

# 键合方法研制 InAsP/InGaAsP 量子阱 1.3 $\mu\text{m}$ 垂直腔面发射激光器\*

劳燕锋<sup>†</sup> 曹春芳 吴惠桢 曹 萌 刘 成 谢正生 龚 谦

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所 信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050)

**摘要:** 设计并研制了由 InAsP/InGaAsP 应变补偿多量子阱有源层、SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> 介质薄膜和 GaAs/Al(Ga)As 半导体分布布拉格反射镜(DBR)构成的垂直腔面发射激光器(VCSEL). 采用直接键合技术实现 InP 基有源层与 GaAs 基 DBR 的晶片融合, 并经过侧向湿法腐蚀定义电流限制孔径和沉积介质薄膜 DBR 等关键器件工艺, 研制出 InAsP/InGaAsP 量子阱垂直腔面发射激光器, 其阈值电流为 13.5mA, 单模激射波长为 1288.6nm.

**关键词:** 垂直腔面发射激光器; 晶片直接键合; 隧道结

**PACC:** 7280E; 4280S; 8115N

**中图分类号:** TN248

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2008)11-2286-06

## 1 引言

垂直腔面发射激光器<sup>[1]</sup> (vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL) 具有单纵模工作、圆形输出光束、低功耗、低阈值、高调制速率、易于二维阵列集成等特点, 它在光纤通信、并行光互连<sup>[2]</sup>、气体探测<sup>[3]</sup>、数据存储、激光显示<sup>[4]</sup> 等领域有着广泛的应用前景. 与 850nm VCSEL 相比, 1.3 和 1.55 $\mu\text{m}$  位于硅基光纤的低色散和低损耗窗口, 因此长波长 1.3 和 1.55 $\mu\text{m}$  的 VCSEL 在光纤通信应用中有着更大的优势. 从研究现状看, GaAs 基 850nm VCSEL 已获得了快速发展, 其器件性能达到了商业应用水平; 然而, 由于实现高质量 InP 基半导体分布布拉格反射镜(distributed Bragg reflector, DBR)的外延较为困难, 研制高性能长波长 VCSEL 器件仍存在难度<sup>[5]</sup>. 在 1.3 $\mu\text{m}$  VCSEL 研究方面, 国际上报道了多种实现方法, 例如在具有高反射率和高热导率性能的 GaAs 基 DBR 上生长 GaInNAs<sup>[6]</sup> 和 GaAsSb<sup>[7]</sup> 量子阱、GaAs 基量子点<sup>[8]</sup> 等有源层材料, 从而将 GaAs 基全外延 VCSEL 的激射波长推进到 1.3 $\mu\text{m}$ ; 而在 InP 基底上, 外延相对较大折射率差异且与 InP 晶格匹配的铋化物如 AlGaAsSb/AlAsSb 制备 DBR, 使 InP 基全外延 VCSEL 取得了重要进展<sup>[9]</sup>; 此外, 利用晶片键合技术兼容 InP 和 GaAs 基材料各自的优势<sup>[10]</sup>, 也获得了高性能长波长 VCSEL 器件. 国内方面, 对于 1.3 $\mu\text{m}$  VCSEL 的研究报道目前仍很少, 其原因是长波长 VCSEL 的研制对结构设计、材料生长和器件工艺的要求都非常苛刻. 从器件制作角度来说, 全外延结构需要刻蚀上反射腔镜, 而且获得高性能 VCSEL 器件的一个关键工艺是制作电流限制孔径, 一般通过氧

化高 Al 组分 AlGaAs 层<sup>[11]</sup> 或掩埋隧道结<sup>[12]</sup> 来达到限制电流目的, 这些制作过程使整个 VCSEL 器件工艺较为复杂. 取得简单、可靠、可重复性的器件研制技术将有利于实现长波长 VCSEL 的实际应用.

本文报道了利用晶片直接键合方法研制 InAsP/InGaAsP 量子阱 1.3 $\mu\text{m}$  VCSEL 激光器, 从结构设计、外延材料生长和器件工艺制作等均由自主技术实现. VCSEL 结构由 SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> 介质膜 DBR, GaAs 基 GaAs/Al(Ga)As 半导体 DBR 以及处于它们之间的 InP 基 InAsP/InGaAsP 应变补偿多量子阱有源层材料组成. 由气态源分子束外延(gas-source molecular-beam epitaxy, GSMBE) InP 和 GaAs 基材料, 通过直接键合技术将两种材料融合成为一个整体, 沉积 SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> 介质薄膜 DBR 后形成完整 VCSEL 结构. 器件制作中, 采用选择性侧向腐蚀 n<sup>++</sup>-InP/p<sup>++</sup>-InAlAs 隧道结实现注入电流的限制. 与报道的其他器件工艺相比, 本文中 VCSEL 制作过程相对简单且可对谐振腔共振模式(简称腔模)进行检测和调整, 利用侧向腐蚀孔径技术易于在器件工艺上实现电流的限制, 因而成功制作出 1.3 $\mu\text{m}$  VCSEL. 文中利用晶片键合技术实现 InAsP/InGaAsP 量子阱 1.3 $\mu\text{m}$  VCSEL 器件在国内尚属首次.

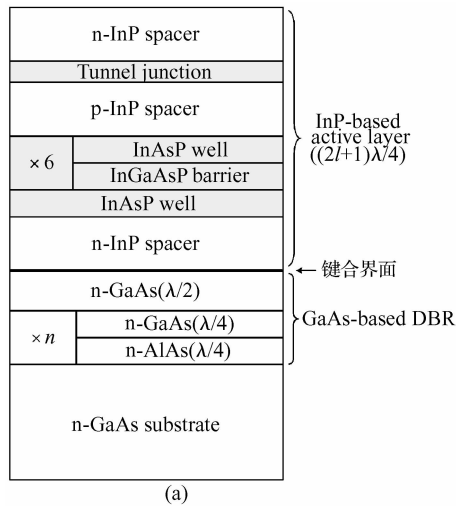
## 2 实验

图 1(a) 为利用晶片直接键合方法制备的用于制作 VCSEL 的半导体结构示意图, 它由 InP 基有源层和 GaAs 基下 DBR 组成, 在该结构上沉积的 SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> 上 DBR 后形成完整的 VCSEL 器件结构, 为便于说明将这种结构称为半腔 VCSEL. 由于 InP 基有源层材料的折射率介于 GaAs 和介质薄膜 DBR 材料之间, 由传

\* 国家重点基础研究发展规划资助项目(批准号:2003CB314903)

<sup>†</sup> 通信作者. Email: lyflys@hotmail.com

2008-04-26 收到, 2008-06-10 定稿



(a)

SL×8	n-InP	7.1nm
	n-InGa <sub>0.2</sub> As <sub>0.44</sub> P	8.7nm
n-InP spacer		326.1nm
n-InP		47.4nm
SCMQWs ×6	InAs <sub>0.44</sub> P well	6.10nm
	InGa <sub>0.36</sub> As <sub>0.44</sub> P barrier	7.45nm
InAs <sub>0.44</sub> P well		6.10nm
i-InP		75.8nm
p-InP spacer		131.6nm
p-InAl <sub>0.48</sub> As		30nm
TJ	p <sup>++</sup> -InAl <sub>0.48</sub> As	15nm
	p <sup>++</sup> -InP	20nm
n-InP spacer		780.2nm
SL×10	n-InGa <sub>0.20</sub> As <sub>0.44</sub> P	8.7nm
	n-InP	7.1nm
n-InGa <sub>0.20</sub> As <sub>0.44</sub> P etch stop		191nm
InP buffer		500nm
InP substrate (n <sup>+</sup> )		

(b)

n-GaAs(λ/2)		192.2nm	
×23	n-GaAs(λ/4)	96.1nm	
	n-AlAs	4.9nm	
	×9	n-GaAs(1DL)	0.5653nm
		n-AlAs(20DL)	11.3nm
n-GaAs buffer		500nm	
n <sup>+</sup> GaAs substrate			

(c)

图 1 (a) 直接键合 VCSEL 结构示意图;(b) InP 基有源材料结构;(c) GaAs 基 DBR 结构

Fig.1 Schematic structures of (a) directly bonded VCSEL, (b) InP-based active materials, and (c) GaAs-based DBR

递矩阵法进行理论计算表明, InP 基材料作为共振腔其光学厚度须满足关系式:  $(2l + 1)\lambda/4$ , 其中  $l$  为整数,  $\lambda$

为激光波长, 本文中取  $l = 8$ ; 同时半腔和完整 VCSEL 均为 Fabry-Pérot (F-P) 共振腔结构, 利用这一特点在器件制作过程中可准确地检测并控制腔模的位置. 为了获得高性能 VCSEL 器件必须使腔镜具有高反射率且有源层具有高光学增益, 因此实验上需要将腔模控制在 DBR 反射带内以达到有效反射, 并调整腔模与有源层增益谱的关系使器件在工作状态下得到高光学增益. 测试图 1(a) 键合结构可得到腔模位置, 并通过湿法腐蚀方法改变 InP 基材料的厚度以实现腔模的调整.

InP 基与 GaAs 基材料的外延结构如图 1(b) 和 (c) 所示, 分别由 GSMBE 生长得到, 其中 III 族元素由高纯度金属固体源获得, 而 V 族元素由气源 AsH<sub>3</sub> 和 PH<sub>3</sub> 经高温裂解得到. InAsP/InGaAsP 应变补偿多量子阱 (strain-compensated multi-quantum well, SCMQW) 结构设计成阱与垒的 V 族元素组分相同, 因此外延过程中保持气路 AsH<sub>3</sub>, PH<sub>3</sub> 以及 In 源炉束流不变, 仅需控制 Ga 的生长, 这种设计和外延处理可以获得比较理想的界面控制. 量子阱采用阱在外侧的结构, 如图 1(b) 所示, 其优点是减小了量子阱总厚度, 在保证驻波增强因子的情况下增大了阱的数目, 外侧阱以 InP 层作为电子阻挡层, 根据生长参数得到补偿后的净应变量为 0.13%. InP 基结构中采用了重掺杂的 n<sup>++</sup>-InP/p<sup>++</sup>-InAlAs 隧道结结构, 其作用将在下一节中详细阐述, n 型材料由掺 Si 得到, 浓度为  $1.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , p 型材料为 C 掺杂, 由气态 CBr<sub>4</sub> 不经裂解直接进入生长室, 在衬底表面分解并进入材料内部形成 C 掺杂, 浓度为  $1.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ . 图 1(b) 的 InP 基材料上下两侧各生长有 InP/InGaAsP 超晶格 (superlattice, SL) 层, 顶层 SL 用作键合界面层, 而下层 SL 在键合后作为选择性湿法腐蚀层用于腔模调节. InP 基有源材料的光致发光谱如图 2(a) 所示, 其中 1314nm 为量子阱发光峰位置, 而 1164nm 为 InP/InGaAsP SL 的发光峰; 由生长参数知道, InGaAsP 带隙波长为 1180nm, 由于 SL 中 InP 的限制作用使其发光峰蓝移到 1164nm; 测试时泵浦光从表面入射, 因而主要为表面 SL 层吸收产生光跃迁, 部分载流子的扩散迁移进入量子阱而发光, 这就使得实际测到的 1314nm 发光峰强度要比 1164nm 发光峰弱. 由于外延样品用于直接键合工艺, 其表面平整度对键合质量影响较大<sup>[14]</sup>, 在 GaAs 基 DBR 的生长中我们重点优化了材料表面质量. 一般地, Al 源的纯度低于 In, Ga 源, 且 Al 原子极为活泼, 极易与杂质氧结合, 引起 AlGaAs 材料表面粗糙化现象<sup>[15]</sup>, 实验中采用了一种数字合金技术 (digital alloy)<sup>[15]</sup>, 即在 AlAs 层中间隔插入 GaAs 原子层, GaAs 子层在一定程度上阻隔了杂质氧的累积, 结构如图 1(c) 所示, 其中表面的  $\lambda/2$ -GaAs 层不影响反射率值和反射相位, 但增加了表面 GaAs 层厚, 有利于减小键合高温退火对 DBR 的影响. 通过生长优化得到了光学显微镜 (1000 倍) 下具有平整表面的样品, 图 2 (b) 为 23 周期 DBR 的反射光谱, 实测最高反射率值为  $98.9 \pm 1\%$ .

晶片直接键合<sup>[16]</sup>是作者制作 VCSEL 器件的关键

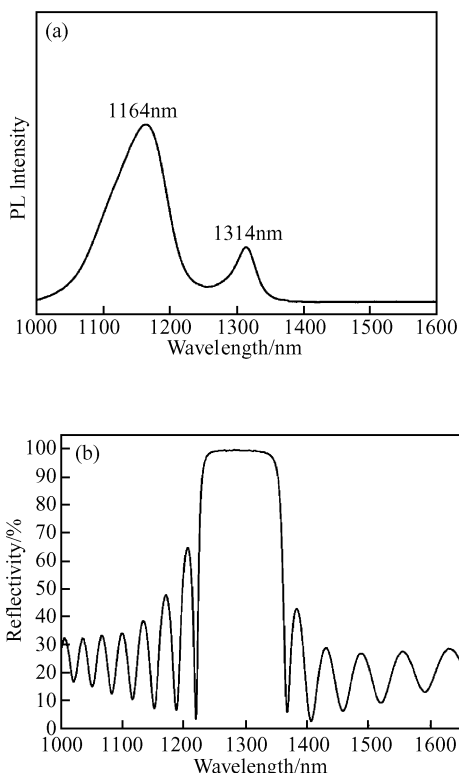


图 2 (a) InP 基有源材料的 PL 谱; (b) 23 周期 GaAs/Al(Ga)As DBR 的反射光谱

Fig.2 (a) PL spectrum of InP-based active materials; (b) Reflection spectrum of 23-period GaAs/Al(Ga)As DBR

工艺,它是在不加入任何中间层的情况下,经过高温退火处理使两种材料融合成为一个整体,其界面通过化学键力紧密地结合.制作过程可分为 4 个步骤:表面处理、晶片叠合、高温退火键合以及衬底去除. InP 与 GaAs 基材料片首先沿着 $\langle 110 \rangle$ 晶向解理成  $1\text{cm} \times 1\text{cm}$  大小,并在 InP 基材料表面腐蚀出  $250\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$ , 宽为  $5\mu\text{m}$  的沟道图案,作为退火过程中释放化学气氛的通道.待键合晶片经过清洗、表面氧化物去除后边对边地叠合在一起,置于键合装置后并施加压力,随后立即放入退火炉进行高温退火,1h 内从室温升至键合温度,退火完成后 2h 内自然降温到  $350^\circ\text{C}$  以下,待降至  $100^\circ\text{C}$  以下时取样.实验中采用  $630^\circ\text{C}$  退火温度,  $2\sim 3\text{MPa}$  键合压强,退火时间为 30min.由于退火温度高于一般 InP 基材料生长温度,因此需要验证键合过程对量子阱发光性能的影响;实验结果表明<sup>[17]</sup>, InAsP/InGaAsP 应变补偿量子阱在  $650^\circ\text{C}$  下键合仍具有较好的发光特性,该体系具有高温稳定性性能的原因是其结构中相同组分的 V 族元素使退火过程中阱与垒之间不发生 As 与 P 的互扩散,而仅引起 In 与 Ga 的互扩散效应,采用 InAsP/InGaAsP 量子阱结构保证了键合样品有源层的光学性能.

键合后, InP 衬底和 InGaAsP 腐蚀阻挡层分别由  $\text{HCl} + \text{H}_3\text{PO}_4$  (3 : 1) 和  $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$  (1 : 1 : 10) 选择性腐蚀去除.键合样品的剖面电子显微镜图 (scanning-electron microscope, SEM) 如图 3 所示,可以看到其中均匀键合且紧密结合不留空隙的 InP-GaAs 界面.器件工艺中,首先在样品表面制作  $\text{SiN}_x$  掩膜,由

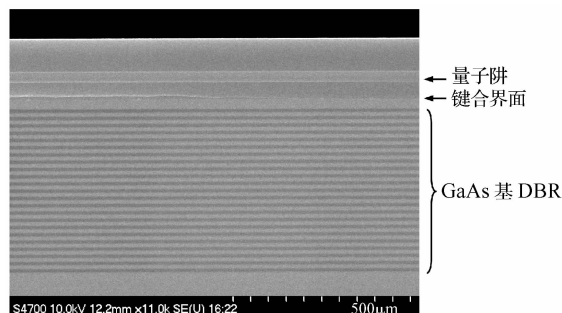


图 3 键合 VCSEL 样品的剖面 SEM 图

Fig.3 Cross-sectional SEM of bonded VCSEL samples

非选择性湿法腐蚀出直径为  $32\mu\text{m}$  的圆形台面,腐蚀深度达到 InAlAs 层.器件制作的关键工艺是利用柠檬酸系溶液(柠檬酸:双氧水 = 10 : 1)选择性侧向腐蚀 In-AlAs 层(总厚为  $50\text{nm}$ )制作电流限制孔径.由于受腐蚀液浓度、环境温度、InAlAs 层厚度、腐蚀时样品状态等因素影响,湿法腐蚀速率存在一定的偏差,实验中侧向腐蚀速率约为  $6\mu\text{m}/\text{h}$ ,实际腐蚀时间为 1.5h.长时间腐蚀下须注意柠檬酸溶液对结构中其他材料的侵蚀作用,实验证明柠檬酸溶液腐蚀 InP 和 InGaAsP 的速率分别为  $17.4\text{nm}/\text{h}$  和  $210\text{nm}/\text{h}$ ,考虑到 InAlAs 层两侧为 InP 材料,在 1.5h 腐蚀作用下结构不致发生变化.图 4 是侧向腐蚀实验样品制作电流孔径后的剖面 SEM 图,为便于解理剖面采用了条形图案,根据实验结果我们估算实际器件中的电流孔径为  $15\mu\text{m}$ .在表面涂覆聚酰亚胺绝缘材料进行器件隔离,并开窗口蒸镀正面 Ti/Pt/Au 金属接触电极后,由电子束蒸发法沉积  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  介质薄膜 DBR,由于其高反射率带波长范围达到  $250\text{nm}$  以上,因此较容易覆盖腔模位置,然而需要注意的是相位匹配问题,利用传递矩阵方法进行光场计算得到,当以  $\text{SiO}_2$  为与 InP 接触第一层、 $\text{TiO}_2$  为最后一层时达到有效反射.最后减薄 GaAs 基底并制作背面 Au-GeNi/Au 接触电极后制作出如图 5 所示的 VCSEL 器件.

### 3 结果与分析

为了成功研制出  $1.3\mu\text{m}$  VCSEL 器件,我们在结构

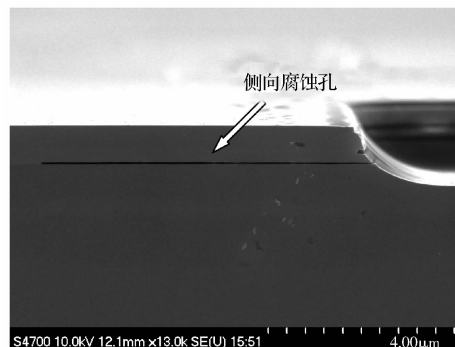


图 4 VCSEL 器件结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of VCSEL devices

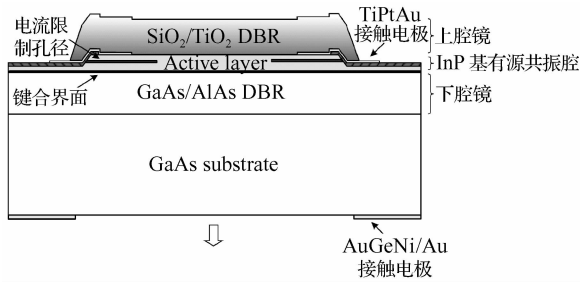


图 5 侧向腐蚀孔的剖面 SEM 图

Fig.5 Cross-sectional SEM of the lateral etching aperture

中考虑了以下几个方面的设计. 第一, 利用 InAsP/InGaAsP 量子阱结构减弱了高温过程中元素的扩散效应, 保证了键合结构有源增益材料的发光性能. 第二, 采用了重掺杂的  $n^{++}$ -InP/ $p^{++}$ -InAlAs 隧道结结构. 一方面, 由于隧道结利用了载流子的隧穿机制, 工作时处于反向偏置, 因此结构中部分 p 型 InP 空间层被替换成 n 型材料, 减小了空间层的吸收损耗; 另一方面, 利用选择性侧向腐蚀 InAlAs 层在实验上较容易实现电流限制孔径的制作. 侧向腐蚀工艺的一个重要问题是, 上下材料层易发生塌陷造成粘接现象, 产生可能的漏电流, 然而注意到隧道结为反向偏置, 塌陷处的材料层形成反偏的 pn 结, 不产生导通电流, 因此侧向腐蚀后的隧道结具有电流限制作用; 另外, 隧道结因其高掺杂具有高电导率, 使注入到量子阱区的载流子得以均匀化, 一般圆形台面中心是基横模光场极大值处, 而高阶横模在边缘处为光场极大, 载流子的均匀注入有利于器件工作在基横模. 第三, 利用图 1(a) 结构实现了 VCSEL 腔模的准确控制; 实验证明, 图 1(a) 的半腔 VCSEL 以及沉积  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  上 DBR 后的完整 VCSEL 均为 F-P 共振腔结构, 这有利于实验中腔模的实时检测和控制. 在键合制作半腔 VCSEL 结构后, 由选择性湿法腐蚀 InP/InGaAsP SL 将腔模调整到准确位置. 由图 2(b) 知道 GaAs/Al(Ga)As DBR 的高反射带中心位置位于 1294nm, 实验中通过腐蚀将腔模位置调整在 1293.7nm. 图 6 所示为腔模调整后的半腔 VCSEL 反射光谱, 图中还给出了进行器件工艺制作后半腔 VCSEL 的电致发光光谱 (electroluminescence, EL), 可见 EL 发光主峰为 1293.4nm, 与

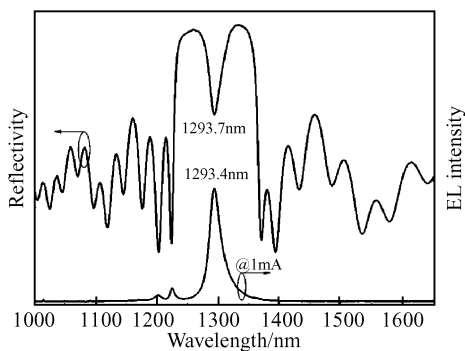


图 6 半腔 VCSEL 的反射光谱与电致发光光谱比较

Fig.6 Comparison of reflection and EL spectra of half-cavity VCSEL

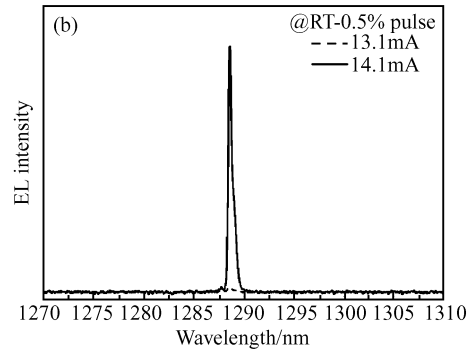
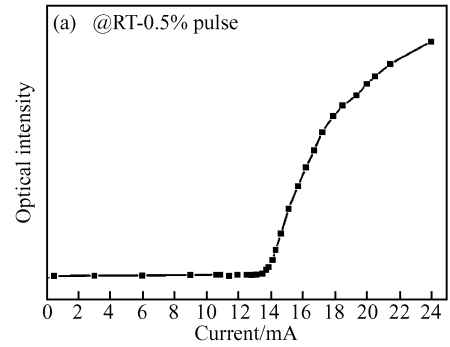


图 7 VCSEL 器件的激光特性 (a) 电流-功率特性; (b) 激光前后 EL 谱比较

Fig.7 Lasing characteristics of VCSEL devices (a)  $I$ - $P$  performance; (b) Comparison of EL spectra before and after lasing

腔模位置重合, 侧边小峰对应反射谱上的低谷. 第四, 键合界面 InP 基材料一侧生长了 InP/InGaAsP SL 层, SL 结构由于其内建应力场的存在可起到阻挡缺陷扩散的作用, 实验已证明, InP/InGaAsP SL 层可减小键合界面引起的额外光学损耗并有利于减小键合过程导致的腔模变化效应<sup>[18]</sup>.

$\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  上 DBR 由于两种介质材料之间折射率差大, 易于获得高反射率, 实验中生长了 12 个周期, 其反射率值大于 99.9%, 因此我们将  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  DBR 作为反射腔镜, 而 GaAs/Al(Ga)As DBR 作为激光出射侧腔镜, 即器件为衬底面出射型, 这种方案减小了 GaAs 基 DBR 的周期数, 有利于降低外延要求.

器件测试在室温下进行, 光由衬底面出射经一反射镜进入配有 InGaAs 探测器的 NICOLET 760 型傅里叶变换红外光谱仪, 测试发光光谱. 测试时, 器件两端施加 20kHz、占空比为 0.5% 的脉冲电压. 由于光束从衬底面出射, 衬底吸收以及衬底-空气界面的反射和散射作用, 使实际出射光功率减弱很多. 我们分别测试了不同注入电流下的发光光谱, 以其强度对波长的积分值表示光功率, 得到的电流-功率关系如图 7(a) 所示, 可以看出器件阈值电流为 13.5mA. 图 7(b) 为激光前后的发光光谱比较, 激光后呈现单纵模特性, 波长位置为 1288.6nm. 激光波长略短于半腔结构的 EL 主峰, 这是因为  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  上 DBR 中心波长小于 1294nm, 从而使 VCSEL 结构腔模位置蓝移到了 1288.6nm. 当增大注入电流时, 光谱表现出多模特性<sup>[19~21]</sup>, 如图 8 所示, 模式位置分别位于 1287.8, 1288.6, 1289.5 和 1290.4nm, 各模式之间

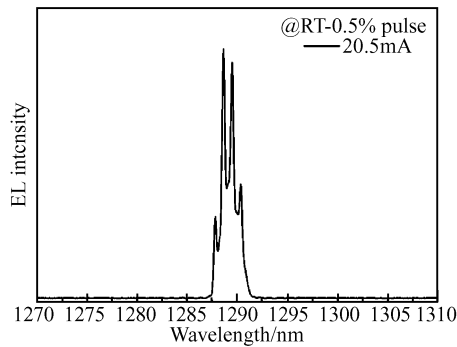


图 8 大电流注入下的多模特性

Fig. 8 Multi-transverse mode properties under the injection of large current

的间距相等,为多横模特征<sup>[22]</sup>。

多横模的出现可归结为空间烧孔效应 (spatial hole-burning, SHB)<sup>[23]</sup>。由于结构中采用了电流限制孔径和隧道结,器件激射前载流子浓度在孔径中心为极大值分布;当增大注入电流,孔径中心为光场极大值的基横模得以放大,达到阈值条件,器件激射为单横模(图 7 (b)),激射后受激辐射使中心区域的载流子迅速消耗,因此实际载流子浓度在孔径中心为极小值,而主要分布于边缘区域,此即空间烧孔效应。载流子的这种分布,使得电流增大的同时基横模强度不能得以快速增大,相反使孔径边缘处为光场极大的高阶横模得到放大,由于我们器件中的电流孔径为  $15\mu\text{m}$ ,一般孔径大于  $8\mu\text{m}$  时衍射损耗可以忽略,这使得高阶横模的光学增益大于损耗而得到激射,这是图 8 出现多横模的原因<sup>[19~22]</sup>。

## 4 结论

采用晶片直接键合方法研制了包含 InAsP/InGaAsP 应变补偿多量子阱有源层、 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  介质薄膜和 GaAs/Al(Ga)As 半导体 DBR 的长波长  $1.3\mu\text{m}$  VCSEL 器件。该器件在室温脉冲下激射,阈值电流为  $13.5\text{mA}$ ,单纵模激射波长为  $1288.6\text{nm}$ ,大电流注入下呈现多横模特性,这与器件中采用了  $15\mu\text{m}$  限制孔径有关。本文报道的 VCSEL 制作过程相对简单,侧向湿法腐蚀隧道结的方法易于实现电流限制孔径制作,有望获得实际应用。

## 参考文献

[1] Iga K. Surface-emitting laser: Its birth and generation of new optoelectronics field. *IEEE J Sel Topics Quantum Electron*, 2000, 6(6): 1201

[2] Guenter J K, Tatum J A, Clark A, et al. Commercialization of Honeywell's VCSEL technology; further developments. *Proceedings of the SPIE*, 2001, 4286: 1

[3] Robert S, Ortsiefer M, Rosskopf J, et al. Long-wavelength InP-based VCSELs with buried tunnel junction; Properties and appli-

cations. *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers VIII Proceedings of SPIE*, 2004, 5364: 1

- [4] Bove V M Jr, Sierra W. Personal projection, or how to put a large screen in a small device. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2003, 34: 708
- [5] Karim A, Bjorlin S, Piprek J, et al. Long-wavelength vertical-cavity lasers and amplifiers. *IEEE J Sel Topics Quantum Electron*, 2000, 6(6): 1244
- [6] Supper D, Steinle G, Ilzhöfer M, et al. Hybrid  $1285\text{nm}$  GaInNAs VCSELs with  $1.2\text{mW}$  singlemode output power at  $85^\circ\text{C}$ . *Semicond Sci Technol*, 2006, 21: 1464
- [7] Anan T, Yamada M, Nishi K, et al. Continuous-wave operation of  $1.30\mu\text{m}$  GaAsSb/GaAs VCSELs. *Electron Lett*, 2001, 37(9): 566
- [8] Ledentsov N, Bimberg D, Ustinov V M, et al. Quantum dots for VCSEL applications at  $\lambda = 1.3\mu\text{m}$ . *Physica E*, 2002, 13: 871
- [9] Feezell D, Buell D A, Coldren L A. InP-based  $1.3\sim 1.6\mu\text{m}$  VCSELs with selectively etched tunnel-junction apertures on a wavelength flexible platform. *IEEE Photon Technol Lett*, 2005, 17(10): 2017
- [10] Jayaraman V, Mehta M, Jackson A W, et al. High-power  $1320\text{nm}$  wafer-bonded VCSELs with tunnel junctions. *IEEE Photon Technol Lett*, 2003, 15(11): 1495
- [11] Margalit N M, Babic D I, Streubel K, et al. Submilliamp long wavelength vertical cavity lasers. *Electron Lett*, 1996, 32(18): 1675
- [12] Nishiyama N, Caneau C, Hall B, et al. Long-wavelength vertical-cavity surface-emitting lasers on InP with lattice matched AlGaInAs-InP DBR grown by MOCVD. *IEEE J Sel Topics Quantum Electron*, 2005, 11(5): 990
- [13] Piprek J, Akulova Y A, Babic D I, et al. Minimum temperature sensitivity of  $1.55\mu\text{m}$  vertical-cavity lasers at  $-30\text{nm}$  gain offset. *Appl Phys Lett*, 1998, 72(15): 1814
- [14] Takagi H, Maeda R, Chung T R, et al. Effect of surface roughness on room-temperature wafer bonding by Ar beam surface activation. *Jpn J Appl Phys*, 1998, 37(7): 4197
- [15] Chand N, Chu S N G. Origin and improvement of interface roughness in AlGaAs/GaAs heterostructures grown by molecular beam epitaxy. *Appl Phys Lett*, 1990, 57(17): 1796
- [16] Liao Z L, Mull D E. Wafer fusion: A novel technique for optoelectronic device fabrication and monolithic integration. *Appl Phys Lett*, 1990, 56(8): 737
- [17] Lao Yanfeng, Wu Huizhen, Huang Zhanchao. Luminescent properties of annealed and directly wafer-bonded InAsP/InGaAsP multiple quantum wells. *Semicond Sci Technol*, 2005, 20: 615
- [18] Lao Yanfeng. Design and fabrication of  $1310\text{nm}$  vertical-cavity surface-emitting lasers. PhD Dissertation, 2007, Chapter 5 (in Chinese) [劳燕锋.  $1310\text{nm}$  垂直腔面发射激光器设计与研制. 博士论文, 2007, 第五章]
- [19] Sundgren P, von Wurtemberg R M, Berggren J, et al. High-performance  $1.3\mu\text{m}$  InGaAs vertical cavity surface emitting lasers. *Electron Lett*, 2003, 39(15): 1128
- [20] Hall E, Almuneau G, Kim J K, et al. Electrically-pumped, single-epitaxial VCSELs at  $1.55\mu\text{m}$  with Sb-based mirrors. *Electron Lett*, 1999, 35(16): 1337
- [21] Babic D I, Streubel K, Mirin R P, et al. Room-temperature continuous-wave operation of  $1.54\mu\text{m}$  vertical-cavity lasers. *IEEE Photon Technol Lett*, 1995, 7(11): 1225
- [22] Babic D I, Dudley J J, Streubel K, et al. Optically pumped all-epitaxial wafer-fused  $1.52\mu\text{m}$  vertical-cavity lasers. *Electron Lett*, 1994, 30(9): 704
- [23] Morozov V N, Neff J A, Zhou H J. Analysis of vertical-cavity surface-emitting laser multimode behavior. *IEEE J Quantum Electron*, 1997, 33(6): 980

## Fabrication of InAsP/InGaAsP Quantum-Well 1.3 $\mu\text{m}$ VCSELs by Direct Wafer-Bonding\*

Lao Yanfeng<sup>†</sup>, Cao Chunfang, Wu Huizhen, Cao Meng, Liu Cheng, Xie Zhengsheng, and Gong Qian

(State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

**Abstract:** We designed and fabricated a vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) that consisted of an InP-based active layer with InAsP/InGaAsP strain-compensated multi-quantum wells, SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> dielectric film, and GaAs/AlAs semiconductor distributed Bragg reflectors (DBRs). The InP-based active layers and GaAs-based DBRs were integrated using wafer-direct bonding techniques. Then, devices were successfully fabricated upon related device processing such as current-aperture definition using wet-etching undercut techniques and deposition of dielectric DBR, etc. The threshold current of the VCSEL is 13.5 mA and the wavelength of the single mode is 1288.6 nm.

**Key words:** vertical-cavity surface-emitting laser; wafer-direct bonding; tunnel junction

**PACC:** 7280E; 4280S; 8115N

**Article ID:** 0253-4177(2008)11-2286-06

---

\* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (No.2003CB314903)

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: lyfls@hotmail.com

Received 26 April 2008, revised manuscript received 10 June 2008

©2008 Chinese Institute of Electronics