

文章编号: 1000-7032(2020)01-0048-07

光电耦合对 InGaN/GaN 量子阱光学性能的影响

陈 澜¹, 吴瑾照¹, 龙 浩¹, 史晓玲¹, 应磊莹¹, 郑志威¹, 丘志仁², 张保平^{1*}

(1. 厦门大学电子科学与技术学院微纳光电子研究室, 福建 厦门 361005;

2. 中山大学物理学院 光电材料与技术国家重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要: 围绕高性能 GaN 基垂直腔面发射激光器 (VCSELs), 设计了两种具有不同光电耦合强度的 InGaN/GaN 量子阱 (QWs) 样品, 研究了它们的光学性质。样品 A 在腔模的两个波腹处各放置两个 InGaN 耦合量子阱, 而样品 B 在腔模的一个波腹处放置 5 个 InGaN 耦合量子阱。计算表明样品 A 具有较大的相对光限制因子 1.79, 而样品 B 为 1.47。光学测试发现样品 A 有着更高的内量子效率 (IQE) 和更高的辐射复合效率。使用两种样品制作了光泵 VCSEL 结构, 在光激发下实现激射, 其中基于样品 A 的 VCSEL 有着更低的激射阈值。结果表明有源区结构会显著影响量子阱与光场的耦合作用、外延片的内量子效率、辐射复合寿命和 VCSEL 激射阈值, 同时也说明样品 A 的有源区结构更有利于制作低阈值的 VCSEL 器件。

关 键 词: 有源区; 相对光限制因子; 内量子效率; 复合寿命; 垂直腔面发射激光器

中图分类号: O472.3

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fjxb20204101.0048

Influence of Photo-electron Coupling on Optical Properties of InGaN/GaN Quantum Wells

CHEN Lan¹, WU Jin-zhao¹, LONG Hao¹, SHI Xiao-ling¹, YING Lei-ying¹,ZHENG Zhi-wei¹, QIU Zhi-ren², ZHANG Bao-ping^{1*}

(1. Laboratory of Micro/Nano-Optoelectronics, School of Electronic Science and Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, School of Physics, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

* Corresponding Author, E-mail: bzhang@xmu.edu.cn

Abstract: Toward high performance GaN-based vertical cavity surface emitting lasers (VCSELs), we designed two types of InGaN/GaN coupled quantum wells (QWs) with different photo-electron interaction strengths, and studied their optical properties. In sample A, two sets of QWs are located at two antinodes of the optical field with two coupled QWs in each set. While in sample B, one set of QWs is located at one antinode of the optical field with five coupled QWs. The relative optical confinement factors are calculated to be 1.79 and 1.47 for samples A and B, respectively. Optical measurements revealed that sample A has higher internal quantum efficiency (IQE) and higher radiative recombination efficiency. VCSELs fabricated by using sample A are featured with lower threshold pumping energy compared with the device fabricated from sample B. These results demonstrated that the structure of QWs will influence the photo-electron interaction, the IQE, the radiative efficiency of materials, and the threshold of VCSELs. In our case, structure of sample A is better than sample B.

Key words: active region; relative optical confinement factor; internal quantum efficiency; recombination lifetime; vertical cavity surface emitting laser

收稿日期: 2019-09-22; 修订日期: 2019-10-25

基金项目: 科学挑战专题 (TZ2016003); 国家自然科学基金 (U1505253, 11474365) 资助项目

Supported by Science Challenge Project (TZ2016003); National Natural Science Foundation of China (U150523, 11474365)

1 引 言

GaN 基垂直腔面发射激光器 (VCSELs) 具有发光范围覆盖整个可见光波段、激射阈值低以及圆形输出光束等优点, 在高分辨率显示、激光打印、光学存储和塑料通信等方面具有更广阔的应用前景。至今, 已经报道了 GaN 基光泵 VCSEL 器件^[1-5]和电泵 VCSEL 器件^[6-8]的激射, 但是其性能有待进一步提高, 材料和器件结构也需要继续优化。其中激射阈值作为衡量 VCSEL 器件性能的一个重要参数, 受到腔内损耗、谐振腔长、DBR 的性能以及有源区与光场的耦合等因素影响。一些研究团队通过改变 DBR 的结构降低 VCSEL 的阈值。2003 年, Park 等使用曲面 DBR 制作的长腔长 GaN 基 VCSEL 的激射阈值为 $160 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2[9]}$; 2015 年, Lee 等使用高折射率差的纳米孔 DBR 将 GaN 基 VCSEL 的阈值降为 $7 \sim 8 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2[10]}$; 2019 年, Mishkat-UI-Masabih 等同样使用了纳米孔结构的 DBR, 将非极性 GaN 基 VCSEL 的阈值进一步降为 $5 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2[11]}$, 激射阈值改变了 2 个数量级。也有一些研究团队通过改变 DBR 的材料来降低 VCSEL 的激射阈值。2016 年, Liu 等使用电导 n 型 DBR 制作了阈值为 $1.64 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的 GaN 基 VCSEL^[12]; 2019 年, Park 等使用 airgap/AlGaIn DBR 制作了阈值更低的光泵 VCSEL, 对应的阈值为 $270 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2[13]}$ 。除了上述在 DBR 方面的工作外, 2018 年, 本研究团队曾尝试通过改变腔长制作出低阈值的 GaN 基光泵 VCSEL, 测得的激射阈值为 $20.65 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2[14]}$ 。

另一方面, 有源区结构作为 VCSEL 的重要组成部分, 直接决定了产生受激辐射的条件, 对于激射阈值的影响是不容忽视的。然而, 至今对其研究还不充分。本课题组曾经研究了平板谐振腔中的光损耗, 发现与普通 LED 中的非耦合量子阱相比较, 采用耦合 InGaN/GaN 量子阱结构可以大幅度降低光损耗, 因此预计将有利于降低激射阈值^[15]。在此基础上, 本文通过改变量子阱的分布结构, 研究了量子阱与光场相互作用或光电耦合对量子阱光学性能和 VCSEL 阈值的影响。本文还对改变有源区结构后激射阈值的变化进行了研究与讨论。

2 材料设计与 VCSEL 器件制备

本文研究的两个外延片样品 A 和 B 的有源

区结构都是由 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}/\text{GaN}$ (阱宽为 3 nm, 垒宽为 5 nm) 量子阱组成, 主要区别在于样品 A 是先生长两个耦合量子阱之后生长一层 GaN 插入层, 插入层的厚度依据波长 λ 值设定 (约为 $\lambda/2$), 然后再生长两个耦合量子阱; 样品 B 则是连续生长了 5 个耦合量子阱。为了方便进行比较, 两个外延片样品其他部分的结构保持相同, 设定发光波长为 420 nm。两个外延片都是在蓝宝石衬底上利用成熟的 MOCVD 技术生长, 包括成核层、u-GaN 层、n-GaN 层、InGaIn/GaN 量子阱结构、p-AlGaIn 电子阻挡层、p-GaN 层和 $\text{p}^+ \text{-InGaIn}$ 层。考虑到驻波场分布特性, 样品表面处光场强度为 0, 而量子阱处于光场 (与电场的平方成正比) 最大值, 以此设计 p 型层的厚度。另外, 设计样品 A 的 GaN 插入层的厚度使得两组耦合量子阱同时处于光场分布的最大值处。两个样品对应的结构和光场分布如图 1 所示。

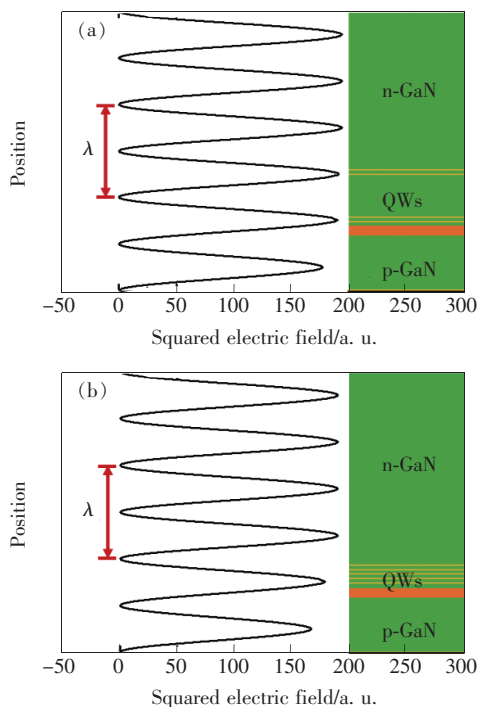


图 1 样品 A(a) 和 B(b) 的外延片结构和模拟的光场分布
Fig. 1 Epitaxy wafer structure of samples A(a) and B(b) and modified optical field (squared electric field) in design of devices

利用样品 A 和样品 B 制作的 VCSEL 器件结构如图 2 所示。将外延片制成 VCSEL 器件时, 先在外延材料表面蒸镀 12.5 对 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 下 DBR, 再用光敏胶将其粘在石英片上, 使用激光剥离技术 (LLO) 剥离掉蓝宝石衬底, 接着利用研磨和抛

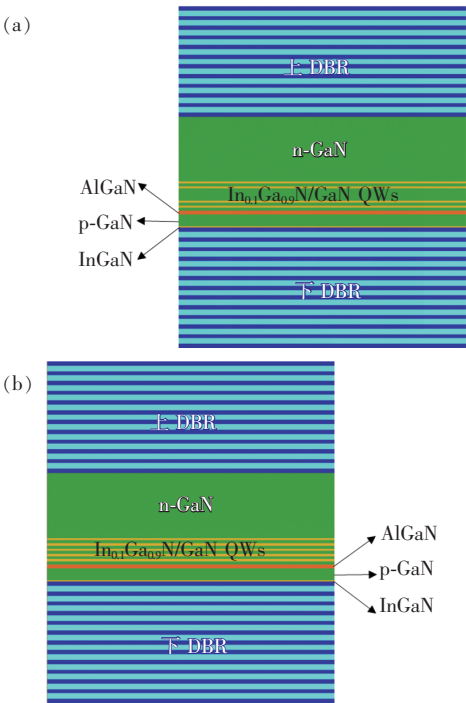


图2 样品 A(a) 和 B(b)制作的 VCSEL 器件结构图
Fig. 2 Structures of VCSEL devices fabricated by using samples A(a) and B(b)

光技术磨去部分 n-GaN,待腔长达到 6λ 后在 n-GaN 层表面蒸镀 10.5 对 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 上 DBR。VCSEL 器件的谐振腔由 n-GaN 层、InGaIn/GaN 量子阱、AlGaIn 层 (20 nm)、p-GaN 层 (97 nm) 和 InGaIn 层 (3 nm) 组成。为了增强 VCSEL 器件中有源区与光场的耦合作用,将样品 A 有源区中的两组耦合量子阱分别放置在谐振腔内的两个波腹处,每个量子阱都与光场有着较强的耦合;而样品 B 有源区中的 5 个耦合量子阱位于谐振腔内的同一个波腹上,中心处的量子阱与光场耦合最强,分布在两边的量子阱离中心量子阱越远,与光场的耦合越弱。为了研究两种结构中量子阱与谐振腔内光场的耦合作用,计算了两个 VCSEL 器件的相对光限制因子,它描述了谐振腔内分布的光场在有源区中的受限程度,等于有源区中的光能量与激光器谐振腔中的总能量之比。相对光限制因子的计算公式如下^[16]:

$$\Gamma_r = \frac{L}{d_a} \frac{\int_{d_a} |E(z)|^2 dx}{\int_L |E(z)|^2 dx}, \quad (1)$$

其中, $E(z)$ 表示光场分布中的驻波模式, d_a 表示有源区厚度, L 表示腔长。计算得到的两个 VC-

SEL 器件的相对光限制因子如表 1 所示。样品 A 对应的 VCSEL 的相对光限制因子大于样品 B 对应的 VCSEL,说明样品 A 的有源区结构更有利于增强有源区与谐振腔内光场的耦合作用。有源区与光场的耦合作用越强,越有利于激光的产生,对于减小 VCSEL 的激射阈值是非常有利的。

表 1 样品 A 和样品 B 的相对光限制因子

Tab. 1 Confinement factor of sample A and sample B

样品	限制因子 (Γ_r)
A	1.79
B	1.47

3 外延片测量结果和讨论

3.1 光致发光 (PL) 随温度的变化

为了比较两个外延片样品的发光特性,我们进行了变温光致发光测试,使用的激发源是 325 nm He-Cd 连续激光器,冷却装置是 He 循环低温控制机。测得不同温度下两个样品的 PL 谱如图 3 所示。低温下在样品 A 的 PL 谱中观察到两个发光峰,经过计算可知,位于 413 nm 附近的发光

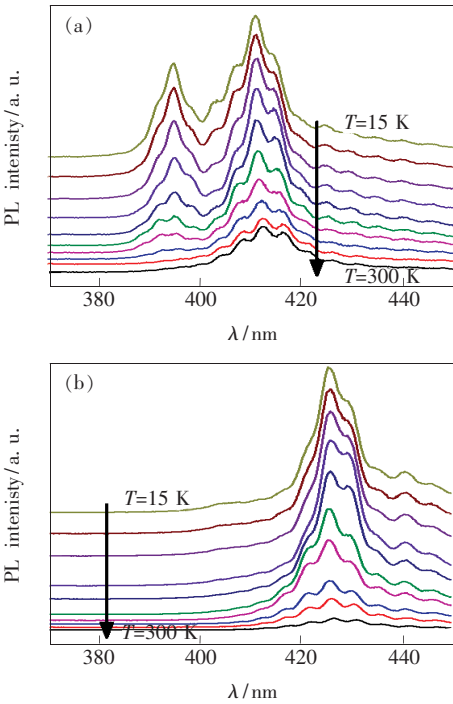


图3 15 ~ 300 K 温度范围内样品 A(a) 和样品 B(b)的变温 PL 谱图
Fig. 3 Temperature-dependent PL spectra of sample A(a) and sample B(b) over the temperature ranging from 15 K to 300 K

峰来自于量子阱中电子基态和空穴基态之间的跃迁;位于 394 nm 附近的发光峰涉及到高能态跃迁,温度升高时这个峰会逐渐消失。而样品 B 的 PL 谱中只有一个发光峰,位于 426 nm 处,该峰来自于基态之间的跃迁。

根据以上测试结果可以求出两种有源区结构的外延片样品的内量子效率(IQE),内量子效率是有源区每秒产生的光子数与每秒注入有源区的电子空穴对数之比,与发光效率成正比。通常使用室温和低温下发光强度的比值计算外延片的内量子效率 η ^[17-18]:

$$\eta = \frac{I_{300\text{ K}}}{I_{15\text{ K}}}, \quad (2)$$

得到两个外延片样品的内量子效率如表 2 所示,样品 A 的内量子效率远大于样品 B。

表 2 样品 A 和样品 B 根据变温光致发光光谱计算得到的内量子效率。

Tab. 2 Internal quantum efficiency of sample A and sample B calculated by temperature-dependent photoluminescence spectrum

样品	内量子效率 (IQE)
A	0.28
B	0.12

3.2 时间分辨光致发光测量

为了进一步研究两种结构的辐射复合特性,我们将 Nd: YAG 皮秒脉冲激光器 (355 nm, 10 Hz) 作为激发源测量了样品的时间分辨光致发光特性,测得发光强度随时间变化的衰减曲线如图 4 所示。使用单指数模型分别对衰减曲线的前半部分和后半部分进行拟合,得到的拟合参数如表 3 所示, τ_{initial} 表示前半部分的复合寿命, τ_{final} 表示后半部分的复合寿命。由 τ_{initial} 和 τ_{final} 可以求得辐射复合寿命 τ_r 和非辐射复合寿命 τ_{nr} ^[19-20]:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{nr}} &= 2\tau_{\text{final}} \\ \tau_r &= \frac{2\tau_{\text{initial}} \cdot \tau_{\text{final}}}{\tau_{\text{final}} - \tau_{\text{initial}}}, \end{aligned} \quad (3)$$

该计算方法曾经被美国弗吉尼亚联邦大学电气与计算机工程系的一个课题组采用,计算了不同有源层厚度的双异质结 InGaN 基 LED 的辐射复合寿命和非辐射复合寿命,用于研究改变有源层厚度对双异质结 LED 的影响^[21]。西安交通大学的电子物理与器件教育部重点实验室也曾采用这个方法计算蓝光和绿光 InGaN/GaN 多量子阱 LED

的载流子寿命,用于分析不同 In 组分和缺陷密度对发光特性的影响^[22]。

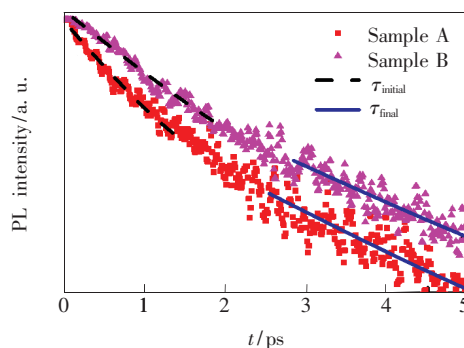


图 4 样品 A 和样品 B 的时间分辨光致发光光谱及拟合曲线

Fig. 4 Time-resolved photoluminescence spectra and fitting curves of sample A and sample B

我们用该方法分析得到两个样品的寿命数据如表 3 所示。可以看到,样品 A 和样品 B 的非辐射复合寿命基本相同,说明两者的晶体质量差别不大,也就是说两个样品中的点缺陷和位错密度没有明显差别,这得益于比较成熟的 MOCVD 结晶生长技术;而样品 A 的辐射复合寿命约是样品 B 的一半,说明样品 A 的辐射复合效率要比样品 B 高,约两倍程度。样品 A 的辐射复合寿命小于非辐射复合寿命,说明样品 A 的辐射复合占据主要地位;而样品 B 则以非辐射复合为主。

表 3 对时间分辨光致发光谱进行拟合后计算得到样品 A 和样品 B 的复合寿命

Tab. 3 Calculation of recombination lifetime of sample A and sample B according to fitting result of time-resolved photoluminescence spectrum

样品	$\tau_{\text{initial}}/\text{ns}$	$\tau_{\text{final}}/\text{ns}$	τ_r/ns	$\tau_{\text{nr}}/\text{ns}$
A	0.53	1.22	1.87	2.44
B	0.80	1.36	3.89	2.72

内量子效率的测量结果和时间分辨实验结果表明样品 A 具有较大的辐射复合效率和内量子效率;时间分辨结果还表明样品 A 的辐射复合效率高于非辐射复合效率,样品 B 的辐射复合效率低于非辐射复合效率;同时样品 A 和样品 B 的晶体质量没有明显差别。这些结果表明样品 A 的量子阱结构对于提高材料的辐射复合效率和内量子效率起到了决定性作用。换言之,样品 A 的较大的光电耦合强度对于提高样品的发光性能发挥了重要作用。虽然上述分析中两个样品还没有人

为地附加上谐振腔结构,但是材料的发光也会受到谐振效应的影响。谐振效应与光的反射密不可分,而外延材料的折射率与界面处反射率之间的关系为:

$$R = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2}, \tag{4}$$

其中 n_1 和 n_2 分别表示相邻两种材料的折射率。样品中各材料层的折射率如表 4 所示。外延片的表面不仅光滑,表层的 InGaN 材料与空气还有较大的折射率差,这使得外延表面具有较大的光反射率,约为 20.84%;另外一个具有较大反射率的反射面是 GaN-蓝宝石界面,光反射率约为 2.96%。这两个反射面构成了谐振腔的两个反射镜。在图 3 所示的发光谱中有很多规则排列的小峰,就是这个谐振腔造成的多重反射和干涉的结果。这种干涉现象也在他人的研究中多次观测并报道^[23-24]。

表 4 样品中各材料层的折射率

Tab. 3 Refractive indices of each layer in the samples

材料	折射率
InGaN	2.68
GaN	2.52
AlGaN	2.33
蓝宝石	1.78

4 VCSEL 测试结果

将外延片样品 A 和 B 制成结构如图 2 所示

的 VCSEL 器件之后,我们使用德国 CryLas 公司 FTSS355-Q1 型号的半导体激光器(355 nm, 20 kHz)作为激发源对 VCSEL 器件进行了光学测试,激发光的光斑直径约为 20 μm。图 5 为样品 A 制作的 VCSEL 器件的发光谱线和发光强度在不同泵浦能量下的变化图。从图 5(a)可以观察到,VCSEL 器件的激射峰位于 411.6 nm 处,线宽为 0.14 nm。图 5(b)中,样品 A 对应的 VCSEL 器件在激发光能量小于 2.02 nJ/pulse 时光强增加缓慢,超过 2.02 nJ/pulse 后光强迅速增加,这说明样品 A 制作的 VCSEL 实现室温激光发射,对应的激射阈值为 643 μJ · cm⁻²。

图 6 所示为样品 B 制作的 VCSEL 器件的发光谱线和发光强度在不同泵浦能量下的变化图。图 6(a)中,VCSEL 器件的激射峰位于 405.8 nm 处,线宽为 0.23 nm。观察图 6(b)可知,该 VCSEL 器件也实现了室温激光发射,在激发光能量达到 4.16 nJ/pulse 时出现激射现象,对应的激射阈值为 1.31 mJ · cm⁻²。经比较发现,样品 A 的阈值明显低于样品 B,前者为后者的 1/2。根据之前的讨论得知,样品 A 中有源区的相对光限制作用更强,样品 A 的内量子效率和辐射复合速率也更高。结合两个 VCSEL 器件的测试结果考虑,前述的影响因素都与 VCSEL 器件的阈值有关,同时也说明了样品 A 的有源区结构更有利于制作低阈值的 VCSEL 器件。

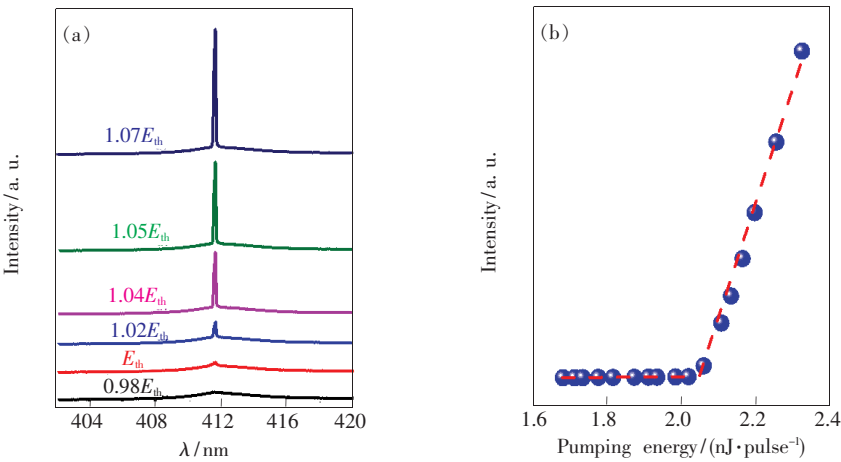


图 5 样品 A 制作的 VCSEL 器件在不同泵浦能量下的发光谱线(a)和发光强度(b)

Fig. 5 Photoluminescence spectra (a) and peak intensity (b) at different pumping energies for VCSEL fabricated by using sample A

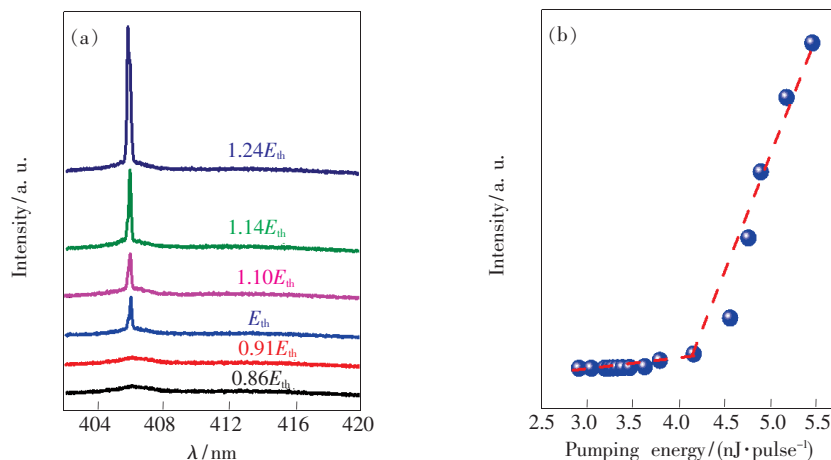


图 6 样品 B 制作的 VCSEL 器件在不同泵浦能量下的发光谱线(a)和发光强度(b)

Fig.6 Photoluminescence spectra(a) and peak intensity(b) at different pumping energies for VCSEL fabricated by using sample B

4 结 论

本文设计了两种具有不同光电耦合强度的 In-GaN/GaN 量子阱样品,样品 A 在腔模的两个波腹处各放置两个 InGaN 耦合量子阱,而样品 B 在腔模的

一个波腹处放置 5 个 InGaN 耦合量子阱。研究发现,样品 A 具有较大的光限制因子、更高的内量子效率和辐射复合效率。基于样品 A 的 VCSEL 有着更低的激射阈值。结果表明,样品 A 的有源区结构更有利于制作低阈值的 VCSEL 器件。

参 考 文 献:

- [1] SOMEYA T, WERNER R, FORCHEL A, *et al.*. Room temperature lasing at blue wavelengths in gallium nitride microcavities [J]. *Science*, 1999, 285(5435): 1905-1906.
- [2] SONG Y K, ZHOU H, DIAGNE M, *et al.*. A quasicontinuous wave, optically pumped violet vertical cavity surface emitting laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, 76(13): 1662-1664.
- [3] TAWARA T, Gotoh H, AKASAKA T, *et al.*. Low-threshold lasing of InGa_N vertical-cavity surface-emitting lasers with dielectric distributed Bragg reflectors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 83(5): 830-832.
- [4] KAO C C, PENG Y C, YAO H H, *et al.*. Fabrication and performance of blue GaN-based vertical-cavity surface emitting laser employing AlN/GaN and Ta₂O₅/SiO₂ distributed Bragg reflector [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 87(8): 081105-1-3.
- [5] CAI L E, ZHANG J Y, ZHANG B P, *et al.*. Blue-green optically pumped GaN-based vertical cavity surface emitting laser [J]. *Electron. Lett.*, 2008, 44(16): 972-974.
- [6] LU T C, KAO C C, KUO H C, *et al.*. CW lasing of current injection blue GaN-based vertical cavity surface emitting laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 92(14): 141102-1-3.
- [7] LU T C, CHEN S W, WU T T, *et al.*. Continuous wave operation of current injected GaN vertical cavity surface emitting lasers at room temperature [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 97(7): 071114-1-3.
- [8] YE H P S, CHANG C C, CHEN Y T, *et al.*. GaN-based vertical-cavity surface emitting lasers with sub-milliamper threshold and small divergence angle [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2016, 109(24): 241103.
- [9] PARK S H, KIM J, JEON H, *et al.*. Room-temperature GaN vertical-cavity surface-emitting laser operation in an extended cavity scheme [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 83(11): 2121-2123.
- [10] LEE S M, GONG S H, KANG J H, *et al.*. Optically pumped GaN vertical cavity surface emitting laser with high index-contrast nanoporous distributed Bragg reflector [J]. *Opt. Express*, 2015, 23(9): 11023-11030.
- [11] MISHKAT-UL-MASABIH S M, LUK T S, MONAVARIAN M, *et al.*. Polarization-pinned emission of a continuous-wave optically pumped nonpolar GaN-based VCSEL using nanoporous distributed Bragg reflectors [J]. *Opt. Express*, 2019, 27(7): 9495-9501.
- [12] LIU Y S, HAQ A F M S, MEHTA K, *et al.*. Optically pumped vertical-cavity surface-emitting laser at 374.9 nm with an

- electrically conducting n-type distributed Bragg reflector [J]. *Appl. Phys. Express*, 2016,9(11):111002.
- [13] PARK Y J, DETCHPROHM T, MEHTA K, *et al.*. Optically pumped vertical-cavity surface-emitting lasers at 375 nm with air-gap/ $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ distributed Bragg reflectors [C]. *Proceedings of SPIE 10938, Vertical-Cavity Surface-emitting Lasers XXIII*, San Francisco, California, United States, 2019:109380A.
- [14] WU J Z, LONG H, SHI X L, *et al.*. Reduction of lasing threshold of GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers by using short cavity lengths [J]. *IEEE Trans. Electron Dev.*, 2018,65(6):2504-2508.
- [15] YING L Y, HU X L, LIU W J, *et al.*. Control of optical loss in GaN-based planar cavities [J]. *Superlattices Microstruct.*, 2015, 88:561-566.
- [16] MICHALZIK R. VCSEL fundamentals [M]. MICHALZIK R. *VCSELs: Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers*. Berlin:Springer, 2013:19-75.
- [17] LI P P, LI H J, LI Z, *et al.*. Strong carrier localization effect in carrier dynamics of 585 μm InGaN amber light-emitting diodes [J]. *J. Appl. Phys.*, 2015,117(7):073101.
- [18] CAN N, OKUR S, MONAVARIAN M, *et al.*. Active region dimensionality and quantum efficiencies of InGaN LEDs from temperature dependent photoluminescence transients [C]. *Proceedings of SPIE 9363, Gallium Nitride Materials and Devices X*, San Francisco, California, United States, 2015:93632U.
- [19] KIM H, SHIN D S, RYU H Y, *et al.*. Analysis of time-resolved photoluminescence of InGaN quantum wells using the carrier rate equation [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2010,49(11R):112402.
- [20] SHIM J I, KIM H, SHIN D S, *et al.*. An efficiency droop model of the saturated radiative recombination rate and its verification by radiative and nonradiative carrier lifetime measurements in InGaN-based light emitting diodes [C]. *Proceedings of SPIE 7939, Gallium Nitride Materials and Devices VI*, San Francisco, California, United States, 2011:79391A.
- [21] LI X, OKUR S, ZHANG F, *et al.*. Impact of active layer design on InGaN radiative recombination coefficient and LED performance [J]. *J. Appl. Phys.*, 2012,111(6):063112-1-8.
- [22] LI Q, WANG S, GONG Z N, *et al.*. Time-resolved photoluminescence studies of InGaN/GaN multi-quantum-wells blue and green light-emitting diodes at room temperature [J]. *Optik*, 2016,127(4):1809-1813.
- [23] HUMS C, FINGER T, HEMPEL T, *et al.*. Fabry-Perot effects in InGaN/GaN heterostructures on Si-substrate [J]. *J. Appl. Phys.*, 2007,101(3):033113-1-4.
- [24] LIU H H, LIN T, WAN L Y, *et al.*. Modelling of microcavity effect in InGaN/GaN heterostructures for interfacial study [J]. *Mater. Res. Express*, 2018,5(8):086201.



陈澜(1995-),女,河南郑州人,硕士研究生,***年于***大学获得学士学位,主要从事 InGaN/GaN 量子阱激光器的研究。
E-mail: chenlan_1023@qq.com



张保平(1963-),男,河北石家庄人,博士,教授,***年于日本东京大学获得博士学位,主要从事宽禁带半导体材料与光电子器件、微纳米结构制造及应用的研究。
E-mail: bzhang@xmu.edu.cn