

# 非统一多量子阱波长可选 DFB 激光器

谢红云 霍文娟 江之韵 路志义 张万荣

(北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100124)

**摘要** 报道了一种单片集成的串联 DFB 激光器芯片, 在合适工作条件下, 可以在疏波分复用(CWDM)的两个信道波长激射。芯片通过非统一多量子阱有源区拓宽材料增益谱, 给 DFB 激光器的纯折射率光栅引入弱增益耦合, 提高 DFB 激光器的动态单模特性。芯片采用普通 DFB 激光器的制备工艺制备, 工艺简单成本低, 重复性高。测试结果表明, 芯片能够在 1.51  $\mu\text{m}$  和 1.53  $\mu\text{m}$  两个波长激射, 出光功率均能达到 6 mW 以上, 边模抑制比均达到 40 dB。

**关键词** 激光器; 波长可选; 非统一量子阱; 弱增益耦合; 单片集成

中图分类号 TN242

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201239.1002002

## Wavelength Selectable DFB Laser Based on Non-Uniform Multiple Quantum Wells

Xie Hongyun Huo Wenjuan Jiang Zhiyun Lu Zhiyi Zhang Wanrong

(College of Electronic Information and Controlling Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract** A monolithic integrated chip with DFB lasers in serial is presented, which provides two selectable wavelengths for coarse wave divide multiplexing (CWDM) channel at suitable working condition. Non-uniform multiple quantum wells is designed and grown to widen active material gain spectrum. Weak gain coupled is added into pure refractive index grating of each DFB laser to promote dynamic single mode. The monolithic chip is fabricated with common process of DFB laser, which has the features of simple process, low cost and high repetition. Test results show that the chip can output at two wavelengths of 1.51  $\mu\text{m}$  and 1.53  $\mu\text{m}$ . Output powers are both higher than 6 mW and single mode suppression ratios both achieve 40 dB.

**Key words** lasers; wavelength selectable; non-uniform quantum well; weak gain couple; monolithic integrated

**OCIS codes** 140.5960; 140.3490; 140.3570

## 1 引 言

光纤通信系统具有极宽的带宽和高的传输速率, 是现代通信网络中骨干网的主要通信技术, 其宽带特性的应用也越来越广泛。成熟的密集波分复用(DWDM)技术和目前成为研究热点的疏波分复用(CWDM)技术都充分利用了光纤通信系统极宽的带宽特性。CWDM 系统应用于接入网和城域网, 采用 2002 年 ITU-U 制定的通信标准, 可以 8 波长信道复用或 4 波长信道复用, 信道间隔宽达 20 nm, 是一种低成本的复用技术。应用于 CWDM 系统的光

通信器件要求性能好价格低, 性价比需求高。近年来发展迅速的单片光电集成技术(OEIC)能够将有源器件[如多个分布反馈(DFB)激光器, 电吸收(EA)调制器等]和无源器件(光波导等)集成在同一芯片内, 与采用分立器件构成的光功能模块相比, 能有效降低器件成本。单片集成 OEIC 芯片的报道很多。但大多数报道是面向 DWDM 系统的集成芯片, 芯片能够覆盖的带宽范围有限<sup>[1~3]</sup>。CWDM 系统的信道间隔宽, 单片集成的芯片需要覆盖至少 100 nm 的带宽范围才能满足系统的需求。因此拓

收稿日期: 2012-05-07; 收到修改稿日期: 2012-06-11

基金项目: 国家自然科学基金(61006044、60776051、61006059)、北京市自然科学基金(4122014、4082007)和北京市教委科技发展计划(KM200910005001、KM200710005015)资助课题。

作者简介: 谢红云(1978—), 女, 博士, 副教授, 主要从事半导体高速光电器件及集成电路等方面的研究。

E-mail: xiehongyun@bjut.edu.cn

宽材料的增益谱和宽带内多个有源器件集成就成为研究的重要方面。

本文主要研究适用于 CWDM 系统的 DFB 激光器串联光源,在同一芯片上集成 CWDM 系统两个信道波长的 DFB 激光器。芯片的有源区采用非统一的量子阱结构拓宽材料的增益谱到 115 nm。前后串联的两个 DFB 激光器通过引入有源区载流子周期性阻挡机制,在折射率耦合的光栅中加入弱增益耦合,有效抑制 DFB 激光器的停止带,提高了单模特性。双单模串联激光器选择合适的电流注入条件,能够分别在 1.51  $\mu\text{m}$  和 1.53  $\mu\text{m}$  两个波长激励,边模抑制比(SMSR)均能达到 40 dB。集成的光源芯片采用传统的 DFB 激光器工艺制备,与已有报道的集成芯片的制备方法相比,工艺简单易操纵,成本低,能满足 CWDM 系统对光通信器件性价比的要求。

## 2 芯片设计

### 2.1 非统一多量子阱材料

量子阱材料的带隙波长受阱的厚度和组分影响,不同厚度的阱或不同组分的阱对应的激励波长不一样。非统一多量子阱包含多个不同厚度或不同组分的量子阱,在合适的载流子密度和合适的腔长下,不同厚度或不同组分的阱能够同时在不同波长激励,从而拓宽材料的增益谱<sup>[4]</sup>。因为采用金属有机化学气相沉积(MOCVD)外延方法,调整量子阱厚度比调整量子阱组分在技术上更容易实现,因此选用不同厚度的量子阱组合来拓宽材料的增益谱。

假设量子阱导带和价带的带隙偏移分别为 4:6,可以计算出量子阱的带隙差,并且考虑量子阱/垒的应变引起的导带和价带(包括重空穴价带和轻空穴价带)边的变化,可以得到一定厚度的量子阱对应的光致发光(PL)谱峰值波长的计算表达式为

$$\lambda_p = 1.24 / (E_g + E_{cl} + E_{hh1}), \quad (1)$$

式中  $E_g$  为阱材料的带隙能量,并且考虑量子阱/垒的应变引起的导带和价带边的变化, $E_{cl}$  为导带第一分立能级, $E_{hh1}$  为价带重空穴第一分立能级。

不同厚度的量子阱对应的 PL 峰值波长如图 1 所示。从图 1 可以看出,随着量子阱厚度的增加,PL 峰值波长也逐渐增长。在量子阱厚度超过 9.5 nm 后,波长增长随着量子阱厚度的增加基本趋于平缓。因此选取量子阱的厚度在 5~9 nm 这个范围。

非统一量子阱的增益谱形状和谱宽不仅仅由阱

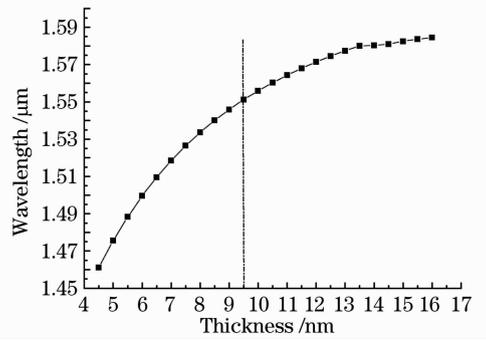


图 1 不同厚度量子阱的 PL 峰值波长  
Fig. 1 PL peak wavelength of quantum well with different thicknesses

的不同厚度决定,同时还会受到不同阱厚量子阱的排列方式,载流子在阱内的不均匀分布及生长的垒层厚度和势垒的高度等因素影响<sup>[5-7]</sup>。综合考虑这些因素,本文设计的不同阱厚的非统一多量子阱结构如图 2 所示,包含 3 个 5.8 nm 的阱,3 个 6.3 nm 的阱和 2 个 7.8 nm 的阱,较厚的阱置于有源区靠近 p 型一侧。选用的阱材料为呈压应变的  $\text{In}_{0.5614}\text{Ga}_{0.4386}\text{As}_{0.9605}\text{P}_{0.0395}$ ,垒材料为呈张应变的  $\text{In}_{0.7845}\text{Ga}_{0.2155}\text{As}_{0.4685}\text{P}_{0.5315}$ ,厚度为 12 nm。选取这个厚度一方面考虑到对载流子在不同阱中均匀分布的影响,另一方面有足够的垒厚度保证相邻阱中的电子波函数不互相影响,在设定的导带能级和价带能级之间跃迁。

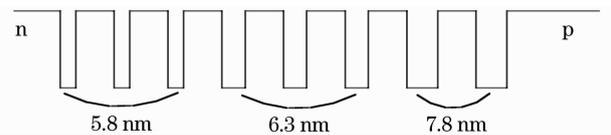


图 2 不同厚度的非统一多量子阱结构  
Fig. 2 Structure of non-uniform quantum well with different thicknesses

仿真非统一多量子阱在不同注入载流子密度下的材料增益,结合光波导结构的光限制因子等参数,计算得到其模式增益,图 3 为非统一多量子阱在载流子密度为  $3.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  时的增益谱的仿真结果。同时给出了统一厚度(5.8, 6.3, 7.8 nm)多量子阱的增益谱和非统一多量子阱的增益谱,可以看出,3 个单一厚度的量子阱分别对应的峰值波长在 1.528, 1.540, 1.572  $\mu\text{m}$ 。厚度不同的非统一多量子阱增益谱的半峰全宽比统一厚度多量子阱的半峰全宽有明显拓宽,达到了 120 nm。

MOCVD 生长的外延结构片如图 4 所示,非统一多量子阱有源区两侧为上下波导区,由 1.2Q(即该层材料的带隙波长为 1.2  $\mu\text{m}$ )的 InGaAsP 和

1.1Q InGaAsP 构成。外延片的放大自发辐射 (ASE) 谱的测试结果如图 5 所示,半峰全宽达到了 115 nm,能够满足多个 CWDM 信道 DFB 激光器集成的需求。

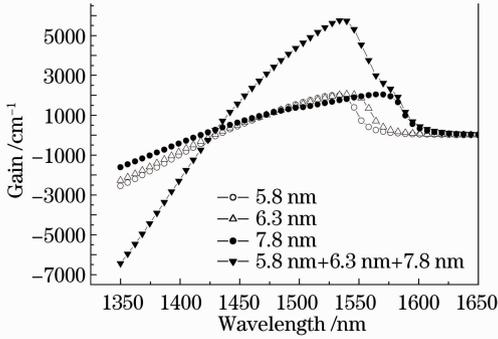


图 3 统一厚度和非统一多量子阱在注入载流子密度为  $3.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  下的增益谱仿真结果

Fig. 3 Simulation results of gain spectrum with uniform and non-uniform thickness quantum wells under injecting carrier density of  $3.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

InP cladding
1.1Q 60 nm InGaAsP
1.2Q 60 nm InGaAsP
asymmetric multiple quantum well (AMQW)
1.2Q 60 nm InGaAsP
1.1Q 60 nm InGaAsP
InP buffer

图 4 不同厚度非统一多量子阱外延结构片

Fig. 4 Epitaxial structure of non-uniform quantum well with different thicknesses

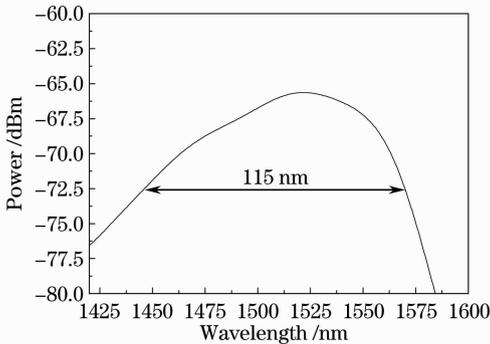


图 5 不同厚度非统一多量子阱外延片 ASE 测试结果  
Fig. 5 ASE tested result of non-uniform quantum well with different thicknesses

## 2.2 混合耦合光栅工作机制

纯折射率耦合光栅 DFB 激光器的单模特性有明显的停止带(stop\_band),动态单模特性不利于多个 DFB 激光器的集成。增益耦合光栅能够提高 DFB 激光器的动态单模特性。实现增益耦合有两

种常用方法:1) 腐蚀有源区改变有源区增益;2) 采用吸收光栅代替折射率调制光栅。但腐蚀有源区会影响器件使用可靠性,而吸收光栅的制备需要特殊的吸收材料,制备工艺复杂,器件成本较高。本文在折射率耦合光栅中引入弱增益耦合机制,制备混合耦合光栅。弱增益耦合通过在图 4 给出的材料结构中加入 30 nm 的反型层实现,如图 6 所示,30 nm 的反型层生长在 60 nm 1.1Q InGaAsP 上波导层之上。在原来的外延结构中并没有 n 型反型层,光栅制作在 InP 限制层和 60 nm 的上波导层,构成纯折射率光栅。加入 30 nm 反型层后,光栅制作在 InP 限制层,30 nm 反型层和 60 nm 上波导层上,如图 7 所示。

InP protecting layer
1.1Q 30 nm etch-stop layer
n-InP 30 nm
1.1Q 60 nm InGaAsP
1.2Q 60 nm InGaAsP
AMQW
1.2Q 60 nm InGaAsP
1.1Q 60 nm InGaAsP
InP buffer

图 6 加入 n 型反型层的非统一多量子阱外延片

Fig. 6 Non-uniform quantum well with n-inversion layer

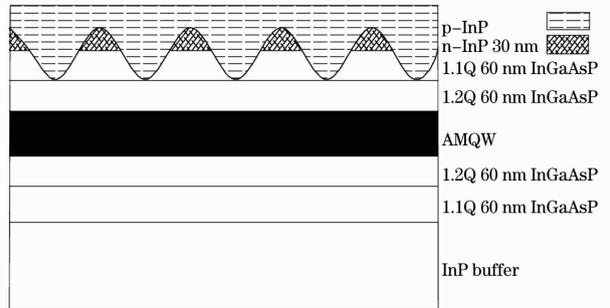


图 7 引入 n 型反型层的折射率耦合光栅

Fig. 7 Pure index coupled grating with n-inversion layer

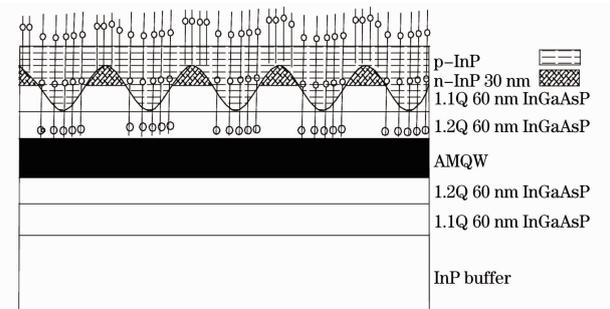


图 8 有源区载流子空间周期性调制示意图  
Fig. 8 Diagram of carrier space periodical modulation of active area

在电流注入时,因为在空间上有 n 型反型区的周期性阻挡,有源区的载流子密度会随之出现周期性变化,有源区的增益受载流子密度的影响也会在空间上出现周期性变化,从而将弱增益耦合引入到纯折射率光栅中,如图 8 所示。

### 3 混合耦合光栅双单模串联 DFB 激光器

图 9 是串联 DFB 激光器结构图。器件的有源区采用厚度不同的非统一多量子结构,其自发辐射增益谱的半峰全宽如前所述在 115 nm,能够满足 CWDM 系统信道波长的多个 DFB 激光器集成。本文选择了 1.51  $\mu\text{m}$  和 1.53  $\mu\text{m}$  两个信道波长。前后级联的 DFB 激光器采用了引入弱增益耦合的纯折射率光栅。器件长 550  $\mu\text{m}$ ,前后两部分各长 250  $\mu\text{m}$ ,中间为 50  $\mu\text{m}$  的隔离区。前后两部分的光栅周期不同,决定了激射的波长不同,其中长波长对应的光栅置于串联结构的后部分,短波长对应的光栅置于串联结构的前部分。如此可以避免两个激光器间相互干扰<sup>[8]</sup>。

前后两部分在注入合适电流的情况下,能够分别激射在光栅决定的布拉格波长上。测试结果如图 10 和图 11 所示。在后部分不加任何偏置时,前 DFB 激光器的阈值电流为 25 mA,器件的工作电压在 1.3 V 左右,与没有引入 n 型反型层的器件相比略有增加,100 mA 的工作电流下出光功率达到 6 mW,如图 10(a) 所示。图 10(b) 是前 DFB 激光器

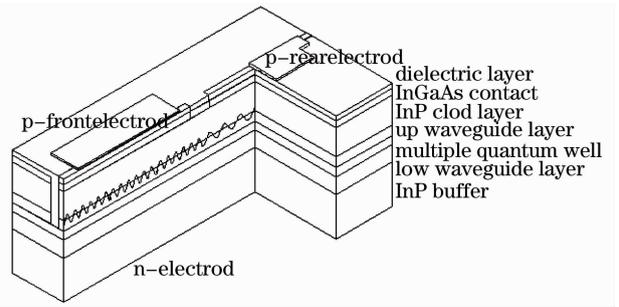


图 9 级联 DFB 激光器结构图

Fig. 9 Structure of cascade DFB laser

的光谱,激射波长为 1.51  $\mu\text{m}$ ,边模抑制比为 45 dB。同样,图 11(a) 是后 DFB 激光器的  $P-I$  和  $V-I$  曲线,在前段部分加载阈值电流以下的不同电流时,后激光器的阈值电流在 25 mA 左右,器件的工作电压在 1.4 V 左右,与没有引入 n 反型层的器件相比也略有增加,出光功率随着前段部分加载电流的增大而增大。前段部分能够起到半导体光放大器(SOA)的作用放大后 DFB 的出光功率,在 100 mA 工作电流下,后 DFB 的最大出光功率达到了 9.5 mW。图 11(b) 给出了后 DFB 激光器的激射光谱,激射波长在 1.53  $\mu\text{m}$ ,边模抑制比  $S_{21}$  达到了 40 dB。可以看出,n 反型层的引入提高了前后两个 DFB 激光器的动态单模特性,但对器件的性能并没有造成影响。图 12 是前后两个 DFB 激光器调制特性的测试结果,图中纵坐标为传输增益  $S_{21}$ 。从测试曲线看出,前后两个激光器的 3 dB 小信号调制带宽均达到了 8 GHz,能够满足速率 2.5~10 Gb/s 的 CWDM 通信系统对器件高频高速工作的要求。

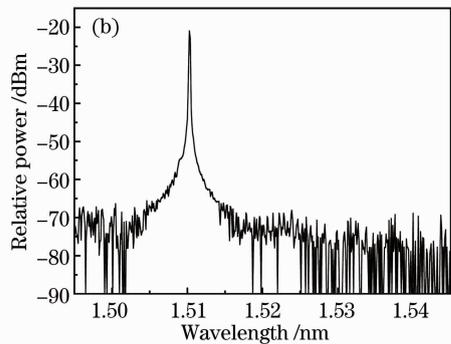
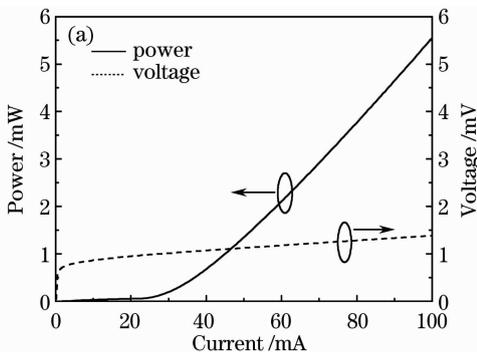


图 10 前 DFB 激光器的(a)  $P-I$ ,  $V-I$  曲线和(b) 激射光谱

Fig. 10 (a)  $P-I$  curve,  $V-I$  curve and (b) spectrum of front DFB laser

本课题组亦制备了纯折射率光栅的串联 DFB 激光器进行对比,前后 DFB 激光器的激射光谱均存在双模激射,也进一步证明引入弱增益耦合的折射率光栅有良好的动态单模特性。芯片采用传统的 DFB 激光器制备工艺完成,工艺简单成本低,重复

性高<sup>[9]</sup>。

### 4 结 论

本文利用厚度不同的非统一多量子阱有源区结构,选取 3 组 5.8 nm, 3 组 6.3 nm 和 2 组 7.8 nm

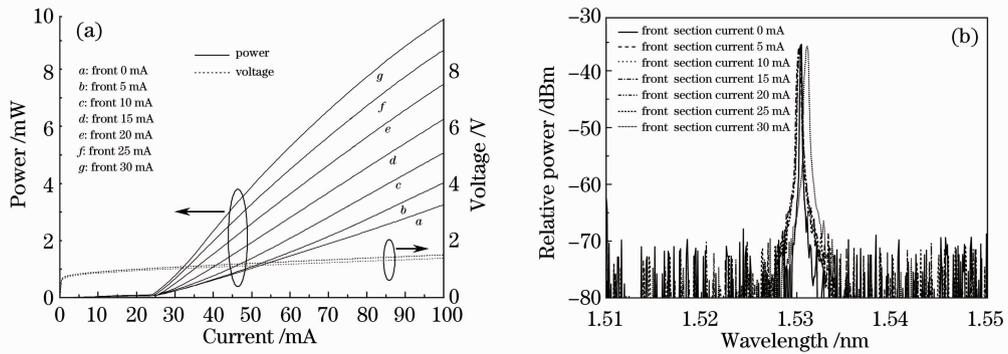


图 11 后 DFB 激光器的 (a)  $P-I$  曲线,  $V-I$  曲线和 (b) 激光光谱

Fig. 11 (a)  $P-I$  curve,  $V-I$  curve and (b) spectrum of rear DFB laser

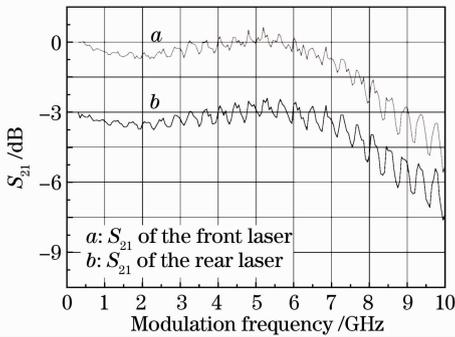


图 12 前后 DFB 激光器的调制特性

Fig. 12 Modulation characteristics of front and rear DFB lasers

的量子阱, 拓宽材料的增益谱宽到 115 nm。通过制备带有反型层的布拉格光栅在空间上周期性调制有源区载流子密度和有源区的增益, 提高 DFB 激光器的动态单模特性。制备完成了串联双单模 DFB 激光器, 在合适的工作条件下, 集成芯片可以在 1.51  $\mu\text{m}$  和 1.53  $\mu\text{m}$  两个波长激射, 出光功率均能达到 6 mW, 单模抑制比达到 40 dB。芯片的测试结果能够满足 CWDM 系统对集成光源的信道波长要求, 并且性价比高。

**致谢** 感谢中国科学院半导体研究所多功能集成部件组在芯片制备和测试上所做的工作和给予的帮助。

### 参 考 文 献

- 1 H. Nakano. Technological trends of optical communication devices for DWDM[C]. NEC Device Technology International, 2000. 59
- 2 Sun Bing, Chen Daru, Gao Shiming. Multi-wavelength fiber optical parametric oscillator with a tunable wavelength-spacing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0202006  
孙 兵, 陈达如, 高士明. 波长间隔可调谐多波长光纤光学参量振荡器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0202006
- 3 Tang Yi, Kang Zhihui, Jiang Liyun *et al.*. Tunable  $\text{Yb}^{3+}$  ~ doped fiber ring laser based on the principle of polarization filter [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 934~938  
唐 毅, 康智慧, 姜立运 等. 基于偏振滤波原理的宽可调谐掺  $\text{Yb}^{3+}$  环形光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 934~938
- 4 M. J. Hamp, D. T. Cassidy. Critical design parameters for engineering broadly tunable asymmetric multiple-quantum-well lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **36**(8): 978~983
- 5 M. J. Hamp, D. T. Cassidy, B. J. Robinson *et al.*. Nonuniform carrier distribution in asymmetric multiple-quantum-well InGaAsP laser structure with different numbers of quantum wells[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**(5): 744~746
- 6 M. J. Hamp, D. T. Cassidy, B. J. Robinson *et al.*. Effect of barrier thickness on the carrier distribution in asymmetric multiple-quantum-well InGaAsP lasers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(2): 134~136
- 7 M. J. Hamp, D. T. Cassidy. Experimental and theoretical analysis of the carrier distribution in asymmetric multiple quantum well InGaAsP lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2001, **37**(1): 92~99
- 8 Xie Hongyun, Chen Liang, Shen Pei *et al.*. Analysis of a wavelength selectable cascaded DFB laser based on the transfer matrix method[J]. *Chinese J. Semiconductors*, 2010, **31**(6): 064006
- 9 Xie Hongyun, Zhou Fan, Wang Baojun *et al.*. Modified holographic exposure to fabricate varied Bragg grating in an identical chip [J]. *Chinese J. Semiconductors*, 2005, **26**(7): 1287~1290

栏目编辑: 宋梅梅