

# 1 053 nm 高速超辐射发光二极管的研制及其光电特性

段利华<sup>1,2,3</sup>, 张淑芳<sup>4</sup>, 周勇<sup>3</sup>, 张靖<sup>3</sup>, 郭洪<sup>3</sup>, 罗庆春<sup>3</sup>, 方亮<sup>1,2\*</sup>

1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044;
2. 重庆大学应用物理系, 重庆 401331;
3. 重庆光电技术研究所, 重庆 400060;
4. 重庆电子工程职业学院软件学院, 重庆 401331)

**摘要:**制备了一种新型的具有高调制带宽的1 053 nm超辐射发光二极管(SLD). 利用光荧光(PL)测试分析了不同温度、不同生长速率对SLD芯片外延材料质量的影响,优化了InGaAs/GaAs量子阱的生长温度与生长速率. 分析了SLD模块的光电特性随温度与注入电流的变化关系. 研究结果表明,SLD输出波长随温度的漂移系数为0.35 nm/°C,其输出波长随注入电流的漂移对温度并不敏感. 在25 °C、100 mA注入电流下SLD的-3 dB调制带宽达到1.7 GHz,尾纤输出功率2.5 mW,相应的光谱半宽为24 nm,光谱波纹为0.15 dB.

**关键词:**超辐射发光二极管;1 053 nm;调制带宽

**中图分类号:**TN248.4;TN365 **文献标识码:**A

## Preparation and photoelectric characteristics of high speed superluminescent diode emitting at 1 053 nm

DUAN Li-Hua<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Shu-Fang<sup>4</sup>, ZHOU Yong<sup>3</sup>, ZHANG Jing<sup>3</sup>,  
GUO Hong<sup>3</sup>, LUO Qing-Chun<sup>3</sup>, FANG Liang<sup>1,2\*</sup>

1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. Department of Applied Physics, Chongqing University, Chongqing 401331, China;
3. Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, China;
4. College of Software, Chongqing College of Electronic Engineering, Chongqing 401331, China)

**Abstract:** A high speed 1 053 nm superluminescent diode (SLD) with ridge-waveguide structure has been fabricated. By optimizing of the growth parameters such as temperature, growth rate, epitaxial materials with excellent crystal quality were attained. The photoelectric characteristics of the SLD depended on temperature and driver current were analyzed. The coefficient of the wavelength shift with temperature was 0.35 nm/°C. The wavelength of the SLD shift with driver current insensitive to the temperature. A -3 dB cutoff frequency of 1.7 GHz was obtained at a DC bias current of 100 mA and 25 °C, corresponding to 2.5 mW output power from single mode fiber (SMF) with spectral modulation of less than 0.15 dB and spectral width of 24 nm.

**Key words:** superluminescent diode, 1 053 nm, modulation bandwidth

**PACS:** 42.55. Px; 85.60. Jb

收稿日期:2014-01-22,修回日期:2015-02-05

Received date: 2014-01-22, revised date: 2015-02-05

基金项目:国家自然科学基金(11304405);重庆大学机械传动国家重点实验室开放课题(SKLMT-KFKT-201419);重庆市科技攻关计划(CSTC 2012gg-gjhz50001, CSTC2013jj B0023);重庆市教育委员会科技项目(KJ132209);重庆大学大型仪器设备开放基金(201412150103, 201412150104, 201412150105)

Foundation items: Supported by NSFC(11304405), the Sharing Project of State Key Laboratory of Mechanical Transmission of Chongqing University (SKLMT-KFKT-201419), the Scientific and Technological D & R Project of Chongqing (CSTC2012 gg-gjhz50001 and CSTC 2013 jjB0023), Chongqing Education Commission (KJ132209), and the Sharing Fund of Large-scale Equipment of Chongqing University (201412150103, 201412150104 and 201412150105)

作者简介(Biography):段利华(1980-),男,广西桂林人,博士,主要研究领域为半导体激光器. E-mail: dlh259@163.com

\*通讯作者(Corresponding author); E-mail: lfang@cqu.edu.cn

## 引言

超辐射发光二极管(SLD)的性能介于激光器与发光二极管之间,具有短相干长度,低噪声以及宽光谱等优点,是光纤陀螺、波分复用、相干层析成像等的理想光源.近年来关于 SLD 的研究主要集中在  $\sim 0.8 \mu\text{m}$ <sup>[1]</sup>,  $\sim 1.3 \mu\text{m}$ <sup>[2]</sup> 以及  $\sim 1.5 \mu\text{m}$ <sup>[3]</sup> 波段,大都是通过设计不同的结构与技术以期实现低光谱波纹,大功率以及宽光谱的输出,而对 SLD 的调制带宽研究很少. N. S. K. Kwong 等人报道的  $1.3 \mu\text{m}$  波长 SLD(发光区长  $730 \mu\text{m}$ ),在  $140 \text{ mA}$  下  $3 \text{ dB}$  调制带宽为  $570 \text{ MHz}$ <sup>[4]</sup>. 2013 年 T. Ohgoh 等人报道了波长为  $1.05 \mu\text{m}$  的 SLD,其芯片输出功率为  $33.4 \text{ mW}$ ,对应的光谱半宽达到了  $77.5 \text{ nm}$ <sup>[5]</sup>. 通常情况下,通过增加 SLD 的增益区长度可以提高其输出功率,但是其腔长的增加会提高光子寿命,导致 SLD 的调制带宽的下降. 据我们所知,截至目前没有关于  $\sim 1.0 \mu\text{m}$  波段 SLD 的调制带宽的研究报道.

在高功率激光系统中一般利用相位调制器对单纵膜激光进行频谱展宽以避免受激布里渊散射(SBS),但是当后继系统中的滤波器存在中心波长偏差时,则会导致相位调制产生的带边失衡,使光信号出现较为严重的高频起伏<sup>[6]</sup>. 而且 SBS 阈值强烈依赖于种子源的光谱宽度,所以,具有宽光谱的 SLD 作为种子源相比于激光器具有更高的 SBS 阈值<sup>[7]</sup>. 另外,当  $1053 \text{ nm}$  激光器倍频转换至  $351 \text{ nm}$  时,由于其高的相干性,经放大器后光束形貌的微小变化都能严重影响三倍频的光束质量<sup>[8]</sup>. 而采用  $1053 \text{ nm}$  SLD 作为惯性约束聚变(ICF)等高能激光系统的种子光源,具有体积小,方便调制等优点,但使用时在系统后端需要用滤波片进行滤波,其通过光谱带宽仅有  $2 \text{ nm}$  左右,因此需要极为精确地控制 SLD 的发射波长.

本文首次详细报道了  $1053 \text{ nm}$  高速 SLD 模块的研制及其光电特性. 分析了生长温度与生长速度对 InGaAs/GaAs 量子阱外延材料质量的影响,以及 SLD 的光电特性随热沉温度与注入电流的变化关系.

## 1 器件结构与研制

辐射波长为  $1053 \text{ nm}$  的应变量子阱,由于高组分 In 掺入, InGaAs/GaAs 晶格失配大,极易触发 InGaAs 单层的生长模式由 2D 层状生长向 3D 岛状生长模式的转变. 避免高应变 InGaAs 出现 3D 生长模式的唯一途径是利用生长动力学阻止系统达到平

衡<sup>[9]</sup>,以提高 In 的并入率. 为得到高质量高效率的外延材料,我们研究了生长温度以及生长速率对外延材料生长质量的影响. 材料生长是在 AIX2400MOCVD 设备上进行的,生长压力  $100 \text{ mbar}$ , III 族源为三甲基镓(TMGa)、三甲基铝(TMAL)、三甲基铟(TMIn), V 族源为砷烷(AsH<sub>3</sub>), P 型掺杂剂为二乙基锌(DEZn), N 型掺杂剂为硅烷(SiH<sub>4</sub>). 载气为经 Pd-cell 纯化的 H<sub>2</sub>,载气流量  $30 \text{ L/min}$ ,量子阱发光效率测试采用 Philip PL 测试仪,组分测试采用 X 射线双晶衍射仪. 衬底采用晶向(100)偏(110)方向 2 度的掺 Si GaAs 衬底.

不同生长温度、生长速率下, InGaAs/GaAs-MQW 的 PL 测试结果如图 1 所示. InGaAs/GaAs-MQW 的生长质量基本上是随生长温度的降低而提高. 在  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $630 \text{ }^\circ\text{C}$  的生长温度下,生长质量较差,当生长温度降至  $550 \text{ }^\circ\text{C}$ ,生长质量持续改善. 然而,当生长温度继续降低至  $530 \text{ }^\circ\text{C}$  时,生长质量并未出现预期的提高,反而不如  $550 \text{ }^\circ\text{C}$ ,表明最佳的生长温度应高于  $530 \text{ }^\circ\text{C}$ . 当生长温度较高时( $630 \text{ }^\circ\text{C}$ ), PL

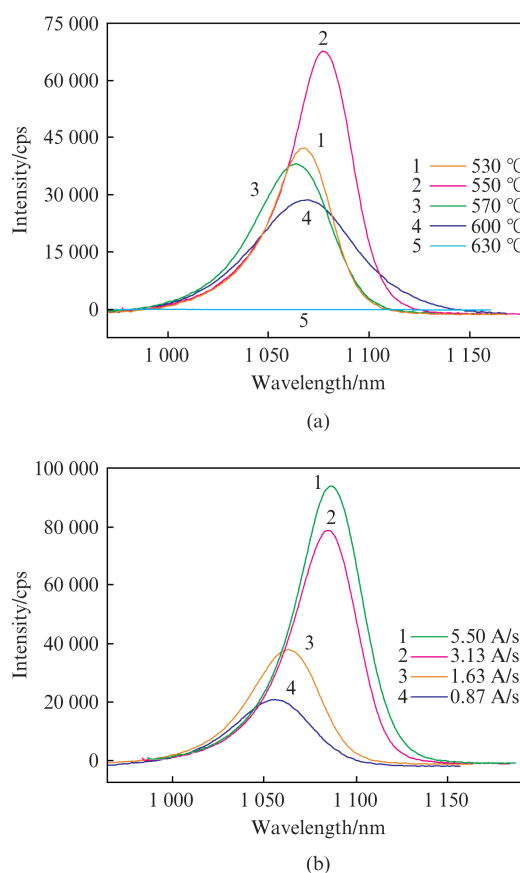


图1 不同生长温度、生长速率下, InGaAs/GaAs-MQW 的 PL 测试结果

Fig. 1 PL spectra of InGaAs/GaAs MQW with different (a) growth temperature, (b) growth rate

测试光强很弱.

关于生长速率对高 In 组分 InGaAs 生长质量的影响有不同的观点和报道<sup>[10-11]</sup>. 为明确生长速率对生长质量的影响,进行了生长速率的优化对比实验,测试结果如图 1(b)所示. 从 PL 测试的结果来看,在较高的生长速率下,多量子阱的界面质量和晶体质量更佳,PL 效率随生长速率的增大而持续显著改善,PL 峰值波长红移. 在生长速率的对比实验中,TMIn/TMGa 摩尔流量比以及 V/III 比均保持恒定. 由此可见,增大生长速率有利于改善生长质量.

设定 InGaAs/GaAs 量子阱的生长温度为 550 °C,生长速率为 5.50 Å/s. 为了进一步提高材料的生长质量,在限制层与波导层之间加入了一层 6 nm 厚的应变缓冲层<sup>[12]</sup>,应变缓冲层可以减少线缺陷,能有效地改善界面处的表面质量<sup>[13]</sup>,其 XRD 测试结果如图 2 所示,从图可以看到 InGaAs/GaAs 量子阱结构的晶体质量较佳. 外延片结构如图 3a 所示,在衬底上依次生长 0.5 μm 厚的 N 型 GaAs 缓冲层、1.5 μm 厚的 N 型 Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>As 下限制层、0.2 μm 的非掺杂 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As ( $x=0.5 \sim 0.2$ ) 渐变分别限制层、6 nm 的非掺杂 In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As 缓变层、In<sub>0.34</sub>Ga<sub>0.66</sub>As/GaAs 应变双量子阱 (5.5 nm/10 nm)、0.2 μm 的非掺杂 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As ( $x=0.2 \sim 0.5$ ) 渐变分别限制层以及 1.3 μm 厚的 P 型 Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>As 上限制层和 0.2 μm 厚的 P 型 GaAs 接触层.

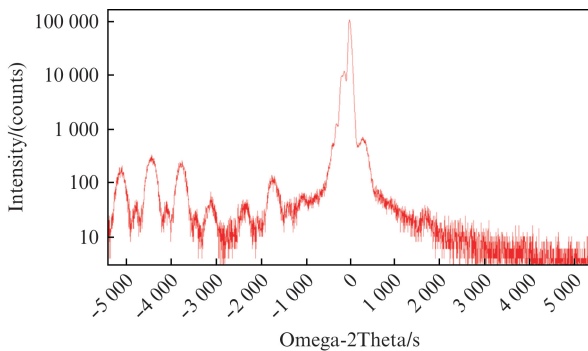


图 2 InGaAs/GaAs-MQW 的 XRD 测试结果  
Fig. 2 XRD scanning curves of InGaAs/GaAs MQW

芯片采用脊波导结构,脊宽 4 μm,脊高 1.5 μm. 有源发光区长 700 μm. 为了抑制腔内的激射振荡,采用 400 μm 长的弯曲锥形波导吸收区结构,弯曲波导与后端面的法线间的角度为 8°,并在两腔面镀 1/4 波长厚度的 ZrO<sub>2</sub> 增透膜. P 面与 N 面电极分别为 Ti/Pt/Au 和 AuGeNi/Au. 为了提高 SLD 的调制带宽,芯片 P 面采用点电极以及微带线封装以降低电

容,如图 3(b)所示,SLD 芯片正装在 AlN 热沉上,通过过渡电极与微带线相连,AlN 热沉置于致冷器上以控制 SLD 的工作温度,为匹配 50 Ω 的特征阻抗,微带线上串联一个 43 Ω 的电阻与 SMA 相连. 模块采用带 SMA 的七针蝶形封装,性能测试示意图如图 3(b)中插图所示.

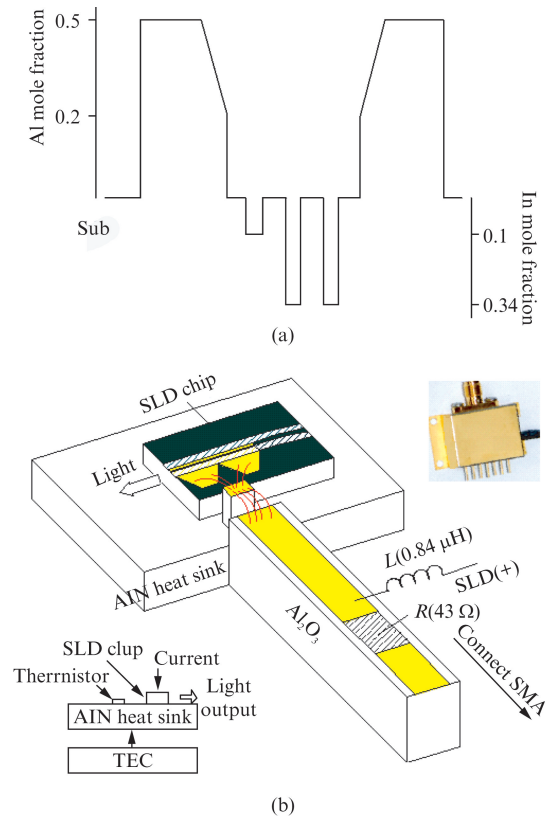


图 3 (a) SLD 芯片外延结构示意图,(b) SLD 微带线封装示意图,插图为器件照片与性能测试示意图

Fig. 3 (a) Schematic diagram of the SLD epitaxial structure,(b) schematic drawing of assembly of microstrip and the SLD chip, the inset are performance measurement and packaging photo

## 2 器件结果与讨论

### 2.1 温度对 SLD 模块光电性能的影响

超辐射发光二极管的峰值功率以及光谱半宽可以表示为<sup>[14]</sup>:

$$P_p = \frac{2\beta n_{sp} hc^2}{\lambda_p^3} \exp\{-\alpha L + G(N)\} \quad (1)$$

$$\Delta\lambda_{FWHM} \propto \frac{\lambda_w(N)}{\sqrt{G(N)}} = \frac{\lambda_w(N)}{\sqrt{L\Gamma g_0(N)}} \quad (2)$$

式中, $h$  为普朗克常数, $c$  为真空中光速, $\beta$  为自发辐射光至波导层的耦合因子, $n_{sp}$  为粒子数反转因子, $\lambda_p$  为峰值波长, $\lambda_w$  为材料增益谱半宽, $\alpha$  为模式损耗, $L$

为芯片腔长,  $N$  为载流子密度,  $G$  为芯片的总增益,  $\Gamma$  为限制因子,  $g_0$  为峰值材料增益.

在  $15\text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 45\text{ }^\circ\text{C}$  温度范围内 SLD 模块光纤输出功率随注入电流变化关系如图 4(a) 所示. 结果显示 SLD 具有“软阈值”, 软阈值以下发射光为自发辐射光, 软阈值以上时进入以自发辐射为主的超辐射状态. 随着温度的升高, SLD 的增益  $G$  下降, 使得 SLD 的输出功率也降低, 其光谱波纹几乎成线性变小, 如图 4a 中插图所示,  $5\text{ }^\circ\text{C}$  时光谱波纹为  $0.25\text{ dB}$ ,  $50\text{ }^\circ\text{C}$  时减少为  $0.05\text{ dB}$ . 在  $25\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $100\text{ mA}$  下 SLD 模块尾纤输出功率达到  $2.5\text{ mW}$ , 发射波长为  $1\ 053.6\text{ nm}$ ,  $3\text{ dB}$  光谱半宽  $24\text{ nm}$ , 光谱波纹为  $0.15\text{ dB}$ , 如图 4(b) 所示.

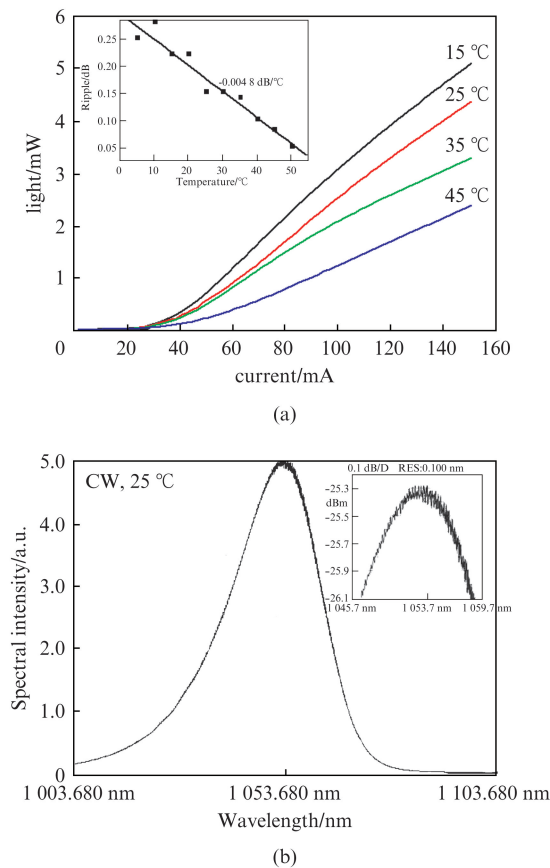


图 4 (a) 不同温度下 SLD 模块尾纤输出功率与注入电流的关系, 插图为光谱波纹随温度的变化, (b)  $100\text{ mA}$ 、 $25\text{ }^\circ\text{C}$  下的 SLD 典型的光谱图, 相应光谱调制深度为  $0.15\text{ dB}$   
 Fig. 4 (a) The  $L$ - $I$  curves of  $1\ 053\text{ nm}$  SLD at different temperature, the inset is the spectral modulation depth shift with the temperature, (b) the typical spectrum of the  $1\ 053\text{ nm}$  SLD at  $100\text{ mA}$  and  $25\text{ }^\circ\text{C}$ , the corresponding spectral modulation depth is  $0.15\text{ dB}$

对 SLD 模块在不同温度下进行了连续与脉冲 ( $3\text{ kHz}$ ,  $10\text{ }\mu\text{s}$ ) 测试, 注入电流为  $100\text{ mA}$ , 结果如图

5 所示. 随着温度的升高, 波长向长波方向漂移, 连续与脉冲条件下的波长漂移系数分别为  $0.35\text{ nm}/^\circ\text{C}$  和  $0.36\text{ nm}/^\circ\text{C}$ , 两者变化一致说明 SLD 模块具有良好的散热特性.

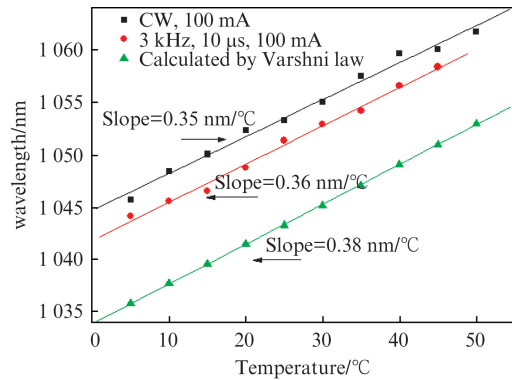


图 5 SLD 模块输出波长随温度的漂移  
 Fig. 5 The output wavelengths shift with the temperature

为了进一步分析 SLD 模块输出波长随温度的变化, 对  $\text{InGaAs}$  量子阱 SLD 外延材料带隙本身随温度变化的关系进行计算. 应变会导致  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  量子阱激光器的能带结构发生变化<sup>[15]</sup>. 超辐射发光二极管类似于脊波导结构的半导体激光器, 不同的是一端有一段非注入吸收区用来抑制激射振荡. 这里做类似地简单分析. 在大压应变情况下,  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  量子阱中能带跃迁主要是导带到重空穴带的跃迁.

$$E_g^{C,HHH} = E_g(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}) + 2A \left[ \frac{C_{11} - C_{12}}{C_{11}} \right] \varepsilon - B \left[ \frac{C_{11} + 2C_{12}}{C_{11}} \right] \varepsilon \quad (3)$$

式中,  $\varepsilon$  为弹性应变变量,  $C_{ij}$  为弹性硬度张量的分量, 它们的值请参考文献 [16].  $A$ 、 $B$  分别为流体静压力和切向形变势, 其中  $A = 1.2x - 7.1$ ,  $B = -0.1x - 1.7$ <sup>[17]</sup>.  $E_g(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As})$  是无应变时的带隙. 高温时 ( $T > 100\text{ K}$ ), PL 波长的变化可以反映能带带隙的改变, 故可通过观察 PL 波长来分析带隙边发射的情况<sup>[18]</sup>. 能带带隙随温度的变化可以用 Varshni 经验公式来表示:

$$E_g(T) = E_g(0) - \alpha T^2 / (T + \beta) \quad (4)$$

式中  $E_g(0)$  是  $T = 0\text{ K}$  时的带隙能量,  $\alpha$  和  $\beta$  是与材料有关的常数. 对于  $\text{In}_{0.34}\text{Ga}_{0.66}\text{As}/\text{GaAs}$  应变量子阱,  $E_g(0) = 1.1872\text{ eV}$ ,  $\alpha$  和  $\beta$  分别取  $5.8 \times 10^{-4}\text{ eV/K}$ ,  $310\text{ K}$ <sup>[19]</sup>. 利用  $\lambda = 1.24/E_g^{C,HHH}$ , 可以得到 PL 波长随温度变化的关系, 如图 4 所示, 波长漂移系数为  $0.38\text{ nm}/^\circ\text{C}$ , 这与 SLD 的 ASE 波长漂移系数是相吻合的.

## 2.2 注入电流对 SLD 模块光学特性的影响

随着注入电流的增加,由于材料增益增加从而使芯片总增益  $G(N)$  增加,同时,由于带系填充效应导致增益谱宽  $\lambda_w$  变宽. 所以,它们增长的快慢决定 SLD 光谱半宽  $\Delta\lambda_{FWHM}$  的变化. 当 SLD 由自发辐射进入超辐射状态,光谱半宽急剧下降,然后随注入电流增加而缓慢增长,如图 6(a) 所示. 光谱半宽由自发发射谱与光学增益谱决定<sup>[20]</sup>,在低注入电流时自发辐射占主导,具有更宽的光谱半宽. 另外,温度会影响空穴至量子阱的输运时间,在低电流密度注入时量子阱中具有更均匀的载流子分布,从而也具有更宽的发射光谱. 而在高注入水平时光学增益谱决定了 SLD 的光谱半宽,材料增益半宽  $\lambda_w$  比芯片的有效增益的平方根  $\sqrt{G(N)}$  增长要快<sup>[21]</sup>.

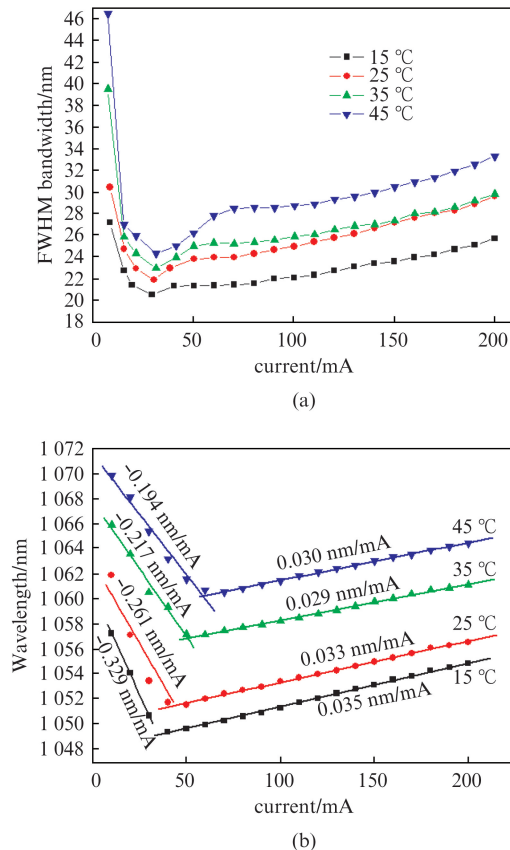


图 6 不同温度下 SLD 的 (a) 光谱半宽随注入电流的变化, (b) 输出波长随注入电流的变化  
Fig. 6 (a) The bandwidths (FWHM), and (b) the output wavelengths shift with the injection current at different temperature

随着注入电流的增加,SLD 的输出波长由于带隙填充效应开始急剧下降,当注入电流大于“软阈值”时,由于有源层的温度上升引起的带隙收缩效应导致的波长红移大于因电流注入水平改变引起的带隙填

充效应所致的波长蓝移<sup>[22]</sup>,SLD 输出波长向长波方向漂移,如图 6(b) 所示. 25 °C 时, 10 mA 时的输出波长为 1 062 nm, 50 mA 时为 1 051.5 nm, 而 200 mA 时则为 1 056.5 nm. 在软阈值以下波长的漂移系数为  $-0.261$  nm/mA, 软阈值以上为  $0.033$  nm/mA. 从图 5 (b) 还可以看到,输出波长的漂移系数随着温度的上升略微变小,但是这种影响有限,特别是在软阈值以上时输出波长随注入电流的漂移对温度并不敏感.

## 2.3 SLD 模块的调制带宽

为了提高调制带宽,SLD 芯片 P 面电极采用电极图形技术以及微带线封装来降低寄生电容. 利用 C-V 测量仪测试 SLD 芯片的电容值为  $5.73$  pF. 在 100 mA、25 °C 下测得 SLD 的  $-3$  dB 调制带宽达到  $1.7$  GHz, 如图 7 所示.

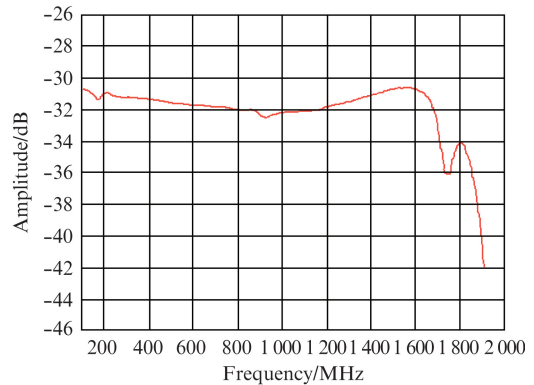


图 7 100 mA、25 °C 条件下 SLD 的调制带宽曲线  
Fig. 7 The frequency response of the 1053 nm SLD at 100 mA and 25 °C

另外,还可通过缩短发光区长度以减少光子寿命来提高 SLD 的调制带宽. 当发光区长度为  $500 \mu\text{m}$  时,在 100 mA、25 °C 下测得调制带宽超过 2 GHz. 但是,有源区长度减少会降低 SLD 的输出功率,而且有源区电流注入密度变大导致第二能级发生跃迁,在 998 nm 附近出现一波峰,如图 8 所示. 此波峰的出现使得光谱形状发生改变,影响光谱半宽及中心发射波长的稳定.

## 3 结论

详细报道了一种具有高调制带宽的 1 053 nm 超辐射发光二极管. 研究了不同温度、不同生长速率对 SLD 芯片外延材料质量的影响,确定了 InGaAs/GaAs 量子阱的优化生长温度与生长速率分别为  $550$  °C 和  $5.50 \text{ \AA/s}$ . 分析了 SLD 模块的光电特性随温度与注入电流的变化关系. 随着温度的升高,SLD

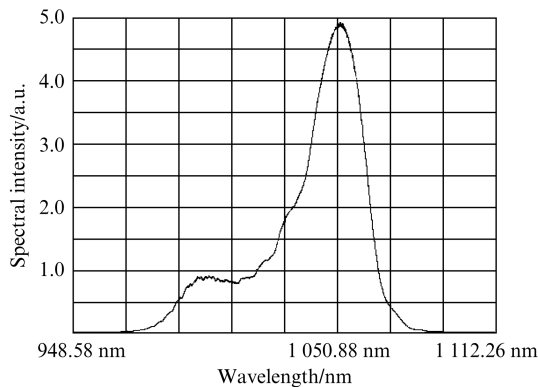


图8 100 mA、25 °C条件下SLD的光谱曲线图,发光区长500  $\mu\text{m}$

Fig. 8 The spectrum of the 1 053 nm SLD with 500  $\mu\text{m}$  active length at 100 mA and 25 °C

的增益下降,使得SLD的输出功率也降低,其光谱波纹几乎成线性变小.当SLD由自发辐射进入超辐射状态时,光谱半宽急剧下降,然后随注入电流增加而缓慢增长,SLD输出波长随温度的漂移系数为0.35 nm/°C,其输出波长随注入电流的漂移对温度并不敏感.通过采用SLD芯片P面电极图形技术以及微带线封装降低了寄生电容,在25 °C、100 mA注入电流下SLD(发光区长700  $\mu\text{m}$ )的-3 dB调制带宽达到1.7 GHz,尾纤输出功率2.5 mW,相应的光谱半宽为24 nm,光谱波纹为0.15 dB.研制的SLD模块具有良好的散热特性.此SLD模块适用于ICF激光驱动器等大功率激光系统的种子源.

## References

- [1] Andreeva E V, Il'ichenko S N, Kostin Y O, *et al.* Broad-band superluminescent diodes with bell-shaped spectra emitting in the range from 800 to 900 nm[J]. *Quantum Electronics*, 2013, **43**(8): 751 - 756.
- [2] Wei J, Park S, Hu Y, *et al.* A high-power, broad-bandwidth 1 310 nm superluminescent diode with low spectral modulation[C]. In *Biomedical Optics 2006. International Society for Optics and Photonics*, 2006: 60791P - 60791P - 6.
- [3] Song J H, Cho S H, Han I K, *et al.* High-power broadband superluminescent diode with low spectral modulation at 1.5  $\mu\text{m}$  wavelength[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, **12**: 783 - 785.
- [4] Kwong N S K, Chaim N B, Chen T. High-power 1.3- $\mu\text{m}$  superluminescent diode[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **54**: 298 - 300.
- [5] Ohgoh T, Mukai A, Yaguchi J, *et al.* Demonstration of 1.0  $\mu\text{m}$  InGaAs high-power and broad spectral bandwidth superluminescent diodes by using dual quantum well structure[J]. *Applied Physics Express*, 2013, **6**(1): 014101 - 1 ~ 014101 - 4.
- [6] JI Fan, XU Li-Xin, WANG Jian-Jun, *et al.* Analysis of pulse fluctuation caused by modulation and filtering[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* (纪帆,徐立新,王建军,等.调制滤波引起脉冲起伏研究.量子电子学报) 2008, **25**(4): 413 - 417.
- [7] Zhang H T, Liu M, Yan P, *et al.* SLD seeded all fiber cascaded nanosecond pulsed amplifier[J]. *Laser Physics*, 2012, **22**(8): 1331 - 1334.
- [8] Guardalben M J, Waxer L J. Improvements to long-pulse system performance and operation efficiency on OMEGA EP[J]. *Proceeding of SPIE*, 2011, **7916**: 79160G - 1 ~ 79160G - 10.
- [9] Schlenker D, Miyamoto T, Chen Z, *et al.* Growth of highly strained GaInAs/GaAs quantum wells for 1.2  $\mu\text{m}$  wavelength lasers[J]. *J. Crystal. Growth*, 2000, **209**(1): 27 - 36.
- [10] Grandjean N, Massies J. Epitaxial growth of highly strained InGaAs on GaAs(001): the role of surface diffusion length[J]. *J. Crystal. Growth*, 1993, **134**(1): 51 - 62.
- [11] Su Y K, Chen W C, Wan C T, *et al.* Optimization of highly strained InGaAs/GaAs quantum well lasers grown by MOVPE[J]. *J. Crystal. Growth*, 2008, **310**(15): 3615 - 3620.
- [12] Li X, Duan L H, Zhou Y, *et al.* Strained InGaAs/GaAs quantum-well laser emitting at 1 054 nm[J]. *Journal of superconductivity and novel magnetism*, 2010, **23**(6): 937 - 939.
- [13] Schlenker D, Pan Z, Miyamoto T, *et al.* Effect of surface quality on overgrowth of highly strained GaInAs/GaAs quantum wells and improvement by a strained buffer layer[J]. *Japanese journal of applied physics*, 1999, **38**(9R): 5023 - 5027.
- [14] Park J, Li X. Theoretical and numerical analysis of superluminescent diodes[J]. *Journal of lightwave technology*, 2006, **24**(6): 2473 - 2480.
- [15] Chan C H, Wu J D, Huang Y S, *et al.* Photoluminescence and surface photovoltage spectroscopy characterization of highly strained InGaAs/GaAs quantum well structures grown by metal organic vapor phase epitaxy[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2010, **124**: 1126 - 1133.
- [16] Zhan F, Li L, Ma X H, *et al.* Theoretical study of linewidth enhancement factor of InGaAs/GaAs strained quantum well lasers[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2012, **61**(5): 054209 - 1 ~ 054209 - 6.
- [17] Ye Z C, Shu Y C, Cao X, *et al.* Strain effect on temperature dependent photoluminescence from  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  quantum wells[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2011, **32**(2): 164 - 168.
- [18] Saidi F, Hassen F, Maaref H, *et al.* Optical study of  $\text{B}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  epilayers[J]. *Materials Science and Engineering C*, 2006, **26**: 236 - 239.
- [19] Lai F I, Kuo S Y, Wang J S, *et al.* Temperature dependent optical properties of  $\text{In}_{0.34}\text{Ga}_{0.66}\text{As}_{1-x}\text{N}_x/\text{GaAs}$  single quantum well with high nitrogen content for 1.55  $\mu\text{m}$  application grown by molecular beam epitaxy[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2006, **291**: 27 - 33.
- [20] Song J H, Kim K, Leem Y A, *et al.* High-power broadband superluminescent diode using selective area growth at 1.5- $\mu\text{m}$  wavelength[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, **19**(19): 1415 - 1417.
- [21] Park J W, Li X. Theoretical and numerical analysis of superluminescent diodes[J]. *Journal of lightwave technology*, 2006, **24**(6): 2473 - 2480.
- [22] Higashi T, Yamamoto T, Ogita S, *et al.* Experimental analysis of temperature dependence of oscillation wavelength in quantum-well FP semiconductor lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1998, **34**(9): 1680 - 1689.