

文章编号: 0258-7025(2003)02-0109-04

# 非均匀阱宽多量子阱 1.55 $\mu\text{m}$ 高功率 超辐射光源

刘 杨, 宋俊峰, 曾毓萍, 吴 宾, 张源涛, 许呈栋, 杜国同

(吉林大学电子工程系集成光电子国家重点实验室, 吉林 长春 130023)

**摘要** 采用非均匀阱宽多量子阱材料拓宽超辐射器件的输出光谱, 并利用前期关于倾斜脊形集成超辐射光源的研究成果, 制得了新型的 1.55  $\mu\text{m}$  高功率宽光谱 InGaAsP/InP 集成超辐射光源。发现该器件较均匀阱宽多量子阱器件的输出光谱有很大变化, 光谱半宽由原来的 20~30 nm, 增加到 45~60 nm 左右。该器件同样具有较好的抑制激射能力, 在可测试范围内, 在没有蒸镀腔面抗反射膜的情况下未见激射模式的出现。在准连续工作条件下, 器件最大峰值功率已达到 150 mW 以上。

**关键词** 量子光学; 超辐射发光管; 非均匀阱宽多量子阱; 半导体光放大器; 单片集成; 光谱分割; 多波长光源

**中图分类号** TN 248.4      **文献标识码** A

## Wide-spectrum High-power 1.55 $\mu\text{m}$ Superluminescent Light Source with Non-uniform Well-thickness Multi-quantum Wells

LIU Yang, SONG Jun-feng, ZENG Yu-ping, WU Bin,  
ZHANG Yuan-tao, XU Dong-cheng, DU Guo-tong

(*Electronics Engineering Department, Jilin University*

*State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Changchun, Jiling 130023, China*)

**Abstract** In this paper, non-uniform well-thickness multi-quantum wells (NWT-MQWs) materials were adopted to widen the output spectrum of superluminescent device. A novel type of 1.55  $\mu\text{m}$  high-power wide-spectrum InGaAsP/InP integrated superluminescent light source was fabricated based on the tilted ridge-waveguide integrated superluminescent light source. The spectral halfwidth is increased from 20~30 nm with the uniform well thickness devices to 45~60 nm. The quasi-CW superluminescent power of the device is over 150 mW.

**Key words** quantum optics; superluminescent diode; non-uniform well-thickness multi-quantum wells; semiconductor optical amplifier; monolithic integration; spectrum slicing; multiwavelength light source

## 1 引 言

随着光波分复用(WDM)领域中“光谱分割”<sup>[1~3]</sup>技术的发展,对宽谱光源性能要求也不断提高,即对其功率指标有较高要求的同时,也希望其光谱宽度越宽越好,以覆盖更大的光谱范围来提供更多的传输信道。为此,提高光谱宽度成为超辐射器件研究的另外一个目标。增加光谱宽度的方法主要

有以下几种:叠加具有不同发光中心波长有源层<sup>[4]</sup>;级联各种不同发光中心波长有源层<sup>[5]</sup>;选择区域外延(SAE)技术生长渐变厚度的量子阱有源区<sup>[6]</sup>;利用量子阱不同子能级之间的跃迁发射光谱的叠加增加谱宽<sup>[7]</sup>;采用不同阱宽双量子阱结构<sup>[8]</sup>等等。这些方法的基本思想都是利用不同发光波长介质的叠合来拓宽光谱。

本文在均匀阱宽量子阱高功率集成超辐射光源

**收稿日期:**2001-06-25; **收到修改稿日期:**2002-02-08

**基金项目:**国家“863”高技术计划,国家自然科学基金(60077021),973 重大基础研究项目(G2000036605)资助项目。

**作者简介:**刘杨(1969.8—),男,山东人,博士,主要从事Ⅲ-V族化合物半导体光电器件及材料的研究。E-mail: laserlab@mail.jlu.edu.cn

的研究基础上<sup>[9,10]</sup>,采用非均匀阱宽多量子阱结构的外延材料,制得了宽光谱高功率 1.55  $\mu\text{m}$  超辐射光源,谱宽较均匀阱宽器件提高一倍以上。

## 2 器件结构原理及工艺过程

根据有限深势阱理论<sup>[11]</sup>,导带量子阱中分立能级  $E_{oi}$  的本征方程可表示为

$$\sqrt{\frac{m_b^*}{m_{cw}^*} \cdot \frac{\Delta E_c - E_{oi}}{E_{oi}}} = \begin{cases} \tan\left(\frac{d_w \sqrt{2m_{cw}^* E_{oi}}}{2\eta}\right) & n \text{ 为偶数} \\ -\cot\left(\frac{d_w \sqrt{2m_{cw}^* E_{oi}}}{2\eta}\right) & n \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (1)$$

其中  $m_b^*$  和  $m_{cw}^*$  分别为导带垒和阱中电子的有效质量,在阱内被记作  $m_{cw}^*$ ,在阱外被记作  $m_b^*$ 。 $\Delta E_c$  为势阱深度即导带不连续值, $E_{oi}$  为量子化能级( $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ ),该能量的参考点是以阱区导带底为基准的。 $d_w$  为阱宽度。

通过求解上面的超越方程,可以求出导带势阱中分立能级  $E_{c0}, E_{c1}, E_{c2}, \dots$ ,它们分别表示导带势阱中第一、二、三、 $\dots$  子能级的数值,用同样的

方法可以求得价带中空穴(重)的分立能级表达  $E_{v0}, E_{v1}, E_{v2}, \dots$ 。子带之间的跃迁遵守  $\Delta n = 0$  的准则。考虑第一子能级之间的跃迁带边发光波长为

$$\lambda = \frac{1.24}{E_b} = \frac{1.24}{E_g + E_{c0} + E_{v0}} \quad (2)$$

其中  $E_b$  为跃迁能量,单位为 eV, $E_g$  为阱区禁带宽度。

图 1 就是应用式(1),(2)得到的 InGaAsP 量子阱(如表 1 所示)带边波长与量子阱宽度的关系曲线,可见,阱的导带与价带子能级之间的跃迁能量随阱宽度的变窄而增加。拟采用三种不同宽度的量子阱叠合来拓宽光谱,考虑到阱区的光增益,每种宽度的势阱数目为 2 个,即阱区共由 6 个阱组成。阱宽的选择主要应考虑到不同宽度的势阱发光波长的间隔要适中。若间隔过小,就难以起到拓宽光谱的作用,如果间隔过大输出光的光谱中有可能出现多峰,而且光增益将明显下降;本文将三种不同宽度的量子阱发光波长的间隔定为均匀阱宽发射光谱的谱宽度,从文献[9]可知,一般均匀阱宽量子的超辐射发光宽度(FWHM)为 30 nm 左右,由计算曲线(如图 1),最后确定阱宽分别为 4 nm,5.5 nm,8 nm,它们中心发光波长的间隔为 30 nm 左右。

表 1 非均匀量子阱外延层结构参数

Table 1 Structural parameters of NWT-MQWs epilayer

Layer	Thickness	Concentration / $\text{cm}^{-3}$
$p^-$ -InGaAs cap layer	0.2 $\mu\text{m}$	$3.5 \times 10^{19}$
$p$ -InP upper cladding layer	1.5 $\mu\text{m}$	$2 \times 10^{18}$
$p$ -InGaAsP etch stop layer	30 nm	$2 \times 10^{18}$
$p$ -InP cladding layer	0.15 $\mu\text{m}$	$2 \times 10^{18}$
$p$ -InGaAsP SCH layer	60 nm ( $\lambda_g = 1.15 \mu\text{m}$ )	Undoped
$p$ -InGaAsP SCH layer	60 nm ( $\lambda_g = 1.30 \mu\text{m}$ )	Undoped
MQWs active region	5 barriers	10 nm ( $\lambda_g = 1.30 \mu\text{m}$ ), $-0.5\%$ tensile
	6 wells	4, 5.5, 8 nm ( $\lambda_g = 1.61 \mu\text{m}$ ), $+1.1\%$ compressive
$n$ -InGaAsP SCH layer 1	60 nm ( $\lambda_g = 1.30 \mu\text{m}$ )	Undoped
$n$ -InGaAsP SCH layer 2	60 nm ( $\lambda_g = 1.15 \mu\text{m}$ )	Undoped
$n$ -InP buffer layer	0.4 $\mu\text{m}$	$3.5 \times 10^{18}$

该集成超辐射器件的结构与文献[9]中相同,都由超辐射发光管区(SLD)和半导体光放大器区(SOA)两部分组成,并且同为倾斜脊形波导结构,如图 2 所示。关于该结构抑制激射的工作原理在文献[9]中已经做了详细的说明。我们仍然采用金属有机化学气相淀积技术(MOCVD)进行外延生长,外延基本结构由衬底、缓冲层、下限制层、有源层、上

限制层、盖层等构成。为了便于脊形波导的制作,在上限制层中引入了刻蚀停止层(etching stop layer),由 InGaAsP 材料组成( $\lambda_g = 1.30 \mu\text{m}$ )。考虑到刻蚀停止的效果以及该四元层对包层结构导光性能的影响,将该层厚度定为 30 nm,脊形波导的高度为 1.70  $\mu\text{m}$  左右,即将刻蚀停止层放置在距盖层 1.7  $\mu\text{m}$  的位置,表 1 给出了该器件的各外延层的结

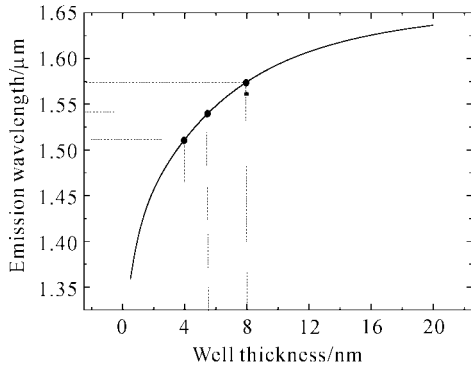


图 1 InGaAsP 量子阱宽度与阱的第一子能级间跃迁波长的关系计算曲线

Fig. 1 Calculation curve of transition wavelength of first sub-band in the InGaAsP Quantum well versus its well width

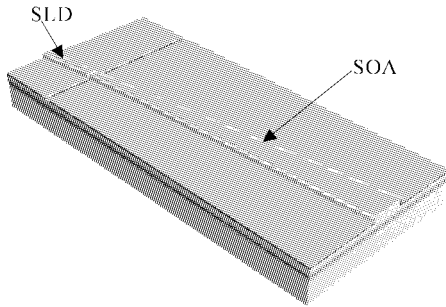


图 2 非均匀阱宽多量子阱倾斜脊形集成超辐射器件结构示意图

Fig. 2 Schematic structure of NWT-MQWs integrated superluminescent device

构参数。图 3 为非均匀阱宽量子阱材料能带结构示意图。由于该倾斜脊形波导结构具有较强的抑制激励的能力,所以仍然没有在器件的输出端面上蒸镀抗反射膜(AR-coating)。

### 3 结果和讨论

为了观测大电流下焦耳热对器件的影响,将脉冲电流的占空比由 1%<sup>[9]</sup> 提高为 10% (脉宽为 100 μs;周期为 1 ms),即在准直流条件下(Quasi-CW)对器件进行了测试并与窄脉宽条件下的测试结果进行了比较。图 4 是在不同超辐射区的电流注入下,输出光功率与 SOA 的电流变化关系曲线。从图中可以看出,光功率随电流的变化与均匀阱宽器件相似,表现出软阈值特性。放大器区与超辐射区同时工作时较放大器区单独抽运时有较大的功率提高。由此足以显示出这种集成超辐射器件在提高光功率

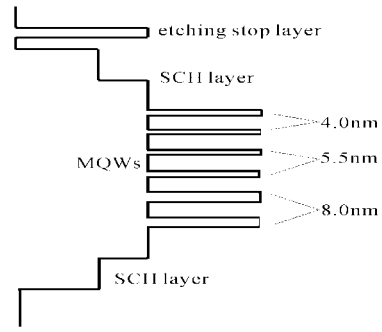


图 3 非均匀阱宽量子阱材料能带结构示意图  
Fig. 3 Schematic energy band structure of NWT-MQWs materials

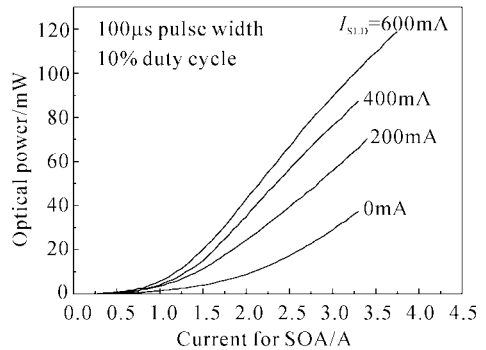


图 4 非均匀阱宽多量子阱集成超辐射器件功率特性曲线

Fig. 4 *P-I* characteristic of NWT-MQWs integrated superluminescent device

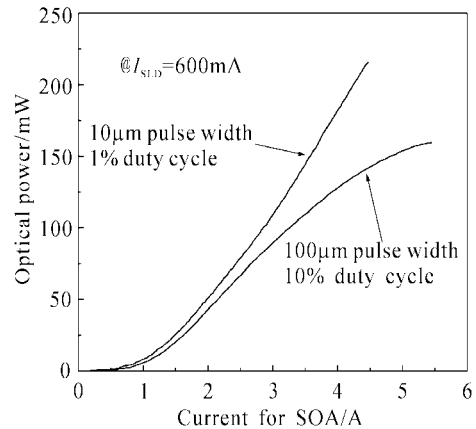


图 5 在不同脉冲工作条件下的非均匀阱宽多量子阱超辐射器件功率特性比较

Fig. 5 Comparison for *P-I* characteristic of NWT-MQWs integrated superluminescent device at different pulsed conditions

方面的优势。

图 5 为器件在超辐射区注入电流为 600 mA 时

的功率电流关系曲线,同时将器件在准直流(10%占空比)和小占空比1%(10  $\mu$ s脉宽)两种条件下的功率电流曲线一并绘入图中。可见在准直流条件下器件表现出明显的热饱和特征,器件在5 A时最大输出功率达到156 mW;而此时小占空比条件下的功率已经达到200 mW以上,而且没有任何热饱和的迹象。

另外,通过对器件光谱特性的测试表明,在高注入下器件脊形结构很好地抑制了激射的发生,同时,从此时器件相应的远场特性( $0^\circ$ 位置无峰包)也可以说明这一点(平行于结平面的远场图样中, $0^\circ$ 位置是否存在峰包是倾斜型超辐射器件是否出现激射的另一判据<sup>[10]</sup>)。图6为该器件在超辐射区和放大器区不同注入下的光谱图。从图中可以注意到与均匀阱宽器件相比谱线的形状略微表现出不对称性,谱线的中心峰略向短波长偏移。这说明不同宽度的阱之间发光强度是不同的,即窄阱的增益要高于宽阱,这是典型的量子尺寸效应作用的结果,是由于阱宽的减小导致联合态密度的增加所引起的。如果适当调整外延层参数,就会得到对称的谱分布。另外,在不同电流的注入下,光谱谱形没有发生变化,仍保持不

对称性,说明不同宽度阱的光增益差异在不同注入下相对保持不变,这种光谱形状的稳定分布正是光谱分割技术所需要的。

对比均匀、非均匀阱宽两种集成超辐射器件的特性,发现非均匀阱宽器件的光谱半宽(FWHM)较均匀阱宽器件提高近一倍以上,由20~30 nm提高到45~60 nm;在同样注入水平下,非均匀阱宽器件的功率明显低于均匀阱宽器件<sup>[10]</sup>,说明前者有源区增益要小于后者。可见,高功率的获得和宽光谱的获得是相互制约的,只能在功率和谱宽之间作适中的取舍。

### 参 考 文 献

- 1 D. K. Jung, S. K. Shin, C.-H. Lee *et al.*. Wavelength-division-multiplexed passive optical network based on spectrum-slicing techniques [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(9): 1334~1336
- 2 K.-Y. Liou, U. Koren, K. Dreyer *et al.*. A 24-channel WDM transmitter for access systems using a loop-back spectrally sliced light-emitting diode [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(2): 270~272
- 3 D. D. Sampson, W. T. Holloway. 100 mW spectrally-uniform broadband ASE source for spectrum-sliced WDM systems [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(19): 1611~1612
- 4 O. Mikami, H. Yasaka, Y. Noguchi. Broader spectral width InGaAsP stacked active layer superluminescent diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(11): 987~989
- 5 Y. Noguchi, H. Yasaka, O. Mikami. Tandem active layer superluminescent diode with a very wide spectrum [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **58**(18): 1976~1978
- 6 C. H. Joyner, C. R. Doerr, J. C. Centanni *et al.*. Broad spectrum source for local access networks [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(8): 749~751
- 7 A. T. Semenov, V. R. Shidlovshi, S. A. Safin. Wide spectrum single quantum well superluminescent diodes at 0.8  $\mu$ m with bent optical waveguide [J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(10): 854~856
- 8 C. F. Lin, B. L. Lee, P.-C. Lin. Broad-band superluminescent diodes fabricated on a substrate with asymmetric dual quantum wells [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(11): 1456~1458
- 9 Liu Yang, Song Junfeng, Zeng Yuping *et al.*. Integrated superluminescent light source with tilted structure by using ridge waveguide [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2001, **A28**(9): 786~788 (in Chinese)
- 10 Y. Liu, J. F. Song, Y. P. Zeng. High power 1.5  $\mu$ m integrated superluminescent light source with tilted ridge waveguide [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2001, **33**: 1233~1239
- 11 M. Asada, A. Kameyama, Y. Suematsu. Gain and intervalence band absorption in quantum-well lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1984, **QE-20**(7): 745~753

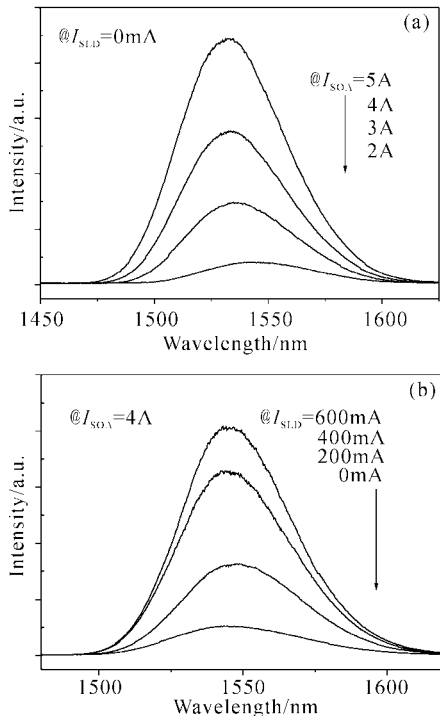


图6 在不同抽运条件下的非均匀阱宽多量子阱超辐射器件的光谱特性

Fig. 6 Spectral Characteristics of NWT-MQWs integrated superluminescent device at different pumping conditions