

双波长垂直腔面发射激光器及特性研究*

关宝璐 郭霞[†] 张敬兰 任秀娟 郭帅 李硕 揣东旭 沈光地

(北京工业大学, 光电子技术省部共建教育部重点实验室, 北京 100124)

(2010年1月26日收到; 2010年3月24日收到修改稿)

基于光子晶体技术在一维光子晶体带隙内引入缺陷态模式, 并对激光器谐振腔内部电磁场分布和共振波长进行调制, 从而将单一波长分裂为双波长输出. 最终制备出了一种新的具有双波长光谱输出特性的垂直腔面发射激光器, 缺陷层为 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 材料, 厚度为 $5\lambda/4$. 所得到的双波长输出光谱具有低吸收损耗、输出波长容易控制及同方向垂直输出特性. 同时, 通过调整一维光子晶体的折射率差和缺陷层厚度可以有效调谐双波长的间距及输出波段. 所设计的双波长垂直腔面发射激光器结构同样适合于其他光电子器件, 如光开关、光放大器、调制器及光电探测器等.

关键词: 垂直腔面发射激光器, 光子带隙, 双波长

PACS: 42.55.Px, 42.60.Jf, 42.70.Qs

1. 引言

垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 作为重要的光电子器件受到人们的广泛关注, 并将成为光通信、光谱分析、波分复用等领域的重要半导体激光器光源. 特别是近几年, 基于光子晶体 (PC) 技术的 VCSEL 研究成为一个研究热点, 以实现高质量、单横模、多功能的半导体激光光源^[1-5]. PC 结构是指由不同介电常数的材料周期性排列, 从而形成具有一定宽度的光子带隙 (PBG) 的晶体结构, 其中, 类似分布布拉格反射镜 (DBR) 的一维 PC 结构同样可以形成 PBG, 并对处于其中的激光频率具有很强的反射作用^[6-8]. PC 结构具有 PBG 的这种特性往往被用于调谐激光器的多波长光谱输出和多波段显示器件中^[9]. 目前, 实现 VCSEL 多波长输出的方法主要有两种^[10,11]: 一种是采用表面等离子体金属光栅结构, 即在 VCSEL 表面直接制备出亚波长量级的具有不同周期的金属光栅, 从而实现不同方向上的多光束发射. 另一种是通过外延具有不同激射波长的多量子阱级联结构, 进而实现纵向多波长光谱输出特性. 但是这种结构需要精准的生长厚度控制和避免阱间过强的耦合作用, 而使输出波长难于控制. 另外, 还需要考虑不可避免的吸收和能量损耗.

本文首次采用 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 材料作为缺陷层, 形成非均匀一维 PC 结构的 DBR 反射镜, 从而对 VCSEL 器件结构内部电磁场能量分布进行有效调节, 并在 PBG 中引入设计波长的缺陷模态, 最终制备出双波长 VCSEL 器件. 所得到的双波长输出光谱具有低吸收损耗、输出波长容易控制及同方向垂直输出特性. 所设计的基于非均匀一维 PC 结构的双波长 VCSEL 具有结构简单、集成度高、光束方向单一等特点. 这种具有良好相干特性和稳定频率间隔的双波长输出 VCSEL 器件, 在波分复用光通信系统、高精度传感器测量和双(多)波长合成干涉测量等领域中有着广泛的应用前景.

2. 双波长 VCSEL 结构设计

图 1 为基于一维 PC 结构的双波长 VCSELs 示意结构和内部电磁场能量分布情况, 其晶向结构是利用 EMCORED125 型金属有机化学气相淀积 (MOCVD) 设备在 n 型 GaAs 衬底上外延生长得到的^[12]. 首先, 生长 26 对 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$ 均匀一维 PC 反射镜结构, 然后在一个 λ 厚度的有源区内, 生长 3 个 8 nm 的阱层、4 个 10 nm 的垒层和 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 过渡层. 同时, 在氧化限制层 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 上生长 p 型层, 它包括两对 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$ 层, 随后

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2006CB604902) 和国家自然科学基金 (批准号: 60908012) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: guo@bjut.edu.cn

生长 p 型掺杂的 GaAs 欧姆接触层和本征的 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 缺陷层, 厚度为 $5\lambda/4$. 顶部 n 型 DBR 由 19.5 对 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$ 层组成, 从而形成非均匀一维 PC 结构, 中心波长设计为 980 nm, 双波长输出为 920—980 nm 波段. 器件制备整体过程如下: 首先通过湿法腐蚀技术和各向异性感应耦合等离子体刻蚀(ICP)技术暴露出 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 氧化层侧边, 在 420°C 、湿氮环境中进行横向氧化, 最终得到直径 25 μm 的氧化孔径. 随后溅射 300 nm 的正面 Ti/Au 层和背面 Au/Ge/Ni/Au 层, 进行 430°C 合金处理, 形成金属电极接触层并得到完整器件^[12,13].

为了进一步掌握非均匀一维 PC 结构对 VCSEL 内部光子传输的调制作用, 本文对具有缺陷层的 VCSEL 内部电磁波 $E(z)$ 的分布进行研究, 并通过模拟计算光波形成的驻波电磁场能量 $|E(z)|^2$ 在 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 缺陷层和 VCSEL 中的分布, 如图 1 所示. 虽然一维非均匀 PC 结构对 VCSEL 整体反射率影响很小, 同样可以形成高反射带宽, 但是, 从图 1 中可以看出, 非均匀 PC 结构对特定波长形成的驻波电磁场能量分布具有很大调制作用. 由于激光器谐振腔内稳定的驻波电磁场与谐振腔共振波长具有对应关系^[14], 因此, 通过调节谐振腔内电磁场能量的分布, 可以有效改变腔内共振波长, 进而实现 VCSEL 的多波长输出特性. 也就是说, 相比于 VCSEL 结构所设计的中心波长, 非均匀一维 PC 结构的缺陷层 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 在 PBG 中引入了新的缺陷模态, 并在谐振器中实现多共振波长. 此外, 处于缺陷层内的电磁场能量也会随着缺陷层厚度的增大而增加.

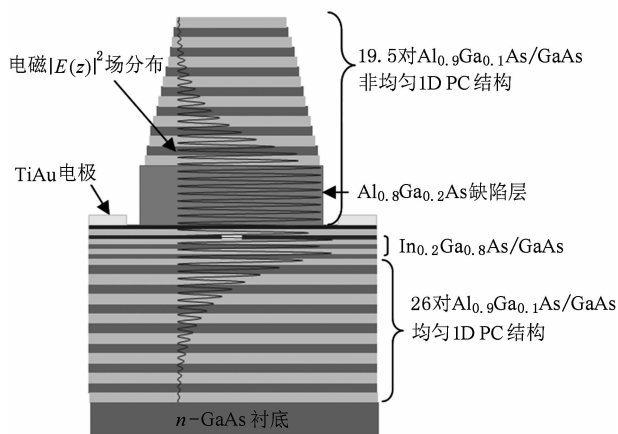


图 1 双波长 VCSELs 示意结构和内部电磁场能量分布

3. 实验结果与分析

图 2 为室温测量得到的双波长 VCSEL 输出光谱特性曲线和缺陷模态随缺陷层厚度变化的关系曲线. 可以看出, 缺陷层对谐振腔共振波长有明显的调制作用, 输出双波长分别处于 977 nm 和 941 nm 处, 另外, 在 955 nm 处也出现一个半宽为约 10 nm 的波峰, 这是由于在有源区内发出的光没有经过上非均匀一维 PC 反射镜, 而直接从注入电极边溢出, 并被探测器测量得到. 所得双波长的光谱半宽 (FWHM) 分别为 0.9 nm 和 3.4 nm, 由于激光器品质因子 Q 可以表示为 $Q \approx \lambda/\Delta\lambda$, 其中 $\Delta\lambda$ 为光谱半宽^[15], 因此, 根据图 2 的测量长波长结果计算得到品质因子 $Q = 1085$. 同时激光器的光学有效腔长 L_{eff} 也决定于品质因子 Q ^[15], 即 $2\pi L_{\text{eff}}(R_1 R_2)^{-1/4}/\lambda(1 - \sqrt{(R_1 R_2)})$, 其中 R_1, R_2 分别为均匀一维 PC 结构 DBR 和非均匀一维 PC 结构 DBR 的反射率. 由上述得到的品质因子 Q 值可以进一步计算激光器的光学有效腔长为 4.3 λ , 这是由于 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 缺陷层不仅调节了激光器内部光场能量的分布, 同时也增加了谐振腔内光子的传输距离, 因此与常规 VCSEL 有效腔长相比增加了很多. 考虑到光谱的自由谱宽 (FSR) 可以表示为 $\text{FSR} = \lambda^2/2n_{\text{eff}}L_{\text{eff}}$, 其中本实验中激光器的有效折射率 $n_{\text{eff}} = 3.2$ ^[16], 代入谐振腔有效腔长值得 $\text{FSR} = 35.5$, 与测量结果完全一致. 所设计的非均匀一维 PC 结构 VCSEL 的另一个特点是可以改变缺陷层厚度, 而对双波长输出光谱进行调谐. 已知处于 DBR 高反射带宽中的波长是禁止传播的, 等价于一维 PC 结构中的 PBG^[2], 因此反射谱带宽中的允许传播波长可以近似模拟 PBG 中缺陷模态的变化情况, 如图 2 (b) 所示. 可以看出, 对于所设波段, 随着缺陷层厚度从 1.1 μm 逐渐增加到 1.175 μm 附近时, VCSEL 谐振腔中的共振波长从 950 nm 附近向长波方向红移, 即对谐振腔中共振双波长进行调谐, 同时保持波长间隔不变. 但在缺陷层厚度继续增加到 1.2 μm 附近的变化过程中, 谐振腔中始终存在唯一的共振波长, 因此, 缺陷层的厚度对实现稳定的双波长输出至关重要. 研究中还发现, 当增加非均匀一维 PC 结构层的折射率差时, PBG 的范围也将被增大. 对于本文设计的结构, 当折射率差达到 0.6 以上时, PBG 范围近 400 nm, 并将形成多个模式缺陷态.

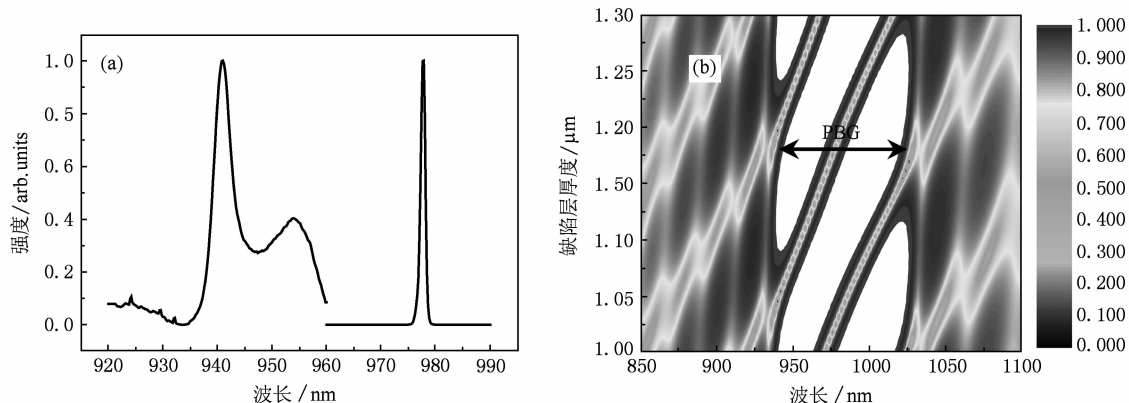


图2 (a) 双波长 VCSEL 输出光谱特性; (b) 缺陷模式调谐特性

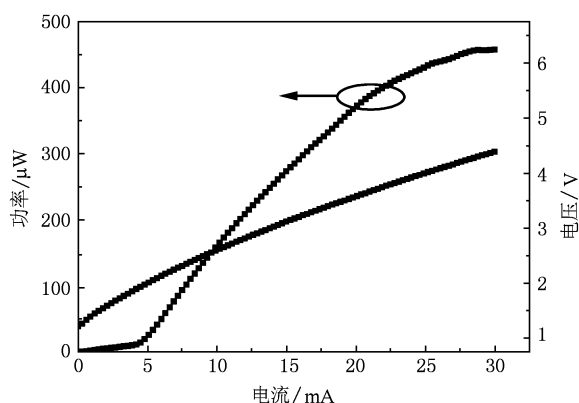


图3 双波长 VCSEL 输出功率和电压随电流的变化关系曲线

图3是室温测量得到的双波长 VCSEL 输出功率和电压随电流变化关系曲线,注入电流为 30 mA,氧化孔径 25 μm .从图3中可以看出,与常规 VCSEL 器件阈值电流相比,双波长 VCSEL 的阈值电流有所增加,为 4.2 mA,这是由于器件内部光场能量渗透到 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 缺陷层内,增加谐振腔共振模式的同时,减少了有源区内部光增益.另外,大的氧化孔径也增加了有源区体积,从而增加了激光器的阈值增

益.从以上实验结果可以得出,对于基于非均匀一维 PC 结构的 VCSEL 激光器,缺陷层 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 有效调制了谐振腔共振模式,并实现了双波长输出.同时,这种双波长输出光谱特性在整个电流注入过程中都存在,并在阈值电流以上实现激射.

4. 结 论

本文提出一种非均匀一维 PC 结构作为 VCSEL 上反射镜,并设计 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 缺陷层厚度为 $5\lambda/4$,从而在 PBG 中引入缺陷模式对 VCSEL 内部光场能量和共振波长进行调制,最终制备出双波长 VCSEL 器件.双波长输出光谱具有高 Q 因子、同方向垂直输出特性,激射波长分别为 977 nm 和 941 nm.所设计的基于非均匀一维 PC 结构的双波长 VCSEL 具有结构简单、集成度高、光束方向单一等特点.同时,通过不同缺陷层厚度的设计可以有效调谐 VCSEL 谐振腔中的共振波长,并保持波长间隔不变.这种具有良好相干特性和稳定频率间隔的双波长输出 VCSEL 及结构,在光通信系统、高精度传感器测量和光电探测器等领域中有着广泛的应用前景.

- [1] Koyama F 2009 *IEICE Electron. Expr.* **6** 651
- [2] Li R, Ren K, Ren X B, Zhou J, Liu D H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2520 (in Chinese) [李蓉、任坤、任晓斌、周静、刘大禾 2004 物理学报 **53** 2520]
- [3] Raftery J J, Lehman A C Jr, Danner A J, Leisher P O, Giannopoulos A V, Choquetter K D 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 081119
- [4] Boutami S, Benbakir B, Leclercq J L, Viktorovitch P 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 071105
- [5] Danner A J, Raftery J J Jr 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 1031
- [6] Carretero L, Ulibarrena M, Blaya S, Finia A 2004 *Appl. Optics.* **43** 2895
- [7] Deych L I, Erementschouk M V, Ivchenko E L, Lisyansky A A, Voronov M M 2005 *Phys. Stat. Sol. C* **2** 805

- [8] Matsuhisa Y, Ozaki R, Haase W, Yoshino K, Ozaki M 2006 *Ferroelectrics* **344** 239
- [9] Choi S S, Morris S M, Huck W T S, Coles H J 2009 *Adv. Mater.* **21** 1
- [10] Yu N, Kats M A, Pflugl C, Geiser M, Wang Q J, Belkin M A, Capasso F, Fischer M, Wittmann A, Faist J, Edamura T, Furuta S, Yamanishi M, Kan H 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 161108
- [11] Guo X, Shen G D, Guan B L, Gu X L, Wu D, Li Y B 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 013507
- [12] Guan B L, Guo X, Yang H, Liang T, Gu X L, Guo J, Deng J, Gao G, Shen G D 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4585 (in Chinese) [关宝璐、郭霞、杨浩、梁庭、顾晓玲、郭晶、邓军、高国、沈光地 2007 物理学报 **56** 4585]
- [13] Guan B L, Guo X, Deng J, Qu H W, Lian P, Dong L, Chen M, Shen G D 2006 *Chin. Phys.* **15** 2959
- [14] Kyungwon A, Michael S F 1995 *Phys. Rev. A* **52** 1691
- [15] Hunt N E J, Schubert E F, Logan R A, Zyzik G J 1992 *Appl. Phys. Lett.* **61** 2287
- [16] Hadley G R 1995 *Opt. Lett.* **20** 1483

Characteristics of dual-wavelength vertical-cavity surface-emitting lasers*

Guan Bao-Lu Guo Xia[†] Zhang Jing-Lan Ren Xiu-Juan Guo Shuai Li Shuo Chuai Dong-Xu Shen Guang-Di
(Key Laboratory of Opto-electronics Technology, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(Received 26 January 2010; revised manuscript received 24 March 2010)

Abstract

Based on asymmetric one-dimensional photonic crystal structure, a dual-wavelength vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) with modified standing wave field distribution has been constructed. The defect layer is $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ with $5\lambda/4$ thickness. Specifically, the dual-wavelength output spectrum of the VCSEL has low absorption loss, easy wavelength adjustment and same output direction. In addition, the two wavelengths and their spacing could be tuned by changing the refractive index contrast of the asymmetric PC structure and the thickness of defect layer. Such dual-VCSEL structure can be applied in optical bistable switches, amplifiers, modulators and detectors, etc. .

Keywords: VCSEL, photonic crystal gap, dual-wavelength

PACS: 42.55. Px, 42.60. Jf, 42.70. Qs

* Project supported by the 973 Programs (Grant No 2006CB604902), and National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60908012).

[†] Corresponding author. E-mail: guo@bjut.edu.cn