

半导体量子点激光器研究进展*

王 占 国

(中国科学院半导体研究所 半导体材料科学实验室 北京 100083)

摘 要 首先简要地回顾了半导体激光器发展的历史和量子点激光器所特有的优异性能,进而介绍半导体量子点及其三维量子点阵列的制备技术.然后分别讨论了量子点激光器(能带)结构设计思想,实现基态激射所必须具备的条件和近年来国内外半导体量子点激光器的研究进展.最后分析讨论了量子点激光器研制中存在的问题和发展趋势.

关键词 应变自组装量子点,量子点激光器

SEMICONDUCTOR QUANTUM DOT LASERS

WANG Zhan Guo

(Laboratory of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

Abstract The history of semiconductor laser diodes, and especially quantum dot (QD) lasers with their superior lasing characteristics, are briefly reviewed. Typical techniques for fabricating semiconductor QDs and three-dimensional QD arrays are described. Various ideas for the band energy structure design and the conditions for realizing lasing via the ground states of QD lasers are presented, and recent exciting research advances are summarized in detail. Finally, the key problems for improving the properties of QD lasers, future trends and prospects for this new type of laser diode are discussed.

Key words self-assembled quantum dots, quantum dot lasers

1 引言^[1]

1962年第一个砷化镓(GaAs)同质pn结激光器在4K实现受激辐射,开辟了半导体激光器(LD)的新时代.它与几乎同时发明的光导纤维技术一起,奠定了今天光纤通信技术的基础.1963年,Alferov, Kazarinov^[2]和Kroemer^[3]提出的双异质结概念,是继半导体激光器发明以来的一个重要里程碑,使GaAlAs/GaAs激光器的性能得到显著改善;虽然与起源于衬底的穿透位错和缺陷相关的暗线缺陷导致的激光器早期退化问题,曾一度使激光器实用化的步伐进展缓慢,但随着低位错GaAs衬底研制成功和外延层质量的提高,半导体激光器在70年代末80年代初已有商品出售.基于1978年Casey和Panish^[4]等以及稍后的Tsang(1981)^[5]和Hersee(1982)^[6]等提出的电子、光子分别限制的概念和分子束外延(MBE)及金属有机物化学气相沉积(MOCVD)技术的不断发展与完善,导致了1980年

GaAlAs/GaAs量子阱激光器(QWLD)的研制成功,这是半导体激光器发展历史上又一个里程碑,具有更重要的意义.载流子受到一维量子限制的QWLD与双异质结激光器相比,具有更低的阈值电流密度(J_{th})和 J_{th} 对温度依赖的不敏感以及窄的增益谱等,因而受到广泛重视,大大加快了半导体激光器,特别是大功率激光器及其阵列的实用化步伐,并逐步形成了高技术产业.

理论分析表明,当材料的特征尺寸在三个维度上都与电子的德布罗意波长或电子平均自由程相比拟或更小时,电子在材料中的运动受到三维限制,也就是说电子的能量在三个维度上都是量子化的,称电子在三个维度上都受限制的材料为量子点.图1是不同维度材料和相应的态密度函数.如果量子点的最低两个分立量子能级能量差大于几倍的 kT (室温约25meV),那么就不会出现增益函数的热依赖或激光依赖的展宽.这种具有类原子的态密度函

* 国家自然科学基金资助项目

2000-03-21收到

数的量子点激光器(QDLD),可望具有比QWLD、量子线激光器更加优异的性质,如超低阈值电流密度($J_{th} \leq 2 \text{ A/cm}^2$,目前最好的QWLD的 $J_{th} = 50 \text{ A/cm}^2$)、极高的阈值电流温度稳定性(理论上 $T_0 = \infty$)、超高的微分增益(至少为QWLD的一个量级以上)和极高的调制带宽以及在直流电流调制下无啁啾工作等。量子点激光器已显示出从大功率、光计算到光纤数字传输用高速光源以及红外探测器等方面的极重要的应用前景,是目前国际上最前沿的重点研究方向之一。

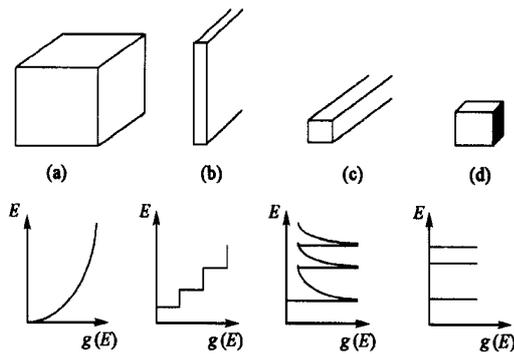


图1 不同维度材料(上)和相应的态密度函数(下)
(a) 三维体材料;(b) 二维量子阱材料;(c) 一维量子线材料;
(d) 零维量子点材料

2 量子点的制备技术

量子点的制备方法很多,但常用的有两种。一是微结构材料生长与微细加工技术相结合的方法^[7],即采用MBE或MOCVD技术在图形化衬底上进行选择性外延生长或高质量的外延材料生长,结合高空间分辨电子束直写、干法或湿法刻蚀,然后再进行外延生长。这种方法的优点是QD的尺寸、形状和密度可控,但由于加工带来的界面损伤和工艺过程引入的杂质污染等,使其器件性能与理论的预言值相差甚远。1994年,Hirayama等^[8]用上述方法制备的InGaAs/InGaAsP量子点激光器,在77K时, J_{th} 仍高达 7.6 kA/cm^2 !

为此,近年来人们利用SK生长模式,又发展了应变自组制备QD的新技术^[9]。SK生长模式适用于晶格失配较大,但表面、界面能不是很大的异质结材料体系。SK外延生长初始阶段是二维层状生长,通常只有几个原子层厚,称之为浸润层[见图2(a)]。随着层厚的增加,应变能不断积累,当达到某一个临界厚度 t_c 时,外延生长则由二维层状生长过

渡到三维岛状生长[见图2(b)],以降低系统的能量。三维岛生长初期形成的纳米量级尺寸的小岛周围是无位错的。若用禁带宽度大的材料将其包围起来,小岛中的载流子受到三维限制,称之为量子点[见图2(c)]。在生长的单层量子点基础上,重复上述的生长过程,可获得量子点超晶格结构。量子点超晶格结构究竟是垂直对准还是斜对准,依赖于隔离势垒层的厚度和量子点顶层应力的分布[图2(d)为垂直对准,图2(e)为斜对准]。在MBE生长量子点时,可用高能电子衍射仪通过衍射斑点形状的变化直接控制量子点的形成。这种方法的缺点是其尺寸、形状、分布均匀性和密度较难控制。图3是我们实验室利用SK生长模式分别在InP基和GaAs基衬底上生长的三维量子线点阵的TEM截面像和InAs量子点的AFM图。

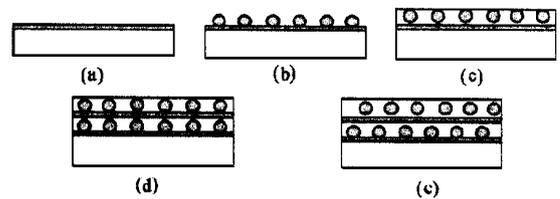


图2 利用SK生长模式制备量子点的示意图
[白色方框为GaAs材料,灰色的小岛和长条为In(Ga)As,灰长条为浸润层。(a) 浸润层;(b) In(Ga)As岛;(c) 量子点;(d) 量子点的垂直对准;(e) 量子点的斜对准]

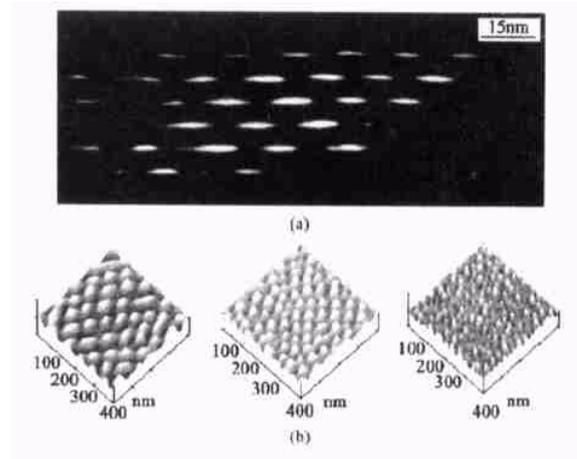


图3
(a) InAs/InAlAs/InP 三维量子线阵列的TEM截面像;
(b) In_xGa_{1-x}As/GaAs(311)B量子点的AFM图(左 $x=0.3$,
中 $x=0.4$,右 $x=0.5$)

3 量子点激光器设计与制造

简单地说,量子点激光器是由一个激光母体材料和组装在其中的量子点以及一个激发并使量子点物理

中粒子数反转的泵源所构成. 一个实际的量子点激光器的能带结构和生长结构示意图如图 4 所示.

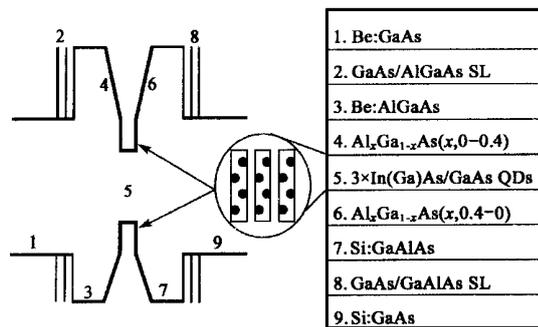


图 4 量子点激光器能带结构和生长结构示意图
(1, 9 为上下欧姆电极接触层; 2, 8 为超晶格缓冲层; 3, 7 为上下包层; 4, 6 为上下折射率梯度改变分别限制区; 5 为量子点有源区)

一个理想的量子点激光器, 首先要求量子点的尺寸、形状相同, 其变化范围应小于 10%, 即量子点应只有单一电子能级和一个空穴能级, 以利于 QDLD 的基态激射. 量子点的多能态存在, 浸润层和势垒能态将引起激射波长蓝移, 无法实现 QDLD 的无啁啾工作. 无啁啾工作是量子点 LD 最重要的优点之一. 所谓啁啾是指激光器在直流电流的调制下激光器发射波长的改变 ($\Delta \lambda$), 而波长改变是远距离光纤通信中一个亟待解决的关键问题. 它的物理起因是来自激光介质中复数磁导率的实部与虚部之间的耦合. 理想的量子点 LD 是无啁啾工作的, 实际上由于量子点激发态等贡献使增益曲线不再对称, 导致反映耦合强度的线宽增强因子不再为零, 而增大到 0.5, 但这仍要比最好 QWLD 的值 (1—2) 优 2—4 倍. 第二, 要求有尽量高的量子点面密度和体密度, 以保证 QD 材料有尽可能大的增益和防止增益饱和, 这有利于 QDLD 的低阈值基态工作. 第三, 要正确选择量子点的尺寸, 因为量子点的临界尺寸同选用材料体系导带带阶 (ΔE_c) 紧密相关. 若选用 QD 的尺寸不当 (如太小), 量子点中第一电子能级 (基态) 与势垒层连续能量差很小, 那么在有限的温度下, 量子点中的载流子的热激发将使量子点中载流子耗尽, 无法实现基态激射. 若量子点中能级差与 kT 相比拟时, 高能级的热填充难以避免. 简单的估算表明, $InAs/GaAs$ 球形量子点的尺寸下限大约为 20nm. 第四, 量子点激光器工作波长可通过选择材料体系, 控制量子点形状、尺寸等实现, 目前已报道的 QDLD 的波长已覆盖了从红光到近红外波段. 此外, 激光腔面制作、镀膜质量、腔长选择等对 QDLD 的工作模式也产生重要影响.

量子点激光器材料通常是采用 MBE 技术生长 (也有用 MOCVD 技术的), 生长顺序依次是 (见图 4): 在重掺硅的 n^+ (001) 面 GaAs 衬底上, 先生长 AlGaAs/GaAs 短周期超晶格缓冲层, 以屏蔽来自衬底的缺陷和使生长平面平整, 进而生长出厚度约为 1—1.5 μm 的掺硅 n 型 $Al_{0.4}Ga_{0.6}As$ 下包层; 折射率梯度改变 $As_xGa_{1-x}As$ ($x = 0.4 \rightarrow 0$) 下光学限制层; 包含单层或多层 $In(Ga)As/GaAs$ 或 $InGaAs/AlGaAs$ 量子点有源区, 折射率梯度改变 $Al_xGa_{1-x}As$ ($x = 0 \rightarrow 0.4$) 上光学限制层; 掺 Be p 型 $Al_{0.4}Ga_{0.6}As$ 上包层; 短周期超晶格层和重掺 Be 的 p^+ GaAs 电极接触层. GaAs, AlGaAs 和量子点的生长温度分别为 600 $^\circ C$, 700 $^\circ C$ 和 490 $^\circ C$. $In(Ga)As/GaAs$ 应变自组装量子点生长是采用 SK 生长模式, 二维平面生长向三维岛状 (量子点) 生长过渡, 从高能电子衍射图像由线状向点状改变来进行原位监控. 若单层量子点的面密度为 $4 \times 10^{10} cm^{-2}$, 厚度为 200nm, 包括有三层垂直耦合量子点的复合辐射体积内总的量子点密度可达 $6 \times 10^{15} cm^{-3}$. 激光器结构生长完成后, 可按需要制成不同器件结构 (宽条或窄条脊形等)、不同工作模式的量子点激光器.

4 量子点激光器的研究进展

1980 年, Arakawa 和 Sakaki^[10] 首先尝试了利用磁场对量子阱中载流子进行三维限制, 结果仅发现激光器的 T_0 增加, 但未使 J_{th} 降低. 直到 1994 年, 第一个基于应变自组装量子点的 Fabry-Perot 注入激光器由俄罗斯-德国联合实验小组的 Kirstaedter 等^[11] 研制成功. 它是在 AlGaAs/GaAs 折射率梯度改变分别限制结构中加入 $InGaAs/GaAs$ 单层量子点有源区, 器件制成带有无镀膜解理腔面的浅台面条形几何结构, 腔长 1mm. 77K 时, 工作波长 $\lambda = 0.95\mu m$ 的 $J_{th} = 120 A/cm^2$, $T_0 = 350 K$ (50—120 K), 明显地超过了量子阱激光器的 T_0 ; 室温工作时, J_{th} 增加到 950 A/cm^2 , 波长向短波长移动, 很接近浸润层发光能量. 分析表明, 这是由于量子点中载流子激发到势垒层中和增益饱和所致. 1995 年, 日本的一个研究小组^[12], 采用 MBE 技术和 SK 生长模式, 制备了 $In_{0.4}Ga_{0.6}As/GaAs$ 单层量子点激光器, 85K 时, $J_{th} = 800 A/cm^2$, 输出波长为 0.92 μm , 激射跃迁发生在浸润层. 1996—1997 年是量子点激光器研制迅速发展的两年, 除俄罗斯-德国联合实验小组之外, 日本、英国、美国、法国、加拿大和中国等的一些

研究小组也加入了量子点激光器的研制行列.为了实现量子点激光器的基态激射,人们在优化生长工艺条件下,使量子点的尺寸、形状的均匀性得到了明显改善,量子点尺寸均匀性可控制在 10% 以下,基本上满足了基态激射的要求.为了降低室温阈值电流密度,多个实验小组尝试了增加有源区垂直耦合量子点的层数的方法,取得了理想的效果.1996 年, Ledantsov 等^[13]采用 10 层 $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子点超晶格结构为量子点激光器的有源区,使室温下 J_{th} 降低到 $90\text{ A}/\text{cm}^2$;采用三层 $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ 量子点超晶格结构,室温下,四侧解理面几何构形的量子点激光器,在工作波长为 $1\mu\text{m}$ 时, J_{th} 仅为 $62\text{ A}/\text{cm}^2$! 创下了量子点激光器的最好记录.1997 年, Heinrichsdorff 等^[14]报道了腔长为 1.5 mm 的量子点激光器, 77 K 时, $J_{\text{th}} = 12.7\text{ A}/\text{cm}^2$, 室温下 $J_{\text{th}} = 110\text{ A}/\text{cm}^2$ 的好结果.1997 年,我们实验室的 MBE 组^[15]也实现了腔长为 $500\mu\text{m}$ 的 InAs/GaAs 单层量子点激光器的研制,室温下在工作波长为 $0.98\mu\text{m}$ 时, J_{th} 为 $590\text{ A}/\text{cm}^2$, 达到了当时国际先进水平.1998 年中国^[16]和美国^[17]等研制成功的大功率量子点激光器(多模)的室温 J_{th} 分别为 $218\text{ A}/\text{cm}^2$ 和 $270\text{ A}/\text{cm}^2$.1999 年美国的一个实验小组^[18], 研制成功室温 J_{th} 仅 $26\text{ A}/\text{cm}^2$ 的 $\text{InAs}/\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ 量子点激光器.它是将一个密度高达 $7 \times 10^{10}\text{ cm}^{-2}$ 的单层 InAs 量子点置入应变 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ 量子阱中作为有源区来实现的.器件工作波长为 $1.25\mu\text{m}$, 但这个双侧解理面激光器的腔长长达 $7800\mu\text{m}$, 以增加有源区的增益.同年 Gyoungwon park^[19]等又报道了室温单模 CW 工作波长为 $1.3\mu\text{m}$ 的量子点激光器, J_{th} 为 $45\text{ A}/\text{cm}^2$, 脉冲工作 $J_{\text{th}} = 25\text{ A}/\text{cm}^2$, 向光通信应用又跨进了一大步.

理想的量子点激光器的另一个突出优点是阈值电流密度(J_{th})不依赖于温度,即特征温度 $T_0 = \infty$.实际的量子点激光器的 T_0 与量子点尺寸、势垒层材料及其质量密切相关.通过优化量子点尺寸和提高包层生长温度(改善势垒层质量),可使量子点激光器的 T_0 明显提高.1996 年, Bimberg 等^[20]和 Alferov^[21]等报道了他们研制的量子点激光器的 T_0 分别高达 425 K ($<100\text{ K}$) 和 530 K ($80-220\text{ K}$).1997 年, Maximov 等^[22]将量子点置入 $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ 量子阱中,使量子点中载流子的逃逸势垒高度增加,大大降低了载流子的逃逸几率,减小了漏电流,从而使他们研制的量子点激光器的 T_0 在 $80-330\text{ K}$ 之间

仍能保持高达 385 K 的值,这是量子阱激光器无法做到的!

典型的单层量子点的增益谱半宽约 50 meV , 这远大于满足 0.5 mm 腔长的条形激光器单模工作要求的 1 meV .然而在实验上确已观察到 QDLD 在稍大于 J_{th} 时 ($<1.1J_{\text{th}}$) 就出现单纵模工作模式,并且随注入电流增大,多个可明显分辨的纵模工作模式在短波长方向相继出现,可能的原因有两个:一是由于量子点分布不均匀,其增益在接近增益极大值附近可能存在局域最小值,这就增加了另外一些纵向模式的阈值电流.当注入电流增大时,最初被抑制的模式开始激射;另外,尺寸不同的量子点,对载流子的俘获时间常数不同,只有那些能迅速充满载流子的量子点才对激射有贡献.因此,要实现量子点激光器单纵模工作,对量子点的尺寸均匀性的控制要求是很严格的,要实现这一点,还需做更多的工作.

量子点激光器所特有的低 J_{th} 、高 T_0 工作和灾难性光学镜面损伤(COMD)以及衬底缺陷影响被减小等优异性能,使量子点激光器更有利于高功率工作.大功率量子点激光器的研制工作在过去的三年里取得了很大进展.1997 年, Shernyakov 等首先报道了室温(287 K)高达 1 W 连续波(CW)工作的量子点激光器研制成功的消息.量子点激光器的有源区为 10 层垂直耦合 $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ 量子点超晶格,激光器结构为 $114\mu\text{m}$ 的浅台面,微分效率 40% , J_{th} 在 $1100\mu\text{m}$ 腔长时为 $290\text{ A}/\text{cm}^2$, 工作波长为 $\sim 0.99\mu\text{m}$.当热沉温度为 $70\text{ }^\circ\text{C}-75\text{ }^\circ\text{C}$ 时仍能观察到激射.1998 年 5 月,俄罗斯-德国联合实验小组的 Maximov 等^[23]也报道了与 Shernyakov 等类似的结果.他们还发现,经 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 0.5 h 的退火,量子点激光器的主要结构性能参数 J_{th} 和量子效率未见改变或退化,表明量子点激光器工作是稳定的.就在这篇文章的后记中,他们又公布了在增加量子点有源区的密度后,获得了室温 CW 工作 1.5 W 的光输出功率的好结果.同年,我国的大功率量子点激光器的研制也取得了突破性进展,中国科学院半导体材料科学实验室的 MBE 小组,采用三层垂直耦合 $\text{In}(\text{Ga})\text{As}/\text{GaAs}$ 量子点超晶格为有源区,制作成条宽为 $100\mu\text{m}$ 、腔长 $800\mu\text{m}$ 的宽接触激光器结构,腔面镀膜,连续波工作单面光输出功率大于 1 W .图 5 是该实验室研制成功的大功率量子点激光器的光输出功率与注入电流(a)和激射特性曲线(b). $T_0 = 333\text{ K}$ ($20-180\text{ K}$), $T_0 = 157\text{ K}$ ($180-300\text{ K}$), 室温 $J_{\text{th}} = 218\text{ A}/\text{cm}^2$, 工作波长 $0.96\mu\text{m}$.器件在 0.61 W 和

0.54 W 条件下室温工作 3000h, 功率分别仅下降 0.81 db 和 0.49db, 为目前国际上报道的最好结果之一. 将 19 路量子点激光器通过光纤制成耦合模块, 室温连续输出光功率可高达 10 W 以上.

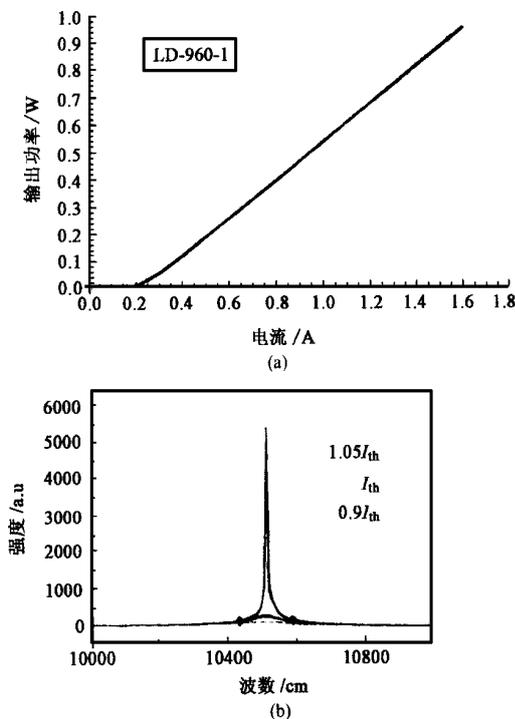


图5 我们实验室研制成功的大功率量子点激光器的光输出功率与注入电流(a)和激光特性(b)曲线

1999 年, 俄罗斯 - 德国联合实验小组的 Kovsh^[24]等在分析了限制量子点激光器输出最大功率的可能原因后, 通过增加有源区量子点的面密度 ($1.5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$) 和采用三层垂直耦合 InAs/Al_{0.15}Ga_{0.85}As 量子点超晶格有源区, 制备成功工作波长为 $0.87 \mu\text{m}$ 、室温连续双面(镀膜)最大输出功率为 3.5 W 的最好成绩. 激光器为 $100 \mu\text{m} \times 920 \mu\text{m}$ 宽条结构, $J_{\text{th}} = 400 \text{ A/cm}^2$, 峰值转换效率达 45%. 他们相信, 进一步优化激光器的设计和制作工作, 量子点激光器的输出功率还会进一步增加.

合理选择 $\text{In}_x\text{Ga}_y\text{Al}_{1-x-y}\text{As}$ 材料体系的组分 x 和 y , 量子点激光器的工作波长可覆盖红光到近红外光纤通信的两个重要窗口. 1999 年, 美国德克萨斯大学^[17]和日本富士通的实验小组^[25]分别报道了试制成功波长为 $1.30 \mu\text{m}$ 室温单模连续工作的量子点激光器的信息. 目前, InP 基量子点的光致发光谱峰值波长已扩展到光纤通信的另一个窗口 $1.55 \mu\text{m}$ 附近, 显示了它作为光纤通信光源的重要应用前景. 此外, 早在 1996 年美国 - 加拿大联合实验组的 Fafard 等^[26]研制成功以 $\text{In}_{0.64}\text{Al}_{0.36}\text{As}$ 单层量子点为

有源区的宽接触 ($400 \times 600 \mu\text{m}$) 红光激光器, 77 K 工作波长为 $0.707 \mu\text{m}$, $J_{\text{th}} = 730 \text{ A/cm}^2$, 脉冲输出功率为 200 mW. 红光量子点激光器的研制进展虽然不大, 但也不断有文章报道, 我们实验室也开展了 $\text{In}_{0.35}\text{Al}_{0.65}\text{As}/\text{Ga}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}$ 红光量子点的研制工作, 在 80 K 已观察到了红光激射.

垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 由于具有光束质量好、低电流工作和面发射、便于器件平面集成和光耦合应用等特点, 是半导体激光器研制的另一个热点. 若将 VCSEL 的量子阱有源区用单层或多层量子点代替, 就可制成量子点 VCSEL. 人们预料, 它会有更优越的性能. VCSEL 的关键是微腔的设计与制造. 微腔实际上是由一个带宽为几十毫电子伏 (meV) 的抑制频带和在抑制频带中另加一个约 1 meV 的通频带组成, 若使尺寸均匀量子点的基态能量与微腔的通频带 (pass band) 匹配, 则可实现对光子和电子的优化控制. 由于 Fabry - Perot 腔模式间距离很大, 微腔又很短, 故量子点 VCSEL 的单模运转可自动满足. 量子点 VCSEL 激光器的输出波长只受通频带的限制, 而不受量子点尺寸不均匀性的影响, 若量子点最大增益与通频带不匹配, 则仅导致 J_{th} 增加.

第一个室温电注入工作的量子点 VCSEL 是 1996 年 Saito 等人^[27]研制成功的, 量子点有源区是由面密度为 $2 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 的 10 层垂直耦合量子点超晶格组成, 发射面为 $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$, 激射波长为 960.4 nm , 处于基态和激发态之间, 显然是两者共同的贡献. Lott 等人^[28]于 1997 年又实现了电注入室温基态激射的量子点 VCSEL, 台面直径为 $8 \mu\text{m}$ 时, 阈值电流为 $200 \mu\text{A}$ ($J_{\text{th}} = 400 \text{ A/cm}^2$). 当台面直径缩小到 $1 \mu\text{m}$ 时, 阈值电流低到 $68 \mu\text{A}$, 这与目前报道最好的量子阱 VCSEL 的结果相当^[29].

5 量子点激光器研制存在的问题和发展趋势

虽然量子点激光器的研制, 在短短的几年里, 已取得了令人瞩目的成绩, 但其性能与理论预测相比, 仍有较大差距! 进一步提高量子点激光器的性能, 必须解决下述问题: 一是如何生长尺寸均匀的量子点. 尽管单个量子点的光增益很大, 但由于它的尺寸不均匀, 会导致发光峰的非均匀展宽. 现有的量子点发光峰的半高宽最好的也是 20 meV 左右, 远大于量子阱材料 ($\sim \text{meV}$); 所以只有很小一部分量子点对

激光器发光有贡献,限制了光增益,影响了 J_{th} 的进一步减小.生长尺寸高度均匀的量子点是面临的提高量子点激光器质量的一个严峻挑战!二是如何增加有源区量子点面密度和体密度(增加耦合层数),保证有源区高的光增益,也是要进一步解决的重要问题之一.三是如何优化量子点激光器的结构设计,使其有利于量子点对载流子的俘获和束缚.通常是采用增大量子点受限势垒高度和提高势垒区材料生长质量来实现.另一方面,通过控制量子点尺寸和选择材料体系的组分,可在较大范围内改变激光器的波长,但在实验上,要获得可精确控制的工作波长,仍有较长的路要走.

综上所述,研制用于光纤通信光源的 $1.3\mu\text{m}$ 和 $1.5\mu\text{m}$ 单模、低 J_{th} 和无啁啾工作的可实用化的量子点激光器,仍是今后相当长一段时间里人们追求的目标;研制用于光纤放大器和全固态激光器泵浦源的大功率量子点激光器是另一个重要方向,大功率量子点激光器研制有可能在近几年内取得突破,并首先走向实用化.

(后记:在本文定稿时,中国科学院半导体材料科学实验室又研制成功双面连续波工作输出功率为 3.618W 的大功率量子点激光器)

致谢 感谢梁基本、姜卫红等提供的有益资料以及王玲在打印、制图等方面的帮助.

参 考 文 献

- [1] Bimber D, Grundmann M, Ledentsov N N. Quantum Dot Heterostructures. Chichester New York etc: John Wiley & Sons, 1999. 279
- [2] Afferov Zh I, Kazaronov R F. Semiconductor laser with electric pumping. Author's Certificate, NI 81737
- [3] Kroemer H. Proc. IEEE, 1963, 51: 1782
- [4] Casey H C, Panish M B. Heterostructure Lasers(Part A). New York: Academic, 1978
- [5] Tsang W T. Appl. Phys. Lett., 1981, 38: 835
- [6] Hersee S D, Baldy M, Assenat P *et al.* Electron. Lett., 1982, 18: 870
- [7] Forchel A, Leier H, Maile E *et al.* Festkörperprobleme (Advances in solid state physics), 1988, 28: 99
- [8] Hirayama H, Matsunaga K, Asada M *et al.* Electron Lett., 1994, 30: 142
- [9] Seifert W, Carlsson N, Miller M *et al.* Prog. Crystal Growth Charact., 1996, 33: 423
- [10] Arakawa Y, Sakaki H. Appl. Phys. Lett., 1982, 40: 939
- [11] Kirstaedter N, Ledentsov N N, Grundmann M *et al.* Electron. Lett., 1994, 30: 1416
- [12] Shoji H, Mukai K, Ohtsuka N *et al.* Photon. Tech. Lett., 1995, 12: 1385
- [13] Ledentsov N N, Shchukin V A, Grundmann M *et al.* Phys. Rev. B, 1996, 54: 8743
- [14] Heinrichsdorff F, Mao M H, Kirstadter N *et al.* Appl. Phys. Lett., 1997, 71: 22
- [15] 王占国.第四届全国 MBE 会议文集.江苏无锡,1997年9月[WANG Zhan-Guo. Proceeding of the 4th National Conference on MBE. Wuxi, Jiangsu, 1997, Sept. (in Chinese)]
- [16] Wang Z G, Gong Q, Zhou W *et al.* 3th Rinpacific international conference on advanced materials and processing, edited by Imam M A *et al.* Hosted by TMS, 1998, 2097
- [17] Huffaker D L, Park G, Zhou A *et al.* Appl. Phys. Lett., 1998, 73: 2564
- [18] Liu G T, Stintz A, Li H *et al.* Electron. Lett., 1999, 35: 1163
- [19] Gyoungwon park, Oleg B Shcheking, Sebastian *et al.* RT continuous wave operation of a single-layered $1.3\mu\text{m}$ quantum dot laser; Appl. 1999, 75: 3267
- [20] Bimberg D, Kirstaedter N, Grundmann M *et al.* Phys. Stat. Sol. (b), 1996, 194: 159
- [21] Alferov Z I, Gardeev Yu N, Zaitsev S V *et al.* Semicond., 1996, 30: 197
- [22] Maximov M, Gardeev N Yu, Zaitsev S V *et al.* Semicond., 1996, 31: 124
- [23] Maximov M V, Shernyakov Yu M, Tsatsul'nikov A F *et al.* J. Appl. Phys., 1998, 83: 5561
- [24] Kovsh A R, Zhukov A E, Licshits D A *et al.* Electron. Lett., 1993, 35: 1161
- [25] Mukai K, Nakata Y, Otsubo K *et al.* IEEE Photonics Technology Lett., 1999, 11: 1205
- [26] Fafard S, Hinzer K, Raymond S *et al.* Science, 1996, 274: 1350
- [27] Sairo H, Vishi K, Ogura I *et al.* Appl. Phys. Lett., 1996, 69: 3140
- [28] Lott J A, Ledentsov N N, Vstinov V M *et al.* Electron. Lett., 1997, 33: 1150
- [29] Huffaker P L, Deppe D G. Appl. Phys. Lett., 1997, 70: 1781



作者简介

王占国,男,1938年出生,中国科学院半导体研究所研究员,中国科学院院士.长期从事半导体材料及材料物理研究,在半导体深能级物理、光谱物理研究中,取得了多项国际水平的成果.近年来,又在低维半导体材料,如应变自组装 $\text{In}(\text{Ga})\text{As}/\text{GaAs}$ 等量子线、量子点和量子点超晶格材料生长及性质研究方面取得进展,在国内外重要学术刊物发表论文一百余篇.

E-mail: zgwang@red.semi.ac.cn