

目 次

※动态综述※

半导体激光器辐照损伤效应实验研究进展 王祖军, 宁浩, 薛院院, 等(151)

※光电器件※

一种用于光时域反射仪的 1550 nm 半导体激光器 廖柯, 王昊璇, 熊文涛, 等(159)

基于碳管/石墨烯/GaAs 双异质结自驱动的近红外光电探测器 陶泽军, 霍婷婷, 尹欢, 等(164)

TDI 图像传感器横向抗晕栅极电压与满阱容量关系研究 曲杨, 王欣洋, 周泉, 等(169)

三维压差式光纤矢量水听器设计与实验 张滔, 胡斌杰, 陈超育, 等(173)

结构解耦四质量块微陀螺仪的设计与制备 李敏阳, 张卫平, 谷留涛, 等(177)

低电压驱动 F-P 腔可调谐滤波器的仿真和设计 任浩杰, 侯海港, 朱丽慧, 等(182)

影响谐振式光纤陀螺精细度的因素分析 郭丽君, 王田瑞, 何家杰, 等(187)

基于纺锤型空气腔的光纤马赫-曾德尔折射率传感器 戴洋, 王婷婷, 孙家程, 等(191)

压电谐振器特殊模式振动特性研究 梁天晨, 吴校生, 李志超(195)

一种应用于 CMOS 图像传感器数字双采样 ADC 的 PGA 电路 吴治军, 李毅强, 彭松, 等(200)

基于 MSM 结构的表面等离子体共振光纤折射率传感器 郭志勇, 葛益烟, 沈令闻, 等(205)

※材料、结构及工艺※

蓝光 GaN 基 Micro-LED 芯片制备及激光剥离工艺研究 王仙翅, 潘章旭, 刘久澄, 等(211)

缺陷对极紫外掩模多层结构反射场的扰动研究 李冠楠, 刘立拓, 周维虎, 等(217)

基于压控电流源的铂电阻测温非线性校正设计 许子颖, 董峰, 傅雨田(223)

用于近红外单光子探测器的均温板性能研究 姚友丹, 洪占勇, 罗成刚(227)

凹槽型微通道传热与流动性能的数值分析 范贤光, 黄江尧, 许英杰(232)

基于蛾眼阵列的全向宽光谱减反层优化设计 刘晓光, 汪岳峰(237)

p 型 GaN 上 Pd/NiO/Al/Ni 反射电极欧姆接触的热稳定性研究 左秉鑫, 曾昭烜, 李昕昕, 等(242)

面向毫克级仿昆虫扑翼飞行器的力-力矩传感器 孟冉, 张卫平, 王晨阳, 等(247)

二硫化钼-石墨烯垂直异质结的制备与表征 顾杰, 颜元凯, 万茜(252)

※光电技术及应用※

基于 GPU 的分布式全息孔径数字成像技术研究 黄家应, 杨峰, 朱磊, 等(257)

基于高程和地物光谱约束的多光谱图像预处理算法 方秀秀, 黄旻, 王德志, 等(264)

一种基于宽频光源和 FP 腔滤波的 CO₂ 检测系统 成龙, 丁雷, 张子儒(268)

轻小型推扫视频一体化相机设计与验证 胡永富, 解静, 吴建福, 等(273)

基于 SVM 的疲劳驾驶人脸图像特征检测算法 刘梦佳, 赵建国(278)

基于双层次决策规则的红外与可见光图像融合 王芳莲, 李喜艳(283)

CCD 图像传感器电极间漏电流自动化测试系统设计 郭利, 周建勇, 何达, 等(287)

针对联合变换相关器加密系统的光学唯密文攻击系统 彭凯飞, 沈学举, 黄富瑜(291)

基于 SSD 的实时轻量级无人机检测算法 王若霄, 徐智勇, 张建林(296)

CONTENTS

Research Progresses of Radiation Damage Experiments in Laser Diodes	WANG Zujun, NING Hao, XUE Yuanyuan, et al. (151)
Study on 1 550 nm Semiconductor Lasers Used in OTDR	LIAO Ke, WANG Haoxuan, XIONG Wentao, et al. (159)
Self-powered Near-infrared Photodetector Based on Single-walled Carbon Nanotube/Graphene/GaAs Double Heterojunctions	TAO Zejun, HUO Tingting, YIN Huan, et al. (164)
Relationship between Voltage of Lateral Anti-blooming Gate and Full Well Capacity in TDI Image Sensor	QU Yang, WANG Xinyang, ZHOU Quan, et al. (169)
Design and Experiment of Three-dimensional Gradient Fiber Optic Vector Hydrophone	ZHANG Tao, HU Binjie, CHEN Chaoyu, et al. (173)
Design and Fabrication of Structure-decoupled Quadruple Mass MEMS Gyroscope	LI Minyang, ZHANG Weiping, GU Liutao, et al. (177)
Simulation and Design of Low Voltage Driven F-P Cavity Tunable Filter	REN Haojie, HOU Haigang, ZHU Lihui, et al. (182)
Study on Factors Influencing the Finesse of Resonator Fiber Optic Gyro	GUO Lijun, WANG Tianrui, HE Jiajie, et al. (187)
Optical Fiber Mach-Zehnder Refractive Index Sensor Based on Spindle Air Cavity	DAI Yang, WANG Tingting, SUN Jiacheng, et al. (191)
Research on Special Modal Vibration Characteristics of Piezoelectric Resonators	LIANG Tianchen, WU Xiaosheng, LI Zhichao(195)
A PGA on Digital Double Sampling ADC of CMOS Image Sensor	WU Zhijun, LI Yiqiang, PENG Song, et al. (200)
Surface Plasmon Resonance Fiber Refractive Index Sensor Based on MSM Structure	GUO Zhiyong, GE Yixian, SHEN Lingwen, et al. (205)
Preparation of Blue Light GaN-based Micro-LED Chips and Study on Laser Lift-off Process	WANG Xianchi, PAN Zhangxu, LIU Jiucheng, et al. (211)
Study of Defect Perturbation in Reflective Field of EUV Mask Multilayer	LI Guannan, LIU Lituo, ZHOU Weihu, et al. (217)
Design of Nonlinearity Correction of Platinum Resistance Temperature Sensor Based on Voltage-controlled Current Source	XU Ziyong, DONG Feng, FU Yutian(223)
Study on The Performance of Vapor Chamber for Near Infrared Single Photon Detector	YAO Youdan, HONG Zhanyong, LUO Chenggang(227)
Numerical Analysis on Heat Transfer and Flow Characteristics of Grooved Microchannel	FAN Xianguang, HUANG Jiangyao, XU Yingjie(232)
Optimization and Design of Omnidirectional and Broadband Antireflection Layer Based on Moth-eye Array	LIU Xiaoguang, WANG Yuefeng(237)
Study on Thermal Stability of Ohmic Contact of Pd/NiO/Al/Ni Reflective Electrode on p-GaN	ZUO Bingxin, ZENG Zhaohui, LI Qixin, et al. (242)
Lift-Torque Sensor Applied for Insect-Inspired Flapping-Wing Micro Air Vehicle	MENG Ran, ZHANG Weiping, WANG Chenyang, et al. (247)
Preparation and Characterization of Graphene-Molybdenum Disulfide Vertical Heterojunction	GU Jie, YAN Yuankai, WAN Xi(252)
Research on Distributed Holographic Aperture Digital Imaging Technology Based on GPU	HUANG Jiaying, YANG Feng, ZHU Lei, et al. (257)
Multispectral Image Preprocessing Based on Elevation and Surface Feature Spectrum Constraints	FANG Xiuxiu, HUANG Min, WANG Dezhi, et al. (264)
A CO ₂ Detection System Based on Broadband Light Source and FP Cavity Filtering	CHENG Long, DING Lei, ZHANG Ziru(268)
Design and Verification of Light and Small Push-broom and Video Integrated Camera	HU Yongfu, XIE Jing, WU Jianfu, et al. (273)
Research on Feature Detection Algorithm of Fatigue Driving Face Image Based on SVM	LIU Mengjia, ZHAO Jianguo(278)
Infrared and Visible Image Fusion Based on Two-Level Decision Rules	WANG Fanglian, LI Xiyang(283)
Design of Automated Test System for Leakage Current between Electrodes of CCD Image Sensor	GUO Li, ZHOU Jianyong, HE Da, et al. (287)
Optical Ciphertext-only Attack System for Joint Transform Correlator Encryption System	PENG Kaifei, SHEN Xueju, HUANG Fuyu(291)
Real-time Lightweight UAV Detection Method Based on SSD Algorithm	WANG Ruoxiao, XU Zhiyong, ZHANG Jianlin(296)

半导体激光器辐照损伤效应实验研究进展

王祖军¹, 宁浩², 薛院院¹, 徐瑞², 焦仟丽²,
刘敏波¹, 姚志斌¹, 马武英¹, 盛江坤¹, 董观涛¹

(1. 西北核技术研究院 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 西安 710024;

2. 湘潭大学 材料科学与工程学院, 湖南 湘潭 411105)

摘要: 半导体激光器(LD)工作在空间辐射或核辐射环境中时,会受到辐照损伤的影响而导致器件性能退化。文章回顾了不同时期研制的LD(从早期的GaAs LD到量子阱LD和量子点LD)在辐照效应实验方面的研究进展,梳理了国际上开展不同辐射粒子或射线(质子、中子、电子、伽马射线)诱发LD辐射敏感参数退化的实验规律,分析总结了当前LD辐照效应实验方法研究中亟待解决的关键技术问题,为今后深入开展LD的辐照效应实验方法、退化规律、损伤机理及抗辐射加固技术研究提供理论指导和实验技术支持。

关键词: 半导体激光器; 辐照损伤; 总剂量效应; 位移效应; 阈值电流; 斜率效率

中图分类号: TN386.5; O605 **文章编号:** 1001-5868(2020)02-0151-08

Research Progresses of Radiation Damage Experiments in Laser Diodes

WANG Zujun¹, NING Hao², XUE Yuanyuan¹, XU Rui², JIAO Qianli²,

LIU Minbo¹, YAO Zhibin¹, MA Wuying¹, SHENG Jiangkun¹, DONG Guantao¹

(1. State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, CHN; 2. School of Materials Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, CHN)

Abstract: Laser diodes (LDs) applied in the space or nuclear radiation environments will be susceptible to the radiation damage, which induces the degradation of the LD performances. In this paper, the radiation experiment progresses of the LDs manufactured at different periods such as the GaAs LDs at forpart, the quantum well LDs, and the quantum dot LDs are reviewed. The degradations of the LD radiation parameters induced by different particles or rays such as protons, neutrons, electrons, and gamma rays are briefly introduced. The key problems needing to be further resolved in the future are analyzed. This paper will provide the basis of the theories and experimental techniques for the investigations of radiation experiment methods, degradation, damage mechanisms, and adiation hardening of the LDs.

Key words: laser diode; radiation damage; total ionizing dose effects; displacement effect; threshold current; slope efficiency

0 引言

半导体激光器(LD)具有体积小、重量轻、功耗

低、寿命长、结构简单、可直接调制、响应速度快等优良性能,广泛应用于光纤通信、光信息存储、光学测量、信息处理、传感及自动控制等领域。随着LD在卫星光通信、大型强子对撞机、核工业等强辐射环境中的广泛应用,工作在空间辐射或核辐射环境中的LD会受到辐射损伤的影响而导致性能退化,严重

收稿日期:2019-10-16.

基金项目:国家自然科学基金项目(11875223,11805155);中国科学院战略性先导科技专项项目(XDA15015000);国家重点实验室基金项目(SKLIPR1803,1903Z);抗辐照应用技术创新基金项目(KFZC2018040201).

时甚至出现器件失效。

国外从 20 世纪 60 年代就开始研究 LD 的辐照损伤效应,并通过开展 LD 的中子、质子、电子、伽马射线等辐照实验^[1-9],较系统地研究了不同粒子或射线辐照 LD 诱发性能退化的实验规律、物理机制和损伤模型。国内相关研究开展较晚,仅少数单位零星开展了 LD 的辐照损伤实验和理论研究,目前国内针对 LD 的辐照损伤效应研究主要还停留在辐照实验方案设计、实验规律分析阶段,亟待制定出成熟或标准的辐照实验测试方法和评估规范,实现从辐照效应实验、损伤机理分析、辐照损伤评估到抗辐照加固设计的体系研究。

本文通过回顾不同时期研制的 LD(从早期的 GaAs LD 到量子阱 LD 和量子点 LD)在辐照损伤效应实验方面的研究进展,梳理国际上开展不同辐射粒子或射线(质子、中子、电子、伽马射线等)诱发 LD 辐射敏感参数退化的实验规律,分析总结了目前 LD 辐照损伤效应实验研究中亟待解决的关键技术问题,为深入开展辐照效应实验方法、退化规律、损伤机理及抗辐射加固技术研究提供理论参考和实验技术支持。

1 GaAs LD 辐照效应实验研究进展

自 1962 年美国多个实验室的科学家几乎同时宣布研制出基于 GaAs 的 pn 同质结构注入型 LD(第一代 LD)后,国外的多个研究团队(如美国海军实验室、圣地亚实验室、喷气推进实验室等)从 1963 年就开始了 LD 辐照效应研究。早期的 LD 辐照效应研究以 GaAs LD 为主,通过开展 GaAs LD 中子、质子、电子、伽马射线辐照实验,得到了不同辐射粒子或射线辐照 GaAs LD 诱发性能退化的实验规律,初步分析了辐照损伤物理机制,发现工作在强辐射环境中的 LD 会受到辐射损伤的影响,而使器件出现性能退化甚至功能失效。

1963 年, Petree 开展了 GaAs LD 中子辐照损伤效应实验研究^[1]。辐照实验在 Harry Diamond 实验室的 Triga Mark F 脉冲反应堆上进行,辐照样品为 10 只德州仪器研制的 GaAs LD。中子辐照注量最高达到 3×10^{14} n/cm², 能量大于 10 keV。辐照过程中不加偏置电压。实验结果表明:当中子注量大于 1×10^{12} n/cm² 时,中子辐照诱发 GaAs LD 光功率输出开始退化,随着中子辐照注量增大,光功率输出退化显著;然而, GaAs LD 的 C-V 特性不受中

子辐照影响。

1964 年, Millea 等开展了 GaAs LD 电子辐照损伤效应实验研究^[2]。电子辐照注量累积到 3.2×10^{15} e/cm², 能量为 2 MeV。实验结果表明, GaAs LD 的电流和 emission band 强度在电子辐照后随偏置电压增大而减小。

1965 年, Saji 等开展了 GaAs LD ⁶⁰Co 伽马射线辐照损伤效应及退火研究^[3]。实验结果表明,伽马辐照诱发 GaAs LD 的量子效率减小,峰值波长随辐照注量增大向短波方向漂移,阈值电流随辐照总剂量增大而增大。辐照后,在 200 °C 下退火 20 min 后,量子效率和阈值电流有明显恢复,但未达到辐照前的状态;峰值波长在退火过程中不仅没有恢复反而出现向短波方向漂移加剧的现象。伽马辐照诱发 GaAs LD 阈值电流增大主要源于辐射诱发缺陷导致间接复合中心增多。

1967 年, Compton 等开展了 GaAs LD 辐照损伤实验后的退火规律研究^[4]。电子辐照注量累积到 1×10^{15} e/cm², 能量为 0.5~1.2 MeV。实验结果表明,电致发光效率随电子辐照注量增大而减小。电子辐照诱发电致发光效率减小是辐照导致阈值电流增大的主要因素。辐照后,在温度为 100 °C 热退火 15 min, 光功率输出没有变化,但当加正向电流室温退火后,光功率输出有明显的恢复。

1970 年, Barnes 等开展了室温下 GaAs LD ⁶⁰Co 伽马射线辐照损伤效应实验及退火研究^[5]。实验结果表明,伽马射线辐照诱发发光效率的退化源于半导体激光器 p 型区的电子寿命减小。退火测试结果表明,通过加正向电流退火能使伽马射线辐照诱发半导体性能退化得到较好的恢复, Barnes 等人还分析了加正向电流退火的物理机制,并建立了相应的理论模型。

1971 年, Barnes 等人开展了 GaAs LD 的中子辐照损伤效应实验^[6], 研究分别在室温(300 K)和 76 K 下, GaAs LD 工作在低于阈值电流条件下中子辐照对辐射电流、非辐射电流、阈值电流的影响。实验结果表明,在室温下当 LD 电流低于阈值电流时, LD 的电流主要由空间电荷层的载流子复合产生,而辐射电流由少数载流子在 p 型区的热注入产生,中子辐照对上述电流没有明显的影响。然而,中子辐照通过引入非辐射复合中心减小了空间电荷区和中性区的载流子寿命,进而导致光强减小、总电流增大。在温度为 76 K 时, LD 的性能受中子辐照影响

程度小于其在温度为 300 K 时受到的影响。

1972年, Barnes 等人上述工作的基础上开展了 GaAs LD 在大于或等于阈值电流情况下的中子辐照损伤效应实验研究^[7]。实验结果表明, 温度为 300 K 时, 当 LD 工作电流大于阈值电流, 且中子注量为 $8.32 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2$ 时, 辐照后的阈值电流增加了 71%; 当 LD 工作电流密度为 $1.1 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ 时, 辐照后的光强降低了 13%。温度为 76 K 时, 当 LD 工作电流大于阈值电流, 且中子注量为 $1.7 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$ 时, 辐照后的阈值电流增加了 86%; 当 LD 工作电流密度为 $6.0 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 时, 辐照后的光强增加了 70%。

1973年, Schroeder 等人开展了 GaAs LD 的快中子辐照损伤效应实验研究^[8]。实验结果表明, 温度为 300 K 时, 中子辐照诱发 GaAs LD 光输出脉冲的延迟时间增大; 中子辐照注量在 $9.25 \times 10^{12} \sim 1.15 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$ 范围内, 延迟时间增大程度随中子辐照注量增大而增大。温度为 77 K 时, GaAs LD 光输出脉冲启动的延迟时间未受到中子辐照影响。

1976年, Minden 开展了单异质结 GaAs LD 的质子辐照损伤效应实验研究^[9]。质子辐照注量累积到 $1.6 \times 10^{14} \text{ p/cm}^2$, 能量为 2 MeV。实验结果表明: 质子辐照后阈值电流增加了 3 倍, 进行 400 °C 以上的高温退火后, 阈值电流有一定程度的减小, 但并没有恢复到辐照前的状态。

国外早期开展的辐照实验研究为工作在空间辐射和核辐射环境下的 GaAs LD 辐射敏感参数退化规律、损伤物理机制、理论建模研究提供了实验依据, 为开展 LD 的辐照效应实验方法研究奠定了实验基础。由于受到 GaAs LD 工作条件(如低温工作条件)及器件工艺水平的限制, 辐照诱发 GaAs LD 辐射敏感参数退化程度差异较大, 但从中子、质子、电子和伽马射线辐照实验结果分析可以看到, 早期的 GaAs LD 对辐射损伤比较敏感, 在辐射环境下应用的 GaAs LD 需要考虑辐照损伤。国内在该时期尚未见关于 LD 辐照损伤效应实验研究的报道。

2 量子阱 LD 辐照效应实验研究进展

量子阱 LD 诞生于 20 世纪 80 年代, 因其具有较低的阈值电流和较高的微分增益, 应用领域不断拓展。随着量子阱 LD 的广泛应用, 国内外均有关于量子阱 LD 的辐照效应实验研究见诸报道。

1989年, Carson 等人开展了高功率量子阱

GaAs LD 的中子辐照损伤效应实验研究^[10]。辐照样品为以 n 型 GaAs 为衬底、量子阱活性区在两层 GaAlAs 中间的 broad-area LD。中子辐照注量范围为 $9.9 \times 10^{12} \sim 1.2 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2$, 能量为等效 1 MeV 中子。实验结果表明: 当中子注量在 $1 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2$ 量级时, 阈值电流变化小于 2%; 在 $1 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$ 量级时, 阈值电流增加近 35%, 斜率效率下降 7%; 在 $1 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2$ 量级时, 阈值电流增加 150%, 斜率效率下降 75%; 输出波长、近场图、二极管电压等参数在辐照前后没有变化。

1990年, Frueholz 等人开展了用于卫星铷和铯标准原子钟的 AlGaAs LD 的中子辐照损伤效应研究^[11]。辐照样品为 6 只三菱 TJS ML3101 型 LD。实验在圣地亚脉冲反应堆 (SPR III) 上进行, 中子辐照注量为 $2 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2$, 能量大于 1 MeV。实验结果表明, 2 只阈值电流接近 15 mA 的 LD 在辐照后性能基本无变化, 而其余 4 只阈值电流接近 35 mA 的 LD 在辐照后性能退化显著。

1993年, Evans 等人开展了应变量子阱 LD 的质子辐照效应研究^[12]。辐照样品为 InGaAs/GaAs 应变量子阱 LD, 工作波长为 980 nm。质子辐照注量最高达 $3.0 \times 10^{13} \text{ p/cm}^2$, 能量为 4.5 MeV。实验结果表明, 质子辐照后, 当 LD 工作温度为 293 K 时, 其阈值电流随质子辐照注量增大而增大, 而斜率效率没有变化; 光功率随质子辐照注量增大而减小。

1996年, Baggio 等人开展了高功率 AlGaInP 双异质结 LD 瞬态电离辐照效应研究^[13]。辐照样品为菲利普公司 CQL800/D 型 FB 高功率 AlGaInP 双异质结 LD。辐照剂量率范围为 $5 \times 10^9 \sim 2 \times 10^{12} \text{ rad(Si)/s}$ 。实验结果显示, 当辐照偏置电流小于阈值电流且剂量率较低(如 $1 \times 10^{10} \text{ rad(Si)/s}$) 时, 器件输出光功率明显增加; 当辐照偏置电流高于阈值电流且剂量率为 $3 \times 10^{11} \text{ rad(Si)/s}$ 时, 光功率明显减小, 当辐照剂量率为 $2 \times 10^{12} \text{ rad(Si)/s}$ 时, 光功率退化到辐照前的 17% 左右。

1997年, Zhao 等人开展了多量子阱 LD 质子辐照效应研究^[14]。辐照样品采用 Mitsubishi 公司的 ML40123R 型 GaAs/GaAlAs 多量子阱 LD, 工作波长为 780 nm, 其外延层采用金属有机化学气相沉积 (MOCVD) 法生长。质子辐照注量范围为 $1 \times 10^{12} \sim 1 \times 10^{14} \text{ p/cm}^2$, 注量率范围为 $4 \times 10^8 \sim 1.5 \times 10^{10} \text{ p/(cm}^2 \cdot \text{s)}$, 能量为 192.5 MeV。实验结果显示, 质子辐照后, LD 的阈值电流随质子辐照注量增大

而线性增大,且高温下的阈值电流增大程度比低温大,管脚短接辐照后的阈值电流比加偏置电压时大。光功率输出随质子辐照注量增大而减小,在质子辐照注量为 1×10^{13} p/cm² 时,光功率退化程度小于 5%。斜率效率在质子辐照注量较小时(小于 1×10^{13} p/cm²)随注量增大而缓慢增大,当质子辐照注量较大时,随注量增大而缓慢减小,在整个实验过程中斜率效率的变化不超过 6%。

1998年,Taylor等人开展了 AlGaAs 垂直腔面发射激光器(VCSEL)的质子辐照效应研究^[15]。辐照样品采用由 10 nm AlGaAs 势垒层和 3 个 7 nm 量子阱组成的 VCSEL,其在真空中的工作波长为 850 nm。质子辐照注量为 4.9×10^{13} p/cm²,能量为 4.5 MeV。实验结果显示,质子辐照后,LD 的峰值输出光功率减少 14.4%,电压增加 3.1%,阈值电流增加 80%。

2001年,Johnston等人开展了 LD 的质子位移辐照损伤效应研究^[16]。辐照样品为 InGaAsP 量子阱 LD,工作波长为 1300 nm。质子辐照注量范围为 $1 \times 10^{12} \sim 3 \times 10^{13}$ p/cm²,能量为 50 MeV。实验结果显示,LD 的阈值电流随质子辐照注量增大而线性增大,斜率效率在质子辐照前后没有变化。

2004年,Johnston等人开展了辐照诱发 LD 性能退化的损伤物理机制研究^[17]。辐照样品为不同材料(AlGaInP、AlGaAs、InGaAs 和 InGaAsP)、不同波长(660~1550 nm)的 LD 器件。质子辐照注量范围为 $2 \times 10^{12} \sim 6 \times 10^{13}$ p/cm²,能量为 51 MeV。实验结果显示,LD 的阈值电流均随质子辐照注量增大而增大,但不同类型的 LD 并不都呈线性增大。在质子辐照注量高于 1×10^{13} p/cm² 时,斜率效率变化较明显。光功率在质子辐照前后变化很小。

2006年,Durand等人开展了高功率 LD 质子辐照效应研究^[18]。辐照样品采用金属有机化学气相沉淀(MOCVD)生长重掺杂 GaAs 晶圆及 AlGaAs/GaAs/AlGaAs 结构的 LD。质子辐照注量最高达 2.1×10^{10} p/cm²,能量为 60 MeV。实验结果表明,质子辐照后,该 LD 的光电特性没有发生变化。

2007年,Boutilier等人开展了 GaInAsP 量子阱 LD(852 nm)的电子辐照效应研究^[19]。辐照样品采用金属有机气相外延(MOVPE)生长的 n 型 GaAs 衬底及 GaInAsP 量子阱的无铝 LD。电子辐照注量分别为 1×10^{14} , 1×10^{15} 和 1×10^{16} e/cm²,能量为 1 MeV。结果显示,电子辐照后,阈值电流

随电子辐照注量增大而增大,退火后有一定程度恢复;斜率效率没有变化;*I-V* 特性曲线变化不明显。

2008年,Boutilier等人开展了 InAs/InP 量子阱 LD(1550 nm)的质子辐照效应研究^[20]。辐照样品采用分子束外延(MBE)生长 Si 掺杂/InP 衬底及 GaInAsP 量子阱的 LD。质子辐照注量分别为 8×10^9 , 6×10^{10} 和 5×10^{12} p/cm²,能量为 31 MeV。实验结果表明,质子辐照后,饱和电流随质子辐照注量增大而增大,其增大机理为质子辐照诱发的非辐射复合中心导致载流子寿命减小;斜率效率没有变化,增益和光功率也没有变化。

2009年,Boutilier等人开展了 GaInAsP 单量子阱 LD(852 nm)的质子和电子辐照损伤效应实验,以及对载流子寿命影响的测量方法研究^[21]。辐照样品采用金属有机气相外延(MOVPE)生长的 n 型 GaAs 衬底及单异质结(Separate Confinement Heterostructure, SCH) GaInAsP 量子阱。电子辐照注量分别为 1×10^{14} , 1×10^{15} 和 1×10^{16} e/cm²,能量为 1 MeV;质子辐照注量为 5×10^{12} p/cm²,能量为 31 MeV。实验结果表明,质子和电子辐照诱发 LD 性能退化与量子阱中的非辐射载流子寿命减小直接相关。通过理论计算、实验测试及阈值电流变化可测量非辐射载流子寿命。

2011年,Troska开展了多模(Multimode) VCSEL LD、边缘发射(Edge-Emitting) LD、量子点 LD 的中子和 π 粒子辐照效应研究^[22]。中子辐照注量最高达到 5.2×10^{15} n/cm²,能量为 20 MeV; π 粒子辐照注量为 1×10^{15} particles/cm²,能量为 191 MeV。实验结果表明,三种 LD 的阈值电流均随中子辐照注量增大而增大,退火后有一定程度的恢复,斜率效率均随中子辐照注量增大而减小。 π 粒子辐照诱发 LD 性能退化的相对损伤因子比中子辐照高 2~3 倍。

与国外开展的量子阱 LD 的辐照效应实验研究相比,国内在相关方面开展的研究相对较少,起步也较晚。2000年,林理彬等人开展了电子和质子辐照在 AlGaAs/GaAs 量子阱材料诱发的深能级缺陷的实验测试研究^[23]。辐照样品为采用传统 MBE 方法在 GaAs 衬底上生长的 AlGaAs/GaAs 量子阱材料。电子辐照在静电加速器上开展,电子辐照注量范围为 $1 \times 10^{13} \sim 1 \times 10^{16}$ e/cm²,能量为 0.4~1.8 MeV 电子。质子辐照在高压倍加器上开展,质子辐照注量范围为 $1 \times 10^{11} \sim 1 \times 10^{14}$ p/cm²,能量

为 20~130 MeV。实验测试结果表明,电子辐照诱发产生的缺陷为 $E_e = E_0 - 0.22$ eV;质子辐照诱发产生的缺陷为 $E_p = E_0 - 0.67$ eV。

2001年,林理彬等人开展了 InGaAsP LD 的电子辐照实验研究^[24]。辐照样品为基于 n 型 InP 衬底的 1.3 μm InGaAsP LD。电子辐照在静电加速器上开展,电子辐照注量范围为 $1 \times 10^{12} \sim 2 \times 10^{16}$ e/cm²,能量为 0.4~1.8 MeV 电子。实验结果表明,当电子辐照注量小于 1×10^{15} e/cm² 时,对 LD 的性能退化不显著;当电子辐照注量大于 1×10^{15} e/cm² 时,输出功率出现急剧下降。

2009年,黄绍艳等人开展了 InGaAsP/InP 多量子阱 LD 及其组件的辐照效应实验研究^[25]。辐照实验在⁶⁰Co 伽马射线源上开展,辐照样品为 InGaAsP 材料系的多量子阱 LD,包括法布里珀罗 (FP)腔 LD 和分布反馈式 (DFB)LD,并分别具有尾纤、光窗和裸管 3 种输出结构形式,光输出波长包括 1310 和 1550 nm 两种。伽马辐照总剂量最高达 5.5×10^4 Gy(Si),剂量率约为 0.5 Gy(Si)/s,能量为 1.17 和 1.33 MeV。辐照偏置条件分别为加偏置电流、短路和开路 3 种状态。实验结果表明,多量子阱 LD 抗伽马射线辐照能力很强;而带光窗输出和尾纤输出的多量子阱 LD 由于组件中包含光窗、耦合透镜及小段光纤,这些附属光学元件会因伽马射线辐照而导致光透过率下降以及传输损耗增大,从而造成 LD 输出光功率随辐照总剂量增大而下降。此外,还开展了能量分别为 2,5 和 8 MeV 的质子辐照实验。在质子辐照注量为 $1 \times 10^{12} \sim 1 \times 10^{13}$ p/cm² 时,随辐照注量增大,LD 的阈值电流逐渐增大,光功率逐渐减小。图 1 给出了 8 MeV 质子辐照后,光功率 P 随质子辐照注量增大而减小的变化关系曲线。

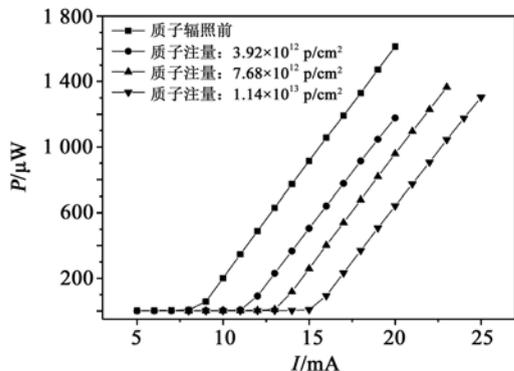


图 1 8 MeV 质子辐照后,光功率随质子辐照注量的变化关系曲线

2010年,常国龙等人开展了量子阱 LD 的伽马辐照效应实验研究^[26]。辐照实验在⁶⁰Co 伽马射线源上开展,辐照样品为 InGaAsP 材料系的多量子阱 LD,光输出波长为 1550 nm。伽马辐照总剂量最高达 8×10^3 Gy(Si),剂量率分别为 0.5 和 1.0 Gy(Si)/s,能量为 1.17 和 1.33 MeV。辐照偏置条件为加偏置电流状态。实验结果表明:LD 的阈值电流随总剂量增大而线性增大,阈值电流损伤系数 $K_1 = 5.6 \times 10^{-5}$ mA/Gy(Si);光功率随总剂量增大而减小(注入电流为 22 mA)。

2012年,马晶等人开展了 InGaAs/InGaAsP 量子阱 LD 的电子辐照效应实验研究^[27]。辐照实验在直线电子加速器上开展,辐照样品为基于 n 型 InP 衬底、无应变的 InGaAsP 光学限制层、量子阱有源区的 InGaAs/InGaAsP 量子阱 LD,光输出波长为 1550 nm。电子辐照注量范围为 $5 \times 10^{13} \sim 1 \times 10^{16}$ e/cm²,能量为 1 MeV。实验测试结果表明,LD 的相对阈值电流变化随电子辐照注量增大而近似线性增大;相对输出功率变化随电子辐照注量增大而近似线性下降。

2015年,高欣等人开展了 GaAsP/InP 多量子阱 LD 的电子和伽马射线辐照效应实验研究^[28]。辐照样品为 DFB 结构的 GaAsP/InP 多量子阱 LD,光输出波长为 1550 nm。电子辐照在直线加速器上开展,其注量范围为 $1 \times 10^{13} \sim 1 \times 10^{16}$ e/cm²,注量率分别为 1×10^{13} 和 1×10^{15} e/(cm²·s),能量分别为 1 和 2 MeV。总剂量辐照实验在⁶⁰Co 伽马射线源上开展,总剂量范围为 $2 \times 10^6 \sim 5 \times 10^7$ rad(Si),剂量率约为 0.5 rad(Si)/s。实验测试结果表明,当伽马射线总剂量为 5×10^7 rad(Si)时,LD 的阈值电流变化不明显,斜率效率有约 11% 的退化;LD 在电子辐照后阈值电流显著增大,光功率输出和斜率效率明显减小。

2018年以来,王祖军等人较系统地开展了 FP 和 DFB 多量子阱 LD 低剂量率下的总剂量效应、高能质子、散裂源中子、反应堆中子位移效应辐照实验,得到不同辐射粒子或射线辐照多量子阱 LD 诱发敏感参数退化的实验规律,图 2 给出了多量子阱 LD 的 I - V 特性曲线随总剂量增大的变化曲线,图 3 给出了多量子阱 LD 的光功率在中子辐照前后的变化曲线。上述研究为建立 LD 辐照损伤效应实验方法提供了实验技术支持。

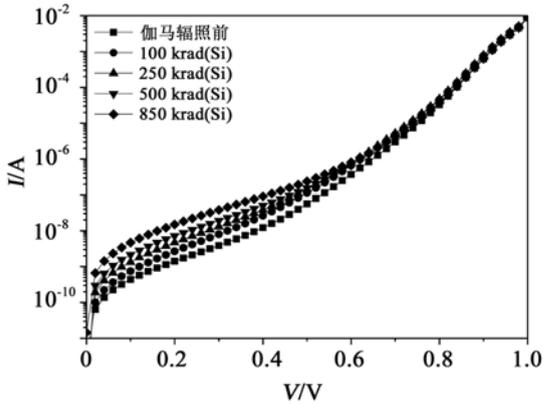


图2 不同总剂量下多量子阱 LD 的 I - V 特性曲线

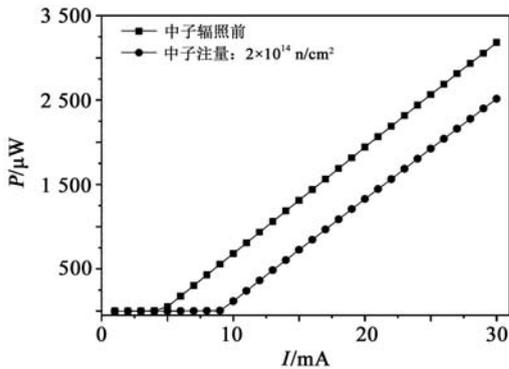


图3 多量子阱 LD 的光功率在中子辐照前后的变化曲线

3 量子点 LD 辐照效应实验研究进展

量子点是由少量原子组成且三个维度的尺寸都小于 100 nm 的原子团簇,具有类似单原子的不连续的能带特性^[29]。与量子阱 LD 相比,量子点 LD 由于量子点材料中载流子在三个运动方向上受到限制,载流子态密度与能量关系为 δ 函数,因而具有更低的阈值电流密度和更高的特征温度、发光效率、调制带宽等优良性能,在卫星光通信系统中具有较好的应用前景^[30]。1982 年,Arakawa 等在研究多量子阱 LD 的阈值电流对温度的依赖性时,提出了三维量子点的概念,并通过理论计算得出三维量子点结构的阈值电流几乎不随温度 ($-50 \sim 50$ °C) 变化^[31]。1994 年,Hirayama 等相继报道了量子点 LD 研制成功^[32]。与量子阱 LD 相比,对量子点 LD 的辐照效应实验研究较少,起步也较晚。

2000 年,Piva 等人开展了自组装量子点 LD P^{4+} 离子辐照实验研究^[33]。辐照实验在 Tandem 加速器上开展,辐照样品种为 InAs/GaAs 量子点 LD。 P^{4+} 离子辐照注量范围为 $1 \times 10^8 \sim 1 \times 10^{11}$ ions/cm²,能量为 8.56 MeV。实验结果表明,量子点 LD

和量子阱 LD 的光致发光均随离子辐照注量增大而减小,量子阱 LD 的 PL 退化程度比量子点 LD 的 PL 的退化程度约高 1~2 个数量级。量子点 LD 的抗辐射能力相对强于量子阱 LD,源于其电子和空穴等载流子受量子点活性区的约束及高效收集,从而限制了载流子向非辐射复合中心转移。

2002 年,Leon 等人开展了自组装 III-V 族量子点 LD 质子辐照实验研究^[34]。辐照实验在 Van De Graff 加速器上开展,辐照样品种为 InGaAs/GaAs 量子点 LD。质子辐照注量范围为 $1.3 \times 10^{11} \sim 3.5 \times 10^{13}$ p/cm²,注量率约为 6×10^{12} p/(cm²·s),能量为 1.5 MeV。实验结果表明,当质子辐照注量为 3.5×10^{13} p/cm² 时,量子点 LD 的荧光强度相当于辐照前的 50% 以上,而量子阱 LD 的荧光强度仅相当于辐照前的 1/30 左右;量子点 LD 的载流子寿命受质子位移损伤的影响较小。与量子阱 LD 相比,量子点 LD 表现出较强的抗质子辐射性能。

2008 年,Mares 等人开展了 InAs/InGaAs 量子点 LD 伽马射线辐照实验研究^[35]。辐照实验在 ⁶⁰Co 伽马射线源上开展,辐照样品种为 InAs/InGaAs 量子点 LD。伽马辐照总剂量最高达 1.6 MGy(Si),剂量率约为 400 Gy(Si)/hr,能量为 1.17 和 1.22 MeV。实验结果表明,阈值电流随总剂量增大而增大,斜率效率和光功率输出则随辐照总剂量增大而减小;不加驱动辐照后的阈值电流、斜率效率和光功率输出的退化程度比加驱动辐照后的退化程度更严重。

2015 年,Fauzi 等人开展了 InAs/GaAs 量子点 LD 热中子辐照实验研究^[36]。辐照实验在 PUSPATI TRIGA 反应堆上开展,辐照样品种为通过 MBE 生长的 Si 掺杂 GaAs 衬底,InAs 量子点为通过 SK 方式生长的 InAs/GaAs 量子点 LD。热中子辐照注量范围分别为 3×10^{13} , 6×10^{13} 和 9×10^{13} n/cm²,注量率约为 1×10^{12} n/(cm²·s)。实验结果表明,加反向电压或正向电压后的漏电流均随中子辐照注量增大而增大,加反向电压后的漏电流比辐照前增大两个数量级,加正向电压后的漏电流比辐照前增大一个数量级。漏电流增大源于中子位移辐照损伤诱发的缺陷影响了载流子的非辐射复合。

国内在量子点 LD 辐照效应实验研究方面与国外相比开展的相对较少,起步也较晚。国内仅少数单位零星开展了量子点 LD 的中子、质子、电子和伽马射线的辐照实验研究。

2012 年,车驰等人开展了 InAs/GaAs 量子点

LD反应堆中子辐照实验研究^[30]。辐照实验在反应堆中子源上开展,辐照样品为 InAs/GaAs 量子点 LD,中子辐照注量为 5×10^{13} n/cm²。实验结果表明,中子辐照后量子点 LD 输出功率减小,阈值电流增大;通过对实验结果进行理论分析认为,中子辐照量子点 LD 诱发性能退化主要源于中子位移损伤诱发的缺陷,这些缺陷充当非辐射复合中心导致非辐射复合概率增大。

2013年,杨瑞等人开展了 InAs/GaAs 量子点伽马射线辐照实验研究^[30]。辐照实验在⁶⁰Co 伽马射线源上开展,辐照样品为 AOI 公司生产的 InAs/GaAs 量子点 LD。伽马辐照总剂量范围为 $5 \times 10^3 \sim 1 \times 10^5$ rad(Si),剂量率约为 100 rad(Si)/min,能量约为 1.0 MeV。实验结果表明,阈值电流随总剂量增大而增大,光功率和斜率效率随总剂量增大而减小;当总剂量为 1×10^5 rad(Si)时,加偏置辐照的量子点 LD 功能失效,而未加偏置辐照的量子点 LD 性能退化,但未出现功能失效。

2019年,王俊等人开展了 InAs/GaAs 单层量子点 LD 电子和质子辐照实验研究^[37]。辐照实验在双速加速器上开展,辐照样品为在 n 型 GaAs 衬底上生长缓冲层,再在缓冲层上通过 S-K 机理生长量子点层而制备的 InAs/GaAs 量子点 LD。电子辐照注量范围为 $1 \times 10^{14} \sim 2 \times 10^{15}$ e/cm²,能量分别为 1.0 和 2.0 MeV。质子辐照注量范围为 $1 \times 10^{11} \sim 2 \times 10^{12}$ p/cm²,能量分别为 1.0 和 2 MeV。实验结果表明,量子点 LD 在相同驱动电流下的电压均随辐照注量增加呈上升趋势;量子点 LD 阈值电流随辐照注量增大而增大,光功率和斜率效率则随辐照注量增大而减小;当电子和质子的辐射等效总剂量分别超过 1×10^7 和 8×10^5 rad(Si)之后,阈值电流增加和斜率效率下降趋势均变缓。

4 研究展望

当前,随着 LD 研发理论和制备工艺技术的飞速发展,LD 的转换效率、寿命、可靠性显著提升,且能直接调制易集成,使得各种性能先进的新型 LD 不断涌现,为评估 LD 在极端辐射环境下的可靠性,需要开展 LD 的辐照损伤效应考核实验。然而,目前国内外还没有建立专门针对 LD 辐照效应考核的实验方法,没有明确辐照最劣偏置条件、辐照剂量(注量)、辐照剂量率(注量率)、能量、粒子种类及失效判据等。本文通过回顾不同时期研制的 LD 在辐

照效应实验方面的研究进展,梳理国内外开展不同辐射粒子或射线(质子、中子、电子、伽马射线)诱发 LD 辐射敏感参数退化的实验规律,为今后课题组系统深入开展 LD 的辐照效应实验方法、退化规律、损伤机理及抗辐射加固技术研究提供了理论指导和实验技术支持。

参考文献:

- [1] Petree M C. Degradation of luminescence in neutron-irradiated GaAs diodes[J]. Appl. Phys. Lett., 1963, 3(4): 67.
- [2] Millea M F, Aukerman L W. The role of diffusion current in the electroluminescence of GaAs diodes [J]. Appl. Phys. Lett., 1964, 5(8): 168-169.
- [3] Saji M, Inuishi Y. Radiation damage and annealing of GaAs laser diode[J]. Jap. J. of Appl. Phys., 1965, 4(10): 830-831.
- [4] Compton D M J, Cesena R A. Mechanisms of radiation effects on lasers[J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 1967, 14(6): 55-61.
- [5] Barnes C E. Effects of ⁶⁰Co gamma irradiation on epitaxial GaAs laser diodes[J]. Phys. Rev. B, 1970, 1(12): 4735-4747.
- [6] Barnes C E. Neutron damage in epitaxial GaAs laser diodes [J]. J. of Appl. Phys., 1971, 42(5): 1941-1949.
- [7] Barnes C E. Neutron damage in GaAs laser diodes; at and above laser threshold[J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 1972, 19(6): 382-385.
- [8] Schroeder J O, Noel B W. Neutron irradiation effects on diffused GaAs laser diodes [J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 1973, 20(6): 261-265.
- [9] Minden H T. Effects of proton bombardment on the properties of GaAs laser diodes[J]. J. of Appl. Phys., 1976, 47(3): 1090-1094.
- [10] Carson R F, Chow W W. Neutron effects in high-power GaAs laser diodes [J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 1989, 36(6): 2076-2082.
- [11] Frueholz F P, Camparo J C, Delcamp S B, et al. Effects of neutron fluence on the operating characteristics of diode lasers used in atomic frequency standards [J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 1990, 37(6): 39-43.
- [12] Evans B D, Hager H E, Hughlock B W. 5.5 MeV proton irradiation of a strained quantum-well laser diode and a multiple quantum-well broad-band LED [J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 1993, 40(6): 1645-1654.
- [13] Baggio J, Brisset C, Sommer J L, et al. Electrical and optical response of a laser diode to transient ionizing radiation [J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 1996, 43(3): 1038-1043.
- [14] Zhao Y F, Patwary A R. 200 MeV proton damage effects on multi-quantum well laser diodes [J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 1997, 44(6): 1898-1904.

- [15] Taylor E W, Paxton A H, Schone H, et al. In vacuo responses of an AlGaAs vertical cavity surface emitting laser irradiated by 4.5 MeV protons[J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 1998, 45(3): 1514-1517.
- [16] Johnston A H. Proton displacement damage in light-emitting and laser diodes[J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 2001, 48(5): 1713-1720.
- [17] Johnston A H, Miyahira T F. Radiation degradation mechanisms in laser diodes[J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 2004, 51(6): 3564-3571.
- [18] Durand Y, Culoma A, Meynart R, et al. Performance of high-power laser diode arrays for spaceborne lasers [J]. Appl. Opt., 2006, 45(22): 5752-5757.
- [19] Boutillier M, Gauthier-Lafaye O, Bonnefont S, et al. Electron irradiation effects on Al-free laser diodes emitting at 852 nm[J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 2007, 54(4): 1110-1114.
- [20] Boutillier M, Gauthier-Lafaye O, Bonnefont S, et al. First evaluation of proton irradiation effects on InAs/InP quantum dash laser diodes emitting at 1.55 μm [J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 2008, 55(4): 2243-2247.
- [21] Boutillier M, Gauthier-Lafaye O, Bonnefont S, et al. Measurement of irradiation impact on carrier lifetime in a quantum well laser diode [J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 2009, 56(4): 2155-2159.
- [22] Troska J, Detraz S, Nasr-Storey S S E, et al. Radiation damage studies of laser and photodiodes for use in multi-Gb/s optical data links [J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 2011, 58(6): 3103-3110.
- [23] 林理彬, 黄万霞, 孔梅影. 粒子束辐照在 AlGaAs/GaAs 量子阱材料中引入的深能级缺陷[J]. 人工晶体学报, 2000, 29(5): 248.
- Lin Libin, Huang Wanxia, Kong Meiyang. Deep energy defect in AlGaAs/GaAs quantum well material introduced by particle beam irradiation[J]. J. of Synthetic Crystals, 2000, 29(5): 248.
- [24] 林理彬, 廖志君, 祖小涛, 等. 1.3 μm InGaAsP 半导体激光器的电子辐照效应[J]. 中国激光, 2001, 28(6): 497-500.
- Lin Libin, Liao Zhijun, Zu Xiaotiao, et al. Effect of electron radiation in 1.3 μm InGaAsP semiconductor laser [J]. J. of Chinese Laser, 2001, 28(6): 497-500.
- [25] 黄绍艳, 刘敏波, 唐本奇, 等. 多量子阱激光二极管质子辐照效应及其退化特性[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(9): 1405-1410.
- Huang Shaoyan, Liu Minbo, Tang Benqi, et al. Proton irradiation effects on multi-quantum-well laser diodes and their annealing characteristics [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(9): 1405-1410.
- [26] 常国龙. 半导体激光器辐照效应及影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- Chang Guolong. The study of the influence of radiation effect on laser diodes [D]. Harbin: Harbin Institute of Technol., 2010.
- [27] 马晶, 车驰, 韩琦琦, 等. 位移辐照效应对量子阱激光器性能的影响[J]. 物理学报, 2009, 21(9): 1405-1410.
- Ma Jing, Che Chi, Han Qiqi, et al. Displacement damage effect on the characteristics of quantum well laser [J]. Acta Phys. Sin., 2009, 21(9): 1405-1410.
- [28] Xin G, Shengsheng Y. Radiation damage characterization of InGaAsP laser diodes for space laser communication [J]. Nuclear Phys. Rev., 2015, 32(2): 249-253.
- [29] 马传贺. 量子点激光器 $I-V$ 特性和光谱研究[D]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2011.
- Ma Chuanhe. Research on $I-V$ characteristics and optical spectrum of quantum dot lasers [D]. Qufu: Qufu Normal University, 2011.
- [30] 车驰, 柳青峰, 马晶, 等. 位移效应对量子点激光器的性能影响[J]. 物理学报, 2013, 62(9): 1-6.
- Che Chi, Liu Qingfeng, Ma Jing, et al. Displacement damage effects on the characteristics of quantum dots lasers [J]. Acta Phys. Sin. 2013, 62(9): 1-6.
- [31] Arakawa Y, Sakaki H. Multidimensional quantum well laser and temperature dependence of its threshold current [J]. Appl. Phys. Lett., 1982, 40(11): 939-941.
- [32] Hirayama H. Lasing action of $\text{Ga}_{0.67}\text{In}_{0.33}\text{As}/\text{GaInAsP}/\text{InP}$ tensile strained quantum box laser [J]. Electron Lett., 1994, 30: 142-144.
- [33] Piva P G, Goldberg R D, Mitchell I V, et al. Enhanced degradation resistance of quantum dot lasers to radiation damage [J]. Appl. Phys. Lett., 2000, 77(5): 624-626.
- [34] Leon R, Marcinkevicius S, Siegert J, et al. Effects of proton irradiation on luminescence emission and carrier dynamics of self-assembled quantum dots [J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 2002, 49(6): 2844-2851.
- [35] Mares J W, Harben J, Thompson A V, et al. Gamma radiation induced degradation of operating quantum dot lasers [J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 2008, 55(2): 763-768.
- [36] Fauzi D A, Md Rashid N K A, Mohamed Zin M R, et al. Neutron radiation effects on the electrical characteristics of InAs/GaAs quantum dot-in-a-well structure [J]. IEEE Trans. on Nuclear Science, 2015, 62(6): 3324-3329.
- [37] 王俊, 高欣, 冯展祖, 等. 空间光通信量子点激光器辐射损伤效应研究[J]. 真空与低温, 2019, 25(1): 41-45.
- Wang Jun, Gao Xin, Feng Zhanzu, et al. Radiation damage effect of quantum dot laser with space optical communication [J]. Vacuum and Cryogenics, 2019, 25(1): 41-45.

作者简介:

王祖军(1979—),男,湖北汉川人,博士,研究员,从事光电器件的辐射效应及抗辐射加固研究。

E-mail: wangzujun@nint.ac.cn

一种用于光时域反射仪的1550 nm 半导体激光器

廖柯, 王昊璇, 熊文涛, 陈健, 周勇, 田坤

(重庆光电技术研究所, 重庆 400060)

摘要: 光时域反射仪(OTDR)是通信链路中光纤特性测试的专用仪器,半导体激光器是OTDR的关键元器件,激光器的性能直接影响OTDR的测试距离、测试精度等。为适应OTDR的应用需求,提出并研制了一种非对称分别限制(SCH)激光器,SCH结构可有效提高激光器的输出功率和斜率效率。同时,采用应变多量子阱结构来提高器件的温度特性。研制的1550 nm \pm 20 nm工作波长的激光器,其单模尾纤输出功率大于等于60 mW(工作电流300 mA,25 $^{\circ}$ C),激光器上升/下降时间小于1 ns,完全满足OTDR长距离、高精度测试的使用要求。

关键词: 半导体激光器;光时域反射仪;工作波长;输出功率;光谱宽度

中图分类号: TN248.34 **文章编号:** 1001-5868(2020)02-0159-05

Study on 1550 nm Semiconductor Lasers Used in OTDR

LIAO Ke, WANG Haoxuan, XIONG Wentao, CHEN Jian, ZHOU Yong, TIAN Kun

(Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: The optical time domain reflectometer (OTDR) is a special instrument in the test of optical fiber communication link. As the key component of OTDR, the performance of semiconductor laser directly influences the characteristics of OTDR, such as test distance, test precision, etc. In order to meet the application requirements of OTDR, a kind of ridged waveguide laser chip with separate confinement heterostructure (SCH) was proposed. The SCH can improve the output power and slope efficiency of the lasers. Meanwhile, the quantum well structure was adopted to improve the temperature characteristic. For the developed semiconductor lasers working at the wavelength of 1550 nm \pm 20 nm, the output efficiency of the single mode fiber exceeds 60 mW at the working current of 300 mA under 25 $^{\circ}$ C, and the rise/fall time is less than 1 ns, meeting the requirements of long-distance and high precision in OTDR applications.

Key words: laser diode; OTDR; working wavelength; output power; spectral width

0 引言

随着光纤通信技术在各个领域的广泛应用,对通信链路中光纤特性的测试显得日益重要。光时域反射仪(OTDR)是一种专用光纤测试仪器,它不仅可测量光纤长度,还能提供光纤链路与长度有关的衰减细节,能精确定位光纤的接头、断点等^[1]。OTDR的性能主要取决于半导体激光器的品质。

为提高OTDR全温范围(-20~60 $^{\circ}$ C)的测试精度,增加测试距离,本文研制了一种非对称分别限制半导体激光器,通过优化设计半导体激光器芯片结构和耦合封装,提高了激光器电光效率,减少了上升、下降时间,器件采用同轴单模光纤耦合结构,其工作波长为1550 nm \pm 20 nm,单模尾纤输出功率大于等于60 mW(工作电流300 mA,25 $^{\circ}$ C),阈值电流典型值为45 mA,光谱宽度小于10 nm,上升、下降时间小于1 ns(占空比:1%,脉冲宽度:10 μ s)。

1 理论分析

1.1 OTDR 工作原理

OTDR 是基于瑞利散射与菲涅耳反射原理构成的,光纤中传输的光束受瑞利散射影响而导致其光功率减小^[2],且瑞利散射引起的光纤损耗与传输距离呈指数衰减;如果光纤存在几何缺陷、断裂面或连接点时,由于折射率突变便会产生菲涅耳反射,菲涅耳反射反映了光纤接点或断点处背向散射的反射程度^[3]。

OTDR 的工作原理框图如图 1 所示^[4],脉冲发生器驱动激光器发出的光脉冲经方向耦合器、光纤活动连接器注入被测光纤,光脉冲在传输过程中不断产生瑞利散射,在光纤存在几何缺陷、断裂面或连接点处产生一个菲涅耳反射。光脉冲发射端的接收检测电路检测到后向瑞利散射光,经光电转换并进行信号处理,即可检测到光纤的缺陷、断裂面或连接点的位置。

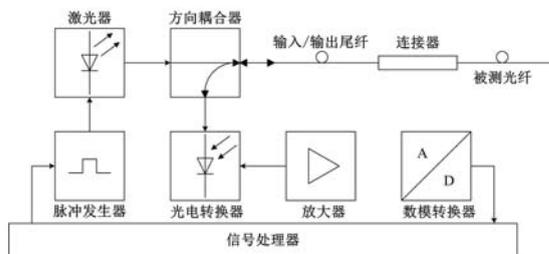


图 1 OTDR 工作原理框图

1.2 激光器芯片结构设计及参数计算

1.2.1 激光器芯片结构设计

设计的非对称分别限制(SCH)脊波导芯片结构示意图如图 2 所示。采用 3 个未掺杂的 InGaAsP 量子阱和未掺杂的非对称 SCH 结构,上 SCH 结构与下 SCH 结构层的厚度比约为 1:2,为了实现基模输出,脊宽设定为 $3\ \mu\text{m}$,采用倒台面结构。

(1) 材料系的选择

InGaAsP/InP 和 AlGaInAs/InP 两种材料均可制作 $1\ 550\ \text{nm}$ 波长激光器,而 InGaAsP/InP 在同样的载流子浓度下具有更高的增益 G_{net} 和峰值增益 g ,以及更小的内部损耗 α_i 、非线性增益抑制因子 ϵ 和光子寿命 τ_p ,这意味着其具有更高的效率和更好的调制性能。此外,同样波长的 InGaAsP/InP 材料阱宽相对更宽,因此 InGaAsP/InP 材料的光限制因子 Γ 相对更大,对光场限制也就更好^[5]。同时,采用应变多量子阱结构来提高温度特性等,弥补与

AlGaInAs/InP 材料的温度特性差距,本文选择 InGaAsP/InP 材料系进行该激光器芯片的设计与制作。

(2) 量子阱与波导层设计

多量子阱可以提高光场限制因子,增加有源层对非平衡载流子的收集能力,提高光增益。但量子阱数目的增加会导致阈值电流密度升高,通过仿真模拟优化,取 3 个量子阱。波导结构的优化既可以有效降低其对载流子的吸收,还可以提高模式的增益吸收,并能得到较小的近场半宽与远场角,以利于光纤和激光器的耦合。本文通过采用渐变折射率波导,进一步降低了内建电势,提高了电光转换效率。

(3) 限制层与顶层设计

为保证限制层对光场有良好的限制以防止载流子泄漏,必须保证其与波导层有一个能隙差,一般载流子的扩散长度为 $1\ \mu\text{m}$ 左右,所以限制层不宜太厚,本文设定为 $1.5\ \mu\text{m}$ 。为形成良好的欧姆接触,设计顶层为重掺杂,掺杂浓度大于 $10^{19}\ \text{cm}^{-3}$,而厚度设计为 $0.3\ \mu\text{m}$ 。

采用脊波导的芯片结构,该结构的制作工艺相对简单,只需要一次外延。为了提高激光器的输出功率和斜率效率,采用非对称分别限制结构以减少激光本征模式同 p^- 掺杂区域的重叠,同时增加量子阱的数量以克服因光限制因子降低而导致的阈值电流增加。

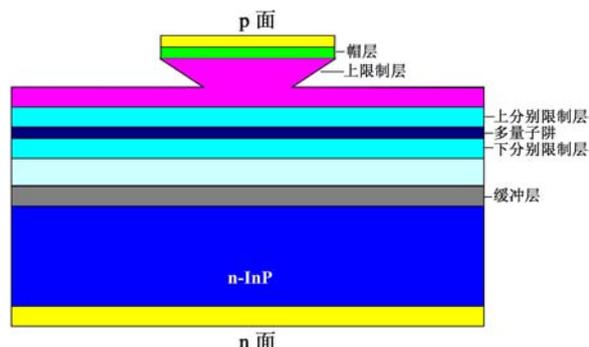


图 2 InGaAsP SCH 应变多量子阱激光器波导截面结构

1.2.2 参数计算

(1) 激光波长

激光波长是激光器的一个重要参数,它由有源区的有效带隙 E_{eff} 决定,计算公式如下:

$$\lambda = hc/h\nu \approx 1.24/E_{\text{eff}} \quad (1)$$

式中, ν 为光子频率, c 为真空中光速, h 为普朗克常数。

根据量子理论,可以得出等效带隙 E_{eff} 为

$$E_{\text{eff}} = E_g + \left[\frac{h^2 \pi^2}{2m_e d_w^2} + \frac{h^2 \pi^2}{2m_{\text{hh}} d_w^2} \right] \quad (2)$$

式中, E_g 为 InGaAsP 体材料的禁带宽度, d_w 为阱层厚度, m_e 和 m_{hh} 分别为电子和空穴的有效质量。由此可见, 量子阱激光器的波长与体材料的禁带宽度、阱层厚度等有关。

采用 Sadao Adachi 等人的线性插值法计算 E_g , 其方法如下:

$$Q(x, y) = \frac{x(1-x)[(1-y)T_{\text{InGaP}} + yT_{\text{InGaAs}}] + y(1-y)(1-x)[(1-x)T_{\text{InAsP}} + xT_{\text{GaAsP}}]}{x(1-x) + y(1-y)} \quad (5)$$

四元材料 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}/\text{InP}$ 的各种参数可以通过二元材料线性插值进行求得, 如表 1。

由式(2)可以计算出 E_{eff} , 由式(3)~(5)可以计算出 InGaAsP 材料的晶格常数, 设计适当的应变变量, 同时考虑激光器镀增透膜波长蓝移和热效应波长红移等, 结合激光器腔长设计, 可以得到理想的工作波长。

表 1 计算 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}/\text{InP}$ 材料所需的各种参数

参数	符号/单位	GaAs	InAs	InP	GaP
晶格常数	A/nm	0.565 33	0.605 84	0.586 88	0.545 05
弹性劲度常数	$C_{11}/(10^{11} \text{ dyn/cm}^2)$	11.879	8.329	10.11	14.05
弹性劲度常数	$C_{12}/(10^{11} \text{ dyn/cm}^2)$	5.376	4.526	5.61	6.203
导带静压形变势	a_c/eV	-7.17	-5.08	-5.04	-7.14
价带静压形变势	a_v/eV	1.16	1.00	1.27	1.70
价带的切形变势	b/eV	-1.7	-1.8	-1.7	-1.8
价带参数	γ_1	6.8	20.4	4.95	4.05
	γ_2	1.9	8.3	1.65	0.49
	γ_3	2.73	9.1	2.35	1.25

由文献[6]可以计算光增益系数、各层的吸收系数(除有源层和波导层)、阈值电流密度、光谱线宽、远场图和远场角等参数。

(2) 输出功率

输出功率是激光器的另一个重要参数。半导体激光器是一种电光转换器件, 其前端面输出光功率可表示为^[7-8]

$$P = (h\nu/e)\eta_D(I - I_{\text{th}}) \quad (6)$$

其中,

$$\eta_D = \eta_j \eta_i \frac{\ln(1/R_f R_r)}{\alpha_i + \frac{2L}{\ln(1/R_f R_r)}} T(R_f, R_r) \quad (7)$$

式中, I 为工作电流, I_{th} 为阈值电流, e 为电子电荷, η_D 为前端面外微分量子效率, η_j 为注入效率, η_i 为内量子效率, R_f, R_r 分别为前、后端面反射率, $T(R_f, R_r)$ 为非对称膜修正因子。

前腔面的反射率 R_f 对 η_D 存在一个最佳

用 B, T 和 Q 分别代表二元、三元和四元材料的材料参数, 那么, 对于三元材料 $\text{AB}_x\text{C}_{1-x}$ 有:

$$T_{\text{ABC}}(x) = xB_{\text{AB}} + (1-x)B_{\text{AC}} \quad (3)$$

对于 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 材料有:

$$Q(x, y) = (1-x)yB_{\text{InAs}} + (1-x)(1-y)B_{\text{InP}} + xyB_{\text{GaAs}} + x(1-y)B_{\text{GaP}} \quad (4)$$

如果已知三元材料的参数, 则可以表示为

值^[9-10], 实验测得 R_f 在 5%~10% 时, $T(R_f, R_r)$ 为 0.9~1.0。图 3 给出了 $\eta_j = 1, \eta_i = 0.95, \alpha_i = 6 \text{ cm}^{-1}, L = 1000 \mu\text{m}, R_r = 100\%$ 时, R_f 的估算曲线。

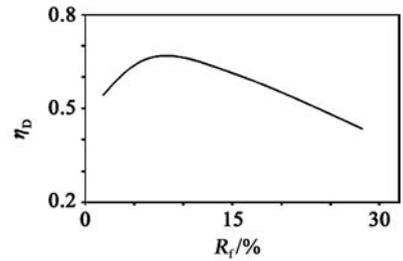


图 3 R_f 与 η_D 的关系曲线

由式(7)可知, 提高 η_D 是增加输出功率的有效手段。但前端面的载流子消耗会引起光增益饱和而出现烧孔效应, 因此并非 R_f 越小越好, 本文取 R_f 约 10%。

2 激光器制作

激光器制作工艺流程如图 4 所示, 主要包括 MOCVD 材料生长、光刻、耦合等关键工艺。

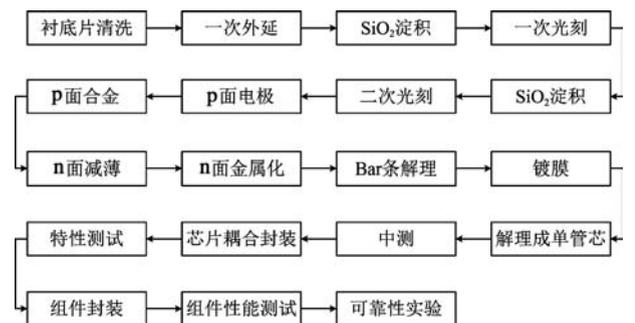


图 4 激光器制作工艺流程图

2.1 材料外延生长

外延材料的质量不仅影响激光器的性能参数和可靠性, 而且对产品的批量生产能力有直接影响, 这也是国内外厂家的核心技术, 除了要将理论设计的

参数值精确应用在实际生长的激光器芯片材料中,还必须根据使用设备的特点优化工艺条件参数,使生长的材料质量几近完美。本文设置生长温度为 680℃,反应室气压为 6.666 12 Pa,并通过提高 III/V 束流比,获得了良好的激光器芯片外延材料。

2.2 脊波导光刻工艺

为了精确控制脊宽和脊高,对脊波导光刻工艺有很高要求。由于波导的宽度为 3 μm 左右,常规工艺采用两块光刻版分两次光刻来完成。先利用第一块光刻版制作出 3 μm 宽的脊形台面,再利用窄版在台面上套刻出电流通道。由于现有光刻方式为接触式曝光,套刻的容差较小,如果套偏,将直接导致脊波导侧壁 SiO₂ 遭到刻蚀,造成电流泄漏等,导致器件性能降低。本文采用腐蚀终止层、自聚焦对准的方法,并通过优化刻蚀工艺条件来精确控制脊宽和脊高。

2.3 腔面镀膜工艺

研究表明^[6],端面反射率乘积 $R_r R_t$ 大于 0.1 以后,阈值电流密度 J_{th} 随 $R_r R_t$ 变化不大。因此,选择稳定性好、近红外透过率高、粘附性好的 Al₂O₃ 作为增透膜(AR),而采用(SiO₂/TiO₂)⁷ 膜结构作为高反膜(HR)。激光器增透膜和反射膜实验曲线分别如图 5 和 6 所示。

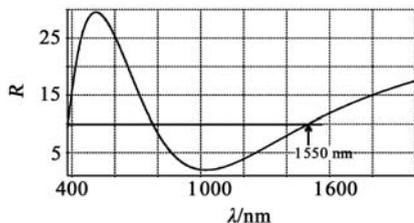


图 5 激光器增透膜实验曲线

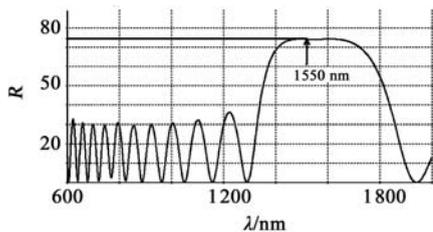


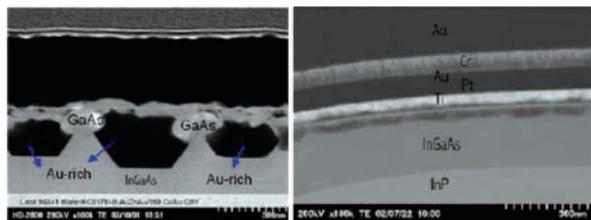
图 6 激光器反射膜实验曲线

2.4 p 面金属电极

为了实现良好的欧姆接触,p 面电极通常可选用 Au/Zn,Ti/Pt/Au 等材料。研究表明,采用 Au/Zn 电极材料时,Au 会迁移进入 InGaAs 层,并反应生成富 Au 化合物而形成缺陷,在加电工作状态下,缺陷的进一步发展会导致芯片可靠性降低;而在

Ti/Pt/Au 材料中,Pt 形成一层阻挡层,防止 Au 迁移进入半导体材料内。

图 7(a)、(b)分别是采用 Au/Zn 和 Ti/Pt/Au 金属电极的激光器老化后金属-半导体接触界面的扫描电镜(SEM)照片,由图可见 Au/Zn 电极中的 Au 已经深入到半导体材料中,形成富 Au 化合物缺陷;而 Ti/Pt/Au 电极与半导体材料之间仍然保持清晰的界面。综合以上分析,本文选择使用 Ti/Pt/Au 材料作为 p 面金属电极。



(a) Au/Zn 电极 (b) Ti/Pt/Au 电极

图 7 采用 Au/Zn 电极或 Ti/Pt/Au 电极的激光器老化后的金属-半导体界面 SEM 图

2.5 耦合封装工艺

本文研制的 1 550 nm 激光器采用带尾纤的 TO 封装,内部的 LD 管芯、热沉、支架等用焊料分级钎焊在管壳散热座上,LD 管芯-热沉的焊接采用 GD-200 激光器芯片压焊机完成,内部引线为 30 μm 键合金丝,采用 4524 深腔金丝球焊机进行焊接。激光器耦合封装示意图如图 8 所示。

对于同轴型激光器与单模光纤激光焊接耦合,三光束点焊机三束激光采用 120°间隔对称焊接的方式,可以避免焊接的不对称性,减少因不对称性引起的焊后偏移。

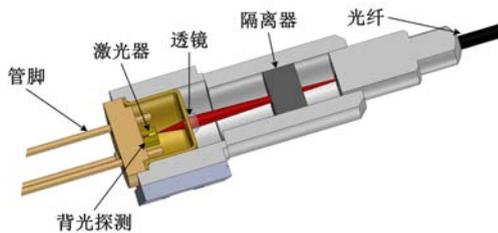


图 8 1 550 nm 激光器耦合封装示意图

3 实验结果

研制的 1 550 nm 半导体激光器的主要光电性能参数如下:工作波长为 1 550 nm±20 nm,单模尾纤输出功率不低于 60 mW(工作电流 300 mA, 25℃),阈值电流典型值为 45 mA,光谱宽度小于 10 nm,上升、下降时间低于 1 ns(占空比:1%,脉冲

宽度:10 μs)。该激光器的 $P-I$ 曲线、光谱图和输出波形分别如图 9,10 和 11 所示。

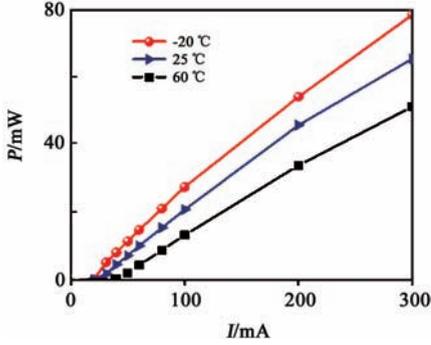


图 9 不同环境温度下激光器的 $P-I$ 曲线

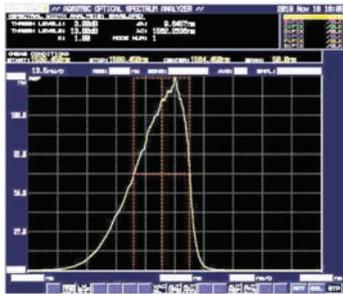


图 10 激光器的光谱图

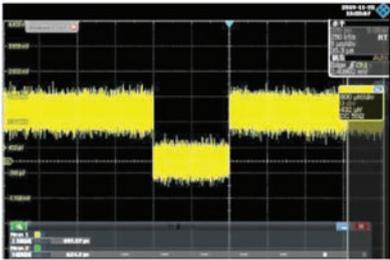


图 11 激光器的输出波形

4 结束语

本文设计了一种用于光时域反射仪的1550 nm 半导体激光器,给出了器件设计的理论推导和计算,并通过技术研究和工艺优化,获得了理想的器件参数,实验结果显示,在-20,25 和 60 $^{\circ}\text{C}$ 环境温度下、工作电流为 300 mA 时,激光器输出功率分别大于 40,60 和 80 mW,完全满足工程化应用需求。

参考文献:

- [1] 张士文, 扈国华. 基于 OTDR 的光纤参数测量系统[J]. 光通信技术, 2005, 29(2): 56-57.
Zhang Shiwen, Shu Guohua. Automatic fiber parameter measurement system based on OTDR [J]. Optical Communication Technol., 2005, 29(2): 56-57.

- [2] 马正先, 熊建文. OTDR 在光纤测量中的应用[J]. 激光杂志, 1999, 20(2): 2-7.
Ma Zhengxian, Xiong Jianwen. Application of an OTDR in optical fiber measurements[J]. Laser J., 1999, 20(2): 2-7.
- [3] Soto W. Optical testing for passive optical networks [C]// IEEE Conf. on Optical Fiber Commun., 2008: 1-3.
- [4] 侯功, 黄在朝, 邓辉. OTDR 系统中激光器驱动电路的设计[J]. 自动化仪表, 2013, 34(10): 84-88.
Hou Gong, Huang Zaichao, Deng Hui. Design of the driving circuit for lasers in OTDR system [J]. Process Automation Instrumentation, 2013, 34(10): 84-88.
- [5] 王振. 1550 nm 大功率半导体脉冲激光器研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
Wang Zhen. Research on 1550 nm high power semiconductor pulse laser[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technol. of China, 2018.
- [6] 廖柯. 0.87 μm 脉冲半导体激光器研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2001.
Liao Ke. Research on 0.87 μm pulsed semiconductor laser[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technol. of China, 2001.
- [7] 廖柯, 张道银. 镜面镀膜技术在 GaAlAs 可见光激光器中的应用[C]// 天津: 第五届全国光纤通信学术会论文集, 1991, 5: 162.
Liao Ke, Zhang Daoyin. Application of mirror coating technology in GaAlAs visible light laser [C]// Tianjin: The Fifth National Academic Conf. on Optical Fiber Commun., 1991, 5: 162.
- [8] 罗江才, 朱自文, 王剑格, 等. 1.3 μm InGaAsP/InP LD, SLD 和 LED 的介质镀膜[J]. 半导体光电, 1995, 16(2): 131-134.
Luo Jiangcai, Zhu Ziwen, Wang Jiange, et al. Dielectric coating on 1.3 μm InGaAsP/InP LD, SLD and LED [J]. Semiconductor Optoelectronics, 1995, 16(2): 131-134.
- [9] 郝尧, 卢玉村, 陈建国. 优化反射率以增强半导体激光器输出功率[J]. 半导体光电, 1995, 16(2): 131-134.
Hao Yao, Lu Yucun, Chen Jianguo. Optimization of the reflectance to enhance the output power of semiconductor laser [J]. Semiconductor Optoelectronics, 1995, 16(2): 131-134.
- [10] Higashi T, Ogita S, Soda H, et al. Optimum asymmetric mirror facet structure for high-efficiency semiconductor lasers [J]. IEEE J. of Quantum Electron., 1993, 29(6): 1981-1982.

作者简介:

廖柯(1963—),男,研究员级高级工程师,享受国务院政府特殊津贴专家,国家科技进步特等奖获得者,从事半导体光电器件及应用技术的研究工作,以第一作者发表论文 10 余篇。

E-mail: zdsssqbzx@163.com

基于碳管/石墨烯/GaAs 双异质结自驱动的近红外光电探测器

陶泽军, 霍婷婷, 尹欢, 苏言杰

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院 薄膜与微细技术教育部重点实验室, 上海 200240)

摘要: 基于单壁碳纳米管(SWCNT)/单层石墨烯/GaAs 双异质结结构构筑了自驱动近红外光电探测器,利用 GaAs 优异的光电特性和石墨烯的高载流子迁移率特点,该光电探测器在无偏压情况下光电响应率可达 393.8 mA/W,比探测率达到 6.48×10^{11} Jones,开关比为 10^3 。而且,利用半导体性 SWCNT 对近红外光子的高吸收特性以及 SWCNT/石墨烯异质结对 SWCNT 产生光生载流子进行有效分离,使得该双异质结光电器件的光谱响应可拓展至 1 064 nm,突破了 GaAs 自身的响应极限 860 nm。

关键词: SWCNT; 单壁碳纳米管; 石墨烯; GaAs; 异质结; 光电探测器

中图分类号: TN36 **文章编号:** 1001-5868(2020)02-0164-05

Self-powered Near-infrared Photodetector Based on Single-walled Carbon Nanotube/Graphene/GaAs Double Heterojunctions

TAO Zejun, HUO Tingting, YIN Huan, SU Yanjie

(Key Laboratory of Thin Film and Microfabrication of the Ministry of Education, School of Electronics, Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, CHN)

Abstract: In this paper, a self-powered near-infrared photodetector was fabricated based on a single-walled CNT (SWCNT) /graphene/GaAs double heterojunction structure. Due to the excellent photoelectric properties of GaAs and high carrier mobility of graphene, the photodetector exhibits a high photoresponsivity, detectivity and the on/off ratio of 393.8 mA/W, 6.48×10^{11} Jones and 10^3 , respectively. More importantly, combing the near-infrared light absorption of SWCNTs with the photo-generated carriers effectively separated by the SWCNT/graphene heterojunction, the spectral response of the double heterojunction device is broadened to 1 064 nm, breaking through the absorption limit of GaAs itself.

Key words: SWCNT; carbon nanotube; graphene; GaAs; heterojunction; photodetector

0 引言

光电探测器是一种基于光电效应,将光信号转化为电信号的光电器件。光电探测器尤其是近红外光电探测器在军事、农业、天文、卫星遥感等领域发挥着重要的作用^[1]。传统构筑近红外光电探测器异质结的材料受到诸如热失配和晶格失配等限制,导

致近红外光电探测器无法满足高性能和低成本的要求。近年来,碳纳米材料凭借自身的特殊结构和独特的纳米效应被用于构筑近红外光电探测器,使近红外光电探测器有望突破现阶段的技术瓶颈。

石墨烯和单壁碳纳米管(SWCNT)是碳纳米材料在光电探测领域中研究最为深入的两种材料。石墨烯作为一种零带隙的二维纳米材料,具有类似于金属的性质,这一特性使其和半导体结合形成异质结时,可以避免晶格失配和热失配的影响;同时它在室

收稿日期:2019-11-27.

基金项目:国家自然科学基金项目(61974089).

温下的载流子迁移率可高达 $15\,000\text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ，这有利于制备快速响应的光电器件；它对可见光的透过率可以达到97%以上，与半导体形成异质结时不影响半导体对光的吸收^[2-5]。这些优异的性能使石墨烯材料在光电器件中的应用具有巨大的潜力^[6]。SWCNT对近红外波段的光有较好的吸收，它的吸收系数比一些传统用于制作近红外探测器的半导体材料高1个数量级^[7-8]，这使得SWCNT成为构筑高性能近红外光电探测器的一种理想材料。此外SWCNT载流子的弹道输运机制，使得其响应速度理论上可以高达飞秒级^[7]。GaAs作为一种直接带隙的半导体材料，自身具有很高的光吸收系数，它与单层石墨烯等碳纳米材料结合后形成异质结，可以得到性能优异的近红外光电探测器^[9-11]。近年来的研究表明，对异质结表面进行掺杂，可以进一步提高其性能。合肥工业大学罗林保团队^[12]通过在GaAs表面加一层氧化铝钝化层，使其石墨烯/GaAs器件的响应率提高到5 mA/W，探测率达到 2.88×10^{11} Jones，同时响应时间达到了320/380 ns。浙江大学林时胜团队^[13]利用银纳米粒子掺杂，拓宽了GaAs的光谱响应，使其在超出极限吸收波长的940 nm处也产生了光响应，得到了一个宽光谱响应的光电探测器。

本文构筑了一种基于SWCNT/石墨烯/GaAs双异质结的近红外光电探测器。通过SWCNT/石墨烯和石墨烯/GaAs这两个异质结分别实现对近红外光和可见光的高效探测。SWCNT和石墨烯自身的高载流子迁移率也使得构筑的光电探测器具有更高的响应率及更快的响应速度。

1 实验

1.1 SWCNT/石墨烯/GaAs异质结的制备

使用金属有机物化学气相沉积(MOCVD)技术沉积一层 $1\ \mu\text{m}$ 厚的GaAs缓冲层，并对其进行单面抛光，然后在未抛光的一面采用电子束蒸发法蒸镀一层Ti/Au(50 nm/100 nm)作为背电极。接下来分别使用丙酮、异丙醇、去离子水对GaAs的表面依次进行清洗。采用原子层沉积(ALD)技术在抛光面生长一层 $80\ \mu\text{m}$ 厚的氧化铝绝缘层，中间留出一个 $4\ \text{mm} \times 4\ \text{mm}$ 的窗口区域作为GaAs的吸光区，同时也是石墨烯和GaAs接触形成异质结的区域。最后将处理后的GaAs浸泡在硫化铵溶液中10 min，实现对GaAs表面的钝化。

采用化学气相沉积(CVD)法在锗片上生长单层石墨烯，在石墨烯上旋涂一层聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)，然后放入 $V_{\text{HF}} : V_{\text{H}_2\text{O}_2} : V_{\text{H}_2\text{O}} = 1 : 1 : 15$ 的腐蚀液中对锗基底进行腐蚀。待锗基底完全腐蚀后使用滤纸将石墨烯捞出并放入去离子水中进行清洗。清洗完成后用上述处理后的GaAs将石墨烯从去离子水中捞出，放入 $60\ ^\circ\text{C}$ 的烘箱中，真空烘干。接着使用丙酮去除石墨烯表面旋涂的PMMA。最后在石墨烯表面旋涂一层SWCNT，在SWCNT表面涂上银胶作为另一个电极。

1.2 测试与表征

本文使用场发射电子显微镜(Zeiss Ultra Plus, Germany)表征SWCNT/石墨烯/GaAs的表面形貌；使用拉曼测试系统测得该异质结器件在514 nm激发波长下的拉曼光谱；器件的电学性能使用半导体参数分析仪(安捷伦, 4156C)在405~1 064 nm激光器照射下获得的I-V和I-t曲线进行表征。器件的频率响应曲线采用斩波器(4~4 000 Hz)和数字示波器(Tektronix, TDS 3052C)得到。

2 分析与讨论

构筑的碳纳米管/石墨烯/GaAs异质结器件结构示意图如图1所示，可以清楚看出这是一种体异质结结构的器件。该异质结器件的实物图如图2(a)所示，透过窗口层可以看到GaAs的表面，说明SWCNT和石墨烯的加入并不影响GaAs自身的光吸收。图2(b)为SWCNT/石墨烯/GaAs异质结的SEM图，从中可以清晰地看到，SWCNT在GaAs上排布散乱但连续，并且在其下方也可看到部分石墨烯的褶皱。从图2(c)石墨烯/GaAs异质结器件的拉曼图谱清晰看到，石墨烯的D峰、G峰和2D峰分别位于 $1\,346$ 、 $1\,583$ 和 $2\,680\ \text{cm}^{-1}$ 。石墨烯的2D峰的半峰宽为 $34\ \text{cm}^{-1}$ ，表明石墨烯的层数是单层。旋涂SWCNT后，SWCNT/石墨烯/GaAs的拉曼图谱中可以看出SWCNT的D峰和2D峰分别位于 $1\,335$ 和 $2\,625\ \text{cm}^{-1}$ ，其G峰劈裂成 G^+ 峰 ($1\,587\ \text{cm}^{-1}$) 和 G^- 峰 ($1\,539\ \text{cm}^{-1}$)。由于SWCNT在相同测试条件下拉曼信号较强，导致其掩盖了石墨烯的特征峰信号，因此SWCNT/石墨烯/GaAs的拉曼图谱中只出现了SWCNT的特征峰。与此同时，SWCNT/石墨烯/GaAs上较弱的D峰强度说明总体上缺陷比较少，减少了载流子的复合几率，使得

该器件可以获得较高的光电响应。

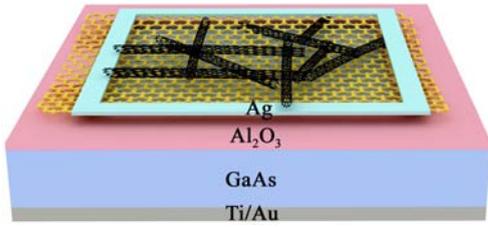
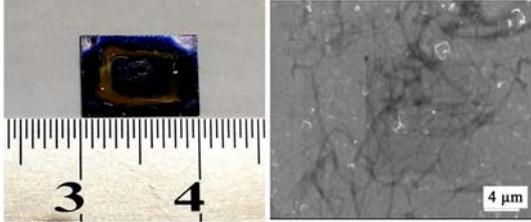
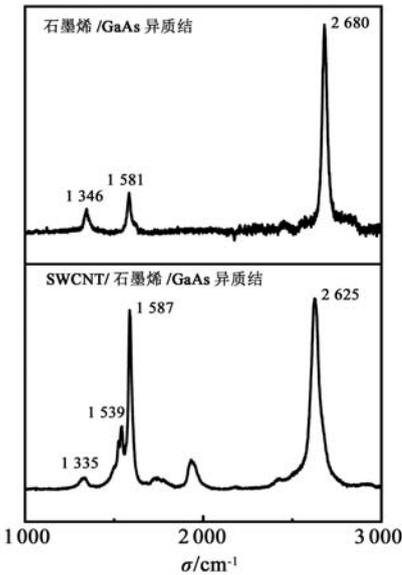


图1 器件结构示意图



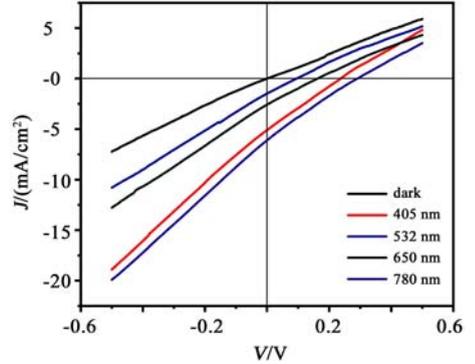
(a) 实物图 (b) 器件 SEM 图



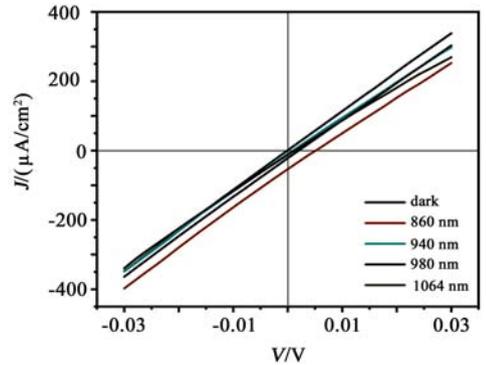
(c) 两种异质结器件的拉曼图谱
图2 器件实物图及性能表征

该异质结器件的电学性能如图3所示。从图中可以看出,当激光波长在405~780 nm时,在零偏压下的光响应主要由石墨烯/GaAs异质结产生,其光电流密度为2~7 mA/cm²,可见器件的光电响应比较明显。从图3(b)可以看出,器件在激光波长为860~1064 nm的范围内在零偏压下的光电响应主要由碳纳米管/石墨烯异质结产生,其光电流密度为20~70 μA/cm²,相比于405~780 nm波段的光电响应较弱。从图中还可以得到该异质结器件的暗电流密度为10.3 μA/cm²,最大开关比约为7×10³。J-V曲线在负方向上表现出电阻的特性,其原因在于在较大功率的光照射下,旁路电阻的影响比较明

显,但J-V曲线的不对称性以及0 V处的下移也说明了该器件存在异质结并且发生了光伏效应。



(a) 405~780 nm 激光照射下



(b) 860~1064 nm 激光照射下

图3 SWCNT/石墨烯/GaAs异质结器件在不同波长激光照射下的J-V曲线(光功率密度均为30 mW/cm²)

图4是器件在无偏压下,不同波长光照射下的I-t响应曲线,由于器件在波长860 nm以后产生的光电流比较小,故对各个波长下的响应采用了归一

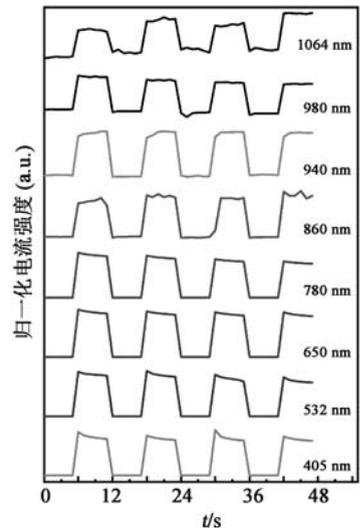


图4 SWCNT/石墨烯/GaAs异质结器件在无偏压、不同波长激光照射下的I-t曲线(入射激光的功率密度均为30 mW/cm²)

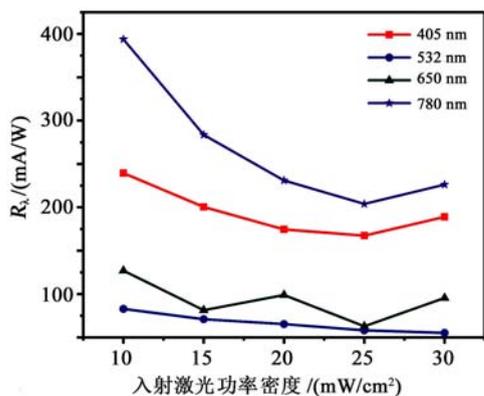
化的方法。从图中可以明显看出,该异质结器件在不加任何偏压的情况下,在 405~1 064 nm 的激光照射下都有明显的光响应,说明器件的光谱响应达到了 1 064 nm,突破了 GaAs 的吸收极限(860 nm),证明了 SWCNT 吸收了近红外波长的光,光伏效应主要发生在 SWCNT/石墨烯处。从图中还可以看出,该器件在经历多个开关的状态所产生的光电流基本都在一个量级上,具有比较好的稳定性。

光电探测器的响应率(R_λ)和比探测率(D^*)的公式如下所示:

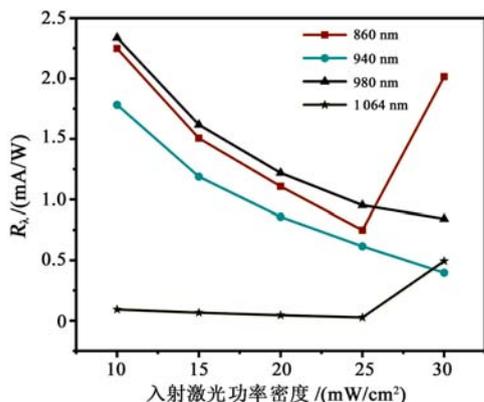
$$R_\lambda = \frac{I_p - I_d}{P_\lambda} \quad (1)$$

$$D^* = \sqrt{\frac{A}{2qI_d}} R_\lambda \quad (2)$$

式中, I_p 、 I_d 、 P_λ 和 A 分别为器件的光电流、暗电流、入射光功率和有效吸光面积。基于上述两个公式,根据测试结果计算出每个波长下不同功率密度激光照射的器件响应率和探测率曲线如图 5 和 6 所示。可以看出,随着入射光功率密度的减小,响应率

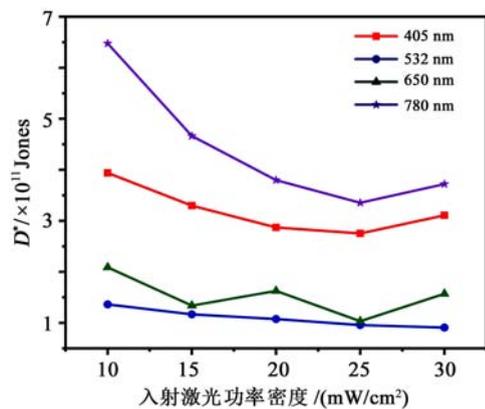


(a) 405~780 nm

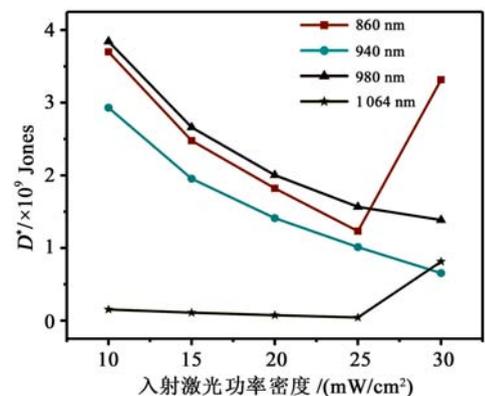


(b) 860~1 064 nm

图 5 异质结器件在不同波长、不同入射功率密度激光照射下的响应率曲线



(a) 405~780 nm



(b) 860~1 064 nm

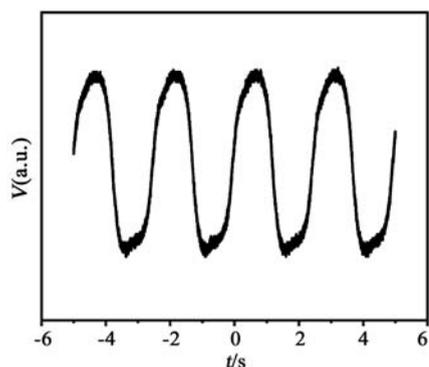
图 6 异质结器件在不同波长、不同入射功率密度激光照射下的探测率曲线

和探测率逐渐增大,这个变化趋势符合光电探测器的一般情况。从图中还可以得到,该器件在 780 nm 处取得的最大响应率为 393.8 mA/W,最大探测率为 6.48×10^{11} Jones。激光波长范围在 860~1 064 nm 时的响应率和比探测率,相比激光波长范围在 405~780 nm 时的低了 2~3 个数量级,这主要是由于较薄 SWCNT 网络对近红外光的吸收有限,难以达到与 GaAs 对可见光的吸收相当。

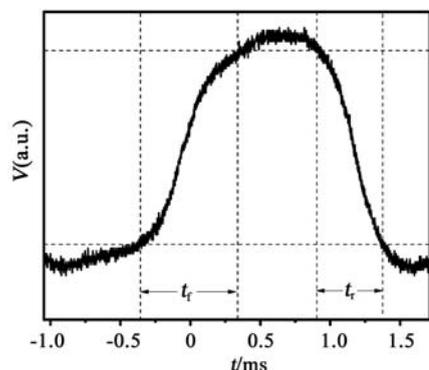
除了上述两个光电探测器的特性参数外,响应时间也是衡量光电探测器性能的一个重要指标。图 7(a)为该异质结器件在 400 Hz 下的频率响应曲线,可以看到该曲线出现了尖峰,说明器件基本达到了最大响应频率。从图 7(b)可以得到,该异质结器件的上升时间(t_r)和下降时间(t_f)分别为 331 和 537 μ s,总体来说,器件的光响应速度比较快。

SWCNT/石墨烯/GaAs 双异质结器件的能带图如图 8 所示。从图中可以得到,石墨烯/GaAs 异质结的内建势垒远大于 SWCNT/石墨烯的内建势垒。光生载流子因内建电场的作用分离产生光伏效

应,并且当光的波长在 405~780 nm 时,光电响应主要发生在石墨烯/GaAs 异质结处;当光的波长在 860~1 064 nm 时,光电响应主要发生在 SWCNT/石墨烯异质结处,因而导致该器件在 405~780 nm 时的光响应远大于 860~1604 nm 的光响应。该器件在无偏压下可以进行光探测,取决于 SWCNT/石墨烯/GaAs 双异质结的内建电场作用,同时石墨烯/GaAs 较大的内建电场也是该器件有较高光响应的根本原因。



(a) 完整曲线



(b) 单独一个周期曲线

图 7 异质结器件在无偏压、400 Hz 下的频率响应曲线 (405 nm 激光照射)

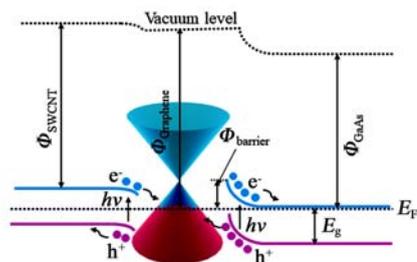


图 8 SWCNT/石墨烯/GaAs 异质结在光照下的能带图

3 结论

本文报道了一种基于 SWCNT/石墨烯/GaAs 双异质结结构的自驱动光电探测器。通过湿法转移

石墨烯和旋涂 SWCNT 得到 SWCNT/石墨烯/GaAs 双异质结结构。通过对该器件进行电学性能测试,得到器件的工作机理是基于这两个异质结产生光伏效应从而实现自驱动的光电探测,即在 0 V 下该器件也可以产生明显的光电流。器件的最大响应率为 393.8 mA/W,最大比探测率为 6.48×10^{11} Jones,光谱响应范围在 405~1 064 nm。实验结果进一步证明了碳纳米管/石墨烯/GaAs 双异质结作为自驱动高性能光电探测器的巨大优势。

参考文献:

- [1] Lim E L, Yap C C, Jumali M H H, et al. A mini review: Can graphene be a novel material for perovskite solar cell applications? [J]. Nano-Micro Lett., 2018, 10: 27.
- [2] Li X, Tao L, Chen Z, et al. Graphene and related two-dimensional materials: Structure-property relationships for electronics and optoelectronics[J]. Appl. Phys. Rev., 2017, 4: 021306.
- [3] Song Y, Fang W, Brenes R, et al. Challenges and opportunities for graphene as transparent conductors in optoelectronics[J]. Nano Today, 2015, 10: 681-700.
- [4] Liu C H, Chang Y C, Norris T B, et al. Graphene photodetectors with ultra-broadband and high responsivity at room temperature[J]. Nat. Nanotech., 2014, 9: 273-278.
- [5] Lin S, Lu Y, Xu J, et al. High performance graphene/semiconductor van der waals heterostructure optoelectronic devices[J]. Nano Energy, 2017, 40: 122-148.
- [6] Bartolomeo A D. Graphene Schottky diodes: An experimental review of the rectifying graphene/semiconductor heterojunction[J]. Phys. Rep., 2016, 606: 1-58.
- [7] Long M S, Wang P, Fang H, et al. Progress, challenges and opportunities for 2D material based photodetectors[J]. Adv. Funct. Mater., 2018: 1803807.
- [8] 蔡葆昉. 基于单壁碳纳米管/石墨烯 van der waals 结的高性能纳米传感器研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- [9] Cai Baofang. High performance nanosensors based on single-walled carbon nanotubes/graphene van der waals junction[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2019.
- [10] Jie W, Zheng F, Hao J. Graphene/gallium arsenide-based Schottky junction solar cells[J]. Appl. Phys. Lett., 2013, 103: 233111.
- [11] Lin S S, Wu Z Q, Li X Q, et al. Stable 16.2% efficient surface plasmon-enhanced graphene/GaAs heterostructure solar cell[J]. Adv. Energy. Mater., 2016, 6: 1600822.
- [12] Zeng L H, Lin S H, Li Z J, et al. Fast, self-driven, air-stable, and broadband photodetector based on vertically aligned PtSe₂/GaAs heterojunction [J]. Adv. Funct. Mater., 2018, 28: 1705970.

(下转第 172 页)

TDI 图像传感器横向抗晕栅极电压与满阱容量关系研究

曲 杨^{1,2}, 王欣洋^{1,2}, 周 泉³, 常玉春⁴

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 长光辰芯光电技术有限公司, 长春 130033; 4. 大连理工大学 微电子学院, 大连 116600)

摘要: 时间延时积分 CMOS 图像传感器(TDI-CIS)具有优良的微光探测能力,可应用于航空探测及卫星遥感等领域。然而,在入射光强较强时,TDI-CIS 容易出现光晕(Blooming)现象,影响观测效果。首先分析了光晕产生的机理;然后基于两种传统的抗晕结构,设计出一种具有沿垂直方向布局的长方形横向抗晕栅的 TDI-CIS;通过成像实验发现横向抗晕栅极电压与抗晕效果及满阱容量(FWC)之间呈负相关关系;最后通过实验得到所设计 TDI-CIS 的最优抗晕栅极电压值为 2.1 V。

关键词: 时间延时积分; CMOS; 光晕; 横向抗晕栅; 满阱容量

中图分类号: TN386.1 **文章编号:** 1001-5868(2020)02-0169-04

Relationship between Voltage of Lateral Anti-blooming Gate and Full Well Capacity in TDI Image Sensor

QU Yang^{1,2}, WANG Xinyang^{1,2}, ZHOU Quan³, CHANG Yuchun⁴

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics of the Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, CHN; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN; 3. Gpixel. Incorporation, Changchun 130033, CHN; 4. School of Microelectronics, Dalian University of Technology, Dalian 116600, CHN)

Abstract: Due to its excellent detection ability under low light illumination, time delay integration CMOS image sensor (TDI-CIS) can be applied in aviation detection and satellite remote sensing. However, it is easy to appear blooming phenomenon to affect observation when TDI-CIS is under higher intensity illumination. In this paper, the mechanism of blooming is introduced firstly and a TDI-CIS with rectangle lateral anti-blooming gate which is arranged in vertical direction based on two different anti-blooming structures is designed. Imaging tests indicate that the voltage of anti-blooming gate (V_{ABG}) is negatively corrected with anti-blooming and full well capacity (FWC). Finally, the optimal V_{ABG} of 2.1 V is obtained.

Key words: TDI; CMOS; blooming; lateral anti-blooming gate; FWC

0 引言

随着半导体工艺技术的飞速发展,将电荷耦合器件(CCD)和 CMOS 集成于同一芯片成为可能。时间延时积分 CMOS 图像传感器(Time Delay Integration CMOS Image Sensor, TDI-CIS)采用

CCD 作为感光器件,集成了 CMOS 读出电路,通过调节积分时间以及 TDI 级数来实现对不同光强目标的观测。与传统 TDI CCD 相比,TDI-CIS 有着低功耗及高集成度的优势,成为高分辨率遥感相机的核心器件^[1]。

在实际应用中,TDI CMOS 图像传感器在接收到强光信号时极易产生光晕(Blooming)现象,影响

观测效果。如通过探测器观测地球表面时,成像范围内不同物体之间较大的光强差会导致光晕的产生,难以获得理想的清晰图像。

本文针对光晕现象,提出并设计了一种带有横向抗晕栅(ABG)结构像素的 TDI-CIS,测试并分析抗晕效果与满阱容量(FWC)之间的关系,得出该图像传感器的最优抗晕栅极电压值。

1 光晕

1.1 光晕的影响及消除方法

当 CCD 图像传感器接收到强光信号,其收集的光生电子数超过 FWC 时会溢出到邻近像素中。如图 1 所示,手电筒发光区域光线过强,过剩的电子溢出到垂直方向上的邻近像素,出现光晕现象,使得图像中手电筒发光区域出现严重失真^[2]。光晕不仅严重影响成像效果,而且会导致光晕区图像数据受到无法经过后期处理恢复的永久性损伤。

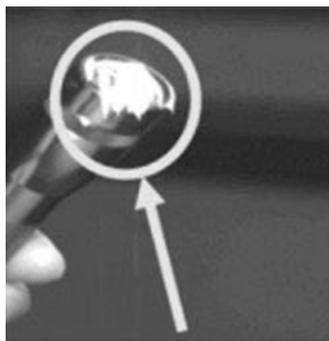


图 1 强光下图像产生光晕

目前有两种主流抗晕结构,第一种为垂直抗溢出漏极 (Vertical Anti-Blooming Drain, VABD) 抗晕结构,通过对衬底施加反向偏置电压,使衬底势垒小于邻近 Gate。当产生的电子数达到 FWC 时,这个势垒差将促使过剩电荷垂直地导入衬底(此时衬底充当 VABD)。这种设计不会影响填充系数,但会减小感光区的深度,从而影响传感器对于长波光的吸收^[3]。在此结构中,由长波光激发在像素深处产生的光电子会直接被垂直抗溢出漏极吸收^[4-6]。另一种为横向抗溢出漏极 (Lateral Anti-Blooming Drain, LABD) 抗晕结构,将抗溢出漏极和 ABG 集成到 CCD 像素中。当 ABG 打开后,由于其下面势垒小于邻近 Gate 下的势垒,溢出的电荷将流入 LABD,从而达到抗晕的效果。但这种结构设计会占用传感器有效像素区域,降低传感器的填充系数和灵敏度。本文中,为了保证传感器对于长波光的

吸收,采用 LABD 设计。以上两种结构均是通过集成抗溢出漏极于像素结构中,将过剩电荷导出以消除其对邻近像素的影响。抗溢出漏极只会防止过剩电荷流入邻近像素,并不会对其他像素造成影响。

1.2 横向抗晕栅极电压与满阱容量的关系

如图 2 所示,由于 $FWC \propto H \times L$,横向抗晕栅极开启电压 V_{ABG} 的大小将影响像素的 FWC。减小 V_{ABG} 会提升 ABG 下势垒 H ,进而增加满阱容量,但在极强光照下,过窄的溢出通道会降低电荷的导出效率,依然有电荷溢出到邻近像素的风险。较大的 V_{ABG} 虽然可以保证抗晕效果,但会使 H 减小,进而降低像素的 FWC,使图像传感器的动态范围降低。因此,在尽可能保证大满阱的条件下找到使抗晕功能完全打开的 V_{ABG} 具有重要的研究意义。

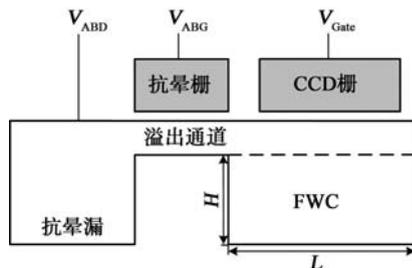


图 2 LABD 结构示意图

2 图像传感器设计

2.1 像素设计

本文设计的图像传感器像素原理图如图 3 所示,感光区域采用 CCD 工艺,在曝光时间内,光生电子在 CCD Gate 下生成、存储并传递,而后越过溢出栅 (Overflow Gate, OG) 传输至浮置节点电容 (Floating Diffusion, FD) 内等待读出。读出电路采用 CMOS 工艺,在选择开关 SEL 开启后,FD 内的电荷经源极跟随器 (Source Follower, SF) 放大后转

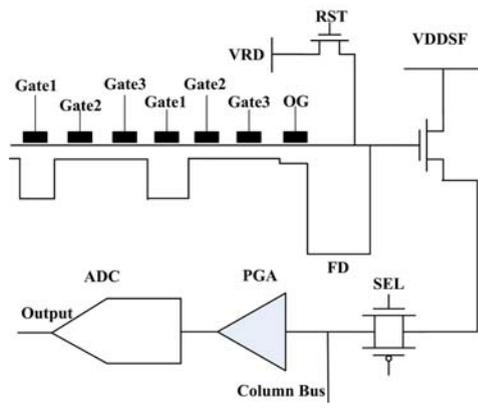


图 3 像素原理图

换成模拟信号,而后经模数转换器(Analog-Digital Converter, ADC)和可编程增益放大器(Programmable Gain Amplifier, PGA)处理后以数字信号读出。

2.2 横向抗晕结构设计

如图4所示,为了降低工艺风险,本文将ABG设计成沿垂直方向布局的长方形,每个CCD Gate两侧各有一个ABG来保证抗晕效果。此外,位于同一列的CCD Gate共用同一个ABG,每两个相邻ABG共享一个ABD。相较于其他ABG布局,长方形设计更易于实现,而且不会对电荷传输效率(CTE)产生影响。除此之外,ABD的存在会进一步提升列间像素的隔离效果。

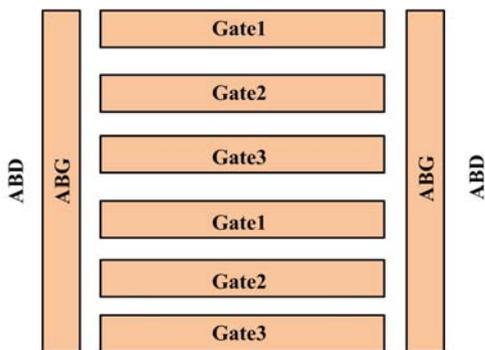


图4 带有纵向抗晕栅的像素设计

2.3 测试图像传感器

图5和图6分别为设计的TDI CMOS图像传感器的宏观照片和设计框架图,其像素尺寸为 $5\mu\text{m}$,像素阵列为 4096×100 ,采用 180nm 工艺制造,正照设计。



图5 图像传感器宏观照片

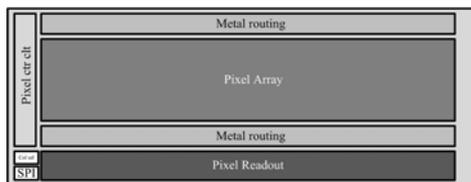


图6 图像传感器设计框架图

3 评估方法与数据分析

3.1 满阱容量计算方法

满阱容量的计算公式为^[7]

$$FWC = \frac{S_{\text{Light}} - S_{\text{Dark}}}{1000C_{\text{vg}}} \quad (1)$$

其中, S_{Light} 为取光子传输曲线(Photon Transfer Curve, PTC)最高点所对应数字量化值(Digital Number, DN); S_{Dark} 为初始输出DN值; C_{vg} 为PTC斜率,即转换效率。

理论上,由于本实验中设置 V_{ABG} 、 C_{vg} 和 S_{Dark} 为固定值,通过对比不同电压下的PTC顶点位置即可判断满阱容量的变化趋势。

3.2 抗晕评估方法

成像实验以溴钨灯作为光源,光线依次经过积分球、靶条及镜头对焦于测试像素,形成条形光斑。在 $V_{\text{ABG}}=0\text{V}$ 时调节光强使条形光斑产生光晕,如图7(a)所示。而后保持光强不变,调节 V_{ABG} ,观察成像区域邻近像素的输出图像以判断抗晕效果。位于同一行的像素由于有浅槽隔离^[8]和ABD的存在,图像上出现的横向光晕并不明显,可忽略不计。

3.3 结果分析

根据上述抗晕评估方法可得到光晕随 V_{ABG} 的变化规律。如图7(b)和(c)所示,光晕的长度随 V_{ABG} 的增加逐渐缩短,在 V_{ABG} 为 1.9V 时光晕已接近消失,在 V_{ABG} 为 2.1V 时光晕完全消失,继续增大 V_{ABG} ,光晕不再有明显变化。由于光晕的长度随 V_{ABG} 的增加持续缩短,此处已省略光晕消失之前的图像。

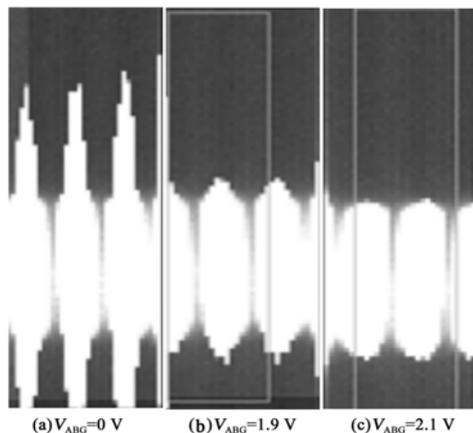


图7 光条随 V_{ABG} 的变化

PTC随 V_{ABG} 的变化如图8所示。随着 V_{ABG} 的增加,顶点呈持续下降趋势。由于只改变了 V_{ABG} ,

各 PTC 的起始点与顶点之前的部分重合度较高,即 C_{ve} 为一固定值,符合理论分析。当 V_{ABG} 在 $0\sim 1\text{ V}$ 的范围内变化,PTC 顶点下降明显,此时以牺牲 FWC 为代价,ABD 已经可以有效地将过剩电荷导出,但由于溢出通道窄无法完全消除光晕,还应继续增大 V_{ABG} 。在 V_{ABG} 为 2.1 V 时光晕消失,FWC 达到最小值 114.96 ke^- ;在 V_{ABG} 为 0 V 时 FWC 最大,为 145.67 ke^- 。两者相差约 30 ke^- 。

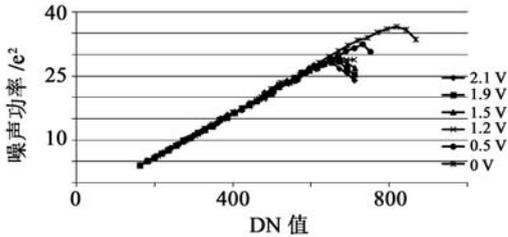


图 8 不同 V_{ABG} 下的 PTC 曲线

从理论分析和实验测试可知,TDI-CIS 的抗晕能力与 V_{ABG} 成正相关关系,FWC 与 V_{ABG} 成负相关关系,随着 V_{ABG} 的增加,抗晕效果愈发明显。本文所设计的图像传感器在 V_{ABG} 为 2.1 V 时达到了两者的最佳平衡,此时满阱为 114.96 ke^- 。对于实际应用而言, V_{ABG} 的大小应由图像传感器的工作环境和观测目标的特性决定,设计者需要在强抗晕能力和高动态范围之间进行折中。

4 结论

本文从光晕现象的产生原理出发,首先对比分析了两种主流抗晕结构的优缺点,然后设计出具有沿垂直方向布局的长方形 LABG 像素的 TDI CMOS 图像传感器。通过在恒定光强下调节 V_{ABG} ,观察抗晕效果以及对应 FWC 的变化。分析实验结果可知,在 V_{ABG} 提升至 2.1 V 时达到最佳抗晕效果。同时,FWC 从 V_{ABG} 为 0 V 时的 145.67 ke^- 减小到 V_{ABG} 为 2.1 V 时的 114.96 ke^- 。

(上接第 168 页)

- [12] Luo L B, Hu H, Wang X H, et al. A graphene/GaAs near-infrared photodetector enabled by interfacial passivation with fast response and high sensitivity[J]. J. Mater. Chem., 2015, C3: 4723-4728.
- [13] Lu Y, Feng S, Wu Z, et al. Broadband surface plasmon resonance enhanced self-powered graphene/GaAs photodetector with ultrahigh detectivity[J]. Nano Energy,

参考文献:

- [1] 廖乃钺,刘绪化,刘昌林,等. 横向抗弥散多光谱 TDI CCD 图像传感器[J]. 半导体光电, 2019, 40(1): 17-19.
Liao Naiman, Liu Xuhua, Liu Changlin, et al. Multispectral TDI CCD imaging sensors with lateral anti-blooming ability[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(1): 17-19.
- [2] Quantum Imaging. inc. Anti-blooming [DB/OL]. 2014-04-15. <https://quantumimaging.com/anti-blooming>.
- [3] Nakamura Junichi. Image Sensors and Signal Processing for Digital Still Cameras[M]. America: Taylor & Francis, 2006: 79-91.
- [4] 武利翻. CCD 纵向抗晕结构设计与优化[J]. 现代电子技术, 2010, 33(16): 172-174.
Wu Lifan. Design and optimization of CCD image sensor with vertical anti-blooming structure [J]. Modern Electronics Technique, 2010, 33(16): 172-174.
- [5] 武利翻. CCD 图像传感器抗晕技术研究[J]. 传感器世界, 2010, 16(8): 16-19.
Wu Lifan. Research on anti-blooming technology in CCD image sensors[J]. Sensor World, 2010, 16(8): 16-19.
- [6] 米本和也. CCD/CMOS 图像传感器基础与应用[M]. 陈榕庭, 彭美桂, 译. 北京: 科学出版社, 2003.
Kazuya Yonemoto. CCD/CMOS Image Sensor No Kiso to Ouyou[M]. Chen Rongting, Peng Meigui, Transl. Beijing: Science Press, 2003.
- [7] Wang Xinyang. Noise in sub-micron CMOS image sensors [D]. Delft: Delft University of Technol., 2008.
- [8] 闻黎, 王建华. 新型集成电路隔离——STI 隔离[J]. 微纳电子技术, 2002, 39(9): 11-12.
Wen Li, Wang Jianhua. New isolation technology of IC: STI isolation[J]. Micronanoelectronic Technology, 2002, 39(9): 11-12.

作者简介:

曲杨(1993—),男,吉林长春人,硕士研究生,主要研究方向为 TDI CMOS 图像传感器;

王欣洋(1980—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,研究员,主要研究方向为 CMOS 图像传感器设计。

E-mail: wangxinyang@ciomp.ac.cn

2018, 47: 140-149.

作者简介:

陶泽军(1993—),男,硕士生,主要研究方向为基于碳纳米材料/GaAs 异质结光伏型光电探测器;

苏言杰(1982—),男,博士,副研究员,硕士生导师,主要研究方向为碳基纳米材料及纳米器件。

E-mail: yanjiesu@situ.edu.cn

三维压差式光纤矢量水听器设计与实验

张滔¹, 胡斌杰¹, 陈超育², 郭运动², 邓志儒², 石滔², 徐栋²

(1. 华南理工大学 电子与信息学院, 广州 510000; 2. 长沙深之瞳信息科技有限公司, 长沙 410005)

摘要: 阐述了压差式光纤矢量水听器的基本原理, 分析了基元灵敏度及间距对其声压灵敏度的影响, 进行了三维压差式光纤矢量水听器探头结构设计, 研制了二维压差式光纤矢量水听器样品, 并进行了性能指标测试。测试结果表明, 在 20~1 000 Hz 频段内, 压差式光纤矢量水听器的声压灵敏度与理论计算结果基本吻合, 在 500 Hz 具有良好的指向性。

关键词: 光纤; 矢量水听器; 压差式

中图分类号: TN929.11 **文章编号:** 1001-5868(2020)02-0173-04

Design and Experiment of Three-dimensional Gradient Fiber Optic Vector Hydrophone

ZHANG Tao¹, HU Binjie¹, CHEN Chaoyu², GUO Yundong², DENG Zhiru², SHI Tao², XU Dong²

(1. School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510000, CHN;

2. Changsha Sensintel Information Technology Co. Ltd., Changsha 410005, CHN)

Abstract: The basic principles of the gradient fiber optic vector hydrophone are elaborated, and the effects of component sensitivity and distance impact on the acoustic pressure sensitivity are analyzed. The structure design of the 3D gradient fiber vector hydrophone is completed. Samples of two-dimensional gradient fiber optic vector hydrophones were manufactured and technically tested. Test results indicate, in the frequency range of 20~1 000 Hz, the acoustic pressure sensitivity of the gradient fiber vector hydrophone is basically consistent with the theoretical value, and its presents good directivity at 500 Hz.

Key words: fiber optics; vector hydrophone; gradient

0 引言

随着人们对水声科学研究的不断深入, 越来越多的问题已经不能完全依靠声压水听器及其基阵来很好地解决, 如水声声强测量、水下噪声源的空间定位和辐射声功率问题^[1]。要完整地得到声场信息, 不仅需要声场的标量信息, 如声压, 还需要声场的矢量信息, 如声压梯度、质点振速, 以及质点加速度等。矢量水听器不仅能同时测量这些信息^[2-5], 而且具有带宽一致的偶极子指向性^[6]。矢量水听器的采用使系统的抗相干干扰能力和线谱检测能力获得提高^[7], 并可实现远场多目标的识别^[8]。

矢量水听器可分为同振式和压差式两种。同振式矢量水听器的基本原理是通过刚性几何体内的传

感结构直接获取外部介质质点的振动信号; 压差式矢量水听器的基本原理是利用空间距离很近的两点处声压的有限差分来近似得到声压梯度^[2]。压差式矢量水听器的测量与加速度无关, 相比同振式矢量水听器, 具有良好的抗加速度性能, 可搭载在鱼雷、潜航器等移动平台上, 具有一定的应用优势^[3]。

光纤水听器通过高灵敏度的光纤相干检测, 将水声信号转换成光信号, 通过光纤传至信号处理系统提取水声信号信息, 具有灵敏度高、频响特性好等特点^[9-12], 且采用光纤作为信息传输载体, 适宜远距离、大范围监测。目前国内对光纤矢量水听器的研究多集中在同振式光纤矢量水听器, 因此开展压差式光纤矢量水听器研究具有重要的理论和实际意义。

1 原理与设计

1.1 光纤水听器的原理及设计

光纤水听器的光学结构为非平衡迈克尔逊干涉仪光学结构,采用法拉第旋光镜(FRM)消除偏振衰落,采用相位调制解调技术消除相位衰落和高灵敏度光学相干检测,采用推挽式空气腔结构实现声压增敏。光纤水听器结构示意图如图 1 所示。

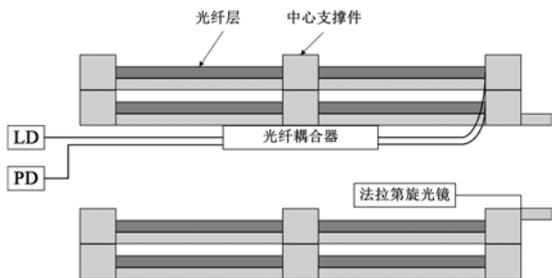


图 1 光纤水听器结构示意图

增敏结构使用较多的是顺变弹性增敏层或空气腔结构,由于弹性增敏层一般选用的材料为聚氨酯、硅橡胶等聚合物,其蠕变现象相对比较明显,长期工作的稳定性得不到保证。本设计采用芯轴型推挽式空气腔结构,即将迈克尔逊干涉仪光纤的两臂分别缠绕于两个薄壁圆筒外表面,内外两个圆筒由胶粘合,中间形成空气腔,缠绕在内、外筒上的光纤在声压作用下引起的光相位变化分别为正和负,因此在相干后,其灵敏度相对于单臂传感结构约高 6 dB^[13-14]。

1.2 压差式光纤水听器工作原理

压差式矢量水听器是通过测量中心点附近各个水听器的声压,进而获取各轴向的声压梯度来实现对其中心点质点振速的测量。由于三维压差式光纤水听器具有维度上的轴对称性,在对其进行原理阐述时可先简化考虑一个维度,其一维工作模型如图 2 所示。

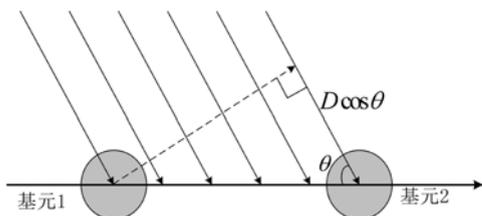


图 2 平面波入射下压差式光纤矢量水听器的工作模型

理想情况下,假设声压传感基元的声压相位灵敏度为 M_0 、两个声压传感基元间距为 D ,入射波方向与两基元连线方向的角度为 θ ,则在声场压力 P

作用下引起的相位变化为 ϕ ,由声压相位灵敏度定义可知压差式光纤矢量水听器的声压相位灵敏度 M 可表示为

$$M = \frac{\phi}{P} = 2M_0 \sin\left(\frac{kD \cos \theta}{2}\right) \quad (1)$$

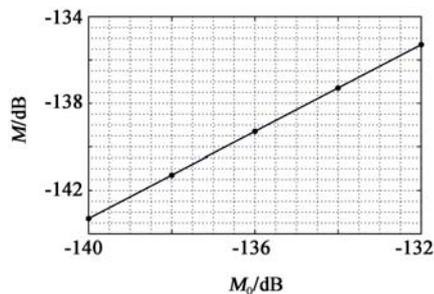
式中, $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \omega/c$ 为声波数, λ 表示声波的波长, ω 为角频率, c 为声波在该介质中的声速。

假定该矢量水听器中心实际声压为 p_0 ,而测量的声压常用该维度上的两基元平均声压 \bar{p} 代替,由此引入的声压的相对测量误差为

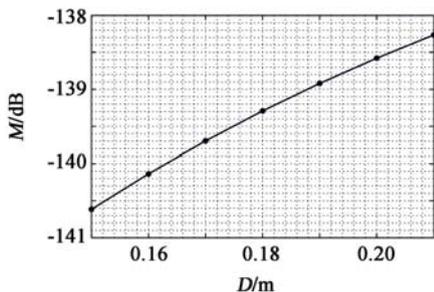
$$\delta_p = \left| \frac{\bar{p} - p_0}{p_0} \right| = \left| \cos\left(\frac{\pi D \cos \theta}{\lambda}\right) - 1 \right| = \frac{(\pi D f \cos \theta)^2}{2c^2} \quad (2)$$

式中, λ 为声波的波长, c 为该介质下的声速, f 为对应的声波频率。由式(1)、(2)可知,在设计时必须综合考虑矢量水听器的工作频率上限 f_{\max} 、基元声压灵敏度 M_0 和基元间距 D 。

测试矢量水听器声压灵敏度时,选取响应最大的方向,即 $\theta = 0^\circ$,由声压灵敏度定义可知,影响矢量水听器的主要因素有声压传感基元灵敏度和基元间距。以工作频率上限 f_{\max} 为 1 000 Hz 为例(假定水中媒介声速 c 为 1 500 m/s),设计的测量误差容许小于 10%,则由式(2)可确定基元间距 $D \leq 0.21$ m。在以上前提条件下分别仿真分析了:1)基



(a) $M-M_0$ 关系曲线



(b) $M-D$ 关系曲线

图 3 声压灵敏度 M 随基元灵敏度 M_0 和基元间距 D 的变化关系

元间距 $D=0.18\text{ m}$ 恒定,压差式光纤矢量水听器灵敏度 M 随声压传感基元灵敏度 M_0 的变化关系;2)基元声压灵敏度 $M_0=-136\text{ dB}$ 恒定,压差式光纤矢量水听器灵敏度随基元间距变化的关系,结果如图3所示。

由仿真结果可知,在基元间距不变时,压差式光纤矢量水听器灵敏度随基元灵敏度的增加呈线性增加;在基元声压灵敏度不变时,一定范围内压差式光纤矢量水听器灵敏度随基元间距的增加而近似线性增加。同时对比分析可知,压差式矢量水听器受基元灵敏度影响更明显,表明提高压差式矢量水听器声压灵敏度最有效的方法是提高单个基元的声压灵敏度。

$$\begin{cases} v_{O_x}(t) = -\frac{1}{\rho} \int \frac{p_1(t) - p_2(t)}{2r} dt \approx \frac{jkA}{\rho} \cos \varphi \sin \theta \int e^{j(\omega_0 t - kr)} dt \\ v_{O_y}(t) = -\frac{1}{\rho} \int \frac{p_3(t) - p_4(t)}{2r} dt \approx \frac{jkA}{\rho} \sin \varphi \sin \theta \int e^{j(\omega_0 t - kr)} dt \\ v_{O_z}(t) = -\frac{1}{\rho} \int \frac{p_5(t) - p_6(t)}{2r} dt \approx \frac{jkA}{\rho} \cos \theta \int e^{j(\omega_0 t - kr)} dt \end{cases} \quad (4)$$

式中, A 为积分常量, k 为声波数, ω_0 为声场角频率, ρ 为传播介质速度, θ 和 φ 为三维空间方位角, r 为三维空间位移。由式(3)可以看出,采用矢量水听器改善了声压信号的信噪比,使信噪比约提高 $\sqrt{6}$ 倍。结合式(4),对于三维压差式光纤矢量水听器结构,通过求得某维度上的声压差 Δp 和振速 $v_0(t)$,去除了各项同性的光学噪声的影响。

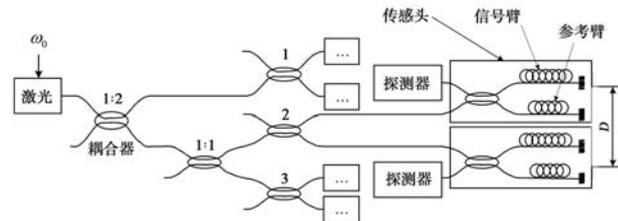


图4 三维压差式光纤矢量水听器光学结构

2 实验结果

为了验证上述理论设计,研制了二维压差式光纤矢量水听器,如图5所示,其基元间距 $D=0.18\text{ m}$,基元结构尺寸为 $\phi 21\text{ mm} \times 51\text{ mm}$,其中内筒缠绕光纤 46 m ,外筒缠绕光纤 46.52 m 。采用窄线宽可调谐的激光器,输出光波长为 1550 nm 。

在驻波场条件下,对 $20\sim 1000\text{ Hz}$ 频段内的压差式矢量水听器及其基元进行校准测试^[15-16]。测得的传感基元声压灵敏度频响曲线如图6所示,图中

1.3 压差式光纤矢量水听器设计

对于三维压差式光纤矢量水听器,采用六干涉仪结构,即每个轴上使用两个干涉仪测量轴上两个点的声压,其光学结构示意图如图4所示。

由工作原理可知,在满足条件 $kD \ll 1$ 下,由有限差分法近似,可得:

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial x} \approx \frac{\Delta p_x}{\Delta x} = \frac{p_1(t) - p_2(t)}{D} \\ \frac{\partial p}{\partial y} \approx \frac{\Delta p_y}{\Delta y} = \frac{p_3(t) - p_4(t)}{D} \\ \frac{\partial p}{\partial z} \approx \frac{\Delta p_z}{\Delta z} = \frac{p_5(t) - p_6(t)}{D} \end{cases} \quad (3)$$

于是, O 点的振速可表示为

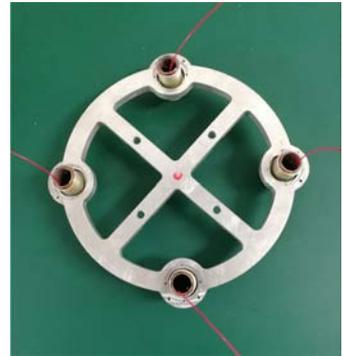
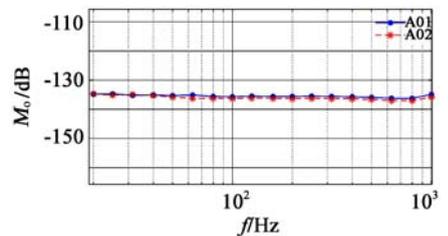
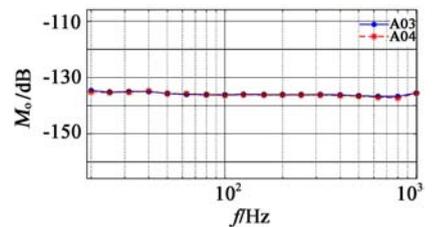


图5 压差式矢量水听器实物照片



(a) 第一组



(b) 第二组

图6 压差式光纤矢量水听器基元声压灵敏度频响曲线

A01~A04 为传感基元编号, 两两组成一个维度的压差式光纤矢量水听器。从图中可以看出, 基元灵敏度起伏小于等于 ± 1.0 dB, 频带内平均灵敏度为 -136.1 dB。

分别完成了二维压差式光纤矢量水听器灵敏度测试和指向性测试。其灵敏度频响如图 7 所示, 将测得的基元灵敏度 -136.1 dB, 代入理论公式(1)得到理论值。理论与测试结果表明, 实验结果与理论值较吻合。

在 500 Hz 下测得该矢量水听器的指向性如图 8 所示, 从图中可知其具备优异的指向性, 凹点深度大于等于 35.3 dB, 轴向最大值不对称性小于等于 0.5 dB。

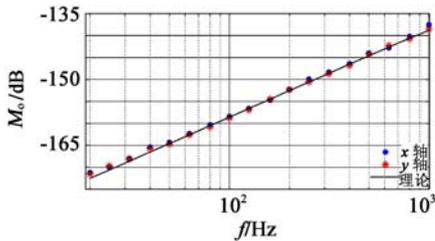


图 7 压差式光纤矢量水听器灵敏度频响曲线

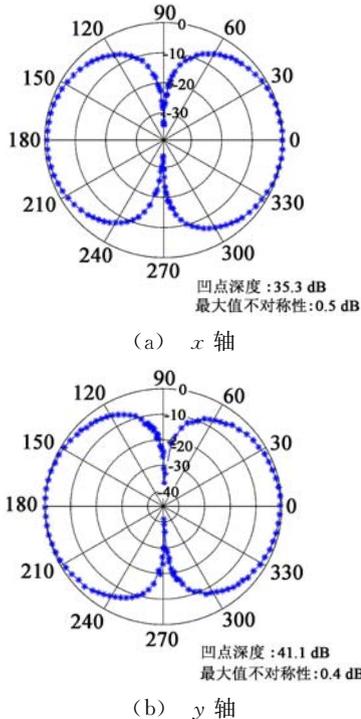


图 8 500 Hz 下矢量水听器指向性图

3 总结

本文系统地阐述了压差式光纤矢量水听器的工作原理并对影响其灵敏度的因素进行了详细分析,

结果表明压差式光纤矢量水听器灵敏度随着声压传感基元的灵敏度和间距的增加而增加, 在此基础上进行了三维压差式光纤矢量水听器的设计, 最后研制了基元间距 $D = 0.18$ m、基元平均灵敏度 $M_0 = -136.1$ dB 的二维压差式光纤矢量水听器样品, 并进行了性能指标测试。测试结果表明, 在 20 ~ 1 000 Hz 频段内, 压差式光纤矢量水听器的声压灵敏度与理论计算结果基本吻合, 500 Hz 下的凹点深度大于 35.0 dB, 最大值不对称性不大于 0.5 dB。

参考文献:

- [1] 吴祥兴. 超低频矢量水听器技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005: 1-2.
Wu Xiangxing. Research on intrasonic vector hydrophone[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005: 1-2.
- [2] 陈丽洁, 张鹏, 徐兴烨, 等. 矢量水听器综述[J]. 传感器与微系统, 2006, 25(6): 5-8.
Chen Lijie, Zhang Peng, Xu Xingye, et al. Overview of vector hydrophone[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2006, 25(6): 5-8.
- [3] 孙贵青, 李启虎, 杨秀庭, 等. 新型光纤水听器和矢量水听器[J]. 物理, 2006, 35(8): 645-653.
Sun Guiqing, Li Qihu, Yang Xiuting, et al. A novel fiber optic hydrophone and vector hydrophone[J]. Physics, 2006, 35(8): 645-653.
- [4] 康崇, 张敏, 陈洪娟, 等. 薄壁圆柱壳体压差式光纤矢量水听器[J]. 中国激光, 2008, 35(8): 1214-1219.
Kang Chong, Zhang Min, Chen Hongjuan, et al. Pressure optical fiber vector hydrophone made of thin-walled cylindrical shell[J]. Chinese J. Lasers, 2008, 35(8): 1214-1219.
- [5] 孙贵青, 李启虎. 声矢量传感器研究进展[J]. 声学学报, 2004, 29(6): 481-490.
Sun Guiqing, Li Qihu. Process of study on acoustic vector sensor[J]. Acta Acoustica, 2004, 29(6): 481-490.
- [6] 陈丽洁. 微型矢量水听器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006: 1-2.
Chen Lijie. Research on micro vector hydrophone[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006: 1-2.
- [7] 惠俊英, 李春旭, 梁国龙, 等. 声压和振速信息联合信号处理抗相干干扰[J]. 声学学报, 2000, 25(5): 389-394.
Hui Junying, Li Chunxu, Liang Guolong, et al. Signal processing using pressure and velocity information to anti coherence of acoustic field[J]. Acta Acoustica, 2000, 25(5): 389-394.
- [8] Bucaro J A. Fiber optic hydrophone[J]. J. of Acoust. Soc. of America, 1977, 62(5): 1302-1304.
- [9] Lv Wenlei, Pang Meng, Shi Qingping, et al. Study on fiber-optic gradient hydrophone based on interferometer[J]. Proc. SPIE, 2008, 7156: 10.1117/112.805496.

(下转第 181 页)

结构解耦四质量块微陀螺仪的设计与制备

李敏阳, 张卫平, 谷留涛, 刘朝阳, 田梦雅

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院 微纳电子学系, 微米/纳米加工技术国家级
重点实验室, 薄膜与微细技术教育部重点实验室, 上海 200240)

摘要: 提出了一种新型的结构解耦四质量块陀螺仪的结构设计以及制备方法。采用梳齿电极的设计和推挽法消除了静电驱动力的二倍频分量, 并对折叠梁结构进行仿真分析和优化, 有效地实现了对驱动和检测模态的结构解耦。针对陀螺仪的结构, 设计了可行的工艺方案并进行实际加工, 采用 SOI 和阳极键合工艺, 最终制作出四质量块陀螺仪样品。仿真得到驱动和检测模态的谐振频率差为 7 Hz, 表明其结构的高度对称性。谐波分析下陀螺仪最大位移为 1 290 nm, 驱动框架最大位移差为 60.75 nm, 检测框架最大位移为 305.24 nm, 取得了理想的解耦效果。

关键词: 结构解耦; 四质量块; 阳极键合; SOI; 仿真分析

中图分类号: V241.5 **文章编号:** 1001-5868(2020)02-0177-05

Design and Fabrication of Structure-decoupled Quadruple Mass MEMS Gyroscope

LI Minyang, ZHANG Weiping, GU Liutao, LIU Zhaoyang, TIAN Mengya

(National Key Laboratory of Science and Technology on Micro/Nano Fabrication, Key Laboratory for Thin Film and Microfabrication of Ministry of Education, Department of Micro and Nano Electronics, School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, CHN)

Abstract: A new structure design and preparation method of structure-decoupled quadruple mass gyroscope are proposed. Design of comb electrode and push-pull method are used to eliminate the second harmonic component of the electrostatic driving force, and the structure of folding beam is simulated, analyzed and optimized to effectively realize the structural decoupling of drive mode and sense mode. According to the structure of the gyroscope, a feasible process plan was designed and the practical processing was carried out. Samples of the quadruple mass gyroscope were finally made by using SOI and anode bonding process. Simulation results show that the resonant frequency difference between drive mode and sense mode is 7 Hz, which means the structure is highly symmetrical. Through the harmonic analysis, the maximum displacement of gyroscope is 1 290 nm, the maximum displacement difference of driving frame is 60.75 nm, and the maximum displacement of detection frame is 305.24 nm, which means that the ideal decoupling effect is obtained.

Key words: structure decoupling; quadruple mass; anode bonding; SOI; simulation analysis

收稿日期: 2019-11-26.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61574093); 预研基金项目(614280504010317, 6140863020202); 上海专业技术服务平台项目(19DZ2291103); 教育部新世纪优秀人才支撑计划项目(NCET-10-0583).

0 引言

近年来,微半球陀螺仪逐渐成为惯性领域的研究热点^[1-3],然而其对制造工艺的要求较高,如高温下的吹玻璃或者 3D 硅微工艺,均成本较高、挑战性大。

目前市场上应用较多的线振动陀螺仪工艺简单、成本低,然而,单质量块陀螺仪的抗共模干扰能力低,双质量块陀螺仪虽然有很高的环境鲁棒性,但是在驱动和检测模态上的对称性不足。四质量块硅微陀螺仪同时具有单质量块结构的优良特性,以及双质量块结构的抗共模干扰能力,因而具有很好的发展前景。加州大学 Shkel 课题组^[4-9]设计的四质量块陀螺仪由于结构的高度对称性,可直接测量旋转角度,消除了传统的速率模式 MEMS 陀螺仪的带宽和动态范围限制。该技术具有可使线振动硅微机械陀螺仪用于惯性制导的潜力。

本文利用二自由度和同步耦合杠杆机构的设计,提出了结构解耦的四质量块陀螺仪,并采用传统的 SOI 和阳极键合工艺制作了边长为 8 mm 的陀螺仪芯片。

1 基本结构与工作原理

1.1 基本结构

图 1 所示为四质量块微陀螺仪的主要结构,由四质量块谐振子和梳齿电极等组成。

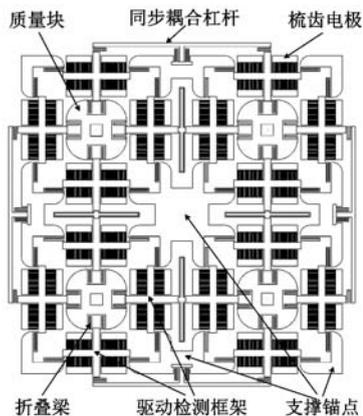


图 1 四质量块微陀螺仪结构图

四质量块谐振子由 9 个支撑锚点、16 个驱动检测框架、4 个质量块、4 个同步耦合杠杆和多个折叠梁组成。4 个质量块中心部分分别进行了挖空处理以降低耦合机构的承受应力。为了实现二自由度的机械结构,每个质量块的周围设计有 4 个十字形驱

动检测框架,驱动检测框架的一端通过折叠梁与质量块相连,另一端与支撑锚点相连。折叠梁刚度的合理选择以及二自由度的结构设计有效地实现了驱动与检测模态之间的模态解耦。同时,相邻质量块的驱动检测框架之间通过同步耦合杠杆和框架梁连接,形成质量块之间的机械同步,使得驱动和检测模态具有高度的对称性,从结构上减小了陀螺仪的频率分裂。梳齿电极有 64 个,每个驱动检测框架周围有 4 个梳齿电极,每个电极上有 13 个等间隙分布的梳齿。

1.2 工作原理

为了消除梳齿电极驱动产生的二倍频相,驱动检测框架的电极都采用推挽法的设计,如图 2 所示。

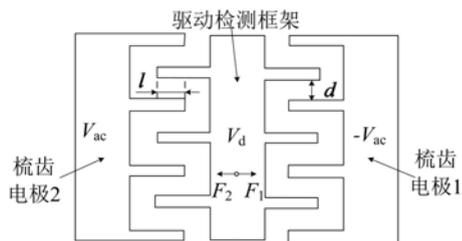


图 2 推挽法示意图

图 2 中, V_{ac} 是指施加在梳齿电极 2 上的幅值为 V_a 、频率为 ω 的正弦交流电压, V_d 是指施加在驱动检测框架上的直流偏置电压, l 为相对梳齿长度, d 为梳齿间隙, F_1, F_2 分别为梳齿电极 1、梳齿电极 2 与驱动检测框架之间的静电力。忽略齿宽引起的平行板电容,于是驱动检测框架与梳齿电极之间的电容为

$$C_{comb}(x) = 2n\epsilon \frac{(l+x)h}{d} \quad (1)$$

式中, ϵ 为极板间电介质的介电常数, h 为器件的厚度, $2n$ 为驱动检测框架上梳齿的个数, x 为梳齿的切向位移,可见梳齿电容的大小与受迫振动的位移成正比。

$$F_1 = \frac{1}{2} \frac{\partial C_{comb}(x)}{\partial x} (V_d + V_a \sin \omega t) = \frac{\epsilon nh}{d} (V_d + V_a \sin \omega t)^2 \quad (2)$$

$$F_2 = \frac{1}{2} \frac{\partial C_{comb}(x)}{\partial x} (V_d - V_a \sin \omega t) = \frac{\epsilon nh}{d} (V_d - V_a \sin \omega t)^2 \quad (3)$$

因此,采用推挽法产生的静电驱动力可计算为

$$F_{comb} = F_1 - F_2 = \frac{4\epsilon nh}{d} V_d V_a \sin \omega t \quad (4)$$

由上式可以看出,二倍频分量被消除,静电力与所加交流电同频,并且当梳齿参数确定时,推挽法产生的静电力只与所加电压有关,且其大小与电压幅值成正比,不受电容间隙变化影响。

按照推挽法的驱动方式,在驱动框架及其周围的四个梳齿电极上施加合适的电压,驱动框架产生谐振并通过折叠梁带动质量块振动。当四质量块陀螺仪感应到外部转角的输入时,质量块在科里奥利力的作用下产生检测模态振动,方向与驱动模态成 90° 。模态解耦的结构设计,极大地降低了驱动和检测模态的耦合效应。为了更直观地理解和验证四质量块陀螺仪的工作模式,通过COMSOL有限元仿真模拟了四质量块的驱动和检测模态,结果如图3所示。

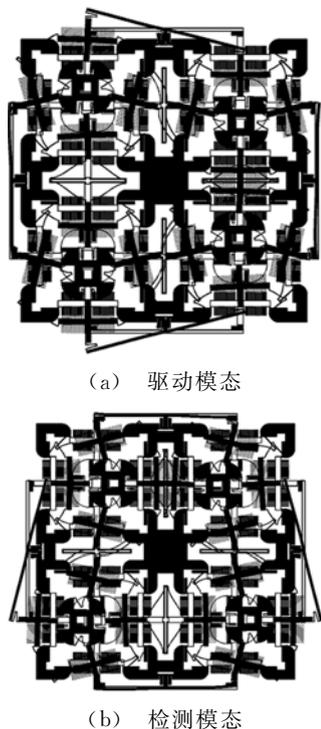


图3 四质量块微陀螺仪工作模式

2 结构解耦分析与优化

驱动与检测之间的模态耦合对陀螺仪的零偏有很大的影响,一般来说,解耦可以从结构和电路两方面来实现。本文针对折叠梁对其结构和刚度配比进行了仿真分析,得到了较为理想的解耦效果。

2.1 折叠梁刚度分析

折叠梁的基本结构如图4所示。

折叠梁厚度为 h ,根据能量法,可推导出折叠梁在 x 和 y 方向上的刚度分别为

$$k_x = \frac{Ehb^3}{L_a^2(27L_a + 6L_b)} \quad (5)$$

$$k_y = \frac{Ehb^3(2L_b + 3L_a)}{4L_b^2(6L_a^2 + 6L_aL_b + L_b^2)} \quad (6)$$

其中, h 值由SOI片设备层厚度而定,为 $45\ \mu\text{m}$; (111)晶向硅的 E 为 $190\ \text{GPa}$;考虑到硅的许用应力, b 值设定为 $16\ \mu\text{m}$, L_a 值为 $32\ \mu\text{m}$ 。这里主要分析 L_b 对折叠梁刚度的影响。

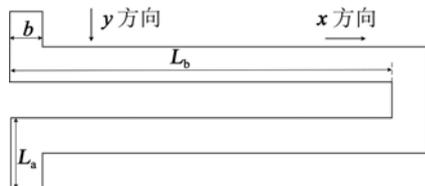


图4 折叠梁结构示意图

如图5所示,随着 L_b 的增大,刚度比稳步增大,然而 k_x 和 k_y 值的变化在 L_b 大于 $150\ \mu\text{m}$ 之后逐渐平缓,继续增大 L_b 值对折叠梁的刚度影响不大。再考虑到陀螺仪的整体尺寸,初步设定 L_b 的值为 $176\ \mu\text{m}$ 。

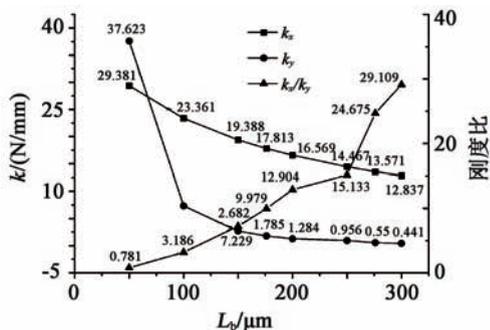


图5 L_b 与折叠梁刚度关系曲线

2.2 折叠梁解耦仿真

上面分析了 L_b 对折叠梁刚度配比的影响,理论上 k_x 越大, k_y 越小,二自由度结构下折叠梁的解耦效果越好。为了验证四质量块陀螺仪实际的解耦效果,对不同 L_b 的四质量块结构进行建模,并通过COMSOL有限元仿真软件对不同模型进行模态分析和谐响应分析,得到驱动和检测模态的频率分别为 $38\ 653$ 和 $38\ 660\ \text{Hz}$,然后按照之前所述的推挽法在驱动电极和谐振子上分别施加幅值为 $5\ \text{V}$ 的正弦交流电和直流偏置电压,得到驱动检测框架的位移,如图6所示。

图6中,驱动框架的位移选取的是其最大、最小位移的差值,以此来反映驱动框架在谐振时的平行性,其值越小则梳齿电极电容间隙的变化越小,静电

驱动力越稳定,在 L_b 为 $176\ \mu\text{m}$ 时,其值为 $60.75\ \text{nm}$,可以近似地认为驱动框架没有发生旋转,没有额外的因电容间隙变化产生的静电力。质量块和检测框架选取的是其最大位移,从图中可以看出, L_b 对质量块的最大位移影响不大,而检测框架的位移变化明显,解耦效果随 L_b 的增大不断增强,但是在 L_b 大于 $150\ \mu\text{m}$ 之后,变化的梯度开始减小,增大 L_b 带来的解耦收益下降,这一点和之前折叠梁刚度分析的结果一致。

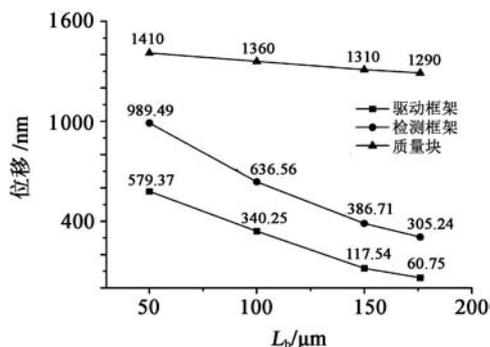


图6 L_b 与谐响应分析位移关系曲线

综合以上分析,在考虑器件尺寸的前提下,为了获得较好的解耦效果, L_b 的值设计为 $176\ \mu\text{m}$,对应折叠梁的刚度 k_x, k_y 分别为 12.904 和 $1.785\ \text{N/mm}$ 。模态分析得到驱动和检测模式的频率分别为 $38\ 653$ 和 $38\ 660\ \text{Hz}$,频率分裂的值为 $7\ \text{Hz}$,陀螺仪具有较高的对称性。谐响应分析下质量块最大位移为 $1\ 290\ \text{nm}$,驱动框架最大位移差为 $60.75\ \text{nm}$,检测框架最大位移为 $305.24\ \text{nm}$,达到了比较好的结构解耦效果。

3 工艺制备

考虑到高深宽比的问题,器件的厚度不能太大,采用SOI工艺是很好的选择。然而,二自由度和推挽法的设计使得四质量块陀螺仪在结构上有较多小面积的锚点,因此,在工艺上,本文采用了SOI和阳极键合相结合的MEMS工艺,如图7所示。

其中,选购的SOI片大小为 $10.16\ \text{cm}$ (4 inch),包括 $100\ \mu\text{m}$ 厚的硼掺杂p型器件层、 $5\ \mu\text{m}$ 厚的二氧化硅埋氧层以及 $485\ \mu\text{m}$ 厚的处理层。玻璃片是 $500\ \mu\text{m}$ 厚的肖特BF33。具体的工艺步骤如下:首先干法刻蚀SOI片器件层,刻蚀深度为 $5\ \mu\text{m}$,制作出锚点支撑结构(图7(a));将刻蚀后的SOI片器件层表面与玻璃片进行阳极键合(图7(b));对键合后

的SOI片处理层进行干法刻蚀,去除 $485\ \mu\text{m}$ 厚的SOI底层硅,并用BOE湿法刻蚀埋氧层上 $5\ \mu\text{m}$ 厚的二氧化硅(图7(c));在刻蚀后的SOI片表面先后溅射 $15\ \text{nm}$ 的铬和 $300\ \text{nm}$ 的金(图7(d));然后,用铬、金腐蚀液依次湿法腐蚀出电极pad层(图7(e));最后深反应离子刻蚀 $45\ \mu\text{m}$,释放出陀螺仪结构,完成器件加工(图7(f))。陀螺仪裸芯片的局部和整体电镜图如图8,显示了梳齿电极质量块的结构细节。

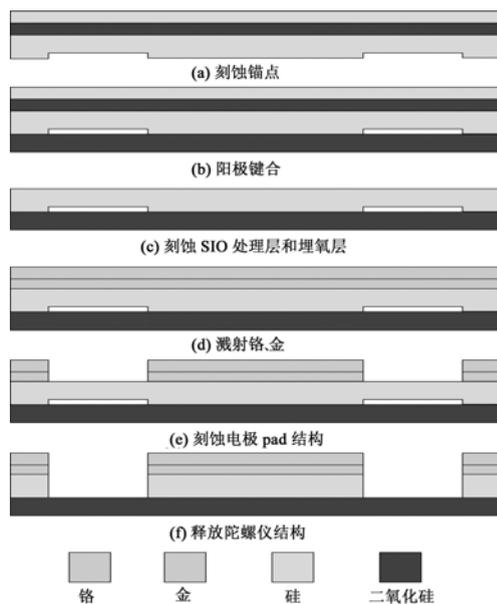


图7 四质量块陀螺仪加工流程

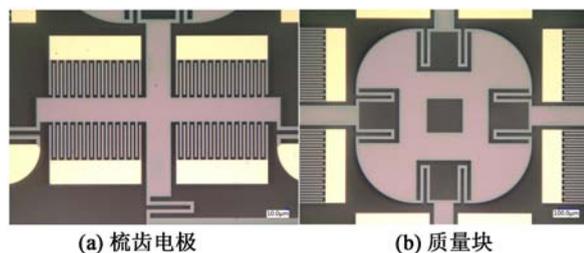


图8 陀螺仪裸芯片电镜图

4 总结

本文主要介绍了具有高度对称性的结构解耦四质量块MEMS陀螺仪,简述了其基本结构,着重介

绍了其结构解耦和推挽法驱动的原理。并针对折叠梁结构进行了大量的仿真分析,得到了解耦效果比较理想的结构参数和仿真结果。谐响应分析下质量块最大位移为 1 290 nm, 驱动框架最大位移差为 60.75 nm, 检测框架最大位移为 305.24 nm, 达到了比较好的结构解耦效果。此外, 经过不断的 MEMS 工艺实验, 最终基于 SOI 和阳极键合成功制备了陀螺仪样品。

参考文献:

- [1] Rozelle D M, Meyer A D, Trusov A A, et al. Milli-HRG inertial sensor assembly—a reality [C]//2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), 2018; 20-23.
- [2] Wang X, Xue J, Wang Q. The error analysis of hemispherical resonator gyro based on a vibration model[C]// 2017 IEEE 2nd Adv. Information Technol., Electronic and Automation Control Conf., 2017; 2158-2162.
- [3] Z Xiaogang, T Jiwen, S Bin, et al. Application of a new denoising algorithm in hemispherical resonant gyro vibration signal processing[C]// 2017 3rd IEEE Inter. Conf. on Control Science and Systems Engin., 2017; 535-538.
- [4] Askari S, Asadian M H, Shkel A M. Retrospective correction of angular gain by virtual carouseling in MEMS gyroscopes [C]// 2019 IEEE Inter. Symposium on Inertial Sensors and Systems, 2019; 1-4.
- [5] Askari S, Asadian M H, Kakavand K, et al. Vacuum sealed and getter activated MEMS quad mass gyroscope demonstrating

better than 1.2 million quality factor[C]// 2016 IEEE Inter. Symp. on Inertial Sensors and Systems, 2016; 142-143.

- [6] Asadian M H, Askari S, Shkel A M. An ultra-high vacuum packaging process demonstrating over 2 million Q-factor in MEMS vibratory gyroscopes[J]. IEEE Sensors Lett., 2017, 14(3): 1-1.
- [7] Sina Askari, Mohammad H, Asadian Kasra Kakavand, et al. Vacuum sealed and getter activated MEMS quad mass gyroscope demonstrating better than 1.2 million quality factor [C]// IEEE Inter. Symp. on Inertial Sensors and Systems, 2016, 13(1): 75-82.
- [8] Trusov A A, Atikyan G, Rozelle D M, et al. Flat is not dead; Current and future performance of Si-MEMS quad mass gyro (QMG) system[C]// Proc. 2014 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, 2014; 252-258.
- [9] Trusov A A, et al. Force rebalance, whole angle and self-calibration mechanization of silicon MEMS quad mass gyro [C]// 2014 Inter. Symp. on Inertial Sensors and Systems, 2014; 1-2.

作者简介:

李敏阳(1994—),男,硕士研究生,主要研究方向为微惯性技术;

张卫平(1971—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为先进微型机器人与微型无人机、先进微纳惯性技术、微机电系统、精密仪器、电路控制与嵌入式系统及其集成技术。

E-mail: zwp37@163.com

(上接第 176 页)

- [10] Giallorenzi T G, Bucaro J A, Dandridge A, et al. Optical fiber sensor technology [J]. IEEE Trans. on Microwave Theory and Technique, 1982, 30(4): 472-511.
- [11] Mills G B. Fiber optic gradient hydrophone[D]. Monterey, California: Naval Postgraduate School, 1984: 3-4.
- [12] 沈洪, 罗辉. 光纤水听器传感技术及应用[J]. 传感器世界, 2007, 13(4): 27-29.
- Shen Hong, Luo Hui. The fiber optic hydrophone and its applications[J]. Sensor World, 2007, 13(4): 27-29.
- [13] 倪明. 光纤水听器关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院声学研究所, 2003: 62-66.
- Ni Ming. Investigation of the key technologies of fiber optic hydrophone [D]. Beijing: Acoustic Institute of Chinese Academy of Sciences, 2003: 62-66.
- [14] 运朝青, 罗洪, 胡正良, 等. 应用于拖曳细线阵的光纤水听器研究[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 84-88.
- Yun Zhaoqing, Luo Hong, Hu Zhengliang, et al. Fiber optic hydrophone used for thin line towed array[J]. Acta Optica

Sinica, 2012, 32(12): 84-88.

- [15] 吕文磊, 庞盟, 王利威, 等. 压差式矢量水听器驻波场校准实验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 16(8): 1079-1086.
- Lv Wenlei, Pang Meng, Wang Liwei, et al. Standing wave calibration of a gradient hydrophone [J]. J. of Harbin Engineering University, 2010, 16(8): 1079-1086.
- [16] 熊水东, 王付印, 罗洪, 等. 驻波管测试下压差式光学矢量水听器的改进[J]. 压电与声光, 2012, 34(6): 820-823.
- Xiong Shuidong, Wang Fuyin, Luo Hong, et al. Improvement of fiber-optic gradient hydrophone under standing wave tube measurement method [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2012, 34(6): 820-823.

作者简介:

张滔(1976—),男,湖北利川人,博士,高级工程师,主要从事电子与信息技术研究。

E-mail: zhangtao00760305@163.com

低电压驱动 F-P 腔可调谐滤波器的仿真和设计

任浩杰¹, 侯海港², 朱丽慧¹, 黄清伟²

(1. 上海大学 材料科学与工程学院, 上海 200433; 2. 江苏大学 材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 利用 COMSOL 多物理场有限元软件, 对无孔、圆形孔、正方形孔、菱形孔四种新型折叠梁形桥面结构 Fabry-Perot(F-P)腔可调谐滤波器进行了电压-位移、应力和镜面平整度仿真, 以优选最佳的桥面结构。结果显示, 在相同驱动电压下, 菱形孔桥面的位移最大。同时, 桥面达到相同位移时, 菱形孔桥面所需的驱动电压最小, 并且菱形孔桥面的应力和平整度也能满足滤波器的设计要求。利用 Essential Macleod 软件对优选出的菱形孔桥面结构滤波器进行了滤波性能分析, 结果表明, 滤波器在 3~5 μm 的光谱调谐范围内, 具有良好的滤波效果, 可以满足低电压驱动和宽调谐范围的要求。

关键词: F-P 腔; 可调谐滤波器; 静电驱动; 桥面形状; 仿真

中图分类号: TN713 **文章编号:** 1001-5868(2020)02-0182-05

Simulation and Design of Low Voltage Driven F-P Cavity Tunable Filter

REN Haojie¹, HOU Haigang², ZHU Lihui¹, HUANG Qingwei²

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200433, CHN;

2. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, CHN)

Abstract: In order to select the optimal bridge deck structure, the voltage-displacement, stress and mirror flatness of four new folded beam bridge deck structures of Fabry-Perot(F-P) cavity tunable filters (with no holes, circular holes, square holes and diamond holes) were simulated using the multi-physics finite element COMSOL software. The results show that the displacement of the bridge deck with diamond holes is the largest under the same driving voltage. Meanwhile, the required driving voltage of the bridge with diamond holes is the smallest under the same displacement. The stress and flatness of the bridge with diamond holes can also meet the design requirements of filters. Then the filtering performance of the optimized folded beam bridge deck structure with diamond holes was analyzed by the Essential Macleod software. The results show that its filtering is excellent in the optical spectrum of 3~5 μm tuning range, and can meet the requirements of low driving voltage and wide tuning range.

Key words: F-P cavity; tunable filter; electrostatic drive; bridge shape; simulation

0 引言

Fabry-Perot(F-P)腔可调谐滤波器是一种利用光的干涉, 只准许特定波长的光波通过, 并阻止其他波长的光通过, 对光波连续可调谐的分光器件。目前设计和报道的基于微机电系统(MEMS)技术的可调谐 F-P 滤波器采用静电驱动^[1-5], 通过桥面发生

位移, 改变腔长, 从而对光波长进行调谐, 驱动电极位于 F-P 腔滤波器上下反射镜上。这种基于 MEMS 加工的 F-P 腔可调谐滤波器, 具有小型化、调谐速度快、精确度高、大批量加工成本低等优点^[6], 被广泛应用于光谱仪^[5,7]、光通信^[8-9]、激光器^[10]和传感器^[11-12]等领域, 但是仍然存在一些不足。首先, F-P 可调谐滤波器的调谐范围不够大, 所需要的驱动电压较大, 器件的能耗较高, 而且不利于

之后的集成封装,一定程度上限制了其应用;此外,F-P腔滤波器的建模采用的是简化的物理模型,很少有基于多物理场的仿真。而实际上滤波器的调谐过程为复杂的机电耦合过程,采用简化的物理模型不能准确地反映滤波器实际的调谐过程和滤波效果。

本文提出无孔、圆形孔、正方形孔、菱形孔四种新型折叠梁形桥面结构F-P腔可调谐滤波器,并通过多物理场有限元模拟软件COMOSL对其电压-位移、应力和镜面平整度进行仿真,来模拟可调谐滤波器的实际调谐过程,优选出一种最佳的桥面结构。利用Essential Macleod光学膜系设计软件对新型折叠梁形桥面结构F-P腔可调谐滤波器进行滤波性能分析。最终得到一款基于MEMS技术的新型低电压驱动F-P腔可调谐滤波器。

1 基于MEMS技术的F-P腔可调谐滤波器结构

设计的基于MEMS技术的F-P腔可调谐滤波器结构如图1所示,由桥面和底座组成,中间为空气腔,金属桥墩起支撑作用,上部反射镜镶嵌在桥面上。滤波腔的腔长为 $2.5\ \mu\text{m}$,结构材料采用Al(屈服强度为170 MPa)。当对上部、底部电极施加电压时,在静电力的牵引下,上部反射镜会随着桥面而上下运动,改变滤波器的腔长,进而实现滤波器的调频功能。理想的F-P腔的腔体结构要满足以下几点:(1)可调谐范围大、可覆盖光谱宽;(2)腔体要足够坚固,能够抵抗在调谐过程中产生的应力,不会发生桥臂的断裂和桥面的崩塌;(3)反射镜在调谐过程中有较好的平整度,以保证精确的滤波效果;(4)低电压驱动。与十字形和圆形桥面相比,折叠梁形桥面面积小、结构紧凑、填充因子高。图2(a)为设计的折叠梁形桥面形状,桥面大小为 $80\ \mu\text{m}\times 80\ \mu\text{m}$,像元尺寸为 $120\ \mu\text{m}\times 120\ \mu\text{m}$,中心圆半径为 $50\ \mu\text{m}$,有四个长臂,其尺寸为 $100\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$ 。为了进一步减少驱动电压,实现低电压驱动的目的,在折叠梁形桥面的基础上,另外设计了三种有孔桥面,分别为圆形孔、正方形孔和菱形孔。每个桥臂上都有9个孔,孔的面积都为 $36\ \mu\text{m}^2$,其中正方形边长为 $6\ \mu\text{m}$,圆形孔直径为 $6.77\ \mu\text{m}$,菱形孔的对角线长为 $8\ \mu\text{m}\times 9\ \mu\text{m}$ 。圆形、菱形、正方形孔的桥面结构形状分别如图2(b),(c),(d)所示。

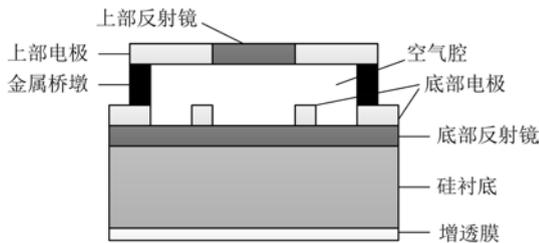


图1 F-P腔可调谐滤波器结构图

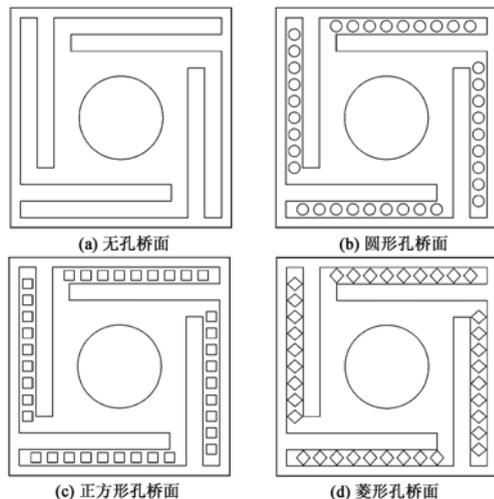


图2 四种桥面的结构形状

2 四种桥面结构的仿真

2.1 电压-位移分析

滤波器的透射中心波长 λ 取决于F-P滤波器的腔长 l ,式(1)为两者之间的关系^[13]:

$$\lambda = 2nl \cos \theta / m \quad (1)$$

式中, n 为折射率, θ 为入射角, m 为干涉级次。当腔内介质为空气时 $n=1$,取 $\theta=0^\circ$, $m=1$,此时 $\lambda=2l$ 。滤波范围为 $3\sim 5\ \mu\text{m}$,腔长 l 变化范围为 $1.5\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 。

通过施加驱动电压来实现桥面的位移,可以改变滤波器的腔长。当腔长从 $2.5\ \mu\text{m}$ 变化至 $1.5\ \mu\text{m}$,相应桥面位移为 $0\sim 1.0\ \mu\text{m}$,腔长随桥面位移变化的具体数值如表1所示。图3为 $1\sim 14\ \text{V}$ 驱动电压下四种桥面结构的电压-位移仿真图。可见当电压较小时,四种桥面的位移都非常小,腔长基本没有发生变化,无法实现滤波器调谐功能。随着驱动电压的增大,四种桥面的位移增加。从图4的 $14\ \text{V}$ 电压下四种桥面结构位移的仿真结果可以看出,最大位移出现在桥面处。并且,圆形孔、正方形孔和菱形孔三种有孔桥面的位移都大于无孔桥面,其中菱形孔桥面位移最大,达到 $0.42\ \mu\text{m}$ 。

表 1 给出了四种桥面位移 $0 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 所需的驱动电压。当桥面位移 d 为 $1.0 \mu\text{m}$ 时,相应的腔长变化到 $1.5 \mu\text{m}$,而无孔、圆形孔、正方形孔、菱形孔桥面所需的驱动电压 V 分别为 24.7, 19.7, 19.8 和 18.4 V。可见要实现 F-P 腔可调谐滤波器调谐性能,菱形孔桥面所需的驱动电压最小。

表 1 四种形状桥面位移 $0 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 时相应的腔长值及所需的驱动电压

$d/\mu\text{m}$	$l/\mu\text{m}$	V/V			
		无孔	圆形孔	正方形孔	菱形孔
0	2.5	0	0	0	0
0.1	2.4	100	8.0	8.0	7.6
0.2	2.3	13.8	11.3	11.0	10.4
0.3	2.2	16.4	13.3	13.2	12.3
0.4	2.1	18.3	14.8	14.7	13.7
0.5	2.0	19.8	16.0	15.9	14.8
0.6	1.9	21.0	16.9	16.9	15.8
0.7	1.8	22.1	17.8	17.8	16.5
0.8	1.7	23.1	18.5	18.5	17.2
0.9	1.6	23.9	19.2	19.2	17.9
1.0	1.5	24.7	19.7	19.8	18.4

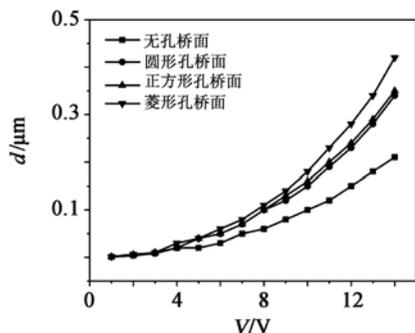
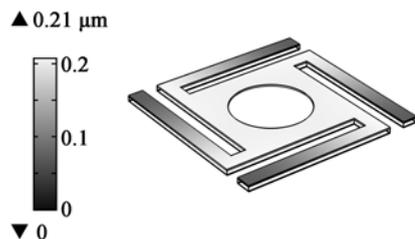
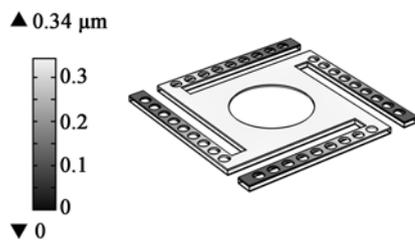


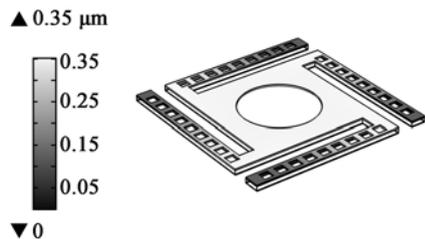
图 3 四种桥面结构电压与位移的关系图



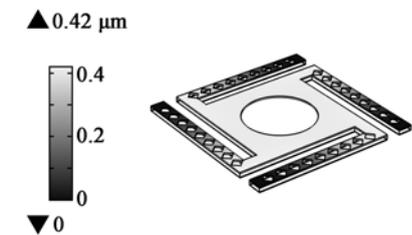
(a) 无孔桥面



(b) 圆形孔桥面



(c) 正方形孔桥面

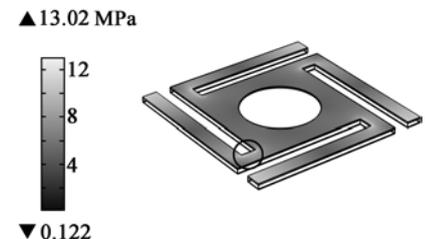


(d) 菱形孔桥面

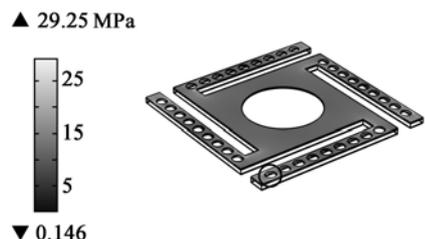
图 4 在 14 V 驱动电压下四种桥面结构的位移

2.2 应力分析

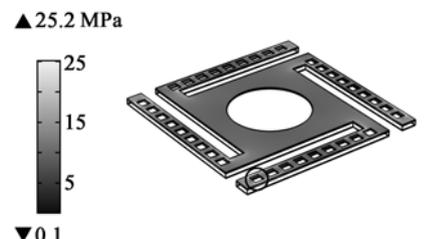
F-P 滤波器在调谐过程中要保证平稳运行,产生的应力最大值不能超过材料的可承受范围,否则会发生桥腿的断裂和桥面的崩坍,对滤波器造成损坏。图 5 为 14 V 驱动电压下四种桥面的应力分布仿真图。从图中可以看到,无孔桥面的应力最大值出现在支撑桥臂和桥面的连接处,如图 5(a) 所示。



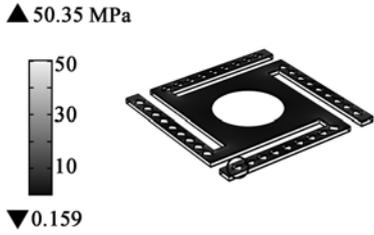
(a) 无孔桥面应力分布图



(b) 圆形孔桥面应力分布图



(c) 正方形孔桥面应力分布图



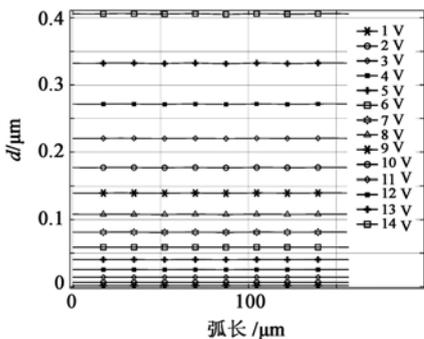
(d) 菱形孔桥面应力分布图

图5 在14 V驱动电压下四种桥面结构应力分布

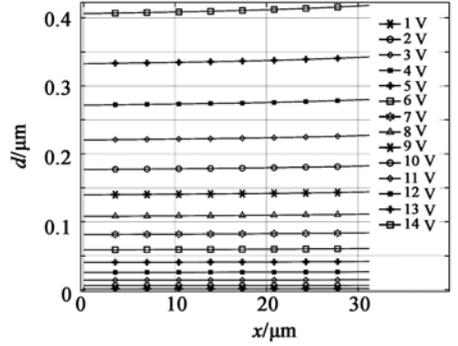
由于在桥臂上挖孔会导致应力集中,有孔桥面的应力最大值出现在桥臂挖孔边缘处,如图5(b)~(d)所示。无孔、圆形孔、正方形孔、菱形孔四种桥面的应力最大值分别为13.02, 29.25, 25.17和50.35 MPa。在孔的面积同为 $36 \mu\text{m}^2$ 时,正方形孔、圆形孔、菱形孔的尺寸依次增大,由此产生的应力集中相应增加,其中菱形孔产生的应力集中最严重。此外,在相同电压下菱形孔桥面位移最大,进一步增加了菱形孔桥面的应力。

2.3 镜面平整度分析

滤波器在调谐过程中,各点位置所受力不同,使得各点的位移也不相同,导致桥面不平整,进而使得镶嵌在桥面中心圆位置上的反射镜也不平坦,影响滤波器的滤波效果。通过对不同电压下四种桥面中心圆平整度的仿真,发现当电压较小时,四种桥面位移比较小,圆周方向和径向的各点位移相差无几。随着电压增加,桥面各点位移增加,其中菱形孔桥面位移变化最大。图6给出了不同驱动电压下菱形孔桥面中心圆的平整度变化情况。图7对比了14 V驱动电压下四种桥面结构中心圆平整度变化。四种桥面圆周方向各点的位移相差不大,而径向相差比较明显,其中菱形孔桥面位移相差最大。表2给出了四种桥面圆周方向和径向上位移最大值与最小值的差值。根据式(2)可以计算四种桥面的径向倾斜角 θ :

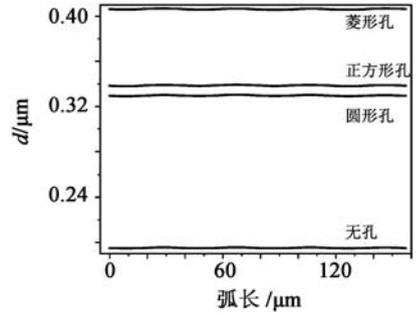


(a) 圆周方向

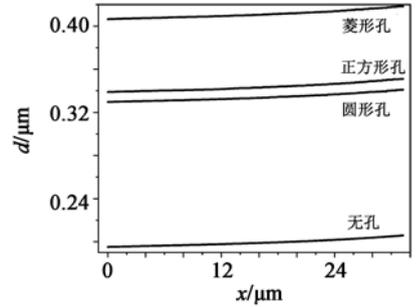


(b) 径向

图6 不同驱动电压下菱形孔桥面结构中心圆平整度变化情况



(a) 圆周方向



(b) 径向

图7 在14 V驱动电压下四种桥面结构中心圆平整度变化

$$\theta = \arctan[(d_{\max} - d_{\min})/x] \quad (2)$$

式中, d_{\max} 和 d_{\min} 分别为桥面位移的最大值和最小值, x 为径向长度。

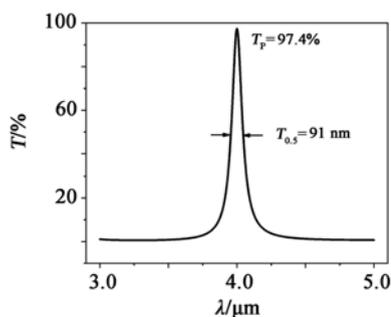
计算得到无孔、圆形孔、正方形孔、菱形孔四种桥面径向倾斜角分别为 0.0195° , 0.0209° , 0.0216° 和 0.0227° ,可见菱形孔的桥面的径向倾斜角最大。

表2 四种桥面结构圆周方向与径向位移的最大值与最小值的差值以及径向倾斜角

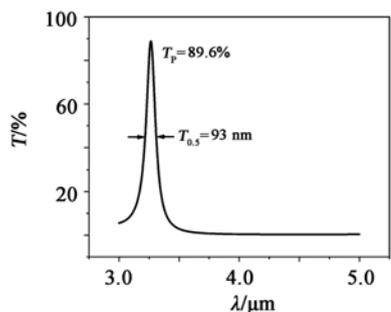
桥面结构	$(d_{\max} - d_{\min})/\mu\text{m}$		$\theta/(\circ)$
	圆周方向	径向	
无孔	0.000 93	0.010 64	0.019 5
圆形孔	0.001 25	0.011 40	0.020 9
正方孔	0.001 25	0.011 80	0.021 6
菱形孔	0.001 33	0.012 24	0.022 7

3 优选的桥面结构的滤波分析

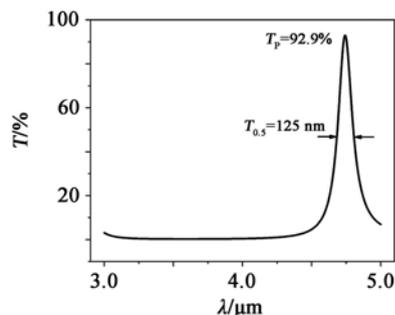
通过以上分析发现,在相同驱动电压下,菱形孔桥面的位移最大,可以实现大的调谐范围。同时,桥面达到相同位移时,菱形孔桥面所需的驱动电压最小,能够满足滤波器低电压调谐的要求。菱形孔桥面可达到的最大应力仅为 50.35 MPa,远小于选用材料 Al 的屈服强度 170 MPa。同时,菱形孔桥面的倾斜非常小,平整度较好,不会对滤波器的调谐产生影响。综合考虑,我们选定菱形孔桥面作为 F-P 腔可调谐滤波的桥面结构。为实现在宽光谱范围内的连续可调谐滤波特性,上述新型菱形孔折叠梁形桥面结构 F-P 腔可调谐滤波器的上部反射镜设计为 Ge-Al₂O₃-Ge-Al₂O₃,下部反射镜设计为 Ge-Al₂O₃-Ge,中间为空气腔,并在 Si 衬底的背部设计镀上一层 Al₂O₃ 增透膜。在 Essential Macleod 光学膜系设计软件中输入各个膜层参数进行滤波性能的分析,结果如图 8 所示。图 8(a)为滤波器腔长在 2 μm 时的滤波曲线,中心波长为 4 μm,半波宽 $T_{0.5}$ 为 91 nm,中心波长的峰值透过率 T_p 达到 97.4%,其他波段的透射率极低,具有较好的滤波效果。要实现 3~5 μm 光谱的调谐范围,要求器件的腔长能在 1.5~2.5 μm 变化,并且在此范围内滤波效果要好。图 8(b)和(c)分别为腔长在 1.5 和 2.5 μm 变化时的滤波曲线,中心波长的峰值透过率分别为 89.6%



(a) 腔长 2 μm



(b) 腔长 1.5 μm



(c) 腔长 2.5 μm

图 8 菱形孔桥面 F-P 腔可调谐滤波器的滤波曲线

和 92.9%,半波宽分别为 93 和 125 nm,器件具有较好的滤波性能。

通过以上对无孔、圆形孔、正方形孔、菱形孔四种桥面结构的仿真分析可知,所设计的菱形孔桥面结构的 F-P 腔可调谐滤波器能够满足低电压驱动和宽调谐范围的要求。

4 结论

(1)当施加的驱动电压较小时,无孔、圆形孔、正方形孔、菱形孔四种桥面的位移都非常小。随着驱动电压的增大,四种桥面的位移增加。圆形孔、正方形孔和菱形孔三种有孔桥面的位移都大于无孔桥面,其中菱形孔桥面位移最大,可实现大调谐范围。

(2)在相同驱动电压下,菱形孔桥面的位移最大。桥面达到相同位移时,菱形孔桥面所需的驱动电压最小,能够满足滤波器低电压调谐的要求。并且菱形孔桥面的应力和平整度也能满足滤波器的设计要求。

(3)菱形孔桥面在整个 3~5 μm 滤波范围内都具有良好的滤波效果。在腔长为 2 μm 时,中心波长为 4 μm,半波宽为 91 nm,中心波长的峰值透过率达 97.4%,其他波段的透射率极低。在要求的腔长变化极值为 1.5 和 2.5 μm 时,中心波长的峰值透过率分别为 89.6%和 92.9%,半波宽分别为 93 和 125 nm。本文设计的菱形孔桥面 F-P 腔可调谐滤波器具有低电压驱动、宽光谱调谐范围与高滤波性能等特性。

参考文献:

- [1] Saari H, Mannila R, Antila J, et al. Miniaturised gas sensor using a micromachined Fabry-Perot interferometer [J]. Preparing for the Future, 2000, 10(3): 4-5.

(下转第 216 页)

影响谐振式光纤陀螺精细度的因素分析

郭丽君, 王田瑞, 何家杰, 潘晨浩

(长春理工大学 理学院 光电信息科学与技术系, 长春 130022)

摘要: 分析了偏振波动噪声和背散噪声对谐振式光纤陀螺精细度的影响。搭建了光纤环形谐振环测试系统, 实验结果表明: 通过使用偏振控制器和保偏光源抑制偏振波动噪声, 能使光纤谐振环的特性参数精细度由 64.67 提高到 101, 谐振深度由 0.503 3 提高到 0.712。并且测得光纤谐振腔中背向散射光与主信号强度之比为 0.026 7%。研究结果可为谐振式光纤陀螺的小型化和高灵敏度提供理论参考。

关键词: 谐振式光纤陀螺; 精细度; 偏振波动; 背向散射

中图分类号: TN629.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-5868(2020)02-0187-04

Study on Factors Influencing the Finesse of Resonator Fiber Optic Gyro

GUO Lijun, WANG Tianrui, HE Jiajie, PAN Chenhao

(Department of Optoelectronics Information Science and Technology, School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, CHN)

Abstract: The influence of polarization fluctuation noise and backscattering noise on the fineness of the resonant fiber optic gyro was analyzed. And an optical fiber ring resonance ring test system was set up. The experimental results show that, by using a polarization controller and a polarization maintaining light source to suppress polarization fluctuation noise, the fineness and the resonance depth of the characteristic parameters of the fiber resonance ring can be increased from 64.67 to 101, and from 0.503 3 to 0.712, respectively. And the ratio of the backscattered light to the main signal intensity in the fiber resonator was measured to be 0.026 7%. The research results can provide a theoretical reference for the miniaturization and high sensitivity of the resonant fiber optic gyroscope in the future.

Key words: resonator fiber optic gyro; finesse; polarization fluctuation; backscattering

0 引言

光纤陀螺是基于光学 Sagnac 效应产生的谐振频率差来测量旋转角速度的一种新型光学传感器^[1], 在导航和制导领域占有重要的地位。光纤陀螺又分为干涉式光纤陀螺和谐振式光纤陀螺^[2-3], 基于谐振原理的谐振式光纤陀螺是一个频率感应装置, 一个环长为 5~10 m 的谐振式光纤陀螺的极限

灵敏度就可以达到一个环长为 1 km 的干涉式光纤陀螺的极限灵敏度。与干涉式光纤陀螺相比, 谐振式光纤陀螺具有光纤长度短、波长稳定性高、动态范围大等优点。正是由于这些优点使得谐振式光纤陀螺成为新一代惯性传感器的代表, 并且被广泛研究^[4]。在谐振式光纤中, 特性参数精细度 F 的大小直接影响陀螺的性能, 其值越大陀螺的极限灵敏度越高, 但在实际测试中, 精细度 F 受各种噪声, 如光源相干性、瑞利背向散射噪声、光纤中偏振波动和温度波动引起的噪声、光学克尔效应引起的噪声等的影响, 使得测量的精细度 F 偏离理论计算值。

本文分析了偏振波动噪声和背散噪声对谐振式

收稿日期: 2019-03-27.

基金项目: 吉林省科技发展计划项目 20180201024SF); 长春理工大学青年基金项目 (000590/XQNJJ-2015-02); 吉林省教育厅“十三五”项目 (JJKH20181087KJ, JJKH20181126KJ).

光纤陀螺的精细度 F 的影响。同时,搭建了光纤谐振环测试系统,通过偏振控制器和保偏光源抑制偏振波动噪声,可使光纤谐振环精细度 F 和谐振深度达到 101 和 0.712。对系统进行了背向散射噪声测试,测得了光纤谐振腔中背向散射光与主信号强度之比为 0.0267%。

1 谐振式光纤陀螺基本原理

谐振式光纤陀螺的基本结构如图 1 所示,从光源 S 发出的相干光由 3 dB 耦合器 $C1$ 分成两束,然后借助于耦合器 $C2$ 沿着相反方向注入谐振腔中。谐振腔中逆时针光波的谐振频率,通过耦合器 $C4$ 由探测器 $D1$ 检测,顺时针光波的谐振频率,通过耦合器 $C3$ 由探测器 $D2$ 检测。在没有旋转的情况下,逆时针和顺时针的谐振频率是相同的,当环形谐振腔以角速度 Ω 旋转时,两束反向传播的的谐振光波会有一个谐振频差^[5]:

$$\Delta f = \frac{4A}{\lambda L} \Omega \tag{1}$$

式中, A 为谐振腔包围的面积, L 为腔长。 $4A/\lambda L$ 为谐振式光纤陀螺的标度因子,只要检测出 Δf , 就可以确定旋转角速度 Ω 。

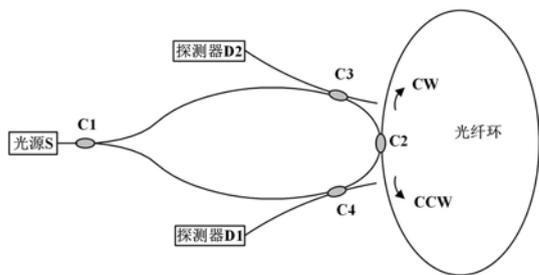


图 1 谐振式集成光学陀螺的基本结构图

谐振腔的精细度 F 定义为^[6]

$$F = \frac{FSR}{\delta f_{1/2}} \tag{2}$$

其中, FSR 为自由谱宽, $\delta f_{1/2}$ 为半高全宽。

精细度 F 是衡量谐振腔性能的最重要的指标,它反映了谐振腔的尖锐程度。半高全宽可表示为^[6]

$$\delta f_{1/2} = \frac{2}{\pi} \frac{c}{n_0 L} \sin^{-1} \left[\frac{k_r}{2(1 - k_r)^{1/2}} \right] \tag{3}$$

$$k_r = 1 - (1 - \gamma_0) e^{-2\alpha L}$$

自由谱宽 FSR 表示为相邻两个谐振峰之间的频率间隔,可表示为^[6]

$$FSR = f_{p+1} - f_p = \frac{c}{n_0 L} \quad p = 1, 2, 3, \dots \tag{4}$$

式中, k_r 为最佳耦合比, n_0 为光纤芯折射率, α 为单位长度光纤的传播损耗, γ_0 为耦合器的插入损耗, L 是光纤环长度。由式(3)和(4)可进一步推导出精细度的表达式为

$$F = \frac{\pi}{2 \sin^{-1} \left[\frac{k_r}{2(1 - k_r)^{1/2}} \right]} \tag{5}$$

图 2 为仿真计算的精细度 F 与最佳耦合比 k_r 的关系曲线图。由图 2 可知, k_r 越小,精细度 F 越大。

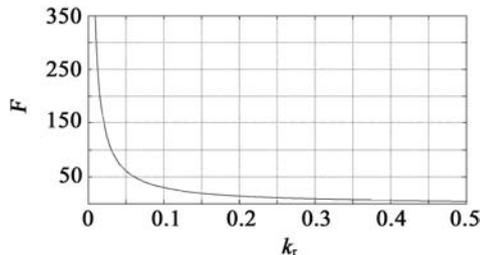


图 2 谐振腔精细度 F 与最佳耦合比 k_r 的关系曲线

2 偏振波动和背散噪声

为了更好地提高陀螺的测试精度,需要对谐振式光纤陀螺中的噪声因素进行分析。在谐振式光纤陀螺中,主要的噪声源有:光源相干性、瑞利背向散射噪声、光纤中偏振波动和温度波动引起的噪声、光学克尔效应引起的噪声等^[7-8]。其中,目前最为重要的是偏振波动噪声和背散噪声。

2.1 偏振波动噪声

在光纤谐振腔中传输一周后其偏振状态不发生改变的特殊偏振态称为偏振本征态。在理想情况下,光纤环形谐振腔中有两个偏振本征态,两者之间是正交的,相互独立而不产生串扰^[9]。由于环境温度等因素的变化会使光纤中的双折射发生变化,从而引起偏振本征态的传播常数的改变,两谐振频率间隔的波动,谐振频率点因偏振态的波动而发生漂移,即产生偏振波动噪声^[10]。抑制偏振波动噪声,可以采取以下两个途径:(1)选择性地激起两个本征偏振态中的一个而抑制掉另一个;(2)采取措施使两个偏振本征态的谐振峰的位置稳定而不产生交叠,保证谐振稳定性。

2.2 瑞利背向散射噪声

瑞利背向散射是由入射光激发传输媒质中的原

子键的偶极子天线辐射引起的,它与入射光波长的四次方成反比例关系。在随机结构的物体中,瑞利背向散射存在累积效应。在光纤谐振腔中,其物质结构形式排列不规则,为非晶体类结构,故其受瑞利背向散射效应影响很大。抑制背向散射噪声的方法:(1)用正弦波对 CW 和 CCW 两束光进行不同频率的调制,抑制输入光波的载波分量;(2)对输入光波进行二进制相移键控,使用二进制相移键控来对输入光波进行调制,可以使被调制的波形中不存在固有载波分量。

一般情况下,光纤中的瑞利背散噪声强度为^[11]

$$I_b = I_0 (1 - 10^{-\alpha_R \times L_c / 10}) \times S \quad (6)$$

其中, I_0 为输入光强度, I_b 为背散光信号, α_R 为瑞利散射的衰减因子, L_c 为光源的相干长度, $S = 3/2n^2\omega_0(\omega/c)^2$ 为恢复因子,描述了被光纤再捕捉到并在光纤中形成反向传输的那部分散射光束。 ω_0 为基模光斑尺寸, ω 为光源的角频率, c 为光在真空中的光速。将 $\omega_0 = 8 \mu\text{m}$, $n = 1.456$, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 代入得: $S = 5.382 \times 10^{-9}$,所以此时谐振腔的瑞利背向散射光与输入光强度比即谐振腔的背散系数为 1.239×10^{-13} 。

3 实验

根据图3所示的系统结构框图搭建了光纤环形谐振腔检测系统,该光纤环形谐振腔环长为5 m。测试所用光源为工作波长为1550 nm、线宽为0.1 kHz的非保偏光纤激光器,其输出波长(或频率)可通过调节外加压电陶瓷(PZT)电压来进行调制。在光纤激光器上施加一个频率为1 Hz、幅值为5 V的低频锯齿波,驱动光纤激光器内部的PZT,光信号从耦合器C进入光纤环,其输出可通过光电探测器PD对其输出光频率进行扫描,这样即可在示波器上观察到环形谐振腔的谐振曲线。

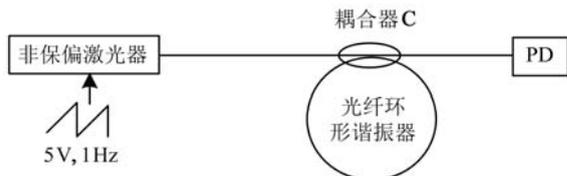


图3 光纤环形谐振腔性能测试框图

谐振曲线如图4所示。图4中有两类不同的谐振曲线,信号较强、移动较慢的信号是由光纤的慢轴产生的(对应TE模式),这是有用信号;另一个则对

应于快轴(对应TM模式),属于干扰信号。得到主模式TE模式的自由谱FSR为582 ms,半高全宽 $\delta_{1/2}$ 为9 ms。已知光纤激光器频率调谐率为13.74 MHz/V,可求得FSR和半高宽分别为39.98和0.62 MHz,求得精细度 F 为64.67,谐振深度 ρ 为0.5033。

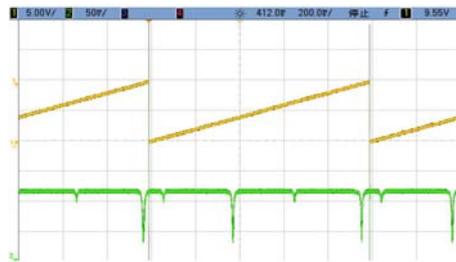


图4 示波器检测的谐振曲线

在光纤环形谐振腔检测系统中加入偏振控制器,此时检测到的谐振曲线如图5所示。经过偏振控制器抑制偏振噪声后,TM模式偏振态被抑制。得到自由谱FSR为592 ms,半高全宽 $\delta_{1/2}$ 为7 ms,求得精细度 F 为84.57,谐振深度 ρ 为0.7308。

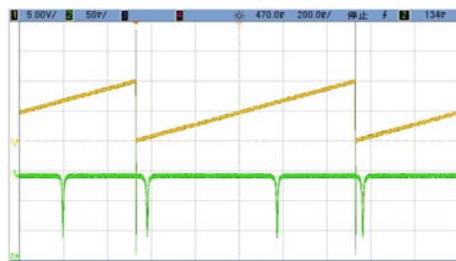


图5 非保偏光源抑制偏振波动后的谐振曲线

将光源换成保偏激光器,测试装置如图6所示,测试的谐振曲线如图7所示,求得精细度 F 为101,谐振深度 ρ 为0.738。

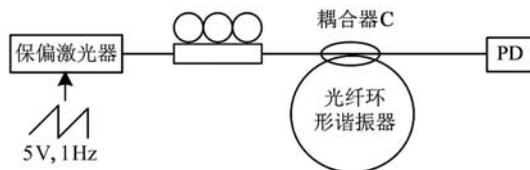


图6 保偏光源加入偏振控制器的光纤环形谐振腔的检测框图

由图4,5和7可知,通过偏振控制器和保偏激光器抑制了偏振噪声,使精细度 F 从64.67提高到101,谐振深度从0.5033提高到0.738。

背向散射谱的测试系统如图8所示。光纤激光器(FL)输出的激光经过环形器CIR后到达光纤环形谐振腔的输入端口,然后经过谐振腔耦合器(DC)

耦合进入环形谐振腔,光在环形谐振腔中沿 CW 方向传输;多光束干涉叠加后从谐振腔输出用光电探测器 PD1 可检测谐振腔 CW 方向的光束信号。当 CW 光束在谐振腔内绕环多次传输时,腔内散射光束将沿 CCW 方向绕环多次,散射光经谐振腔耦合器耦合出进入 CIR 的端口 2,用光电探测器 PD2 在环形器 CIR1 的 3 端口可以观察散射光束信号。

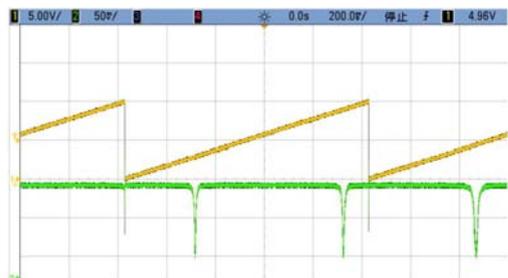


图 7 保偏光源抑制偏振波动后的谐振曲线

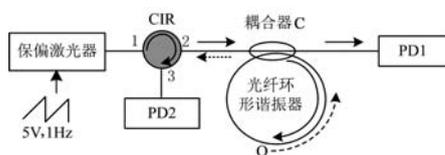


图 8 背向散射谱测试系统框图

谐振曲线和背向散射曲线如图 9 所示。可得最大背向散射峰电压为 0.05 V,谐振深度为 0.225 V, PD1 和 PD2 放大倍数之比为 3 : 2500,因此瑞利背向散射光与主信号强度之比为 0.026 7%。如果经过背散噪声抑制后还会使谐振腔的精细度 F 进一步变大。

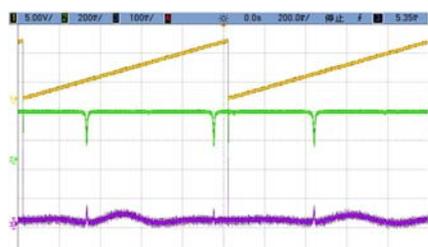


图 9 谐振曲线和背向散射测试结果

4 结论

本文搭建了光纤环形谐振腔检测系统。通过偏振控制器和保偏激光器抑制了偏振噪声使精细度从 64.67 提高到 101,谐振深度从 0.503 3 提高到 0.738。同时对系统进行了背向散射噪声测试,测得光纤谐振腔中瑞利背向散射光与主信号强度之比为 0.026 7%。有效抑制了偏振波动噪声对谐振式光纤陀螺精细度的影响。对其他噪声的抑制,有待

进一步的研究。

参考文献:

- [1] 刘福民,徐宇新,金 锋. 微型集成光学陀螺研究进展[J]. 导航与控制, 2004, 3(4): 43-49.
Liu F M, Xu Y X, Jin F. Research developments of micro-optic gyroscope[J]. Navigation and Control, 2004, 3(4): 43-49.
- [2] 郭 伟,金仲和,唐衍哲,等. 一种新结构的硅基无源环形波导式谐振腔[J]. 半导体光电, 2003, 24(1): 29-31.
Guo W, Jin Z H, Tang Y Zh, et al. A new configuration of passive Si-based ring waveguide resonant cavity [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2003, 24(1): 29-31.
- [3] 米 剑,张春熹,李 铮,等. 偏光干涉对光纤陀螺性能的影响[J]. 中国光学, 2005, 26(8): 1140-1144.
Mi J, Zhang C X, Li Z, et al. Effect of polarization interference on fiber optic gyro performance[J]. Acta Opt. Sin., 2005, 26(8): 1140-1144.
- [4] Carroll R, Coccoli C D, Cardarelli D, et al. The passive resonator fiber optic gyro and comparison to the interferometer fiber gyro[J]. Proc. SPIE, 1986, 719: 169-177.
- [5] Aiditty H J, Lefevre H C. Sagnac effect in fiber gyroscopes [J]. Opt. Lett., 1981, 6(8): 401-403.
- [6] Zhang F, John W Y. Lit, direct-coupling single-mode fiber ring resonator[J]. Opt. Soc. Am., 1988, 5: 1347-1355.
- [7] 郭 伟. 谐振式光纤陀螺的基础研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
Guo Wei. Basic research on resonant fiber optic gyro [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- [8] Ma H L, Wang Sh J, Jin Zh H. Measurements of excess loss of the crossed waveguide using optical waveguide ring resonators[J]. Opt. Commun., 2008, 281: 6016-6018.
- [9] Yu H Y, Zhang Ch X, Feng L Sh, et al. Modeling of polarization noise in silicon integrated optical resonance gyroscope and performance analysis [J]. Infrared and Laser Engin., 2012, 41(5): 1287-1293.
- [10] 黄伟溪,陈 哲,隋 展. 熊猫光纤热双折射效应光纤偏振控制器研究[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(6): 1137-1142.
Huang Weixi, Chen Zhe, Sui Zhan, et al. Fiber polarization controller based on thermal birefringent effect of PANDA fiber [J]. Infrared and Laser Engin., 2010, 39(6): 1137-1142.
- [11] Hotate K, Takiguchi K, Hirose A. Adjustment-free method to eliminate the noise induced by the backscattering in an optical passive ring-resonator gyro [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 1990, 2(1): 75-77.

作者简介:

郭丽君(1978—),女,吉林洮南人,博士,硕士生导师,主要从事集成光学光器件及光学传感器方面的研究工作。

E-mail: guolijun915@163.com

基于纺锤型空气腔的光纤马赫-曾德尔折射率传感器

戴洋, 王婷婷, 孙家程, 王菲, 花文栋

(南京信息工程大学 电子与信息工程学院, 南京 210044)

摘要: 设计了一种基于光纤纺锤型空气腔的三明治结构全光纤马赫-曾德尔折射率传感器。纺锤型空气腔是通过普通单模光纤和光子晶体光纤熔接后再拉锥形成的。锥区的纺锤型空气腔和包层分别作为参考臂和传感臂, 从而形成马赫-曾德尔干涉。基于 FDTD Solutions 和 COMSOL 仿真软件分别对传感器的干涉条纹及锥区电场分布进行了仿真, 得到了折射率传感器干涉条纹波谷波长和有效折射率与环境折射率的关系。当环境折射率为 1.36~1.37 和 1.37~1.38 时, 灵敏度分别为 1 377.6 和 1 436 nm/RIU。此传感器具有极短的干涉臂, 能够降低损耗, 且具有较高的折射率灵敏度。

关键词: 光纤传感; 全光纤; 马赫-曾德尔干涉; 折射率传感器

中图分类号: TN29 **文章编号:** 1001-5868(2020)02-0191-04

Optical Fiber Mach-Zehnder Refractive Index Sensor Based on Spindle Air Cavity

DAI Yang, WANG Tingting, SUN Jiacheng, WANG Fei, HUA Wendong

(School of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, CHN)

Abstract: A sandwich-structured all-fiber Mach-Zehnder refractive index sensor based on a spindle-type air cavity was designed. The spindle-type air cavity was manufactured by splicing and taper a common single-mode optical fiber and a photonic crystal fiber. The spindle-type air cavity and cladding in the taper area serve as the referring and sensing arms respectively, then the Mach-Zehnder interference is established. The interference fringes of the sensor and the electric field distribution in the taper area were simulated respectively based on FDTD Solutions and COMSOL. The relationship between the trough wavelength of the index sensor and the environmental refractive index, the effective refractive index and the environment refractive index are obtained by simulations. The sensitivity is 1 377.6 and 1 436 nm/RIU when the refractive index is 1.36~1.37 and 1.37~1.38 respectively. The extremely short interference arm is used to reduce the loss and the sensor has higher refractive index sensitivity.

Key words: fiber sensing; all-fiber; Mach-Zehnder interference; refractive index sensor

0 引言

折射率是衡量物质的重要品质之一, 被广泛应用于食品质量、医疗和环境监测等领域^[1]。目前, 利用光纤传感测量折射率的传感器类型主要有光强调

制型、干涉型、光纤表面等离子体共振型等^[2-3]。其中, 干涉型折射率传感器的干涉类型主要有马赫-曾德尔干涉、迈克尔逊干涉、法布里-珀罗干涉等^[4-5]。2012年, Zhang 等人^[6]通过将一对突变锥之间的一段光纤进行大错位熔接得到了灵敏度为 100 nm/RIU 的光纤内嵌马赫-曾德尔折射率传感器。2014年, 付广伟等人^[7]通过 CO₂ 激光熔融技术制作了基于光子晶体光纤的马赫-曾德尔折射率传感器, 传感器

收稿日期: 2019-12-21.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61405094); 江苏省高校优势学科三期建设工程资助项目(“信息与通信工程”优势学科)。

灵敏度为 33.388 4 nm/RIU。2015 年, Zhao 等人^[8]使用纤芯错位的方法制作了灵敏度为 78.7 nm/RIU 的马赫-曾德尔折射率传感器。2016 年, 兆雪等人^[9]使用单模光纤双拉锥的方法制作了灵敏度为 128.233 nm/RIU 的光纤马赫-曾德尔折射率传感器。2016 年, 李辉栋等人^[10]通过化学腐蚀的方法使两根单模光纤纤芯产生凹槽从而形成空气腔, 再与细芯光纤熔接, 所得马赫-曾德尔折射率传感器的灵敏度为 -216.21 dB/RIU。2019 年, Wang 等人^[11]通过光子晶体光纤与单模光纤熔接产生气泡后拉锥形成液滴型空气腔, 制作了高灵敏度马赫-曾德尔折射率传感器, 其灵敏度高达 2 803.6 nm/RIU。

本文设计了一种通过单模光纤与光子晶体光纤熔接后再进行光纤拉锥的技术构成的一种纺锤型空气腔马赫-曾德尔折射率传感器。光纤拉锥区内的纺锤型空气腔和 SiO₂ 包层构成了三明治结构的全光纤马赫-曾德尔传感器, 空气腔和 SiO₂ 包层充当干涉臂, 由于干涉臂极短, 所以大大降低了光的传输损耗。此传感器制作简单、稳定性好。

1 光纤马赫-曾德尔折射率传感器的原理

如图 1 所示, 基于纺锤型空气腔的光纤马赫-曾德尔折射率传感器由两根普通单模光纤 (SMF) 和一根实芯光子晶体光纤 (PCF) 构成。使用光纤熔接机将单模光纤的一端与实芯光子晶体光纤的一端低损耗熔接, 用来传输光信号; 光子晶体光纤的另一端与第二根单模光纤熔接, 由于部分光子晶体光纤的空气孔塌陷, 使得熔接点处形成气泡, 用光纤拉锥机对气泡所在位置进行拉锥, 形成纺锤型空气腔, 构成三明治结构的马赫-曾德尔折射率传感器。

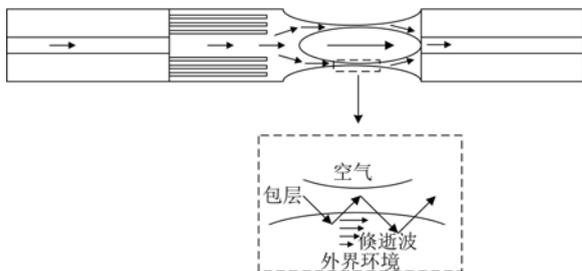


图 1 基于纺锤型空气腔的光纤马赫-曾德尔折射率传感器结构示意图

光在第一根单模光纤纤芯中传输, 经光子晶体光纤, 到达纺锤型空气腔前端时, 光分为两束, 一束

在空气腔中传播, 另一束在空气腔周围的 SiO₂ 包层传播, 包层模被激发, 到达空气腔尾部时两束光耦合进入第二根单模光纤, 发生马赫-曾德尔干涉, 干涉强度为

$$I = I_{\text{core}} + I_{\text{clad}} + 2\sqrt{I_{\text{core}}I_{\text{clad}}}\cos\left(\frac{2\pi L \cdot \Delta n_{\text{eff}}}{\lambda}\right) \quad (1)$$

式中, I_{core} 和 I_{clad} 分别为纤芯模和包层模传输光光强, Δn_{eff} 表示两个模的有效折射率差, L 为干涉臂的长度, λ 为输入光波长, $\frac{2\pi L \cdot \Delta n_{\text{eff}}}{\lambda}$ 为包层模与纤芯模的相位差。传输光的光强随相位差的变化而变化。

对于 m 级和 $m-2$ 级干涉条纹对应的波谷波长, 可表示为

$$\lambda_m = 2L \cdot \Delta n_{\text{eff}} / [2(m+1)] \quad (2)$$

$$\lambda_{m-2} = 2L \cdot \Delta n_{\text{eff}} / [2(m-2)+1] \quad (3)$$

Δn_{eff} 可以表示为

$$\Delta n_{\text{eff}} = \frac{2}{(1/\lambda_m - 1/\lambda_{m-2})L} \quad (4)$$

由于倏逝场的作用, 包层的有效折射率会受到环境折射率的影响, 而空气腔的有效折射率与环境折射率 n_s 无关, 保持不变。所以 Δn_{eff} 会随着 n_s 的改变而改变。根据式 (2), λ_m 也会随着 n_s 的改变而发生变化。 m 级干涉谷的波长的变化量表示为

$$\Delta\lambda_m = \frac{2(\Delta n_{\text{eff}} + \Delta n)L}{2m+1} - \frac{2\Delta n_{\text{eff}}L}{2m+1} = \frac{2\Delta nL}{2m+1} \quad (5)$$

其中, Δn 是包层有效折射率随环境折射率变化的变化量。

2 光纤马赫-曾德尔折射率传感器建模与仿真

首先使用 COMSOL 仿真软件分别计算折射率传感器的包层模和纤芯模的有效折射率, 其仿真模型如图 2 所示。

仿真模型的参数如下: 纺锤型空气腔腰径为 37.7 μm , 拉锥区腰径为 40 μm , 环境层直径为 60 μm , 完美匹配层直径为 70 μm 。空气腔折射率设置为 1, 包层折射率设置为 1.446 81, 环境折射率 n_s 参数化扫描范围设置为 1.36~1.38。设置模式分析待求模态数为 20, 分别对空气腔和包层的有效折射率进行仿真。选取部分仿真电场结果如图 3 所示。图 4 所示为有效折射率 n_{eff} 与环境折射率 n_s

的关系图。

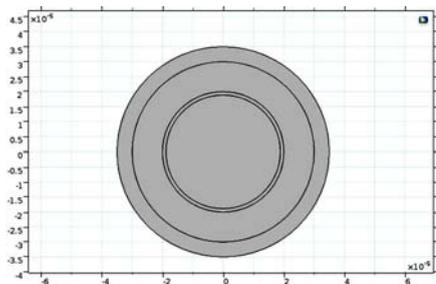


图2 COMSOL 仿真结构图

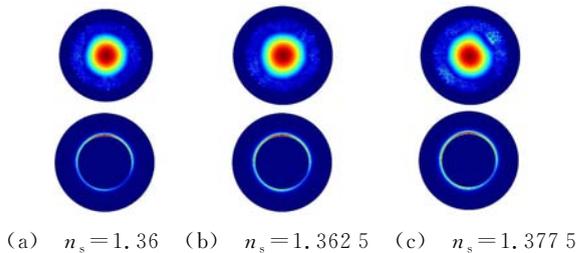


图3 仿真电场图

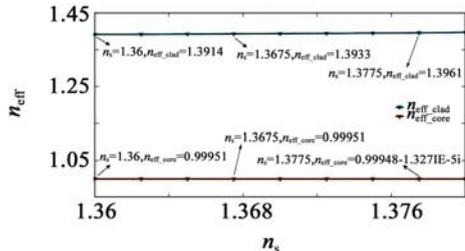


图4 有效折射率与环境折射率的关系图

结合图3和4可得,空气腔的有效折射率基本保持为0.9995,包层的有效折射率从1.3914提高到1.397。接下来,通过FDTD Solutions仿真软件对折射率传感器进行建模仿真,计算透射谱,其模型如图5所示。

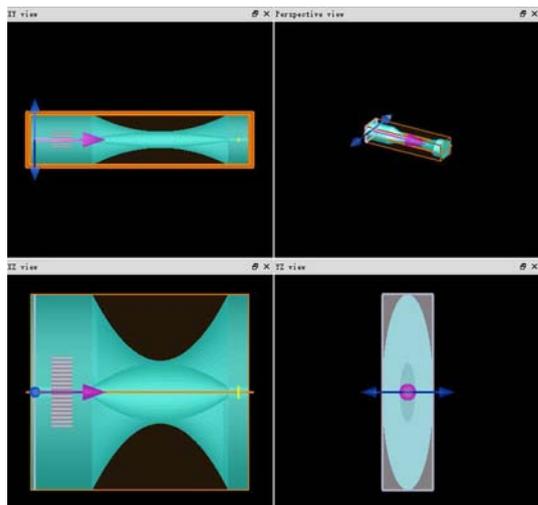


图5 折射率传感器仿真模型图

仿真模型的参数如下:纺锤型空气腔的轴向长度为331.4 μm,最大截面直径为37.7 μm,拉锥区腰椎直径为40 μm,单模光纤纤芯折射率为1.45205,包层折射率为1.44681,空气腔折射率设置为1。光子晶体光纤纤芯直径为7 μm,5层空气孔,空气孔直径为2.82 μm,孔间距为5.43 μm,包层直径为125 μm。仿真区域选用2D模式,光源设置为高斯光源,网格精度设为 $x=y=z=0.06\ \mu\text{m}$ 。使用频域场和功率监视器来获得透射谱。环境折射率参数化扫描范围分别设为1.36~1.37和1.37~1.38,得到折射率传感器的干涉条纹,如图6所示。

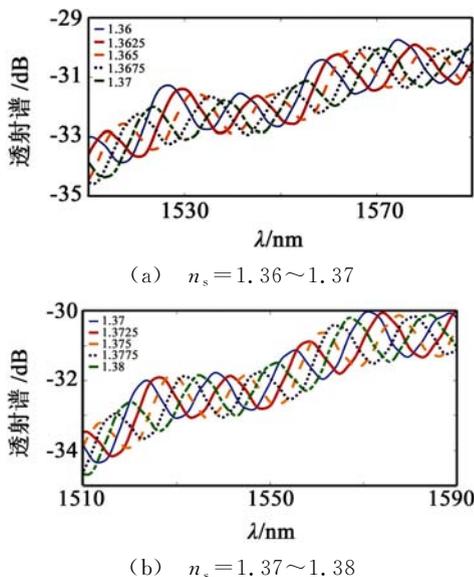


图6 不同环境折射率范围内折射率传感器的干涉条纹

从图6中可以看出,随着环境折射率的增加,干涉条纹向长波方向漂移。

3 折射率传感特性分析

当环境折射率发生变化时,包层模有效折射率也会发生变化,但是作为参考臂的纺锤型空气腔的有效折射率不会发生变化,从而使得传感臂和参考臂的有效折射率差产生变化,导致干涉波谷的波长产生漂移。当折射率范围在1.36~1.37时选择波长为1565 nm附近的波谷作为参考,计算其波谷漂移;当折射率范围在1.37~1.38时,选择波长为1560 nm附近的波谷作为参考并计算漂移。图7(a),(b)分别是环境折射率范围为1.36~1.37,1.37~1.38时的波谷波长与环境折射率的关系图。当环境折射率范围为1.36~1.37和1.37~1.38时,灵敏度分别为1377.6和1436 nm/RIU。

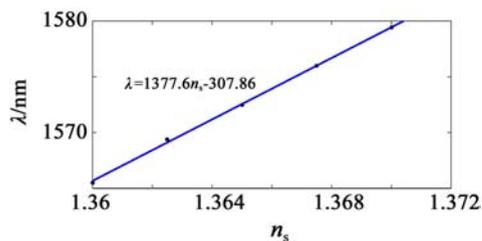
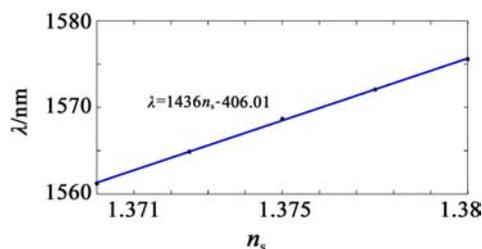
(a) $n_s = 1.36 \sim 1.37$ (b) $n_s = 1.37 \sim 1.38$

图7 环境折射率与波谷波长关系

4 结论

本文设计了一种基于纺锤型空气腔的光纤马赫-曾德尔折射率传感器,并研究了其折射率传感特性,当环境折射率范围在 1.36~1.37 时,折射率灵敏度为 1 377.6 nm/RIU,当环境折射率范围在 1.37~1.38 时,折射率灵敏度为 1 436 nm/RIU。建立了马赫-曾德尔折射率传感器模型,使用 COMSOL 和 FDTD Solutions 仿真软件分别对电场、有效折射率以及传感器在不同环境折射率下的透射谱进行了计算与仿真,得到了有效折射率与环境折射率的关系以及波谷波长与环境折射率的关系。此传感器具有极短的干涉臂,能够降低损耗,且具有较高的灵敏度。

参考文献:

- [1] 毕卫红, 申远, 刘强, 等. 直接熔融塌陷光子晶体光纤马赫-曾德尔干涉仪的折射率传感特性[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 81-85.
- [2] Bi Weihong, Shen Yuan, Liu Qiang, et al. Refractive index sensing characteristics of a Mach-Zehnder interferometer based on directly photonic crystal fiber[J]. Chinese J. of Laser, 2014, 41(5): 81-85.
- [3] 蔡凯杰, 葛益娴, 周俊萍. 基于双 D 型光纤表面等离子体共振折射率传感研究[J]. 半导体光电, 2018, 39(5): 628-633.
- [4] Cai Kaijie, Ge Yixian, Zhou Junping. Study on refractive index sensing based on double D-type surface plasmon resonance[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2017, 39(5): 628-633.
- [5] Wu D, Zhu T, Deng M, et al. Refractive index sensing based on Mach-Zehnder interferometer formed by three cascaded

single-mode fiber tapers[J]. Appl. Opt., 2011, 50(10): 1548-1553.

- [4] 王婷婷, 葛益娴, 常建华, 等. 基于椭球封闭空气腔的光纤复合法布里-珀罗结构折射率传感特性研究[J]. 物理学报, 2014, 63(24): 24070101-24070110.
- [5] Wang Tingting, Ge Yixian, Chang Jianhua, et al. Refractive index sensing characteristic of a hybrid-Fabry-Perot interferometer based on an in-fiber ellipsoidal cavity[J]. Acta Phys. Sin., 2014, 63(24): 24070101-24070110.
- [6] Zhang Q, Zhou J, Chen J P, et al. Single-mode fiber refractive index sensor with large lateral offset fusion splicing between two abrupt tapers[J]. Opt. Engin., 2012, 51(9): 0905021-0905023.
- [7] 付广伟, 郭朋, 付兴虎, 等. 基于 CO₂ 激光熔融塌陷 PCF Mach-Zehnder 干涉仪折射率传感特性[J]. 光电子·激光, 2014, 25(9): 1657-1661.
- [8] Fu Guangwei, Guo Peng, Fu Xinghu, et al. A refractive index sensor of PCF Mach-Zehnder interferometer based on CO₂ laser fusion technology[J]. J. of Optoelectron. • Laser, 2014, 25(9): 1657-1661.
- [9] Zhao Y, Li X G, Cai L. A highly sensitive Mach-Zehnder interferometric refractive index sensor based on core-offset single mode fiber[J]. Sensors & Actuators A Phys., 2015, 223: 119-124.
- [10] 兆雪, 邵敏, 乔学光, 等. 光纤锥在线型马赫-曾德尔干涉仪的折射率传感特性[J]. 光子学报, 2016, 45(2): 02060061-02060065.
- [11] Zhao Xue, Shao Min, Qiao Xueguang, et al. Refractive index sensing of in-fiber Mach-Zehnder interferometer based on two fiber tapers[J]. Acta Photon. Sin., 2016, 45(2): 02060061-02060065.
- [12] 李辉栋, 傅海威, 邵敏, 等. 基于光纤气泡级联的高灵敏度马赫-曾德尔干涉仪液体折射率传感器[J]. 光子学报, 2016, 45(7): 07060061-07060065.
- [13] Li Huidong, Fu Haiwei, Shao Min, et al. In-fiber Mach-Zehnder interferometer based on cascading fiber air bubble for high sensitivity liquid refractive index measurement[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(7): 07060061-07060065.
- [14] Wang Tingting, Wang Fei, Dai Yang, et al. Highly sensitive refractive index sensor based on an in-fiber droplet-shape air cavity[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2019, 31(16): 1347-1350.

作者简介:

戴洋(1996—),男,硕士生,主要研究领域为光纤传感;

王婷婷(1979—),女,博士,副教授,研究领域为光纤传感与光信号处理。

E-mail: wtt79812@163.com

压电谐振器特殊模态振动特性研究

梁天晨, 吴校生, 李志超

(上海交通大学 微纳电子学系 微米纳米加工技术国家重点实验室, 上海 200240)

摘要: 针对压电谐振器振动特性分析的应用需求,构建了一种小型化、廉价的矢量分析系统。系统采用 STM32 控制 4 路 DDS 芯片产生驱动信号和矢量解析正交信号。通过向 DDS 芯片写频率控制字,对压电谐振器进行扫频驱动。同时采用 STM32 内置 ADC,采样并计算获取各频率点压电谐振器输出信号的幅值和相位。通过提取压电谐振器两个特殊振动模态下的共振频率、品质因数(Q 值)、输出信号相位等振动特性参数,获得驱动信号对这些参数的影响规律,系统分析了驱动信号对压电谐振器振动特性的影响,为压电谐振器的驱动、信号检测提供了有效的技术途径,实验结果为压电谐振器振动特性分析提供了依据。

关键词: 压电谐振器; 振动模态; 品质因数; 谐振频率; 矢量解析

中图分类号: TN384 **文章编号:** 1001-5868(2020)02-0195-05

Research on Special Modal Vibration Characteristics of Piezoelectric Resonators

LIANG Tianchen, WU Xiaosheng, LI Zhichao

(National Key Laboratory of Science and Technology on Micro/Nano Fabrication Laboratory,

Department of Micro/Nano Electronics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, CHN)

Abstract: A miniaturized and low-cost vector analysis system is proposed to analyze the vibration characteristics of piezoelectric resonators. The system uses STM32 to control 4 DDS chips to generate the driving signals and the vector analytical orthogonal signals. By writing frequency control words to the DDS module, the signals with sweeping frequencies are generated to excite the piezoelectric resonator. Vector analytical technology is used to obtain the amplitude and phase of the output at each sweeping frequency. The resonance frequency, quality factor (Q value) and phase parameters under the two special vibration modes of the piezoelectric resonator are extracted. The influence of driving signals on vibration characteristics of piezoelectric resonator are analyzed systematically.

Key words: piezoelectric resonator; vibration mode; quality factor; resonance frequency; vector analysis

0 引言

压电谐振器是振动式传感器、驱动器、振荡器的核心部件,为了提高其驱动效率或检测灵敏度,压电谐振器通常工作在某阶谐振模态下。为了评价其在谐振模态下的振动性能,可用共振频率、品质因数

(Q 值)、输出信号和驱动信号的相位差等参数来量化表征,此外还需要研究谐振器输出信号与驱动信号之间的关系。

本文在研究压电谐振器的结构、工作机理的基础上,给出了驱动检测电路的系统构成、控制流程;通过测控实验提取了压电谐振器在不同驱动电压下的振动特性参数;然后通过数据分析,获得了驱动电压对其振动特性的影响规律。

收稿日期:2019-12-13.

基金项目:上海市科委平台建设项目(11DZ2290303);上海市科委浦江人才计划资助项目(14PJD022).

1 基于特殊模式的压电谐振器

如图 1 所示^[1], 本文研究的压电谐振器主体材料为锆钛酸铅(PZT), 沿 z 轴极化。在压电谐振器的上下表面制作有驱动电极(Dr^+ , Dr^-)、检测电极($S_1 \sim S_8$)和参考电极($R_1 \sim R_4$)。在驱动电极 Dr^+ 和 Dr^- 上施加同幅、同频、反相的正弦电压作为驱动信号, 当驱动电压频率与压电谐振器振动模式谐振频率相同时, 压电谐振器的振动位移幅度最大, 达到谐振状态。

压电谐振器可以处于不同的特殊模式下振动, 本文以陀螺器件作为压电谐振器的应用对象, 选择了一类特殊模式作为参考振动模式^[2-3], 该类型振动模式需要满足以下条件: (1) 各质点都沿同一轴向作振动(y 轴); (2) 质点的振动方向和压电谐振器材料的极化方向相垂直(y 与 z 轴); (3) 沿质点振动方向(y 轴), 相对两个棱边同为拉升或压缩振动状态, 相邻两个棱边振动方向相反, 为压缩或拉伸振动状态。研究发现在 250~400 kHz 频率范围内存在两个振动模式满足上述条件^[9]。本文以这两个特殊振动模式为研究对象, 实验验证并提取了特殊振动模式下的振动特性参数, 获得驱动电压幅值对振动特性参数的影响规律。

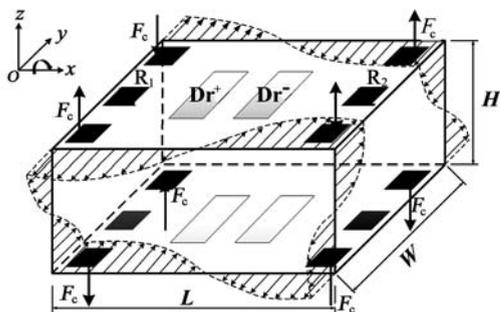


图 1 压电谐振器结构图

2 压电谐振器特殊模式测控系统

2.1 系统组成

如图 2 所示, 压电谐振器驱动检测系统由嵌入式控制器(STM32F103ZET6)、驱动信号模块、解析信号模块、矢量解析模块组成。

STM32 控制器通过 SPI 接口分别给驱动信号模块和解析信号模块的 DDS 芯片发送控制字, 采用 4 片 AD9833 模块作为 DDS 信号发生装置。控制信号中, SCLK 和 SDATA4 片共用, 通过 4 个片选信号 FSYNC 分别选择写入的 DDS 端口。DDS1,

DDS2 产生的两路反相正弦信号经过滤波放大后, 对压电谐振器进行驱动。DDS3, DDS4 产生的两路正交正弦信号经过滤波放大后, 作为后续矢量解析模块的两路正交参考信号。在驱动信号激励下, 压电谐振器输出电极上感应电荷经电荷放大器成比例转化成电压信号^[4], 再由比例放大器调整幅值, 将获得的电压信号 V_s 输出给矢量解析模块。

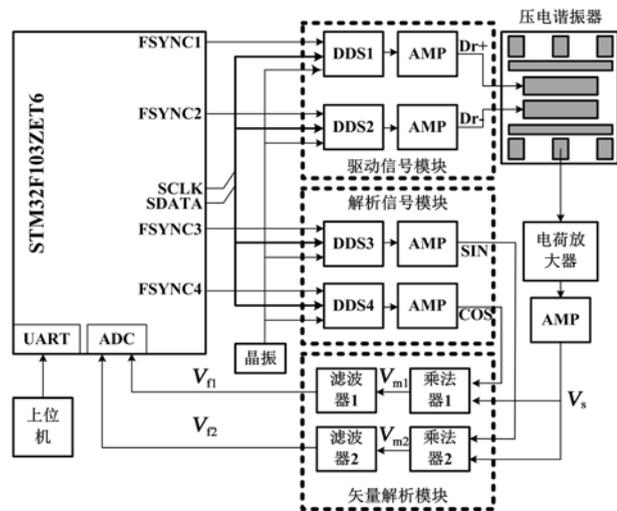


图 2 压电谐振器测控系统框图

V_s 信号的正交矢量解析过程如下^[5]: 设被测信号 V_s 为 $D \sin(\omega t + \varphi)$, D 为被测信号的幅值, φ 为信号相位。设两路正交参考信号分别为 S 和 C , $S = B \sin \omega t$, $C = B \cos \omega t$, 则两路乘法器输出信号 V_{m1} 和 V_{m2} 分别为

$$V_{m1} = C \times V_s = \frac{1}{2} [BD \sin \varphi + BD \sin(2\omega t + \varphi)] \tag{1}$$

$$V_{m2} = S \times V_s = \frac{1}{2} [BD \cos \varphi - BD \cos(2\omega t + \varphi)] \tag{2}$$

经过低通滤波器后, 式(1)、(2)中的倍频信号被滤除, 只剩下直流分量, 设为 V_{f1} 和 V_{f2} 。实际测试过程中, 正交参考信号的幅值单峰值选为 2 V。 V_{f1} 和 V_{f2} 经过 STM32 片载 ADC 转化成数字信号, 在嵌入式系统内部通过运算获得 V_s 的幅值 D 和相位 φ :

$$D = \sqrt{V_{f1}^2 + V_{f2}^2} \tag{3}$$

$$\varphi = \tan^{-1}(V_{f1}/V_{f2}) \tag{4}$$

2.2 控制程序

压电谐振器扫频驱动及被测信号矢量解析程序框图如图 3 所示。程序启动后, 首先完成 STM32

控制器硬件初始化,然后分别初始化 DDS 模块的频率、相位寄存器,此时,DDS 模块产生的输出正弦信号经滤波、放大后对压电谐振器进行激励,振子输出信号经后处理电路(电荷放大器、乘法器、滤波器)转换为输出信号 V_{f1} 和 V_{f2} ,供 ADC 采样。此处需要解决的一个问题是:STM32 控制器片载 ADC 的采样范围为 $0\sim 3.3\text{ V}$,而原始的被测信号有出现负值的可能(负值时 ADC 转换的结果为零)。在程序设计过程中,为了避免该结果发生,当发现采样值为 0,则判断被采样信号为负值,此时,将对应该路的正交参考信号进行翻转,即相位控制字增加 $\Delta\varphi$,相应正交参考信号移相 180° ,使被转换信号由负转正。

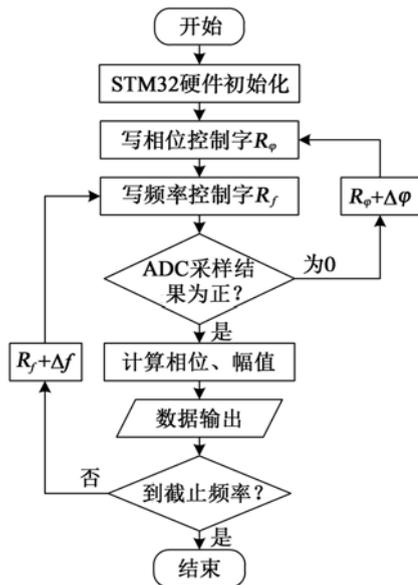


图3 扫频及矢量解析程序框图

扫频过程描述:测控系统需要获得在一个频率范围内各频率点的相应输出,因此需要扫频。完成一个频率点输出信号的采样后,如果未到截止频率,则频率控制字增加 Δf ,DDS 输出信号的频率增加一个扫频步长,进入下一步采样过程。

每一个频率点采样传入的数值经过程序运算,并获得被测信号的幅值和相位,通过 STM32 串口传入上位机进行存储和数据分析。研究发现:在图 1 所示的压电谐振器模型中,通过在驱动电极施加同幅、反相的正弦激励电压,在 $250\sim 400\text{ kHz}$ 频率范围内扫频^[2],会激励出两个共振模态满足前述模态要求。实验过程中,在激励电压 5 V_{pp} 条件下, 307.41 和 386.83 kHz 两个频率点存在峰值,如图 4 (低频谐振点)和图 5(高频谐振点)所示。图 4 显示的扫频范围为 $306\sim 309\text{ kHz}$,扫频步长为 10 Hz 。

图中的实部分量为 V_{f2} ,虚部分量为 V_{f1} 。分析图中数据可获得谐振处的 Q 值,即通过共振频率点 f_r 和 -3 dB 带宽 $BW_{-3\text{ dB}}$ 来计算获得 ($Q = f_r / BW_{-3\text{ dB}}$),可得图中所示共振模态的 Q 值为 323。

图 5 的扫频范围为 $384.5\sim 389.0\text{ kHz}$,扫频步长也为 10 Hz 。该谐振处的 Q 值为 1 330。

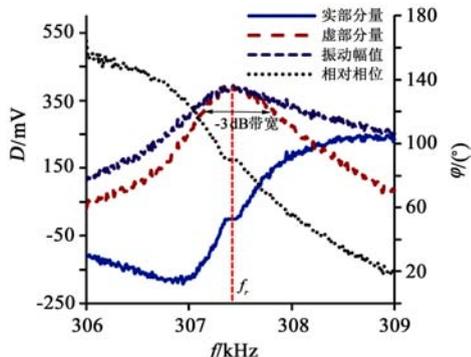


图4 低频谐振点附近扫频

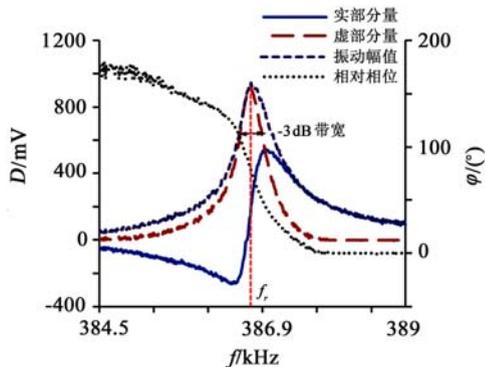


图5 高频谐振点附近扫频

3 实验结果及分析

图 6 为本实验的现场图。实验采用四通道 Tek 示波器 TDS2024B 来观察电路波形图,STM32 控制器采集并处理获得的幅值和相位值,通过串口传到上位机进行实时显示和数据保存。

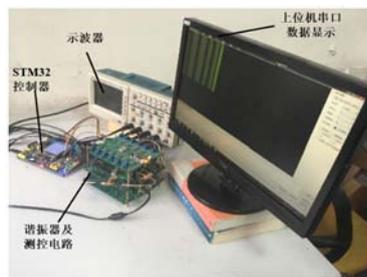


图6 实验装置照片

3.1 振动特性扫频实验

在压电谐振器中,输出信号的实部分量表征的

是阻性输出,虚部为感性或容性输出,虚部分量可以用来量化压电谐振器单位周期内存储的动能。本研究以压电谐振器输出信号的虚部分量为观测对象。

图 7~8 分别汇总了低频段、高频段谐振模态在不同驱动电压 V_{pp} 下被测信号虚部分量的扫频实验结果。

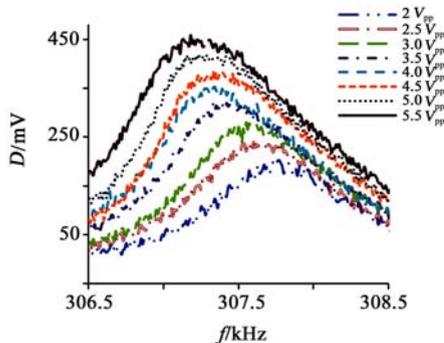


图 7 低频谐振模态虚部分量

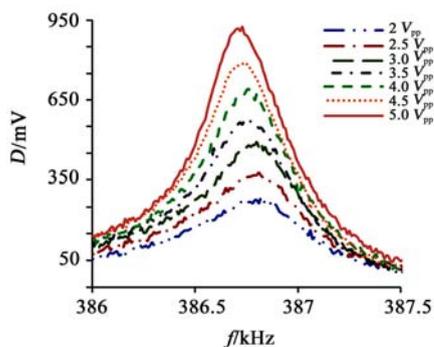


图 8 高频谐振模态虚部分量

3.2 实验结果分析

分析图 7 和 8 的实验数据,可以获得如下结果:

(1)驱动电压幅值对输出信号幅值和 Q 值的影响规律。如图 9 所示,在低频共振模态下(307.41 kHz),随着驱动电压幅值的增大,输出信号的幅值 D 线性增大,而 Q 值近乎线性减小。

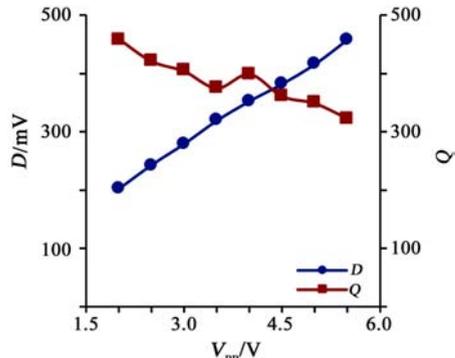


图 9 低频模态下驱动电压对输出信号幅值和 Q 值的影响

在高频共振模态下(386.83 kHz),如图 10 所

示,随着驱动电压幅值的增大,输出信号的幅值线性增大, Q 值也近乎线性增大。

(2)驱动电压幅值对谐振频率及输出信号相位的影响。如图 11 所示,在低频共振模态下,随着驱动电压幅值的增大,谐振频率在减小,输出信号的相位基本保持恒定不变,约为 90° ,具有很好的稳定性。

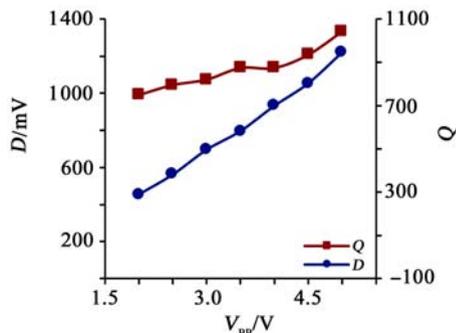


图 10 高频模态下驱动电压对输出信号幅值和 Q 值的影响

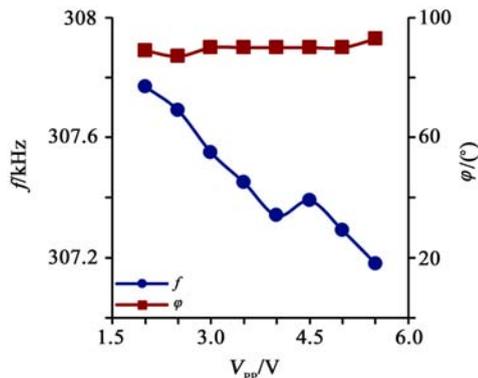


图 11 低频模态下驱动电压对谐振频率和相位的影响

在高频共振模态下,如图 12 所示,随着驱动电压幅值的增大,谐振频率总体趋势在减小,输出信号的相位基本保持恒定不变,约为 80° ,波动范围极小。

综合分析以上实验结果,可发现如下规律:(1)输出信号的幅值和驱动电压的幅值具有很好的线性相关性;(2)谐振器的 Q 值在低频模态下随驱动电压增大而减小,说明低频模态驱动电压会增大振子内部的能量损耗;而在高频模态下,当驱动电压增大时, Q 值反而增大,驱动电压的增大反而减小了单位周期内振子内部损耗的能量在总能量中的比例,这是个很有趣的现象;(3)随着驱动电压增大,两种模态输出信号的相位在谐振频率点处恒定保持不变,也就是说,谐振状态下输出信号的相位几乎不受外界条件影响,这进一步验证了通过锁相技术来跟踪压电谐振器共振频率的有效性^[5-6];(4)在两个模

态下,谐振频率都随驱动电压增大而减小,这就是通常所说的软化效应^[8],软化效应是压电谐振器模态激励过程中需要考虑的重要因素^[7]。

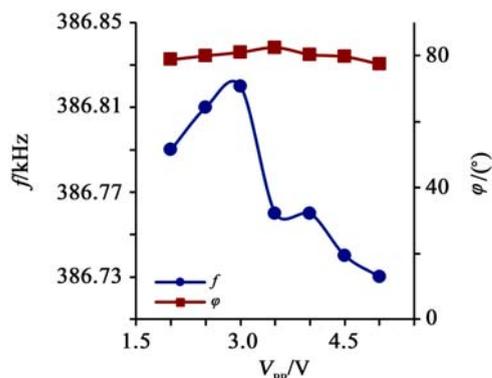


图 12 高频模态下驱动电压对谐振频率和相位的影响

4 结论

本文采用 STM32 控制器给 4 路 AD9833 DDS 模块写频率控制字和相位控制字,分别产生两路反相压电谐振器驱动信号和两路正交矢量解析信号。压电谐振器在驱动信号的激励下,输出电极的感应电荷经过电荷放大器和比例放大器后转换成适量的电压,该电压与两路正交矢量解析信号分别作为乘法器的输入,乘法器输出经过低通滤波后的直流量提供给 STM32 内置 AD 转换器,转换成数字信号,STM32 的算法程序通过运算获得被测信号的幅值和相位,再由串口传到上位机进行显示和数据存储。

实验结果表明,驱动电压与谐振器振动特性具有很大相关性,驱动电压幅值与输出信号幅值线性相关性强。驱动电压的大小也会明显影响两种模态下的 Q 值,谐振状态下,输出信号的相位具有很好的稳定性,基本不受外界条件的影响,驱动电压会引起振子的软化效应。

本文研究的技术路线和实验结果为压电谐振器的模态激励提供了有效可靠的理论依据和参考。

参考文献:

[1] 李国斌, 吴校生. 基于 FPGA 的压电陀螺数字化检测电路设计[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(9): 1-3.
Li Guobin, Wu Xiaosheng. Design of digital detection circuit for piezoelectric gyroscope based on FPGA[J]. Transducer and

Microsystem Technol., 2016, 35(9): 1-3.

- [2] 吴校生, 卢奕鹏, 陈文元. 压电型微固体模态陀螺的模态及谐振分析[J]. 传感技术学报, 2008, 21(12): 2014-2019.
Wu Xiaosheng, Lu Yipeng, Chen Wenyuan. Modal and harmonic analysis of piezoelectric solid-state micromachined modal gyroscope (PSMMG)[J]. Chinese J. of Sensors and Actuators, 2008, 21(12): 2014-2019.
- [3] 韦念, 吴校生, 刘武, 等. 压电微固体模态陀螺的安装技术[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(10): 41-43, 53.
Wei Nian, Wu Xiaosheng, Liu Wu, et al. Mounting technology of piezoelectric micromachined modal gyroscope[J]. Transducer and Microsystem Technol., 2015, 34(10): 41-43, 53.
- [4] 赵聪, 吴校生, 李国斌, 等. 压电式微固体模态谐振器电荷放大器负载效应的研究[J]. 仪表技术与传感器, 2016(9): 117-119.
Zhao Cong, Wu Xiaosheng, Li Guobin, et al. Load effect research of piezoelectric micro cuboid resonator charge amplifiers[J]. Instrument Technique and Sensor, 2016(9): 117-119.
- [5] 曾小润, 吴校生. 压电式微固体模态陀螺谐振频率自动跟踪电路[J]. 半导体光电, 2019, 40(2): 171-175.
Zeng Xiaorun, Wu Xiaosheng. Piezoelectric micromachined modal gyroscope resonant frequency automatic tracking circuit [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(2): 171-175.
- [6] He Y S, Wu X S, Zheng F, et al. Document closed loop driving and detect circuit of piezoelectric solid-state micro gyroscope[J]. Microsystem Technologies, 2014, 20(2): 185-191.
- [7] Wang Zhenyu, Wu Xiaosheng, Shu Shengzhu. Resonance characteristics of piezoelectric resonator based on digital driving circuit of field-programmable gate array[J]. Shanghai Jiaotong University, 2019, 24(1): 1-6.
- [8] 崔玉国, 孙宝元, 董维杰, 等. 压电陶瓷执行器迟滞与非线性成因分析[J]. 光学精密工程, 2003, 11(3): 270-275.
Cui Yuguo, Sun Baoyuan, Dong Weijie, et al. Causes for hysteresis and nonlinearity of piezoelectric ceramic actuators [J]. Optics and Precision Engin., 2003, 11(3): 270-275.
- [9] Wu Xiaosheng, Chen Wenyuan, Lu Yipeng, et al. Vibration analysis of a piezoelectric micromachined modal gyroscope (PMMG)[J]. J. of Micromechanics and Microengin., 2009, 19(12): 125008.

作者简介:

梁天晨(1992—),男,河北保定人,硕士研究生,主要研究压电谐振器及其相关外围电路。

E-mail: 740795516@qq.com

一种应用于 CMOS 图像传感器 数字双采样 ADC 的 PGA 电路

吴治军, 李毅强, 彭松, 李梦菊

(重庆光电技术研究所, 重庆 400060)

摘要: 提出了一种应用于 CMOS 图像传感器数字双采样模数转换器(ADC)的可编程增益放大器(PGA)电路。通过增加失调采样电容,采集 PGA 运放和电容失配引入的失调电压,在 PGA 复位阶段和放大阶段进行相关双采样和放大处理,通过数字双采样 ADC 将两个阶段存储电压量化,并在数字域做差,降低了 PGA 电路引入的固定模式噪声。采用 $0.18\ \mu\text{m}$ CMOS 图像传感器专用工艺进行仿真,结果表明:在输入失调电压 $-30\sim 30\ \text{mV}$ 变化区间,提出的 PGA 的输出失调电压可以降低到 $1\ \text{mV}$ 以下,相比传统 PGA 输出失调电压随输入失调电压单倍线性关系而言大大降低了列固定模式噪声。

关键词: CMOS 图像传感器; 数字双采样 ADC; PGA 电路

中图分类号: TP212 **文章编号:** 1001-5868(2020)02-0200-05

A PGA Circuit on Digital Double Sampling ADC of CMOS Image Sensor

WU Zhijun, LI Yiqiang, PENG Song, LI Mengtao

(Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: A PGA circuit on digital double sampling ADC of CMOS image sensor is proposed. The offset voltage introduced by mis-matching of amplifier and capacitance of PGA is collected by increasing the offset sampling capacitance CC . The relative double sampling and amplification is performed in the reset sampling and PGA amplification stage, the digital double sampling ADC will quantify the two-stage storage voltage and make the difference in the digital domain, so the fixed mode noise introduced by the circuit of PGA is eliminated. Simulations were performed on $0.18\ \mu\text{m}$ special process of CMOS image sensor. The results show that, the output offset voltage of PGA can be reduced to less than $1\ \text{mV}$ in the range of input offset voltage of $-30\sim 30\ \text{mV}$, which greatly reduces the column FPN compared with traditional PGA with single linear relationship between output offset voltage and input offset voltage.

Key words: CMOS image sensor; digital double sampling ADC; PGA circuit

0 引言

近年来,CMOS 图像传感器作为一种典型的模数混合集成电路,已广泛应用于国民生活的各个领域。相比传统的电荷耦合器件(Charge Couple Device, CCD),CMOS 图像传感器拥有更快的工作速度、更丰富的片上处理功能、更高的集成度,以及

更低的价格,因此获得越来越高的市场份额。当前 CMOS 图像传感器仍然向着低功耗^[1]、高动态^[2-3]、高精度^[4]、高速^[5-6]、高分辨率方向快速发展。作为 CMOS 图像传感器中最重要模块之一的模数转换器(ADC),对整个 CMOS 图像传感器的发展发挥着不可替代的重要作用。

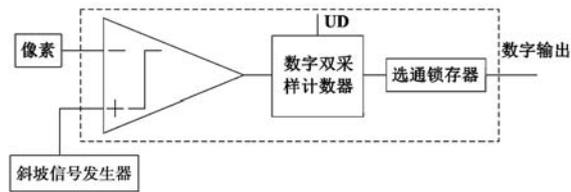
目前,CMOS 图像传感器主要采用列并行 ADC 结构,包括单斜 ADC(SS-ADC)、过采样 ADC($\Delta\Sigma$

ADC)、逐次逼近ADC(SAR ADC)、循环ADC(Cyclic ADC)等。其中,单斜ADC结构简单、面积小、功耗低,普遍应用于小像元CMOS图像传感器。但是,单斜ADC具有较高的固定模式噪声(Fixed Pattern Noise, FPN)。为降低单斜ADC的FPN,数字双采样双斜ADC结构^[7]被提出;为了扩展传感器的动态范围,通常在ADC电路前级加入可以根据光强变化来处理不同亮度信号的可编程增益放大器(Program Gain Amplifier, PGA),但是PGA会引入额外的列FPN。本文提出了一种适用于数字双采样双斜ADC结构、具有更低固定模式噪声的PGA电路,该PGA电路具有可编程控制增益、相关双采样处理、两次采样输出电压对失调电压进行消除处理的特点,同时将运放引入的失调进行数字双采样处理,通过最大化地减小列电路失调电压的影响,来降低列FPN,提高图像质量。

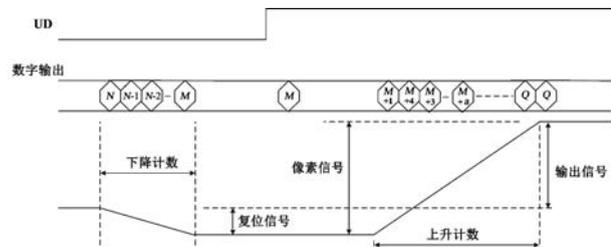
1 问题的提出

相比单斜ADC,数字双采样双斜ADC通过对复位信号和像素信号的量化结果在数字域做差,消除像素输出产生的FPN,减小ADC量化时延时产生的数字码误差。其结构如图1(a)所示,虚线框内为ADC中的比较器、计数器和选通锁存器,UD是加/减控制信号。图1(b)为数字双采样计数器的工作原理示意图。一次完整的模数转换需要分别对复位信号 V_{reset} 和像素信号 V_{signal} 进行量化:首先,像素输出复位信号 V_{reset} ,此信号与斜坡发生器产生的斜坡相比较,并设置UD为低电平,计数器为减法计数模式,量化复位信号 V_{reset} ,并存储在数字双采样计数器中;然后,像素输出像素信号 V_{signal} ,此信号与斜坡发生器产生的斜坡相比较,并设置UD为高电平,

计数器为加法计数模式,此时量化结果自动减去之前复位信号 V_{reset} 的量化结果,通过控制加/减法计数模式来实现复位信号 V_{reset} 和像素信号 V_{signal} 对应的数字域做差;最后,把计数器结果锁存于锁存器中,并通过列选通来实现锁存输出。



(a) 数字双采样双斜ADC结构



(b) 数字双采样计数器的工作原理

图1 数字双采样双斜ADC结构及计数器的工作原理示意图

为了扩展传感器的动态范围,在数字双采样双斜ADC结构之前加入一级带可编程增益和失调消除技术的PGA电路,能够根据光强变化来处理不同亮度信号,从而提升图像质量。在像素输出和ADC输入加入一级PGA电路,加入传统PGA电路的数字双采样双斜ADC结构框图如图2所示。

传统PGA电路的数字双采样双斜ADC会引入大的列FPN,使图像传感器的成像质量变差。PGA电路分为两个阶段:复位阶段(S_1 和 S_2 打开, S_3 闭合)和放大阶段(S_1 和 S_2 闭合, S_3 打开)。

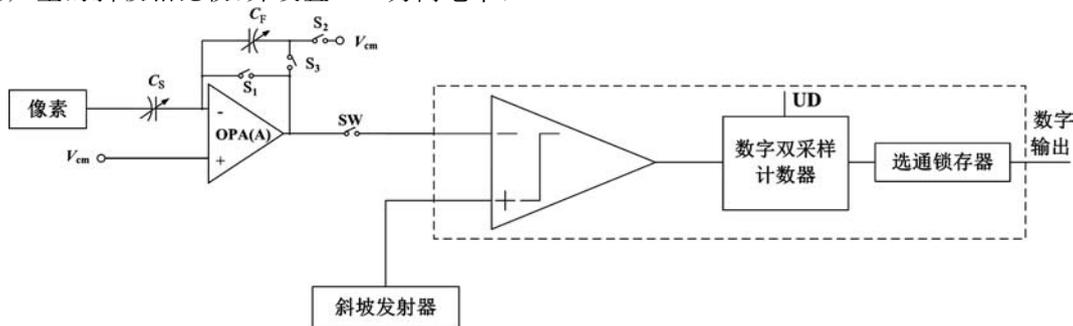


图2 带可变增益和失调消除技术的数字双采样双斜ADC结构

假设OPA运放的放大倍数为 A ,输入失调电压为 V_{os} ,则复位阶段,PGA的输出为

$$V_{out} = \frac{A}{A+1}V_{cm} - \frac{A}{A+1}V_{os} \quad (1)$$

放大阶段,PGA 的输出为

$$V_{out} = \frac{1}{1 + \frac{1}{A} + \frac{1}{1 + \frac{C_S}{C_F}}(1 + A)}(V_{cm} - V_{os}) + \frac{1}{1 + \frac{1}{A}(1 + \frac{C_S}{C_F})} \left[V_{cm} + \frac{C_S}{C_F}(V_{reset} - V_{signal}) \right] \quad (2)$$

数字双采样双斜 ADC 对 PGA 电路的复位阶段和放大阶段分别进行数字量化,并且通过加/减计数器把这两次的数字量化结果进行做差,得到图像传感器的图像输出。通过控制加/减计数器数字域做差转换成模拟域的结果为

$$V_{out} = \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{A} + \frac{1}{1 + \frac{C_S}{C_F}}(1 + A)} + \frac{1}{1 + \frac{1}{A}(1 + \frac{C_S}{C_F})} - \frac{A}{A + 1} \right) V_{cm} + \left(\frac{A}{A + 1} - \frac{1}{1 + \frac{1}{A} \frac{1}{1 + \frac{C_S}{C_F}}(1 + A)} \right) V_{os} + \frac{1}{1 + \frac{1}{A}(1 + \frac{C_S}{C_F})} \cdot \frac{C_S}{C_F}(V_{reset} - V_{signal}) \quad (3)$$

通过上式可以看出,传统 PGA 电路会引入额外的列 FPN。本文提出了适用于数字双采样双斜 ADC 的双失调消除的 PGA 电路,与传统 PGA 相比,数字双采样对两次采样值都进行了失调电压消除处理,能够降低失调电压对列 FPN 的影响,以提高图像质量。

2 提出的 PGA 电路设计

为了克服加入传统 PGA 电路后,数字双采样双斜 ADC 数字量化结果会引入列 FPN 的不足,本文提出了新的 PGA 电路,如图 3(a)所示,其与现有的 PGA 电路一样有运算放大器 OPA、采样电容 C_S 、反馈电容 C_F 和三个开关,主要区别在于:(1)增加了失调采样电容 C_C ;(2)开关 S_2 的一端从接反馈电容 C_F 和开关 S_1 的公共端变为接采样电容 C_S 、反馈电容 C_F 、采样电容 C_C 和开关 S_3 的公共端;(3)开关 S_1 的一端从接反馈电容 C_F 和开关 S_1 的公共端变为接采样电容 C_C 和 OPA 的负输入端的公共

端;(4)反馈电容 C_F 的一端从接开关 S_1 和开关 S_2 的公共端变为接开关 S_1 、开关 S_3 和运放的输出端的公共端。

在 PGA 电路中,提出的方案里增加一个采样失调电容 C_C ,其 PGA 电路工作时序如图 3(b)所示,PGA 工作分 3 步骤执行:

步骤一:失调消除(Auto-Zeroing)阶段

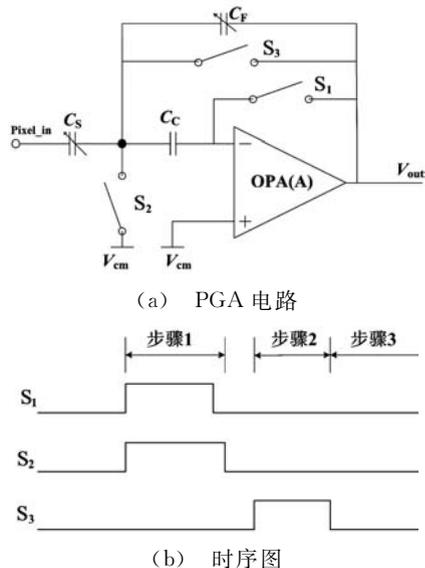


图 3 本文提出的 PGA 电路结构及其时序图

图 4 为本文提出的 PGA 电路消除失调的电路框图。在 Auto-Zeroing 阶段,运放的输入输出端短接,包含失调信息的电荷存储在电容 C_C 上。当信号读取阶段,即 S_1 和 S_2 关闭, S_3 打开,此时,有效失调电压为

$$V_{os, res} = \frac{1}{1 + A} V_{os} \quad (4)$$

其中, A 为 PGA 运放的开环电压增益, V_{os} 为运放的失调电压。

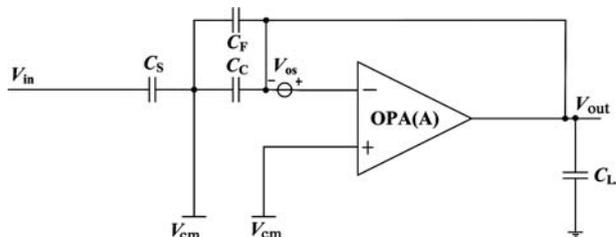


图 4 失调消除阶段电路框图

步骤二:复位阶段

在此阶段, S_1 和 S_2 打开, S_3 闭合,此时运放的输出端与负输入端短接,使运放成单位反馈结构。假设输入为来自像素输出的复位电平 V_{reset} ,存储在

电容 C_s 上的电压为

$$V_1 = \frac{A}{1+A} \left(V_{cm} + \frac{1}{1+A} V_{cm} + \frac{1}{1+A} V_{os} \right) \quad (5)$$

阶段电路框图如图5所示。

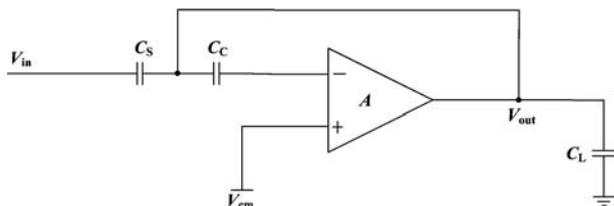


图5 复位阶段电路框图

步骤三：放大阶段

放大阶段电路框图如图6所示，此时E和F节点为悬空节点。假设输入信号为积分信号 V_{signal} ，而E和F节点电荷不会改变，得到如下两式：

$$\begin{aligned} (V_E - V_{signal})C_s + (V_E - V_{out})C_F &= \\ (V_1 - V_{reset})C_s & \end{aligned} \quad (6)$$

$$[(V_{cm} - (V_E + V_{os, res} - V_{cm} - V_{os}))]A = V_{out} \quad (7)$$

通过三个阶段的三个等式可计算出：

$$\begin{aligned} V_{out} = \frac{1}{1 + \frac{1}{A} \left(1 + \frac{C_F}{C_s} \right)} & \left[\left(1 + \frac{1}{A+1} \right) V_{cm} + \left(\frac{1}{A+1} \right) \cdot \right. \\ V_{os} + \frac{C_s}{C_F + \frac{1}{A} (C_s + C_F)} & \left. (V_{reset} - V_{signal}) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

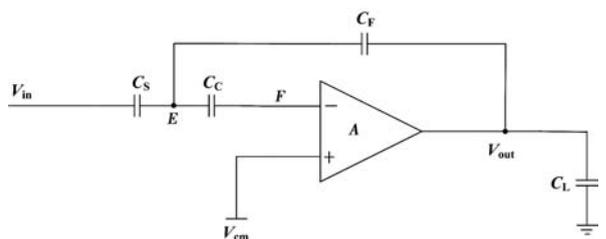


图6 放大阶段电路框图

从式(4)、(5)和(8)可以看出，失调消除阶段通过电容 C_c 储存失调电压；复位阶段输出和放大阶段输出与失调电压 $\frac{1}{A+1} V_{os}$ 相关，两个阶段采集的失调电压都做了失调消除处理，并进行了像素电压相关双采样处理。数字双采样双斜ADC对PGA电路的复位阶段和放大阶段分别进行数字量化，并通过加/减计数器把这两次的数字域量化结果进行做差，得到图像传感器的图像输出。通过控制加/减计数器数字域做差转换成模拟域结果：

$$\begin{aligned} V_{out} = \frac{1}{1 + \frac{1}{A} \left(1 + \frac{C_F}{C_s} \right)} & \frac{C_s}{C_F + \frac{1}{A} (C_s + C_F)} \cdot \\ (V_{reset} - V_{signal}) - \frac{\frac{C_F}{C_s}}{(1+A) \left(1 + \frac{C_F}{C_s} + A \right)} & \cdot \\ \left[\left(1 + \frac{1}{A+1} \right) V_{cm} + \left(\frac{1}{A+1} \right) V_{os} \right] & \end{aligned} \quad (9)$$

随后，通过后级数字双采样ADC处理，与传统PGA结果相比较，大大减小了图像传感器的列FPN。通过式(3)和(9)可以看出，传统PGA电路模拟域做差结果与 V_{os} 成正比列关系，而本文提出的PGA电路模拟域做差结果与 $\frac{1}{A^3} V_{os}$ 成反比关系，大大降低了由 V_{os} 引入图像传感器的列FPN，提高了图像质量。另外，通过把电容 C_s 和电容 C_F 作为可变电容可以进行可编程增益控制。

3 仿真结果分析与对比

将本文提出的PGA采用 $0.18 \mu\text{m}$ CMOS 图像传感器专用工艺进行仿真。设置PGA和ADC比较器模拟电源电压为 3.3 V ，计数器和锁存选通部分数字电源电压为 1.8 V ，时钟频率为 25 MHz 。图7为仿真所需的输入信号及控制时序，图8为在该时序下不同失调电压下的仿真结果。

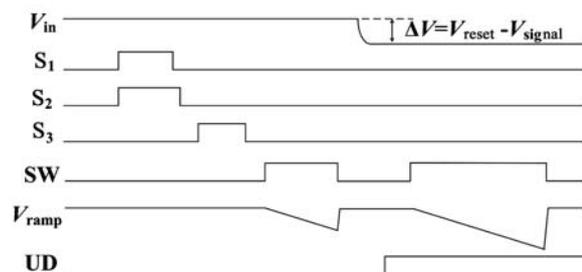


图7 本文提出的PGA+数字双采样ADC的时序

图8分别为本文提出的PGA和传统PGA的多个模拟失调电压的仿真结果。可以看出，由于放大器的失调变化和有限增益，在复位阶段，本文提出的PGA做了失调消除处理，而传统PGA的失调输出随放大器的失调变化单倍线性变化；在放大阶段，本文提出的PGA和普通PGA都做了失调消除处理。

图9是本文提出的PGA和传统PGA分别通过数字双采样双斜ADC处理后的数字量化后转换

为模拟电压与放大器的失调变化的仿真结果。结果表明,与传统 PGA 相比,通过加入本文提出的 PGA 后,再经过数字双采样双斜 ADC 处理,输入失调电压在 $-30 \sim 30$ mV 变化区间内,PGA 电路的输出失调电压可以降至 1 mV 以下,相比传统 PGA 的输出失调电压随输入失调电压单倍线性变化而言,大大降低了列 FPN,提高了成像质量。

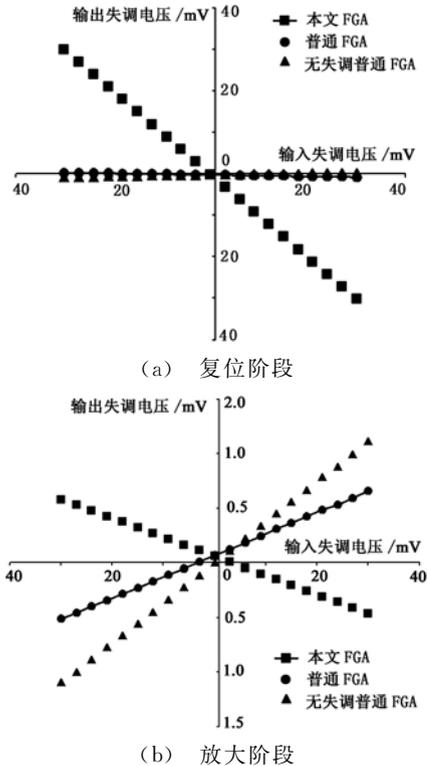


图 8 多个模拟失调电压的仿真结果

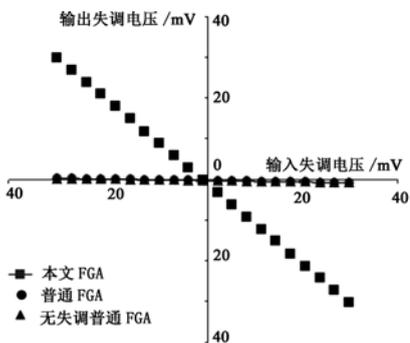


图 9 数字双采样双斜 ADC 处理后失调仿真结果

4 总结

为了扩展传感器的动态范围,设计了用于数字双采样双斜 ADC 架构的双失调消除采集的 PGA 电路结构,该电路能够根据光强变化来处理不同亮度信号,从而提升图像质量。双失调消除采集的

PGA 电路引入了失调采集电容,通过失调电压的采集、复位阶段和 PGA 放大阶段两个阶段电压的采集,以及后续数字双采样电路进行数字量化处理,最小化 PGA 电路引入的列 FPN 噪声。仿真结果显示,双失调消除采集的 PGA 电路通过两个阶段电压采样,再经过后续数字双采样 ADC 处理,在 PGA 电路输入失调电压 $-30 \sim 30$ mV 变化区间内,其输出失调电压可以降至 1 mV 以下,相比传统 PGA 的输出失调电压随输入失调电压单倍线性变化而言,大大降低了列 FPN,提高了图像成像质量。

参考文献:

- [1] Kagawau K, Shishido S, Nunoshita M, et al. A 3.6 pW/frame · pixel 1.35 V PWM CMOS image with dynamic pixel readout and no static bias current[C]// IEEE Inter. Solid-State Circuits Conf., 2008: 54-595.
- [2] 隋晓红,高勇,赵阶喜,等.用于视觉假体的新型高动态范围图像传感器像素单元电路设计[J].电子学报,2011,39(8):1800-1804.
- Sui Xiaohong, Gao Yong, Zhao Jiexi, et al. Circuit design of high-dynamic-range image sensor pixel for visual prostheses[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(8): 1800-1804.
- [3] 周鑫,朱大中.新型集成阵列四象限 CMOS 光电传感器的研制[J].电子学报,2005,33(5):928-930.
- Zhou Xin, Zhu Dazhong. Research of a new integrated arrayed 4 quadrants CMOS photo-electric sensor[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(5): 928-930.
- [4] Matsuo S, Bales T J, Shoda M, et al. 8.9-megapixel video image sensor with 14-b column-parallel SA-ADC[J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 2009, 56(11): 2380-2389.
- [5] Duboi J, Ginjac D, Paindavoine M, et al. A 10 000 fps CMOS sensor with massively parallel image processing[J]. IEEE J. of Solid-State Circuits, 2008, 43(3): 706-717.
- [6] Chen Minsi, Yao Suying, Zhao Yiqiang, et al. Timing control methods for new CMOS image sensor with high frame rate and wide dynamic range[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(11): 1922-1925.
- [7] 徐江涛,贾文龙,高静.基于 CMOS 图像传感器列级 ADC 的数字双采样[J].南开大学学报(自然科学版),2015,48(1):61-66.
- Xu Jiangtao, Jia Wenlong, Gao Jing. Digital double sampling based on CMOS image sensor column-level ADC[J]. J. of Nankai University (Nature Science Edi.), 2015, 48(1): 61-66.

作者简介:

吴治军(1984—),男,重庆人,工程师,主要研究方向为 CMOS 图像传感器设计。

E-mail: 493934428@qq.com

基于MSM结构的表面等离子体共振光纤折射率传感器

郭志勇¹, 葛益娴^{1,2}, 沈令闻¹, 张鹏¹, 顾钦顺¹

(1. 南京信息工程大学 电子与信息工程学院, 南京 210044; 2. 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044)

摘要: 基于表面等离子体共振(SPR)效应,设计了一种基于多模-单模-多模(MSM)结构的光纤折射率传感器。采用光纤熔接的方式构成MSM结构,并且在单模光纤的表面涂覆二氧化钛/银(TiO₂/Ag)复合膜构成传感单元。利用FDTD Solutions仿真分析了单模光纤长度与金属膜厚度对传感器性能的影响。结果表明:单模光纤长度越长,共振深度越深;TiO₂/Ag复合膜中Ag膜厚度为50 nm, TiO₂膜厚度为20 nm时,传感器性能最优,在1.33~1.41环境折射率范围内,传感器的灵敏度约为6 875 nm/RIU。实验结果表明该光纤折射率传感器结构制作工艺简单、灵敏度高。

关键词: 光纤传感器; 表面等离子体共振; MSM结构; 折射率; 复合膜

中图分类号: TP212 **文章编号:** 1001-5868(2020)02-0205-06

Surface Plasmon Resonance Fiber Refractive Index Sensor Based on MSM Structure

GUO Zhiyong¹, GE Yixian^{1,2}, SHEN Lingwen¹, ZHANG Peng¹, GU Qinshun¹

(1. School of Electronics & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, CHN; 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing 210044, CHN)

Abstract: Based on the surface plasmon resonance (SPR) effect, a fiber-optic refractive index sensor based on a multimode-singlemode-multimode (MSM) structure was designed. The structure of the MSM is constructed by optical fiber fusion, and the surface of the single-mode optical fiber is coated with a titanium dioxide/silver (TiO₂/Ag) composite film to form a sensing unit. The effects of single-mode fiber length and metal film thickness on sensor performance were analyzed using FDTD Solutions. The results show that the longer the single-mode fiber length, the deeper the resonance depth; when the thickness of the Ag film is 50 nm, and the thickness of the TiO₂ film is 20 nm, the sensor can obtain the best performance. In the range of 1.33~1.41 ambient refractive index, the sensor has a sensitivity of approximately 6 875 nm/RIU. Experimental results show that the optical fiber refractive index sensor has a simple manufacturing process and high sensitivity.

Key words: optical fiber sensor; SPR; MSM structure; refractive index; composite membrane

0 引言

表面等离子体共振(SPR)光纤折射率传感器是一种利用激发出的倏逝波与金属表面的等离子体产

生的共振效应来测量环境折射率的传感器。相比于其他类型的光纤传感器,SPR光纤传感器具有灵敏度高、抗电磁干扰、响应速度快、体积小等优点,能够适应各种严峻的传感环境,在温度测量^[1-2]、生化研究^[3]、水质检测^[4]等领域都得到了广泛的研究与发展。由于表面等离子体共振效应主要是利用倏逝波

收稿日期:2019-10-10.

基金项目:国家自然科学基金项目(61307061);江苏高校优势学科Ⅲ期建设工程资助项目.

与金属表面的等离子体发生共振而产生的,因此人们通过各种手段改变光纤的结构,例如 D 型抛磨结构^[5-7]、熔融拉锥结构^[8-9]、U 型弯曲结构^[10-11]等,使光纤中的光场从纤芯中泄露,从而激发出更多的倏逝波。传统 SPR 光纤传感器采用的 D 型结构或者拉锥结构,是通过抛磨将光纤的包层去除或利用拉锥使光纤变细的方法来增加倏逝波的泄露,从而获得更优的传感器性能。然而这样的光纤结构处理方法,要对纤细的光纤进行抛磨或拉锥处理,不仅制作工艺复杂,还会导致传感器结构的机械强度变低,难以保证传感器的稳定性。

本文提出了一种基于多模-单模-多模(MSM)结构的 SPR 光纤传感器,此结构仅需要采用普通商用光纤,通过光纤熔接的方式按照多模-单模-多模的顺序熔接即可制作完成,相比于传统的 D 型结构或拉锥结构而言,具有制作工艺简单、成本低廉、传感器结构稳定等诸多优点。本文建立了传感器结构模型,通过理论计算与 FDTD Solutions 仿真模拟,分析了传感器结构中单模光纤长度与金属膜厚度对传感器性能的影响,并利用光纤熔接工艺和镀膜工艺制作了该传感器结构,建立了折射率测量实验系统,并且对实验结果进行了分析。

1 传感器结构和传感原理

本文所提出的基于 MSM 结构的 SPR 光纤传感器结构示意图如图 1 所示,通过光纤熔接的方式将单模光纤连接在两段多模光纤中间,即构成了 MSM 的光纤结构,并在单模光纤的表面镀上用于激发 SPR 效应的金属膜从而构成传感单元。在本结构中采用的金属膜材料为 TiO_2/Ag 复合膜,在 Ag 膜表面镀上 TiO_2 氧化物层,既能够防止 Ag 膜在空气中氧化,也能够提高传感器的灵敏度^[12-13]。

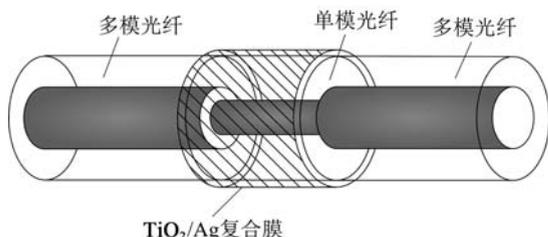


图 1 SPR 光纤传感器结构示意图

正常情况下,光场以基模的形式在纤芯中传播,因此纤芯中的光场不容易受到外界环境变化的影响^[14]。本文所提出的 MSM 结构通过在两段多模

光纤中熔接一段单模光纤,此时由于模场直径不匹配,从而导致在多模光纤纤芯中传播的基模将会耦合到单模光纤的包层中,进而激发出单模光纤中的高阶包层模,当高阶包层模所产生的倏逝波的波矢与金属层表面的等离子波的波矢相等时将产生共振,也就形成了 SPR 效应。

假设光在光纤中都是沿着子午面传播,SPR 光纤传感器结构中光线的传播示意图如图 2 所示,其中单模光纤的长度为 L ,包层直径为 D ,光纤以固定入射角 α 入射到金属层表面。

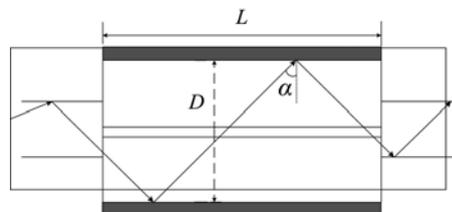


图 2 光在光纤中的传播示意图

在 SPR 光纤传感器中,光在光纤中传播会发生多次反射,其中单次反射处可以近似地看成棱镜结构,因此首先通过 Krestchmann 棱镜模型得到表面等离子体共振的共振条件^[15-16]为

$$\sqrt{\epsilon_0} \frac{\omega}{c} \sin \alpha = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}} \quad (1)$$

其中, ϵ_0 , ϵ_1 和 ϵ_2 分别为棱镜、金属层和环境介质的介电常数, ω 为光波的角频率。由共振条件可以看出,只要保持入射光的角度不变,在某一特定波长下在透射光谱上将会表现出吸收峰,吸收峰的峰谷位置即为共振波长。当外界环境折射率发生改变时,共振波长的位置也会相应地变化。所以只需要通过测量透射光谱图中共振峰的位置变化就可以准确获得外界环境折射率的变化。

通过计算可以得出 Krestchmann 棱镜模型的反射系数^[15-16]:

$$r = \left(\frac{r_{01} + r_{12} e^{2ik_z d_1}}{1 + r_{01} r_{12} e^{2ik_z d_1}} \right)^2 \quad (2)$$

然而在实际 SPR 光纤传感器中,光在光纤中会发生多次反射,反射次数 N 为

$$N = \frac{L}{D \tan \alpha} \quad (3)$$

同时,光在光纤内传播的反射角在临界角到 90° 之间变化,分别对应不同的传播模式,这些传播模式的能量分布是不均匀的,而是类似于高斯分布,模式密度分布函数^[16]为

$$I(\alpha) = (18\,510 + 369.4\alpha - 1\,071\alpha^2 + 133\alpha^3 - 4.754\alpha^4) / 100\,000 \quad (4)$$

根据以上公式得出 SPR 光纤传感器中的总反射系数^[16]为

$$R = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M r^N \times I(\alpha) \quad (5)$$

其中, M 为传播模式数。从以上理论分析可以得出, 单模光纤的长度越长, 光在传感区域的反射次数就越多, 从而导致反射系数越小, 即在透射谱中表现为共振峰的共振深度越深, 而共振峰的位置仅与材料的介电常数、入射光的波长与入射角有关, 与单模光纤的长度无关。单模光纤的长度仅影响共振峰深度变化, 并不影响共振峰位置的变化。

利用以上反射系数计算的结果, 通过 MATLAB 计算得出在 1.33~1.41 环境折射率范围内 SPR 传感器的透射谱, 如图 3 所示。从图中可以看出, 随着外界环境折射率的逐渐增加, 共振峰的位置逐渐发生红移, 共振波长与环境折射率之间存在着基本的对应关系, 通过测量透射光谱中共振波长的变化, 即可准确获得环境折射率的变化。

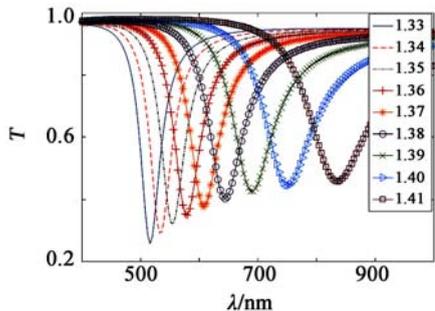


图 3 不同环境折射率下的 SPR 透射谱

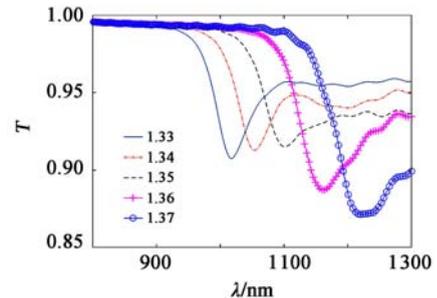
2 FDTD Solutions 仿真模拟

对于本文所设计的基于 MSM 结构的光纤折射率传感器, 单模光纤的长度与金属膜的厚度是影响传感器性能的两个重要参数。本文采用 FDTD Solutions 软件进行仿真模拟, 基于时域有限差分法将空间网格化, 从时间域信号中获得宽波段的连续稳态结果, 得到精准的仿真结果。

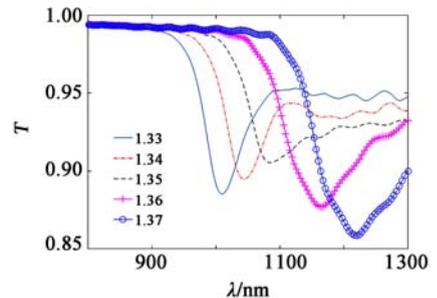
2.1 单模光纤长度对传感器性能的影响

首先对传感器结构进行建模, 在此仿真模型中, 设置单模光纤的纤芯直径为 $10\ \mu\text{m}$, 包层直径为 $125\ \mu\text{m}$, 多模光纤的纤芯直径为 $62.5\ \mu\text{m}$, 包层直径为 $125\ \mu\text{m}$ 。在本结构中单模光纤的长度即为整个传感区域的长度, 由于计算机内存的限制, FDTD 无

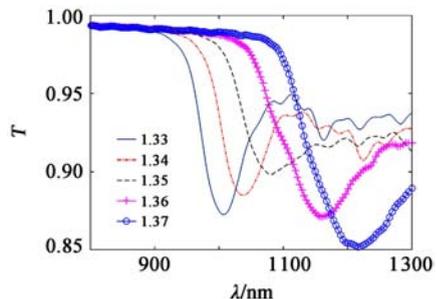
法进行大结构尺寸模型的仿真, 因此本仿真中通过缩减实际单模光纤的尺寸, 分析缩减后单模光纤的长度对传感器性能的影响来获得实际长度与传感器性能的关系。设置单模光纤的长度分别为 300, 450, 600, 800 以及 $1\,000\ \mu\text{m}$, 并且保持金属膜的长度与单模光纤的长度一致, 得到在 1.33~1.37 环境折射率范围内, 不同光纤长度下的 SPR 传感器的透



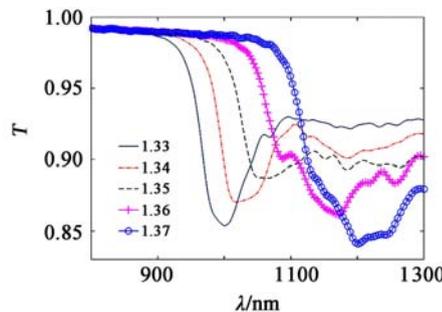
(a) 单模光纤长度 $300\ \mu\text{m}$



(b) 单模光纤长度 $450\ \mu\text{m}$



(c) 单模光纤长度 $600\ \mu\text{m}$



(d) 单模光纤长度 $800\ \mu\text{m}$

图 4 不同环境折射率对应不同单模光纤长度下的 SPR 透射谱

射谱随环境折射率变化的关系,如图 4 所示。从图中可以看出随着单模光纤长度的增加,仅有共振峰的深度逐渐变深,而共振峰的位置基本保持不变,即传感器自身的灵敏度基本保持不变,这一结果与理论分析的结论相吻合。

以环境折射率 1.33 为例,不同单模光纤长度下的 SPR 透射谱如图 5 所示,从图中可见随着单模光纤长度的增加,共振峰的深度逐渐变深,即 SPR 现象更明显。在环境折射率 1.33 下,传感器的品质因数 Q 与单模光纤长度的关系如图 6 所示,可见随着光纤长度增加,品质因数逐渐变小,这主要由于光纤长度增加,共振峰的半高宽逐渐增加,而传感器的灵敏度不变,导致传感器的品质因数随着单模光纤长度的增加逐渐变小。

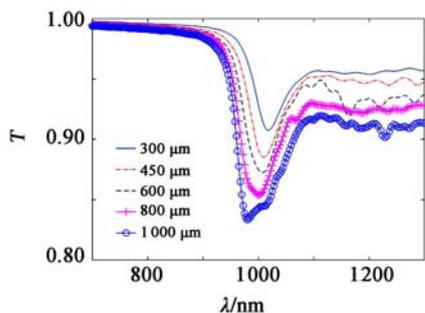


图 5 1.33 环境折射率对应不同单模光纤长度下的 SPR 透射谱

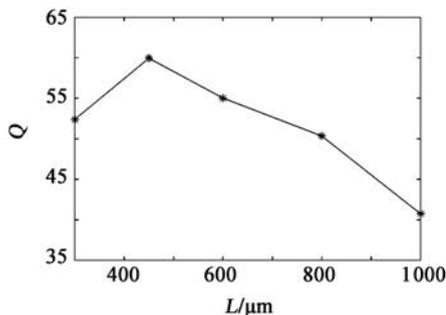


图 6 品质因数与单模光纤长度的关系图

从以上仿真结果可以得出,随着单模光纤长度的增加,共振峰的深度逐渐增加,但品质因数降低,同时考虑到实际制作传感器的工艺,本文所选择单模光纤的长度为 5 mm 左右。

2.2 金属膜厚度对传感器性能的影响

本文所采用的金属膜材料为 TiO_2/Ag 复合膜,由 Ag 膜与 TiO_2 膜复合构成。为得到复合膜的厚度对传感器性能的影响,首先分析单层银膜厚度对传感器性能的影响,在环境折射率 1.33 下,不同银膜厚度的 SPR 透射谱如图 7 所示。从图中可以看

出在银膜厚度为 50 nm 时,吸收峰的半高宽最小且共振深度最深,这主要是由于倏逝波的穿透深度有限,当金属膜厚度大于倏逝波的穿透深度时,倏逝场强度逐渐降低,从而导致 SPR 现象随之减弱。因此本文选取的 TiO_2/Ag 复合膜中银膜厚度为 50 nm。

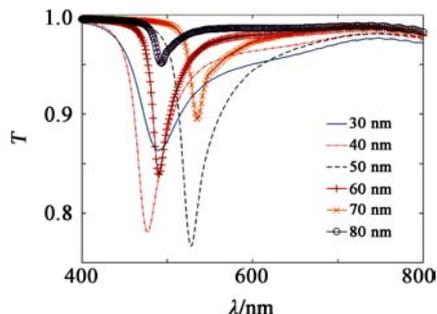


图 7 不同 Ag 膜厚度对应的 SPR 透射谱

其次分析 TiO_2/Ag 复合膜中 TiO_2 膜的厚度对传感器性能的影响,在 50 nm 厚的 Ag 膜表面分别镀 5, 10, 20, 25 和 30 nm 厚的 TiO_2 膜,仿真模拟得到不同厚度 TiO_2 膜的传感器在 1.33 环境折射率下的透射谱,如图 8 所示。从图中可以看出,当 TiO_2 膜的厚度为 20 nm 时,吸收峰的共振深度最深,即 SPR 现象最明显。因此本文选取 TiO_2/Ag 复合膜中,Ag 膜厚度为 50 nm, TiO_2 膜厚度为 20 nm。

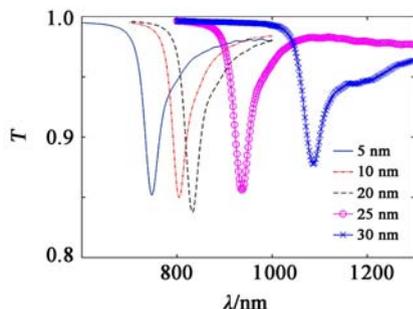


图 8 不同 TiO_2 膜厚度对应的 SPR 透射谱

2.3 传感环境分析

通过以上仿真分析,选取单模光纤长度为 5 mm, TiO_2/Ag 复合膜厚度分别为 20 和 50 nm,建立传感器结构模型,分析传感环境折射率对 MSM 型光纤 SPR 传感器性能的影响。当介质折射率范围为 1.33~1.41 时,其 SPR 共振谱如图 9 所示。从图中可以看出,随着环境折射率的不断增加,共振峰位置发生红移。图 10 为共振波长和折射率 n 的关系图,在 1.33~1.41 环境折射率范围内,传感器的灵敏度约为 6 875 nm/RIU,表明本文所设计的基

于MSM结构的SPR光纤折射率传感器具备了较高的线性度和灵敏度。

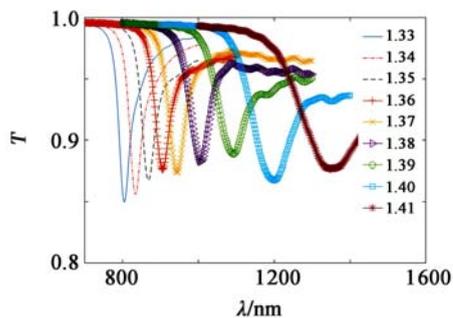


图9 不同环境折射率下 TiO_2/Ag 复合膜的 SPR 透射谱

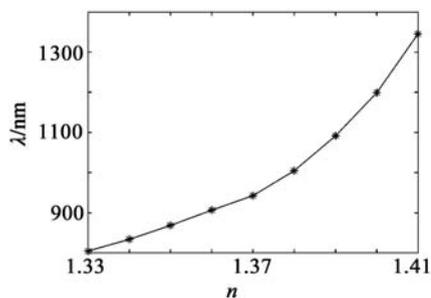


图10 共振波长和折射率的关系

3 实验测试系统与结果分析

3.1 实验测试系统

利用光纤熔接机,选用普通的商用通信光纤构成上述MSM结构,其中单模光纤的长度为5 mm。通过磁控溅射镀膜机在单模光纤表面镀 TiO_2/Ag 复合膜,构成整个传感单元。建立的实验测试系统如图11所示,该系统包括HL2000卤钨灯光源、多模光纤、传感单元、USB2000+光谱仪以及计算机。本实验采用不同浓度的甘油溶液来模拟传感环境折射率的变化,通过配比不同浓度的甘油溶液,利用阿贝折射率仪标定不同浓度所对应的折射率。

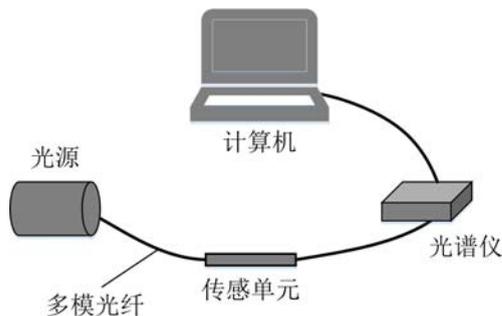
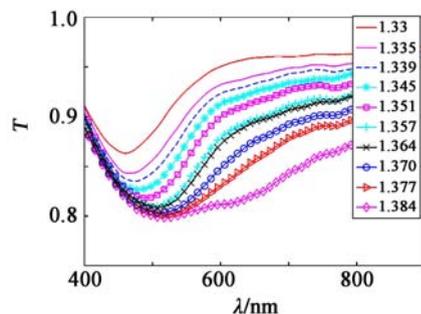


图11 传感器测试系统示意图

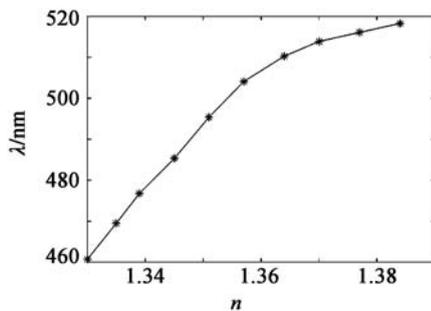
3.2 实验结果分析

利用MATLAB对测量得到的结果进行滤波与

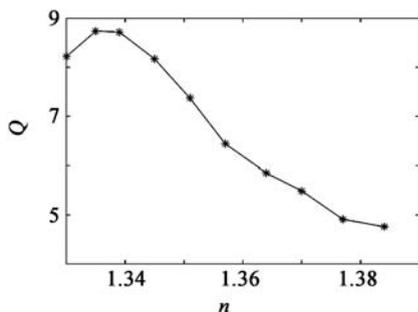
归一化处理,得到在1.33~1.384环境折射率范围内的透射谱,如图12(a)所示,从图中可以看出,随着外界环境折射率的增加,SPR共振峰的位置随之发生红移。图12(b)为折射率与共振波长的关系图,实验制作的光纤传感器的灵敏度约为1066 nm/RIU。图12(c)为折射率与品质因数的关系图,可见随着环境折射率的不断增加,品质因数不断减小,这主要是由于当环境折射率逐渐增加时,SPR吸收峰半高宽逐渐增大,从图中可以看出,该传感器在低环境折射率下性能较优,在高环境折射率下的性能略低。由于制作该传感器结构所采用光纤的包层与纤芯折射率与仿真模型中设置的折射率不一致,并且镀膜表面存在一定的粗糙度,导致在1.33~1.384环境折射率范围内传感器的灵敏度低于仿真结果,总体上,通过本实验仍然验证了该结构SPR光纤传感器的可行性与制作工艺简单的优点。



(a) 传感器 SPR 透射谱



(b) 折射率与共振波长的关系



(c) 折射率与品质因数的关系

图12 实验测量结果图

4 结论

本文设计了一种基于 MSM 结构的 SPR 光纤折射率传感器,具有制作工艺简单、结构稳定、灵敏度高等优点。通过理论计算与 FDTD Solutions 仿真模拟,分析了传感器结构中单模光纤的长度与金属膜厚度对传感器性能的影响。结果表明,单模光纤长度越长,共振深度越深;TiO₂/Ag 复合膜中 Ag 膜厚度为 50 nm, TiO₂ 膜厚度为 20 nm 时,传感器性能最优。并对制作的 MSM 结构传感器进行了测试,在 1.33~1.384 环境折射率范围内,其灵敏度约为 1066 nm/RIU。为后续进一步研究与制作 MSM 结构 SPR 光纤传感器奠定了基础。

参考文献:

- [1] Wang Y, Huang Q, Zhu W, et al. Novel optical fiber SPR temperature sensor based on MMF-PCF-MMF structure and gold-PDMS film[J]. *Opt. Express*, 2018, 26(2): 1910-1917.
- [2] He C, Fang J, Zhang Y, et al. High performance all-fiber temperature sensor based on coreless side-polished fiber wrapped with polydimethylsiloxane[J]. *Opt. Express*, 2018, 26(8): 9686-9699.
- [3] Caucheteur C, Guo T, Albert J. Review of plasmonic fiber optic biochemical sensors: improving the limit of detection[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2015, 407(14): 3883-3897.
- [4] 冯李航. 光纤新型结构 SPR 传感器开发及检测应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
Feng Lihang. Research on the development and detection application of SPR sensor with new optical fiber structure[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [5] Santos D F, Guerreiro A, Baptista J M. Numerical investigation of a refractive index SPR D-type optical fiber sensor using COMSOL multiphysics[J]. *Photonic Sensors*, 2013, 3(1): 61-66.
- [6] Chiu M H, Wang S F, Chang R S. D-type fiber biosensor based on surface-plasmon resonance technology and heterodyne interferometry[J]. *Opt. Lett.*, 2005, 30(3): 233-235.
- [7] 蔡凯杰, 葛益娴, 周俊萍. 基于双 D 型光纤表面等离子共振折射率传感研究[J]. *半导体光电*, 2018, 39(5): 628-633.
Cai Kaijie, Ge Yixian, Zhou Junping. Research on surface

plasmon resonance refractive index sensing based on double-D fiber[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2018, 39(5): 628-633.

- [8] Lin H Y, Huang C H, Cheng G L, et al. Tapered optical fiber sensor based on localized surface plasmon resonance[J]. *Opt. Express*, 2012, 20(19): 21693-21701.
- [9] Verma R K, Sharma A K, Gupta B D. Surface plasmon resonance based tapered fiber optic sensor with different taper profiles[J]. *Opt. Commun.*, 2008, 281(6): 1486-1491.
- [10] Verma R K, Gupta B D. Theoretical modelling of a bi-dimensional U-shaped surface plasmon resonance based fibre optic sensor for sensitivity enhancement[J]. *J. of Physics D: Appl. Phys.*, 2008, 41(9): 095106.
- [11] Zhang C, Li Z, Jiang S Z, et al. U-bent fiber optic SPR sensor based on graphene/AgNPs[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 251: 127-133.
- [12] Wang T, Zhang M, Liu K, et al. The effect of the TiO₂ film on the performance of the optical fiber SPR sensor[J]. *Opt. Commun.*, 2019, 448: 93-97.
- [13] 顾丹. 银掺杂二氧化钛半导体薄膜的 SPR 性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.
Gu Dan. SPR properties of silver doped titanium dioxide semiconductor films [D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2015.
- [14] 梁燕洪. 光纤包层模式传感器及其应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 20-21.
Liang Yanhong. Optical fiber cladding mode sensor and its application research [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016: 21-21.
- [15] Velazquez-Gonzalez J S, Monzon-Hernandez D, Martinez-Pinon F, et al. Surface plasmon resonance-based optical fiber embedded in PDMS for temperature sensing[J]. *IEEE J. of Sel. Topics in Quantum Electron.*, 2016, 23(2): 126-131.
- [16] 曹振新. 基于表面等离子体共振效应的信息获取和显示[D]. 南京: 东南大学, 2005: 12-19.
Cao Zhenxin. Information acquisition and display based on SPR effect[D]. Nanjing: Southeast University, 2005: 12-19.

作者简介:

郭志勇(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感器;

葛益娴(1982—),女,江苏盐城人,博士,副教授,主要从事光纤 MEMS 压力传感器的研究。

E-mail: geyixian820925@163.com

蓝光 GaN 基 Micro-LED 芯片制备及激光剥离工艺研究

王仙翅¹, 潘章旭², 刘久澄², 郭婵², 李志成¹, 龚岩芬², 龚政²

(1. 中南大学材料科学与工程学院, 长沙 410083; 2. 广东省半导体产业技术研究院, 广州 510650)

摘要: 基于半导体制造工艺, 制备了尺寸为 $50\ \mu\text{m} \times 80\ \mu\text{m}$ 的蓝光氮化镓(GaN)基 Micro-LED 芯片。芯片的正向导通电压在 2.55 V 左右; 测试了 10 颗 LED 芯片在 1 mA 注入电流下的电压值, 得到的最大值和最小值分别为 3.24 和 3.12 V, 波动幅度在 4% 以内。在 1 mA 的测试电流下, 测试芯片的 EL 光谱峰值波长和半高宽分别为 453 和 14.4 nm, 芯片的外量子效率可达 12.38%, 芯片发光均匀且亮度很大。测试结果表明, 所制备的 Micro-LED 芯片具有优异的光电性能。此外, 通过激光剥离技术, 实现了 Micro-LED 芯片的转移。研究了激光剥离工艺对 Micro-LED 芯片光电性能的影响, 发现在优化的工艺条件下, 激光剥离对芯片的光电性能几乎无影响。这些结果有助于小间距微尺寸 LED 芯片阵列及显示技术的研究。

关键词: Micro-LED 芯片; 激光剥离; 芯片转移; 光电性能

中图分类号: TN312.8 **文章编号:** 1001-5868(2020)02-0211-06

Preparation of Blue Light GaN-based Micro-LED Chips and Study on Laser Lift-off Process

WANG Xianchi¹, PAN Zhangxu², LIU Jiucheng², GUO Chan²,

LI Zhicheng¹, GONG Yanfen², GONG Zheng²

(1. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, CHN;

2. Guangdong Institute of Semiconductor Industrial Technology, Guangzhou 510650, CHN)

Abstract: Based on semiconductor manufacturing process, blue light GaN-based Micro-LED chips with a size of $50\ \mu\text{m} \times 80\ \mu\text{m}$ were prepared. The forward voltage of the chips is about 2.55 V. The voltage of ten LED chips under the injection current of 1 mA were tested, and the maximum value of 3.24 V and minimum value of 3.12 V were obtained with a fluctuation amplitude within 4%. At the test current of 1 mA, the peak wavelength and FWHM of the EL spectrum of the test chips are 453 nm and 14.4 nm, respectively. The external quantum efficiency of the chip can reach up to 12.38%, and the chip emits very uniform light and presents a high brightness. The test results show that the prepared Micro-LED chips have excellent photoelectric performance. In addition, Micro-LED chips transfer was achieved through laser lift-off technology, and the influence of laser lift-off process on the photoelectric performance of Micro-LED chips was studied. It is found that the laser lift-off process almost has no effect on the photoelectric performance of the chips under optimized process conditions.

Key words: Micro-LED chips; laser lift-off; chips transfer; photoelectric performance

收稿日期: 2019-12-14.

基金项目: 广州市科技计划项目-国际科技合作项目(201807010093); 广东省科学院人才项目(2017GDASCX-0703); 广东省重大科技专项项目(2017B010114002).

0 引言

氮化镓(GaN)基发光二极管(LED)因具有高效、可靠、响应速度快、寿命长、功耗低等优点,不仅被广泛应用于全彩显示面板背光、交通信号灯、汽车照明、固态照明等领域^[1-3],而且可以制造成由COMS/TFT控制^[4]集成的微尺寸LED阵列,用于小型投影仪、微显示器、可见光通信、医学研究等^[5-8]。LED的使用寿命非常长,可以在极端条件如高温或低温、高湿度和不稳定的环境下工作,这些特性表明LED非常适合显示应用。此外,随着微尺寸LED(Micro-LED)技术的发展,以及人们对增强现实(AR)、虚拟现实(VR)等^[9]可穿戴设备需求的增长,Micro-LED显示技术已经成为半导体领域研究的热点。与液晶显示器(LCD)相比,Micro-LED显示器无需外部光源;与有机发光二极管(OLED)相比,Micro-LED在亮度、寿命、热稳定性和极端条件下使用等方面更有优势^[10]。近年来,研究者们对GaN基LED开展了大量的研究工作,有团队报道了实现GaN基LED颜色可调性的方法,比如结合荧光粉或者量子点等实现颜色转换,展示了其制备成彩色微显示器的应用前景^[11]。蓝光GaN基LED芯片结构可以分为两类:垂直芯片结构和倒装芯片结构,而研究人员根据芯片结构进行p和n电极总线设计,在制备有源矩阵和无源矩阵Micro-LED显示器上取得了不少成果^[12-14]。

近年来,倒装芯片工艺已广泛应用于微尺寸LED阵列的研究。Gong团队^[15]制备了一种具有高像素密度的微像素化LED阵列,由于采用倒装芯片结构,这些器件的光电性能得到了极大的提高。倒装芯片制备完成后,结合激光剥离工艺实现LED芯片阵列的转移,可以制备具有不同功能的光电器件^[16-17]。Chun团队^[18]通过激光剥离和转印的方法制备了柔性GaN基LED系统,但是转移的成功率仍然较低。此外,Liu团队^[19]制备了蓝宝石基倒装Micro-LED芯片,首先将蓝宝石衬底抛光减薄,接着将LED芯片与驱动背板进行绑定键合,这种方法存在LED的出光效率降低和难以制备全彩微显示器等缺点。也有研究报道先将蓝宝石基Micro-LED芯片与驱动背板进行绑定键合。接着通过激光剥离去掉整个蓝宝石衬底,制备出主动寻址单色微LED显示器。但是,采用这种激光剥离实现芯片集成绑定的方法存在需要将蓝宝石进行切割、难以

灵活方便地与不同的驱动电路绑定等缺点^[20]。

本文制备了倒装蓝光GaN基Micro-LED芯片,进行了黏附性临时衬底激光剥离技术的研究,首先将芯片通过激光剥离先转移至具有黏附性的临时衬底上,然后解除临时衬底的黏性并把芯片转移至高分子薄膜上,实现了芯片的二次转移;接着研究了激光剥离工艺对蓝光GaN基芯片光电性能的影响。

1 实验

本文制备的蓝光GaN基Micro-LED芯片使用的是商业化的蓝光LED外延片。该蓝光LED外延片通过金属有机化学气相沉积(MOCVD)在图形化的蓝宝石衬底上依次外延生长不同的功能层而得,从下至上分别为GaN缓冲层(μ -GaN),n型GaN层,多量子阱(MQW)层和p型GaN层。通过深刻蚀技术刻蚀GaN至蓝宝石衬底,制备一颗颗彼此孤立的蓝光Micro-LED芯片,然后结合激光剥离工艺实现芯片的转移,以方便后续进行LED芯片的相关研究工作。芯片制备工艺流程如图1所示,首先进行外延片的清洗,有机清洗和无机清洗各15 min,以去除外延片表面的杂质和外延生长残留的金属离子;接着使用电子束蒸镀一层ITO作为透明导电层,使用快速退火炉在O₂气氛、550℃下进行快速退火以提高ITO导电层的透光率,通过湿法腐蚀刻蚀掉n电极区域的ITO,使用感应耦合等离子体(ICP)干法刻蚀GaN至n型GaN层制备台面结构,以便后续进行n电极的欧姆接触工艺;然后使用等离子增强化学气相沉积(PECVD)沉积一层较厚的SiO₂保护层,使用湿法刻蚀去掉芯片区域周边的SiO₂,使用ICP干法刻蚀GaN至蓝宝石衬底;再使用电子束蒸镀一层Ni/Au金属薄膜,采用超声剥离技术制备反射层,在空气气氛、450℃条件下退火3 min,获得性能优异的反射镜;然后采用PECVD沉积一层SiO₂钝化层,使用ICP干法刻蚀掉n电极和p电极区域的SiO₂;最后使用电子束蒸镀一层Ti/Al/Ni/Au金属薄膜,使用超声剥离技术制备n电极和p电极,获得尺寸为50 μ m \times 80 μ m的蓝光GaN基Micro-LED芯片,其芯片结构如图2所示。



图1 微尺寸LED芯片制备流程

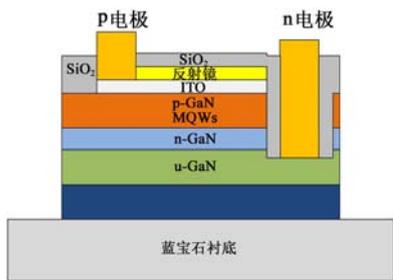


图2 微尺寸 LED 芯片的结构示意图

制备完成后,使用点测机(PG2100)测试微尺寸蓝光 GaN 基芯片的电学性能与光学性能。

Micro-LED 芯片制备完成后,进行后续的激光剥离工艺(LLO)。首先,将蓝宝石衬底进行抛光减薄,目的是在芯片剥离时能够将激光清晰地聚焦在蓝宝石衬底上方的 GaN 缓冲层上;然后将抛光减薄后的外延片芯片贴合到黏附性的临时衬底上,临时衬底在激光剥离时起到芯片支撑的作用。使用全固态半导体激光器超快脉冲激光(波长为 266 nm)进行芯片的剥离,激光在 GaN-蓝宝石界面发生吸收,使未掺杂的 GaN 分解为氮(N_2)和镓(Ga)金属,反应化学式为: $2GaN \rightarrow 2Ga(m) + N_2(g)$,可以将蓝宝石衬底轻松移除,以完成芯片的初次转移;接着将黏附性的临时衬底解除黏性并将上面的芯片转移至高分子薄膜上,完成芯片的二次转移。通过优化激光剥离时的功率,得到最佳剥离功率为 0.6 mW,在此剥离功率下,激光剥离对芯片没有损伤且芯片转移成功率可高达 97%。图 3 展示了激光剥离与芯片转移的流程。

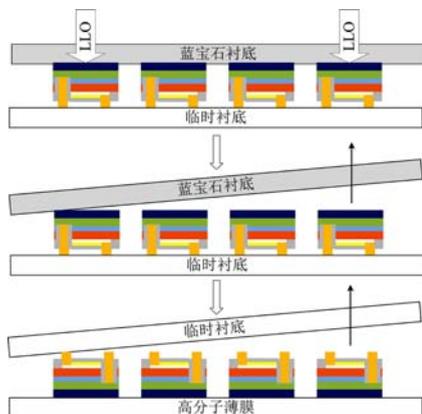


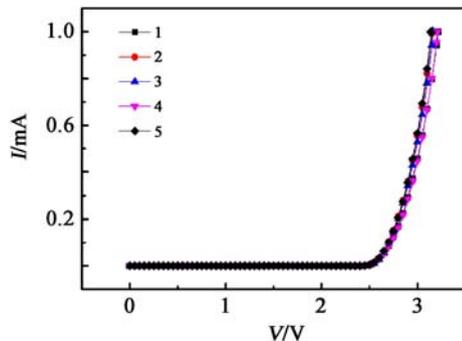
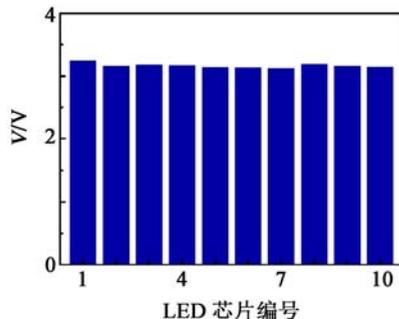
图3 激光剥离与芯片转移流程示意图

2 结果与讨论

2.1 制备芯片的光电性能

实验制备了尺寸为 $50 \mu m \times 80 \mu m$ 的蓝光 GaN

基 Micro-LED 芯片,制备完成后,使用点测机(PG2100)测试了微尺寸蓝光 GaN 基 LED 芯片的电学性能与光学性能。图 4 展示了 GaN 基 Micro-LED 芯片的电学性能。图 4(a)展示了 5 颗具有代表性的蓝光 GaN 基 Micro-LED 芯片(1~5 依次编号)的电流-电压($I-V$)特性,芯片的正向导通电压在 2.55 V 左右,由于蓝宝石基蓝光外延片具有高效优异的量子阱结构,当正向导通电流在 $10 \mu A$ 时,制备的 GaN 基 Micro-LED 芯片已经能够发光且发光亮度较大;当测试电流增大到 1 mA 时,5 颗芯片的电压值分别为 3.136, 3.143, 3.159, 3.202 和 3.215 V,表现出优异的电学性能,而这与 ITO 透明导电层密切相关。为了进一步测试芯片 $I-V$ 特性的均匀性,随机选取 10 颗 LED 芯片(1~10 依次编号)并测试其 $I-V$ 曲线,这些 LED 芯片在 1 mA 测试电流下的电压值如图 4(b)所示,测得的电压最大值为 3.24 V,最小值为 3.12 V,波动幅度在 4% 以内,高均匀性说明芯片制备工艺较为成熟。以上分析表明实验制备的微尺寸蓝光 LED 芯片电学性能优异,满足用于微显示器的性能需求。

(a) 5颗LED芯片的 $I-V$ 特性

(b) 随机选取的 10 颗 LED 芯片在 1 mA 电流下的电压值

图4 GaN 基 Micro-LED 芯片的电学性能

图 5 展示了 1 颗代表性的 GaN 基 Micro-LED 芯片在 1 mA 测试电流下的电致发光(EL)光谱,插图是相应芯片点亮时的光学图片。从 EL 光谱中可

可以看出,该 LED 芯片在 1 mA 测试电流下的 EL 光谱峰值波长和半高宽分别为 453 和 14.4 nm。测试其他芯片在 1 mA 电流下的 EL 光谱,与图 5 几乎一样。从插图中可以看到 LED 芯片周边均匀的圆形光圈,说明该芯片发光均匀。由于使用点测机测试芯片的光电性能时,采用的是上收光模式,将两个探针分别扎在宽度只有 20 余微米的 n 电极和 p 电极上,这样多少会对光电性能的测试产生一点影响,但是通过实验结果分析,影响比较微小。后续将倒装芯片绑定在电路上,光从芯片的背面发射出来,没有电极的光阻挡,加上芯片中反射镜层的光反射作用,可以让芯片在 1 mA 注入电流下发光更加均匀且亮度更大。制备的微尺寸蓝光 LED 芯片光学性能优良,证明了其在新型微显示器上的应用前景。

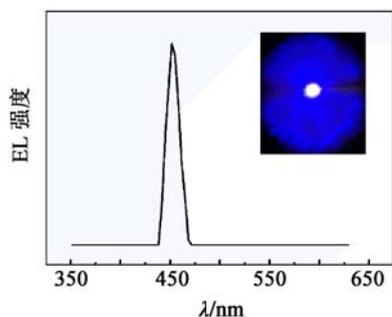
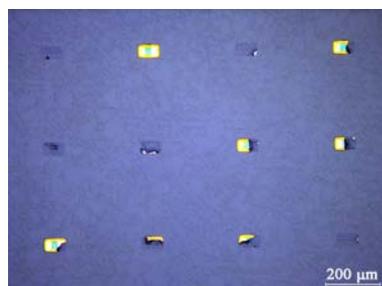


图 5 芯片在 1 mA 电流下的 EL 光谱

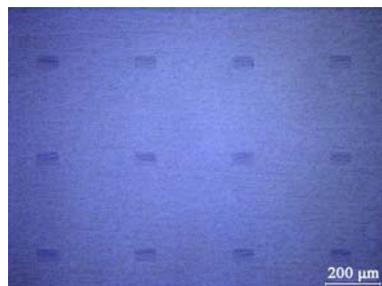
2.2 激光剥离工艺对芯片的影响

以上结果表明制备的蓝光 GaN 基 Micro-LED 芯片具有优异的光电性能。芯片在制备完成后又继续进行了激光剥离与芯片转移的工艺实验,而本文提出的黏附性临时衬底激光剥离技术不同于已经报道^[20]的激光剥离以实现芯片阵列转移的方法。通过激光剥离工艺将芯片无损伤地转移至临时衬底上是实验的关键步骤,本文研究了未优化与优化的剥离条件对芯片的影响。图 6 展示了未优化与优化的激光剥离条件下芯片剥离后原衬底的光学图片。由图 6(a)可知,在未优化激光剥离条件下,存在芯片在蓝宝石衬底上未剥离下来、剥离下来的芯片碎裂、芯片电极脱落等情况。由图 6(b)可知,通过优化激光剥离条件,主要是调节激光剥离时的功率,得到最佳功率为 0.6 mW,芯片转移成功率可高达 97%,几乎不存在芯片碎裂、芯片电极脱落等情况。将芯片转移至黏附性临时衬底后,将临时衬底解除黏性,然后将芯片转移至高分子薄膜上,实现芯片的二次转移。将芯片翻转到高分子膜上后,可以灵活地选取

芯片并集成到设计的电路上进行相关研究。图 7 展示了转移至高分子薄膜上芯片的光学图片。



(a) 未优化条件下



(b) 优化条件下

图 6 芯片激光剥离后原衬底的光学图片

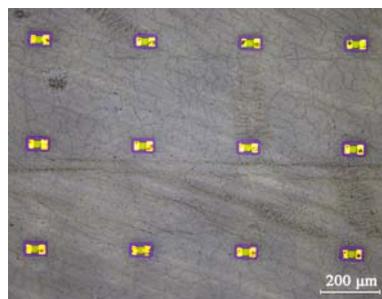
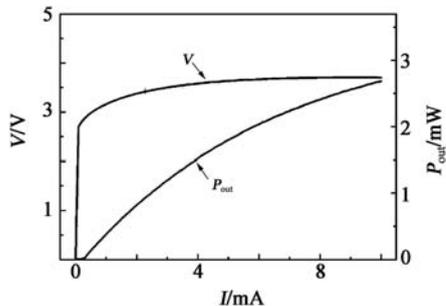


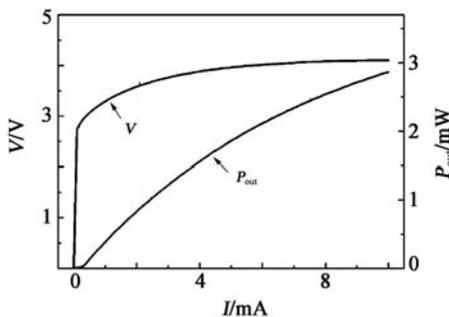
图 7 高分子薄膜上芯片的光学图片

在优化剥离条件下通过激光剥离技术将芯片转移至高分子薄膜上后,研究了激光剥离工艺对芯片光电性能的影响。图 8 展示了激光剥离前后具有代表性的芯片的光电性能,包括 $I-V$ 特性、光输出功率 P_{out} 和外量子效率 η_{ext} 。由图 8(a)可知,选取的 LED 芯片的正向导通电压约为 2.63 V;当电流达到 1 mA 时,导通电压为 3.15 V;当电流达到 5 mA 时,导通电压为 3.63 V;而当电流达到 10 mA 时,导通电压为 3.70 V;而其光输出功率随输入电流的增加而增大,当输入电流为 10 mA 时,光输出功率为 2.68 mW。在芯片尺寸只有 $50 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$ 的情况下,单颗芯片能够拥有以上的电光数据,证明制备的芯片光电性能很好。图 8(b)展示了激光剥离后一颗具有代表性芯片的 $I-V$ 特性和光输出功率,其正向导通电压约为 2.69 V;当电流达到 1 mA 时,导通

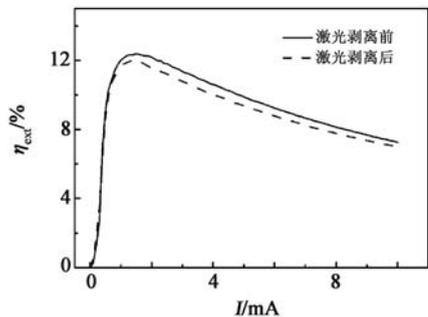
电压为 3.29 V; 当电流达到 5 mA 时, 导通电压为 3.96 V; 而当电流达到 10 mA 时, 导通电压为 4.10 V。该 LED 芯片的光输出功率随输入电流的增加而增大, 当输入电流为 10 mA 时, 光输出功率为 2.86 mW。图 8(c) 展示了这两颗芯片的外量子效率曲线, 最大值分别为 12.38% 和 11.98%。以上分析表明这两颗芯片的 I - V 特性、光输出功率和外量子效率之间的差异并不大, 由此可知, 在优化的剥离条件下, 激光剥离工艺对 LED 芯片光电性能几乎没有影响。



(a) 激光剥离前芯片的 I - V 和 I - P_{out} 特性



(b) 激光剥离后芯片的 I - V 和 I - P_{out} 特性



(c) 激光剥离前后芯片的外量子效率

图 8 激光剥离前后具有代表性芯片的光电性能

3 结论

本文制备了尺寸为 $50 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$ 的蓝光 GaN 基 Micro-LED 芯片, 测试了其光电性能, 测试结果表明芯片具备优异的光电性能。 I - V 曲线显示芯片的正向导通电压在 2.55 V 左右; 随机选取 10 颗

LED 芯片并分别测试它们在 1 mA 注入电流下的电压值, 得到的最大值为 3.24 V, 最小值为 3.12 V, 波动幅度在 4% 以内; EL 光谱测试得到芯片在 1 mA 电流下的 EL 光谱峰值波长和半高宽分别为 453 和 14.4 nm; 芯片的外量子效率可达到 12.38%, 芯片发光亮度大且出光均匀。通过优化激光剥离条件, 芯片可以无损伤地转移且转移率高达 97%。实验表明激光剥离前后芯片的 I - V 特性、光输出功率和外量子效率之间的差异并不大, 由此可知, 在优化的激光剥离条件下激光剥离工艺对芯片光电性能几乎无影响。这些结果有助于微尺寸 LED 阵列和 Micro-LED 显示技术的相关研究。

参考文献:

- [1] Kim T, Jung Y H, Song J Z, et al. High-efficiency, microscale GaN light-emitting diodes and their thermal properties on unusual substrates[J]. *Small*, 2012, 8(11): 1643-1649.
- [2] Li L Z, Liu C B, Su Y Z, et al. Heterogeneous integration of microscale GaN light-emitting diodes and their electrical, optical and thermal characteristics on flexible substrates[J]. *Adv. Mater. Technol.*, 2018, 3(1): 1700239.
- [3] Tian P F, Mckendry J D, Gong Z, et al. Characteristics and applications of micro-pixelated GaN-based light emitting diodes on Si substrates[J]. *J. Appl. Phys.*, 2015, 115: 033112.
- [4] Kim H M, Um J G, Lee S, et al. High brightness active matrix micro-LEDs with LTPS TFT backplane [J]. *SID Symp. Digest of Technol. Papers*, 2018, 49(1): 880-883.
- [5] Liu Z J, Chong W C, Wong K M, et al. A novel BLU-free full-color LED projector using LED on silicon micro-displays [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2013, 25(23): 2267-2269.
- [6] Chong W C, Cho W K, Liu Z J, et al. 1 700 pixels per inch (PPI) passive-matrix micro-LED display powered by ASIC [C]// *IEEE Inter. Conf. on Compound Semiconductor Integrated Circuit Symp.*, 2014, 18: 1-4.
- [7] Mckendry J D, Massoubre D, Zhang S L, et al. Visible-light communications using a CMOS-controlled micro-light-emitting-diode array[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2012, 30(1): 61-66.
- [8] Goble C, Bierbrauer C, Moser R, et al. GaN-based micro-LED arrays on flexible substrates for optical cochlear implants [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2014, 47(20): 205401.
- [9] Liu Z J, Chong W C, Wong M, et al. GaN-based LED micro-displays for wearable applications[J]. *Microelectron. Eng.*, 2015, 148(1): 98-103.
- [10] Chen C J, Chen H C, Liao J H, et al. Fabrication and characterization of active-matrix 960×540 blue GaN-based micro-LED display[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2019,

- 55(2): 3300106.
- [11] Gong Z, Massoubre D, Mckendry J, et al. Flip-chip, micro-pixelated InGaN light-emitting diode arrays: attractive sources for micro-displays, colour conversion and fluorescence detection[J]. Phys. Status Solidi, 2009, 6(2): 848-851.
- [12] Gong Z, Zhang H X, Gu E, et al. Matrix-addressable micropixelated InGaN light-emitting diodes with uniform emission and increased light output [J]. IEEE Trans. Electron Devices, 2007, 54(10): 2650-2657.
- [13] Xie E, Stonehouse M, Ferreira R, et al. Design, fabrication and application of GaN-based micro-LED arrays with individual addressing by N-electrodes[J]. IEEE Photon. J., 2017, 9(6): 7907811.
- [14] Heernsdorf J, Mckendry J D, Zhang S L, et al. Active-matrix GaN micro light-emitting diode display with unprecedented brightness [J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 2015, 26(6): 1918-1925.
- [15] Gong Z, Gu E, Jin S R, et al. Efficient flip-chip InGaN micro-pixelated light-emitting diode arrays: promising candidates for micro-displays and colour conversion[J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 2008, 41(9): 094002.
- [16] Jung Y H, Wang X T, Kim J, et al. GaN-based light-emitting diodes on origami substrates [J]. Appl. Phys. Lett., 2012, 100(23): 231113.
- [17] Choi M, Jang B, Lee W, et al. Stretchable active matrix inorganic light-emitting diode display enabled by overlay-aligned roll-transfer printing [J]. Adv. Funct. Mater., 2017, 27(11): 1606005.
- [18] Chun J, Hwang Y, Choi Y S, et al. Transfer of GaN LEDs from sapphire to flexible substrates by laser lift-off and contact printing[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2012, 24(23): 2115-2118.
- [19] Liu Z J, Chong W C, Wong K M, et al. 360 PPI flip-chip mounted active matrix addressable light emitting diode on silicon (LEDoS) micro-displays[J]. J. Display Technol., 2013, 9(8): 678-682.
- [20] Um J G, Jeong D Y, Jung Y H, et al. Active-matrix GaN μ -LED display using oxide thin-film transistor backplane and flip chip LED bonding[J]. Adv. Electron. Mater., 2018, 5(3): 1800617.
- 作者简介:**
王仙翘(1994—),男,湖南省娄底市人,硕士研究生,主要从事 GaN 基 Micro-LED 芯片制备、芯片绑定集成和柔性 LED 阵列的相关研究;
龚政(1976—),男,湖北省黄冈市人,博士后,教授级高级工程师,主要从事 Micro-LED 新型显示技术的研究。
E-mail: zheng_gong@gdisit.com
-
- (上接第 186 页)
- [2] Calaza C, Fonseca L, Moreno M, et al. A surface micromachining process for the development of a medium-infrared tuneable Fabry-Perot interferometer[J]. Sensors and Actuators A (Physical), 2004, 113(1): 39-47.
- [3] Blomberg M, Torkkeli A, Lehto A, et al. Electrically tuneable micromachined Fabry-Perot interferometer in gas analysis[J]. Physica Scripta, 2006, 1997(T69): 119.
- [4] Antila J, Mannila R, Kantojarvi, et al. Spectral imaging device based on a tuneable MEMS Fabry-Perot interferometer [J]. Proc. of SPIE, 2012, 8374: 83740F.
- [5] Neumann N, Ebermann M, Hiller K, et al. Tuneable infrared detector with integrated micromachined Fabry-Perot filter[J]. J. of Microlithography Microfabrication & Microsystems, 2008, 7(2): 124-128.
- [6] Fischer A C, Forsberg F, Lapisa M, et al. Integrating MEMS and ICs [J]. Microsystems & Nanoengineering, 2015, 1: 15005.
- [7] Oliver J, Lee W B, Lee H N. Filters with random transmittance for improving resolution in filter-array-based spectrometers[J]. Opt. Express, 2013, 21(4): 3969-89.
- [8] Zhang A, Yuan Y, Yue Z, et al. Design of multi-wavelength tuneable filter based on lithium niobate [J]. Opt. Communications, 2018, 415: 13-17.
- [9] Ayerden N P, Ghaderi M, Enoksson P, et al. A miniaturized optical gas-composition sensor with integrated sample chamber [J]. Sensors & Actuators B (Chemical), 2016, 236: 917-925.
- [10] Chen Q, Cole G D, Bjorlin E S, et al. First demonstration of a MEMS tuneable vertical-cavity SOA [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2004, 16(6): 1438-1440.
- [11] Liu B, Jie L, Liu H, et al. Diaphragm based long cavity Fabry-Perot fiber acoustic sensor using phase generated carrier[J]. Opt. Communications, 2017, 382: 514-518.
- [12] Ahmed M F, Xue T, Wu B, et al. High quality factor coaxial cable Fabry-Perot resonator for sensing applications [J]. IEEE Sensors J., 2017, 17(10): 3052-3057.
- [13] Roychoudhuri C, Hercher M. Stable multipass Fabry-Perot interferometer: design and analysis[J]. Appl. Opt., 1977, 16(9): 2514-20.
- 作者简介:**
任浩杰(1995—),男,安徽人,硕士研究生,主要从事滤波器的研究;
朱丽慧(1971—),女,浙江人,教授,博士生导师,主要从事材料方面的研究。
E-mail: lh Zhu@i. shu. edu. cn

缺陷对极紫外掩模多层结构反射场的扰动研究

李冠楠^{1,2}, 刘立拓¹, 周维虎^{1,2}, 石俊凯¹, 陈晓梅¹

(1. 中国科学院微电子研究所 光电技术研发中心, 北京 100029; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 极紫外光刻掩模具有特殊的多层膜堆叠的反射式结构,在工艺制造过程中极易产生缺陷,引起多层膜结构变形,从而对掩模反射场产生干扰。这种掩模缺陷是制约极紫外光刻技术发展的难题之一。建立了含有缺陷的极紫外掩模多层膜结构模型,在此基础上采用时域有限差分(FDTD)法分析了缺陷尺寸和缺陷位置对掩模多层膜结构反射场分布的影响。结果表明,多层膜结构反射场受干扰程度是缺陷的高度和宽度综合作用的结果,并且与缺陷结构的平缓程度有关。反射场受干扰程度也与缺陷在多层膜结构内部的高度位置有关,引起多层膜结构靠近底层变形的缺陷对反射场的影响较小,而引起多层膜结构靠近顶层变形的缺陷对反射场有明显的干扰。

关键词: 极紫外光刻掩模; 相位缺陷; 时域有限差分法; 扰动分析

中图分类号: O436 **文章编号:** 1001-5868(2020)02-0217-06

Study of Defect Perturbation in Reflective Field of EUV Mask Multilayer

LI Guannan^{1,2}, LIU Litu¹, ZHOU Weihu^{1,2}, SHI Junkai¹, CHEN Xiaomei¹

(1. R & D Center of Optoelectronic Technology, Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, CHN; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN)

Abstract: Extreme ultraviolet (EUV) lithography system uses a reflective mask structure with multilayers of Mo/Si, but defects can easily occur in the surface of substrate or in the process of depositing multilayer. Even a small defect can cause a large disturbance to the reflected field of mask. Manufacture of defect-free EUV mask is one of the most critical challenges for EUV lithography. In this paper, a multilayer structure model of ultra-ultraviolet mask with defects was established, and the influence of defect size and location on the reflection field distribution of mask multilayer structure was analyzed by finite difference time domain (FDTD) method. The results show that the interference degree of the reflection field of the multilayer structure is the result of the combination of the height and width of the defects, and is related to the smoothness of the defect structure. The interference degree of the reflection field is also related to the height of the defects in the multilayer structure. The defects that cause the multilayer structure to be deformed near the bottom have little influence on the reflection field, while the defects that cause the multilayer structure to be deformed near the top have obvious interference on the reflection field.

Key words: extreme ultraviolet mask; phase defect; FDTD method; perturbation analysis

收稿日期: 2019-12-09.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51905528); 国家重点研发计划项目(2017YFF0107300); 中国科学院前沿科学重点研究计划项目(QYZDY-SSW-JSC008).

0 引言

面向集成电路 7 nm 及以下制造工艺节点的需求,极紫外(Extreme Ultraviolet, EUV)光刻技术已成为当前乃至今后光刻技术的重要发展趋势^[1]。EUV 光刻采用的光源波长为 13.5 nm,极易被绝大多数材料吸收,因此不同于传统的透射式光刻系统, EUV 光刻需采用反射式光学系统和反射式掩模结构。其中,制造“零缺陷”的 EUV 掩模版是 EUV 光刻工艺制程中极其重要的环节,是 EUV 光刻提高良率和实现量产的先决条件。高精度的 EUV 掩模版需要在低热膨胀的基底材料上镀制 40 层堆叠的 Mo/Si 双层膜。相对于传统掩模结构,这种特殊的多层膜(Multilayer, ML)结构对 EUV 光具有更高的反射率。ML 的设计要求每一 Mo 层和 Si 层都具有足够高的平滑度,但由于层数多,在 ML 结构膜层堆叠过程中,极易在基底表面或 ML 内部产生纳米级的缺陷,从而导致 ML 结构的变形,最终造成光刻产品出现严重缺陷。因此 EUV 光刻对掩模的制造要求是达到“零缺陷”,即不能出现引起相对晶圆关键尺寸产生 10% 及以上的缺陷。EUV 掩模制造过程中的缺陷控制已成为制约 EUV 光刻技术发展的技术瓶颈之一^[2-3]。

EUV 掩模缺陷主要有两种类型,一种是在 ML 顶部出现的缺陷,这种缺陷由于直接影响 EUV 光的吸收或散射,造成 ML 反射率下降,光刻时会导致局部曝光量不均匀,因此称为振幅缺陷;另一种是存在于掩模基底或者在 ML 镀制过程中产生的缺陷,这种缺陷会引起其附近的 ML 产生变形,使反射光相位发生变化,导致曝光量不足,因此称为相位缺陷。相较于振幅缺陷,相位缺陷对掩模反射光场的干扰情况更为复杂,并且难以修复和补偿。因此,准确地仿真相位缺陷对掩模反射光场的影响可为 EUV 光刻技术的发展提供关键的数据支撑^[5-7]。

国外有关研究机构已经针对 EUV 掩模相位缺陷进行了深入的仿真研究。德国弗劳恩霍夫协会 IISB 研究所 Peter Evanschitzky 等人于 2007 年提出了用波导法计算缺陷对掩模近场及频谱分布的影响特性,验证了小尺寸缺陷会引起晶圆关键尺寸明显的变化。美国劳伦斯伯克利国家实验室 Gullikson^[8], Lam^[9], Clifford^[10] 等人先后提出了单平面近似法、光线追迹法,并先后建立了 RADICAL (Rapid Absorber Defect Interaction Computation

for Advanced Lithography) 模型和 DPS (Defect Printability Simulator) 模型,研究缺陷的不同性质对掩模反射场的影响。除此之外,日本超先进电子技术协会 EUV 工艺技术研究实验室、美国波士顿大学、韩国汉阳大学、法国 CNRS 协会等研究机构也都进行了大量的 EUV 掩模缺陷扰动特性的有关研究^[11-14]。国内 EUV 光刻技术研究起步较晚,对 EUV 掩模版缺陷的相关研究也较少。中国科学院上海光机所的刘晓雷等人提出了基于等效膜层法的多层膜仿真模型^[15-17],对含缺陷的多层膜衍射谱进行了准确快速的仿真,但没有涉及缺陷本身特征对反射场扰动的影响。

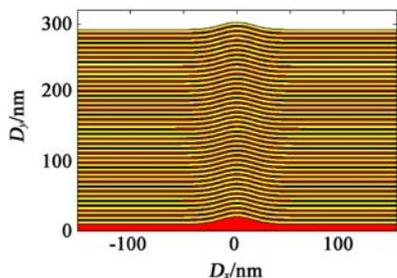
目前,我国针对 EUV 掩模缺陷的研究与国际先进水平差距较大,国内针对缺陷本身性质对 ML 反射场的扰动研究还处于空白状态。本文通过对有缺陷的 EUV 掩模 ML 结构建模,并对反射光场进行严格的电磁场仿真,研究了相位缺陷的尺寸和位置对 ML 反射场的扰动特性。结果表明,缺陷的高度和宽度以及缺陷处于 ML 内部的位置,均会对 ML 反射场产生不同程度的干扰。

1 模型和方法

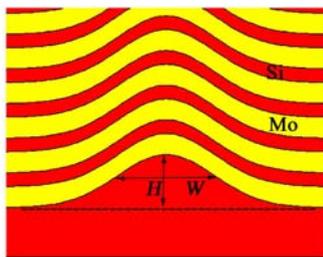
在 EUV 掩模版结构中,ML 起到反射 EUV 光的作用。在基底处以及 Mo, Si 两种材料交替沉积过程中极易产生缺陷,从而引起缺陷附近 ML 发生局部畸变,最终导致光刻晶圆产生缺陷。本文将对有缺陷的 EUV 掩模 ML 进行建模,对其反射场进行仿真研究。由于 EUV 掩模 ML 的单层膜尺寸小于入射光波长,因此对 ML 反射光场的仿真分析需要采用严格的电磁场仿真方法,即严格求解麦克斯韦方程组获得电磁场的精确分布。本文采用的时域有限差分法(Finite-Difference Time-Domain, FDTD)是一种严格的电磁场仿真方法,通过在时间和空间上对电磁场进行离散,将麦克斯韦方程组转化为差分方程,对电磁场在时域上进行求解。

ML 内部真实的缺陷形状极为多样,并且在薄膜沉积过程中,由内部缺陷所引起膜层的变形程度以及形变传递的过程同样是复杂多样的。实际 Mo/Si 多层膜的镀膜过程,在高水平工艺的沉积作用下,基底存在的缺陷以及镀膜期间产生的缺陷会使得之后镀制的膜层近似呈高斯形态变形和生长。因此本文采用典型的高斯形状表征缺陷的形貌特

征^[18],研究缺陷尺寸以及缺陷在 ML 内部的位置对反射场的干扰特性。图 1 为含有缺陷的 EUV 掩模 ML 截面图。纵、横坐标分别代表掩模 ML 横向和纵向的距离尺寸 D_x, D_y 。ML 由 40 层 Mo 层和 40 层 Si 层交替堆叠而成,共 80 层单层膜,每层尺寸均为 $300 \text{ nm} \times 300 \text{ nm}$,单层膜厚度如表 1 所示。高斯型缺陷形貌特征尺寸参数包括其 y 方向的峰值高度和 x 方向的半峰全宽,分别用缺陷高度(H/nm)和缺陷宽度(W/nm)表示。位于基底上的缺陷或者在 ML 镀制过程中产生的缺陷均会向上传递,使各层膜均产生形变。假设缺陷引起每一层产生相同的形变^[3],在缺陷尺寸参数对 ML 反射场干扰分析中,认为缺陷位于基底上且 ML 产生的形变由最底层(第 80 层)传递到最顶层(第 1 层)。本文将使用 FDTD Solutions 仿真软件进行 EUV 掩模 ML 的建模与反射场扰动分析。对于三维 ML, FDTD 仿真精度高,但会耗费大量的内存和运行时间。考虑到 ML 在 $x-z$ 平面的对称性,为缩短运行时间,本文将进行二维 ML 反射场的仿真分析,其中 FDTD 仿真参数如表 1 所示。



(a) 含缺陷 ML 结构



(b) 局部放大示意图

图 1 EUV 掩模 ML 含缺陷仿真模型

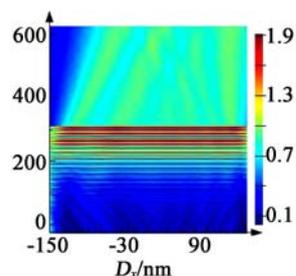
表 1 EUV 掩模 ML 仿真参数

多层	40 层 Mo (2.78 nm 厚)/Si(4.17 nm 厚)
发光	波长 $\lambda = 13.5 \text{ nm}$, 平面波, TE 极向, 入射角 $\theta = 6^\circ$

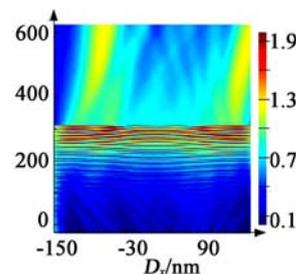
2 仿真结果和分析

图 2 是通过使用 FDTD 方法严格仿真 ML 近

场反射场的幅值分布图。左图是 EUV 光传播到无缺陷 ML 的近场反射场幅值分布图,右图是 EUV 光传播到有缺陷的 ML 的近场反射场幅值分布图,横坐标表示 ML 结构的横向距离。虚线处为 ML 表面,虚线下方为 ML 内部透射光场分布,虚线上方为反射光场分布。入射光以 6° 角由左上方斜入射至 ML,因此反射光沿右上方传播。无缺陷 ML 反射光场强度分布较为均匀,且在 ML 的内部光强分布由上到下逐渐减弱,在 ML 底层部分光强极弱。而含有缺陷的 ML 反射光场强度分布极不均匀,中间位置处强度明显减弱,边缘位置处强度增加。光强在 ML 内部的分布也较为杂乱。可以看出,缺陷对 ML 反射场有着明显的干扰。



(a) 无缺陷



(b) 有缺陷

图 2 EUV 掩模 ML 反射场近场强度分布

2.1 缺陷尺寸对反射场的影响

缺陷所引起的 ML 形变会从底层传递到顶层。设定缺陷高度变化范围为 $1 \sim 5 \text{ nm}$,缺陷宽度变化范围为 $10 \sim 50 \text{ nm}$,仿真得到 ML 反射场幅值分布曲线。其中,幅值信号的增强和减弱,均属于缺陷对反射场的干扰,因此采用幅值信号的最大值与最小值之差,即极差来表征缺陷对反射场的干扰程度。极差越大,缺陷对反射场的干扰越强,故提取每条曲线扰动部分的最大值和最小值,取极差进行比较分析。仿真结果如图 3,4 所示。

图 3(a)为在缺陷宽度 50 nm 条件下,不同缺陷高度下的 ML 反射场幅值 M 分布曲线。由于入射光斜入射至膜层致使曲线相对中心向右偏移。相较

于无缺陷幅值分布曲线,含缺陷曲线有更强的高频振荡,这主要是由于膜层变形处的网格离散化所引起的数值效应。ML 结构近似于布拉格反射镜结构,相较于无缺陷多层膜,反射光相位在膜层变形处会发生改变,散射增强,在对应的反射光接收处光强会减弱,边缘处光强增强。仿真结果表明,缺陷宽度不变时,随着缺陷高度增大,ML 反射场中心位置幅值减小,边缘位置幅值增大,幅值分布相较无缺陷反射场幅值的差距逐渐明显。图 3(b)为对应的幅值极差 R 曲线。无缺陷 ML 反射场幅值极差在 0.1 左右。缺陷高度越高,反射场幅值极差值越大,并呈单调上升的趋势。这表明随着缺陷高度的增加,膜层几何结构的纵向变形会导致反射光降低,缺陷对反射场的干扰程度也增加。

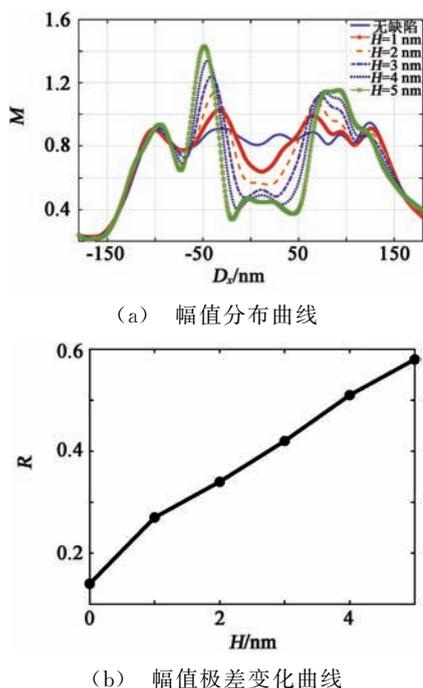
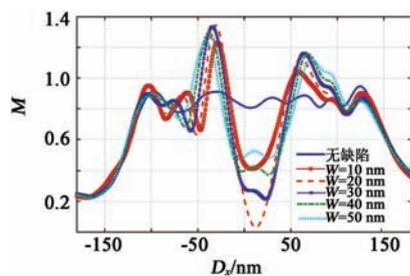
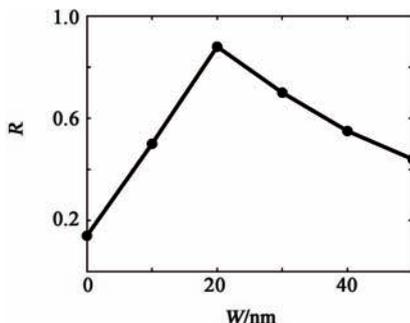


图 3 缺陷宽度为 50 nm 时,不同缺陷高度下的 ML 反射场

图 4 表示在缺陷高度为 3 nm 时,不同缺陷宽度下的 ML 反射场幅值分布和幅值极差曲线。如图所示,随着缺陷宽度增加,反射场幅值分布较无缺陷反射场幅值分布的差距先增大后减小,在缺陷宽度为 20 nm 时,缺陷对反射场的干扰最明显。幅值极差呈现相同的变化趋势,在缺陷宽度为 20 nm 时,极差达到最大值,极差并没有随缺陷宽度增加而单调递增,这说明缺陷尺寸的增大并不一定会导致 ML 反射场持续受到更强的干扰。当缺陷宽度增大到一定程度,反射场受干扰程度会降低。



(a) 幅值分布曲线



(b) 幅值极差变化曲线

图 4 缺陷高度为 3 nm 时,不同缺陷宽度下的 ML 反射场

上述结果表明 ML 反射场受缺陷的干扰程度并不完全随缺陷尺寸的增大而单调增强,考虑到缺陷形状的平缓程度,对缺陷高度和宽度的影响做进一步的分析。图 5 显示了不同缺陷尺寸对 ML 反射场的干扰程度,横坐标为缺陷宽度,纵坐标为缺陷高度,颜色值表示反射场幅值极差 R 。由图 5 可知,缺陷高度为 1 nm 时,随着缺陷宽度增大,极差变化不明显,极差值与无缺陷极差值相近,缺陷宽度为 10 nm 时,随着缺陷高度的增加,极差值单调增加,但仍保持在较低的水平,反射场受到的影响较小,说明缺陷尺寸过小时,膜层的变形程度极小,趋近于无缺陷膜层,缺陷对反射场的干扰基本可以忽略。缺陷宽度为 20~50 nm 时,随着缺陷高度的增加,极差值单调增加到较高的水平,缺陷对反射场的干扰逐渐增强;在缺陷高度为 2~5 nm 时,随着缺陷宽度增大,反射场受缺陷的干扰程度呈先增大后减小的趋势。这是由于在一定范围内,缺陷宽度越大,膜层变形越严重,相应的近场处越难以接收到反射光,导致光强减小,而当缺陷宽度增大到一定程度,薄膜变形趋近平行平面,则恢复无缺陷 ML 反射和透射的性质,对反射场的影响会减小。结果表明,缺陷对 ML 反射场的干扰并不是由基底上缺陷本身的尺寸特征引起的,大尺寸缺陷并不一定会对反射场产生干扰。缺陷所导致的膜层变形的平缓程度是影响反射场的关键因素,膜层变形平缓,可近似无缺陷

ML,对反射场的影响较小;膜层变形尖锐,ML反射光相位发生改变,反射光幅值减小,最终会导致光刻曝光量不足,从而使光刻产品出现缺陷。

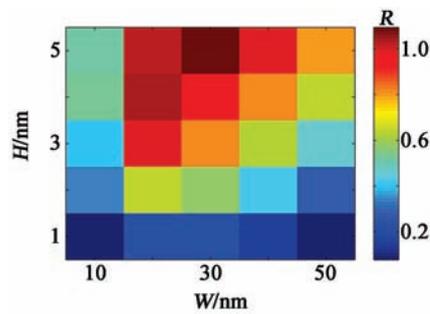


图5 不同缺陷结构下 ML 反射场幅值极差

2.2 缺陷位置对反射场的影响

在掩模制造过程中,缺陷不仅存在于基底上,还会在 ML 结构镀制过程中产生。出现在不同膜层处的缺陷将对 ML 反射场产生不同程度的干扰。本节就此问题建立了四种 ML 模型,如图 6 所示,横纵坐标分别对应 ML 截面横向、纵向距离。可见,当缺陷分别位于 ML 第 80 层(最底层)、第 60 层、第 40 层和第 20 层时,缺陷所在膜层下方的所有膜层不会产生变形,缺陷上方邻近的 20 层的膜层产生了同等程度的变形。

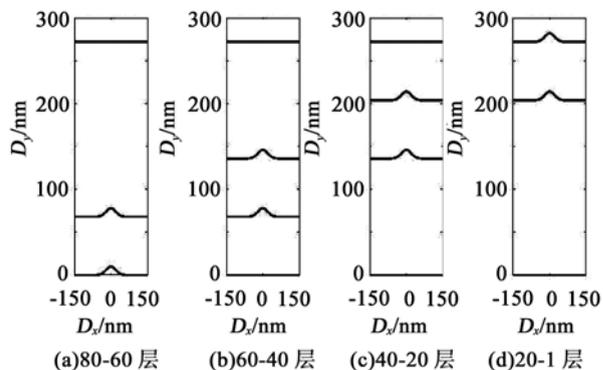
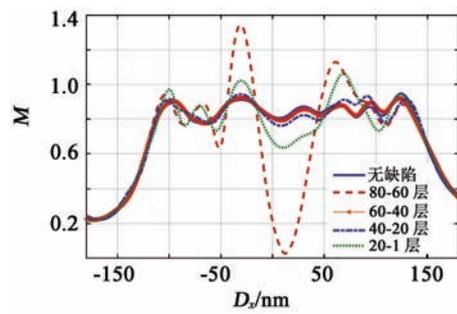


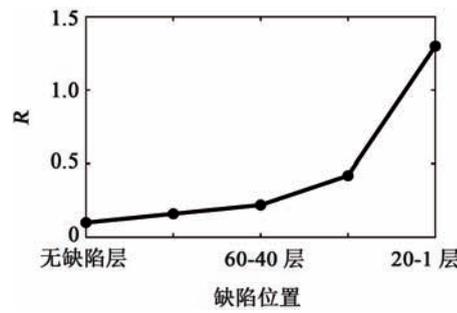
图6 EUV 掩模 ML 内部不同缺陷位置示意图

图 7 为缺陷在 ML 不同位置处的反射场幅值分布和幅值极差曲线。可以看出,缺陷存在于最底层时,幅值分布曲线接近无缺陷幅值曲线,极差值接近无缺陷幅值极差,缺陷引起 ML 的底部变形对反射场的影响较小;随着缺陷位置逐渐接近顶部,中心位置幅值减小,两侧幅值增大,极差值增大,缺陷对反射场的影响逐渐增强。结果表明,上层缺陷对反射场的干扰更强。这是由于 EUV 光在 ML 内部向下传播的过程中,光强会逐渐减弱,多层底部对 EUV 光的反射也非常微弱,ML 靠近底部的变形所引起

反射光的散射对反射光场的影响十分微弱,靠近顶部的结构由于反射较强的 EUV 光,膜层的变形会对反射场有着极强的干扰。



(a) 幅值分布曲线



(b) 幅值极差变化曲线

图7 不同缺陷位置处 ML 反射场

3 结论

本文基于严格的电磁场仿真方法分析了 EUV 掩模 ML 内部缺陷的性质对 ML 反射光场的影响。具体讨论了缺陷尺寸和缺陷位置对 ML 反射的 EUV 光场的干扰程度。结果表明,对于缺陷尺寸,缺陷所引起膜层变形的平缓程度,是影响 ML 反射场的关键因素。大尺寸缺陷,若引起膜层较为平缓的变形,则会使变形膜层对 EUV 光趋于无缺陷 ML 的平行平面反射,从而降低缺陷对反射场的影响;小尺寸缺陷若引起膜层较为尖锐的变形,会因散射增大缺陷处反射场边缘强度,降低中心强度,从而对发射场有更强的干扰。存在于 ML 结构靠近底层的缺陷,若只引起 ML 底部膜层的形变,只对反射场有着微弱的影响,随着缺陷在膜层内部位置的上移,引起 ML 靠近顶部的膜层变形,对反射场的干扰会随之增强,这与 EUV 光传播到 ML 内光强逐渐减弱有关。本文研究了存在于基底上以及多层结构内的缺陷对 ML 反射场的影响,对缺陷对反射场的扰动性有了更好的理解,有助于优化掩模制造中的薄膜沉积工艺,也有助于进行掩模缺陷的修复和补偿。

通过今后对掩模缺陷更深入的研究,有助于为 EUV 光刻掩模缺陷检测技术的发展提供关键而重要的数据支撑。

参考文献:

- [1] Kim S S, Chalykh R, Kim H, et al. Progress in EUV lithography toward manufacturing[C]// Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography VIII. Inter. Society for Optics and Photonics, 2017, 10143: 2264043.
- [2] Yamane T, Watanabe H. Application of EUV dark field image for EUVL mask fabrication[C]// Photomask Japan 2017: Symp. on Photomask and Next-generation Lithography Mask Technol. , 2017, 10454: 2280133.
- [3] Krautschik C G, Nishiyama I. Printability of opaque and clear phase defects using the finite-difference time-domain (FDTD) method[J]. Proc. of SPIE, 2003, 5037: 831-840.
- [4] Barty A, Mirkarimi P, Stearns D G, et al. EUVL Mask Blank Repair[J]. Proc. of SPIE, 2002, 4688: 472313.
- [5] 杨 雄. 极紫外投影光刻掩模若干问题研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2005.
Yang Xiong. Investigation on extreme ultraviolet lithography mask[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [6] Hashimoto T, Yamanashi H, Sugawara M, et al. Lithographic characterization of EUVL mask blank defects [C]// Microlithography Inter. Society for Optics and Photonics, 2004, 5374: 534692.
- [7] Gullikson E M, Cerjan C, Stearns D G, et al. Practical approach for modeling extreme ultraviolet lithography mask defects [J]. J. of Vacuum Science & Technol. B (Microelectronics and Nanometer Structures), 2002, 20(1): 8681-8686.
- [8] Lam M C, Neureuther A R. Fast simulation methods for defective EUV mask blank inspection[J]. Proc. of SPIE, 2004, 5567: 741-750.
- [9] Clifford C H, Montgomery M W, Maurer W, et al. Compensation methods using a new model for buried defects in extreme ultraviolet lithography masks[J]. Proc. of SPIE, 2010, 7823: 78230V.
- [10] Sugawara M. Simulation analysis of printability of scratch and bump defects in EUV lithography[J]. Proc. of SPIE, 2006, 6151: 61510W-61510W-10.
- [11] Yeung M, Barouch E. A very fast and accurate rigorous EMF simulator for EUVL masks based on the pseudo-spectral time-domain method[J]. Proc. of SPIE, 2013, 8701: 870113.
- [12] Yoo M S, Park S W, Kim J H, et al. Aerial image characterization for the defects in the extreme ultraviolet mask[C]// 11th Korean Conf. on Semiconductor, 2004, 45 (5): 1218-1223.
- [13] Besacier M, Schiavone P, Farys V, et al. Modeling of the influence of the defect position on the reflected intensity in EUV mask[J]. Proc. of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2005, 5751(1): 77-84.
- [14] 刘晓雷, 李思坤, 王向朝. 基于等效膜层法的极紫外光刻含缺陷掩模多层膜仿真模型[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0622005.
Liu Xiaolei, Li Sikun, Wang Xiangzhao. Simulation model based on equivalent layer method for defective mask multilayer in extreme ultraviolet lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0622005.
- [15] 张 恒, 李思坤, 王向朝. 基于改进型结构分解的极紫外光刻掩模衍射谱快速仿真方法[J]. 光学学报, 2018, 38(1): 0105001.
Zhang Heng, Li Sikun, Wang Xiangzhao. A rapid simulation method for diffraction spectra of EUV lithography mask based on improved structural decomposition[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(1): 0105001.
- [16] 张 恒, 李思坤, 王向朝, 等. 基于机器学习校正的极紫外光刻含缺陷掩模仿真方法[J]. 光学学报, 2018, 38(12): 1222002.
Zhang Heng, Li Sikun, Wang Xiangzhao, et al. 3D rigorous simulation of defective masks used for EUV lithography via machine learning-based calibration[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 1222002.
- [17] Mirkarimi P B, Stearns D G. Investigating the growth of localized defects in thin films using gold nanospheres[J]. Appl. Phys. Lett. , 2000, 77(14): 2243.

作者简介:

李冠楠(1994—),女,内蒙古自治区赤峰市人,硕士生,主要从事微纳检测与测量方面的研究工作;

周维虎(1962—),男,安徽合肥人,研究员,博士生导师,主要从事精密仪器与几何量计量方面的研究工作。

E-mail: zhouweihu@ime.ac.cn

基于压控电流源的铂电阻测温非线性校正设计

许子颖^{1,2,3}, 董峰^{1,3}, 傅雨田^{1,3}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083)

摘要: 铂电阻因其高精度、高稳定性、可重复性以及可互换性的特点,作为温度传感器在工业领域以及航天领域被广泛应用。针对铂电阻的非线性特性,提出了一种基于压控电流源的铂电阻测温非线性校正设计方法。利用测量系统的输出值微调铂电阻的激励电流的方法,抵消非线性误差,提高输出信号的线性度,具有参数计算简单、电路实现方便的优点。该方法应用于某在轨辐射定标系统,进行了相应的电路设计,采集了实际实验数据。实测数据表明,采用该方法能在 $-40\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内将由铂电阻温度传感器非线性产生的测量误差改善为约 $0.016\text{ }^{\circ}\text{C}$,提高了温度测量精度。

关键词: 铂电阻; 温度测量; 非线性校正; 电流源; 在轨辐射定标

中图分类号: TN721 **文章编号:** 1001-5868(2020)02-0223-04

Design of Nonlinearity Correction of Platinum Resistance Temperature Sensor Based on Voltage-controlled Current Source

XU Ziyang^{1,2,3}, DONG Feng^{1,3}, FU Yutian^{1,3}

(1. Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, CHN;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN; 3. CAS Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai 200083, CHN)

Abstract: As a kind of temperature sensor, the platinum resistance has a wide application in many industrial sectors and fields of aerospace due to its advantage of high accuracy, long-term stability, repeatability and interchangeability. In this paper, a method of nonlinearity correction of platinum resistance is presented based on a voltage-controlled current source. The method is featured in easy circuit design and parameter calculation. It was applied to an onboard radiometric calibration system, and both the corresponding circuit design and laboratory data were presented. It is shown that, the measuring error caused by the nonlinearity is reduced to $0.016\text{ }^{\circ}\text{C}$, within a measuring range of $-40\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Key words: platinum resistance; temperature measurement; nonlinearity correction; current source; onboard radiometric calibration

0 引言

空间红外遥感仪器在星上运行阶段,受外层空间恶劣的环境以及元器件老化等因素的影响,仪器性能不断衰变,必须定期地对其进行在轨绝对辐射

定标^[1],重新获取辐射响应特性,保证仪器的各响应参数实时准确,即星上辐射定标。

星上辐射定标的一种有效方法是黑体定标,以星载黑体为标准源,利用黑体温度与黑体辐射量之间的精确对应关系,可以获得较为理想的定标精度^[2]。星载黑体研究的难点之一在于精确的测温。红外遥感仪器黑体测温相对工业领域的测温,有以

下特点:1)测温范围取决于红外探测器的动态响应范围,空间探测用中长波红外探测器的动态范围普遍位于 200~350 K,测温范围较窄;2)红外遥感仪器辐射定标黑体测温精度要求相对较高,普遍优于 0.5 K。

基于这些特点,采用铂电阻作为测温传感器。铂电阻以其高精度、高灵敏度的特点在中、低温测量中占有重要的地位^[3],具有稳定性好、示值复现性高和耐氧化等优点^[4],符合黑体测温对传感器的要求。

由于铂电阻温度传感器的线性度远高于其他温度传感器,在阻值-温度值换算时,可以用简单的线性函数实现。然而铂电阻特性曲线与理想化的直线之间仍然存在一定的非线性,在需要精密测温的应用中,此非线性分量会带来无法忽略的测量误差。

铂电阻的非线性特性曲线如图 1^[4]所示,其中曲线①为铂电阻特性曲线,曲线②为线性化的理想直线。以 PT1000 型铂电阻传感器为例,在 0~100 °C 测温范围,0 °C 下对应的阻值为 1 000 Ω,100 °C 下对应的阻值为 1 385.1 Ω,误差最大点 50 °C 下对应的阻值为 1 194 Ω,而根据线性化的理想直线计算得到 50 °C 下的阻值为 1 192.5 Ω,误差为 1.5 Ω,约等效于 0.39 °C 的温度误差。对于测温精度普遍要求优于 0.5 °C 的辐射定标黑体测温来说,铂电阻非线性造成的误差较大,不能适应辐射定标黑体测温的精度要求,必须进行非线性校正的处理。

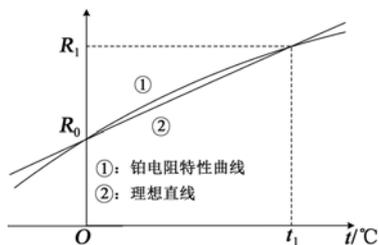


图 1 铂电阻的非线性特性曲线

铂电阻传感器非线性的校正手段一般有:A/D 基准电压反馈校正法^[3]、软件查表插值法^[4]、软件对称函数校正法^[5]、积分式 A/D 变基准电压校正法^[6]等,这些方法都能有效地对铂电阻非线性实施校正,但也存在着诸如需要特定硬件环境、实现复杂、占用软件资源较多等缺点。本文提出一种基于压控电流源的铂电阻测温非线性校正方法,该方法基于硬件实现,参数计算方便,只需基本的电子元件就能实现校正,电路构成简单、可靠性好,功能实现的代价小、性价比高。

1 铂电阻非线性校正原理

1.1 非线性校正硬件原理设计

铂电阻传感器具有测量精度高、线性度好的优点,适合采用恒定电流源作为其输入,用精准稳定的电流激励铂电阻传感器,采集其两端电压进行放大的方法获取温度信号,使获得的信号与铂电阻阻值成线性关系。在此基础上,利用输出的信号和参考电压共同作用于压控电流源,微调流过铂电阻的电流,改变输出信号,抵消其与待测的温度间的非线性分量,达到校正非线性的目的。校正电路的原理结构如图 2 所示。

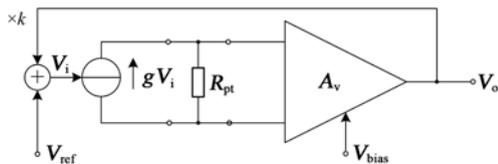


图 2 铂电阻的非线性校正原理图

1.2 非线性校正原理分析

从图 2 可以看出,流过铂电阻的激励电流由压控电流源产生。电流源输入控制电压记为 V_i ,压控电流源跨导为 g 。采集铂电阻两端的返回信号,经过差分放大输出的电压 V_o 。乘以一个系数 k ($k \ll 1$) 返回至压控电源的控制端,与基准电压 V_{ref} 叠加后共同作用于电流源,完成对流过铂电阻电流的微调。该校正方法的关键点在于待定系数 k 的计算。

差分放大器的电压增益记为 A_v 。为了去除输出信号中的固定电平,使输出信号在待测温度范围内实现较大的动态范围,在放大电路中引入偏置电压,记为 V_{bias} 。输出信号的计算式为

$$V_o = gA_v R_{pt} (V_{ref} + kV_o) + V_{bias} \quad (1)$$

其中, R_{pt} 为铂电阻阻值,按照国际电工委员会的铂热电阻技术标准,其是摄氏温度 t 的函数,符合 ITS-90 国际分度表铂电阻阻值可用下式表示:

$$R_{pt} = R_0 f(t)$$

$$f(t) = \begin{cases} 1 + at + bt^2 & t \geq 0 \\ 1 + at + bt^2 + c(t - 100)t^3 & t < 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, $a = 3.9080 \times 10^{-3}$, $b = -5.8020 \times 10^{-7}$, $c = -4.2735 \times 10^{-12}$, R_0 为铂电阻在 0 °C 的对应阻值。对于辐射定标应用来说, t 的范围一般在 -73~77 °C,在此温度范围内,对非线性贡献最大的是二次项, $f(t)$ 可近似为

$$f(t) = 1 + at + bt^2 \quad (3)$$

将式(2)代入式(1),得:

$$V_o = gA_v R_o f(t) (V_{ref} + kV_o) + V_{bias} \quad (4)$$

对式(4)进行变换,令:

$$E = gA_v R_o (V_{ref} + kV_{bias}) \quad (5)$$

$$K = gA_v R_o k (K \ll 1) \quad (6)$$

$$V = V_o - V_{bias} \quad (7)$$

将式(5)~(7)代入式(4)进行变换,得:

$$V = Ef(t) / [1 - Kf(t)] = E(1 + at + bt^2) / (1 - K - Kat - Kbt^2) \quad (8)$$

对于分母多项式来说, $|Kbt^2| \ll (1 - K)$ 且 $|bt^2| \ll |at|$, 则式(8)可近似为

$$V = E(1 + at + bt^2) / (1 - K - Kat) \quad (9)$$

变换可得:

$$V = E \left(-\frac{b}{aK} \right) \cdot \frac{\left(t - \frac{-a - \sqrt{a^2 - 4b}}{2b} \right) \left(t - \frac{-a + \sqrt{a^2 - 4b}}{2b} \right)}{t - (1 - K) / aK} \quad (10)$$

非线性化的目的在于使系统输出信号 V_o 中只包含温度 t 的一次项, 对于式(10)来说, 只要令 $\frac{1 - K}{aK} = \frac{-a \pm \sqrt{a^2 - 4b}}{2b}$, 即可使 V 中只含有 t 的一次项, 去除系统输出中的非线性成分。考虑到 K 的取值要为正且尽量接近 0, 取:

$$\frac{1 - K}{aK} = \frac{a + \sqrt{a^2 - 4b}}{-2b} \quad (11)$$

求 K 值得:

$$K = 0.035351 \quad (12)$$

从而获得待定系数 k 为

$$k = K(gA_v R_o)^{-1} = 0.035351(gA_v R_o)^{-1} \quad (13)$$

可见, 在实际应用中, 只要知道压控电流源跨导 g , 差分放大器的电压增益 A_v 以及铂电阻的 0°C 阻值 R_o 。这 3 个参数, 就能运用式(13)达到快速求取 k 系数的目的。

以上推导过程基于测温范围位于 0°C 附近的前提, 在温度范围远离 0°C 的应用中, 需对式(2)进行变换才可进行待定系数计算。以测温范围远高于 0°C 为例, 设测温范围的中心温度值为 T_c , 将温度值 $t = T_c + \Delta t$ 代入式(2):

$$R_{pt} = R_o [1 + a(T_c + \Delta t) + b(T_c + \Delta t)^2] \quad (14)$$

进行变换后得到:

$$R_{pt} = R_o (1 + aT_c + bT_c^2) [1 + (a + 2bT_c) \cdot \Delta t / (1 + aT_c + bT_c^2) + b\Delta t^2 / (1 + aT_c + bT_c^2)] \quad (15)$$

以 $a' = (a + 2bT_c) / (1 + aT_c + bT_c^2)$, $b' = b / (1 + aT_c + bT_c^2)$ 代替式(11)中的 a 和 b , 获取新的 K 值, 以 $R'_o = R_o (1 + aT_c + bT_c^2)$ 代替式(13)中的 R_o , 并将新的 K 值代入, 即能获得适用于该温度范围的 k 系数。

2 非线性校正实际应用

2.1 电路设计

基于以上对于非线性校正的原理分析, 提出一种基于压控电流源铂电阻测温的非线性校正的实际应用电路, 见图 3。

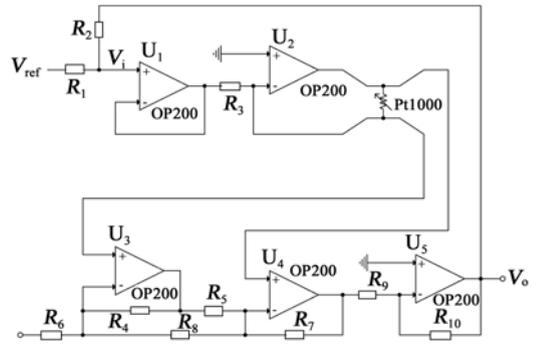


图 3 铂电阻的非线性校正电路图

运算放大器 U_1 和 U_2 及外围器件构成一个简单的压控电流源, 跨导系数 $g = -0.2 \text{ mA/V}$; 测温传感器采用 pt1000 型铂电阻, 其 0°C 阻值 $R_o = 1000 \Omega$; 运算放大器 $U_3 \sim U_5$ 及外围器件构成差分放大电路, 放大系数 $A_v = -20.5$ 。以上构成了一个基本的铂电阻温度传感器激励及信号放大电路, 在此基础上, 将输出信号 V_o 和基准电压 V_{ref} 通过电阻 R_1 和 R_2 构成的电阻网络 ($R_1 \ll R_2$) 叠加作为电流源的输入, 实现非线性校正的功能。

k 为电阻网络分压系数 $R_1 / (R_1 + R_2)$, 由式(13)可得 $k = R_1 / (R_1 + R_2) = 0.035351(gA_v R_o)^{-1} = 0.008622$, 得出 $R_1 / R_2 = 0.008697$ 。实际电路设计中取 $R_1 = 1.3 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 150 \text{ k}\Omega$, 可以较为接近理论计算值。

该电路的优点为: 只要拆除电路中的电阻 R_2 , 电路就变为不带非线性校正功能的常规铂电阻测温电路。有无非线性校正功能的区别只在于一个电阻

的改动,对于同样采用基于电流源的铂电阻测温电路来说,提供了一种能以极小的代价改善电路功能的思路。

该应用电路是某辐射定标测温电路系统的一部分。系统采用四线制铂电阻接入来防止传输线误差的引入,以间歇式电流激励铂电阻的方式减少铂电阻的自热误差^[7]。电流源及差分放大部分采用低噪声运放 OP200,外围电阻均采用高精度金属膜电阻,且保证差分放大电路电阻配对,确保电流源输出稳定以及放大输出精确。测量结果通过模数转换送往数据采集系统进行处理和分析。

2.2 实验验证

实验验证过程中,以精密电阻箱代替铂电阻传感器接入图 3 电路,根据国际标准铂电阻分度表切换电阻箱阻值以模拟铂电阻在各待测温度点下的阻值变化。实验步骤为:

1) 将电路置于实验室恒温环境,并预先通电 15 min 使电路内半导体器件结温稳定;

2) 使用电阻箱切换各待测温度点对应阻值,以台式数字万用表记录一组各温度点下经校正后的电路输出电压;

3) 拆除图 3 电路中的电阻 R_2 ,重复步骤 2),记录一组各温度点下未经校正的电路输出电压;

4) 对步骤 2) 和 3) 中产生的两组数据用最小二乘法分别进行线性拟合,计算输出拟合后的温度值与实际待测值的误差,得出两组数据的非线性度。计算输出电压和待测温度间的线性相关系数;

5) 进行实验数据对照比较。

数据记录及计算结果如表 1, 2。

实验数据表明:

1) 在待测温度 $-40 \sim 70$ °C 内,未经校正的输出信号计算得出的温度值较实际待测值的误差较显著,最大可达到 0.277 °C,无法满足辐射定标测温的精度要求,而经过非线性校正的输出实测值与实际待测值间最大误差为 0.016 °C;

2) 经校正的输出值曲线的非线性度为未校正的输出值曲线的 6.24%,即线性度提高了约 15 倍;

3) 在各个温度点,经校正的输出值误差普遍优于未校正输出值误差,反映到线性相关系数上,经校正的输出值与温度间的线性相关系数为 99.999 99%,优于未经校正的 99.998 27%,意味着经校正后的各实际测量值相对于拟合直线的离散度

得到较为明显的改善。

表 1 温度测量数据

待测温 度/°C	校正输 出/V	校正后 误差/°C	未校正 输出/V	未校正 误差/°C
-40	0.615 1	-0.014 00	0.738 1	-0.277 00
-30	1.405 0	-0.007 02	1.509 0	-0.126 00
-20	2.195 0	0.003 23	2.277 90	-0.001 17
-10	2.985 0	0.016 00	3.044 9	0.098 60
0	3.773 0	0.008 53	3.808 1	0.148 00
10	4.562 0	0.001 04	4.569 1	0.169 00
20	5.351 0	-0.000 11	5.328 2	0.165 00
30	6.140 0	-0.001 27	6.085 3	0.134 00
40	6.929 0	0.001 38	6.840 7	0.081 40
50	7.719 0	0.006 56	7.594 0	0.000 75
60	8.506 0	-0.011 10	8.343 4	-0.131 00
70	9.296 0	-0.003 35	9.092 9	-0.261 00

表 2 非线性参数计算结果

校正后非 线性度	校正后线性 相关系数/%	未校正非 线性度	未校正线性 相关系数/%
1.571×10^{-4}	99.999 99	2.519×10^{-3}	99.998 27

3 结论

本文针对星上辐射定标测温对于铂电阻测温非线性校正的要求设计了一种基于压控电流源的非线性校正方法,阐述了其原理,并进行参数分析计算。以该原理为依据,给出了一种非线性校正电路的设计,并对该电路进行了实验数据获取。数据表明该方法对于铂电阻的非线性具有显著的改善效果,且电路实现方便、参数计算简单,能满足定标测温的精度要求。

参考文献:

- [1] 韩启金, 闵祥军, 傅俏燕, 等. HJ-1B 卫星红外多光谱相机星上定标精度分析[J]. 航天返回与遥感, 2010, 31(3): 41-47.
Han Qijin, Min Xiangjun, Fu Qiaoyan, et al. Analysis of onboard calibration accuracy of HJ-1B infrared multispectral camera[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2010, 31(3): 41-47.
- [2] 陈海龙. 星上定标技术概述[J]. 红外, 2003(6): 9-14.
Chen Hailong. Overview of on-board calibration techniques[J]. Infrared, 2003(6): 9-14.
- [3] 李纲民, 杨文波. 铂电阻的 A/D 非线性校正[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2003, 16(1): 29-32.
Li Gangmin, Yang Wenbo. Nonlinear correcting method platinum resistance A/D convert[J]. J. of Yantai University (Nature Science and Engin. Edi.), 2003, 16(1): 29-32.

(下转第 231 页)

用于近红外单光子探测器的均温板性能研究

姚友丹^{1,2}, 洪占勇^{1,2}, 罗成刚³

(1. 合肥工业大学 工业与装备技术研究院, 合肥 230009; 2. 安徽省航空结构件成形制造与装备实验室, 合肥 230009; 3. 科大量子技术股份有限公司, 合肥 230031)

摘要: 近红外单光子探测器是量子保密通信的重要组成部分,降低其工作温度是提高探测效率的关键。文章讨论了铝合金散热器和均温板的温差特性,研究了其启动速度随热流密度变化的关系,分析了热流密度对散热器热阻值的影响,并搭建系统进行了实验验证。结果表明:均温板散热性能优于铝合金散热器,温差能控制在 2°C 以内,且均温板的启动速度更快。另外,散热器尺寸对散热性能有着很大的影响,加载相同热流密度时大尺寸的均温板能耗散更多热量。因此,采用较大尺寸的均温板将有利于提升探测器的探测效率。

关键词: 单光子探测器; 均温板; 热阻; 热流密度

中图分类号: TN312.7; TN36 **文章编号:** 1001-5868(2020)02-0227-05

Study on The Performance of Vapor Chamber for Near Infrared Single Photon Detector

YAO Youdan^{1,2}, HONG Zhanyong^{1,2}, LUO Chenggang³

(1. Institute of Industrial & Equipment Technology, Hefei 230009, CHN;

2. Anhui Province Key Laboratory of Aerospace Structural Parts Forming Technology and Equipment, Hefei 230009, CHN;

3. QuantumCTek Corporation Limited, Hefei 230031, CHN)

Abstract: Near infrared single photon detector is an important part of quantum secure communication, and reducing its operating temperature is the key to improve the detection efficiency. In this paper, the characteristics of temperature difference of aluminum alloy radiator and vapor chamber were discussed, the relationship between the starting speed and the change of heat flux was studied, the influence of heat flow density on the thermal resistance value of the cooling device was analyzed, and a system for experimental verification was build. The results show that the cooling performance of the vapor chamber is better than that of the aluminum alloy radiator, the temperature difference can be controlled within 2°C , and the starting speed of the vapor chamber is faster. In addition, the size of the radiator has a great influence on the heat dissipation performance. When the same heat flux is loaded, the large-size vapor chamber can dissipate more heat. Therefore, the use of a larger vapor chamber will be conducive to improve the detection efficiency.

Key words: single photon detector; vapor chamber; thermal resistance; heat flow density

0 引言

近红外单光子探测器是量子保密通信系统的重

要组成部分,其核心器件为雪崩光电二极管(Avalanche Photodiode, APD)。APD是一种对温度很敏感的器件^[1],环境温度的变化会影响其热噪声、暗电流噪声、击穿电压等,从而影响它的探测性能^[2]。APD在 -60°C 左右的工作温度下探测效率

最优,采用半导体制冷器(Thermoelectric Cooler, TEC)对APD降温,利用半导体的热电效应可以使TEC冷面快速降温,但TEC热面也会产生热量^[3],因此需要设计散热系统将多余热量耗散。

散热优化设计是确保近红外单光子探测器正常工作的重要环节^[4]。常用的散热器件是铝合金散热器,工作原理为增加与空气的接触面积,通过加快对流速度来进行散热。但铝合金散热能力有限,当接触面的热流密度过高时,无法及时将热量转移,热量会在局部聚集,产生热点(Hot Spot)现象^[5]。热点现象会导致较高的热应力,降低探测器的稳定性和使用寿命。

均温板利用气-液相变过程大幅提升了散热效率,可以有效避免热点现象的发生,均温板散热在各类仪器设备中的应用也变得更加广泛^[6-11]。

本文对均温板和铝合金散热器进行了对比实验研究,通过加载不同热流密度,进行了温差特性和启动特性的研究,并分析它们的热阻变化,从而验证了均温板可以提升探测器系统的制冷效果。

1 实验装置与方案

均温板结构简图如图1所示,其本质为在二维平面进行热传导的平板热管,与热源接触的面为蒸发端,远离热源的面为冷凝端,工质的蒸发、冷凝、回流将热量扩散到整个均温板腔内,使温度在管壁均匀分布。

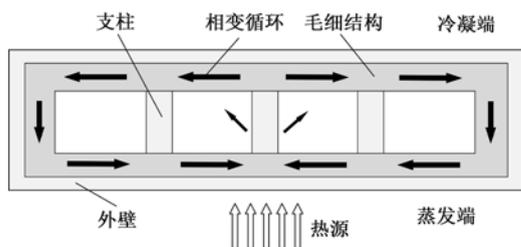


图1 均温板结构简图

本文使用的均温板外壁为铜,工作介质为水,毛细结构由铜粉烧结而成,腔体内部有铜粉烧结形成的支柱,用以防止均温板在受力时结构产生变形。另外在实验中使用铝合金散热器作为金属均温器件,与均温板进行对比实验。均温器件尺寸如表1所示(器件高度包括散热翅片高度)。

为了定量分析均温板的性能参数,本文建立了性能测试实验系统,如图2所示。将均温板、半导体制冷器、风扇平稳放置在高低温箱内部。调节加载

电压可以改变半导体制冷器的制冷功率和热面的热流密度。半导体制冷器的热面与均温板紧密接触,并涂抹适量导热硅脂,以减少各器件之间的接触热阻。将风扇安装在散热翅片下方,为均温器件散热。热电偶布置在均温器件及半导体制冷器上,另一端与多路温度测试仪连接进行温度采集,测试电脑与多路温度测试仪通过RS232串口进行通信。

表1 均温器件尺寸

均温器件	尺寸(长×宽×高)
铝合金散热器	105 mm×80 mm×25 mm
均温板 1	105 mm×80 mm×25 mm
均温板 2	210 mm×90 mm×25 mm

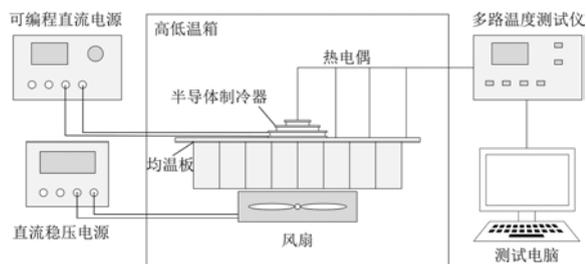


图2 实验系统示意图

如图3所示,在均温板上表面均匀布置6个热电偶,点1,2和3分别距离半导体制冷器边缘5,20和35 mm,这三个测试点的导热可以看作一维导热过程,通过计算推导可以获得半导体制冷器热面加载的热流密度。

热流密度计算公式为

$$q = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

其中,“-”号表示热通量从较高温度区域移动到较低温度区域, λ 为金属的导热系数, ΔT 为测温点间的温差, Δx 为两个测温点之间的直线距离。

将热电偶对称布置,点4,5和6用于矫正热流密度的误差。点8布置在半导体制冷器冷面中心,记录最低制冷温度,点7布置在半导体制冷器热面中心。

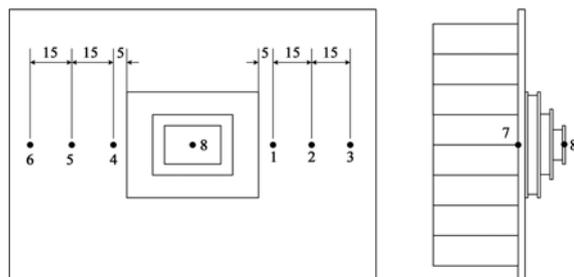


图3 热电偶分布示意图

为了保证实验环境的一致性,将高低温箱温度设置为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,待温箱内部温度稳定方可进行实验。各路热电偶所测的温度由多路温度测试仪每间隔 5 s 记录一次。温度测试仪所记录的实验数据使用 AT4500 DataLogger 软件储存,最后将实验数据导入 Origin8.5 中进行分析处理。

2 实验结果与分析

2.1 温差特性

在实验数据分析中,取稳定状态 60 s 内记录的数值均值作为分析对象,并将各个测试点的温度记为 T_1, T_2, \dots, T_8 ,同时定义温差: $\Delta T_A = T_7 - T_1$, $\Delta T_B = T_1 - T_3$ 。实验过程中热流密度 q 最大可达 $5.0 \times 10^4\text{ W/m}^2$,即半导体制冷器热面的最大功率达到 42 W ,此功率未超出半导体制冷器的设计范围,能保证其正常工作。

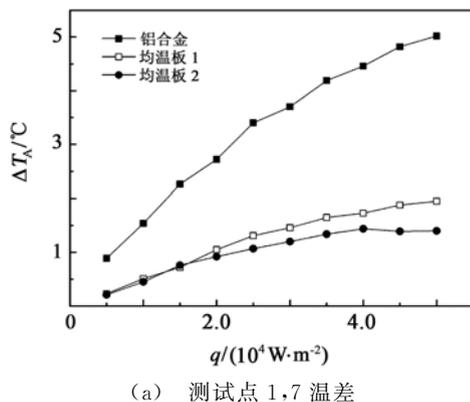
图4所示为各均温器件在不同热流密度下的温差值。对铝合金散热器进行测试时, ΔT_A 和 ΔT_B 都随着热流密度的上升几乎呈线性增长。当热流密度升高至 $5.0 \times 10^4\text{ W/m}^2$ 时, ΔT_A 达到了 $5.02\text{ }^{\circ}\text{C}$,均温器件最大温差值($\Delta T_A + \Delta T_B$)达到了 $8.78\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这表明,在铝合金散热器和半导体制冷器的接触面聚集了大量热量,得不到及时传导和散发,而且这种现象会随着热流密度的上升而变得更加严重。

通过均温板与铝合金散热器的对比分析,均温板的温度差值大幅度减小,当热流密度为 $5.0 \times 10^4\text{ W/m}^2$ 时, ΔT_A 的值均稳定在 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,表现出了良好的均温效果。

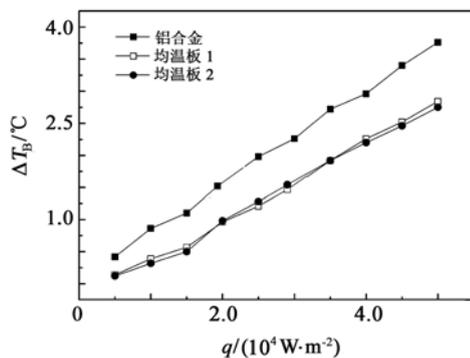
图4(a)所示是测试点1,7温差 ΔT_A 的值,可见,当热流密度小于 $2.0 \times 10^4\text{ W/m}^2$ 时,相比于均温板1,均温板2并没有表现出更好的均温效果。这是因为在加载的热流密度较小时,均温板未能进入最佳工作状态,内部工作介质没有完全参与到相变传热过程中,热量主要是通过内壁和支柱传导。随着热流密度的增加,均温板逐渐进入最佳工作状态,均温板通过工作介质沸腾、冷凝的相变循环,大幅度减小了传热过程中的径向热阻。均温板2具有更大尺寸,腔体内含有更多的工作介质,表现出了更好的均温优势。

图4(b)所示是测试点1,3温差 ΔT_B 的值,可见,铝合金散热器和均温板温差没有显著差异,都随着热流密度的增加线性升高。这是由于测试点3布

置在在均温板的边缘部分,所处位置在均温板腔体之外,只能通过金属壳体进行传热,所以此处温差没有得到改善。



(a) 测试点1,7温差



(b) 测试点1,3温差

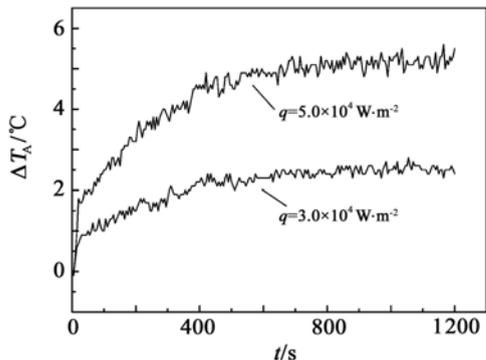
图4 不同热流密度下测试点温差值

2.2 启动特性

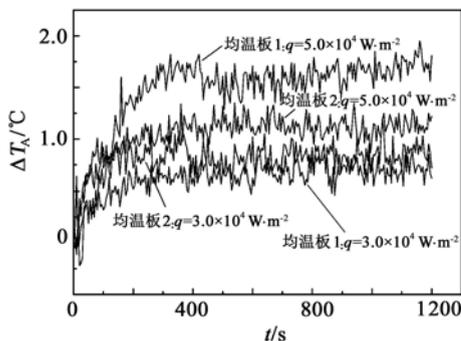
图5所示为铝合金散热器和均温板温差的瞬时特性。可以看出,铝合金散热器和均温板随着热流密度的增大,温差在初始阶段的上升速度都会加快;在相同热流密度时,均温板的温差上升速度明显快于铝合金散热器。与铝合金散热器相比,均温板的温差会在更短的时间内趋于平缓。

当热流密度为 $5.0 \times 10^4\text{ W/m}^2$ 时,如图5(a)所示,铝合金散热器需要耗费 600 s 才能趋于平稳,而如图5(b)所示,均温板只需 300 s 就能使温差趋于平稳,即均温板具有较好的启动特性。

在散热装置的热传导过程中,因为铝合金散热器只能依靠金属材料本身的导热性能,而均温板采用更为高效的相变传热,工作介质的沸腾、冷凝、回流过程进行快速循环,因此均温板的温差可以在短时间达到稳定状态。温差的快速稳定有利于探测器快速进入稳定运行状态、加快系统启动的速度,也将减轻热量对器件的冲击,延长器件的使用寿命。



(a) 铝合金散热器



(b) 均温板

图 5 铝合金散热器和均温板的温差瞬时特性

2.3 热阻分析

热阻是判断热均温器件热性能的主要指标,热阻值越小,热性能越好。定义均温器件的热阻为 R_h :

$$R_h = \frac{T_7 - (T_2 + T_5)/2}{Q} \quad (2)$$

其中, Q 为半导体制冷器热端的放热功率,由热流密度乘以加热面积获得。

图 6 所示为各均温器件热阻曲线,可见随着热流密度增加,均温板的热阻逐渐减小,并逐渐趋于平稳,而铝合金散热器的热阻基本不变,保持在 $0.30 \sim 0.32 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$ 的范围内。当热流密度达到 $5.0 \times$

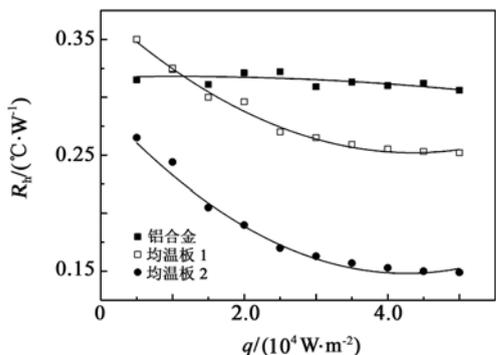


图 6 铝合金散热器及均温板热阻曲线

$10^4 \text{ W}/\text{m}^2$ 时,均温板 1 的热阻为 $0.25 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$,均温板 2 的热阻为 $0.15 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$,而铝合金散热器的热阻为 $0.31 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$,表明均温板具有更好的热性能,并且具有较大尺寸的均温板 2 热性能更加优越。

2.4 制冷效果

近红外单光子探测器为了实现更高的探测效率、更低的暗计数、更小的热噪声,需要处于一个稳定的低温环境中,通常最优的温度为 $-50 \sim -60 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。利用多级半导体制冷器可以实现这种低温环境,但受当前 TEC 材料的限制,其冷面和热面的最大温差只能达到 $100 \text{ } ^\circ\text{C}$ 左右,所以热面温度过高会限制其冷面的制冷效果,从而影响探测器的性能。

图 7 所示为铝合金制冷器和均温板上测试点 8 的温度曲线。TEC 通电后,测试点 8 的温度会以极快的速度下降至 $-50 \text{ } ^\circ\text{C}$,表现出优异的制冷性能。

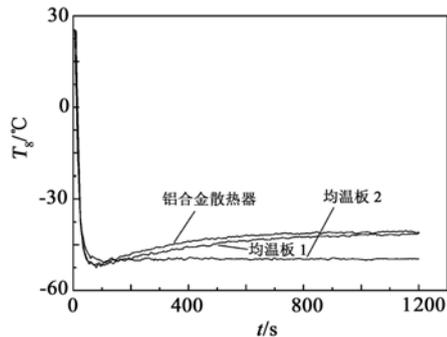


图 7 测试点 8 的瞬时温度特性曲线

铝合金散热器和均温板 1 中测试点 8 的温度在下降到 $-50 \text{ } ^\circ\text{C}$ 后会随着时间缓慢回升,最终稳定在 $-42 \text{ } ^\circ\text{C}$ 附近。均温板 2 则在温度下降到 $-50 \text{ } ^\circ\text{C}$ 后就维持稳定状态。这是由于铝合金散热器和均温板 1 热面聚集的热量随时间增加,导致热面温度达到 $60 \text{ } ^\circ\text{C}$ 以上,TEC 材料限制冷面温差只有 $100 \text{ } ^\circ\text{C}$ 左右,导致铝合金制冷器和均温板 1 中测试点 8 的温度会随着热量的堆积而缓慢回升。均温板 2 腔体内含有大量的工作介质,可将更多的热量通过相变循环耗散掉,所以均温板 2 中测试点 8 的温度可以维持在 $-50 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。因此,具有更大尺寸的均温板 2 可以为单光子探测器提供更好的工作条件。

3 结论

1) 相比铝合金散热器,均温板通过气-液相变表现出了优异的均温效果,为近红外单光子探测器的稳定运行提供良好环境,避免了热点现象的出现。

当热流密度大于一定的阈值时,具有较大尺寸的均温板表现出更好的均温效果。

2)均温板可以在更短时间内使温差趋于稳定状态,表现出了优于铝合金散热器的启动性能。温差稳定所需的时间缩短,将有利于单光子探测器快速进入稳定运行状态,同时也会减轻热量对器件的冲击,提升器件的使用寿命。

3)均温板的热阻会随着热流密度的增大而减小,并逐渐趋于稳定。与铝合金散热器相比,均温板具有更好的热性能,具有较大尺寸的均温板热性能更加优越。

4)均温板与相同尺寸的铝合金散热器相比,对半导体制冷器的制冷能力提升有限。具有较大尺寸的均温板腔体内有更多的工作介质,可以耗散更多的热量,为近红外单光子探测器提供更好的工作条件,提升探测器的相关性能。

参考文献:

- [1] Brain M C. Absolute noise characterisation of avalanche photodiodes[J]. *Electron. Lett.*, 1978, 14(15): 485-487.
 - [2] Matukas J, Palenskia V, Pralgauskaite S, et al. Photosensitivity and noise characteristic investigation of ultrafast InGaAs/InP avalanche photodetectors[C]// *IEEE Inter. Conf. on Microwaves*, 2006: 173-176.
 - [3] Xuan X C. On the optimal design of multistage thermoelectric coolers[J]. *Semiconductor Science & Technol.*, 2002, 17(6): 625-629.
 - [4] 李水峰,熊予莹,王 晗,等. 红外 InGaAs/InP 单光子探测器的温度特性研究[J]. *量子光学学报*, 2008, 14(3): 327-332.
- Li Shuifeng, Xiong Yuying, Wang Yi, et al. Study on the temperature characteristics of infrared InGaAs/InP single photon detectors[J]. *Chinese J. of Quantum Optics*, 2008, 14

(上接第 226 页)

- [4] 张 萱, 闻建静, 楼建明. 铂电阻测温非线性校正方案[J]. *南昌大学学报(工科版)*, 2003, 25(3): 53-56.
- Zhang Xuan, Wen Jianjing, Lou Jianming. Linear compensation method for temperature measurement of a platinum resistance thermometers [J]. *J. of Nanchang University(Engin. & Technol. Edi.)*, 2003, 25(3): 53-56.
 - [5] 王 勇, 王晓东. 高精度铂电阻测温非线性校正方法[J]. *测控技术*, 2004, 23(7): 75-76.

Wang Yong, Wang Xiaodong. Non-linear calibration method of the high precision Pt-resistance in measuring temperature[J]. *Measurement & Control Technology*, 2004, 23(7): 75-76.
 - [6] 李 龙. 铂电阻智能测温电路设计及非线性校正方法[J]. *大众科技*, 2011, 146(10): 141-144, 147.

(3): 327-332.

- [5] Sauciu I, Chrysler G, Mahajan R, et al. Spreading in the heat sink base: Phase change systems or solid metals[J]. *IEEE Trans. on Components and Packaging Technol.*, 2003, 25(4): 621-628.
 - [6] Wang J C, Huang C L. Vapor chamber in high power LEDs [C]// *IEEE Microsystems Packaging Assembly and Circuits Technol. Conf. (IMPACT)*, 2010: 1-4.
 - [7] Wu X P, Mochizuki M, Nguyen T, et al. Low profile-high performance vapor chamber heat sinks for cooling high-density blade servers[C]// *IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symp.*, 2007: 174-178.
 - [8] Reyes M, Velazquez A, Arias J R, et al. Experimental and theoretical study of a vapour chamber based heat spreader for avionics applications[J]. *Appl. Thermal Engin.: Design, Processes, Equipment, Economics*, 2012, 37: 51-59.
 - [9] Bose J R, Ahammed N, Asirvatham L G. Thermal performance of a vapor chamber for electronic cooling applications[J]. *J. of Mechanical Science and Technol.*, 2017, 31(4): 1995-2003.
 - [10] 周 驰, 左敦稳, 孙玉利, 等. 应用于 LED 肋片散热的均温板效果实验研究[J]. *微电子学*, 2015, 45(1): 136-139.
- Zhou Chi, Zuo Dunwen, Sun Yuli, et al. Experimental research on the effect of temperature equalizing plate applied to LED fins heat dissipation[J]. *Microelectronics*, 2015, 45 (1): 136-139.
 - [11] 冯志伟, 张 红, 许 辉. 大功率 LED 排式热管散热器的开发及性能研究[J]. *半导体光电*, 2012, 33(2): 76-80, 85.

Feng Zhiwei, Zhang Hong, Xu Hui. Development and performance study of high power LED row heat pipe radiator [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2012, 33(2): 76-80, 85.

作者简介:

姚友丹(1995—),男,硕士生,研究方向为仪器及设备精度保障。

E-mail: 826398050@qq.com

Li Long. The design of intelligent temperature measurement circuit by platinum resistor and nonlinear correction method[J]. *Da Zhong Ke Ji*, 2011, 146(10): 141-144, 147.

- [7] 陈莉杰, 黄 庶. 铂电阻测温传感器的间歇电流激励方法[J]. *传感器技术*, 2003, 22(3): 48-50.
- Chen Lijie, Huang Shu. Driven method with intermittent current to platinum sensor of measuring temperature[J]. *J. of Transducer Technol.*, 2003, 22(3): 48-50.

作者简介:

许子颖(1984—),男,江苏无锡人,硕士研究生,主要研究方向为红外光电技术。

E-mail: alphacx@hotmail.com

凹槽型微通道传热与流动性能的数值分析

范贤光, 黄江尧, 许英杰

(厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 针对电子器件的散热问题,提出了四种具有对称和等距凹槽的微通道,并通过三维数值模拟,研究了不同雷诺数下凹槽形状及布局对微通道性能的影响。结果表明:在给定的雷诺数范围内,圆形凹槽的传热性能仅次于三角凹槽,而梯形和矩形凹槽的传热性能较差。三角凹槽压降最大,其次是圆形,而梯形和矩形凹槽压降差异较小;同种形状不同布局的凹槽,压降几乎一致,这表明通过改变凹槽布局来提高性能不会产生额外压降损失。综合换热和压降特性,微通道热性能系数先增后减,故三角凹槽在雷诺数为 600 时获得最优热性能,而在雷诺数为 900 时等距圆形凹槽的热性能超过三角凹槽。

关键词: 微通道; 凹槽; 传热和流动性能; 数值模拟

中图分类号: TK124 **文章编号:** 1001-5868(2020)02-0232-05

Numerical Analysis on Heat Transfer and Flow Characteristics of Grooved Microchannel

FAN Xianguang, HUANG Jiangyao, XU Yingjie

(School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, CHN)

Abstract: Four microchannel models with symmetrical and equidistant grooves are proposed for the heat dissipation of electronic devices. The effects of groove shape and layout on microchannel flow and heat transfer performance under different Reynolds numbers (Re) were studied by three-dimensional numerical simulation. The results show heat transfer performance of circular groove is only inferior to that of the triangular groove, while trapezoid and rectangular grooves are poor. The pressure drop of triangular groove is the largest, followed by circular groove, and the pressure loss difference between trapezoid and rectangular groove is small, but the pressure drop is almost the same for the grooves with the same shape and different layout, which indicates that changing the groove layout to improve performance will not produce additional pressure loss. Combining with the characteristics of heat transfer and pressure drop, the thermal performance coefficient (TPC) of microchannel increases first and then decreases, so the optimal TPC is obtained with the triangular groove at $Re = 600$, while the TPC of the equidistant circular groove exceeds that of the triangular groove at $Re = 900$.

Key words: microchannel; groove; heat transfer and flow characteristic; numerical simulation

0 引言

随着电子器件向高性能、小型化方向的不断发展,散热问题已成为制约其发展的主要障碍。高效

的冷却系统是电子设备可靠运行的基本要求之一。一方面,将产生的热量释放到环境中变得非常困难,另一方面,为了避免温度升高可能对电子设备造成的损坏,必须不断地释放这些热量。然而,传统的风冷方式已经不能满足高密度散热的要求,亟需寻找

收稿日期:2019-12-16.

基金项目:国家自然科学基金项目(21874133,21974118).

新的方法来及时去除电子器件产生的高热量。因此,这一复杂却有深刻意义的问题引起了国内外研究者的关注。而微通道散热器,自1981年由Tuckerman^[1]首次提出并设计硅基底矩形微通道散热器后,以其独特的优点和高效的换热性能得到广泛研究。

Izci等^[2]通过数值模拟研究了不同形状的微通道针翅结构的流动特性,包括圆形、方形、菱形以及三角形等结构。研究表明在雷诺数为20~120的范围内,矩形针翅和其他针翅结构相比具有最高的压降。彭洁旻等^[3]提出了一种内凹形的微通道热沉,并对比了其在不同流速下和传统矩形微通道的换热流动性能。结果表明,该内凹形微通道的努塞尔系数低于矩形通道,但由于其特殊的凹腔结构有效降低了流动压降,因而该结构能够减少泵功损失而获得较高的综合性能。Hung等^[4]研究了一种锥形通道,这种锥形微通道具有高或宽上的锥度变化。结果显示,在一定的泵功率下,热阻与宽锥比的关系不是单调的,热阻先减小后增大。研究还发现,与平行或高锥度通道相比,宽锥形通道设计具有更低且相对均匀的温度分布。更有研究发现进出口的布局影响着微通道整体的性能,Naphon等^[5]设计了单入口、多出口的喷射流进出口,结果证明出口位置改变了速度和温度的均匀性。Tang等^[6]则研究了三种不同进出口位置以及散热器形状的换热特性,并发现矩形散热器中进出口布局在两侧中间具有最优性能。

目前国内外学者已经对微通道的结构等进行了大量的研究,以探寻更优的流动和传热性能,然而却很少有关于内部凹槽对整体流动及散热性能影响的研究。夏国栋等^[7]提出一种三角凹槽周期性变截面微通道,结果表明其散热性能明显优于矩形等截面微通道。在一定雷诺数范围内,两者压降相差不大,前者的平均温度和最高温度均小于后者。因此,少数研究表明微通道的内部凹槽对散热性能具有实际的改善效果。本文在设计四种对称及四种等距凹槽的基础上,通过数值仿真研究不同形状及布局的内侧凹槽对微通道流体流动及换热性能的影响。

1 物理模型

为了研究凹槽形状及其布局对微通道整体性能的影响,本文提出四种对称凹槽及四种等距凹槽的微通道进行模拟分析。各个微通道的基本尺寸一

致,以具有三角凹槽为例的微通道单元及网格划分结果如图1所示,流体域充满微通道及其凹槽,单条微通道长、宽、高分别为10,0.55和0.5 mm。另一方面,三角凹槽、矩形凹槽、梯形凹槽、圆形凹槽等四种凹槽的对称布局及等距布局如图2所示。其中微通道宽度为0.15 mm,凹槽宽度为0.2 mm,凹槽高度为0.1 mm,凹槽间距为0.2 mm以及等距凹槽中心间距为0.1 mm。本文通过数值模拟研究四种形状及四种布局的凹槽,详细分析不同凹槽微通道的传热和流动性能,以及对称和等距凹槽之间的差异。

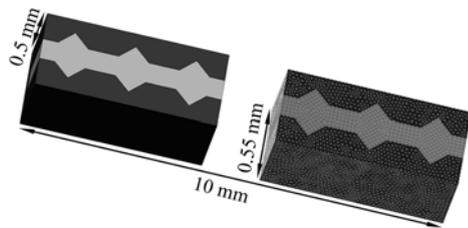


图1 三角凹槽微通道单元与网格划分示意图

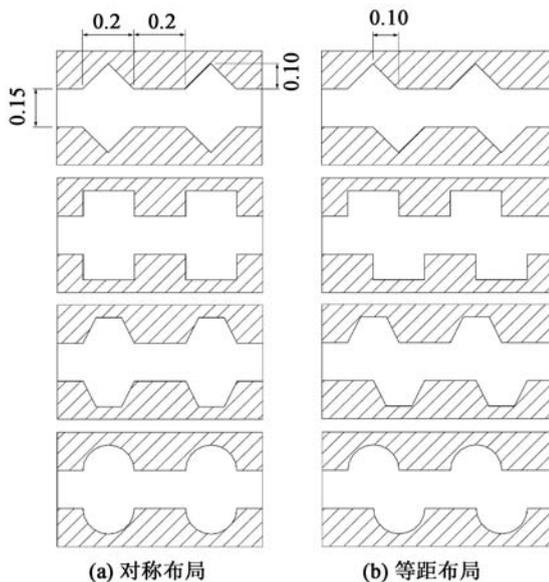


图2 四种凹槽的对称和等距布局结构示意图(单位:mm)

2 数值模拟

2.1 控制方程

为了分析该模型的热特性和流动特性,计算过程采用SIMPLE方法,对模拟过程做如下假设:流动是三维不可压缩的稳态层流,固液界面不滑移。除施加热流的表面外,其余表面均绝热,并且忽略辐射换热。基于以上假设,控制方程如下:

连续性方程:

$$\frac{\partial \bar{\rho} u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

能量守恒方程:

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

2.2 边界条件及网格无关性验证

在微通道的散热面上施加 150 kW/m² 的热流量,同时微通道和基底接触面为固液耦合界面,其余表面均为绝缘。微通道入口设定为速度入口,入口温度为 298 K,而出口边界为标准大气压,且残差迭代精度设置为 10⁻⁶。

为了保证计算的精度和效率,网格划分必须验证网格的独立性,以保证计算结果不受网格点大小的影响。本文以努塞尔系数作为网格独立性验证的依据,不同网格下的结果变化如表 1 所示。可以看出,随着网格数量的增加,努塞尔系数 N 逐渐增大并且趋于稳定。当网格数量达到 58 958, 401 075, 1 103 490, 1 778 088 时,相应的 N 变化率分别为 33.8%, 5.3%, 0.68% 以及 0.52%。因此考虑到计算量和精度,本文选取 1 103 490 的网格数量进行模拟计算。

表 1 网格无关性验证

网格节点数	N	变化率/%
58 958	50.71	33.8
401 075	72.57	5.3
1 103 490	76.13	0.68
1 778 088	76.25	0.52
2 200 884	76.65	/

2.3 数据处理

对流换热中,常用平均努塞尔系数作为传热性能指标:

$$N = \frac{qd}{(T_w - T_f)\lambda} \quad (4)$$

式中, q 为热流密度, d 为入口当量直径, λ 为导热系数, T_w 为微通道平均温度, T_f 为流体平均温度。

微通道中流体压降定义为

$$\Delta p = p_{in} - p_{out} \quad (5)$$

式中, p_{in} 为入口压力, p_{out} 为出口压力。

综合考虑传热性能和阻力损失,采用无量纲参数 TPC 对整体性能进行评估^[8]。

$$TPC = (N/N_0)/(\Delta p/\Delta p_0)^{(1/3)} \quad (6)$$

式中, N_0 和 Δp_0 分别为雷诺数 Re 为 300 时矩形直道的努塞尔系数和压降。

3 计算及结果分析

3.1 微通道流动性能分析

凹槽微通道由于凹槽的存在,速度场的分布会因不同形状的凹槽而产生变换,这是由于三角形、矩形、梯形以及圆形凹槽对流体的扰动能力不一致引起的。图 3 显示了雷诺数为 300 时微通道在末端凹槽处的流场分布情况,流动方向自左向右。可以直观地看出不同凹槽对速度场的分布产生不同影响。并且各个凹槽的层流滞止区从大到小依次为:矩形凹槽、梯形凹槽、圆形凹槽以及三角凹槽。对比同一类型凹槽,例如梯形凹槽,等距凹槽下半区的滞止区略大于上半区,这是由于结构的流畅性更加顺应流

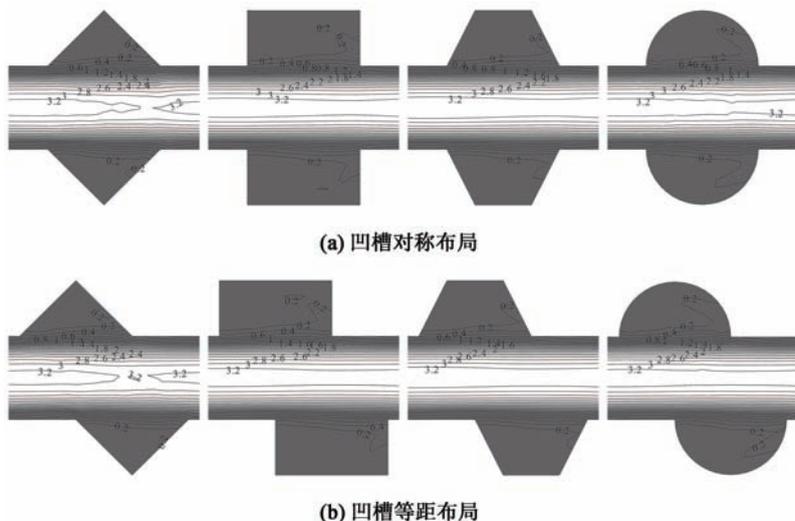


图 3 微通道凹槽单元处速度场分布

动方向,从而减弱了流动循环性,而该布局下的凹槽对称和等距分布的流场差距较小。

压降是衡量泵功消耗的重要指标,图4给出了不同微通道压降随雷诺数 R_e 的变化情况。由图4可知,在低雷诺数时,各种凹槽的压降相差不大。随着雷诺数的增大,各个微通道的压降也逐渐增大。其中,三角凹槽的压降增大明显快于其他凹槽,这是因为三角凹槽对流体的扰动能力强于其他凹槽,不断破坏流体边界层,因此流动阻力更大。其次,圆形凹槽对流体的扰动能力仅次于三角凹槽,梯形凹槽和矩形凹槽次之。而对于同种类型的凹槽,对称凹槽和等距凹槽的压降基本保持一致。

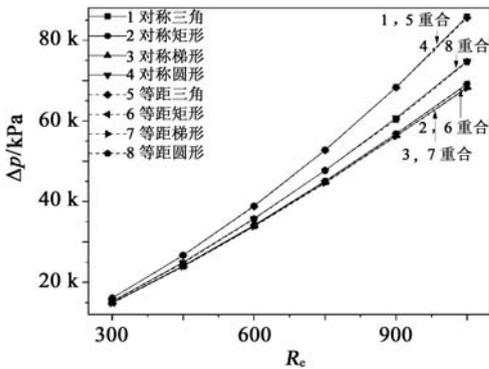


图4 微通道压降随 R_e 的变化关系

3.2 微通道传热性能分析

图5为不同雷诺数下各个凹槽微通道的温度变化情况,可见不同凹槽的传热能力相差较大。一方

面,凹槽的设计明显增加了散热面积,其次是凹槽对流体的扰动能力更强,进而散热的效果更好。另一方面,随着雷诺数的不断增大,各个微通道的最高温度 T_{max} 逐渐减小且趋于平缓,因此雷诺数大到一定程度后不能通过提高雷诺数来提高传热性能。在所给出的凹槽设计中,最高温度从大到小依次为:矩形凹槽、梯形凹槽、圆形凹槽、三角凹槽。其中矩形和梯形凹槽的最高温度差异较小,约为1 K。

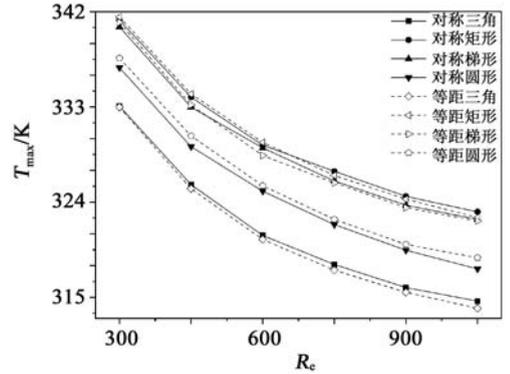


图5 微通道最高温度随 R_e 的变化关系

为了直观比较各种凹槽微通道的温度,图6给出了雷诺数为300时各个微通道的温度分布情况。由于滞止区的存在,矩形凹槽和梯形凹槽在凹槽内侧的温度明显高于其他位置,最高温度约为341 K。而三角凹槽和圆形凹槽的滞止区较小,因此温度明显低于矩形凹槽和梯形凹槽,其中三角凹槽的最高温度约为333 K,圆形凹槽的最高温度约为337 K。

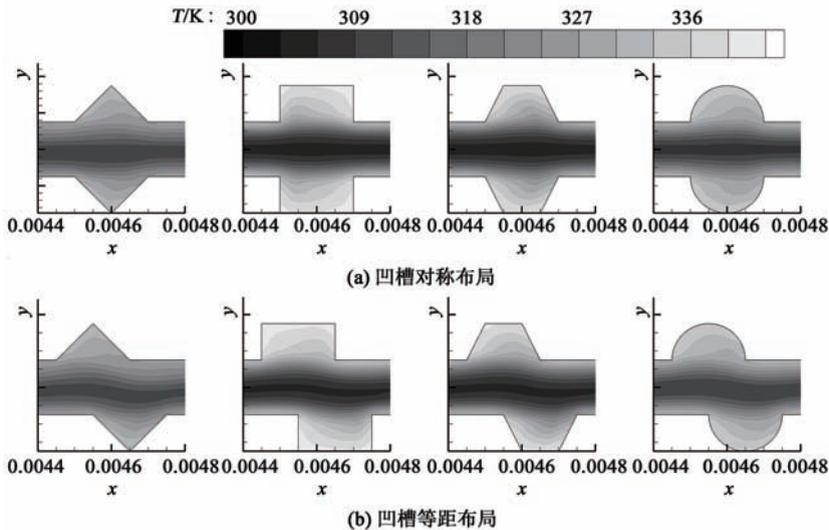


图6 微通道凹槽单元的温度场分布

为较好评估各个微通道的传热性能,图7显示了不同微通道努赛尔系数比随雷诺数的变化关系,

可见随着 R_e 的增大,努赛尔系数比越来越大,但增长速度变慢。努赛尔系数比从大到小依次为:三角

凹槽、圆形凹槽、梯形凹槽、矩形凹槽。相比于矩形和梯形凹槽,雷诺数为 300 时,三角凹槽的努塞尔系数比约提升了 0.14,而圆形凹槽提升了 0.1。而雷诺数达到 1 050 时,三角凹槽提升了 0.3,而圆形凹槽提升了 0.25。可见三角凹槽和圆形凹槽的努塞尔系数比的增长速率大于矩形和梯形凹槽。

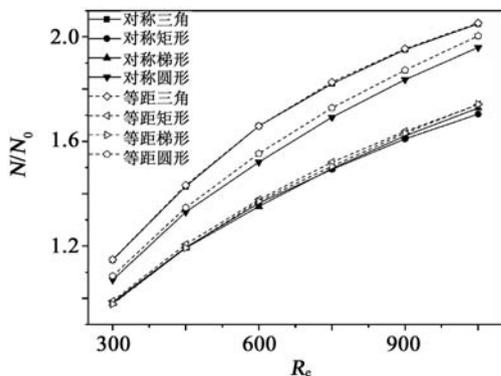


图 7 努塞尔系数比随 R_e 的变化关系

3.3 综合性能分析

综合流动性能和传热特性,考虑压降以及努塞尔系数比等,以热性能 TPC 来评估微通道性能。图 8 给出不同微通道的 TPC 随 R_e 的变化情况。随着雷诺数的增大,微通道的热性能先上升后趋于下降,这是由于努塞尔系数增长逐渐变缓而压降增长趋于上升而导致的,故在低雷诺数下具有最优的 TPC。相比于常规矩形直道,具有凹槽的微通道都不同程度上提高了热性能。在雷诺数小于 900 时,三角凹槽的 TPC 最高,而当雷诺数大于 900 后,等距圆形凹槽的 TPC 最高。一方面,三角凹槽的压降上升速率大于圆形凹槽,另一方面,三角凹槽的努塞尔系数增长速率小于圆形凹槽。因此,当雷诺数达到一定值后,圆形凹槽的 TPC 高于三角凹槽。而梯形凹槽和矩形凹槽具有较低的 TPC,这主要是因为努塞尔系数较低,换热性能较差。

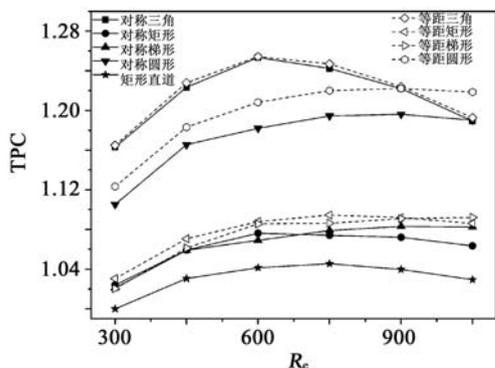


图 8 热性能系数随 R_e 的变化关系

4 结论

本文建立了三角形、矩形、梯形、圆形凹槽的对称和等距微通道模型,并比较常规的矩形直道以分析凹槽形状及布局对微通道散热性能的影响。重点分析了各种微通道的流动性能、传热性能以及综合热性能等,得出的结论如下:

(1) 具有三角凹槽、矩形凹槽、梯形凹槽、圆形凹槽等的微通道对流体扰动能力各有差异。并且随着雷诺数的增大,流体压降越来越大;

(2) 随着流量的增大,各个微通道的努塞尔系数逐渐变大,而增长速率逐渐变缓。其中,三角凹槽的换热性能最好,其次是圆形凹槽,而矩形和梯形凹槽的换热性能相差不大,表现为矩形和梯形凹槽的最高温度均比圆形凹槽高 4°C ,而圆形凹槽比三角凹槽高 4°C ;

(3) 低雷诺数时,各凹槽压降基本无区别,而随着雷诺数的增大,不同形状凹槽压降差异较大,三角凹槽大于圆形凹槽,而梯形和圆形凹槽较小且差异不大;而同种凹槽中对称及等距布局压降基本保持一致;

(4) 随着雷诺数的增大,微通道的热性能先增大后减小,故低雷诺数下可获得最优热性能。三角和圆形凹槽的热性能系数远大于矩形和梯形凹槽。在雷诺数低于 900 时,三角凹槽的热性能高于圆形凹槽,反之等距圆形凹槽优于三角凹槽。对比矩形直道,具有凹槽的微通道都不同程度上提高了热性能。

参考文献:

- [1] Tuckerman D B, Pease R F W. High-performance heat sinking for VLSI[J]. Electron Device Lett., 1981, 2(5): 126-129.
- [2] Izi T, Koz M, Kosar A. The effect of micro pin-fin shape on thermal and hydraulic performance of micro pin-fin heatsinks [J]. Heat Transf. Eng., 2015, 36(17): 1447-1457.
- [3] 彭洁旻, 陈维, 邓大祥. 内凹形微通道热沉换热流动性能的数值分析[J]. 半导体光电, 2014, 35(2): 88-92. Peng Jiewen, Chen Wei, Deng Daxiang. Numerical analysis on heat transfer and flow characteristics of cooper [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014, 35(2): 88-92.
- [4] Hung T C, Yan W M. Effects of tapered-channel design on thermal performance of microchannel heat sink [J]. Int. Commun. Heat Mass Transf., 2012, 39(9): 1342-1347.

(下转第 241 页)

基于蛾眼阵列的全向宽光谱减反层优化设计

刘晓光, 汪岳峰

(陆军工程大学 石家庄校区 电子与光学工程系, 石家庄 050003)

摘要: 为降低太阳能电池封装材料PET薄膜的反射率,采用严格耦合波分析(RCWA)方法对基于蛾眼阵列的减反层进行了优化设计。对比研究了圆锥形、抛物线形和正弦形蛾眼结构的减反性能,结果表明圆锥形蛾眼结构具有最佳全向宽光谱减反性能。分析了圆锥体几何参数对太阳光透过率的影响,为参数选取提供依据。在此基础上,提出基于柱形与锥形复合结构的蛾眼阵列,通过参数优化,进一步提高了太阳光在大角度入射条件下的透过率。优化后复合结构的蛾眼阵列的PET薄膜对波长范围在 $0.3\sim 1.1\mu\text{m}$ 、入射角度为 $0^\circ\sim 90^\circ$ 的入射太阳光角度归一化透过率到达0.9664,相比于未采取减反措施的PET薄膜透过率提高12.77%。

关键词: 蛾眼阵列; 减反射层; 形状优化; 严格耦合波分析法

中图分类号: O436.1 **文章编号:** 1001-5868(2020)02-0237-05

Optimization and Design of Omnidirectional and Broadband Antireflection Layer Based on Moth-eye Array

LIU Xiaoguang, WANG Yuefeng

(Department of Electronic and Optical Engineering, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, CHN)

Abstract: In order to reduce the reflectivity of solar cell PET packaging materials, the rigorous coupled wave analysis (RCWA) method is used to optimize the anti-reflection layer based on moth-eye array of PET film. Firstly, the solar light transmission characteristics of conical, parabolic and sinusoidal moth-eye structures are compared. It is shown that the conical moth-eye structure has the best omnidirectional and broadband anti-reflection performance. Meanwhile, effects of geometry parameters on moth-eye array with conical structure are analyzed, which helps to select optimal parameters. On this basis, a moth-eye array based on composite structures composed of cylindrical and conical structure is proposed. By optimized geometry parameters, the transmittance of sunlight under large angle incident conditions is further improved. The PET film having moth-eye array with optimized composite structures has a normalized transmittance of 0.9664 for a solar wavelength with a wavelength range of $0.3\sim 1.1\mu\text{m}$ under the incident angle of $0^\circ\sim 90^\circ$, which is 12.77% higher than that without taking countermeasures.

Key words: moth-eye array; anti-reflection layer; shape optimization; rigorous coupled wave analysis method

0 引言

平流层太阳能飞艇、无人机等飞行器采用柔性薄膜光伏电池作为能量来源^[1-3]。由于光伏电池直

接贴在飞行器表面,无法采取对日定向措施,因而在多数情况下太阳光为斜入射,且入射角的范围横跨 $0^\circ\sim 90^\circ$ 。由菲涅尔定理可知,斜入射条件下,太阳光在空气与光伏电池封装材料的交界面的反射率增

大,且反射损失随入射角的增大而增大,必然造成光伏电池对太阳光吸收率的降低,影响光伏阵列的输出功率和飞行器的性能。因此,为提高光伏电池对太阳光的吸收效率,通常需要对封装材料采取一定的减反措施。同时,由于光伏电池的响应波长横跨可见光到近红外,甚至短波红外,因此减反层必须具备宽光谱减反特性。

通过模拟蛾眼表面的微纳光子结构,研究人员提出基于蛾眼阵列的全向宽光谱减反层^[4],其原理是当周期性微纳结构的周期与波长相当或小于波长时,其可以等价于折射率梯度变化的介质层^[5],从而降低太阳光入射路径上折射率的变化,减小反射。Boden 和 Bagnall^[6]通过研究硅表面蛾眼阵列的光学特性,发现形状对蛾眼阵列的减反性能有重要影响。为实现最佳的减反效果,研究人员研究了圆锥形^[7-8]、抛物线形^[9-10]和正弦形^[11]三种主要形状蛾眼阵列的减反特性。然而,这些研究多针对太阳光正入射或入射角较小的情况,而对于太阳能飞行器而言,所要考虑的太阳光入射角范围为 $0^\circ\sim 90^\circ$ 。因此,本文以严格耦合波分析(RCWA)方法为基础,对比研究了三种结构的减反性能,分析了几何参数的影响,并对通过复合结构降低蛾眼阵列对太阳光入射角的敏感性进行研究。

1 仿真模型

严格耦合波分析方法是一种精确求解麦克斯韦方程组的方法,被广泛应用于周期性微纳结构光学特性的研究。基于 RCWA 的蛾眼阵列仿真模型如图 1 所示。其中,蛾眼阵列采用密排分布,蛾眼高度为 h ,底面半径为 r 。 x, y, z 满足右手定则,在 x 和 y 方向的周期分别为 $2r$ 和 $2\sqrt{3}r$ 。其中虚线框表示

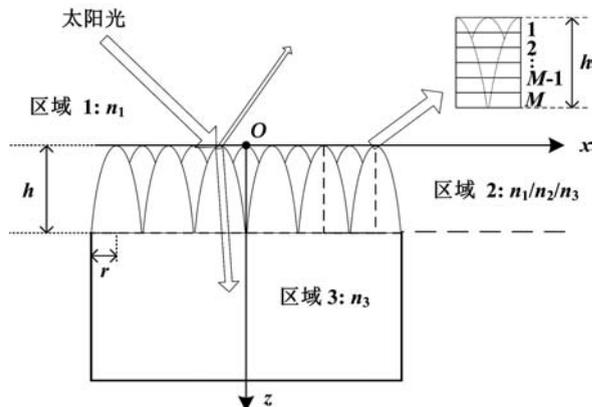


图 1 蛾眼阵列仿真模型

一个仿真单元,由于蛾眼结构在 z 方向上的半径是变化的,即占空比是蛾眼高度的函数。因此,在进行仿真时需要对仿真单元在 z 方向上进行分层。假设共分为 M 层,第 l 层的厚度为 d_l 。沿 z 方向可以分为 3 个区域:区域 1、区域 2 和区域 3。其中,区域 1 为空气,折射率 $n_1=1$;区域 2 为蛾眼阵列形成的光栅区,其折射率取决于不同 z 处占空比;区域 3 为基底,即 PET 基底,折射率 $n_3=1.5$ 。

为衡量不同形状蛾眼结构的太阳光透过率特性,定义光谱平均(SSI)透过率为

$$\eta_{p/s} = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} Q(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S(\lambda)d\lambda} \tag{1}$$

其中,下标 p/s 分别表示 p 波或 s 波, $Q(\lambda)$ 为太阳光透过率, $S(\lambda)$ 为太阳光谱。由于太阳光为非偏振光,因此太阳光的 SSI 透过率表示为^[12]

$$\eta = \frac{\eta_p + \eta_s}{2} \tag{2}$$

由于蛾眼阵列的 SSI 透过率是太阳光入射角的函数,为衡量蛾眼阵列减反性能的角度特性,定义角度平均 SSI(ASSI)透过率为^[13]

$$\delta = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \eta \cos \theta d\theta \tag{3}$$

其中, θ 为太阳光的入射角。

2 仿真分析

2.1 不同形状蛾眼阵列透过率

2.1.1 形状对蛾眼阵列透过率的影响

假设飞行器采用硅光伏电池,仿真光谱范围为 $0.3\sim 1.1\mu\text{m}$,太阳光入射角为 $0^\circ\sim 90^\circ$ 。首先对比研究三种形状蛾眼阵列对太阳光的透射特性。假设不同形状蛾眼高度为 $0.5\mu\text{m}$,底面半径均为 $0.1\mu\text{m}$,基底厚度为 $30\mu\text{m}$,仿真圆锥形、抛物线形和正弦形蛾眼结构的 SSI 透过率,如图 2 所示。

从图 2 中可以看出,三种结构蛾眼阵列的 SSI 透过率曲线随入射角的变化趋势基本一致,即随着太阳光入射角的增大,透过率逐渐降低。太阳光入射角在 $0^\circ\sim 60^\circ$ 范围内,SSI 透过率接近 100%,能够实现良好的减反效果。当太阳光入射角大于 60° 后,SSI 透过率随入射角的增大而迅速降低至 0。从图中插图可以看出,圆锥形结构蛾眼阵列的透过率优于另外两种结构。

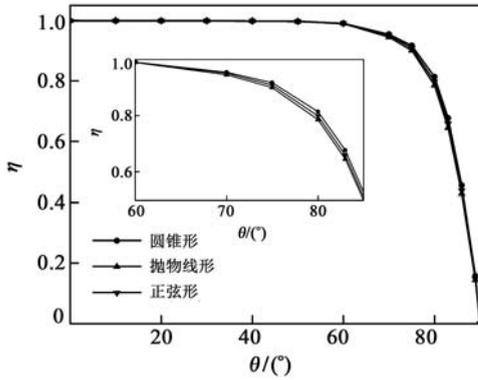


图2 不同形状蛾眼结构的 SSI 透过率曲线

2.1.2 几何参数对透过率的影响

在上文分析的基础上,对蛾眼高度和底面半径对蛾眼阵列透过率的影响进行分析。从 2.1.1 节的分析结果可以看出,圆锥结构蛾眼阵列对于全向宽光谱减反效果要优于抛物线和正弦形结构。因此,此节主要以圆锥结构作为研究对象。蛾眼高度对阵列透过率的影响如图 3 所示。

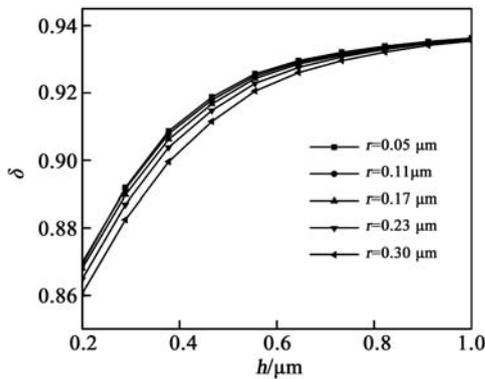


图3 高度对蛾眼阵列透过率的影响

从图中可以看出,对于特定蛾眼底面半径,随着蛾眼高度的增大,ASSI 透过率也随之增大。在 $h = 1 \mu\text{m}$ 附近,不同底面半径的蛾眼阵列 ASSI 透过率基本相同,表明高度对蛾眼阵列的透过率的影响较为显著,但高度达到一定程度时,其对透过率的影响基本保持不变。

底面半径对蛾眼阵列透过率的影响如图 4 所示。从图中可以看出,当蛾眼高度取值为 $0.2 \mu\text{m}$ 时,随着底面半径从 $0.05 \mu\text{m}$ 增大到 $0.3 \mu\text{m}$,ASSI 透过率呈先增大后减小的变化趋势。当 $h = 0.4 \mu\text{m}$ 时,随着底面半径的增大,ASSI 透过率逐渐减小;而当 h 取值大于 $0.6 \mu\text{m}$ 时,ASSI 透过率随着底面半径的增大基本保持不变。从上述分析可以看出,高度和底面半径均对蛾眼阵列的透过率有影响,其中

高度的影响更为突出。当高度增大到一定值后,底面半径对蛾眼阵列透过率的影响可以忽略。

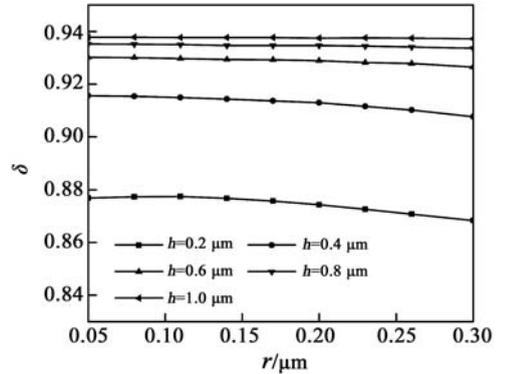


图4 底面半径对蛾眼阵列透过率的影响

2.2 圆柱形与圆锥形复合结构蛾眼阵列

从上文分析中可以发现,蛾眼阵列能够在较大入射角范围内对太阳光实现较好的减反效果,但是在太阳光大角度入射时减反性能减弱。由于飞行器光伏阵列不具备对日定向能力,光伏阵列在长时间内面临太阳光的大角度入射,因此降低蛾眼阵列对太阳光入射角的依赖性至关重要。有研究发现在太阳光入射角大于 60° 时,疏排分布的圆柱形蛾眼阵列减反性能优于圆锥形蛾眼阵列^[14]。在此基础上,本文提出采用圆柱形与圆锥形结构组成复合结构以进一步提高蛾眼阵列的透过率,降低蛾眼阵列减反性能对太阳光入射角的敏感性。

根据圆柱和圆锥的位置关系,设计如图 5 所示的两种复合结构 A 和 B,结构 A 由底部圆台和顶部圆柱构成,结构 B 由底部圆台、中间圆柱和顶部圆锥构成。其中底部圆台和顶部圆锥构成完整圆锥。假设蛾眼高度均为 $1 \mu\text{m}$,底部圆台的高度为 h_2 ,圆台所在圆锥的高度为 h_1 ,并令 $\omega = h_2/h_1$ 。

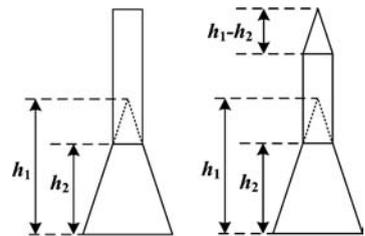
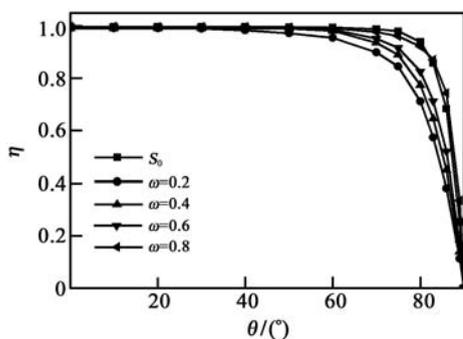


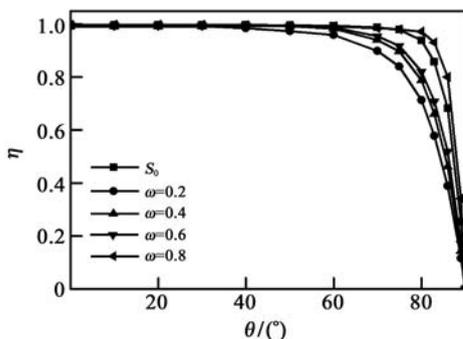
图5 两种圆柱形与圆锥形复合结构蛾眼

图 6(a)~(c) 给出结构 A 在 h_1 和 ω 取值不同时的 SSI 透过率曲线。其中, S_0 表示相同高度圆锥形结构蛾眼阵列的透过率曲线。从图中可以看出,对于结构 A 而言,对于特定 h_1 ,随着 ω 的增大,SSI

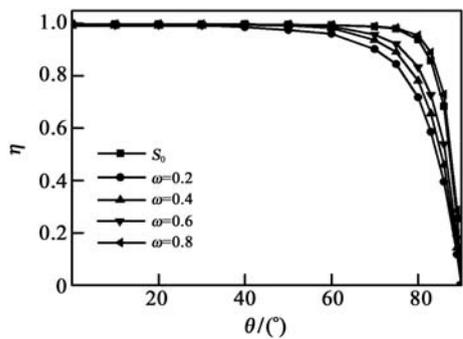
透过率呈现增大的趋势,对于三种 h_1 的取值,SSI 透过率最大值均对应 $\omega = 0.8$ 。其中,当 $h_1 = 0.6 \mu\text{m}$ 时, $\omega = 0.8$ 所对应的复合结构蛾眼阵列与 S_0 的 SSI 透过率曲线基本相同。而当 $h_1 = 0.8$ 和 $1 \mu\text{m}$ 时, $\omega = 0.8$ 所对应的复合结构蛾眼阵列在太阳光入射角较大时均大于 S_0 的 SSI 透过率,但 $h_1 = 0.8 \mu\text{m}$ 时复合结构蛾眼阵列在太阳光入射角较大时的 SSI 透过率更大。仿真结果表明,复合结构 A 能够有效增大蛾眼阵列在太阳光大角度入射时的透过率。复合结构 B 蛾眼阵列的 SSI 透过率曲线如图 6(d)~(f)所示,可以看出结构 B 随 h_1 和 ω 的变化规律与结构 A 基本相同,在 $h_1 = 0.7$ 和 $0.9 \mu\text{m}$,且 $\omega = 0.8$ 时,在太阳光入射角较大时均能有效提高蛾眼阵列的透过率。与结构 A 不同的是,对于结构 B,当 $h_1 = 0.9 \mu\text{m}$ 时, ω 的不同取值并不会降低蛾



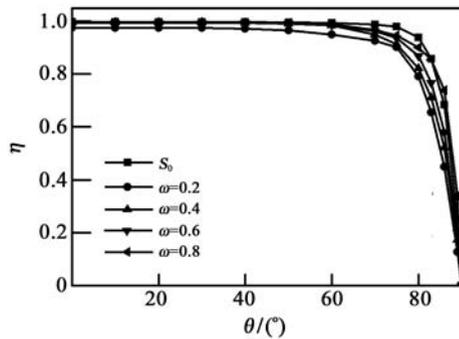
(a) 结构 A, $h_1 = 0.6 \mu\text{m}$



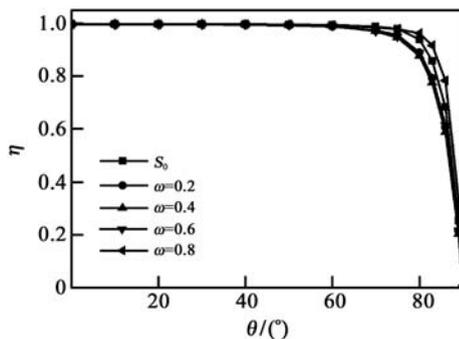
(b) 结构 A, $h_1 = 0.8 \mu\text{m}$



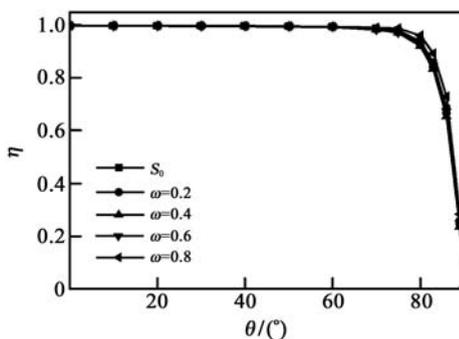
(c) 结构 A, $h_1 = 1.0 \mu\text{m}$



(d) 结构 B, $h_1 = 0.5 \mu\text{m}$



(e) 结构 B, $h_1 = 0.7 \mu\text{m}$



(f) 结构 B, $h_1 = 0.9 \mu\text{m}$

图 6 两种复合结构蛾眼阵列的 SSI 透过率曲线

眼阵列的透过率,而当 $\omega = 0.8$ 时蛾眼阵列透过率增大。从降低加工难度的角度,可选取结构 A 作为最终优化结构,在 $h_1 = 0.8 \mu\text{m}$ 且 $\omega = 0.8$ 时 ASSI 透过率为 0.966 4,未采取减反措施的 PET 薄膜的 ASSI 透过率为 0.857,提高了 12.77%。

3 结论

为减小封装材料的反射,增大光伏电池对太阳光的吸收率,本文采用严格耦合波分析方法对基于蛾眼阵列的全向宽广谱减反层进行了优化设计。在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 入射角、 $0.3 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 光谱范围内,对比研究了圆锥形、抛物线形和正弦形结构蛾眼阵列的减反性能,表明圆锥形结构蛾眼结构透过率最高,且高

度是影响蛾眼阵列透过率的主要几何参数。当蛾眼高度在 $0.6\ \mu\text{m}$ 以上时,底面半径的影响可以忽略。其次,提出以圆柱形和圆锥形进行组合的复合结构,利用圆柱结构在疏排分布下对太阳光入射角敏感度较低的特性,设计由上部圆柱和下部圆台构成的复合结构,进一步降低了蛾眼阵列对太阳光入射角的敏感性,优化后蛾眼阵列的透过率较普通 PET 薄膜提高了 12.77%,可有效提升光伏电池对太阳光的吸收效率。

参考文献:

- [1] 朱炳杰, 杨希祥, 麻震宇, 等. 平流层飞艇太阳电池系统产能分析[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(1): 14-18.
Zhu Bingjie, Yang Xixiang, Ma Zhenyu, et al. Power analysis of stratospheric airship's solar array system[J]. J. of National University of Defense Technol., 2019, 41(1): 14-18.
- [2] 赵 达, 刘东旭, 孙康文, 等. 平流层飞艇研制现状、技术难点及发展趋势[J]. 航空学报, 2016, 37(1): 45-56.
Zhao Da, Liu Dongxu, Sun Kangwen, et al. Research status, technical difficulties and development trend of stratospheric airship[J]. Acta Aeronauticae Astronautica Sinica, 2016, 37(1): 45-56.
- [3] 王 寅, 胡文韬. 太阳能飞机太阳电池组阵设计方法研究[J]. 电源技术, 2018, 42(7): 1061-1063.
Wang Yin, Hu Wentao. A method of designing solar array for solar-powered aircraft[J]. Chinese J. of Power Sources, 2018, 42(7): 1061-1063.
- [4] Clapham P B, Hutley M C. Reduction of lens reflexion by the "Moth Eye" principle[J]. Nature, 1973, 244: 281-282.
- [5] Wang S, Yu X Z, Fan H T. Simple lithographic approach for subwavelength structure antireflection [J]. Appl. Phys. Lett., 2007, 91: 061105.
- [6] Boden S A, Bagnall D M. Tunable reflection minima of nanostructured antireflective surface[J]. Appl. Phys. Lett., 2008, 93: 133108.
- [7] 夏国栋, 李云飞, 翟玉玲, 等. 变截面微通道散热器流动和传热特性[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(2): 287-292.
Xia Guodong, Li Yunfei, Zhai Yuling, et al. Fluid flow and

- [7] Tsui K H, Lin Q F, Chou H T, et al. Low-cost, flexible and self-cleaning 3D nanocone anti-reflection films for high-efficiency photovoltaics[J]. Adv. Mater., 2014, 26: 2805-2811.
- [8] Li X H, Li P C, Ji L, et al. Subwavelength nanostructures integrated with polymer-packaged III-V solar cells for omnidirectional, broad-spectrum improvement of photovoltaic performance[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2015, 23: 1398-1405.
- [9] Kuo W K, Hsu J J, Nien C K. Moth-eye-inspired biophotonic surfaces with antireflective and hydrophobic characteristics [J]. ACS Appl. Mater. & Interfaces, 2016, 8: 32021-32030.
- [10] Choi B K, Park S H, Song Y M, et al. Nano-tailoring the surface structure for the monolithic high-performance antireflection polymer film [J]. Adv. Mater., 2010, 22: 3713-3718.
- [11] Leem J W, Kim S, Lee S H, et al. Efficiency enhancement of organic solar cells using hydrophobic antireflective inverted moth-eye nanopatterned PDMS films [J]. Adv. Energy Mater., 2014, 4: 1301315.
- [12] Asadollahbaik A, Boden S A, Charlton M D B, et al. Reflectance properties of silicon moth-eyes in response to variations in angle of incidence, polarisation and azimuth orientation[J]. Opt. Express, 2014, 22(S2): A402-A415.
- [13] Solano M, Faryad M, Hall A S, et al. Optimization of the absorption efficiency of an amorphous-silicon thin-film tandem solar cell backed by a metallic surface-relief grating [J]. Appl. Optics, 2013, 52(5): 966-979.
- [14] Li P C, Yu E T. Large-area omnidirectional antireflection coating on low-index materials[J]. J. of The Optical Society of America B, 2013, 30(10): 2584-2588.

作者简介:

刘晓光(1990—),男,博士研究生,主要从事光伏系统设计与应用方面的研究。

E-mail: graduatexg@163.com

heat transfer on microchannel heat sink with changeable cross-sections[J]. J. of Beijing University of Technol., 2015, 41(2): 287-292.

- [8] Wang Y B, Kai Z, Zhuo C, et al. Effects of the location of the inlet and outlet on heat transfer performance in pin fin CPU heat sink[J]. Appl. Thermal Eng., 2019, 151: 506-513.

作者简介:

范贤光(1980—),男,福建福州人,博士,教授,主要从事光电信息与检测技术研究。

E-mail: fanxg@xmu.edu.cn

(上接第 236 页)

- [5] Naphon P, Klangchart S. Effects of outlet port positions on the jet impingement heat transfer characteristics in the mini-fin heat sink[J]. Int. Commun. Heat Mass Transf., 2011, 38(10): 1400-1405.
- [6] Tang S, Zhao Y H, Diao Y H, et al. Effects of various inlet/outlet positions and header forms on flow distribution and thermal performance in microchannel heat sink[J]. Microsyst. Technol., 2018, 24(5): 2485-2497.

p 型 GaN 上 Pd/NiO/Al/Ni 反射电极欧姆接触的热稳定性研究

左秉鑫^{1,2}, 曾昭烜², 李祈昕², 李叶林², 刘宁炆², 赵 维², 陈志涛², 李云平³

(1. 中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083;

2. 广东省半导体产业技术研究院, 广州 510650; 3. 中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083)

摘要: 研究了 p 型 GaN 上 Pd/NiO/Al/Ni 反射电极欧姆接触的比接触电阻率、热稳定性, 以及光学反射率。与传统 Pd/Al/Ni 电极相比, Pd/NiO/Al/Ni 电极的欧姆接触在氮气环境中经 300 °C 下热处理 10 min 后, 仍保持低比接触电阻率(小于 $5 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$)和高反射率(大于 80% @365 nm)。研究获得的优化 Pd/NiO 层厚度为 1 nm/2 nm, 此时的 Pd/NiO/Al/Ni 反射电极既能形成良好的欧姆接触, 拥有低比接触电阻率, 又能减少对紫外光的吸收, 保持高反射率。研究表明适当的 NiO 层厚度能够有效地防止热处理过程中上层 Al 金属向 p-GaN 表面层的渗入, 对于制备高质量的 Al 基反射电极至关重要。

关键词: GaN; 电极材料; 欧姆接触; 热稳定性; 倒装紫外 LED 芯片

中图分类号: TN312.8 **文章编号:** 1001-5868(2020)02-0242-05

Study on Thermal Stability of Ohmic Contact of Pd/NiO/Al/Ni Reflective Electrode on p-GaN

ZUO Bingxin^{1,2}, ZENG Zhaohui², LI Qixin², LI Yelin²,

LIU Ningyang², ZHAO Wei², CHEN Zhitao², LI Yunping³

(1. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, CHN;

2. Guangdong Semiconductor Industry Technology Research Institute, Guangzhou 510650, CHN;

3. State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, CHN)

Abstract: The specific contact resistance, thermal stability and optical reflectivity of the ohmic contact on p-GaN of Pd/NiO/Al/Ni reflective electrode were investigated. Compared with the traditional Pd/Al/Ni electrode, the ohmic contact of Pd/NiO/Al/Ni electrode keeps low specific contact resistance ($< 5 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$) and high reflectivity ($> 80\% @ 365 \text{ nm}$) after annealing at 300 °C for 10 minutes in nitrogen environment. The optimized Pd/NiO layer thickness is 1 nm/2 nm. Under such conditions, the Pd/NiO/Al/Ni reflective electrode can not only form good ohmic contact, but also have low specific contact resistance, reduce the absorption of UV light and maintain high reflectivity. The results show that the appropriate thickness of NiO layer can effectively prevent the infiltration of the upper layer of Al metal into the surface layer of p-GaN during annealing, which is very important for the preparation of high-quality Al-based reflective electrode.

Key words: GaN; electrode materials; ohmic contact; thermal stability; flip-chip ultraviolet light-emitting diodes

收稿日期: 2019-12-21.

基金项目: 广州珠江科技新星项目支持项目 (201806010087).

0 引言

AlGaIn基紫外LED作为一种高效、节能、环保的固态光源,在取代传统汞灯方面具有巨大的潜力^[1]。近几年来基于三族氮化物(III-Nitride)宽禁带半导体材料的紫外发光二极管(UV LED)被应用于杀菌、净水、医疗诊断、光疗和紫外光固化等诸多领域^[2-4]。然而,相比于成熟的蓝光、绿光LED,紫外LED仍普遍面临着外量子效率低、工作电压高,以及热稳定和长期可靠性差等严峻挑战,限制了其大规模应用^[5-7]。倒装芯片技术是实现高效率紫外LED的有效途径,其关键技术在于制备高质量p型接触反射电极。关于p-GaN欧姆接触反射电极,已有多种方案报道,如Ni/Au^[8],Ni/Ag^[9],Mo/Ag/Au^[10],Ti/Ag/Pt^[11],Rh^[12]等。金属Al是一种良好的反射镜材料,在紫外波长范围均具有高的反射率^[13],但是由于其低功函数,不能与p-GaN形成良好欧姆接触。为此,Cho等人^[14]报道了使用Pd/Al作为反射电极,其在305 nm波长处的反射率高达82%。Jang等人^[15]的研究表明,PdGa合金的形成有利于提高热稳定性和降低比接触电阻率。然而,Pd/Al体系的热稳定性仍较差,欧姆接触十分容易被破坏。原因可能是上层低功函数金属Al在热处理过程中穿过Pd层,渗入进p-GaN中破坏了接触^[16]。Pan等人^[17]报道了一种改进的方案,采用Pd/NiO/Al/Ti/Au作为p-GaN的欧姆接触反射电极,他们的研究显示薄层NiO对紫外光有较高的透过率,对反射电极整体的反射率影响较小,且可以作为扩散阻挡层使反射电极在200℃下仍具有较好的热稳定性。尽管如此,受限于沉积NiO材料质量以及各层厚度配比,Pan等人采用的反射电极的比接触电阻率只有 $3.3 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}^2$,反射率则为75% @370 nm,离器件的产业化应用要求仍有较大的差距。而且,由于反射电极的后续高质量介质膜生长工艺要求的生长温度超过250℃,因此,进一步探索其在更高温度下的热稳定性是很有必要的。本文报道了一种先通过热氧化形成NiO,然后优化Pd/NiO层厚度,再沉积金属Al制备Pd/NiO/Al/Ni反射电极的改进方案,研究表明制备获得的Pd/NiO/Al/Ni反射电极在氮气环境下经过300℃热处理10 min后,依然能保持 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 量级的比接触电阻率,且在365 nm波长处具有大于80%的反射率。

1 实验

本文中使用的紫外LED外延晶圆是采用金属有机化学气相沉积法(MOCVD)生长的。三甲基镓(TMGa)、三甲基铝(TMAI)、三甲基铟(TMIn)和氨(NH₃)分别用作Ga,Al,In和N的来源,氮气和氢气被用作载气。外延结构由低温AlN缓冲层、2 μm厚的未掺杂Al_{0.05}Ga_{0.95}N层、3 μm厚的Si掺杂Al_{0.05}Ga_{0.95}N层($1.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)、10个周期的In_{0.02}Ga_{0.98}N(7 nm)/Al_{0.15}Ga_{0.85}N(20 nm)多量子阱(MQW)、20 nm厚的Mg掺杂Al_{0.3}Ga_{0.7}N电子阻挡层(EBL)以及110 nm厚的Mg掺杂Al_{0.05}Ga_{0.95}N层组成,然后是20 nm厚的Mg掺杂p-GaN接触层(Hall测试结果显示空穴浓度约为 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)。本研究制备了5组样品进行比较,其中第一组样品作为参考基准,采用电子束蒸发台(DE TECHNOLOGY LIMITED DE400 E-BEAM)在p-GaN上依次沉积Pd/Al/Ni,其他组样品均采用Pd/NiO/Al/Ni作为反射电极。为了实现Pd/NiO/Al/Ni,首先在p-GaN样品上通过电子束蒸发沉积Pd/Ni,然后在快速退火炉(Premtek RTP-CT 150M)氧气环境中400℃下氧化10 min(氧气流量为5 ml/min)形成Pd/NiO合金,最后再沉积反射层Al和保护层Ni。各组样品依次编号为0#,1#,2#,3#和4#,其反射电极结构参数如表1所示。本研究使用Agilent B2901A精密型电源测量I-V特性,用圆环型传输线模型(CTLTM)法获得比接触电阻率。此外,在快速退火炉中氮气环境下对这些样品进行热处理,用以模拟芯片制备后续加工的高温条件,研究其在200和300℃下的热稳定性。在光学反射率测量中,金属薄膜被沉积在石英玻璃基底上,并用紫外-可见分光光度计(Lambda 950)进行测量。

表1 各组样品的反射电极结构参数(单位:nm)

样品	0#	1#	2#	3#	4#
Pd	5	2	2	2	1
NiO	0	4	3	2	2
Al	200	200	200	200	200
Ni	2	2	2	2	2

2 结果与分析

本文使用圆环型传输线模型获得欧姆接触的比接触电阻率,在圆环两边通恒定电流I,测得相应的

电压 V 并计算得到电阻 R_{tot} 。 R_{tot} 满足下式^[18]：

$$R_{tot} = \frac{R_s}{2\pi} \left[\ln\left(\frac{r_n}{r_o}\right) + L_T \left(\frac{1}{r_n} + \frac{1}{r_o} \right) \right] \quad (1)$$

式中, r_o 、 r_n 分别表示内圆和外圆半径, L_T 为传输线长度, R_s 为方块电阻。可从直线拟合中得到 R_s 和 L_T , 再由 $\rho_c = R_s \cdot L_T^2$ 求得比接触电阻率 ρ_c 。本文图中的 $I-V$ 曲线均基于传输线最大的内圆和外圆半径间距 $35 \mu\text{m}$ 测试得到。

各组样品退火前测试的 $I-V$ 特性曲线如图 1 所示, 从图中可以看出, NiO 层的引入是很有必要的, 其对比接触电阻率存在影响。图 2 中示出了各组样品的光学反射率 R 测试结果, 波长范围是 $300 \sim 500 \text{ nm}$ 。由 1#、2# 和 3# 样品的反射率测试结果可以看出, 拥有较薄 NiO 层样品的反射率更高。同样, 由 3# 和 4# 样品的反射率比较可知, Pd 层较薄的样品反射率更高, 而且 Pd 层厚度对反射率的影响比 NiO 层厚度的影响更大, 这说明 NiO 比 Pd 更透明。所以, 要提高电极反射率, 就要使用更薄的 Pd 层, 减少电极对紫外光的吸收, 这与一般文献中报道的结果一致。但由于 Pd 层作为接触层, 其过薄会使电极接触电阻增加, 降低接触的电学性能。因此, Pd 层需要控制在一个合适的厚度, 使得电极

既具有高的反射率又能保持低的比接触电阻。通过研究发现, Pd 层厚度保持在 1 nm 左右是比较合适的, 在波长 365 nm 处, Pd(1 nm)/NiO(2 nm)/Al/Ni 反射电极显示出较高的光学反射率(大于 80%)。

图 3 为各组样品在 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 氮气环境退火 5 min 后测试的 $I-V$ 特性曲线。由图 1 可知, 0# 样品 Pd/Al/Ni 在退火前测试的 $I-V$ 特性曲线为直线, 说明电极与 p-GaN 之间形成了良好的欧姆接触; 但是经 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 退火 5 min 后, 测得的 $I-V$ 特性曲线由直线变为曲线, 说明接触退化严重, 变为非欧姆接触; 而其余组样品在 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 退火前后都能保持良好的欧姆接触, 这说明 NiO 层对样品的热稳定性有显著影响。各组样品在 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 退火前后的比接触电阻率如表 2 所示。由 0# 和 2# 样品的 $I-V$ 特性测试结果可以看出, NiO 层不仅能保护接触不发生退化, 而且随着退火温度的升高, 还可以保持其低比接触电阻率。相反, 随着退火温度的升高, 没有 NiO 层的接触会严重退化。加入 NiO 阻挡层后样品的热稳定性明显提高, 这可能是由于 NiO 在热退火过程中能有效阻挡上层金属对 p-GaN 的渗入, 防止其破坏接触。

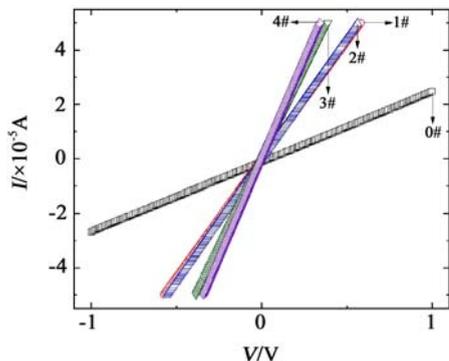


图 1 样品退火前的 $I-V$ 特性曲线

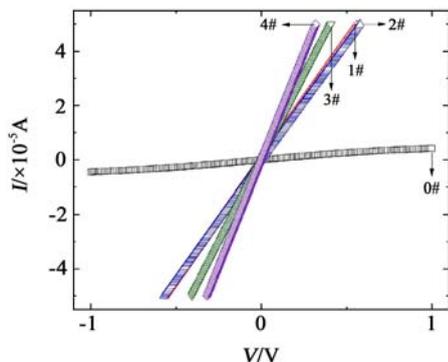


图 3 样品在 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 氮气环境退火 5 min 后的 $I-V$ 特性曲线

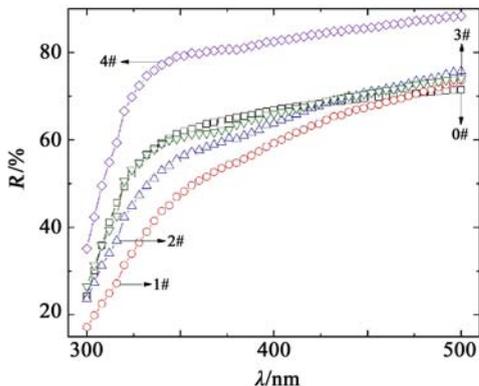


图 2 石英玻璃基底上样品的反射率

表 2 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 退火前后的比接触电阻率(单位: $\Omega \cdot \text{cm}^2$)

状态	0#	1#	2#	3#	4#
退火前	5.56×10^{-4}	1.47×10^{-4}	1.11×10^{-4}	1.45×10^{-3}	5.96×10^{-3}
退火后	—	2.24×10^{-4}	2.54×10^{-4}	2.69×10^{-3}	8.86×10^{-3}

为了进一步研究 NiO 层对反射电极欧姆接触热稳定性的影响, 对各组样品在 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 氮气环境下热退火 10 min 并进行了 $I-V$ 特性测试, 结果如图 4 所示, 计算出的比接触电阻率如表 3 所示。由以上测试结果可以看出, 除 0# 样品外, 其余各组样品在 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 氮气环境中, 热退火前后都能保持较好的欧姆接触。但是当退火温度升高至 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 只有 3# 和 4# 样品依然能保持欧姆接触, 其余样品则全

部变为非欧姆接触。

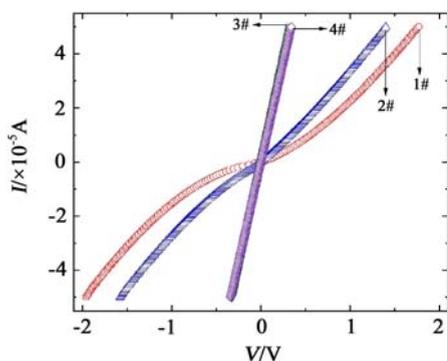


图4 样品在300 °C氮气环境下退火10 min后的I-V曲线

表3 3#和4#样品300 °C退火后的比接触电阻率(单位: $\Omega \cdot \text{cm}^2$)

工艺	0#	1#	2#	3#	4#
退火后	—	—	—	2.35×10^{-4}	5.00×10^{-4}

图4的结果非常有意义,它表明温度升高至300 °C时Pd/NiO中较薄的NiO层仍可以保护接触的电学性能不退化,是一种很好的扩散阻挡层材料。但是,较厚的NiO层(3和4 nm)反而无法起到扩散阻挡层的作用,无法让反射电极保持欧姆接触。在将Ni氧化成NiO的工艺中,使用的温度为400 °C,之后继续沉积Al/Ni,刚沉积完的反射电极为欧姆接触,所以可以排除高温下Ni扩散导致欧姆接触被破坏。根据实验结果和分析,提出了一种可能的模型,即当Ni层过厚(大于2 nm)时,在氧化成为NiO后仍有一定的金属Ni没有转化为NiO,残留的Ni可能成为上层金属的扩散通道。具体地,当热处理温度较低(200 °C)时,上层金属的扩散动力不足,NiO层中残留的Ni仍具有一定的阻挡能力,能阻挡上层金属向下扩散;但当温度过高(300 °C)时,上层金属的扩散动力增加,过剩残留的Ni无法阻挡上层金属的扩散,反而成为上层金属渗入的扩散通道,如图5所示。

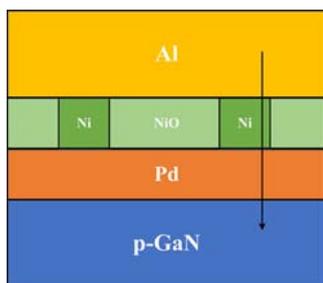


图5 高温环境下Ni成为上层金属扩散通道示意图

为了验证这种猜想,又制备了新的样品Pd

(2 nm)/Ni(2 nm)/Al/Ni,并测试了其在氮气环境200和300 °C下热退火前后的I-V特性曲线,如图6所示。结果显示,经过200 °C退火5 min后,样品Pd(2 nm)/Ni(2 nm)/Al/Ni能保持较为良好的欧姆接触,说明此温度下Ni层能起到一定阻挡上层金属扩散的作用。但经过300 °C退火5 min后,该样品则无法继续保持欧姆接触,说明Ni层在300 °C下无法有效阻挡上层金属对金属Pd以及p-GaN的渗入。该试验结果与我们的猜想较为一致,在一定程度上验证了Ni辅助的金属扩散模型的可能性,即在高温下(300 °C),Ni无法起到有效阻挡作用,反而会成为上层金属扩散通道。更详细的机理有待进一步深入研究。

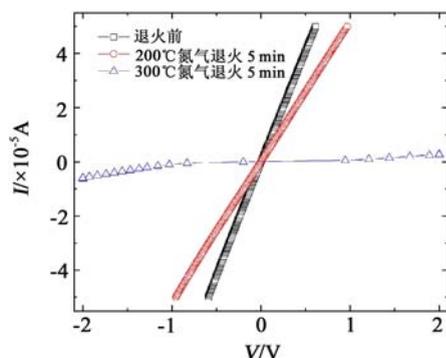


图6 样品Pd(2 nm)/Ni(2 nm)/Al/Ni在200和300 °C下退火前后的I-V特性曲线

为了探究优化厚度条件下Pd(1 nm)/NiO(2 nm)/Al/Ni反射电极的欧姆接触在更严苛条件下的热稳定性,又对4#样品分别在400,450和500 °C氮气环境下退火20 min,退火后的I-V特性曲线如图7所示。从图中可以看出,4#样品经过400 °C退火20 min后仍能保持欧姆接触,但其比接触电阻率大幅增加($1.05 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}^2$);当温度达到450 °C时,I-V特性曲线由直线变得略微弯曲,

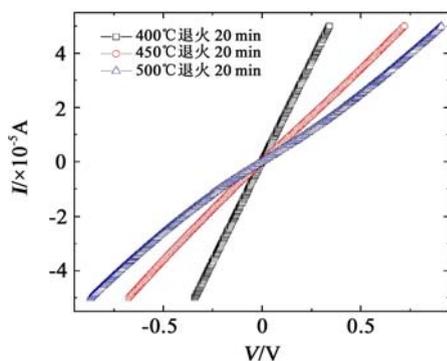


图7 4#样品在400、450和500 °C下氮气环境退火后的I-V特性曲线

说明欧姆接触开始被破坏;而当温度升高至 500 °C 时, I - V 特性曲线完全变得弯曲,说明欧姆接触已经被破坏。这一结果表明, Pd(1 nm)/NiO(2 nm)/Al/Ni 电极接触在 400 °C 退火 20 min 后依然保持欧姆接触,具有良好的热稳定性。

3 结论

本文研究了在 p-GaN 上具有更高热稳定性和反射率的 Pd/NiO/Al/Ni 欧姆接触反射电极。试验获得的反射电极中 Pd 的最佳厚度为 1 nm, NiO 的最佳厚度为 2 nm, Pd(1 nm)/NiO(2 nm)/Al/Ni 电极在 300 °C 氮气环境下热处理 10 min 后,比接触电阻率保持在 $5 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 以下,在 365 nm 波长处的光学反射率大于 80%,且在 400 °C 氮气环境下退火 20 min 后依然能保持欧姆接触。结果表明,通过沉积 Ni 再热氧化形成的 NiO 对于形成高质量的 Pd/NiO/Al/Ni 反射电极具有重要作用, NiO 具有阻止上层金属 Al 扩散的阻挡作用。此外,当 Ni 厚度大于 2 nm 时,反射电极的热稳定性反而变差,这可能是由于氧化工艺中残留过剩的金属 Ni,在 300 °C 高温下容易形成 Ni 辅助的金属 Al 扩散通道,破坏欧姆接触。

参考文献:

- [1] Kneissl M, Kolbe T, Chua C, et al. Advances in group III-nitride-based deep UV light-emitting diode technology [J]. *Semiconductor Science and Technol.*, 2010, 26(1): 014036.
 - [2] Khan M A. AlGaIn multiple quantum well based deep UV LEDs and their applications[J]. *Physica Status Solidi (A)*, 2006, 203(7): 1764-1770.
 - [3] Endrueit A, Johnson M S, Long A C. Curing of composite components by ultraviolet radiation; A review [J]. *Polymer Composites*, 2006, 27(2): 119-128.
 - [4] Kneissl M, Rass J. III-nitride ultraviolet emitters; Technology and applications[J]. *Springer Series in Materials Science*, 2016, 227: 415-434.
 - [5] Shatalov M, Sun W, Lunev A, et al. 278 nm deep ultraviolet LEDs with 11% external quantum efficiency[C]// *IEEE 2012 70th Annual Device Research Conf. (DRC)*, 2012: 6257013.
 - [6] Ichikawa M, Fujioka A, Kosugi T, et al. High-output-power deep ultraviolet light-emitting diode assembly using direct bonding[J]. *Appl. Phys. Express*, 2016, 9(7): 072101.
 - [7] Kashima Y, Maeda N, Matsuura E, et al. High external quantum efficiency (10%) AlGaIn-based deep-ultraviolet light-emitting diodes achieved by using highly reflective photonic crystal on p-AlGaIn contact layer[J]. *Appl. Phys. Express*, 2018, 11(1): 012101.
 - [8] Kim T, Yoo M C, Kim T. Cr/Ni/Au ohmic contacts to the moderately doped p- and n-GaN[J]. *MRS Proc.*, 1996, 449: 1061.
 - [9] Jang H W, Lee J L. Mechanism for ohmic contact formation of Ni/Ag contacts on p-type GaN[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 85(24): 5920.
 - [10] Jeng M J, Shiue C C, Chang L B. The reflectivity of Mo/Ag/Au ohmic contacts on p-type GaN for flip-chip light-emitting diode (FCLED) applications [J]. *Appl. Surface Science*, 2008, 254(15): 4479-4482.
 - [11] Oh M, Jeong S, Gil Y, et al. Highly reflective Ti/Ag/Pt contacts to p-GaN for high-efficiency GaN-based light-emitting diodes[J]. *Jap. J. of Appl. Phys.*, 2015, 54(2): 02BB01.
 - [12] Takano T, Mino T, Sakai J, et al. Deep-ultraviolet light-emitting diodes with external quantum efficiency higher than 20% at 275 nm achieved by improving light-extraction efficiency[J]. *Appl. Phys. Express*, 2017, 10(3): 031002.
 - [13] Edwards J D. Reflecting surfaces of aluminum[J]. *J. of the Society of Motion Picture Engineers*, 2015, 24(2): 126-132.
 - [14] Cho H K, Ostermay I, Zeimer U, et al. Highly reflective p-contacts made of Pd-Al on deep ultraviolet light-emitting diodes[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2017, 29(24): 2222-2225.
 - [15] Jang H W, Kim K H, Kim J K, et al. Low-resistance and thermally stable ohmic contact on p-type GaN using Pd/Ni metallization[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, 79(12): 1822-1824.
 - [16] Chen G T, Pan C C, Fang C S, et al. High-reflectivity Pd/Ni/Al/Ti/Au ohmic contacts to p-type GaN for ultraviolet light-emitting diodes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 85(14): 2797.
 - [17] Pan C C, Chen G T, Hsu W J, et al. Thermal stability improvement by using Pd/NiO/Al/Ti/Au reflective ohmic contacts to p-GaN for flip-chip ultraviolet light-emitting diodes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 88(6): 062113.
 - [18] 李鸿渐, 石 瑛. 测量计算金属-半导体接触电阻率的方法 [J]. *半导体技术*, 2008, 33(2): 155-159.
- Li Hongjian, Shi Ying. Measurement and calculation of specific contact resistance in metal-semiconductor contacts [J]. *Semiconductor Technol.*, 2008, 33(2): 155-159.

作者简介:

左秉鑫(1993—),男,湖南省长沙市人,硕士研究生,主要从事半导体器件结构设计及制备工艺的研究。

E-mail: ningyangliu@gdisit.com

面向毫克级仿昆虫扑翼微飞行器的力-力矩传感器

孟 冉^{1,2}, 张卫平¹, 王晨阳^{1,2}, 周 岁^{1,2}, 魏铭辰^{1,2}

(上海交通大学 1. 微米/纳米加工技术重点实验室;

2. 电子信息与电气工程学院微纳电子学系, 上海 200240)

摘要: 毫克尺度微型仿生飞行器基于柔性高频翅拍运动的升力机制, 具有柔性大变形、振动非线性、多自由度力-力矩耦合等特征, 其有效升力/力矩范围处于 $\text{mN}/(\mu\text{N}\cdot\text{m})$ 量级, 通用力传感器较难准确测定力学参数, 进而给微型仿生飞行器设计与控制带来一定的困难。文章提出了一种面向微型扑翼飞行器的新型力-力矩传感器, 它可以在固定约束条件下实现微飞行器高频扑翼运动产生的升力和力矩的测量, 为扑翼飞行器控制力和力矩解耦研究提供精度较高的数据。该传感器采用对称式多悬臂梁柔顺机构将升力/力矩转化为微小形变, 结合高带宽、高精度电容位移测量装置, 可以采集高频振动条件下的微小升力/力矩。基于梁理论进行了传感器力学建模, 并结合有限元仿真验证了原理的可行性。对被测对象微型仿生扑翼飞行器的主要测量参数范围开展结构与工艺设计, 实验结果显示, 该传感器的升力测量范围为 $-10\sim 10\text{ mN}$, 力矩测量范围为 $-20\sim 20\ \mu\text{N}\cdot\text{m}$, 特征频率为 1 kHz , 升力和力矩的灵敏度分别为 0.01 mN 和 $0.01\ \mu\text{N}\cdot\text{m}$, 经验证, 对整机重量在 $80\sim 250\text{ mg}$ 、工作频率在 $1\sim 200\text{ Hz}$ 范围的微型扑翼飞行器具有较强的适用性。

关键词: 扑翼飞行器; 力矩传感器; 力传感器; 可变形结构

中图分类号: TP212 **文章编号:** 1001-5868(2020)02-0247-05

Lift-Torque Sensor Applied for Insect-Inspired Flapping-Wing Micro Air Vehicle

MENG Ran^{1,2}, ZHANG Weiping¹, WANG Chenyang^{1,2}, ZHOU Sui^{1,2}, WEI Mingchen^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Micro/Nano Fabrication;

2. Department of Micro/Nano Electronics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, CHN)

Abstract: Due to high-frequency flapping motion, the insect-inspired flapping-wing micro air vehicles (FMAV) present the characteristics of flexible and large deformation, nonlinearity vibration, force-torque coupling, etc. The lift force and torque generated by IFMAV is about mN and $\mu\text{N}\cdot\text{m}$ respectively, but it is difficult to accurately test small force and torque, which brings challenges for the structure design and control of the FMAV. In this paper, a novel force-torque sensor for the IFMAV is presented, which can measure the high-frequency lift force and torque generated by the IFMAV under fixed constraints. The lift-torque sensor is designed to use a symmetrical multi-cantilever compliant mechanism to convert lift force/torque into a small deformation. Combined with a high-bandwidth, high-precision capacitive displacement measuring device, it can collect data of lift force/torque under high-frequency vibration conditions. In this paper, the sensor mechanics modeling is based on the beam theory, and it is verified by finite element simulation. The structure is designed and processed based on the main parameters of the

收稿日期: 2019-10-29.

基金项目: 上海市科委项目(19511104202, 19DZ2291103);

教育部基金项目(6141A02022607, 6141A02022627);

预研基金项目(1816311ZT005020, 301020803, 17070

107).

IFMAV. Experimental test indicate that such features as the lift measurement range of $-10\sim 10\text{ mN}$, torque measurement range of $-20\sim$

$20 \mu\text{N} \cdot \text{m}$, characteristic frequency of 1 kHz, and the sensitivity of lift and torque of 0.01 mN and $0.01 \mu\text{N} \cdot \text{m}$ respectively, were obtained. This sensor meets the test requirements of IFMAV which weights between 80~250 mg and works in the range of 1~200 Hz frequency.

Key words: IFMAV; torque sensor; force sensor; deformable structures

0 引言

目前国内外在仿生扑翼微飞行器的研究上取得了许多突破性的成果,哈佛大学、上海交通大学等分别研制了压电、电磁驱动的毫克级仿昆扑翼飞行器^[1-4]。这类飞行器所产生的升力约为 $0.8 \sim 1.2 \text{ mN}$,力矩约为 $1 \sim 10 \mu\text{N} \cdot \text{m}$ 。除了升力与力矩微小之外,这些飞行器还具有自重小、系统工作频率高、运动非线性程度高等特点。当前对于微小尺度飞行器的研究瓶颈主要是缺乏高精度传感器以实现飞行器微力和微力矩的准确测量。

对于毫克级别的微型飞行器来说,力矩范围在几微牛米量级。目前比较成熟、高精度的商业传感器是由 ATI 公司研发的 Nano 17 六轴力矩传感器,其测量范围可达 $120 \text{ mN} \cdot \text{m}$,精度约 $16 \mu\text{N} \cdot \text{m}$,该精度不能满足飞行器力矩的测量范围要求。

Beyeler 等人在 2009 年提出了一种六轴 MEMS 传感器结构,配合 7 个电容位移传感器检测,可同时测量 x, y, z 轴的旋转和偏转,量程范围可达 $1\,000 \mu\text{N} \cdot \text{m}$ 和 $2\,600 \text{ nN} \cdot \text{m}$ 。MEMS 技术虽然有良好的精度,但是由于其量程范围过小,并不适合毫克级微飞行器。2009 年,哈佛大学 Wood 等^[6-7]研制了双轴的力传感器来测量飞行器产生的升力变化,并于 2012 年设计了十字形的变形结构来测量飞行器各个方向的力矩,但是该方式无法同时测量力和力矩的大小,而且测量时更换传感器的过程较为繁琐。本文在参考国内外力-力矩传感器设计的基础之上,设计了一种基于悬臂梁模型、呈十字形分布、可变形的力-力矩传感器结构,通过变形梁在受力、力矩方向上的形变,配合高精度电容位移探头测量飞行器在敏感方向上产生的力和力矩,从而为飞行器的悬飞控制提供必要的的数据准备。同时通过特性试验测试验证了该传感器的灵敏度、稳定性和可靠性,结果表明均能满足毫克级仿昆扑翼飞行器的测试要求。

1 传感器原理分析

本文所设计的力-力矩传感器由四个悬臂梁构

成对称式平行柔顺机构,其特点是力学模型线性度高、端部平面只产生平移运动,保证输出位移的位移精度和位置精度。悬臂梁分布呈对称十字形结构,连接处采用如图 1 所示细节展示的结构来等效铰链连接,传感器末端的两个圆板为传感器输出板,两个输出板分别配合两个高精度电容位移探头,将输出板的位移变化转换为电信号读取出来。

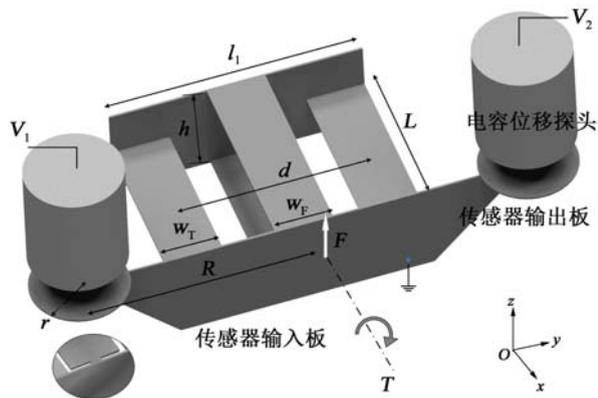


图 1 传感器模型图

升力测试时,将被测飞行器固定在传感器输入板上(置于四个悬臂梁板的中心处),传感器的四个悬臂梁板分别受力产生相同的形变,从而带动输出板与固定的高精度电容位移探头间的距离变化,两个探头所检测的距离变化的平均值即为升力作用下产生的形变位移。飞行器力矩测试时,传感器上的四个悬臂梁板受十字形的扭矩作用,带动两个输出板产生扭转位移,两个电容探头检测的差值即为扭矩作用下产生的位移变化量。

当传感器同时受到力和力矩的作用时,经过力学分析,由于悬臂梁板采用铰链的方式连接,在力矩的作用下,板面的扭转角度远小于传感器输入板受力矩作用扭转的角度,所以可以忽略不计,因此力和力矩的同时作用可以近似等效为所产生的形变位移是分别受力和力矩作用下的向量叠加量。

2 传感器设计与仿真

2.1 传感器设计

力-力矩传感器用于对系统全重为 80~250 mg

的仿昆虫扑翼微飞行器的力与力矩进行测量,该类飞行器的升力范围为 0.5~5 mN,三个自由度的力矩范围为 1~10 $\mu\text{N}\cdot\text{m}$,工作频率在 120 Hz 以内,为防止飞行器与传感器产生共振,传感器特征频率至少应比飞行器工作频率高 4 倍。此外,输出位移进一步被高精度电容传感器采集并转换为电信号参数,此类传感器可测范围为 50 μm ,分辨率为 1 nm。

根据上述分析,得到参数关系如下:

$$\begin{cases} 0 \leq |\delta_{\max}| \leq \frac{50}{2} \times 10^{-6} \\ 0 \leq |2\theta_{\max}R| \leq \frac{50}{2} \times 10^{-6} \\ f_1 \geq 480 \\ f_2 \geq 480 \end{cases} \quad (1)$$

其中, δ_{\max} 为最大升力下产生的变形量, θ_{\max} 为最大扭矩下产生的扭转角, f_1 为测力模式下的共振频率, f_2 为测力矩模式下的共振频率。

根据上一节原理分析,设定传感器的输入板为刚性体,在升力 F 的作用下,四个悬臂梁板在受力作用下弯曲应力相等,故产生形变量相等,因此可以求得传感器升力刚度:

$$k_m = \frac{Et^3(\omega_F + \omega_T)}{2L^3} \quad (2)$$

为避免传感器由于工作在共振频率下导致测试非线性,故根据等效能量法计算传感器绕 y 向弯曲模式下的共振频率为

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_m}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E(t^3\omega_2 + t\omega_1^3)}{2L^3\rho(2\omega_1t + 2\omega_2t + 2R(h + \omega_1))}} \quad (3)$$

其中, m 为传感器的总质量。

当传感器在检测力矩作用下,十字形分布的上下两个悬臂梁用于防止输出板不发生显著的面外飘曲,影响输出测量点处的位移精度和极板间的平行度。在扭矩 T 作用下,呈十字形对称分布的四个悬臂梁板均受到扭矩 T 的作用,由于传感器的输入板为刚性模型,四个悬臂梁板在受扭矩 T 的作用后扭转角度相同,计算可得扭转刚度为

$$k_\theta = \frac{Eht(\omega_T t^2 d + \omega_F^3 h)}{8L^3} \quad (4)$$

同样地,该系统的共振频率^[8]为

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_\theta}{J}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Eht(\omega_T t^2 d + \omega_F^3 h)}{8L^3(2J_T + 2J_F + J_{\text{out}})}} \quad (5)$$

其中, J 为飞行器和传感器的转动惯量之和。

根据上述方程模型与前述理论分析,选择合理参数如表 1。

表 1 传感器材料属性及设计参数

参数	值
殷钢弹性模量 E/GPa	141
殷钢密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	8 100
泊松比 ν	0.29
传感器形变板长 L/mm	10
传感器形变板厚 $t/\mu\text{m}$	150
中间形变板宽 ω_F/mm	6
左右形变板宽 ω_T/mm	4
中间形变板间距 h/mm	5
左右形变板间距 d/mm	10
传感器探头距中线 R/mm	10

2.2 仿真分析

为了验证理论模型的准确性,本文采用 COMSOL 进行了有限元仿真,分别分析了测力模式和测力矩模式下该力-力矩传感器的共振位移模式与共振频率,并测定相应模式下的系统刚度。图 2 所示为力-力矩传感器的有限元模型,结构与材料参数见表 1,模型采用 17 600 个四面体网格,背板固定,在输入板处添加刚体约束,并在其中心点添加力与力矩载荷,采集两侧输出板中心位置的位移,见图 3。

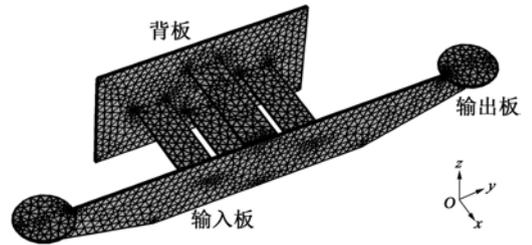


图 2 力-力矩传感器有限元模型

通过对图 3 所示有限元模型的分析可知,在传感器分别加载力和力矩载荷时,传感器仿真刚度均呈线性变换,验证了该模型的有效性。经验证,有限元模型分析的梁结构升力刚度为 8.438 1 mN/ μm ,力矩刚度为 17.230 7 ($\mu\text{N}\cdot\text{m}$)/ μm ,且在同时受力和力矩作用时,原力和力矩刚度几乎不受影响。

为验证传感器的工作频率范围,通过在输入板上施加谐波力并测量整个激励频率范围内的目标位移来确定频率响应,如图 4。经过仿真计算,该传感器在绕 y 向弯曲模式和 x 向扭转模式下的共振频率分别为 1 194.3 和 2 457 Hz,与静力学模型计算结

果相近,可以满足仿昆扑翼微飞行器的测试要求。

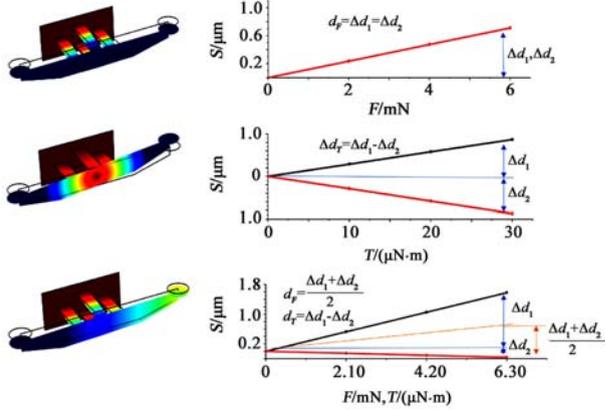


图3 力-力矩传感器外载作用下的变形位移

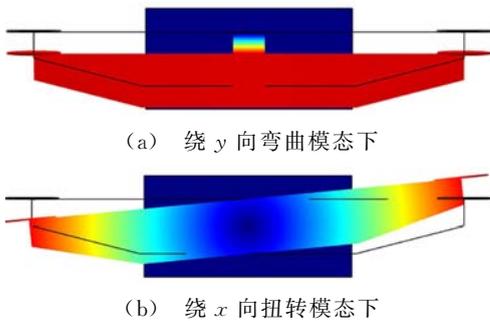


图4 力-力矩传感器在不同模式下的共振频率分析

3 传感器加工与测试

3.1 传感器加工

该十字形传感器由殷钢合金平板通过紫外激光加工而成,将厚度为 $150\ \mu\text{m}$ 的殷钢薄板按照如图 5 (a)所示的图纸切割,然后折叠装配成三维立体结构。值得注意的是,在固定板表面贴覆石英膜,从而进一步加固输入板表面的刚度。将传感器固定在亚克力板上,亚克力板通过螺栓和五自由度移动平台相固定。

传感器设计加工完成后,选择合适的电容位移探头测量十字形梁的尖端位移。电容位移探头为无接触式,检测接地的十字梁传感器电容极板和固定的电容位移探头间的位移变化。每个电容位移探头

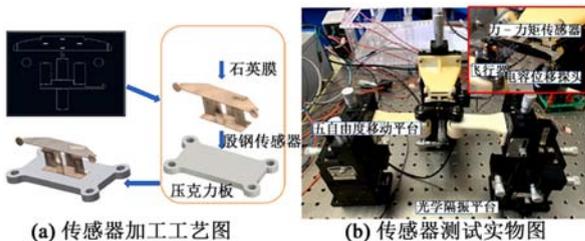


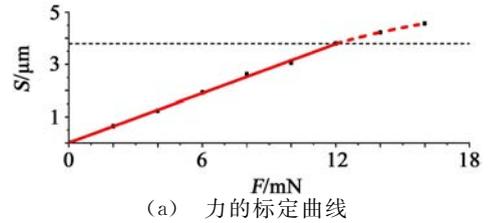
图5 传感器加工工艺及测试实验图

都安装在五自由度移动平台上,可以实现电容位移探头与目标板的精确对准。最终搭建的测试平台实物如图 5(b)所示。

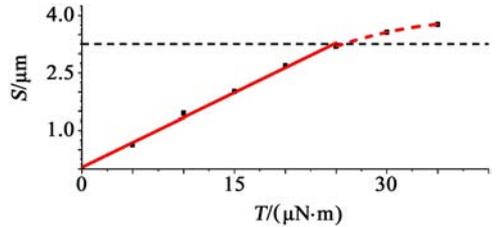
3.2 传感器性能测试

3.2.1 力-力矩传感器标定测试

对力-力矩传感器进行升力标定实验,将砝码挂在传感器标定板中线上,标定数据通过最小二乘法进行线性拟合,得到图 6 所示传感器实测数据与拟合曲线,经过换算分析可得传感器升力刚度为 $3.1613\ \text{mN}/\mu\text{m}$,拟合度为 0.99681 ;力矩刚度为 $7.5177\ (\mu\text{N}\cdot\text{m})/\mu\text{m}$,拟合度为 0.99857 。图 6 中虚线以上部分为非线性标定部分,故可知传感器的测力范围为 $-10\sim 10\ \text{mN}$,力矩测量范围为 $-20\sim 20\ \mu\text{N}\cdot\text{m}$ 。



(a) 力的标定曲线



(b) 力矩的标定曲线

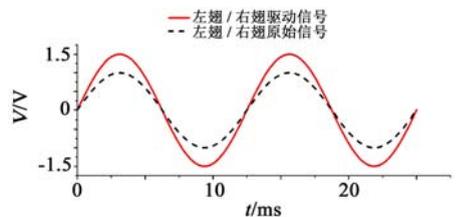
图6 力和力矩标定曲线

3.2.2 仿昆扑翼微飞行器的力和力矩测试

经过扫频实验得出,力-力矩传感器空载的频率为 $1.2\ \text{kHz}$,而传感器带载飞行器的频率约为 $1\ \text{kHz}$,可以满足整机重量在 $80\sim 250\ \text{mg}$ 、工作频率在 $1\sim 200\ \text{Hz}$ 的微型扑翼飞行器的测试要求。

除共振实验外,对仿昆扑翼微飞行器进行了升力和翻滚力矩的测试,具体数据如图 7 所示。

仿生扑翼微飞行器的升力和翻滚力矩(Roll)定义方向如图8所示,将微型飞行器固定在传感器输



(a) 左右翅膀升力驱动信号图

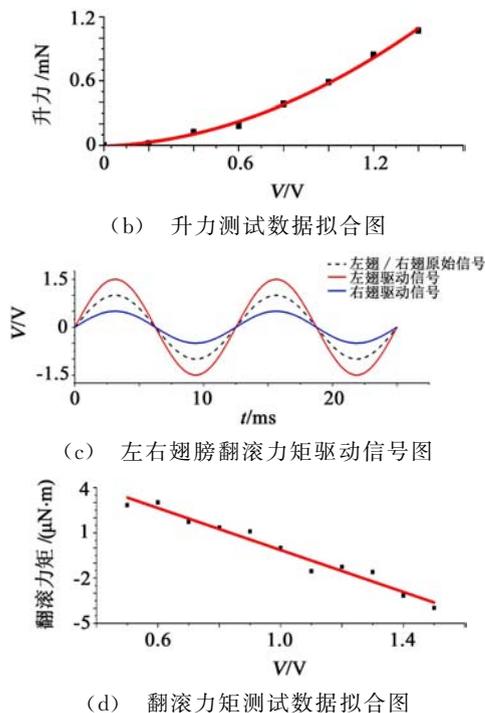


图7 仿昆虫扑翼微飞行器升力和力矩测试

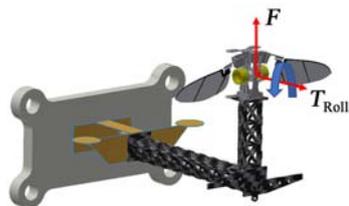


图8 仿昆虫扑翼微飞行器测试模型图

入板上,对飞行器采用不同的驱动信号幅值驱动,收集两端的电容极板位移数据,将二者数据平均后乘以标定刚度即为升力值,将二者差值通过力矩标定刚度可换算为翻滚力矩值,建立从驱动信号幅值变化到升力和翻滚力矩变化的映射关系(见图7)。

4 总结与展望

本文提出了一种面向仿生扑翼微飞行器的定制化力-力矩传感器,采用悬臂梁模型并呈十字形对称分布的平行柔顺机构、高精度激光切割、焊接、高压覆膜工艺加工,配合电容位移传感器、五自由度可移动台和光学隔振平台,搭建了一套完整的毫克级飞行器升力-力矩测试系统,经过标定、扫频等系列特性实验,验证了该传感器达到设计要求,并对飞行

器的升力和翻滚力矩进行了测试实验检验。经验证,该传感器的升力测试精度可达 0.01 mN ,力矩测试精度为 $0.01 \mu\text{N} \cdot \text{m}$;升力灵敏度为 $3.1613 \text{ mN}/\mu\text{m}$,力矩灵敏度为 $7.5177 (\mu\text{N} \cdot \text{m})/\mu\text{m}$,量程范围可满足 $80 \sim 250 \text{ mg}$ 飞行器的力和力矩测量要求,为飞行器在力和力矩的解耦控制研究提供有效的数据支撑。

参考文献:

- [1] Ma K Y, Felton S M, Wood R J. Design, fabrication, and modeling of the split actuator microrobotic bee[C]// IEEE/RSJ Inter. Conf. on Intelligent Robots & Systems, 2012: 6386192.
 - [2] Zou Y, Zhang W, Ke X, et al. The design and microfabrication of a sub 100 mg insect-scale flapping-wing robot[J]. Micro & Nano Lett., 2017, 12(5): 297-300.
 - [3] Zou Y, Zhang W, Zhang Z. Liftoff of an electromagnetically driven insect-inspired flapping-wing robot[J]. IEEE Trans. on Robotics, 2016: 1-5.
 - [4] Zhou S, Zhang W, Zou Y, et al. Piezoelectric driven insect-inspired robot with flapping wings capable of skating on the water[J]. Electron. Lett., 2017, 53(9): 579-580.
 - [5] Beyeler F, Muntwyler S, Nelson B J. A six-axis MEMS force-torque sensor with micro-newton and nano-newtonmeter resolution[J]. J. of Microelectromechanical Systems, 2009, 18(2): 433-441.
 - [6] Wood R J, Cho K J, Hoffman K. A novel multi-axis force sensor for microrobotics applications[J]. Smart Materials and Structures, 2009, 18(12): 125002.
 - [7] Finio B M, Galloway K C, Wood R J. An ultra-high precision, high bandwidth torque sensor for microrobotics applications[C]// Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ Inter. Conf. on, 2011: 6094420.
 - [8] 高德亮, 范振华. 扭矩传感器原理及应用[J]. 科技传播, 2012(1): 99-107.
- Gao Deliang, Fan Zhenhua. The principle and application of torque sensor [J]. Science and Technology Communication, 2012(1): 99-107.

作者简介:

孟冉(1994—),女,山西晋中人,硕士生,主要从事仿昆虫扑翼微飞行器的测试系统研究;

张卫平(1971—),男,山东青岛人,博士,教授,主要从事微机电系统和仿生机器人相关技术研究。

E-mail: zwp37@163.com

二硫化钼-石墨烯垂直异质结的制备与表征

顾杰, 颜元凯, 万茜

(江南大学 物联网工程学院 电子工程系, 江苏 无锡 214122)

摘要: 以采用化学气相沉积法(CVD)生长的单层石墨烯为导电电极、四硫代钼酸铵水溶液为电解质,通过电化学沉积法合成了二硫化钼/石墨烯($\text{MoS}_2/\text{graphene}$)垂直异质结。将合成的 $\text{MoS}_2/\text{graphene}$ 垂直异质结通过CVD在氢气(H_2)和氩气(Ar)环境下进行退火处理。利用拉曼光谱、X射线衍射仪(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)、原子力显微镜(AFM)系统地分析了样品的物质成分、表面形貌和厚度等。这种简单、环保、低成本的制备大面积 $\text{MoS}_2/\text{graphene}$ 垂直异质结的方法具有普遍适用性,为其他垂直异质结的制备开辟了新途径。

关键词: 范德瓦尔斯力; 四硫代钼酸铵; 电化学沉积; 拉曼光谱; 原子力显微镜

中图分类号: TB383.2 **文章编号:** 1001-5868(2020)02-0252-05

Preparation and Characterization of Graphene-Molybdenum Disulfide Vertical Heterojunction

GU Jie, YAN Yuankai, WAN Xi

(Department of Electronic Engineering, Internet of Things Engineering Institute, Jiangnan University, Wuxi 214122, CHN)

Abstract: By using the monolayer graphene grown by chemical vapor deposition (CVD) as the conductive electrode and ammonium tetrathiomolybdate aqueous solution as the electrolyte, the vertical heterojunctions of molybdenum disulfide-graphene ($\text{MoS}_2/\text{graphene}$) were synthesized by electrochemical deposition method. The synthesized $\text{MoS}_2/\text{graphene}$ vertical heterojunction was annealed by chemical vapor deposition(CVD) system under the hydrogen and argon atmosphere. The Raman spectroscopy (Raman), X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscope (SEM), and atomic force microscope (AFM) were used to systematically analyze the material composition, surface morphology, and thickness of the resulting $\text{MoS}_2/\text{graphene}$ vertical heterojunctions. This simple, environment-friendly, and low-cost method for synthesizing large-area $\text{MoS}_2/\text{graphene}$ vertical heterojunctions has universal applicability, which opens a new way for the synthesis of other vertical heterojunctions.

Key words: Van der Waals force; ammonium tetrathiomolybdate; electrochemical deposition; Raman spectroscopy; atomic force microscopy

0 引言

2004年,曼彻斯特大学的Novoslov等人^[1]首

次采用机械剥离法分离出石墨烯。石墨烯的发现开创了二维层状半导体材料科学的新纪元。二维层状半导体材料具有原子级厚度、较高的载流子迁移率、良好的透光性等优异的物理特性^[2-5],在当今的半导体工业中,扮演着越来越重要的角色。二维半导体材料的层状特性以及各种材料之间较低的晶格失配,为人工构建异质结提供了有利的前提。如何低成本可控制备大尺寸平面异质结与垂直异质结成为人们研究的热点。

收稿日期:2019-12-16.

基金项目:国家自然科学基金青年项目(61804067);江苏省自然科学基金青年项目(BK20170193);江苏省“双创博士”资助项目(1256010241180240);江苏省“六大人才高峰”资助项目-第十五批(DZXX-021);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JUSRP11746,JUSRP51726B);江南大学新进人员科研启动基金项目(1255210322161270,111222333).

平面异质结是由不同二维层状材料通过共价键在同一平无缝连接合成的,化学气相沉积法(CVD)是合成平面异质结的主要方法^[6-7]。而垂直异质结是通过两种材料上下层之间的范德瓦尔斯力作用而形成的^[8-9]。垂直异质结由机械剥离的材料通过人工转移合成,由于样品的尺寸和厚度难以满足实际应用需求,因此如何大面积可控制备二维层状半导体材料及其垂直异质结成为主要问题。

电化学沉积法制备 MoS₂/graphene 垂直异质结主要分为两步:第一步采用 CVD 法生长高质量单层石墨烯,并转移至 300 nm 的 SiO₂/Si 衬底上;第二步将 SiO₂/Si 衬底上的石墨烯作为导电电极,在安全环保的四硫代钼酸铵溶液中电镀 MoS₂/graphene 垂直异质结,然后在氢气和氩气环境下进行退火处理,得到高质量、洁净的 MoS₂/graphene 垂直异质结。

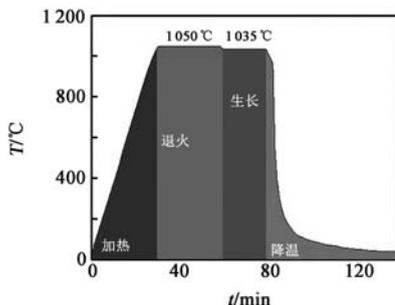
1 实验

1.1 石墨烯的生长

首先将铜箔进行电化学抛光处理,以去除铜箔表面的杂质和有机物,提高其平整度。电化学抛光溶液为磷酸(500 ml)、无水乙醇(500 ml)、异丙醇(100 ml)、尿素(10 g)和水(1 000 ml)的混合溶液。使用 10 V 恒压电源,阳极接铜箔,阴极接碳棒,阳极电压为 6 V,抛光时间 60 s,抛光结束后将铜箔放入去离子水中清洗干净,并用氮气吹干^[10]。采用 CVD 法生长石墨烯,以甲烷为碳源、25 μm 厚铜箔(99.8%, Alfa Aesar)为基底。将处理后的铜箔放在石英舟上,推入石英管内,生长装置如图 1(a)。



(a) 生长装置示意图



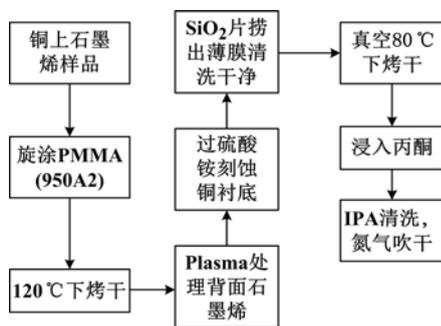
(b) 温度-时间曲线

图1 石墨烯生长实验装置和生长温度-时间关系曲线

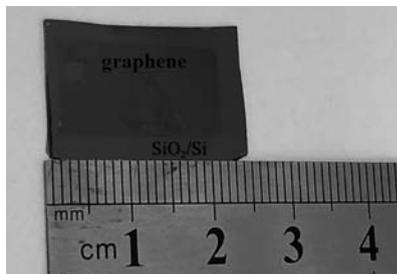
生长过程主要分为四步:第一步,在 30 min 内加热石英管至 1 050 °C;第二步,在 1 050 °C 下维持 30 min,通入氢气对铜箔进行退火处理,铜箔接近熔融状态,铜箔表面晶粒尺寸得到有效提高;第三步,降温至 1 035 °C,通入甲烷气体,甲烷在铜催化作用下,在铜箔表面脱氢形成石墨烯,生长温度与退火温度保持 10 °C 左右温度差,以更好地生长石墨烯,生长过程保持 15 min;第四步,生长结束后冷却至室温,拿出样品,石墨烯生长过程的温度与时间关系如图 1(b) 所示。

1.2 石墨烯的转移

常用的石墨烯转移方法主要是湿法转移^[11],转移流程如图 2(a) 所示,首先将生长完毕的石墨烯/铜箔样品旋涂聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),在 120 °C 下加热 10 min 使 PMMA 成膜。其次用氧气等离子体将铜箔反面的石墨烯清理干净,放入 0.5 mol 过硫酸铵溶液中刻蚀铜衬底;刻蚀完毕后,将 PMMA/石墨烯薄膜放入去离子水中洗涤干净;然后用 SiO₂/Si 片将 PMMA/石墨烯薄膜捞出,放入真空烤箱中在 80 °C 下烘干水分;最后放入丙酮中将 PMMA 溶解干净,再放入异丙醇(IPA)中清洗,然后用氮气吹干。转移后的石墨烯样品照片如图 2(b) 所示。



(a) 湿法转移方法流程图



(b) SiO₂/Si 衬底上石墨烯照片

图2 湿法转移方法流程和 SiO₂/Si 上石墨烯照片

1.3 电化学法制备 MoS₂/Graphene 垂直异质结

将转移至 300 nm SiO₂/Si 衬底的石墨烯作为导

电电极,接入电化学工作站的阳极;将碳棒或者另一片石墨烯接入电化学工作站的阴极。将这两个电极同时浸入四硫代钼酸铵水溶液中,保持 2 cm 左右间距,电化学沉积装置示意图如图 3(a)所示。

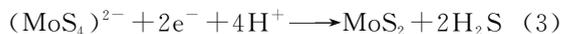
四硫代钼酸铵溶液是安全环保的水溶液^[12]。在电化学沉积过程中,浸入溶液的石墨烯面积保持在 1 cm^2 左右,外部电路的总电阻(R_{tot})如下^[12]:

$$R_{\text{tot}} \equiv V/I = R_{\text{bath}} + R_{\text{c1}} + R_{\text{c2}} \quad (1)$$

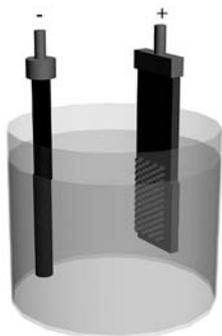
其中, I 和 V 分别是外电路的外加电流和电压, R_{bath} 是与电解质浓度等相关的电阻, R_{c1} 和 R_{c2} 分别是石墨烯电极和碳棒电极的接触电阻,其主要由电极的构造(包括有效反应区域、石墨烯片的初始质量和电极之间的距离)决定,因此 R_{tot} 不断变化。使用上海辰华仪器有限公司的 CHI-660E 电化学工作站,可以保持电流恒定不变,避免不可控变量的影响。确定电镀时间为 120 s,电流密度为 $100\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$,四硫代钼酸铵溶液浓度为 $2\ \text{mg}/\text{ml}$ 。在阳极石墨烯表面,前驱体在水中电离出的四硫代钼酸根离子发生氧化反应沉积生成 MoS_3 和单质硫。反应过程如下^[12]:



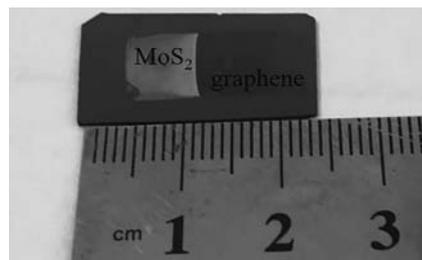
在阴极石墨烯表面,四硫代钼酸根离子发生还原反应直接沉积生成 MoS_2 和硫化氢气体,反应过程如下^[12]:



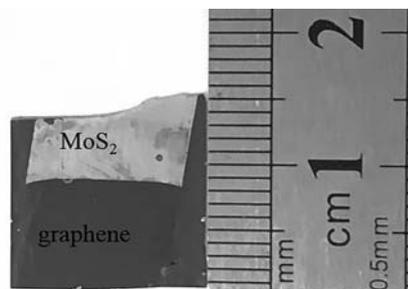
电镀结束后,将石墨烯从四硫代钼酸铵水溶液中捞出,放入异丙醇中清洗并用氮气吹干。然后,采用 CVD 工艺,在低压环境 ($30\sim 40\ \text{Pa}$) 下通入氢气和氩气在 $500\sim 800\ ^\circ\text{C}$ 下退火 1 h。将阳极沉积的 MoS_3 结晶还原成高质量的 MoS_2 。图 3(b)是退火处理后阳极石墨烯沉积的 $\text{MoS}_2/\text{graphene}$ 垂直异质结,图 3(c)是阴极石墨烯沉积的 $\text{MoS}_2/\text{graphene}$ 垂直异质结。



(a) 电化学沉积装置示意图



(b) 阳极 $\text{MoS}_2/\text{Graphene}$ 垂直异质结照片



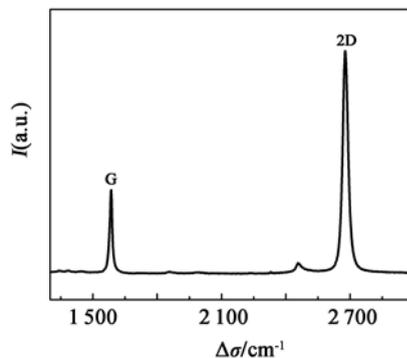
(c) 阴极 $\text{MoS}_2/\text{Graphene}$ 垂直异质结照片

图 3 电镀装置和 $\text{MoS}_2/\text{Graphene}$ 垂直异质结照片

2 表征结果与讨论

2.1 石墨烯质量分析

将转移至 SiO_2/Si 片上的石墨烯进行拉曼光谱 (Raman) 测量,得到拉曼测试结果如图 4(a)所示^[10],可以发现,在 $1580\ \text{cm}^{-1}$ 和 $2680\ \text{cm}^{-1}$ 处出现石墨烯的特征峰 G 峰和 2D 峰,2D 峰的强度是 G 峰的 2 倍,并且没有 $1350\ \text{cm}^{-1}$ 处的缺陷峰 D 峰,证明是高质量单层石墨烯^[13]。然后,用原子力显微镜 (AFM) 测量石墨烯的表面形貌和厚度,如图 4(b)所示,黑色圆圈代表石墨烯破损区域,测量其厚度大约为 $1\ \text{nm}$ ^[10]。表面粗糙度用均方根 (RMS) 表示,经过软件计算其 RMS 约为 $0.37\ \text{nm}$,比机械剥离的石墨烯 (约 $0.16\ \text{nm}$) 高,因为转移后的石墨烯表面残留 PMMA,石墨烯表现为疏水性,导致其表面更粗糙^[14]。



(a) 石墨烯拉曼光谱图

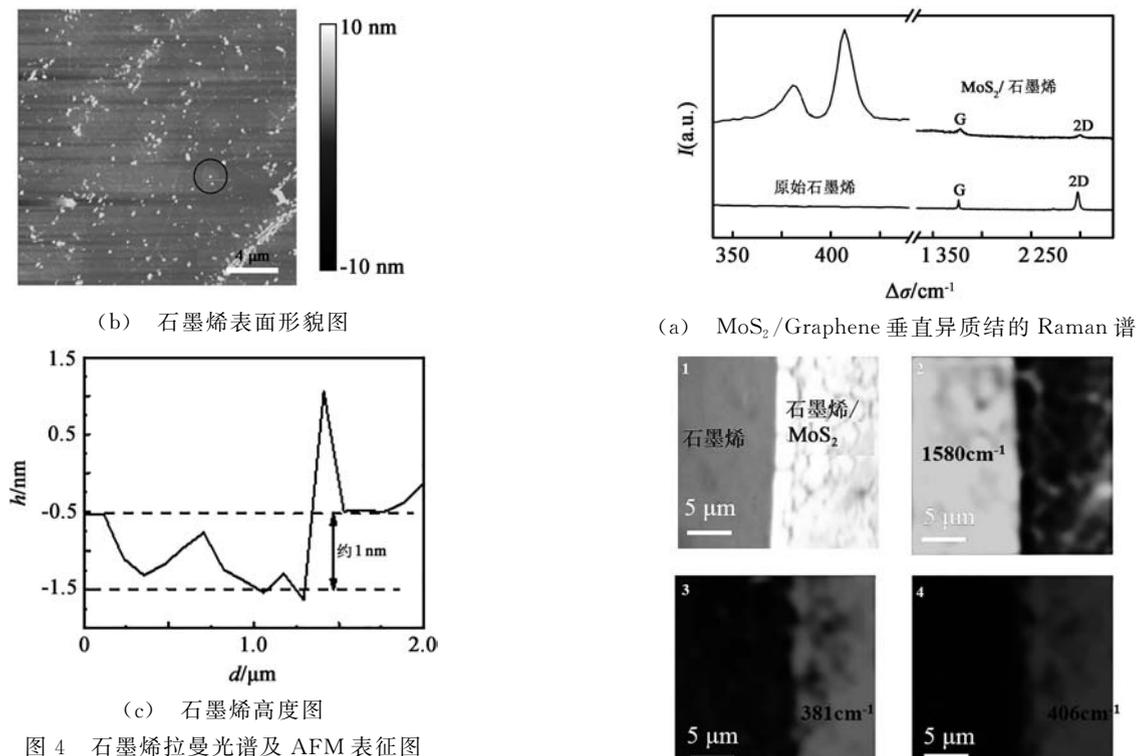
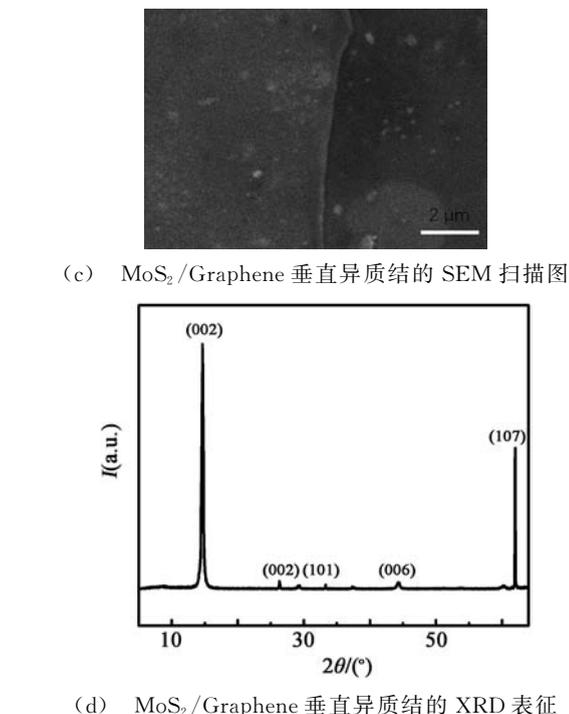


图4 石墨烯拉曼光谱及 AFM 表征图

2.2 MoS₂/Graphene 异质结的质量和成分分析

使用拉曼 (Raman) 光谱仪对 MoS₂/graphene 垂直异质结物质成分进行分析。测得的 MoS₂/graphene 垂直异质结拉曼光谱如图 5(a) 所示, 图中黑色曲线代表原始石墨烯的拉曼峰, 主要特征峰有 1 580 cm⁻¹ 处的 G 峰和 2 680 cm⁻¹ 处的 2D 峰。灰色曲线代表 MoS₂/graphene 垂直异质结的拉曼峰, 出现两个特征峰, 381 cm⁻¹ 处的峰较弱, 对应于 MoS₂ 的 E_{2g}¹ 模式, 406 cm⁻¹ 处出现强度较高的峰, 对应于 MoS₂ 的 A_{1g} 模式, 并且 MoS₂ 两个特征峰波数差为 25 cm⁻¹, 说明电镀的 MoS₂ 为多层^[15], 此外还有石墨烯的 G 峰和 2D 峰两个特征峰, 符合 MoS₂/graphene 垂直异质结的拉曼光谱。为了进一步分析异质结的物质成分分布, 对样品进行 Raman 强度的面扫描, 扫描区域约为 30 μm × 30 μm, 结果如图 5(b) 所示。图 5(b) 中 1 图为 MoS₂/graphene 垂直异质结的光学照片, 左边为石墨烯, 右边为 MoS₂/graphene 垂直异质结, 2 图是石墨烯 1 580 cm⁻¹ 处 G 峰的拉曼强度面扫描图, 左边强度高于右边, 因为右边石墨烯上覆盖一层 MoS₂, 信号强度低。3~4 图是 MoS₂ 在 381 cm⁻¹ 和 406 cm⁻¹ 处特征峰的拉曼强度面扫描图, 左边没有信号, 右边信号强。表明左边没有 MoS₂, 只有石墨烯, 右边是 MoS₂/graphene 垂直异质结。

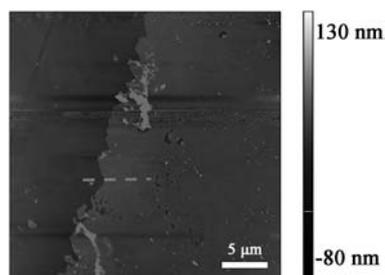
图5 MoS₂/Graphene 垂直异质结的质量和成分分析结果图5 MoS₂/Graphene 垂直异质结的质量和成分分析结果

通过扫描电子显微镜 (SEM) 对 MoS₂/graphene 垂直异质结进行表征, 结果如图 5(c) 所示; 由于石墨烯与 MoS₂ 电导率不同, 左右两边存在

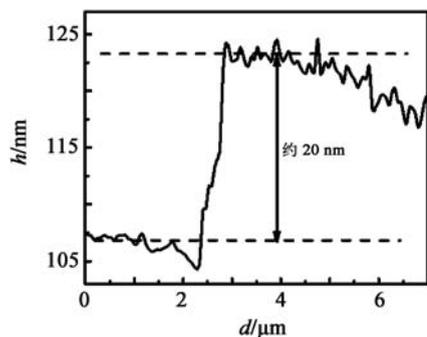
明显的颜色对比,与拉曼强度面扫描测得的结果相符合。通过 X 射线衍射仪(XRD)对异质结成分进行进一步分析,所得结果如图 5(d)所示,MoS₂的衍射峰分别为(002),(004),(101),(006)和(107)^[16],证明电镀的 MoS₂ 结晶程度较高,质量较好。

2.3 阴、阳极 MoS₂/Graphene 垂直异质结的对比

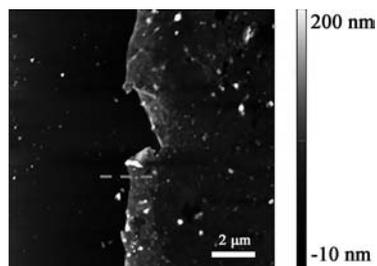
通过原子力显微镜(AFM)对阳极和阴极沉积的 MoS₂/graphene 垂直异质结的表面形貌和厚度进行分析,阳极 MoS₂/graphene 垂直异质结表面形貌如图 6(a)所示,右边区域为 MoS₂/graphene 垂直异质结。沿着(a)图中虚线测量 MoS₂/graphene 垂直异质结高度如图 6(b)所示,大约为 20 nm,其 RMS 值约为 4.57 nm。阴极 MoS₂/graphene 垂直异质结表面形貌如图 6(c)所示,沿着图 6(c)中虚线测量阴极 MoS₂/graphene 垂直异质结厚度如图 6(d)所示,大约为 95 nm,其 RMS 值约为 29.2 nm,在相同的参数下,阴极产生的 MoS₂/graphene 垂直异质结比阳极的更粗糙且更厚。



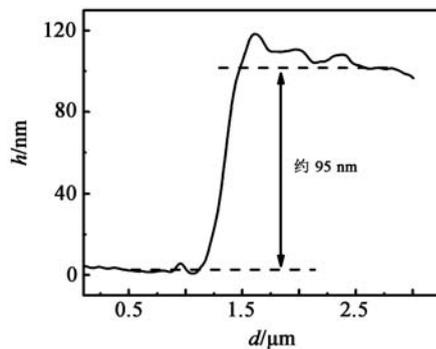
(a) 阳极 MoS₂/Graphene 垂直异质结表面形貌



(b) 阳极 MoS₂/Graphene 垂直异质结高度图



(c) 阴极 MoS₂/Graphene 垂直异质结表面形貌



(d) 阴极 MoS₂/Graphene 垂直异质结高度图

图 6 MoS₂/Graphene 的形貌和厚度分析图

3 结论

本文采用电化学沉积法,以 CVD 法生长的石墨烯为导电电极、四硫代钼酸铵水溶液为电解质溶液,合成了 MoS₂/graphene 垂直异质结。通过拉曼光谱仪和 X 射线衍射仪发现 MoS₂/graphene 垂直异质结具有较高的结晶度和质量。通过原子力显微镜发现阴极产生的 MoS₂/graphene 垂直异质结厚度明显大于阳极,但是阳极的 MoS₂/graphene 垂直异质结表面更加平滑。该方法为制备其他二维材料异质结乃至多结提供了一种新思路。

参考文献:

- [1] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. *Science*, 2004, 306 (5696): 666-669.
- [2] Novoselov K S, Fal'ko V I, Colombo L, et al. A roadmap for graphene[J]. *Nature*, 2012, 490(7419): 192-200.
- [3] Chhowalla M, Shin H S, Eda G, et al. The chemistry of two-dimensional layered transition metal dichalcogenide nanosheets [J]. *Nature Chem.*, 2013, 5(4): 263-275.
- [4] Wang Q H, Kalantar-Zadeh K, Kis A, et al. Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides[J]. *Nature Nanotechnol.*, 2012, 7(11): 699-712.
- [5] Franklin A D. Nanomaterials in transistors: From high-performance to thin-film applications[J]. *Science*, 2015, 349 (6249): 2750.
- [6] Gong Y, Lin J, Wang X, et al. Vertical and in-plane heterostructures from WS₂/MoS₂ monolayers [J]. *Nature Mater.*, 2014, 13(12): 1135-1142.
- [7] Lee C H, Lee G H, Van der Zande A M, et al. Atomically thin p-n junctions with Van der Waals heterointerfaces[J]. *Nature Nano.*, 2014, 9(9): 676-681.

(下转第 263 页)

基于 GPU 的分布式全息孔径数字成像技术研究

黄家应, 杨峰, 朱磊, 饶长辉

(中国科学院光电技术研究所, 成都 610200)

摘要: 分布式全息孔径数字成像技术是利用数字全息记录各子孔径的复振幅信息,通过孔径间相位拼接实现综合成像的一种主动成像技术。在远距离成像中,大气湍流引入的子孔径内高阶相位误差和子孔径间低阶相位误差,以及孔径间的位置失配误差,都会影响成像质量。随机并行梯度下降算法(SPGD)是一种无波前探测优化控制算法,具有可以并行、快速收敛、高效可靠等优点,可用于校正系统孔径内高阶和孔径间低阶相位误差。但是SPGD算法需要多次迭代,运算量巨大,难以满足实时性要求。文章基于GPU平台,对高、低阶相位误差校正进行了并行加速处理,运算速度较CPU平台分别提升26.42倍和36.47倍。此外,采用AKZAE算法校正各子孔径间的位置失配误差,完成了各子孔径复振幅的拼接,最终实现了分布式四孔径的综合成像。

关键词: 分布式孔径; 数字全息; 随机并行梯度下降算法; GPU并行加速

中图分类号: TN391.41 **文章编号:** 1001-5868(2020)02-0257-07

Research on Distributed Holographic Aperture Digital Imaging Technology Based on GPU

HUANG Jiaying, YANG Feng, ZHU Lei, RAO Changhui

(Institute of Optoelectronic Technology of the Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610200, CHN)

Abstract: Distributed holographic aperture digital imaging technology is an active imaging technology that uses digital holography to record the complex amplitude information of each sub-aperture, and realizes comprehensive imaging through phase stitching between apertures. In long-distance imaging, the high-order phase error in the subaperture introduced by atmospheric turbulence, the low-order phase error between the subapertures, and the position mismatch error between the apertures will affect the imaging quality. Stochastic parallel gradient descent (SPGD) is an optimal control algorithm without wavefront detection. With the advantages of parallelism, fast convergence, high efficiency and reliability, it can be used to correct high-order and low-cost phase errors within the aperture of the system. However, the SPGD algorithm requires multiple iterations and a huge amount of calculations, which is difficult to meet the real-time requirements. In this paper, parallel acceleration processing was performed based on the GPU platform for both high and low-order phase error correction, and the operation speed is 26.42 and 36.47 times higher than the CPU platform, respectively. In addition, the AKZAE algorithm was used to correct the position mismatch error between the sub-apertures and complete the splicing of the complex amplitudes of the sub-apertures, Finally, distributed four-aperture comprehensive imaging was realized.

Key words: distributed aperture; digital holography; random parallel gradient descent algorithm; GPU parallel acceleration

0 引言

对目标的高分辨率成像技术在空间科学和军事应用上都有十分重要的意义。对于一个衍射极限的望远镜系统,其角分辨率 θ 与口径 D 成反比^[1]。口径 D 越大,分辨率越高。但由于制造技术、费用、支撑结构等原因,单口径望远镜很难做大。分布式孔径成像利用多个小孔径来等效单个大孔径,通过相位拼接获得与单个大孔径相当的成像分辨率。它是一种像面干涉成像的方式,要求孔径间共相误差控制在 $\lambda/10$ 以内, λ 是成像波长。

分布式孔径成像有光学共相和数字共相两种相位拼接方式。光学共相需要大量的中继光学器件,系统复杂,容易受到外界扰动的影响。数字共相先记录各子孔径光束的波前复振幅,再通过数值的方式优化实现多孔径复振幅的共相综合,最终得到高分辨图像。相比传统光学共相,数字共相有着结构简单、体积小、易共形、稳定性好等优点。

在数字共相中,子孔径复振幅的记录有多种方法。其中分布式全息孔径数字成像技术^[2]是利用数字全息技术记录各子孔径的复振幅信息,通过孔径间的相位拼接实现综合成像的一种主动成像技术^[4],能够在低照度、背景复杂的条件下获取远距离目标的高分辨率图像^[5-6]。

大气湍流以及系统装配误差等各种环境因素,会带来孔径内高阶、孔径间低阶相位误差以及孔径间位置失配误差等。针对高阶、低阶相位误差,采用随机并行梯度下降 (SPGD) 算法^[7]校正,但 SPGD 算法需要多次迭代,计算量巨大,很难满足成像系统的实时性要求。本文基于 GPU 平台,对成像系统中最耗时的 SPGD 算法进行并行加速优化。此外,针对孔径间位置失配误差,利用 AKAZE 算法^[8]提取各子孔径图像的特征点,基于这些特征点实现孔径间空间位置的配准。最终基于 GPU 平台实现了分布式四孔径综合成像。

1 基本原理

1.1 分布式全息孔径数字成像系统

分布式全息孔径数字成像系统结构如图 1 所示。激光经过分光器分成两路,一路作为照明光,另一路作为参考光,目标回波与参考光在相机表面干涉,得到各孔径数字全息图。数据处理流程如图 2 所示,图中只列举了两个孔径,多个孔径原理相同。

主要分为四个步骤:

- (1)从各子孔径全息图 H_1, H_2 中提取物光复振幅 A_{10}, A_{20} ;
- (2)校正各子孔径内高阶相位误差,得到校正后的复振幅 A_{11}, A_{21} ;
- (3)由复振幅成像,得到 I_1 和 I_2 ,选取 I_2 为基准,对 I_1 匹配,得到仿射矩阵 T ,再用 T 校正复振幅 A_{11} ,得到 A_{12} ;
- (4)拼接复振幅,并以 A_{21} 为基准,校正 A_{12} 低阶相位误差,得到高分辨图像。

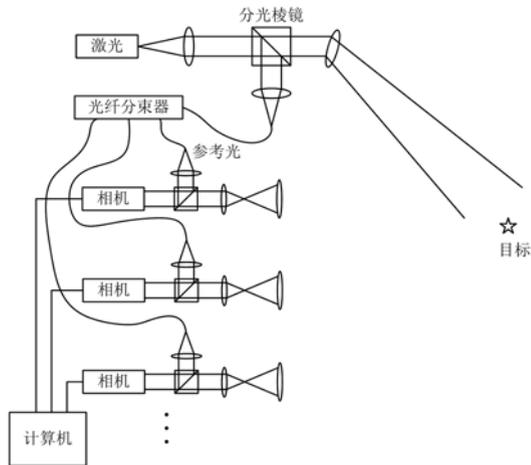


图 1 分布式全息孔径数字成像系统结构图

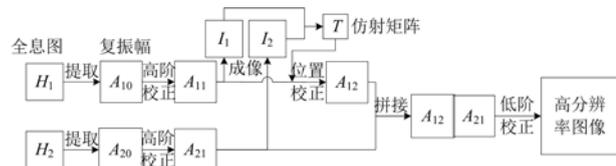


图 2 分布式全息孔径数字成像系统数据处理流程图

1.2 单孔径内复振幅提取

实验采用离轴数字全息^[9]记录复振幅,如图 3 所示,参考光与目标回波光在相机表面干涉形成全息图。探测器得到全息图为

$$I_k(x, y) = | a_k(x, y) + r(x, y) |^2 \quad (1)$$

其中, $a_k(x, y)$ 为第 k 个孔径的物光, $r(x, y)$ 为参考光。提取复振幅流程如图 4 所示。首先对 $I_k(x, y)$ 进行傅里叶变换 (FT):

$$\begin{aligned} \mathcal{F}\{I_k(x, y)\} &= \mathcal{F}\{| a_k(x, y) + r(x, y) |^2\} = \\ &R(\hat{a}_k(u, v)) + \hat{a}_k(u - u_0, v - v_0) + \\ &R(\hat{r}(u, v)) + \hat{a}_k^*(u + u_0, v + v_0) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $\hat{a}_k(u, v), \hat{r}(u, v)$ 分别为物光、参考光的傅里叶变换, $\hat{a}_k^*(u, v)$ 为物光傅里叶变换的共轭。

设参考光、物光到相机的入射角分别为 θ_1 和

θ_2, λ 为激光波长, d_{pa} 为探测器像素间距。根据采样定理及离轴全息再现像分离条件, 该夹角需满足以下条件:

$$\begin{cases} \theta_1 \gg 3\theta_2 \\ \theta_1 + \theta_2 \leq \lambda/2d_{pd} \end{cases} \quad (3)$$

然后从频谱中滤出 $\hat{a}_k(u-u_0, v-v_0)$ 部分, 再进行傅里叶逆变换 (IFT) 即可得到物光复振幅 $a_k(x, y)$ 。

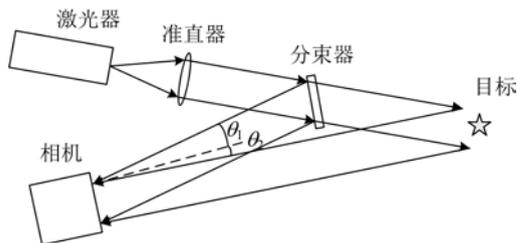


图3 数字离轴全息成像模型

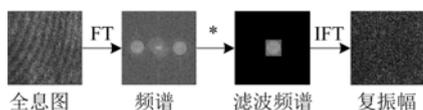


图4 提取复振幅流程图

对复振幅进行菲涅尔衍射, 即可恢复目标图像, 菲涅尔衍射公式的傅里叶变换形式为

$$E(x, y) = -\frac{ie^{ikz}}{\lambda z} e^{\frac{ik(x^2+y^2)}{2z}} \mathcal{F}\left\{E_0(x_1, y_1) e^{\frac{ik(x_1^2+y_1^2)}{2z}}\right\} \quad (4)$$

1.3 高阶、低阶相位误差校正

远距离目标成像中由于大气湍流、系统装配误差等会引入 Zernike 高阶、低阶相位误差, 可等效为在瞳面引入相应的相位误差。可使用 SPGD 算法^[7]校正, 算法流程如图 5 所示。

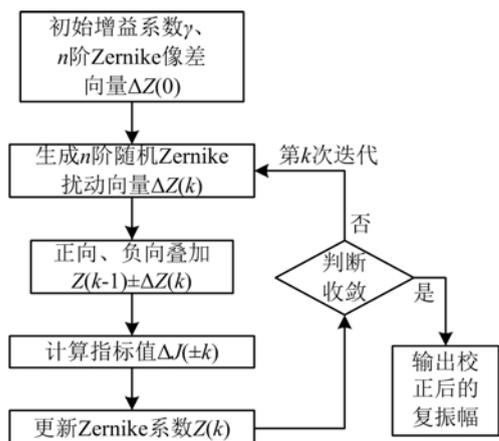


图5 SPGD算法流程图

选取图像的清晰度函数^[10]作为指标值, 添加随机 Zernike 扰动, 以迭代的方式在梯度下降的方向寻找最优解。

SPGD 校正高阶、低阶相位误差时采用的随机扰动分别为 Zernike 多项式除前三阶外的其余几项。

1.4 孔径间位置失配误差校正

系统装配等误差使得子孔径空间位置与设计不匹配, 即孔径间存在旋转、平移、缩放误差。

如式(4)所示, 菲涅尔衍射本质上是一次傅里叶变换。由傅里叶变换的旋转、相移、尺度变换特性可知, 子孔径瞳面复振幅的旋转、倾斜、缩放会分别导致图像的旋转、平移和缩放。所以子孔径间的旋转、倾斜、缩放误差可通过对各子孔径重建图像进行配准得到相应的变换矩阵, 最后由变换矩阵计算得到。

图像配准的核心在于特征点的检测, 而特征点检测算法中最具代表的有 SIFT, SURF 和 AKAZE 算法。SIFT, SURF 都是基于金字塔策略构建高斯尺度空间, 进而进行极值点检测; 高斯尺度空间可以当作各向同性的扩散, 在梯度方向和垂直梯度方向以相同的速度扩散, 因而牺牲了局部精度, 容易造成边缘模糊、细节丢失。

针对上述问题, AKAZE 算法采用非线性扩散滤波构建非线性尺度空间, 核心是用非线性扩散滤波构建非线性尺度空间, 相对于高斯尺度空间具有更高的定位精度, 在去噪的同时保留了边缘信息。通过求各点 Hessian 矩阵行列式的值判断该点是否为极值点, 并得到相应的特征描述因子。

本文采用 AKAZE 算法提取待配准图像的特征点, 以某个孔径的图像为基准, 基于两幅图像的特征描述因子实现图像匹配; 最后采用 RANSAC 算法反复筛选特征描述因子来确定最终的变换矩阵。

2 GPU 并行计算加速

2.1 算法复杂度分析

由于各孔径的数据处理操作可并行执行, 所以仅针对 1.1 中单孔径数据处理的四个步骤进行复杂度分析。(1)提取复振幅: 两次傅里叶变换以及一次滤波操作; (2)高阶相位校正: 需要多次迭代, 每次迭代包括两次生成 Zernike 波面、两次像差叠加、两次图像重建; (3)位置失配误差校正: 两次 AKAZE 特征点检测、一次基于特征向量的图像匹配、计算仿射矩阵、复振幅校正; (4)低阶相位误差校正: 与高阶类

似,但低阶的图像重建是基于两个孔径拼接后的大复振幅,时间复杂度更高。

由于孔径间位置失配误差在短时间内不会有太大变化,所以当前匹配得到的变换矩阵可以用于现在以及未来一小段时间内,不需要实时匹配。因此可基于 CPU 实现图像匹配,将得到的仿射矩阵传入 GPU 再进行复振幅校正。综上,最耗时的是步骤(2)、(4)的 SPGD 算法,可基于 GPU 进行并行加速优化。

2.2 GPU 并行计算架构

GPU 拥有大量的核心处理单元以及数据存储单元,可以带来强大的浮点运算能力,为此,GPU 拥有强大的并行计算能力以及存储带宽^[11]。在一般的 CPU+GPU 混合编程中,CPU 负责程序的逻辑单元,如各子程序执行顺序等,GPU 主要负责处理一些庞大的数据以及运算量的高密度运算^[12]。

2.3 SPGD 算法的 GPU 架构

SPGD 算法需要多次迭代,且每次迭代涉及矩阵运算以及傅里叶变换等,总体运算量巨大,非常适合采用 GPU 并行加速优化。基于 GPU 的 SPGD 算法的程序架构如图 6 所示。

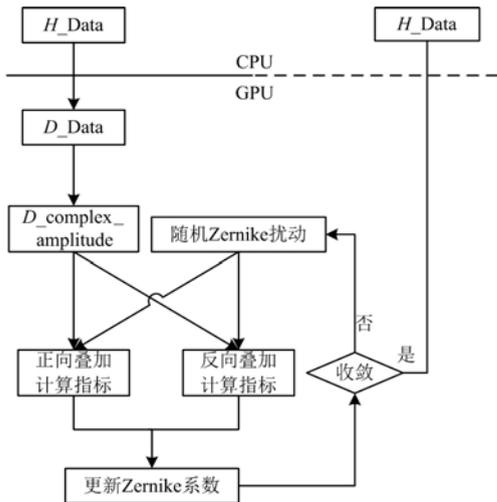


图 6 基于 GPU 的随机并行梯度下降算法的程序架构

基于 GPU 的 SPGD 程序执行步骤如下:

- a. 将 CPU 中的全息图数据 H_Data 传输到 GPU 中,得到 D_Data ;
- b. 提取复振幅得到 $D_complex_amplitude$;
- c. 分别叠加随机 Zernike 正、负向扰动,计算相应指标值;
- d. 根据指标值更新 Zernike 系数;
- e. 判断收敛,如未收敛,重复步骤 c, d, e; 否则

输出数据到 CPU。

2.4 矩阵运算的 GPU 并行加速

SPGD 算法中涉及大量的矩阵操作,例如矩阵加减、点乘、截取等。每个矩阵元素的运算是相对独立的,不存在数据关联,很适合同行加速运算。

程序采用 2D Grid of 2D Blocks 结构表示 ThreadId(线程号)的二维位置,相应的 Grid(线程格)、Block(线程块)和 Thread(线程)示意如图 7 所示。每个 Thread 与矩阵中的元素一一对应,使得编程逻辑更加清晰。 $ThreadId(x, y)$ 如式(5)所示。

$$\begin{cases} x = threadIdx.x + blockIdx.x \times blockDim.x \\ y = threadIdx.y + blockIdx.y \times blockDim.y \end{cases} \quad (5)$$

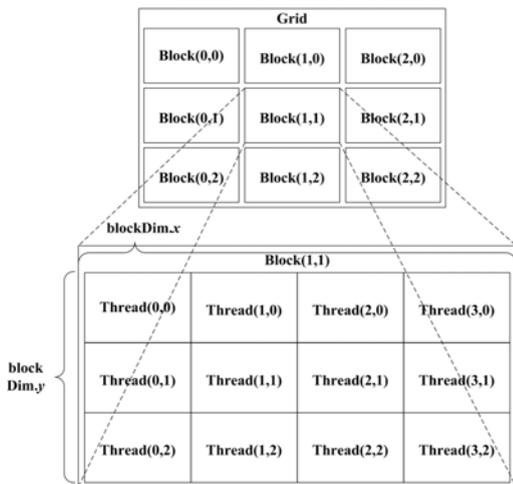


图 7 GPU 中 2D Grid of 2D Blocks 示意图

2.5 矩阵规约的 GPU 并行加速

计算图像指标值时需要矩阵进行规约操作,而规约操作涉及矩阵数据关联,即每个矩阵元素间的运算不再是独立的,不能采用传统的并行思路。

共享内存(Shared Memory)是 GPU 的重要组成部分之一,相比于全局内存(Global Memory)拥有更低的延迟与更高的带宽。在规约前先将输入数据存入共享内存中,可加快后续规约操纵。

使用两次规约操作,算法执行流程如图 8 所示。图中以虚线分为两个阶段,两个阶段都调用同一个内核函数。第一阶段中,内核执行线程块数(NumBlocks)个并行规约,得到中间数组 partial。第二阶段,内核调用一个线程块对中间数组 partial 进行规约,从而得到最终规约结果 sum。

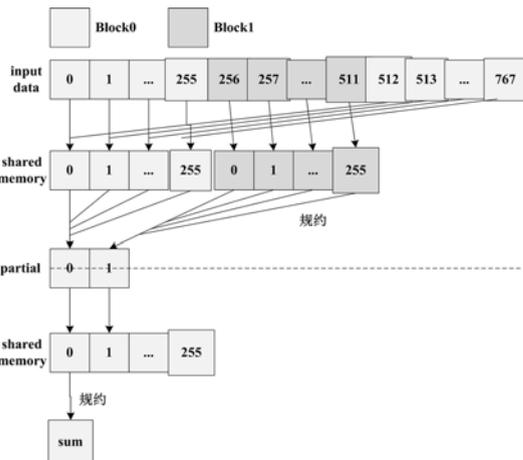


图8 CUDA两次规约算法流程图

3 实验研究

在室内搭建了分布式全息孔径数字成像系统的光路,主要实验装置及参数如下:激光器波长为532 nm;COMS相机像素数为3 856×2 764,像素间距为1.67 μm;3:1分光棱镜。实验中物体离相机距离为0.48 m。实验数据处理部分采用戴尔Precision 7820 Tower服务器:CPU为Xeon Silver 4114@2.20 GHz;GPU为Nvidia Quadro P5000(16 GB);系统为Windows10;软件环境为Visual Studio 2017;CUDA程序版本为CUDA10.0。

实验中为模拟分布式四孔径,移动相机至上下左右四个位置。分别采集四幅全息图。取每幅对应位置1 024×1 024像素的全息图,等效成一幅大的2 048×2 048像素的全息图。

3.1 单孔径复振幅提取

单孔径复振幅提取结果如图9所示,当参考光角度与物光角度满足式(4)时,物光频谱分离为三部分,如图9(b)所示。图9(c)为提取的单孔径复振幅。

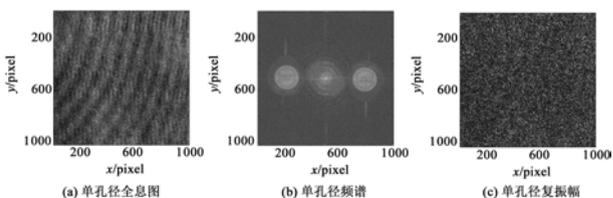


图9 单孔径复振幅提取

3.2 SPGD高阶相位误差校正

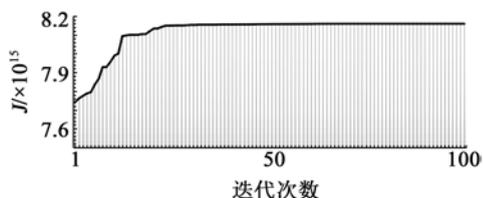
为模拟远距离分布式孔径成像系统,人为地在复振幅上添加了随机Zernike高阶相差,然后采用基于GPU的SPGD算法进行校正。图10为高阶

相位误差校正实验结果,图像清晰度用 J 表示。由图10(a)可以看出,SPGD程序迭代30次左右达到收敛状态;校正前图像10(b)与校正后图像10(c)对比明显,校正效果比较好。

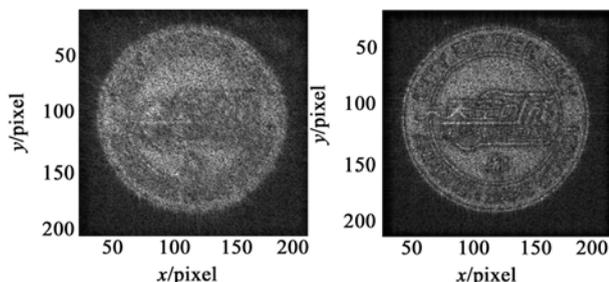
为了评价算法加速效果,引入CPU平台进行对比,并计算加速比 S_p ^[13]:

$$S_p = T_0 / T_p \quad (6)$$

其中, T_0 表示未加速前的程序运行时间,这里指基于CPU平台的程序运行时间, T_p 表示加速后的程序运行时间,这里指基于GPU平台加速的程序运行时间。得到不同平台的SPGD高阶程序运行时间对比,如表1所示。基于GPU的程序加速比达到26.42以上,而且随着迭代次数的增加,加速比也在增大。



(a) SPGD高阶程序图像指标变化曲线



(b) 校正前图像

(c) 校正后图像

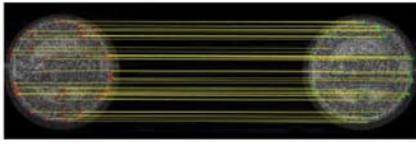
图10 高阶相位误差校正实验结果

表1 不同平台SPGD高阶相位校正程序运行时间对比

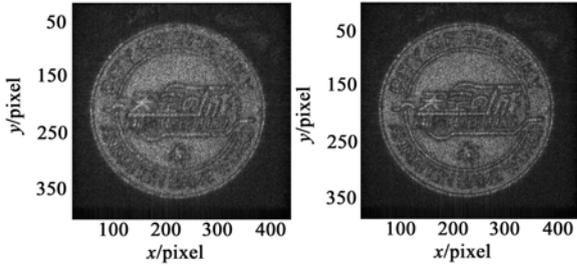
迭代次数	CPU平台时间/s	GPU平台时间/s	加速比
30	2.721	0.103	26.42
50	4.761	0.150	31.74
100	9.136	0.268	34.09
200	18.863	0.506	37.28

3.3 孔径间位置失配误差校正

基于AKAZE算法的两个孔径间图像特征的匹配结果如图11所示。由图11(a)可看出,AKAZE算法能精准地检测到大量的特征点用于后续匹配。图像未校正直接叠加的图像如图11(b)所示,十分模糊;校正后叠加的图像如图11(c)所示,清晰很多,匹配效果很好。



(a) 特征点匹配结果



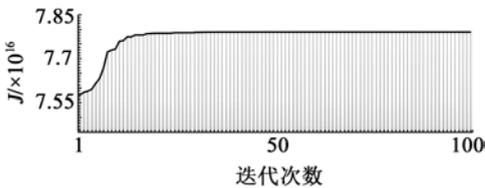
(b) 校正前图像

(c) 校正后图像

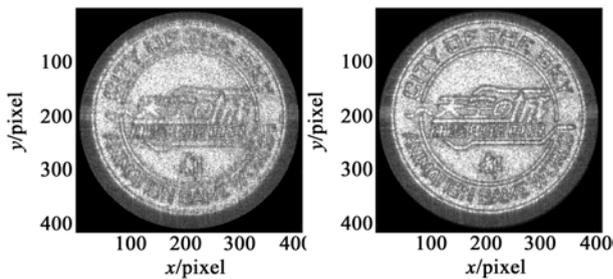
图 11 AKAZE 算法的孔径间图像特征匹配结果

3.4 孔径间低阶相位误差校正

同理,人为地在复振幅上添加随机 Zernike 低阶相差。图 12 为低阶相位误差校正实验结果。由图 12(a)可以看出,SPGD 程序迭代 20 次左右就能达到收敛状态;校正前图像 12(b)与校正后图像 12(c)对比明显,且校正效果比较好。不同平台的 SPGD 低阶程序运行时间对比如表 2 所示。基于 GPU 的程序加速比达到 36.47 以上,而且随着迭代次数的增加,加速比也在增大。



(a) SPGD 低阶程序图像指标变化曲线图



(b) 直接叠加图像

(c) 校正后叠加图像

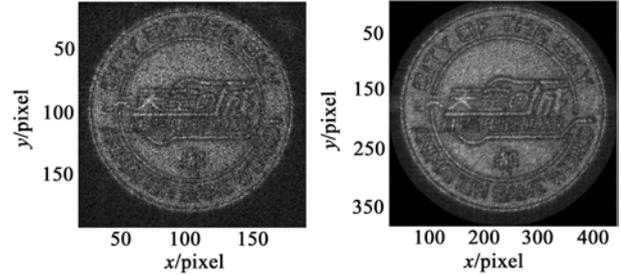
图 12 低阶相位误差校正实验结果

表 2 不同平台 SPGD 低阶相位校正程序运行时间对比

迭代次数	CPU 平台时间/s	GPU 平台时间/s	加速比
30	6.018	0.165	36.47
50	10.379	0.246	42.19
100	20.084	0.452	44.43
200	40.279	0.868	46.40

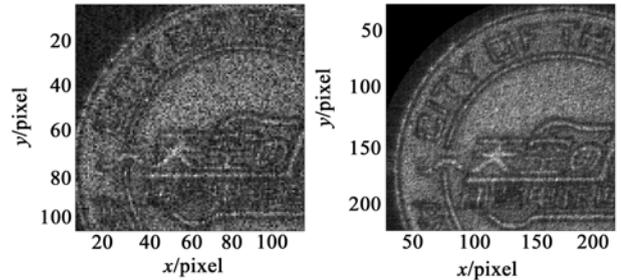
3.5 四孔径综合成像

得到共相校正后的大复振幅后,随后进行菲涅尔衍射成像,得到分布式四孔径综合成像图,如图 13(b)所示。从成像细节图 13(c)~(d)可以看出,四孔径综合图像相较于单孔径图像,细节更加丰富、清晰度更好、分辨率更高。



(a) 单孔径图像

(b) 四孔径综合图像



(c) 单孔径图像细节

(d) 四孔径综合图像细节

图 13 单孔径图像与四孔径综合图像对比

4 结论

本文采用分布式全息孔径数字成像系统来实现高分辨率成像,并采用 SPGD 算法进行 Zernike 高阶、低阶相位误差校正。针对 SPGD 算法十分耗时的的问题,采取 CUDA 多线程技术进行并行化优化,相对于 CPU 程序,加速比分别达到 26.42 和 36.47 以上。此外,针对孔径间位置失配误差,采用 AKAZE 算法提取特征点,然后进行特征匹配,最终实现了分布式四孔径综合成像,相较于单孔径成像提升了图像分辨率。

参考文献:

- [1] Born M, Wolf E. Principles of Optics [M]. 7th Edi. Cambridge: Cambridge University Press, 1999: 952.
 - [2] 彭建涛. 基于计算全息的光学系统检测与共相技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
- Peng Jiantao. Research on detection and common phase technology of spliced large aperture optical system based on computational holography [D]. Changchun: Changchun

- Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics of the Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [3] 姜文汉, 张雨东, 饶长辉, 等. 中国科学院光电技术研究所的自适应光学研究进展[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 64-72.
Jiang Wenhan, Zhang Yudong, Rao Changhui, et al. Progress in adaptive optics research of institute of optoelectronic technology, Chinese academy of sciences [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 64-72.
- [4] Marron J C, Kendrick R L. Distributed aperture active imaging[J]. Proc SPIE, 2007, 6550: 65500A-65500A-7.
- [5] Hoft T, Kendrick R, Marron J, et al. Two-wavelength digital holography[C]// Digital Holography & Three-dimensional Imaging 2007, 2007: DTuD1.
- [6] Marron J C, Kendrick R L. Multi-aperture 3D imaging systems[C]// 2008 IEEE Aerospace Conf., 2008: 4526385.
- [7] 陈波, 李新阳, 姜文汉. 大气湍流自适应光学随机并行梯度下降算法的优化[J]. 中国激光, 2010, 37(4): 959-964.
Chen Bo, Li Xinyang, Jiang Wenhan. Optimization of adaptive optical stochastic parallel gradient descent algorithm for atmospheric turbulence[J]. Chinese J. of Lasers, 2010, 37(4): 959-964.
- [8] Pablo Fernandez Alcantarilla. Fast explicit diffusion for accelerated features in nonlinear scale spaces[C]// British Machine Vision Conf. (BMVC), 2013: 10.5244.
- [9] Marron J C, Kendrick R L, Seldomridge N, et al. Atmospheric turbulence correction using digital holographic detection: Experimental results[J]. Opt. Express, 2009, 17(14): 11638-11651.
- [10] 龙学军. 基于像质评价函数最优化的自适应波前控制技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
Long Xuejun. Research on adaptive wavefront control technology based on image quality evaluation function optimization[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.
- [11] 杜竹君, 高天欣, 唐晓英. 图形处理器在实时光学相干断层成像中的应用[J]. 激光生物学报, 2017, 26(2): 97-103.
Du Zhujun, Gao Tianxin, Tang Xiaoying. The usage of graphics processing unit in real-time imaging of optical coherence tomography[J]. Acta Laser Biology Sinica, 2017, 26(2): 97-103.
- [12] 马宏灿, 李传荣, 周梅, 等. 基于CUDA的三维成像载荷快速融合处理方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(3): 443-448.
Guan Hongcan, Li Chuanrong, Zhou Mei, et al. Research on fast fusion of 3D imaging payload based on CUDA[J]. Remote Sensing Technol. and Application, 2017, 32(3): 443-448.
- [13] 全吉成, 王平, 王宏伟. 计算机图形处理器加速的光学航空影像正射校正[J]. 光学精密工程, 2016, 24(11): 2863-2871.
Quan Jicheng, Wang Ping, Wang Hongwei. Orthorectification of optical aerial images by GPU acceleration[J]. Guangxue Jingmi Gongcheng/Optics and Precision Engin., 2016, 24(11): 2863-2871.
- 作者简介:**
黄家应(1994—),男,硕士研究生,主要研究方向为分布式成像、全息技术、GPU加速;
朱磊(1980—),男,博士生导师,主要研究方向为自适应光学技术、光学相控阵技术、分布式高分辨成像技术。
E-mail: zhulei_cas@aliyun.com
-
- (上接第256页)
- [8] Britnell L, Ribeiro R M, Eckmann A, et al. Strong light-matter interactions in heterostructures of atomically thin films [J]. Science, 2013, 340(6138): 1311-1314.
- [9] Zhang W, Chuu C P, Huang J K, et al. Ultrahigh-gain photodetectors based on atomically thin graphene-MoS₂ heterostructures[J]. Sci. Rep., 2014, 4(1): 3826.
- [10] Li X, Cai W, An J, et al. Large-area synthesis of high-quality and uniform graphene films on copper foils [J]. Science, 2009, 324(5932): 1312-1314.
- [11] Wan X, Chen K, Xu J. Interface engineering for CVD graphene: current status and progress[J]. Small, 2014, 10(22): 4443-4454.
- [12] Wan X, Chen K, Chen Z, et al. Controlled electrochemical deposition of large-area MoS₂ on graphene for high-responsivity photodetectors[J]. Adv. Funct. Mater., 2017, 27(19): 1603998.
- [13] Wan X, Chen K. High-quality large-area graphene from dehydrogenated polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. Chem. Mater., 2012, 24(20): 3906-3915.
- [14] Cheng Z, Zhou Q, Wang C, et al. Toward intrinsic graphene surfaces: a systematic study on thermal annealing and wet-chemical treatment of SiO₂-supported graphene devices[J]. Nano. Lett., 2011, 11(2): 767-771.
- [15] Liu K K, Zhang W, Lee Y H, et al. Growth of large-area and highly crystalline MoS₂ thin layers on insulating substrates[J]. Nano. Lett., 2012, 12(3): 1538-1544.
- [16] Ponomarev E A. Electrochemical deposition of MoS₂ thin films by reduction of tetrathiomolybdate [J]. Thin Solid Films, 1996, 280(1/2): 86-89.
- 作者简介:**
顾杰(1995—),男,江苏镇江人,硕士生,从事二维半导体材料的研究;
万茜(1985—),男,江苏无锡人,博士,教授,从事石墨烯等二维材料的制备和光电器件的研究。
E-mail: xwan@jiangnan.edu.cn

基于高程和地物光谱约束的多光谱图像预处理算法

方秀秀^{1,2}, 黄旻^{1,2}, 王德志³, 张桂峰¹, 赵宝玮¹

(1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 首都航天机械有限公司, 北京 100076)

摘要: 分视场滤光片型多光谱相机在利用拼接和配准生成多光谱图像时,受云、水等特殊地物的影响,利用现有方法生成的结果图像上容易出现条带噪声和错配现象。提出了一种三维信息约束下的尺度不变特征转换(SIFT)图像配准和地物光谱特性约束下的多光谱图像预处理算法,该算法利用三维信息约束的 SIFT 算子提高配准精度,同时在地物光谱特性约束下选取有效的辐射校正点提高图像拼接时各条带图像灰度的校正精度。实验结果表明,利用该方法对分视场多光谱相机数据进行预处理时,即使图像上存在云、水等特殊区域的地物,结果图像仍能保持高精度配准且无条带噪声。

关键词: 分视场滤光片型;多光谱相机;SIFT 算子;多光谱图像预处理

中图分类号: TP391 **文章编号:** 1001-5868(2020)02-0264-04

Multispectral Image Preprocessing Based on Elevation and Surface Feature Spectrum Constraints

FANG Xiuxiu^{1,2}, HUANG Min^{1,2}, WANG Dezhi³, ZHANG Guifeng¹, ZHAO Baowei¹

(1. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, CHN; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN; 3. Beijing Aerospace Machinery Corporation Limited, Beijing 100076, CHN)

Abstract: When multispectral images are generated by mosaicking and registration, they are prone to strip noise and mismatch due to the effects of clouds and water. In the paper, a combined method of images registration based on SIFT algorithm constraints to 3D information and multispectral images preprocessing algorithm under the restriction of ground spectral characteristics is proposed. In this algorithm, SIFT operator constraints to 3D information are used to improve the registration accuracy. At the same time, effective radiation calibration points are selected under the ground spectral characteristics constraints to improve the gray-scale correction accuracy of each band image when stitching. The experimental results show that, when the method is used to preprocess the multispectral camera data, even if there are special areas such as clouds and water on the image, the images can own high registration accuracy without strip noise, and the spectral consistency is high.

Key words: split-field filter type; multispectral camera; SIFT operator; multispectral image preprocessing

0 引言

分视场滤光片阵列型多光谱相机通过在探测器靶面前端放置镀有多个窄带滤光片的基片,将像面

划分成若干区域,每个区域对应不同中心波长的窄带滤光片。因此,每次拍照获取的影像在空间上被分割为多个区域,且每个区域对应不同的波段信息。通过平台的推扫,可以获得目标区域所有波段的信息。多光谱相机获取的原始图像经过拼接、配准、色调调整等处理后,形成最终的多光谱数据。

收稿日期:2019-12-10.

基金项目:中科院先导项目(XDA13030402).

多光谱相机虽然安装在稳定平台上,但是稳定平台的稳定精度和平台携带的定位定姿系统(Position and Orientation System, POS)精度无法保证在一个像元以内。因此,多光谱数据的拼接和配准依然依赖于高精度的影像匹配技术。目前常用的图像配准算法主要包括基于区域的配准和基于特征的配准^[1]。考虑到尺度不变特征转换(Scale-Invariant Feature Transform, SIFT)算子对角度、光照变化不敏感,该算子在多光谱影像匹配中可以取得较好结果。但是,当影像上存在大面积云域时,使用SIFT算子会检测到大量不可靠的云上特征点,最终获取的匹配点可能都是云上点,导致地面图像匹配、配准存在错误。

另外,受拍照角度、光照条件等环境因素变化影响,不同时段获取的多光谱影像其亮度存在不一致现象。因此在预处理时需要针对不同影像进行匀光处理。根据算法处理域不同,匀光算法主要包括两大类:一是基于空间域的匀光算法,如直方图匹配法^[2]、Wallis滤波法^[3]等;二是基于频域的匀光算法,如Mask匀光法^[4]、同态滤波法^[5]、Retinex匀光法^[6]等。但是,当图像上存在大量的云、水、雪等时,这些算法效果并不好。

本文提出一种基于三维信息约束的SIFT图像配准和基于光谱信息约束的灰度一致性校正的分视场滤光片型多光谱数据预处理算法。首先,该算法利用云和目标区域的高程信息对SIFT算子匹配过程进行约束,使得匹配点处于地面。其次,在对多幅影像进行匀光处理时,通过选取合适的基准影像以及利用归一化水指数(Normalized Difference Water Index, NDWI),选取重叠区的非云、雪、水等特殊区域的同名点建立相邻影像之间的灰度变换模型对不同影像进行匀光处理。该算法可以快速、高精度地对多光谱数据进行拼接、配准处理,且可有效消除条带噪声。

1 基于三维信息和地物光谱属性约束的多光谱数据拼接与配准算法

多光谱数据预处理时,首先通过影像同名点匹配方法获取高精度的影像序列的两度、三度重叠的同名点,接着利用列文伯格-马夸尔特(Levenberg-Marquardt, LM)算法进行平差,以获取影像序列之间的高精度几何关系。在建立起影像之间几何关系

并对原始图像进行匀光处理后,就可以将每个影像投影到基准影像上,实现多光谱图像的拼接和配准处理。从以上步骤可以看出,提取出高精度的同名点以及对影像进行匀光处理是多光谱图像预处理的关键。

1.1 基于三维信息约束的改进SIFT算子多光谱影像匹配

SIFT算子通过构建尺度空间、检测定位极值点、分配关键点方位及构建128维特征描述子4个步骤获取特征点集^[7]。提取出每张影像的SIFT算子后,就可以利用马氏距离进行匹配^[8],如式(1):

$$Md = \sqrt{(\mathbf{Z}_i - \boldsymbol{\mu})^T \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{Z}_i - \boldsymbol{\mu})} \quad (1)$$

式中, \mathbf{Z}_i 为样本空间 $\mathbf{Z} = \{(x_1, y_1)^T, (x_2, y_2)^T, \dots, (x_n, y_n)^T\}$ 中的任一样本点, $\boldsymbol{\mu} = (\mu_x, \mu_y)^T$ 为样本均值, \mathbf{C}^{-1} 为协方差矩阵 \mathbf{C} 的逆。

从式(1)中可以发现,SIFT算子匹配时并未考虑同名点的高程信息。而多光谱相机获取的数据有可能存在大量的云,这些影像匹配时,SIFT算子提取的同名点可能就处于云上。为了剔除云上点,考虑到平台可以提供每张影像拍照时的粗精度的外方位元素和目标区域高程,因此在利用马氏距离进行匹配时,利用前方交会计算出同名点高程,如式(2):

$$\begin{cases} x = -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Y - Y_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Y - Y_s)} \\ y = -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Y - Y_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Y - Y_s)} \end{cases} \quad (2)$$

式中, x, y 为以像主点为原点的像平面坐标, f 为像片主距, X, Y, Z 为物点坐标, X_s, Y_s, Z_s 为外方位线元素, $a_i, b_i, c_i (i=1, 2, 3)$ 为外方位角元素组成的方向余弦。

计算出同名点高程后,如果点的高程值与目标区域平均高程之差超过阈值,则认为该点不是同名点,可得:

$$h_i - h_0 > \Delta h \quad (3)$$

式中, h_i 为计算出的同名点高程值, h_0 为目标区域高程值, Δh 为设定阈值(可以依据目标区域一般的云层高度进行设置)。

通过以上处理,可以有效消除SIFT算子提取出的云上同名点,然后采用鲁棒的随机抽样一致(Random Sample Consensus, RANSAC)算法剔除粗差,获得精确匹配特征同名点。

生成多光谱图像是利用原始数据序列生成最终

的影像,因此利用以上高精度匹配方法获取序列影像的两度重叠和三度重叠同名点,这样将建立起基于全区域的影像高强度几何约束网并实现序列影像的整体配准。最终利用 LM 算法计算出序列影像相对于基准影像之间的高精度几何关系^[9],可得:

$$E(\mathbf{M}) = \sum_j ((x_{mj} - x_{nj})^2 + (y_{mj} - y_{nj})^2) = \mathbf{e}(\mathbf{M})^T \mathbf{e}(\mathbf{M}) < \epsilon \quad (4)$$

$$\mathbf{M}^{k+1} = \mathbf{M}^k + \Delta \mathbf{M} \quad (5)$$

$$\Delta \mathbf{M} = (\mathbf{J}^T(\mathbf{M})\mathbf{J}(\mathbf{M}) + \mu \mathbf{I})^{-1} \mathbf{J}^T(\mathbf{M})\mathbf{e}(\mathbf{M}) \quad (6)$$

式中, \mathbf{M} 为序列影像到基准影像的几何变换参数矩阵集, j 为同名点对序号, m, n 为同名点 j 对应的两个影像的序号, ϵ 为迭代终止条件(误差允许值), k 为迭代次数, $\mathbf{J}(\mathbf{M})$ 为 $\mathbf{e}(\mathbf{M})$ 的 Jacobian 矩阵, \mathbf{I} 为单位矩阵, μ 为阻尼因子。对于给定的 μ , 若能使误差函数 $E(\mathbf{M})$ 降低, 则 μ 降低, 否则, μ 增加。

1.2 地物光谱信息约束下的光谱原始数据匀光算法

为了校正同一地物在不同影像上的灰度差异, 算法将利用重叠区域同名区域灰度相关性, 通过计算相邻影像之间灰度变换的线性模型达到校正灰度不一致的目的。在此过程中, 灰度调整基准影像的选取和重叠区同名点的选取是关键。

1.2.1 基于影像标准偏差的灰度校正基准影像选取

影像的标准偏差反映了影像灰度的动态变换范围, 标准偏差越大, 一定程度上影像的对比度越强。如图 1 中, a 和 b 分别为对比度不同的两张相邻影像, 其标准偏差分别为 0.132 5 和 0.142 1。c 为未经灰度校正的拼接影像, 有明显灰度差异。分别以图 a 和图 b 为基准影像对另一幅影像进行灰度校正, 得到拼接影像图 d 和图 e。图 d 和图 e 计算得到标准偏差分别为 0.126 9 和 0.134 5, 同时从目视效果容易看出图 e 的对比度优于图 d。

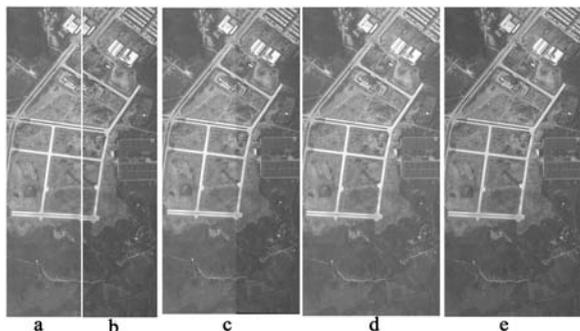


图 1 对比度不同的影像作为基准影像

在进行单波段灰度校正时, 选择标准偏差大的影像作为基准影像, 然后利用传递关系对同一波段所有影像进行辐射一致性校正。如图 2 所示。

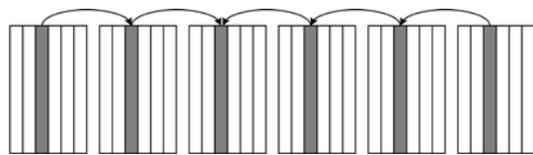


图 2 同一波段影像灰度校正示意图

1.2.2 NDWI 指数约束下的重叠区域灰度校正同名点选取及灰度校正

建立两个相邻影像上相同波段图像之间的灰度变换模型时, 主要是通过选取重叠区域的多个同名点或同名区域, 建立起两张影像的线性变换模型, 然后利用线性回归方法解算出线性模型参数, 如图 3 所示。

解算出相邻两张影像之间的灰度变换关系后, 就可以计算出序列影像之间的灰度变换公式:

$$y_i = ax_i + b \quad (7)$$

$$a = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (8)$$

$$b = \bar{y} - a\bar{x} \quad (9)$$

式中, y_i 为基准影像第 i 个同名点的灰度值, x_i 为待校正影像相应同名点的灰度值, \bar{x}, \bar{y} 分别为基准影像和待校正影像同名点灰度值的平均值。

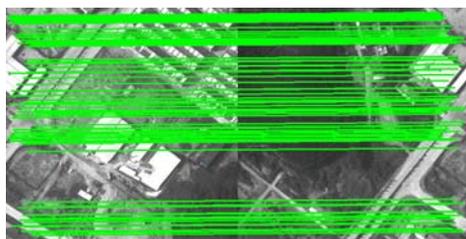


图 3 相邻影像重叠区域同名点

序列影像相对基准影像的灰度变换公式如下:

$$y_i = x_n \times \prod_{i=1}^{n-1} a_i + b_{n-1} \times \prod_{i=1}^{n-2} a_i + b_{n-2} \times \prod_{i=1}^{n-3} a_i + \dots + b_2 a_1 + b_1 \quad (10)$$

式中, y_i 为基准影像上同名点的灰度值, x_n 为基准影像一侧第 n 张影像上的灰度值, a_i, b_i 为同一侧第 i 张影像相对基准影像的灰度变换参数。

灰度校正的同名点选取存在两个问题: 一是如果选取的点为角点, 位置的细微偏差都会导致辐射校正模型较大的误差; 二是如果选取的点在云、水和

雪等区域,也会使得计算结果存在较大偏差。

为了解决第一个问题,算法将选择灰度变化平缓区域为灰度校正的同名区域。由于候选区域内各像素的灰度值相差不大,即使灰度检测存在一、两个像素的偏移,也不会对计算结果造成严重影响。为了减小灰度检测带来的误差,将计算控制点及其邻域内的灰度平均值作为观测值,以增加算法的鲁棒性。

对于多光谱图像可以计算出 NDWI 指数,而这一指数可以分辨出图像中云、水和雪等特殊区域。算法将利用地物 NDWI 指数指导同名区域选取。选取时,首先计算整幅图像的 NDWI(利用前面一节获取的高精度几何参数),计算公式如下^[10] :

$$NDWI = \frac{R_G - R_{IR}}{R_G + R_{IR}} \quad (11)$$

式中, R_G 和 R_{IR} 分别为绿光波段和近红外光波段的反射率。

计算出 NDWI 后,对于初选的同名区域,利用该区域的 NDWI 均值判断其是否为特殊区域上的点。通过比较该区域均值与阈值的大小来判断其是否为特殊区域上的点。如果不是,则保留,否则剔除,如式(12):

$$\begin{cases} th_1 < NDWI < th_2, \text{水} \\ th_3 < NDWI < th_4, \text{云} \\ \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

其中,水的 NDWI 指数为 0.09~0.19,云的 NDWI 指数为 -0.04~-0.09。

1.3 基于灰度内插的多光谱图像生成

由 1.1 节的计算可得任意单波段内的影像间高精度几何关系,通过该几何关系对匀光后的影像进行单波段拼接。对于波段间的影像配准,由于几何变换参数是基于序列影像整体平差计算得到的,因此影像波段间的几何关系可以表示为简单的平移变

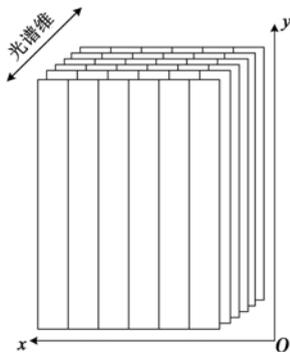


图4 多光谱影像拼接配准结果示意图

换,利用该几何平移关系完成影像间多波段配准。多光谱影像拼接配准结果示意图如图4所示。

2 实验与分析

实验使用的多光谱数据来自某机载六谱段滤光片型多光谱相机的实际拍摄数据,拍摄地点为中国某山区,由于山区的天气特点,拍摄的多光谱图像容易存在云的干扰。

图5给出了用本文方法实现的多光谱伪彩色(R:650 nm;G:540 nm;B:480 nm)影像。

从目视效果看,拼接结果几何位置正确,地物色彩均匀,无明显偏色现象。为了定量评价该算法的几何拼接精度,根据文献[11]提出的计算方法,计算结果图像拼接处多个同名点对距离 d_i ($i=1,2,\dots,n$) 的均方根误差,计算结果 $\delta_1 = ((d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_n^2)/n)^{1/2} = 0.79$ 。同理,为了定量评价该算法的灰度校正精度,计算同名点对灰度差值 h_i ($i=1,2,\dots,n$) 的均方根误差,计算结果 $\delta_2 = ((h_1^2 + h_2^2 + \dots + h_n^2)/n)^{1/2} = 2.51$ 。从数值来看,该算法可以实现多光谱图像的高精度拼接,保证拼接精度在一个像元内,并且拼接处同名点灰度值无突变,有效消除了条带噪声。



图5 拼接后多光谱伪彩色图像

3 结束语

本文提出一种分视场机载滤光片型多光谱图像预处理算法,该算法将基于三维信息约束的改进 SIFT 算子和 LM 平差等算法运用于图像拼接,保证了拼接影像的精度;将基于地物光谱属性约束的匀光算法运用于原始多光谱数据灰度校正,保证了拼接影像的色彩均匀性。将该算法运用于分视场滤光片型多光谱影像的预处理,得到地物几何位置拼接正确、无条带噪声的影像。结果表明,该方法同样适用于影像上存在云、水的情况。

(下转第 272 页)

一种基于宽频光源和 FP 腔滤波的 CO₂ 检测系统

成 龙^{1,2,3}, 丁 雷^{1,2}, 张子儒^{1,2,3}

(1. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 介绍了一种基于宽频光源和法布里-珀罗谐振腔(Fabry-Perot, FP)结构的 CO₂ 检测系统。该系统为主动光学系统, 结构简单、系统信噪比高。从差分吸收激光雷达原理出发, 阐述了该系统的基本工作原理, 使用 HITRAN 数据库模拟大气环境, 设计系统参数, 确定系统工作波段为 1.57 μm, 光源为 L 波段超辐射 LED 光源(Super LED, SLED), 能量波动值 Rip 为 50 dB, 输出功率为 24.51 mW, 接收端滤波器为光纤 FP 腔滤波器, 工作中心波长为 1.55 μm, 带宽为 60 nm, 通道间隔为 50 GHz, 设计系统探测误差为 2×10^{-6} 。

关键词: CO₂ 柱浓度; 光纤 FP 腔; 宽频光源; SLED; 主动光学

中图分类号: TN958.98 **文章编号:** 1001-5868(2020)02-0268-05

A CO₂ Detection System Based on Broadband Light Source and FP Cavity Filtering

CHENG Long^{1,2,3}, DING Lei^{1,2}, ZHANG Zirui^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Infrared Detection and Imaging Technology of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, CHN;

2. Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, CHN;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN)

Abstract: A system based on wide-band light source and Fabry-Perot (FP) structure is introduced for the detection of CO₂. The system is an active optical system with simple structure and high signal noise ratio (SNR). Based on the principles of traditional differential absorption lidar, the basic working principles of the detection system are described, and the system parameters are designed by using the HITRAN database to simulate the atmospheric environment. Thus the working band of the system is determined to be 1.57 μm, the light source is a L-band super-luminescent LED (SLED), and the energy fluctuation value Rip is 50 dB. The system output power is 24.51 mW, and the filter at the receiving end is a fiber-optic FP cavity filter with the center wavelength of 1.55 μm, the bandwidth of 60 nm, and the channel interval of 50 GHz. The error of the designed system is only 2×10^{-6} .

Key words: CO₂ column concentration; fiber FP filter; broadband light source; SLED; active optics

0 引言

近年来, 温室效应造成的全球温度上升和极端气候变化引起了科学界的广泛关注^[1]。温室气体检测的主要目的是获取大气中 CO₂ 的分布数据。传统光谱探测模式^[4]很难满足 CO₂ 高精度、高定量

化^[2-3]的探测要求。在轨运行的 OCO-2 采用光栅高光谱仪模式, 实现了 $(1 \sim 2) \times 10^{-6}$ 误差内的大气 CO₂ 柱浓度探测^[5]。为了进一步提高探测精度, 扩大数据的时间、空间覆盖率, 主动光学温室气体探测将成为下一代温室气体检测的重要发展方向。

和传统被动光学系统相比, 主动光学 CO₂ 检测的优点包括: 1) 无需太阳光就能实现夜晚和高纬度

区域探测;2)探测精度高,受云和气溶胶干扰小;3)可获取垂直结构 CO₂ 分布,包括近地面 CO₂ 数据和分层信息。美国 NASA 的 ASCENDS 项目^[6]和欧洲 ESA 的 A-SCOPE 项目^[7]都采用主动光学探测方案,通过激光路径差分吸收雷达获取 CO₂ 的分布数据,该类技术应用仍处于地面验证阶段。

本文基于主动光学差分吸收激光雷达原理,结合 FP 腔在大气痕量气体检测方面的研究成果^[8-9],探索宽频光源-FP 腔探测系统在大气 CO₂ 检测中的应用,通过数据仿真模拟设计系统的主要参数。

1 系统原理

差分吸收激光雷达常用于大气污染气体的探测^[10],其发射端包含两个激光器,大气对这两束激光的吸收作用不同,通过两束激光信号的差分值计算吸收路径上的气体分子浓度。

CO₂ 气体透过率谱线如图 1,差分吸收激光雷达一般选择同一吸收峰-谷上的一对波长,透过率峰值波长为 λ_{on} ,该波长对 CO₂ 浓度较为敏感,谷值波长记为 λ_{off} ,该波长受到 CO₂ 浓度影响较小,两通道上能量分别表示为

$$P(\lambda_{on,off},R) = K(\lambda_{on,off})P_0(\lambda_{on,off}) \cdot \exp\left\{-\int_0^R \alpha(\lambda_{on,off},z)dz - 2\int_0^R \beta(\lambda_{on,off},z)dz\right\} \quad (1)$$

$$P(\lambda_{off},R) = K(\lambda_{off})P_0(\lambda_{on}) \cdot \exp\left\{-\int_0^R \alpha(\lambda_{off},z)dz - 2\int_0^R \beta(\lambda_{off},z)dz\right\} \quad (2)$$

$$\alpha(\lambda,z) = N(Z)\sigma(\lambda) \quad (3)$$

其中, K 表示除了 CO₂ 分子吸收作用外其他衰减因素的影响(包括其他气体成分和光学透镜吸收), α 为大气吸收系数, β 为大气散射系数, R 为传播距离, N 为待测 CO₂ 分子数, σ 为 CO₂ 分子的吸收截面。由于 λ_{on} 和 λ_{off} 非常接近,两波长上参数近似为

$$\beta(\lambda_{on},z) \approx \beta(\lambda_{off},z) \quad (4)$$

$$K(\lambda_{on}) \approx K(\lambda_{off}) \quad (5)$$

$$\sigma(\lambda_{on}) \gg \sigma(\lambda_{off}) \quad (6)$$

对两个信号进行差分,计算目标气体分子数为

$$N(R) = \frac{1}{2\sigma(\lambda_{on})} \frac{d}{dR} \left[\ln \frac{P(\lambda_{off},R)}{P(\lambda_{on},R)} \right] \quad (7)$$

上述过程即差分吸收激光雷达的数据反演过程。在实际反演计算中, $\sigma(\lambda_{on})$ 是大气温度、湿度和压强的函数,反演精度受到大气参数精度的影响。

对差分吸收激光雷达进行改造,选择多个吸收

峰-谷波长对,波长选择如图 1。系统仍采用双通道探测,通道 1 为透过率多个峰值波长光信号叠加,通道 2 为透过率多个谷值波长光信号叠加,两通道上光功率分别表示为

$$P_1(\lambda,R) = \sum_{i=1}^n P(\lambda_{on_i},R) \quad (8)$$

$$P_2(\lambda,R) = \sum_{i=1}^n P(\lambda_{off_i},R) \quad (9)$$

其中每一对峰值-谷值波长($\lambda_{on_i},\lambda_{off_i}$)即一个差分吸收激光雷达的两个波长,每一对信号差分值都是 CO₂ 浓度的函数。由等比定理可得:

$$\frac{\sum_{i=1}^n P(\lambda_{off_i},R)}{\sum_{i=1}^n P(\lambda_{on_i},R)} = \frac{P(\lambda_{off_1},R)}{P(\lambda_{on_1},R)} = \dots = \frac{P(\lambda_{off_i},R)}{P(\lambda_{on_i},R)} \quad (10)$$

此时目标气体分子数为

$$N(R) = \frac{1}{2\sigma(\lambda_{on})} \frac{d}{dR} \left[\ln \frac{P_2(\lambda,R)}{P_1(\lambda,R)} \right] \quad (11)$$

和差分吸收激光雷达相比,本系统每个通道上的信号是多个波长信号的累加,信号强度的增强大大提高了数据信噪比。由于该系统光源为宽频段光源,发射端不需要稳频系统来保证频率稳定性,系统结构更为简单。

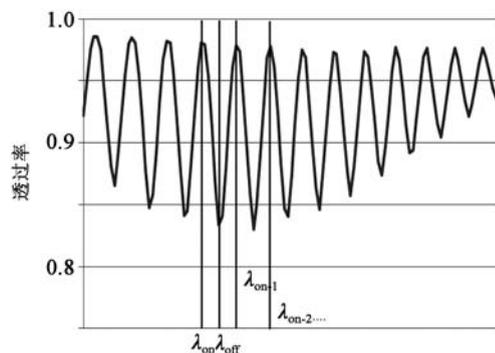


图 1 CO₂ 透过率示意图

2 系统设计

系统由发射端和接收端组成,发射端包括宽频光源 SLED 和光放大器,接收端包括光纤 FP 腔滤波器和探测组件,发射端和接收端共用前端光学系统和三口光纤环形器,系统内部光路用光纤连接^[11],以提高光能量的利用率。

系统结构如图 2 所示,SLED 发出的光经过光放大器进入光纤环形器,前端光学系统将光耦合到大气中,返回光线通过光纤环形器,在环形器输出口分为两个通道进行探测。

接收端的两个通道中,通道 1 直接对光线进行探测,信号受 CO_2 浓度影响较大,通道 2 光线经过了光纤 FP 腔滤波后进行探测,设计光纤 FP 腔透过率峰值波长对应 CO_2 透过率吸收谷值波长,通道 2 信号为 CO_2 吸收峰谷值信号的累加,受 CO_2 浓度影响较小,由两通道差分数值可计算 CO_2 分子数。

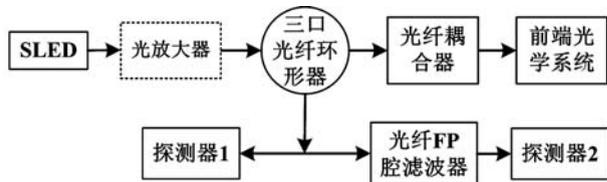


图 2 检测系统构成框图

3 波段选择

常用 CO_2 大气探测窗口包括 1.57, 1.61 和 2.06 μm 三个波段。2.06 μm 超出了传统光纤通信波段,故不作考虑。使用 HITRAN 数据库仿真, CO_2 在 1.56~1.62 μm 的透过率如图 3,波段内有四个吸收峰密集区。考虑水汽吸收谱线重合导致的误差,选择水汽吸收最弱的波段 1567~1574 nm 作为系统工作波段。

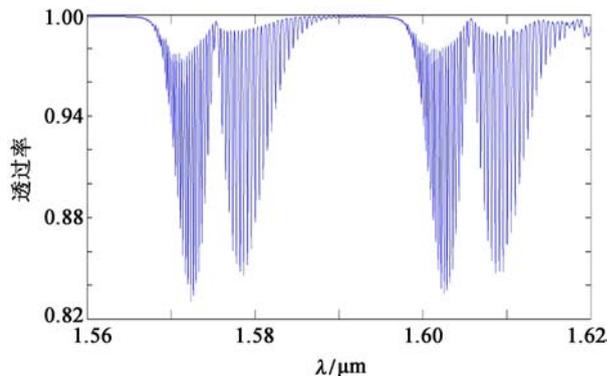


图 3 1.56~1.62 μm 大气 CO_2 透过率谱(CO_2 400×10^{-6})

4 发射端设计

发射端包括宽频 SLED 光源和光放大器。SLED 发光功率介于 LED 和半导体激光器之间,在较宽带宽内有平坦的光输出。考虑功率和稳定性要求,选择 EXALOS 公司 SLED:EXS210062-01,其光谱辐射特性如图 4,输出功率为 24.51 mW,能量波动 R_{ip} 为 50 dB。

在大气衰减路径较长时,为保证系统信噪比,需要对光能量进行放大。系统工作在光纤通信的 L 波段,主要的放大手段包括掺铒光纤激光放大器

(EDFA)^[12]和光参量振荡(OPO)放大器^[13]。传统 EDFA 的工作波段很难覆盖系统工作波长,通过延长光纤长度,使光纤放大器工作波长向长波方向延伸。在牺牲部分放大率的前提下,EDFA 可以在 1570 nm 附近。OPO 放大器利用非线性晶体的差频效应实现光功率放大,由于本方案内部采用光纤机构,OPO 光放大器的空间光输入要求增加了系统复杂性,故选用 EDFA 方案。

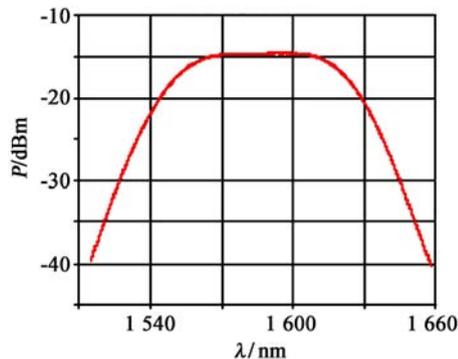


图 4 SLED 光源光能量辐射谱

5 光学系统设计

本系统发射端和接收端共用一个光学系统。光纤结构提供两条光传输路径,即发射端-大气环境和大气环境-接收端两条路径。三口光纤环形器可以实现内部 port1-port2 和 port2-port3 两条光通路,满足系统设计要求。另一种可行的方案是使用多芯光纤^[14],光纤由五条光纤纤芯组成,中心位置光纤纤芯用于接收返回信号,其余四条光纤纤芯用于发射信号,两部分光纤纤芯相对于光学焦点进行适当的伸缩,以保证发射端和接收端光纤结构耦合,提高系统能量效率。多芯结构对于系统装调匹配和稳定性要求高,能量利用率低于光纤环形器,故光纤环形器光路更为合适。

6 接收端设计

接收端由光纤 FP 腔滤波器和探测组件两部分组成。其中光纤 FP 腔滤波器是接收端的核心器件。光纤 FP 腔对于环境参数变化敏感,常用于环境温度、压强和应力等参数的测量,是光通信和传感技术领域的重要器件^[15]。光纤 FP 腔结构和空间 FP 腔结构类似,使用飞秒激光镀膜层在光纤径向上击穿光纤纤芯,形成折射率变化的谐振腔,在光纤内部截面上实现多光束干涉,光纤 FP 腔结构如图 5。

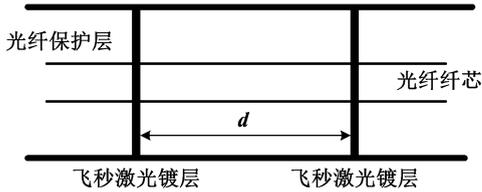


图5 光纤 FP 腔滤波结构示意图

光纤 FP 腔的主要参数为自由光谱范围(FSR)和半高宽(FWHM),两者满足以下公式:

$$FSR = \bar{\lambda}^2 / 2nd \quad (12)$$

$$V_{FWHM} = 2(1 - R) / \sqrt{R} \quad (13)$$

其中, $\bar{\lambda}$ 为系统工作波段的中心波长, n 为腔内介质折射率, d 为腔长, R 为腔两端的反射率。光纤 FP 腔滤波器透过率函数相当于中心间隔为 FSR 的一系列 Airy 函数叠加, Airy 函数半高宽为 V_{FWHM} 。

光纤 FP 腔滤波器参数设计过程如图 6, 探测精度目标为 2×10^{-6} , 以 400×10^{-6} 和 402×10^{-6} 作为 CO₂ 浓度输入, 通过 HITRAN 数据库和逐线积分法(LBLRTM)获得两个浓度下大气透过率谱线。设置 FP 腔参数, 计算 400×10^{-6} 和 402×10^{-6} 对应的系统信号, 两者之差即系统对于 2×10^{-6} 浓度变化的敏感值。优化 FP 腔参数, 获得较好的敏感性。最终确定设计参数 $FSR = 0.4 \text{ nm}$, 通道间隔 50 GHz, 半高宽 0.1 nm。具体设计要求如下: 带宽为 60 nm, 端口为 port1-port2, 通道间隔为 50 GHz, 插入损耗小于 5 dB, 平坦度小于 0.5 dB, 波长热稳定性小于 $0.02 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, 最大功率承载 200 mW。

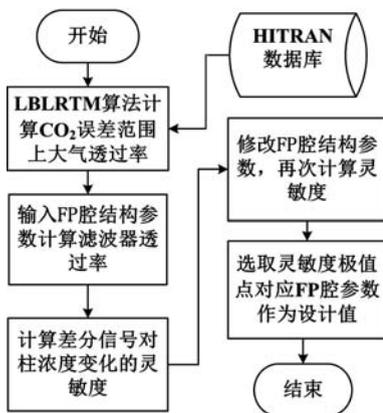


图6 FP 谐振腔参数设计流程

对定制光纤 FP 腔滤波器进行测试, 使用可调谐激光器作为光源, 直接测量经过光纤 FP 腔后各个波段光能量, 获得 FP 腔滤波后光能量, 结果如图 7 所示, 可见满足上述设计要求。

接收端探测器为两个相同的 InGaAs 单元探测器, 输入口采用光纤接入, 响应波长为 $1020 \sim 1650 \text{ nm}$, 带宽为 3 GHz。

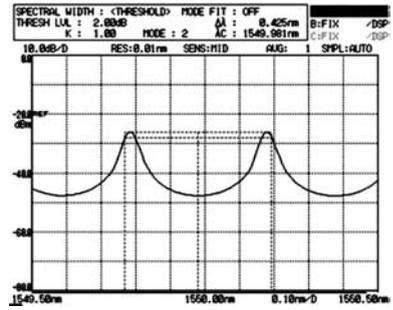


图7 光纤 FP 腔滤波效果

7 结论

本文深入研究了基于宽频光源和光纤 FP 腔滤波器的大气 CO₂ 检测。从传统差分吸收激光雷达技术出发, 介绍了该系统的工作原理和结构组成。通过仿真计算, 确定系统工作波长、发射端和接收端的结构及参数。最终选择 $1567 \sim 1574 \text{ nm}$ 作为工作波段, 选用 SLED 作为系统光源, 光纤 FP 腔滤波器作为接收端滤波器, 光纤 FP 腔自由光谱范围为 0.4 nm, 通道间隔为 60 GHz, 半高宽为 0.1 nm。系统在上述结构参数下, 对 CO₂ 浓度的检测误差可控制在 2×10^{-6} 内。

参考文献:

- [1] 张 妍, 李 玥. 国际碳排放权交易体系研究及对中国的启示[J]. 生态经济, 2018, 34(2): 66-70.
Zhang Yan, Li Yue. Research on international emission trading scheme and its implication to China[J]. Ecological Economy, 2018, 34(2): 66-70.
- [2] Park J H. Atmospheric CO₂ monitoring from space[J]. Appl. Opt., 1997, 36(12): 2701-2712.
- [3] Rayner P J, O'Brien D M. Correction to "The utility of remotely sensed CO₂ concentration data in surface source inversions"[J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(1): 175-178.
- [4] Mao J, Kawa S R. Sensitivity studies for space-based measurement of atmospheric total column carbon dioxide by reflected sunlight[J]. Appl. Opt., 2004, 43(4): 914-927.
- [5] Crisp D, Pollock H R, Rosenberg R, et al. The on-orbit performance of the orbiting carbon observatory-2 (OCO-2) instrument and its radiometrically calibrated products[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2017, 10(1): 59-81.
- [6] Abshire J B, Riris H, Allan G R, et al. A lidar approach to measure CO₂ concentrations from space for the ASCENDS mission[J]. Proc. of SPIE, 2010, 7832(2): 289-301.

- [7] Amediek A, Fix A, Ehret G, et al. Airborne lidar reflectance measurements at 1.57 μm in support of the A-SCOPE mission for atmospheric CO_2 [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2009, 2(3): 755-772.
- [8] Georgieva E M, Heaps W S. Total column oxygen detection using a Fabry-Perot interferometer[J]. Opt. Engin., 2006, 45(11): 2365-2372.
- [9] Heaps W S. Broadband lidar technique for precision CO_2 measurement[J]. Proc. of SPIE, 2008, 7111: 10.1117/12.802624.
- [10] 刘豪, 舒嵘, 洪光烈, 等. 连续波差分吸收激光雷达测量大气 CO_2 [J]. 物理学报, 2014, 63(10): 205-210.
Liu Hao, Shu Rong, Hong Guanglie, et al. Continuous-wave modulation differential absorption lidar system for CO_2 measurement[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(10): 205-210.
- [11] 高坡, 胡以华, 赵翔翔, 等. 全光纤差分吸收激光雷达大气成分探测精度分析[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 14-18.
Gao Po, Hu Yihua, Zhao Nanxiang, et al. Accuracy analysis of all-fiber differential absorption lidar for atmospheric component [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 14-18.
- [12] 程杰. 用于大气二氧化碳探测的高功率激光光源研究[D]. 武汉: 武汉邮电科学研究院, 2012.
Cheng Jie. Research on high power laser source for atmospheric carbon dioxide detection [D]. Wuhan: Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunications, 2012.
- [13] Abshire J B, Riris H, Allan G R, et al. Pulsed airborne lidar measurements of atmospheric CO_2 column absorption[J]. Tellus, 2010, 62(5): 770-783.
- [14] 林攀攀, 凌六一, 黄友锐. 基于光纤耦合长光程 LED-DOAS 技术的大气 NO_2 测量研究[J]. 光学技术, 2016, 42(1): 34-38.
Lin Panpan, Ling Liuyi, Huang Yourui. Research on the detection of atmospheric NO_2 based on optical fiber coupling long path LED[J]. Optical Technique, 2016, 42(1): 34-38.

作者简介:

成龙(1989—), 男, 博士生, 主要从事基于主动光学大气 CO_2 柱浓度的检测。

E-mail: chenglong@shanghaiitech.edu.cn

(上接第 267 页)

参考文献:

- [1] 余先川, 吕中华, 胡丹. 遥感图像配准技术综述[J]. 光学精密工程, 2013, 21(11): 2960-2972.
Yu Xianchuan, Lv Zhonghua, Hu Dan. Review of remote sensing image registration techniques[J]. Optics and Precision Engin., 2013, 21(11): 2960-2972.
- [2] Stark J A. Adaptive image contrast enhancement using generalizations of histogram equalization[J]. IEEE Trans. on Image Proc., 2000, 9(5): 889-896.
- [3] 王智均, 李德仁. Wallis 变换在小波影像融合中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2000, 25(4): 338-342.
Wang Zhijun, Li Deren. Application of Wallis transform in wavelet based image fusion[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2000, 25(4): 338-342.
- [4] 李德仁, 王密, 潘俊. 光学遥感影像的自动匀光处理及应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2006, 31(9): 753-756.
Li Deren, Wang Mi, Pan Jun. Auto-dodging processing and its application for optical RS images [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006, 31(9): 753-756.
- [5] IHO S-52. IHO specifications for chart content and display aspects of ecdis edition 5.0 [S]. The Inter. Hydrographic Bureau MONACO, 1996.
- [6] Land E H. The retinex theory of color vision[J]. Scientific American, 1977, 237(6): 108-128.
- [7] Lowe D G. Object recognition from local scale-invariant features[C]// Proc. of the Seventh IEEE Inter. Conf. on Computer Vision, 1999: 1150-1157.
- [8] 张建勋, 张凯文, 牛文宾. 基于 PCA-SIFT 和马氏距离的 SAR 图像自动配准[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2011(10): 40-45.
Zhang Jianxun, Zhang Kaiwen, Niu Wenbin. Automatic registration of SAR image based on PCA-SIFT and Mahalanobis distance[J]. J. of Chongqing Institute of Technol. (Nature Science Edi.), 2011(10): 40-45.
- [9] 伏燕军, 杨坤涛, 邹文栋, 等. 基于 Levenberg-Marquardt 算法的图像拼接[J]. 激光杂志, 2007, 28(5): 46-48.
Fu Yanjun, Yang Kuntao, Zou Wendong, et al. Image mosaic based on Levenberg-Marquardt algorithm[J]. Laser J., 2007, 28(5): 46-48.
- [10] Mcefeeters S K. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features[J]. Inter. J. of Remote Sensing, 1996, 17(7): 1425-1432.
- [11] 赵宝玮, 相里斌, 黄旻, 等. 视差约束的改进 Hough 变换多光谱影像匹配方法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2015, 42(6): 94-98.
Zhao Baowei, Xiang Libin, Huang Min, et al. Matching method for multispectral images based on improved Hough transformation with disparity constraint [J]. J. of Xidian University(Nature Science Edi.), 2015, 42(6): 94-98.

作者简介:

方秀秀(1995—), 女, 安徽安庆人, 硕士研究生, 研究方向为多光谱图像数据处理;

黄旻(1976—), 男, 安徽宣城人, 博士, 研究员, 研究方向为计算光学成像。

E-mail: huangmin@aoe.ac.cn

轻小型推扫视频一体化相机设计与验证

胡永富, 解静, 吴建福, 齐文雯, 牟研娜

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘要: 介绍了一种轻小型推扫视频一体化微纳遥感相机的综合优化设计思路。系统设计时综合考虑星地一体化处理,采用大 F 数RC系统降低产品光机体积重量;电子学采用商用货架产品加固技术实现高性能同时降低成本,星上数据处理采用数字TDI技术实现面阵相机推扫视频一体化成像,大幅提升成像效能。采用该方法设计的微纳遥感相机具备视频、推扫、条带等多种工作模式,满足不同应用场景需求。该技术在欧比特视频相机等微纳遥感载荷的设计及研制中进行了应用,在轨获取了高品质的视频及遥感图像,在商业遥感载荷市场具有广阔的应用前景。

关键词: 遥感面阵相机; 综合优化; 推扫成像; 视频成像; 数字TDI

中图分类号: TP391.41; V443.5 **文章编号:** 1001-5868(2020)02-0273-05

Design and Verification of Light and Small Push-broom and Video Integrated Camera

HU Yongfu, XIE Jing, WU Jianfu, QI Wenwen, MOU Yanna

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, CHN)

Abstract: Introduced is a comprehensive optimization design about light and small push-broom & video integrated cameras for micro and nano satellites. In the system design, the integrated processing of satellite and ground is considered comprehensively, the RC system with large F -number is used to reduce the volume and weight. Commercial shelf strengthening technology is applied to achieve high performance and reduce cost. On-board data processing adopts digital TDI technology to realize push-broom and video integrated imaging of array camera, greatly improving imaging efficiency. The designed micro/nano remote sensing camera has a variety of working modes, such as video, push-broom, strip and so on, to meet the needs of different application scenarios. This technology has been applied in the design and development of micro and nano remote sensing payload, such as the OVS-1 video camera. High quality video and remote sensing images have been obtained in orbit. It has a broad application prospect in the market of commercial remote sensing payload.

Key words: remote sensing array camera; comprehensive optimization; push-broom imaging; video imaging; digital TDI

0 引言

随着大数据、云计算等技术的快速崛起,结合互联网技术,以微纳卫星研制为切入点,国内外出现了众多新兴商业遥感初创公司,如美国行星实验室(Planet Labs)、阿根廷 Satellogic、加拿大地球直播

(UrtheCast),国内欧比特、长光卫星、千乘探索等公司。轻小型推扫视频一体化相机可在轨获取推扫图像及凝视视频,具备自动曝光、自动白平衡、均匀性校正等功能,轻小型化程度高、使用灵活方便、成本低,特别适用于商业遥感公司微纳遥感卫星平台。本文介绍了一种轻小型推扫视频一体化微纳遥感相机的综合优化设计方法及应用情况。

1 系统设计

1.1 系统设计原则

轻小型推扫视频一体化相机系统参数选择时需综合考虑成像质量、体积等因素,以实现系统参数匹配最优为原则。

光学系统的截止频率为 $f_c = 1/\lambda F$, 探测器的采样频率为 $f_s = 1/p$, 系统的 Nyquist 频率为 $f_N = 1/2p$, 其中 λ 为光学系统波长, F 为光学系统的 F 数, p 为探测器像元尺寸。当 $\lambda F/p > 2$ 时属于超采样系统, 系统分辨率受限于光学系统; 当 $\lambda F/p < 2$ 时属于欠采样系统, 系统分辨率受限于探测器。对于欠采样系统, $\lambda F/p$ 越小, 系统调制传递函数 (MTF) 越高, 信噪比越高, 图像高频混叠越严重, $\lambda F/p$ 越大; 系统 MTF 越低, 信噪比越低, 图像高频混叠效应越弱。由于图像混叠现象一旦产生, 处理时不可恢复, 对于微纳遥感载荷在非弱光成像时信噪比问题并不突出, 在系统设计时结合地面调制传递函数补偿 (MTFC) 技术, 重点权衡 MTF、混叠问题, 兼顾信噪比, 选择按照 $\lambda F/p$ 接近于 1 的原则进行系统设计。该方法既可以保证系统具备一定的 MTF 及信噪比, 实现光学系统与探测器像元尺寸的匹配, 减小相机口径, 提高遥感器的性价比, 同时能够限制混叠对图像质量的影响, 结合地面 MTFC 技术, 可以获得像质优良的图像。

成像时通过卫星机动实现对地面固定区域的凝视成像, 可获得目标的动态视频信息, 结合数字 TDI 技术实现面阵相机推扫成像, 大幅提升了面阵相机的数据获取能力, 实现了推扫视频一体化成像。

1.2 系统设计

以一台分辨率为 2 m 的微纳相机为例, 轨道高度为 550 km, 选定的探测器像元尺寸为 $5.5 \mu\text{m}$, 计算得到系统焦距为 1 524 mm, 系统 F 数取 10, $\lambda F/p$ 为 1.02。主要指标见表 1。

相机光学系统采用 RC+校正镜形式, 结合大面阵 CMOS 探测器, 实现系统轻小型化。如图 1 所示, 相机由光机主体、视频控制器两部分组成, 视频控制器按照 PC104 标准研制, 安装在卫星堆栈内。

图 2 所示为相机模装图。光机主体由主镜、次镜、校正镜、主承力板、前镜筒、前镜筒遮光罩、调焦机构、焦面组件及热控等组成, 完成成像、焦面位置调整及温控功能。视频控制器由一次电源板、二次电源板、调焦控制板、视频处理板等电路组成, 完成

图像信号处理、总线通信、调焦控制等功能。

表 1 2 m 微纳相机技术指标

序号	指标名称	参数
1	星下点像元分辨率	1.98 m@550 km
2	光学参数	谱段: 0.42~0.7 μm ; 焦距: 1 524 mm; F : 10; 视场角 $2\omega \geq 1.06^\circ$ (方视场: 0.85°×0.64°)
3	探测器参数	像元尺寸: 5.5 μm ; 像元数量: 4 096×3 072
4	成像幅宽	视频: 优于 8 km×6 km; 推扫: 优于 8 km
5	视频帧频/(f/s)	20
6	量化值/bit	视频模式: 8; 图像模式: 10
7	最大信噪比/dB	≥ 40
8	静态传函	≥ 0.10

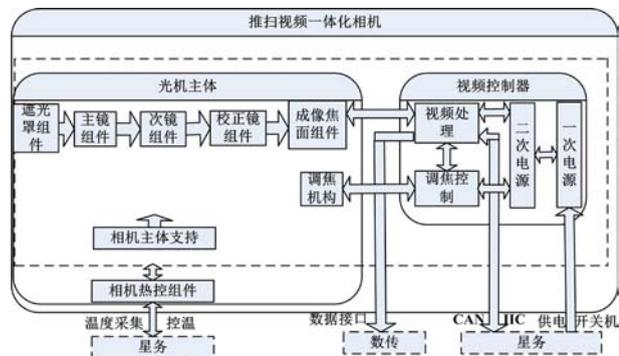


图 1 相机组成框图

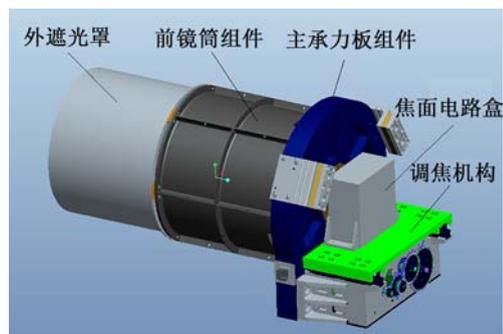


图 2 相机模装图

相机电子学设计以低成本、快速研制为主要原则, 采用商用货架产品设计理念, 通过商用相机后背加固配以工业元器件电路的方案进行产品实现。相机电子学系统按照其功能分为焦面组件与相机控制器, 焦面组件采用面阵 CMOS 图像传感器工业相机, 大大简化了成像电子学电路, 系统框图如图 3 所示。为满足系统轻小型化、低功耗要求, 相机控制器按照 PC104 标准研制, 安装在卫星堆栈内, 以提高

整星的集成度。

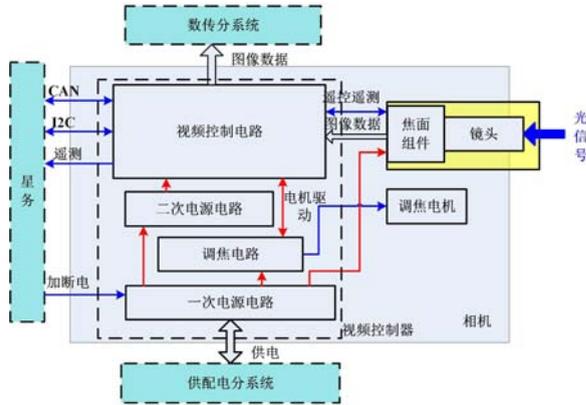
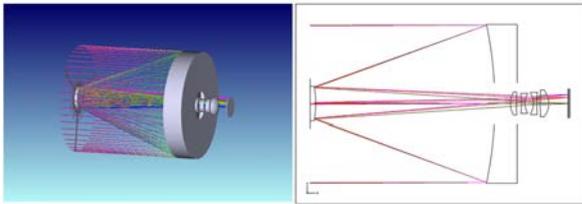


图3 相机电子学系统框图

1.3 系统 MTF 预估

如图4所示,光学系统焦距为1524 mm,视场角较小,结合卫星体积重量约束,选用RC+校正镜系统。该系统对轴外像差的校正能力强、结构紧凑、加工装调容易、适应空间环境能力强、热及压力对焦距影响小、成熟可靠。该系统在空间相机光学系统中使用非常广泛。



(a) 光学系统3D图

(b) 光学系统2D图

图4 光学系统示意图

考虑次镜遮光罩、三根连接杆、主镜中心孔等造成遮拦后光学系统MTF曲线如图5所示,在奈奎斯特频率(91 lp/mm)处各视场平均MTF为0.293。

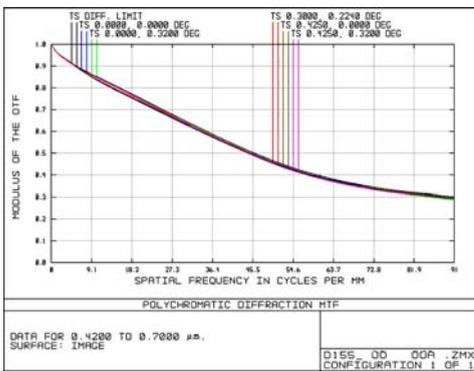


图5 光学系统MTF曲线

本光学系统MTF、畸变、像面照度均匀性、透过

率等指标均满足应用要求,且其工作温度范围、真空离焦等,均符合项目要求。

相机静态MTF主要由镜头、探测器、电子线路的MTF决定,计算公式如下:

$$MTF_{\text{静态}} = MTF_{\text{Opt}} \times MTF_{\text{factor}} \times MTF_{\text{sensor}} \times MTF_{\text{electron}} \quad (1)$$

式中, $MTF_{\text{静态}}$ 为相机静态调制传递函数, MTF_{Opt} 为光学系统设计的调制传递系数, MTF_{factor} 为加工装调质量因子的调制传递函数, MTF_{sensor} 为探测器的调制传递函数, MTF_{electron} 为电子线路影响调制传递函数。

根据初步设计结果及以往型号的研制经验,相机静态MTF指标预计结果如表2所示。

表2 相机静态MTF预计结果

各部分 MTF	数值
镜头	0.293
装调因子	0.87
探测器	0.45
电子线路	0.98
静态 MTF	0.112

将整个成像链路系统看作空间频率的线性系统,且各个单元对调制传递函数进行级联相乘即可确定整个系统的综合调制度响应。系统的总体响应可表示成各个环节传函的乘积。

$$MTF_{\text{动态}} = \prod_{i=1}^n MTF_i \quad (2)$$

推扫模式下可通过减小曝光时间提高MTF,此处按照运动1个像元进行分析,分析结果见表3。

通过地面MTFC算法进行像质提升,实现系统动态 $MTF \geq 0.10$ 。

表3 动态传函分析

各部分 MTF	视频模式	推扫模式
静态传函	0.112	0.112
平台稳定度	0.90	0.90
大气	0.80	0.80
推扫运动	/	0.636
系统动态传函 (MTF补偿前)	0.080	0.066 (两个方向平均)
MTFC	1.5倍	1.5倍
系统动态 MTF	0.12	0.10

1.4 数字TDI技术

时间延迟积分(Time Delay and Integration, TDI)技术是航天遥感应领域的关键技术之一,该技术已广泛应用于CCD探测器中。但基于TDI CCD的相机系统的电子学系统复杂,难以满足微纳

卫星的要求。面阵 CMOS 图像传感器电子学集成度高,通过数字 TDI 的方式可以实现条带推扫成像,同时还可以实现凝视视频等多种工作模式,非常适合微纳卫星系统的应用。

面阵传感器数字 TDI 技术在数字域进行 TDI,与在电荷域进行 TDI 的原理是一致的,都是通过对同一景物多次曝光后进行延迟累加,从而解决单帧推扫成像积分时间不充足的情况。以积分级数 4、帧频为 2 行推扫时间为例,TDI 的原理如图 6 所示。

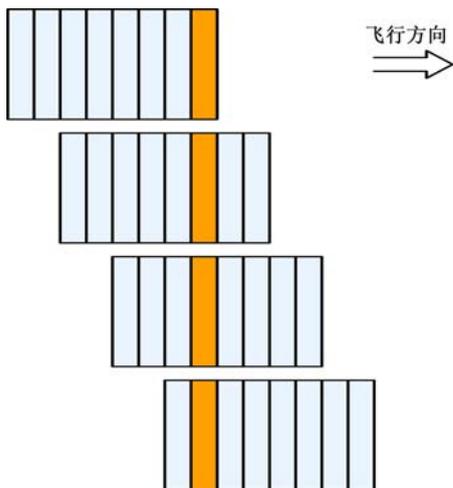


图 6 数字 TDI 原理示意图

在推扫过程中,相机以固定帧频进行面阵成像,设帧频为推扫过两行像元的时间,则第一幅图像与第二幅图像拍摄景物相差两行,进行 TDI 时,需要将这两幅图像按照相差两行像元的位置对位相加,若需要进行 4 级积分,则需要连续拍照四次,将四次图像叠加。面阵传感器所需的有效成像行数为 $2 \times 4 = 8$ 行。数字 TDI 技术仿真效果如图 7 所示。



(a) 原始图像 (b) TDI10 级图像

图 7 数字 TDI 仿真结果

对数字 TDI 技术进行了动态成像专项试验及外景成像试验验证。动态成像专项试验设备由动态景物模拟器、平行光管、靶标等组成,试验过程如下:

1) 搭建光路,使矩形靶标能够在相机中心视场

清晰成像;

2) 设置动态景物模拟器多档转台转速,计算对应的相机成像帧频,并通过地检设备将参数发给相机,控制相机成像;观察成像是否正常,是否存在变形;

3) 设置相机不同的 TDI 级数,观察成像是否正常,是否有明显拖影现象;

4) 采集各级图像,并进行分析。

测试装置及相机采集图像成像效果分别如图 8 和 9 所示。

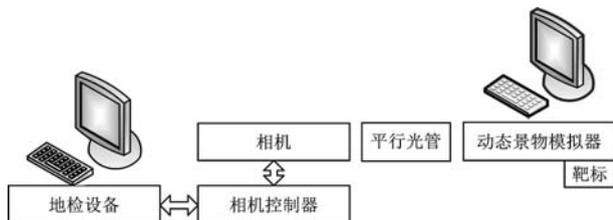
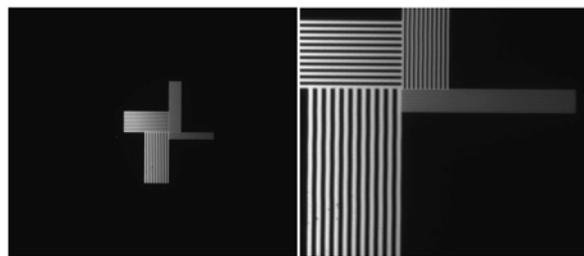


图 8 动态成像试验组成框图



(a) 采集的靶标图像 (b) 靶标局部图像

图 9 数字 TDI 算法验证结果

通过理论分析及试验验证,可以得到如下结果:

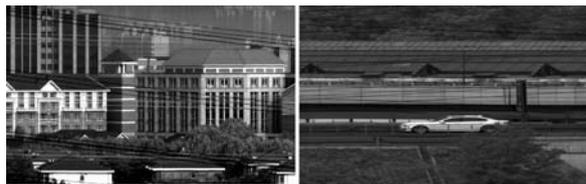
1) 证明了数字 TDI 技术的正确性;

2) 在相同的帧频下,曝光时间减少,可以减少图像运动拖影的影响,提高图像的 MTF,但曝光时间减少到一定程度,图像信噪比下降,MTF 受扰也会下降;

3) 在相同的环境照度下,与增益相比较,TDI 能够明显抑制噪声,达到更优良的图像效果。为了达到最优的成像效果,可以适当降低图像的曝光时间,增加 TDI 级数,仅在非常暗的情况下采用增益获得更大的成像动态范围,通过曝光时间、TDI 级数及增益三个参数匹配,获得尽可能高的 MTF 及信噪比。

相机进行了外景成像试验,试验时使用转台模拟在轨不同速高比,成像效果如图 10 所示。

通过外景成像测试可以看出相机实现了推扫成像及视频成像一体化,数字 TDI 技术得到了验证,成像清晰、像质良好。



(a) 推扫模式下 (b) 视频模式下

图 10 相机在不同模式下采集的图像

1.5 MTFC 技术

MTFC 采用文献[1]基于空域的自适应 MTFC 遥感图像复原算法,该算法根据实验室实测的调制传递函数值,考虑光学系统、探测器与电子元器件等对图像品质的影响,构造有限长脉冲响应计算去卷积核,对图像进行去卷积时根据相机成像所设参数(包括积分级数、增益等)下不同灰度的信噪比信息,兼顾景物内容进行自适应抑噪处理。该方法通过合理的约束,能够很好地避免低信噪比情况下噪声放大过大以及平坦地区高频噪声放大过大。

MTFC 主要补偿相机系统和像移引起的 MTF,具体实施过程如图 11 所示。

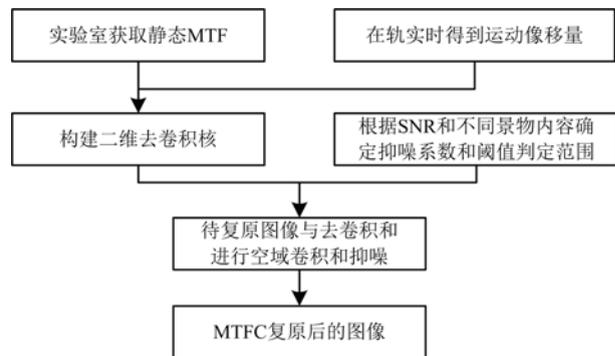
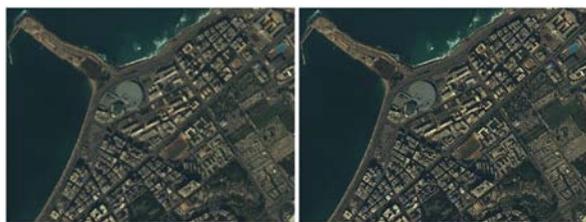


图 11 MTFC 处理流程

通过 MTFC 可把系统 MTF 提高至 0.10 以上。从视觉效果和图像参数对比看,图像质量提升明显,如图 12 所示。



(a) 处理前 (b) 处理后

图 12 MTFC 处理结果

2 验证情况

按照该设计方式完成了欧比特视频相机、某型

推扫视频一体化相机等多套微纳遥感载荷研制,欧比特相机具备视频及条带成像模式,推扫模式在某型推扫视频一体化相机在轨应用中工作良好,地面 MTFC 复原后 $MTF \geq 0.10$ 。

3 总结

针对微纳遥感载荷,采用 $\lambda F/p$ 接近于 1 的思想进行总体参数综合优化,结合地面 MTFC 技术可在保证一定像质的情况下减小载荷口径,用面阵探测器结合数字 TDI 计算实现推扫视频一体化,采用工业级电子学加固方案实现电子学系统,按照该原则设计的遥感载荷数据获取能力强、使用灵活、成本低且像质良好,适用于微纳遥感卫星组网应用需求。后续可进一步优化在星上实现 MTFC,可实现图像质量再次提升。

参考文献:

[1] 周楠,齐文雯,曹世翔,等. 基于空域的自适应 MTFC 遥感图像复原算法[J]. 航天返回与遥感, 2015, 36(4): 54-62.
Zhou Nan, Qi Wenwen, Cao Shixiang, et al. Adaptive MTFC restoration algorithm of remote sensing images based on spatial domain[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2015, 36(4): 54-62.

[2] 叶钊,李熹微,王超,等. 微纳卫星光学载荷技术发展综述[J]. 航天器工程, 2016, 25(6): 122-130.
Ye Zhao, Li Xiwei, Wang Chao, et al. Survey of technological development of optical payload for micro-nano satellite[J]. Spacecraft Engineering, 2016, 25(6): 122-130.

[3] 张科科,乌崇德,傅丹鹰. 采样式成像系统中混叠影响的初步研究[J]. 航天返回与遥感, 2004, 25(4): 50-53.
Zhang Keke, Wu Chongde, Fu Danying. Preliminary research on the influence of aliasing in the sampled imaging system[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2004, 25(4): 50-53.

[4] 陈世平,姜伟. 航天光学采样成像系统 MTF 的优化设计与 MTFC[J]. 航天返回与遥感, 2007, 28(4): 17-27.
Chen Shiping, Jiang Wei. The MTF optimal design and MTFC for spaceborne optical sampled imaging system[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing[J], 2007, 28(4): 17-27.

[5] 金光,钟兴. CCD 光学遥感器参数选择研究[J]. 空间科学学报, 2009, 29(1): 135-139.
Jin Guang, Zhong Xing. Choice of CCD optical remote sensor parameter[J]. Chin. J. Space Sci., 2009, 29(1): 135-139.

[6] Guan L, Ward R K. Restoration of randomly blurred images by the Wiener filter[J]. IEEE Trans. on Acoustics, Speech & Signal Processing, 1989, 37(7): 589-592.

(下转第 282 页)

基于 SVM 的疲劳驾驶人脸图像特征检测算法

刘梦佳, 赵建国

(郑州大学 机械与动力工程学院, 郑州 450052)

摘要: 针对传统图像识别算法对疲劳驾驶检测精度差、准确率低的缺陷,提出了一种利用人脸图像特征提取的疲劳驾驶检测方法。首先将实时采集到的车辆驾驶员面部图像进行预处理,借助 Dlib 检测出图像中的人脸区域并进行人脸图像特征点的标注,然后使用基于眼睛纵横比(Eye Aspect Ratio,EAR)的方法进行图像中人眼疲劳特征的识别,基于嘴唇纵横比(Mouth Aspect Ratio,MAR)的方法进行图像中嘴部疲劳特征的识别,最后利用支持向量机(SVM)的方法将两种特征融合起来进行疲劳驾驶检测。实验表明,该方法可以准确地定位出特征点,疲劳检测的识别率达 84.29%,可以有效地识别出疲劳状态。

关键词: 疲劳驾驶;人脸图像检测;人脸特征点定位;眼睛纵横比;支持向量机

中图分类号: TP391.41 **文章编号:** 1001-5868(2020)02-0278-05

Research on Feature Detection Algorithm of Fatigue Driving Face Image Based on SVM

LIU Mengjia, ZHAO Jianguo

(College of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, CHN)

Abstract: Aiming at the defects of the traditional image recognition algorithm, which has poor precision and low accuracy in fatigue driving detection, an effective evaluation method of fatigue driving detection using face image data is proposed. Through real-time acquisition of the vehicle driver's face image, the face image was preprocessed first, the face area in the image was detected with the help of Dlib and the feature points of the face image were marked, then the eye-aspect-ratio (EAR)-based method was used to recognize the fatigue feature of the human eyes in the image, the mouth-aspect-ratio (MAR)-based method was used to recognize the fatigue feature of the mouth in the image, and finally the support vector machine (SVM) was applied to combine the two features for fatigue driving detection. Experimental results show that the method can locate the feature points accurately, and the recognition rate of fatigue detection reaches 84.29%, which can effectively identify the fatigue state.

Key words: fatigue driving; face images detection; face feature points location; EAR; SVM

0 引言

机动车驾驶员在经过长时间连续行车后,生理机能和心理机能都会不同程度失调或降低,出现注意力不集中、驾驶水平下降的现象。采用疲劳驾驶检测技术对驾车人的状态进行实时监测,发现驾驶员有疲劳迹象及时进行报警,可大大降低因疲劳驾驶而引发的交通事故隐患^[1-2],因此,针对疲劳驾驶

检测的研究具有非常重要的意义。

目前用于疲劳驾驶状态的检测方法主要分为三类,第一类是通过行车数据对驾驶员的疲劳状态进行检测;第二类是通过驾驶员的生理指标进行检测,确定其是否处于疲劳驾驶状态;第三类则是通过图像算法进行疲劳检测。其中,前两类方法存在检测精确度较差,实用性不强的缺陷;在成本、技术和应用的综合对比之下,第三类方法是目前研究领域

内的主流方法,该类方法是利用采集到的人脸视频帧图像,分析人眼的眨眼频率、幅度和闭合时间或者嘴部打哈欠频率等参数进行疲劳检测^[3]。在此类检测方法中,对人脸视频帧图像的检测和人脸特征点的识别及定位是研究的重中之重。

本文利用 Dlib 进行人脸图像的识别和特征点定位,采用基于眼睛纵横比(Eye Aspect Ratio, EAR)的方法采集疲劳和清醒两种状态特征,通过支持向量机(SVM)的方法进行疲劳驾驶的检测。通过实验测试,对比分析了本文提出的检测算法与目前其他疲劳驾驶检测技术(如基于 AdaBoost 的疲劳驾驶检测、基于 YCbCr 颜色空间的疲劳驾驶检测,以及基于 ASM 和 HSV 颜色模型的疲劳驾驶检测)的性能优劣,验证了算法的优越性。

1 提出的疲劳驾驶检测方法

本文提出的方法主要包括图像采集及预处理、人脸检测及特征点定位、提取人眼及嘴部特征、疲劳程度识别。具体工作原理为:首先使用高清摄像头实时采集驾驶员面部的图像并进行图像预处理;接着借助 Dlib 使用人脸识别算法精确定位出人脸,对嘴部和眼睛的特征进行提取;最后通过支持向量机算法进行疲劳驾驶检测。算法流程如图 1 所示。

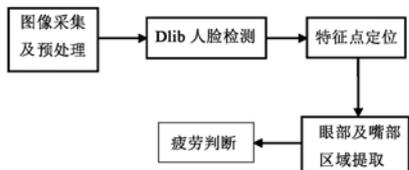


图 1 算法流程设计图

1.1 图像采集及预处理

算法使用 CCD 摄像头实时拍摄采集驾驶员驾驶时的视频,帧频为 30 f/s。将每帧图像保存下来后,进行直方图均衡化,通过直方图均衡化可以调整其灰度分布,达到图像增强的效果^[4]。之后采用中值滤波器对图像进行去噪处理,因为图像受到噪声和背景突变的干扰,会给图像处理运算带来不利的影响^[5]。

1.2 人脸检测及特征点定位

1.2.1 人脸检测

Dlib 是 C++ 的一款开发工具包,主要包含机器学习算法和工具,被广泛应用于工业界和学术界来解决各种现实问题,如嵌入式设备、人工智能和高

性能计算环境等^[6]。现在 Dlib 库提供了 Python 接口,能够在 Python 中直接使用 Dlib 提供的功能。

Dlib 的人脸检测方法是基于图像的 HOG 特征,结合了支持向量机算法实现图像和人脸的检测特征描述功能。HOG 即方向梯度直方图(History of Oriented Gradient),是在现代计算机视觉和数字图像处理中被广泛研究和使用的图像检测算法,是一种可以同时图像和人脸检测的特征描述算子。与其他特征描述子相比,HOG 特征具有对图像的几何变换、光学变化良好的鲁棒性等优点。检测方法的大致思路如下:应用最终训练出的分类器检测人脸图片,对该图像的不同尺寸进行滑动扫描,提取 HOG 特征,并用分类器做分类。如果检测判定为人脸,则将其标定出来,经过一轮滑动扫描后必然会出现同一个人脸被多次标定的情况,因此在图像扫描完成后应用非极大值抑制来消除重叠多余的检出人脸,从而得到最终的人脸检测区域。

1.2.2 特征点定位及提取

人的面部主要由眼睛、鼻子、嘴、下巴等构成,通过对这些局部及它们之间的结构关系进行几何描述,可作为识别人脸的重要特征,我们称之为几何特征^[7]。人脸面部特征的提取识别,即是对人脸的几何特征进行建模的过程。

在检测出人脸区域后,我们借助 Dlib 构建出人脸特征点检测算法,对人脸图像中的 68 个特征点进行标注,然后借助 OpenCv 绘制出脸部图像的 68 个特征点的坐标,如图 2 所示。

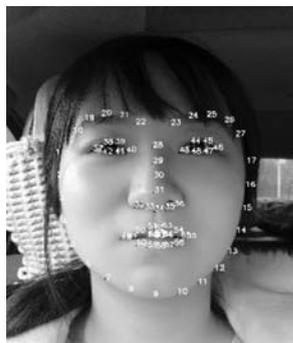


图 2 特征点标注

1.3 疲劳程度识别

1.3.1 基于 EAR 的测评机理

EAR,即眼睛纵横比,它是由 Tereza Soukupova 和 Jan'cech 在 2016 年提出的^[8],可以快捷地通过眼睛地标距离的比例确定一个人是否眨眼,检测效率高。如图 3 所示,将人眼从左角开始,

然后围绕该区域的其余部分顺时针标定出 6 个 (x, y) 坐标, 依次命名为 p_1, p_2, p_3, p_4, p_5 和 p_6 , 可以得到:

$$EAR = \frac{\|p_2 - p_6\| + \|p_3 - p_5\|}{2\|p_1 - p_4\|} \quad (1)$$

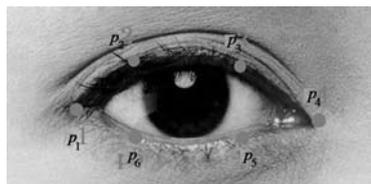


图 3 标定出的人眼区域坐标

当眼睛睁开的时候, EAR 值基本不变, 而当眼睛闭合时, EAR 值将接近于 0。从图 4 中可以看到, 在一段时间之内, EAR 值是相对恒定的, 这表明该段时间眼睛是睁开的; 然后在某一时刻迅速下降到 0, 之后又再次回到恒定的范围, 这表明在这一时刻发生了眨眼。

根据这个原理, 实时监测 EAR 值, 如果在某一时刻数值突然下降, 并且不会再回到初始的数值, 这就表明此时驾驶人已经闭上了眼睛。

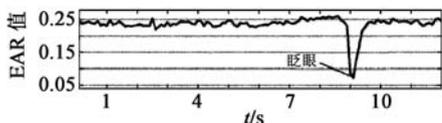


图 4 一段时间内 EAR 值的变化曲线

1.3.2 人眼特征疲劳判断

驾驶员处于疲劳驾驶时, 眼睛会不断眨眼甚至闭合。数据表明: 当驾驶人的眼睛闭合时间超过 2 s 时, 发生交通事故的概率将大大增加。由于疲劳时两眼的动作基本保持一致, 所以取左右眼 EAR 值的均值作为人眼的 EAR 值^[9]。图 5 是根据视频截取的一段处于疲劳状态前后的视频中人眼的 EAR 均值所绘制的。从图中可以看出, 人在正常情况下睁眼的时候 EAR 值都在 0.6~0.9 波动; 每次眨眼

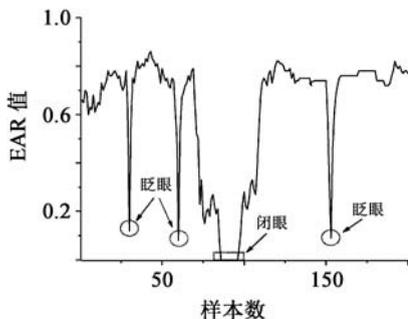


图 5 人眼的 EAR 均值变化曲线

的时候, EAR 值都会迅速下降至 0.1 左右; 在疲劳时, EAR 值先是在 0.2~0.3 左右波动, 然后闭眼的时候, EAR 值会趋近于 0。通过对实验采集的视频中人眼 EAR 值的分析可以得出, 眼睛闭合的临界阈值为 0.3, 当 EAR 值持续 2 s 以上的时间低于 0.3 时, 可以认为这是眼部的一个疲劳特征。

1.3.3 嘴部特征疲劳判断

驾驶员处于疲劳驾驶时, 最常见的反应就是打哈欠, 此时面部表情变化最明显的是嘴部, 可以通过检测驾驶人员的嘴唇区域, 即嘴部开合状态和张开持续时间, 来确定驾驶人是否在打哈欠^[10]。

人在说话、哭泣和大笑时嘴巴都会张开, 但是打哈欠是一个较长的过程且嘴巴张开幅度较大^[11]。它与人眼的生理活动变化类似, 所以可以通过改进 EAR 机理来进行打哈欠的判断。由于嘴部在活动内外嘴唇会一同发生变化, 并且嘴唇区域特征点有 8 个, 所以使用内嘴唇坐标进行计算。嘴唇区域坐标标示示例如图 6 所示, 将人眼特征疲劳识别方法用于嘴部特征疲劳识别中, 得到新的嘴唇纵横比 (Mouth Aspect Ratio, MAR) 的值。MAR 的计算公式如式(2):

$$MAR = \frac{\|p_2 - p_8\| + \|p_3 - p_7\| + \|p_4 - p_6\|}{3\|p_1 - p_5\|} \quad (2)$$

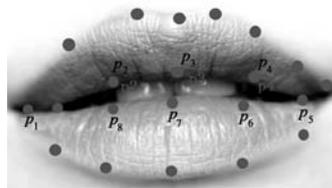


图 6 嘴唇区域坐标标示

同样地, 通过模拟驾驶员在驾驶时进行说话、唱歌和打哈欠的情况, 然后将得到的 MAR 值的变化过程绘制成图 7。从图中可以看出, 正常情况下人

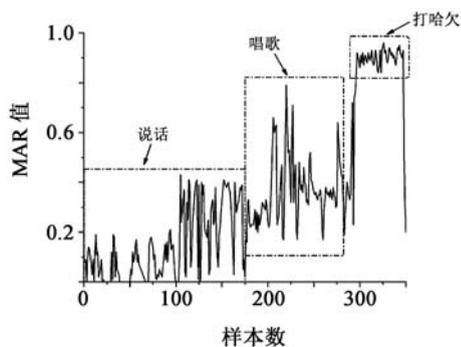


图 7 嘴部的 MAR 值变化

在说话的时候 MAR 值不是太高,唱歌的时候 MAR 值会瞬时增大但不会超过 0.8,而当人打哈欠时, MAR 值会在 0.9 左右波动。通过对实验采集的视频中嘴部 MAR 值的分析,我们发现打哈欠时 MAR 值总是在 0.9 左右,所以可以认为当 MAR 值高于 0.9 时,驾驶员打了一次哈欠,属于嘴部的一个疲劳特征。

2 基于 SVM 的疲劳识别模型

2.1 支持向量机的原理

支持向量机(SVM)最早是由前苏联学者 Vapnik 提出,主要用于非线性回归和模式识别领域,SVM 通过建立一个分类超平面作为决策平面,将正例和反例之间的隔离边缘最大化^[12],从而转化为一个凸二次规划问题进行求解。SVM 具有良好的泛化能力,通过有限训练样本得到小的误差,依然可以保证独立的测试样本,维持较小的误差,同时具有良好的鲁棒性^[13]。

2.2 驾驶疲劳检测原理

由于采集的眼睛和嘴巴特征的数据并不具有规律性,所以此类问题属于非线性分类问题。根据特征发生变化的时间点区分清醒与疲劳状态,将识别出的眼睛的疲劳特征和嘴部的疲劳特征分类为疲劳状态,分类标签为 1;选取 EAR 值平稳波动在高于 0.3 范围内、MAR 值平稳波动在低于 0.9 范围内的 1 min 作为与疲劳特征相反的清醒特征,将它们分类为清醒状态,分类标签为 0。分别从清醒和疲劳状态中随机选取 140 组数据作为实验样本,每个样本中都包含有 EAR 值和 MAR 值。本文采用的向量机模型选用高斯核(Radial Basis Function, RBF)函数,选取惩罚因子 C 为 7,参数 degree 的值为 6,然后随机选取实验样本中的 70 组样本作为训练集对 SVM 进行训练得到分类模型,使用分类模型对剩余的 70 组样本进行测试,识别结果如表 1 所示。按上述步骤再做一组对比实验,只采用 EAR 值,向量机的识别率为 82%;只采用 MAR 值,向量机的识别率为 73%。而表 1 得出的采用 EAR 值和 MAR 值综合分类的识别率为 84.29%。由此可见,将两种特征融合能提高模型识别率。

表 1 支持向量机分类识别

样本数/个	分类标签	清醒状态	疲劳状态	识别率/%
35	0	28	7	80.00
35	1	4	31	88.57

3 算法检测性能对比分析

为了进一步验证本文提出方法的先进性,在相同实验条件下与其他现有疲劳驾驶检测方法进行了对比,如表 2 所示。分别使用 4 种方法在 95 幅人脸图像上进行具体测试。该 95 幅人脸图像的尺寸、背景环境、光照条件均不相同,以便充分验证方法的适用性和有效性。从表 2 可以看出,相比于其他三种疲劳驾驶检测方法,本文方法具有最高的正确检测率 97.89%,验证了其有效性。虽然基于 YCbCr 颜色空间的疲劳驾驶检测的正确检测率也能达到 97.89%,但是本文方法的平均检测时间仅为 0.193 2 s,即时性较强。

表 2 人脸图像检测结果对比

疲劳驾驶检测方法	检测数量	正确数量	正确检测率/%	平均检测时间/s
基于 AdaBoost 的疲劳驾驶检测 ^[14]	95	89	93.68	0.211 4
基于 YCbCr 颜色空间的疲劳驾驶检测 ^[15]	95	93	97.89	0.197 5
基于 ASM 和 HSV 颜色模型的疲劳驾驶检测 ^[16]	95	92	96.84	0.235 7
本文方法	95	93	97.89	0.193 2

4 结论

本文通过实时采集驾驶员的人脸图像,并定位、识别出人脸图像中眼睛和嘴巴两个特征,计算出实时的 EAR 和 MAR 值,通过进一步的数据对比确定各自的变化阈值,将它们作为判定指标来收集清醒和疲劳两种状态的样本,然后使用支持向量机的方法进行疲劳驾驶检测,测试的识别率达到 84.29%,对比采用单一的特征进行检测,识别率有较大的提升,说明特征融合能够提高系统判别的准确性。在相同实验条件下与其他现有疲劳驾驶检测方法进行了对比,进一步验证了所提算法的优越性。

参考文献:

- [1] 梁昭德. 基于卷积神经网络的驾驶人疲劳检测算法研究[D]. 广州:华南理工大学, 2018.
Liang Zhaode. Study on fatigue driving detection algorithm based on convolutional neural networks[D]. Guangzhou: South China University of Technol., 2018.
- [2] 耿欣. 基于小波变换和神经网络的疲劳驾驶检测技术的研究[D]. 沈阳:东北大学, 2012.
Geng Xin. Study of neural classification of drive fatigue using wavelet analysis [D]. Shenyang: Northeastern University, 2012.

- [3] 唐杰, 陈仁文, 余小庆. 基于卷积神经网络的车载疲劳驾驶检测系统的实现[J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(1): 116-121.
Tang Jie, Chen Renwen, Yu Xiaoqing. Implement of vehicle fatigue driving detection system based on convolutional neural network[J]. Foreign Electronic Measurement Technol., 2018, 37(1): 116-121.
- [4] 葛小凤. 基于人眼检测的驾驶员疲劳检测算法研究[D]. 南充: 西华师范大学, 2017.
Ge Xiaofeng. The research on driver fatigue detection algorithm based on eye detection[D]. Nanchong: China West Normal University, 2017.
- [5] 李强. 基于PERCLOS的列车司机驾驶疲劳检测研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
Li Qiang. Research on train driver's fatigue detection based on PERCLOS[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [6] 刘春平, 高翔, 张建伟, 等. 基于人脸关键点的表情实时动态迁移[J]. 现代计算机(专业版), 2019(2): 41-45.
Liu Chunping, Gao Xiang, Zhang Jianwei, et al. Live dynamic transfer of facial expression based on landmarks of face[J]. Modern Computer(Professional), 2019(2): 41-45.
- [7] 于怡佳. 浅析人脸识别技术在政务服务领域中的应用[J]. 机电产品开发与创新, 2017, 30(5): 40-41, 39.
Yu Yijia. A brief analysis of the application of face recognition technology in government services [J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2017, 30(5): 40-41, 39.
- [8] Tereza Soukupova, Jan' cech. Real-time eye blink detection using facial landmarks [J]. 21st Computer Vision Winter Workshop, 2016(3): 3-5.
- [9] 曹国震, 彭寒, 谭伟. 基于多特征模糊融合的疲劳状态判决[J]. 火力与指挥控制, 2017, 43(4): 96-100.
Cao Guozhen, Peng Han, Tan Wei. Decision of fatigue state based on characteristics' fuzzy fusion [J]. Fire Control & Command Control, 2017, 43(4): 96-100.
- [10] 张丽雯, 杨艳芳, 齐美彬, 等. 基于面部特征的疲劳驾驶检测[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2013, 36(4): 448-451.
Zhang Liwen, Yang Yanfang, Qi Meibin, et al. Detection of fatigue driving based on facial features [J]. J. of Hefei University of Technology(Nature Science Edi.), 2013, 36(4): 448-451.
- [11] 耿磊, 袁菲, 肖志涛, 等. 基于面部行为分析的驾驶员疲劳检测方法[J]. 计算机工程, 2018, 44(1): 274-279.
Geng Lei, Yuan Fei, Xiao Zhitao, et al. Driver fatigue detection method based on facial behavior analysis [J]. Computer Engineering, 2018, 44(1): 274-279.
- [12] 王小川, 史峰, 郁磊. Matlab神经网络43个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2013.
Wang Xiaochuan, Shi Feng, Yu Lei. Analysis of 43 Cases of Matlab Neural Network [M]. Beijing: Beihang University Press, 2013.
- [13] 李敏, 李江天, 宋战兵. 基于支持向量机的驾驶疲劳检测研究[J]. 数字制造科学, 2019, 17(2): 131-135.
Li Min, Li Jiangtian, Song Zhanbing. Detection of driving fatigue based on support vector machine [J]. Digital Manufacture Science, 2019, 17(2): 131-135.
- [14] 刘朝涛, 张雪佼. 基于图像处理的疲劳驾驶预警研究[J]. 电子技术应用, 2019, 45(8): 104-108.
Liu Chaotao, Zhang Xuejiao. Research on fatigue driving warning based on image processing [J]. Application of Electronic Technique, 2019, 45(8): 104-108.
- [15] 旷文腾, 毛宽诚, 黄家才, 等. 基于高斯眼白模型的疲劳驾驶检测[J]. 中国图象图形学报, 2016, 21(11): 1515-1522.
Kuang Wenteng, Mao Kuancheng, Huang Jiakai, et al. Fatigue driving detection based on sclera Gaussian model [J]. J. of Image and Graphics, 2016, 21(11): 1515-1522.
- [16] 徐柱, 何锋, 华星淇, 等. 基于AdaBoost算法的疲劳驾驶检测系统研究[J]. 汽车技术, 2019(5): 21-25.
Xu Zhu, He Feng, Hua Xingqi, et al. Research on fatigue driving detection system based on AdaBoost algorithm [J]. Automobile Technology, 2019(5): 21-25.

作者简介:

刘梦佳(1994—),女,河南郑州人,硕士研究生,主要研究方向为数字图像处理与模式识别;

赵建国(1964—),男,河南郑州人,硕士,副教授,主要研究方向为产品数字化设计、装配理论及应用、图形图像处理技术与图学理论及应用。

E-mail: liumengjia2345@sohu.com

Graphics, 2006, 11(9): 1299-1305.

作者简介:

胡永富(1982—),男,江苏丰县人,硕士研究生,高级工程师,主要从事微纳遥感相机设计研制工作,获得多项专利。

E-mail: 122016882@qq.com

(上接第 277 页)

- [7] Hunt B R. The application of constrained least squares estimations to image restoration by digital computer[J]. IEEE Trans. on Computer, 1973, 22(9): 805-812.
- [8] 陈强, 戴奇燕, 夏德深. 基于MTF理论的遥感图像复原[J]. 中国图像图形学报, 2006, 11(9): 1299-1305.
Chen Qiang, Dai Qiyan, Xia Deshen. Restoration of remote sensing images based on MTF theory [J]. J. of Image and

基于双层次决策规则的红外与可见光图像融合

王芳莲¹, 李喜艳²

(1. 郑州电子信息职业技术学院 电子工程系, 郑州 451450; 2. 中国人民解放军信息工程大学 网络空间安全学院, 郑州 450001)

摘要: 针对传统可见光和红外图像融合方法存在融合图像中缺失方向性信息和各向异性信息的问题,提出了一种基于双层次决策规则的红外与可见光图像融合方法。该方法将各向异性扩散(Anisotropic Diffusion, AD)和极值规则进行融合,首先通过AD滤波器将每个输入的源图像分解为近似层和细节层。然后将双层次融合决策规则分别应用于细节层和近似层,以保留光谱信息和结构信息,最后使用结构相似性指数(SSIM)、平均梯度(AG)和信息熵(IE)对融合图像的图像质量进行评估。实验结果表明,相比现有其他图像融合方法,所提方法的融合图像中具有更多的信息并有效减少了伪影现象,验证了所提出方法的有效性。

关键词: 图像融合; 红外图像; 可见光图像; 信息熵; 各向异性扩散

中图分类号: TP391.41 **文章编号:** 1001-5868(2020)02-0283-04

Infrared and Visible Image Fusion Based on Two-Level Decision Rules

WANG Fanglian¹, LI Xiyang²

(1. Department of Electronic Engineering, Zhengzhou Professional Technical Institute of Electronics & Information, Zhengzhou 451450, CHN; 2. College of Cyberspace Security, Information Engineering University of The PLA, Zhengzhou 450001, CHN)

Abstract: Aiming at the problem that the traditional visible and infrared image fusion methods usually present missing directional and anisotropic information in the fusion image, a two-level decision rule based infrared and visible image fusion method is proposed. This method fuses anisotropic diffusion (AD) and extreme value rules. Firstly, an AD filter is used to decompose each input source image into an approximation layer and a detail layer. Then, the two-level fusion decision rules are applied to the detail layer and the approximation layer, respectively, to preserve the spectral information and structural information. Finally, the structural similarity index (SSIM), average gradient (AG), and information entropy (IE) can be used to evaluate the image quality of the fused image. Experimental results show that compared with other existing image fusion methods, the fusion image of the proposed method in this paper can obtain more information and effectively reduce the artifacts, which verifies the effectiveness of the proposed method.

Key words: image fusion; infrared image; visible image; information entropy; anisotropic diffusion

0 引言

图像融合是一种对具有互补信息的不同来源图像进行合成的方法,融合图像可以有效增强人的视

觉感知能力。图像融合的目的是得到一个新图像,该新图像具有输入图像的互补特征和共同特征^[1]。涉及可见光和红外光成像传感器的多传感器图像融合可用于各种领域,包括智能检测、导航、安防监控、军事侦察以及卫星遥感等^[2-3]。

可见光图像由可见光谱散射形成,而红外图像

收稿日期:2019-12-11.

基金项目:2018年度河南省科技厅科技攻关项目(182102210540).

由热辐射产生并与亮度有关。在恶劣的天气环境或者夜间环境条件下,需要将可见光传感器和红外线传感器进行结合。为了形成具有增强表示的目标场景,要求形成的合成图像尽量避免丢失细节信息^[4-6]。近年来,很多学者对图像融合问题进行了大量研究,例如对离散小波变换(Discrete Wavelet Transform, DWT)^[7]和拉普拉斯金字塔(Laplacian Pyramid, LP)等分辨率分解方法^[8]进行了探讨,或者对经验模式分解(Experience Mode Decomposition, EMD)、独立成分分析(Independent Component Analysis, ICA)等数据驱动方法^[9]进行了分析。在基于主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)原理的基础上,各种基于像素决策规则的图像融合技术(包括强度色相饱和度,极大、极小、平均和加权平均图像融合)等多种融合机制已得到广泛使用。此外,双边滤波器等多种边缘保留和平滑方案也被广泛用于图像融合。但是这些方法会产生梯度反转伪影和晕轮效应。文献[10]使用极大亮度值方法研究了小波融合技术,但融合后的图像出现了对比度降低和模糊不清的问题。文献[11]通过选择极大像素强度并结合PCA进行了融合,但是其所获得的融合图像对比度和照度较低。研究发现,这些方法的结果缺乏方向性信息和各向异性,并且在融合图像中包含伪影。

为了克服上述机制的缺陷,本文使用各向异性扩散(AD)滤波器进行过滤并进行多次迭代,目的是将图像像素分离并处理为两个层次:近似层和细节层。基于AD的方法使用区域内平滑技术,可以保留边缘并去除伪影。源图像的AD处理可同时保留高频信息和对比度。基于极大和极小的双层次融合决策方法改善了融合图像中的冗余信息,并增强了细节特征。利用AD对源图像进行分解,并对近似层应用极小规则,对细节层应用极大规则,以产生最终的融合图像。SSIM, AG和IE等图像指标参数的评估结果显示,本文提出的融合方法具有较高的研究价值和意义。

1 新的可见光与红外光图像融合方法

从上述分析可知,需要从融合图像中去除伪影和冗余信息,以便使最终结果包含两个源图像的互补信息。因此,需要AD和Max-Min的组合,从而实现可见光和红外光图像的融合,即通过结合使用AD和双层次决策规则来执行可见光和红外光图像

融合。双层次融合决策规则需要选择出输入图像每个对应像素的极大和极小像素,以便形成输入图像的合成像素。它有助于抑制冗余信息,并突出显示源图像中具有极大信息的部分。

1.1 各向异性扩散(AD)过滤

文献[12]对源图像执行非线性滤波以产生基础层,并将其命名为各向异性扩散滤波器。这是一个不均匀的过程,可以在可能存在边缘的位置上降低扩散率。图像 I 的各向异性扩散方式如下:

$$I_i = p(m, n, t)\Delta I + \nabla p \cdot \nabla I \quad (1)$$

其中, $p(m, n, t)$ 为通量函数,也被称为扩散率, Δ 和 ∇ 分别表示拉普拉斯算子和梯度算子, t 为迭代次数。式(1)的求解方法为

$$I_{m,n}^{t+1} = I_{\min}^t + \lambda [c_N \overline{\nabla}_N + c_S \overline{\nabla}_S + c_W \overline{\nabla}_W] I_{m,n}^t \quad (2)$$

其中, $I_{m,n}^{t+1}$ 表示较粗糙的图像,其大小取决于之前的较粗糙图像比例。 λ 值的范围为: $0 \leq \lambda \leq 1/4$,取值越大越平滑。 $\overline{\nabla}_N, \overline{\nabla}_S, \overline{\nabla}_E$ 和 $\overline{\nabla}_W$ 表示在各个方向上的最邻近距离。在四个方向上对当前像素求偏导,其公式如下:

$$\begin{cases} \overline{\nabla}_N I_{m,n} = I_{m,n-1} - I_{m,n} \\ \overline{\nabla}_S I_{m,n} = I_{m,n+1} - I_{m,n} \\ \overline{\nabla}_E I_{m,n} = I_{m-1,n} - I_{m,n} \\ \overline{\nabla}_W I_{m,n} = I_{m+1,n} - I_{m,n} \end{cases} \quad (3)$$

文献[12]进一步提出了如下两个公式:

$$s(\nabla I) = e^{-\langle \|\nabla I\|/c \rangle^2} \quad (4)$$

$$s(\nabla I) = \frac{1}{1 - (\|\nabla I\|/c)^2} \quad (5)$$

式(4)和(5)调节平滑和边缘保持。其中, c 是热传导系数,用来控制边缘的灵敏度,取值越大越平滑,越不易保留边缘。研究发现,AD滤波器克服了高斯模糊的缺陷,具有保留图像边缘细节的能力,且抗噪声能力较强。因此,常规AD滤波器可有效缓解多传感器图像融合存在的方向性信息和各向异性缺乏问题。

1.2 基于AD与双层次决策规则结合的图像融合算法

为了进一步降低伪影现象,本文提出了基于AD与双层次决策规则相结合的图像融合算法。预处理的第一步是将两个源图像从RGB图像转换为灰度图像。预处理后,使用AD处理可见光和红外光图像(源图像)。在两个源图像上均应用AD过滤

器后,可以获得基础层。提出图像融合算法的详细执行步骤如下:

步骤 1:输入源图像 A_1 和 A_2 。

步骤 2:通过 AD 分解源图像,以获得基础层 B_1 和 B_2 ,具体实现方法为:1)使用式(1)确定源图像的扩散率;2)使用式(4)和(5)生成基础层。

步骤 3:细节层 D_1 和 D_2 可以通过从源图像中减去基础层来获得,如式(6)所示:

$$D_k(m, n) = A_k(m, n) - B_k(m, n) \quad (6)$$

其中, $D_k(m, n)$ 是细节层, $A_k(m, n)$ 是源图像, $B_k(m, n)$ 是基础层。

步骤 4:使用式(7)给出的极大融合规则,对两个输入源图像的细节层进行融合:

$$D_k(m, n) = \max(D_k^1(m, n), D_k^2(m, n)) \quad (7)$$

步骤 5:使用式(8)给出的极小融合规则,对两个输入源图像的基础层进行融合:

$$B_k(m, n) = \min(B_k^1(m, n), B_k^2(m, n)) \quad (8)$$

步骤 6:使用极大规则将基础层和细节层组合在一起,以获得最终结果,如式(9)所示:

$$F_k(m, n) = \min(B_k(m, n), D_k(m, n)) \quad (9)$$

其中, $F_k(m, n)$ 是所产生的融合图像。使用提出的融合算法生成最终的重建图像并计算其 SSIM, AG 和 IE 性能指标。

2 实验结果与讨论

2.1 实验数据集与配置

为了评估所提出算法的性能,将其与 DTZ^[9], V-NSCT^[10]和 BEMD^[11]进行了比较。在一组经典的数据集上进行了具体仿真实验,该数据集来自常用图像融合数据集网站 www.imagefusion.org 的红外与可见光序列图数据库。所有算法均在 MATLAB R2014a 中实现。测试程序在 64 位 Windows7 的个人计算机上进行,配置为 16 GB RAM 和 Intel Core i7-4940MX 3.3 GHz CPU。

2.2 图像融合结果分析

该组可见光和红外光图像的融合是通过应用 AD 将其分解为基础层来实现的。使用极大和极小融合规则作为融合算法,进一步突出细节层,并维持源图像中的基础层框架。红外与可见光测试数据集的基础层和细节层分解如图 1 所示。

在相同的一组数据集上,4 种不同方法的可见光和红外光图像融合结果,如图 2 所示。从图 2 可以看出,相比于其他三种图像融合方法,本文所提方

法得到的图像融合结果在主观视觉效果上具有较为明显的改善,更符合人们的视觉特性,即在保留图像细节信息、增加信息量方面得到了有效提升。这是因为本文所提方法能够提取源图像的区域特征和纹理特征,从而使得所获得的融合图像同时包含了两个源图像的互补特征信息。通过这些特征信息可以验证所提出融合方法的有效性。因此主观指标上,本文所提方法得到的融合图像视觉效果优于其他融合算法得到的图像。

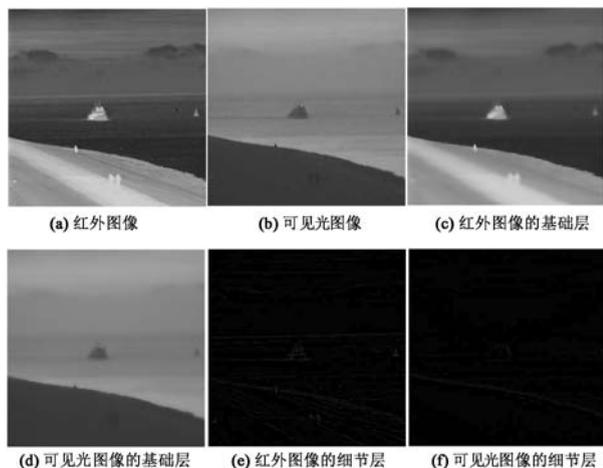


图 1 基础层和细节层分解结果

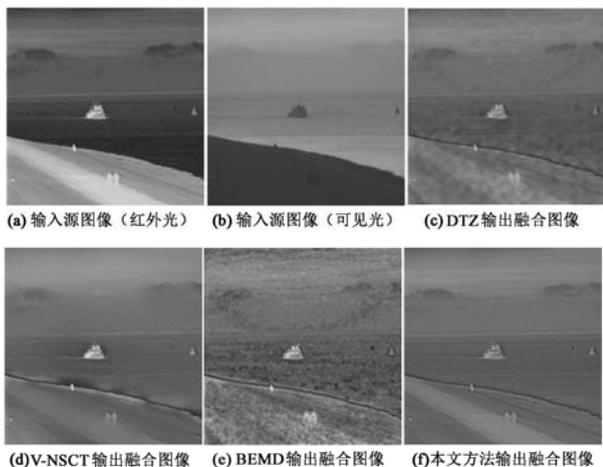


图 2 可见光图像和红外光图像进行融合后的结果

2.3 客观质量评估与对比

为了评估所提出算法的性能,将其与 DTZ^[9], V-NSCT^[10]和 BEMD^[11]进行了比较。使用结构相似性指数(SSIM)、平均梯度(AG)和信息熵(IE)对融合图像的图像质量进行了评估。

SSIM 的计算方式如下:

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \quad (10)$$

其中, μ_x 和 μ_y 分别表示图像 x 和 y 的均值, σ_x 和 σ_y 分别表示图像 x 和 y 的标准差, c_1 和 c_2 均为常数。AG 的计算方式如下:

$$AG = \sum_m \sum_n (S(m, n) - \bar{S})^2 \quad (11)$$

$$S(m, n) = \sqrt{G_x(m, n)^2 + G_y(m, n)^2} \quad (12)$$

其中, G_x 和 G_y 分别为通过 Sobel 梯度算子得到的纵横方向的梯度值, \bar{S} 为平均梯度值。

IE 的计算方式如下:

$$IE = - \sum_i P(x_i) \log_2 P(x_i) \quad (13)$$

其中, x_i 表示随机变量, $P(x_i)$ 表示输出概率函数。

对于三个评估指标, 均是其值越大则表示图像融合效果越好, 反之, 图像融合失真或者模糊。因此, 使用这三个指标参数可以对图像融合质量进行客观量化评估。

各种图像融合方法的客观指标对比结果如表 1 和图 3 所示。从表 1 和图 3 可以看出, 相比其他方法, 本文所提方法在所有的融合质量客观评价指标上均有一定程度的提高。相比于文献[9]中的 DTZ 方法, 本文方法得到的 IE 提高了约 4.48%, 这表明其融合图像中的信息量很大。此外, 越高的 SSIM 值表示源图像和融合图像之间的结构相似度越高。而相比于文献[9]中的方法, 本文图像融合方法得到的 SSIM 提高了约 14.7%。这表明所提方法的融合图像中具有更多的信息并有效减少了伪影现象。

表 1 各种图像融合方法的客观指标对比结果

指标	红外与可见光图像融合方法			
	DTZ	V-NSCT	BEMD	本文方法
IE	6.423 6	6.572 6	6.640 7	6.711 8
AG	6.592 6	6.802 4	6.927 1	7.124 1
SSIM	0.753 4	0.830 2	0.803 7	0.864 2

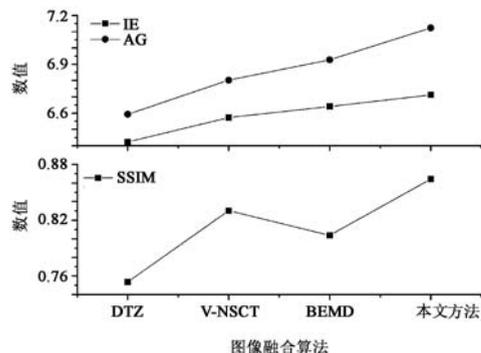


图 3 几种算法的 SSIM, AG 和 IE 对比

3 结论

本文提出了一种基于各向异性扩散和双层决策规则的可见光图像和红外光图像融合方法。通过源图像的 AD 处理, 可以保留大量的高频信息, 从而得到了比其他多分辨率分解技术更好的结果。基于 AD 和基于极大-极小的图像融合方法有效减少了伪影现象, 多个图像融合质量指标结果均得到了提高。为了进一步提高图像融合方法的性能, 后续研究将尝试把 AD 与 Karhunen-Loeve (KL) 变换、非下采样 Contourlet 变换相结合, 并尝试应用于可见光/毫米波图像融合。

参考文献:

- [1] Wei Chunyu, Zhou Bingyin, Guo Wei. Multi-focus image fusion based on nonsubsampling compactly supported shearlet transform[J]. Multimedia Tools & Applications, 2017, 77(16): 1-32.
- [2] Soundrapandian R. An efficient DWT and intuitionistic fuzzy based multimodality medical image fusion[J]. Inter. J. of Imaging Systems & Technol., 2017, 27(2): 118-132.
- [3] Davis M J, Ihinger P D. New controlled rapid quench technique in a 1 atm infrared image furnace[J]. American Mineralogist, 2015, 84(2): 48-54.
- [4] Li Z, Miao T J. Image fusion based on CS of DWT-IRLS[J]. Chinese J. of Liquid Crystals & Displays, 2017, 32(1): 35-39.
- [5] Zhang Hengwei, Ji Xiang, Zhao Wei, et al. Jamming effect of laser on infrared thermal imagers automatic gain control circuit[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2011, 23(9): 2325-2328.
- [6] Wu Wei, Yang Xiaomin, Li Hong, et al. A novel scheme for infrared image enhancement by using weighted least squares filter and fuzzy plateau histogram equalization[J]. Multimedia Tools & Applications, 2017, 76(54): 1-29.
- [7] 龚昌来, 罗 聪, 杨冬涛, 等. 一种基于平稳小波域的红外图像增强方法[J]. 激光与红外, 2013, 43(6): 703-707. Gong Changlai, Luo Cong, Yang Dongtao, et al. Infrared image enhancement method based on stationary wavelet domain[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(6): 703-707.
- [8] 陈永亮, 王华彬, 陶 亮. 自适应动态峰值剪切直方图均衡化[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(1): 167-171. Chen Yongliang, Wang Huabin, Tao Liang. Adaptive dynamic clipped histogram equalization title[J]. Computer Engin. and Applications, 2015, 51(1): 167-171.
- [9] 杨 桃, 童 涛, 陆松岩, 等. 基于多特征的红外与可见光图像融合[J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 489-496.

(下转第 290 页)

CCD 图像传感器电极间漏电流自动化测试系统设计

郭利, 周建勇, 何达, 何昌海, 尹俊, 唐遵烈, 袁世顺

(重庆光电技术研究所, 重庆 400060)

摘要: CCD图像传感器电极间漏电流是反映CCD器件可靠性的一个关键参数,在CCD图像传感器的生产过程中,对其电极间漏电流测试是一个重要的检测筛选环节。基于一种漏电流自动化测试方法,设计了一种CCD电极间漏电流自动化测试系统。该系统可根据不同种类CCD器件,自定义被测信号名称、测试通道地址和测试判据,通过计算机软件控制自动循环扫描,自动采集漏电流数据,形成标准测试报表。该系统具有设置灵活、操作方便、自动化测试等优点,可有效提升CCD生产检查筛选过程中的测试效率和测试设备的通用性。

关键词: CCD图像传感器; 电极间漏电流; 自动化测试

中图分类号: TN386.5 **文章编号:** 1001-5868(2020)02-0287-04

Design of Automated Test System for Leakage Current between Electrodes of CCD Image Sensor

GUO Li, ZHOU Jianyong, HE Da, HE Changhai, YIN Jun, TANG Zunlie, YUAN Shishun
(Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: Leakage current between electrodes of charge coupled device (CCD) image sensors is a key parameter affecting the reliability of CCD, thus the measurement of leakage current is very important for the detection and screening in the production process of CCD image sensors. In this paper, based on an automatic test method of leakage current, an automated test system for leakage current between CCD electrodes is designed. The signal name, test channel address and the test criterion can be customized according to different types of CCDs, and automated cycle scanning operations are controlled by computer software to collect leakage current data to form a standard test report automatically. This automated test system presents the advantages of flexible setting, convenient operation and automated testing, which can effectively improve the testing efficiency and equipment versatility in the production and screening processes of CCDs.

Key words: CCD image sensor; leakage current between electrodes; automated test

0 引言

随着研究技术的进步,CCD图像传感器向着多品种、多样化、多功能方向发展,在空间遥感、精确制导、微光夜视等领域得到广泛应用^[1-2]。

CCD内部控制电荷收集、转移的单元——MOS电容结构由大面积相互交叠的栅电极构成^[3],交叠处通常由厚度约为100 nm的二氧化硅介质进行隔

离。但制作过程的材料、工艺质量或使用过程中受静电放电损伤,都有可能产生漏电流,从而导致暗电流增加等现象^[4-5],影响产品的可靠性,降低产品的使用寿命。检测CCD电极间的漏电流是衡量器件可靠性的一种关键技术途径。传统的漏电流测试一般采用人工手动测试的方式,覆盖范围不够全面,测试效率低下。基于此,本文提出一种漏电流自动化测试方法,设计了一种CCD电极间漏电

流自动化测试系统,该系统可快速准确地测试 CCD 器件电极漏电情况,有效剔除容易早期失效的低可靠性器件。

1 测试原理

构成 CCD 的基本单元是 MOS(金属-氧化物-半导体)结构^[6]。在刻蚀、氧化、注入等半导体制作工艺过程中^[7],由于工艺偏差导致相邻 MOS 结构的栅电极之间或与衬底之间隔离度不够,形成潜在的低阻抗通路(如图 1 所示),会影响电极电压对体内耗尽区电势的控制能力,从而影响 CCD 转移效率、电荷电压转换效率等关键指标。

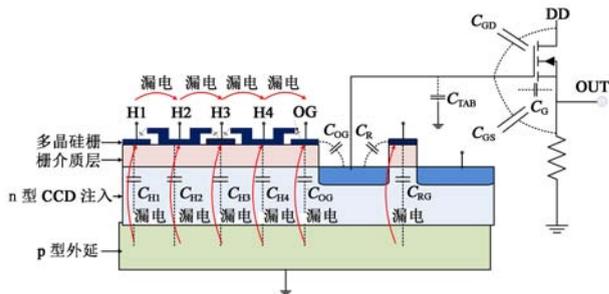


图 1 CCD 电极结构漏电基本原理示意图

为了测试器件电极间漏电流,本文设计如图 2 所示的电流测试回路,在被测电极上施加电压,其余电极短路在一起接入电源负端,回路中串联高精度皮安表。在无光照条件下,给器件被测引线端加载规定的直流测试电压,通过电流计可以得到电极间的漏电流。

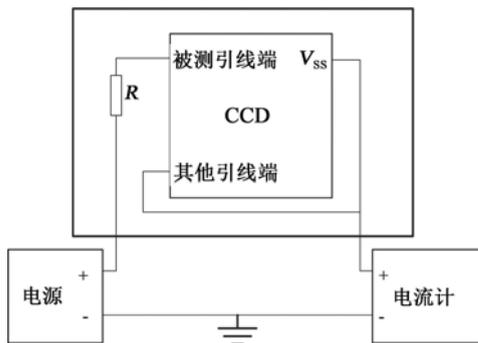


图 2 电极间漏电流测试原理框图

2 测试系统设计

2.1 测试系统硬件设计

测试系统设计主要由单片机、移位寄存器、反向器、单刀双掷(SPDT)继电器、串口电路、单触发按钮开关及 CCD 载体转接板组成。配合相关的外围

接口电路和计算机,使用智能控制采集软件,实现对 CCD 图像传感器漏电流的测试。本测试装置具有手动和自动两种测试方式,可实现对多种 CCD 图像传感器器件电极间漏电流的测量。测试系统的工作原理框图如图 3 所示。

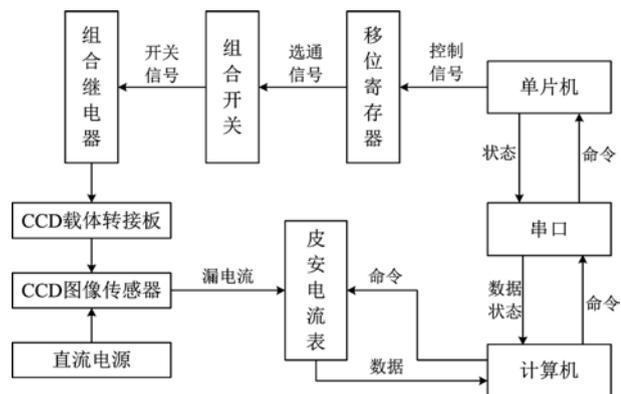


图 3 测试系统原理框图

自动切换测试电路原理如图 4 所示。本测试电路选用单刀双掷继电器,采用 SPDT 继电器排列组合,通过选通电路由单片机控制 SPDT 开关选通引线端待测管脚。在测试电路中添加一个 1 MΩ 的限流保护电阻 R_1 ,用以防止电源加电出现过冲对 CCD 器件的损伤。在 CCD 所有引线端管脚的 SPDT 开关处连接一个 500 kΩ 的静电保护电阻 R_2 至 GND,确保测试后将单元 MOS 剩余的电容电荷有效放电。

在测试电路中,针对不同的 CCD 器件,需配接相对应的 CCD 载体转接板,连接电流表,形成漏电流测试单元电路。在测试不同的 CCD 电极间漏电流时,选择对应的 SPDT 继电器单元电路连接至直流电源输入端,通过计算机智能控制采集软件操作,使用单片机控制,对 CCD 引线端管脚单通道选通,实现 CCD 电极间漏电流的测试功能。

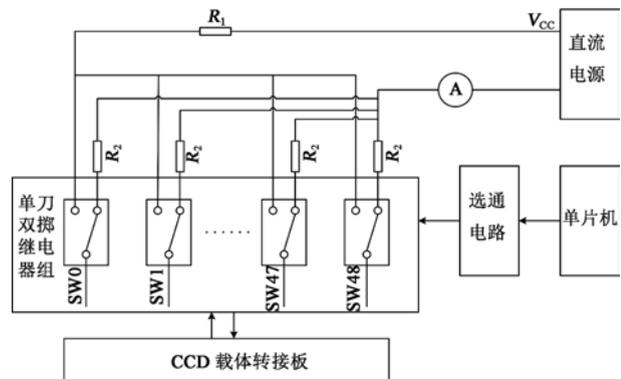


图 4 自动切换测试电路原理图

选用单刀双掷 SPDT 继电器,将其进行排列组合,针对 CCD 器件多管脚漏电流测试需要,可实现对 CCD 器件 49 个单元管脚电极间的漏电流测试。测试电路在实际使用中,可调标准直流电源的范围为 0~32 V。电流表选用的是 Tektronix 公司的 Keithley 6485 皮安表。

2.2 自动测试的软件实现

测试系统中的计算机使用智能控制采集软件,通过 RS-232 串口通信接口,实现对 CCD 管脚的地址配置设置、测试结果的记录与保存,以及自动循环测试等功能。计算机智能控制采集软件操作界面如图 5 所示。



图 5 智能控制采集界面

在进行 CCD 电极间漏电流测试前,首先要对器件的被测试引线端进行初始选定配置并保存。下例为一款 CCD 器件,根据测试需要对所需测试的 20 个被测试引线端进行了配置并保存。

根据配置表定义,生成配置表如图 6。



图 6 配置表图

本系统可自动进行 CCD 电极间漏电流测试,并将测试结果保存至指定文件表格内。针对栅电极间对地漏电流的测试要求,测试指定管脚对地漏电流时,在计算机智能控制采集软件操作界面上选定器件编号,选定测试电压、采样前置和采样间隔,完成

加载配置后,选定开始测试。自动测试结果保存并形成测试报表。软件流程图如图 7 所示。

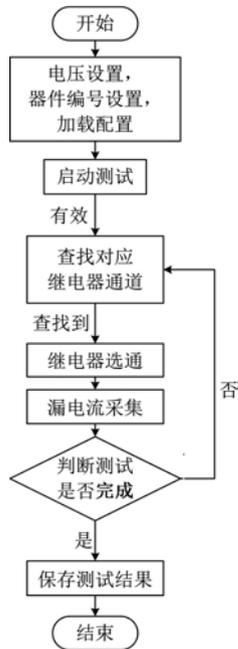


图 7 软件控制流程图

3 测试结果

使用 CCD 电极间漏电流参数测试装置,对多个批次 CCD 器件的被测试引线端进行了漏电流测试。以某一批次 CCD 器件为例,被测器件加载测试电压为 12 V。测试漏电流结果如表 1。

从表 1 测试结果可以看出,编号为 FY-3-7 的器件有两个栅电极漏电,漏电流值严重偏移正常值范围,判定此器件已经损坏。

经过对多个批次 CCD 芯片漏电流的测试验证,表明该系统能准确无误地筛选出损坏器件。由此可见该 CCD 电极间漏电流自动化测试系统完全能满足各类常用 CCD 芯片的漏电流测试。

4 结论

本文设计了一种自动化 CCD 电极间漏电流测试系统。该测试系统能够实现 CCD 电极间漏电流的自动化测量,大大提高了器件筛选效率。该系统适用于各类常规 CCD 器件,能对不同批次的器件进行分析,精确判断出漏电流值,准确定位 CCD 异常现象的原因。该系统还具有自动化、高效率、高精度、通用性强等优点,可为 CCD 制作过程中工艺流程的改进和优化提供可靠的实际测试数据支撑。

表 1 垂直栅异常 CCD 漏电测试结果(单位: μA)

器件编号		FY-3-3	FY-3-6	FY-3-7	FY-3-2	FY-3-8	FY-3-5
存储区时钟相 1	M1	0.003	0.001	0.001	0.001	0.012	0.001
存储区时钟相 2	M2	0.002	0.001	0.001	0.001	0.003	0.002
存储区时钟相 3	M3	0.002	0.001	0.001	0.001	0.009	0.001
存储区时钟相 4	M4	0.002	0.001	0.001	0.001	0.003	0.002
光敏区时钟相 1	S1	0.004	0.001	0.001	0.001	0.012	0.001
光敏区时钟相 2	S2	0.003	0.001	10.877	0.001	0.003	0.001
光敏区时钟相 3	S3	0.002	0.001	10.896	0.001	0.002	0.001
光敏区时钟相 4	S4	0.005	0.001	0.001	0.001	0.006	0.001
A 区水平时钟相 1	$\Phi 1A$	0.000	0.001	0.001	0.001	0.060	0.001
A 区水平时钟相 2	$\Phi 2A$	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001
A 区水平时钟相 3	$\Phi 3A$	0.001	0.001	0.000	0.000	0.042	0.002
A 区水平时钟相 4	$\Phi 4A$	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001
B 区水平时钟相 1	$\Phi 1B$	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
B 区水平时钟相 2	$\Phi 2B$	0.003	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
B 区水平时钟相 3	$\Phi 3B$	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
B 区水平时钟相 4	$\Phi 4B$	0.003	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
复位时钟	VRG	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.002
输出栅	VOG	0.001	0.001	0.001	0.001	0.003	0.003
场收集	V_{col}	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.003
复位漏	VRD	0.003	0.002	0.001	0.001	0.001	0.003

参考文献:

- [1] 王俊波. CCD 图像传感器技术与应用[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2004.
Wang Junbo. CCD Image Sensor Technology and Applications [M]. Chengdu: Press of University of Electronic Science and Technol., 2004.
- [2] 练敏隆, 王世涛. 基于 ICCD 的空间微光成像系统成像性能研究[J]. 航天返回与遥感, 2007, 28(3): 6-10.
Lian Minlong, Wang Shitao. Research on the imaging performance of space low light level imaging system based on ICCD[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2007, 28(3): 6-10.
- [3] 周立伟. 光电子成像: 走向新的世纪[J]. 北京理工大学学报, 2002, 22(1): 1-12.
Zhou Liwei. Photoelectronic imaging: Towards the new century[J]. J. of Beijing Institute of Technol., 2002, 22(1): 1-12.

- [4] Bosiers J T, Peters I M, Draijer C, et al. Technical challenges and recent progress in CCD imagers[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2006, 565(1): 148-156.
- [5] Sopczak A, Aoulmit S, Bekhouche K, et al. Radiation hardness studies in a CCD with high speed column parallel readout[J]. J. Instrumentation, 2008, 5(5): 05007.
- [6] 王庆有. CCD 应用技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 2000.
Wang Qingyou. CCD Application Technology [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2000.
- [7] 顾祖毅, 田立林, 富力文. 半导体物理学[M]. 北京: 电子工业出版社, 1995.
Gu Zuyi, Tian Lilin, Fu Liwen. Semiconductor Physics [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 1995.

作者简介:

郭利(1963—),男,工程师,从事 CCD 器件参数测试工作。

E-mail: guoli1963@163.com

(上接第 286 页)

- Yang Guang, Tong Tao, Lu Songyan, et al. Fusion of infrared and visible images based on multi-features [J]. Optics and Precision Engin., 2014, 22(2): 489-496.
- [10] Fu Zhizhong, Wang Xue, Li Xiaofeng. Infrared and visible image fusion based on visual saliency and NSCT[J]. J. of University of Electronic Science & Technol. of China, 2017, 46(2): 357-362.
- [11] Zhu P, Huang Z H. Fusion of infrared and visible images based on BEMD and GFL[J]. J. of Optoelectronics • Laser,

2017, 28(10): 1156-1162.

- [12] Ma Xiaoshuang, Shen Huanfeng, Zhang Liangpei, et al. Adaptive anisotropic diffusion method for polarimetric SAR speckle filtering[J]. IEEE J. of Sel. Top. in Appl. Earth Observations & Remote Sensing, 8(3): 1041-1050.

作者简介:

王芳莲(1981—),女,河南郑州人,本科,讲师,研究方向为计算机应用和电子信息技术。

E-mail: wangfanglianzz@126.com

针对联合变换相关器加密系统的光学唯密文攻击系统

彭凯飞, 沈学举, 黄富瑜

(陆军工程大学石家庄校区 电子与光学工程系, 石家庄 050003)

摘要: 针对混合输入输出(HIO)等数值攻击算法攻击联合变换相关器(JTC)加密系统运行时间长、攻击效率低的问题,设计了一种基于光路迭代的光学唯密文攻击系统。该系统充分利用了光学系统高速并行处理的特点,通过光束在光学系统中的光学傅里叶变换取代在计算机上的数字傅里叶变换,显著缩短了攻击算法的运行时间,有效提高了对JTC加密系统的攻击效率。仿真结果表明,相较于HIO攻击算法,在迭代次数相同的条件下,基于光路迭代的光学唯密文攻击系统有效减少了算法的运行时间,显著提高了对JTC加密系统的攻击效率。

关键词: 光学信息安全; 联合变换相关器; 唯密文攻击; 空间光调制器

中图分类号: O438.2 **文章编号:** 1001-5868(2020)02-0291-05

Optical Ciphertext-only Attack System for Joint Transform Correlator Encryption System

PENG Kaifei, SHEN Xueju, HUANG Fuyu

(Department of Opto-Electronics Engineering, Campus of Shijiazhuang, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, CHN)

Abstract: Aiming at the problem that the numerical attack algorithms such as hybrid input-output (HIO) algorithm attack the JTC encryption system with long running time and low attack efficiency, an optical ciphertext-only attack system based on optical path iteration is designed. The system utilizes the characteristics of high-speed parallel processing of optical system, and replaces the digital Fourier transform by optical Fourier transform, which significantly reduces the running time of the algorithm and effectively improves the attack efficiency. The simulation results show that compared with the HIO algorithm, the optical ciphertext-only attack system effectively reduces the running time of the algorithm and significantly improves the attack efficiency of the JTC encryption system under the same number of iterations.

Key words: optical security; joint transform correlator; ciphertext-only attack; spatial light modulator

0 引言

自1995年基于4-f系统的双随机相位编码技术(DRPE)被提出以来^[1],光学图像加密技术凭借其天然的并行性和快速处理的优势,受到众多研究者的关注,逐渐成为研究热点,多种加密技术相继被提出。例如,基于分数傅里叶变换的加密技术、基于鬼成像的加密技术、基于涡旋光束的加密技术和基于联合变换相关器(JTC)的加密技术。其中,JTC

光学加密系统由于具有不需要制作复共轭密钥、密钥模板不需要精确对准及加密图像是灰度图像,便于记录和传输等优点^[2-6],是实用性好的一种光学图像加密系统,在光学图像加密中被广泛应用。

近年来,研究者还通过采用选择明文攻击(CPA)、已知明文攻击(KPA)^[7]、唯密文攻击(COA)^[8-10]等方法对JTC加密系统进行了安全性分析。其中选择明文攻击和已知明文攻击需要获取更多信息才能对JTC加密系统进行有效攻击,而唯密文攻击仅使用密文即可有效攻击出明文,其实用性更强。目前为止,研究者们对于JTC加密系统的

收稿日期:2019-10-12.

基金项目:国家自然科学基金项目(61801507).

唯密文攻击研究主要以在计算机上的数值攻击为主,受计算机硬件条件限制较大,影响了光学信息技术并行高速的优点,攻击效率低。为此,本文设计了一种针对 JTC 加密系统的光学唯密文攻击系统。该系统利用光学系统并行高速的特点,通过在光路中反复进行相位迭代,完成了对 JTC 加密系统的唯密文攻击。

1 JTC 加密系统及混合输入输出算法

1.1 JTC 加密系统

JTC 加密系统^[11]示意图如图 1(a)所示,其中透镜的焦距为 f 。以输入面中心为原点建立平面直角坐标系,将待加密图像 $f(x, y)$ 与随机相位模板 $r(x, y)$ 叠加置于输入面物窗口,其中心坐标为 $(-a, 0)$;将另一随机相位模板 $k(x, y)$ 作为密钥置于输入面密钥窗口,其中心坐标为 $(a, 0)$,其中两随机相位模板均值为 0,且各自独立分布。准直激光束入射加密系统后,经光学傅里叶变换在频谱面由 CCD 记录联合功率谱,即加密图像^[2]:

$$E(u, v) = | \mathcal{F}\{f(x+a, y)\} \cdot r(x+a, y) + k(x-a, y) \|^2 = | F(u, v) * R(u, v) |^2 + | K(u, v) |^2 + [F(u, v) * R(u, v)]^* K(u, v) \cdot \exp[-j2\pi(2a)u] + [F(u, v) * R(u, v)]K(u, v)^* \cdot \exp[-j2\pi(-2a)u] \quad (1)$$

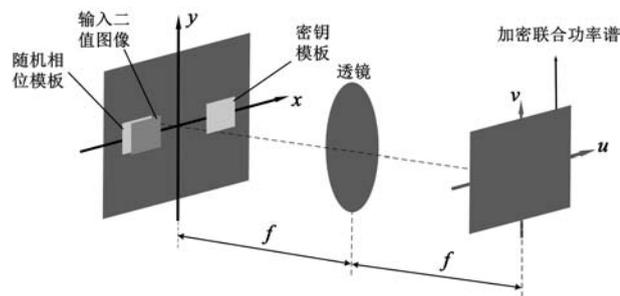
式中, $F(u, v), R(u, v), K(u, v)$ 分别为 $f(x, y), r(x, y), k(x, y)$ 的傅里叶变换,“ $*$ ”代表卷积,“ $[\]^*$ ”代表复共轭, (u, v) 代表频谱域坐标, $u = x'/\lambda f, v = y'/\lambda f$ 。

JTC 解密系统^[11]如图 1(b)所示,将密钥 $k(x, y)$ 置于解密系统输入面,其中心坐标为 $(a, 0)$,将 CCD 记录得到的加密图像置于解密系统频谱面中心。准直激光束入射解密系统后,密钥经光学傅里叶变换在频谱面上形成解密光束,解密光束通过密文后经傅里叶逆变换在解密系统输出面的光场分布为^[2]

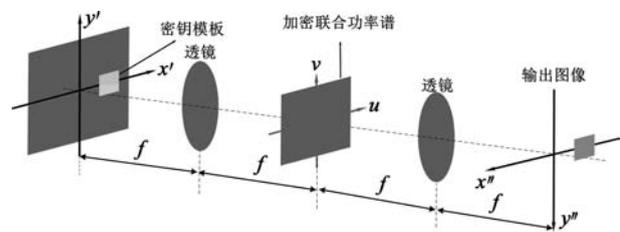
$$g(x'', y'') = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}\{k(x-a, y)\}P(u, v)\} = k(x'', y'') * [r(x'', y'')c(x'', y'')] \otimes [r(x'', y'')c(x'', y'')] * \delta(x''-a, y'') + k(x'', y'') * \delta(x''-a, y'') + k(x'', y'') * k(x'', y'') \otimes [r(x'', y'')c(x'', y'')] * \delta(x''-3a, y'') + r(x'', y'')c(x'', y'') * \delta(x''+a, y'') \quad (2)$$

式中,“ \otimes ”代表相关, (x'', y'') 为解密系统输出面坐

标。式(2)中第四项的强度分布即为原始图像,当式中各项所示的光场中心间距足够大时,空间上相互分离,使用 CCD 可在 $(-a, 0)$ 处记录解密图像。



(a) JTC 加密系统示意图



(b) JTC 解密系统示意图

图 1 JTC 加、解密系统示意图

1.2 混合输入输出算法

1971 年, Gerchberg 提出了通过光场强度信息恢复输入和输出平面上光场相位信息的算法^[11], 即 GS 算法。在 GS 算法的基础上, 通过利用输入面物面位置支撑在空域对迭代过程约束, 形成了混合输入输出(HIO)算法^[9-10]。该算法收敛速度相对于 GS 算法有很大提升。

算法中使用的判据是均方差 (Mean Square Error, MSE), 定义为

$$MSE = \frac{1}{N \times M} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M [g(i, j) - |g_{k+1}(i, j)|]^2 \quad (3)$$

其中, j, i 分别是图像像素的横、纵坐标, N, M 分别是图像横、纵坐标像素总数, g 是原始图像, g_{k+1} 是攻击过程中第 k 次迭代后的估算图像。MSE 越接近于 0, 说明迭代攻击所得到的图像和原始图像越接近, 当 MSE 小于预先设定的阈值, 迭代过程则结束, 反之, 继续迭代。一般而言, 攻击判据 MSE 取的数值越小, 攻击结果越接近原始图像。

设 $E(\xi, \eta)$ 为待攻击的加密图像, $g_{k+1}(x, y)$ 是攻击过程中第 k 次迭代后的估算图像, 初始图像 $g_1(x, y)$ 是一个任意生成的随机图像。迭代从随机生成的图像 $g_k(x, y)$ 开始, 下面以第 k 次迭代为例, 介绍 HIO 算法, 其原理示意图如图 2 所示。首

先对第 $k-1$ 次迭代得到的 $g_k(x, y)$ 进行傅里叶变换, 得到 $\mathcal{F}\{g_k(x, y)\} = |G_k(\xi, \eta)| \exp[i\Phi_k(\xi, \eta)]$, 其中 $|G_k(\xi, \eta)|$ 为光场振幅, $\exp[i\Phi_k(\xi, \eta)]$ 为光场相位。然后判断加密图像的振幅 $\sqrt{E(\xi, \eta)}$ 与 $|G_k(\xi, \eta)|$ 是否满足 MSE 判据, 若满足则说明已达到了攻击要求, 迭代过程结束, $g_k(x, y)$ 为攻击结果。若不满足 MSE 判据, 则使用加密图像的振幅 $\sqrt{E(\xi, \eta)}$ 取代傅里叶变换 (FT) 得到光场的振幅 $|G_k(\xi, \eta)|$ 。然后对 $\sqrt{E(\xi, \eta)} \exp[i\Phi_k(\xi, \eta)]$ 进行傅里叶逆变换 (IFT), 得到 $\mathcal{F}^{-1}\{\sqrt{E(\xi, \eta)} \exp[i\Phi_k(\xi, \eta)]\} = g'_k(x, y)$, 再在空域利用输入面、物面位置支撑得到第 k 次迭代后的估算图像:

$$g_{k+1}(x, y) = \begin{cases} g'_k(x, y) & x, y \in \gamma \\ g_k(x, y) - \beta g'_k(x, y) & x, y \notin \gamma \end{cases} \quad (4)$$

其中, γ 为输入面物窗口与密钥窗口内点的集合。 β 为迭代常数, 影响迭代收敛速度以及算法是否收敛, 一般根据经验选取。

按上述过程反复迭代即可攻击出原始图像。

由于 HIO 算法等数值攻击算法主要在计算机上实现, 过于依赖计算机硬件的支持, 当处理大量数据时, 随着迭代次数的增多, 算法中的两次傅里叶变换会占用更多时间, 算法攻击效率将会骤减。

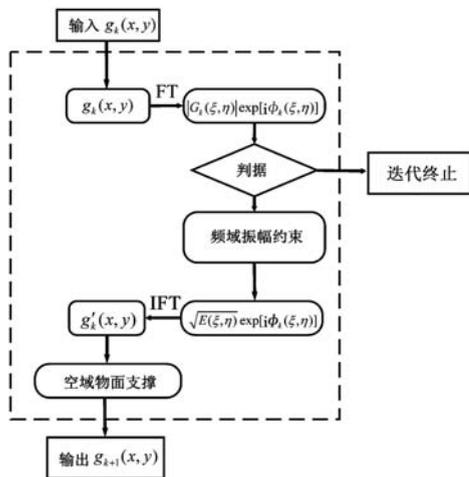


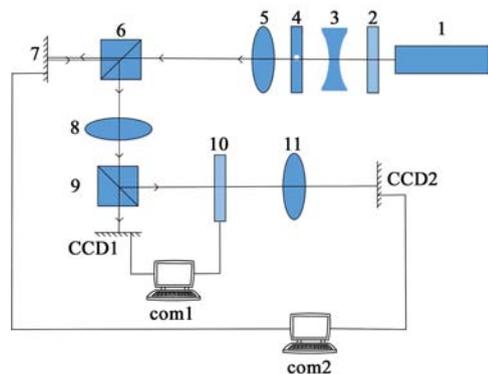
图2 HIO算法原理示意图

2 针对 JTC 加密系统的光学唯密文攻击系统

针对 HIO 算法等数值攻击算法效率低的问题, 利用光学信息系统天然的并行性及处理速度快的特点, 提出了基于光路迭代的唯密文攻击算法, 并设计

了一套针对 JTC 加密系统的光学唯密文攻击系统。

针对 JTC 加密系统的光学唯密文系统示意图如图 3 所示, 从 He-Ne 激光器发出的激光束经可调衰减器衰减后, 得到强度合适的激光束。激光束再经扩束准直系统和小孔光阑后, 得到准直激光束。在反射式空间光调制器上加载第 $k-1$ 次迭代得到的估算图像 $g_k(x, y)$ (初始加载随机图像), 对准直激光束进行调制, 得到振幅为 $g_k(x, y)$ 的光束。振幅为 $g_k(x, y)$ 的光束通过第一块傅里叶透镜, 在其频谱面上得到复振幅为 $|G_k(\xi, \eta)| \exp[i\Phi_k(\xi, \eta)]$ 的光束, 由 CCD1 记录其振幅 $|G_k(\xi, \eta)|$ 。电脑 1 (com1) 对已知的带攻击加密图像的振幅 $\sqrt{E(\xi, \eta)}$ 以及 CCD 记录的光束振幅 $|G_k(\xi, \eta)|$ 进行计算, 若其满足 MSE 判据则迭代结束, $g_k(x, y)$ 为攻击结果, 否则控制透射式空间光调制器, 使其将光束的振幅 $|G_k(\xi, \eta)|$ 调制为 $\sqrt{E(\xi, \eta)}$, 从而得到复振幅为 $\sqrt{E(\xi, \eta)} \exp[i\Phi_k(\xi, \eta)]$ 的光束, 该光束通过第二块傅里叶透镜, 在其频谱面上得到振幅为 $g'_k(x, y)$ 的光束, 由 CCD2 记录其振幅。电脑 2 (com2) 通过式 (4) 计算得到第 k 次迭代的估算图像 $g_{k+1}(x, y)$ 。



1. He-Ne 激光器; 2. 可调衰减器; 3, 5. 扩束准直系统; 4. 小孔光阑; 6, 9. 分光棱镜; 8, 11. 傅里叶透镜; 7. 反射式空间光调制器; 10. 透射式空间光调制器

图3 针对 JTC 加密系统的光学唯密文攻击系统示意图

3 数值仿真

为验证所设计的针对 JTC 加密系统的光学唯密文攻击系统的正确性, 仿真 JTC 加密系统的加、解密及使用所设计系统攻击 JTC 加密系统的过程。仿真时使用的原始灰度图像为 200×200 像素的灰度图像, 如图 4 所示。激光波长为 632.8 nm , 傅里叶透镜焦距为 400 mm 。空间光调制器像元数为 1920×1080 , 像元间距为 $8 \mu\text{m}$ 。CCD 像元数为

768×576, 像元尺寸为 8 μm。

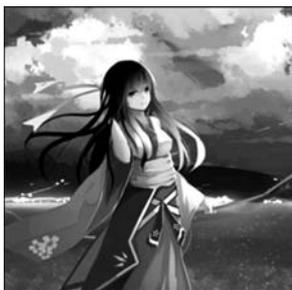


图4 原始图像

3.1 JTC 加解密过程仿真

直接加密图4所示的灰度图像时,输入面两窗口大小均为 200×200 像素,物窗口中心坐标为 (-200,0),密钥窗口中心坐标为 (200,0)。所用随机相位模板 $r(x,y)$ 和密钥模板 $k(x,y)$ 分别如图5(a)、(b)所示。按式(1)计算联合功率谱,并根据文献[12]中的消噪音方法消除直流项以及密钥共轭项,得到加密图像如图5(c)所示;将密钥 $k(x,y)$ 置于输入面,其中心坐标为 (200,0),将消噪音处理后的加密图像置于频谱面中心,在输出面上通过式(2)计算得到的解密图像如图5(d)所示。

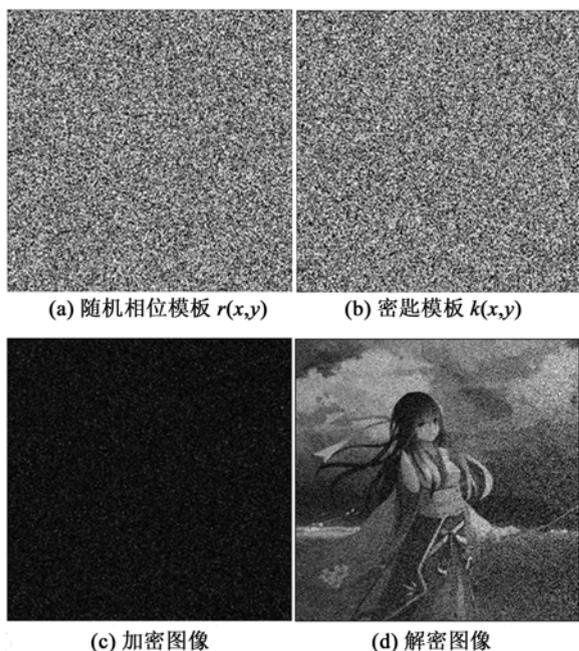


图5 JTC 加解密仿真结果

3.2 攻击过程仿真

仿真攻击图5(c)所示的加密图像时,随机生成的初始估算图像 $g_1(x,y)$ 如图6所示,将其上载反射式空间光调制器,在第一块傅里叶透镜的频谱面上使用 CCD 记录光场的振幅 $|G_1(\xi,\eta)|$,然后传

输给电脑1,电脑1使用 MSE 判据判断是否完成攻击,未达 MSE 判据则通过电脑1控制透射式空间光调制器将光场的振幅调制为图5(c)所示图像的振幅 $\sqrt{E(\xi,\eta)}$ 。然后在第二块傅里叶透镜的频谱面上使用 CCD 记录光场振幅 $g'_1(x,y)$,然后传输给电脑2,电脑2利用式(4)得到估算图像 $g_2(x,y)$,再上载至反射式空间光调制器。重复以上步骤,直至满足 MSE 判据。仿真结果如图7所示,其中图7(a)~(d)分别是迭代次数为 200,500,1000 和 2000 时攻击结果,其 MES 分别为 0.0673,0.0036,0.0032 和 0.0014。可以看出,随着迭代次数的增加,MSE 逐渐减小,攻击所得图像越接近原始图像。

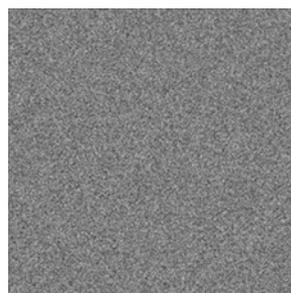


图6 初始估算图像

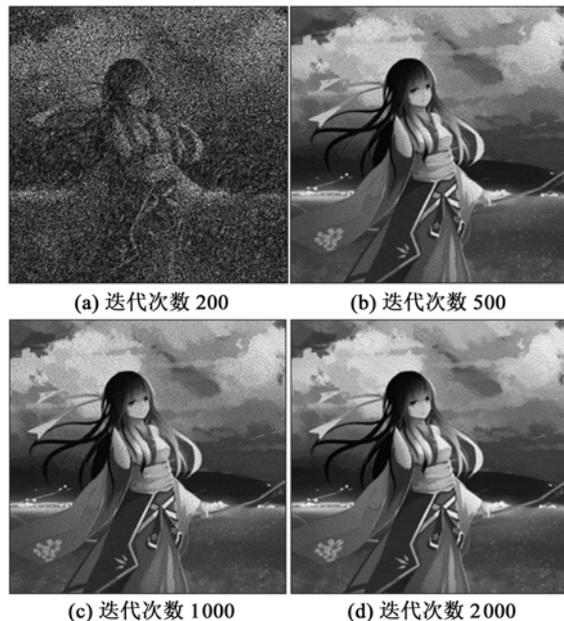


图7 攻击仿真结果

图8为 MSE 随迭代次数变换曲线,可以看出当迭代次数小于 500 时,随着迭代次数的增加,MSE 逐渐减小,当迭代次数大于 500 时,MES 基本保持不变。

HIO 算法的核心在于两次傅里叶变换以及频

域振幅约束、空域物面关系约束,其中傅里叶变换占用算法运行时间更多。而本文设计的光学攻击系统采用的光学傅里叶变换,以光速进行,几乎不占用算法运行时间,该算法运行时间仅需要考虑两次约束占用的运行时间。图9为HIO算法和本文所设计的光学攻击系统运行时间和迭代次数关系的对比图。可以看出,本文所设计的光学攻击系统有效节约了算法运行时间,特别是傅里叶变换占用的时间,所以其运行时间远少于HIO算法,有效提升了对JTC加密系统的攻击效率。这在数据量较大、迭代次数较大的情况下尤为明显。

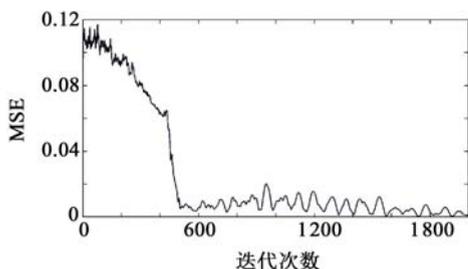


图8 MSE随迭代次数变化曲线

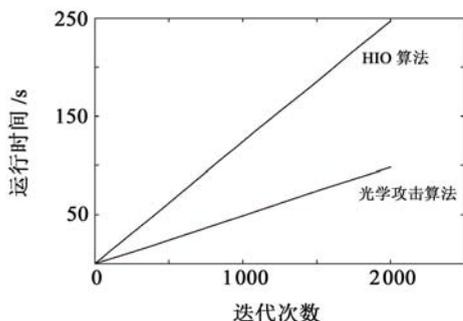


图9 两种算法运行时间随迭代次数变化的对比

4 结论

本文提出了一种针对JTC加密系统的光学唯密文攻击系统,通过在光学系统中反复迭代实现了对JTC加密系统的攻击。由于利用了光学系统高速并行的特点,因此该算法的攻击效率要远优于HIO算法等传统数值攻击算法。对JTC加密系统攻击的仿真验证了所设计系统的正确性。仿真结果表明,随着迭代次数的增加,得到的攻击图像MSE逐渐减小,攻击效果越好。相同条件下,光学攻击算法的运行时间远少于HIO算法,在数据量较大、迭代次数较大的情况下尤为明显。

参考文献:

[1] Refregier P, Javidi B. Optical image encryption based on input plane and Fourier plane random encoding[J]. Opt. Lett.,

1995, 20(7): 767-769.

- [2] Nomura T, Javidi B. Optical encryption using a joint transform correlator architecture[J]. Opt. Engin., 2000, 39(8): 2031-2035.
- [3] Amaya D, Tebaldi M, Torroba R, et al. Wavelength multiplexing encryption using joint transform correlator architecture[J]. Appl. Opt., 2009, 48(11): 2099-2104.
- [4] Liu J, Bai T Z, Shen X Z, et al. Parallel encryption for multi-channel images based on an optical joint transform correlator[J]. Opt. Commun., 2017, 396: 174-184.
- [5] Vilardy J M, Millan M S, Perez-Cabre E. Nonlinear image encryption using a fully phase nonzero-order joint transform correlator in the Gyrator domain[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2017, 89: 88-94.
- [6] John B F, Myrian T, Roberto T, et al. Experimental multiplexing of encrypted movies using a JTC architecture[J]. Opt. Express, 2012, 20(4): 3388.
- [7] Barrera J F, Vargas C, Tebaldi M, et al. Known-plaintext attack on a joint transform correlator encrypting system[J]. Opt. Lett., 2010, 35(21): 3553-3555.
- [8] 彭翔, 汤红乔, 田劲东. 双随机相位编码光学加密系统的唯密文攻击[J]. 物理学报, 2007, 56(5): 2629-2636.
Peng Xiang, Tang Hongqiao, Tian Jindong. Ciphertext-only attack on double random phase encoding optical encryption system[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(5): 2629-2636.
- [9] Zhang C, Liao M, He W, et al. Ciphertext-only attack on a joint transform correlator encryption system [J]. Opt. Express, 2013, 21(23): 28523.
- [10] Fienup J R. Phase retrieval algorithms: a comparison[J]. Appl. Opt., 1982, 21(15): 2758-2769.
- [11] 彭凯飞, 沈学举, 黄富瑜, 等. 基于灰度图像二值编码的JTC多图像加密系统[J]. 半导体光电, 2019, 40(5): 737-741, 748.
Peng K F, Shen X J, Huang F Y, et al. Joint transform correlator encryption system based on binary coding for gray image[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(5): 737-741, 748.
- [12] 沈学举, 刘旭敏, 蔡宁, 等. 非线性JTC光学图像加密系统及其消噪和抗攻击特性研究[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0709003.
Shen X J, Liu X M, Cai N, et al. Nonlinear image encryption system based on JTC and its removing noise and resisting attack properties research[J]. Chinese J. of Lasers, 2015, 42(7): 0709003.

作者简介:

彭凯飞(1994—),男,山东省泰安人,主要研究方向为光通信和光学信息安全;

沈学举(1963—),男,博士,教授,主要研究方向为光信息处理。

E-mail: shxjoptics@aliyun.com

基于 SSD 的实时轻量级无人机检测算法

王若霄^{1,2}, 徐智勇¹, 张建林¹

(1. 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对当前无人机检测算法普遍不能做到快速准确检测的问题,提出了一种基于 SSD 的改进实时轻量级无人机检测算法——TSSD。首先,针对 SSD 算法的骨干网络权重参数量大的问题,改进得到一种轻量级的骨干网络。其次,针对 SSD 只利用多层特征图进行多尺度预测,而特征之间的联系没有被很好地融合利用,加入了一种特征增强模块来提高检测能力。在自建无人机数据集中进行的实验结果表明,提出的算法检测速度达到 125 f/s,远高于原始 SSD 的检测速度,且准确率比原始 SSD 也有所提升。

关键词: 深度学习; SSD 算法; 无人机检测; 特征增强; 实时性

中图分类号: TP391.4 **文章编号:** 1001-5868(2020)02-0296-05

Real-time Lightweight UAV Detection Method Based on SSD Algorithm

WANG Ruoxiao^{1,2}, XU Zhiyong¹, ZHANG Jianlin¹

(1. Institute of Optics and Electronics of the Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, CHN;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN)

Abstract: In order to solve the problem that detection algorithm of unmanned aerial vehicle (UAV) can not detect UAV quickly and accurately, an improved real-time lightweight UAV detection algorithm based on SSD is proposed, which is called TSSD. Firstly, a lightweight backbone network is improved to solve the problem of large amount of weights parameters in the backbone network of SSD algorithm. Secondly, SSD only uses multi-layer feature map for multi-scale prediction, but the relationship between features is not well utilized, and a feature enhancement module is added to improve the detection ability. The experimental results of the self-built UAV dataset show that the detection speed of the proposed algorithm is 125 f/s, which is much higher than that of the original SSD, and the accuracy of the proposed algorithm is also higher than that of the latter.

Key words: deep learning; SSD algorithm; UAV detection; feature enhancement; real time

0 引言

随着社会的发展和科技的进步,无人机凭借其低廉的价格和便利性已经很好地融入人们的日常生活,但也因此带来了许多问题。无人机面临的安全威胁、利用小型无人机发起的攻击以及无人机的认证和溯源等都应得到重视^[1]。因此,无人机监管系统针对无人机的实时检测和监控十分重要,这样的

系统要做到实时和轻量级,可以在嵌入式设备上使用,能够在特殊情形下实时监管无人机,避免出现利用无人机犯罪事件。

近年来深度学习的发展使得目标检测有了质的飞跃,基于深度学习的目标检测起源于两阶段算法 R-CNN^[2],后续虽然发展出了针对两阶段算法的一系列改进算法,但速度仍然较慢,不能满足实时性需求。单阶段算法起源于 YOLO^[3],以速度快著称,是实时检测算法,然而由于方法简单,性能弱于采用

多尺度预测的SSD^[4]。尽管SSD已经足够优秀,但也不能直接用在嵌入式设备上。本文在SSD的基础上进行改进,得到适用于嵌入式设备实时目标检测网络的TSSD(Tiny SSD)。首先,针对SSD的整体结构计算量大的问题,改进得到一种轻量级结构。其次,针对SSD浅层特征图的语义信息不足导致检测能力不强而加入了一种特征增强模块来提高检测能力。实验证明,该网络能在自建无人机数据集上取得良好效果,速度相比SSD也有大幅提升。

1 相关工作

基于深度学习的目标检测算法主要分为两阶段算法和单阶段算法。两阶段算法主要是对输入图像进行区域提名,得到一系列可能是目标的候选区域,再对候选框进行多分类和更进一步的位置回归。自R-CNN之后,Fast-RCNN^[5]使得每个候选区域共享特征图的提取,大幅度提升了检测速度,Faster-RCNN^[6]更进一步地提升了速度,把区域提名阶段也利用神经网络实现,真正实现了一体化。尽管两阶段网络一直都在提高速度,但是与单阶段网络相比,速度仍然是一大劣势。单阶段目标检测算法没有区域提名阶段,直接进行分类和回归,因而大幅提高了网络的推断速度。虽然单阶段检测算法速度快但是精度却不如两阶段算法,为此学者们都致力于保证单阶段算法速度快的同时提高检测精度。YOLO算法速度最快但精度很低,因为它只是简单地对图像用网格划分,利用网格分类和回归会导致定位不精确。SSD算法针对YOLO的缺点,摒弃了网格划分的方式,采用多尺度预测结合Faster-RCNN中的锚点框策略提高了精度。

近年来,无人机或者空中飞行目标的检测一直都是研究的热点问题,深度学习的出现更有力地促进了无人机目标检测的发展。刘佳铭^[7]将无人机检测任务分为两步,先检测目标再细致分类,这样做虽可以保障精度,但两阶段非端对端的算法无法实际应用。甄然等人^[8]将CNN与概率神经网络PNN相结合来做无人机检测,可加强分类能力但训练过程比较复杂,需要大量重复迭代。李斌等人^[9]基于YOLOV3^[10]进行改进,针对无人机定位不准和样本不平衡进行损失函数的改进,但YOLOV3网络结构复杂,速度慢于SSD。李秋珍等人^[11]基于SSD改进得到无人机检测算法,但仍然无法做到网络的轻量级。

2 无人机检测算法的实现

本文首先分析SSD的网络框架,然后介绍提出的TSSD网络整体框架,并分析为何能做到轻量级和实时性,最后详细介绍加入的特征增强模块的作用。

2.1 SSD网络结构

SSD的骨干网络是VGG16^[12]结构,如图1所示,含有13个卷积层和3个全连接层,VGG16的优点是比较简单,卷积层均采用相同的 3×3 卷积核。SSD针对VGG16做了修改,以适用于检测任务,SSD网络结构如图2所示,前半部分是VGG16的结构,本文将VGG16后面两层的全连接层FC6和FC7变换为了卷积层,Conv7之后的层则是本文添加的卷积层。针对YOLO算法最后一层特征图中的低分辨率信息在空间上可能过于粗糙,无法进行精确定位,为了检测不同尺度的目标,SSD采用了多尺度预测,Conv4-3及之后的卷积层加起来共6层,均添加一层分类层卷积,以得到检测特征图用于分类和回归。前面分辨率较高的浅层特征图检测小

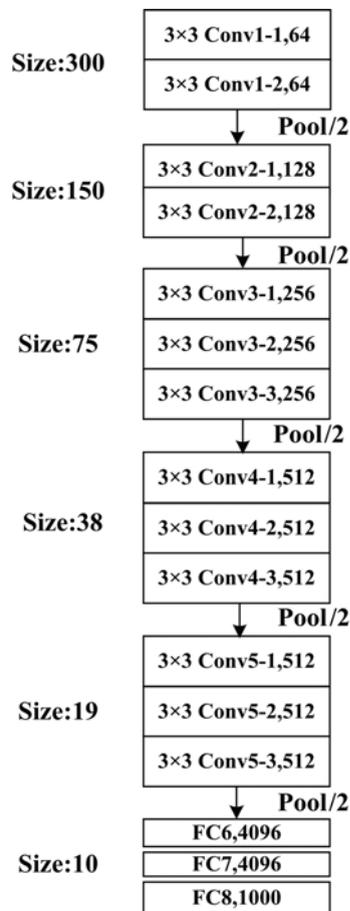


图1 VGG16网络结构

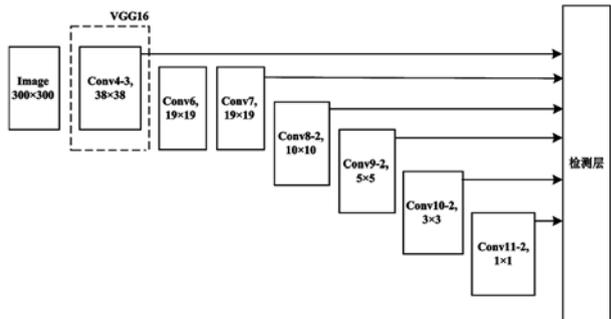


图2 SSD网络结构

目标,后面分辨率高的深层特征图检测大目标,也就是说,对于不同尺度的物体,SSD通过在多个卷积特征图(多个尺度)上执行检测,每个特征图预测适当大小边框的类别分数和边框偏移量,这样相比YOLO可进一步提升检测精度。

2.2 TSSD网络结构

本文提出的TSSD网络是基于SSD网络的改进,其整体网络结构如图3所示。设计的骨干网络如图4所示,是基于VGG16的改进。尽管VGG16的结构简单,但是所包含的权重数目却很大,训练时间过长,调参难度大,需要的存储容量大,不利于部署和安装到嵌入式系统中。为了更加轻量化和使得网络达到实时,削减了VGG16的卷积数目以及通道数目,通道数目最多也只有256,这样做不仅有利于防止过拟合,也大大减少了参数量。原始VGG16没有批归一化层,本文设计的骨干层均加上了批归一化层,使得梯度更新更加稳定,初始学习率也因此加大。除此之外还使用了一些 1×1 卷积,进行通道数的降维,使用 1×1 卷积代替部分 3×3 卷积,在保持非线性的同时可以大幅度降低计算量。

通过图3也可以看出,除了骨干网络改进外,多尺度预测仍然是6个检测层,但添加了一个特征增强模块来提高Conv4-3层的检测能力。增加这个模块有利于提高检测小目标的能力。

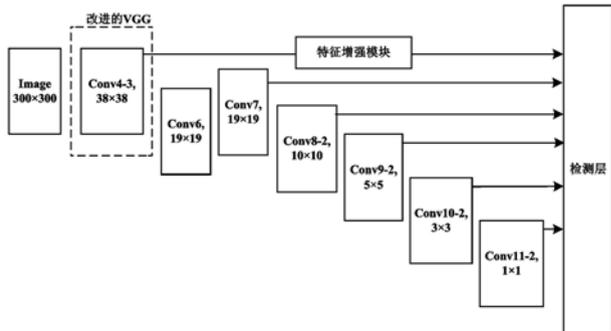


图3 本文提出的TSSD网络结构

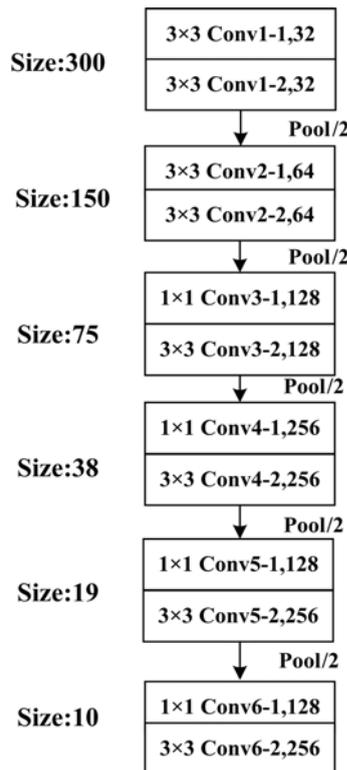


图4 本文设计的骨干网络结构

2.3 特征增强模块

图3中特征增强模块的详细结构如图5所示。SSD算法针对小目标的检测能力相比YOLOv3而言是一大弱势,因为SSD只利用多层特征图分别进行检测,而特征之间的联系没有被很好地融合利用。对于输入为 300×300 的图片,Conv4-3尺度为 38×38 的浅层预测层由于深度较浅,所含的语义信息很少,直接用于检测小目标并不足够,YOLOv3采取多尺度预测的同时利用特征金字塔网络^[13]的Top-Down结构将特征图进行级联,即将深层特征图上采样后级联进浅层特征图,从而增强浅层特征的语义信息来提高特征的表达能力,提高对小目标的检测能力,但这样做带来的劣势是严重影响了网络的速度,在轻量级网络中也不适宜采用这样的结构。为此,针对SSD的劣势,在Conv4-3后加入了一个特征增强模块,来增强浅层检测小目标的能力。

如图5,该模块使用多通道的卷积核,输入特征图Conv4-3的通道数目通过 1×1 卷积分成4份,每个通道的通道数是64,最终级联起来。每个通道的卷积深度不同,4个通道有3种不同的卷积层深度,就有不一样的语义信息,输入信息经过不同的卷积层深度后级联起来能综合各个深度的语义信息和空间信息,进一步增强细节语义特征,从而提高检测不

同尺度目标的能力,有利于提高对小目标的检测能力。结构中的空洞卷积采用不同的膨胀率能让特征图具有尺度特异的响应性,尤其对于深度较深的通路由于没有经过下采样,感受野没有增加,因而采用大的膨胀率使感受野增大。深度越深的通道,采用的膨胀率就越大,起到类似下采样的效果。且为了保障轻量化将较大的二维卷积拆分成两个较小的一维卷积,减少推断速度的同时能增加特征多样性,能让浅层检测层进一步提取不同的丰富特征。另外中间两个通道其中一个先经过 1×3 卷积,再经过 3×1 卷积,另一个通道先经过 3×1 卷积再通过 1×3 卷积,可以提取到不同方向的特征,避免提取特征的重复性。

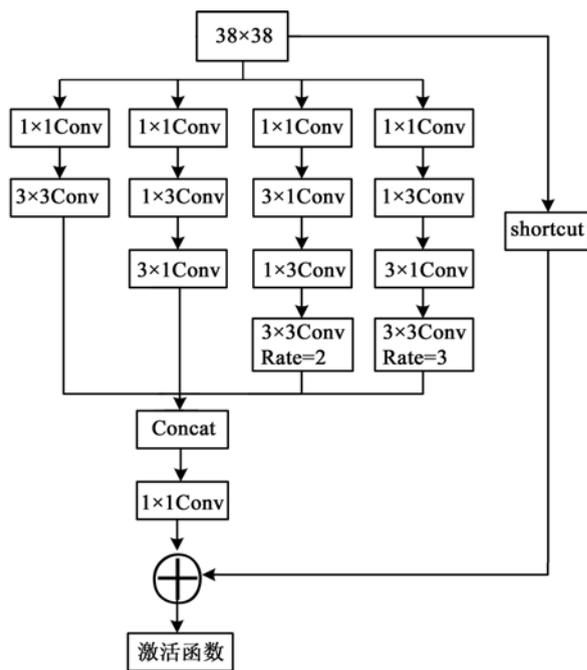


图5 特征增强模块

2.4 网络训练

本文的训练策略与SSD一样,在训练时需利用预设的锚点框通过平移和缩放的线性回归方式去拟合真实框。由于每个预测层预设的锚点框有多个,如果某个预测框与真实框具有最高的交并比,则标记该预测框为正样本,同时忽略非最佳的预测框,因此对于每个真实框,只分配一个预设的锚点框产生的预测框与之对应。为了能更充分地从数据中学习特征,使用一些数据增强策略,如采用随机裁剪、旋转、灰度变化等方式,提高网络的泛化能力。本文算法的损失函数如式(1)所示,是分类和位置回归的损失带权加和,其中 x 表示预测值, c 为置信度, l

为预测框, g 为真实框, α 表示两者的权重, N 表示该预测层匹配到锚点框的数量。位置损失是预测框 l 和真实框 g 之间的smooth-L1损失,置信损失是softmax交叉熵损失。

$$L(x, c, l, g) = \frac{1}{N} (L_{\text{conf}}(x, c) + \alpha L_{\text{loc}}(x, l, g)) \quad (1)$$

3 实验结果与分析

3.1 数据集介绍

本文中采用的数据集是自建的无人机数据集,主要是在室内厂房和室外空旷环境下拍摄的多目标无人机图片。其中训练集8723张,测试集2640张,将无人机按照数据集中出现的无人机型号分为6类,分别是U819A,AG,AT,HR,YD和MT。

3.2 训练与测试

本文的实验采用Pytorch框架,GPU硬件采用1080Ti,整个网络的输入图片被调整为 300×300 的尺寸作为网络输入,训练优化方法采取随机梯度下降法,动量设为0.9,由于轻量级网络的权重衰减需要小一些,因而权重衰减设置为 10^{-4} 。由于骨干网络是全新设计的,没有经过ImageNet预训练,因此多迭代一些以便于充分学习特征,一共迭代200个epoch,Batch size为64张。由于调大学习率对于从头开始训练往往很有帮助,故初始学习率设为0.08,50个epoch后学习率下降为 10^{-3} ,100个epoch后学习率下降为 10^{-4} ,这样的策略有助于网络收敛。

3.3 检测结果对比

本文使用mAP指标来检验网络的性能,表1是本文无人机检测算法与SSD,YOLOv3检测算法的性能对比。训练后SSD的权重大小为100Mb,而本文的算法仅13.6Mb,大大减少了参数量,且速度大幅度提升,达到125f/s,在嵌入式设备JetsonTX2上也能达到15f/s,基本可以满足实时性需求。在检测性能上,TSSD也要优于SSD和YOLOv3,主要原因是无人机的检测不需要特别庞大的骨干网络和通道数目,容易造成过拟合,轻量级

表1 各检测算法性能对比(单位:%)

算法	mAP	U819A	AG	AT	HR	YD	MT	速度/(f/s)
SSD	76.1	83.1	80.5	71.0	77.2	77.2	67.6	45
YOLOv3	76.5	83.6	80.5	73.1	77.2	76.1	68.7	25
TSSD	76.7	80.9	80.3	71.6	78.8	78.0	70.6	125



图 6 无人机检测示例图

的网络结构设计反而更加适合少量类别的检测,防止过拟合。图 6 所示是无人机检测示例图。

4 总结

本文提出了一种基于 SSD 改进的实时轻量级无人机检测算法 TSSD,通过对 SSD 整体网络结构进行修改来达到轻量化,且为了弥补 SSD 网络浅层预测层检测能力的不足,加入了特征增强模块,该模块可以充分利用不同深度的卷积信息来提高特征提取能力。实验结果表明,本文所提算法的推断速度有大幅提升,满足在嵌入式设备上的使用需求,检测精度也略有提升,证明了该检测网络可以快速而准确地检测无人机。

参考文献:

- [1] 刘 炜, 冯丙文, 翁 健. 小型无人机安全研究综述[J]. 网络与信息安全学报, 2016, 2(3): 39-45.
Liu Wei, Feng Bingwen, Weng Jian. Survey on research of mini-drones security [J]. Chinese J. of Network and Information Security, 2016, 2(3): 39-45.
- [2] Girshick R, Donahue J, Darrell T, et al. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation[C]// Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2014: 580-587.
- [3] Redmon J, Divvala S, Girshick R. You Only Look Once: unified, real-time object detection[C]// Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016: 779-788.
- [4] Liu Wei, Anguelov D, Erhan D, et al. SSD: single shot multibox detector[C]// European Conf. on Computer Vision (ECCV), 2016: 21-37.
- [5] Girshick R. Fast R-CNN[C]// Proc. of the IEEE Inter. Conf. on Computer Vision, 2015: 1440-1448.
- [6] Ren S, He K, Girshick R, et al. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks[C]// Advances in Neural Information Processing Systems, 2015: 91-99.
- [7] 刘佳铭. 基于深度卷积神经网络的无人机识别方法研究[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(2): 22-26.
Liu Jiaming. Research on UAV recognition method based on DCNN[J]. Ship Electronic Engineering, 2019, 39(2): 22-26.
- [8] 甄 然, 于佳兴, 赵国花, 等. 基于卷积神经网络的无人机识别方法仿真研究[J]. 河北科技大学学报, 2019, 40(5): 397-403.
Zhen Ran, Yu Jiaxing, Zhao Guohua, et al. Simulation research on UAV recognition method based on convolutional neural network [J]. J. of Hebei University of Science and Technol., 2019, 40(5): 397-403.
- [9] 李 斌, 张彩霞, 杨 阳, 等. 复杂场景下深度表示的无人机目标检测算法[JB/OL]. 计算机工程与应用: 1-7 [2019-10-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20190916.1003.002.html>.
Li Bin, Zhang Caixia, Yang Yang, et al. Drone target detection algorithm for depth representation in complex scenes[JB/OL]. Computer Engineering and Applications: 1-7 [2019-10-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20190916.1003.002.html>.
- [10] Redmon J, Farhadi A. YOLOv3: An incremental improvement[J]. arXiv preprint, 2018: 1804.02767.
- [11] 李秋珍, 熊饶饶, 王汝鹏, 等. 基于 SSD 算法的实时无人机识别方法研究[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(5): 30-35.
Li Qiuzhen, Xiong Raorao, Wang Rupeng, et al. Research on real-time UAV recognition method based on SSD algorithm[J]. Ship Electronic Engineering, 2019, 39(5): 30-35.
- [12] Simonyan K, Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition[J]. arXiv eprint, 2014: 1409.1556.
- [13] Lin Tsung Yi, Dollar P. Feature pyramid networks for object detection[C]// Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017: 2117-2125.

作者简介:

王若霄(1994—),男,江西南昌人,硕士研究生,主要研究方向为基于深度学习的目标检测。

E-mail: 2585157341@qq.com

《半导体光电》编辑委员会

顾问 王占国(科学院院士) 姚建铨(科学院院士) 方家熊(工程院院士)
主任 欧黎
副主任 蒋志伟
委员 (以姓氏笔画为序)
王小勇 方亮 孔梅 宁永强 孙长征 刘秉琦 刘胜 刘斌
华勇 安俊明 李成 李向阳 李国强 余华 邹卫文 张卫平
张佰君 沈鸿烈 宋凝芳 罗风光 周立庆 孟洲 祝连庆 赵明富
徐学良 高新江 郭霞 崔一平 龚敏 蒋亚东 喻志农 童杏林
熊平 潘武 瞿鹏飞

半导体光电

BANDAOTI GUANGDIAN

(双月刊 1976年创刊)

第41卷 第2期 2020年4月

SEMICONDUCTOR OPTOELECTRONICS

(Bimonthly, Started in 1976)

Vol.41 No.2 April 2020

主管单位 中国电子科技集团有限公司
主办单位 重庆光电技术研究所
编辑出版 《半导体光电》编辑部
编委主任 欧黎
主编 蒋志伟
执行主编 李福果
责任编辑 朱玲瑞
印刷 重庆五湖印务有限公司
国内订阅 《半导体光电》编辑部
通信地址 重庆市南岸区南坪花园路14号(400060)
电话 (023)65860286(编辑)
(023)65860287(发行)
电子邮箱 soe@163.net

Competent Authorities China Electronics Technology Group Corporation
Sponsored by Chongqing Optoelectronics Research Institute
Edited and Published by Editorial Office of Semiconductor Optoelectronics
Director of Editorial Board OULI
Chief Editor JIANG Zhiwei
Executive Chief Editor LI Fuguo
Editor in Charge ZHU Lingrui
Printed by Chongqing Wuhu Printing Corp.
Domestic Subscription Editorial Office of Semiconductor Optoelectronics
Address No.14 Garden Road, Nan'an District, Chongqing 400060,
P. R. China
Telephone (023)65860286 (Edition)
(023)65860287 (Distribution)
E-mail soe@163.net

半导体光电

二〇二〇年四月

第四十一卷 第二期 (151-300)

半导体光电

二〇二〇年四月

第四十一卷 第二期 (151-300)