

## 1 550 nm 宽光谱超辐射发光二极管的研制

訾 慧, 薛正群, 王凌华, 林中晞, 苏 辉

(中国科学院福建物质结构研究所 激光工程技术研究室, 福建 福州 350002)

**摘 要:** 超辐射发光二极管因其宽光谱低抖动的光谱特点以及输出光为非相干光的特性, 在光学相干层析成像技术、光处理技术等领域具有重要应用。为获得宽光谱低抖动的超辐射输出光, 设计并制备了一种 1 550 nm AlGaInAs 多量子阱超辐射发光二极管。采取倾斜  $12^\circ$  波导并增加隔离区, 结合抗反射薄膜, 最终实现宽光谱输出的超辐射发光二极管, 并比较了有无隔离区对器件性能的影响。实验结果表明, 制得的超辐射发光二极管 3 dB 光谱宽度可拓宽至 83 nm, 光谱纹波小于 0.1 dB, 在 200 mA 工作电流下, 出光功率大于 1.5 mW。

**关键词:** 超辐射发光二极管; 宽光谱低抖动; 倾斜波导; 隔离区; 抗反射薄膜

**中图分类号:** TN383 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0420001

## Study of wide spectrum superluminescent diode at 1 550 nm

Zi Hui, Xue Zhengqun, Wang Linghua, Lin Zhongxi, Su Hui

(Laboratory of Laser Engineering and Technology, Fujian Institute of Research on the Structure of Matter,  
Chinese Academy of Sciences, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** Superluminescent diode had important applications in OCT or light processing technology because of its wide and low ripple spectrum as well as incoherent light output. To satisfy the demand of wide and low ripple spectrum, the 1 550 nm AlGaInAs multi-quantum-well superluminescent diode was designed and manufactured. In this paper, tilt waveguide ( $12^\circ$ ) structure and isolation area were further adopted. Combined with the anti-reflect film, broad spectrum and low ripple superluminescent diode was obtained. Also, the influences of the isolation area on the device properties were compared. The experimental results show that the 3 dB spectral bandwidth of the superluminescent diode can reach around 83 nm with ripple as small as 0.1 dB, at the current of 200 mA, the output power is above 1.5 mW.

**Key words:** superluminescent diode; wide spectrum low ripple; tilted waveguide; isolation area; anti-reflect film

收稿日期: 2017-11-05; 修订日期: 2017-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(61405198); 国家 863 计划(2013AA014202); 福建省自然科学基金(2014J06022);  
国家重点研发计划(2016YFB0402300, 2016YFB0402304)

作者简介: 訾慧(1992-), 女, 硕士生, 主要从事半导体光电器件如超辐射发光二极管等的制备和研究。Email: zihui@fjirsm.ac.cn

导师简介: 苏辉(1971-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事半导体激光器、光电器件及系统等方面的研究。

Email: hui@fjirsm.ac.cn

## 0 引言

超辐射发光二极管(Superluminescent Diode, SLD)是一种重要的半导体光电器件,性能介于激光器和发光二极管之间<sup>[1-2]</sup>。作为一种高功率、宽光谱范围的稳定光源,且相干长度短,所以在光纤陀螺(Fibre Optic Gyroscope, FOG)、光时域反射仪(Optical Time Domain Reflectometer, OTDR)、光学相干层析成像技术(Optical Coherence Tomography, OCT)、光波分复用系统(wavelength division multiplexer, WDM)等领域都有广泛应用<sup>[3-4]</sup>。

具有宽光谱低抖动输出特性的光源可以降低光学仪器噪声,提高仪器的分辨率,因此减小光谱抖动、提高光谱宽度是超辐射器件研究的重要目标<sup>[5]</sup>。有效抑制 F-P 模式、拓宽光谱的技术主要有以下几种:采用多量子阱作为有源区<sup>[6]</sup>;波导采用弯曲结构或倾斜结构<sup>[7]</sup>;在器件的腔面镀上抗反射膜<sup>[8]</sup>;腔的一端引入不同形状的吸收区等<sup>[9]</sup>。李辉等<sup>[10]</sup>采用非均匀阱宽多量子阱大光腔结构,制得出光功率约 7 mW 的 850 nm 超辐射发光管,谱宽较均匀阱宽器件提高一倍以上,半峰宽达到 26 nm; Song J H 等<sup>[11]</sup>采用 8° 波导弯曲结构,制得 1.5 μm 高功率宽光谱超辐射发光二极管,光谱半宽为 60 nm,光谱抖动 0.3 dB; 刘杨<sup>[12]</sup>等研制了 1 550 nm InGaAsP/ InP 集成超辐射光源,光谱宽度由 25~30 nm 增至 45~60 nm。目前国内大多数报道的 SLD 多采用小角度倾斜或弯曲,且谱宽一般小于 60 nm,光谱抖动较大,而在实际应用中, OCT 等光学仪器的精度与光源的光谱宽度成正比<sup>[13]</sup>,因此在保证出光功率的前提下,需要光谱更宽更平滑的光源,才能更好满足如 OCT, WDM 等光学仪器的光谱带宽要求,提高仪器的精密程度。

文中基于有源区高增益 AlGaInAs 多量子阱结构,从有源区设计实现宽的增益谱;通过进一步加大常规倾斜角度(12°),以此降低 FP 模式,保证超辐射光只被单程放大输出;在结构中引入 20 μm 矩形隔离区,吸收由腔面反射的谐振光进而有效抑制反馈,并结合低反射率的优化光学镀膜方法。通过以上设计,很大程度上拓宽了器件光谱宽度减小抖动,在保证较高功率输出的同时,实现了 SLD 器件的整体高功率宽光谱低抖动输出,输出谱宽提高至 83 nm 以

上,波纹小于 0.1 dB,并比较了有无隔离区对器件性能的影响。

## 1 器件设计与工艺

器件外延片在有源区设计上综合考虑光场和掺杂区域的重叠情况,同时优化量子阱的应变、层数和厚度实现高增益,采用多层 AlInGaAs 量子阱(MQW)结构,在 500 μm n-InP 衬底上通过 MOCVD 生长 500 nm n-InP 缓冲层,60 nm AlInGaAs 下势垒层,应变多量子阱 AlInGaAs 100 nm,60 nm AlInGaAs 上势垒层,100 nm InP 盖层,为防止刻蚀过度损坏器件,在盖层上引入 25 nm InGaAsP 腐蚀停止层和 1.8 μm InP 空间层,最后在材料上生长一层 140 nm P<sup>+</sup>-InGaAs 电接触层完成外延片的生长,器件外延结构如图 1 所示。

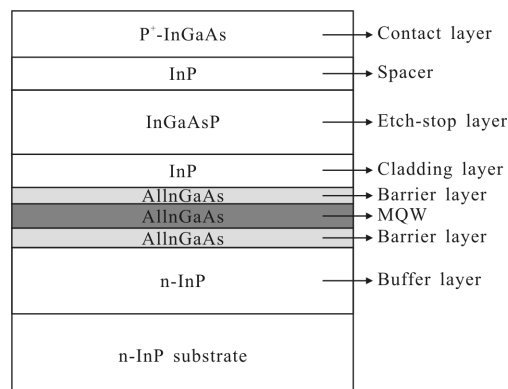


图 1 1 550 nm 超辐射发光二极管外延结构图

Fig.1 Epitaxial layer structure of 1 550 nm superluminescent diode

为了比较了有无隔离区对器件性能的影响,引入 20 μm 隔离区,分别制备了带有隔离区和不带隔离区的两种 SLD 器件。器件芯片垂直总腔长( $l$ )为 600 μm,倾斜脊型 12°,即倾斜波导与后端面的法线间的角度为 12°,设计相对较大角度的倾斜波导更有利于破坏 F-P 腔反馈,降低在腔面产生的 F-P 模式增益。脊型波导结构采用光刻结合湿法腐蚀工艺,脊宽 3.4 μm,脊高 1.6 μm。隔离区结构则采用二次光刻工艺腐蚀 P<sup>+</sup>-InGaAs 层实现,隔离区部分垂直长度为 20 μm,吸收区垂直长度( $l_1$ )为 190 μm,放大区垂直长度( $l_2$ )为 390 μm。芯片的整体结构如图 2 所示。光刻完成后,使用电子束蒸发 Ti/Pt/Au 金属作为 P 面金属,研磨减薄至 110 μm, n 面金属蒸发 GeAu/Ni/

Au,最后在  $n_2$  氛围中进行合金,实现欧姆接触。

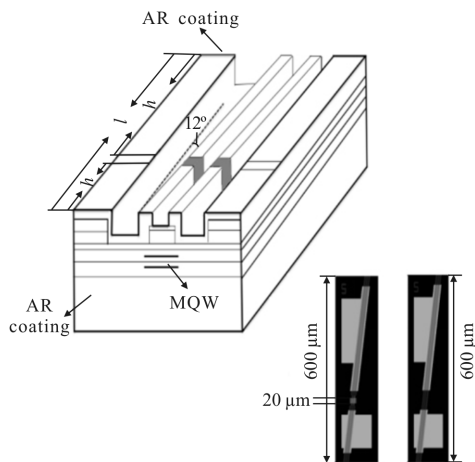


图 2 多量子阱超辐射发光二极管结构示意图

Fig.2 Schematic structure of MQW superluminescent diode

为了进一步的保证 SLD 单向放大输出,降低光谱波纹,在两种芯片的出光面和背光面均蒸镀双层  $\text{Si}/\text{Al}_2\text{O}_3$  抗反射膜。单层氧化物薄膜(如  $\text{SiO}_2$ )对压力、衬底温度、氧气流量等因素较为敏感,所以很难稳定控制其反射率,相反,设计使用的双层  $\text{Si}/\text{Al}_2\text{O}_3$  抗反射膜来得到端面低反射率。图 3 为测得该高透膜系在 InP 衬底上的出光反射率曲线,从图 3 看出,在 1550 nm 附近器件端面可以实现反射率低于 0.5%。

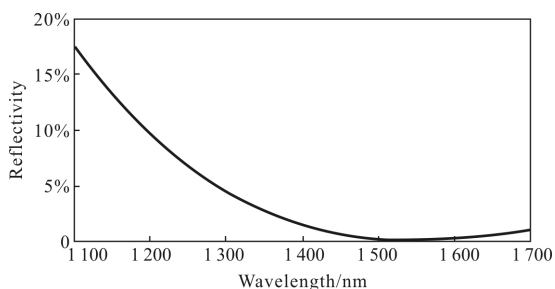


图 3 InP 衬底上  $\text{Si}/\text{Al}_2\text{O}_3$  膜的出光反射率曲线

Fig.3 Reflectivity of  $\text{Si}/\text{Al}_2\text{O}_3$  film on InP substrate

## 2 实验结果和讨论

### 2.1 出光功率测试

测试中,将 SLD 芯片固晶于 AlN 基板,在室温条件下(25  $^{\circ}\text{C}$ ),分别对两种芯片结构的超辐射发光二极管器件进行测量与分析。

首先对两种结构的 SLD 器件进行 LIV 测试,测试中使用积分球。两种管芯的输出功率 P-I 特征曲线、电阻曲线 I-V 曲线分别如图 4(a)、(b)所示。由图 4

看出,随着注入电流的增加,输出功率均呈增加趋势,图(a)、(b)的 I-V 曲线均表现出了良好的正向伏安特性效果。根据两图比较,无隔离区管芯出光功率在电流 200 mA 下约 3.9 mW,曲线线性良好,无功功率饱和现象;对于有隔离结构管芯,由于其隔离区的吸收作用,在 200 mA 工作电流下出光功率约为 1.5 mW,在电流大于 200 mA 后功率还有上升的趋势。与常规激光器相比,两种结构的 SLD 器件均无明显的阈值。这也表明两种结构管芯均已是超辐射出光,实验结果符合原先的设计。

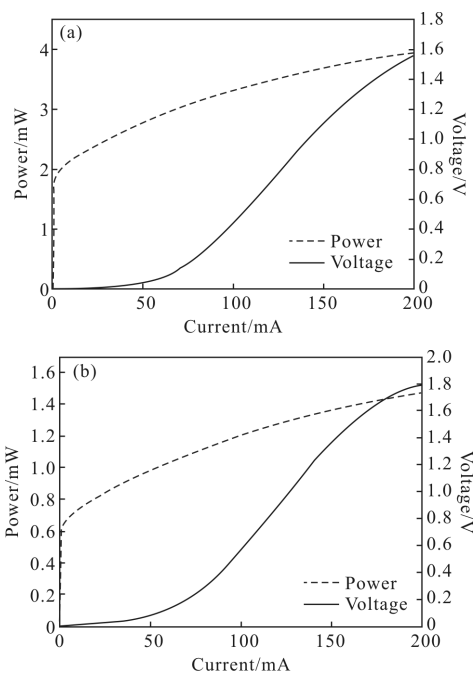


图 4 无隔离区 SLD 的 P-I、I-V 曲线(a);有隔离区 SLD 的 P-I、I-V 曲线(b)

Fig.4 P-I, I-V characteristics of SLD without isolation area(a); P-I, I-V characteristics of SLD with isolation area (b)

### 2.2 光谱测试

在光谱测试中,光路一端通过探针接入 Keithley 加入不同电流,另一端利用透镜光纤将 SLD 芯片输出光耦合至光谱分析仪。

无隔离区结构 SLD 在不同电流(依次为 40、60、80、100、120 mA)注入情况下的光谱测试结果如图 5(a)所示。从图中可以看出,器件中心波长为 1550 nm,无隔离区 SLD 器件在 60 mA 电流时光谱开始出现抖动,随着电流注入增加,光谱波纹增大。这主要是由于不同模式间存在竞争关系,随着注入电流的增加,因腔面模式反馈产生的增益逐渐增大,消耗了大

量的载流子,单程受激放大(即 SLD 的输出模式)占输出比例减小,当腔面模式增益大于腔面损耗和内部损耗时,其在输出光谱上形成的光谱波纹将增大。图 5(b)为器件在 100mA 工作电流下的典型光谱图。可以看到,无隔离区 SLD 器件 3 dB 光谱宽度为 48 nm,在谱线峰值附近光谱抖动约 1 dB。

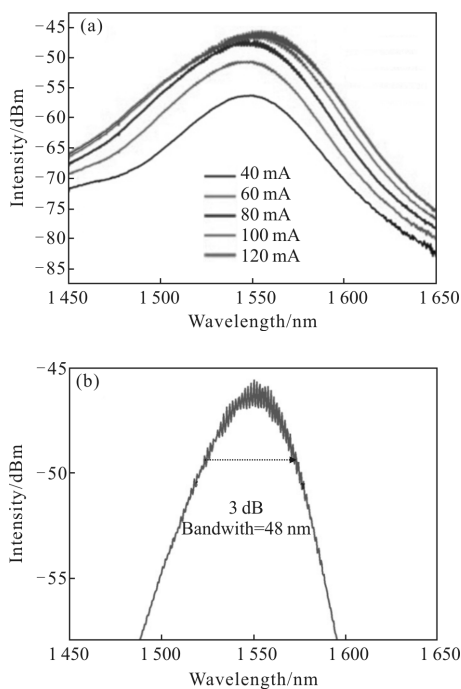


图 5 不同电流下无隔离区 SLD 光谱图(a); 100 mA、25 °C 下的典型光谱图(b), 3 dB 光谱宽为 48 nm

Fig.5 Spectrum of SLD without isolation area under different work current (a); typical spectrum at 100 mA and 25 °C(b), the corresponding spectrum at 3 dB is 48 nm

同样测量方法和设备下,对带有隔离区结构的 SLD 管芯在不同注入电流下的光谱进行测试,结果如图 6(a)所示。芯片中心波长为 1 550~1 554 nm。通过比较,有隔离区结构的芯片在不同电流下的光谱性能表现均很好,光谱形状规则,光谱波纹低,电流增大至 120 mA 情况下光谱也基本无抖动。在 100 mA 工作电流下光谱特性如图 6(b)所示,可以看出,器件 3 dB 光谱宽度可以达到 83 nm。为了得到准确的光谱波纹值,在靠近峰值 1 550 nm 处选取波长范围 20 nm 内分析光谱,如图 6(b)所示,光谱的波纹小于 0.1 dB,光谱平滑而较宽,光谱波纹明显下降,这说明 SLD 器件隔离区设计使得光学反馈得到了有效抑制,大大优化了光谱特性。两种器件的光谱都没有出

现明显类似激光器的激射谱线,器件腔内并没有形成谐振,器件结构的设计及工艺的改进对于器件性能起到了预期的优化作用。

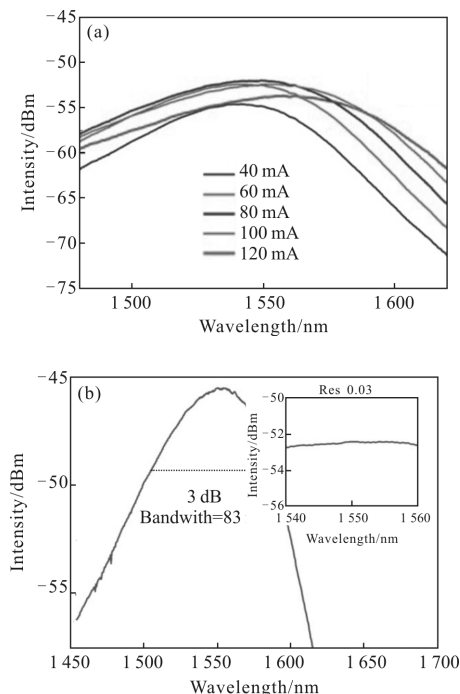


图 6 有隔离区不同电流下 SLD 光谱图(a); 100 mA、25 °C 下典型光谱图(b), 3 dB 光谱宽为 83 nm, 插图为波长范围 20 nm 光谱波纹图

Fig.6 Spectrum of SLD with isolation area under different work current (a); typical spectrum at 100 mA and 25 °C (b), the corresponding spectrum at 3 dB is 83 nm, the inset is the spectrum ripple diagram at 20 nm wavelength span

由两种 SLD 管芯在工作电流下的光谱特性和输出功率的对比得出,无隔离区 SLD 器件由于不存在吸收区的损耗,同时其有源区体积大,在 200 mA 电流下输出功率较高,但光谱在工作电流增加下波动较为明显;对于带有隔离区结构的芯片,由于矩形隔离区的引入,从出光面反射回来的谐振光几乎全部被吸收掉,再加上 0.5% 反射率的高透膜工艺,使得由于背光端面反射而产生的反馈增益大幅降低从而有效抑制了 F-P 激射,光谱宽度由 48 nm 拓宽至 83 nm,光谱波纹由 1 dB 降至 0.1 dB,较好的优化了光谱特性。

采用以上器件设计对于 SLD 的输出光谱有明显改善。但是吸收区的存在会将腔面反射回来的光吸收而降低光增益,最终减小了端面的出光功率。下

一步将进一步改进结构,比如增加喇叭形波导实现光的放大以及调整吸收区和增益区比例等,在保证宽光谱低抖动的的前提下提高饱和输出功率。

### 3 结论

文中通过采取增加隔离区及倾斜  $12^\circ$  波导结构,并结合低反射率端面抗反射薄膜技术,成功实现了 SLD 器件的超辐射特性,在中心波长  $1550\text{ nm}$  附近光谱纹波小于  $0.1\text{ dB}$ ,并且获得了  $83\text{ nm}$  的宽谱输出。同时,将带吸收区结构的 SLD 器件与无吸收区器件进行了对比。结果表明,无隔离区 SLD 在  $200\text{ mA}$  电流下输出功率达  $3.9\text{ mW}$ ,  $3\text{ dB}$  光谱宽度为  $48\text{ nm}$ ;增加隔离区后 SLD 器件光谱抖动降低,波纹小于  $0.1\text{ dB}$ ,  $3\text{ dB}$  光谱宽度增大至  $83\text{ nm}$ 。此次制备获得的高功率宽光谱 SLD 器件,可以作为一些医疗和工程光学设备的优良光源,可大大提高光学相干层析成像(OCT)、光纤陀螺(FOG)等对光源有特殊要求的光学设备的精度,具有重要的工程应用意义。

#### 参考文献:

- [1] Wang Mimi, Tao Hanzhong, Sun Zishuai, et al. The development and performance of the high-power LED radiator [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2017, 113(13): 65–72.
- [2] Romaim B, Khalid M, Vincent A, et al. Ultraviolet laser quantum well intermixing based prototyping of bandgap tuned heterostructures for the fabrication of superluminescent diodes[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 78(4): 5–9.
- [3] Zhang Chen, Yi Xiaosu, Yang Yanming, et al. Effects of degree of polarization of SLD on the performance of fiber optic gyroscope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 38(3): 509–514. (in Chinese)  
张晨, 伊小素, 杨艳明, 等. 超辐射发光二极管偏振度对光纤陀螺性能的影响 [J]. *红外与激光工程*, 2006, 38(3): 509–514.
- [4] Gao Y Y, Wang X X, Zhang Y N. Output characteristics of superluminescent light emitting diodes used in optic fiber gyroscope [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2015, 127(5): 2531–2534.
- [5] Chen S, Li W, Zhang Z, et al. GaAs-based superluminescent light-emitting diodes with  $290\text{ nm}$  emission bandwidth by using hybrid quantum well/quantum dot structures [J]. *Nanoscale Research Letters*, 2015, 10(1): 1–8.
- [6] Bei S, Lau K M. Enhanced optical properties of InAs/InAlGaAs/InP quantum dots grown by metal-organic chemical vapor deposition using a double-cap technique [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2016, 433: 19–23.
- [7] Kafar A, Stanczyk S, Sarzynski M, et al. Nitride superluminescent diodes with broadened emission spectrum fabricated using laterally patterned substrate [J]. *Optics Express*, 2016, 24(9): 9673–9682.
- [8] Ma Dongge, Shi Jiawei, Liu Mingda, et al. Effect of facet reflectivity on the output characteristics of superluminescent diode[J]. *Laser Technology*, 1996, 20(3): 168–173. (in Chinese)  
马东阁, 石家伟, 刘明大, 等. 腔面反射率对超辐射发光二极管输出特性的影响[J]. *激光技术*, 1996, 20(3): 168–173.
- [9] 唐琦, 徐海明, 王汉华. 一种偏振无关超辐射发光二极管芯片: 中国, 205881934[P]. 2017–01–11.
- [10] Li Hui, Wang Yuxia, Li Mei, et al. High-power  $850\text{ nm}$  large optical cavity wide spectrum superluminescent diode[J]. *Chinese J Lasers*, 2006, 33(5): 613–616. (in Chinese)  
李辉, 王玉霞, 李梅, 等. 高功率  $850\text{ nm}$  宽光谱大光腔超辐射发光二极管[J]. *中国激光*, 2006, 33(5): 613–616.
- [11] Song J H, Kim K, Leem Y A, et al.  $100\text{ mW}$  High-power broadband superluminescent diode using selective area growth at  $1.5\text{ }\mu\text{m}$  wavelength [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(19): 1415–1417.
- [12] Liu Yang, Song Junfeng, Zeng Yuping, et al. Wide-spectrum high-power  $1.55\text{ }\mu\text{m}$  superluminescent light source with non-uniform well-thickness multi-quantum wells [J]. *Chinese J Lasers*, 2003, 30(2): 109–112. (in Chinese)  
刘杨, 宋俊峰, 曾毓萍, 等. 非均匀阱宽多量子阱  $1.55\text{ }\mu\text{m}$  高功率超辐射光源[J]. *中国激光*, 2003, 30(2): 109–112.
- [13] Zhong Ming, Qian Zhiyu, Xue Han, et al. Study of OCT resolution improvement with double SLD sources [J]. *Shanghai Journal of Biomedical Engineering*, 2006, 27(4): 226–228. (in Chinese)  
钟鸣, 钱志余, 薛晗, 等. 利用双 SLD 光源提高 OCT 纵向分辨率的理论研究 [J]. *上海生物医学工程*, 2006, 27(4): 226–228.