

硅基 III-V 族量子点激光器的发展现状和前景

王霆 张建军 Huiyun Liu

Quantum dot lasers on silicon substrate for silicon photonic integration and their prospect

Wang Ting Zhang Jian-Jun Huiyun Liu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 204209 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.204209

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.204209>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I20>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

用于铯原子内态操控的双光子拉曼激光的产生及应用

Generation and application of two-photon Raman laser for manipulation of internal state of Cs atom

物理学报.2015, 64(18): 184209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.184209>

多横模垂直腔面发射激光器及其波长特性

Multi-transverse-mode and wavelength split characteristics of vertical cavity surface emitting laser

物理学报.2015, 64(16): 164203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164203>

基于半导体环形激光器的高速双向双信道混沌保密通信

High speed bidirectional dual-channel chaos secure communication based on semiconductor ring lasers

物理学报.2015, 64(15): 154205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154205>

243 nm 稳频窄线宽半导体激光器

A narrow linewidth diode laser at 243 nm

物理学报.2015, 64(13): 134205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.134205>

双路激光混沌复用系统的混沌同步及安全性能研究

Performance of chaos synchronization and security in dual-chaotic optical multiplexing system

物理学报.2015, 64(12): 124206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124206>

专题: 硅基光电子物理和器件

## 硅基III-V族量子点激光器的发展现状和前景

王霆<sup>1)†</sup> 张建军<sup>1)</sup> Huiyun Liu<sup>2)</sup>

1) (中国科学院物理研究所, 北京 100190)

2) (Department of Electrical and Electronic Engineering, University College London, Torrington Place, London, UK)

(2015年9月7日收到; 2015年9月25日收到修改稿)

本文简要综述了硅基III-V族量子点激光器的研究进展. 在介绍了量子点激光器的优势和发展后, 重点介绍了近年来硅基、锗基III-V族量子点材料生长上的突破性进展及所带来的器件性能的大幅提高, 如实现了锗基和硅基 $1.3\ \mu\text{m}$  InAs/GaAs量子点激光器的室温激射, 锗基量子点激光器的阈值电流低至 $55.2\ \text{A}/\text{cm}^2$ 并可达 $60\ ^\circ\text{C}$ 以上的连续激射, 通过锗硅虚拟衬底, 在硅基上实现了 $30\ ^\circ\text{C}$ 下以 $16.6\ \text{mW}$ 的输出功率达到4600 h的激光寿命, 这些突破性的进展为硅基光电子集成打开了新的大门.

关键词: 半导体激光, 激光材料, 集成光学, 光电子器件

PACS: 42.55.Px, 42.70.Hj, 42.82.-m, 85.70.-q

DOI: 10.7498/aps.64.204209

## 1 引言

随着微电子器件的尺寸日益逼近其物理极限, 摩尔定律很难进一步延续, 硅集成电路的发展面临着巨大的挑战和机遇. 硅基光电子学旨在将光子学器件和电子学器件集成在硅晶片上, 把互补型金属氧化物半导体(CMOS)工艺兼容的激光器、光调制器、光波导和光探测器等组件集成到微电子电路从而实现硅基光电子集成. 它兼具光子学器件的高传输处理速度、高传输带宽和电子学器件的低成本、微尺寸、高集成度等特质, 有望给信息产业领域注入新的生机和活力, 吸引了大量科学家和工程师的研究兴趣<sup>[1]</sup>. 然而, 由于硅是间接带隙半导体, 不具有良好的发光特性, 因此实现硅基光电子集成的首要任务是如何实现硅基高效率发光的激光光源. 在过去10多年间, 持续的投入和努力使该领域得到了较快的发展, 如美国麻省理工学院 Michel 研究组通过引入张应变和重掺杂的方法, 大幅提高了发光效率, 实现了电抽运的硅基锗激光输出<sup>[2]</sup>; 德国 Grützmacher 研究小组在硅基上外延生长了锡含

量高达12.6%的高质量锗锡薄膜, 观察到了光抽运的硅基直接带隙锗锡合金的激光输出<sup>[3]</sup>. 然而其发光效率依然没有达到商用水平, 因此在硅基全IV族激光光源方面, 仍需进一步提高锗中的张应变、锗锡合金的薄膜质量及锡的含量, 或者探索巧妙设计的锗/硅超晶格结构<sup>[4]</sup>. 而另一方面, III-V族半导体如GaAs, InAs是直接带隙材料, 具有极高的发光效率, 将III-V族材料高质量外延生长在硅衬底上则可获得高效激光光源. 在硅基上生长III-V族材料存在着反向畴、晶格失配和热膨胀系数差异等问题, 可喜的是, 2011年伦敦学院大学 Liu等<sup>[5]</sup>在锗衬底上成功生长出高质量的InAs/GaAs量子点并实现了 $1.3\ \mu\text{m}$ 波长量子点激光器的室温连续激射, 而后进一步实现了硅基InAs/GaAs量子点的室温连续激射<sup>[5-8]</sup>.

## 2 硅基III-V族量子点激光器

## 2.1 量子点激光器的主要优势

自从1963年双异质结半导体激光器被提出以来, 量子结构的激光器就引起了广泛的关注和研

† 通信作者. E-mail: wangting@iphy.ac.cn

究 [9,10]. 尤其是在过去的 30 年, 生长制备技术得到了全面的发展和提高, 如分子束外延技术, 它可把材料生长的精度控制在原子尺度, 已成功地生长制备出高质量的二维量子阱、一维量子线和零维量子点结构. 零维量子点结构能实现三维的量子限制, 被认为是人造原子, 且随着量子点物理尺寸的减少, 量子限制效果会随之增强 [11,12]. 在半导体量子阱激光器中, 注入的载流子会受到热激发而从低能级跃迁到高能级, 例如从基态跃迁到激发态乃至异质结构中, 因此高能级的载流子复合会导致阈值电流的显著升高, 从而降低激光的光电转换效率. 1982 年, Arakawa 和 Sakaki [12] 预测了量子点激光器可以大幅度减少由载流子注入引起的热激发, 考虑到阈值电流和温度之间是幂次方关系, 量子点对于温度的不敏感性可以大幅度提高激光

器的工作温度和器件寿命. 结合高温生长 GaAs 分隔层和调制掺杂量子点等技术, 量子点激光器的特征温度  $T_0$  相对于量子阱激光器得到了大幅度提高 [13–16]. 图 1 显示不同温度下 GaAs/InGaAs 量子点和量子阱激光器的输出功率随阈值电流的变化 [17]. 由图 1 可见, 量子阱激光器 (图 1 (b), (c)) 的输出功率和阈值电流的比值随温度的增加出现大幅衰减, 且最高工作温度只能在 85 °C, 而在量子点激光器中 (图 1 (a)), 输出功率和阈值电流的比值在 -40—100 °C 之间并没有明显变化. 近 10 多年来, 量子点激光器多个方面的优势, 如低阈值电流密度、高工作温度和调制频率都已成功实现, 目前自组装生长的 InAs/GaAs 量子点激光器在通信波段已被广泛应用 [18–20].

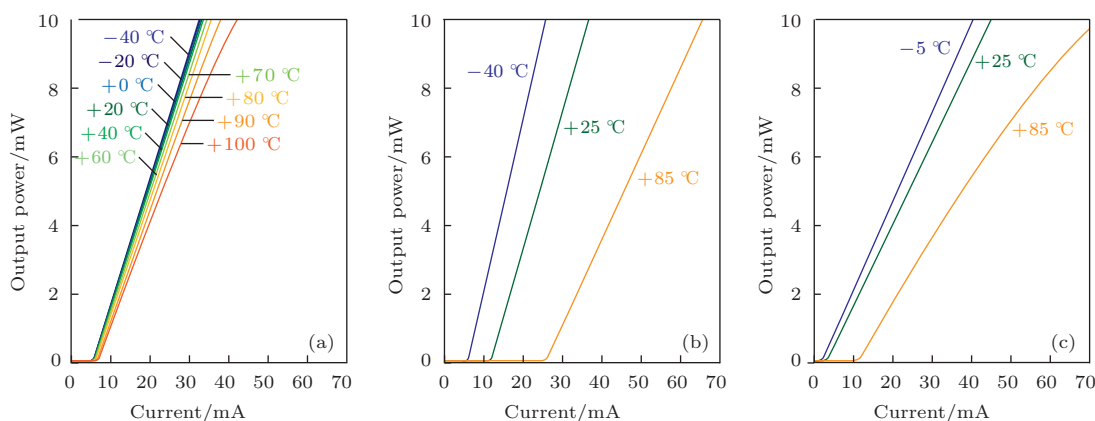


图 1 量子点 (a) 和量子阱激光器 (b), (c) 的变温测试对比, 量子点激光器对温度变化的敏感度更低, 更稳定 [17]  
 Fig. 1. Temperature dependent  $L-I$  measurements of quantum dot (a) and quantum well (b), (c) lasers. Quantum dot lasers are less sensitive to temperature variations [17].

## 2.2 量子点激光器的发展

1994 年 Hirayama 等 [21] 首次实现了半导体量子点激光器的制备, 其制备方法是将在 InGaAs/GaInAsP/InP 量子阱通过湿法刻蚀获得了类似于量子点的盒状结构, 然后多层生长覆盖层. 在 77 K 脉冲模式下, 该激光器激发态激光的阈值电流密度约为 7.6 kA/cm<sup>2</sup> [21], 高于传统量子阱激光器室温激光的阈值电流密度一个数量级. 在同一年, Kirstaedter 等 [22] 宣布了自组装生长的 InGaAs/GaAs 量子点激光器的首次基态激光, 在 77 K 其阈值电流密度降至 120 A/cm<sup>2</sup>, 室温阈值电流密度为 950 A/cm<sup>2</sup>. 然而在随后的几年里量子点激光器的性能一直局限于较低的工作温度和

较高的阈值电流. 这主要是由于当时自组装生长的量子点的尺寸不均匀, 从而导致荧光光谱的半高宽增大, 因而发光增益会被宽谱平均分摊, 降低波峰增益. 量子点的发光增益主要决定于量子点的大小、密度、形貌、尺寸均匀性以及堆垛的层数. 1999 年, Liu 等 [13] 实现了 1.3 μm 量子点激光器室温 26 A/cm<sup>2</sup> 的低阈值电流密度, 这是量子点激光器首次超过传统的量子阱激光器. 通过高温生长 GaAs 分隔层和调制掺杂量子点等技术, 2004 年, Liu 等 [16] 将 InAs/GaAs 量子点激光器的阈值电流密度进一步降低到 19 A/cm<sup>2</sup> 特征温度  $T_0$  提高到 111 K. 图 2 展示了自 1960 年以来不同衬底上不同结构的半导体激光器的发展进程, 从异质结到量子阱到量子点, 再到近期的硅基量子点激光器.

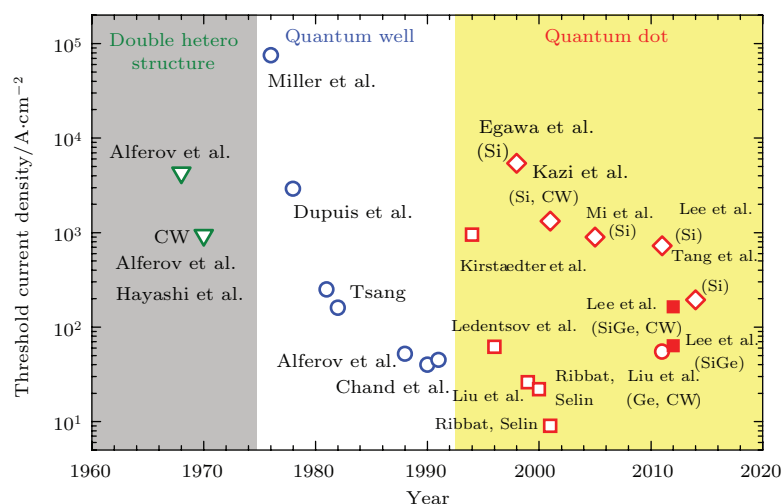


图2 1960年以来不同衬底上不同结构的半导体激光器的发展进程 [23]

Fig. 2. The development of semiconductor lasers since 1960 [23].

表1 硅基 III-V 族激光器的寿命进展

Table 1. The lifetime of III-V lasers on silicon substrate.

年份	技术	阈值电流密度和激射功率	位错密度	器件寿命	文献
1987	GaAs/AlGaAs 自组装量子阱	2 mW	$10^7/\text{cm}^2$	< 10 s	[24]
1991	InGaAs/AlGaAs 自组装量子阱	2000 A/cm <sup>2</sup> , 2 mW	—	10 h	[25]
2000	InGaAs 类量子点	1320 A/cm <sup>2</sup> , 0.5 mW	—	80 h	[26]
2001	图形衬底上的 GaAs/AlGaAs 自组装量子阱	810 A/cm <sup>2</sup> , 1 mW	$2 \times 10^6/\text{cm}^2$	200 h	[27]
2003	GeSi/Si 衬底上的 GaAs/AlGaAs 自组装量子阱	270 A/cm <sup>2</sup> , < 1 mW	$2 \times 10^6/\text{cm}^2$	4 h	[28]
2014	Ge/Si 虚拟衬底上的 InAs/GaAs 自组装量子点	2000 A/cm <sup>2</sup> , 16.6 mW	$2 \times 10^8/\text{cm}^2$	4600 h	[29]

表 1 显示了自 1987 年以来硅基 III-V 族半导体激光器的性能提升. 从最初硅基量子阱激光器仅有 10 s 的输出寿命, 历时 27 年于 2014 年在硅基量子点激光器中首次达到了 4600 h 的工作时间. 由表 1 可见, 尽管其位错密度并没有明显减少, 但其性能得到了大幅提升, 说明现有的外延生长技术有效地阻止了位错对发光结构层的影响. 这也是因为量子点的独立特性使得单个有位错的量子点并不会影响其他量子点的光学性能, 从而大幅度减少了位错对其光学特性的影响. 而量子阱器件因为是二维量子薄膜材料, 导致位错很容易在薄膜层里衍生和传递, 从而降低了发光效率.

### 2.3 硅基量子点激光器的异军突起

众所周知, IV 族材料作为光电器件的主要弊端在于其间接带隙导致的低发光效率 [30]. 在过去的 20 多年里, 科研人员尝试了多方面的手段试图

在硅基结构上实现有效的激光光源如硅拉曼激光器 [31]. 尽管硅拉曼激光已在室温实现了连续激射, 但其光电转化效率很低, 仍然必须依赖于外界的抽运光源 [31], 因而使得使用载流子注入的方式无法实现有效的光电转换, 其光增益不足以达到激射条件. 这就意味着此方法不具有实际应用价值. 其他研究方向, 如低维硅纳米晶体和硅纳米孔状结构也曾被重点研究 [32], 但光增益和损耗问题一直无法得到解决.

2005 年, 通过使用倒装焊技术, 即将 III-V 族量子阱激光器倒装焊到硅衬底上, Intel 联合 UCSB 首次实现了 III-V 族激光器在硅基上的激射 [33]. 尽管此硅基激光器具有高功率、高稳定性及可被进一步集成等优点. 但依然存在着明显的缺点, 如工艺复杂、倒装焊后的器件导热性较差等, 最终导致器件良品率极低, 无法实现大规模量产. 若要实现硅基光电器件的高度集成, 将 III-V 族材料直接通过

外延生长到硅基上应该是最具潜力的方向之一。

硅基 III-V 族材料的外延生长主要受限于 III-V 族和 Si 的极性不同、晶格失配和热膨胀系数差异, 因此相应的会出现反相畴 (APDs)、穿透位错 (TDs) 和微裂缝等问题 [34,35]。

反相畴 (APDs): III-V 族材料如 GaAs, InAs 是由两种不同原子构成的晶格, 而 IV 族材料仅有单一原子。在 IV 族衬底材料的表面上会不可避免地存在原子台阶, 因此在原子台阶处可能产生错误的晶键 (Ga—Ga 或者 As—As), 称之为反向畴。反相畴是一种平面位错, 会产生非辐射复合中心, 降低器件性能。

穿透位错 (TDs): GaAs 和 Si 有 4.1% 的晶格失配, InP 和 Si 有 7.5% 的晶格失配, 这都会导致外延生长的 III-V 族材料中产生大量应力。应力弛豫会直接产生高密度的穿透位错, 通常在  $10^{10}/\text{cm}^2$ 。这些穿透位错也会形成非辐射复合中心, 大幅减小器件的发光效率和寿命。

微裂缝: III-V 族和 IV 族材料不同的热膨胀系数会产生热应力从而导致进一步的晶格失配, 最终产生微裂缝。

### 2.3.1 硅基直接外延生长 III-V 族材料

硅基 III-V 族的直接外延生长已经被探讨和研究了 30 多年 [36,37]。但在这 30 多年的研究中, 硅基的 III-V 族材料的位错密度仍然在  $10^6 \text{ cm}^{-2}$  以上。硅基量子阱激光器都存在着极高的阈值电流和极短的寿命 ( $\sim 10 \text{ h}$ ) [38-41]。幸运的是, 相对于量子阱, 量子点的光学特性受高位错密度的影响较低, 这意味着使用量子点可能实现高质量的硅基发光器件。

1999 年, Linder 等 [42] 首先报道了在硅衬底上 InGaAs 量子点的自组装生长。他们首先在 2" 的硅 (100) 衬底上生长 4  $\mu\text{m}$  厚的 GaAs 缓冲层, 其中包括在 350  $^\circ\text{C}$  下生长 30 nm 的形核层, 然后在 780  $^\circ\text{C}$  退火 10 min。然而得到的晶体质量不高, 可以看到极高密度的穿透位错。在  $1.2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  的位错密度下, 该器件在 80 K 低温下成功实现了脉冲激光, 其阈值电流密度为 3.85  $\text{kA}/\text{cm}^2$ 。2001 年, Kazi 等 [43] 报道了第一个硅基 InGaAs 量子点的连续室温激光。相对于 Linder 等的方法, 他们在 2" 硅 (100) 衬底上生长了 1  $\mu\text{m}$  厚的 GaAs 缓冲层, 形核层为 10 nm 的 GaAs (生长温度为 400  $^\circ\text{C}$ ), 且去掉

了缓冲层生长后的高温退火过程, 该器件的阈值电流密度降低至 1.32  $\text{kA}/\text{cm}^2$ 。如图 3 所示, 该硅基 InGaAs 量子点激光器的固定功率输出寿命约为 80 h, 而相同测试条件下量子阱激光器的寿命仅为 20 h, 寿命得到了 4 倍以上的提高 [43]。2005 年, 通过使用 10 层 InGaAs/GaAs 量子点位错过滤层, Bhattacharya 等 [44-48] 报道了 InGaAs 量子点激光器在 1.1  $\mu\text{m}$  的室温激光, 其阈值电流密度进一步降低到 900  $\text{A}/\text{cm}^2$ , 同时特征温度  $T_0$  也提高至 244 K。

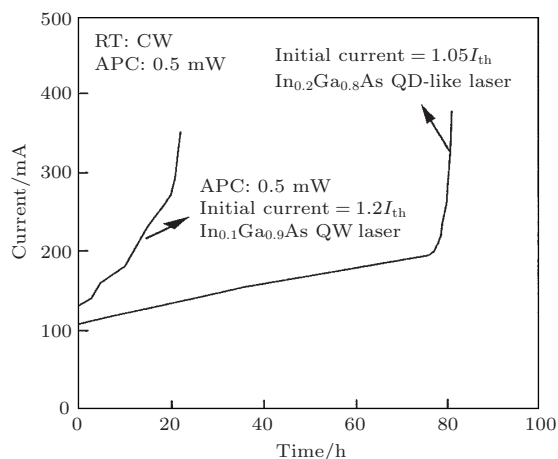


图3 硅基 InGaAs 量子阱和量子点激光器的稳定性对比, 测试条件: 室温、固定输出功率 0.5 mW [43]

Fig. 3. The stability comparison of InGaAs quantum well and quantum dot lasers on silicon substrate. Experimental conditions: room temperature, fixed output power at 0.5 mW [43].

以上研究极大地增强了实现硅基高效 III-V 族量子点激光器的信心, 然而阈值电流依然过高, 且未达到通信波段所需求的 1.3 或 1.55  $\mu\text{m}$  激光波长, 使得其实用性仍受到很大限制。2008 年, Li 等 [49] 在 6 $^\circ$  斜切硅 (100) 衬底上实现了室温 1.3  $\mu\text{m}$  InAs/GaAs 量子点的荧光发光, 其室温半高宽为 57 meV, 但没能实现激光发射。后来, Wang 等 [6,7] 实现了硅基 1.3  $\mu\text{m}$  InAs/GaAs 量子点激光器的室温连续激光。通过在 400  $^\circ\text{C}$  以 0.1 ML/s 的低生长速率生长一个 30 nm 的 GaAs 形核层, 大量的位错会被限制在 50 nm 的 GaAs/Si 界面以内。该研究表明 GaAs 在硅基的形核温度是减少反相畴和位错密度的关键 [6]。此外, 在 1  $\mu\text{m}$  的 GaAs 缓冲层里, 超晶格位错过滤层技术也被用于减少穿透位错。最后在缓冲层之上生长 5 层 InAs/InGaAs/GaAs 量子点结构用作发光层。最终他们实现了硅基 1.3  $\mu\text{m}$  波长量子点激光器的室温激光, 阈值电流密度减

少到  $650 \text{ A/cm}^2$ . 此外, 该组还发现 AlAs 形核层比 GaAs 更能减少 GaAs/Si 界面的位错密度和粗糙度, 通过使用 InAlAs/GaAs 取代 InGaAs/GaAs 超晶格位错过滤层, 将位错密度从  $10^9 \text{ cm}^{-2}$  减少到  $10^6 \text{ cm}^{-2}$  [8]. 图 4(a) 为该样品的横截面透射电子显微镜 (TEM) 图, 我们可以看到在 5 层位错过滤层后, 位错密度大幅减少, 在 TEM 中几乎观察不到位错. 图 4(b) 进一步展示了位错密度随位错过滤

层数的变化, 可以看到五层 InAlAs/GaAs 位错过滤层有效地将位错密度降低至  $5 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ . 通过减少位错密度, 该硅基量子点激光器在室温以 77 mW 的高功率激射, 并且阈值电流密度降低到  $194 \text{ A/cm}^2$ . 图 4(c) 显示了该器件的  $L-I$  图, 可见其最高脉冲工作温度可达  $111 \text{ }^\circ\text{C}$ . 此外, 通过采用调制掺杂和侧面镀层等方法有望进一步提高激光器的性能.

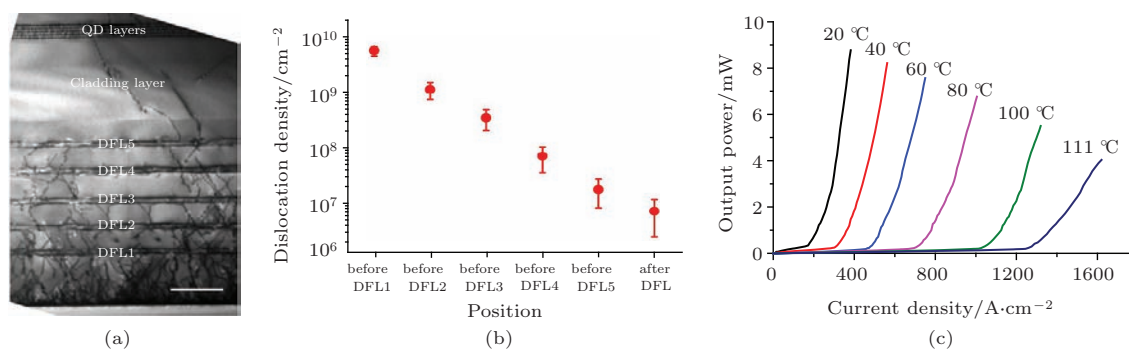


图 4 (a) 硅基量子点激光器的截面 TEM 图, 图中 DFL (dislocation filter layer) 为位错过滤层; (b) 不同层数的 DFL 对位错密度的影响; (c) 不同温度下的激光输出功率随电流密度的变化 [7,8]

Fig. 4. (a) The cross-sectional TEM image of quantum dot laser on silicon substrate (DFL is the dislocation filter layer); (b) the effectiveness of different numbers of DFL; (c) the output power versus current density at different temperature [7,8].

### 2.3.2 锗衬底上的高性能 InAs/GaAs 量子点激光器

锗和硅具有很好的兼容性, 且现有的 SiGe 技术已经非常成熟, 此外, 锗具有高载流子迁移率 (Ge 具有已知半导体中最高的空穴迁移率) 和在通信波段的高吸收率等优异特性. 因此, 与硅基外延生长一样, Ge 衬底上 III-V 族材料的生长同样引起了人们的研究兴趣. 相对于硅基外延生长, Ge 和 GaAs 的晶格失配 (0.08%) 和热膨胀系数差都很小 [5]. 2010 年, Border 等报道了在 germanium-on-insulator-on-silicon (GeOI) 衬底上  $1.3 \mu\text{m}$  InAs/GaAs 量子点的高质量生长, 并且发现 GaAs 缓冲层中的单层量子点有利于减少反相畴密度, 但是对减少穿透位错并没有明显作用, 因此没能实现激光激射. 一年之后, Liu 等 [5-8] 取得了突破性的进展, 报道了 Ge 衬底上  $1.3 \mu\text{m}$  InAs/GaAs 量子点激光器的室温激射. 此研究工作中, 在生长 GaAs 缓冲层之前, 他们首先生长了一层 Ga 原子的前置层, 该前置层的使用大幅度减少了反相畴的密度, 从而降低了 Ge/GaAs 界面的粗糙度, 大幅提高了晶体质量. 图 5(a), (b), (c) 和 (d) 显示了 As 前置层和 Ga 前置层相应的原子力显

微镜 (AFM) 和截面 TEM 图. 可以清楚地看到, 使用 Ga 前置层其表面平整度和界面质量都得到了大幅度的提高. 图 5(e) 展示了利用该方法生长的 InAs / GaAs 量子点在  $1.305 \mu\text{m}$  波长连续激射的  $L-I$  图, 实现了室温  $55.2 \text{ A/cm}^2$  的阈值电流密度, 相对于上面提到的硅基量子点激光器其阈值电流密度得到了显著的下降. 此外, 量子点激光器良好的耐高温特性使得其连续激射达到了  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ .

通过进一步优化 GaAs/Ge 界面的形核条件, Liu 等实现了 Ge 衬底上的 InAs/GaAs 量子点激光器在  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  的脉冲激射. 之后, 他们进一步将在锗衬底上的生长技术推广到硅基 SiGe 虚拟衬底上, 成功实现了硅基 SiGe 虚拟衬底  $1.3 \mu\text{m}$  InAs/GaAs 量子点激光器室温下  $63.4 \text{ A/cm}^2$  的阈值电流密度的激射. 相对于倒装焊技术的硅基 InP 激光器  $205 \text{ A/cm}^2$  的阈值电流密度 [50], 该方法将硅基激光器的阈值电流密度降低了一半. 通过优化激光器制备的后工艺, 2014 年, UCSB 和英特尔合作在硅基 SiGe 虚拟衬底上进一步实现了  $95 \text{ }^\circ\text{C}$  的连续激射 [51]. 通过增加高反射层, 成功实现了最高  $119 \text{ }^\circ\text{C}$  的连续激射, 其阈值电流密度低至  $427 \text{ A/cm}^2$ , 输出功率为  $176 \text{ mW}$ , 特征温度  $T_0$  超过  $200 \text{ K}$  [51,52].

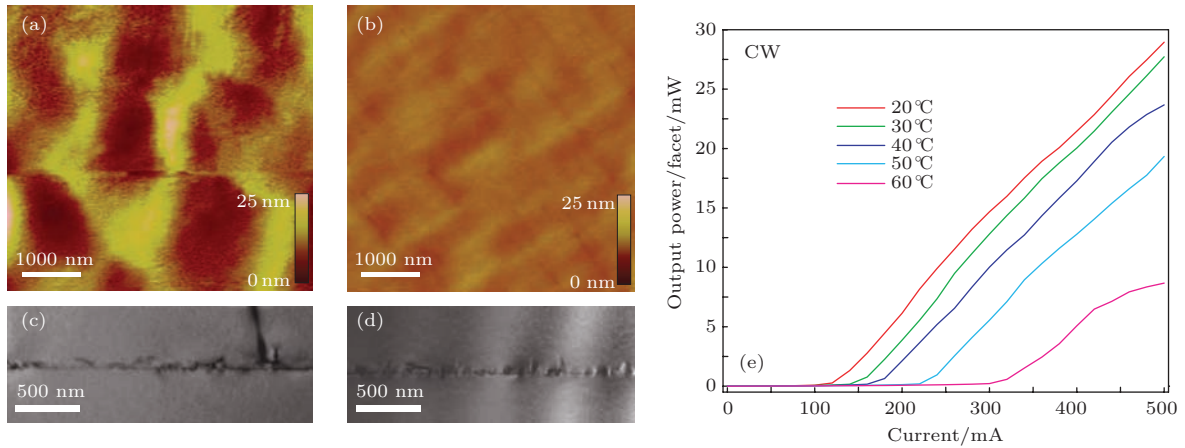


图5 (a), (b) 是 Ge 衬底上生长 1.2  $\mu\text{m}$  GaAs 缓冲层后的 AFM 图 (5  $\mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ ), (a) As 前置层, (b) Ga 前置层; (c), (d) 是 GaAs/Ge 界面的 TEM 图, (c) As 前置层, (d) Ga 前置层; (e) 连续电流下的激光输出功率在不同温度的  $L-I$  图 [5]

Fig. 5. (a) and (b) are the AFM images of 1.2  $\mu\text{m}$  GaAs buffer layer grown on Ge substrates, where (a) is As prelayer, and (b) is Ga prelayer; (c) and (d) are the TEM images of GaAs/Ge interface, where (c) is As prelayer, and (d) is Ga prelayer; (e) the  $L-I$  curve of the laser at different temperature under continuous-wave current injection [5].

### 3 总 结

在过去的 10 多年, 1.3  $\mu\text{m}$  GaAs 衬底量子点激光器对光电领域产生了重要影响. 硅基 III-V 族量子点激光器结合 III-V 族材料的高发光效率和硅材料的成熟工艺、高集成度和低成本等特性, 可能引领未来硅基光电子集成领域的飞速发展. 当然和商业激光器相比, 硅基量子点激光器仍须进一步提高性能. 一方面, 需提高晶体质量, 尤其是如何减少 GaAs/Si 界面的位错密度; 另一方面, 需要通过使用高反射镀层、电极优化等提高后工艺技术, 从而全面提高硅基量子点激光器的输出功率和器件寿命, 同时降低其阈值电流密度. 最终将实现高性能、高良品率和高集成度的硅基量子点激光器, 从而取代现有的外置 III-V 族半导体激光器.

### 参考文献

[1] Zhou Z P 2012 *Si-based Optoelectronics* (Beijing: Beijing University Press) (in Chinese) [周治平 2012 硅基光电子学 (北京: 北京大学出版社)]  
 [2] Camacho-Aguilera R E, Cai Y, Patel N, Bessette J T, Romagnoli M, Kimerling L C, Michel J 2012 *Opt. Express* **20** 11316  
 [3] Wirths S, Geiger R, von den Driesch N, Mussler G, Stolica T, Mantl S, Ikonik Z, Luysberg M, Chiussi S, Hartmann J M, Sigg H, Faist J, Buca D, Grützmacher D 2015 *Nat. Photon.* **9** 88  
 [4] D' Avezac M, Luo J W, Chanier T, Zunger A 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 027401

[5] Liu H, Wang T, Jiang Q, Hogg R, Tutu F, Pozzi F, Seeds A 2011 *Nat. Photon.* **5** 416  
 [6] Wang T, Liu H, Lee A, Pozzi F, Seeds A 2011 *Opt. Express* **19** 11381  
 [7] Lee A, Jiang A, Tang M, Seeds A, Liu H 2012 *Opt. Express* **20** 22181  
 [8] Chen S, Tang M, Wu J, Jiang Q, Dorogan V, Benamara M, Mazur Y, Salamo G, Seeds A, Liu H 2014 *Electron Lett.* **50** 1467  
 [9] Kroemer H 1963 *Proc. IEEE* **51** 1782  
 [10] Alferov Z I, Kazarinov R 1963 Patent Number 181737  
 [11] Asada M, Miyamoto Y, Suematsu Y 1986 *IEEE J. Quant. Electron.* **22** 1915  
 [12] Arakawa Y, Sakaki H 1982 *Appl. Phys. Lett.* **40** 939  
 [13] Liu G, Stintz A, Li H, Malloy K, Lester L 1999 *Electron. Lett.* **35** 1163  
 [14] Liu H, Hopkinson M, Harrison C, Steer M, Frith R, Sellers I, Mowbray D, Skolnick M 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 2931  
 [15] Liu H, Sellers I, Badcock T, Mowbray D, Skolnick M, Groom K, Gutierrez M, Hopkinson M, Ng J, David J 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 704  
 [16] Liu H, Sellers I, Gutierrez M, Groom K, Soong W, Hopkinson M, David J, Beanland R, Badcock T, Mowbray D 2004 *J. Appl. Phys.* **96** 1988  
 [17] Sugawara M, Usami M 2009 *Nat. Photon.* **3** 30  
 [18] Maximov M V, Ledentsov N N 2004 *Dekker Encyclopedia Nanosci. Nanotechnol.* 3109  
 [19] Li S, Gong Q, Cao C, Wang X, Yan J, Wang Y, Wang H 2013 *Infrared Phys. Technol.* **60** 216  
 [20] Dingle R, Henry C H 1976 Patent Number US3982207A  
 [21] Hirayama H, Matsunaga K, Asada M, Suematsu Y 1994 *Electron Lett.* **30** 142  
 [22] Kirstaedter N, Ledentsov N N, Grundmann M, Bimberg D, Ustinov V M, Ruvimov S S, Maximov M V, Kop'ev P S, Alferov Z I, Richter U, Werner P, Gosele U, Heydenreich J 1994 *Electron Lett.* **30** 1416  
 [23] Wu J, Chen S, Seeds A, Liu H 2015 *J. Phys. D* **48** 363001

- [24] van der Ziel J P, Dupuis R D, Logan R A, Pinzone C J 1987 *Appl. Phys. Lett.* **51** 89
- [25] Choi H K, Wang C A, Karam N H 1991 *Appl. Phys. Lett.* **59** 2633
- [26] Kazi Z I, Thilakan P, Egawa T, Umeno M, Jimbo T 2001 *Jpn. J. Appl. Phys.* **40** 4903
- [27] Kazi Z I, Egawa T, Jimbo T, Umeno M 2000 *Jpn. J. Appl. Phys.* **39** 3860
- [28] Groenert M E, Pitera A J, Ram R J, Fitzgerald E A 2003 *J. Vac. Sci. Technol. B* **21** 1064
- [29] Liu A Y, Herrick R W, Ueda O, Petroff P M, Gossard A C, Bowers J E 2015 *IEEE J. Quantum Electron.* **21** 1900708
- [30] Jalali B, Fathpour S 2006 *J. Lightwave Techn.* **24** 4600
- [31] Rong H, Jones R, Liu A, Cohen O, Hak D, Fang A, Paniccia M 2005 *Nature* **433** 725
- [32] Chen X, Li C, Tsang H K 2011 *NPG Asia Materials* **3** 34
- [33] Park H, Fang A W, Kodama S, Bowers J E 2005 *Opt. Express* **13** 9460
- [34] Tanabe K, Watanabe K, Arakawa Y 2012 *Sci. Rep.* **2** 349
- [35] Liang D, Bowers J E 2010 *Nat. Photon.* **4** 511
- [36] Wang W 1984 *Appl. Phys. Lett.* **44** 1149
- [37] Fletcher R M, Wagner D K, Ballantyne J M 1984 *Appl. Phys. Lett.* **44** 967
- [38] Deppe D, Holonyak J N, Nam D, Hsieh K, Jackson G, Matyi R, Shichijo H, Epler J, Chung H 1987 *Appl. Phys. Lett.* **51** 637
- [39] Deppe D, Nam D, Holonyak J N, Hsieh K, Matyi R, Shichijo H, Epler J, Chung H 1987 *Appl. Phys. Lett.* **51** 1271
- [40] Kaliski R, Holonyak J N, Hsieh K, Nam D, Lee J, Shichijo H, Burnham R, Epler J, Chung H 1987 *Appl. Phys. Lett.* **50** 836
- [41] Hall D, Deppe D, Holonyak J N, Matyi R, Shichijo H, Epler J 1988 *J. Appl. Phys.* **64** 2854
- [42] Linder K, Phillips J, Qasaimeh O, Liu X, Krishna S, Bhattacharya P, Jiang J 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 1355
- [43] Kazi Z I, Egawa T, Umeno M, Jimbo T 2001 *J. Appl. Phys.* **90** 5463
- [44] Mi Z, Bhattacharya P, Yang J, Pipem K 2005 *Electron. Lett.* **41** 742
- [45] Mi Z, Yang J, Bhattacharya P, Huffaker D 2006 *Electron. Lett.* **42** 121
- [46] Yang J, Bhattacharya P, Mi Z 2007 *IEEE Trans. Electron Devices* **54** 2849
- [47] Yang J, Bhattacharya P, Wu Z 2007 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **19** 747
- [48] Yang J, Bhattacharya P 2008 *Opt. Express* **16** 5136
- [49] Li L, Guimard D, Rajesh M, Arakawa Y 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 3105
- [50] Tanabe K, Watanabe K, Arakawa Y 2012 *Sci. Rep.* **2** 349
- [51] Liu A Y, Zhang C, Norman J, Snyder A, Lubyshev D, Fastenau J M, Liu A W, Gossard A C, Bowers J E 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 041104
- [52] Liu A Y, Zhang C, Snyder A, Lubyshev D, Fastenau J M, Liu A W, Gossard A C, Bowers J E 2014 *J. Vac. Sci. Technol. B* **32** 02C108



SPECIAL ISSUE—Physics and devices of silicon photonics

# Quantum dot lasers on silicon substrate for silicon photonic integration and their prospect

Wang Ting<sup>1)†</sup> Zhang Jian-Jun<sup>1)</sup> Huiyun Liu<sup>2)</sup>

1) (*Institute of Physics, Chinese Academy Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*Department of Electrical and Electronic Engineering, University College London, Torrington Place, London, UK*)

( Received 7 September 2015; revised manuscript received 25 September 2015 )

## Abstract

In this article, the recent progress of III-V quantum dot lasers on silicon substrates for silicon photonic integration is reviewed. By introducing various epitaxial techniques, room-temperature 1.3- $\mu\text{m}$  InAs/GaAs quantum dot laser on Si, Ge and SiGe substrates have been achieved respectively. Quantum dot lasers on Ge substrate has an ultra-low threshold current density of 55.2 A/cm<sup>2</sup> at room temperature, which can operate over 60 °C in continuous-wave mode. Futhermore, by using the SiGe virtual substrate, at 30 °C and an output power of 16.6 mW, a laser lifetime of 4600 h has been reached, which indicates a bright future for the large-scale photonic integration.

**Keywords:** semiconductor laser, laser material, photonic integration, optoelectronic device

**PACS:** 42.55.Px, 42.70.Hj, 42.82.-m, 85.70.-q

**DOI:** 10.7498/aps.64.204209

---

† Corresponding author. E-mail: [wangting@iphy.ac.cn](mailto:wangting@iphy.ac.cn)