

文章编号: 1000-7032(2022)01-0110-09

带有非吸收窗口的高性能 InGaAs/AlGaAs 量子阱激光二极管

刘翠翠^{1,2†}, 林楠^{3,4†}, 马骁宇^{3,4*}, 井红旗^{3,4}, 刘素平^{3,4}

(1. 中国原子能科学研究院核物理所, 北京 102413; 2. 国防科技工业抗辐照应用技术创新中心, 北京 102413;
3. 中国科学院半导体研究所光电子器件国家工程中心, 北京 100083; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了解决限制近红外单发射区 InGaAs/AlGaAs 量子阱半导体激光二极管失效阈值功率提升的腔面光学灾变损伤问题, 研制了一种带有 Si 杂质诱导量子阱混杂非吸收窗口的新型激光二极管, 并对其性能进行了测试分析。首先, 对于带有非吸收窗口的二极管, 在其谐振腔上方前后腔面附近的窗口区域覆盖 50 nm Si/100 nm SiO₂ 组合介质层, 在远离腔面的增益区域覆盖 50 nm Si/100 nm TiO₂ 组合介质层, 并采用 875 °C/90 s 快速热处理工艺促进 Si 杂质扩散诱导量子阱混杂并去除非辐射复合中心。然后, 基于相同外延结构、相同流片工艺制备了无非吸收窗口的激光二极管作对照组。测试结果显示, 带有非吸收窗口的新型激光二极管平均峰值输出功率提升约 33.6%, 平均峰值输出电流提升约 50.4%, 腔面光学灾变损伤的发生概率和破坏程度均明显降低, 且其阈值电流、斜率效率及半高全宽等特性也无任何退化。该研究证明, 采用 Si 杂质诱导量子阱混杂技术制备的非吸收窗口, 对近红外单发射区 InGaAs/AlGaAs 量子阱半导体激光二极管腔面光学灾变损伤有明显的抑制效果。

关键词: 半导体激光二极管; 腔面光学灾变损伤; 量子阱混杂; 非吸收窗口

中图分类号: TP248.4; TH314+.3 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20210306

High Performance InGaAs/AlGaAs Quantum Well Semiconductor Laser Diode with Non-absorption Window

LIU Cui-cui^{1,2†}, LIN Nan^{3,4†}, MA Xiao-yu^{3,4*}, JING Hong-qi^{3,4}, LIU Su-ping^{3,4}

(1. Institute of Nuclear Physics, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

2. National Innovation Center of Radiation Application, Beijing 102413, China;

3. National Engineering Research Center for Optoelectronic Devices, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding Author, E-mail: maxy@semi.ac.cn

Abstract: In order to solve catastrophic optical mirror damage (COMD), the problem of limiting the output power of near-infrared single-emitting InGaAs/AlGaAs quantum well semiconductor laser diodes (LD), a new-typed LD with a non-absorption window (NAW) based on Si impurity induced quantum well intermixing (QWI) technology was designed and fabricated, and its performance is tested and analyzed. Firstly, for the diode with NAW, a 50 nm Si/100 nm SiO₂ composite dielectric layer is covered in the window region near the front and rear cavity surfaces above the cavity, and a 50 nm Si/100 nm TiO₂ composite dielectric layer is covered in the gain region far away from the cavity surface. A rapid thermal annealing (RTA) process of 875 °C/90 s is used to promote Si impurity diffusion induces QWI and remove non-radiation recombination centers. Then, based on the same

收稿日期: 2021-09-22; 修订日期: 2021-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(11690044); 国家重点研发计划(2018YFB1107300)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(11690044); National Key Research and Development Program of China(2018YFB1107300)

†: 共同贡献作者

epitaxial structure and preparation process, the traditional LD without NAW is prepared as the control group. Finally, the test results show that the catastrophic failure threshold power and the catastrophic failure threshold current of the new LD with NAW increase about 33.6% and 50.4%, respectively, and the occurrence probability and damage degree of COMD of the new LD are significantly reduced. Moreover, there is no degradation of the characteristics of threshold current, slope efficiency and full width half maximum of the new LD. This study proves that the NAW prepared by Si impurity induced QWI technology has a significant suppression effect on the COMD of near-infrared single-emitting InGaAs/AlGaAs quantum well semiconductor LD.

Key words: semiconductor lasers; catastrophic optical mirror damage; quantum well intermixing; non-absorption window

1 引 言

GaAs 基高功率半导体激光器具有体积小、重量轻、散热好、光功率密度高等优点,可作为直接光源或固体激光器、光纤激光器的泵浦源使用,在医疗、工业、军事等领域有良好的应用前景^[1-2]。但这些应用场景都对 GaAs 基高功率半导体二极管的输出功率有更高的需求。然而,半导体激光二极管输出功率的提升普遍受到光学灾变损伤(Catastrophic optical damage, COD)限制。对于 InGaAs/AlGaAs 量子阱半导体激光二极管,沿其谐振腔方向其光场强度在前腔面处达到峰值。而在实际情况下,因腔面氧化、界面态等因素会导致非辐射复合增加,因而在激光二极管腔面,尤其是前腔面处,更容易发生光学灾变损伤^[3-4],因此也被称为腔面光学灾变损伤,即 COMD。

针对 COMD 的诱发机制,可通过降低腔面光吸收、抑制腔面非辐射复合、减少腔面处光子密度等手段来缓解 COMD 问题^[5-6]。其中,量子阱混杂是一种降低腔面光吸收的途径,可通过快速热退火诱导无序化(RTA)^[7]、杂质诱导无序化(Impurity induced disordering, IID)^[8]、无杂质空位诱导无序化(Impurity-free vacancy disordering, IFVD)^[9-10]等方法实现。其中, IID 相比其他方法操作更简单、成本更低、诱导效果更显著,因而受到广泛关注。

从 20 世纪 60 年代开始,出现了针对 COMD 及其解决方法的研究并持续至今。COMD 现象在 1966 年首次被 Cooper 在 GaAs 同质结半导体激光二极管上观测到^[11]。1977 年,Chinone 基于 AlGaAs/GaAs 双异质结半导体激光二极管,利用扫

描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)观测,认定导致 COMD 的关键因素是腔面处更高的功率密度和腔表面氧化所产生的强烈的非辐射复合^[12-13]。1986 年,Deppe^[14]基于 AlGaAs/GaAs 量子阱激光二极管,利用 280 nm SiO₂ 薄膜和 90 nm Si₃N₄ 薄膜的 IFVD 作用,结合 875 °C/10 h 热处理实现了约 90 meV 带隙展宽。1987 年,Mei 研究发现,Al 元素的扩散系数会随 Si 杂质浓度的增加而上升,并得出 Si 杂质能有效促进 AlAs/GaAs 超晶格结构量子阱混杂的结论^[15]。2013 年, Morita 采用 IFVD 技术在 915 nm 宽条形半导体激光二极管上制备了非吸收窗口,提升了该器件在 20 °C 恒温测试下的输出功率以及长时间工作的稳定性^[16]。2019 年, Mengya^[17]在 Si 基 InAs/GaAs 量子点激光二极管选区波长调整方案研究中发现,经相同条件的热处理,被 SiO₂ 介质膜覆盖的区域波长蓝移达 40 nm,被 TiO₂ 介质膜覆盖的区域波长蓝移仅 3.4 nm。证明了 SiO₂ 介质膜能促进该结构的量子阱混杂,而 TiO₂ 介质膜则有抑制量子阱混杂的作用。

本文选用 Si 杂质作为量子阱混杂技术的诱导源,设计并制备了带有非吸收窗口的新型 InGaAs/AlGaAs 量子阱半导体激光二极管,并对其光电性能进行测试分析。选择 Si 杂质作诱导源的原因是 Si 常作为 InGaAs/AlGaAs 量子阱半导体激光二极管芯片外延过程中使用的施主杂质,容易获得且不易造成污染;同时, p 型 GaAs 常采用 C 掺杂,引入 Si 杂质可部分中和 C 掺杂,基于载流子复合效应在窗口微区也形成低浓度载流子注入区,有助于减少窗口区载流子非辐射复合产生的热量,进一步抑制 COMD 现象。但是,由于

IID 会引入杂质诱导缺陷产生,再进行长时间热处理可能会引起材料内部应力释放,进而影响材料表面及内部的晶体质量。与之相比,RTA 技术热处理时间较短,对于材料内部晶体质量影响较小,因此本文选择 RTA 技术来激活杂质并促进其扩散。

2 实 验

2.1 样品制备

采用金属氧化物化学气相沉积(Metal organic chemical vapor deposition, MOCVD)设备制备了 In-GaAs/AlGaAs 量子阱半导体激光二极管的初级外延片。外延生长时的载气为氢气(H_2);Ⅲ族源为三甲基铟(TMIn)、三甲基镓(TMGa)和三甲基铝(TMAI);Ⅴ族源为砷烷(AsH_3);P型和N型掺杂剂分别源于四氯化碳(CCl_4)和硅烷(SiH_4)。设备反应室内温度为 $550 \sim 700 \text{ }^\circ\text{C}$,压力为 $5\ 000 \text{ Pa}$,衬底选用(100)偏 $[111] A15^\circ$ 的 n-GaAs,包含外延片信息的器件结构示意图及初级外延片的光致发光谱如图 1 所示。

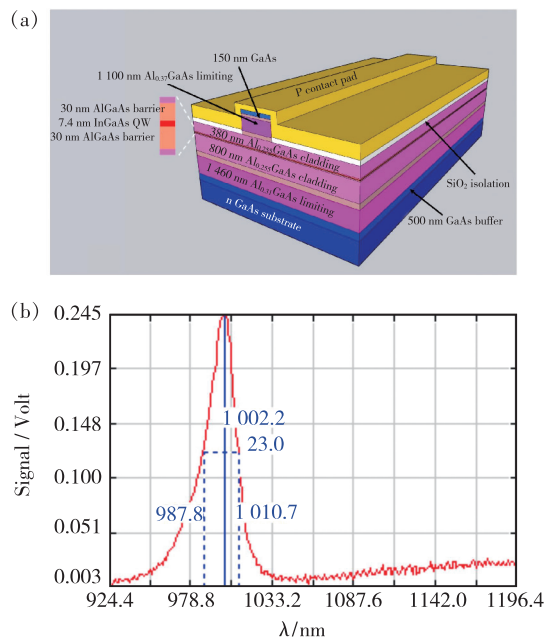


图 1 InGaAs/AlGaAs 量子阱激光二极管的外延结构(a)和光致发光谱(b)

Fig. 1 Epitaxial structure of InGaAs/AlGaAs quantum well laser diode(a) and photoluminescenc spectrum(b)

2.2 仿真计算

因为 GaAs 表面的压应力有助于更多 Ga 空位缺陷的产生^[18],同时促进 Si 向结构内部扩散,

进而产生更强烈的量子阱混杂效果。因此,首先研究了不同介质层对 GaAs 界面产生的应力作用。实际初级外延片的 GaAs 衬底层厚度为 $450 \mu\text{m}$,外延层总厚度约 $4.5 \mu\text{m}$,且每层均含高比例的 Ga 及 As 元素。为了避免相对误差过大引起的计算错误,在模拟中以厚度为 $25 \mu\text{m}$ 、长度为 $100 \mu\text{m}$ 的 GaAs 代替激光二极管外延片。模拟中所使用的物理参数如表 1 所示,模拟结果如图 2 所示。

表 1 相关材料的杨氏模量、泊松比、密度及热膨胀系数
Tab. 1 Young's modulus, Poisson's ratio, density and coefficient of thermal expansion of related materials

介质材料	杨氏模量/ Pa	泊松比	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$)	热膨胀系数/ K^{-1}
GaAs	8.50E10	0.31	5 500	6.40E-06
Si	1.77E11	0.29	2 328	2.60E-06
SiO ₂	7.31E10	0.17	2 203	5.50E-07
TiO ₂	7.50E10	0.22	4 200	9.90E-06

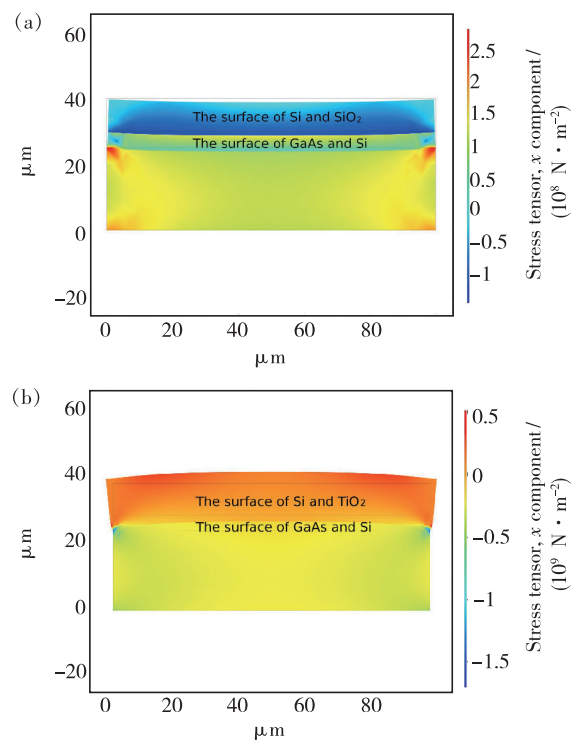


图 2 COMSOL 模拟的带有 Si/SiO₂(a)、Si/TiO₂(b)介质层的外延片退火后的形变。

Fig. 2 Simulation of annealing deformation of epitaxial wafers with Si/SiO₂(a) and Si/TiO₂(b) dielectric layer by COMSOL

为了更明显地展示形变趋势,图 2 中展示的是放大 20 倍后的形变量。同时,在模拟中将介质

层的厚度相比于实际情况放大了 100 倍, 图 2(a) 中样品的介质层为 5 μm Si/10 μm SiO₂, 图 2(b) 中样品的介质层为 5 μm Si/10 μm TiO₂。假设样品升温至 875 $^{\circ}\text{C}$ 后产生稳定形变, 由图 2 可见, GaAs 表面因受 Si/SiO₂ 组合介质层带来的压应力而产生明显弯曲, 这种形变会导致在表面 GaAs 层内形成更多的 Ga 空位缺陷。又因为在该类量子阱体系内, Si 元素及 Al 元素的扩散程度与 Ga 空位浓度正相关^[15], 可知 Si/SiO₂ 组合介质层有利于促进量子阱混杂的进行。而在 TiO₂ 层拉伸应力作用下, Si 形变带来的压应力被减弱, GaAs 表面 Ga 空位缺陷的产生较少, 进而减缓了量子阱区域的元素互扩散, 因此 Si/TiO₂ 组合介质层对量子阱混杂有抑制作用。

基于菲克第二定律及其叠加原理, 可推导在原子单向扩散过程中 InGaAs/AlGaAs 量子阱结构组分及禁带宽度随时间和空间变化的方程。以量子阱的中心位置为 Z 轴原点, 设量子阱宽度为 $2d$, III 族及 V 族原子的扩散系数 D 近似独立且各向同性, 且量子阱界面上各组分的初始浓度呈阶梯分布。当量子阱中 Al 元素沿一维 Z 方向扩散一定长度 $L_d = \sqrt{Dt}$ 后, 各组分原子浓度 C 随时间 t 的变化遵从菲克第二定律方程:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla C) = D \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2}, \quad (1)$$

假设量子阱、垒中 Al 元素浓度分别为 C_1 、 C_2 , 如下所示:

$$C = \begin{cases} C_1, & |Z| < d \\ C_2, & |Z| > d \end{cases}, \quad (2)$$

联合公式(1)、(2)可推导出该结构中各位点 Al 元素的浓度:

$$C(Z) = C_1 + \frac{(C_2 - C_1)}{2} \cdot \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{Z+d}{2L_d}\right) + \operatorname{erfc}\left(\frac{-Z+d}{2L_d}\right) \right], \quad (3)$$

同时, In_{1-x-y}Al_yGa_xAs 四元化合物半导体的禁带宽度可通过公式(4)计算^[19]:

$$E_g(\text{In}_{1-x-y}\text{Al}_y\text{Ga}_x\text{As}) = 0.36 + 0.629x + 2.093y + 0.436x^2 + 0.577y^2 + 1.013xy - 2xy(1-x-y), \quad (4)$$

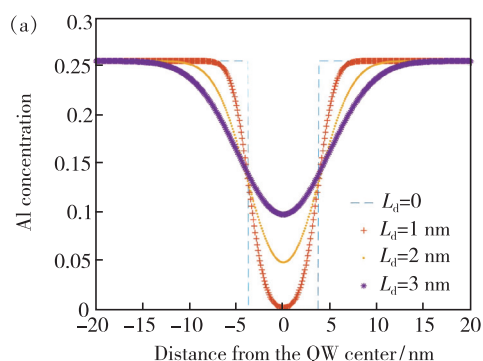
本文所用的 In_{0.267}Ga_{0.733}As/Al_{0.255}Ga_{0.745}As 量子阱外延片, Al 元素将不断从浓度较高的区域向中

量子阱区扩散。假设 Al 元素从势垒区向阱区的扩散长度 L_d 分别为 0, 1, 2, 3 nm, 联合公式(1)~(4)可计算出 Al 元素在量子阱中的分布和对应的能带结构, 如图 3 所示。随着 Al 元素的扩散, 量子阱区域内 Al 元素不断增加, 使其从原始的三元化合物 InGaAs 逐渐变成四元化合物 InAlGaAs, 量子阱区域禁带宽度随之变化。结合公式(5)所示波长和禁带宽度之间的关系:

$$\lambda = \frac{hc}{E_g}, \quad (5)$$

其中, λ 是波长, h 是普朗克常数, c 是光速, E_g 是量子阱禁带宽度。公式(5)结合图 3(b)可见, 随量子阱带隙变大, 激光器发光波长变短, 即发生蓝移。

The concentration of Al after Al diffused over different distances



The band gaps after Al diffused over different distances

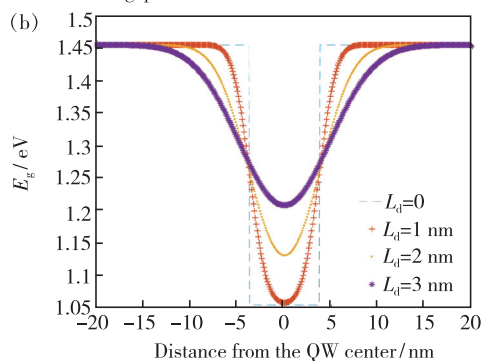


图 3 Al 扩散不同距离后, InGaAs/AlGaAs 量子阱内 Al 元素的浓度 (a) 和量子阱的带隙结构 (b)。

Fig. 3 Composition concentration (a) and band gap (b) of InGaAs/AlGaAs quantum well after Al diffusion at different distances

2.3 样品表征

将同一片激光二极管初级外延片表面划分为 4 个区域, 一区域生长 50 nm Si/100 nm SiO₂ 组合介质层, 二区域生长 50 nm Si/100 nm TiO₂ 组合介质层, 三区域生长 50 nm Si 单介质层, 四区域生

长 100 nm TiO₂ 单介质层。经 875 °C/90 s RTA 处理,测试这 4 个区域的光致发光谱,并与原始初级外延片的光致发光谱对比。

如图 4 所示,带有 Si 单介质层及带有 Si/SiO₂

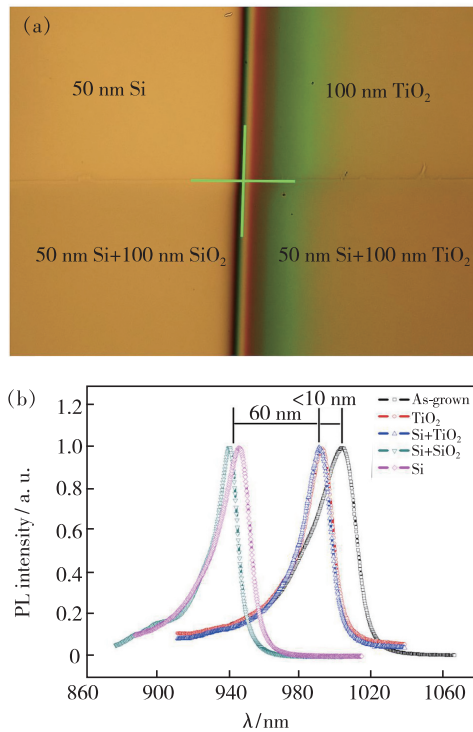


图 4 激光二极管外延片不同区域覆盖的介质层(a)及对应区域的光致发光谱(b)

Fig. 4 The dielectric layer covered different region of laser diode epitaxial wafer(a) and photoluminescenc spectra of different regions(b)

组合介质层的区域都产生了较大的波长蓝移。其中,带有 Si/SiO₂ 组合介质层区域的中心波长移至约 935 nm,与原始外延片中心波长的蓝移差约 67 nm。而带有 TiO₂ 单介质层及带有 Si/TiO₂ 组合介质层区域的波长蓝移都受到明显抑制,与带有 Si/SiO₂ 介质层区域的波长蓝移差约 60 nm。

至此,应力应变的软件模拟结果、杂质扩散的数学计算结果,以及实验测试结果趋于一致,都显示出 Si/TiO₂ 组合介质层与单独 TiO₂ 层均可起到较好的抑制波长蓝移效果,而 Si/SiO₂ 组合介质层也和单独 Si 层一样可起到较好的促进波长蓝移效果。同时,与生长单层介质层相比,生长 Si/TiO₂ 或 Si/SiO₂ 组合介质层有利于减少光刻步骤、降低流片难度,也能在 RTA 过程中更好地保护外延片表层。综合考虑后,分别用 Si/SiO₂ 组合介质层、Si/TiO₂ 组合介质层来实现促进、抑制量子阱混杂的目标。

优化后的流片工艺如图 5 所示:(a)在样品表面利用 MOCVD 外延生长一层 50 nm 厚的 Si 层;(b)在样品表面利用等离子体增强化学气相沉积(Plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD)设备外延生长一层 100 nm 厚 SiO₂ 层,然后按照芯片出光面的条宽刻蚀出 100 μm 的条形区域;(c)刻蚀掉非窗口区的 SiO₂ 层;(d)在样品表面利用 Ebeam 淀积一层 100 nm 厚 TiO₂; (e)刻蚀掉窗口区域上方的 TiO₂; (f)在带有介质层的外延片上面覆盖 GaAs 盖片,下面垫 Si 片,并进行

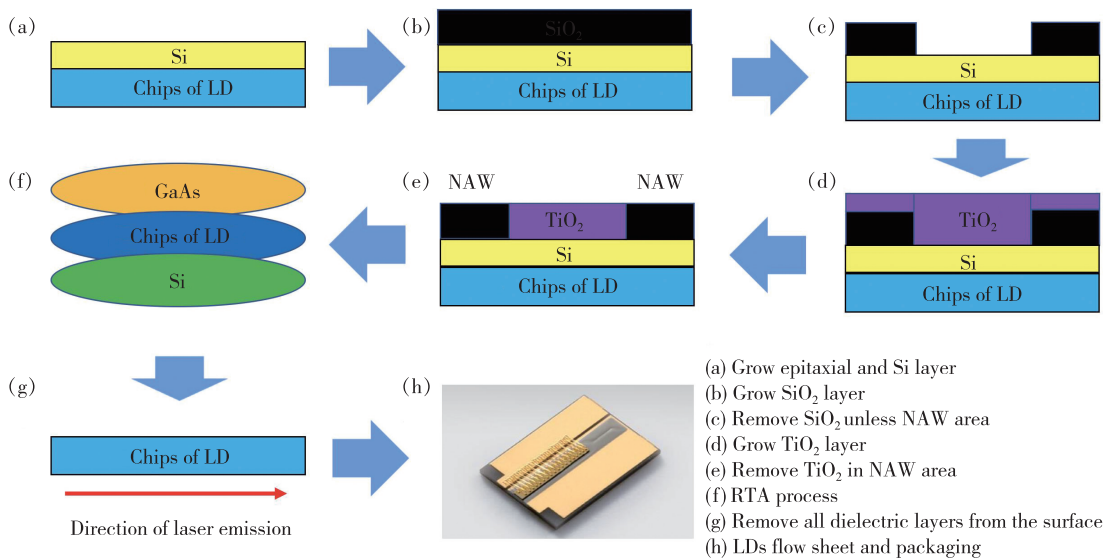


图 5 带有非吸收窗口的激光二极管流片流程

Fig. 5 The tape-out process of laser diode with non-absorption window

875 °C/90 s 快速热处理;(g) 去除所有介质层;(h) 将外延片解理、镀膜,并封装成器件。同时,在激光二极管前腔面镀透过率高于 95% 的增透膜,后腔面镀反射率高于 95% 的高反膜,以实现高效率的前腔面激光输出。该激光器的光发射区宽度为 100 μm ,谐振腔腔长为 4 500 μm ,量子阱宽度为 7.4 nm。该非吸收窗口区域在激光二极管谐振腔前后腔面处,长度均为 50 μm 。

3 结果与讨论

基于 Si 杂质诱导量子阱混杂技术,成功制备了 4 只带有非吸收窗口的新型半导体激光二极管(以下简称新型二极管)。同时,也在相同流片工艺下制备了 4 只不带非吸收窗口的常规半导体激光二极管(以下简称常规二极管),这两种二极管除去非吸收窗口其他规格完全一样。不带非吸收窗口的常规二极管编号为:Normal-1、Normal-2、Normal-3、Normal-4,带有非吸收窗口的新型二极管编号为:New-1、New-2、New-3、New-4。分别测

试了两种二极管的功率-电流-电压($P-I-V$)曲线、激光光谱和电致发光图像特性。

3.1 功率-电流-电压输出曲线

图 6 分别展示了两种二极管的 $P-I-V$ 测试曲线。对比图 6(a)、(b)可知,4 只常规二极管的平均峰值电流为 12.3 A,4 只新型二极管的平均峰值电流为 18.5 A,比常规二极管提高了 50.4%;4 只常规二极管的平均峰值输出功率为 10.5 W,4 只新型二极管的平均峰值输出功率为 14.1 W,比常规二极管提高了 33.6% 左右,可见新型二极管的电学性能显著提高。

然而,新型二极管的偏置电压在大于 1.8 V 时出现了突变性升高。分析这个现象的原因是 Si 扩散进入 GaAs 层上表面后改变了其掺杂特性,当工作电压达到一定值后的 COMD 瞬间,电流增大、产热也骤增,故引发了电压的瞬间抖动。并且 4 只新型二极管 $P-I-V$ 曲线的统一性劣于 4 只常规二极管,因此未来需要对该工艺下新型二极管的稳定性和可靠性进行更深入全面的研究。

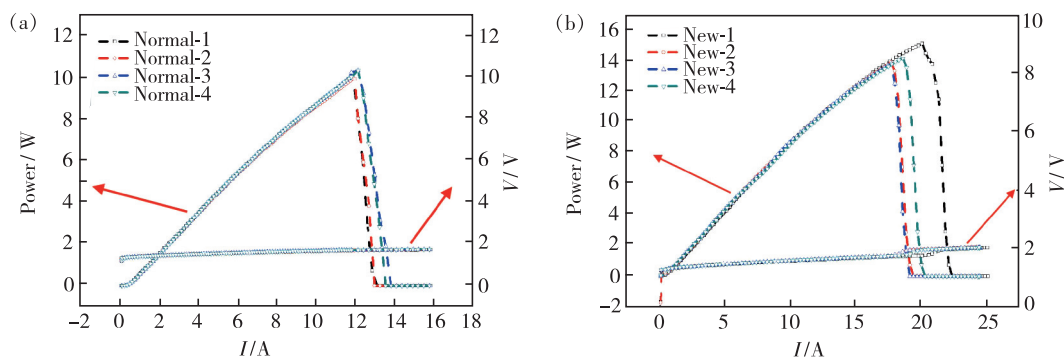


图 6 常规二极管(a)和新型二极管(b)的 $P-I-V$ 特性

Fig. 6 The $P-I-V$ characteristics of normal lasers(a) and new lasers(b)

3.2 激光光谱

图 7 为两种二极管的实测激光光谱,对比光谱的高度可以看出,新型二极管的峰值光强显著提高,这是因为非吸收窗口结构改善了二极管腔面处的界面态,降低了腔面处光吸收,也减少了热生成导致的半导体材料带隙变窄所引起的光吸收;同时,Si 杂质在 GaAs 中具有 n 型掺杂特性,再结合热处理工艺,可复合 GaAs 中的部分 p 型载流子,降低二极管腔面处的载流子注入浓度。因此,利用 Si 杂质诱导量子阱混杂技术制备的非吸收窗口可以在降低腔表面光吸收产热的同时,降低载流子的非辐射复合,故可进一步提高二极

管的光输出功率。

同时,常规二极管光谱的对称性较差,杂峰数量也更多,甚至出现了比中心波长更强的杂峰;而新型二极管的光谱对称性较好,且大都只有一个较强的主峰。这说明制备非吸收窗口的过程中也消除了部分陷阱能级,降低了由陷阱能级所激发的其他波长杂峰。然而,新型二极管光谱主峰左侧大都会有一个较弱的杂峰,这可能是由非吸收窗口区域量子阱混杂导致的带隙展宽和波长蓝移所致。不过,这也体现出利用该技术可以很方便地可控实现单一芯片上的光子集成。

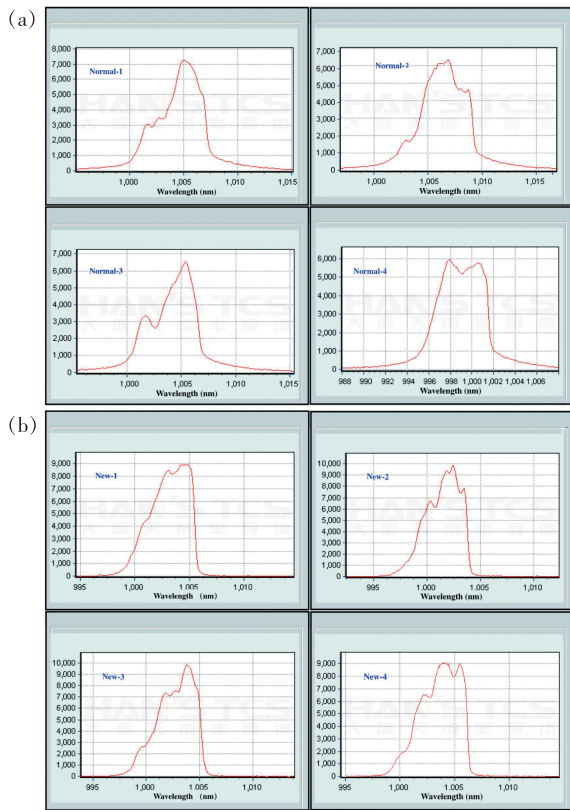


图 7 常规二极管 (a) 和新型二极管 (b) 的激光光谱
 Fig. 7 The laser spectra of normal lasers (a) and new lasers (b)

3.3 电致发光图像

进行电致发光图像测试时,是利用探针针对样品进行加电,电流约为 200 ~ 300 mA,大小在器件的阈值电流以下,并记录电致发光图像。经过筛选、磨抛、测试等过程,最终得到 4 只常规二极管及 4 只新型二极管的电致发光图像结果,如图 8 所示。该图像经显微镜放大 50 倍,完整展示了激光器前腔面附近的电致发光图像。图中,红色区域展示的是加电之后发光的区域,红色区域内部的黑色区域则是由于发生 COD 而不能电致发光的区域。

由图 8 (a) 可见,4 只常规二极管全部在前腔面处发生了 COMD,并最终导致了器件失效;而由图 8 (b) 可见,4 只新型二极管中只有 2 只在前腔面处发生了 COMD,1 只在谐振腔内其他地方发生了 COD,还有 1 只未检测到 COD 现象。由此可见,在新型二极管腔面处,尤其是前腔面处,COMD 发生概率明显降低;并且 COMD 也仅破坏了新型二极管谐振腔内小块区域,从发生 COMD 损伤的源头向谐振腔

内部的延伸受到了明显抑制,这表明非吸收窗口能显著减少 COMD 的破坏程度。

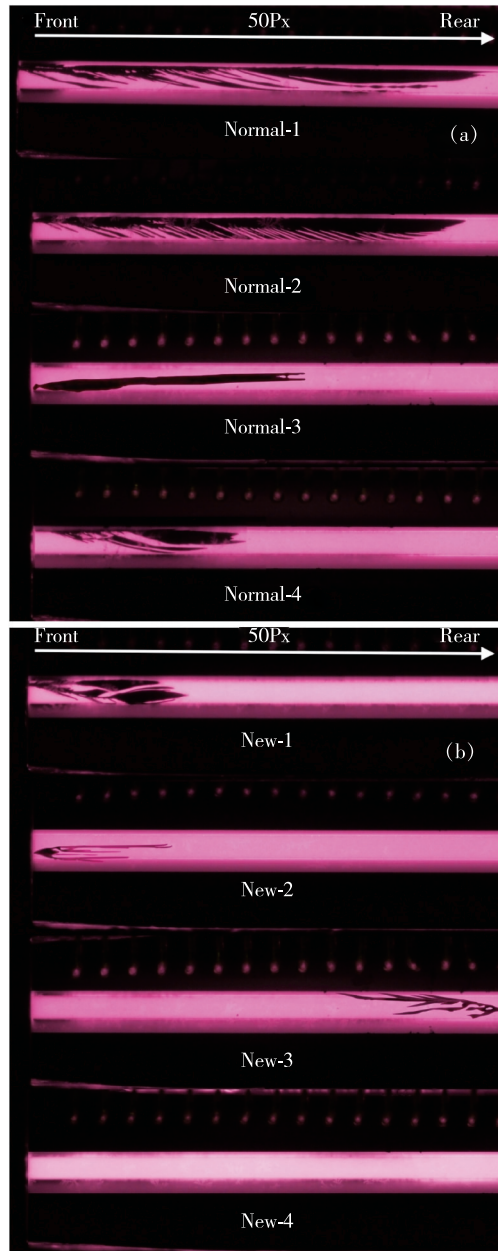


图 8 常规二极管 (a) 和新型二极管 (b) 的电致发光图像 (50 Px)
 Fig. 8 The electroluminescence images of normal lasers (a) and new lasers (b) (50 Px)

4 结 论

为了进一步提高 InGaAs/AlGaAs 高功率量子阱半导体激光二极管峰值功率,针对 COMD 这一限制其输出功率提升的关键问题,本文设计了一种利用 Si 杂质诱导量子阱混杂方法制备非吸收窗口的技术方案,并在相同的工艺条

件下同时制备了不带有非吸收窗口的常规二极管以及带有非吸收窗口的新型二极管。两者的电学和光学输出特性显示,新型二极管的 COMD 峰值输出功率和峰值输出电流相比常规二极管分别增加了 33.6% 和 50.4%;电致发光图像测试结果显示,新型二极管 COMD 发生概率和损伤程度均明显降低。综合多种测试结果可知,通过 Si 杂质诱导量子阱混杂制备非吸收窗口,可显著改善 InGaAs/AlGaAs 高功

率量子阱半导体激光二极管 COMD 问题。但是,新型二极管的稳定性仍存疑问,其长期应用的可靠性还需要进一步研究。同时,该研究也证明量子阱混杂技术可应用于光子集成,未来在光子集成领域具有广泛的应用前景。

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.20210306>.

参 考 文 献:

- [1] 胡雪莹,董海亮,贾志刚,等. GaAs 基 980 nm 高功率半导体激光器的研究进展 [J]. 人工晶体学报, 2021,50(2): 381-390.
HU X Y, DONG H L, JIA Z G, *et al.* Research progress of GaAs based 980 nm high power semiconductor lasers [J]. *J. Synth. Cryst.*, 2021,50(2):381-390. (in Chinese)
- [2] 袁庆贺,井红旗,张秋月,等. 砷化镓基近红外大功率半导体激光器的发展及应用 [J]. 激光与光电子学进展, 2019,56(4):040003-1-14.
YUAN Q H, JING H Q, ZHANG Q Y, *et al.* Development and applications of GaAs-based near-infrared high power semiconductor lasers [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2019,56(4):040003-1-14. (in Chinese)
- [3] 刘启坤,孔金霞,朱凌妮,等. 电致发光用于大功率半导体激光器失效模式分析 [J]. 发光学报, 2018,39(2): 180-187.
LIU Q K, KONG J X, ZHU L N, *et al.* Failure mode analysis of high-power laser diodes by electroluminescence [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2018,39(2):180-187. (in English)
- [4] 宋悦,宁永强,秦莉,等. 大功率半导体激光器抗腔面灾变性光学损伤技术综述 [J]. 半导体光电, 2020,41(5): 618-626.
SONG Y, NING Y Q, QIN L, *et al.* Review on the methods of preventing catastrophic optical mirror damage in high-power diode lasers [J]. *Semicond. Optoelectron.*, 2020,41(5):618-626. (in Chinese)
- [5] HOU L P, MARSH J H. Photonic integrated circuits based on quantum well intermixing techniques [J]. *Procedia Eng.*, 2016,140:107-114.
- [6] LIN T, ZHANG H Q, SUN H, *et al.* Impurity free vacancy diffusion induced quantum well intermixing based on hafnium dioxide films [J]. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 2015,29:150-154.
- [7] 何天将,井红旗,朱凌妮,等. 对 915 nm InGaAsP/GaAsP 初次外延片量子阱混杂的研究 [J/OL]. (2021-08-03) [2021-09-08]. 光学学报, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1252.04.20210802.1715.020.html>.
HE T J, JING H Q, ZHU L N, *et al.* Research on quantum well intermixing of 915 nm InGaAsP/GaAsP primary epitaxial wafers [J/OL]. (2021-08-03) [2021-09-08]. *Acta Opt. Sinica*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1252.04.20210802.1715.020.html>. (in Chinese)
- [8] 刘翠翠,林楠,熊聪,等. Si 杂质扩散诱导 InGaAs/AlGaAs 量子阱混杂的研究 [J]. 中国光学, 2020,13(1): 203-216.
LIU C C, LIN N, XIONG C, *et al.* Intermixing in InGaAs/AlGaAs quantum well structures induced by the interdiffusion of Si impurities [J]. *Chin. Opt.*, 2020,13(1):203-216. (in English)
- [9] 田伟男,熊聪,王鑫,等. 基于 GaAs 膜的 GaInP/AlGaInP 无杂质空位扩散诱导量子阱混杂的研究 [J]. 发光学报, 2018,39(8):1095-1099.
TIAN W N, XIONG C, WANG X, *et al.* Impurity-free vacancy diffusion induces intermixing in GaInP/AlGaInP quantum wells using GaAs encapsulation [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2018,39(8):1095-1099. (in Chinese)
- [10] 王鑫,赵懿昊,朱凌妮,等. 基于 SiO₂ 薄膜的 915 nm 半导体激光器的无杂质空位诱导量子阱混合研究 [J]. 光子学

- 报, 2018, 47(3):0314003-1-7.
- WANG X, ZHAO Y H, ZHU L N, *et al.* Impurity-free vacancy diffusion induces quantum well intermixing in 915 nm semiconductor laser based on SiO₂ film [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(3):0314003-1-7. (in Chinese)
- [11] COOPER D P, GOOCH C H, SHERWELL R J. Internal self-damage of gallium arsenide lasers [J]. *IEEE J. Quantum Elect.*, 1966, 2(8):329-330.
- [12] CHINONE N, NAKASHIMA H, ITO R. Long-term degradation of GaAs-Ga_{1-x}Al_xAs DH lasers due to facet erosion [J]. *J. Appl. Phys.*, 1977, 48(3):1160-1162.
- [13] EPLER J E, BURNHAM R D, THORNTON R L, *et al.* Laser induced disordering of GaAs-AlGaAs superlattice and incorporation of Si impurity [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, 49(21):1447-1449.
- [14] DEPPE D G, GUIDO L J, HOLONYAK N JR, *et al.* Stripe-geometry quantum well heterostructure Al_xGa_{1-x}As-GaAs lasers defined by defect diffusion [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, 49(9):510-512.
- [15] MEI P, YOON H W, VENKATESAN T, *et al.* Kinetics of silicon-induced mixing of AlAs-GaAs superlattices [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, 50(25):1823-1825.
- [16] MORITA T, NAGAKURA T, TORII K, *et al.* High-efficient and reliable broad-area laser diodes with a window structure [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2013, 19(4):1502104-1-4.
- [17] LIAO M Y, LI W, TANG M C, *et al.* Selective area intermixing of III-V quantum-dot lasers grown on silicon with two wavelength lasing emissions [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2019, 34(8):085004-1-9.
- [18] GARESO P L, BUDA M, FU L, *et al.* Influence of SiO₂ and TiO₂ dielectric layers on the atomic intermixing of In_xGa_{1-x}As/InP quantum well structures [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2007, 22(9):988-992.
- [19] 李岩. 808 nm、905 nm 高功率半导体激光器结构设计及外延生长 [D]. 北京:北京工业大学, 2016.
LI Y. *Structure Design and Epitaxy Growth of High Power Semiconductor Laser Diodes Emitting at 808 nm and 905 nm* [D]. Beijing:Beijing University of Technology, 2016. (in Chinese)



刘翠翠(1993-),女,河北沧州人,博士,助理研究员,2020年于中国科学院半导体研究所获得博士学位,主要从事高功率半导体激光二极管、半导体器件可靠性分析等方面的研究。

E-mail: sissiliu2020@163.com.



马晓宇(1963-),男,吉林延吉人,硕士,研究员,博士生导师,1987年于吉林大学获得硕士学位,主要从事材料生长、高功率半导体激光二极管阵列及其组件的研究。

E-mail: maxy@semi.ac.cn.



林楠(1986-),男,陕西渭南人,硕士,助理研究员,2012年于西安理工大学获得硕士学位,主要从事高功率半导体激光二极管及其组件的研究。

E-mail: linnan@semi.ac.cn