

文章编号: 1000-7032(2026)08-1479-13

载流子传输调控对 1.3 μm 垂直腔面发射激光器 微分增益的影响

郭晓勇¹, 贾 伟^{1,2}, 贾志刚^{1,2}, 孙 静¹, 尚 林³,
董海亮^{1,2*}, 许并社^{1,2,3}

(1. 太原理工大学 新材料界面科学与工程教育部重点实验室, 山西 太原 030024;

2. 山西浙大新材料与化工研究院, 山西 太原 030024;

3. 陕西科技大学 物理与信息科学学院, 陕西 西安 710021)

摘要: 利用 PICS 3D (Photonic integrated circuit simulator in 3D) 仿真软件设计了一种具有 InGaAs 过渡势垒和双氧化层结构 1.3 μm 垂直腔面发射激光器 (Vertical cavity surface emitting laser, VCSEL), 旨在提高有源区内部的载流子分布均匀性, 改善载流子的传输特性, 从而提高微分增益。结果表明, 随着 InGaAs 过渡势垒和双氧化层结构的引入, 器件的阈值电流逐渐减小, 斜率效率、输出功率和功率转换效率逐渐增大。InGaAs 过渡势垒提高了载流子注入, 使有源区内载流子分布更加均匀。同时, 在 n 侧插入氧化层形成双氧化结构, 进一步增强了载流子和光场的限制作用。对于氧化孔径为 7 μm 的新型 VCSEL, 其峰值转换效率可达 37.8%, 最大斜率效率为 0.923 $\text{W} \cdot \text{A}^{-1}$, 功率达到 9 mW。在注入电流为 10 mA 时, 新型 VCSEL 在 25 $^{\circ}\text{C}$ 和 85 $^{\circ}\text{C}$ 下的最大 3 dB 调制带宽为 19.8 GHz 和 16 GHz, 表现出良好的高速性能。新型 1.3 μm VCSEL 的理论设计为外延材料的制备提供了理论指导和数据支撑。

关键词: 垂直腔面发射激光器; 高速; 光互联; 小信号调制带宽; 微分增益

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260095

CSTR: 32170.14.CJL.20260095

Effect of Carrier Transport Modulation on Differential Gain of a 1.3 μm Vertical-cavity Surface-emitting Laser

GUO Xiaoyong¹, JIA Wei^{1,2}, JIA Zhigang^{1,2}, SUN Jing¹, SHANG Lin³,
DONG Hailiang^{1,2*}, XU Bingshe^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Interface Science and Engineering in Advanced Materials,

Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Shanxi-Zheda Institute of Advanced Materials and Chemical Engineering, Taiyuan 030024, China;

3. School of Physics & Information Science, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

* Corresponding Author, E-mail: dhltyut@163.com

Abstract: In this paper, the PICS 3D (Photonic integrated circuit simulator in 3D) simulation software was utilised to design a 1.3 μm vertical cavity surface-emitting laser (VCSEL) with an InGaAs transition barrier and a double oxide layer structure. The objective of this study was to enhance the uniformity of carrier distribution within the active region and to improve carrier transport characteristics, with the aim of increasing the differential gain. The results indicate that with

收稿日期: 2026-03-23; 修订日期: 2026-04-01

基金项目: 山西浙大新材料与化工研究院 (2022SX-TD018, 2022SX-AT001, 2021SX-AT001); 山西省自然科学基金 (202303021221046); 国家自然科学基金 (61904120, 21972103); 陕西省自然科学基金 (2023-JC-QN-0552); 山西省重点研发计划 (202302150101001); 山西省“1331 项目”

Supported by Shanxi-Zheda Institute of Advanced Materials and Chemical Engineering (2022SX-TD018, 2022SX-AT001, 2021SX-AT001); Natural Science Foundation of Shanxi Province (202303021221046); National Natural Science Foundation of China (61904120, 21972103); Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province of China (2023-JC-QN-0552); Key R&D Projects in Shanxi Province (202302150101001); Shanxi “1331 Project”

the introduction of the InGaAs transition barrier and the double-oxide layer structure, the device's threshold current gradually decreases, whilst the slope efficiency, output power and power conversion efficiency gradually increase. The InGaAs transition barrier has been shown to enhance carrier injection, resulting in a more uniform carrier distribution within the active region. Concurrently, the insertion of an oxide layer on the n-side to form a double-oxide structure further enhances the confinement of carriers and the optical field. For the novel VCSEL with an oxide aperture of 7 μm , the peak conversion efficiency reaches 37.8%, the maximum slope efficiency is $0.923 \text{ W} \cdot \text{A}^{-1}$, and the output power reaches 9 mW. At an injection current of 10 mA, the maximum 3 dB modulation bandwidth of the novel VCSEL at 25 °C and 85 °C is 19.8 GHz and 16 GHz, respectively, demonstrating excellent high-speed performance. The theoretical design of the new 1.3 μm VCSEL provides theoretical guidance and data support for the preparation of epitaxial materials.

Keywords: vertical-cavity surface-emitting laser; high speed; optical interconnect; small-signal modulation bandwidth; differential gain

1 引 言

随着第五代移动通信技术(5th generation mobile communication technology, 5G)的发展,通信系统正朝着高速率、大容量与低功耗的方向演进^[1]。为满足互联网、高清视频、云计算以及工业应用等领域对带宽日益增长的需求,光互连技术凭借其优异性能,在高速数据传输中的应用日益广泛^[2]。与边发射激光器相比,垂直腔面发射激光器(VCSEL)因谐振腔短而具有更高的弛豫振荡频率和调制带宽,并易于实现单纵模工作。同时,VCSEL还具有圆形光斑、小发散角、低阈值电流、高功率转换效率、低功耗、高温工作稳定性、高可靠性以及低成本^[3]等一系列优点,被国际公认为光纤通信领域中极具潜力的激光光源之一。

在近红外波段,1.2~1.3 μm 的VCSEL受到广泛关注。850 nm VCSEL虽常用于光纤通信^[4],但其传输距离在高速率下仍受限制,难以满足高速局域网的应用需求。相比之下,1.3 μm VCSEL凭借较低的衰减和色散特性,在光纤通信与并行光互联系统中展现出重要优势^[5]。为了提高VCSEL的调制带宽和比特率,关键在于优化VCSEL器件的微分增益^[6]。更高的微分增益会产生更高的谐振频率(在给定输出功率下),高的谐振频率有助于VCSEL器件在由阻尼限制和热限制引起的带宽峰值出现之前,实现更高的调制带宽^[7]。因此,提高微分增益成为研究焦点之一。例如,2009年,Chang等制备了基于980 nm的锥形氧化层高速VCSEL。通过将氧化层的厚度增加至半波长,同时缩短其锥形结构的长度,不仅增强了横向光学限制,还增大了器件的微分增益,最终

在10 mW输出功率下实现了超过20 GHz带宽与35 Gbps的数据传输速率^[8]。同年,Westbergh等制备了孔径为9 μm 的850 nm VCSEL。量子阱采用InGaAs替换GaAs提升了微分增益,还采用双氧化层结构来降低器件的寄生电容,从而在低电流密度下实现了20 GHz的调制带宽,分别在55 °C和85 °C完成了30 Gbps与25 Gbps的无误码传输^[9]。2013年,Yazdanypoor等系统研究了采用多层氧化层结构优化单模VCSEL的光输出功率,系统性分析了多个氧化层的位置和氧化孔径尺寸对器件性能的影响。结果表明,合理设计多层氧化层结构可以在保持单模特性的同时有效提高光输出功率,并降低阈值电流^[10]。2016年,Caliman等通过将InAlGaAs/InP量子阱中的应变提升至1.6%,并通过调整DBR的数量来减少腔光子寿命,利用1310 nm波长的晶片熔结VCSEL实现了超过25 Gbps的直接调制速率^[11]。此外,采用超晶格有源区是提高微分增益的另一有效途径。例如,Blokhin等利用分子束外延和双晶片融合技术,制造了具有基于InGaAs/InGaAlAs超晶格有源区的1.3 μm VCSEL,该器件在20 °C下实现了超过8 GHz的小信号调制带宽^[12]。2017年,Fuchs等设计了II型1.3 μm “W”量子阱结构,改善了器件在高温下的工作特性。II型量子阱结构根据改变量子阱和量子垒的对位情况,大幅度减少了器件在高温下载流子泄露问题,使其器件可以在高温工作环境下正常运行^[13]。2020年,Gebski等通过采用金属有机气相外延的方式生长InGaAsN量子阱有源区,研究了不同氧化孔径下VCSEL器件的输出特性。在氧化孔径为3 μm 的情况下,阈值电流低至1 mA,最大输出功率约0.8 mW,边模抑制

比超过 35 dB。在高速性能方面,在偏置电流为 5 mA 情况下,VCSEL 器件实现了 10 GHz 调制带宽和 12 Gbps 无误码数据传输速率^[14]。

近年来,在 1.3 μm 的 VCSEL 中,一般主要是两种材料体系,一种是 InP 体系,另一种是 GaAs 体系。对于 InP 体系,与 InP 晶格匹配的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 材料存在的明显短板是不同组分之间的折射率差太小,要达到 DBR 所需的反射性能,其结构材料通常需要几十甚至上百个周期,这对各外延层的厚度和组分均匀性都提出了极高的要求,因此对其 DBR 结构的制备工艺条件需深入研究^[15]。然而,对于 GaAs 体系,采用 InGaAsN/GaAs 作为有源区材料的优势在于其具有较大的导带有效质量,这有助于提高微分增益^[16]。同时,InGaAsN 与 GaAs 之间较大的导带差能形成较深的量子阱,从而可以有效限制载流子,这对于提升器件的高速性能至关重要。然而,这也会导致载流子在有源区内分布不均,形成聚集效应,从而阻碍载流子传输,降低其传输效率,并加剧了载流子之间的散射和消耗。这种传输受阻使得大量载流子局部堆积,无法被有效利用,从而显著增加非辐射复合几率,最终制约器件的微分增益和输出特性。区别于单纯通过增加应变来提升微分增益的常规思路,本文利用 PICS 3D 软件设计了一种集成 InGaAs 过渡势垒与 n 侧氧化层的新型 VCSEL 结构,旨在通过协同优化载流子输运与横向光场限制,从物理机制上抑制有源区内的载流子聚集效应。采用 InGaAs 作为过渡量子势垒能够使有源区内的载流子分布更趋均匀,从而降低非辐

射复合并减小阈值电流。引入 n 侧氧化层可以提高载流子注入效率,改善载流子的传输特性,提高器件输出功率。同时,其还有效提高器件有源区内部的电流密度,改善器件的微分增益,从而提高器件的调制性能^[17]。

2 外延结构与参数

本文设计的传统结构 VCSEL、InGaAs 作为过渡势垒结构 VCSEL 及其双氧化层结构 VCSEL,如图 1(a)~(c) 所示,且分别对应为 VCSEL-A、VCSEL-B 和 VCSEL-C。VCSEL-A 器件是在 GaAs 的衬底上放置了 500 nm 的 GaAs 缓冲层,接下来在缓冲层上设计了 37 对由 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ /GaAs 组成、掺杂浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 n 型布拉格反射镜(n-DBR)。采用 20 nm 厚的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 组分渐变层插入在 GaAs 高折射率层与 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 低折射率层之间,在保证高反射率的同时,可以有效降低 GaAs 高折射率层到 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 低折射率层的能带界面载流子损耗。在 n-DBR 上侧是器件的有源层,有源层包含两个 6 nm 的 $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}_{0.99}\text{N}_{0.01}$ 量子阱,三个 10 nm 的 GaAs 量子垒层,其两侧各设置 180 nm 的 $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ 空间层。在有源层的上方是 17 对由 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ /GaAs 组成,且掺杂浓度为 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 p-DBR,在靠近有源层的第一对 p-DBR 的 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 层中插入 30 nm 厚的 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 层,其外围设计为绝缘的 AlO_x ,这样可以使注入的电流限制在氧化孔径以内,减少了电流的扩散。最后,在 p-DBR 上面是 GaAs 帽层和欧姆接触层。

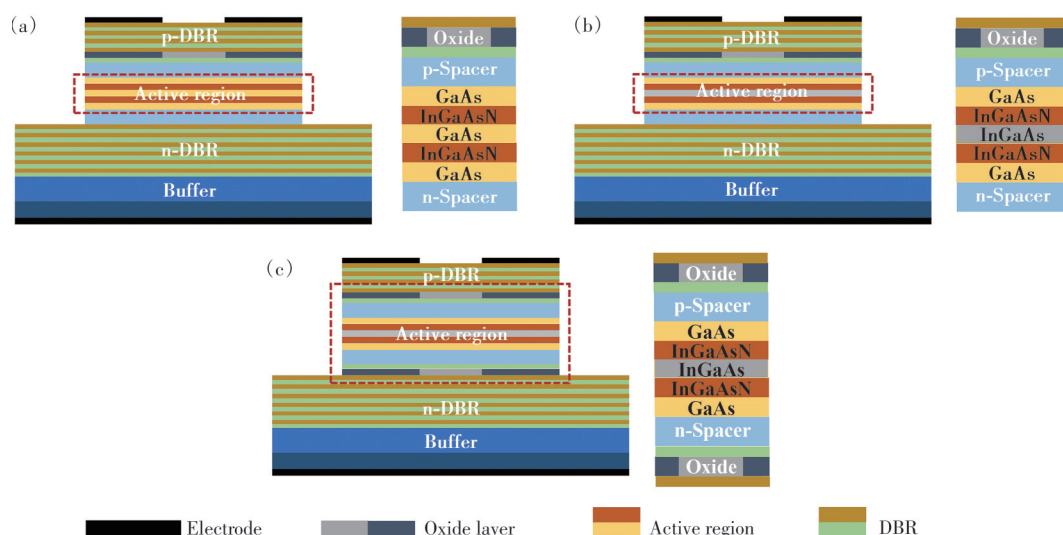


图1 VCSEL结构示意图。(a)基础结构;(b)InGaAs势垒结构;(c)双氧化层结构

Fig.1 Schematic diagram of VCSEL structure. (a) Basic structure. (b) Using InGaAs barrier structure. (c) Double oxide layer structure

VCSEL-B 是在 VCSEL-A 的基础上把位于最中间的量子垒替换成为 $\text{In}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{As}$, VCSEL-C 是在 VCSEL-B 的基础上在 n 侧(p 侧同样位置处)添加了一个氧化层,器件结构的具体参数如表 1 所示。

表 1 1.3 μm VCSEL 结构参数
Tab. 1 Structural parameters of 1.3 μm VCSEL

Layer	Cycles	Material	Thickness/nm	Doping/cm ⁻³
Cap		GaAs	5	$1.5\times10^{19}(\text{p})$
DBR _H	17	GaAs	72	$3\times10^{18}(\text{p})$
Gradient	17	$\text{Al}_{0.9-0}\text{Ga}_{0.1-1}\text{As}$	20	$3.5\times10^{18}(\text{p})$
DBR _L	17	$\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$	83	$3\times10^{18}(\text{p})$
Gradient	17	$\text{Al}_{0-0.9}\text{Ga}_{1-0.1}\text{As}$	20	$3.5\times10^{18}(\text{p})$
DBR _H		GaAs	72	$2\times10^{18}(\text{p})$
Gradient		$\text{Al}_{0.9-0}\text{Ga}_{0.1-1}\text{As}$	20	$3.5\times10^{18}(\text{p})$
Oxide		$\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$	30	$5\times10^{17}(\text{p})$
DBR _L		$\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$	83	$3\times10^{18}(\text{p})$
Spacer		$\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$	188	
QB		GaAs	10	
QW	2	$\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}_{0.99}\text{N}_{0.01}$	6	
QB	2	GaAs	10	
Spacer		$\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$	188	
DBR _L	37	$\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$	83	$2\times10^{18}(\text{n})$
Gradient	37	$\text{Al}_{0-0.9}\text{Ga}_{1-0.1}\text{As}$	20	$2.5\times10^{18}(\text{n})$
DBR _H	37	GaAs	72	$2\times10^{18}(\text{n})$
Buffer		GaAs	500	$2\times10^{18}(\text{n})$
Substrat		GaAs	250	$3\times10^{18}(\text{n})$

图 2 是器件的驻波折射率分布图。在设计过程中,为获得最大的光增益,将有源层放置在谐振腔的中心位置,使其与驻波的电场波腹完全对齐,以确保电子与空穴可以进行高效的辐射复合。氧

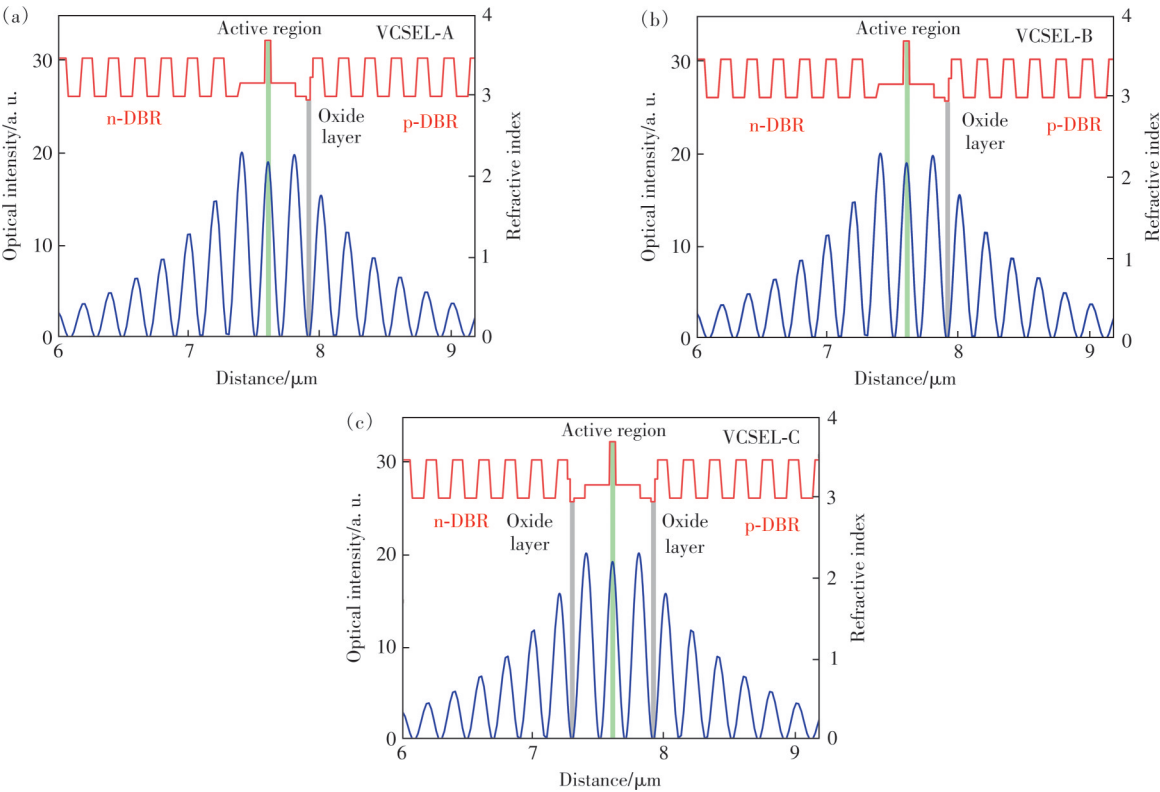


图 2 三个 VCSEL 的驻波折射率分布图。(a)VCSEL-A;(b)VCSEL-B;(c)VCSEL-C
Fig.2 Waveguide refractive index distribution diagrams of the three VCSELs. (a)VCSEL-A. (b)VCSEL-B. (c)VCSEL-C

化层放置在驻波电场的波节处,不仅可以减少氧化层的电流拥挤效应而且还可以减少芯层和包层之间的折射率差,从而形成弱折射率波导结构^[18]。为满足器件的高速性能要求,通常需要采用较短的谐振腔^[19]。因此,本研究将三个器件的有效腔长均设计为一个波长(1λ)。同时,为了保证器件稳定单模工作,把三个器件结构的氧化孔径都设置为 $7\ \mu\text{m}$ 。

3 结果与讨论

3.1 电学性能分析

为了讨论 InGaAs 作为过渡量子势垒和 n 侧添加氧化层对有源区能带结构的影响,图 3 展示了三个 VCSEL 有源区附近的能带图。图中黑线表示导带(E_c),粉色线和紫色线分别表示重空穴和轻空穴(E_v),绿色虚线表示电子(E_m)和空穴(E_{fp})的准费米能级。

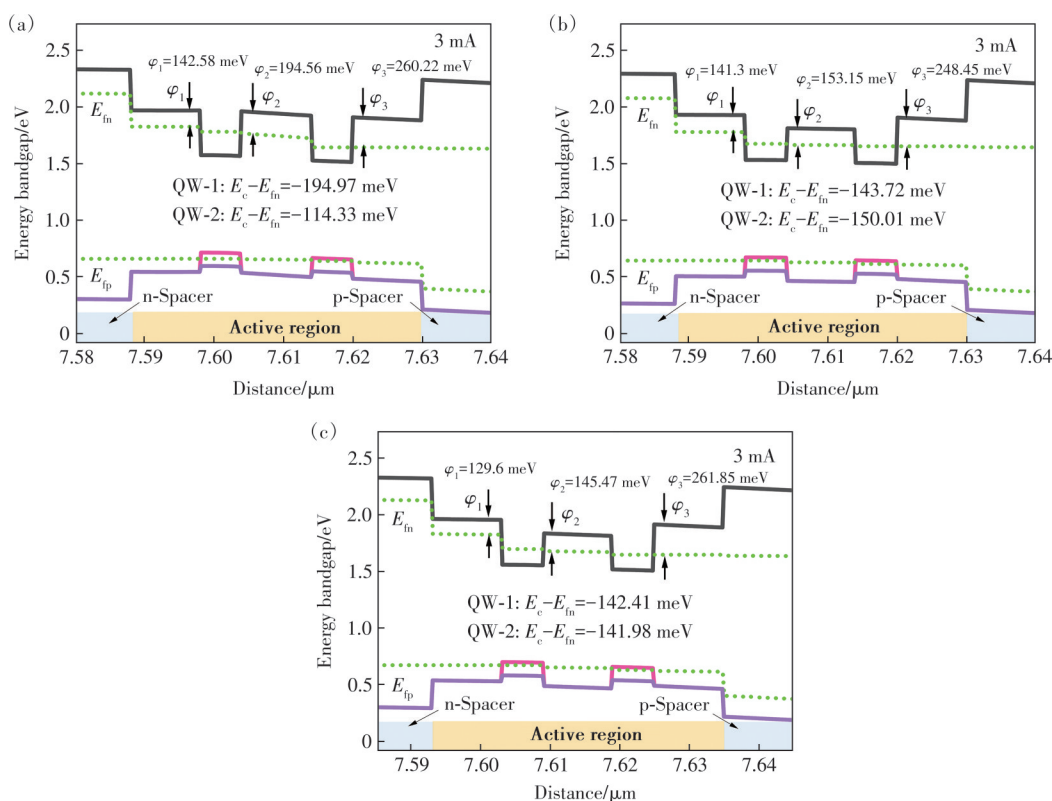


图3 在电流为3 mA时,不同VCSEL结构的能带图。(a)VCSEL-A;(b)VCSEL-B;(c)VCSEL-C

Fig.3 Band diagrams for different VCSEL structures at a current of 3 mA. (a)VCSEL-A. (b)VCSEL-B. (c)VCSEL-C

在三个图中同一位置分别计算了第一个量子阱的电子注入相对强度(φ_1)、第二个量子阱的电子注入相对强度(φ_2)以及最后的电子逃逸相对强度(φ_3),还分析了两个量子阱的 E_c 和 E_{fm} 之间的能量分离差值。第一个量子阱内的能量分离差值从 $-194.97\ \text{meV}$ 变化到最后的 $-142.41\ \text{meV}$,而第二个量子阱内的能量分离差值从 $-114.33\ \text{meV}$ 到最后的 $-141.98\ \text{meV}$,可以看出两个量子阱中 E_c 和 E_{fm} 之间的能量分离差值逐渐减小并最后达到趋于平均。这主要归因于采用 InGaAs 过渡势垒,它显著降低了两个量子阱的电子注入相对强度以及最后的逃逸相对强度。具体而言,InGaAs 过渡势垒的引入有效削减了电子从 n 侧注入量子阱所需跨越的有效能障,使得电子更容易进入两个量

子阱内。但采用 InGaAs 过渡势垒也会使电子更容易逃逸出有源区。为了解决这一问题,在 n 侧添加一层氧化层,其可以有效限制器件中的电流扩展,从而实现对载流子控制。相较于 VCSEL-A 与 VCSEL-B,VCSEL-C 不仅进一步降低了两个量子阱中电子的注入相对强度,还将电子的逃逸相对强度从 $248.45\ \text{meV}$ 提升至 $261.85\ \text{meV}$,从而更有效地抑制了电子泄漏。这使得电子能在有源区内更充分地复合产生光子,进而提高了光增益。

图 4 是三个器件结构的电学性能曲线。图 5 展示了三个 VCSEL 结构在注入电流为 $3\ \text{mA}$ 的受激辐射复合速率、非辐射复合速率、电子浓度以及空穴浓度。由图 4(a)中可以看出,在室温连续波条件下三种不同结构的 VCSEL 的阈值电流分别

为 0.35, 0.28, 0.25 mA, 阈值电流公式为:

$$I_{th} = \frac{eV_a}{\eta_a} (AN_{th} + BN_{th}^2 + CN_{th}^3), \quad (1)$$

其中, V_a 为有源区体积, A 、 B 和 C 分别为肖克利-里德-霍尔复合 (Shockley-Read-Hall Recombination, SRH) 复合、辐射复合和俄歇复合速率, η_a 为载流

子注入效率, N_{th} 为阈值载流子浓度。如图 5(b)~(d) 所示, VCSEL-B 和 VCSEL-C 的阈值电流降低, 主要是由于两个结构中的 SRH 复合和俄歇复合等非辐射复合过程得到了显著抑制。而非辐射复合降低主要是由于 InGaAs 过渡势垒的引入降低了电子进入下一个量子阱的相对强度, 使得电子

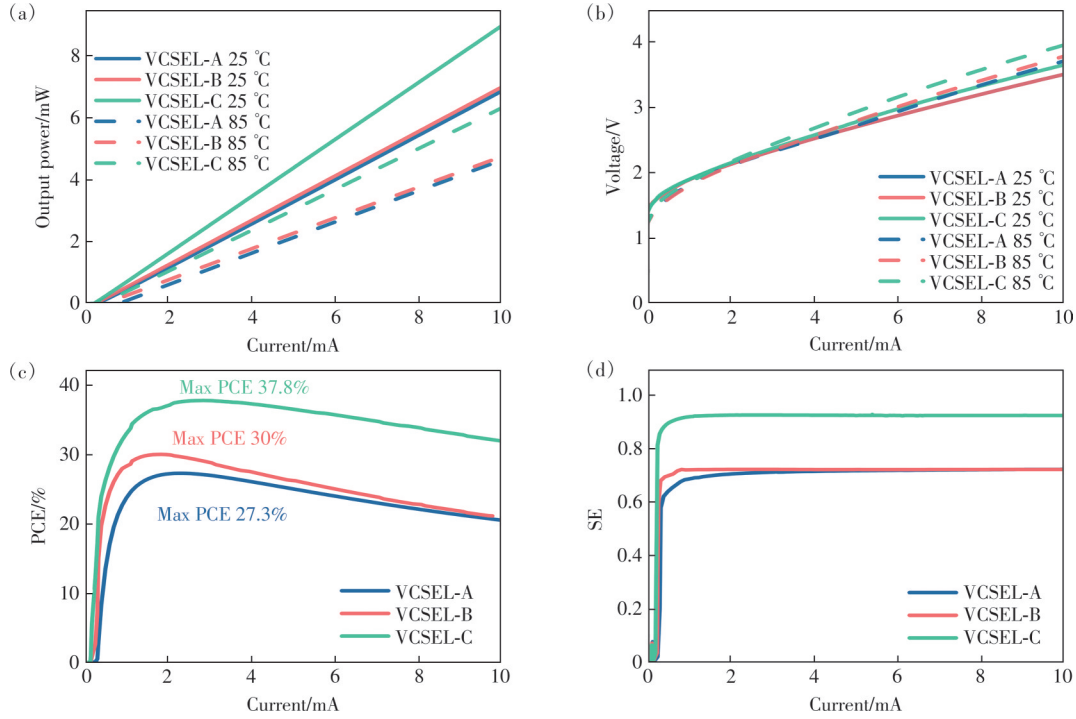


图 4 三个 VCSEL 结构的 (a) $L-I$ 曲线、(b) $V-I$ 曲线、(c) $PCE-I$ 曲线、(d) $SE-I$ 曲线

Fig.4 $L-I$ curves (a), $V-I$ curves (b), $PCE-I$ curves (c), $SE-I$ curves (d) of three VCSEL structures

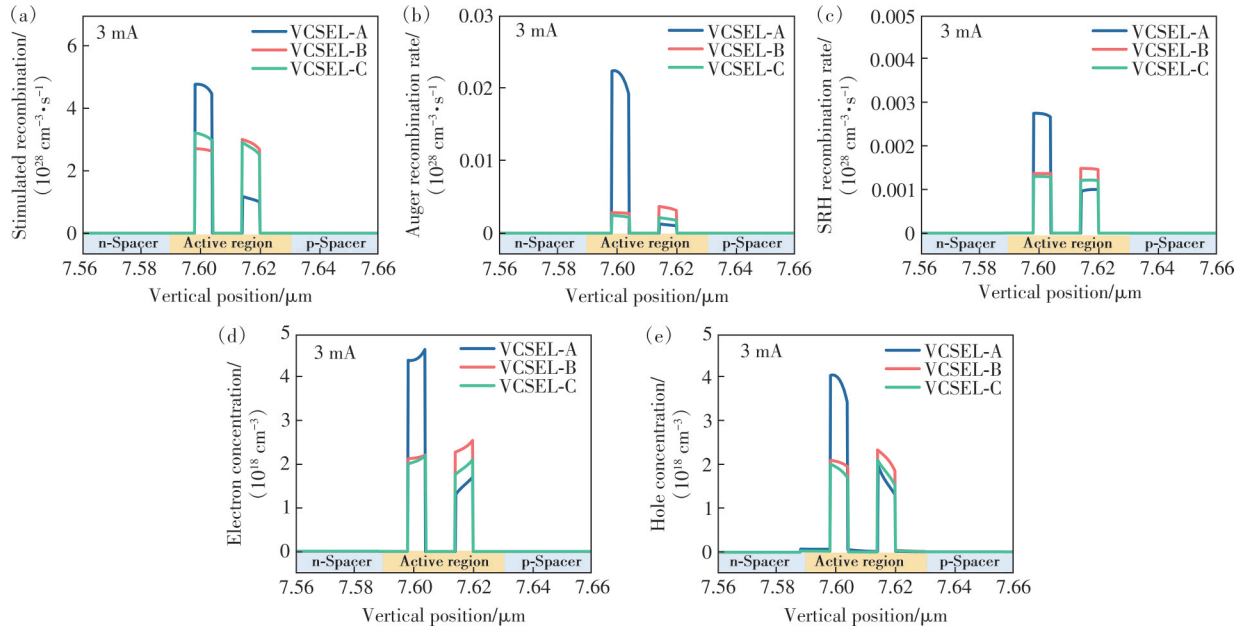


图 5 在电流为 3 mA 时, 氧化孔径为 7 μm VCSEL 的 (a) 受激辐射复合、(b) 俄歇复合、(c) SRH 复合、(d) 电子浓度、(e) 空穴浓度

Fig.5 At a current of 3 mA, for a VCSEL with an oxide aperture of 7 μm : (a) stimulated emission recombination, (b) Auger recombination, (c) SRH recombination, (d) electron concentration, (e) hole concentration

能够更加均匀地分布于两个量子阱中,从而改善了载流子的传输特性,使有源区内载流子浓度可以进一步地进行复合过程,进而使有源区内电子和空穴浓度降低。非辐射复合是与有源区载流子浓度成正比,随着有源区载流子浓度的下降,其非辐射复合也随之下降。在 VCSEL-C 的结构中,在 n 侧插入氧化层提高了载流子的注入效率,降低了阈值电流^[20]。当注入电流为 10 mA 时,三种结构 VCSEL 的输出功率分别为 6.92, 7, 8.98 mW。VCSEL-B 相较于 VCSEL-A,其功率提升并不显著。图 4(b)中展示了三种不同器件结构的电流电压曲线(I - V 曲线),由于三种器件结构的 DBR 和腔体结构都是固定一致的,只有有源区内部以及在 VCSEL-C 中 n 侧添加的氧化层等因素导致器件的电阻发生变化。对于 VCSEL-C 而言,在 n 侧添加氧化层以后,由于其部分被氧化而转化为 Al-O_x ,使得器件中的串联电阻有所增加,进而使得其电压略微增加^[21]。器件第一量子阱内部电子浓度下降与有源区载流子浓度平均化,共同抑制了非辐射复合并提高了输出功率,从而提升了功率转换

效率(Power conversion efficiency, PCE)。如图 4(c)所示,VCSEL-A、VCSEL-B 的最大 PCE 分别为 27.3% 和 30%,PCE 随着注入电流的增加而显著降低。对于 VCSEL-C 而言,其最大 PCE 为 37.8%,且在 6 mA 仍能达到 35%,在整个工作电流中 PCE 仍能保持在 32% 左右。这表明,VCSEL-C 在工作过程中可以保持一个较高的 PCE。如图 4(d)所示,VCSEL-A 和 VCSEL-B 的最大斜率效率(Slope efficiency, SE)分别为 $0.709 \text{ W} \cdot \text{A}^{-1}$ 和 $0.72 \text{ W} \cdot \text{A}^{-1}$,而 VCSEL-C 的 SE 为 $0.923 \text{ W} \cdot \text{A}^{-1}$,相比分别增长了 30.1% 和 28.1%。因此,采用 InGaAs 作为过渡势垒和在 n 侧添加氧化层可以有效地平均有源区内部的载流子浓度,降低非辐射复合速率。主要原因是 InGaAs 过渡势垒降低了电子注入相对强度,避免了单一量子阱内载流子的聚集问题,而 n 侧氧化层更进一步降低了载流子横向扩展问题,二者共同作用使得有源区内的载流子浓度均匀化,从而达到提高输出功率的目的。

图 6 展示了三种不同结构对应量子阱内的电流密度以及电流密度的局部放大图。如图 6(a)、

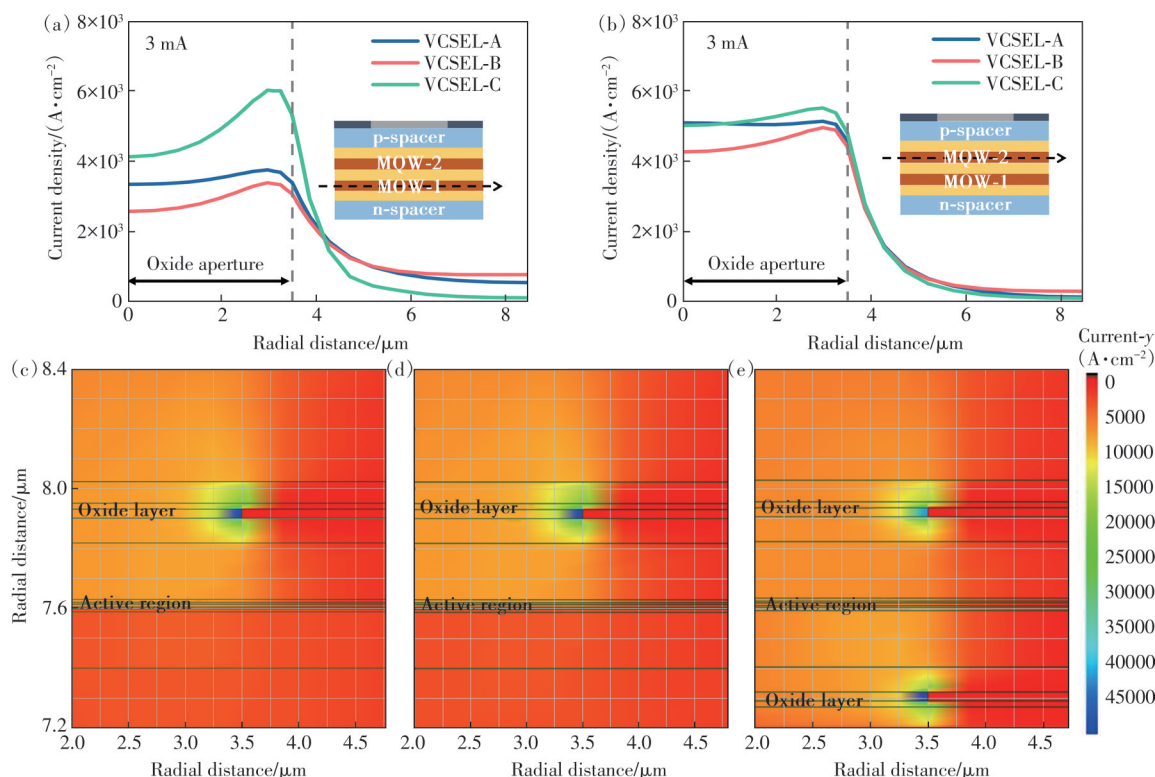


图6 电流为3 mA时,氧化孔径7 μm VCSEL的(a)靠近n侧第一量子阱电流密度径向分布,(b)第二量子阱电流密度径向分布,(c)VCSEL-A电流密度局部放大图,(d)VCSEL-B电流密度局部放大图,(e)VCSEL-C电流密度局部放大图

Fig.6 At a current of 3 mA, the radial distribution of the current density of the first quantum well near the n-side of the 7 μm oxide-doped VCSEL(a), the radial distribution of the current density of the second quantum well(b), a local magnified view of the current density of VCSEL-A(c), a local magnified view of the current density of VCSEL-B(d), a local magnified view of the current density of VCSEL-C(e)

(b)所示, VCSEL-B中两个量子阱的电流密度均出现下降。这是由于采用 InGaAs 过渡势垒导致载流子泄漏,削弱了电流密度,进而使得输出功率未获得显著提升。而对于 VCSEL-C 来说,其功率相较于 VCSEL-A 和 VCSEL-B 分别提升了约 29.7% 与 28.3%。这主要归因于两点,第一,在辐射复合方面,如图 5(a)所示, VCSEL-C 的受激辐射复合相比于 VCSEL-A 和 VCSEL-B 更加均匀,且相较于 VCSEL-B 而言,受激辐射复合有所增加,同时, VCSEL-C 的非辐射复合也有所降低;第二,在载流子注入方面,如图 6(a)、(b)所示, VCSEL-C 中两个量子阱内的电流密度相较于 VCSEL-B 有了显著提升,这是提高器件功率的关键因素^[21]。图 6(c)~(e)展示了三种 VCSEL 结构在注入电流 3 mA 下的电流密度分布局部放大图,对比可知,在氧化层附近几乎没有电流流入,这验证了氧化层很好地起到了对电流的横向引导和限制。此外,根据图 6(e)所示,在 n 侧添加氧化层后,靠近 n 侧的有源区中电流密度显著提升,这一现象与图 6(a)、(b)的结论相符,进一步证明了 n 侧氧化层可以有效改善有源区内部载流子的运输。

3.2 光学性能分析

氧化限制型 VCSEL 的横向光学限制主要是

通过对高 Al 组分(98%)的 AlGaAs 层进行选择氧化,降低其折射率,从而形成折射率差(Δn_{eff})的圆柱形波导来实现的^[22]。在 VCSEL 结构的芯层区域(n_{core}), $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 的折射率为 2.93;而在包层区域(n_{clad}),由于其被氧化成为 AlO_x ,使其折射率显著降低。由此,可以在径向形成有效折射率差(Δn_{eff}),从而实现横向的光学限制。氧化芯层和包层的有效折射率差计算公式如下^[23]:

$$N_{\text{clad}} = \frac{\int n_{\text{clad}} E_z dz}{\int E_z dz}, \quad N_{\text{core}} = \frac{\int n_{\text{core}} E_z dz}{\int E_z dz}, \quad (2)$$

其中 n_{core} 和 n_{clad} 为材料折射率, E_z 是电场沿 Z 方向的驻波分布。经过计算, VCSEL-A、VCSEL-B 和 VCSEL-C 三种结构的有效折射率差依次为 0.000 39, 0.000 41 和 0.000 81。有效折射率差增大主要归因于 n 侧氧化层的引入,它增加了氧化层区域与光场驻波模式之间的重叠。为了进一步研究三种不同器件结构的光学性能,对三种不同器件结构进行了横模性能探究。VCSEL 的横模特性可以用 LP_{mn} 来表示,其中 m 代表方位模数, n 代表径向模数^[23]。为了探究各个模式之间的竞争关系,需要分析三个模式(LP_{01} 、 LP_{11} 和 LP_{21})的分布^[24]。图 7 为三种不同器件结构光场沿径向的一维分布,其中

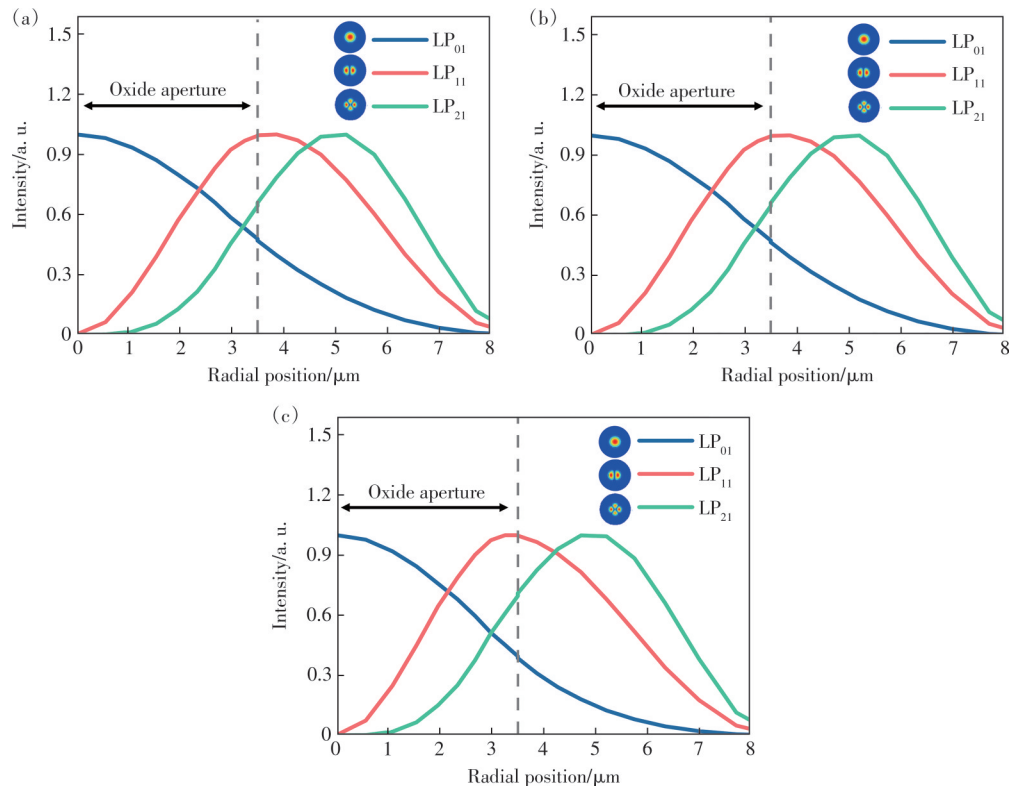


图 7 不同 VCSEL 结构的三个模式径向分布。(a) VCSEL-A; (b) VCSEL-B; (c) VCSEL-C

Fig.7 The radial distribution of the three modes for different VCSEL structures. (a) VCSEL-A. (b) VCSEL-B. (c) VCSEL-C

黑色虚线代表氧化孔的位置。模式分布对比结果显示,VCSEL-B相较于VCSEL-A并无显著差异。然而,VCSEL-C由于在n侧引入了氧化层,根据有效折射率差公式可知,增加一个氧化层,其分子也同样增加,而分母是一个固定值,使得芯层和包层的有效折射率差增大,形成高效的折射率波导结构,将光场紧密约束在未氧化孔径内,使其光场的限制能力显著增强。因此,高阶横模(LP₁₁、LP₂₁)在氧化孔径内的占比明显增加。

图8为三种器件结构的远场发散角,其中VCSEL-A结构的发散角为9.65°,VCSEL-B结构的发散角为9.75°,而VCSEL-C结构的发散角为10.54°。VCSEL的横向光场限制能力随氧化层数量的增加而提高。在n侧添加氧化层后,更强的横向光场限制使得氧化孔径内能够支持更多的高阶横模,导致VCSEL-C结构的远场发散角增加^[21]。

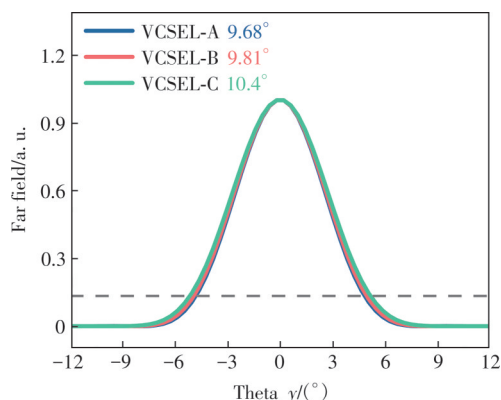


图8 不同VCSEL结构的远场分布图

Fig.8 Far-field distribution diagrams of different VCSEL structures

3.3 高速性能分析

对于高速VCSEL而言,需要考虑谐振二阶系统和电寄生的影响,VCSEL的频率响应可以用三极传递函数来描述^[25]:

$$H(f) = \frac{f_R^2}{f_R^2 - f^2 + j\frac{\gamma}{2\pi}f} \cdot \frac{1}{1 + j\frac{f}{f_p}}, \quad (3)$$

其中 f_R 为弛豫共振频率, γ 为固有阻尼因子, f_p 为寄生截止频率。弛豫共振频率近似为^[26]:

$$f_R \approx D\sqrt{J - J_{th}}, \quad (4)$$

$$D = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\eta_i \Gamma V_g}{qL_a} \cdot \frac{\partial g/\partial n}{\chi}}, \quad (5)$$

其中偏置电流密度和阈值电流密度分别用 J 和 J_{th}

表示, η_i 为内部量子效率, Γ 为光限制因子, V_g 为群速度, L_a 为有源区的总厚度, q 为电子电荷, $\partial g/\partial n$ 为微分增益, χ 为输运因子。光限制因子表示光场能量被限制在有源区中的比例,用于衡量光场与增益区域的重叠程度。光限制因子由下式计算^[27]:

$$\Gamma = \frac{L}{L_a} \frac{\int_{L_a} |E(z)|^2 dz}{\int_L |E(z)|^2 dz}, \quad (6)$$

其中 L 为VCSEL的腔体长度, L_a 为有源区的总厚度, $E(z)$ 为光学场驻波模式。经计算,三种不同结构的光限制因子分别为5.375%、5.382%和8.257%。VCSEL-C通过在n侧引入氧化层以后,使得光场更加集中于有源区的中心,增大了光场和有源区的重叠,从而提高了光学限制因子。 D 因子表示弛豫共振频率随注入电流的变化率,根据公式(4),弛豫共振频率随着偏置电流密度的增加而增大。然而,这种增大并非线性且存在饱和效应,在注入电流较低时,弛豫共振频率随注入电流的快速变化有利于高速调制。阻尼因子由下式确定^[25]:

$$\gamma = K \cdot f_R^2 + \gamma_0, \quad (7)$$

$$K = 4\pi^2 \left[\tau_p + \frac{\varepsilon \chi}{v_g \left(\frac{\partial g}{\partial n} \right)} \right], \quad (8)$$

其中 τ_p 和 ε 为光子寿命和增益约束因子。由公式(7)可知, K 因子决定VCSEL的最大固有调制带宽。随着偏置电流的增加,调制带宽主要受到阻尼机制的限制。因此,为获得最大的调制带宽,需要尽可能降低 K 因子与阈值电流 I_{th} ,同时保持较高的微分增益 $\partial g/\partial n$ 。基于上述表述方程,采用InGaAs作为过渡量子势垒并结合双氧化层结构,不仅可以使有源增益区内的微分增益分布更加均匀,还能进一步提高量子阱中的电流密度,这也有助于实现更高的调制带宽^[17]。这主要是因为增大了量子阱中的电流密度,根据公式(4)可知,电流密度增大会使得器件中的弛豫共振频率增大,根据频率响应的三极传递函数分析, f_R 增大有助于提高器件调制带宽,从而最终提升器件的高速性能。

图9展示了三种不同器件结构在室温下的微分增益图,表2为三种不同结构在量子阱中的微分增益积分面积。微分增益公式为 $\partial g/\partial n$,其中 g

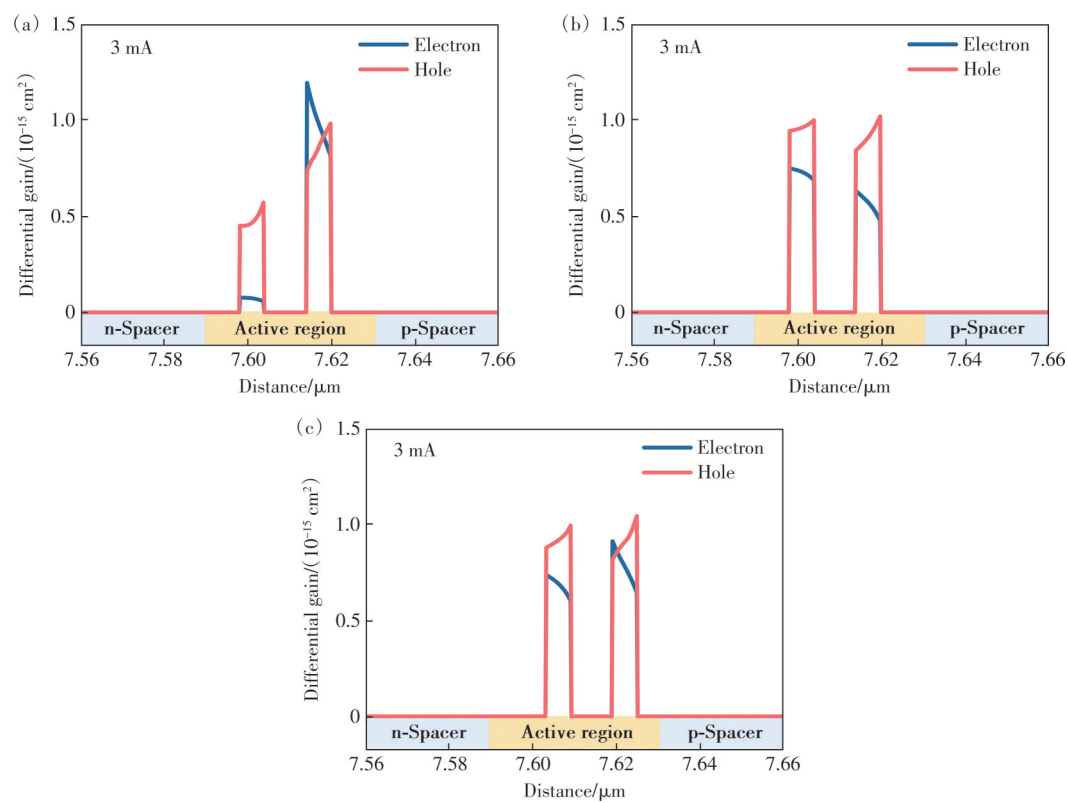


图9 在电流为3 mA时,不同 VCSEL结构的微分增益图。(a)VCSEL-A;(b)VCSEL-B;(c)VCSEL-C

Fig.9 At an electric current of 3 mA, the differential gain graphs for different VCSEL structures are shown as follows. (a) VCSEL-A. (b) VCSEL-B. (c) VCSEL-C

表 2 量子阱内微分增益积分面积

Tab. 2 An integral component of the differential gain within a quantum well				
结构	第一个阱空穴/(10 ⁻²² cm ³)	第二个阱空穴/(10 ⁻²² cm ³)	第一个阱电子/(10 ⁻²² cm ³)	第二个阱电子/(10 ⁻²² cm ³)
VCSEL-A	2. 787	4. 987	0. 414 5	5. 717
VCSEL-B	5. 772	5. 585	4. 345	3. 389
VCSEL-C	5. 519	5. 471	4. 084	4. 661

为器件的增益系数, n 为有源区内载流子浓度。由于三种器件结构的 DBR 以及有源区内部量子阱垒的厚度和材料都是固定的, 所以对于微分增益来说基本上是一个固定的数值^[28]。然而, 器件性能的优化可以通过载流子的分布进行调控。如图 3 所示, 通过降低第二个量子阱的电子注入相对强度 φ_2 , 使得电子可以更好地进入第二个量子阱。并且根据图 9 和表 2, 对比电子微分增益可以得知, 电子微分增益在 VCSEL-B 中变得更加均匀, 并且空穴的微分增益也有所增加。这种改善主要得益于电子注入第二个量子阱的效率得到提升, 这使得电子与空穴在量子阱内复合更加充分, 从而显著地增强了量子阱内的受激辐射与光增益。同时, 更高效的复合过程也有效降低了有源区内的载流子浓度。根据微分增益公式 $\partial g/\partial n$, 提高增益 g , 并降低载流子浓度 n , 是提升微分增益

的直接途径。对于 VCSEL-C, 其在 VCSEL-B 结构的基础上在 n 侧引入了一个氧化层, 可以限制注入电流的横向扩展, 使得载流子可以集中约束在有源区内部, 这种横向强载流子限制效应有效弥补了因引入 InGaAs 过渡势垒而削弱的纵向限制能力, 这一改进有效提升了载流子的注入效率, 同时降低了阈值载流子浓度, 提高了微分增益^[28]。

在 VCSEL 器件中, 频率响应表示为器件对不同频率信号(电信号)的增益特性, 其在频率响应曲线上的 3 dB 带宽即为调制带宽。弛豫共振频率作为频率响应曲线的关键参数, 直接决定了调制带宽的极限, 而调制带宽的大小又最终制约了 VCSEL 的高速性能。弛豫共振频率是决定调制带宽的主要因素, 其数值主要受载流子扩散、载流子传输和增益抑制的影响。根据公式(3)、(4)和(5), 弛豫共振频率随着微分增益的提高而增加,

这是提升器件高速性能的关键。图10展示了三种器件在25℃和85℃下的小信号调制响应曲线。弛豫共振频率是决定调制带宽的主要因素,其数值主要受载流子扩散、载流子传输和增益抑制的影响。仿真结果表明,在10 mA电流下,三种不同器件结构在25℃和85℃的3 dB调制带宽分别为13.2、17.8、19.8 GHz和11、14.1、16 GHz,VCSEL-C相对于VCSEL-B和VCSEL-A而言,在25℃

和85℃调制带宽分别增加了约50%、11.24%和45.5%、13.5%。调制带宽的增加主要是由以下原因导致的。首先,采用InGaAs作为过渡量子势垒,优化了电子微分增益的分布均匀性,并且提升了空穴微分增益。其次,在n侧引入的氧化层有效降低了阈值载流子浓度,并且进一步提高了微分增益,这两方面协同作用,提升了VCSEL器件3 dB调制带宽。

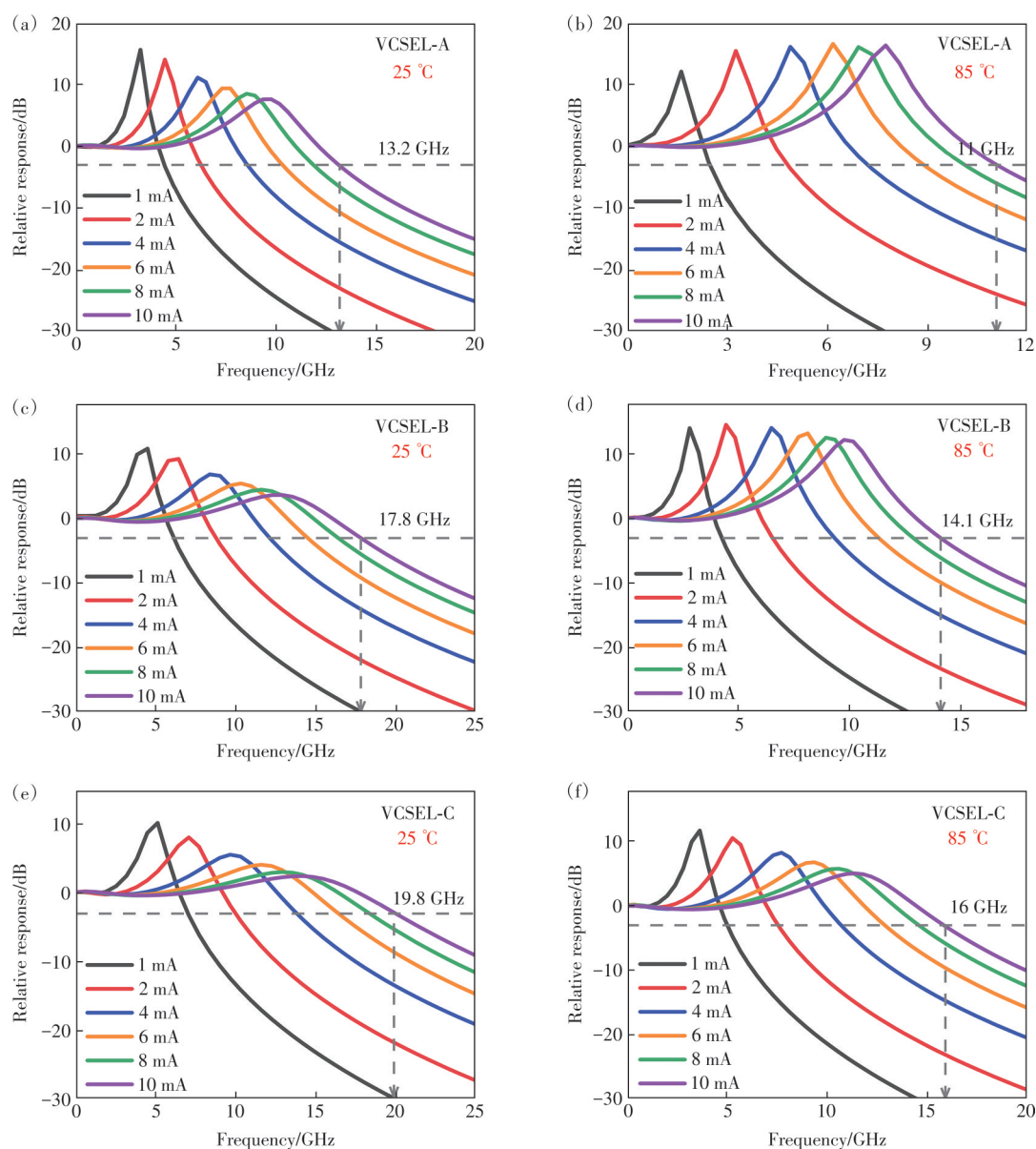


图10 三种不同器件结构在25℃和85℃下的小信号调制响应

Fig.10 The small-signal modulation responses of three different device structures at 25℃ and 85℃

三种不同结构的3 dB调制带宽与 $J - J_{th}$ 平方根的关系如图11所示。图11中数据点的斜率表示 D 因子的大小, D 因子与高速VCSEL的内部量子效率和有源区量子阱的微分增益有关^[23]。根据图11,三种不同器件结构的 D 因子在25℃和

85℃下分别为2.55、3.48、3.9 GHz/(A·cm⁻²)^{1/2}和2.2、2.8、3.13 GHz/(A·cm⁻²)^{1/2}。结果表明,采用InGaAs作为过渡量子势垒并结合n侧氧化层能够有效提高 D 因子,这意味着其在改善器件的小信号调制带宽方面展现出更大潜力。

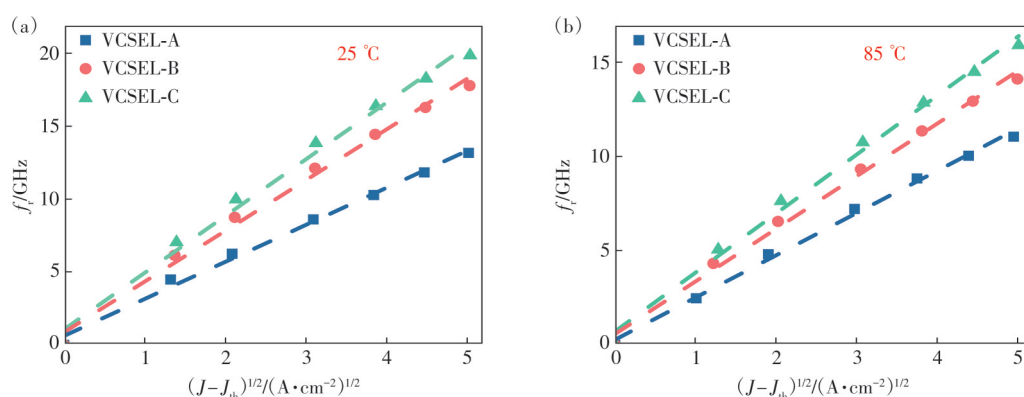


图 11 三种不同器件结构在 25 °C 和 85 °C 时的模拟 3 dB 频率与平方根 $J - J_{th}$ 的关系

Fig.11 The relationship between the simulated 3 dB frequency of three different device structures and the square root of $J - J_{th}$ at 25 °C and 85 °C

4 结 论

本文采用 PICS3D 仿真软件设计了一种新型高速 1.3 μm VCSEL 结构。该结构采用 InGaAs 过渡量子势垒与 n 侧氧化层,有效改善了载流子的传输调控特性,降低了器件的阈值电流,同时在偏置电流给定的情况下显著提升了激射功率及调制带宽。在室温连续波条件下,新型 VCSEL 功率达到 8.98 mW,峰值转换效率达到 37.8%,最大斜率效率为 $0.923 \text{ W} \cdot \text{A}^{-1}$ 。在光学性能方面,n 侧引入的氧化层结构使器件具有较强的光场限制能力,

并且也会有更多的模式限制在出光孔,远场发散角略微增大。此外,在高速性能方面,新型 VCSEL 可有效提升微分增益,在 25 °C 和 85 °C 的 3 dB 调制带宽分别为 19.8 GHz 和 16 GHz,分别提高了约 50% 和 45.5%。新型 1.3 μm VCSEL 的研究成果为高速高性能外延材料的制备提供了数据和理论支持。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20260095>

参 考 文 献:

- [1] JIANG Y, LIU Y Y, LIU X, *et al.* Organic solid-state lasers: a materials view and future development [J]. *Chem. Soc. Rev.*, 2020, 49(16): 5885-5944.
- [2] XU B B, JIN C Y, PARK J S, *et al.* Emerging near-infrared luminescent materials for next-generation broadband optical communications [J]. *InfoMat*, 2024, 6(8): e12550.
- [3] 罗妍, 郝永芹, 邹永刚. 应用于 VCSEL 的 GaAs/AlO_x 高折射率对比度亚波长光栅反射镜的设计和制备 [J]. *光学学报*, 2023, 43(1): 0105002.
 LUO Y, HAO Y Q, ZOU Y G. Design and fabrication of GaAs/AlO_x high-index-contrast sub-wavelength grating reflector for VCSEL [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2023, 43(1): 0105002. (in Chinese)
- [4] CHORCHOS Ł, LEDENTSOV N N, TURKIEWICZ J P. 850 nm multiaperture vertical cavity surface emitting lasers: equivalent circuit modeling, intrinsic response, transmission performance and comparison to standard VCSEL design [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2025, 43(9): 4331-4337.
- [5] PING S, BO X Y, LIANG D H, *et al.* High-performance multi-junction cascade 1.3 μm quantum dot vertical cavity surface-emitting laser [J]. *Opt. Lett.*, 2024, 49(6): 1437-1440.
- [6] LIN G R, CHENG C H, KUO H C, *et al.* Nearly 70 Gbit/s NRZ-OOK encoding of a dual-mode 850 nm VCSEL with a highly in-doped and small Zn-diffused emission area [J]. *Photon. Res.*, 2022, 10(7): 1602-1616.
- [7] 王皓, 张瑞康, 陆丹, 等. 1.55 μm 大功率高速直调半导体激光器阵列 [J]. *光学学报*, 2019, 39(9): 0914001.
 WANG H, ZHANG R K, LU D, *et al.* 1.55 μm high-power high-speed directly modulated semiconductor laser array [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2019, 39(9): 0914001. (in Chinese)
- [8] CHANG Y C, COLDREN L A. High-efficiency, high-speed VCSELs for optical interconnects [J]. *Appl. Phys. A*, 2009, 95(4): 1033-1037.

- [9] WESTBERGH P, GUSTAVSSON J S, HAGLUND Å, *et al.* High-speed, low-current-density 850 nm VCSELs [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, 15(3): 694-703.
- [10] YAZDANYPOOR M, GHOLAMI A. Optimizing optical output power of single-mode VCSELs using multiple oxide layers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2013, 19(4): 1701708.
- [11] CALIMAN A, MEREUTA A, WOLF P, *et al.* 25 Gbps direct modulation and 10 km data transmission with 1 310 nm waveband wafer fused VCSELs [J]. *Opt. Express*, 2016, 24(15): 16329-16335.
- [12] BLOKHIN S, BABICHEV A, GLADYSHEV A, *et al.* Wafer-fused 1 300 nm VCSELs with an active region based on superlattice [J]. *Electron. Lett.*, 2021, 57(18): 697-698.
- [13] FUCHS C, BRÜGGEMANN A, WESELOH M J, *et al.* High-temperature operation of electrical injection type-II (GaIn)As/Ga(AsSb)/(GaIn)As “W”-quantum well lasers emitting at 1.3 μm [J]. *Sci. Rep.*, 2018, 8(1): 1422.
- [14] GEBSKI M, DONTSOVA D, HAGHIGHI N, *et al.* Baseline 1 300 nm dilute nitride VCSELs [J]. *OSA Contin.*, 2020, 3(7): 1952-1957.
- [15] JAYARAMAN V, MEHTA M, JACKSON A W, *et al.* High-power 1 320 nm wafer-bonded VCSELs with tunnel junctions [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, 15(11): 1495-1497.
- [16] SEO W H, O'BRIEN C, DONEGAN J F, *et al.* Small-signal modulation characteristics for 1.5 μm lattice-matched InGa-NAs/GaAs and InGaAs/InP quantum well lasers [J]. *Opt. Quant. Electron.*, 2004, 36(13): 1147-1153.
- [17] CHENG C H, SHEN C C, KAO H Y, *et al.* 850/940 nm VCSEL for optical communication and 3D sensing [J]. *Opto-Electron. Adv.*, 2018, 1(3): 180005.
- [18] YUE A, SHEN K, WANG R F, *et al.* Low threshold current 1.3 μm GaInNAs VCSELs grown by MOVPE [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, 16(3): 717-719.
- [19] 田思聪, 佟存柱, 王立军, 等. 长春光机所高速垂直腔面发射激光器研究进展 [J]. *中国光学(中英文)*, 2022, 15(5): 946-953.
- TIAN S C, TONG C Z, WANG L J, *et al.* Research progress of high-speed vertical-cavity surface-emitting laser in CIOMP [J]. *Chin. Opt.*, 2022, 15(5): 946-953. (in Chinese)
- [20] 贾秀阳, 贾志刚, 董海亮, 等. 对称氧化限制结构提高795 nm VCSEL单模功率 [J]. *人工晶体学报*, 2025, 54(5): 809-818.
- JIA X Y, JIA Z G, DONG H L, *et al.* Symmetric oxide confinement structure improves 795 nm VCSEL single-mode power [J]. *J. Synth. Cryst.*, 2025, 54(5): 809-818. (in Chinese)
- [21] PAN G Z, XUN M, ZHAO Z Z, *et al.* High slope efficiency bipolar cascade 905 nm vertical cavity surface emitting laser [J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 2021, 42(9): 1342-1345.
- [22] ZHOU Y L, JIA Y C, ZHANG X, *et al.* Large-aperture single-mode 795 nm VCSEL for chip-scale nuclear magnetic resonance gyroscope with an output power of 4.1 mW at 80 °C [J]. *Opt. Express*, 2022, 30(6): 8991-8999.
- [23] LI X, ZHOU Y L, ZHANG X, *et al.* High-power single-mode 894 nm VCSELs operating at high temperature (> 2 mW @ 365 K)[J]. *Appl. Phys. B*, 2022, 128(1): 16.
- [24] MICHALZIK R. *VCSELs Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers* [M]. Berlin: Springer, 2013: 560.
- [25] CUI N, GUAN B L, LI J J, *et al.* 850 nm VCSEL with sub quantum well and p-type δ -doping in the active layers for improved high-speed and high-temperature performance [J]. *Opt. Commun.*, 2023, 530: 129128.
- [26] WESTBERGH P, GUSTAVSSON J S, KÖGEL B, *et al.* Impact of photon lifetime on high-speed VCSEL performance [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2011, 17(6): 1603-1613.
- [27] MICHALZIK R, EBELING K J. Operating principles of VCSELs [M]. LI H E, IGA K. *Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Devices*. Berlin: Springer, 2003: 53-98.
- [28] TATHAM M C, LEALMAN I F, SELTZER C P, *et al.* Resonance frequency, damping, and differential gain in 1.5 μm multiple quantum-well lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, 28(2): 408-414.



郭晓勇(2000-),男,山西晋中人,硕士研究生,2023年于山东交通学院获得学士学位,主要从事GaAs基垂直腔面发射激光器方面的研究。

E-mail: gxy159365@163.com



董海亮(1984-),男,山东东明人,博士,正高级实验师,2016年于太原理工大学获得博士学位,主要从事砷化镓、氮化镓基半导体激光器和氮化镓基发光二极管发光机理与光电性能的研究。

E-mail: dhlytut@163.com