



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

硅基 InAs 量子点激光器器件制作及其性能测试

作者姓名: _____ 张 斌 _____

指导教师: _____ 张建军 副研究员 _____

_____ 中国科学院物理研究所 _____

学位类别: _____ 理学博士 _____

学科专业: _____ 凝聚态物理 _____

培养单位: _____ 中国科学院物理研究所 _____

2019 年 6 月

Fabrication and Characterization of InAs Quantum Dot Lasers
on Silicon

A dissertation submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Doctor of Philosophy
in Physics

By

Bin Zhang

Supervisor: Vice-Professor Jianjun Zhang

Institute of Physics
Chinese Academy of Sciences
June 2019

中国科学院大学

研究生学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。

作者签名：

日 期：

中国科学院大学

学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院有关保存和使用学位论文的规定，即中国科学院有权保留送交学位论文的副本，允许该论文被查阅，可以按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

作者签名：

日 期：

导师签名：

日 期：

摘 要

随着微电子技术的持续发展，晶体管数目急剧增加，电互联空间急剧减小，芯片功耗和性能受到严重制约。同时随着互联网和物联网的发展，大量的数据需要通过数据中心的服务器处理，而服务器之间传统的电互联会产生大量的功耗。由此，对高速、大带宽、低功耗、低成本的互联技术提出了很大的需求。硅基光电技术可以实现高速、高集成度的光互联，同时可以用传统微电子 CMOS 工艺的制造，是实现片上光互连极具竞争力的解决方案。

目前硅基光电子集成芯片中最大的挑战是片上光源的集成。片上光源的获得主要有键合技术和直接外延生长两种方式。键合技术较为成熟，但是由于其扩展性低的问题使得其不利于大规模集成。因此如果能采用直接生长的方式在硅基衬底上获得高质量 III-V 材料将会是硅基光电子集成最理想的解决方案。

本论文在硅基、SOI 基衬底上直接外延高质量 InAs 量子点发光结构的基础上，制备了不同形式的激光器器件，主要内容如下：

通过微纳加工工艺制备硅基 InAs 量子点 F-P 腔电泵浦激光器。该激光器在室温下的阈值电流为 190 mA，阈值电流密度为 265 A/cm^2 ，对应谱峰的半高宽为 0.1 nm，激光器的工作温度范围为 $-20 \text{ }^\circ\text{C} \sim 65 \text{ }^\circ\text{C}$ 。此外，研究发现封装工艺对激光器性能的发挥有很大的影响。

通过微纳加工工艺制备硅基 InAs 量子点垂直腔面发射微腔激光器。该激光器实现低阈值功率 (20 μW) 激射，在 6 mW 泵浦光下的半高宽为 1.3 nm。在不同温度测试条件下，实现激光器在 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 激射，体现出器件有优异的温度稳定性。

目前硅基光电子无源器件都是基于 SOI 衬底，因此实现 SOI 基光源是硅基光电技术发展中重要的一步。本文通过选用在 SOI 基直接生长的 InAs 量子点激光器结构，通过微纳加工工艺首次实现了 SOI 基 InAs 量子点微盘激光器的制备。该激光器的阈值功率为 0.39 mW，对应谐振腔的品质因子 (Q 值) 为 3900。在相同条件下制备了 Si 基的 InAs 量子点微盘激光器，其阈值功率和 Q 值分别为 0.38 mW 和 3674。SOI 和 Si 基 InAs 量子点微盘激光器的性能达到了相同结构的 GaAs 基 InAs 微盘激光器 (阈值: 0.33 mW 和 Q 值: 3550) 几乎一样的水平。由此体现

出本文的光泵浦 SOI 基 InAs 量子点激光器有优秀的性能，也反应出 SOI 衬底上生长的激光器结构有高晶体质量。

综上，本文所采用的激光器制备方式对未来硅基光电子芯片中光源的集成有很大的应用潜力。

关键词：硅基光电子，量子点激光，集成光电，半导体激光器，微腔

Abstract

With the development of microelectronics, the number of transistors is dramatic increment, which lead to narrower spaces for electrical interconnects, higher power consumption and limited performances. In addition, the rapid development of the internet and internet of things (IOTs) generates huge amount of data to store and process in the data centers. However, traditional data centers are still using electrical interconnects which consume more power compared to optical interconnects. An interconnect solution with high speed, wide bandwidth, low power consumption is required to support the fast development of microelectronics. The silicon photonics combining the merit of optical interconnects and CMOS compatible, perfectly meets all of the criteria due its high speed, wide bandwidth, ultra-low transmission loss and low cost.

At current stage, the efficient light sources on silicon are still a challenge. There are two major approaches to combine III-V materials with Si, which are wafer bonding techniques and direct epitaxial growth. The III-V/Si bonding method generally have scalability, yield and cost issues. In contrast, the direct growth method can overcome scalability and yield issues, which is the ideal approach for photonics integration if the high-quality III-V material can be achieved on Si substrate.

In this work, we fabricated and characterized three different types of lasers through the high-quality InAs QD laser epitaxy structures directly grown on Si or SOI substrate.

We first fabricated electro pumped Fabry-Perot (FP) cavity InAs QD lasers on Si. The threshold current of F-P cavity lasers on Si is 190 mA which corresponding to the current density of 265 A/cm². The full-width-half-maximum (FWHM) of the laser is 0.1 nm. During the temperature dependent characterization, the laser can work at the temperatures ranging from -20 °C to 65 °C. In addition, it is found the laser performance influenced by the package technology.

Secondly, we fabricated the InAs QD micropillar lasers on Si substrate. The lasing threshold of InAs QD micropillar is as low as 20 μW with a FWHM of 1.3 nm under the optical pump power of 6 mW. Moreover, the micropillar laser is capable of operating at maximum temperature up to 100 °C, which indicate the great temperature stability of InAs QD microcavity lasers on Si (001) substrate.

As we known, all the silicon photonic devices are based on the SOI platform rather than Si substrates, however, III-V lasers on SOI platform by direct epitaxy remain absent in the field, which could potentially participate as an essential step towards the silicon photonic integration. In this work, we demonstrate the first O-band optically pumped InAs/GaAs QD microdisk laser on SOI substrates grown by molecular beam epitaxy (MBE). The quantum dot laser structures used for device fabrication were prepared by direct epitaxial growth on by dual-chamber MBE system. Additionally, the comparison of the performance of InAs QD microdisk lasers on GaAs, Si (001) and SOI are studied with identical epi-structures. The lasing threshold and Q factor of microdisk lasers on Si (0.38 mW, 3674) and SOI (0.39 mW, 3900) substrates exhibit similar performance in comparison with the lasers on GaAs (0.33 mW, 3550), which indicated the high crystal quality of GaAs buffer on SOI.

In summary, the work demonstrated in this thesis shown a great potential to integrate III-V lasers into silicon photonic platform for future photonic integration circuits applications.

Key Words: Silicon Photonics, Quantum-Dot Laser, Integrated Photonics, Semiconductor Laser, Microcavity

目 录

摘 要 I

Abstract III

目 录 V

第 1 章 绪论	1
1.1 微电子技术发展现状	2
1.2 光互联	5
1.3 硅基光电子	6
1.4 硅基光电子上光源的器集成	7
1.5 量子点激光器	9
1.6 硅基激光器的类型及应用	11
1.6.1 水平端面发射激光器	11
1.6.2 垂直腔面发射激光器	13
1.6.3 微盘激光器	14
1.7 半导体激光器性质及和结构	15
1.7.1 电泵阈值电流密度和注入电流密度	15
1.7.2 激光器的谐振腔的模式	16
1.7.3 激光器的品质因子 Q 值和模式体积	17
1.7.4 温度对阈值电流的影响	17
1.7.5 异质结激光器的光场和电流限制	18
1.8 论文各章节内容	19
第 2 章 硅基 InAs 量子点电泵激光器	21
2.1 材料与器件结构	21
2.2 激光器器件工艺和测试	23
2.2.1 光刻工艺	25
2.2.2 刻蚀工艺	26
2.2.3 电极沉积工艺	32
2.2.4 测试平台搭建及器件测试	40
2.3 测试结果和分析	42

2.4 本章小结:	49
第 3 章 硅基 InAs 量子点垂直腔面发射微腔激光器	51
3.1 材料结构和生长	51
3.2 器件制作与性能测试	55
3.3 结果和讨论	57
3.3.1 材料性能.....	57
3.3.2 激光器性能.....	59
3.4 本章小结	63
第 4 章 SOI 基 InAs 量子点微盘激光器	65
4.1 微盘激光器的设计和生长	65
4.2 器件制作工艺与测试	69
4.2.1 湿法刻蚀工艺.....	70
4.2.2 干法刻蚀.....	72
4.3 结果和讨论	76
4.3.1 材料性质.....	76
4.3.2 器件性能.....	79
4.4 本章小结:	83
第 5 章 总结与展望	85
参考文献	87
附录	103
个人简历与发表文章目录	111
致谢	113

第 1 章 绪论

随着微电子技术的不断发展,晶体管数目急剧增加,引起芯片中用于电互联的空间被不断压缩,导致器件损耗、信号延迟、以及器件内部的噪声和串扰都明显增加,从而严重影响产品性能。此外,随着互联网和物联网迅速崛起和发展,在云端产生了大量的数据,这些数据都需要在数据中心进行处理,服务器之间传统的电互联会产生大量的热,而数据中心有约 45%左右的功耗用在扇热上。由此可见,不论是在微处理器芯片尺寸上的互连,还是在大规模数据中心服务器之间的互联互通,都对高速、大带宽、低功耗、低成本的互联解决方案有很大的需求。硅基光电子技术是将集成光路和集成电路结合在一起的技术,既能够利用光互联的高速、大带宽、低功耗、低成本的优势,又具有 CMOS 工艺兼容性,能利用现有 CMOS 工艺线,实现大批量低成本的制造,因此,硅基光电子被认为是下一代高性能计算及数据中心的关键技术^[2]。硅基光电子集成的潜力是在 1985 年开始被意识到的,经过几十年的发展,硅基光电子技术逐渐受到广泛的关注和系统的研究。现阶段硅基光电子集成电路中已经成功集成了高性能的分束器、分波(解)复用器、调制器、光探测器等,目前最大的挑战是片上光源的集成^[2]。片上光源的集成主要有键合技术和直接生长集成两种方式,键合技术存在着良品率低,性能不稳定和费用高的问题。2011 年英国伦敦学院大学首次通过直接生长的方式在硅的斜切衬底上实现 III-V 激光器在硅上集成^[3],在此之后有很多科学家研究如何在硅基上生长高质量的 GaAs 缓冲层^[4-6],比如采用斜切 Si (001) 衬底^[3,7], Ge/Si 虚拟衬底^[8,9], 氢退火工艺^[10,11], GaP 中间过渡层^[12-14], 和 V 型槽硅衬底^[15-17]等等。2015 年加州大学圣塔芭芭拉分校将 III-V/Si 的直接生长集成的硅基激光器的寿命提升到 5000 小时^[18,19]。但是上述所有技术几乎都存在高密度的位错和热失配问题,导致激光器的性能受到明显影响。

本论文通过直接外延的方式在 Si 衬底上和 SOI 衬底上直接生长 InAs/GaAs 量子点激光器来实现片上光源的制备。论文通过系统优化电泵 F-P (Fabry-Pérot) 腔激光器的制作工艺,成功实现了硅基量子点电泵激光器的激射,其性能处于国际前沿。论文采用在硅图形衬底和 SOI 图形衬底上构建“硅 (111) 晶面的锯齿

孔洞结构”的方法，大大降低了硅基和 SOI 基上所生长的 GaAs 缓冲层的位错密度，同时显著改善了衬底和缓冲层之间的热失配问题。在此基础上生长并制备了垂直发射腔面激光器，以及微盘激光器。此外，论文成功实现了 SOI 基量子点微盘激光器的制备，并发现所制备激光器具有低阈值功率，高品质因子等物理特性。

1.1 微电子技术发展现状

众所周知，从工业革命开始我们的生活便进入了“信息时代”，这是一个数字化的时代。在这个时代中最重要的变革是 1947 年 12 月 16 日 AT&T 公司贝尔实验室的三名科学家 William Shockley, John Bardeen 和 Walter Brarrain 发明了世界上第一支晶体管，从此人们进入了数字世界，晶体管也被誉为 20 世纪最伟大的发明。在这之后的半个多世纪里，从晶体管发展到集成电路，接着计算机的出现和更新，再到互联网的出现和普及，半导体技术在这个“信息时代”引来了它日新月异的高速发展。数字信息领域的发展程度通常采用集成晶体管的数目来描述，遵循摩尔在 1965 年提出的摩尔定律：最小单元器件价格不变，集成电路的复杂性以每年大约两倍的速度增长。（“The complexity for minimum component costs has increased at a rate of roughly a factor of two per year”）^[20]。后来这个定律最终被简化成：每过 18-24 个月集成电路中的晶体管数量会翻一翻。

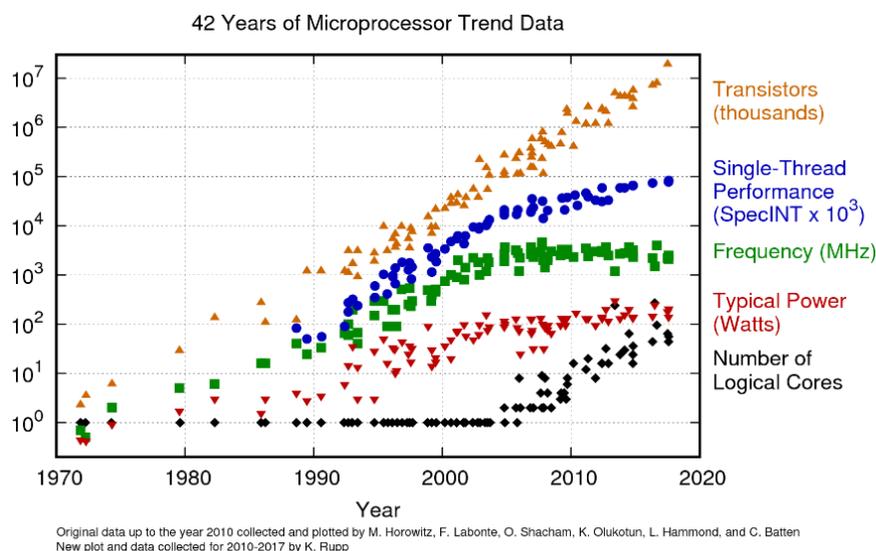


图 1.1 42 年来微处理器各项性能统计值，来源：英特尔公司

Fig. 1.1 42 years of microprocessor trend data from Intel

尽管摩尔定律在现代社会中依旧有效，但是从如图 1.1 可知，到 2017 年为止，近十几年来，除了集成电路中晶体管的数量依旧按照摩尔定律增加，其它方面的性能变化很小，比如电子时钟频率，功耗和单线程性能等等，其中电子时钟的频率决定中央微处理器 (CPU) 的主频速度，即 CPU 的运算能力。为了使摩尔定律继续有效，电子行业已经通过增加晶圆的尺寸和进一步压缩工艺节点的尺寸，从而最大程度地降低加工成本并增大每个线程中的逻辑核心数。

为了使摩尔定律继续在半导体产业界得以延续，需要进一步增加每个核心的集成密度。但是，微处理器的功率损耗与电子时钟频率和每个核心的集成密度成正比。目前，CPU 集成密度已经达到核反应堆相当的量级，如果继续增加，功耗将迅速上升。这就是为什么这么多年来，CPU 电子时钟的频率一直没有提升的主要原因。其次是在于晶体管数目急剧增加，引起用于电互联的空间被不断压缩。图 1.2 显示了 Intel 微处理器内部的金属相互连接。随着电互联维度的降低，虽然逻辑门延时降低，但是电阻和 RC 信号的延迟都会明显增加，同时还增加了器件内部的噪声和串扰，从而限制了性能的增益。此外，在图 1.2 中可以看出在目前的处理器中，几乎没有更多的空间用于电互联。

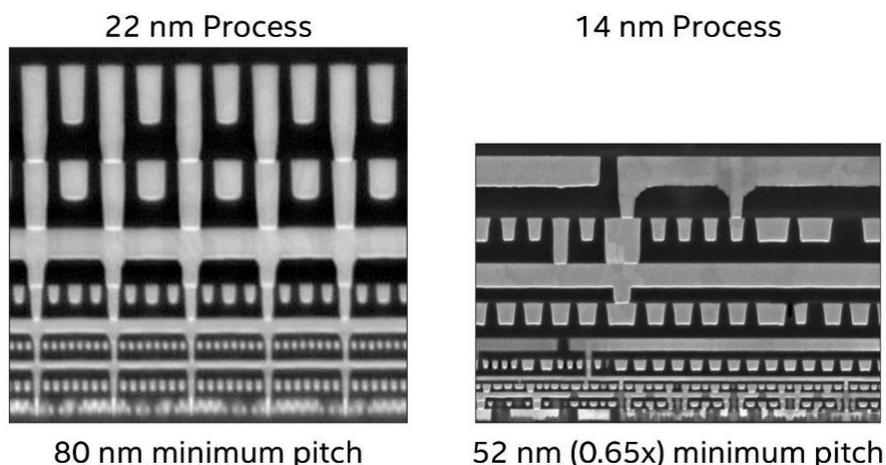


图 1.2 芯片中的金属互联，来源：英特尔公司

Fig. 1.2 Metal interconnects in a CPU, from Intel

随着器件线宽的进一步减小，也将导致良品率的下降和成本的上升，工艺尺寸的进一步减小受到限制。如图 1.3 所示 ITRS 在 2013 年预测 CPU 中晶体管中物理门的宽度将会在 2028 年到达 5 nm，然而仅仅过了 2 年，在 2015 年的预测报告^[21]中显示，门宽度将在 2021 年到达 10 nm 后不能再继续减小^[21]，这说明由于

受到材料本身性质的限制，工艺线宽已经接近极限。早在 2015 年 Intel 就宣布将在 2016 年实现 10 nm 工艺，但是由于工艺稳定性问题而不断推迟该计划^[22, 23]。为了进一步得到 CPU 计算性能的提升，目前采用平行增加逻辑核心数。因此，对于芯片内部互联的需求随着微处理器中核心数的增加而不断增加。由此可见，需要一个更高带宽的互联互通技术去克服上述挑战，才能进一步提升 CPU 的计算性能。

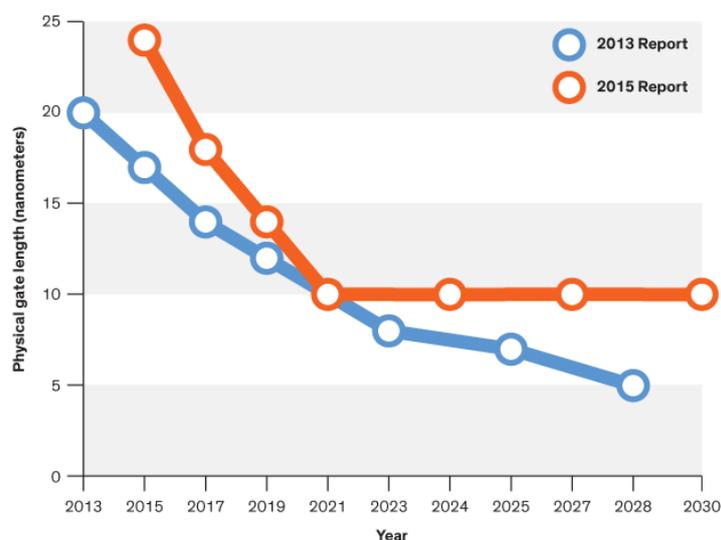


图 1.3 2013 年 (蓝线) 和 2015 年 (红线) ITRS 对晶体管门的最小宽度发展的预测
Fig. 1.3 The shrink time of physical gate length of transistors predicted by ITRS in 2013 (blue curve) and 2015 (red curve)

互联中对低功耗有高要求的另一个领域是数据中心。目前由于互联网和物联网迅速崛起和发展，在云端产生了大量的数据，这些数据都是在数据中心进行存储和处理。数据中心庞大的数据计算量会产生大量的热，据估计，数据中心冷却功耗占整体功耗的 45% - 50%^[24-26]。在传统的数据中心使用的仍然是电互联技术，与光互联技术相比，电互联将会增加 15% - 30% 的能耗，甚至更多^[27]，因此，有很多这样的数据中心，比如 Facebook，Google 和阿里巴巴等，它们大部分建造在北方天气寒冷的地方，或者在湖边等水资源充足的地方。从商业角度来讲，数据中心每年消耗在冷却高性能交换器上的费用，已经可以购买全套新设备了^[28]。

1.2 光互联

如上面所讨论的,为了跟上信息时代快速发展的步伐,不论在微处理器芯片尺寸上的互连,还是在大规模数据中心服务器之间的互联互通,都对高速、大带宽、低功耗、低成本的互联解决方案有很大的需求^[29,30]。光作为传输媒介,完美地匹配了上面提到的所有性能要求,这是因为光没有静止质量,几乎没有相互干扰,因此用光进行信号传输时,在同一个通道中可实现多路信号同时传输,再加上光的速度很快,能实现信号的快速处理。事实上,早在十九世纪八十年代我们已经在长距离的网络中使用了光纤形式的光互联。在此之后低损耗光纤已经成功应用于光纤到户等长距离通讯中。为了解决微处理器中逻辑核心之间的通信问题,光互联技术需要进一步向芯片对芯片之间的互联发展,将集成光路和集成电路相互集成。为了解决第一部分讨论的问题,光互联对电互联的替代需要进一步从板对板的互联向模块对模块、芯片对芯片、逻辑核心对逻辑核心之间的互联发展,互联对象尺寸不断减小,如图 1.4 所示那样需要不断减少互联距离,最终实现在硅基光电子电路中芯片级的光互联^[31-35]。然而,当器件之间过渡区的距离不断缩小时,单位体积的器件数量会显著增加,这也会增加光互联系统的费用和复杂程度。寻找一个经济、节能和高效的解决方案去实现高密度集成的光电路是我们目前面临的挑战。

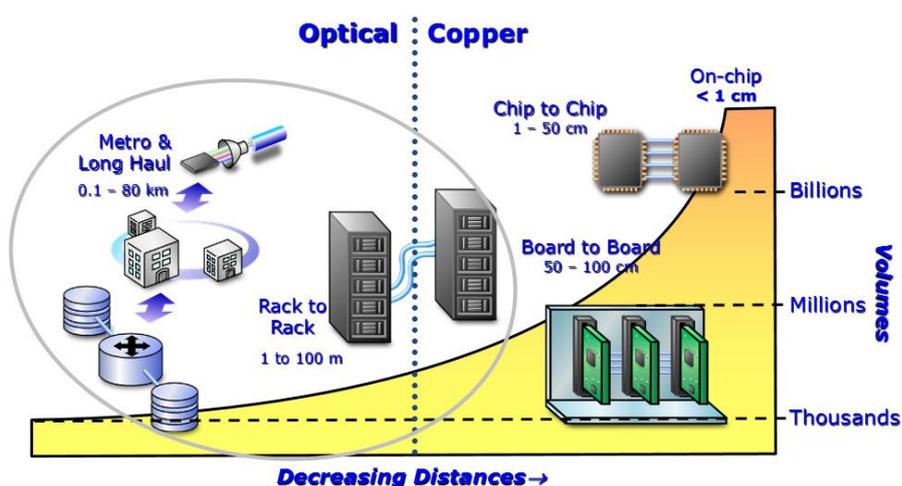


图 1.4 传输距离下的互联和器件密度之间关系的趋势图, 来源 Intel

Fig. 1.4 The trend of transmission distance vs. device volume for optical interconnects, from

Intel

1.3 硅基光电子

硅基光电子技术被普遍认为是下一代通信系统和数据交换技术最具潜力的关键技术。硅基光电子技术能够实现传统集成电路和光电路的集成,实现芯片之间的光互联和高密度数据的长距离传输,是解决高性能计算和数据中心所面临互联问题最具潜力的技术^[1]。硅基光电子技术之所以受到人们广泛关注的另一个原因是该技术的 CMOS 工艺兼容性,从而能利用 CMOS 生产线实现低成本、大批量生产。CMOS 工艺技术有非常高的制造精度和技术成熟度,一直引领着半导体行业最先进、高产量、重复性好的技术。硅基光电子所使用的基础材料不单是硅晶圆,还有 SOI 衬底。硅及其氧化物在通信波段 (C 波段: 1310 nm, O 波段: 1550 nm) 是透明的,因此它们都是理想的波导材料,此外,由于硅的折射率 (3.45) 与氧化硅的折射率 (1.45) 相差很大,因此对光场有很强的限制作用,能应用于低损耗的波导^[36]。这个优势也使得在 SOI 工艺中,硅基光电子技术成为通信波段范围内的最佳候选方案,尽管最初的 SOI 基的硅基光电子芯片 (PIC) 被应用于芯片上的通信、互通互联和传感器。也正是因为具备该优势,硅基光电子领域得到不断的发展,硅基光电子芯片的价格随着集成度的不断增加而降低,有预测表明^[2],当产品的价格低于 \$1/Gbps 时,硅基光电子互联将会在电互联和多模光纤互联的竞争中胜出,因此,百万级的数据中心和高性能计算公司正在计划在本次硬件替换周期中大规模部署基于硅基光电子的互联技术。

1985 年第一次研究并成功在 SOI 的晶圆上制备出波导的独立器件,这是最早意识到硅基光电子的集成潜力^[37, 38], Bookham Technology Ltd 公司在很短的时间内将波导器件商业化。在 1990 年代,第一个集成在硅基上的陀螺仪和压力传感器首次实现了商用化。在此之后,商用化的产品逐渐转移到用于通信的波分复用器。波分复用器能够在硅基晶圆上实现高密度、低成本的集成^[39, 40],实现多路高速传输的数据通过波分复用器复用耦合进入到单根光纤中,从而实现技术商用化的要求。

近年来,SOI 基波导, p-i-n 结调制器^[31], Ge 基和 Si/Ge 基的光电探测器和 Si/Ge 基调制器等器件不断实现应用^[41-43],由此推动数据通信得到进一步的发展。目前成功的硅光产品包含很多种硅基光电子技术的集成,一些公司比如 Luxtera、Acacia Communications 以及 Intel 等已经成功将这些技术成功应用于实际硅光产

品中^[44,45]。硅光集成 100 Gb/s 的收发器和相关产品已经大量应用于高性能计算、数据中心的互联和电子通信中的光传输，在这些产品中集成了功率分配器、分波复用 (MUXs) 和解复用器 (DEMUXs)、调制器、光探测器和激光器，这类光电集成芯片被认为是真正实现小型化和低成本的高数据密度的光芯片，如图 1.5 所示，虽然 SOI 和 Si 基上的工艺技术本身提供了全部的光子器件，但是硅基片上光源依然是一个挑战，这主要是因为硅是间接带隙半导体

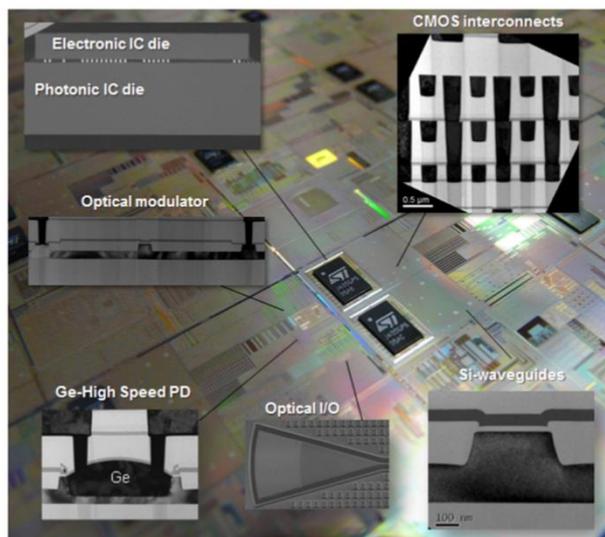


图 1.5 目前整体集成的硅基光电子芯片^[2,44]

Fig. 1.5 Overview of current fully integrated silicon photonics technology using a 3D electronic integrated circuit

1.4 硅基光电子上光源的器集成

由于硅是间接带隙材料，如图 1.6 所示，当电流注入后能带中的载流子将产生声子 (热)^[46]，因此硅本身并不是一种好的光源材料。但是片上光源对于硅基光电子器件来讲非常重要，因此有很多科学家致力于该方面的研究。主要从两个方面进行探索，其一是对硅材料通过特殊的处理来改变能带结构，提高发光效率，减少声子热效应。有研究采用独特的纳米技术的研究，比如多孔硅^[47,48]，硅纳米晶^[49]，SOI 超晶格^[50]和类似光子晶体的图形^[51]，尝试着去打破晶体对称性使声子局域化，并在纳米范围的晶体结构中产生激子的量子监禁。然而，依然难以实现室温连续激射的激光器。虽然有能够在室温下实现连续光泵浦激射的硅基拉曼激光器，但是需要很复杂的工艺去降低由于自由载流子的吸收和双光子吸收造成的波导损耗^[52]。另一种思路是采用直接带隙的 III-V 族材料作为发光材料 (图 1.6)，

然后将 III-V 材料和硅结合在一起^[7, 53, 54]。目前实现硅和 III-V 光源材料集成的方式主要有三种途径^[46, 55, 56]。

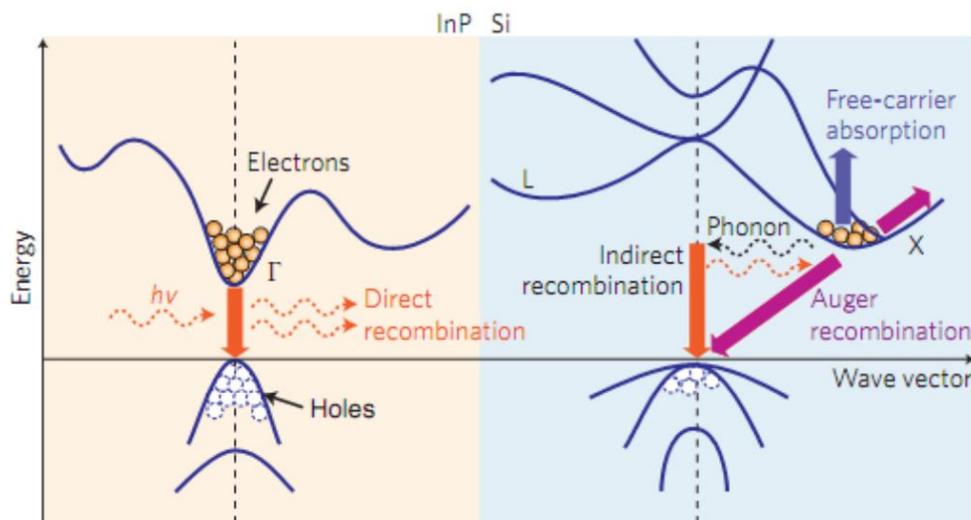


图 1.6 III-V 族材料和 Si 中的能带和主要载流子迁移示意图^[46]

Fig. 1.6 Energy band diagrams and major carrier transition processes in InP and silicon crystals

第一种方式是先将 III-V 族材料键合在 Si 的晶圆上，然后再进行后续的工艺制程，这种工艺的对准精度要求不高，但是在后续加工中 III-V 族材料会对传统的 CMOS 工艺线造成污染，而且后续加工中对准和无源器件的图形化工艺的实施困难性较大。

第二种方式是在 GaAs 基或其它基体材料上生长激光器结构，然后将生长好的激光器结构键合到已经图形化 (完成波导和 PIC 工艺) 的 SOI 晶圆上^[57]。在 2006 年，该技术有重大的突破，UCSB 的光电子研究小组制作出一个由 III-V 族量子阱材料作为增益介质的异质结激光器，并逐步耦合到硅波导中，实现了当时在通讯波段工作的最先进的电泵激光器^[58]。目前这种异质结激光器已经在 Intel 的 100G 的硅基光电子收发模块中的得到商业化的应用。该工艺需要采用高精度的对接耦合方式 (也就是混合工艺型)，工艺要求很高，良品率低。此外，在键合中使用的粘合剂热阻大，将大大降低了器件的散热性能，从而影响器件的稳定性和寿命。

第三种方法是将 III-V 族材料直接外延生长在 Si 或 SOI 的衬底上^[3, 10, 59]。该工艺一般先在硅或 SOI 衬底上生长缓冲层，并最大限度的降低位错增殖延伸到

有源区，目前一般采用 GaAs/Ge 缓冲层，也包括 InGaAs/GaAs 超晶格位错过滤层等结构，以及通过图形衬底的方式进一步降低位错密度，提高器件材料的质量。通过直接外延生长的方式获得的激光器具有更好的热稳定性，因为激光器部分直接和衬底生长在一起，所以器件中的热量更易向衬底传导，从而明显提升器件的散热性能。此外，在未来的光电集成芯片发展中，直接生长的方式还能实现有源器件的定位生长。先用传统的 CMOS 工艺线生长做好无源器件部分，再留出空间进行有源部分的生长，通过控制生长的厚度，在垂直方向上直接实现对准，最后对有源区域和无源区域进行统一加工，从而保证水平面上的对准，最后形成硅基光源的与硅光波导器件的单片集成。

与传统的单一 III-V 族光电集成相比，硅和 III-V 材料的集成拓宽了硅和 III-V 材料的应用领域。在两个通讯波段，硅的波导技术都提供了很低的传播损耗 (优于几个 dB/cm)，同时保留着很大弯曲度和高密度集成特点，而 III-V 是直接带隙材料，具有高的增益值和带隙调谐特性。

1.5 量子点激光器

半导体激光器的历史可以追溯到 1960 年块体 p-n 结材料的提出^[60]，但是在块体材料中光效率和量子限制作用都不高。在 1963 年 Herbert 和 Alferov 在同一年各自预言了异质结激光器^[61,62]。Alferov 在 1970 年制作出双异质结激光器，通过在高能带材料中插入低能带材料的方法，使得光场的限制和量子效率均得到提升，从而提升了激光器的性能^[63]。在 20 世纪 60 年代，分子束外延 (MBE) 技术已经用于高晶体质量的异质结的生长。通过使用这种分子束外延技术，能够设计并生长维度更低 (电子德布罗意波长的量级) 的激光器结构，形成量子阱结构，从而达到对电子有更强的限制作用。如图 1.7 所示不同材料结构和对应的态密度分布^[64]，当半导体结构在一个维度上被限制的时候，电子也在该方向上受到限制，因此在该限制方向上对应的能带结构是不连续的。当电子在三维方向上被限制时，能量-动能 (E-k) 关系是类似 delta 函数一样的分立态密度，这意味着电荷载流子只能占据一个受限的能级，由此可以进一步提高对电子的限制作用，提高量子发光效率。这就意味着，在理论上相比于量子阱激光器，量子点激光器能获得更低的阈值电流密度。此外，这种三维限制的量子点限制结构还能提升量子点激光器的温度性能。

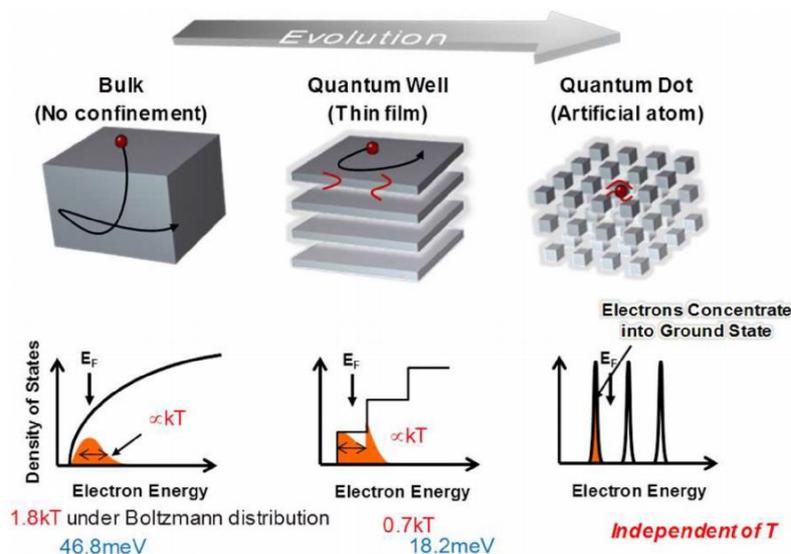


图 1.7 材料结构和对应的不同维度材料的能带密度：体材料，量子阱，量子点。

Fig. 1.7 Schematic structures and corresponding density of states of bulk, quantum well and quantum dot

1982 年, Arakawa 在理论上首次预言了量子点激光器, 并对量子限制作用和温度不敏感性都做了讨论^[65]。随后, 1994 年, N. Kirstaedter 在实验上成功制备第一个端面发射的电泵量子点激光器^[66]。1999 年量子点激光器的阈值电流低于量子阱激光器的阈值电流^[67]。在 2004 年, Fathpour 等科学家使用 p 掺杂的量子点实现了从 5 到 75°C 温度区间内工作的量子点($T_0 = \infty$)激光器^[68]。此后, 科学家们相继报道了更高工作温度的硅基量子点激光器^[4, 10, 56, 57, 59, 69]。

此外, 量子点激光器的另一个优势是, 对穿透位错不敏感。在硅基上通过直接生长的方式获得 III-V 激光器时, 在 Si 上生长晶体质量高的 III-V 缓冲层是获得高性能硅基激光器的基础。由于 III-V 材料和 Si 之间的晶格失配和热膨胀系数差异, 以及反向畴的原因, 极容易在 III-V 材料和 Si 界面上产生大量的位错缺陷, 如图 1.8 所示, 这些位错会往上传播, 穿过有源层形成穿透位错。当穿透位错穿过有源层时, 比如在量子阱激光器中, 量子阱将会被全部破坏, 所有被位错穿透的量子阱将成为复合中心, 导致发光效率急剧下降。在量子点结构中, 穿透位错只穿过个别量子点, 其它没有被位错穿透的量子点的发光并不受影响。高质量的量子点激光器不但能使用分子束外延 (MBE) 设备, 也能够使用金属有机物化学气象沉积 (MOCVD) 系统, 通过 Stranski-Krastanov (S-K) 生长模式生长得

到。此外，量子点能够实现叠层生长，从而在保证高模场增益的情况下，不会增加内部模式的损耗^[70]。

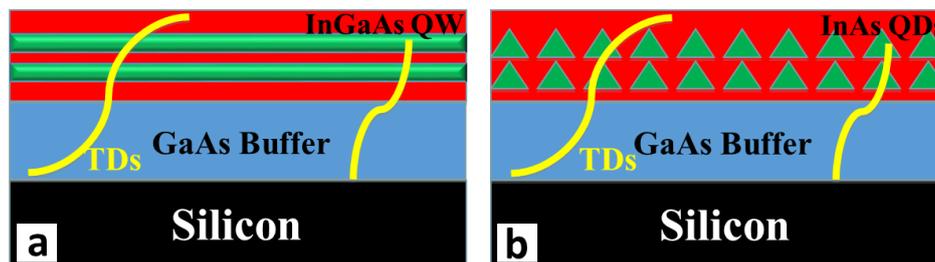


图 1.8 在量子点和量子阱中穿透位错的示意图

Fig. 1.8 Schematic of Threading dislocations in quantum well and quantum dot active layer

1.6 硅基激光器的类型及应用

硅基光电子中涉及的量子点激光器通常有水平端面发射 Fabry-Pérot (F-P) 腔激光器，垂直端面发射激光器和微盘激光器，每种类型的激光器各有优势。其中 F-P 腔激光器是最常见的激光器，因为激光器的腔长可以做的很长，因此能提供高功率的激光输出。垂直腔面发射激光器是光在上下两个反射镜之间来回震荡，因为上下两个反射镜之间的距离很近，所以该激光器又是微腔激光器，能实现低阈值激射。垂直腔面发射激光器能在垂直方向上进行光耦合，当反射镜采用布拉格反射镜时可实现波长的调制，同时垂直发射激光器能和探测器集成后能实现距离和表面轮廓等方面的探测。另一种微腔激光器是微盘激光器，该激光器在微盘的环形谐振腔中震荡而产生激光，该激光器因为有源区小，因此输出功率很小，但是可作为高密度集成中的光源。

1.6.1 水平端面发射激光器

水平端面发射激光器也就是传统的驻波式的 F-P 腔激光器。如图 1.9 所示，它是最简单的激光器，首先通过刻蚀形成光的波导，解离后在半导体激光器的波导的两端解离形成平行的两个镜面，这样就形成了 F-P 腔，激光器的增益介质在两个镜面之间，光在两个晶面之间震荡不断增益，从而形成激射。F-P 腔激光器的腔长可以做的很长，增加有源区的增益介质，因此 F-P 腔激光器可以产生高的激射功率，但是高工作电流时，激光一般是多模。激光器的模式随着脊波导宽度的减小而不断减少，当宽度到达 $4\ \mu\text{m}$ 左右的时候，激光器一般能实现单模激射，

此外激光器可以通过温度调制激光器的激射波长^[71, 72]。通过在激光器自然解离形成的反射镜上镀上增发膜,能显著降低激光器的阈值电流并提高激光器输出功率。此外通过在波导上制作光栅结构能将平行端面发射的 F-P 腔激光器做成 DFB 或 DBR 激光器^[71, 73, 74],从而 F-P 腔激光器具有激光波长和相位调制的性能。另外对于脊型波导宽度窄的单模 F-P 激光器,在其中一个出射端设计吸收介质,可以做成锁模激光器^[75, 76]。由此可见水平端面发射激光器有广泛的应用,据统计截止 2017 年有 3 百万左右的 F-P 腔激光器被用于数据通信市场^[64],因此在通信光互联和高性能计算中的光互联芯片中,端面发射激光器有非常重要的作用。在硅基光电子集成中, F-P 腔激光器和以 F-P 腔激光器为基础的激光器能为整个集成芯片提供各种形式的大功率光源。但是激光器和集成光子器件中波导的对准和激光器散热是限制该激光器广泛应用的主要原因。通过直接生长的方式在 Si 衬底或 SOI 衬底上集成激光器结构,在后续的工艺中激光器的加工和无源器件的图形化可以在同一套掩模板下实现,这样就能保证在水平面上的对准,再加上 MBE 对材料生长厚度的高精度可控性,能保证激光器的有源层的高度和波导刚好匹配,从而实现在垂直和水平面上对准的高精度控制。此外,相比于通过键合技术实现激光器在硅基上的集成,直接生长技术更能保证激光器的散热,这是因为键合技术中使用的黏贴剂会导致热阻的增加。

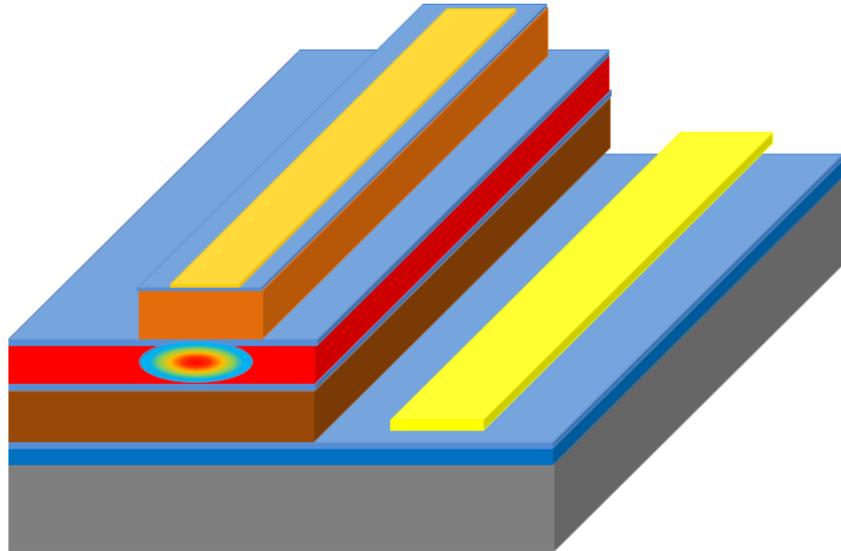


图 1.9 水平 F-P 腔激光器结构示意图

Fig. 1.9 Schematic of a typical F-P cavity laser structure

1.6.2 垂直腔面发射激光器

第一个在表面垂直出射的激光器可以追溯到 1965 年^[77]。而第一个真正意义上的垂直腔面发射激光器是在 1969 年，H. Soda 等人采用金属反射镜在 77K 下实现的^[78]，今年是 VCSEL 激光器诞生的 40 周年。1975 年通过 MBE 实现 GaAs-Al_{0.3}Ga_{0.7}As 布拉格反射镜的生长^[79]，之后以 DBR 作为反射镜的 VCSEL 激光器^[80-82]，和其它相应的 VCSEL 激光器^[83-85]、VCSEL 阵列^[86-88]和 VCSEL 激光器的应用相继被报道出来^[89-97]。

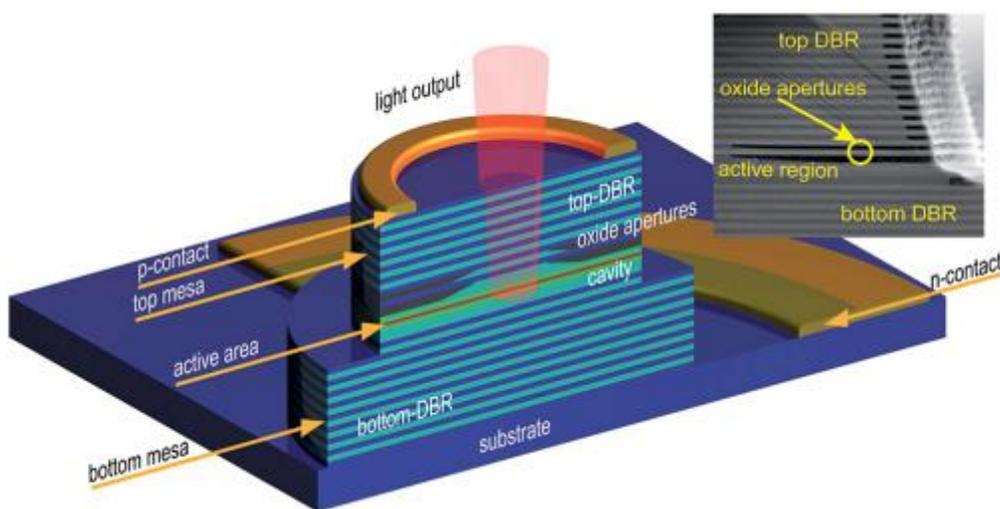


图 1.10 垂直腔面发射激光器结构示意图^[93]

Fig. 1.10 A typical gallium arsenide-based vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) structure

目前，垂直腔面发射激光器（VCSEL）的反射镜主要采用布拉格反射镜（DBR），如图 1.10 所示，谐振腔在上下两个反射镜中间，有源区位于谐振腔内，VCSEL 结构独特，具有许多优异的特性^[98]。比如垂直端面发射激光器的谐振腔的腔长通常很小，只有德布罗意波波长的量级，因此 β 值小，有微腔作用，从而实现低阈值的激射。上下反射镜之间形成的小谐振腔也使纵模之间的间隔加大，由此具有更高的动态调制频率。反射镜通常采用 DBR 结构，DBR 反射镜为多个周期的高低折射率材料交替组成，每一层为 $1/4$ 个波长，在作为反射镜的同时，能选择激光器激射光的波长。通过改变上下反射镜之间的距离可以调整谐振腔的长度，可实现波长的可调谐。同时，VCSEL 激光器的激光是垂直出射的，能在多层光电子芯片中用于不同层芯片之间的光信号传输。此外 VCSEL 激光器还有

低功耗、低成本、高稳定性的优势,同时垂直腔面发射激光器容易做成二维阵列,并且在硅基光电子器件中容易集成^[82, 83, 98]。因此,垂直腔面发射激光器是数据中心、高性能计算上和光互联多模光纤中的重要光源^[28, 93]。VCSEL 激光器在其它领域也有非常广泛的应用^[92],如:光传感、面部识别、激光打印、激光显示、激光照明、汽车电子、激光加工、消费电子、原子传感、激光雷达等等^[89-97]。

1.6.3 微盘激光器

微盘激光器是如图 1.11 所示的利用“耳语回廊”模式 (whispering-gallery mode, WGM) 在微盘环形腔内不断环形震荡而激射的一种微腔激光器。早在 1992 年美国贝尔实验室采用 III-V 族材料制作了第一个耳语回廊 (WG) 模式的微盘激光器^[99],在 0°C 下实现光泵激射,同年,在室温下采用脉冲电流,实现微盘激光器的电泵浦激射^[100]。此后,在降低微盘激光器的阈值激射功率,提高器件的工作温度以及采用不同的有源材料去提升微盘激光器性能等方面的做了一系列研究^[21, 101-107]。

通过品质因子(Q)和模式体积(V_m)这两个参数来描述微腔激光器谐振腔的性质,采用微盘作为激光器的谐振腔,可以极大地提高激光器模式的品质因子,同时明显减小激光的模式体积,从而大幅提升微盘谐振腔中载流子自发辐射的几率。因此,微盘谐振腔激光器能实现激光器的低阈值激射。此外,微盘激光器在实现范围可调谐微盘谐振腔半导体激光器中是一项很有吸引力的技术。这是因为微盘激光器不同于传统的环形激光器,在微盘激光器中,传统激光器的有源区和无源件的环形谐振腔相组合,形成激光器有源区行波的环形谐振腔,该谐振腔代替了传统的驻波式的 F-P 腔,从而提高了谐振腔侧模的抑制比、线宽并降低了频率啁啾^[108, 109]。另外,微盘激光器在硅基光电子集成中具有尺寸优势,能促进硅基光电子器件更高的密度集成。目前世界上已经通过键合或直接生长的方式实现了 Si 基微腔激光器^[110-112]。与垂直腔面发射激光器一样,微盘激光器不但在高性能计算、通信和数据中心上有重要的应用,在探测和传感器领域也有非常广泛的应用^[113-117]。

本文通过直接生长的方式制备了硅基电泵低阈值的端面发射激光器,硅基光泵垂直腔面发射激光器和微盘激光器,并首次制备出 SOI 基的微腔室温低阈值激射的激光器。

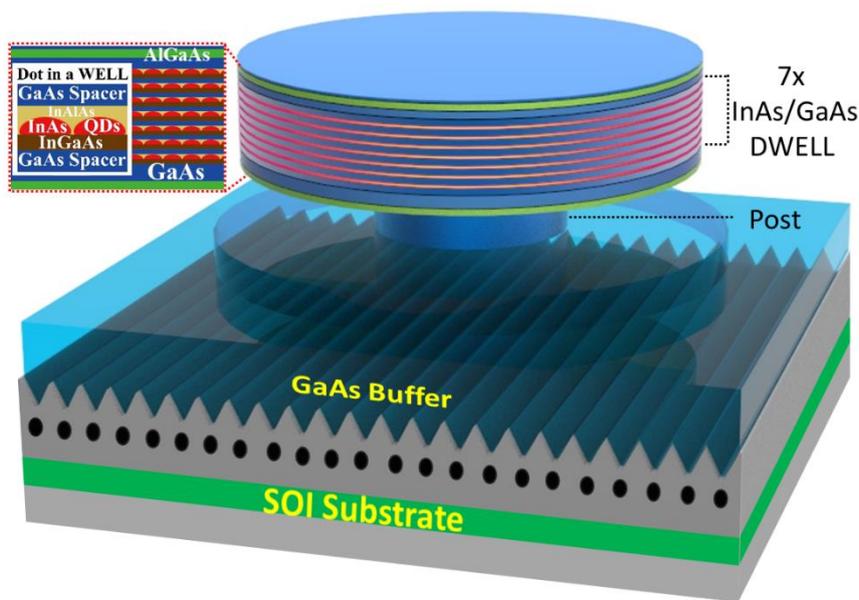


图 1.11 微盘激光器结构示意图

Fig. 1.11 Schematic of a typical Microdisk laser structure

1.7 半导体激光器性质及和结构

对于半导体激光器而言，激光和泵浦源功率之间的关系是激光器性能测试中最常用的。通过对激光和泵浦功率关系曲线拟合获得阈值功率或阈值电流。这里我们主要介绍电泵激光器的阈值电流和阈值电流密度，量子效率，激光器谐振腔模式，激光器的品质因子 (Q 值) 和模式体积 (V_m)，以及温度对激光器性能的影响。此外，还介绍了异质结激光器结构和光场的限制。

1.7.1 电泵阈值电流密度和注入电流密度

半导体激光器电流的增益 G 通常采用下面公式描述：

$$G = G_{tr} \left(\ln \frac{J}{J_{th}} + 1 \right) \dots\dots\dots (1.1)$$

其中 J_{tr} 是注入电流密度，当注入电流达到阈值的时候增益为^[118]：

$$G_{th} = \alpha_i + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right) = G_0 \left(\ln \frac{J}{J_{th}} \right) + G_0 \dots\dots\dots (1.2)$$

此时，注入电流能够采用线性(1/L)将 $\ln(J_{th})$ 拟合。拟合的直线和注入电流的截距被称为阈值电流。斜率大小和反射镜上的损耗成正比。其中 R 是反射率， L 是谐振腔的长度。

1.7.2 激光器的谐振腔的模式

在激光器谐振腔内，光沿着谐振腔轴向（即行波方向）传播会形成不同的驻波从而形成多纵模，同时在激光器的横截面上会有不同电磁场的分布形成多个横模^[118]。

纵模也就是不同波长的激光器模式，在激光器谐振腔的两个反射镜之间，只要满足下列条件：

$$p \frac{\lambda}{2} = L \quad \dots\dots\dots (1.3)$$

或

$$\delta v = \frac{c}{2L} \quad \dots\dots\dots (1.4)$$

在激光器谐振腔内就会形成稳定的驻波，其中 L 是腔长， λ 是波长， p 是整数，如图 1.12 (b) 所示，一个驻波就代表一个纵模，在不考虑发光带宽的情况下，理论上可以有无限个间距为 δv 的纵模。然而实际光源发的带宽是有限的，如图 1.12 (a) 所示，因此实际得到的激光器的纵模如图 1.12 (c) 所示。

微盘激光器的环形谐振腔是耳语回廊效应，由公式 1.3 可得纵模产生的条件为 $2\pi \times n_{eff} \times R = p \times \lambda_m$ ，其中 n_{eff} 是有效折射率， R 是微盘半径， p 是角量子数， λ_m 是波长。自由光谱范围 (FSR) 是指两个相邻纵模之间的间距。

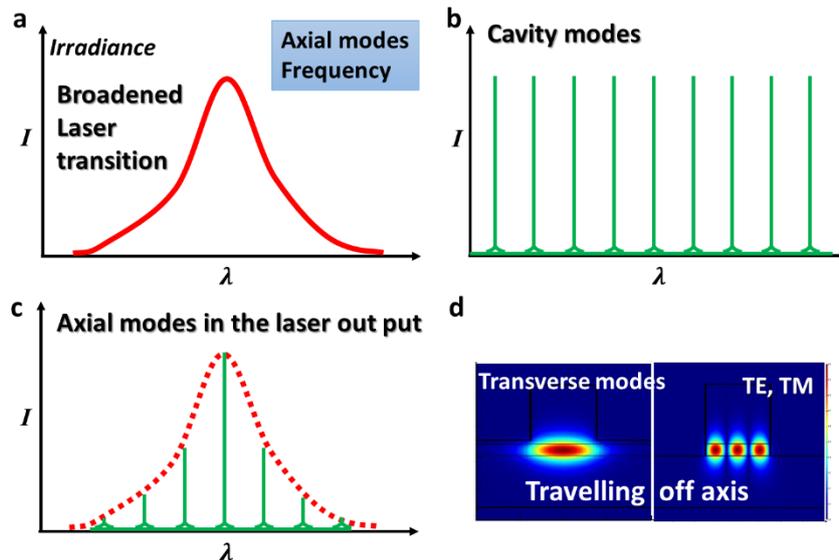


图 1.12 激光器模式示意图 (a) 激光器发光宽谱，(b) 腔模，(c) 激光器实际激射的纵模，(d) 激光器端面横模

Fig. 1.12 Schematic of laser mode, (a) broadened laser transition line, (b) cavity mode, (c) axial modes in the laser output, and (d) transverse mode

横模是光在传播方向的横截面上，由于电磁场的分布不同，形成不同的光场模式分布，如图 1.12 (d) 一般基模只有一个光斑，高阶模有多个光斑，但是他们都不是单一的纵模。

1.7.3 激光器的品质因子 Q 值和模式体积

品质因子可以用来描述谐振腔中光子被约束的时间，一般可定义为：

$$Q = \frac{2\pi \times \text{energy stored in the resonator}}{\text{energy dissipated per cycle}} \dots\dots\dots (1.5)$$

或

$$Q = \frac{\text{resonant frequency}}{\text{linewidth}} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \dots\dots\dots (1.6)$$

其中， λ 和 $\Delta\lambda$ 分别为激光波长和纵模线宽。当品质因子越高，意味着谐振腔内损耗越小，光子寿命也越长，相应纵模的线宽就越窄。微盘激光器尺寸很小，所以有源区面积也很局限，因此品质因子的高低对激光器性能有明显影响，微盘谐振腔的品质因子主要由谐振的本征损耗决定，如：辐射损耗、材料吸收损耗、散射损耗等。

模式体积 (V_m) 可以用来描述激光器谐振腔在空间上对光子的约束程度，定义为：

$$V_m = \int \frac{v\varepsilon(r)|E(r)|^2 d^3r}{\max[\varepsilon(r)|E(r)|^2]} \dots\dots\dots (1.7)$$

模式体积强烈依赖于微腔大小。对于 F-P 腔激光器，模式体积约为腔的体积；对于微盘激光器的环形谐振腔，模式的横截面积的量级可以到波长的平方数，相应的模式体积为微盘周长与横截面积的乘积。

1.7.4 温度对阈值电流的影响

半导体激光器的不足之处在于器件的阈值电流受工作温度的影响。但是由于量子点的能态是 δ 函数，因此器件对温度的敏感性很小。可以用 T_0 来描述器件对温度依赖性的特点， J_0 是温度外推到 $T=0\text{ K}$ 时的阈值电流。

$$J_{th} = J_0 \exp\left(\frac{T}{T_0}\right) \dots\dots\dots (1.8)$$

这样可通过具有温度依赖性的 L-I 曲线描述温度特性。 T_0 值越低则表示温度依赖性越强。对于量子点激光器，理论温度系数可以无限制地处于室温，这说明，量子点激光器在作为温度不敏感型的光源方面有巨大的潜力。

1.7.5 异质结激光器的光场和电流限制

在实际器件结构中需要考虑激光器对光场和外加电场的限制，从而保证器件的发光效率并提高器件性能。光场限制是指将泵浦产生的光尽可能地限制在有源区所在的谐振腔，保证更多的激发光能多次泵浦量子点以获得增益，从而提高增益损耗比，减小阈值电流。电场限制是指将外加电流限制在有源区中有效的发光区域，减少电流泄露到其它区域，从而提高发光效率。

在垂直方向上主要是光场的限制，光场的限制主要采用“光总是喜欢往折射率高的地方走”的原理设计，即在有源区的折射率最高。图 1.13 为双异质结结构对光场的限制，区域 1 和 3 分别表示衬底和有源区，区域 2 和 4 分别表示覆盖层，区域 3 有源区的折射率最高，区域 2 和 4 的折射率相等，但是低于有源区的折射率，在有源区两侧形成对称的折射率分布。从图 1.13 (c) 中可以看出，在该结构中光的模场能被有效的限制在有源区内。

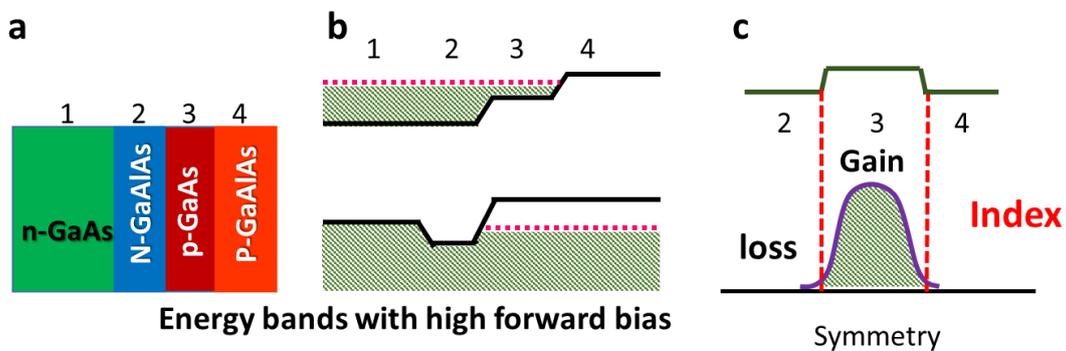


图 1.13 双异质结结构对光场的限制

Fig. 1.13 Diagram illustrating the action of double heterojunction structure in confining the radiation to the gain region

在水平方向上，一般有三种方式对光场和电场进行限制。如图 1.14 (a) 所示采用将高折射率的有源层埋在激光器中，两边的折射率都比有源层低，在激光器内形成类似于波导的结构，光模场主要限制在 n_1 红色区域，但是这种结构的激光器制作工艺很复杂，同时无法对电场进行限制。另一种如图 1.14 (b) 所示，通

过材料破坏的方式在蓝色阴影区域制造高电阻区域，形成对电场的限制，但是因为在破坏前后材料的折射率差别不大，因此无法对光场进行限制。最后一种如图 1.14 (c) 所示，采用刻蚀脊型波导的形式，将光场限制在波导下的有源层中，同时两侧没有半导体材料的脊型波导也能对电场进行很好的限制。因此该结构被广泛应用于半导体激光器中。

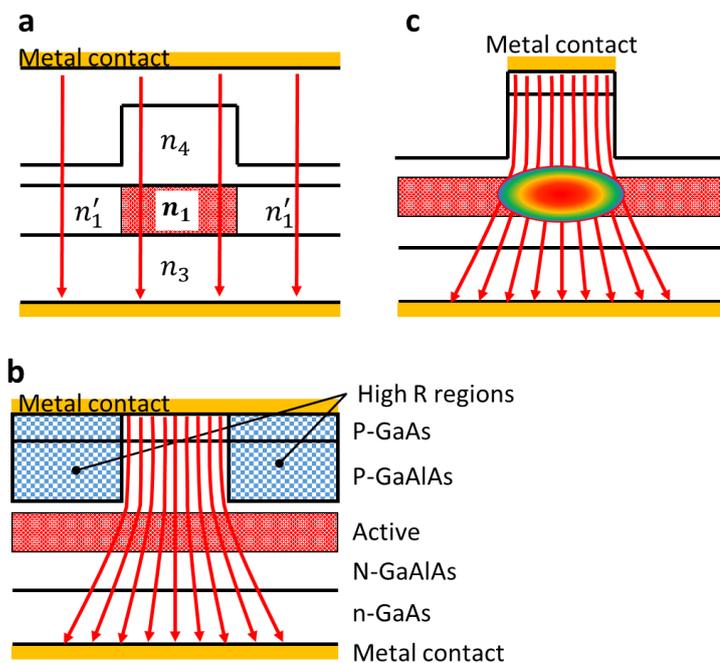


图 1.14 不同光电模场限制类型的激光器结构示意图

Fig. 1.14 Schematic cross-section of three-type laser structure

1.8 论文各章节内容

第一章，主要介绍了硅基光电子集成的发展和意义。硅基光电子是目前公认的解决数据中心和高性能计算中互联的最佳方案。硅基光电子能实现光电子器件的集成，实现高密度数据的长距离传输。此外，硅基光电子在利用传统的硅工艺线去实现大的晶圆尺寸，高通量的产出和低生产成本上具有很大的潜力。在硅基光电子集成中，光源的集成是目前最后一个需要攻克的技术难点。该章介绍了光源在硅基光电子芯片上的集成主要有键合技术和直接生长技术两种。介绍了硅基光源的研究现状和量子点激光器。以及对半导体激光器的性质和激光器设计中考虑的因素进行了介绍。

第二章，主要介绍了硅基 InAs 量子点电泵激光器。介绍了激光器的材料和激光器结构，详细研究了 InAs 量子点电泵浦脊型波导激光器制作中的关键工艺：光刻、刻蚀、电极沉积等。采用自主搭建的激光器测试平台，对激光器性能进行测试。研究了激光器的 I-V 性质、电光性能，温度特性、增反膜和封装工艺对器件性能的影响，以及不同泵浦源下器件的激射行为。最后对比了已经发表的其它激光器的性能。

第三章，主要介绍了以 DBR 为反射镜的硅基垂直腔面发射 InAs 量子点激光器。采用第二章获得的最佳刻蚀工艺条件制备了垂直腔面激光器。最后对激光器材料和激光器器件性能进行了表征。

第四章，介绍了 GaAs 基、Si 基、SOI 基上制备 InAs 量子点微盘谐振腔激光器。本章中所使用的样品是采用同样的外延生长方式在硅，GaAs 和 SOI 衬底上直接生长 III-V 的激光器结构。首次实现 O 波段光泵浦 InAs/GaAs 量子点微盘激光器在 SOI 基上的直接外延与器件制备。作为对比，在相同条件下生长并制备了 GaAs 基和 Si 基的微盘激光器。研究了微盘激光器器件的制作工艺，并对 GaAs 基 Si 基和 SOI 基的量子点微盘激光器的性能进行了表征和分析，最后对比了已经报道的 Si 基光泵微盘激光器的性能。

第五章，是总结和展望。对全文进行总结，并对可能有意义的工作进行展望。

第 2 章 硅基 InAs 量子点电泵激光器

本章介绍了硅基电泵浦 InAs 量子点激光器的器件制作及其性能测试。首先对激光器的材料结构和激光器结构进行简单介绍,然后详细研究了激光器制作工艺,比如:光刻工艺、干湿法刻蚀工艺、电极工艺等。最后对激光器的性能进行测试分析,对激光器的电流与电压 (I-V) 性质,电光(L-I)性能,器件工作温度,增反膜的作用等进行详细的探讨,同时对比了不同工艺条件下制作的激光器的性能。最后,统计并比较了目前已发表的同类激光器的性能。

2.1 材料与器件结构

论文中所使用的样品是采用外延生长方式在硅衬底上直接生长的 InAs 量子点激光器结构,如图 2.1 所示。首先在 Si 衬底上生长 GaAs 缓冲层,在缓冲层中包含多层超晶格结构的位错过滤层,用于阻碍位错穿透到 GaAs 缓冲层表面,激光器材料生长在 GaAs 缓冲层上。最接近 GaAs 缓冲层的是蓝色区域 400 nm 厚的高掺杂浓度的 GaAs 层,用于做 N 型电极接触。图中橘黄色的区域为是 1300 nm 厚的 N 型/P 型轻掺杂的 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 覆盖层。包含 10 层均匀分布量子点的有源区在 N 型和 P 型覆盖层之间。在 P 型覆盖层上面是 300 nm 重掺杂的 GaAs 层和 50 nm 的重掺 GaAs 盖层,用于和金属形成 P 型欧姆接触。激光器材料中的缓冲层和激光器结构均由双腔 MBE 技术原位生长提供,激光器材料均一稳定。

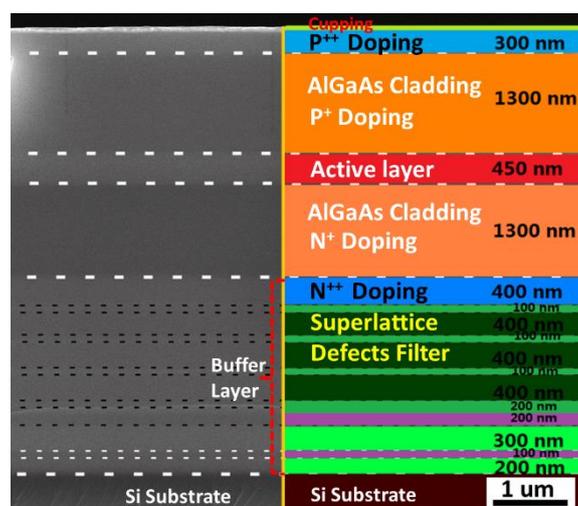


图 2.1 硅基 InAs 量子点激光器的材料结构

Fig. 2.1 The cross-sectional SEM image of InAs/GaAs laser structure on Si (001)

图 2.2 显示了激光器的结构示意图，因为激光器有源区材料的折射率比两侧 $1.3\ \mu\text{m}$ AlGaAs 的覆盖层的折射率高，所以在垂直方向上，光的模式能被有效限制在有源层中。同时激光器采用脊型波导结构，在横向能将模场限制在脊型波导的正下方的有源区域上。P 型电极直接沉积在样品最表面的 P 型重掺杂区，N 型电极则是通过刻蚀露出 N 型盖层下的 N 型重掺杂区，然后将 N 型金属电极沉积在 N 型重掺杂区，对应的刻蚀深度为 $3550\ \text{nm}$ 。

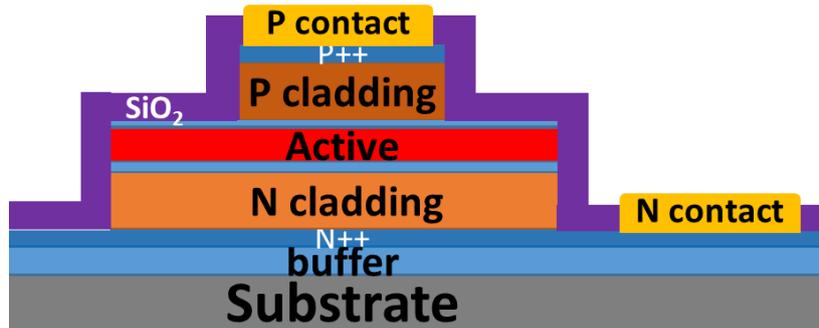


图 2.2 硅基 InAs 量子点激光器器件的结构示意图

Fig. 2.2 Schematic of an InAs QD laser structure

如图 2.3 (a) 和图 2.3 (b) 所示，在理想状态下，脊型波导的波导刻蚀深度在有源区的上方和下方基本没有差别，均能有效限制光场。但是，当刻蚀深度超过有源区时，有源区刻蚀侧壁的粗糙度将导致有源区光的散射，增加激光器的损耗。因此，我们采用图 2.3 (a) 所示方案，即波导的位置位于有源区上方，对应的刻蚀深度为 $1.6\ \mu\text{m}$ 。其它没有电极的地方均有 SiO_2 材料作为介质薄膜保护器件，具体工艺流程见下文介绍。

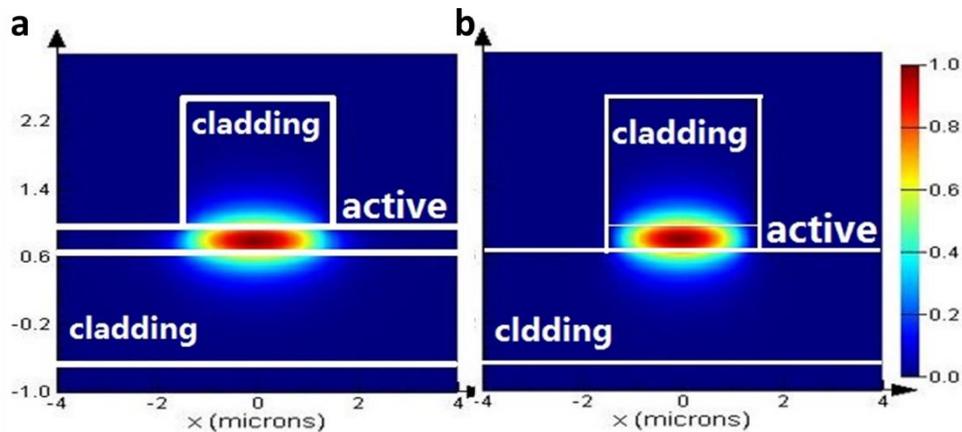


图 2.3 不同刻蚀深度下激光模场的分布

Fig. 2.3 Mode distribute at the cross-section of ridge with different etching depth

2.2 激光器器件工艺和测试

在实际器件制作过程中,随着工艺步骤的进行,器件表面的污染会逐渐加重,因此在器件工艺设计的时候,往往需要将清洁度要求最高的工艺尽可能地放在最前面,同时需要考虑到不同器件制作步骤之间的相互影响。本文采用两种工艺设计方案制作激光器,分别为工艺 A 和工艺 B,其中工艺 A 采用优先刻蚀脊型波导,因为波导侧壁的粗糙度直接影响脊型波导中的光损耗;工艺 B 采用优先沉积 P 型电极金属,因为清洁的样品表面能保证金属电极和样品之间的接触并保证器件电极性能的均一性,甚至降低器件电阻。

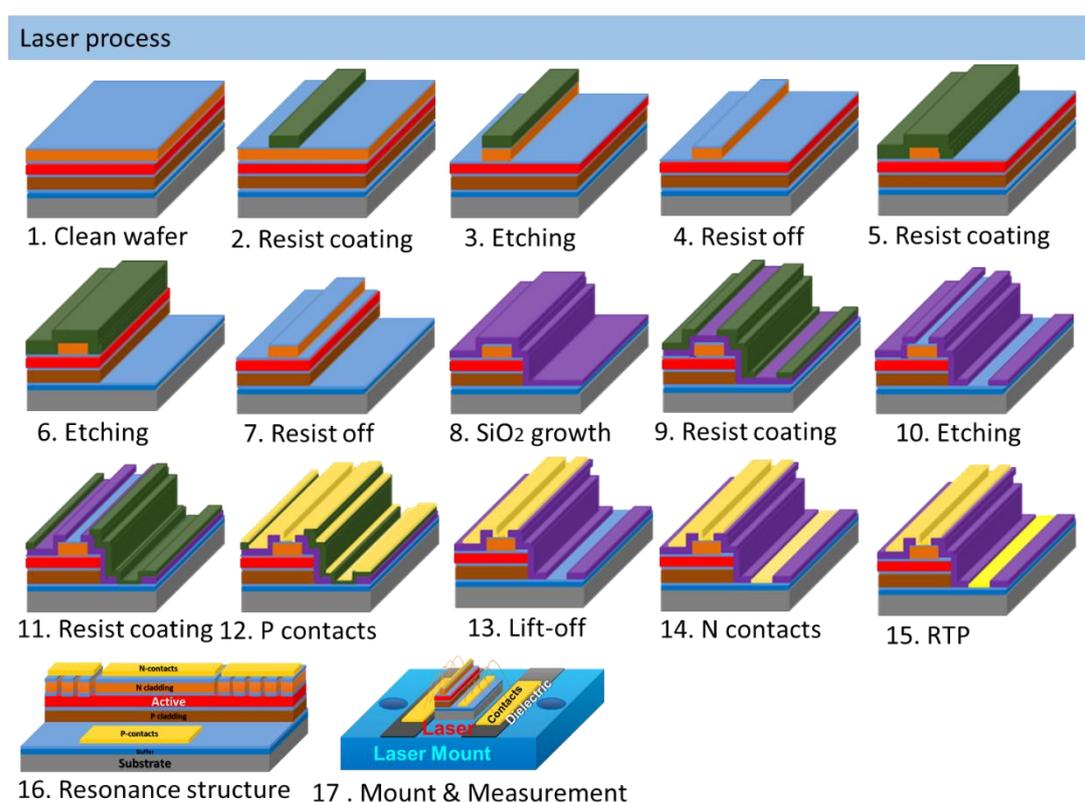


图 2.4 激光器制作工艺 A 的流程图

Fig. 2.4 Schematic diagram of laser process A

如图 2.4 所示工艺 A, 第一步先刻蚀脊型波导, 工艺流程主要包括: 1. 脊波导结构刻蚀, 采用 SUSS MA6 紫外曝光机进行光刻, 然后用 ICP 进行刻蚀制作脊型波导; 2. 刻出 N 型电极区, 通过紫外曝光后, 用光刻胶做掩膜, ICP 刻蚀 $3.55\ \mu\text{m}$ 后露出重掺杂的 N 型电极区; 3. 二氧化硅介质层生长, 在第一步和第二步后深度去胶, 然后在 $380\ ^\circ\text{C}$ 下, 采用牛津的 PECVD 沉积 $800\ \text{nm}\ \text{SiO}_2$

介质层；4. 二氧化硅电极窗口刻蚀，光刻后使用光刻胶作为掩膜，采用 RIE (牛津仪器) 刻蚀二氧化硅，开出用于沉积 P 型和 N 型电极的窗口；5. P 型电极制作，采用双层胶工艺光刻形成 undercut 结构，然后使用电子束蒸发沉积 Ti-Au 金属作为 P 型电极；6. N 型电极制作，同样采用双层胶工艺和热蒸发制作 N 型电极；7. 退火，在快速退火炉中 360 °C 下退火 90 s；8. 减薄及谐振腔制作，采用自动研磨抛光器，将器件减薄至 60 nm 左右，然后通过解离获得谐振腔；9. 测试等七个步骤。

工艺 B 优先沉积 P 型电极，如图 2.5 所示，工艺流程主要包括：1. P 型电极沉积；2. 脊波导结构刻蚀；3. N 型电极层的刻蚀；4. 二氧化硅介质层生长；5. 二氧化硅电极窗口刻蚀；6. N 型电极制作；7. Probe 电极制作；8. 退火；9. 减薄及谐振腔制作；10. 测试等七个步骤。

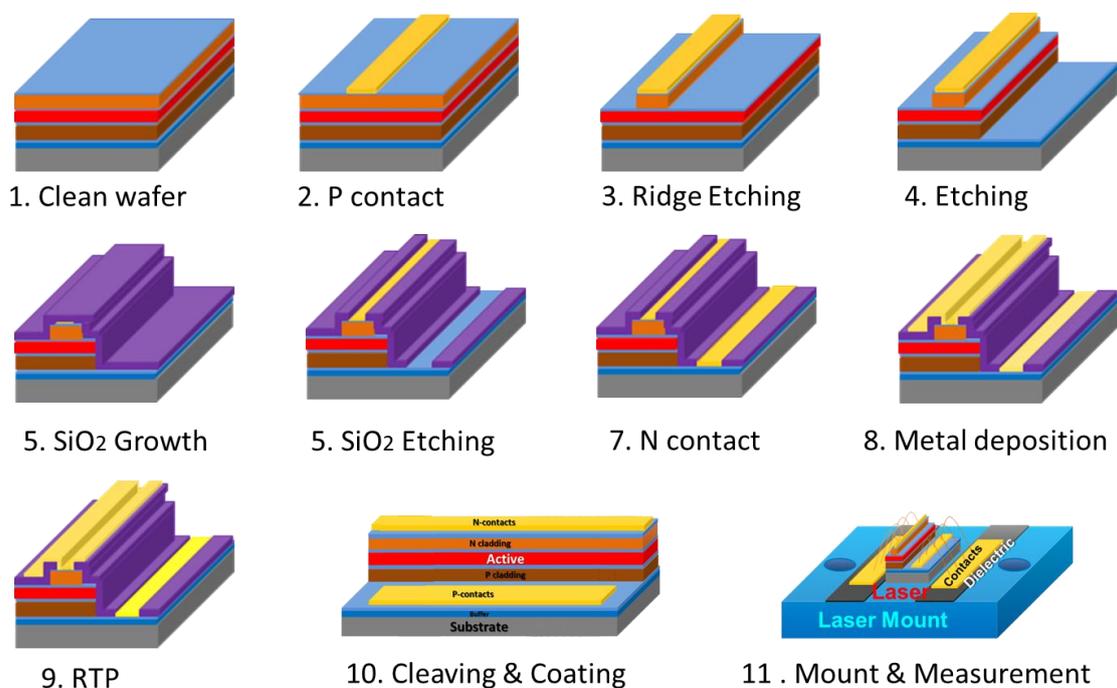


图 2.5 激光器制作工艺 B 的流程图

Fig. 2.5 Schematic diagram of laser process B

其中光刻工艺主要包括晶圆清洗、烘干、涂胶、前烘、曝光、显影、定影、烘烤等步骤。刻蚀工艺主要包括光刻、ICP 刻蚀和去胶，电极制作主要包括光刻、金属沉积、lift-off、退火等工艺步骤。测试主要分为器件安装到热沉底座，温度控制，I-V 测试 L-I 测试。激光器制备工艺中对器件起决定性作用的工艺为光刻，

刻蚀深度和刻蚀表面的光滑度和陡直度的控制, 金属-半导体接触以及退火工艺。本文针对这些工艺的各个部分进行了系统的研究和优化, 并确定了各个工艺的最佳工艺条件。最后采用自主设计搭建的控温测试平台对激光器器件性能进行测试分析。

2.2.1 光刻工艺

光刻技术是每个工艺步骤的基础, 光刻时, 将光刻板上的图形准确转移到样品表面是光刻的关键, 本文基于 $3\ \mu\text{m}$, $5\ \mu\text{m}$, $10\ \mu\text{m}$, $20\ \mu\text{m}$ 四种线宽的掩模板, 对 AZ6130, S1813, AZ6112 三种光刻胶进行了系统的实验。实验中采用 SUSS MA6 光刻机, 紫外光的光强为 $15\ \text{mW}$, 旋涂中的转速为 $6000\ \text{rpm}$ 。这里的 AZ6130 光刻胶在 $6000\ \text{rpm}$ 下的厚度是 $2.7\ \mu\text{m}$, S1813 光刻胶在 $6000\ \text{rpm}$ 下的厚度为 $1.0\ \mu\text{m}$, AZ6112 光刻胶在 $6000\ \text{rpm}$ 下的厚度为 $0.8\ \mu\text{m}$ 。相对来讲 AZ6112 光刻胶对紫外光非常的敏感, 涂覆后厚度薄, 有利于细小结构的曝光和图形化。AZ6130 光刻胶旋涂后, 光刻胶厚度大, 可以作为刻蚀的掩膜。图 2.6 为 AZ6130 光刻胶在 $6000\ \text{rpm}$ 旋涂后的曝光和显影结果, 该结果是通过光学显微镜观察统计后画的线条结构示意图, 从图中可以看出曝光显影条件可选取: 曝光 $6.0\ \text{s}$, 显影 $50\ \text{s}$; 曝光 $6.5\ \text{s}$, 显影 $40\ \text{s}$; 曝光 $6.5\ \text{s}$, 显影 $50\ \text{s}$ 。我们用类似的方法得到 AZ6112 光刻胶的最佳曝光参数为: 曝光时间 $2.0\ \text{s}$, 显影时间 $30\text{-}35\ \text{s}$ 。

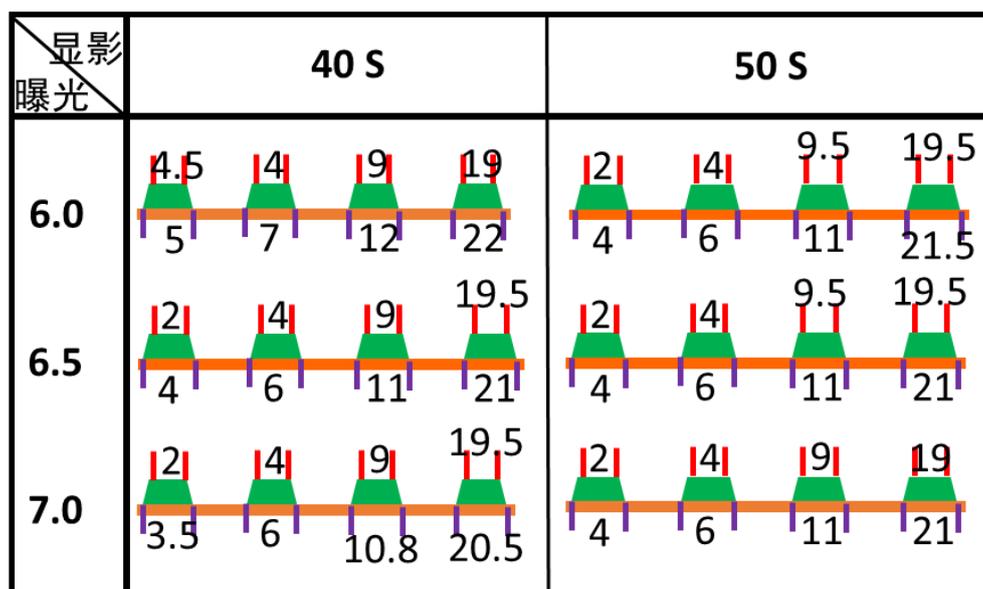


图 2.6 AZ6130 光刻胶在 $6000\ \text{rpm}$ 旋涂后的曝光和显影结果

Fig. 2.6 The line width of photoresister after developing

2.2.2 刻蚀工艺

刻蚀工艺直接决定脊型波导的陡直度和刻蚀表面光滑度,波导的陡直度决定着脊型波导对光场的限制作用,而刻蚀表面的光滑度则是影响光在谐振腔中损耗的关键因素。陡直而又光滑的侧壁能保证激光器的性能。此外刻蚀速率的控制也决定器件能否刻蚀到目标位置。对于脊型波导的刻蚀,过刻蚀将导致激光器损耗的增加。欠刻蚀会因为波导距离有源层太远,导致模场限制作用不强,也会导致损耗的增加。对于N型重掺杂区电极层的刻蚀,当刻蚀深度不够时,N型电极轻掺杂的AlGaAs盖层之间难以形成欧姆接触,导致器件电阻很大,大量产热,甚至不工作;当刻蚀深度过深,N型电极金属和缓冲层接触,不但难以形成欧姆接触,而且缓冲层中大量的位错也会进一步增加器件电阻,降低器件的性能。

由此可见,不论是刻蚀的形貌质量还是刻蚀深度的控制对器件的影响都是至关重要的。刻蚀技术主要分为湿法和干法刻蚀,湿法刻蚀的优点是工艺简单,高效,但是湿法刻蚀受环境、不同批次溶液浓度差异、操作人员等因数影响大,可控性差。同时不同的刻蚀溶液对不同材料的刻蚀速率和刻蚀方向有一定的选择性,有利于选择性刻蚀;干法刻蚀虽然工艺复杂,刻蚀效率低,但是受刻蚀设备腔体以外的环境温度影响小,侧壁陡直度好,对材料的选择性比湿法刻蚀弱。本文对两种方法进行了系统的实验研究。

首先采用湿法腐蚀的方法对GaAs材料进行刻蚀,通过调研选三种常用的腐蚀溶液进行实验,分别为 $K_2Cr_2O_7/CH_3COOH/HBr$ (KCB)体系、 $HNO_3+H_2O_2$ (NH)体系和 $HCl+H_2O_2$ (CH)。采用不同配比和不同浓度的腐蚀溶液,对GaAs材料腐蚀不同的时间,然后通过台阶仪测试刻蚀深度,采用SEM观察刻蚀后样品表面的形貌特征,确定刻蚀的陡直度和刻蚀面的粗糙程度。结果发现在我们实验室所在条件下进行的湿法腐蚀,刻蚀的条件均不能满足器件对刻蚀陡直度和侧壁光滑度的要求。图2.7给出了三个典型的SEM结果,从左到右分别为KCB体系、NH体系和CH体系的SEM图片。从图中可以看出KCB体系的光滑度和陡直度都要好于另外两种体系,但是线条两侧的刻蚀深度不一样,刻蚀角度大约为 50° ,CH体系的陡直度非常的差,而NH体系的陡直度虽然最好,但是侧壁的粗糙度很大,刻蚀结果均不能满足激光器脊型波导的刻蚀要求。因此,在此基础上我们进一步对干法刻蚀工艺进行了系统的研究。

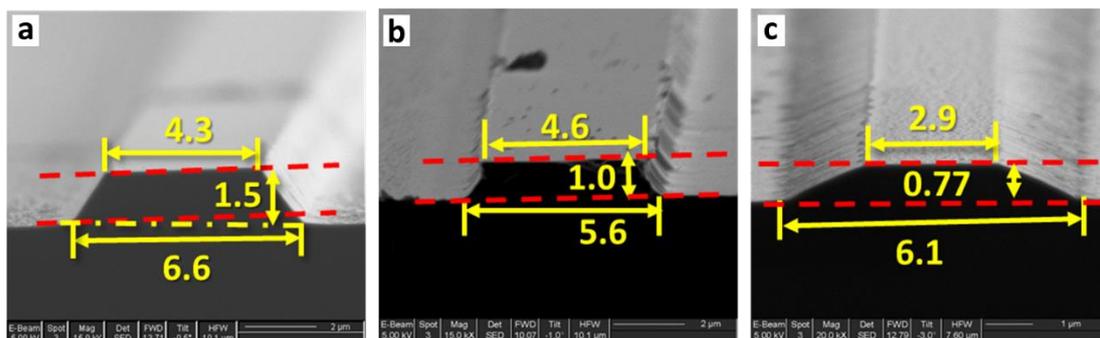


图 2.7 KCB 体系 (a)、NH 体系 (b) 和 CH 体系 (c) 刻蚀后的 SEM 图

Fig. 2.7 SEM images of GaAs ridge etching by KCB (a), NH (b), CH (c) solution

器件工艺中涉及到的干法刻蚀主要有电感耦合等离子体增强刻蚀 (ICP)，和反应离子刻蚀 (RIE)。其中 ICP 主要用于激光器脊型波导的刻蚀，RIE 主要刻蚀介质材料 SiO₂，开电极的窗口。下面主要对 ICP 刻蚀工艺进行详细展开，在 ICP 刻蚀工艺基础上，进一步探索 RIE 刻蚀工艺，相对较为简单，因此本文不再详细介绍 RIE 工艺研究细节。

采用 ICP 刻蚀材料时，存在两种刻蚀作用，分别是来自粒子对样品表面产生物理轰击形成的物理性刻蚀，和等离子体化的气体离子对样品的化学腐蚀，其中化学腐蚀会增加横向刻蚀的速率。当腔体中气体流量大，反应气体气压高，横向刻蚀明显，当腔体中反应气体气压小，离子平均自由程长，刻蚀纵深比高。基于 ICP 刻蚀原理，设置了两个极端的刻蚀条件 (如表 1 所示)，从实验结果的 SEM 照片 (图 2.8) 中可以看出，工艺气体流量大，反应腔内气压高，ICP 功率高的条件下，GaAs 材料的横向刻蚀非常的明显。相反的，低功率、低气压、气体流量小的条件下，横向刻蚀不明显。由此可以推断实现陡直刻蚀的刻蚀条件应介于两者之间。

表 2.1 极端干法刻蚀条件

Table 2.1 Drt etching condition

BCl ₃ sccm	Cl ₂ sccm	Pressure mborr	RF W	ICP W	Temperature °C	Time min
5	3	10	65	500	20	2
50	18	3	50	1000	20	2

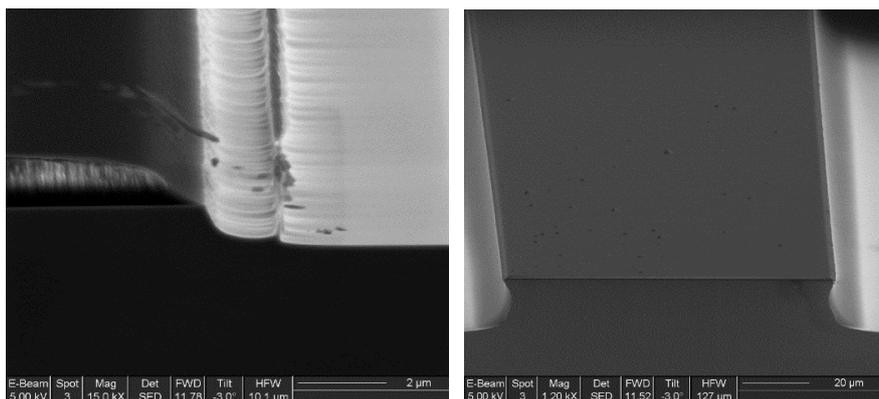


图 2.8 不同刻蚀条件下的 SEM 图

Fig. 2.8 SEM image of GaAs etching Morphology by ICP

表 2.2 不同气流量的刻蚀条件

Table 2.2 Etching condition with different gas flow of BCl_3 and Cl_2

NO.	BCl_3 sccm	Cl_2 sccm	Pressure mborr	RF W	ICP W	Temperature °C	Time min
1#	20	9	6	50	500	20	2
2#	10	6	6	50	500	20	2
3#	7	4	6	50	500	20	2
4#	5	3	6	50	500	20	2

表 2.3 不同腔体总气压和不同 RF 功率下的刻蚀条件

Table 2.3 Etching condition with different chamber pressure and RF power

NO.	BCl_3 sccm	Cl_2 sccm	Pressure mborr	RF W	ICP W	Temperature °C	Time min
5#	10	6	6	50	500	20	1
6#	10	6	2	50	500	20	2
7#	10	6	6	50	500	20	2
8#	10	6	6	100	500	20	1

表 2.4 不同 ICP 功率下的刻蚀条件

Table 2.4 Etching condition with different ICP power

NO.	BCl_3 sccm	Cl_2 sccm	Pressure mborr	RF W	ICP W	Temperature °C	Time min
9#	10	6	6	50	1000	20	1
10#	10	6	6	50	800	20	1
11#	10	6	6	50	500	20	2

基于上述结果,在表 2.1 极端干法刻蚀条件的区间内,以二氧化硅作为掩膜,设计了表 2.2 到表 2.4 所示的一系列实验,分别对不同工艺气体流量,不同腔体压强,RF 功率,以及 ICP 功率进行了系统的研究。

通过 SEM 对上述条件下刻蚀后的 GaAs 材料表面的陡直度和侧壁刻蚀光滑度进行表征,以此判断刻蚀条件的好坏,因为刻蚀深度可以通过时间控制,因此实验中刻蚀深度不作为刻蚀条件优劣的衡量标准。图 2.9 为表 2.2 改变工艺气体的条件下采用 ICP 刻蚀 GaAs 晶圆后,晶圆的断面 SEM 照片。从图中可以看出当 BCl_3 为 20 sccm、 Cl_2 为 9 sccm 与 BCl_3 为 10 sccm、 Cl_2 为 6 sccm 的时候,ICP 刻蚀获得的侧壁陡直度和刻蚀表面粗糙度都优于另外两个条件的刻蚀结果。此外,考虑到高的工艺气体流量容易对材料造成较为明显的横向刻蚀。因此在气体流量上,工艺气体 BCl_3 选用 10 sccm, Cl_2 选用 6 sccm。

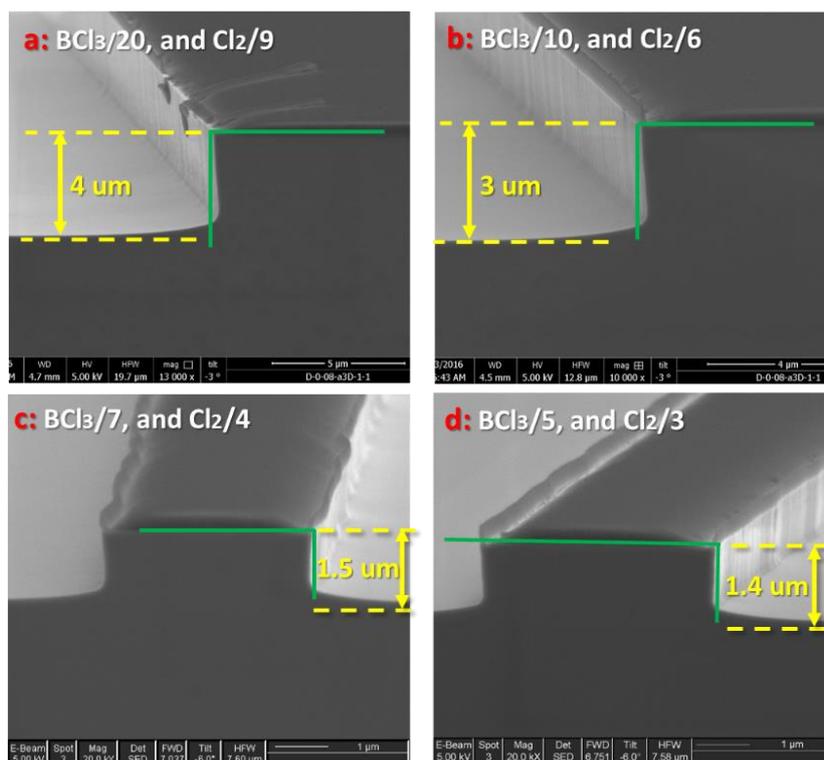


图 2.9 不同工艺气流量下刻蚀后的 SEM 图

Fig. 2.9 SEM of etching sidewall morphology with different gas flow

在上述实验的基础上,进一步优化刻蚀中的总气压和 RF 功率,具体条件见表 2.3 所示。图 2.10 显示的是在其它刻蚀条件一样的情况下,反应腔体内气压分

别为 2 mbar 和 6 mbar 的刻蚀结果。从 SEM 图中可以看出在反应腔体中气压为 6 mbar 的时候，刻蚀表面的光滑度和侧壁陡直度均好于 2 mbar 的结果。在此基础上保持其它条件不变，进一步研究 RF 功率对刻蚀侧壁的影响，图 2.11 为 RF 功率分别为 50 W 和 100 W 条件下的刻蚀结果，从图中看出在 100 W 功率下刻蚀获得的侧壁有明显的内凹，同时侧壁表面的粗糙度也显著增加，这是由高 RF 功率引起横向刻蚀增加所导致。因此选用 6 mbar 腔体气压和 50 W 的 RF 功率。

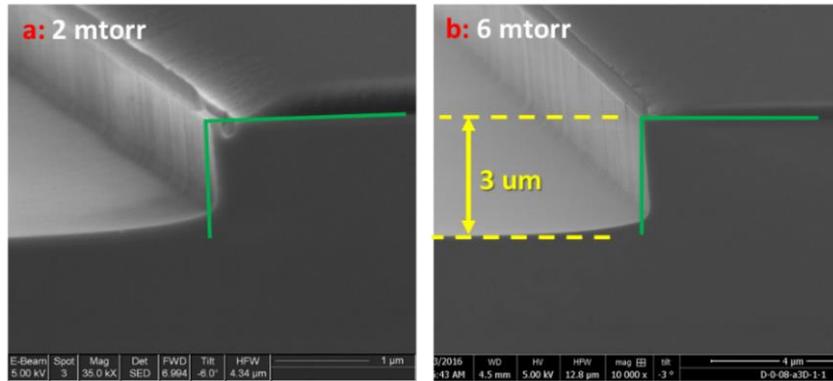


图 2.10 不同腔体气压下刻蚀后的 SEM 图

Fig. 2.10 SEM of etching sidewall morphology with different chamber pressure

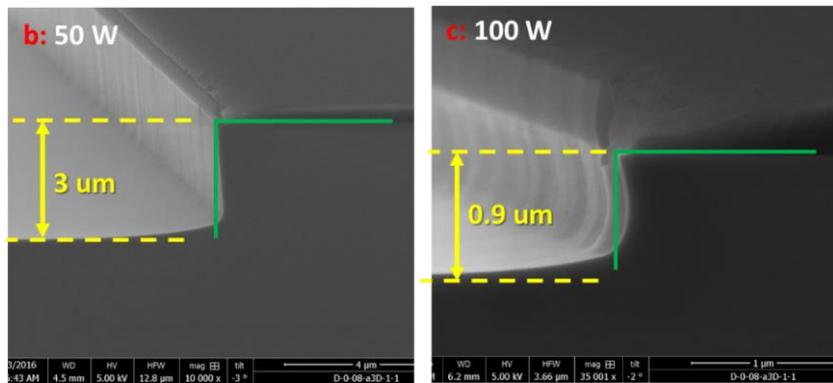


图 2.11 不同 RF 功率下刻蚀的 SEM 图

Fig. 2.11 SEM of etching sidewall morphology with different RF power

在上述实验基础上进一步对不同 ICP 功率 (500 W, 800 W, 1000 W) 下的刻蚀情况进行了研究，具体实验条件如表 2.4 所示。图 2.12 为 GaAs 晶圆衬底在不同 ICP 功率下刻蚀后的 SEM 图，从图中可以看出不同 ICP 功率下刻蚀获得的 GaAs 条形波导的侧壁的陡直度基本一致，都略微大于 90° ，但是当 ICP 功率为 800 W 时，侧壁的粗糙度略差于另外两个条件下的刻蚀结果。

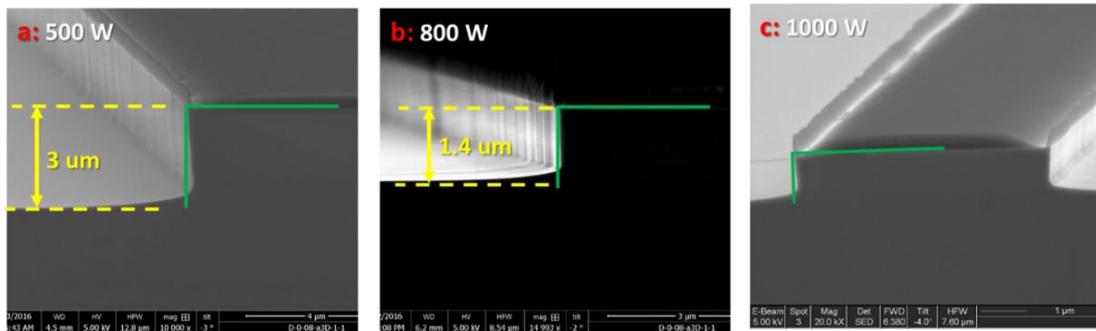


图 2.12 不同 ICP 功率下刻蚀后的 SEM 图

Fig. 2.12 SEM of etching sidewall morphology with different ICP power

在 GaAs 材料刻蚀中，相对于光刻胶作为刻蚀掩膜， SiO_2 硬掩膜有更高的刻蚀比。但是 SiO_2 硬掩膜的图形化需要将掩膜版上的图形首先转移到光刻胶上，然后通过刻蚀，再将光刻胶的图形进一步转移到二氧化硅上。在图形多次刻蚀转移中，掩膜板上的缺陷会被不断放大，同时转移增加了工艺步骤，越多的步骤就意味着引入了更多的影响，因此如果能直接采用光刻胶做掩膜，将减少工艺步骤，并避免掩膜转移中缺陷的放大，从而进一步减低刻蚀的粗糙度，提高工艺质量和工艺稳定性。因此在刻蚀工艺 9#、10#、11# 中采用光刻胶作为掩膜，并用 SEM 表征刻蚀结果。实验中发现，当 ICP 功率为 1000 W 和 800 W 的时候，光刻胶在刻蚀中被明显碳化，如图 2.13 (a) 所示，导致掩膜失效。图 2.13 (b) 显示的是当 ICP 为 500 W，用 3 μm 厚的 AZ6130 光刻胶作为刻蚀掩膜的刻蚀结果，图中可以看出，在刻蚀 1.8 μm 后还剩 2.2 μm 厚的光刻胶，由此可得光刻胶和材料的刻蚀比为 1:2.25，刻蚀比相对较高，同时可以观察到刻蚀侧壁也较为光滑。但是，脊型波导上光刻胶的中间有下凹现象，这是由等离子在波导的中间处被加强导致。此外侧壁的刻蚀角度也大于 90° ，这将直接影响金属电极在台阶上的覆盖性，最理想的角度是略小于 90° 。由此进一步优化刻蚀条件，通过将 ICP 功率降至 400 W，克服光刻胶坍塌变形问题，同时明显降低 ICP 对光刻胶的刻蚀速率，实现光刻胶对刻蚀深度为 1:10 的高刻蚀比。此外，将刻蚀温度由原来的 20°C 降到 10°C ，实现刻蚀后角度略小于 90° 最后将该刻蚀条件应用于激光器材料的刻蚀，图 2.13 (c) 为刻蚀后的 SEM 图，刻蚀的材料中包含 GaAs，AlGaAs 和 InAs 量子点，从 SEM 图中可以看出该刻蚀工艺对不同材料的刻蚀速率基本一致，并没有

出现横向刻蚀速率不一样的现象，由此可见该条件对我们激光器中的材料没有明显的选择性刻蚀，而且陡直度和光滑度都能达到本课题激光器制作的要求。

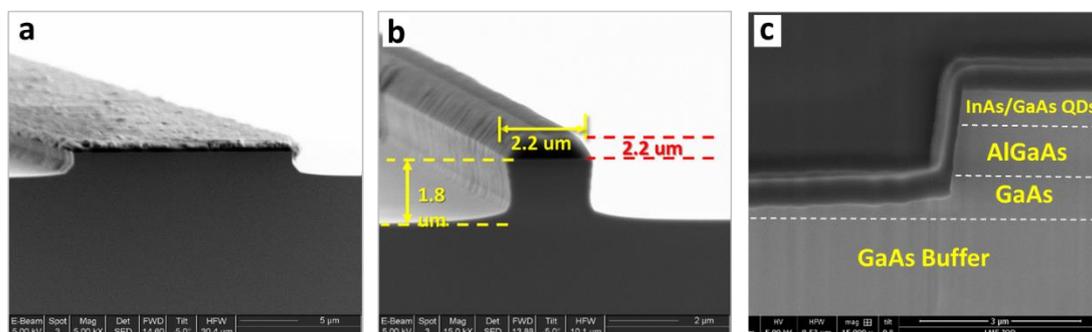


图 2.13 (a) 用光刻胶做掩膜在高 ICP 功率刻蚀后光刻胶掩膜的碳化, (b) 采用光刻胶做掩膜 ICP 功率为 500 W 的刻蚀结果的 SEM 图, (c) 进一步优化后刻蚀结果的 SEM 图

Fig. 2.13 SEM of plasma damaged photoresistor at high ICP power (a), GaAs ridge etched by ICP with 500 W ICP power (b) and ridge sidewall etched by ICP in optimal condition

综上所述，ICP刻蚀最佳工艺条件为：

表 2.5 ICP 最佳干法刻蚀条件

Table 2.5 the optimal ICP etching condition

BCl ₃ sccm	Cl ₂ sccm	Pressure mborr	RF W	ICP W	Temperature °C
10	6	6	50	400	10

2.2.3 电极沉积工艺

半导体器件的电极工艺涉及到金属-半导体接触，lift-off 工艺，金属与材料表面附着性，电极在器件台阶表面覆盖性等方面。其中两个最关键工艺是 lift-off 工艺和金属-半导体接触工艺。lift-off 工艺决定了能否将器件表面不需要的金属完全去除，留下需要的金属图形。如果无法将器件表面不需要的金属溶脱彻底，那么将会引起器件短路，导致器件失效。金属和半导体接触有肖特基接触和欧姆接触两种类型，肖特基接触在半导体材料和金属之间有肖特基势垒，引起电阻增加，同时电压对电流非线性变化，导致器件电流利用率低，器件不稳定。在半导体和金属之间形成欧姆接触，会有更小的接触电阻和更为稳定的器件性能。下面主要介绍这两部分工艺系统研究的结果。

2.2.3.1 Lift-off 工艺

lift-off 工艺也就是溶脱工艺，是指将需要的材料留下，不需要的部分去掉的工艺，其关键点在于构建 undercut 结构，一般采用双层胶构建 undercut 结构，如图 2.14 所示首先涂覆第一层 LOR 光刻胶，在一定温度下烘烤、冷却后，旋涂第二层光刻胶 AZ6130 或 S1813，然后在 115 °C 下烘烤。经过曝光、显影、定影后形成 undercut 结构。在金属电极沉积中，利用 undercut 结构和真空蒸镀优异的蒸镀垂直性，将电极图形化。用电子束蒸发或热蒸发在 undercut 结构的晶圆上沉积金属，然后在丙酮中浸泡，将不需要的金属部分溶脱，留下需要的金属，最后用显影液去除残余光刻胶并清洗样品。当 undercut 结构中下层胶深度太深时容易引起上层胶坍塌，当 undercut 结构不够深时，则无法正常溶脱。

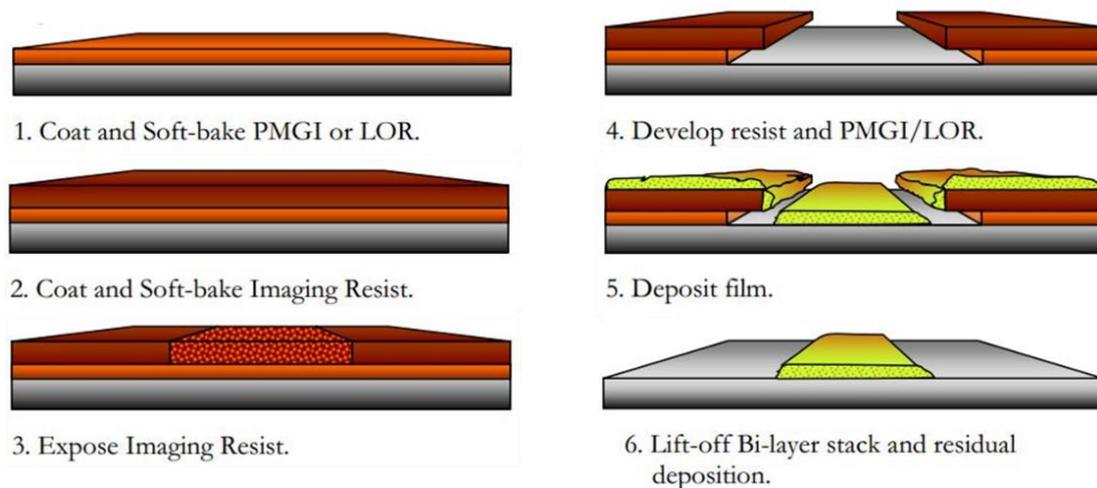


图 2.14 Lift-off 工艺流程示意图

Fig. 2.14 Illustration of the lift-off process

利用双层胶工艺构建 undercut 结构最关键的工艺参数是 LOR 5A 光刻胶的烘烤温度和烘烤时间。如表 2.6 所示，在相同的 AZ6130/S1813 光刻胶的烘烤温度 (115 °C) 和烘烤时间 (1 min) 下，以及相同的曝光时间 (7.5 s) 和显影时间 (75 s) 下，本文探索了 LOR 5A 光刻胶不同烘烤温度和烘烤时间对 undercut 的影响，并用 SEM 对实验结果进行观察。其中 LOR 5A 光刻胶和 AZ6130/S1813 光刻胶的旋涂速度均为 6000 rpm。以下讨论只对 LOR 5A 光刻胶的工艺进行描述，其它相同条件不再赘述。

表 2.6 LOR 5A 光刻胶工艺条件

Table 2.6 the optimal photoresister processing conditions of LOR 5A

LOR 5A		AZ6130/ S1813		曝光时间 s	显影时间 s
温度 / °C	时间 / min	温度 / °C	时间 / min		
180	10	115	1	7.5	75
180	5				
170	10				
180	1				
160	1.5				
160	2				
160	5				
150	3				
150	5				
150	10				

图 2.15 显示了 LOR 5A 光刻胶在 6000 rpm 转速下旋涂后在 180 °C 烘烤 10 min 或 5 min, 以及 170 °C 下烘烤 10 min 后的结果。从图中可以很明显地看出, 上述三个条件下并没有形成明显的 undercut 结构, 在丙酮中浸泡后, 金属也不能很好的剥离。相对来讲 LOR 5A 在 170 °C 下烘烤 10 min 和 180 °C 下烘烤 5 min 的结果要优于 180 °C 下烘烤 10 min 的结果。由此可见, 需要进一步降低 LOR 5A 的烘烤温度, 或减少烘烤时间。

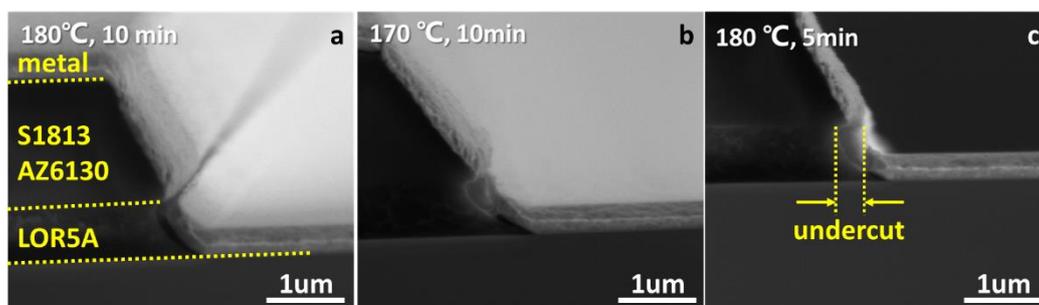


图 2.15 不同烘烤条件下 undercut 工艺结果的 SEM 图 (a: 180 °C 烘烤 10 min, b: 170 °C 烘烤 10 min, c: 180 °C 烘烤 5 min)

Fig. 2.15 SEM cross-section of undercut structure, after development. (a) LOR 5A baking 10 min at 180 °C, (b) baking 10 min at 170 °C, and (c) baking 5 min at 180 °C

在上述实验的基础上, 保证其它条件不变进一步减少 LOR 5A 光刻胶的烘烤时间和降低烘烤温度, 图 2.16 (a) 和 (b) 分别为 180 °C 下烘烤 1 min 和 160 °C 下烘烤 1.5 min 的结果, 从断面的 SEM 图中可以看出, 在这两个条件下都形成了

较为明显的 undercut 结构。SEM 结果显示 180 °C 下烘烤 1 min 的 undercut 结构中单侧内凹程度为 0.28 μm ，160 °C 下烘烤 1.5 min 的 undercut 结构中则是 0.6 μm 。从 undercut 的横向深度来讲，160 °C 烘烤 1.5 min 的条件能满足要求，但是将图 2.16 中所示的样品浸入到丙酮溶液中依然难以溶脱。经过化学实验分析，在溶液状态下，LOR 5A 光刻胶会和 AZ6130/ S1813 光刻胶反应生成一种难溶于丙酮的物质，最终导致金属无法剥离。因此要阻止 LOR 5A 光刻胶与 AZ6130/ S1813 光刻胶之间的化学反应，在旋涂 AZ6130/ S1813 光刻胶之前，干燥的 LOR 5A 光刻胶表面能降低两种胶之间的化学反应。高温短时间烘烤的方式受限于光刻胶导热性能差，光刻胶表面难以充分胶联和干燥。

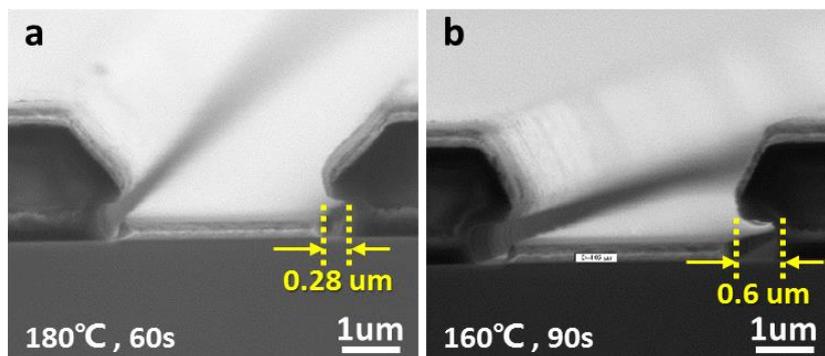


图 2.16 180 °C 烘烤 1 min 和 160 °C 烘烤 1.5 min 的 SEM 图

Fig. 2.16 SEM cross-section of undercut structure, after development. (a) LOR 5A baking 1 min at 180 °C, and (b) baking 1.5 min at 160 °C

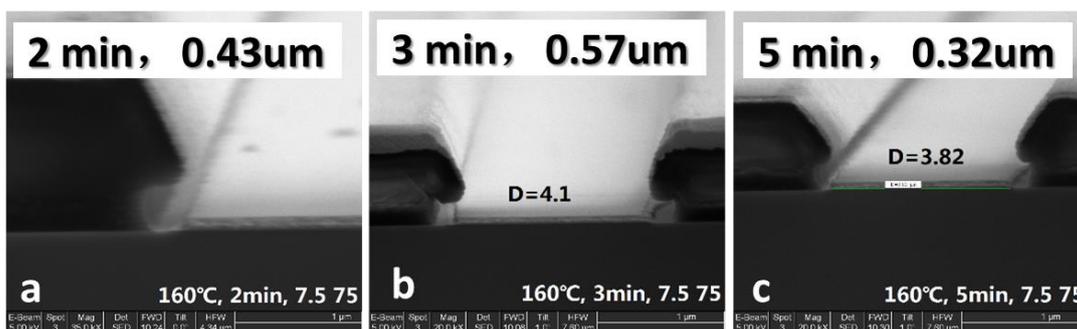


图 2.17 160 °C 下不同烘烤时间后光刻的 SEM 图 (2 min, 3 min, 5 min)

Fig. 2.17 SEM cross-section of undercut structure, after development. Where LOR 5A baking (a) 2 min, (b) 3min, and (c) 5min at 160 °C

基于上述的实验结果，我们在 160 °C 下增加 LOR 5A 光刻胶的烘烤时间，

如表 2.6 所示：分别增加到 2 min, 3 min, 5 min。图 2.17 是实验结果的 SEM 图，从图中可以看出这三个条件均能形成非常好的 undercut 结构，其中在烘烤 3 min 的样品 undercut 结构最好。经过丙酮中浸泡后，三个样品均能够迅速的溶脱，最终形成如图 2.18 光学显微镜拍摄的表面，从该光学显微镜照片可以看出，溶脱的非常彻底，表面非常干净。

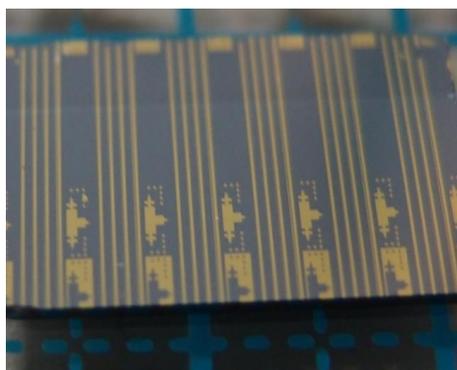


图 2.18 Lift-off 后的晶圆样品表面的光学显微镜照片

Fig. 2.18 Photo of wafer surface after lift-off

在此基础上，为了保证工艺的稳定性，提升工艺中的容错能力。继续优化实验方案，进一步降低烘烤温度至 150 °C，并分别烘烤 3 min, 5 min, 10 min。结果如图 2.19 中 SEM 照片所示，从图中可以看出，都形成很好的 undercut 结构。

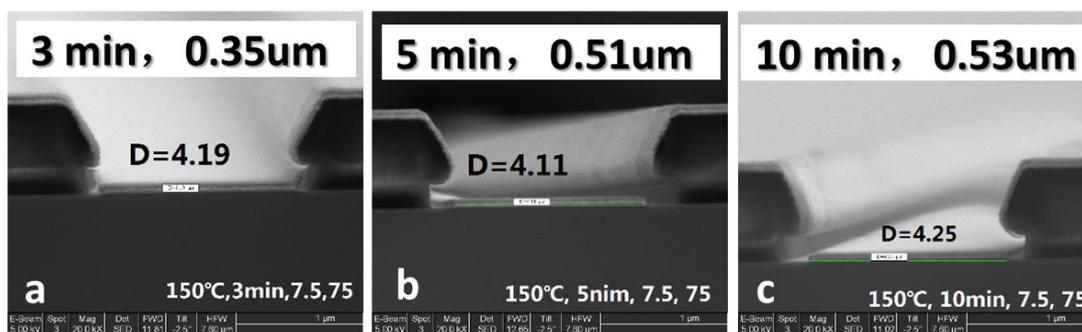


图 2.19 150 °C 下不同烘烤时间后光刻的 SEM 图(3 min, 5 min, 10 min)

Fig. 2.19 SEM cross-section of undercut structure, after development. Where LOR 5A baking (a) 3 min, (b) 5 min, and (c) 10 min at 150 °C

考虑到实际工艺中烘烤温度的波动，我们最终选择 155 °C 烘烤 3 min。由此得到最佳 undercut 的工艺条件如表 2.7 所示：

表 2.7 最佳 undercut 的双层胶工艺

Table 2.7 The optimal processing conditions of undercut

LOR 5A		AZ6130/ S1813		曝光时间 s	显影时间 s
温度 / °C	时间 / min	温度 / °C	时间 / min		
155	3	115	1	7.5	75

2.2.3.2 金属-半导体接触

文章中金属-半导体接触主要涉及 N 型 GaAs 半导体和金属之间的接触，以及 P 型 GaAs 半导体和金属之间的接触。实验的目标是：选用不同的金属，使得金属电极和 N 型 GaAs 半导体材料，以及 P 型 GaAs 半导体都形成欧姆接触。要形成欧姆接触的关键主要是找到与半导体本身功函数相匹配的电极材料，然后在合适的温度和时间下退火形成欧姆接触。

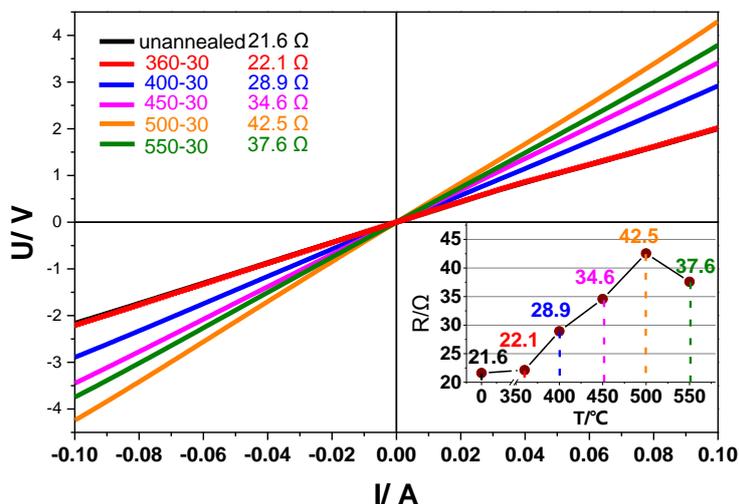


图 2.20 不同退火温度下 P 型电极的 I-V 曲线

Fig. 2.20 I-V curve of P contact obtained at series annealing temperature

文献报道，适合用于 P 型半导体形成欧姆接触的金属有 (Pt、Pd、Zn、Cr、Ti、Au)，考虑到具体功函数的大小，我们选用 Ti/Au 作为 P 型电极。此外，金属 Ti 和 P 型 GaAs 的功函数匹配得很好，选择 Ti-Au 作为 P 型半导体电极金属。Au 在 GaAs 表面的附着性较差，而 Ti 在 GaAs 表面有较好的附着性，同时 Au 在 Ti 表面浸润性又很好，因此项目采用 Ti 和 Au 双层电极既能保证金属和半导体之间的欧姆接触，又能保证电极在器件上的附着性。此外，考虑到 Ti 的电阻比 Au 大，因此需要尽可能降低 Ti 金属的厚度。在一般情况下，金属薄膜的成膜厚

度为 5 nm，但考虑到工艺稳定性问题，Ti 的厚度采用 10 nm。图 2.20 是采用电子束蒸发在 P 型 GaAs 上沉积 10 nm 的 Ti 和 100 nm 的 Au 后，并在不同退火条件下的 IV 图。从图中可以看出，在不退火和 360 °C 下退火 30 秒电阻分别为 21.6 Ω 和 22.1 Ω ，基本一样大。当退火温度超过 400 °C 的时候，电阻增大得较为明显。退火温度继续上升超过 500 °C 的时候电阻又开始下降，但是当退火温度高于 500 °C 温度时，将损害器件材料的性能。课题同时还研究发现不同厚度 (5 nm、10 nm、15 nm) 的金属 Ti 对 P 型 GaAs 电极电阻基本没有影响。

采用与 P 型电极类似的研究思路得到合适的 N 型电极金属为 Ni/Ge/Au 合金和 Au。Ni/Ge/Au 合金和 N 型 GaAs 的功函数相匹配，退火后易于形成欧姆接触。Au 在 GaAs 表面的附着性较差，Ni/Ge/Au 合金在 GaAs 表面有较好的附着性，同时 Au 与 Ni/Ge/Au 合金表面有良好的浸润性，因此采用的 Ni/Ge/Au 合金和 Au 双层金属电极既能保证金属-半导体的欧姆接触，又能确保电极在器件上良好的附着性。图 2.21 是采用热蒸发在 N 型 GaAs 上沉积 50 nm 的 Ni/Ge/Au 合金和 200 nm 的 Au 后，接着在 360 °C~380 °C 下退火 30 s~90 s 后的 I-V 图，从图中可以看出，电阻只有 4.6 Ω ，非常小。用四探针法测得其接触电阻约为 1 Ω 。

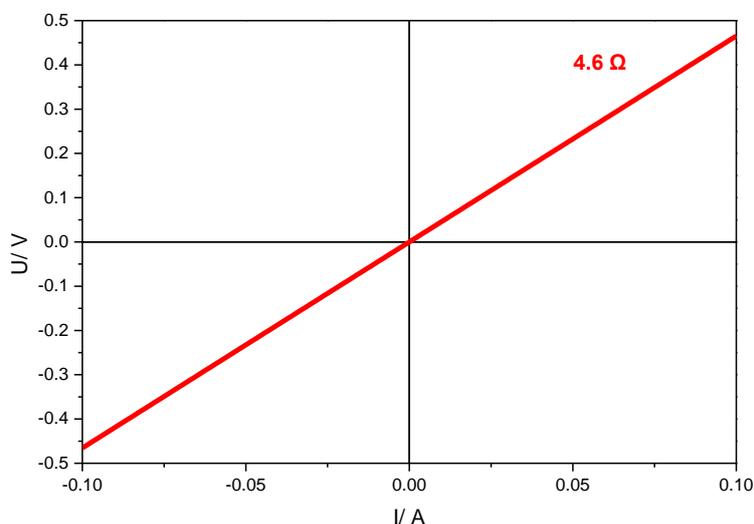


图 2.21 N 型电极的 I-V 曲线

Fig. 2.21 I-V curve of N contact after annealing

综合上述条件，P 型电极选用 Ti 10 nm/Au 100 nm，N 型电极选用 50 nm 的 Ni/Ge/Au 合金和 200 nm 的 Au。当两电极共同退火时采用 360 °C 下退火 30 s。

如果分开退火，P 型电极采用不退火，N 型电极则可在 360 °C~380 °C 下退火 30 s~90 s 的条件下任意选择。

2.2.3.3 电极的台阶覆盖性

上述我们解决了 lift-off 工艺，保证金属顺利溶脱，获得了器件电极制作的最佳工艺条件，保证金属和器件半导体材料之间的欧姆接触和低的器件电阻。但是在器件材料刻蚀中，器件表面会形成台阶，本文采用的电极蒸镀方法是真空蒸镀。真空蒸镀中金属薄膜生长的垂直性非常好，这有利于金属在沉积后的溶脱，但是台阶覆盖率不佳，导致电极在台阶上的断开，如图 2.22 所示，形成短路，器件无法工作。

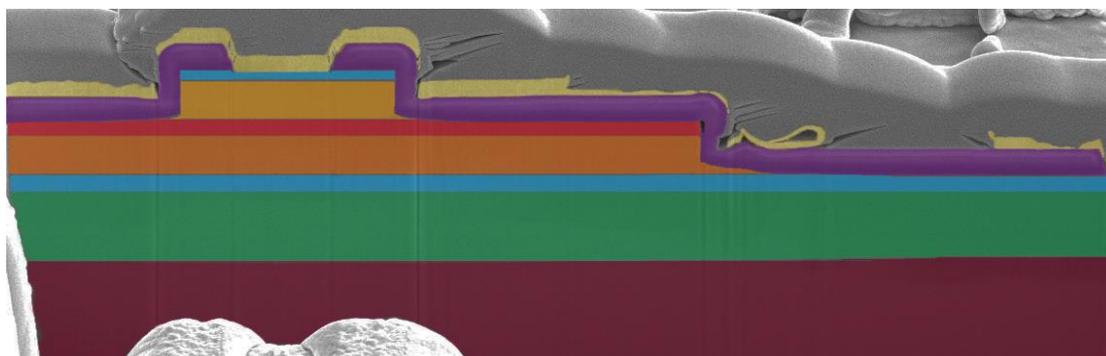


图 2.22 电极在台阶处不连续的现象

Fig. 2.22 SEM of discontinuity phenomenon of contacts on step

解决台阶覆盖性的一种方法是降低台阶侧壁的陡直度，但是，脊型波导上侧壁陡直度的降低会影响波导对光场的限制，影响器件的性能。本文在保证侧壁陡直度的情况下，采用倾斜蒸镀的方法提高金属在台阶上的覆盖率。所谓的倾斜蒸镀是样品相对于金属蒸镀方向倾斜一定角度放置，我们采用 45 度倾斜角度，蒸镀时，器件随样品拖自转而旋转，保证器件侧壁和 SiO₂ 窗口两侧侧壁上的金属都有良好的台阶覆盖性。图 2.23 (a) 和 (b) 分别显示了采用倾斜蒸镀 (金属蒸镀 500 nm 的 Au) 前后的台阶覆盖率的变化，左图为平行蒸镀结果的 SEM 图片，从图中可以看到台阶处的电极没有连上。右图是采用倾斜蒸镀结果的 SEM 照片，从图中可以看到，大概有 250 nm 厚的金属沉积在台阶表面，而且台阶处的金属致密没有空隙并且与台面上的金属连接在一起，形成良好的导通。

综上所述，本文在制作激光器时，当台阶处需要金属电极覆盖的时候，采用倾斜蒸镀，蒸镀厚度大约为 500 nm。对应台阶处的金属厚度约为 250 nm。

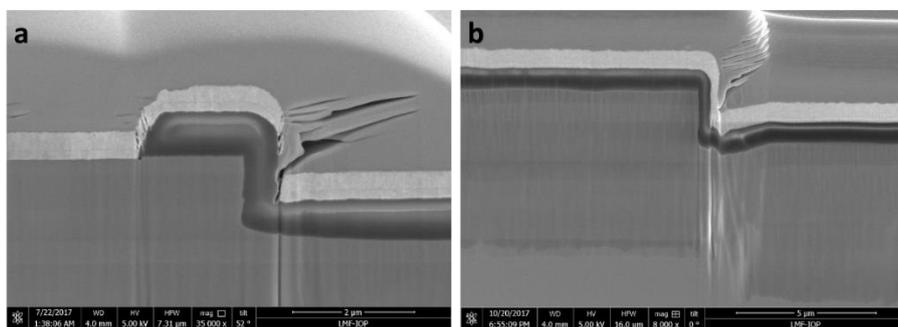


图 2.23 不同蒸镀方法的台阶覆盖率 (a: 平行蒸镀, b: 倾斜蒸镀)

Fig. 2.23 SEM of contacts on step with (a) normal vacuum evaporation and (b) tilted vacuum evaporation

2.2.3.4 电极工艺小结

综上所述的电极工艺具体如下：

1. 6000 rpm 下旋涂 LOR 5A 光刻胶，155 °C 下烘烤 3 min；
2. 6000 rpm 下旋涂 AZ6130/S1813 光刻胶，115 °C 下烘烤 1 min；
3. 在光强为 15 mW 的条件下，曝光 7.5 s 显影 75 s；
4. 蒸镀金属：N 型电极采用热蒸发蒸镀 50 nm 的 Ni/Ge/Au 合金和 200 nm 的 Au。P 型电极采用电子束蒸发沉积 10 nm 的 Ti 和 100 nm 的 Au 后采用热蒸发倾斜蒸镀 500 nm 的 Au，保证台阶覆盖率；
5. 退火：当两电极共同退火时，采用 360 °C 下退火 30 s。分开退火时，P 型电极不退火，N 型电极则可在 360 °C~380 °C 下退火 30 s~90 s 的条件下任意选择。

2.2.4 测试平台搭建及器件测试

本小结介绍激光器测试平台的搭建，封装工艺以及器件的测试。器件实际工作时的性能对于封装工艺依赖性很强。课题自己搭建了简单的电泵激光器的测试系统和封装工艺。本项目中的激光器只是简单的 mount 到基座上，与商用的封装技术相比，其散热性能非常不好，也不是很稳定。这大大影响激光器性能的发挥。

如图 2.24 所示，测试平台包括电流控制器，数据采集装置和温控装置。温控装置主要由位移台，大小热沉，peltier，温度探测器（热敏电阻）和温度控制器组

成。在位移台上面放置大热沉，大热沉和小热沉之间有 peltier，形成三明治结构，两者之间采用绝缘螺丝固定，这里的 peltier 用于制冷或加热，温度探测器位于小热沉内部靠近器件固定的边缘，从而增加温度探测的准确性。使用时将温度探测器和 peltier 与温度控制器相连接，通过温度控制器调整小热沉上的温度，精度为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。测试平台中用于测试激光器连续激射时所用的激光器电流控制器为 Newport LDX-3545B-220V 的精密激光二极管驱动器，激光二极管驱动器最高输出电流为 3 A，电流精度为 $\pm 0.1\%$ 。用于测试激光器脉冲性能的电控制器为：Newport LDP-3830 脉冲激光二极管驱动器，激光器电流分辨率为 10 mA，激光器恒流输出电压为：20 V，占空比：0.01% ~ 5.00%，脉冲宽度 25 ns~ 1 μs 。温度控制器为 Newport LDT-5545B-220V 激光二极管热电温度控制器。该测试平台实现 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度控制， $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 大于 4 小时的长时间温度稳定。

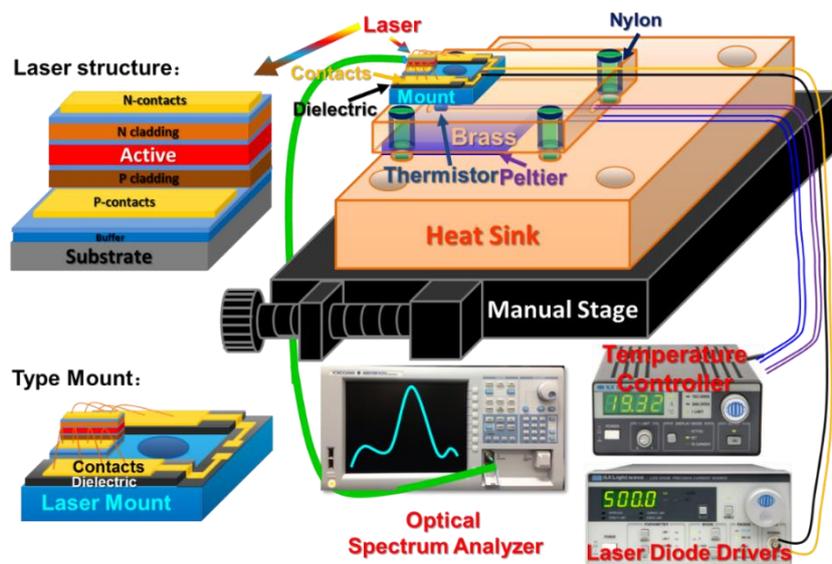


图 2.24 测试平台示意图

Fig. 2.24 schematic of laser measurement setup

测量时将激光器用钢或银胶固定到基座上 (laser mount)，将基座表面涂上导热硅脂后用螺丝固定在小热沉表面。打开温度控制器设置所需的温度，然后将正负极探针分别与激光器的正负电极相接触，之后打开激光二极管驱动器，给激光器加载电流，同时用功率计测试并记录不同电流下的激光器输出功率，测试其电流对输出功率的曲线。最后采用多模光纤对准激光器脊型波导，调整光纤的位

置，激光器出射的光尽可能多地耦合到波导里面，接着将光纤和光谱仪 (YOKOGAWA AQ6370D) 相连接，在需要的电流或输出功率下采集激光器出射的光谱。本文激光器 I-V 性质测试采用的是美国 Janis 探针台 + Keithley 4200SCS。

2.3 测试结果和分析

图 2.25 为不同工艺制作下激光器的 I-V 图，其中红色的曲线为由工艺 A 制作的激光器的曲线，蓝色为由工艺 B 制作的激光器的 IV 曲线。从曲线的结果中可以得到，工艺 A 下制作的激光器的开启电压为 0.7 V，电阻为 6.5 Ω 。工艺 B 的激光器器件的开启电压为 1.1 V，对应开启后电阻为 20 Ω ，两种工艺下开启电压基本一样，但是工艺 B 下制作的激光器开启后的电阻为工艺 A 的 3 倍。工艺 A 激光器的反向击穿电压为 2 V，说明有较大的漏电流，这样大大降低了器件的外效率。工艺 B 激光器的反向击穿电压为 16 V，反向饱和电流明显小于工艺 A，这说明器件的暗电流和漏电流很小，保证了器件的性能。

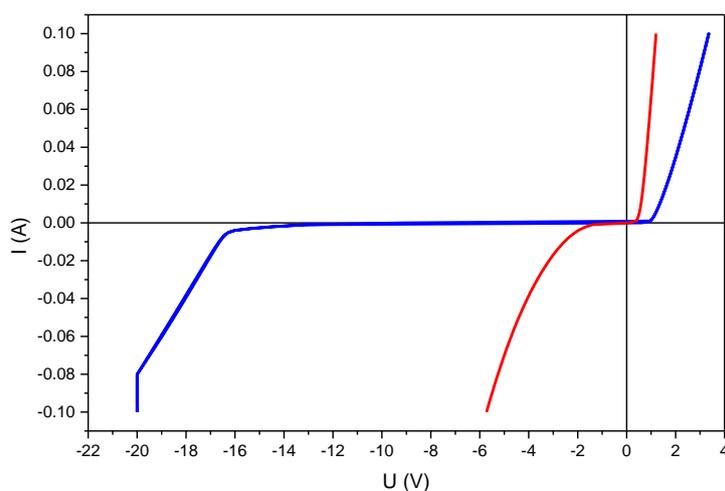


图 2.25 工艺 A 和工艺 B 制的激光器的 I-V 曲线

Fig. 2.25 I-V curve of laser fabricated at process A (red curve) and process B (blue curve)

通过工艺 A 制作的激光器在 5 $^{\circ}\text{C}$ 的温度下测得的泵浦电流对输出光功率的曲线 (L-I 图) 如图 2.26 所示，随着电流的增加，输出功率呈线性缓慢增加，到达阈值电流附近输出功率突然增加，这是因为激光器发生激射。用直线拟合激射后的曲线，反向延长在电流上的截距就是激光器的阈值电流，其值为 375.7 mA，对应阈值电流密度为：940 A/cm^2 。

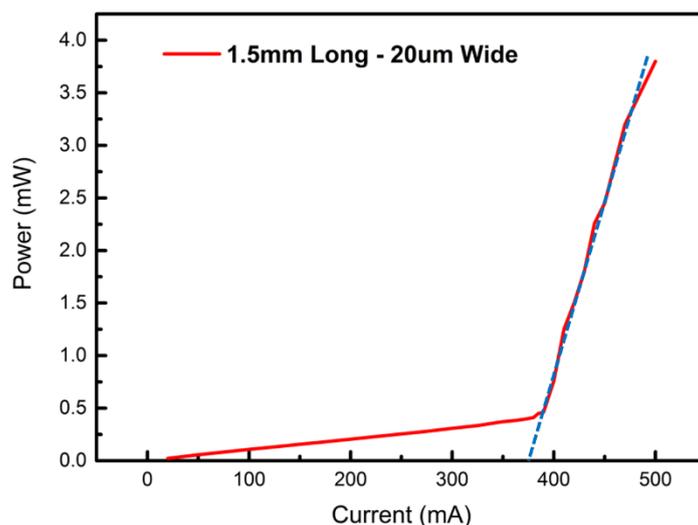


图 2.26 硅基 InAs 量子点激光器在室温的 L-I 曲线图

Fig. 2.26 Plot of output power versus pumping power (L-I curve) of InAs/GaAs QD laser on Si at room temperature.

图 2.27 是工艺 A 制作的激光器在不同注入电流下的出射光光谱的 log 图，从图中可以看出，当泵浦电流为 300 mA，小于阈值电流时，激光器输出的谱线没有激光模式峰，当电流接近阈值电流的时候，开始有好几个模式出现在谱线上，形成模式竞争，随着电流的继续增加，1224.85 nm 的激光模式激射出来形成激射峰。图 2.27 (b) 是 430 mA 下的激光器激射谱，从图中可以看出只有一个峰，对应的半高宽为 0.151 nm，说明该激光器是单模发射激光器。

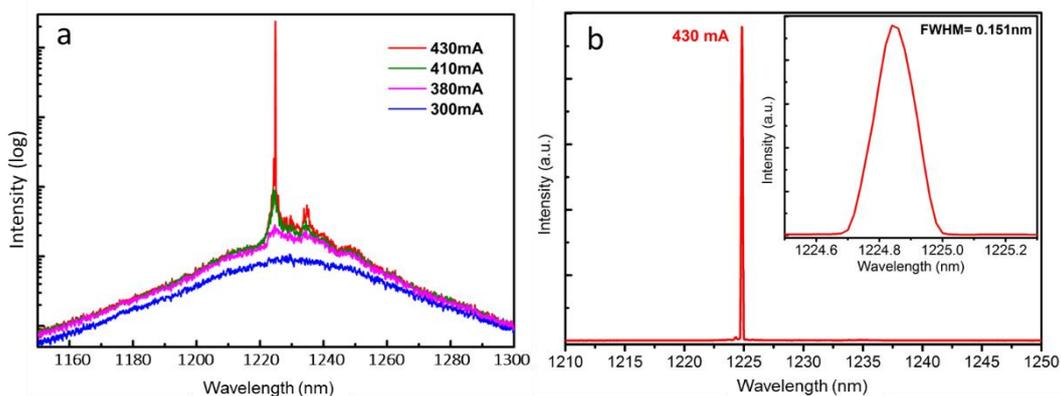


图 2.27 硅基 InAs 量子点激光器的室温激射光谱

Fig. 2.27 Room temperature spectra of InAs/GaAs QD laser on Si pumped at series current

图 2.28 为在 10 °C 时不同泵浦功率下的激光器激射谱的 dB 图，从图中可以看出随着泵浦功率的增加，激光器的激射峰不断增强，同时出现红移，这是因为

随着泵浦电流的增加，激光器的发热量不断增加，而我们的封装工艺较为简单，无法将激光器中的热量顺利导走，导致器件内部温度不断上升，引起峰位的红移。

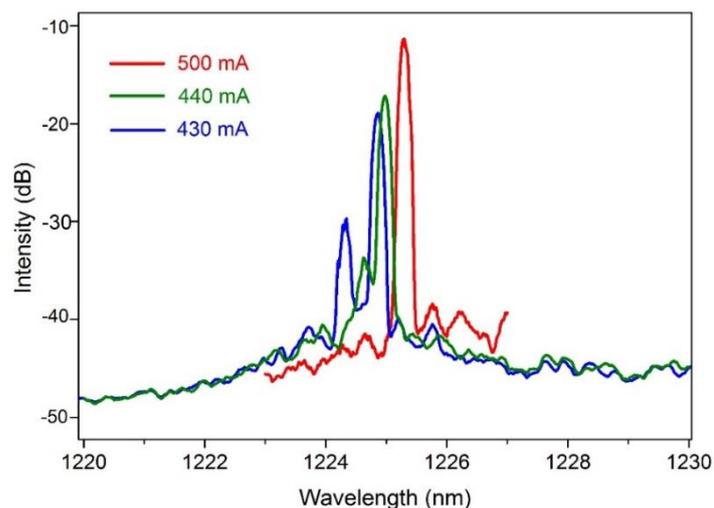


图 2.28 10 °C 下不同泵浦功率下的激光器激光谱

Fig. 2.28 Different pump power spectra of InAs QD laser on Si with log intensity at 10 °C

下面介绍工艺 B 制作的激光器的性能测试结果，相比于工艺 A，工艺 B 主要的变化是有两个方面，其一是在工艺顺序中，先做 P 型电极；其二是在谐振腔方面，采用工艺 A 中的解离形成谐振腔后，又在其中一个端面上蒸镀了增反膜，用于增加其中一个反射镜的反射率。我们主要研究了不同温度下激光器的电流对输出功率的性能，不同温度下激光器出射波长和模式，以及增反膜和封装对激光其性能的影响，最后还测试了激光器在脉冲电流驱动下的性能。

如图 2.29 所示，是激光器在不同温度 (-20 °C ~ 65 °C) 下的测试的电流对输出功率图 (L-I 曲线)。所测试激光器的脊型波导宽度为 10 μm 腔长为 5.7 mm，从图中可知不同温度下的阈值电流和阈值电流密度分别如下表：

表 2.8 不同温度下的阈值电流和阈值电流密度

Table 2.8 Laser threshold current and current density at different operation temperature

温度 °C	-20	-5	10	25	30	40	50	60	65
阈值电流 mA	126	139	155	190	226	254	324	395	455
阈值电流密度 A/cm ²	176	194	216	265	315	354	452	551	635

由此可见在工艺 B 下制备的激光器实现了 -20 °C-65 °C 下的激射，激光器的阈值电流随着温度上的增加不断增加。在室温的时候阈值电流为约为 190 mA，阈值电流密度为 265 A/cm²。

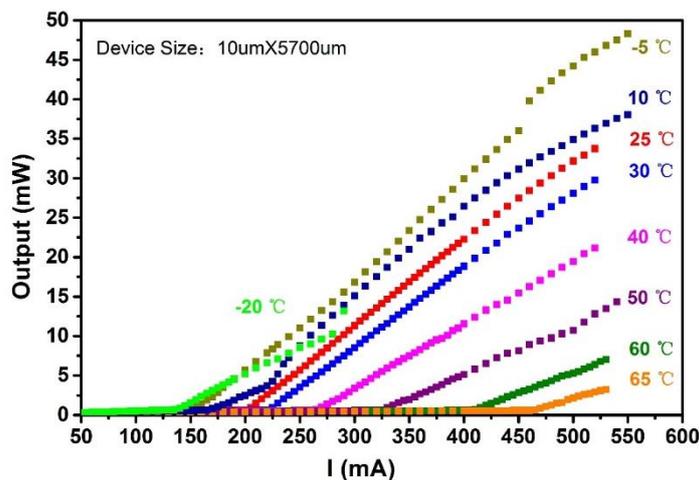


图 2.29 工艺 B 制作的硅基 InAs 量子点激光器的变温 L-I 曲线图

Fig. 2.29 Plot of output power versus injection current (L-I curve) of InAs/GaAs QD laser on Si at different operation temperature with process B

图 2.30 为室温的激光器在 220 mA 工作时的光谱图，图中有一强一弱两个激光器的激光模式峰，两个模式峰的半高宽均为 0.1 nm 左右，对比于工艺 A 制备的激光器性能，工艺 B 制备的激光器工作温度范围远远高于工艺 A 制备的激光器，工艺 A 制备的激光器只能在 5 °C 下工作，而工艺 B 制备的激光器能实现 65 °C 激射。同时，65 °C 下工艺 B 制作的激光器的阈值电流密度为 635 A/cm² 优于工艺 A 制备的激光器在 5 °C 下的阈值电流密度 940 A/cm²。此外，工艺 B 激光器室温下激射后激射谱半高宽也优于工艺 A 下制作的激光器。由此可见，工艺 B 的工艺性能远远优于工艺 A。这说明，保持电极表面的整洁，保证电极与激光器之间的接触，对器件性能影响非常大。

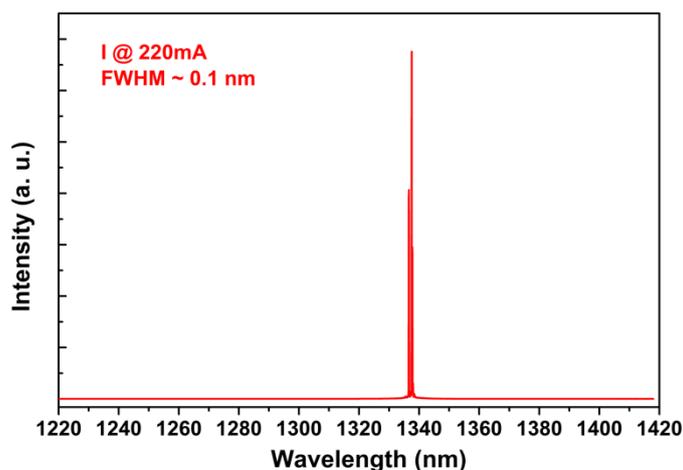


图 2.30 工艺 B 制作的硅基 InAs 量子点激光器的室温光谱图

Fig. 2.30 Room temperature spectra of InAs QD laser on Si pumped at 220 mA with process B

在上述研究的基础上,我们收集了硅基 InAs 量子点激光器在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间的变温光谱图,如图 2.31 所示,其波长变化范围由 $1316\text{ nm}\sim 1355\text{ nm}$ 。理论上量子点激光器对温度不敏感,但是实际上我们观察到随着温度的增加不论在电流与出射功率相关曲线中,还是在光谱上都观察到激光器随温度的升高性能下降较为明显,特别是在温度超过 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之后。这可能是因为我们的量子点的原因,加上温度升高影响到 Dot in Well 结构中量子阱中的载流子,从而影响器件性能。再加上本文的封装工艺过于简单,很难将激光器中的热量迅速导走,导致热量不断在器件中积累,造成电极温度升高,引起电极电阻增大,进一步影响器件性能。若能优化封装工艺到最佳状态,本文相信,工艺 B 制作的激光器对温度的敏感性会大大降低。

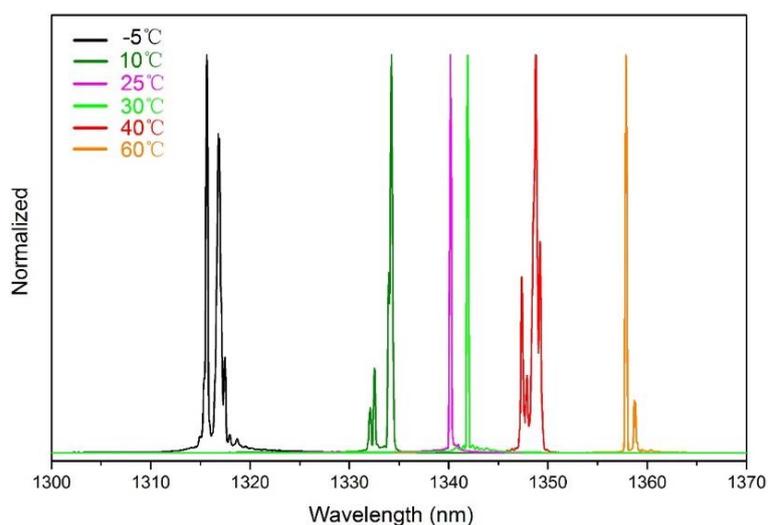


图 2.31 硅基 InAs 量子点激光器变温光谱图

Fig. 2.31 Spectra of InAs QD laser on Si operated at different temperature with process B

为了进一步研究工艺 B 制作的激光器的性能,本文对比了增反膜和封装对激光器性能的影响,对比结果如图 2.32 所示。绿色曲线为没有镀增反膜的裸器件直接放置在测试台上的测试结果,蓝色曲线为镀了增反膜后的器件直接放在测试台上的测试结果。从图中可以看出蒸镀了增反膜后,器件在室温时的阈值电流从原来的 320 mA 降低到了 230 mA ,而且在 450 mA 时候的功率也从 2.3 mW 提升到了 12.6 mW ,增加了 5 倍。红色曲线是将单面镀有增反膜的器件用银胶封装在基板上的测试结果,从图中看出,简单封装后,器件的阈值电流进一步明显降低到 190 mA ,在 450 mA 时的激射功率为 27.5 mW ,增加了 2 倍,由此可见封

装和增反膜能显著提升器件性能,其中增反膜对激光器阈值电流的降低有很明显的作用,用银胶固定到导热基座上能明显提高最大功率。

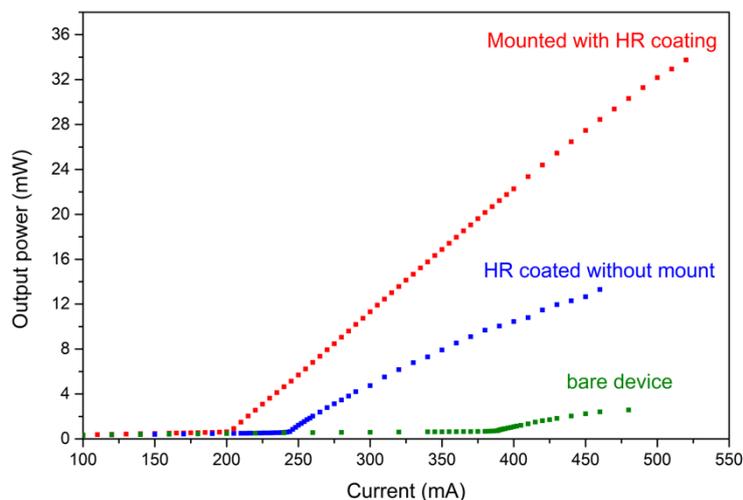


图 2.32 不同优化工艺后的激光器激光性能

Fig. 2.32 Plot of output power versus injection current (L-I curve) of InAs/GaAs QD laser on Si with bare device (green plot), HR coated without mounted (blue plot) and mounted with HR coating (red plot)

为了进一步表征激光器的性能,采用脉冲电流在不同温度下测试了激光器的性能,脉冲电流是间歇性的给激光器加载电流,这种情况下激光器有时间释放内部产生的热量,由此获得的器件性能基本不受自身发热的影响。

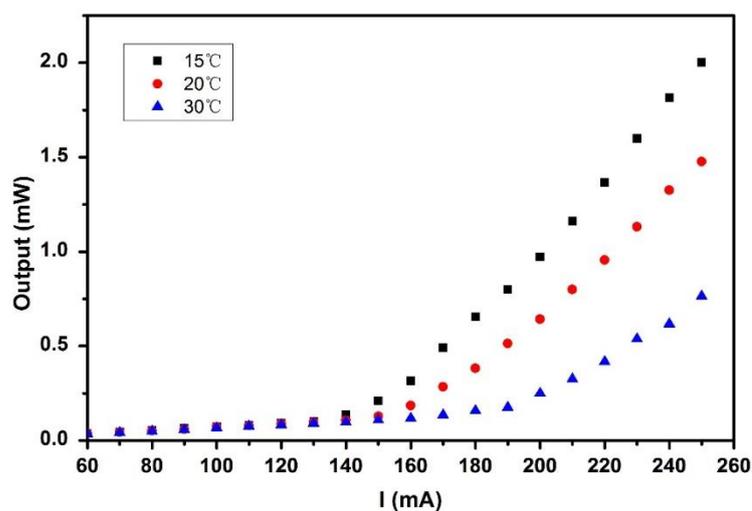


图 2.33 脉冲电流下 L-I 曲线图

Fig. 2.33 Plot of output power versus pulse pumping power (L-I curve) of InAs/GaAs QD laser on Si with different pump power

图 2.33 为脉冲电流下,不同温度的激光器 L-I 曲线。从图中可以得到在 15 °C 的时候,激光器的阈值电流为 110 mA;当温度增加到 20 °C 时,对应的阈值电流为 142 mA;随着温度继续增加到 30 °C,阈值电流增加到 177 mA。阈值电流远远小于连续激射的时候同一温度下的阈值电流,随温度的增加对应阈值电流的变化程度也明显小于连续电流下激射的结果。这是因为,在连续激射的情况下,连续的工作电流产生了大量的热,而我们的封装系统性能不佳,无法及时将这些热量带走,导致激光器性能大大下降。由此可见进一步提升我们激光器封装工艺是本项目后续工作的关键。

最后我们测试了器件的成品率,如图 2.34 所示,各部分做了增反膜和封装的器件一共有 27 个,激射的有 11 个,成品率为 41%,其中有 6 个的阈值电流在 200 mA 以下。没有镀增反膜和没有封装到基座上的器件有 16 个,只有 3 个工作,良品率为 19%,而且阈值电流都在 300 mA 以上,进一步说明增反膜和封装在器件性能上的巨大作用。

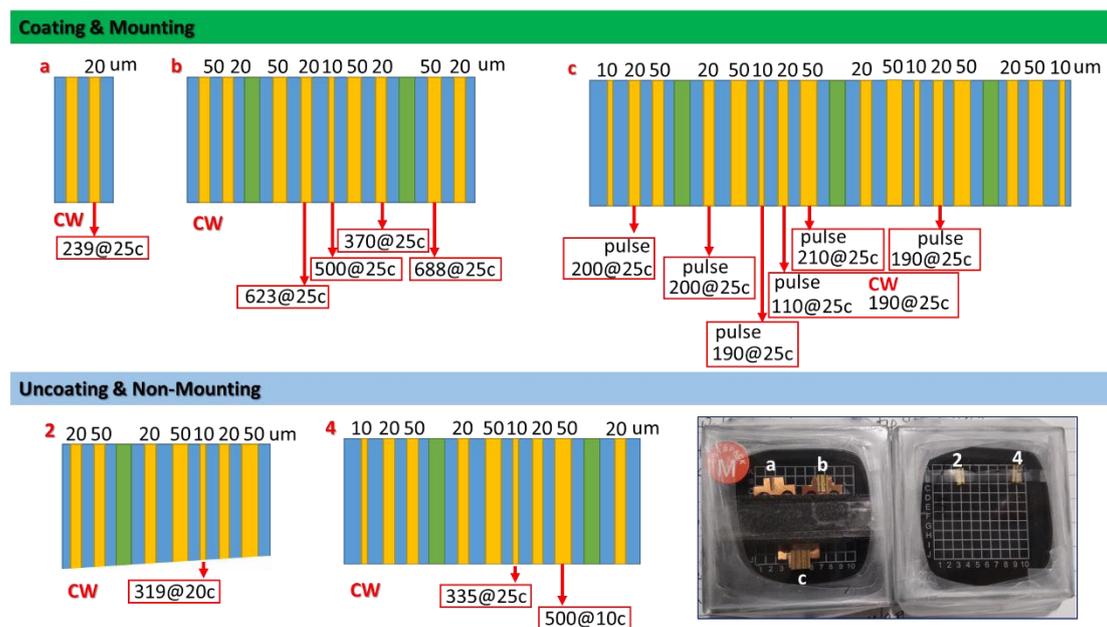


图 2.34 不同器件性能统计示意图

Fig. 2.34 The property statistics of QD lasers on Si

为了更好地说明本文所制备的电泵量子点激光器的性能,对比了其它课题组报道的激光其性能,如图 2.29 所示。我们制作的激光器的最高工作温度为 65 °C,而有报道的激光器的最高工作温度到达 75 °C 以上^[10, 57, 73]。由于器件封装技术不成熟,散热效果不佳导致器件实际工作温度超过 65 °C。室温激光器

连续激射阈值电流约为 190 mA，阈值电流密度为 256 A/cm²。在目前的硅基无斜切衬底上属于一线结果。后期通过封装可实现更好的性能。通过使用脉冲电流注入减少器件发热，我们实现了硅基激光器室温脉冲激射，其阈值电流为 110 mA。

表 2.9 不同硅基电泵浦量子点激光器性能对比

Table 2.9 Comparison of various InAs QD lasers

年份	来源	阈值电流 (mA)	阈值电流密度 (A/cm ²)	温度 °C	器件尺寸
2018	OPTICS EXPRESS (Arakawa) [119]	1200	600	25	100 μm × 2000 μm
2018	OPTICS EXPRESS (Arakawa) [119]	1400	700	30	100 μm × 2000 μm
2018	OPTICS EXPRESS (Arakawa) [119]	2000	1000	40	100 μm × 2000 μm
2018	OPTICS EXPRESS (Arakawa) [119]	3000	1500	60	100 μm × 2000 μm
2018	OPTICS EXPRESS (Arakawa) [119]	3200	1600	70	100 μm × 2000 μm
2017	Optics Letters (John Bowers) [120]	345	862	室温	750 μm × 4 μm
2017	Optics Express (Huiyun Liu) [73]	N/A	425	室温	N/A
2018	本文	190	256	室温 (最高 温度 65°C)	5700 μm × 10μm

2.4 本章小结：

本章主要制备了硅基 F-P 腔脊型波导硅基激光器。一共提出了两种激光器制作工艺，分别是工艺 A 和工艺 B，相比于工艺 A，工艺 B 的第一步工艺为 P 型电极的沉积，同时在谐振腔的其中一端腔面上蒸镀了增反膜。测试结果表明采用工艺 A，激光器在 5 °C 下发生激射，阈值电流为 375.7 mA，对应阈值电流密度为 940 A/cm²。而采用工艺 B 制作的激光器最高工作温度可达 65 °C，在该温度下的阈值电流为 455 mA，阈值电流密度为 635 A/cm²。远远优于工艺 A 制作的激光器。这主要是因为，第一步沉积金属电极能保证金属电极和 P 掺杂的 GaAs 层更好的接触，同时金属电极在后续的工艺中能保护脊型波导的表面不受损伤。我们测试了采用工艺 B 制作的激光器的工作温度区间为 -20 °C~65 °C，在室温 25 °C 的时候的阈值电流为 190 mA，阈值电流密度为 265 A/cm²，对应谱峰的半高宽为 0.1 nm。同时研究了蒸镀增反膜和封装到基座上这两个工艺对激光器性能

的影响,结果发现增反膜和用银胶将激光器固定在基座上均能显著提升激光器性能,激光器的阈值电流从 320 mA 降低到了 190 mA,在 450 mA 泵浦电流下的输出功率从 2.3 mW 增加到了 27.3 mW。此外,通过测试激光器在脉冲电流下的性能,发现激光器在 30 °C 下的阈值电流为 177 mA,远小于激光器连续激射时候的阈值电流: 226 mA,这说明激光器本身产生的热量对器件性能有很大影响。此外,还给出了器件在有增反膜和封装的良品率为裸器件的两倍,平均阈值电流小于裸器件,由此可见器件的封装和增反膜对器件性能影响很大,由此可见本文的封装工艺限制了激光器性能的发挥。最后我们对比了其它课题组的在无斜切衬底上通过直接生长的方式获得并测试了硅基量子点激光器的性能,我们的工作属于国内一线结果,后期通过封装工艺进一步优化能实现更好的性能。

第 3 章 硅基 InAs 量子点垂直腔面发射微腔激光器

最近十几年来, 由于 CMOS 工艺兼容的 III-V/Si 异质集成光源在硅基光电子集成电路上的应用而受到广泛的关注和研究^[121-123]。此外, 硅基量子点垂直腔面发射激光器在硅基光电子集成芯片在高性能计算、数据中心、通信和传感器等方面有重要的应用, 主要是由于垂直端发射激光器能非常方面的实现芯片中上下层之间的光传输和耦合^[124, 125], 以及垂直腔面发射激光器阵列能用来作为传感器, 对距离、温度、形貌进行探测, 此外还能用于激光雷达探测集成芯片中的发射光源^[88-96]。目前硅基激光器的异质集成方式主要有键合技术和直接生长技术。这两种技术各有优劣, 对于键合技术来讲有较好的器件性能和寿命, 但是有扩展性, 产量和成本问题。直接生长技术能够克服这些不足, 但是会引入材料晶体质量的问题, 比如反向畴和穿透位错, 导致硅衬底上生长的 GaAs 缓冲层晶体质量不佳。因此, 近几年有很多科学家研究如何在硅基上生长高质量的 GaAs 缓冲层^[4, 126, 127], 比如说采用 Si (001) 衬底^[7, 56], Ge/Si 虚拟衬底^[8, 9], 氢退火工艺, GaP 中间过渡层^[12, 120, 128], 和 V 型槽硅衬底^[15-17]等。但是上述所有技术几乎都存在高密度的位错和热失配问题, 导致缓冲层材料的性能受到明显影响。本章通过采用在图形衬底上构建硅 (111) 晶面的锯齿孔洞结构和位错过滤层获得高质量的 GaAs 缓冲层, 在此基础上设计并生长垂直腔面微腔激光器结构。采用微加工技术制作了硅基 InAs 量子点垂直腔面发射微腔激光器, 并采用显微光谱测试系统对其性能进行了测试和分析。

3.1 材料结构和生长

垂直腔面发射激光器通常包含上下反射镜和中间有源区, 本章采用布拉格反射镜 (DBR) 作为上下反射镜, 如图 3.1 所示薄膜的布拉格反射镜结构由多层高折射率和低折射率的材料堆叠而成, 每一层都是 1/4 波长。

高低折射率材料的厚度分别为:

$$t_H = \lambda / (4 n_H) \text{ 和 } t_L = \lambda / (4 n_L) \text{ 。}$$

这里的 n_H 和 n_L 分别代表着高低折射率薄膜的有效折射率, λ 表示布拉格反射镜的中心波长。

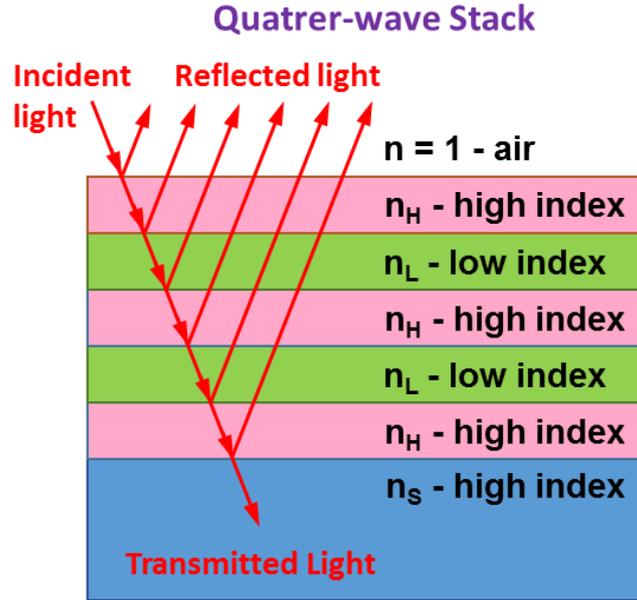


图 3.1 布拉格反射镜的结构示意图

Fig. 3.1 Schematic of Bragg mirror structure

在空气或自由空间中，反射镜两侧都由高折射率材料层在外面的情况下，布拉格反射镜的反射率定义为：

$$R = \left(\frac{1-Y}{1+Y} \right)^2 \dots\dots\dots 3.1$$

这里的 Y 定义为：

$$Y = \left(\frac{n_H}{n_L} \right)^{2p} \frac{n_H^2}{n_S}$$

其中 n_H 和 n_L 高折射率和低折射率材料的有效折射率， n_S 是衬底的折射率， $(2p+1)$ 是布拉格反射镜堆叠的层数。

高反射率区域的空间带宽 ($\Delta\lambda$) 的宽度随两个材料之间折射率差值 (n_H 和 n_L) 的增加而增加。 $\Delta\lambda$ 能够近似的被 λ_0 定义为：

$$\Delta\lambda \approx \frac{4}{\pi} \lambda_0 \arcsin \left(\frac{n_H - n_L}{n_H + n_L} \right) \dots\dots\dots 3.2$$

我们设计的低阈值硅基 InAs/GaAs 量子点垂直端面发射微腔激光器激光发射的中心波长为 1300 nm。上下反射镜时采用 AlAs/GaAs 组成的布拉格反射镜 (DBR) 结构，GaAs 和 AlAs 的折射率分别为 3.45 和 2.926。通过公式 $t_H = \lambda / (4 n_H)$ 和 $t_L = \lambda / (4 n_L)$ 。计算得 GaAs 和 AlAs 的厚度分别为：94.20 nm 和 111.07 nm。下 DBR 反射镜 (底部的布拉格反射镜) 周期数为 33.5，通过公式 3.1 和公式 3.2

分别计算得对应的反射率为: 0.999981348, 和对应的高反射率的带宽为: 140.3744 nm。上反射镜由 15 对周期数的 AlAs 和 GaAs 反射镜组成, 计算得反射率为: 0.991756681, 带宽依然是 140.3744 nm。上下 DBR 反射镜之间是微型谐振腔, 有源层材料也包含在这个微型谐振腔里面, 为了保证光在微型谐振腔里共振, 腔长是 $\lambda/2$ 的整数倍, 我们这里采用 λ , 通过计算我们得到腔的宽度为 423 nm。

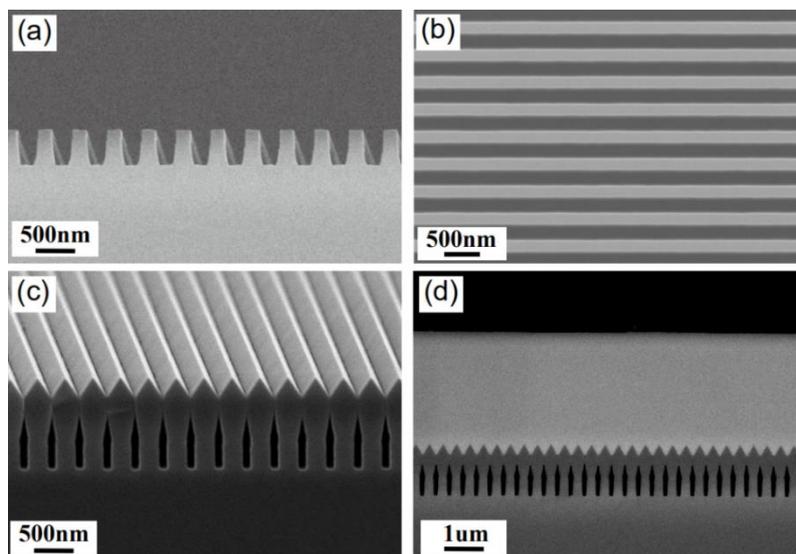


图 3.2 硅 (001) 上 U 形图形衬底的 SEM 图 (a) 截面图、(b) 俯视图, (c) 在 U 型图形衬底上同质外延 500 nm 后形成的硅 (111) 晶面的锯齿孔洞结构, (d) 在硅 (111) 晶面上生长的 GaAs 缓冲层的截面 SEM 图

Fig. 3.2 (a), (b) Cross-sectional and top-view SEM images of U-shape patterned Si (001) substrates, respectively. (c) SEM image of (111)-faceted-sawtooth structure after 500 nm Si buffer on U-shape patterned Si (001). (d) Cross-sectional SEM image of GaAs buffer layers on (111)-faceted Si hollow structure

在器件结构生长中, 通过在硅基图形衬底上构建硅 (111) 晶面的锯齿空洞结构, 实现 InAs 量子点微腔激光器在硅基上的集成。首先采用 CMOS 工艺将 8 英寸的 Si (001) 衬底通过深紫外光刻和干法刻蚀制备 U 型槽图形衬底, 然后将图形衬底切割成 32×32 mm 小片后放入 III-V/IV 双腔 MBE 进行激光器结构的生长。图 3.2 (a) 显示了 Si 衬底上 U 型槽沿 [1-10] 方向的 SEM 截面图, 图 3.2 (b) 是图形衬底的俯视图的 SEM 照片, 可以看出所用 U 型槽沿 [110] 方向排列, 周期为 360 nm, 槽的脊宽为 140 nm, 深 480 nm。首先通过同质外延在 U 型槽表面构建均匀的 111 晶面的锯齿孔洞结构, 如图 3.2 (c), 在此基础上生长 GaAs 缓冲

层。GaAs 缓冲层生长包含两步，第一步包括在 380 °C 下生长原子层和在高温 (560 °C) 下生长 GaAs 缓冲层。接着，在 480 °C 下生长有两种量子阱结构组成的位错过滤层 (DFLs)，两种量子阱分别是 InGaAs/GaAs 和 InAlAs/GaAs 的多重量子阱(QWs)结构。反向畴和大部分的失配位错被限制和湮灭在 GaAs 和 Si (111) 晶面之间的界面上。其它穿透位错(TDs)大部分被位错过滤层 (DFLs) 进一步过滤^[129]。最后生长五个周期的超晶格(SLs)使表面更加平整。图 3.2 (d) 显示了整个在硅 (001) 上的 GaAs 缓冲结构。

图 3.3 (a) 显示的是在 GaAs/Si (001) 衬底上生长的微腔激光器的结构示意图，对应的截面 SEM 照片如图 3.3 (b) 所示，激光器结构包括上下两个 DBR 反射镜和中间有源层。底层 DBR 反射镜由 33.5 对 1/4 波长 (1300 nm) 的 GaAs/AlAs 交替层组成，上部分 DBR 反射镜由 15 层 GaAs/AlAs 交替生长的薄膜层组成。每对 GaAs/AlAs 交替的 DBR 包含 111.1 nm 厚的 AlAs 和 94.2 nm 厚的 GaAs，它们分别在 610 °C 和 560 °C 下生长。有源层包含五层 InAs/GaAs 量子点在量子阱中的结构 (dot-in-a-well (DWELLs))^[129]。每一个 DWELL 周期层包含 3.1 单子层的 InAs 量子点层，该量子点层与上下 2 nm 的 In_{0.143}Ga_{0.857}As 浸润层和 6 nm 的 In_{0.143}Al_{0.857}As 盖层形成三明治结构，每一层的 DWELL 结构都是在 450 °C 下生长的。从 SEM 图中测试得中间微腔谐振腔的实际宽度为 426 nm。

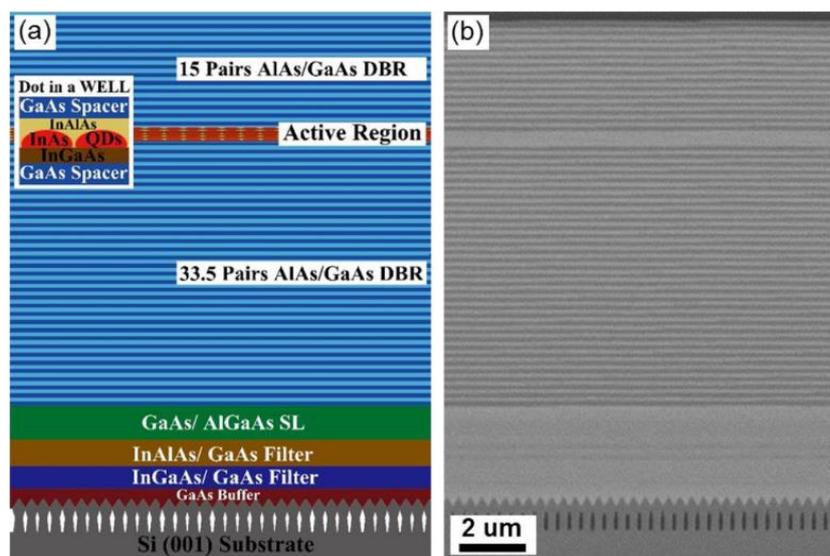


图 3.3 InAs/GaAs 硅基量子点微腔激光器结构的 SEM 截面图

Fig. 3.3 The schematic diagram (a) and cross-sectional SEM image (b) of InAs/GaAs micropillar laser structure on (111)-faceted-sawtooth Si (001) hollow substrate: InAs/GaAs QDs embedded in one λ -cavity with 15 (33.5) pairs of top (bottom) DBRs

3.2 器件制作与性能测试

激光器制作工艺主要包括如图 3.4 所示的晶圆清洗，光刻（平板印刷），干法刻蚀，掩膜去除四个步骤。晶圆清洗主要采用丙酮，异丙醇和去离子水对晶圆表面进行清洗，去除晶圆表面的油脂和其它附着物，然后在 4000 rpm 下采用 AZ6130 旋涂光刻胶，在 115 °C 下烘烤 1 min 后采用 SUSS MA6 紫外曝光机进行图形化，最后显影定影后再 115 °C 下烘烤 5 min。将图形化好的晶圆放到 ICP 中进行干刻，实验采用第二章中获得的最佳干法刻蚀条件进行刻蚀。然后使用丙酮去除器件表面的光刻胶，并用丙酮、异丙醇、去离子水清洗样品表面，最后使用反应离子刻蚀 (RIE) 的氧等离子体对样品表面进一步清洗。

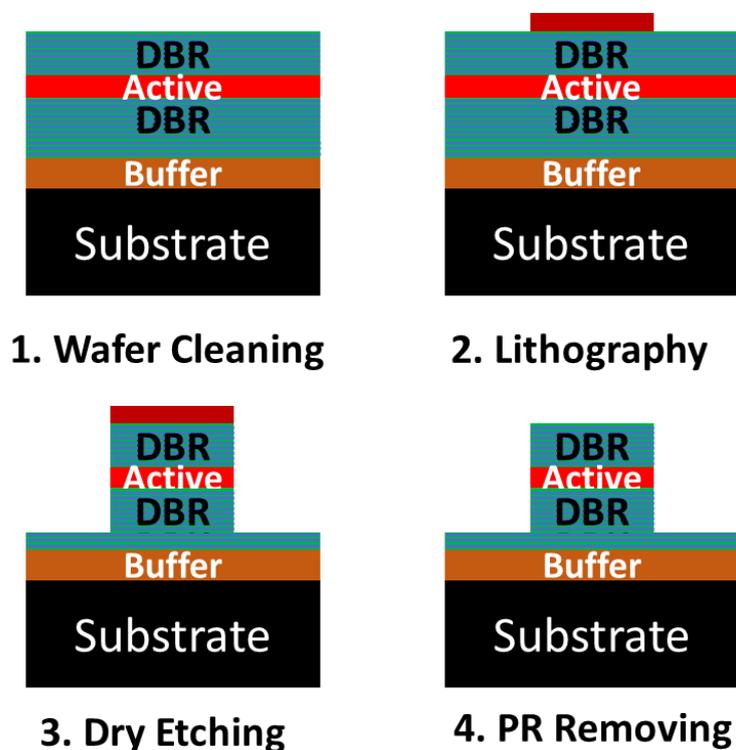


图 3.4 微腔激光器制作工艺流程图

Fig. 3.4 Process flow of the microcavity laser

通过上述工艺我们制作了低阈值硅基 InAs/GaAs 量子点垂直端面发射微腔激光器。如图 3.5 所示，腔面的直径从 250 μm 到 15 μm ，图 3.5 (b) 显示了 15 μm 器件的倾斜 SEM 照片，从图中得到干刻的刻蚀深度为 12 μm 左右，刻蚀到最后 7-8 层的 GaAs/AlAs 布拉格反射镜上，有接近 90° 的陡直性，同时器件刻蚀表面光滑，器件表面非常干净。

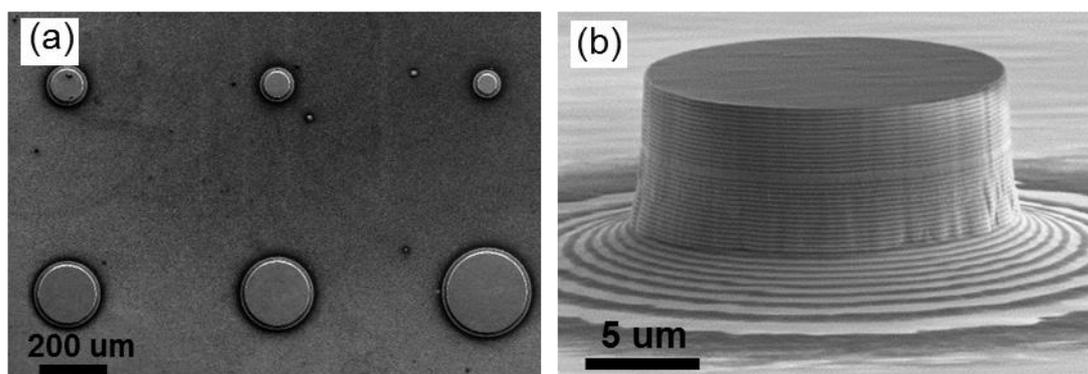


图 3.5 InAs/GaAs 硅基量子点微腔激光器器件的 SEM 图 (a) 不同尺寸的器件的俯视图, (b) 直径为 15 μm 的 InAs/GaAs 量子点激光器器件的倾斜视角视图

Fig. 3.5 (a) top-view SEM image of micropillar lasers with different diameters; (b) SEM image of InAs/GaAs QD micropillar laser on Si (001) with 15 μm diameter

使用原子力显微镜 (AFM) 对硅基上生长的 GaAs 缓冲层表面形貌进行表征, 并测量了对应的粗糙度; 用扫描电镜 (SEM) 对材料结构和器件形貌以及缓冲层形貌进行了观察。采用紫外-可见-红外分光光度计 (Agilent Technologies Cary 7000 UV-Vis-NIR) 在 500 nm-1500 nm 波长范围和室温下测试了完整激光器结构的反射率, 测试示意图如图 3.6 (a) 所示, 测试精度为 0.1 %。然后采用 ICP 将上面的 DBR 全部刻蚀, 只剩下有源层上表面的第一层 GaAs 层, 在如图 3.6 (b) 所示, 然后利用光谱测试系统, 使用 532 nm 激光连续泵浦量子点有源区测试其 PL 性质, 最后用 HORIBA iHR550 光谱仪使用 InGaAs 探测器收集光谱。硅基微腔激光器的测试则采用如图 3.6 (c) 带温度控制的显微光谱测试系统, 采用波长为 532 nm 的激光, 连续泵浦硅基量子点微腔激光器, 在 20 $^{\circ}\text{C}$ 到 100 $^{\circ}\text{C}$ 温区内, 每间隔 20 $^{\circ}\text{C}$ 测试不同泵浦功率下激光器输出的激光谱。本章测试了直径为 15 μm 和 150 μm 的硅基 InAs/GaAs 量子点垂直腔面发射微腔激光器, 其中测试直径为 15 μm 激光器时, 打在样品表面的 532 nm 激光光斑直径约为 12 μm ; 测试直径为 150 μm 激光器时, 激光光斑的直径大约为 150 μm 。采用 HORIBA iHR550 光谱仪上的液氮冷却型线阵列探测器收集了输出激光的谱峰。通过对光谱积分后获得在不同温度和泵浦功率下, 激光器输出的相对功率强度。最后将不同温度和泵浦功率的积分值做成曲线, 获得激光器在不同温度下的 L-L 曲线, 从 L-L 曲线中获得激光器的阈值功率。每次测试中都对光路进行严格对准优化, 保证所搜集到最大强度的光谱。

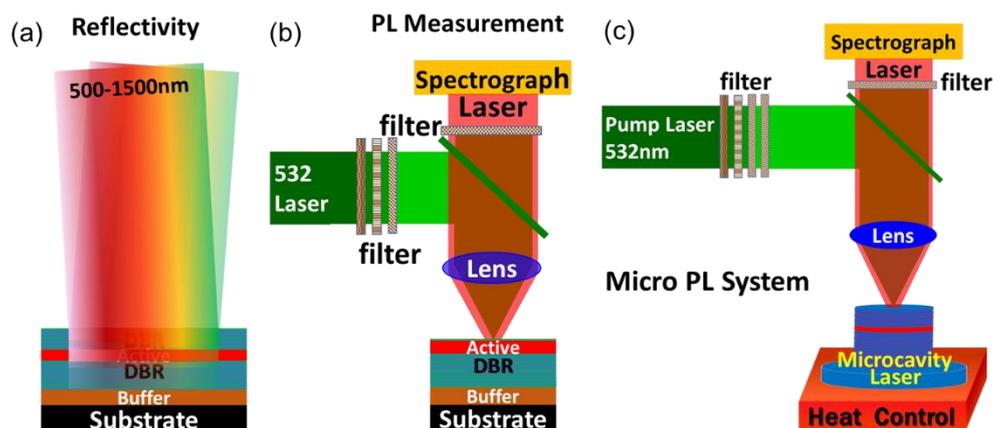


图 3.6 测试原理示意图 (a) 反射率测试示意图, (b) 激光器结构 PL 测试示意图, (c) 带温控的显微 PL 测试系统

Fig. 3.6 Schematic of (a) reflectivity measurement, (b) PL system and (c) micro PL system with heat control

3.3 结果和讨论

3.3.1 材料性能

采用 AFM 表征了 MBE 生长获得的高质量的 GaAs 缓冲层表面的性质, 图 3.7 (b) 是缓冲层表面的 AFM 照片, 扫描范围为 $2 \times 2 \mu\text{m}^2$, 从图中可以得到缓冲层表面的粗糙度约为 0.4 nm。图 3.7 (d) 是通过刻蚀 400nm 深度后在薄膜表面露头的位错 (EPD) 的光学显微镜照片, 从图中我们可以计算得到 GaAs 缓冲层表面的位错密度在 10^5 cm^{-2} 的量级, 此外图 3.7 (e) GaAs 缓冲层表面的电子通道成像 (ECCI) 图中也可以获得相同的结论^[129]。为了进一步证明本文采用的硅 (111) 面的锯齿形孔洞结构对 GaAs 缓冲层中的位错有限制作用, 采用 SEM 分别对图形衬底上生长的 GaAs 缓冲层和非图形衬底上生长的 GaAs 缓冲层的表面形貌进行了观察。结果显示在图形衬底表面生长的 GaAs 缓冲层表面非常平整, 而在非图形衬底上生长的 GaAs 表面则非常粗糙, 存在高密度的反向畴。由此可见, 在图形衬底上构建的硅 (111) 面的锯齿形孔洞结构能够保证高晶体质量 GaAs 缓冲层的生长。最后在上述高质量的 GaAs 缓冲层上生长了五层 InAs/GaAs DWELLs 结构, 图 3.7 (c) 显示的是扫描范围为 $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ 的表面 InAs 量子点 AFM 照片, 从图中可知量子点的密度约为 $3.3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$, 很均匀的分布在 GaAs 缓冲层表面, 由此进一步表明, 上文所获得的 GaAs 缓冲层有很高的晶体质量。

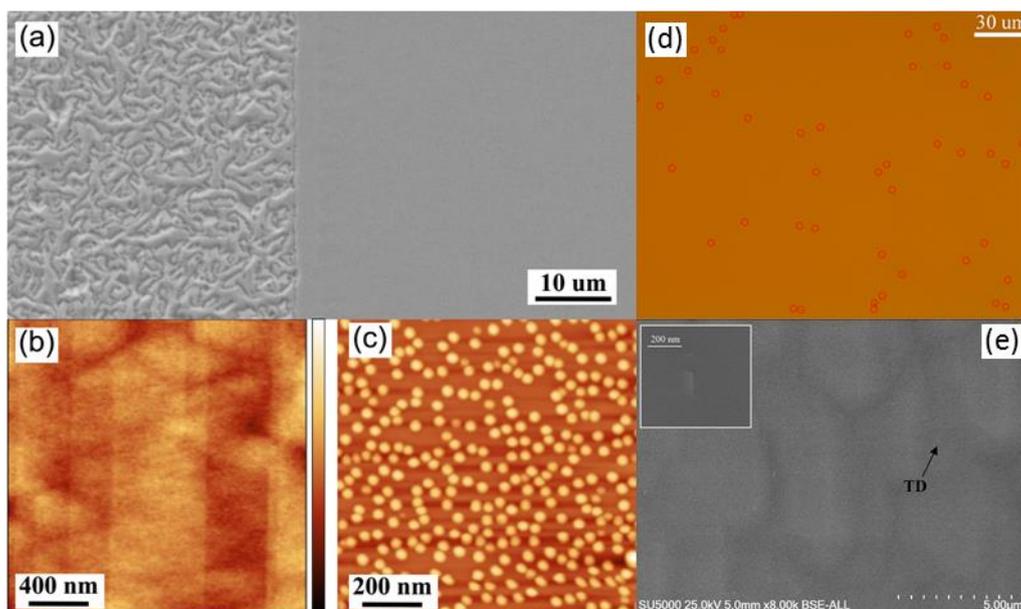


图 3.7 (a)生长在有图形结构的 Si (001) 衬底上和没有图形区域上的 GaAs 缓冲层的 SEM 图。(b) 生长在硅 (001) 图形衬底上 GaAs 缓冲层的 AFM 图。(c) 在 GaAs/Si 衬底上生长的 InAs/GaAs 量子点的 AFM 照片。(d) 刻蚀 400 nm 后在薄膜表面露头的位错 (EPD) 照片。(e) GaAs 缓冲层表面的电子通道成像 (ECCI) 图, 嵌在左上角的是位错的放大图

Fig. 3.7 (a) top-view SEM image of GaAs grown standard Si (001) and sawtooth-structured Si (001) substrates. (b) $2 \times 2 \mu\text{m}^2$ AFM image of the GaAs film grown on (111)-faceted-sawtooth Si (001) hollow substrate. (c) $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ AFM image of InAs/GaAs QDs grown on GaAs/Si substrate. (d) Optical microscopy image of GaAs/Si (001) surface after approximately 400 nm etching depth by etch pit density (EPD) process. The etch pits are marked with red circles. (e) Electron channeling contrast image (ECCI) showing threading dislocations of GaAs/Si template. The inset is a zoomed-in ECCI image of a typical threading dislocation nearby a stacking fault

激光器结构的反射率采用紫外-可见-红外分光光度计测试表征, 结果如图 3.8 红色曲线所示, 在硅基上的 InAs 量子点微腔激光器反射谱的中心波长位于 1300 nm 左右, 这和我们设计值 1300 nm 一致, 对应的带宽为 126 nm, 这个设计值 (140.3744 nm) 也只相差了 14 nm, 两者基本一致, 由此表明通过 MBE 设备和生长材料具有优异的可控性。在 O 波段波长测得的反射率超过 99.9 %, 受限于测试精度, 无法对 0.1 % 以后的反射率进行进一步精确测试。此外我们还注意到在 1320 nm 的地方有一个小凹峰, 该峰是由激光器结构中微米尺度的谐振腔引起的共振峰。此外进一步对激光器结构的光学性质进行了表征, 如图 3.6 (b) 所示,

将激光器结构中的上部分布拉格反射镜刻蚀到只剩下最后一层 GaAs 的位置，然后在 PL 测试系统中测试了有源区的 PL 性能，结果如图 3.8 中蓝色曲线所示，可知谱线的峰位在 1319 nm，刚好和反射谱中谐振腔所在的波长相一致。最后需要在这里指出的是，该激光器结构在 532 nm 的光的反射率为 36.7%，因为谱线的扫描范围过大，因此并没有在图中标识出来，532 nm 是实验中所使用的泵浦光源，对泵浦光源的反射会降低实际进入激光器中用于泵浦激光器的光强。

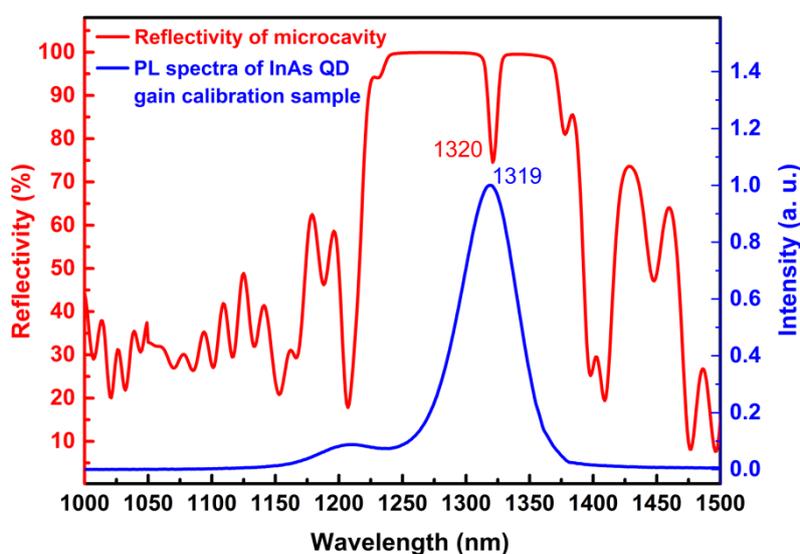


图 3.8 激光器的反射率 (红色) 和刻蚀掉上层 DBR 后 5 层 InAs 量子点的 PL 谱 (蓝色)

Fig. 3.8 Room-temperature PL spectra of InAs QD gain calibration sample (blue) and reflectivity (red) of InAs QD microcavity on Si (001) hollow substrate

3.3.2 激光器性能

将激光器固定封装在铜导热基板上，采用显微 PL 测试系统测试了直径为 15 μm 和 150 μm 的硅基 InAs 量子点垂直腔面发射微腔激光器的性质。圆盘直径为 15 μm 的硅基微腔激光器在室温下的输出功率和泵浦功率 (L-L) 测试结果如图 3.9 所示，其中，内嵌的谱是激光器在泵浦功率为 6 mW 时测得的输出光光谱。通过对激射后的曲线进行线性拟合，反向延长后我们得到激光器的阈值泵浦功率为 20 μW ，在 6 mW 泵浦功率下激光出射谱的半高宽 (FWHM) 为 1.3 nm，半高宽相对较宽，这是器件在平板工艺图形化和刻蚀中环形微腔圆柱的不完美引起的谱线宽化。同时在材料生长中 AlAs/GaAs 界面处也存在微小的起伏，从而进一步对器件谱峰的宽化产生影响。

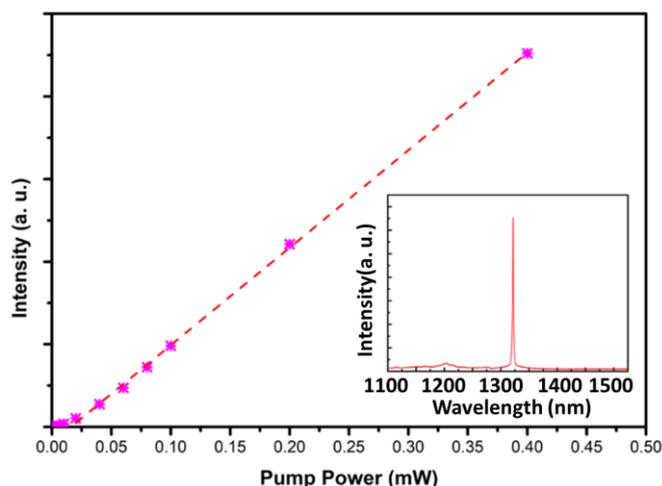


图 3.9 直径为 $15\ \mu\text{m}$ 的硅基 InAs/GaAs 量子点微腔激光器在室温下输出功率和泵浦功率 (L-L) 之间的曲线。内嵌图: 微腔激光器在 $6\ \text{mW}$ 泵浦功率下的出射激光谱线

Fig. 3.9 Plot of output intensity versus pump power (L-L curve) of InAs/GaAs QD micropillar laser (diameter: $15\ \mu\text{m}$) on Si at room temperature. Inset: Spectral plot of micropillar laser at the pump power of $6\ \text{mW}$

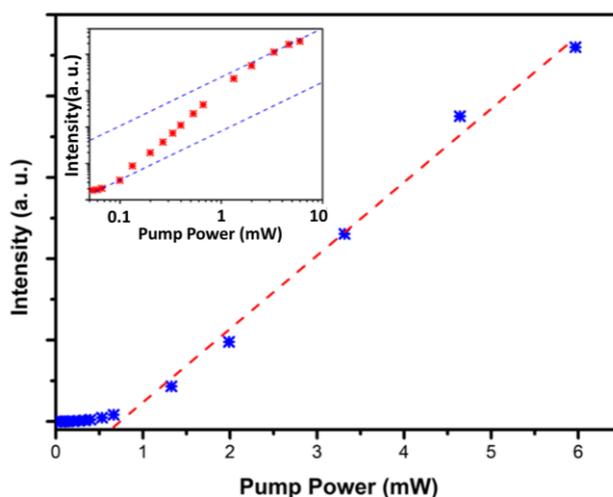


图 3.10 直径为 $150\ \mu\text{m}$ 的硅基 InAs/GaAs 量子点微腔激光器在室温下输出功率和泵浦功率 (L-L) 之间的关系曲线。内嵌图: L-L 曲线对应的 log-log 图

Fig. 3.10 plot of light output versus pump power (L-L curve) of InAs/GaAs QD micropillar laser (diameter: $150\ \mu\text{m}$) on Si at room temperature. Inset: Double-log plot of the L-L curve

对于微腔圆柱直径为 $150\ \mu\text{m}$ 激光器的测试结果如图 3.10 所示, 通过对 L-L 曲线在激射部分进行线性拟合, 反向延长与泵浦功率相交所对应的泵浦功率为激光器的阈值功率, 所示约为 $680\ \mu\text{W}$ 。图 3.10 中内嵌的曲线是 L-L 曲线的 log-log 图, 也就是输出功率强度的 log 值与泵浦功率的 log 值之间的关系曲线, 从图中可知, 两者的关系是典型的 S 形曲线, 包含自发辐射到自发辐射增益, 最后再到

激射的过程。其中自发辐射耦合系数 β 在光学模式随光学微腔尺寸减小而明显降低，由此显著降低激光器的阈值功率^[130, 131]。从 log-log 图中计算获得 150 μm 直径的微腔激光器的 β 值为 0.03。最为对比，本文用同样的方法获得了 15 μm 直径的微腔激光器的 β 为 0.1，大于 150 μm 激光器的结果，这是因为 β 依由腔体的品质因子 Q 值和模式体积 V_m 决定 (Q/V_m)，小尺寸谐振腔的模式体积小，因此 β 值较大。

接着我们收集了直径为 150 μm 激光器在泵浦功率从 1.2 mW 到 44.2 mW 下的激光器输出光光谱，图 3.11 显示的是直径为 150 μm 的硅基 InAs/GaAs 量子点微腔激光器在不同泵浦功率下的图谱，从图中可以看出激光器谱线峰位的中心波长位于 1320 nm，当泵浦功率为 18.1 mW 时，激射峰的半高宽为 3.4 nm，半高宽是 15 μm 的两倍多，这是因为相对与直径为 15 μm 的激光器，150 μm 的激光器的谐振腔很大，对模式的限制作用小，导致模式体积增大，同时在反射界面处的细小散射将导致激射峰的进一步宽化，此外，直径大的激光器有更大面积的 AlAs/GaAs 布拉格反射镜界面，因此受到界面处不平整带来的散射也更大，从而导致激射谱峰的进一步宽化。从图谱中我们还可以知道在不同泵浦功率下出射光谱的半高宽和谱峰的位置几乎没有变化，这是由于量子点激光器本身对温度不敏感以及通过直接生长的方式获得的硅基量子点激光器有良好的热传导性能。

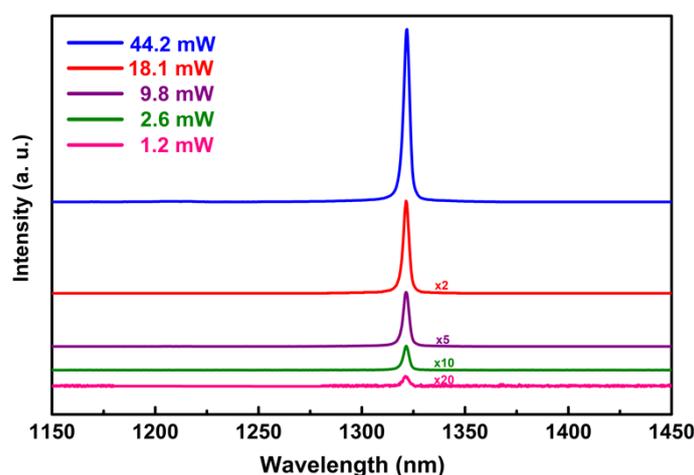


图 3.11 直径为 150 μm 的硅基 InAs/GaAs 量子点垂直腔面发射微腔激光器在不同泵浦功率下的输出光图谱

Fig. 3.11 Room-temperature PL spectra of InAs QD micropillar on Si (001) at increasing pump powers

为了进一步表征硅基 InAs/GaAs 量子点微腔激光器的性能,我们测试了直径为 $150\ \mu\text{m}$ 的激光器在不同工作温度下的性能。图 3.12 显示了在工作温度为 $20\ ^\circ\text{C}$ ~ $100\ ^\circ\text{C}$ 下直径为 $150\ \mu\text{m}$ 的硅基 InAs/GaAs 量子点微腔激光器输出光积分强度和泵浦功率之间的关系 (L-L) 曲线, 以及对应不同温度下的光谱, 从图 3.12 (a) 中可以看出, 虽然随着工作温度的增加激光器的阈值功率不断增加, 相同泵浦功率下对应的出射峰的积分值强度也不断减小, 但是该激光器在 $100\ ^\circ\text{C}$ 下依旧能够工作。此外, 图 3.12 (b) 显示出不同温度下激射峰的半高宽和峰形几乎没有变化, 由图 3.12 (b) 的内嵌图可以得到随着温度的变化, 激光器的红移程度约为 $0.165\ \text{nm}/^\circ\text{C}$ 。由此表面该量子点硅基激光器有出色的温度稳定性, 这也进一步体现出量子点激光器的优势, 同时也说明本文所采用的通过在 Si 图形衬底上, 构建硅 (111) 晶面的锯齿孔洞结构的方法获得高质量的 GaAs 缓冲层并将激光器生长在硅基上的技术, 在未来 III-V 族光电器件与 Si 衬底集成上有潜在的重要应用。

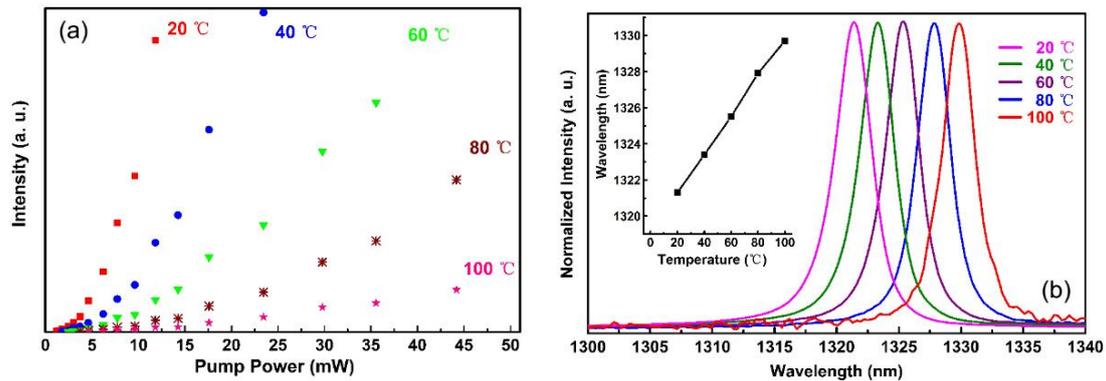


图 3.12 (a) 不同测试温度下, 直径为 $150\ \mu\text{m}$ 的硅基 InAs/GaAs 量子点微腔激光器出射光积分强度和泵浦功率之间的关系 (L-L) 曲线; (b) 激光器在不同温度下的光谱图, 内嵌显示了温度与谱峰波长之间的关系

Fig. 3.12 Integrated PL intensity of InAs QD micropillar on Si (001) as a function of pump power at temperature ranging from $20\ ^\circ\text{C}$ to $100\ ^\circ\text{C}$. (b) PL spectra of InAs micro-cavity laser at different temperature, from $20\ ^\circ\text{C}$ to $100\ ^\circ\text{C}$. Inset: Plot of peak wavelength versus temperature

3.4 本章小结

本章中所使用的样品是采用外延生长方式在硅衬底上直接生长的 InAs 量子点激光器结构,采用微纳加工技术制作了硅基 InAs/GaAs 量子点垂直端面发射微腔光泵浦激光器。在显微光谱测试系统中,采用 532 nm 激光泵浦,测试了激光器的性能。激光器的上下反射镜采用由 AlAs/GaAs 组成的布拉格反射镜 (DBR),以激光器出射波长为 1300 nm 模拟并设计了激光器的 DBR 反射镜、微型谐振腔长,以及量子点发光结构,最后获得的 DBR 反射谱的中心波长在 1300 nm,对应带宽为 126 nm。谐振腔共振波长为 1320 nm,量子点光源发光谱线的中心波长为 1319 nm,设计和实际生长获得的激光器的结构基本一致,这说明通过 MBE 直接外延的方式生长激光器材料具有优异的可控性。本章测试了直径为 15 μm 和 150 μm 的 InAs/GaAs 量子点硅基垂直腔面发射的微腔激光器的性能,其中直径为 15 μm 的垂直腔面发射激光器具有 20 μW 的低阈值功率,在 6 mW 泵浦光激发下的激光谱的半高宽为 1.3 nm。15 μm 直径的激光器的阈值功率远小于 150 μm 的激光器 (450 μW),其半高宽也只有 150 μm 的激光器半高宽 (3.4 nm) 的 1/3 左右,直径为 150 μm 的激光器 β 值为 0.03,小于直径为 15 μm 的激光器 β 值 0.1,主要是因为大尺寸的激光器的激光模式体积大。此外通过激光器工作温度的测试得到激光器的最高工作温度为 100 $^{\circ}\text{C}$ 。表明器件具有优异的温度稳定性,这是由于量子点激光器对温度不敏感的性质,以及通过直接生长的方式在硅基上集成激光器有更为优秀的热稳定性和器件内部更小的热阻特性。由此可见该工艺很有潜力应用于今后 CMOS 工艺兼容的硅基光电子集成。

第 4 章 SOI 基 InAs 量子点微盘激光器

近年来随着硅基光电子技术不断应用于高性能计算和数据中心等领域,使得 COMS 工艺兼容的硅基集成光源的需求不断增强^[2, 46, 122, 123, 132]。目前,很多采用直接生长的方式获得硅基 III-V 量子点结构的工作发表出来^[7, 126, 133, 134],包括 F-P 腔激光器^[3, 10, 59, 120],布拉格反射 (DFB) 激光器和微腔激光器。然而,现在所有的硅基光电子器件都是基于 SOI 平面工艺制作,包括偏振器^[135, 136],分束器^[137, 138],波分(解)复用器^[40],调制器^[139, 140]和探测器^[141-143]。因此,SOI 基光源的集成在硅基光电子领域的发展上是重要的一步。据我们所知,目前在该领域中没有通过直接生长的方式在 SOI 基上集成光源的报道。此外,微盘激光器具有独特的优势,如高品质因素、小尺寸、和低功耗^[100, 102, 106, 127]。本章中所使用的样品是采用外延方式在 SOI, GaAs 和 Si 衬底上直接生长的 InAs 量子点激光器结构,首次在 SOI 基上通过直接生长实现了 O 波段光泵浦 InAs 量子点微盘激光器的激射。作为对比,利用相同激光器结构制作的 GaAs 基和 Si 基的微盘激光器。本章介绍了 SOI 基 GaAs 缓冲层的生长和微盘激光器结构的生长,系统研究了微盘激光器器件的制作工艺,并对 GaAs 基 Si 基和 SOI 基的量子点微盘激光器的性能进行了表征和分析,最后对比了已经报道的 Si 基光泵微盘激光器的性能。

4.1 微盘激光器的设计和生长

微盘激光器谐振腔中的激光模式随着微盘直径的减小而不断减少,小尺寸微盘激光器一般可实现单模激射,但同时随着尺寸的减小,器件中的量子点有源材料也不断减小,使激光器的增益减少,器件的损耗和增益比上升,导致激光器的阈值功率增大,甚至不激射。因此微盘激光器的直径要适中,一般来讲微盘激光器的环形腔的直径在 4 μm 左右的时候出射的激光接近单模,同时又有足够的量子点作为增益材料^[23, 112, 144-146]。因此本章采用的微盘激光器中微盘的直径为 4 μm 。如图 4.1 所示为文献^[147, 148]所报道的微盘中光场分布模拟图,从图中可以看出大部分的光限制在距离微盘边缘 500 nm 左右的地方,由此可见,微盘激光器脖子横向刻蚀深度要大于 500 nm,考虑到工艺容差性和器件稳定性,我们设计脖子的直径小于 2 μm 。

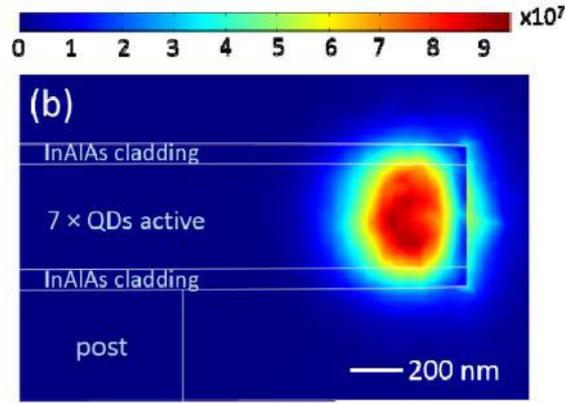


图 4.1 “耳语回廊”模式的环形谐振腔中模式分布模拟的截面图

Fig. 4.1 Cross-sectional slice of the simulated whispering gallery modes of 2D microdisks with 7-layer QDs

InAs 量子点微盘硅基激光器器件主要由器件部分和衬底部分组成。对于 GaAs 衬底上的微盘激光器，激光器材料直接生长在 GaAs 衬底上；但是，Si 衬底和 SOI 衬底上的微盘激光器的生长，首先需要在衬底上生长 GaAs 缓冲层，然后再生长激光器结构。如图 4.2 所示缓冲层的生长包含两个步骤，分别是图形衬底上 Si 的同质外延生长构建 111 晶面的锯齿孔洞结构 (图 4.2 (b))，在此基础上生长带有 III-V 位错过滤层的 GaAs 缓冲层 (图 4.2 (c))。从而获得高晶体质量的 GaAs/Si 或者 GaAs/SOI 异质集成的衬底。

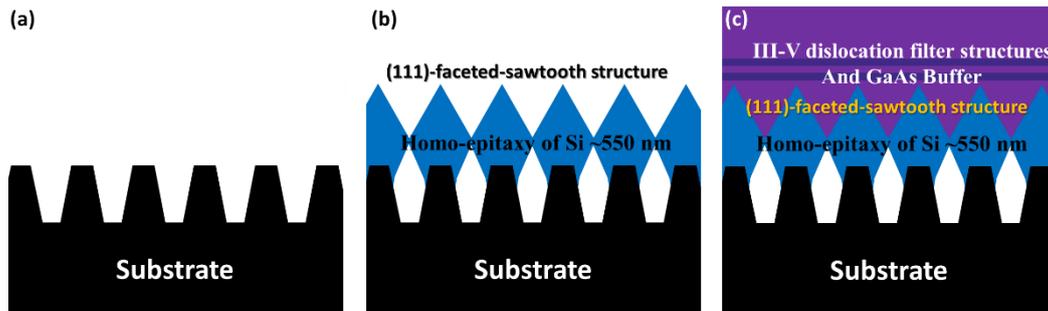


图 4.2 Si (001) 衬底或 SOI 衬底上 GaAs 缓冲层生长示意图，(a) 衬底，(b) 同质外延生长 Si，(c) 在硅 (111) 晶面的锯齿孔洞结构上生长 GaAs

Fig. 4.2 Illustration of GaAs buffer deposition on Si (001) or SOI substrate, (a) patterned Si (001) substrate, (b) Si sawtooth hollow structure and (c) GaAs buffer on Si (001)

如图 4.3 所示为在 GaAs 衬底上或者 GaAs/Si 或者 GaAs/SOI 衬底上生长的激光器结构的示意图。从图中可以看出器件部分包括 600 nm 的 $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}$ 牺牲层和微盘激光器结构。激光器结构包括 400 nm 的 7 层量子点结构，量子点有

源区上下两侧分别是 50 nm 的 GaAs 和 100nm 的 GaAs 层，由此形成三明治结构，在这三明治结构外面上下都有 50 nm 的 $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ ，最上面一层是 20 nm 的 GaAs 层作为保护，中间 GaAs 与有源区的折射率高于两侧 AlGaAs 的折射率，从而在垂直方向上对光的模场进行限制。

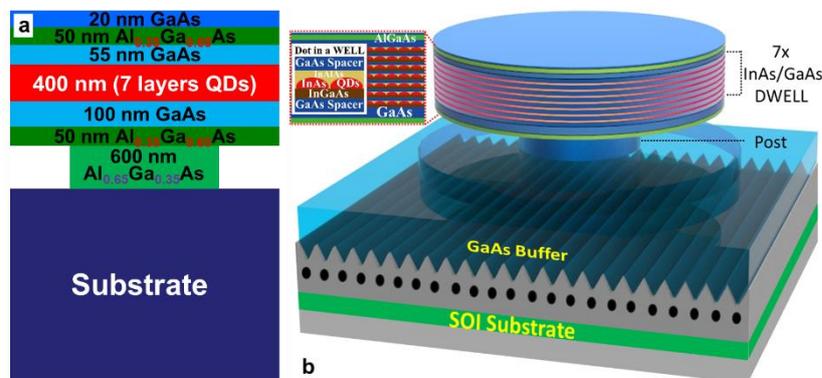


图 4.3 (a) 在 SOI、Si 或 GaAs 衬底上生长并制作的 InAs/GaAs 量子点微盘激光器结构的截面图。(b) 在 SOI 衬底上的 InAs/GaAs 量子点微盘激光器的三维图。内嵌图显示了有源层结构

Fig. 4.3 (a) Cross-sectional schematic diagram of the InAs/GaAs QD microdisk laser on SOI, Si, or GaAs substrate. (b) Three-dimensional schematic diagram of the InAs/GaAs QD microdisk laser on SOI substrates. Inset shows the QD active layer

材料生长使用特殊性质的 Si (001) 衬底，和 SOI 基衬底，其中 SOI 衬底的中间热氧化层的厚度为 3 μm ，顶层硅的厚度为 340 nm。首先是 GaAs 缓冲层的生长，Si (001) U 型衬底的制备和图形衬底上缓冲层的生长如第三章所述，本章不再赘述。SOI 衬底的图形化采用第三章中制作 Si 图形衬底的方法，即先采用深紫外光刻工艺进行光刻，然后采用干法刻蚀工艺刻蚀 Si 获得如图 4.4 (a) 所示 SOI 的 U 型衬底。制备的图形衬底的周期为 360 nm，U 型脊的宽度为 140 nm，深度为 270 nm。将制备的 8 英寸的图形衬底晶圆切成 3.2 cm \times 3.2 cm 小样品，然后通过标准的 RCA 清洗工艺对衬底表面进行清洗。首先在 HF 酸溶液中浸泡去除晶圆表面的自然氧化层，同时在表面会形成一层氢的钝化层。进入 MBE 腔体在高温下除气并在 720 $^{\circ}\text{C}$ 脱氢后冷却到 600 $^{\circ}\text{C}$ ，然后以 1.0 $\text{\AA}/\text{s}$ 的速度同质外延生长 450 nm 厚的 Si 缓冲层，形成如图 4.4 (b) 所示的硅 (111) 晶面的锯齿孔洞结构。之后在连体的双腔 MBE 腔体中从 VI 腔中转移到 III-V 族腔体中继续原位生长。首先在 380 $^{\circ}\text{C}$ 的低温下，以 0.5 $\text{\AA}/\text{s}$ 速率生长 AlAs 原子层。紧接着通

过两步法生长 GaAs 缓冲层，第一步在 380 °C 下，以 0.5 Å/s 的速度，低温生长 30 nm 厚的 GaAs 层；第二步在 580 °C 下，以 0.5 Å/s 的速度，高温生长 560 nm 厚的 GaAs 层，这两步生长的 600 nm 厚的 GaAs 层是用来抚平 Si (111) 锯齿结构，在此基础上继续生长 1.8 μm 厚的 III-V 族缓冲层。III-V 缓冲层包括两对在 480 °C 下生长的 10 nm In_{0.15}Ga_{0.85}As/10 nm GaAs 量子阱结构作为位错过滤层 (DFLs)，两个缓冲层之间夹着厚度为 200 nm GaAs 层。然后接着在 480 °C 下生长两个周期的 10 nm In_{0.15}Al_{0.85}As/10 nm GaAs 位错过滤层，用于进一步降低穿透位错 (TDD)。最后，在 580 °C 下生长 5 个周期的 2 nm Al_{0.6}Ga_{0.4}As/2 nm GaAs 超晶格，用于进一步抚平 GaAs 表面，最终形成如图 4.4 (c) 所示的 GaAs/SOI 结构衬底。

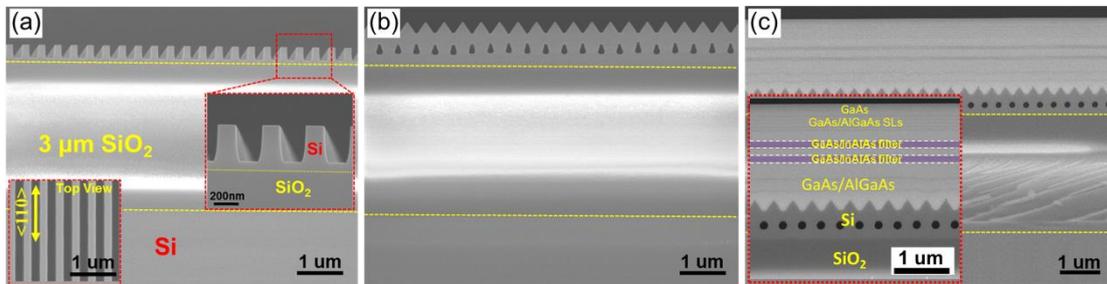


图 4.4 在 SOI 衬底上生长 GaAs 缓冲层的截面扫描电镜照片。(a) SOI 图形衬底，(b) 生长同质外延生长硅后形成的 (111) 晶面的锯齿孔洞结构，(c) 在锯齿孔洞结构的 SOI 衬底上生长带有 III-V 位错过滤层的 GaAs 缓冲层

Fig. 4.4 Cross-sectional SEM images of (a) patterned SOI substrate, (b) saw-tooth hollow structure on SOI substrate and (c) GaAs buffer layers on SOI substrate

在上述 GaAs/Si (001) 和 GaAs/SOI 异质外延的 GaAs 缓冲层衬底上原位生长微盘激光器结构，如图 4.3 所示激光器结构包括 600 nm 的 Al_{0.7}Ga_{0.3}As 牺牲层和 700 nm 的微盘区域。在微盘区域中，包含 7 层的 InAs/GaAs 量子点在量子阱中 (DWELL) 的有源区结构。每层 DWELL 结构中包含 3.1 个单原子层的 InAs 量子点层，每层 InAs 量子点层与 2 nm 的 In_{0.15}Ga_{0.85}As 浸润层和 6 nm 的 In_{0.15}Ga_{0.85}As 盖层形成三明治结构，DWELL 的所有结构都是在 450 °C 下生长获得。上述每层的 InAs/GaAs 量子点结构之间通过 50 nm 厚的 GaAs 空间层隔开，该 GaAs 夹层在 560 °C 下生长。然后在有源区的上下表面生长低折射率的 50 nm Al_{0.40}Ga_{0.60}As 作为模场限制，最后进一步在上表面的 Al_{0.40}Ga_{0.60}As 材料上生长 20 nm 的 GaAs，用于防止 Al_{0.40}Ga_{0.60}As 遇到空气被氧化。为了进一步对比 Si 基

和 SOI 基上微盘激光器的性能, 我们同时在 GaAs 衬底上用完全同样的条件生长了一样结构的微盘激光器。

4.2 器件制作工艺与测试

微盘激光器的制作工艺一共包括如图 4.5 所示的 6 个步奏。首先是用丙酮、IPA、去离子水清洗晶圆表面; 然后将事先在酒精中分散好的 SiO_2 小球, 通过 4000 rpm 旋涂, 将小球均匀的分散在晶圆表面, 接着在 115°C 下干燥 1 min; 冷却后, 以晶圆表面的二氧化硅小球作为掩膜, 用 Inductively Coupled Plasma (ICP) 在一定刻蚀条件下进行刻蚀, 形成小柱子, 刻蚀的深度要超过 AlGaAs 牺牲层; 通过超声, 将表面的小球去除掉; 接着, 将样品放入 NH_4F 和 HF 配置的 BOE 溶液中, 利用 F 离子对 Al 的选择性刻蚀, 刻蚀 AlGaAs 的牺牲层并保留其它部分, 最终形成如图 4.5 中步骤 5 所示的微盘激光器。最后, 利用第三章所述的显微光谱测试系统对微盘激光器的性能进行测试, 泵浦激光为 532 nm 波长的激光。

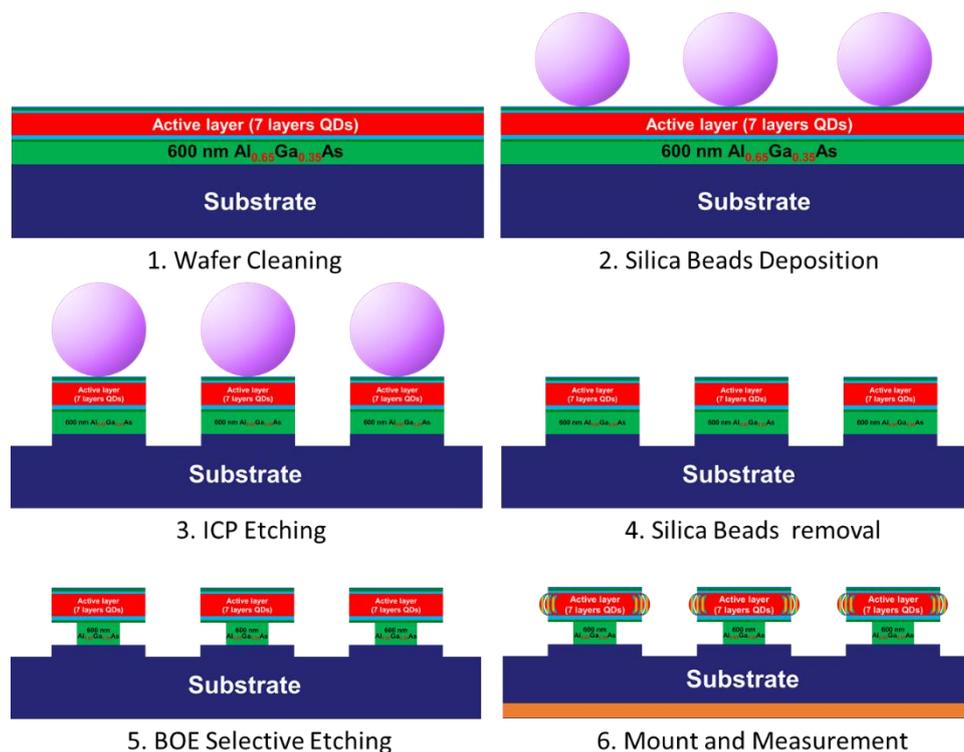


图 4.5 微盘激光器的工艺流程示意图

Fig. 4.5 Illustration of micro disk laser process

在上述微盘激光器制作工艺中, 最重要的是 ICP 干法刻蚀工艺和牺牲层的湿法选择性刻蚀工艺。由此我们对刻蚀工艺进行了系统的研究。

4.2.1 湿法刻蚀工艺

基于 HF 酸能够在 GaAs 和 AlGaAs 体系中选择性刻蚀 AlGaAs^[149-151]，因此在牺牲的刻蚀中采用 HF。此外，考虑到在刻蚀过程中溶液的浓度的稳定性，我们选用 NH₄F 和 HF 配置成缓冲溶液作为刻蚀剂，其中 F 离子作为有效的反应离子，用于刻蚀 AlGaAs 材料，NH₄F 是弱酸，在刻蚀中随着 F 离子的不断消耗，能够不断释放出 F 离子，使得溶液中 F 离子保持一定的稳定。实验中我们主要配置了三种不同比例的 NH₄F/HF 刻蚀溶液，如表 4.1 所示 NH₄F: HF 的比值分别是 3:1 和 5:1。将 ICP 刻蚀得到的小圆柱的样品放入不同的刻蚀溶液中浸泡不同的时间，取出后用去离子水将残留的刻蚀溶液清洗完全，干燥后用扫描电镜对样品的刻蚀衬度进行表征。采用第二章中获得的最佳 ICP 刻蚀工艺刻蚀 GaAs 基上有微盘激光器结构的晶圆，以二氧化硅小球作为掩膜，从而获得 4 μm 小圆柱用于湿法刻蚀研究。

表 4.1 不同比例的 NH₄F/HF 溶液在不同刻蚀时间下 AlGaAs 的刻蚀

Table 4.1 AlGaAs wet etching in different ratio NH₄F/HF solution with verity etching time

Sample NO.	NH ₄ F : HF	Etching Time/ min	Undercut / μm	SEM Image NO.
TW31	3:1	0.5	2.5	图 4.6 (a)
TW32	3:1	1	1.17	图 4.6 (b)
TW33	3:1	2	0.8	图 4.6 (c)
TW51	5:1	1	2.38	图 4.6 (d)
TW52	5:1	2	0.88	图 4.6 (e)
TW53	5:1	5	0.24	图 4.6 (f)

图 4.6 显示的是 GaAs/AlGaAs 小圆柱在不同比例的 NH₄F/HF 缓冲刻蚀溶液中腐蚀不同时间后的 SEM 照片。(a)、(b)、(c) 分别是在 NH₄F : HF 比例为 3 : 1 的溶液中刻蚀 0.5、1、2 min 的结果，(d)、(e)、(f) 分别是在 NH₄F : HF 比例为 5 : 1 的溶液中刻蚀 0.5、1、2 min 的结果。根据 SEM 表征结果，统计了 AlGaAs 的刻蚀深度，如表 4.1 所示，我们可以得到在 NH₄F : HF 为 3 : 1 的溶液中刻蚀 2 min 和 NH₄F : HF 为 5 : 1 的溶液中刻蚀 5 min，均能满足我们对单边刻蚀深度大于 500 nm 的要求。同时从 SEM 图中可以观察到高浓度的 AlGaAs 的侧壁有大概 60° 的角度，低浓度刻蚀的是垂直的。进一步考虑到刻蚀工艺的稳定性和可控性，我们选用刻蚀时间为 5 min 的 NH₄F : HF 为 5 : 1 刻蚀溶液。

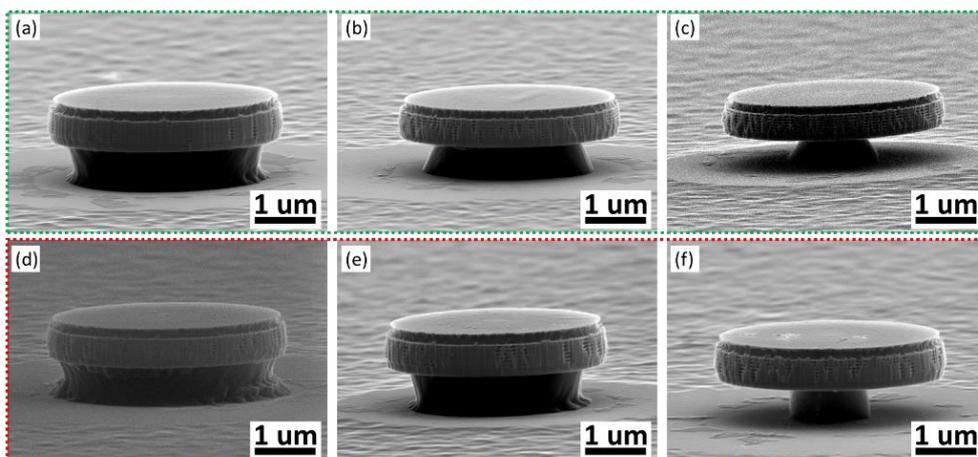
图 4.6 不同比例的 $\text{NH}_4\text{F}/\text{HF}$ 溶液在不同刻蚀时间下刻蚀的 AlGaAs 的 SEM 照片

Fig. 4.6 SEM of microdisk laser etching at different wetting etching condition

我们进一步对上述最佳工艺 (TW53) 所制备的器件的性能进行了表征, 图 4.7 显示了在泵浦功率为 0.440 mW 和 0.990 mW 下, 微盘激光器出射光的光谱, 从图中可以看出, 不论在高泵浦功率下, 还是在低泵浦功率下, 激光器中有很多模式, 这是由于微盘激光器谐振腔表面粗糙, 有大量的光在表面反射面上发射散射导致腔内模式增多。由此可见第二章中获得的最佳刻蚀条件并不适用于本章微盘激光器的刻蚀, 这是因为本章微盘激光器刻蚀采用的是小球作为掩膜。

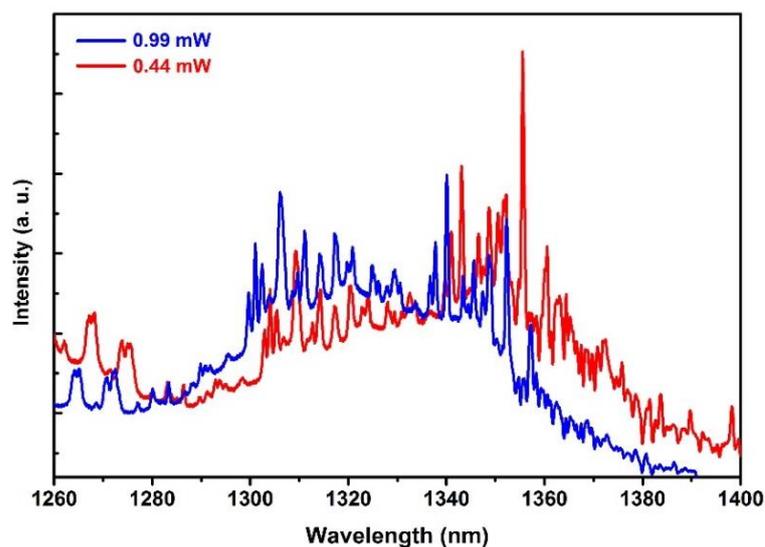


图 4.7 GaAs 基 InAs 量子点微盘激光器 TW53 在不同泵浦功率下的发射光光谱, 红色曲线是泵浦功率为 0.44 mW 的结果, 蓝色曲线为 0.99 mW 的结果

Fig. 4.7 spectura of InAs QD microdisk laser on GaAs at pump power of 0.44 mW (red curve) and 0.99 mW (blue curve) with process TW53

4.2.2 干法刻蚀

从上述微盘的 SEM 照片 (图 4.6) 中可以看到, 采用第二章所述的 ICP 最佳干法刻蚀条件刻蚀获得的微盘侧面非常粗糙, 而且分层现象, 这是因为在用小球最为掩膜时, 小球和样品的接触面是一个点, 其它地方都是有很大的弧形空隙, 这个空隙对 ICP 腔中等离子体的运动轨迹产生影响, 从而影响微盘激光器刻蚀表面的光滑度, 造成微盘激光器的谐振腔中散射严重, 导致腔内有很多模式, 严重影响器件性能。因此我们对 ICP 干法刻蚀工艺进行进一步研究。基于第二章的实验结果, 采用 Cl_2/BCl_3 作为刻蚀工艺气体, 对工艺气体的比例和流量, 腔体内反应气体的压强, RF 和 ICP 的功率进行了系列的设计和实验, 具体工艺参数如表 4.2 所示。在实际刻蚀中有效的刻蚀气体是 Cl_2 , BCl_3 在刻蚀中的作用类似于缓冲剂, 用于保持刻蚀等离子体中 Cl 的稳定。

表 4.2 基于 Cl_2/BCl_3 作为刻蚀气体的微腔激光器干法刻蚀工艺参数

Table 4.2 Micro disk laser dry etching at different process condition

Sample	BCl_3/sccm	Cl_2/sccm	Pressure/mbar	RF/W	ICP/W	Temp./ $^{\circ}\text{C}$	Time/min
TDB1	10	6	6	50	400	10	3
TDB2	10	6	6	100	400	10	3
TDB3	10	20	6	100	400	10	3
TDB4	10	20	12	100	400	10	3
TDB5	10	20	6	100	800	10	3
TDB6	10	20	3	100	800	10	3
TDB7	10	20	6	50	800	10	3
TDB8	10	6	6	50	800	10	3
TDB9	10	20	3	50	800	10	3

采用 SEM 对表 4.2 刻蚀条件下获得的 GaAs 衬底的小圆柱的形貌进行表征, 图 4.8 显示了 SEM 测试结果, 从图 4.8 (a) 到图 4.8 (i) 分别表示 TDB1 到 TDB9 条件下的实验结果, 从图中可以得到 TDB5 的刻蚀条件下获得的小圆柱有光滑的表面和接近 90 度角的侧壁陡直度。其它工艺下刻蚀的结果均不能满足微盘激光器对侧壁陡直度和光滑度的刻蚀要求。同时对比 TDB1 和 TDB2 发现高 RF 功率, 刻蚀后的表面再沉积更明显。对比 TDB2 和 TDB3 发现 Cl_2 流量的增加对侧壁的粗糙度有很大影响, 同时刻蚀速度也明显增加。对比 TDB3 和 TDB4 可知腔

体中反应气体压强的增加显著增强横向刻蚀。对比 TDB3 和 TDB5 可得，增加 ICP 功率，在刻蚀速率上能补偿大 Cl_2 流量带来的刻蚀速率的增加和表面粗糙度的增大，这是由于等离子体中粒子的横向运动的能量增大，在相同的 RF 功率下，更少离子被负偏压吸引到样品表面用于刻蚀。对比 TDB5 和 TDB6 发现反应腔体中气压过低导致刻蚀中出现了台阶，这是因为低气压下，等离子体中粒子的平均自由程增加，更容易绕过小球边缘到达小球正投影内的样品表面，从而对掩膜下的样品也有刻蚀作用，但是这种粒子衍射的刻蚀能力小于主体等离子体刻蚀，从而导致台阶的形成，从 TDB9 条件下刻蚀的 SEM 图中观察到的结果也证实这一点。对比 TDB5 和 TDB7 可知降低 RF 的功率导致有源层和 AlGaAs 牺牲层界面处有更大的横向刻蚀速率，这是由于高 ICP 功率下低的 RF 功率，等离子体中的离子有更大的横向动能，在量子点有源区和 AlGaAs 牺牲层界面区域结构复杂，晶体质量相对较差容易被优先刻蚀，对比 TDB1 和 TDB8 的结果也证实这个结论。由此可见将 ICP 刻蚀中每个刻蚀条件协同获得最佳刻蚀条件是优化刻蚀工艺的关键。

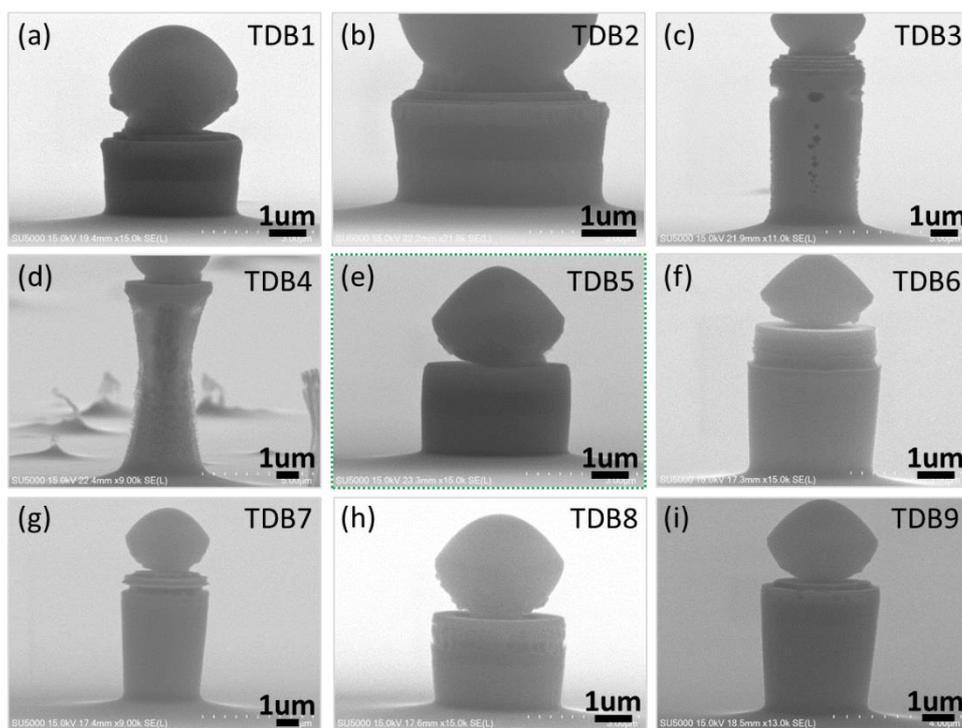


图 4.8 在表 4.2 所示的 Cl_2/BCl_3 刻蚀体系下刻蚀后样品表面的 SEM 图，图 (a) 到 (i) 分别代表 TDB1- TDB9 的刻蚀结果

Fig. 4.8 SEM image of GaAs pillar etched at different condition, (a) - (i) corresponding condition from TDB1 to TDB9 in table 4.2, respectively

对于以 GaAs 为主体的材料的刻蚀有很多报道, 比如采用 $\text{Cl}_2/\text{BCl}_3/\text{Ar}$ 或 Cl_2 和 Ar 气混合刻蚀 GaAs/AlGaAs 为主体的材料体系^[152, 153]。在 Cl_2/Ar 体系中, Cl 通过物理刻蚀和反应刻蚀对样品进行刻蚀, Ar 在刻蚀中只有物理刻蚀作用, 单纯的物理刻蚀对材料选择性差, 同时能够减弱横向刻蚀的效应。因此在上述刻蚀工艺的基础上, 同时设计了以 Cl_2/Ar 为工艺气体的刻蚀工艺, 如表 4.3 所示为详细刻蚀条件, 试图让刻蚀后的侧壁更加完美。

表 4.3 以 Cl_2/Ar 作为刻蚀气体的微腔激光器干法刻蚀工艺参数

Table 4.3 Micro disk laser dry etching at different process condition

Sample	Ar/sccm	Cl_2 /sccm	Pressure/mbar	RF/W	ICP/W	Temp./ $^\circ\text{C}$	Time/min
TDA1	10	20	6	100	400	10	3
TDA2	10	20	6	120	400	10	3
TDA3	10	20	6	50	400	10	3
TDA4	10	10	6	100	400	10	3
TDA5	10	20	3	100	400	10	3
TDA6	10	20	3	100	400	10	3
TDA7	10	20	12	100	400	10	3
TDA8	10	20	6	100	800	10	3
TDA9	10	20	6	50	800	10	3

使用扫描电子显微镜观察在表 4.3 所列参数下刻蚀后的 GaAs 衬底上小圆柱的形貌, 图 4.8 显示了 SEM 测试结果, 从图 4.8 (a) 到图 4.8 (i) 分别表示 TDB1 到 TDB9 的实验结果, 从图中可以得到 TDA1、TDA4、TDA5、TDA9 的刻蚀条件下获得的小圆柱虽然在刻蚀速率上有所差别, 但是都有光滑的表面和接近 90° 角的侧壁陡直度, 相对来讲 TDA1 和 TDA4 的结果更好。其它工艺下刻蚀的结果均不能满足微盘激光器刻蚀的要求。细节上, 相应的不同分立的刻蚀条件对刻蚀的影响与表 4.2 刻蚀条件下获得的结果类似, 此处不再赘述。相比较于 TDB5 的刻蚀结果, TDA1 和 TDA4 刻蚀获得的小圆柱在 AlGaAs 牺牲层和有源层之间的界面处较为明显的转折, 由此说明 TDB5 的刻蚀条件更好。此外, 测量可知在 3 min 时间内 ICP 的刻蚀深度为 $2.4 \mu\text{m}$, 由此得到相应的刻蚀速率为 $0.8 \mu\text{m}/\text{min}$ 。

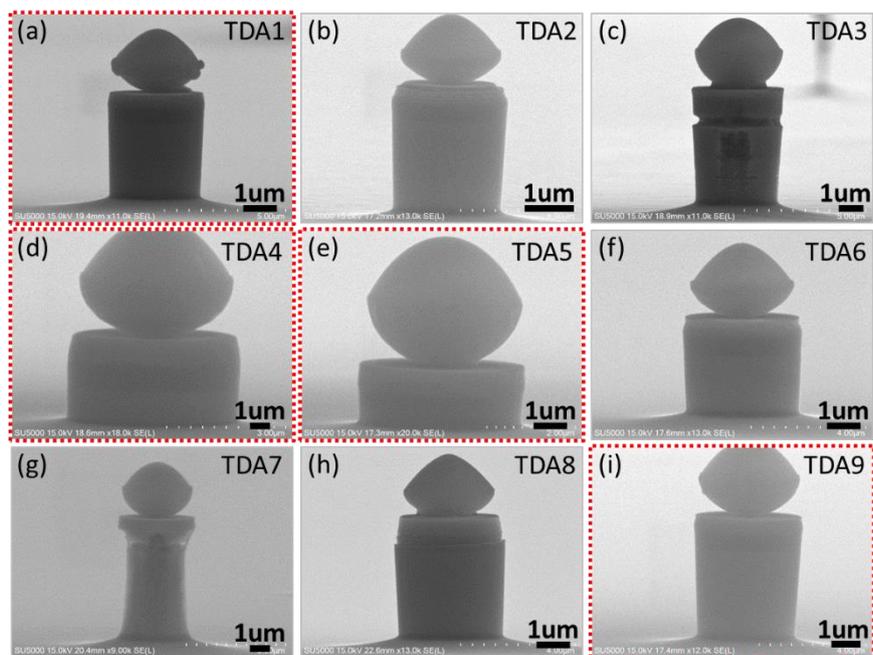


图 4.9 采用 Cl_2/Ar 作为工艺气体在表 4.3 所示的条件下刻蚀后获得的样品的 SEM 图，
图 (a) 到 (i) 分别代表 TDA1- TDA9 的刻蚀结果

Fig. 4.9 SEM image of GaAs pillar etched at different condition, (a) - (i) creponding
condition from TDA1 to TDA9 in table 4.3, respectively

论文考虑到采用小球作为掩膜时，在小球边缘和材料表面之间有较大的弧形空隙，这将导致腔体中等离子体运动的轨迹的改变，可能影响材料的刻蚀。因此本章还尝试在刻蚀器件中，直接采用和样品表面接触的二氧化硅作为硬掩膜。该刻蚀工艺首先需要在样品表面生长厚度大概为 600 nm 左右的二氧化硅，然后利用二氧化硅小球作为掩膜，刻蚀 600 nm 的二氧化硅，得到如图 (a) 所示的直接和材料表面接触的硬掩膜。在此基础上采用 TDB5 工艺刻蚀，得到如图 4.10 (b) 和 (c) 的刻蚀结果，从图中刻蚀结果可以看出，该刻蚀条件下能获得和小球做掩膜一样的结果。基于实际工艺中，工艺步奏越少，工艺的稳定性越好的原则，我们在实际器件中采用二氧化硅小球直接做为掩膜在 TDB5 条件下刻蚀。此外，图 4.10 中 (b) 和 (c) 分别表示在相同刻蚀工艺下，在同一个片子的样品中心和边缘处的刻蚀形貌，从图中可以看出中心处圆柱的是笔直的立在样品上，而边缘处的小圆柱则是倾斜的，这是由于 ICP 刻蚀的边缘效应导致，即在边缘处等离子体和样品作用的方向受到边缘影响和发生倾斜，该现象在上述用 SiO_2 小球做掩膜刻蚀的时候也同样存在。本文通过在样品边上放置陪片的方法，将边缘往外扩展，保证整个样品全部在类中心处，从而克服该刻蚀缺陷。

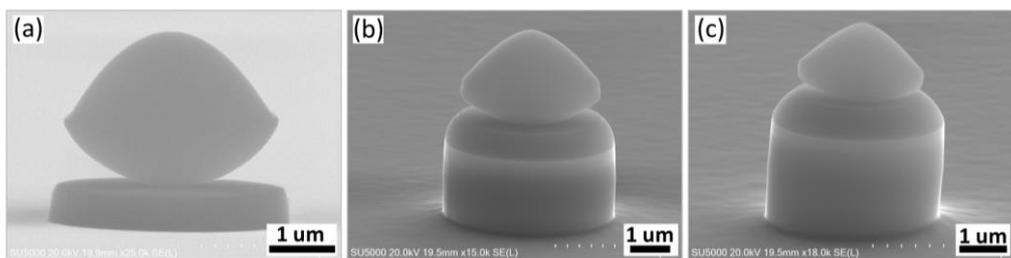


图 4.10 (a) 以二氧化硅小球做掩膜制备的 SiO_2 硬掩膜 SEM 形貌图, (b) (c) 分别是用 SiO_2 作硬掩膜刻蚀样品的中心和边缘处的小圆柱的 SEM 图

Fig. 4.10 SEM image of SiO_2 disk (a), micro pillar at centre (b) and edge (c) which etched by ICP via mask of silica beads

采用上述 TDB5 工艺刻蚀 GaAs 基, Si (001) 基和 SOI 基的量子点微盘激光器结构形成小圆柱, 然后使用 TW53 的湿法刻蚀条件和时间对 ICP 刻蚀获得的小圆柱进行选择性湿法刻蚀, 最终获得如图 4.11 中扫描电镜照片所示的 GaAs 基 (a)、硅基 (b)、SOI 基 (c) InAs 量子点微盘激光器。从图中可知, 所有激光器的侧壁都具有光滑的刻蚀表面, 几乎垂直的刻蚀角度和完美圆形的微环谐振腔。

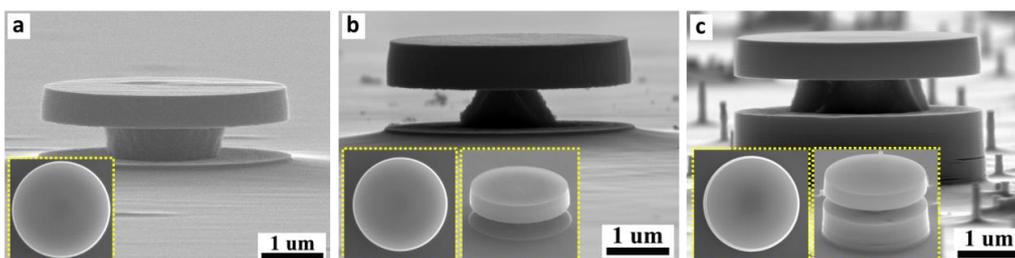


图 4.11 GaAs 基 (a)、硅基 (b)、SOI 基 (c) InAs 量子点微盘激光器的 SEM 图

Fig. 4.11 SEM image Tilted and top-view SEM images of disk laser on GaAs substrate (a), Si substrate (b) and SOI substrate (c)

4.3 结果和讨论

4.3.1 材料性质

如 4.1 节所介绍的在双腔 MBE 中, 通过同质外延 Si 在 SOI 衬底上构建硅 (111) 晶面的锯齿孔洞结构和通过异质外延超晶格结构形成位错过滤层制备了高晶体质量的 GaAs 缓冲层。我们通过 AFM 对该 GaAs 缓冲层表面粗糙度进行了表征, 如图 4.12 所示为 $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ 范围的图, 图 4.12 (a) 为缓冲层生长在图形衬底区域, 图 4.12 (b) 的结果是 GaAs 缓冲层在相同条件下生长在标准硅的表

面。从图中可以看出在图形衬底上的 GaAs 缓冲层表面非常的平整，没有明显的反向畴，粗糙度只 0.6 nm 左右，但是在非图形区域的 GaAs 缓冲层有 60 nm 的起伏，可以在表面看到大量的反向畴 (APB)。为了进一步验证采用图形衬底构建的硅 (111) 晶面的锯齿孔洞结构能有效保证高晶体质量的 GaAs 缓冲层的生长，用 SEM 进一步对样品表面形貌进行了观察，同样发现在图形衬底表面非常平整，而在非图形衬底表面有大量的 APB 存在。

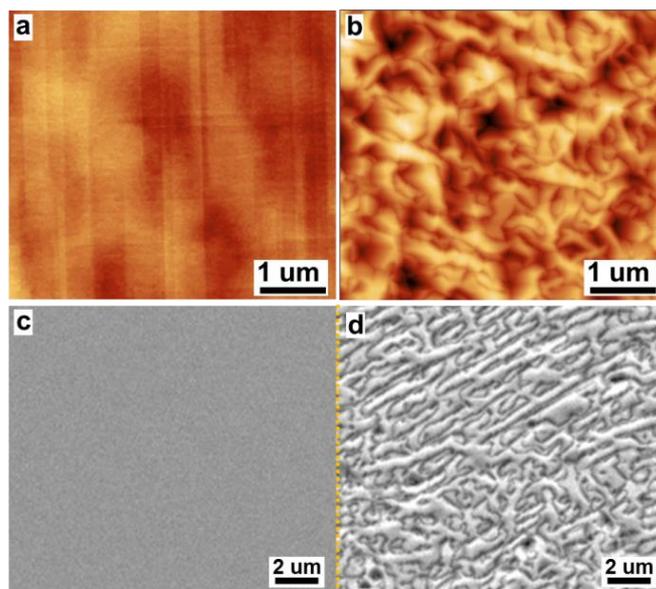


图 4.12 在 SOI 衬底上 GaAs 缓冲层的 AFM 照片 ($5 \times 5 \mu\text{m}^2$ 范围) 和 SEM 照片，其中 (a) 和 (c) 是图形衬底上的结果，(b) 和 (d) 是非图形衬底上的结果

Fig. 4.12 $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ AFM image of the GaAs film deposited on patterned SOI (a) and standard SOI (b) substrates. Top-view SEM image of GaAs grown on patterned SOI substrate (c) and standard SOI substrate (d)

采用 X 射线衍射仪 (XRD) 和透射电子显微镜 (TEM) 对 SOI 基的 GaAs 缓冲层的晶体质量进行表征。图 4.13 (a) 显示的是 SOI 基 GaAs 衬底上 XRD 的 ω - 2θ 图谱，从图中可以看出有两个劈裂的硅的尖峰，这是由 SOI 衬底中顶层硅和基体硅存在相对角度形成的，如文献^[145]所解释的，在制作 SOI 衬底中顶层硅是通过键合工艺和二氧化硅结合的，在键合过程中，顶层硅和基体硅有一定的角度偏差，从而导致图中所示的硅的尖峰的劈裂。此外，我们还可以看到有一个非常尖锐的 GaAs 峰，这说明通过 MBE 外延生长的 GaAs 缓冲层有很高的晶体质量。同时可以观察到 InGaAs/GaAs 和 InAlAs/GaAs 超晶格位错过滤层的多重衍射峰，由此也进一步体现出 MBE 生长所获得的 SOI 基 GaAs 缓冲层的晶体质量优异。

为了进一步测试样品的晶体质量，对 GaAs (004) 晶面所在的峰位测试了摇摆曲线，图 4.13 显示了平行于 U 型槽衬底和垂直于 U 型槽衬底的摇摆曲线测试结果。从图中可以得到两个方向上都有很小的半高宽 (FWHM)，在垂直方向上是 309.7 arcsec，略小于在水平方向上的半高宽 (369.4 arcsec)。根据文献^[144]解释，这可能是由于位错在硅 (111) 晶面的锯齿结构的 $[1 -1 0]$ 和 $[1 1 0]$ 两个不同方向上分布不均匀引起的。图 4.13 (c) 显示了从硅 (111) 晶面的锯齿结构到 GaAs 缓冲层表面的截面 TEM 图，从图中可以看出大量的位错被限制在硅和 III-V 材料的界面，剩下的位错通过超晶格位错过滤层被进一步阻挡。图 4.13 (d) 是图 4.13 (c) 中红色区域 III-V/Si 界面的放大图，从图中可以看出位错在该界面发生了湮灭效应。上述结果也进一步证明了我们设计的生长方式能获得高质量的 III-V/SOI 缓冲层。

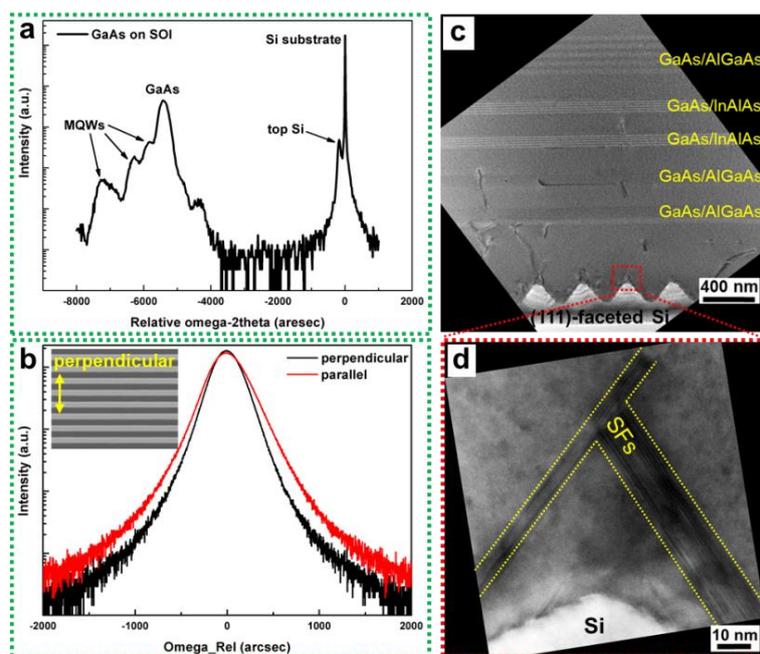


图 4.13 (a) SOI 基 III-V 缓冲层 XRD 的 ω - 2θ 谱线，(b) 平行于衬底 U 型槽方向和垂直于衬底 U 型槽方向测试的 GaAs 缓冲层的摇摆曲线。(c) 在 SOI 衬底上的从 (111) 晶面 Si 的锯齿到 GaAs 缓冲层表面的 TEM 照片，(d) GaAs 和 Si 界面处 (图 (c) 中红色区域) 的放大图

Fig. 4.13 (a) XRD ω - 2θ curve of III-V buffer layer on the SOI substrate. (b) (004) ω -rocking curves across the GaAs peak by the incident x-ray beam perpendicular and parallel to the trenches. (c) Cross-sectional bright-field TEM image of GaAs on sawtooth-hollow-structured SOI substrate, taken along the $[110]$ axis. (d) Zoomed-in cross-sectional TEM images of the interface between GaAs and Si

图 4.14 显示了 7 层量子点生长在 GaAs (001), GaAs/Si (001) 和 GaAs/SOI 三个衬底上的室温光致发光光谱。从图中可以得到 Si 基和 SOI 基的量子点发光强度基本一致,同时接近 GaAs 基的发光强度。这是在 Si 基和 SOI 基上制备的 GaAs 缓冲层有很好的晶体质量。同时可以看到 GaAs、Si 和 SOI 三个衬底上生长的量子点的发光光谱的尖峰分别位于 1282 nm、1297 nm 和 1291 nm。从内嵌的 AFM 图中可知在 GaAs、Si 和 SOI 三个衬底上生长得到的量子点分布均匀,尺寸一致,对应的 InAs 量子点密度分别为: $3.1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 、 $3.3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 、和 $2.52 \times 10^{10} / \text{cm}^{-2}$ 。

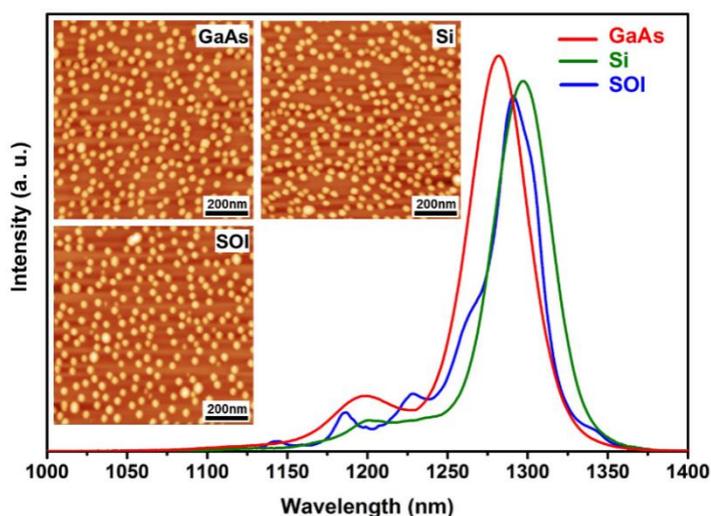


图 4.14 室温下的 GaAs 基 Si 基和 SOI 基上的 InAs/GaAs 量子点光谱, 内嵌图为对应的 $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ 大小的 AFM 图

Fig. 4.14 Room-temperature photoluminescent spectra of InAs/GaAs QDs grown on GaAs, Si (001) and SOI substrates. Insets are the $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ AFM images of the surface InAs QDs on GaAs, Si (001) and SOI

4.3.2 器件性能

在室温下,通过显微光谱测试系统对 GaAs、Si (001) 和 SOI 衬底上的光泵 InAs 量子点微盘激光器的性能进行了表征,其中泵浦激光的波长为 532 nm,聚焦后的光斑大小大约为 $3 \mu\text{m}$ 。考虑到在微盘激光器中的多重反射和吸收效应,微盘激光器中注入的有效光强可以通过公式: $(1-R)[1-\exp(-\alpha d)] / [1-R \times \exp(-\alpha d)]$ 来估算^[112],其中 R 是微盘激光器的表面反射率, α 是材料的吸收系数, d 是微盘激光器的直径。测试中将微区光谱测试系统的光路进行严格优化,确保收集到的是微盘激光器最大的输出光强。

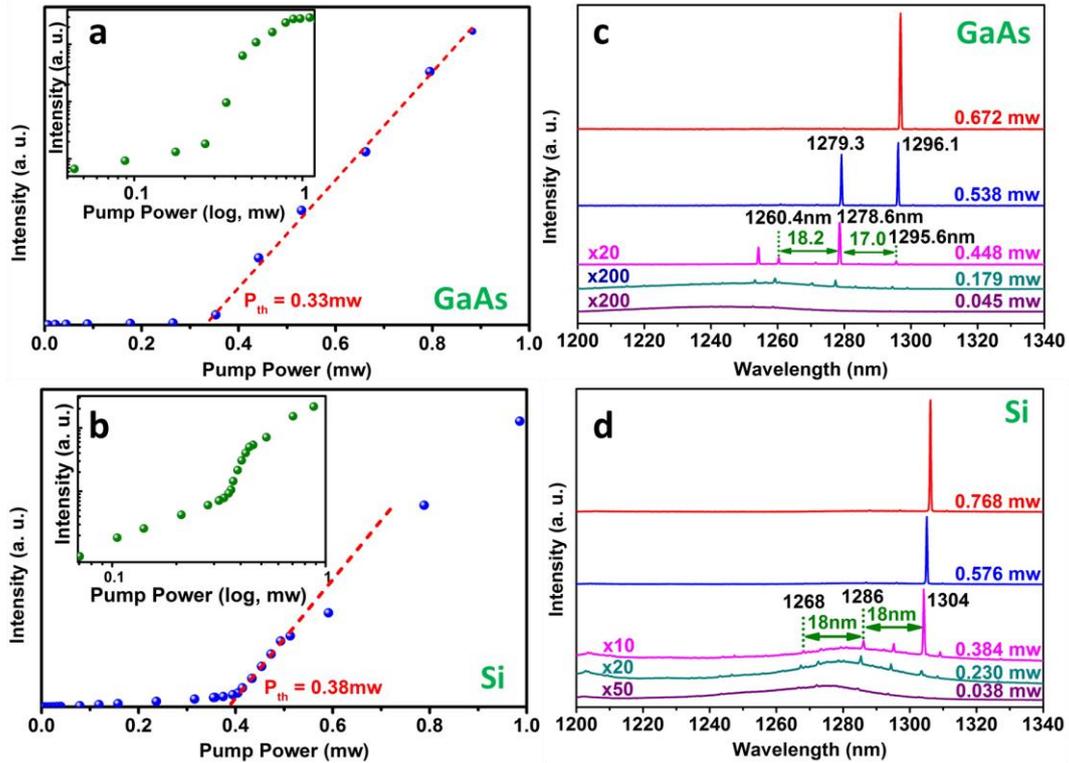


图 4.15 室温下测试的 GaAs (a) 和硅基 (b) 量子点微盘激光器在不同泵浦功率下光谱强度的积分值和泵浦功率的曲线 (L-L)，内嵌图是 L-L 曲线对应的 Log - Log 图；(c) 和 (d) 分别是 GaAs 基和 Si 基在不同泵浦功率下的光谱

Fig. 4.15 Integrated intensity of microdisk lasers as a function of wavelength (L-L curve) for devices on the (a) GaAs substrate and (b) Si substrate at room temperature. Inset: shows the log-log plot of the L-L curve, indicating an “S-shaped” transition. μ PL spectra of the 4- μ m-diameter microdisk laser at different pump powers for devices on the (c) GaAs substrate and (d) Si substrate

测试获得的 GaAs 基和 Si 基的 InAs 量子点微盘激光器的输出强度的积分值和泵浦功率之间的关系曲线 (L-L 曲线) 和不同泵浦功率下的谱峰如图 4.15 所示，从图 4.15 (a) 可知在 GaAs 基上 InAs 量子点微盘激光器的室温阈值功率为 0.33 mW，如图 4.15 (b) 所示在低泵浦功率的时候激光器出射峰有较宽的半高宽，当泵浦功率增加到阈值功率附近的时候，在 1279 nm 附近出现一个主峰，随着功率的继续增加在 1296 nm 附近又出现另一个模式峰，随着功率的继续增加最后 1296 nm 的模式峰占主导，通过观察发现两个峰的距离约为 17 nm，该距离长度恰好为光在自由空间中 4 μ m 的回音廊环形谐振腔一阶模的间距 (FSR)。此外，通过公式 $Q = \lambda_{cav} / \Delta\lambda_{cav}$ ，其中 $\Delta\lambda_{cav}$ 是在阈值功率下的半高宽。我们计算了微盘激光器

冷腔的 Q 值为 3550。图 4.15 (a) 内嵌的 log-log 图是典型的激光器 S 型曲线，他包含三个激光器工作阶段：自发辐射，自发辐射增益放大，激光器谐振激射^[146]。类似的，从图 4.15 (c) 和图 4.15 (d) 中能够观察 Si 基 InAs 量子点微盘激光器在 O 波段的模式主峰的位置在 1304 nm, 根据图中半高宽获得对应的 Q 值为 3674, 测量得 FSR 为 18 nm, 同时从内嵌 log-log 图中可以看出 Si 基微盘激光器在工作中具有典型的非线性转变过程。

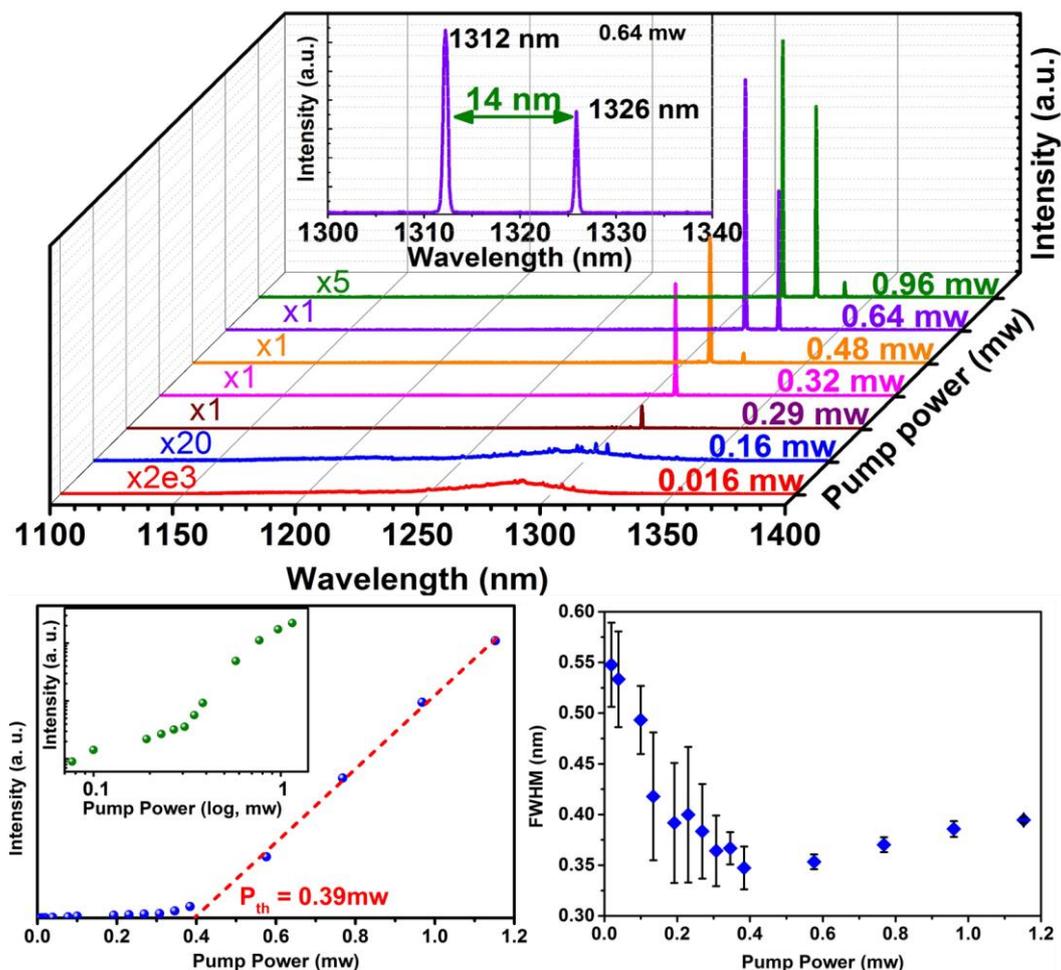


图 4.16 (a) 4 μm 的 SOI 基微盘激光器在不同泵浦功率下发光谱线，内嵌图是在泵浦功率为 0.64 mW 下光谱的放大图，(b) 发光强度的积分值与泵浦功率之间的关系 (L-L) 曲线，其中内嵌图是 L-L 曲线对应的 log-log 图，(c) 半高宽 FWHM 随泵浦功率变化的关系图

Fig. 4.16 (a) Lasing characteristics of a 4- μm -diameter microdisk on SOI. Photoluminescent spectra as a function of pump power. Inset: Zoom-in spectrum of the microdisk pumping in 0.64mW. (b) Linear plot of integrated output intensity versus effective input power (L-L curve). Inset: Double-logarithmic plot of the L-L curve. (c) FWHM evolution with the pump power

采用 Si 和 GaAs 基微盘激光器相同的表征手段，对 SOI 基上的 InAs 量子点激光器进行测试，如图 4.16 所示为不同泵浦功率下激光器光谱，激光器发光强度积分值与泵浦功率之间的关系曲线，以及激光器激射峰半高宽随泵浦功率的变化趋势图。从图 4.16 (b) 的发光强度的积分值与泵浦功率之间的关系曲线可以得到 SOI 基 InAs 量子点激光器的阈值功率为 0.33 mW，这个值和 Si 的 InAs 量子点微盘激光器的阈值基本相同，图 4.16 (b) 中内嵌的 log-log 图也是典型的 S 型曲线。从图 4.16 (a) 可以得到 SOI 基的 InAs 量子点微盘激光器的激射波长在 1312 nm，相对于 GaAs 基和 Si 有微小的红移，随着泵浦功率的增加，另一个激射模式出现在 1326 nm 处，由此可知对应的 FSR 大小是 17 nm。根据图 4.16 (a) 中激射峰的半高宽和两个激光模式峰之间的距离可知微盘谐振腔的 Q 值为 3900，该 Q 值明显大于 GaAs 基的 InAs 量子点微盘激光器的 Q 值 (3550) 和 Si 基 InAs 量子点微盘激光器的 Q 值 (3674)。图 4.16 (c) 显示出，在低功率下，随着泵浦功率的增加，出射峰的半高宽明显减小，到阈值功率附近有最小值，随着功率的进一步增加，半高宽有略微的增加，这是由于在高功率下，器件内部的温度增加所导致。

表 4.4 比较其它文献中 GaAs、Si 和 SOI 基上的 InAs 量子点微盘激光器性能

Table 4.4 Comparison of various InAs QD microdisk lasers on GaAs, Si and SOI substrates

Ref.	Substrate	D [μm]	Threshold power [mw]	FWHM [nm]	Q	Temperature [K]	λ [nm]	Method
[23]	GaAs	5	0.75 (pulsed)	0.7	N/A	300	1260	N/A
[154]	GaAs/Si	1	0.035		1720	10	1197	MOCVD, MBE
[110]	offcut Si	4	0.265	N/A	N/A	300	1177	MOCVD, MBE
	GaAs/Si	4	0.135	N/A	N/A	300	1212	MOCVD, MBE
[111]	GaAs/Si	4	0.250	N/A	2950	300	~1200	MOCVD, MBE
This work	GaAs	4	0.330	0.365	3550	300	1296	<i>in-situ</i> hybrid epitaxy by joint MBEs
	Si	4	0.380	0.355	3674	300	1304	
	SOI	4	0.390	0.336	3900	300	1312	

最后本章统计了前人报道的 GaAs 基和 Si 基的 1.3 μm 波长 InAs/GaAs 量子点微盘激光器和本章所述的在 GaAs, Si 和 SOI 衬底上的 InAs 量子点激光器的性能, 如表 4.4 所示。在之前的研究工作中的 Si 基 InAs 量子点微盘激光器的生长涉及到两个部分, 第一部分硅基 GaAs 缓冲层的生长是在高纵横比的 V 型槽硅衬底中采用 MOCVD 生长获得^[111], 但是 InAs 量子点微盘激光器结构是在 MBE 系统中生长, 而非原位生长。因此当样品在从 MOCVD 的腔体中转移到 MBE 腔体中, 样品表面非常容易被氧化, 并受到污染, 这将影响在后续生长的量子点微盘激光器材料的晶体质量。除此之外, 采用电子束光刻制作 Si 的 V 型图形衬底并不是 COMS 工艺兼容, 不能进行大规模生产加工, 同时一般来讲电子束光刻存在较为明显的写场拼接误差, 增加样品表面的缺陷, 也导致无法获得性能一致的大面积均匀图形衬底, 从而影响直接生长集成硅基激光器在光电集成芯片上的应用。在 V 型槽衬底表面会不可避免的因为电子束光刻和刻蚀而引入缺陷, 当 GaAs 直接生长在 Si 的 V 型槽图形衬底上容易诱发大量的位错。我们采用相连通的 III-V/IV 双腔 MBE 系统, 通过在 SOI 和 SiU 型槽衬底上直接构建硅 (111) 晶面的锯齿孔洞结构, 最后原位生长 GaAs 缓冲层和微盘量子点激光器结构, 这样能最大限度的保证所生长的材料的晶体质量。采用原位生长方式, 样品的所处的环境一直在高真空中, 因此能最大限度的保证 GaAs 缓冲层生长后的样品表面干净, 同时采用同质外延生长的硅 (111) 晶面的锯齿孔洞结构能有效降低由于 SOI 和 Si 图形衬底制作工艺中引入的缺陷, 为 GaAs 材料生长提供该高质量的 Si 表面, 此外硅 (111) 晶面的锯齿结构能有效限制 Si 和 III-V 材料之间出现为缺陷。相比于之前报道 Si 基和 GaAs 基量子点微盘激光器, 我们的阈值大约有 20% 的增大, 这可能是不同测试系统光泵浦光效率不同的原因, 但是我们的 SOI 基量子点微盘激光器有更高的 Q 值 (3900)。最重要的是, 我们第一次通过直接生长的方式实现了 O 波段的 SOI 基 InAs 量子点微盘激光器。

4.4 本章小结:

本章通过外延的方式首次在 SOI 衬底上生长并制作了光泵浦 InAs/GaAs 量子点微盘激光器。详细介绍了 SOI 基上 GaAs 缓冲层的生长和性能, 量子点微盘激光器的制作工艺, 以及不同衬底 (GaAs、Si 和 SOI) 上微盘激光器的性能。

采用 MBE 在 U 型槽图形衬底上依靠硅 (111) 晶面的锯齿孔洞结构, 通过外延生长的方式, 在 SOI 衬底上获得了高质量的 GaAs 缓冲层, AFM 表征结果显示表面粗糙度只有 0.6 nm 左右。晶体质量的提高主要得益于位错在硅和 GaAs 之间的锯齿型界面上湮灭效应和超晶格位错过滤层对位错的限制作用。在该缓冲层上生长 7 层量子点发光结构, 能获得和 Si 基以及 GaAs 基类似的分布均匀, 大小均一的量子点, 同时测得的 PL 也和对应的 GaAs 基和 Si 基上的结果一致。

通过系统研究微盘量子点激光器刻蚀工艺后得到最佳工艺条件为: 采用 SiO₂ 小球作为掩膜用 ICP 进行干法刻蚀, 刻蚀工艺中 BCl₃ 和 Cl₂ 的流量分别为 10 sccm 和 20 sccm, 腔体内反应气压为 6 mbar, RF 和 ICP 功率分别为 100 W 和 800 W, 刻蚀温度为 10 °C。然后采用 NH₄F: HF 为 5:1 的缓冲腐蚀溶液选择性刻蚀 AlGaAs 牺牲层得到微盘激光器。

本章采用 MBE 原位生长并制作了 SOI 基的 InAs 量子点微盘激光器, 首次实现了 O 波段的 SOI 基 InAs 量子点微盘激光器, 该激光器的阈值功率为 0.39 mW, 对应 Q 值为 3900。同时在相同条件下生长并制作了 Si 基的 InAs 量子点微盘激光器, 测得阈值功率和 Q 值分别为 0.38 mW 和 3674。该结果对比相同条件下在 GaAs 基上制备的 InAs 量子点微盘激光器阈值 (0.33 mW) 和 Q 值 (3550) 基本一样, 由此体现出本文的光泵浦 SOI 基 InAs 量子点激光器的性能优异, 也反应出 SOI 衬底上生长的激光器结构有高晶体质量。本章采用的激光器制备方式对未来硅基光电子芯片中光源的集成有很大的应用潜力。

第 5 章 总结与展望

本文主要采用直接外延生长的方式实现了硅(001)基 III-V 族量子点激光器结构的制备,通过系统的研究激光器的制作工艺,成功制作了硅基 F-P 腔 InAs 量子点激光器,硅基垂直腔面 InAs 量子点激光器和硅基 InAs 量子点微盘激光器,以及首例 SOI 基 InAs 量子点微盘激光器,同时测试并分析了激光器材料和器件性能。

通过系统研究激光器的制作工艺,首次基于物理所微加工平台制作出硅基 F-P 腔激光器。测试得,激光器在室温 25 °C 的时候的阈值电流为 190 mA,阈值电流密度为 265 A/cm²,对应谱峰的半高宽为 0.1 nm,激光器的工作温度范围为-20 °C~65 °C。同时研究发现封装工艺对激光器性能的发挥有很大的影响。因此在后续工作中可进一步在封装工艺上进行优化,此外还有两个方面的工作值得继续开展,其一:通过光栅等结构的设计,将 F-P 腔激光器制作成 DFB 激光器, DBR 激光器,以及锁模激光器,进一步研究硅基激光器的性能;其二:通过直接生长的方式将激光器与硅基无源器件、探测器集成在单个晶圆上。

此外,还制备了硅基 InAs/GaAs 量子点垂直腔面发射光泵浦激光器,该激光器材料生长中高质量 GaAs 缓冲层的获得是采用在图形衬底上构建硅(111)晶面的锯齿孔洞结构和位错过滤层。文章测试了直径为 15 μm 和 150 μm 的 InAs/GaAs 量子点硅基垂直端面发射的微腔激光器的性能,其中直径为 15 μm 的垂直端面发射激光器具有低阈值功率(20 μW),在 6 mW 泵浦光激发下的激光谱的半高宽为 1.3 nm。阈值泵浦功率远小于 150 μm 的激光器(450 μW),其半高宽也只有 150 μm 的激光器半高宽(3.4 nm)的 1/3 左右,此外通过激光器工作温度的测试得到激光器的最高工作温度为 100°C。由此体现出器件有优异的稳定性。后续工作可在两个方面展望,第一步:将硅基集成的垂直腔面发射激光器做成阵列发射,第二步:将阵列的硅基垂直腔面发射激光器和探测器集成在一个晶圆上,实现硅基高性能传感器的高密度集成。

最后,通过直接外延生长的方式制作了 SOI 基的 InAs 量子点微盘激光器,首次实现了 O 波段的 SOI 基 InAs 量子点微盘激光器,该激光器的阈值功率为

0.39 mW, 对应 Q 值为 3900。同时在相同条件下生长并制作了 Si 基的 InAs 量子点微盘激光器, 测得阈值功率和 Q 值分别为 0.38 mW 和 3674。该结果对比相同条件下在 GaAs 基上制备的 InAs 量子点微盘激光器阈值 (0.33 mW) 和 Q 值 (3550) 基本一样, 由此体现出本文的光泵浦 SOI 基 InAs 量子点激光器有的性能优异, 也反应出 SOI 衬底上生长的激光器结构有高的晶体质量。本文采用的激光器制备方式对未来硅基光电子芯片中光源的集成有很大的应用潜力。后续研究展望有三点, 其一: 通过类似的方法获得其它类型的 SOI 基激光器, 比如: F-P 腔激光器和垂直腔面发射激光器; 其二: 通过与波导等无源器件集成形成 SOI 基上光发射器的单片集成; 最后, 通过在微盘激光器上覆盖其它光电性质的二维材料, 研究新奇的光电非线性效应。

参考文献

- [1] D. Yakimets, T. H. Bao, M. G. Bardon, M. Dehan, N. Collaert, A. Mercha, Z. Tokei, A. Thean, D. Verkest, K. De Meyer, in *72nd Annual Device Research Conference*. (2014), pp. 133.
- [2] D. Thomson, A. Zilkie, J. E. Bowers, T. Komljenovic, G. T. Reed, L. Vivien, D. Marris-Morini, E. Cassan, L. Viot, J.-M. Fedeli, J.-M. Hartmann, J. H. Schmid, D.-X. Xu, F. Boeuf, P. O'Brien, G. Z. Mashanovich, M. Nedeljkovic, Roadmap on silicon photonics. *Journal of Optics* 18, (2016).
- [3] T. Wang, H. Liu, A. Lee, F. Pozzi, A. Seeds, 1.3- μm InAs/GaAs quantum-dot lasers monolithically grown on Si substrates. *Opt. Express* 19, 11381-11386 (2011).
- [4] J. Norman, M. J. Kennedy, J. Selvidge, Q. Li, Y. Wan, A. Y. Liu, P. G. Callahan, M. P. Echlin, T. M. Pollock, K. M. Lau, A. C. Gossard, J. E. Bowers, Electrically pumped continuous wave quantum dot lasers epitaxially grown on patterned, on-axis (001) Si. *Optics express* 25, 3927-3934 (2017).
- [5] Y. H. Jhang, R. Mochida, K. Tanabe, K. Takemasa, M. Sugawara, S. Iwamoto, Y. Arakawa, Direct modulation of 1.3 μm quantum dot lasers on silicon at 60 °C. *Opt. Express* 24, 18428 - 18435 (2016).
- [6] Y. T. Wan, Q. Li, A. Y. Liu, A. C. Gossard, J. E. Bowers, E. L. Hu, K. M. Lau, Optically pumped 1.3 μm room-temperature InAs quantum-dot micro-disk lasers directly grown on (001) silicon. *Opt. Express* 41, 1664 - 1667 (2016).
- [7] Wang Ting, Zhang Jian-Jun, H. Liu, Quantum dot lasers on silicon substrate for silicon photonic integration and their prospect. *Acta Physica Sinica* 64, 201209 (2015).
- [8] H. Liu, T. Wang, Q. Jiang, R. Hogg, F. Tutu, F. Pozzi, A. Seeds, Long-wavelength InAs/GaAs quantum-dot laser diode monolithically grown on Ge substrate. *Nature Photonics* 5, 416-419 (2011).
- [9] Y. Wang, B. Wang, W. A. Sasangka, S. Bao, Y. Zhang, H. V. Demir, J. Michel, K. E. K. Lee, S. F. Yoon, E. A. Fitzgerald, C. S. Tan, K. H. Lee, High-performance AlGaInP light-emitting diodes integrated on silicon through a superior quality germanium-on-insulator. *Photonics Research* 6, 290 (2018).

- [10] S. M. Chen, Q. Jiang, A. J. Seeds, V. G. Dorogan, H. Liu, M. C. Tang, 1.3 μm InAs/GaAs quantum-dot laser monolithically grown on Si substrates operating over 100°C. *Electronics Letters* 50, 1467-1468 (2014).
- [11] M. Martin, D. Caliste, R. Cipro, R. Alcotte, J. Moeyaert, S. David, F. Bassani, T. Cerba, Y. Bogumilowicz, E. Sanchez, Z. Ye, X. Y. Bao, J. B. Pin, T. Baron, P. Pochet, Toward the III-V/Si co-tegration by controlling the biatomic steps on hydrogenated Si (001). *Appl. Phys. Lett.* 109, 253103 (2016).
- [12] Y. Wan, D. Jung, J. Norman, C. Shang, I. MacFarlane, Q. Li, M. J. Kennedy, A. C. Gossard, K. M. Lau, J. E. Bowers, O-band electrically injected quantum dot micro-ring lasers on on-axis (001) GaP/Si and V-groove Si. *Optics express* 25, 26853-26860 (2017).
- [13] D. Jung, P. G. Callahan, B. Shin, K. Mukherjee, A. C. Gossard, J. E. Bowers, Low threading dislocation density GaAs growth on on-axis GaP/Si (001). *J. Appl. Phys.* 122, 225703 (2017).
- [14] A. Y. Liu, J. Peters, X. Huang, D. Jung, J. Norman, M. L. Lee, A. C. Gossard, J. E. Bowers, Electrically pumped continuous-wave 1.3 μm quantum-dot lasers epitaxially grown on on-axis (001) GaP/Si. *Opt. Lett.* 42, 338 - 334 (2017).
- [15] Alan Y. Liu, Chong Zhang, Andrew Snyder, Dmitri Lubyshev, Joel M. Fastenau, Amy W. K. Liu, Arthur C. Gossard, J. E. Bowers, MBE growth of P-doped 1.3 μm InAs quantum dot lasers on silicon. *Journal of vacuum science & technology B* 32, 02C108 (2014).
- [16] Y. Wan, Q. Li, Y. Geng, B. Shi, K. M. Lau, InAs/GaAs quantum dots on GaAs-on-V-grooved-Si substrate with high optical quality in the 1.3 μm band. *Applied Physics Letters* 107, 081106 (2015).
- [17] B. Shi, S. Zhu, Q. Li, Y. Wan, E. L. Hu, K. M. Lau, Continuous-Wave Optically Pumped 1.55 μm InAs/InAlGaAs Quantum Dot Microdisk Lasers Epitaxially Grown on Silicon. *ACS Photonics* 4, 204-210 (2017).
- [18] Alan Y. Liu, Sudharsanan Srinivasan, Justin Norman, Arthur C. Gossard, J. E. Bowers, Quantum dot lasers for silicon photonics. *Photon. Res.* 3, B1-B9 (2015).
- [19] Daehwan Jung, Robert Herrick, Justin Norman, Katherine Turnlund, Catherine Jan, Kaiyin Feng, Arthur C. Gossard, J. E. Bowers, Impact of threading dislocation density on the lifetime of InAs quantum dot lasers on Si. *Appl. Phys. Lett.* 112, 153507 (2018).

-
- [20] G. E. Moore, Cramming More Components onto Integrated Circuits. *PROCEEDINGS OF THE IEEE* 86, 82-85 (1998).
- [21] S. Gianordoli, L. Hvozدارa, G. Strasser, W. Schrenk, K. Unterrainer, E. Gornik, GaAs/AlGaAs-based microcylinder lasers emitting at 10 μm . *Applied Physics Letters* 75, 1045-1047 (1999).
- [22] Reaping the Benefits of 14 nm and Going Beyond 10nm. *Intel at ISSCC* <https://www.anandtech.com/show/8991/intel-at-isscc-2015-reaping-the-benefits-of-14nm-and-going-beyond-10nm> (2015).
- [23] T. Ide, T. Baba, J. Tatebayashi, S. Iwamoto, T. Nakaoka, Y. Arakawa, Lasing characteristics of InAs quantum-dot microdisk from 3K to room temperature. *Applied Physics Letters* 85, 1326-1328 (2004).
- [24] T. Evans, The Different Technologies for Cooling Data Centers. *APC white paper* 59, (2012).
- [25] Jumie Yuventi, R. Mehdizadeh, A critical analysis of Power Usage Effectiveness and its use in communicating data center energy consumption. *Energy and Buildings* 64, 90-94 (2013).
- [26] A. R. I. Mukaffi, R. S. Arief, W. Hendradjit, R. Romadhon, Optimization of Cooling System for Data Center Case Study: PAU ITB Data Center. *Procedia Engineering* 170, 552-557 (2017).
- [27] D. A. B. Miller, Device Requirements for Optical Interconnects to Silicon Chips. *Proceedings of the IEEE* 97, 1166-1185 (2009).
- [28] A. V. Krishnamoorthy, K. W. Goossen, W. Jan, X. Zheng, R. Ho, G. Li, R. Rozier, F. Liu, D. Patil, J. Lexau, H. Schwetman, D. Feng, M. Asghari, T. Pinguet, J. E. Cunningham, Progress in Low-Power Switched Optical Interconnects. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 17, 357-376 (2011).
- [29] E. Agrell, M. Karlsson, A. R. Chraplyvy, D. J. Richardson, P. M. Krummrich, P. Winzer, K. Roberts, J. K. Fischer, S. J. Savory, B. J. Eggleton, M. Secondini, F. R. Kschischang, A. Lord, J. Prat, I. Tomkos, J. E. Bowers, S. Srinivasan, M. Brandt-Pearce, N. Gisin, Roadmap of optical communications. *Journal of Optics* 18, 063002 (2016).
- [30] C. Kachris, I. Tomkos, A Roadmap on Optical Interconnects in Data Centre Networks. (2015).

- [31] J. Liu, D. D. Cannon, K. Wada, Y. Ishikawa, S. Jongthammanurak, D. T. Danielson, J. Michel, L. C. Kimerling, Tensile strained Ge p-i-n photodetectors on Si platform for C and L band telecommunications. *Applied Physics Letters* 87, 011110 (2005).
- [32] Christoforos Kachris, Keren Bergman, I. Tomkos, Optical Interconnects for Future Data Center Networks. *Springer Series in Photonics*, (2013).
- [33] D. A. B. Miller, The role of optics in computing. *Nature Photonics* 4, 406-407 (2010).
- [34] A. Subcommittee, Top Ten Exascale Research Challenges. *US Department Of Energy Report*, (2014).
- [35] B. Y. S. J, The role of optics in computing. *Nat. Photon.* 4, 406 (2014).
- [36] Richard A. Soref, Joachim Schmidtchen, K. Petermann, Large Single-Mode Rib Waveguides in GeSi-Si and Si-on-SiO₂. *IEEE Journal of Quantum Electronics* 27, 1971-1974 (1991).
- [37] R. A. Soref, J. P. Lorenzo, Single-crystal silicon: a new material for 1.3 and 1.6 μm integrated-optical components. *Electronics Letters* 21, 953 (1985).
- [38] G. T. Reed, W. R. Headley, C. E. J. Png, Silicon photonics: the early years. (2005).
- [39] C. Z. Zhao, G. Z. Li, E. K. Liu, Y. Gao, X. D. Liu, Silicon on insulator Mach-Zehnder waveguide interferometers operating at 1.3 μm . *Applied Physics Letters* 67, 248-2449 (1995).
- [40] G. F. R. Chen, T. Wang, K. J. A. Ooi, A. K. L. Chee, L. K. Ang, D. T. H. Tan, Wavelength selective mode division multiplexing on a silicon chip. *Optics Express* 23, 8095 (2015).
- [41] Q. Xu, B. Schmidt, S. Pradhan, M. Lipson, Micrometre-scale silicon electro-optic modulator. *Nature* 435, 325-327 (2005).
- [42] Y. Kang, H.-D. Liu, M. Morse, M. J. Paniccia, M. Zadka, S. Litski, Monolithic germanium/silicon avalanche photodiodes with 340 GHz gain-bandwidth product. *Nature Photonics* 3, 59-63 (2008).
- [43] D. Feng, J. Luff, S. Jatar, M. Asghari, Micron-scale Silicon Photonic Devices and Circuits. *Optical Fiber Communication Conference (OFC) paper*, Th4C.1 (2014).

-
- [44] F. Boeuf, S. Cremer, E. Temporiti, M. Shaw, N. Vulliet, B. Orlando, D. Ristoiu, A. Farcy, T. Pinguet, A. Mekis, G. Masini, P. Sun, Y. Chi, Recent progress in silicon photonics R&D and manufacturing on 300mm wafer platform. *Optical Fiber Communication Conference (OFC)* paper, W3A.1 (2015).
- [45] C. Doerr, L. Chen, D. Vermeulen, T. Nielsen, S. Azemati, S. Stulz, G. McBrien, X.-M. et, Single-Chip Silicon Photonics 100-Gb per s Coherent. (2014).
- [46] D. Liang, J. E. Bowers, Recent progress in lasers on silicon. *Nature Photonics* 4, 511-517 (2010).
- [47] O. Bisi, Stefano Ossicini, L. Pavesi, Porous silicon: a quantum sponge structure for silicon based optoelectronics. *Surface Science Reports* 38, 1-126 (2000).
- [48] L. T. Canham, Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers. *Appl. Phys. Lett.* 57, 1046-1048 (1990).
- [49] William L. Wilson, P.F. Sajowski, L. E. Brus, Quantum Confinement in Size-Selected, Surface-Oxidized Silicon Nanocrystals. *Science* 262, 1242-1244 (1993).
- [50] Z. H. Lu, D. J. Lockwood, J.-M. Baribeau, Quantum confinement and light emission in SiO₂-Si superlattices. *Nature* 378, 258-259 (1995).
- [51] S. G. Cloutier, P. A. Kosyrev, J. Xu, Optical gain and stimulated emission in periodic nanopatterned crystalline silicon. *Nat. Mater.* 4, 887-891 (2005).
- [52] H. Rong, S. Xu, Y.-H. Kuo, V. Sih, O. Cohen, O. Raday, M. Paniccia, Low-threshold continuous-wave Raman silicon laser. *Nature Photonics* 1, 232-237 (2007).
- [53] Martijn J. R. Heck, Jared F. Bauters, Michael L. Davenport, Jonathan K. Doylend, Siddharth Jain, Geza Kurczveil, Sudharsanan Srinivasan , Yongbo Tang, John E. Bowers, Hybrid Silicon Photonic Integrated Circuit Technology. *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS* 19, (2013).
- [54] S. Keyvaninia, S. Verstuyft, L. Van Landschoot, F. Lelarge, G. H. Duan, S. Messaoudene, J. M. Fedeli, T. De Vries, B. Smalbrugge, E. J. Geluk, J. Bolk, M. Smit, G. Morthier, D. Van Thourhout, G. Roelkens, Heterogeneously integrated III-V/silicon distributed feedback lasers. *Optics letters* 38, 5434-5437 (2013).

- [55] J. E. Bowers, J. T. Bovington, A. Y. Liu, A. C. Gossard, A Path to 300 nm Hybrid Silicon Photonic Integrated Circuits. *Optical Fiber Communication Conference (OFC)* paper, Th1C.1 (2014).
- [56] T. Wang, F. Tutu, F. Pozzi, A. Seeds, H. Liu, 1.3-um InAs/GaAs quantum-dot lasers monolithically grown on Ge substrate. (2011).
- [57] K. Tanabe, T. Rae, K. Watanabe, Y. Arakawa, High-Temperature 1.3 μm InAs/GaAs Quantum Dot Lasers on Si Substrates Fabricated by Wafer Bonding. *Applied Physics Express* 6, 082703 (2013).
- [58] Alexander W. Fang, Hyundai Park, Oded Cohen, Richard Jones, Mario J. Paniccia, J. E. Bowers, Electrically pumped hybrid AlGaInAs-silicon evanescent laser. *Optics Express* 14, 9203-9210 (2006).
- [59] S. Chen, W. Li, J. Wu, Q. Jiang, M. Tang, S. Shutts, Electrically pumped continuous-wave III–V quantum dot lasers on silicon. *Nature Photonics* 10, 307-311 (2016).
- [60] N. G. Basov, O. N. Krokhin, Y. M. Popov, Possibility of using indirect transitions to obtain negative temperatures in semiconductors. *J. Exptl. Theoret. Phys.* 39, 1486-1487 (1960).
- [61] H. Kroemer, A proposed class of hetero-junction injection lasers. *Proceedings of the IEEE* 51, 1782-1783 (1963).
- [62] Zh. I. Alferov and R. F. Kazarinov, Authors Certificate N. 181737, Claim N. 950840, March 1963 [in Russian].
- [63] Z. I. Alferov, Nobel Lecture: The double heterostructure concept and its applications in physics, electronics, and technology. *Reviews of Modern Physics* 73, 767-782 (2001).
- [64] Kenichi Nishi, Keizo Takemasa, Mitsuru Sugawara, Yasuhiko Arakawa, Development of Quantum Dot Lasers for Data-Com and Silicon Photonics Applications. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 23, (2017).
- [65] Y. Arakawa, H. Sakaki, Multidimensional quantum well laser and temperature dependence of its threshold current. *Appl. Phys. Lett.* 40, 939-941 (1982).
- [66] N. Kirstaedter, M. Grundmann, U. Richter, V. M. Ustinov, P. S. Kop'ev, D. Bimberg, P. Werner, S. S. Ruvimov, N. N. Ledentsov, U. Gösele, Z. I. Alferov, J. Heydenreich, M. V. Maximov, Low threshold, large To injection laser

- emission from (InGa)As quantum dots. *Electronics Letters* 30, 1416-1417 (1994).
- [67] G.T. Liu, A. Stintz, H. Li, K. J. Malloy, L. F. Lester, Extremely low room-temperature threshold current density diode lasers using InAs dots in In 0.15Ga 0.85As quantum well. *ELECTRONICS LETTERS* 35, 1163-1165 (1999).
- [68] S. Fathpour, Z. Mi, P. Bhattacharya, A. R. Kovsh, S. S. Mikhlin, I. L. Krestnikov, The role of Auger recombination in the temperature-dependent output characteristics ($T_0 \rightarrow \infty$) of p-doped 1.3 μm quantum dot lasers. *Applied Physics Letters* 85, 5164-5166 (2004).
- [69] T. Kageyama, K. Nishi, M. Yamaguchi, R. Mochida, Y. Maeda, K. Takemasa, Y. Tanaka, T. Yamamoto, M. Sugawara, Y. Arakawa, Extremely high temperature (220°C) continuous-wave operation of 1300-nm-range quantum-dot lasers. *CLEO* paper, 1-1 (2011).
- [70] Sean C. Woodworth, Daniel T. Cassidy, M. J. Hamp, Sensitive absorption spectroscopy by use of an asymmetric multiple-quantum-well diode laser in an external cavity. *Applied Optics* 40, 6719-6724 (2001).
- [71] Q. Li, X. Wang, Z. Zhang, H. Chen, Y. Huang, C. Hou, J. Wang, R. Zhang, J. Ning, J. Min, C. Zheng, Development of Modulation p-Doped 1310 nm InAs/GaAs Quantum Dot Laser Materials and Ultrashort Cavity Fabry–Perot and Distributed-Feedback Laser Diodes. *ACS Photonics* 5, 1084-1093 (2018).
- [72] H. X. Zhao, S. F. Yoon, C. Z. Tong, C. Y. Liu, R. Wang, Q. Cao, Thermal Effects and Small Signal Modulation of 1.3- μm InAs/GaAs Self-Assembled Quantum-Dot Lasers. *Nanoscale Research Letters*, (2011).
- [73] S. Chen, M. Liao, M. Tang, J. Wu, M. Martin, T. Baron, A. Seeds, H. Liu, Electrically pumped continuous-wave 1.3 microm InAs/GaAs quantum dot lasers monolithically grown on on-axis Si (001) substrates. *Optics express* 25, 4632-4639 (2017).
- [74] Y. Wang, S. Chen, Y. Yu, L. Zhou, L. Liu, C. Yang, M. Liao, M. Tang, Z. Liu, J. Wu, W. Li, I. Ross, A. J. Seeds, H. Liu, S. Yu, Monolithic quantum-dot distributed feedback laser array on silicon. *Optica* 5, 528 (2018).
- [75] E. U. Rafailov, M. A. Cataluna, W. Sibbett, Mode-locked quantum-dot lasers. *Nature Photonics* 1, 395-401 (2007).

- [76] D. Arsenijević, D. & Bimberg, Quantum-dot lasers for 35 Gbit/s pulse-amplitude modulation and 160 Gbit/s differential quadrature phase-shift keying. (2016).
- [77] I. Melngailis, Longitudinal injection-plasma laser of InSb. *Applied Physics Letters* 6, 59-60 (1965).
- [78] H. Soda, K. Iga, C. Kitahara, Y. Suematsu, GaInAsP/InP Surface Emitting Injection Lasers. *Japanese Journal of Applied Physics* 18, 2329-2330 (1979).
- [79] J. P. v. d. Ziel, M. Ilegems, Multilayer GaAs-Al_{0.3}Ga_{0.7}As dielectric quarter wave stacks grown by molecular beam epitaxy. *Applied Optics* 14, 2627-2630 (1975).
- [80] M. Ogura, T. Hata, T. Yao, Distributed Feed Back Surface Emitting Laser Diode with Multilayered Heterostructure. *Japanese Journal of Applied Physics* 23, L512–L514 (1984).
- [81] K. Iga, S. Kinoshita, F. Koyama, Microcavity GaAs/GaAs surface-emitting laser with $I_{th} = 6$ mA. *Electronics Letters* 23, 134 (1987).
- [82] T. Sakaguchi, F. Koyama, K. Iga, Vertical cavity surface-emitting laser with an AlGaAs/AlAs Bragg reflector. *Electronics Letters* 24, 928 (1988).
- [83] F. Koyama, Recent Advances of VCSEL Photonics. *Journal of Lightwave Technology* 24, 4502-4513 (2006).
- [84] R. Michalzik, VCSELs-Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers. *Springer Series in Optical Sciences* 166, (2013).
- [85] J. Tatum, J. K. Guenter, VCSEL proliferation. *Proc. of SPIE* 6484, 648403 (2007).
- [86] K. Li, Y. Rao, C. Chase, W. Yang, C. J. Chang-Hasnain, Monolithic high-contrast metastructure for beam-shaping VCSELs. *Optica* 5, 10 (2018).
- [87] Markus-Christian Amann, Thierry Bosch, M. Lescure, R. Myllyla, M. Rioux, Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement. *Optical Engineering* 40, 10 (2001).
- [88] R. Myllylä, J. Marszalec, J. Kostamovaara, A. Mäntyniemi, G.-J. Ulbrich, Imaging distance measurements using TOF lidar. *Journal of Optics* 29, 188-193 (1998).
- [89] Carl W. Wilmsen, Henryk Temkin, L. A. Coldren, Cambridge Studies in Modern Optics Vertical-Cavity Surface Emitting Lasers Design, Fabrication, Characterization, and Applications. (1999).

-
- [90] H. E. Li, K. Iga, Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Devices. *Springer Series in Photonics*, (2003).
- [91] D. Zhou, J.-F. Seurin, G. Xu, R. Van Leeuwen, A. Miglo, Q. Wang, A. Kovsh, C. Ghosh, Progress on high-power 808nm VCSELs and applications. *Proc. of SPIE* 10122, 1012206 (2017).
- [92] A. Larsson, Advances in VCSELs for Communication and Sensing. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 176, 1552-1567 (2011).
- [93] Hui Li, Philip Wolf, Philip Moser, Gunter Larisch, James A. Lott, D. Bimberg, Vertical-cavity surface-emitting lasers for optical interconnects. *SPIE Newsroom*, (2014).
- [94] M. Grabherr, New applications boost VCSEL quantities: recent developments at Philips. 9381, 938102 (2015).
- [95] J.-F. Seurin, D. Zhou, G. Xu, A. Miglo, D. Li, T. Chen, B. Guo, C. Ghosh, High-efficiency VCSEL arrays for illumination and sensing in consumer applications. *Proc. of SPIE* 9766, 97660D (2016).
- [96] N. Mukoyama, J. K. Guenter, H. Otoma, J. Sakurai, N. Ueki, H. Nakayama, VCSEL array-based light exposure system for laser printing. *Proc. of SPIE* 6908, 69080H (2008).
- [97] H. Moench, R. Conrads, S. Gronenborn, X. Gu, M. Miller, P. Pekarski, J. Pollmann-Retsch, A. Pruijmboom, U. Weichmann, Integrated high power VCSEL systems. *Proc. of SPIE* 9733, 97330V (2016).
- [98] A. Liu, P. Wolf, J. A. Lott, D. Bimberg, Vertical-cavity surface-emitting lasers for data communication and sensing. *Photonics Research* 7, 121-136 (2019).
- [99] S. L. McCall, A. F. J. Levi, R. E. Slusher, S. J. Pearton, R. A. Logan, Whispering-gallery mode microdisk lasers. *Applied Physics Letters* 60, 289-291 (1992).
- [100] S. L. McCall, A. F. J. Levi, R. E. Slusher, S. J. Pearton, R. A. Logan, Whispering-gallery mode microdisk lasers. *Applied Physics Letters* 60, 289-291 (1992).
- [101] M. Fujita, K. Inoshita, T. Baba, Room temperature continuous wave lasing characteristics of GaInAsP/InP microdisk injection laser. *Electronics Letters* 34, 278 (1998).

- [102] S. M. K. Thiyagarajan, A. F. J. Levi, C. K. Lin, I. Kim, P. D. Dapkus, S. J. Pearton, Continuous room-temperature operation of optically pumped InGaAs/InGaAsP microdisk lasers. *Electronics Letters* 34, 2333 (1998).
- [103] M. Fujita, R. Ushigome, T. Baba, Continuous wave lasing in GaInAsP microdisk injection laser with threshold current of 40 μ A. *Electronics Letters* 36, 790 (2000).
- [104] J. Faist, C. Gmachl, M. Striccoli, C. Sirtori, F. Capasso, D. L. Sivco, A. Y. Cho, Quantum cascade disk lasers. *Applied Physics Letters* 69, 2456-2458 (1996).
- [105] H. Cao, J. Y. Xu, W. H. Xiang, Y. Ma, S. H. Chang, S. T. Ho, G. S. Solomon, Optically pumped InAs quantum dot microdisk lasers. *Applied Physics Letters* 76, 3519-3521 (2000).
- [106] E. D. Haberer, R. Sharma, C. Meier, A. R. Stonas, S. Nakamura, S. P. DenBaars, E. L. Hu, Free-standing, optically pumped, GaN/InGaN microdisk lasers fabricated by photoelectrochemical etching. *Applied Physics Letters* 85, 5179-5181 (2004).
- [107] A. F. J. Levi, R. E. Slusher, S. L. McCall, J. L. Glass, S. J. Pearton, R. A. Logan, Directional light coupling from microdisk lasers. *Applied Physics Letters* 62, 561-563 (1993).
- [108] William A. Zortman, Anthony L. Lentine, Michael R. Watts, D. C. Trotter, Power Penalty Measurement and Frequency Chirp Extraction in Silicon Microdisk Resonator Modulators. *Optical Fiber Conference (OFC)* paper, OMI7.
- [109] W. Xie, T. Stoferle, G. Raino, T. Aubert, S. Bisschop, Y. Zhu, R. F. Mahrt, P. Geiregat, E. Brainis, Z. Hens, D. Van Thourhout, On-Chip Integrated Quantum-Dot-Silicon-Nitride Microdisk Lasers. *Adv. Mater.* 29, (2017).
- [110] Q. Li, Y. Wan, A. Y. Liu, A. C. Gossard, J. E. Bowers, E. L. Hu, K. M. Lau, 1.3- μ m InAs quantum-dot micro-disk lasers on V-groove patterned and unpatterned (001) silicon. *Optics express* 24, 21038-21045 (2016).
- [111] Y. Wan, Q. Li, A. Y. Liu, A. C. Gossard, J. E. Bowers, E. L. Hu, K. M. Lau, Temperature characteristics of epitaxially grown InAs quantum dot micro-disk lasers on silicon for on-chip light sources. *Applied Physics Letters* 109, 011104 (2016).

-
- [112] K. M. Lau, B. Shi, Y. Wan, A. Y. Liu, Q. Li, S. Zhu, A. C. Gossard, J. E. Bowers, E. L. Hu, InAs quantum dot micro-disk lasers grown on (001) Si emitting at communication wavelengths. *10123, 101230J* (2017).
- [113] F. Vollmer, L. Yang, Label-free detection with high-Q microcavities: a review of biosensing mechanisms for integrated devices. *Nanophotonics* 1, 267-291 (2012).
- [114] E. Kim, M. D. Baaske, F. Vollmer, Towards next-generation label-free biosensors: recent advances in whispering gallery mode sensors. *Lab on a chip* 17, 1190-1205 (2017).
- [115] M. S. Nawrocka, T. Liu, X. Wang, R. R. Panepucci, Tunable silicon microring resonator with wide free spectral range. *Applied Physics Letters* 89, 071110 (2006).
- [116] S. Forstner, S. Prams, J. Knittel, E. D. van Ooijen, J. D. Swaim, G. I. Harris, A. Szorkovszky, W. P. Bowen, H. Rubinsztein-Dunlop, Cavity optomechanical magnetometer. *Phys. Rev. Lett.* 108, 120801 (2012).
- [117] S. Forstner, E. Sheridan, J. Knittel, C. L. Humphreys, G. A. Brawley, H. Rubinsztein-Dunlop, W. P. Bowen, Ultrasensitive optomechanical magnetometry. *Advanced materials* 26, 6348-6353 (2014).
- [118] J. Wilson, J. Hawkes, Optoelectronics: An Introduction. *Prentice Hall; 3rd edition*, 156-200 (1998).
- [119] J. Kwoen, B. Jang, J. Lee, T. Kageyama, K. Watanabe, Y. Arakawa, All MBE grown InAs/GaAs quantum dot lasers on on-axis Si (001). *Optics express* 26, 11568-11576 (2018).
- [120] A. Y. Liu, J. Peters, X. Huang, D. Jung, J. Norman, M. L. Lee, A. C. Gossard, J. E. Bowers, Electrically pumped continuous-wave 1.3 μm quantum-dot lasers epitaxially grown on on-axis (001) GaP/Si. *Opt. Lett.* 42, 338-341 (2017).
- [121] Vilson R. Almeida, Carlos A. Barrios, Roberto R. Panepucci, Michal Lipson, All-optical control of light on a silicon chip. *Nature* 431, 1081-1084 (2004).
- [122] M. Asghari, A. V. Krishnamoorthy, Energy-efficient communication. *Nature Photonics* 5, 268-270 (2011).
- [123] A. Rickman, The commercialization of silicon photonics. *Nature Photonics* 8, 579-582 (2014).

- [124] Y. Ito, T. Fukushima, H. Kino, K.-W. Lee, K. Choki, T. Tanaka, M. Koyanagi, Vertical-cavity surface-emitting laser chip bonding by surface-tension-driven self-assembly for optoelectronic heterogeneous integration. *Japanese Journal of Applied Physics* 54, 030206 (2015).
- [125] H. Lu, J. S. Lee, Y. Zhao, C. Scarcella, P. Cardile, A. Daly, M. Ortsiefer, L. Carroll, P. O'Brien, Flip-chip integration of tilted VCSELs onto a silicon photonic integrated circuit. *Optics express* 24, 16258-16266 (2016).
- [126] Y. H. Jhang, R. Mochida, K. Tanabe, K. Takemasa, M. Sugawara, S. Iwamoto, Y. Arakawa, Direct modulation of 1.3 μm quantum dot lasers on silicon at 60 degrees C. *Optics express* 24, 18428-18435 (2016).
- [127] Y. Wan, Q. Li, A. Y. Liu, A. C. Gossard, J. E. Bowers, E. L. Hu, K. M. Lau, Optically pumped 1.3 μm room-temperature InAs quantum-dot micro-disk lasers directly grown on (001) silicon. *Opt. Lett.* 41, 1664-1667 (2016).
- [128] Daehwan Jung, Patrick G. Callahan, Bongki Shin, Kunal Mukherjee, Arthur C. Gossard, J. E. Bowers, Low threading dislocation density GaAs growth on on-axis GaP/Si (001). *J. Appl. Phys.* 122, 225703 (2017).
- [129] W. Q. Wei, J. H. Wang, B. Zhang, J. Y. Zhang, H. L. Wang, Q. Feng, H. X. Xu, T. Wang, J. J. Zhang, InAs QDs on (111)-faceted Si(001) hollow substrates with strong emission at 1300 nm and 1550 nm. *Appl. Phys. Lett.* 113, 053107 (2018).
- [130] S. M. Ulrich, C. Gies, S. Ates, J. Wiersig, S. Reitzenstein, C. Hofmann, A. Löffler, A. Forchel, F. Jahnke, P. Michler, Photon statistics of semiconductor microcavity lasers. *Physical review letters* 98, 043906 (2007).
- [131] S. Reitzenstein, C. Hofmann, A. Gorbunov, M. Straub, S. H. Kwon, C. Schneider, A. Löffler, S. Hofling, M. Kamp, A. Forchel, AlAs/GaAs micropillar cavities with quality factors exceeding 150,000. *Appl. Phys. Lett.* 90, 251109 (2007).
- [132] H. L. Amin Vahdat, Xiaoxue Zhao and Chris Johnson, The Emerging Optical Data Center. *OSA/OFC/NFOEC*, (2011).
- [133] T. Wang, H.-Y. Liu, J.-J. Zhang, Temperature-Dependent Photoluminescence Characteristics of InAs/GaAs Quantum Dots Directly Grown on Si Substrates. *Chinese Physics Letters* 33, 044207 (2016).

- [134] Q. Feng, W. Wei, B. Zhang, H. Wang, J. Wang, H. Cong, T. Wang, J. Zhang, O-Band and C/L-Band III-V Quantum Dot Lasers Monolithically Grown on Ge and Si Substrate. *Applied Sciences* 9, 385 (2019).
- [135] M. Alam, J. Aitchison, M. Mojahedi, Compact and silicon-on-insulator-compatible hybrid plasmonic TE-pass polarize. *Opt. Lett.* 37, 55–57 (2012).
- [136] Y. Huang, S. Y. Zhu, H. J. Zhang, T. Y. Liow, G. Q. Lo, Ultra-compact CMOS compatible TE-pass polarizer for silicon photonics. *Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference* paper JTh2A.27 (2013).
- [137] P. Orlandi, F. Morichetti, M. J. Strain, M. Sorel, P. Bassi, A. Melloni, Photonic integrated filter with widely tunable bandwidth. *J. Lightwave Technol* 32, 897–907 (2014).
- [138] H. Qiu, F. Zhou, J. Qie, Y. Yao, X. Hu, Y. Zhang, X. Xiao, Y. Yu, J. Dong, X. Zhang, A Continuously Tunable Sub-Gigahertz Microwave Photonic Bandpass Filter Based on an Ultra-High-Q Silicon Microring Resonator. *Journal of Lightwave Technology* 36, 4312-4318 (2018).
- [139] J. C. Rosenberg, W. M. J. Green, S. Assefa, D. M. Gill, T. Barwicz, M. Yang, S. M. Shank, Y. A. Vlasov, A 25 Gbps silicon microring modulator based on an interleaved junction. *Opt. Express* 20, 26411-26423 (2012).
- [140] C. Haffner, W. Heni, Y. Fedoryshyn, J. Niegemann, A. Melikyan, D. L. Elder, B. Baeuerle, Y. Salamin, A. Josten, U. Koch, C. Hoessbacher, F. Ducry, L. Juchli, A. Emboras, D. Hillerkuss, M. Kohl, L. R. Dalton, C. Hafner, J. Leuthold, All-plasmonic Mach–Zehnder modulator enabling optical high-speed communication at the microscale. *Nature Photonics* 9, 525-528 (2015).
- [141] T. Yin, R. Cohen, M. M. Morse, G. Sarid, Y. Chetrit, D. Rubin, M. J. Paniccia, 31GHz Ge n-i-p waveguide photodetectors on Silicon-on-Insulator substrate. *Opt. Express* 15, 13965-13971 (2007).
- [142] I. Sandall, J. S. Ng, J. P. R. David, C. H. Tan, T. Wang, H. Liu, 1300 nm wavelength InAs quantum dot photodetector grown on silicon. *Opt. Express* 20, 10446 (2012).
- [143] L. Vivien, A. Polzer, D. Marris-Morini, J. Osmond, J. M. Hartmann, P. Crozat, E. Cassan, C. Kopp, H. Zimmermann, J. M. Fédéli, Zero-bias 40Gbit/s

- germanium waveguide photodetector on silicon. *Opt. Express* 20, 1096–1101 (2012).
- [144] Q. Li, K. W. Ng, K. M. Lau, Growing antiphase-domain-free GaAs thin films out of highly ordered planar nanowire arrays on exact (001) silicon. *Applied Physics Letters* 106, 072105 (2015).
- [145] L. Megalini, B. C. Cabinian, B. Bonef, H. W. Zhao, T. Mates, J. S. Speck, J. E. Bowers, J. Klamkin, 1550-nm InGaAsP multi-quantum-well structures in InP nano-ridges by selective MOCVD growth on SOI substrates. *Advanced Photonics Conference* paper ITu2A.3, (2017).
- [146] A. E. Siegman, *Lasers*. University Science Books, Mill Valley, CA, (1986).
- [147] S. Zhu, B. Shi, Q. Li, Y. Wan, K. M. Lau, Parametric study of high-performance 1.55 μm InAs quantum dot microdisk lasers on Si. *Opt. Express* 25, 31281-31293 (2017).
- [148] K. Srinivasan, M. Borselli, O. Painter, Cavity Q, mode volume, and lasing threshold in small diameter AlGaAs microdisks with embedded quantum dots. *Opt. Express* 14, 31281 (2006).
- [149] A. R. Clawson, Guide to references on III \pm V semiconductor chemical etching. *Materials Science and Engineering* 31, 1-438 (2001).
- [150] J. Kim, D.H. Lim, G. M. Yang, Selective etching of AlGaAs/GaAs structures using the solutions of citric acid/H₂O₂ and de-ionized H₂O/buffered oxide etch. *J. Vac. Sci. Technol. B* 16, 558 (1998).
- [151] Gregory C. DeSalvo, Wen F. Tseng, J. Comas, Etch Rates and Selectivities of Citric Acid/Hydrogen Peroxide on GaAs, Al_{0.3}Ga_{0.7}As, In_{0.2}Ga_{0.8}As, In_{0.53}Ga_{0.47}As, In_{0.52}Al_{0.48}As. *J. Electrochem. Soc.* 139, (1992).
- [152] Sambhu Agarwala, Scott C. Horst, Oliver King, Rick Wilson, Dennis Stone, Mario Dagenais, Y. J. Chen, High-density inductively coupled plasma etching of GaAs/AlGaAs in BCl₃/Cl₂/Ar: A study using a mixture design experiment. *J. Vac. Sci. Technol. B* 16, 511-514 (1998).
- [153] P. B. Vigneron, F. Joint, N. Isac, R. Colombelli, E. Herth, Advanced and reliable GaAs/AlGaAs ICP-DRIE etching for optoelectronic, microelectronic and microsystem applications. *Microelectronic Engineering* 202, 42-50 (2018).

-
- [154] Y. Wan, Q. Li, A. Y. Liu, W. W. Chow, A. C. Gossard, J. E. Bowers, E. L. Hu, K. M. Lau, Sub-wavelength InAs quantum dot micro-disk lasers epitaxially grown on exact Si (001) substrates. *Applied Physics Letters* 108, 221101 (2016).

附录

A1. 脊型波导 F-P 腔激光器工艺 A 参数

1. 样品清洗干燥

1.1 样品清洗_____ 丙酮/异丙醇/去离子水

1.2 烘干_____ 180°C, 10 min

2. 光刻工艺

2.1 涂 AZ6130 光刻胶_____ 6000 rpm

2.2 前烘: _____ 115°C, 2 min

2.3 用 MA6 紫外曝光_____ 剂量: 100 mw/cm²

2.4 显影_____ 65s

2.5 定影_____ 30s

3. ICP 刻蚀工艺:

BCl₃ _____ 10 sccm

Cl₂ _____ 6 sccm

RF power _____ 50 W

ICP power _____ 400 W

腔体气压_____ 6 Pa

温度_____ 10 °C

4. 去胶

4.1 丙酮/异丙醇/去离子水

时间_____

4.2 在 RIE 中采用 O 等离子体

O₂ _____ 100 sccm

气压 _____ 100 Pa

功率 _____ 100 W

5. 光刻工艺

5.1 样品清洗_____ 丙酮/异丙醇/去离子水

5.2 烘干_____ 180°C, 10 min

- 5.3 涂 AZ6130 光刻胶_____ 6000 rpm
- 5.4 前烘: _____ 115°C, 2 min
- 5.5 用 MA6 紫外曝光_____ 剂量: 100 mw/cm²
- 5.6 显影_____ 65s
6. ICP 刻蚀工艺:
- BCl₃ _____ 10 sccm
- Cl₂ _____ 6 sccm
- RF power _____ 50 W
- ICP power _____ 400 W
- 腔体气压_____ 6 Pa
- 温度_____ 10 °C
- 时间_____
7. 去胶
- 7.1 丙酮/异丙醇/去离子水
- 时间_____
- 7.2 在 RIE 中采用 O 等离子体
- O₂ _____ 100 sccm
- 气压 _____ 100 Pa
- 功率 _____ 100 W
- 时间_____
8. PECVD 生长 SiO₂:
- N₂O _____ 1000 sccm
- N₂ _____ 327 sccm
- SiH₄ _____ 11 sccm
- Power _____ 20 W
- 腔体气压_____ 650 Pa
- 温度_____ 380 °C
- 时间_____
9. 光刻工艺
- 9.1 涂 AZ6130 光刻胶_____ 6000 rpm

9.2 前烘: _____ 115°C, 2 min

9.3 用 MA6 紫外曝光_____ 剂量: 100 mw/cm²

9.4 显影_____ 65s

9.5 定影_____ 30s

10. RIE 开窗口

CHF₃ _____ 50 sccm

Ar _____ 25 sccm

气压 _____ 30 Pa

功率 _____ 150 W

时间_____

11. 双层胶工艺

11.1 旋涂 LOR 5A 光刻胶_____ 6000 rpm

11.2 前烘: _____ 160°C, 2.5 min

11.3 旋涂 AZ6130 光刻胶_____ 6000 rpm

11.4 前烘: _____ 115°C, 2 min

11.5 用 MA6 紫外曝光_____ 剂量: 100 mw/cm²

11.6 显影_____ 65 s

11.7 定影_____ 35 s

12. 电子束蒸发 P 型电极蒸镀

12.1 Ti

速率_____ 0.1 A/s

厚度_____

12.2 Au

速率_____ 1 A/s

厚度_____

13. 溶脱

13.1 丙酮

13.2 异丙醇

13.3 去离子水

13.4 显影液

13.5 异丙醇

13.6 去离子水

13.7 烘干_____ 180°C, 5 min

14. 双层胶工艺 (同 11)

14.1 旋涂 LOR 5A 光刻胶_____ 6000 rpm

14.2 前烘: _____ 160°C, 2.5 min

14.3 旋涂 AZ6130 光刻胶_____ 6000 rpm

14.4 前烘: _____ 115°C, 2 min

14.5 用 MA6 紫外曝光_____ 剂量: 100 mw/cm²

14.6 显影_____ 65 s

14.7 定影_____ 35 s

15. 热蒸发 N 型电极蒸镀

15.1 Ni/Ge/Au 合金

速率_____ 0.4 A/s

厚度_____

15.2 Au

速率_____ 1 A/s

厚度_____

16. 溶脱

16.1 丙酮

16.2 异丙醇

16.3 去离子水

16.4 显影液

16.5 异丙醇

16.6 去离子水

16.7 烘干_____ 180°C, 5 min

17. 退火_____ 380 °C, 90 s

A2. 脊型波导 F-P 腔激光器工艺 B 参数

1. 双层胶工艺
2. 电子束蒸发 P 型电极蒸镀
3. 溶脱
4. 光刻工艺
5. ICP 刻蚀工艺
6. 去胶
7. 光刻工艺
8. ICP 刻蚀工艺
9. PECVD 生长 SiO_2
10. 光刻工艺
11. RIE 开窗口
12. 双层胶工艺
13. 热蒸发 N 型电极蒸镀
14. 热蒸发蒸镀 probe 电极
15. 退火

注：每部工艺细节参照 A1. 脊型波导 F-P 腔激光器工艺 A 参数

A3. 垂直腔面发射激光器工艺参数

A1. 脊型波导 F-P 腔激光器工艺 A 参数

1. 样品清洗干燥

1.1 样品清洗_____ 丙酮/异丙醇/去离子水

1.2 烘干_____ 180°C, 10 min

2. 光刻工艺

2.1 涂 AZ6130 光刻胶_____ 6000 rpm

2.2 前烘: _____ 115°C, 2 min

2.3 用 MA6 紫外曝光_____ 剂量: 100 mw/cm²

2.4 显影_____ 65s

2.5 定影_____ 30s

3. ICP 刻蚀工艺:

BCl₃ _____ 10 sccm

Cl₂ _____ 6 sccm

RF power _____ 50 W

ICP power _____ 400 W

腔体气压_____ 6 Pa

温度_____ 10 °C

4. 去胶

4.1 丙酮/异丙醇/去离子水

时间_____

4.2 在 RIE 中采用 O 等离子体

O₂ _____ 100 sccm

气压 _____ 100 Pa

功率 _____ 100 W

A4. 微盘激光器工艺参数

1. 样品清洗干燥
 - 1.1 样品清洗_____ 丙酮/异丙醇/去离子水
 - 1.2 烘干_____ 180°C, 10 min
2. 小球旋涂
 - 转速_____ 6000 rpm
 - 时间_____
3. ICP 刻蚀工艺:
 - BCl₃ _____ 10 sccm
 - Cl₂ _____ 20 sccm
 - RF power _____ 100 W
 - ICP power _____ 800 W
 - 腔体气压_____ 3 Pa
 - 温度_____ 10 °C
 - 时间_____
4. 去胶
 - 4.1 丙酮/异丙醇/去离子水
时间_____
 - 4.2 在 RIE 中采用 O 等离子体
 - O₂ _____ 100 sccm
 - 气压 _____ 100 Pa
 - 功率 _____ 100 W
5. 湿法刻蚀
 - NH₄F : HF 5 : 1
 - 刻蚀时间 5 min
6. 烘干_____ 180°C, 10 min

个人简历与发表文章目录

作者简历:

2007年08月 - 2011年07月, 中国计量大学材料科学与工程学院获学士学位。

2011年09月 - 2014年07月, 昆明理工大学材料科学与工程学院获硕士学位。

2015年08月 - 2019年05月, 中国科学院物理研究所攻读博士学位。

获奖情况:

1. 物理所所长优秀奖学金 (2016, 2017)
2. 中国科学院大学三好学生 (2018)
3. 北京大学“硅基光电子”暑期学校优秀学员 (2017)

工作经历:

2014年07月 - 2015年07月 云南省分析测试中心, 研究员助理, 负责透射电子显微镜测试分析培训, 以及设备维护

科研及项目经历:

硅(100)基量子点激光器器件研发 (华为 2017)

已发表的学术论文:

- [1] **Bin Zhang**, Wenqi Wei, Jianhuan Wang, Hailing Wang, Hui Cong, Ting Wang, and Jianjun Zhang. Low threshold InAs/GaAs quantum-dot microcavity laser on Si (001) hollow substrate by hybrid epitaxy. *AIP Advances*, 9, 015331 (2019).
- [2] Wenqi Wei, Jianhuan Wang, **Bin Zhang**, Jieyin Zhang, Hailing Wang, Qi Feng, Hongxing Xu, Ting Wang, Jianjun Zhang. InAs QDs on (111)-faceted Si (001) hollow substrates with strong emission at 1300 nm and 1550 nm. *Applied Physics Letter*, 113, 053107 (2018).
- [3] **Bin Zhang**, Wenqi Wei, Jianhuan Wang, Hailing Wang, Hui Cong, Ting Wang, and Jianjun Zhang. Optically pumped low threshold InAs/GaAs quantum-dot micropillar laser on Si (001) hollow substrate. *ACP Conference*, paper M3F.3 (2018).
- [4] **Bin Zhang**, Wen-Qi Wei, Ting Wang, and Jian-Jun Zhang. O-band InAs/GaAs Quantum Dot Micro-disk Lasers on SOI by in-situ hybrid epitaxy. *CLEO Conference*, paper Stu3N.4 (2019)

致 谢

光阴似箭岁月如梭，转逝四个春秋，回想凝聚园内花落花开叶凋芽抽，于人于己，于师于亲，颇有感触。

作为 N09 组的第一批学生，深感荣幸。首先非常感谢导师张建军研究员和王霆副研究员，没有两位老师的帮助和指导自己难以完成博士学位论文。科研上，张老师高效而又严谨认真的科学态度对学生影响很大，每一篇文章，张老师从参考文献到用词用句都严格把关，学生深感自己科研精神之不足。在学生科研上，只要是需要的，从来不会限制学生，而是努力为学生提供足够的资源去尝试并实现想法。张老师努力平衡学生工作和生活，鼓励学生多运动，同时在经济上也基于很大的支持，让学生非常感动。

感谢王老师在科研中给予学生全面而又系统的指导。记得学生刚进组的时候，完全不懂，就连什么叫做光刻胶都不知道，全靠王老师一点一点耐心的指导，每次实验遇到瓶颈的时候，王老师总能和我坐下来一起探讨。王老师非常理解学生在微加工实验室做实验时遇到的困难，经常通过王老师自己的故事鼓励安慰学生，也非常感谢王老师在学生工作和人生发展上的意见和建议，记得学生困惑之时，多次在深夜找王老师讨论自己的人生，王老师每次都非常的认真的倾听，并给了学生很多很好的建议。此外，王老师幽默风趣的形象让学生意识到，科研生活也可以过的这样的多彩。

此外，感谢韦文奇同学在样品提供上的支持，感谢冯琦师兄和丛慧师姐在科研上的指导，感谢黄鼎铭和我共同聆听音乐之美，以及 N09 组其他成员对我的关心和帮助，是大家让我的博士生涯更加的完美。

特别感谢杨槐馨老师对学生的理解和支持，感谢田焕芳老师在电镜上的指导。非常感谢微加工诸位老师对我的指导和理解。感谢全保刚老师在光刻和金属蒸镀上的指导，感谢夏晓翔老师、耿广州老师和张忠山老师在 ICP、RIE 和 PECVD 方面的指导，感谢李莹老师和金爱子老师在 FIB 方面的指导，也感谢李俊杰老师对学生在晚间使用微加工的支持，也感谢王超、郝婷婷等微加工学生的帮助和理解。非常感谢陈晓惠在参考文献编辑中的帮助。感谢崔琦对我的关系和支持。

同时，感谢李无暇老师在工作上的指导和建议，并手把手教我如何参加大企业的全英文面试。感谢清华大学“成功之道”课程的老师们在认识自我，定位自我上给予的帮助，尤其是 Leo 老师在课程后依然给予学生长期的帮助。

感恩母亲三十多年来的鼓励支持和理解，母亲时常叮嘱，做人要有目标有理想，要认真真做人，踏踏实实做事情，不一定要多么出众，但要尽心尽力，每日有所精进，母亲的教诲，孩儿莫敢有所忘。非常感谢兄长多年来在学业和生活上的支持和理解，在我遇到危机之时，老哥总能不顾一切的给予我支持。感谢晓惠的关心和理解，在我博士生活的尾声中，你是美丽的音符，也是新乐章的开始。

最后想借用裴腾飞师兄的方式，以两首歌的歌词来写照我的内心，并结束我的致谢：

《在路上》：那一天，我不得已上路，为不安分的心，为自尊的生存，为自我的证明。路上的辛酸已融进我的眼睛，心灵的困境已化作我的坚定。在路上，用我心灵的呼声。在路上，只为伴着我的人。在路上，是我生命的远行。在路上，只为温暖我的人。

《从头再来》：昨天所有的荣誉，已变成遥远的回忆。勤勤恳恳已度过半生，今夜重又走入风雨。我不能随波浮沉，为了我致爱的亲人。再苦再难也要坚强，只为那些期待眼神。心若在梦就在，天地之间还有真爱。看成败人生豪迈，只不过是从头再来。

本文谨献给为我们兄弟俩不断燃烧自己的母亲。

张 斌
己亥年戊辰月
于凝聚园