

图 5-37 不同退火条件的样品的 XRD 测试结果 (a) 样品 A (无 TCA), (b) 样品 B (一次 TCA, 高温 GaAs 层中间), (c) 样品 C (一次 TCA, 高温 GaAs 层顶部), (d) 样品 D (两次 TCA)

对于在高温 GaAs 层的顶部  $1.4\mu\text{m}$  处插入循环退火的样品, 我们对其进行了腐蚀坑密度 (Etch pit density, EPD) 的测试。具体过程为: 将固体的氢氧化钾放入到坩埚中, 然后对氢氧化钾进行加热到  $320^{\circ}\text{C}$  至  $340^{\circ}\text{C}$  之间, 至熔融的氢氧化钾为澄清状态时, 将要测的样品放入其中, 腐蚀时间在 150s, 腐蚀深度约为  $300\text{nm}$ 。腐蚀结束后, 对样品的表面形貌进行测试, 由于腐蚀坑的尺寸较小, 在光学显微镜下观察不够清楚, 因此一般采用 SEM 进行测试, 来观察表面的腐蚀坑的形貌和密度。

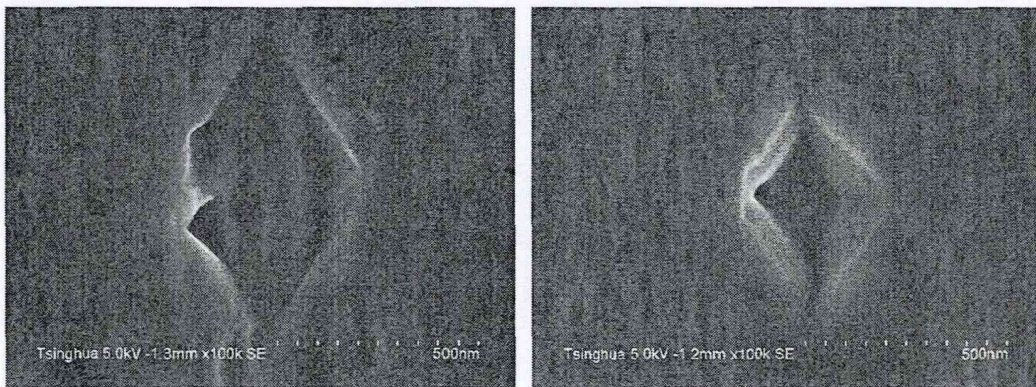


图 5-38 样品表面的腐蚀坑形貌 SEM 图

图 5-38 所示是利用 SEM 在高放大倍数下观察到的样品表面的腐蚀坑形貌, 可以看出, 腐蚀坑为菱形凹坑。我们还观察了不同腐蚀坑的密度, 如图 5-39 所

示,不同区域的腐蚀坑密度不同,我们取了样片表面四个位置,测得其腐蚀坑密度均在  $10^6/\text{cm}^2$  量级,分别为  $8.9 \times 10^6/\text{cm}^2$ ,  $2.0 \times 10^6/\text{cm}^2$ ,  $1.1 \times 10^6/\text{cm}^2$ ,  $3.8 \times 10^6/\text{cm}^2$ , 平均的腐蚀坑密度值约为  $4 \times 10^6/\text{cm}^2$ 。

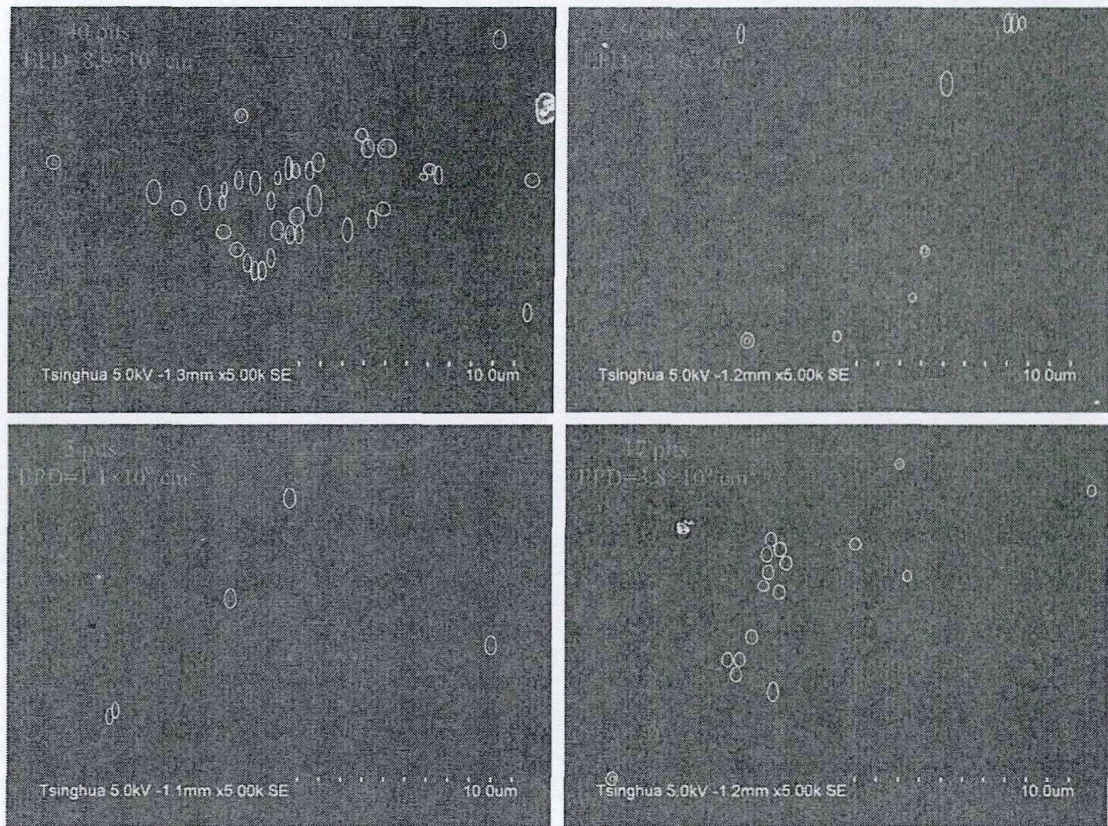


图 5-39 不同区域的腐蚀坑 SEM 图

### 5.3.2 硅基 InAs 量子点的生长

在上述硅基三步法外延 GaAs 的基础上,结合之前在 GaAs 衬底上生长 InAs 量子点的生长条件,我们将 GaAs/Si “三步法”生长与 GaAs 多层量子点生长相结合,进行了硅衬底上多层量子点的生长<sup>[31]</sup>,需要说明的是,我们在进行硅衬底上的量子点生长时与前述 GaAs 上最终优化的  $525^\circ\text{C}$  下的生长条件有所差别,包括最终优化的生长温度和 InGaAs 层等略有不同,硅衬底上量子点均在  $500^\circ\text{C}$  下生长,其具体结构见图 5-40。首先是在 Si 衬底上利用三步法生长 GaAs 缓冲层,厚度为  $2.1\mu\text{m}$ ,在其  $1.7\mu\text{m}$  的位置插入了一次热循环退火(高温-低温-高温循环三次);之后在 GaAs 缓冲层上生长了  $900\text{nm}$  厚 AlGaAs 下包层,Al 的组分采用 0.8,之所以选择高 Al 组分是因为高 Al 组分既可以降低 AlGaAs 层的表面粗糙度,使其顶部沉积量子点少受不利影响;又可以降低光学限制所需的 AlGaAs 限制层厚度为以后 Si 基异变 InAs 量子点发光器件做准备(在 Si 基 GaAs 异变外延中, GaAs 与 Si 之间热膨胀系数失配大,受此影响异变 GaAs 层存在一个临界厚度,低于此厚度异变外延片才不会出现裂纹或翘曲)。AlGaAs 和量子点有源区之

间是较厚的 GaAs 波导层，该波导层采用低温-高温-低温的模式进行生长，其作用是使得沉积量子点之前的表面更加平坦。具体是在生长完 AlGaAs 层后，先生长 100nm 的低温 GaAs 层，在较低温度（500°C）下进行生长，继而将温度升高至高温（720°C），生长 200nm 的 GaAs，然后再将温度降低至低温（500°C），生长 100nm 的 GaAs 层，这样，在生长完较厚的 GaAs 层（400nm）后，位错密度相对于上述在硅上生长了 1.8 $\mu\text{m}$  的 GaAs 而言，肯定更低并且表面粗糙度也有所提高。

多层量子点区域采用了采用 5 层结构的 DWELL 结构，具体是首先生长 3nm In<sub>0.12</sub>Ga<sub>0.88</sub>As 底层，然后生长 InAs 量子点，生长温度为 500°C，五三族比为 5，之后是 3nm 的 In<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>As 盖层，InGaAs 盖层生长结束后，继续生长了 10nm 的低温 GaAs 层，然后将生长温度升高至 600°C，生长了 30nm 的 GaAs 间隔层。为了消除在量子点生长过程中产生的团簇、大岛等，我们在 10nm 低温 GaAs 盖层后插入了层间退火（砷烷暂停），砷烷暂停的时间为 15 秒，这样未被盖层覆盖的大岛或者团簇在没有砷烷的情况下会变小甚至消失<sup>[14][33]</sup>，可以有效提高发光性能。硅基多层量子点结构的 XRD 曲线(3.3ML 沉积量下测得)如图 5-40 所示，可以明显分辨出 GaAs 缓冲层、AlGaAs 下包层和 DWELLs 的外延峰，其中 GaAs 缓冲层外延峰的半宽仅 173arcsec，理论计算穿透位错密度（TDD）约 10<sup>7</sup>/cm<sup>2</sup> 量级。DWELLs 展示出细锐且规律的卫星峰表明多层量子点区域有着较好的晶体质量。我们生长了不同沉积量的样品，沉积量分别为 2.5ML、2.6ML、2.7ML、3.0ML、3.3ML。

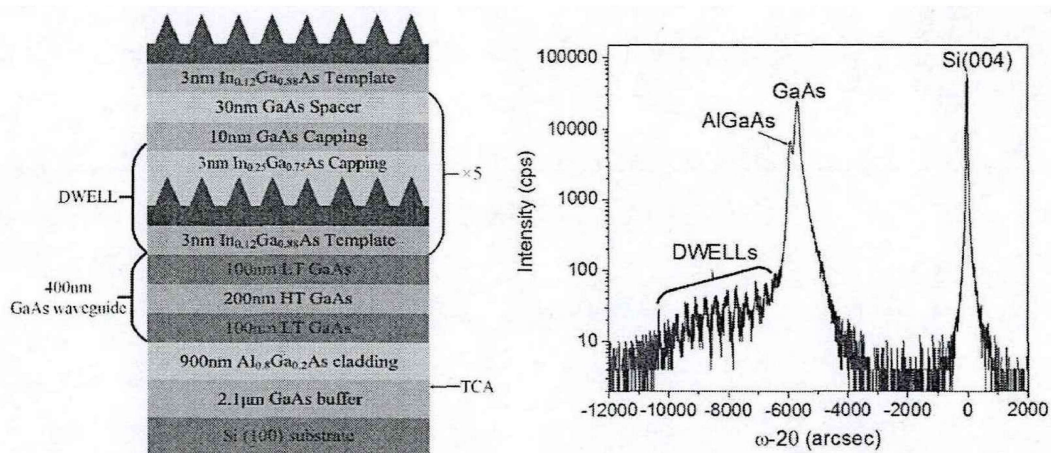


图 5-40 Si 基异变量子点样品结构示意图及该结构的 XRD 图

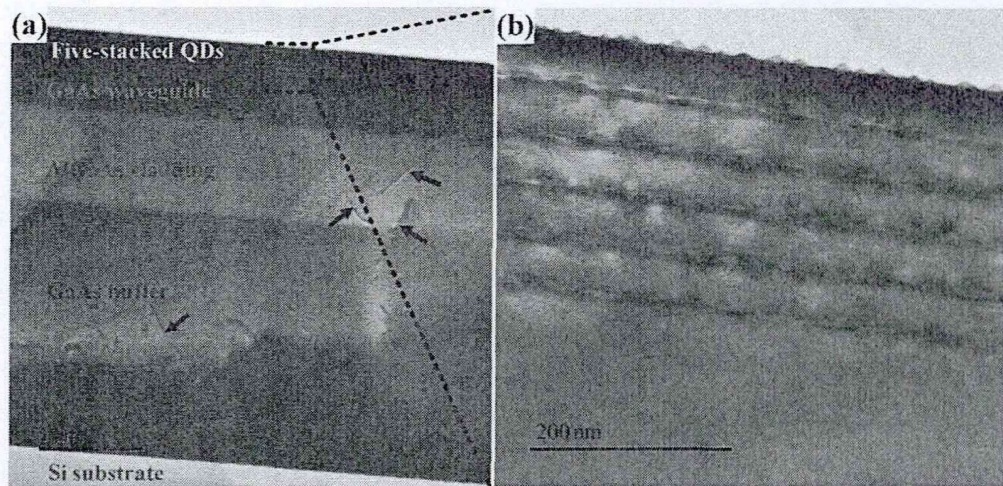


图 5-41 Si 基量子点结构的 TEM 图 (3.3ML)

为进一步获得硅基量子点样品的生长质量等信息，我们对 3.3ML 沉积量的样品进行了 TEM 测试，测试结果如图 5-41 所示。不同层可以较为清楚地从 TEM 图中分辨出来，图中的黑色箭头指的是位错，由于三步法生长硅上 GaAs 以及热循环退火的作用，穿透位错大多集中在 GaAs 缓冲层的靠下位置，当然从图中也可以看出，也有穿透位错延伸到了 AlGaAs 层。但是 400nm 厚度的 GaAs 波导层中已经见不到明显的位错，从右侧量子点区域的图来看，量子点区域也未见明显的穿透位错。从多层量子点的 TEM 图中也可以看出，每层量子点相差无多，也就是说，随着层数的增加，量子点的尺寸未有明显变化，这说明生长暂停和较厚的 GaAs 间隔层起到了作用，并且在每一层中也观察不到较大的团簇，说明此时量子点的质量较好，尤其是从顶层的裸露量子点我们更是可以看出，量子点呈锥形，其横向尺寸以及高度也存在着分布不均匀的情况，这与后面所测得的量子点的形貌图中高度不一以及 PL 图中量子点的光谱半高宽较宽是一致的。

图 5-42 是四种沉积量下测得的原子力显微镜图，分别是 2.5ML、2.7ML、3.0ML、3.3ML。从图中明显看出，成核的量子点有一定的取向性，这是由于衬底是带有偏角的，在表面生长的过程中存在着多原子台阶，量子点会优先在多原子台阶边缘成核<sup>[34][35]</sup>，随着沉积量的增加，量子点的高度明显增加。并且没有明显的大岛或者团簇，这是由于较厚的波导层以及层间退火有效地降低了量子点成核前表面的粗糙度。从量子点的形貌图还可以看出，量子点的高度从 2-6nm 逐渐增加到 4-10nm。虽然量子点的体积增大，其不均匀性依然存在，即无论沉积量的多少，量子点的高度分布总是不均匀的，这是由于 MOCVD 生长的特性造成的，会使发光谱比较宽，这与我们后续测得的 PL 一致，并且对于宽谱器件例如超辐射管比较有利。随着沉积量的增加，量子点的密度有所下降，当沉积量从 2.5ML 增加到 3.3ML 时，量子点的密度从  $8 \times 10^{10}/\text{cm}^2$  下降到  $5 \times 10^{10}/\text{cm}^2$  左右，

这是由于在增加沉积量（增大沉积时间）的过程中，不发光的小岛逐渐合并为大岛。

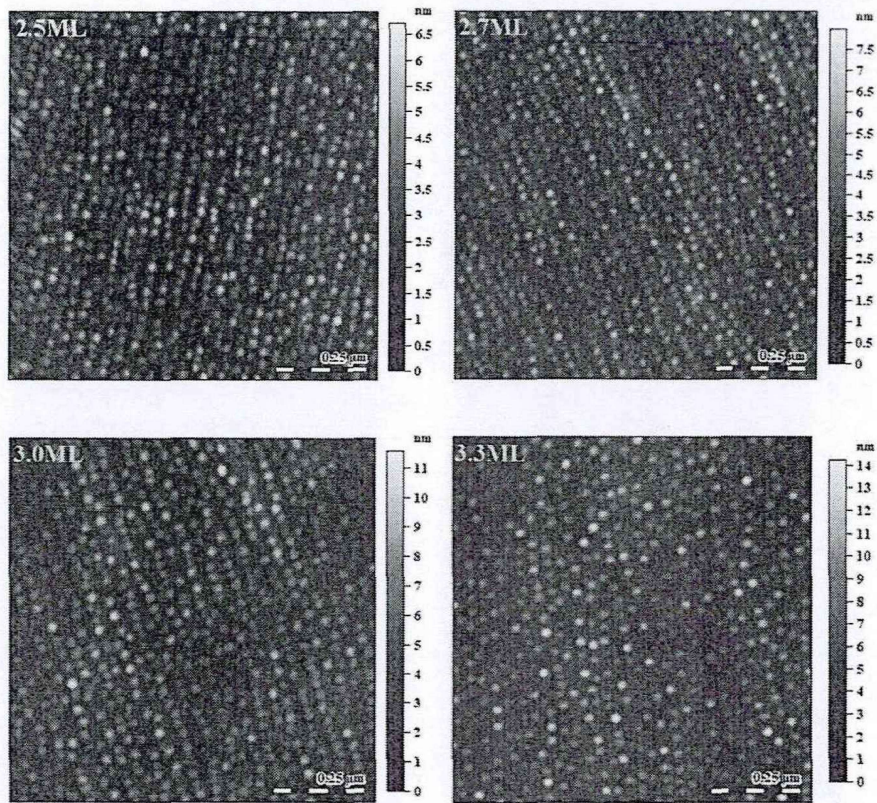


图 5-42 Si 基量子点形貌（沉积量分别为 2.5、2.7、3.0、3.3ML）

从形貌图上我们还可以看出，在外延片的表面上存在着多原子台阶，以 2.7ML 的形貌图为例，我们将其中部分区域放大展示其高度起伏，如图 5-43 所示，可以看出高度起伏中存在着多原子台阶，这是由于衬底存在偏角造成的，量子点生长时会首先在多原子台阶的边缘成核<sup>[34][35]</sup>。我们可以看到，中间的岛的高度为 6nm，岛的两侧存在着多原子台阶，台阶的高度在 1nm 左右。

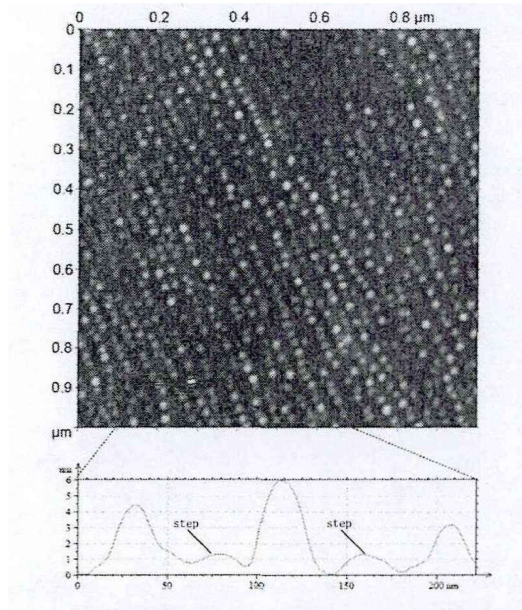


图 5-43 2.7ML 沉积量下的台阶

为了进一步了解 AFM 形貌图中高度的分布，对于上述几个不同沉积量下的量子点 AFM 图我们做出了 Abbott-Firestone 曲线，如图 5-44 所示，该曲线描述了 AFM 图的不同高度的区域占整个图形面积的比例，虽然不能直接反映量子点的高度这一信息，但是从上面的图中可以得知不同沉积量下整个 AFM 图中不同高度所占的比例，从而可以侧面反映出随着沉积量的提高量子点的高度分布的变化。这样从图 5-44 中我们知道，随着量子点沉积量的提高，AFM 图中的高度分布更为集中，这侧面反映了量子点的高度分布较沉积量小的时候更加集中，即量子点的尺寸更加均匀，并且从曲线中看出，随着沉积量的增加，AFM 图中较高部分所占的比例增加，说明量子点的高度增大。

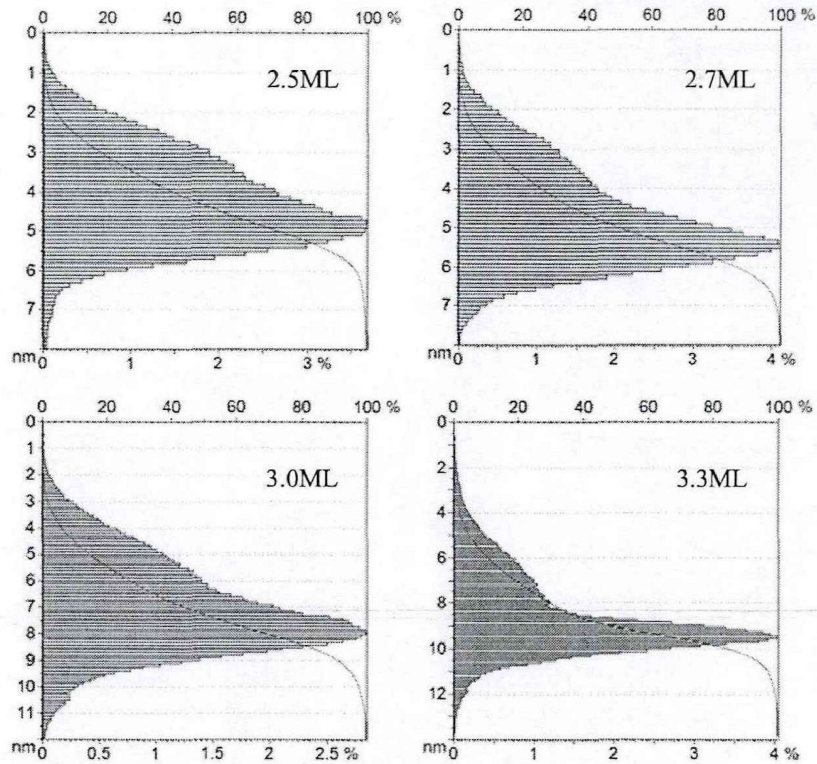


图 5-44 不同沉积量下的 AFM 图的 Abbott-Firestone 曲线

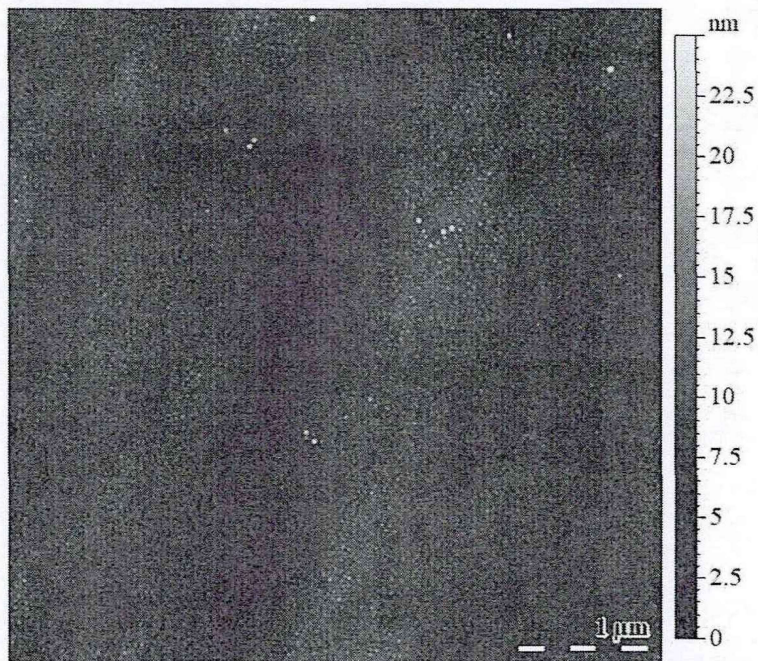


图 5-45 3.3ML 沉积量下  $5 \times 5 \mu\text{m}^2$  AFM 图

我们还对 3.3ML 沉积量下的量子点进行了  $5 \times 5 \mu\text{m}^2$  下的原子力显微镜测试，测试结果如图 5-45，可以看出，样品表面存在着一定的起伏，在整个  $5 \times 5 \mu\text{m}^2$  下，没有团簇的形成，只有极少数的大岛存在，且这些少数的大岛的横向尺寸并不大，并且从  $5 \times 5 \mu\text{m}^2$  下的 AFM 图也可以看出，量子点的分布具有一定的取向性。

在同等沉积量 (2.7ML) 下, GaAs 基和 Si 基多层量子点的 PL 谱如图 5-46 所示, GaAs 基样品的结构与 Si 基样品的区别是, 其 GaAs 缓冲层为 300nm 厚, 并且 AlGaAs 层和多层量子点之间的 GaAs 层是在 500°C 下生长的 200nm 厚度的 GaAs。从比较图中我们可以看出, Si 基量子点的发光强度要弱于 GaAs 基量子点, 就强度而言, Si 基量子点约为 GaAs 基量子点的 87%, 这说明由于穿透位错的少量存在以及表面起伏的影响, Si 基量子点的发光特性受到了轻微的影响, Si 基多层量子点和 GaAs 基多层量子点的峰值波长很接近, 分别为 1220nm 和 1228nm, 说明量子点沉积以及成核的情况相当, 半高宽分别为 94nm (78meV) 和 107nm (90meV), Si 基量子点的半高宽略宽于 GaAs 基, 表明其不均匀性更加明显。

对于不同沉积量的 Si 基多层量子点结构的 PL 谱, 我们也进行了比较。如图 5-47 所示, 随着量子点的沉积量从 2.5ML 增加至 3.3ML, 其发光中心波长明显红移, 峰值强度明显增加。在沉积量为 2.5ML 时, PL 的峰值波长在 1195nm 处, 光谱半高宽为 117nm, 在沉积量为 3.3ML 时, PL 的峰值波长达到 1280nm, 半高宽减小到到 78nm, 即 60meV, 这对于宽谱发光器件例如超辐射管仍然非常有利。同时这也说明随着随着沉积量的增加, 量子点的高度增加, 高度分布更加集中。此外, 我们还在一定的激发功率范围内, 改变激光的激发功率测试了 3.3ML 的 Si 基多层量子点的 PL 谱。如图 5-48, 随着激发功率的增大量子点的发光强度增大, 而波长一直保持在 1280nm, 且半高宽基本不变, 一直保持在 60meV, 并且由于激发光的功率密度不大, 未激发出量子点的激发态。

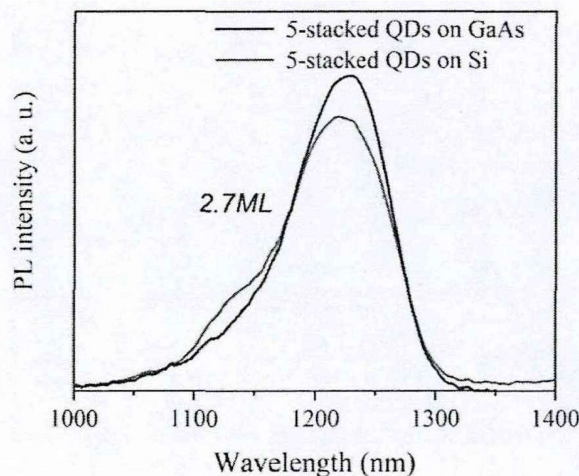


图 5-46 GaAs 基和 Si 基量子点 PL (2.7ML)

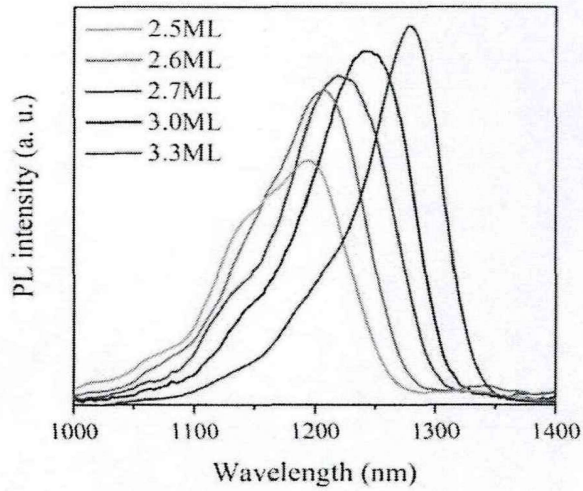


图 5-47 Si 基量子点 PL 随沉积量的变化

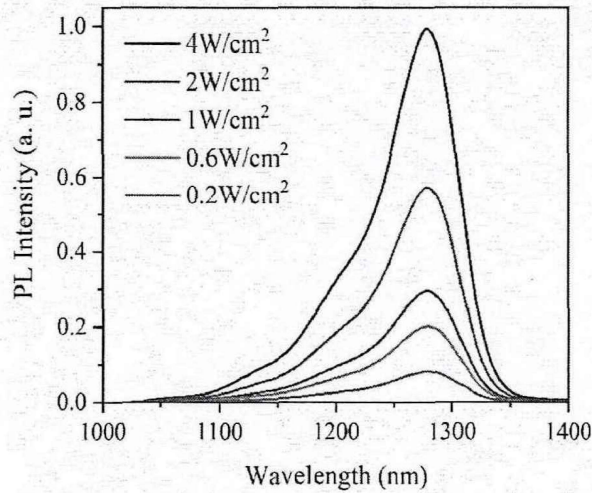


图 5-48 Si 基量子点 PL 随激发功率的变化 (3.3ML)

此外，我们观察到前面的 PL 图中 2.5ML 沉积量下的 PL 半高宽较宽，且在其光谱左侧存在着“肩膀”，由于此时激发功率较低，且在上面变化功率测得的光谱中没有出现明显的激发态，此时 2.5ML 的光谱展宽的现象应该也非激发态，为了解释此现象，我们利用 AFM 图对该沉积量下的量子点的高度分布进行了统计，统计结果如图 5-49 所示，从图中可以看出，在沉积量为 2.5ML 的时候，量子点的高度主要集中在 3nm 附近，且 3-3.5nm 范围内的点的个数最多，在整个形貌图中所占的比例最大，2.5 到 3nm 其次，高度的分布与 PL 所展示的曲线形状相匹配，这说明，此时 2.5ML 的量子点的 PL 谱半高宽较宽且谱型中存在“肩膀”是由于量子点的高度分布较宽造成的。

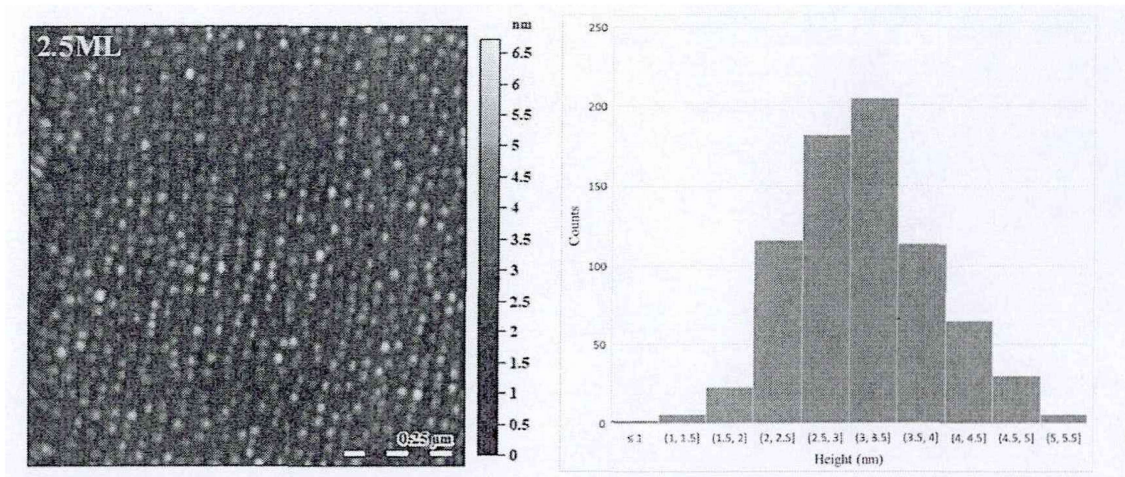


图 5-49 2.5ML 时量子点的 AFM 图及高度分布

为了进一步了解硅基量子点样品的发光特性，我们对 3.3ML 下的量子点样品进行了 PL mapping 的测试，即测试了面积大约为两英寸的四分之一的样品的 PL 的峰值波长分布以及光谱半高宽分布，如图 5-50 所示（图中不规则形状的图形表示样品，由于测试中样品之外的位置数据无效，却对右侧的颜色条造成了影响，使得每一种颜色所代表的波长或者谱宽值范围较宽，无法更加精细地了解峰值波长和谱宽的分布）。从图中我们看出，该样品的波长及光谱半高宽的均匀性较好，峰值波长均分布在 1289nm 所对应的颜色处附近，结合前述 PL 曲线我们知道，主要分布在 1280nm 左右。半高宽均分布在 74.5nm 至 92.6nm 之间，结合前述的 PL 曲线我们知道，主要分布在 80nm 左右，总体而言，该多层量子点样品的均匀性较好，且波长均在 1.3 $\mu\text{m}$  波段，可以作为硅基量子点光源（激光器和超辐射管）的较为理想的有源区，然而鉴于时间以及设备原因，我们暂未完成后续的硅基器件生长及制备工作，不过本工作为后续硅基器件打下了一定的基础。

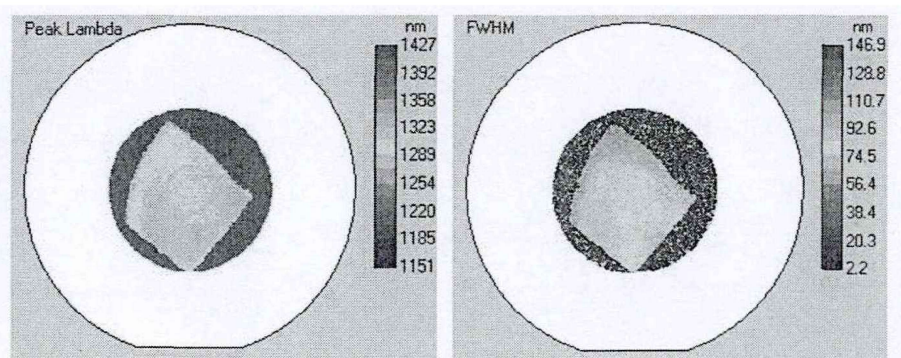


图 5-50 3.3ML 硅基量子点的峰值波长及谱宽分布

## 5.4 本章小结

本章是 III-V 族量子点材料及器件研究，在本章中我们进行了 GaAs 基 InAs 自组织量子点材料的外延生长，然后基于此典型零维的量子点进行了激光器及超

辐射管的制备。首先我们进行了 GaAs 基 InAs 量子点的 MOCVD 外延生长的研究工作，分析了各种生长条件对于 InAs 量子点的影响，包括多层量子点每层的一致性、五三族比、InGaAs 底层和盖层等；之后介绍了 GaAs 基 InAs 量子点器件结构的外延生长，包括 AlGaAs 下限制层的生长、接触层的生长、外延层的掺杂调节等。然后进行了 GaAs 基 InAs 量子点发光器件的研究，包括利用 MOCVD 生长的量子点激光器、利用 MBE 生长的量子点激光器以及量子点超辐射管等。为后续进一步制备性能更加优异的介于零维到三维间的分数维度超辐射管提供了技术支持。

此外，还在 GaAs 基 InAs 量子点材料外延生长的基础上，适应硅基光电子器件发展的需要，开展了硅基 InAs/GaAs 量子点材料的外延生长。首先进行了硅上 GaAs 的异变外延，采用三步法在硅上进行了高质量 GaAs 层的外延；然后将多层 InAs 量子点的自组织生长与硅基 GaAs 异变外延相结合，进行了硅基高质量多层 InAs 量子点的生长研究，比较了不同生长时间下硅基 InAs 量子点的发光性能、量子点形貌等，生长出了发光波长位于 1.3 微米波段的 Si 基异变多层量子点，为后续利用 MOCVD 生长硅衬底上的分数维度器件打下了一定的基础。

## 参考文献

- [1] Dabbousi B O, Rodriguez-Viejo J, Mikulec F V, et al. (CdSe) ZnS core-shell quantum dots: synthesis and characterization of a size series of highly luminescent nanocrystallites[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 1997, 101(46): 9463-9475.
- [2] Handbook of self assembled semiconductor nanostructures for novel devices in photonics and electronics[M]. Elsevier, 2011.
- [3] 程成. 纳米光子学及器件[M]. 科学出版社, 2013.
- [4] Wu J, Chen S, Seeds A, et al. Quantum dot optoelectronic devices: lasers, photodetectors and solar cells[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2015, 48(36): 363001.
- [5] Liu A Y, Srinivasan S, Norman J, et al. Quantum dot lasers for silicon photonics[J]. *Photonics Research*, 2015, 3(5): B1-B9.
- [6] Zhang Z Y, Hogg R A, Lv X Q, et al. Self-assembled quantum-dot superluminescent light-emitting diodes[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2010, 2(2): 201-228.
- [7] Maimon S, Finkman E, Bahir G, et al. Intersublevel transitions in InAs/GaAs quantum dots infrared photodetectors[J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 73(14): 2003-2005.

- [8] Kim E T, Madhukar A, Ye Z, et al. High detectivity InAs quantum dot infrared photodetectors[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(17): 3277-3279.
- [9] Bailey C G, Forbes D V, Raffaele R P, et al. Near 1 V open circuit voltage InAs/GaAs quantum dot solar cells[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(16): 163105.
- [10] Hubbard S M, Cress C D, Bailey C G, et al. Effect of strain compensation on quantum dot enhanced GaAs solar cells[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(12): 123512.
- [11] 贾志刚, 异质兼容集成微系统的实现途径与技术的研究[D], 北京邮电大学, 2014.
- [12] 田芑, 黄黎蓉, 费淑萍, 等. 不同盖层对 InAs/GaAs 量子点结构和光学性质的影响[J]. *物理学报*, 2010, 59(8): 5738-5742.
- [13] Sears K, Tan H H, Wong-Leung J, et al. The role of arsine in the self-assembled growth of In As/ Ga As quantum dots by metal organic chemical vapor deposition[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 99(4): 044908.
- [14] Lee Y, Ahn E, Kim J, et al. Complete suppression of large InAs island formation on GaAs by metal organic chemical vapor deposition with periodic AsH<sub>3</sub> interruption[J]. *Applied physics letters*, 2007, 90(3): 033105.
- [15] Tatebayashi J, Arakawa Y, Hatori N, et al. InAs/GaAs self-assembled quantum-dot lasers grown by metalorganic chemical vapor deposition—Effects of postgrowth annealing on stacked InAs quantum dots[J]. *Applied physics letters*, 2004, 85(6): 1024-1026.
- [16] 陆大成, 段树坤. 金属有机化合物气相外延基础及应用[M]. 科学出版社, 2009.
- [17] Liu H, Wang Q, Li Z, et al. 1.16  $\mu\text{m}$  InAs/GaAs Quantum Dot Laser grown by Metal Organic Chemical Vapor Deposition[J]. *Acta Physica Polonica, A.*, 2018, 134(2).
- [18] Tatebayashi J, Hatori N, Ishida M, et al. 1.28  $\mu\text{m}$  lasing from stacked InAs/ GaAs quantum dots with low-temperature-grown AlGaAs cladding layer by metalorganic chemical vapor deposition[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(5): 053107.
- [19] Lever P , Buda M , Tan H H , et al. Investigation of the Blueshift in Electroluminescence Spectra From MOCVD Grown InGaAs Quantum Dots[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2004, 40(10):1410-1416.
- [20] Passaseo A, De Vittorio M, Todaro M T, et al. Comparison of radiative and structural properties of 1.3  $\mu\text{m}$  In<sub>x</sub>Ga<sub>(1-x)</sub>As quantum-dot laser structures grown by metalorganic chemical vapor deposition and molecular-beam epitaxy: Effect on the

- lasing properties[J]. Applied physics letters, 2003, 82(21): 3632-3634.
- [21] Markus A , Chen J X , C. Paranthoën, et al. Simultaneous two-state lasing in quantum-dot lasers[J]. Applied Physics Letters, 2003, 82(12):1818-1820.
- [22] Asryan L V, Grundmann M, Ledentsov N N, et al. Effect of excited-state transitions on the threshold characteristics of a quantum dot laser[J]. IEEE journal of quantum electronics, 2001, 37(3): 418-425.
- [23]王霆, 张建军, Huiyun Liu. 硅基 III-V 族量子点激光器的发展现状和前景[J]. 物理学报, 2015, 64(20):19-26.
- [24]Liu A Y, Srinivasan S, Norman J, et al. Quantum dot lasers for silicon photonics[J]. Photonics Research, 2015, 3(5): B1-B9.
- [25]Chen S, Li W, Wu J, et al. Electrically pumped continuous-wave III–V quantum dot lasers on silicon[J]. Nature Photonics, 2016, 10(5): 307.
- [26]Chen S, Tang M, Jiang Q, et al. InAs/GaAs quantum-dot superluminescent light-emitting diode monolithically grown on a Si substrate[J]. Acs Photonics, 2014, 1(7): 638-642.
- [27]Wu J, Chen S, Seeds A, et al. Quantum dot optoelectronic devices: lasers, photodetectors and solar cells[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2015, 48(36): 363001.
- [28]Chen S, Liao M, Tang M, et al. Electrically pumped continuous-wave 1.3  $\mu\text{m}$  InAs/GaAs quantum dot lasers monolithically grown on on-axis Si (001) substrates[J]. Optics express, 2017, 25(5): 4632-4639.
- [29]Jung D, Norman J, Kennedy M J, et al. High efficiency low threshold current 1.3  $\mu\text{m}$  InAs quantum dot lasers on on-axis (001) GaP/Si[J]. Applied Physics Letters, 2017, 111(12): 122107.
- [30]Wang Y, Wang Q, Jia Z, et al. Three-step growth of metamorphic GaAs on Si (001) by low-pressure metal organic chemical vapor deposition[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena, 2013, 31(5): 051211.
- [31]Liu H, Wang Q, Chen J, et al. MOCVD growth and characterization of multi-stacked InAs/GaAs quantum dots on misoriented Si (100) emitting near 1.3  $\mu\text{m}$ [J]. Journal of Crystal Growth, 2016, 455: 168-171.
- [32]Wang J, Ren X, Deng C, et al. Extremely low-threshold current density InGaAs/AlGaAs quantum-well lasers on silicon[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(15): 3163-3169.

- [33] Sears K, Tan H H, Wong-Leung J, et al. The role of arsine in the self-assembled growth of InAs/ GaAs quantum dots by metal organic chemical vapor deposition[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 99(4): 044908.
- [34] Kitamura M, Nishioka M, Oshinowo J, et al. In situ fabrication of self-aligned InGaAs quantum dots on GaAs multiatomic steps by metalorganic chemical vapor deposition [J]. *Applied physics letters*, 1995, 66(26): 3663-3665.
- [35] Li L, Guimard D, Rajesh M, et al. Growth of InAs/Sb: GaAs quantum dots on silicon substrate with high density and efficient light emission in the 1.3  $\mu\text{m}$  band [J]. *Applied physics letters*, 2008, 92(26): 3105.

## 第六章 总结与展望

### 6.1 总结

本论文以半导体低维异质结构为出发点, 依托科技部国际合作项目以及国家自然科学基金项目, 在分数维度电子态系理论方面取得了新的进展, 在实验方面重点围绕 III-V 族量子阱和量子点展开, 进行了二维的量子阱、零维的量子点等典型整数维度下激光器及超辐射管的研究工作。以 III-V 族低维异质结构及其发光器件的研究为核心, 在实验室前期研究工作的基础之上, 进行了 InP 基 InGaAsP 量子阱、InP 基 AlGaInAs 量子阱, GaAs 基 InGaAs 量子阱以及 GaAs 基 InAs 量子点等 III-V 族材料及相关的激光器、超辐射管的研究, 还进行了 Si 基 InAs 量子点的外延生长。这些研究工作不仅为 MOCVD 生长量子点器件积累了技术经验, 还为后续进行分数维度 (譬如从二维到三维) 超辐射管或其他相关器件的研究奠定了基础。主要的研究结果包括:

研究并比较了在不同线型 (指数线型和洛伦兹线型) 的弥散率密度函数的情形下电子态密度的变化, 针对指数线型和洛伦兹线型这两种弥散线型对电子态密度进行了计算分析, 比较了能级弥散宽度值不同时电子态密度曲线, 并进一步阐述了实际情况中的复合弥散线型。

制备了 InP 基  $1.3\mu\text{m}$  InGaAsP 啁啾多量子阱发光器件, 该结构中有源区由六周期啁啾 InGaAsP 量子阱组成, 基于此结构制备成功了室温连续工作的激光器与超辐射管, 其中激光器阈值电流密度为  $0.8\text{kA}/\text{cm}^2$ , 激光波长位于  $1.37\mu\text{m}$ ; 采用弯曲波导的超辐射管的光谱宽度为  $27\text{nm}$  ( $350\text{mA}$ ), 发光波长在  $1.34\text{-}1.37\mu\text{m}$ , 输出功率  $5.9\text{mW}$ 。

制备了 InP 基 AlGaInAs 多量子阱的激光器及超辐射管, 其中激光器阈值电流密度为  $460\text{A}/\text{cm}^2$ , 激光波长位于  $1.3\mu\text{m}$ ; 采用弯曲波导的超辐射管光谱宽度在  $10\text{nm}$  左右, 随着电流的增加谱宽变化不明显, 中心波长位于  $1.3\mu\text{m}$  处, 输出功率可达  $30\text{mW}$  以上。

利用 MOCVD 生长并制备出了室温连续工作的 GaAs 基 InGaAs/GaAs 量子阱激光器与超辐射管, 且比较了不同波导形状对于超辐射器件性能的影响。其中激光器阈值电流密度为  $450\text{A}/\text{cm}^2$ , 激光波长位于  $1.1\mu\text{m}$  处; 采用弯曲波导的超辐射管光谱宽度在  $10\text{nm}$  左右, 中心波长在  $1.1\mu\text{m}$  处, 输出功率可达  $20\text{mW}$  以上。

深入开展了 InAs 量子点的 MOCVD 生长优化研究, 比较了多种因素对于量子点的影响, 最终获得了面密度高、表面形貌好 (无弛豫大岛)、光致发光性能

优良且波长接近 1.3 微米的多层堆叠 InAs 量子点结构。并制备了量子点激光器，获得了在室温下可以连续激射的量子点激光器器件。其中无偏 GaAs 衬底上量子点激光器激射波长位于  $1.19\mu\text{m}$ ，阈值电流密度  $700\text{A}/\text{cm}^2$ ，输出功率超过  $15\text{mW}$ ；偏角 GaAs 衬底上量子点激光器激射波长位于  $1.16\mu\text{m}$  处，阈值电流密度为  $950\text{A}/\text{cm}^2$ ，饱和输出功率达  $70\text{mW}$  以上。

利用 MBE 生长的两种 InAs 量子点结构进行了量子点激光器和超辐射管的制备，基于第一种结构制备的激光器激射波长位于  $1.3\mu\text{m}$  处，阈值电流密度低至  $117\text{A}/\text{cm}^2$ ，输出功率达  $20\text{mW}$  以上；采用弯曲波导的超辐射管在室温脉冲条件下工作，发光波长位于  $1.3\mu\text{m}$  处，光谱宽度在  $20\text{nm}$  以上，对应的功率带宽积达  $200\text{mW}\cdot\text{nm}$  以上。基于第二种结构制备的激光器激射波长位于  $1.27\mu\text{m}$ ，阈值电流密度低至  $118\text{A}/\text{cm}^2$ ，输出功率可达  $90\text{mW}$  以上；采用镀膜的超辐射管在室温连续电流下工作，光谱宽度在  $10\text{nm}$  左右，功率在  $3\text{mW}$  以上。

研究了 Si 衬底上多层 InAs 量子点的 MOCVD 生长，对 Si 基多层量子点进行了优化实验。将 GaAs/Si “三步法” 异变外延生长技术与 GaAs 基多层量子点生长技术相结合，在利用 MOCVD 设备生长获得高质量 Si 基 GaAs 外延层的基础上生长了多层量子点结构，生长出了发光波长位于 1.3 微米波段的 Si 基异变多层量子点，通过原子力显微镜测试发现生长出的异变量子点形貌很好，并且密度较高 ( $500/\mu\text{m}^2$  以上)，通过光致发光谱测试发现其发光性能较好。

## 6.2 展望

在本论文已经进行的研究工作的基础上，还可开展以下的研究工作：

一是能级弥散及分数维度电子态系理论的进一步完善。在本文计算了不同弥态允率密度函数线型的基础上，进一步计算弥态允率密度函数为高斯线型时的情况，并且还需计算实际情况中复合弥散线型（例如洛伦兹—指数线型）的电子态密度曲线。此外，在本文计算了二维的电子态密度引入弥散的基础上，进一步计算其他的维度引入弥散后电子态密度曲线的具体变化等。

二是制备介于二维和三维之间典型分数维度超辐射管，通过调整有源区厚度，制备出分数维度的超辐射管，进而比较分数维度与整数维度下的超辐射管性能，确定超辐射管性能最佳时对应的有源区厚度。并且在本文中 InP 基超辐射管的基础上，进一步考虑超辐射管的光谱调制度以及偏振度等性能，通过吸收窗口、端面镀膜等手段进一步降低端面反射率，从而制备出低光谱调制度的超辐射管；通过波导形状调整、有源区增益设计等手段，调整器件的 TE 和 TM 增益，制备出低偏振度的超辐射管。

三是量子点超辐射管，在本文的量子点超辐射管的基础上，进一步优化量子点结构，提高量子点区域的发光性能，通过对量子点区域进行啁啾等手段，拓宽有源区的发光谱，进而制备出室温连续工作的宽光谱量子点超辐射管。

四是进行硅基量子点器件的制备，在本文的硅基多层量子点基础上，使用 MOCVD 或者 MBE 生长硅基量子点器件结构，进而制备出硅基量子点激光器及超辐射管。

## 附录

## 附录 1: 缩略词汇

GaAs	Gallium Arsenide	砷化镓
InAs	Indium Arsenide	砷化铟
InGaAs	Indium Gallium Arsenide	砷化铟镓
InP	Indium Phosphide	磷化铟
InGaAsP	Indium Gallium Arsenide Phosphide	铟镓砷磷
AlGaAs	Aluminum Gallium Arsenide	砷化铝镓
AlGaInAs	Aluminum Gallium Indium Arsenide	砷化铝镓铟
MOCVD	Metal-organic Chemical Vapor Deposition	金属有机化学气相沉积
MBE	Molecular Beam Epitaxy	分子束外延
PL	Photoluminescence	光致发光
EL	Electroluminescence	电致发光
AFM	Atomic Force Microscopy	原子力显微镜
XRD	X-ray Diffraction	X射线衍射
Ecv	Electrochemical capacitance-voltage	电化学电容电压
SEM	Scanning Electron Microscope	扫描电子显微镜
TEM	Transmission Electron Microscope	透射电子显微镜
EPD	Etch Pit Density	腐蚀坑密度
PIV	Power-Current-Voltage	功率-电流-电压
DOP	Degree of Polarization	偏振度
QW	Quantum Well	量子阱
QD	Quantum Dot	量子点
SLD	Superluminescent Diode	超辐射管
DWELL	Dots-in-a-well	阱中点
ML	Monolayer	单原子层
TDD	Threading Dislocation Density	穿透位错密度

## 附录 2: 第三章中计算所用参数

光速	$c=2.99792458 \times 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
自由电子质量	$m_0=9.11 \times 10^{-31} \text{kg}$
温度	$T=300 \text{K}$
电子电荷	$e=1.602176462 \times 10^{-19} \text{C}$
普朗克常数	$h=6.62559 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$
玻尔兹曼常数	$k=1.3806505 \times 10^{-23} \text{J} \cdot \text{K}^{-1}$
GaAs 的带隙宽度	$E_g=1.42 \text{eV}$
GaAs 中电子有效质量	$m_n=0.068 \times m_0$
$1 \text{\AA}=0.1 \text{nm}=10^{-10} \text{m}$	
$1 \text{eV}=1.60217733 \times 10^{-19} \text{J} \approx 1.6 \times 10^{-19} \text{J}$	

## 致谢

念去来、岁月如流，读博久、感激盈。

感谢导师任晓敏教授，依稀记得，与任老师初次见面是在六年前的夏天，能够成为任老师的学生，可以说是机缘巧合，更是我的幸运。任老师对于科研不懈的、忘我的、专注的追求是我学习的榜样，任老师深厚渊博的知识学问、严谨自由的治学态度、宽广发散的思维视野，都值得我去不断学习，尤其是任老师对于科学研究的审视与探索精神，更是让我深深地佩服。在此，我想借用贾志刚师兄的一句话，不求悟其所成，惟愿承其风骨。

感谢导师王琦教授，王老师是我科研路上的领路人，王老师认真刻苦、谦虚谨慎的研究作风深深地感染并影响着我。不管是工作中还是生活上，遇到问题时与王老师的讨论总能给予我启发，可谓良师益友。在此毕业之际，祝愿王老师家庭幸福美满，工作顺利！

感谢实验室负责人黄永清教授，黄老师统筹管理着实验室的各个方面，认真细致，为我们营造了舒适的实验室氛围。在日常的学习研究与生活上，黄老师也是不吝关怀。感谢课题组的张霞老师、刘凯老师、段晓峰老师、王俊老师、颜鑫老师在我读博期间给予的帮助，感谢蔡世伟老师在实验中对于各种设备操作维护上的指导与帮助。

感谢加拿大麦克马斯特大学的李洵老师，在加一年，多蒙照料。李洵老师广博而又深厚的理论知识、前瞻而又务实的科学态度深深地感染并影响着我，是我学术道路上的一盏灯塔。

感谢实验室已经毕业的毛国明、费嘉瑞、胡海洋、陈庆涛、高云霞、贺云瑞、陈佳、刘冰飞、王贤坤、李智明、米晴、侯旭等师兄师姐师弟师妹们在学习或者生活中对我的帮助；感谢柴昭尔、臧思瑶、王龙等组内的师弟师妹们多年来给予的支持和帮助；感谢一同毕业的马晓凯、刘涛、李邦等同学在博士生涯中的帮助；感谢实验室内其他同学们的帮助。

感谢半导体所的苏向斌、魏思航等同学在实验上给予的帮助。

感谢在加期间孙丽、郝丽君、孟凡旺、陈兔翊夫妇、赵桑之夫妇等等许多同学给予的帮助。感谢树智、宋治、世杰、吕凯、刘彬、煜喆、等同学多年来的帮助与鼓励，当我遇到困难时，总能得到你们不吝的关心与鼓励。感谢魏帅在我撰写学位论文的这段时间内温暖的鼓励与陪伴。

感谢自己在曾经数次想要放弃时的挣扎与坚持，愿不忘初心，能在科学的道路上砥砺前行。感谢我的父母家人一直以来对我的支持与关爱。

最后，一并感谢读博期间所有给予我帮助的老师 and 同学们，祝愿你们生活幸福。

## 攻读博士学位期间发表的学术论文及申请的专利

### 期刊论文

#### 第一作者论文

- [1] **Hao Liu**, Qi Wang, Jia Chen, Kai Liu, Xiaomin Ren. "MOCVD growth and characterization of multi-stacked InAs/GaAs quantum dots on misoriented Si (100) emitting near 1.3  $\mu\text{m}$ ". *Journal of Crystal Growth*, Vol. 455, pp: 168-171, 2016. [SCI 检索, 署名单位: 北京邮电大学]
- [2] **Hao Liu**, Qi Wang, Zhiming Li, Jia Chen, Kai Liu, Xiaomin Ren. "1.16  $\mu\text{m}$  InAs/GaAs Quantum Dot Laser grown by Metal Organic Chemical Vapor Deposition". *Acta Physica Polonica A*, Vol. 134(2), pp: 508-511, 2018. [SCI 检索, 署名单位: 北京邮电大学]

#### 非第一作者论文

- [1] Qi Wang, Yunxia Gao, Guoming Mao, **Hao Liu** and Xiaomin Ren. "Micro-photoluminescence and micro-Raman investigations of rolled-up InGaAs/GaAs microtubes monolithically integrated on silicon", *Applied Physics Letters*, Vol. 107, No.8, 2015. [SCI 收录, 署名单位: 北京邮电大学]
- [2] Yunxia Gao, Qi Wang, Zhihong Pan, Xiankun Wang, Guoming Mao, **Hao Liu** and Xiaomin Ren. "Optical studies of free-standing GaAs/AlGaAs single quantum well (SQW) microtubes: A comparison with InGaAs/GaAs bilayer microtubes", *Materials Letters*, Vol. 166, pp. 263-266, 2016. [SCI 收录, 署名单位: 北京邮电大学]
- [3] Guoming Mao, Qi Wang, Zhaoer Chai, **Hao Liu**, Kai Liu and Xiaomin Ren. "Realization of uniaxially strained, rolled-up monolayer CVD graphene on a Si platform via heteroepitaxial InGaAs/GaAs bilayers", *RSC advances*, Vol. 7, No. 24, pp. 14481-14486, 2017. [SCI 收录, 署名单位: 北京邮电大学]
- [4] Guoming Mao, Qi Wang, Zhaoer Chai, Jiawei Cao, **Hao Liu**, Xiaomin Ren, Nikolai A.Maleev, Alexey P.Vasil'ev, Alexey E.Zhukov and Victor M.Ustinov. "Room temperature observation of optical modes in transferred rolled-up InGaAs/GaAs quantum dot microtube with AlGaAs confining layers", *materials science in semiconductor processing*, Vol. 79, pp. 20-23, 2018 [SCI 收录, 署名单位: 北京邮电大学]

- [5] Xu Hou, Qi Wang, Guoming Mao, **Hao Liu**, Rongdi Yu, Xiaomin Ren. “Periodic silver nanocluster arrays over large-area silica nanosphere template as highly sensitive SERS substrate”, *Applied Surface Science*, Vol. 437, pp. 92-97, 2018 [SCI 收录, 署名单位: 北京邮电大学]
- [6] Zhaoer Chai, Qi Wang, Jiawei Cao, Guoming Mao, **Hao Liu**, Xiaomin Ren, Nikolai A. , Maleev, Alexey P. Vasil’ev, Alexey E. Zhukov, Victor M. Ustinov. “Optically pumped lasing in a rolled-up dot-in-a-well (DWELL) microtube via the support of Au pad”, *Applied Physics B-Lasers and Optics*, Vol. 124, No. 2, 2018. [SCI 收录, 署名单位: 北京邮电大学]

## 学术会议

- [1] **Hao Liu**, Qi Wang, Jia Chen, Guoming Mao, Kai Liu, Yongqing Huang, Xiaomin Ren. “Near 1.3 $\mu\text{m}$  Broadband Photoluminescence Emission from Multilayer InAs/InGaAs/GaAs Dots-in-a-Well Structures Grown by MOVPE”, 18<sup>th</sup> International Conference on Metal Organic Vapor Phase Epitaxy, San Diego, 2016.7.10-2016.7.15. [张贴海报]
- [2] 刘昊, 王琦, 陈佳, 李智明等, “利用 MOCVD 生长室温连续激光 InAs/GaAs 量子点激光器”, 第十四届全国 MOCVD 学术会议, 延边, 2016.8.16-2016.8.19. [口头报告]
- [3] Xin Gu, Qi Wang, Xiaomin Ren, **Hao Liu**, Guoming Mao, Shiwei Cai, Xia Zhang and Yongqing Huang. “DWELL based laser structure grown by LP-MOCVD using InGaP as p-doped cladding layer”, *Asia Communications and Photonics Conference-2015*. [EI 收录, 署名单位: 北京邮电大学] [口头报告]
- [4] Xiaomin Ren, Xiaofeng Duan, Xiaolong Liu, **Hao Liu**. “On the Validity of the Newly Proposed Bivergentum Mechanics: One Ready-for-Long Evidence and Two Intriguing Predictions”, *Asia Communications and Photonics Conference-2013*. [EI 收录, 署名单位: 北京邮电大学]
- [5] Long Wang, Qi Wang, **Hao Liu**, Guang Yang, Kai Liu, Xiaomin Ren. “1.34  $\mu\text{m}$  InGaAsP/InP MQW Superluminescent Diodes with J-shaped Ridge Waveguide”, *Asia Communications and Photonics Conference-2018*. [EI 收录, 署名单位: 北京邮电大学]
- [6] Zhaoer Chai, Qi Wang, Haiqiao Ni, **Hao Liu**, Jiawei Cao, Yunxuan Zhu, Kai Liu, Xiaomin Ren. “1.3  $\mu\text{m}$  whispering gallery modes observed in a Si-based rolled-up InAs/GaAs bilayer quantum dot (BQD) microtube at room-temperature”, *Asia*

Communications and Photonics Conference-2018. [EI 收录, 署名单位: 北京邮电大学]

## 申请专利

[1] 一种超辐射发光二极管的优化方法, 201711189391 .6, 第三发明人, 实审中。