

# 有源区 Be 掺杂对 1.3 $\mu\text{m}$ InAs 量子点激光器性能的影响

杜安天<sup>1,2</sup>, 曹春芳<sup>2</sup>, 韩实现<sup>2,3</sup>, 王海龙<sup>1\*</sup>, 龚谦<sup>2,3\*</sup>

- (1. 曲阜师范大学物理工程学院 山东省激光偏光与信息技术重点实验室, 山东 曲阜 273165;  
2. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 中科院太赫兹固态技术重点实验室, 上海 200050;  
3. 中国科学院大学 材料科学与光电子工程中心, 北京 100049)

**摘要:** 利用分子束外延技术在 GaAs(100) 衬底上生长了 1.3  $\mu\text{m}$  InAs DWELL 量子点激光器结构, 研究了有源区 Be 掺杂对量子点激光器性能的影响。研究表明, 对有源区进行 Be 掺杂可以有效降低 InAs 量子点激光器的阈值电流密度, 提升激光器的输出功率, 增加激光器的温度稳定性。研制的 Be 掺杂 InAs 量子点激光器的阈值电流降低到 12 mA, 相应的阈值电流密度仅为 100 A/cm<sup>2</sup>, 激光器的最高输出功率达到 183 mW, 最高工作温度达到了 130 °C。这对 InAs 量子点激光器器件在光通信系统中的应用具有重要意义。

**关键词:** 量子点激光器; 分子束外延; 阈值电流密度; 输出功率; 特征温度  
**中图分类号:** O43 **文献标识码:** A

## Effect of Be doping in active regions on the performance of 1.3 $\mu\text{m}$ InAs quantum dot lasers

DU An-Tian<sup>1,2</sup>, CAO Chun-Fang<sup>2</sup>, HAN Shi-Xian<sup>2,3</sup>, WANG Hai-Long<sup>1\*</sup>, GONG Qian<sup>2,3\*</sup>

- (1. School of Physics and Physical Engineering, Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Polarization and Information Technology, Qufu Normal University, Qufu 273165, China;  
2. Key Laboratory of Terahertz Solid State Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;  
3. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** InAs DWELL quantum dot lasers were grown on GaAs(100) substrate by molecular beam epitaxy technology. The effect of Be doping in active regions on the performance of InAs quantum dot lasers has been studied. The results show that Be-doped in the active region could effectively reduce the threshold current density, improve the output power, and increase the temperature stability of the InAs quantum dot laser. The threshold current of Be-doped InAs quantum dot laser was reduced to 12 mA, and the corresponding threshold current density was 100 A/cm<sup>2</sup>. The highest output power of the laser was 183 mW, and the highest operating temperature reached 130 °C. This is of great significance for the application of InAs quantum dot laser device in the optical communication system.

**Key words:** quantum-dot laser, molecular beam epitaxy, threshold current density, output power, characteristic temperature

## 引言

自组织量子点具有与原子近似的分立能级和态密度, 表现出独特的光学和电学特性,

近年来受到人们的广泛关注<sup>[1-3]</sup>。量子点激光器具有低阈值电流密度、高特征温度、高增益分布、大调制带宽和长寿命等优点, 展现出比量子阱激光器更加优越的性能<sup>[4-10]</sup>。与量子阱相比, 量子点对位错

收稿日期: 2022-12-22, 修回日期: 2023-06-07

Received date: 2022-12-22, revised date: 2023-06-07

基金项目: 国家自然科学基金(61674096)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(61674096)

作者简介(Biography): 杜安天(1993-), 男, 山东滨州人, 博士研究生, 主要从事半导体激光器材料及器件研究。E-mail: atiandu@163.com

\* 通讯作者(Corresponding authors): Email: hlwang@qfnu.edu.cn; qgong@mail.sim.ac.cn

的敏感度也大大降低。位错在穿透量子阱或块状材料时,容易产生大量的非辐射复合中心。然而,对于量子点而言,穿透位错只能破坏几个量子点而不影响其他量子点,因此基于量子点器件的性能不会显著降低<sup>[11-13]</sup>。InAs/GaAs 量子点激光器是目前研究最为广泛的半导体量子点发光器件之一,它可以实现不含磷化物、氮化物和铋化物的 1.3  $\mu\text{m}$  重要光纤通信窗口的激励,在光通讯应用中具有很大潜力。InAs 和 GaAs 两种单晶的晶格失配为 7.2%,因此在 GaAs 上生长 InAs 易于实现 Stranski-Krastanov (SK) 生长模式<sup>[14]</sup>,并且 InAs 量子点材料与 GaAs 材料体系的兼容性好。自 1994 年第一个基于应变自组装生长模式的 InAs/GaAs 量子点激光器研制成功以来<sup>[15]</sup>,在器件性能和工作波长范围的研究都取得了长足的进步。近年来,InAs 量子点在单光子领域的应用也取得了重要进展<sup>[16]</sup>。

利用分子束外延(MBE)技术在 GaAs 上直接生长 InAs 量子点很难把量子点发光波长拓展至 1.3  $\mu\text{m}$ <sup>[17]</sup>。有源区采用 InAs DWELL(dot-in-well)结构减小了量子点周围的势垒和应力分布,可以将 InAs 量子点的发光波长拓展至 1.3  $\mu\text{m}$ 。InAs 量子点激光器的性能受到很多方面的影响,因此对生长条件的优化是很重要的一环。目前对不同的生长温度、量子点厚度、有源区层数、In 生长速率等已经有了很多的研究<sup>[18-20]</sup>,但是对有源区掺杂的研究还较少。有源区掺杂对激光器性能有很大影响,对其进行细致研究很有必要。

本文利用分子束外延技术在 GaAs 衬底上生长了不同的 InAs DWELL 量子点激光器结构。研究有源区 Be 掺杂对激光器性能的影响,结果表明对有源区进行 Be 掺杂可以有效降低 InAs 量子点激光器的阈值电流密度,提升激光器的输出功率,增加激光器的温度稳定性。

## 1 实验

使用 DCA 固态源 III-V 分子束外延系统在 4 英寸  $n^+$  GaAs(100)衬底上生长了 InAs 量子点激光器结构,激光器结构示意图如图 1 所示。先在 GaAs 衬底生长 1  $\mu\text{m}$  厚度的 N 型 GaAs 缓冲层,继续生长 1  $\mu\text{m}$  厚度的 AlGaAs 势垒层。然后以 6 个周期的 AlGaAs/GaAs 超晶格层作为过渡,其中 AlGaAs 和 GaAs 的厚度均为 2 nm。随后生长 70 nm 厚度的 GaAs 波导层, GaAs 和 AlGaAs 的生长温度均为 730  $^{\circ}\text{C}$  (热偶温度读数)。GaAs 基 InAs 量子点激光

器结构为分离限制层异质结构,有源区采用 5 层 InAs DWELL 结构。从下至上包括 2 nm 的  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  应变缓冲层 (Strained Buffer Layer, SBL), 2.7 ML 的 InAs 量子点, 6 nm 的  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  应变释放层 (Strained-Reducing Layer, SRL), 其中 In 的生长速率为 0.1 ML/s, Ga 的生长速率为 0.57 ML/s, 含 In 层的生长温度均为 620  $^{\circ}\text{C}$ 。在多层 InAs DWELL 结构中,用 GaAs 作为空间隔离层,厚度为 50 nm,生长温度为 730  $^{\circ}\text{C}$ 。本文通过在隔离层中引入 Be 作为掺杂剂,生长了两种不同的 InAs 量子点激光器并对其性能进行了测试分析与比较。其中,Be 的掺杂温度为 740  $^{\circ}\text{C}$ ,掺杂浓度为  $7.7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。

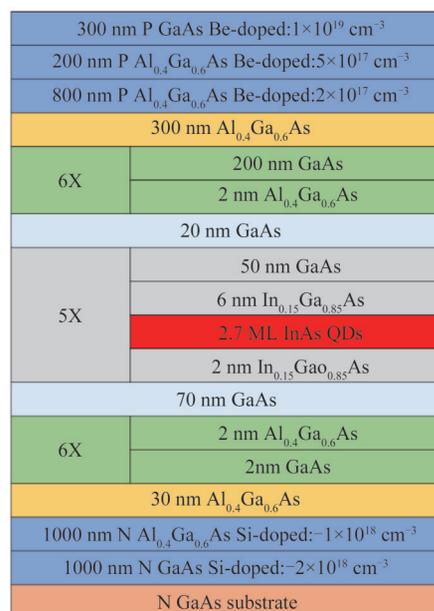


图 1 GaAs 基 InAs 量子点激光器结构示意图

Fig. 1 The schematic diagram of GaAs based InAs quantum dot laser structure

GaAs 基 InAs 量子点激光器的工艺采用标准的光刻和刻蚀工艺。刻蚀至有源区上层的 GaAs 波导层制作脊条,然后沉积 200 nm 的  $\text{SiN}_x$ 。继续在脊条上的上电极 GaAs 接触层用反应离子刻蚀 (RIE) 去掉  $\text{SiN}_x$  开好窗口,沉积 Ti/Pt/Au 形成 P 型欧姆接触,然后将 GaAs 衬底减薄至 150  $\mu\text{m}$ ,沉积 GeAu/Ni/Au 后退火形成 N 型欧姆结接触。图 2 给出了典型的脊条宽度为 3  $\mu\text{m}$  的量子点激光器的截面扫描电镜 (SEM) 图。对激光器的性能进行测试时,使用集成了温控的 Thorlabs ITC4020 电流源对激光器进行温度控制和电流调节,光谱测试采用 Thermo Nicolet iS50 傅里叶光谱仪,利用 Thorlabs S145C InGaAs 探

测器进行激光器功率测试,使用 Veeco 公司的 Multi-mode Nanoscope III SPM 设备测量了量子点样品的表面形貌。

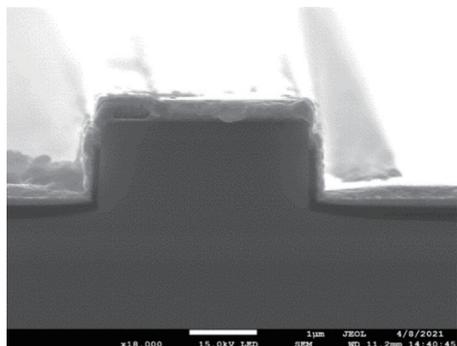


图2 GaAs基InAs量子点激光器截面SEM图

Fig. 2 Cross section SEM of InAs quantum dot laser on GaAs

## 2 结果与讨论

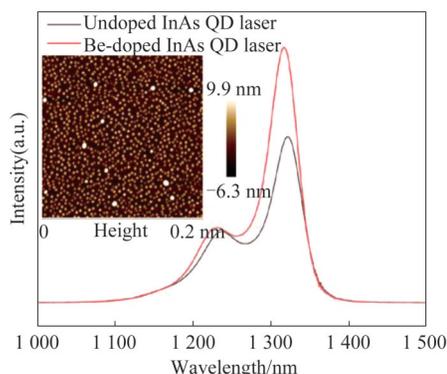


图3 GaAs基未掺杂和Be掺杂InAs量子点激光器的PL光谱,插图:InAs量子点 $2 \times 2 \mu\text{m}^2$  AFM图像

Fig. 3 The PL spectra of GaAs-based undoped and Be-doped InAs quantum dot lasers, Inset: a  $2 \times 2 \mu\text{m}^2$  AFM image of InAs quantum dots

GaAs基未掺杂和Be掺杂InAs量子点激光器材料的光致荧光谱(PL)测试结果如图3所示。未掺杂与Be掺杂量子点激光器材料的PL光谱的半峰宽分别为50.25 nm和46.71 nm。与未掺杂量子点相比,Be掺杂InAs量子点的PL强度明显增强,半峰宽也更窄,这与后续器件的性能测试结果一致。

为了检验生长的量子点结构的质量,我们在生长量子点激光器材料时生长了InAs量子点结构测试片,测试片在生长InAs DWELL结构后,在表面沉积了一层InAs量子点用于原子力显微镜(AFM)的测试。有源区Be掺杂对表面的量子点影响不大,量子点形貌与大小没有明显区别,图3的插图给出了

掺杂样品表面生长 $2 \times 2 \mu\text{m}^2$  InAs量子点的AFM图像。从图中可以看出,InAs量子点排列紧密,边界清晰,量子点密度达到 $4 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$ ,表明成功地生长了质量高的量子点结构。

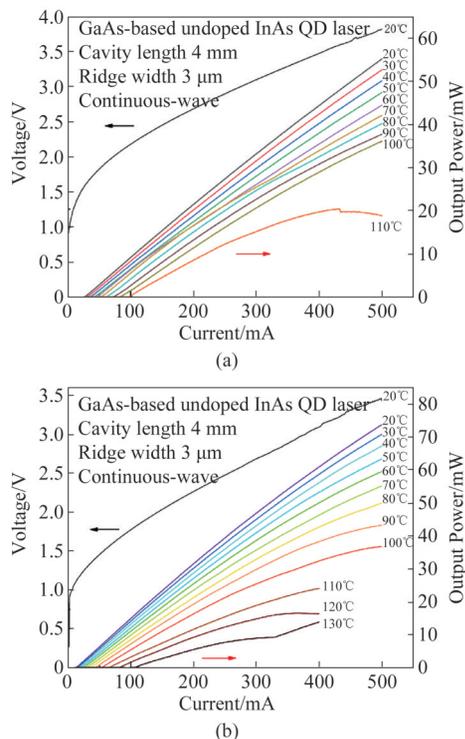


图4 连续工作模式下GaAs基InAs量子点激光器的IVP特性曲线:(a)未掺杂,(b)Be掺杂

Fig. 4 The IVP characteristic curves of GaAs-based InAs quantum dot laser in CW mode: (a) undoped, (b) Be-doped

典型GaAs基未掺杂和Be掺杂InAs量子点激光器的IVP曲线如图4所示。当温度为 $20^\circ\text{C}$ 时,未掺杂和Be掺杂激光器的阈值电流密度分别为 $116 \text{ A/cm}^2$ 和 $100 \text{ A/cm}^2$ ,这表明Be掺杂可以降低激光器的阈值电流密度。这是由于隔离层Be掺杂产生的耗尽区势垒发生变化,可以提高空穴的空间限制,有效地将载流子限制在有源区之中,从而降低激光器激射所需要的阈值电流。随着温度的升高,激光器的斜效率逐渐减小。当温度大于 $100^\circ\text{C}$ 时,激光器的性能迅速下降。这是因为随着温度升高,会增加填充介质的损耗,而且载流子散射加剧,使得能够转化为光子的电子-空穴对的数目减少,基态强度变小,光的损耗抵消了更多的增益,使得净增益变小,导致激光器的性能下降。注入电流增加至500 mA时,Be掺杂InAs量子点激光器的输出功率能够达到75 mW,比未掺杂InAs量子点激光器的输出功率高了14 mW。

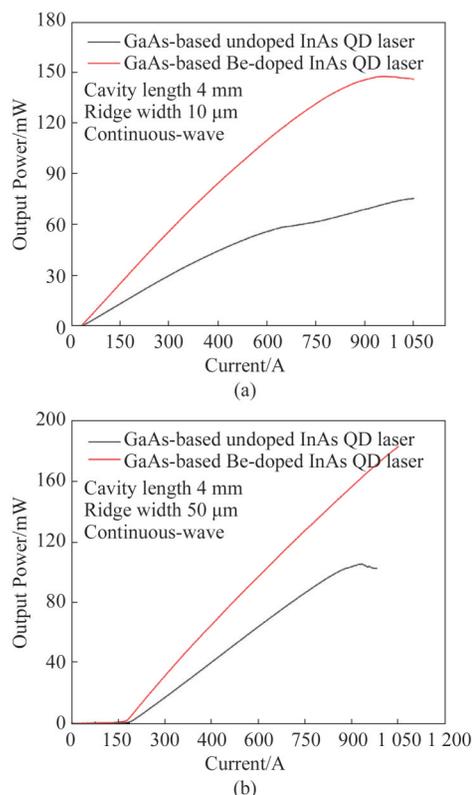


图5 连续工作模式下不同条宽 GaAs 基 InAs 量子点激光器的  $IP$  特性曲线:(a)  $10\ \mu\text{m}$ , (b)  $50\ \mu\text{m}$

Fig. 5 The  $IP$  characteristic curves of GaAs-based InAs quantum dot laser with different ridge widths in CW mode: (a)  $10\ \mu\text{m}$ , (b)  $50\ \mu\text{m}$

对腔长为  $4\ \text{mm}$ , 脊条宽度分别为  $10\ \mu\text{m}$  和  $50\ \mu\text{m}$  的两种不同的激光器进行了最大输出功率的测试, 测试结果如图 5 所示。脊条宽度为  $10\ \mu\text{m}$  时, 未掺杂和 Be 掺杂激光器的最大输出功率分别为  $75\ \text{mW}$  和  $146\ \text{mW}$ 。脊条宽度为  $50\ \mu\text{m}$  时, 未掺杂和 Be 掺杂激光器的最大输出功率分别为  $102\ \text{mW}$  和  $183\ \text{mW}$ 。由于 Be 掺杂能够促进空穴的扩散, 为 InAs 量子点激光器带来了更高的基态模式增益。另外, 在 Be 掺杂后多层量子点有源区的增益分布更加一致, 提高了总的增益, 从而使整体的光电转换效率得到提升, 因此增大了激光器的输出功率<sup>[21]</sup>。同时, Be 的掺入会使导电性增强, 降低激光器的电压, 提升斜效率。Be 掺杂 InAs 量子点激光器的工作温度可以高达  $130\ ^\circ\text{C}$ , 大大提高了量子点激光器的工作温度, 这是由于 Be 的掺入可以抑制空穴在其紧密间隔的能级上的热增宽<sup>[22]</sup>。

InAs 量子点激光器具有良好的温度稳定性, 在温度  $20\ ^\circ\text{C}$  下激光器发射光谱随注入电流的变化如图 6 所示。对于未掺杂的激光器, 注入电流

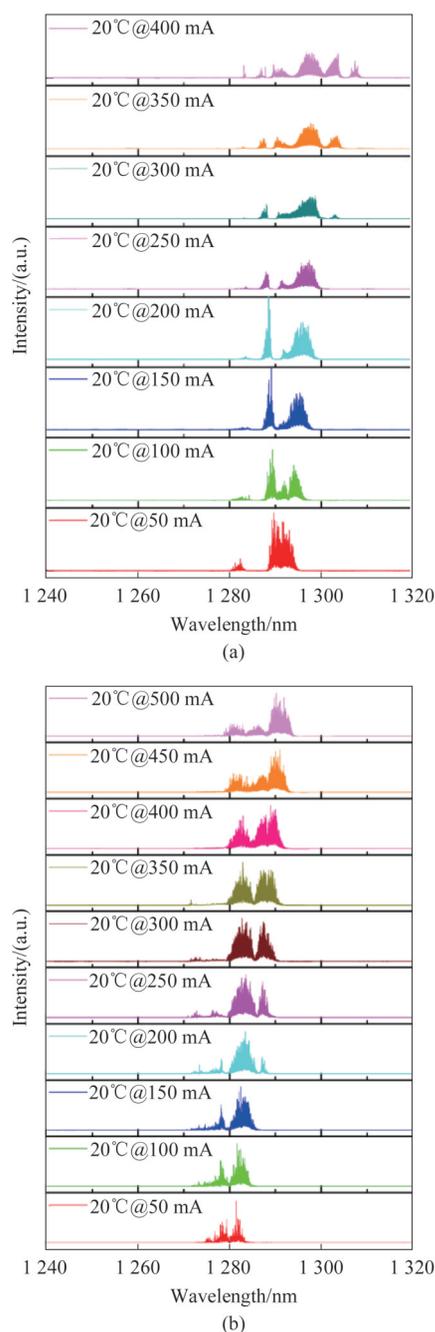


图6  $20\ ^\circ\text{C}$  时 GaAs 基 InAs 量子点激光器发射光谱随注入电流的变化:(a) 未掺杂, (b) Be 掺杂

Fig. 6 The emission spectra of GaAs-based InAs QD laser with different injection currents at the temperature of  $20\ ^\circ\text{C}$ : (a) undoped, (b) Be-doped

为  $50\ \text{mA}$  和  $400\ \text{mA}$  时, 激发波长分别为  $1290.7\ \text{nm}$  和  $1298.1\ \text{nm}$ , 波长随注入电流变化的红移速度为  $0.021\ \text{nm}/\text{mA}$ 。对于 Be 掺杂的 InAs 激光器, 当注入电流为  $50\ \text{mA}$  和  $500\ \text{mA}$  时, 激发波长分别为  $1280.0\ \text{nm}$  和  $1288.2\ \text{nm}$ , 波长随注入电流变化的红移速度为  $0.018\ \text{nm}/\text{mA}$ 。这表明随着注入电流

的增加,Be 掺杂对激发波长的影响并不大,电流注入带来的发热效应不明显。

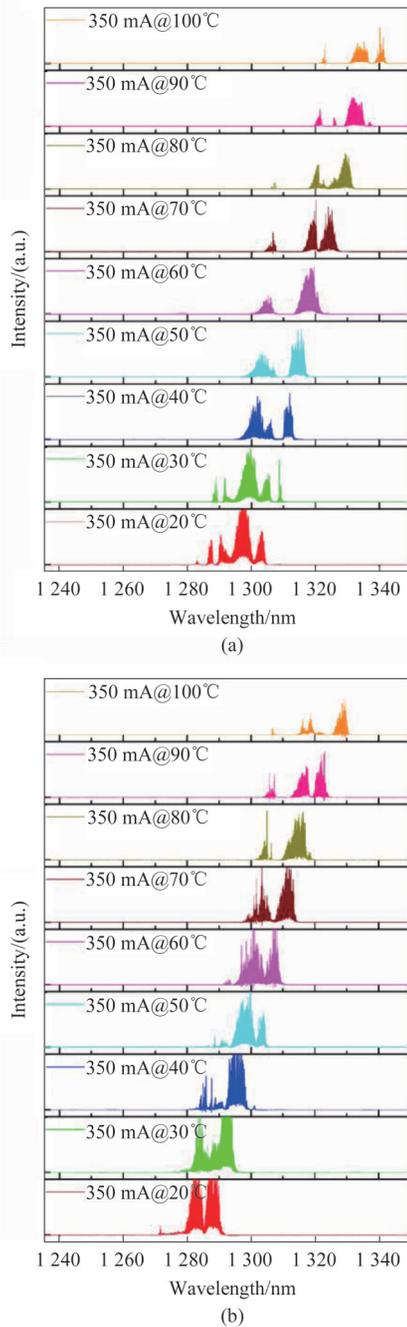


图7 注入电流 350 mA 时 GaAs 基 InAs 量子点激光器发射光谱随温度的变化:(a)未掺杂,(b) Be 掺杂

Fig. 7 The emission spectra of GaAs-based InAs QD laser with different temperatures at the same injection current of 350 mA:(a) undoped, (b) Be-doped

在注入电流为 350 mA 时量子点激光器的发射光谱随温度的变化如图 7 所示。对于未掺杂的 InAs 激光器,温度为 20 °C 和 100 °C 时,激发波长分别为 1 295. 1 nm 和 1 336. 8 nm,波长随温度变化的红移

速度为 0. 521 nm/K。对于 Be 掺杂的 InAs 激光器,温度为 20 °C 和 100 °C 时,激发波长分别为 1 285. 6 nm 和 1 324. 1 nm,波长随温度变化的红移速度为 0. 481 nm/K。Be 掺杂的量子点激光器的发光光谱表现出较低的温度依赖性,这表明 Be 掺杂会降低温度升高对波长红移的影响,Be 掺杂 InAs 量子点激光器具有更好的温度稳定性,这在随后的特征温度的对比中也得到了印证。这主要是由于在距离较近的空穴能级中,Be 的掺入改善了高温对空穴的热破坏,显著抑制了量子点和它们周围的势垒之间的相互扩散。在 Be 掺杂的材料中,Ga 空位的浓度较低,导致 In 与 Ga 之间的互扩散减少<sup>[23]</sup>。

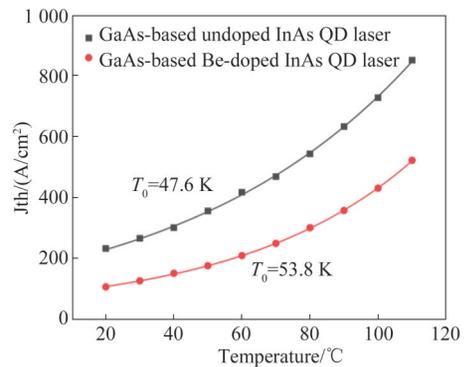


图8 GaAs 基 InAs 量子点激光器特征温度的变化曲线

Fig. 8 The characteristic temperature curves of GaAs-based InAs quantum dot laser

激光器的温度稳定性是衡量激光器性能的重要指标之一。半导体激光器的阈值电流与温度成指数关系<sup>[24]</sup>:

$$J_{th} = J_0 \exp\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (1)$$

式(1)中, $T_0$ 为激光器的特征温度,其数值越大表明激光器阈值电流随着温度的变化就越小。实验测量的量子点激光器阈值电流能密度随温度的变化曲线如图 8 所示,通过拟合得到未掺杂和 Be 掺杂 InAs 量子点激光器的特征温度分别为 47. 6 K 和 53. 8 K。与未掺杂的量子点激光器相比,Be 掺杂的激光器的特征温度有所提高,这表明 Be 的掺入可以提高 InAs 量子点激光器的温度稳定性。InAs 量子点自身价带空穴能级间隔(10 meV)小于室温热激发能级(25 meV),随着温度的升高,空穴将从基态不断向更高能级的激发态跃迁,进而降低载流子辐射复合几率,导致激光器的增益随着温度的升高而明显减小<sup>[25]</sup>。在量子点附近的势垒层中进行 p 型掺杂,能给量子点价带能级提供额外的空穴,会有效

地抑制由热激发引起的热空穴能级展宽。

### 3 结论

利用分子束外延技术在 GaAs(100)衬底上成功制备了 1.3  $\mu\text{m}$  波段的 InAs/GaAs 量子点激光器。在室温连续工作模式下,对未掺杂和 Be 掺杂 InAs 量子点激光器的输出性能、光谱性能和温度稳定性进行了测试分析与比较。与未掺杂的激光器相比,Be 掺杂可以有效地降低激光器的阈值电流密度到 100 A/cm<sup>2</sup>,增大激光器的输出功率到 183 mW,最高工作温度可以提高到 130 °C,激光器具有更好的温度稳定性。这对 InAs 量子点激光器在高速光纤通信领域的应用具有重要意义。

### References

- [1] Wang Z, Qi W, Feng Q, *et al.* InAs/GaAs quantum dot single-section mode-locked lasers directly grown on Si (001) with optical self-injection feedback [J]. *Optics Express*, 2020, **29**(2):674–683.
- [2] Liu A Y, Srinivasan S, Norman J, *et al.* Quantum dot lasers for silicon photonics [Invited] [J]. *Photonics Research*, 2015, **3**(5):050000B1.
- [3] Yang J, Liu Z, Jurczak P, *et al.* All-MBE grown InAs/GaAs quantum dot lasers with thin Ge buffer layer on Si substrates[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2020, **54**(3): 035103.
- [4] Jung D, Norman J C, Kennedy M J, *et al.* High efficiency low threshold current 1.3  $\mu\text{m}$  InAs quantum dot lasers on on-axis (001) GaP/Si [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, **111**(12):122107.
- [5] Yuan Y, Su X B, Yang C A, *et al.* Molecular beam epitaxial growth of InAs quantum dots on GaAs for high characteristics temperature lasers [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2020, **39**(6):667.
- [6] Kageyama T, Nishi K, Yamaguchi M, *et al.* Extremely High Temperature (220°C) Continuous-Wave Operation of 1300-nm-range Quantum-Dot Lasers [C]. 2011 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and 12th European Quantum Electronics Conference (CLEO EUROPE/EQEC). IEEE 2011.
- [7] Ruiz-Marin N, Reyes D F, Stanojevic L, *et al.* Effect of the AlAs capping layer thickness on the structure of InAs/GaAs QD [J]. *Applied Surface Science: A Journal Devoted to the Properties of Interfaces in Relation to the Synthesis and Behaviour of Materials*, 2022(Jan.30):573.
- [8] Qin L, Xu B, Xu X S. Enhancement of excited-state emission of InAs/GaAs quantum dots with large-period photonic crystal [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2019, **38**(5):559–565.
- [9] Wan Y, Inoue D, Jung D, *et al.* Directly modulated quantum dot lasers on silicon with a milliampere threshold and high temperature stability [J]. *Photonics Research*, 2018, **6**(8):776.
- [10] Alexander R R, Agarwal H, Groom K M, *et al.* Systematic study of the effects of modulation p-doping on 1.3- $\mu\text{m}$  quantum-dot lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2007, **43**(12):1129–1139.
- [11] Qi W, Zhang J, Wang J H, *et al.* Phosphorus-free 151  $\mu\text{m}$  InAs quantum-dot microdisk lasers on metamorphic InGaAs/SOI platform [J]. *Optics Letters*, 2020, **45**(7):2042–2045.
- [12] Mi Z, Bhattacharya P, Yang J, *et al.* Room-temperature self-organised In<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>As quantum dot laser on silicon [J]. *Electronics Letters*, 2005, **41**(13):p.742–744.
- [13] Chen S, Chen S, Li W, *et al.* Electrically pumped continuous-wave III-V quantum dot lasers on silicon [J]. *Nature Photonics* 2016, **10**(5):307–311.
- [14] Ray S K, Choi T L, Groom K M, *et al.* High-Power 1.3- $\mu\text{m}$  Quantum-Dot Superluminescent Light-Emitting Diode Grown by Molecular Beam Epitaxy [J]. *Photonics Technology Letters IEEE*, 2007, **19**(2):109–111.
- [15] Mukai K, Ohtsuka N, Sugawara M, *et al.* Self-Formed In<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>As Quantum Dots on GaAs Substrates Emitting at 1.3 $\mu\text{m}$  [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1994, **33**(Part 2, No. 12A):L1710–L1712.
- [16] Stephan D, Bhattacharyya J, Huo Y H, *et al.* Inter-sublevel dynamics in single InAs/GaAs quantum dots induced by strong terahertz excitation [J]. *Applied Physics Letters* 2016, **108**(8):082107.1–082107.4.
- [17] Gong Q, Notzel R, Hamhuis G J, *et al.* Leveling and rebuilding: An approach to improve the uniformity of (In, Ga)As quantum dots [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, **81**(10):1887–1889.
- [18] Joyce P B, Krzyzewski T J, Bell G R, *et al.* Effect of growth rate on the size, composition, and optical properties of InAs/GaAs quantum dots grown by molecular-beam epitaxy [J]. *Physical Review B Condensed Matter*, 2000, **62**(16):10891–10895.
- [19] Wang T, Lee A, Tutu F, *et al.* The effect of growth temperature of GaAs nucleation layer on InAs/GaAs quantum dots monolithically grown on Ge substrates [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **100**(5):4600.
- [20] Salhi A, Fortunato L, Martiradonna L, *et al.* Enhanced modal gain of multilayer InAs/InGaAs/GaAs quantum dot lasers emitting at 1300 nm [J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, **100**(12):1915.
- [21] Cao Q, Yoon S F, Liu C Y, *et al.* Effects of rapid thermal annealing on optical properties of p-doped and undoped InAs/InGaAs dots-in-a-well structures [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, **104**(3):20.
- [22] Kumagai N, Watanabe K, Nakata Y, *et al.* Optical properties of p-type modulation-doped InAs quantum dot structures grown by molecular beam epitaxy [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2007, **301**–302:805–808.
- [23] Li Q, Wang X, Zhang Z, *et al.* Development of Modulation p-Doped 1310 nm InAs/GaAs Quantum Dot Laser Materials and Ultrashort Cavity Fabry-Perot and Distributed-Feedback Laser Diodes [J]. *ACS PHOTONICS*, 2017: *acsphotonics.5*(3):7b01355.
- [24] Yue L, Gong Q, Cao C, *et al.* High-performance InAs/GaAs quantum dot laser with dot layers grown at 425°C [J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, **11**(6):39–42.
- [25] Fathpour S, Mi Z, Bhattacharya P, *et al.* The role of Au-

---

ger recombination in the temperature-dependent output characteristics ( $T_0=\infty$ ) of p-doped 1.3  $\mu\text{m}$  quantum dot la-

ters [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **85**(22): 5164-5166