

文章编号: 1000-7032(2015)01-0069-06

## 低偏振高功率 1 310 nm 超辐射发光二极管的液相外延生长

周 勇<sup>1</sup>, 段利华<sup>1,2\*</sup>, 张 靖<sup>1</sup>, 刘尚军<sup>1</sup>, 韩伟峰<sup>1</sup>, 黄 茂<sup>1</sup>

(1. 重庆光电技术研究所, 重庆 400060; 2. 重庆大学 应用物理系, 重庆 400044)

**摘要:** 对新月形超辐射发光二极管的液相外延生长过程进行了机理分析。利用 Matlab 软件对建立的非平面生长模型进行了理论计算, 并利用扫描电镜(SEM)对液相外延生长的形貌进行了分析, 通过理论计算与实验分析设计了获得低偏振、高功率超辐射发光二极管的外延结构。利用该结构研制的超辐射发光二极管芯片在 100 mA 工作电流、25 °C 工作温度下输出功率达到 3.6 mW, 相应的输出波长为 1 306 nm, 光谱半宽为 39 nm, 光谱波纹为 0.17 dB, 偏振度为 2%。

**关 键 词:** 超辐射发光二极管; 低偏振度; 高功率; 液相外延

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20153601.0069

### 1 310 nm Polarization-insensitive High Power Superluminescent Diodes Fabricated by Liquid Phase Epitaxy

ZHOU Yong<sup>1</sup>, DUAN Li-hua<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Jing<sup>1</sup>, LIU Shang-jun<sup>1</sup>, HAN Wei-feng<sup>1</sup>, HUANG Mao<sup>1</sup>

(1. Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, China;

2. Department of Applied Physics, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

\* Corresponding Author, E-mail: dlhsemi@163.com

**Abstract:** Theoretical analyses of growing processes were made in the case of superluminescent diode with crescent structure by liquid phase epitaxy (LPE), which could perfectly explain some phenomena in experiments of LPE on curved InP surfaces. The results of numerical calculation were consistent with the experimental results. The epitaxy structure was optimized to enhance the output power and reduce the polarization of the SLD. As a result, polarization dependence as low as 2% and 3.6 mW output power were obtained at 100 mA and 25 °C heat-sink temperature, corresponding to 39 nm spectral width with spectral modulation of less than 0.17 dB.

**Key words:** superluminescent diode; polarization insensitive; high power; liquid phase epitaxy

## 1 引 言

超辐射发光二极管(SLD)的性能介于激光二极管与发光二极管之间,具有短相干长度、低噪声以及宽光谱等优点,是用于光纤陀螺<sup>[1]</sup>、光学传感<sup>[2]</sup>等领域的理想光源。实际的 SLD 光源发射

的是部分偏振光,大部分的功率在平行于半导体结的水平偏振中,并且在相同驱动电流下,光源出射光的偏振度会随着外界环境的变化而波动,在光纤陀螺中会导致偏振相位误差。光源出射的光的偏振度越高,其出射光的偏振态对外界环境越敏感。通过在光源后面使用消偏器可以实现

收稿日期: 2014-09-22; 修订日期: 2014-11-05

基金项目: 国家自然科学基金(11304405)资助项目

2% ~ 5% 的低偏振度<sup>[3]</sup>, 不过这种途径需要考虑技术成本等问题。近年来, 关于 SLD 的研究主要集中在  $\sim 0.8$ <sup>[4]</sup>,  $\sim 1.0$ <sup>[5]</sup>,  $\sim 1.3$ <sup>[6]</sup>,  $\sim 1.5 \mu\text{m}$ <sup>[7]</sup> 波段。人们通过采用腔面镀抗反射膜、非泵浦吸收区以及倾斜腔面等技术来抑制 F-P 腔内的光振荡以实现低光谱波纹。为了实现 SLD 高功率输出, Yoo 等<sup>[8]</sup> 提出了“V”沟结构, Xin 等<sup>[9]</sup> 提出了多段图形结构等 SLD 制作技术。Khan 等<sup>[10]</sup> 通过采用量子阱和量子线等技术, 提高了 SLD 的光谱半宽。随着对应变结构材料研究的进步, 偏振不敏感半导体光放大器 (SOA) 与 SLD 器件得以实现, SOA 与 SLD 的偏振度普遍降低至 1 dB ( $\sim 10\%$ ) 的水平<sup>[11-13]</sup>。刘科等<sup>[14]</sup> 采用 MOCVD 生长混合应变量子阱的脊波导结构 SLD, 在 100 mA 注入电流下, 裸管芯的输出功率为 3.5 mW, 偏振度为 0.3 dB。由于具有更好的图形对称性, 方块状的体材料有源区比量子阱结构有源区更容易实现偏振不敏感。掩埋异质结构 (BH) 的横向折射率差远大于脊波导结构, 能更好地实现光源与光纤的有效耦合、线性光-电流特性、稳定的基横模以及良好的漏电流限制, 有利于实现低偏振、大功率输出。

液相外延生长技术具有工艺简单、成本低、外延层界面质量好等优点, 已广泛应用于 III-V 族材料的制备<sup>[15-18]</sup>。为了提高输出功率, 我们曾对双沟平面掩埋异质结构 (DCPBH) SLD 的漏电机理进行了拟合分析, 并通过结构优化实现了对电流限制较为理想的掩埋异质结构<sup>[19]</sup>。针对光纤陀螺等领域的应用, 本文就掩埋新月形 (BC) 结构的液相外延生长技术进行了研究分析, 通过采用体材料有源区结构, 实现了低偏振度、高功率的 SLD 器件。

## 2 理论分析

### 2.1 基横模条件

SLD 外延片采用两步外延工艺制作。一次外延采用 MOCVD 生长, 在 n-InP 衬底上依次生长 n-InP 缓冲层、p-InP 电流阻挡层和 n-InP 限制层。然后, 通过光刻工艺在一次外延片上沿  $\langle 011 \rangle$  晶向刻蚀出宽约  $1.8 \mu\text{m}$ 、深约  $2.5 \mu\text{m}$  的燕尾槽。二次液相外延在沟道衬底上依次生长 n-InP 缓冲层、InGaAsP 下波导层、InGaAsP 有源层、InGaAsP 上波导层、p-InP 限制层和 n-InGaAsP 顶层。外延

生长完成后, 在燕尾槽上方刻蚀窗口, 并通过 p 型 Cd 扩散形成电流通道。SLD 层次结构如图 1 (a) 所示。

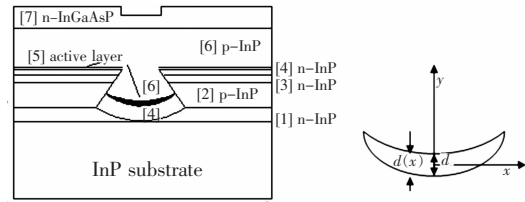


图 1 (a) SLD 层次结构示意图; (b) 分析导模时所采用的坐标系统。

Fig. 1 (a) Schematic diagram of layers structure of SLD. (b) Coordinate system for guided modes.

图 1 (b) 为分析导模时所采用的坐标系统。从 BC 激光器导模的性质出发, 认为新月形有源区为一个被包层覆盖的抛物线波导, 有源层厚度  $d(x)$  随  $x$  呈抛物线变化<sup>[20]</sup>:

$$d(x) = d_0 [1 - (x/(W/2))^2], \quad (1)$$

式中,  $d_0$  为有源层中心厚度,  $W$  为沿  $x$  方向的有源层宽度。若有源区的折射率为  $n_1$ , InP 包层的折射率为  $n_2$ , 对于薄的有源层以及弱波导情况下, 抛物线波导的模截止宽度  $W_c$  为:

$$W_c = m\lambda_0^2 / \sqrt{2\pi d_0 (n_1^2 - n_2^2)}, \quad (2)$$

其中,  $m = 1, 2, \dots$ 。取  $n_1 = 3.358$ ,  $n_2 = 3.162$ ,  $\lambda_0 = 1.3 \mu\text{m}$ , 可求出基横模截止时的  $W_c d_0 = 0.302 \mu\text{m}^2$ 。图 2 为计算出的各阶模截止条件。

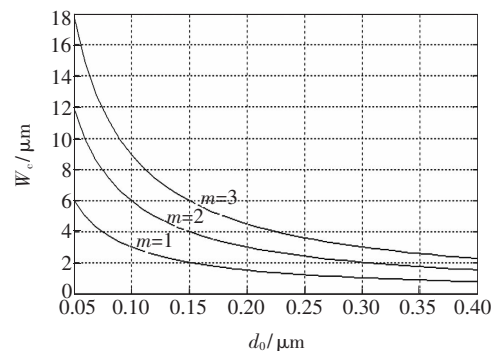


图 2 各阶模截止条件

Fig. 2 Cut-off conditions of different modes

我们生长的有源层厚度典型值为  $d_0 = 0.15 \mu\text{m}$ 。为获得稳定的基横模输出, 有源层的宽度最大不能超过  $2 \mu\text{m}$ 。采用的光刻图形为沟道宽  $1.8 \mu\text{m}$ 、深  $2.5 \mu\text{m}$  的燕尾槽结构, 燕尾槽底部的宽度为  $5 \mu\text{m}$ 。这种燕尾槽结构在掩埋生长时不容易实现窄条宽的生长, 而为了实现基横模、高功

率输出,减小有源层的条宽是必须的。有源层的形状直接受二次外延时第一层 n-InP 生长的影响。第一层生长时间短,有源层位置低、宽度大,如图 3(a)所示,有源层宽度为 2.72  $\mu\text{m}$ 。增加 n-InP 层的生长时间可以抬高有源层的位置使其向燕尾槽口偏移,这样可以略微减小有源层的宽度,但是容易出现槽口回熔塌边增加漏电,如图 3(b)所示,有源层的宽度为 2.45  $\mu\text{m}$ 。为了有效地缩小有源层条宽同时抑制槽口的回熔,我们对二次外延时第一层 n-InP 的外延生长机理进行了分析。

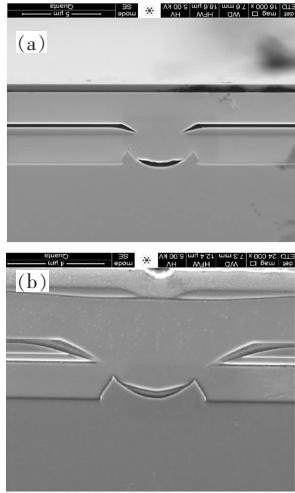


图3 液相外延生长截面 SEM 图

Fig. 3 SEM sectional views of the SLD grown by LPE

## 2.2 生长机理分析

二次液相外延第一层 n-InP 的生长厚度以及所形成界面的曲率直接决定了第二层有源层的生长形状。沟道内的生长速率是不同的,拐角处的生长速率比平面的快。由于局部的快速生长导致熔源中缺磷,拐角处的快速生长致使沟道底部中间的生长缓慢<sup>[21]</sup>。

对于实际有用的几种非平面结构,可将固-液界面分解为扇形“基元”,以建立非平面 LPE 生长的理论模型。如图 4(a)所示,选用通常的极坐标系,其中  $0 \leq \theta_0 \leq 2\pi$ ,近边区生长满足如下方程<sup>[17]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial t} C(r, \theta, t) = D \Delta_2(r, \theta, t),$$

$$C(l, \theta, t) = C_0 + \Delta C \cdot \operatorname{erf} \left[ \frac{l \sin \left( \frac{\pi}{\theta_0} \theta \right)}{2\sqrt{Dt}} \right] +$$

$$\Delta C \cdot e^{\frac{K}{D} + \frac{K^2}{D} t} \cdot \operatorname{erfc} \left[ \frac{l \sin \left( \frac{\pi}{\theta_0} \theta \right)}{2\sqrt{Dt}} + \frac{K\sqrt{Dt}}{D} \right], \quad (3)$$

$$C(r, \theta, t) = C(r, \theta_0, t) = C_0,$$

$$C(r, \theta, 0) = C_0 + \Delta C,$$

略去驰豫项,可以得到在近边区的生长层厚度为:

$$h(t) = 2 \frac{\pi}{\theta_0} \left( \frac{\Delta C}{C_s} \right) \sqrt{\frac{D}{\pi}} \sqrt{t} + 2 \left( 1 - \frac{\pi^2}{\theta_0^2} \right) \sum_j F_j(r) \cdot$$

$$\left( \frac{\Delta C}{C_s} \right) \sqrt{\frac{D}{\pi}} \sqrt{t} - \frac{\pi}{\theta_0} \left( \frac{\Delta C}{C_s} \right) \frac{D}{K} \left[ 1 - e^{K^2/D} \operatorname{erfc} \left( K \sqrt{\frac{t}{D}} \right) \right], \quad (4)$$

其中,  $F_j(r) = \frac{A_j}{\mu_j^2} \left[ J_{\frac{\pi}{\theta_0}+1} \left( \frac{\mu_j}{l} r \right) + J_{\frac{\pi}{\theta_0}-1} \left( \frac{\mu_j}{l} r \right) \right]$ ,  $A_j = \frac{\int_0^{\mu_j} J_{\frac{\pi}{\theta_0}}(x) x dx}{J_{\frac{\pi}{\theta_0}+1}^2(\mu_j)}$ ,  $\mu_j$  为  $\frac{\pi}{\theta_0}$  阶 Bessel 函数  $J_{\frac{\pi}{\theta_0}}$  的第  $j$  个根。 $K$  为平面上平衡反应系数,  $D$  为溶质的扩散系数,  $\Delta C$  为溶液的过饱和度,  $C_s$  为与生长温度  $T_s$  对应的平衡溶质浓度。

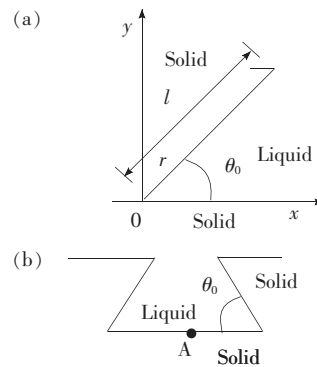


图4 (a) 非平面结构的基本模型;(b) 燕尾槽示意图。

Fig. 4 (a) Fundamental model of curved surface. (b) Schematic diagram of dovetail groove.

用这种“基元”组成燕尾槽,如图 4(b)所示。不管是理论预期还是实际生长情况,在图 4(b)中的 A 点处,即沟道底部的中间生长是比较缓慢的。为方便计算,第一层在 A 点处外延生长的厚度认为是燕尾槽底部两个角在此处生长厚度的叠加。于是, A 点处的厚度为:

$$h(t) = 4 \frac{\pi}{\theta_0} \left( \frac{\Delta C}{C_s} \right) \sqrt{\frac{D}{\pi}} \sqrt{t} + 2 \left( 1 - \frac{\pi^2}{\theta_0^2} \right) \sum_j F_j(r) \cdot$$

$$\left( \frac{\Delta C}{C_s} \right) \sqrt{\frac{D}{\pi}} \sqrt{t} - \frac{\pi}{\theta_0} \left( \frac{\Delta C}{C_s} \right) \frac{D}{K} \left[ 1 - e^{K^2/D} \operatorname{erfc} \left( K \sqrt{\frac{t}{D}} \right) \right], \quad (5)$$

利用 Matlab 软件对上述模型进行拟合计算,参数选取  $D = 4 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ ,  $K = 10^{-2} \text{ cm/s}$ <sup>[17]</sup>。图 4(b)中 A 点处生长厚度与生长时间的关系曲线

如图 5 所示。从理论曲线可以看到,在生长时间少于 3 s 时,A 点处无外延层生长。随着生长时间的增加,生长厚度开始时较快,然后趋于缓慢。刚开始时,由于拐角处优先生长导致局部溶质饱和度降低,在短时间内 A 点处无法生长。计算时我们假定 A 点处厚度是两个厚度的近似叠加,落入沟道内的溶液同时为两个角的生长提供溶质,局部溶质更容易耗尽,生长速度变缓,厚度值相对于独立的一个角所处情况要小,所以生长初期 A 点处的实际值略小于理论值。随着生长的进行,拐点优势逐渐消失,A 点开始快速生长。而后由于沟道内溶液的溶质逐渐耗尽,所以生长变慢。如果继续生长,则非常容易引起燕尾槽肩部回熔,导致溶液中溶质含量上升,生长速度加快,此时的实际值高于理论值。

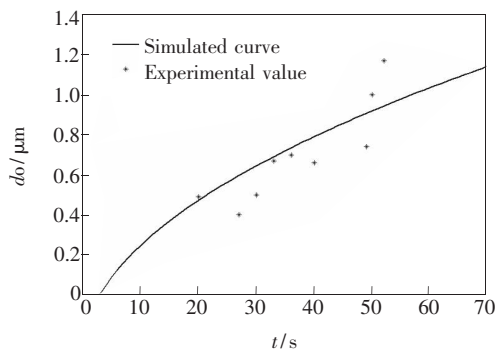


图 5 A 点处第一层 n-InP 生长厚度与生长时间的关系  
Fig. 5 Thickness of n-InP layer at point A vs. growth time

为了便于显结观察,我们在 n-InP 层前增加一层非掺杂的 InGaAsP 层进行外延生长,其生长时间分别为 1, 2, 3 s, 生长形貌如图 6(a) ~ (c) 所示。从图 6(c) 可以看到,当生长时间为 3 s 时,燕尾槽沟底中间 A 点处未能长上,但是拐角处的优先生长并不明显,这可能与生长的材料体系有关。我们将这一层 InGaAsP 层换成 p-InP 层,生长时间为 2 s(图 6(d)),可以看出拐角优势生长明显,且 A 点处未长上。在 n-InP 层前增加一层 p-InP 有如下优点:(1)在燕尾槽沟底两侧形成了反向 pn 结电流限制,减小了漏电通道;(2)燕尾槽底角的填充有利于 n-InP 层生长后形成“U”型界面,从而缩小有源层的宽度,图 6(d)中有源层的宽度为 1.9 μm;(3)底角填充后局部区域快速生长消失,外延生长与溶质输运达到一定平衡从而抑制了燕尾槽肩部回熔,也减少了漏电通道。所以,增加 p-InP 层的生长有

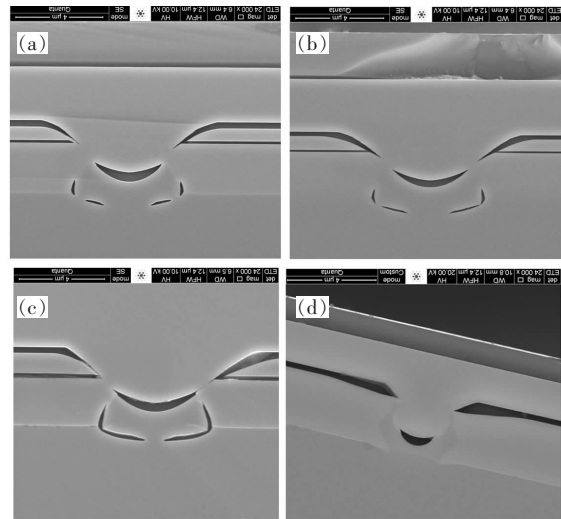


图 6 液相外延生长后的截面 SEM 图,在 n-InP 之前增加了一层生长时间分别为 1 s(a), 2 s(b), 3 s(c) 的非掺杂 InGaAsP,或一层生长时间为 2 s 的 p-InP (d)。  
Fig. 6 SEM sectional views of SLD grown by LPE, an InGaAsP layer grown with 1 s (a), 2 s (b), 3 s (c) or p-InP layer grown with 2 s (d) was added before n-InP layer, respectively.

利于实现高功率的输出。

### 3 结果与讨论

我们在二次液相外延生长 n-InP 缓冲层前增加一层生长时间为 2 s 的 p-InP,然后利用常规工艺制作 SLD 芯片,芯片结构如图 7 所示。有源发光区长 300 μm。非泵浦吸收区采用直波导结构,长度为 600 μm。在距芯片后端面 200 μm 处制作有 Ti/Pt/Au p 面电极,用于接地,它可以吸收 SLD 后向光泄露至限制层的光子从而减少后端面光的反射,降低 SLD 输出光的光谱波纹。两个 p 面电极之间的高掺杂 InGaAsP 顶层被腐蚀以增加电极间的电阻。在经过 n 面减薄后,利用热蒸发制作 n 面电极 AuGeNi/Au。为了抑制腔内的激射振荡,

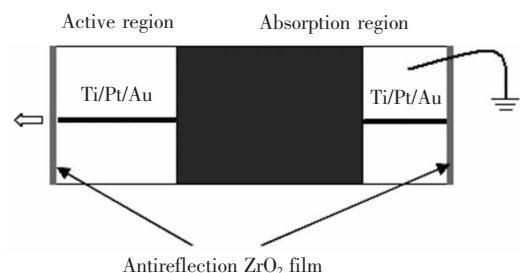


图 7 芯片结构示意图  
Fig. 7 Schematic drawing of SLD chip

在两腔面镀1/4波长厚度的 $ZrO_2$ 增透膜。利用铅锡将芯片烧焊至AlN热沉上,AlN热沉置于致冷器上以控制SLD的工作温度。

在100 mA连续工作(CW)电流、25 °C工作温度下,对SLD芯片进行光电性能测试。其输出

波长为1306 nm,相应的光谱半宽为39 nm,光谱波纹为0.17 dB,如图8所示。图9为芯片的 $L-I-V$ 曲线,其在100 mA下的输出功率达到3.6 mW,相应的偏振度为2%。芯片相对输出功率随偏振角度的变化如图10所示。

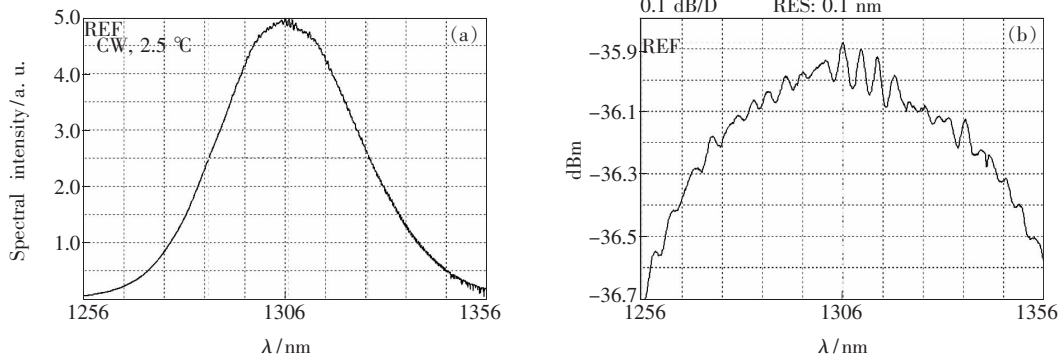


图8 芯片典型的光谱曲线

Fig. 8 Typical spectrum of SLD

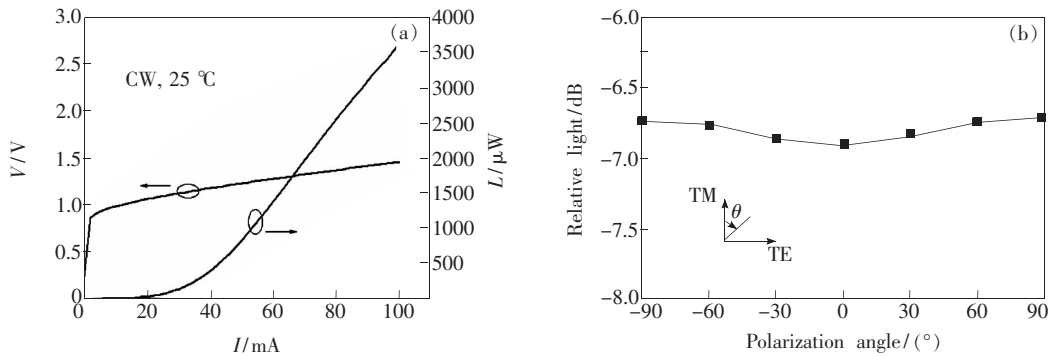


图9 芯片典型的 $L-I-V$ 曲线

Fig. 9 Typical  $L-I-V$  curves of SLD

图10 芯片相对功率随偏振角度的变化

Fig. 10 Relative light of SLD vs. polarization angle

## 4 结 论

通过理论计算得出了燕尾槽新月形结构SLD基横模稳定输出的条件。在此基础上,通过建立的非平面生长模型对液相外延生长机理进行了分析,并通过理论与实验分析设计了低偏振、高功率

SLD的外延结构。在100 mA工作电流、25 °C工作温度下,利用该结构研制的SLD芯片的输出光功率达到3.6 mW,相应的输出波长为1306 nm,光谱半宽为39 nm,光谱波纹为0.17 dB,偏振度为2%。该低偏振度、高功率SLD器件可以作为光源用于光纤陀螺、光纤传感等领域。

## 参 考 文 献:

- [1] Çelikel O, San S E. Design details and characterization of all digital closed-loop interferometric fiber optic gyroscope with superluminescent light emitting diode [J]. *Opt. Rev.*, 2009, 16(1):35-43.
- [2] Feng X J, Wang X X, Li L J, et al. Influences of imperfect polarization induced effects to the quasi-reciprocal reflective optical voltage sensor [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2013, 31(16):2777-2784.
- [3] Heimann M, Liesegang M, Arndt-Staufenbiel N, et al. Optical system components for navigation grade fiber optic gyroscopes [J]. *SPIE*, 2013, 8899:88991A-1-9.
- [4] Andreeva E V, Il'ichenko S N, Kostin Y O, et al. Broadband superluminescent diodes with bell-shaped spectra emitting in

- the range from 800 to 900 nm [J]. *Quant. Electron.*, 2013, 43(8):751-756.
- [ 5 ] Duan L H, Fang L, Zhang J, *et al.* Fabrication and characteristics of high speed InGaAs/GaAs quantum-wells superluminescent diode emitting at 1 053 nm [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2014, 29(5):055004-1-5.
- [ 6 ] Ozaki N, Yasuda T, Ohkouchi S, *et al.* Near-infrared superluminescent diode using stacked self-assembled InAs quantum dots with controlled emission wavelengths [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2014, 53(4S):04EG10-1-5.
- [ 7 ] Kredzinski L, Connelly M J. Anti-Stokes effect CCD camera and SLD based optical coherence tomography for full-field imaging in the 1 550 nm region [J]. *SPIE*, 2012, 8427:84274D-1-5.
- [ 8 ] Yoo Y C, Han I K, Lee J I. High power broadband superluminescent diodes with chirped multiple quantum dots [J]. *Electron. Lett.*, 2007, 43(19):1045-1047.
- [ 9 ] Xin Y C, Martinez A, Saiz T, *et al.* 1.3- $\mu\text{m}$  quantum-dot multisection superluminescent diodes with extremely broad bandwidth [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, 19(7):501-503.
- [10] Khan M Z M, Majid M A, Ng T K, *et al.* Simultaneous quantum dash-well emission in a chirped dash-in-well superluminescent diode with spectral bandwidth > 700 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2013, 38(19):3720-3723.
- [11] Nkanta J E, Maldonado-Basilio R, Khan K, *et al.* Low polarization-sensitive asymmetric multi-quantum well semiconductor amplifier for next-generation optical access networks [J]. *Opt. Lett.*, 2013, 38(16):3165-3168.
- [12] Zhao H, Huang Y D, Zhang W, *et al.* Simulation of polarization-insensitive multiple-quantum-well superluminescent diodes [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, 4(3):181-183.
- [13] Heo D, Lee J S, Yun I K, *et al.* Polarization-independent, high-power, and angle-flared superluminescent diode for WDM-PON applications [C]//Lasers and Electro-Optics Society, Sidney: IEEE, 2005:627-628.
- [14] Liu K, Song A M, Tian K, *et al.* Quantum well superluminescent diodes with high power and low polarization degree [J]. *Semicond. Optoelectron.* (半导体光电), 2013, 34(6):949-953 (in Chinese).
- [15] Yang J H, Gao X, Li Z H, *et al.* A study on high-quality high power InGaAsP/GaAs lasers grown by liquid phase epitaxy [J]. *Acta Armamentarii* (兵工学报), 2001, 22(2):214-217 (in Chinese).
- [16] Wang L, Li Z H, Xu L, *et al.* Al-free SQW high-power semiconductor lasers [J]. *Semicond. Optoelectron.* (半导体光电), 2002, 23(6):391-392 (in Chinese).
- [17] Li X, Chen G X, Jian S S. Theory and experiment of liquid phase epitaxy on curved InP surface [J]. *Chin. J. Semicond.* (半导体学报), 1995, 16(2):93-100 (in Chinese).
- [18] Vilmos R, Janos B, Sandor P, *et al.* Influence of LPE growth conditions on the electroluminescence properties of InP/InGaAs(P) infrared emitting diodes [J]. *Mater. Sci. Eng.*, 2001, B80:18-22.
- [19] Duan L H, Fang L, Zhou Y, *et al.* Analysis on current leakage in DCPBH-SLD grown by LPE [J]. *Semicond. Optoelectron.* (半导体光电), 2012, 33(3):342-345 (in Chinese).
- [20] Wang Q Z, Zhang W F, Pang T. InGaAsP/InP buried crescent laser diode [J]. *J. Univ. Electron. Sci. Technol. China* (电子科技大学学报), 1989, 18(1):78-82 (in Chinese).
- [21] Mito I, Kitamura M, Kobayashi K, *et al.* InGaAsP double-channel-planar-buried-heterostructure laser diode (DC-PBH LD) with effective current confinement [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1983, 1(1):195-202.



周勇(1964 -),男,重庆人,高级工程师,1985年于成都电子科技大学获得学士学位,主要从事半导体激光器件的研究。  
E-mail: coeri127@163.com



段利华(1980 -),男,广西桂林人,高级工程师,2005年于重庆大学获得硕士学位,主要从事半导体激光器件的研究。  
E-mail: dlhsemi@163.com