

利用边发射光致发光谱研究垂直腔面发射 激光器材料的特性

钮金真¹ 李国华²

(1 中央民族大学物理与电子工程系, 北京 100081)

(2 中国科学院半导体研究所 半导体超晶格国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 在室温下测量了 GaInP/AlGaInP 垂直腔面发射激光器(VCSEL)的光致发光谱和反射谱. 通过反射谱测量可以很容易得到激光器的腔模波长. 但是用通常的背散射配置不能测得与有源区中量子阱有关的光致发光信号. 用边激发配置可以测到量子阱的光致发光谱, 但这样测得的光谱已经受到激光器中的分布布拉格反射镜(DBR)的调制. 采用腐蚀去上 DBR 层的方法可以在背散射配置下测得量子阱的光致发光谱, 但仍无法避免下 DBR 层对发光谱的调制作用. 从而只有采用边激发-边发射模式才能测得 VCSEL 中量子阱的真实的光致发光谱.

关键词: 半导体激光器; 光致发光; 边发射

PACC: 4255P; 4260D; 7855

中图分类号: TN249

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2003)10-1067-05

1 引言

垂直腔面发射半导体激光器(VCSEL)具有单纵模工作、低阈值电流、发散角小、光束对称性好等优点, 适用于二维面阵集成以及与其它光电子器件进行光互连集成, 在光计算和信息处理等方面都有广泛的应用前景^[1], 因此对它的设计、工艺、器件特性和物理特性等都有很多研究^[2,3]. 在垂直腔面发射激光器中保证分布布拉格反射镜(DBR)的高反射谱的中心波长、激光器的腔模波长和多量子阱的发光峰值波长三者之间的一致是激光器能正常工作并具有低阈值电流的重要条件. 然而, 由于整个激光器的结构比较复杂, 很难生长出完全符合设计要求的材料, 而且某些生长参数也只有通过实际生长才能最终确定. 因此, 如何测定生长出的激光器芯片的 DBR 中心波长、激光器的腔模波长和多量子阱的发光峰值波长是改进激光器的结构设计, 摸索芯片的生长参数及检验激光器芯片的生长质量的一个重要

问题.

激光器的腔模波长以及 DBR 的中心波长比较容易确定, 通常通过测量垂直于芯片表面的反射谱就可以得到. 但 VCSEL 中量子阱发光峰值波长的测定比较困难, 由于 DBR 的存在, 从激光器芯片表面发射出的发光光谱已经被 Fabry-Perot(F-P)谐振腔调制过, 并不能反映量子阱的实际发光光谱. 因此需要寻找一种比较简便的测量方法来直接测定激光器的发光峰值波长. 在器件制作中常用的检测方法之一是利用 VCSEL 外延片制备边发射激光器, 通过测量边发射激光器的激射特性来检验 VCSEL 外延片本身的增益峰值波长. 但这种方法要求进行比较完整的器件制作, 不太适用于对外延生长结果的直接检测. 也有人采用将有源区上面的 DBR 层腐蚀掉的方法来测量量子阱的发光光谱, 但是这种方法是破坏性的, 而且有源区下面的 DBR 仍然会对发光光谱产生影响. Liang 等人^[4]曾经提出用表面光伏谱来测量 VCSEL 中的量子阱激子跃迁波长. 光伏谱原则上是测量材料的吸收谱, 量子阱中价带到导带的吸收在

钮金真 男, 1945 年出生, 高级工程师, 现从事固体物理学教学及其相关研究.

李国华 男, 1945 年出生, 研究员, 现从事半导体光谱研究.

2002-11-29 收到, 2003-01-08 定稿

光伏谱中会产生一个台阶状的增加,通过微分谱可以得到跃迁波长. Ghosh 等人^[5]采用边发射电致发光来确定 VCSEL 中量子阱的发光波长,这种方法可以直接测量量子阱的发光光谱,但仍然需要进行电极的制备. Schaafsma 等人^[6]也曾用边发射光致发光谱来研究 VCSEL 中的激子跃迁与腔模的相互作用. 这些测量都是非破坏性的直接测量.

我们采用几种不同的配置测量了 GaInP/Al-GaN 多量子阱 650nm 垂直腔面发射激光器的外延片的光致发光谱,并利用反射光谱测定激光器的腔模波长和反射特性,证明采用边激发-边发射配置是测得 VCSEL 中量子阱的发光峰值波长的简单有效方法之一.

2 实验

VCSEL 外延片采用金属有机物气相外延 (MOVPE) 方法生长在 GaAs 衬底上,在有源区中有三个 GaInP/AlGaInP 量子阱,阱宽为 8nm. 其顶部和底部各有 30 对和 55 对的 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{AlAs}$ 多层结构组成的 DBR. 详细的样品结构见文献[7]. 在测量中使用了两块样品,均从同一外延片上切得. 样品 A 未作任何处理,样品 B 已将上 DBR 层腐蚀掉作为对照.

光谱测量系统如图 1 所示. 采用 COHERENT-K100 氦离子激光器的 413.1nm 线为激发光源,激光器输出功率为 1W 左右. 利用改装过的 OLYMPUS-BH2 光学显微镜实现激光聚焦和发光信号的收集, JY-HRD1 双光栅单色仪分光, RCA-C31034 光电倍增管接收,整个系统由计算机控制. 所有光谱测量均在室温下进行. 测得的光谱已经对系统的光谱响应做了校正.

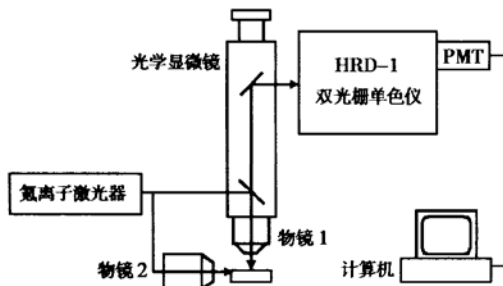


图 1 本实验所用的光谱测量系统示意图
Fig. 1 Schematic of optical system

如图所示,进入显微镜的激光经过一个半透半

反镜后,由物镜 1 聚焦到样品的上表面. 聚焦光斑直径约几个微米大小. 样品发出的光致发光也由物镜 1 收集,经半透半反镜、全反镜等光路系统进入单色仪的入射狭缝. 这是此显微光路的通常测量配置方式,通常称为背散射配置. 为了进行边激发测量,我们又新搭建了一条光路. 激光通过物镜 2 聚焦到样品的侧面,样品发出的光仍然由物镜 1 收集. 这时的测量配置称为边激发配置. 在测量反射光谱时,碘钨灯发出的白光通过光栅后,经物镜 1 聚焦在样品表面. 反射光仍由物镜 1 收集,进入到单色仪后进行分光得到反射光谱. 由于物镜 1 是工作距离为 120mm 的长焦距镜头,接受光的角度约 6° ,这样测得的反射光谱可以近似认为是在垂直入射条件下的反射光谱.

3 结果和讨论

图 2(a)、(b)和(c)分别给出了样品 A 的反射光谱、边激发光致发光光谱和背散射光致发光光谱. 在反射光谱中可以清楚地看到平坦的高反射率区域和两侧由于干涉效应引起的附加结构. 在 652nm 处的反射率的凹陷对应于 F-P 谐振腔的腔模波长,在图中用箭头指出. 在背散射配置下测得的光致发光谱中基本上看不到任何与量子阱发光有关的信号. 这一方

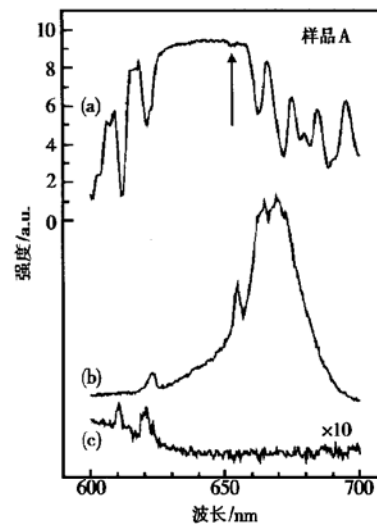


图 2 室温下测得的 GaInP/AlGaInP 垂直腔面发射激光器的反射谱(a)、边入射光致发光谱(b)和背散射光致发光谱(c)
Fig. 2 Reflectance (a), edge excitation photoluminescence (b), and back scattering emission spectra (c) of GaInP/Al-GaN VCSEL measured at room temperature
面是由于 DBR 的高反射率以及激光在外延层中的

吸收,使激光很难透入到量子阱区域,激发出强的量子阱发光.另一方面也是由于 DBR 的高反射率使量子阱的发光难以通过 DBR 层而被探测到.相反,在边激发配置下测得的光致发光谱中可以观察到很强的量子阱的发光.在边激发配置下,激光照射在样品的侧面,不再受到 DBR 层的影响,可以直接激发量子阱中的发光.但是量子阱发出的光仍然需要通过 DBR 层才能被物镜 1 收集到,因此此时测得的光致发光谱仍然会受到 DBR 的调制.在图 2(b)中可以看到发光谱在对应于 652nm 的腔模处以及在对应于若干个反射谱中的凹陷处有明显的锐峰出现,这是发光谱受到 DBR 调制的结果.因此,虽然在边激发配置下可以测得 VCSEL 中量子阱的发光,但测得的光致发光谱并不完全反映出有源区中量子阱的真正的光谱形状,这一点在后面我们还会进一步讨论.

图 3 是样品 B 的反射谱和背散射配置下测得的光致发光谱.从反射谱中可以看到,虽然样品 B 已经把上 DBR 层腐蚀掉了,但下 DBR 层的影响仍然

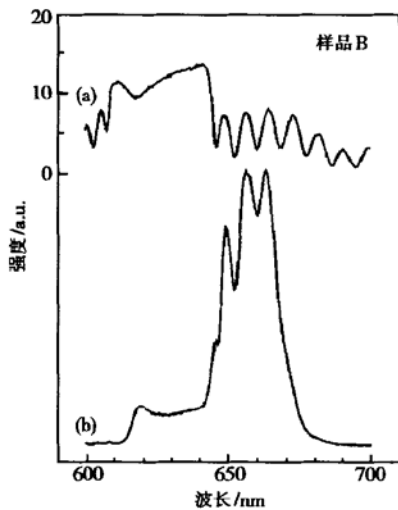


图 3 腐蚀掉上 DBR 层的样品 B 的反射谱(a)和背散射光致发光谱(b)

Fig. 3 Reflectance (a) and back-scattering photoluminescence (b) spectra of sample B, in which the front DBR has been etched away

存在,这可以从反射谱中仍然有一段反射率较大的平坦部分以及由干涉引起的振荡结构看出.从图中也可以看到,在光致发光谱中仍然可以清晰地看到几个锐峰结构,通过与反射谱的对照可以发现,这些多峰结构与反射谱中的振荡结构有一定的对应关系,说明这些多峰结构不是量子阱发光的本征特性,

而是下 DBR 层对发光光谱的调制的结果.因此把上 DBR 腐蚀掉后虽然可以比较容易测得 VCSEL 外延片的光致发光谱,但采用背散射配置仍很难得到 VCSEL 中量子阱的真实的发光光谱.

为了测得 VCSEL 外延片中量子阱的真实的发光光谱,我们将样品竖立起来放在显微镜物镜 1 的下面,使样品的侧面向上.这样在背散射配置下激光聚焦在样品的侧面,物镜 1 收集到的光致发光也是样品从侧面发出的光.我们把这种测量方式称为边激发-边发射模式,简称边发射模式.图 4(a)给出了样品 A 在边发射模式下测得的光致发光谱.由于信号比较弱,发光峰上强度涨落引起的噪音比较明显.因为是在室温下测量,发光峰也比较宽.在 10K 时此发光峰半高宽会减小到只有 6nm, 10~ 300K 变温光致发光谱证实在这种条件下测得的光谱只有一个

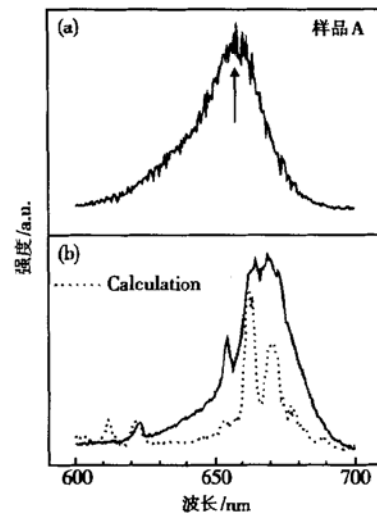


图 4 (a) GaInP/AlGaInP 垂直腔面发射激光器的边入射-边发射光致发光谱;(b)激光器的边入射-面发射光致发光谱图中点线是根据(1)式的计算结果绘出.

Fig. 4 (a) Edge excitation and edge emission spectra of GaInP/AlGaInP VCSEL; (b) Edge excitation and front-emission spectra The dotted curve is the calculated result according to equation (1).

峰.我们取此峰的中心位置为峰值波长,如图中箭头所示.估计由于发光峰信噪比差而引起确定的峰值波长的误差为 2nm 左右.由于在这种模式下完全避免了 DBR 层对光谱的影响,我们认为测得的光谱是 VCSEL 中量子阱的实际的光致发光谱.需要指出的是,由于样品得到限制,我们无法直接比较有源区两侧完全不带 DBR 层的量子阱的边发射谱与垂直发射谱的差别,只是近似认为在我们的样品中这两者

是相同的. 为了进一步说明 VCSEL 中 DBR 层对量子阱发光光谱的调制作用, 在图 4(b) 中我们用实线画出了样品 A 在边激发配置下测得的光谱. 可以看到, 在边激发配置下测得的光谱的峰值位置在 667nm. 比在边发射模式下测得的光谱红移了约 10nm, 而且光谱中出现了一些锐峰结构, 再一次说明这些锐峰结构并不是量子阱发光的本征特性, 而是 DBR 层调制的结果.

如果我们将边发射模式下测得的量子阱的发光谱用 $I_0(\lambda)$ 来描述, 并设量子阱的发光透过上 DBR 层时的透射率为 $t(\lambda)$, 则在边激发配置下测得的发光峰的强度 $I(\lambda)$ 可以写为:

$$I(\lambda) \propto I_0(\lambda)t(\lambda) = I_0(\lambda)[1 - R(\lambda)] \quad (1)$$

其中我们假定 $t(\lambda)$ 可以根据测得的反射谱 $R(\lambda)$ 直接算得. 这样算得的发光谱也在图 4(b) 中用点线画出. 可以看到, 计算得到的光谱可以很好地模拟出边激发配置下测得的光谱的峰值红移和锐峰结构. 当然, 计算得到的光谱并不与实际测量的光谱完全一致. 其主要原因是因为我们用 $1 - R$ 来计算量子阱的发光透过上 DBR 时的透射率. 很显然, 从样品外部测得的反射率和量子阱发光从 F-P 腔内部向外透射时感受到的反射率是不同的. 但由于这个反射率很难测得, 我们只能用上述近似来进行分析.

在样品 B 的边激发-边发射谱中也观察到与样品 A 类似的一个发光峰, 光谱形状和半高宽完全相同, 峰值位置稍有不同, 可能是由于不同样品处 GaInP 合金的组分稍有差异的缘故, 在这儿就不再详细讨论了.

4 结论

采用几种测量配置研究了 GaInP/AlGaInP 多量子阱 650nm 红光垂直腔面发射激光器的外延片的发光特性. 结果表明, 在背散射配置下从激光器芯片的上表面不能测得与 VCSEL 中量子阱有关的发光信

号. 采用边激发-正面收集的边激发配置虽然可以测得与量子阱发光有关的发光光谱, 但此发光光谱已经被 DBR 结构调制过, 不能正确反映出量子阱的真实发光特性. 另一方面, 虽然在背散射配置下可以很容易测得已将上 DBR 腐蚀掉后的对照样品中的光致发光, 但此光谱仍然受到下 DBR 的影响, 也不是量子阱的真实的发光谱. 只有采用侧面激发, 侧面收集的边激发-边发射模式, 才能测得 VCSEL 中量子阱的真实的发光光谱.

致谢 感谢中国科学院半导体研究所光电子研究发展中心刘世安同学提供实验所用的样品.

参考文献

- [1] Iga K, Koyama F, Kinoshita S. Surface emitting semiconductor lasers. IEEE J Quantum Electron, 1988, QE-24: 1845
- [2] Zhao Yiguang, Zhang Yusheng, Huang Xianling. Electrical, thermal and optical waveguiding characteristics of vertical-cavity surface emitting lasers. Chinese Journal of Semiconductors, 1999, 20, 963 (in Chinese) [赵一广, 张宇生, 黄显玲. 垂直腔面发射半导体激光器的电、热和光波导特性. 半导体学报, 1999, 20: 963]
- [3] Kang Xuejun, Lin Shiming, Gao Junhua, et al. Room temperature CW GaAs/AlGaAs vertical cavity surface emitting semiconductor laser fabricated by selective oxidation and selective etching. Chinese Journal of Semiconductors, 1996, 17, 873 (in Chinese) [康学军, 林世鸣, 高俊华, 等. 由选择腐蚀和选择氧化法相结合研制的 GaAs/AlGaAs 垂直腔面发射激光器. 半导体学报, 1996, 17: 873]
- [4] Liang J S, Huang Y S, Tien C W, et al. Surface photovoltage spectroscopy characterization of a GaAs/GaAlAs vertical-cavity-surface-emitting laser structure: angle dependence. Appl Phys Lett, 2001, 79: 3227
- [5] Ghosh S, Constant S, Hosea T J C, et al. Edge-emission electroluminescence study of as-grown vertical-cavity-surface-emitting laser structures. J Appl Phys, 2000, 88: 1432
- [6] Schaafsma D T, Christensen D H. Mode splitting in side emission from vertical-cavity surface-emitting lasers. Phys Rev B, 1996, 54: 14618
- [7] Liu S, Lin S, Cheng P, et al. Investigation on anisotropy of vertical-cavity surface-emitting lasers. J Appl Phys, 2000, 88: 3102

Edge Emission Photoluminescence Study of Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Structures

Niu Jinzhen¹ and Li Guohua²

(1 *Department of Physics and Electronic Engineering, Central University for Nationalities, Beijing 100081, China*)

(2 *National Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

Abstract: Photoluminescence and reflectance of GaInP/AlGaInP vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) structure are investigated at room temperature. The cavity-mode wavelength can be easily obtained using reflectance measurement. But it is hard to observe the photoluminescence related to the quantum wells in the active region at the normal back-scattering configuration. The emission spectra are measured by using edge-excitation configuration, but the observed spectra have been modulated by the distributed Bragg reflectors (DBR) in VCSEL. By etching away the front DBR, the photoluminescence spectra of the VCSEL are measured at back-scattering configuration. However, the measured spectra are still affected by the bottom DBR. The real spectra of the quantum wells in the VCSEL can only be observed in the edge-excitation and edge-emission mode.

Key words: laser; photoluminescence; edge-emission

PACC: 4255P; 4260D; 7855

Article ID: 0253-4177(2003)10-1067-05

Niu Jinzhen male, was born in 1945, senior engineer. He is engaged in the teaching and research on the solid state physics.

Li Guohua male, was born in 1945, professor. He is engaged in the research on the optical properties of semiconductors.

Received 29 November 2002, revised manuscript received 8 January 2003

©2003 The Chinese Institute of Electronics