

利用有源多模干涉器提高 InGaN 超辐射发光二极管的输出功率

臧志刚^{1,2,3} 余健辉^{1,2} 张 军^{1,2,3} 陈 哲^{1,2,3}

¹ 暨南大学光电信息与传感技术广东省普通高校重点实验室, 广东 广州 510632
² 暨南大学光电工程系, 广东 广州 510632
³ 广东省半导体照明产业联合创新中心, 广东 佛山 510033

摘要 为了提高 InGaN 超辐射发光二极管(SLED)的输出功率,采用有源多模干涉器(Active-MMI)作为管芯结构制作了 Active-MMI SLED。由于有源区注入电流抽运面积的增加,提高了器件的增益饱和水平。实验结果表明, Active-MMI SLED 的最大输出功率达到了 47 mW,光谱较宽而又平坦(3 dB 带宽 20 nm)。此外,器件即使在最大输出功率下,仍然保持着稳定的单模输出。

关键词 光学器件; 超辐射发光二极管; 有源多模干涉器; 高功率

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0617001

Enhanced Output Power of InGaN Superluminescent Diode Using Active Multi-Mode Interferometer

Zang Zhigang^{1,2,3} Yu Jianhui^{1,2} Zhang Jun^{1,2,3} Chen Zhe^{1,2,3}

¹ Key Laboratory of Optoelectronic Information and Sensing Technologies of Guangdong Higher Education Institutes, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

² Department of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

³ Guangdong Solid State Lighting Industry Innovation Center, Foushan, Guangdong 510033, China

Abstract To improve the output power of InGaN superluminescent diodes (SLED), an active multimode-interferometer (Active-MMI) configuration has been used to fabricate the Active-MMI SLED. Because of the wider actively pumped area, the output power saturation level has been improved. The experiment results show that the maximum output power of Active-MMI SLED as high as 47 mW is obtained with a wide 3 dB bandwidth of 20 nm and flat spectrum. Moreover, even under the maximum output power of Active-MMI SLED, it still keeps a stable single mode output.

Key words optical devices; superluminescent diodes; active multimode-interferometer; high power

OCIS codes 230.3670; 230.2090; 250.5960

1 引 言

超辐射发光二极管(SLED)作为一种重要的半导体光源器件,获得了广泛的应用。例如,SLED是干涉型光纤陀螺(FOG)的理想光源^[1],由于它的宽光谱(>20 nm)具有短的相干长度,可以减少 FOG 的瑞利噪声,其高功率输出可以提高 FOG 的灵敏

性;在光波分复用技术(WDM)中^[2],SLED 可以实现通信容量的扩充;SLED 的另一个广泛应用是在光学相干层析断影成像技术(OCT)上^[3],它的宽光谱特性可以实现高分辨率的成像质量。SLED 的发光机理是基于单程放大的自发辐射,因此,尽可能地抑制腔里的振荡或减少腔面的反馈是实现高功率

收稿日期: 2013-10-08; **收到修改稿日期**: 2013-12-25

基金项目: 广东省战略新兴产业专项资金 LED 产业项目资助(2012A080302004)、广东省战略性新兴产业核心技术攻关项目资助(2012A080301002)

作者简介: 臧志刚(1982—),男,博士,副教授,主要从事高功率半导体发光器件方面的研究。

E-mail: tzangzg@jnu.edu.cn

SLED 的关键技术之一。一般来说,腔面的反射率小于 10^{-4} 时,可以实现超辐射放大输出。减少器件内部反馈的技术主要有三种:1) 将有源区的波导采用倾斜结构或弯曲结构^[4];2) 在器件的两个腔面镀上几层抗反射膜^[5];3) 在腔的一端处引入非抽运吸收区^[6]。尽管这些方法有效地减少了端面的反馈,但还是不能大范围地提高 SLED 的输出功率。有报道采用锥形波导作为 SLED 的管芯结构来提高输出功率^[7],但是其输出模场的分布不对称,导致与单模光纤的耦合效率低;在加长 SLED 腔长方面,虽然增加腔长可以有效地减少腔面的反馈,提高注入工作电流,但是这种方法存在一定的局限性,因为增加腔长降低了器件输出功率与注入电流(P-I)工作曲线的斜率,从而降低了器件的效率。目前,关于工作在长波段方面($1.0 \sim 1.5 \mu\text{m}$)的 SLED 报道较多^[8-9],而在短波段方面($425 \sim 850 \text{ nm}$)的 SLED 报道较少^[10]。有必要加强短波段 SLED 的研究,因为短波段 SLED 更适应于医疗成像技术。

本文报道了一种 InGaN 基蓝色 SLED,为了提高器件的输出功率,同时保持输出模场具有稳定的单模输出,采用有源多模干涉器(Active-MMI)波导结构作为 InGaN 基蓝色 SLED 的管芯。实验结果表明,采用 Active-MMI 结构的 SLED,其最大输出功率达 47 mW,比普通条形 SLED 相比输出功率提高了 38%。

2 器件的结构与原理

设计的 Active-MMI SLED 结构如图 1(a)所示,采用多模干涉器(MMI)来作为该器件的管芯结构,即 1×1 MMI 多模波导耦合器的两端各连着一根标准的单模波导结构。为了与 Active-MMI SLED 的性能相比较,在同一晶片上生长和制作了普通的条形 SLED(Regular-SLED),如图 1(b)所示。MMI 的原理是基于多模波导的自映像效应,当

光束在多模波导内传播时,激励起的多个模式相互干涉成像,这样沿着多模波导的传播方向周期性地产生输入场的一个或多个像^[11]。就 MMI 本身来说,它是一个无源器件。可以把它设计成 SLED 的管芯结构,使它成为有源器件。由于 SLED 是一种宽带光源,具有短的相干长度,也许有人认为把 MMI 设计成 SLED 的管芯结构,无法实现超辐射。在工业上由于无法将端面的反射率降低到 0, SLED 腔内还是存在反馈,导致 SLED 输出光的成分里包含有自发辐射和受激辐射的光,这也就是为什么说 SLED 是一种放大的自发辐射器件。在 MMI 多模波导与单模波导的连接处可能存在反馈,从而使得器件无法工作。实际上,通过优化实际多模波导的宽度与长度,宽带光源在 MMI 里面传播也能在其周期性的位置成像,使得 MMI 里面的光场能量几乎能全部耦合进入单模波导输出。根据 MMI 原理,放大的自发辐射也应该在多模波导里有自映像效应,输出光场的能量在多模波导与单模波导连接处以单模的形式几乎全部耦合进入单模波导,最终以单模的形式输出。可以看出,MMI 部分与单模波导相比,有一个更大的宽度,通过对 MMI 部分的长度($290 \mu\text{m}$)和宽度($10 \mu\text{m}$)进行适当的设计,采用 BPM 软件进行场模拟,结果显示输入端的单模光场与 MMI 输出端的光场很相似,多模波导内的场能量几乎全部耦合进入单模波。在数值模拟中,选取中心波长为 430 nm ,带宽为 30 nm 的光源进行模拟。从图 1(c)的光场分布图,可以清楚地看到,由于优化了 MMI 的参数,MMI 多模波导与单模波导的连接处没有出现反射与光场泄漏的现象。这个模拟是非常必要的,否则在器件设计上无法提供 SLED 的具体参数。如果在 MMI 多模波导与单模波导的连接处出现反射,器件的输出光谱就会出现激射谱线,使得光谱不具有平坦性,影响了 SLED 的性能与工作。

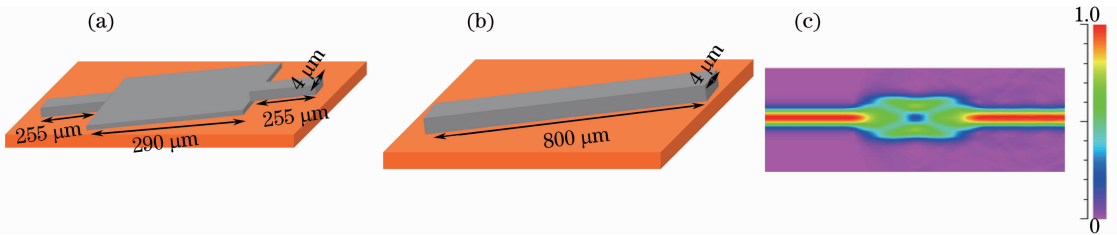


图 1 器件结构示意图。(a) 有源多模干涉器超辐射发光二极管; (b) 普通条形超辐射发光二极管; (c) 光场在有源多模干涉器超辐射发光二极管内的分布

Fig. 1 Schematics of the fabricated superluminescent diodes (SLEDs). (a) Active-MMI SLED; (b) regular SLED; (c) optical field inside Active-MMI SLED

在制备有源层的过程中,采用金属有机物化学气相沉积(MOCVD)技术生长了多量子阱(MQW)结构;为了有效地限制在腔端面的反馈,采用倾斜波导结构(波导结构与端面成 7° 夹角)和出光腔面上镀制抗反射膜的方法;采用常规光刻技术制作A-MMI的波导结构,MMI的长度和宽度分别是 $290\ \mu\text{m}$ 和 $10\ \mu\text{m}$;所有器件具有相同的管芯长度 $800\ \mu\text{m}$;为了使器件有较好的散热性能,所有SLED器件都倒装安装在CVD-diamond热沉上。

3 结果与讨论

在同等测试条件下[室温 $25\ ^\circ\text{C}$,连续电流(CW)],对这两种不同管芯结构的InGaN基蓝色SLED进行了测量。用功率计,光谱仪和近场扫描仪系统分别对制作的SLED进行了输出功率,光谱和近场分布进行了测量。在CW注入电流下,器件的输出功率与电流之间(P-I)的关系特性曲线如图2所示。随着注入电流的增加,输出功率也迅速地增加,当注入电流超过 $200\ \text{mA}$ 时,两种SLED器件的P-I曲线明显出现超辐射输出现象;两种SLED器件的P-I曲线的斜率基本上一致,表明SLED器件即使采用Active-MMI的管芯结构,其光场能量在MMI波导传播过程中基本上没有什么损耗,这也证明了器件按照MMI的原理和现象进行工作。由于有源区面积的不同,两种SLED器件产生超辐射的阈值电流也不同,Active-MMI SLED的阈值电流要比R-SLED的阈值电流要大一点。尽管如此,Active-MMI的最大输出功率是 $47\ \text{mW}$,而Regular-SLED的最大输出功率才 $34\ \text{mW}$,也就是说Active-MMI SLED的最大输出功率要比Regular-SLED的最大输出功率要提高 38% 。输出功率能有这么大提高的原因是:采用Active-MMI的管芯结构,其有源区的抽运面积增加了,这有助于增加功率增益饱和输出水平;另外,有源区面积的增加使Active-MMI SLED的热阻也得到了减低,这样就有效地提高了器件的散热性能。散热性能的提高,减少了注入载流子的非辐射复合几率,提高了电-光转换效率。图3是器件测得的电流电压(I-V)曲线图,I-V曲线表现出了好的正向伏安特性效果。在同样的注入电流下,普通SLED所需的驱动电压要比Active-MMI SLED驱动电压要大,这是由于采用Active-MMI的波导结构作为有源区,有源区抽运面积的增加使得Active-MMI SLED的微分电阻得到了下降。从这一点也可以得出这样一个结

论:Active-MMI SLED的耗电功率也要比普通SLED耗电功率的低。

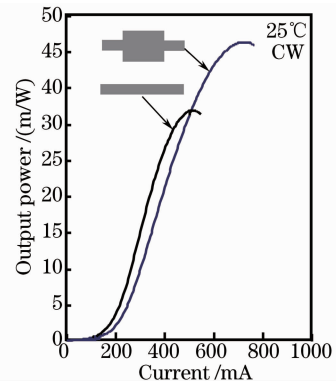


图2 输出功率与注入电流的关系

Fig. 2 Output power against injection current

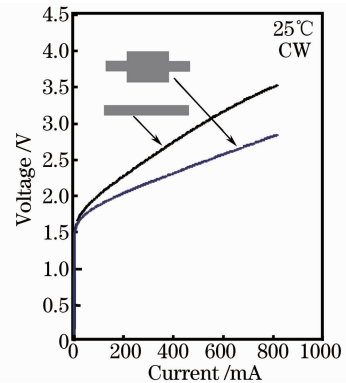


图3 驱动电压与注入电流的关系

Fig. 3 Driving voltage against injection current

为了测量SLED的输出光谱,设计了相关耦合实验装置图,如图4所示。SLED器件输出的光通过单模透镜光纤耦合进入光谱仪。采用单模透镜光纤的目的是为了增加光进入单模光纤的耦合效率,以及减少背景的噪声。图5是器件在同样的注入电流密度 $15\ \text{kA}/\text{cm}^2$ 下测试得到的光谱图。Active-MMI SLED的光谱与Regular-SLED相似,展示了一个平坦而较宽的光谱,中心波长为 $435\ \text{nm}$, $3\ \text{dB}$ 带宽约为 $20\ \text{nm}$ 。从图5可以清晰地看出,所有器件的光谱没有出现激射谱线,这说明了器件端面的反馈得到了抑制,腔内没有形成谐振。另外从图2可以看出,输出功率与注入电流曲线的斜率基本上一致,也说明有MMI与单模波导连接处存在反馈,如果有反馈的话,必然会造Active-MMI SLED的P-I曲线斜率比普通SLED的P-I曲线斜率低。这么宽的 $3\ \text{dB}$ 带宽和平坦的光谱进一步证实了Active-MMI可以作为SLED的管芯结构来实现超辐射发光输出。为了验证器件具有高质量的单模输出,对器件进行了近场测试(NFP),可以看出所有器

件都显示了一个高对称的单模输出特性。同时,发现即使在高注入电流下,NFP的场分布也没有受到影响,一直保持着如图6所示的特性。这种高度对称的稳定单模输出有助提高器件与单模光纤的耦合效率,从而使器件得到广泛的实际应用。

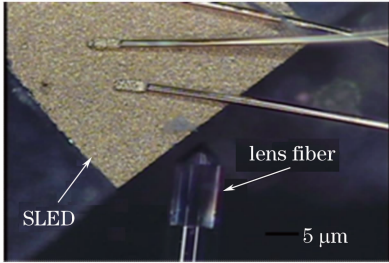


图4 SLED器件耦合进透镜光纤的实验装置图
Fig.4 Setup of SLED coupling into lens fiber

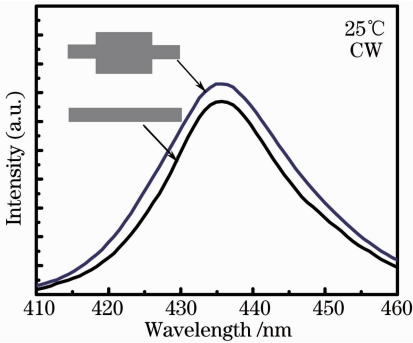


图5 器件的光谱图

Fig.5 Spectrum of the fabricated SLED

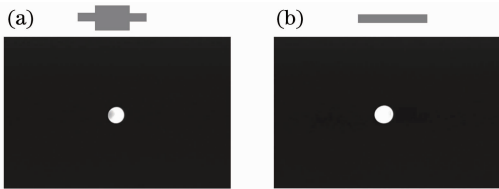


图6 器件的近场分布图

Fig.6 Near-field patterns of the fabricated SLED

3 结 论

采用有源多模干涉器波导作为超辐射发光二极管的管芯结(Active-MMI SLED),并与同样长度的条形波导进行了比较。由于MMI比传统条形波导宽度更宽,因此能扩展有源区的抽运面积,提高功率增益饱和水平,有效地提高了器件的输出功率,同时

又能保证单横模输出。在室温和CW注入电流下,Active-MMI SLED的最大输出功率为47 mW,比条形波导结构的Regular-SLED的最大输出功率要提高38%。另外,Active-MMI SLED也展现了一个较宽而又平坦的光谱和稳定的单模输出,中心波长为435 nm,3 dB带宽为20 nm。

参 考 文 献

- 1 S Schiller. Feasibility of giant fiber-optic gyroscopes[J]. Physical Review A, 2013, 87(3): 033823–033827.
- 2 D Shin, Y C Keh, J W Kwon, *et al.*. Low-cost WDM-PON with colorless bidirectional transceivers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(1): 158–165.
- 3 M D Bayleyegn, H Makhlof, C Crotti, *et al.*. Ultrahigh resolution spectral-domain optical coherence tomography at 1.3 μm using a broadband superluminescent diode light source[J]. Optics Communications, 2012, 285(24): 5564–5569.
- 4 G A Alphonse, D B Gilbert, M G Harvey, *et al.*. High-power superluminescent diodes[J]. IEEE J Quantum Electron, 1988, 24(12): 2454–2457.
- 5 S H Oh, D H Lee, K S Kim, *et al.*. High-performance 1.55 μm superluminescent diode with butt-coupled spot-size converter[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2008, 20(11): 894–896.
- 6 H Nagai, Y Noguchi, S Sudo. High-power, high-efficiency 1.3 μm superluminescent diode with a buried bent absorbing guide structure[J]. Appl Phys Lett, 1989, 54(18): 1719–1721.
- 7 T Yamatoya, S Sekiguchi, F Koyama, *et al.*. High-power CW operation of GaInAsP/InP superluminescent light-emitting diode with tapered active region[J]. Jpn J Appl Phys, 2001, 40(7A): 678–680.
- 8 S Wang, H Zhu, Z Liu, *et al.*. Graded tensile-strained bulkInGaAs/InP superluminescent diode with very wide emission spectrum[J]. Chin Opt Lett, 2004, 2(6): 359–362.
- 9 Liu Yang, Song Junfeng, Zeng Yuping, *et al.*. Wide-spectrum high-power 1.55 μm superluminescent light source with nonuniform well thickness multi quantum wells[J]. Chinese J Lasers, 2003, 30(2): 109–112.
- 刘 杨, 宋俊峰, 曾毓萍, 等. 非均匀阱宽多量子阱1.55 μm 高功率超辐射光源[J]. 中国激光, 2003, 30(2): 109–112.
- 10 Li Hui, Wang Yuxia, Li Mei, *et al.*. High-power 850 nm large optical cavity wide spectrum superluminescent diode[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(5): 613–616.
- 李 辉, 王玉霞, 李 梅, 等. 短波长宽光谱超辐射发光二极管[J]. 中国激光, 2006, 33(5): 613–616.
- 11 Zhao Yu, Jin Yongxing, Dong Xinyong, *et al.*. Experimental studies of multimode interference based fiber optic refractive index sensors[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(6): 1516–1519.
- 赵 宇, 金永兴, 董新永, 等. 基于多模干涉的光纤折射率传感器的实验研究[J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1516–1519.

栏目编辑:李志兰