

GaN 基紫光激光器应用于激光引信抗干扰探索

张好军^{1,2} 赵建林¹

(¹西北工业大学理学院陕西省光信息技术重点实验室, 教育部空间应用物理与化学重点实验室, 陕西 西安 710072)

²中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009

摘要 为了解决空空导弹用红外激光引信易受烟雾干扰的问题, 试制了高重复频率、高功率 GaN 基紫光激光器, 利用瑞利散射原理和分子散射原理, 分析了烟雾散射和飞机目标散射的差异性。在计算双色激光器对烟雾散射差异主要机理的基础上, 在固定空间箱体建立的烟雾室内, 利用紫光激光器和红外激光器形成的双色激光器及锁相放大电路, 对烟雾进行了双色激光散射特性的测试, 得到了相同烟雾状态下两个波长激光的烟雾散射比大于 3 的测试结果。对比理论计算结果和试验数据结果, 确认紫光激光器可用于激光引信抗烟雾干扰, 分析该抗干扰效果在烟雾浓度大时尤其明显。

关键词 激光器; GaN 基紫光激光器; 抗烟雾干扰; 双色散射比

中图分类号 TN248.4; TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0702007

GaN-Based Blue-Violet Laser Diodes Used in Anti-interfere from Fog for Proximity-Fuse

Zhang Haojun^{1,2} Zhao Jianlin¹

¹ Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, Key Laboratory of Space Applied Physics and Chemistry, Ministry of Education, School of Science, Northwestern Polytechnic University, Xi'an, Shaanxi 710072, China
² China Air-to-Air Missile Academic, Luoyang, Henan 471009, China

Abstract The scattering theories of molecules and Rayleigh are applied in the analysis of the deference between fog to solid targets. And GaN-based blue-violet laser diodes and infrared diodes are compounded to a dual-wavelength diodes array. The dual-wavelength diode is used to test the deferent scatterings character of the fog. And for this measurement, a phase-locked circuit is also used. The scattering-ratio of the GaN-based blue-violet laser diodes and infrared diodes is more than 3. Therefore, the GaN-based blue-violet laser diodes can be used in anti-interference from fog for laser proximity-fuse. The thicker of the fog density, the effect is more significant.

Key words lasers; GaN-based blue-violet laser diodes; anti-interfere from fog; dual-wavelength scattering-ratio laser-fuse

OCIS codes 140.3610; 290.5870; 330.1880; 350.2460

1 引言

GaN 基紫光激光器主要的设计应用方向为信息存贮, 采用 GaN 基 405 nm 的蓝光 DVD 光盘的存储容量可达到单面单层 27 Gb^[1], 而现在市场上主流的以 635~650 nm 的 AlGaInP 红光 DVD 光盘只能达到单面单层 4.7 Gb。除了在光信息存储系

统的应用外, 紫光激光器在激光打印、水下通信、投影显示、生物化学试剂的激活以及临床医学等领域也具有广阔的应用前景。

激光引信由于其测距精度高、角度分辨率高、抗电磁干扰能力强, 在复杂的电磁环境中正获得越来越广泛的应用。现在激光引信在空空导弹、面空导

收稿日期: 2011-03-01; 收到修改稿日期: 2011-03-19

作者简介: 张好军(1971—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事近距探测和目标识别等方面的研究。

E-mail: lyzhanghaojun@163.com

导师简介: 赵建林(1958—), 男, 博士, 教授, 主要从事光信息技术及应用等方面的研究。E-mail: jlzhao@nwpu.edu.cn

弹、空面导弹以及天基武器方面,已经列装或展开预先研究,各种工作进行得如火如荼。但激光引信也有其弱点,在抗烟雾粒子方面目前尚有不足,据分析,其在烟雾环境下有两种主要的被干扰模式,一是在粒子的干扰下,产生虚警;二是比较难于在烟雾中识别目标。基于此,本文主要讨论 GaN 基紫光激光器在激光引信抗烟雾干扰方面的应用。利用 GaN 基紫光激光器波长短,复合红外半导体激光器后可以利用其双色比,获得有效的抗干扰效果。

2 GaN 基紫光激光器

本文讨论的 GaN 基紫光激光器^[2]是在中国科学院半导体所杨辉研究员和陈良惠院士领导的研究团队承担的国家 863 重大项目“氮化镓基激光器(GaN-LD)”的基础上,进一步优化工艺研制成功“高重复频率、高功率氮化镓基紫光激光器”。

2.1 GaN 基激光器的材料生长、器件结构及工艺

2.1.1 GaN 基激光器的材料生长

GaN 基激光器器件结构^[2,3]是在蓝宝石衬底上利用 Thomas Swan 的金属氧化物化学气相沉积(MOCVD)设备进行 MOCVD 外延生长的,所用的有机源为三甲基镓(TMGa)、三甲基铝(TMAl)和三甲基铟(TMIIn),氮源为氨气,载气为氢气和氮气^[4]。通过控制生长温度、反应室压力、V/III 比等独特的生长模式,得到了高质量的 GaN 外延膜。图 1 是 GaN 外延膜的双晶 X 射线衍射摇摆曲线,(0002)面的对称扫描摇摆曲线半峰全宽为 180'';而(10-12)面的斜对称扫描摇摆曲线半峰全宽为 182'';霍尔测试给出的室温电子迁移率为大于 1000 cm²/(V·s)。

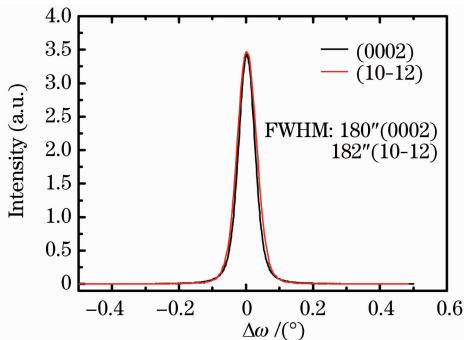


图 1 GaN 外延薄膜的双晶 X 射线衍射摇摆曲线
Fig. 1 XRD measurement of GaN MOCVD film laser diodes

2.1.2 InGaN/GaN 多量子阱有源区的优化

在 InGaN/GaN 多量子阱有源区发光性质方面进行系统的研究^[1],对 TMGa 流量、TMIIn 流量、反

应室压力、GaN 垒层掺 Si、GaN 垒层厚度、InGaN 阱层厚度以及生长阱层前预通 TMIn 对有源区发光性质的影响做了深入细致的研究,得到发光效率良好的 InGaN/GaN 多量子阱材料,为激光器的激射创造了条件。整个激光器结构包括 20 nm 的低温(550 °C) GaN 缓冲层,4 μm 的 N 型 GaN 层,0.9 μm 的 N 型 Al_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN 超晶格(SLs)光限制层,0.1 μm 的 N 型 GaN 波导层,5 个周期的 In_{0.15}Ga_{0.85}N/GaN 多量子阱有源区,其中 In_{0.15}Ga_{0.85}N 阱层的厚度为 3 nm,GaN 垒层的厚度为约 25 nm,20 nm 的 Al_{0.2}Ga_{0.8}N 电子阻挡层,防止电子从有源区泄漏。0.1 μm 的 P 型 GaN 波导层,0.65 μm 的 P 型 Al_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN 超晶格(SLs)光限制层,200 nm 的 P 型 GaN 欧姆接触层。图 2 为激光器结构样品的三轴晶 X 射线衍射(TCXR)。

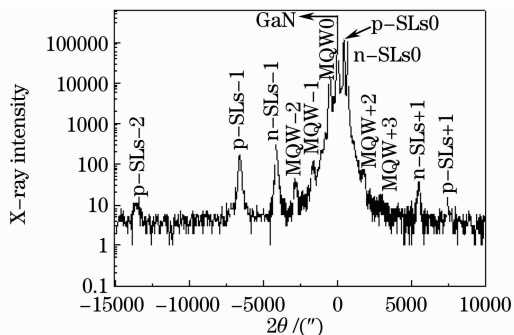


图 2 样品的 TCXR

Fig. 2 TCXR measurement of sample

2.1.3 多脊形波导式 GaN 基激光器结构

为了提高单芯片激光器的输出功率,并保证激光器通过解理获得光滑的腔面,激光器采用多脊型波导结构^[4,5],脊形波导结构是利用干法刻蚀方法将脊形以外区域的 P 型 AlGaIn 部分刻蚀掉,刻蚀后在制作 P 电极前先用等离子体激励式化学气相沉积(PECVD)法蒸上了 300~400 nm 的 SiO₂。由于 P 型 AlGaIn 留置层的厚度通常都较小,因而电流的扩展已基本被消除。就光限制而言,由于在侧向,材料的折射率也出现了差别而建立了自建的波导。该波导的限制作用与留置层的厚度有关,留置层厚度越小,侧向的光限制作用越强。图 3 是脊形

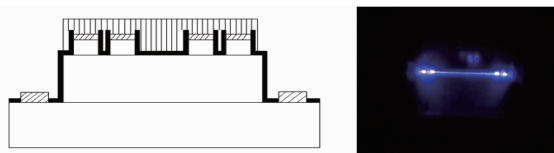


图 3 多脊型结构的改进示意图

Fig. 3 Schematics of four ridges structure laser diodes

GaN 基激光器的结构示意图,脊形边缘离 N 电极边缘的距离为 20 μm ,该数值是考虑脊形下的电流分布和电绝缘而确定的,激光器的腔长为 800 μm ,脊形宽度为 8 μm 。

2.1.4 GaN 基激光器工艺

对器件制备工艺进行了优化设计,包括载流子活化、脊形刻蚀、蒸镀绝缘保护层、电极制备、磨抛、解理和封装等。通过控制加工精度,并注意工艺流程的持续性,克服该结构的工艺相对比较复杂,离子束刻蚀容易对有源区造成损伤,而脊两侧的 SiO_2 等隔离层的工艺缺陷又容易使激光器出现短路等问题。最终制备成功了多脊型 GaN 基激光器。

2.2 GaN 基激光器测试结果

图 4 为激光器在脉冲、直流工作状态下的 $I-V$ 曲线。图 4(a)中 280 mA 电流附近的微分电阻为约 27 Ω 。图 4(b)中小电流时的微分电阻较大,10 mA 附近为 260 Ω 。

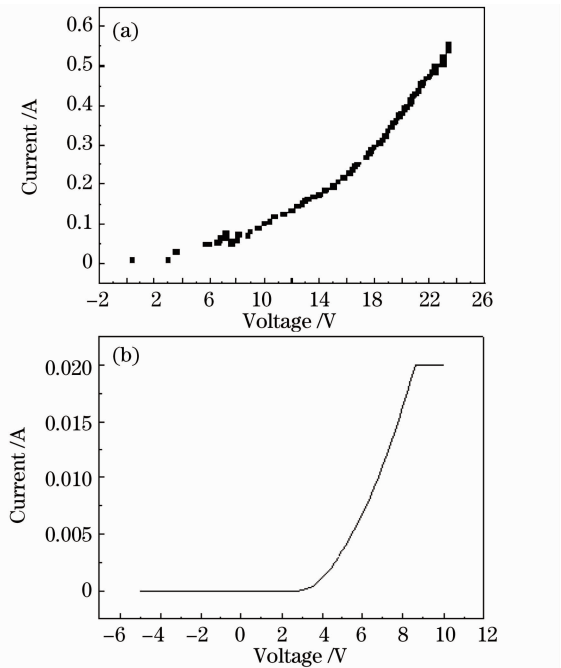


图 4 脊形 GaN 基激光器脉冲(a)、直流(b)工作时的 $I-V$ 曲线

Fig. 4 Pulsed mode (a) and direct current (b) $I-V$ curves for ridges structure GaN-based laser diodes

图 5 为激光器的 $P-I$ 曲线,电流大于阈值时,输出光功率随电流迅速增加,斜率效率在开始的直线段达 0.51 W/A。但电流继续增加时斜率效率有所降低,可能是由热效应和模式的改变引起的。

图 6 是激光器在不同电流下电发光的光谱,电流小于阈值电流时发光峰的半峰全宽较大,200 mA 时半峰全宽为 18.6 nm,但随电流增加,光谱的形状

发生了变化,出现了明显的尖峰。电流大于阈值时,发光峰迅速变窄,半峰全宽为 1.6 nm^[4]。

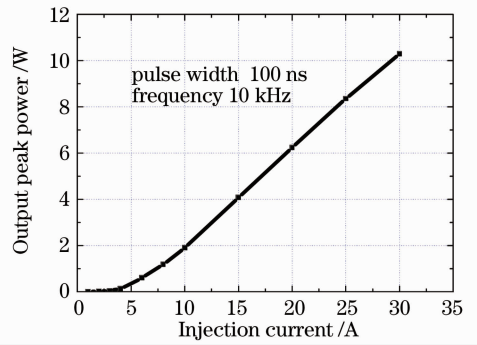


图 5 脊形 GaN 基激光器工作时的 $P-I$ 曲线

Fig. 5 $P-I$ curve for ridges structure GaN-based laser diodes

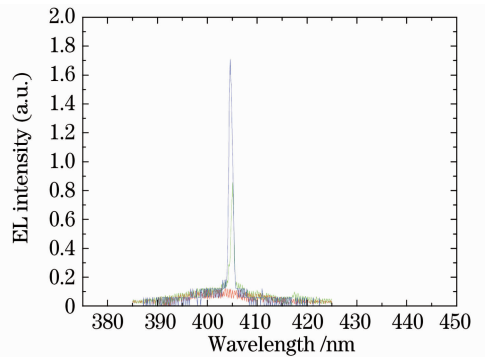


图 6 脊形 GaN 基激光器在不同电流时的光谱曲线

Fig. 6 Spectrum curve for ridges structure GaN-based laser diodes in different currents

3 激光引信作用原理

3.1 组成部分及功能

一般激光引信由以下几部分组成:能源部分,由弹上供电进行二次电压分配,或由该部分自己带热电池或其他发电设备;发射前端,该前端一般由激光器和与其匹配的光学系统组成;接收前端,一般由激

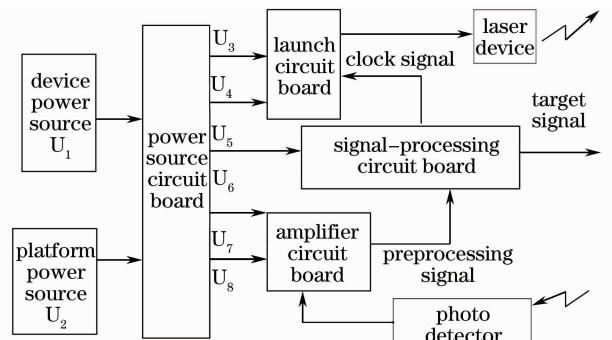


图 7 一般激光引信组成框图

Fig. 7 Block diagram of general detection device

光接收器和与其匹配的光学系统组成;发射电路,由时序电路和驱动电路组成;接收电路,由对探测器转换来对电信号进行放大和比较等预处理电路组成;信号处理电路,主要由 CPLD/FPGA 等大规模快速逻辑电路组成。图 7 为一般激光引信组成框图。

3.2 干扰分析

图 8 为激光引信的发射和接收窗口在目标或干扰情况下的作用效果。如果是目标,则大量的作用效果为反射,如果是烟雾,则存在反射、散射和衰减吸收 3 种效果。烟的主要有效作用波长区域为 $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ ^[6,7],烟(幕)主要是由固体和液体的微粒悬浮在大气中形成,如果发射的激光照射到烟幕表面,则会形成图 8 所示的结果。战场烟尘具有同样的效果,不过相对而言,衰减程度相对人造烟幕会小一些。

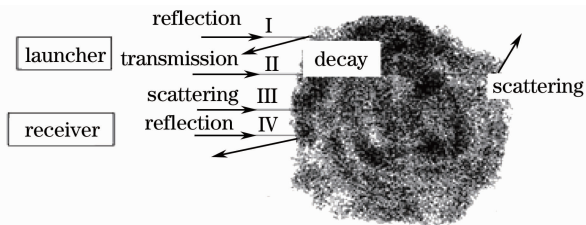


图 8 激光引信的发射和接收窗口在目标或干扰情况下的作用效果示意图

Fig. 8 Effect of short distance device under the target or the disturbing condition between the launcher and receiver window

单位体积内烟幕微粒多,对入射激光的反射、散射和吸收就越多,会造成误动作的发生,同样会造成目标的遮挡,还可以分为几种情况^[7]:

1)当微粒直径显著大于入射光波波长时,微粒使光只产生反射和折射,光入射到烟幕上,一部分由其表面反射,另一部分被折射,即散射强度随微粒的增大而减小,本项主要体现为实体目标的作用效果。

2)当微粒直径显著小于入射光波波长时,符合瑞利散射规则,即分子散射(也可称瑞利散射),当微粒直径增大时,微粒对入射光的散射强度迅速增大,便形成粒子散射(也可称米氏散射),实验证明当粒子直径大约与光波波长相当时,此时产生的散射最大。

3)当烟幕微粒直径接近于可见光波长时,光的散射状态变得更复杂。烟幕微粒不仅能分散光,而且能吸收一部分光,吸收光是烟幕微粒将光能转化成其他能,如热能、化学能或电能等。

综上所述,烟幕微粒对激光传输的影响是随着波长的缩短,造成的散射和衰减吸收会加大,分子散射和粒子散射会具有显著的区别,波长较长的光波在烟中的散射和衰减吸收会小一些。

3.3 双色技术原理

本文提出的双色技术原理,主要基于双色激光对不同目标的不同散射和反射特征的差别,从而区分出目标和烟雾干扰。由于实体目标线形尺寸相对于目前使用的近红外波长,其可以认为是线度足够大的粒子(粒子半径 r 与光波长 λ 满足 $r/\lambda > 10$),散射光强基本上和波长无关^[7],此时形成大粒子散射,故在进行双色技术的比较时,可以认为实体目标对两种波长的光在散射特性方面是一样的。以下只分析烟雾等粒子对两种波长的光的散射特性的差异。

粒子的半径和入射光波长比较,当其小于入射光波长时呈现出分子散射特征,即瑞利散射原理^[8,9]。其散射效率因素 Q_{sca} 为

$$Q_{\text{sca}} = \frac{128\pi^4 r^4}{3\lambda^4} \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 1} \right)^2, \quad (1)$$

式中 n 为散射粒子的折射率。

由(1)式可知, Q_{sca} 是与波长的 4 次方成反比的,故不同波长的散射吸收和衰减具有不同的差别,这正是双色技术工作的原理。

粒子的半径远大于入射光波长时呈现出无选择性特点。随着微粒的增大,其散射光强度也迅速增大,形成粒子散射,即米氏散射原理^[8,9]。通常当粒子直径大约与光波波长相当时,散射最大。

3.4 利用视距进行散射引起的大气衰减的计算

当观测物体时,达到某个距离 V 时产生的对比度为最小值,此时距离 V 称为视距。在波长为 $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 时,可以获得由散射引起的简化透射率公式

$$\tau = \exp \left[- \frac{3.912}{V} \left(\frac{\lambda}{0.55} \right)^{-q} L \right], \quad (2)$$

式中 $V < 6 \text{ km}$ 时, $q = 0.585 V^{1/3}$; 中等能见度时, $q = 1.3$; 良好能见度时, $q = 1.6$ 。

例如,两种波长 $0.41 \mu\text{m}$ 和 $1.06 \mu\text{m}$,在能见度为 50 m ,距离 L 为 10 m 时,则 $\tau(1.06)/\tau(0.41) = 3.6$;在能见度为 20 m ,距离 L 为 10 m 时,则 $\tau(1.06)/\tau(0.41) = 11.3$,可见在能见度愈低的情况下,二者的透射率差别愈明显。

图 9 为两种波长在不同视距情况下的透射率比值趋势示意图。

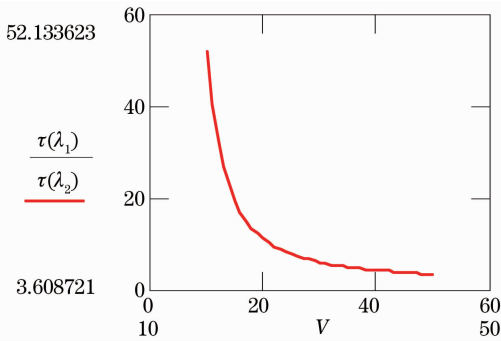


图 9 两种波长在不同视距情况下的透射率比值趋势示意图

Fig.9 Trend of transmittance ratio of two kinds of wavelength light in different visibility conditions

4 验证试验

4.1 测试原理及抗烟雾干扰测试系统

为了验证双色激光对烟雾散射的差异特性,搭建了一套抗烟雾干扰验证系统,系统示意图如图 10 所示。系统包括烟雾室、烟雾产生室和激光光路系统。阴燃箱中点燃两根蚊香,产生的烟雾通过烟雾通道进入烟箱,使烟箱中充满烟雾,通过点燃蚊香的时间来改变烟雾的浓度,烟雾箱的侧壁贴一层黑纸,以避免侧壁对光的反射,反射镜使入射激光穿透烟雾后反射出烟箱外,以避免激光回反,硅探测器放在激光入射口的旁边,接收烟雾的背向散射光。激光器采用直流工作的 810 nm (670 nm) 激光器和 405 nm 激光器,810 nm (670 nm) 激光器通过反射镜改变光路,使 405 nm 激光束和 810 nm (670 nm) 激光束达到平行入射,用斩波器对入射激光束进行斩波,通过锁相放大器读取探测器所测到的后向散射光的信号^[10]。采用挡光板分别测量 405 nm 和 810 nm (670 nm) 激光的烟雾散射信号。

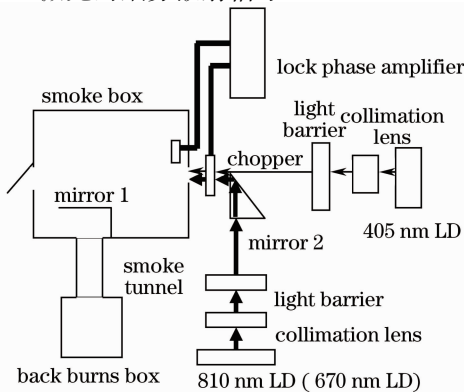


图 10 抗烟雾干扰验证系统示意图

Fig.10 Sketch map for anti-smoke or fog disturbance verification system

4.2 测试结果

利用图 10 系统进行测试,并对测试数据进行归一化处理,获得 810,670 和 405 nm 激光器的散射光的强度与入射光的强度比值随蚊香燃烧时间(烟雾的浓度)的变化趋势和归一化散射强度比的测试结果。

图 11 是测量得到的 810 nm 和 405 nm 激光器的散射光的强度与入射光的强度的比值随蚊香燃烧时间(烟雾的浓度)的变化曲线,在测量的同时,也测量了 670 nm 激光器随蚊香燃烧时间的散射光的强度与入射光的强度的比值。从测量结果可以看出,散射强度比与波长有依赖性,波长越短,散射强度越强。

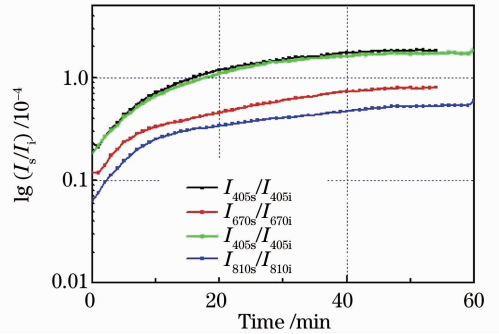


图 11 810,670 和 405 nm 激光器的散射光与入射光的强度比值

Fig.11 Ratio of scattering light intensity and incidence light intensity changes versus the mosquito-repellent incense burning time (the thickness of smoke and fog) by 810, 670 and 405 nm lasers

图 12 为 405 nm 与 810 nm 激光器的归一化散射强度比和 405 nm 与 670 nm 激光器的归一化散射强度比。从结果可以看出,405 nm 与 810 nm 激

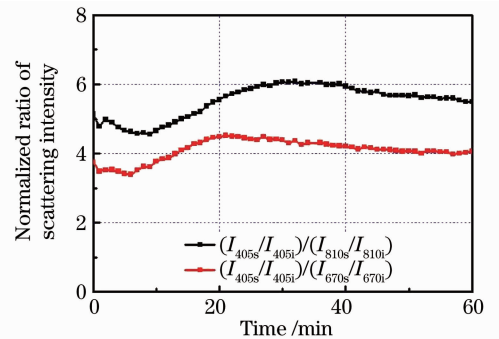


图 12 405 nm 与 810 nm 激光器归一化散射强度比值和 405 nm 与 670 nm 激光器的归一化散射强度比值
Fig.12 Comparison between the ratio of 405 and 810 nm laser scattering intensities and the ratio of 405 and 670 nm laser scattering intensities

光器的归一化散射强度比的值随蚊香燃烧的时间在4.2~6之间变化,405 nm与670 nm激光器的归一化散射强度比的值随蚊香燃烧的时间在3.3~4.5之间变化。

5 结 论

通过优化材料MOCVD生长工艺,生长了具有良好的周期性结构,界面陡峭性好、平整度高的InGaN/GaN多量子阱有源区激光器外延片。通过优化器件结构和制作工艺,研制成功了多脊形脉冲激射的GaN基紫光激光器,激光器的阈值电流密度最低为3.3 kA/cm²,激射波长为405 nm。

由双色理论分析,利用GaN基紫光激光器和红外激光器配合完成了双色激光器对烟雾的测试,由试验结果可知双波长的散射比可大于3,采用双色散射比的方法可以在一定程度上实现抗烟雾干扰。在国内器件成熟的情况下,可以考虑使用更长波长激光和更短波长激光配合来实现更优良的抗干扰效果。

致谢 在本文激光器工艺描述和实验数据的收集过程中,张书明研究员给予了大力帮助,在此表示真诚的感谢。

参 考 文 献

- 1 Liu Yibing. Research of key technologies for blue GaN-based LEDs[J]. *Vacuum Electronics*, 2008, (3): 34~37
刘一兵. GaN基蓝光LED关键技术进展[J]. *真空电子技术*, 2008, (3): 34~37

- 2 Yang Hui, Chen Lianghui. Material growth and device fabrication of GaN-based blue-violet laser diodes [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, **26**(2): 414~417
杨辉, 陈良惠. GaN基蓝紫光激光器的材料生长和器件研制[J]. *半导体学报*, 2005, **26**(2): 414~417
- 3 Chen Lianghui, Ye Xiaojun, Zhong Ming. Gallium nitride based blue laser diodes[J]. *Physics*, 2003, **32**(5): 302~308
陈良惠, 叶晓军, 钟明. GaN基蓝光半导体激光器的发展[J]. *物理*, 2003, **32**(5): 302~308
- 4 Li Deyao, Zhang Shuming. InGaN-based multi-quantum-well-structure blue-violet laser diodes[J]. *Science in China (Series E)*, 2007, **37**(3): 356~359
李德尧, 张书明. 蓝紫光InGaN多量子阱激光器[J]. *中国科学E辑*, 2007, **37**(3): 356~359
- 5 Yin Yi'an. Research Progress in Theory and Key-Technology GaN-Based Blue-violet Laser Diodes [D]. Xiamen: Xiamen University, 2008. 15~35
尹以安. GaN基蓝紫光激光器制备的理论与关键技术的研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2008. 15~35
- 6 Zhang Yixin. Propagation and Imaging in Random Medium[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. 374~375
张逸新. 随机介质中光的传播与成像[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 374~375
- 7 Yao Lujie, Gao Junlin, Xiao Kaitao *et al.*. Smoke Screen Theory and Measurement Technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004. 50~52
姚禄玖, 高钧麟, 肖凯涛等. 烟幕理论与测试技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004. 50~52
- 8 Zhao Jianlin. Optics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. 330~331
赵建林. 光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. 330~331
- 9 Xu Nanrong, Bian Nanhua. Infrared and Guidance [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1997. 149~154
徐南荣, 卞南华. 红外辐射与制导[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997. 149~154
- 10 Liu Yunyan, Yuan Yuzhen. Research progress in GaN-based semiconductor UV detectors [J]. *Semiconductor Technology*, 2005, **30**(2): 25~29
刘云燕, 袁玉珍. GaN基紫外光探测器的研究进展[J]. *半导体技术*, 2005, **30**(2): 25~29