

文章编号: 1000-7032(2023)04-0627-07

高应变 InGaAs/GaAs 多量子阱中的局域态问题

王曲惠^{1,2}, 王海珠^{1,2}, 王 骄^{1,2}, 马晓辉^{1,2*}

(1. 长春理工大学 高功率半导体国家重点实验室, 吉林 长春 130022;
2. 长春理工大学 重庆研究院, 重庆 401135)

摘要: 针对高应变 InGaAs/GaAs 多量子阱中存在的局域态问题, 利用金属有机化合物气相外延(MOCVD)技术, 设计并生长了五周期的 $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}$ 高应变多量子阱材料。通过原子力显微镜(AFM)和变温光致发光(Photoluminescence, PL)测试, 发现量子阱内部存在缺陷及组分波动的材料无序性表现, 验证了多量子阱内部局域态的存在及起源。同时发现在不同测试位置, 局域态在低温下对光谱的影响也不同, 分别表现为双峰分布和峰位“S”型变化。这进一步说明材料内部无序化程度不同, 导致局域态的深度也不同。依据温度-带隙关系的拟合, 提出了包含局域态的多量子阱材料的电势分布, 并揭示了局域态载流子和自由载流子的复合机制。并且借助变功率 PL 测试, 研究了在不同激发功率密度下不同深度的局域态的发光特性。

关键词: InGaAs/GaAs 多量子阱; 局域态; 高应变; 金属有机化合物气相外延(MOCVD)
中图分类号: O482.31 **文献标识码:** A **DOI:** 10.37188/CJL.20220375

Localized States of High-strain InGaAs/GaAs Multiple Quantum Wells

WANG Quhui^{1,2}, WANG Haizhu^{1,2}, WANG Jiao^{1,2}, MA Xiaohui^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of High Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Research Institute of Chongqing, Changchun University of Science and Technology, Chongqing 401135, China)
* Corresponding Author, E-mail: mxh@cust.edu.cn

Abstract: In order to study the localized states in high-strain InGaAs/GaAs multiple quantum wells (MQWs), a five-period $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}$ MQWs structure was designed and grown by metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD) technique in this paper. By means of AFM and temperature-dependent PL, the material disorders in MQWs such as defects and component fluctuation were found, and the existence and origin of localized states in MQWs were verified. The influence of the localized states on the spectra at low temperature was different for different measurement positions, exhibiting a bimodal distribution and an “S”-shaped change in peak position, respectively. This further indicated that different disorder within the material led to different depths of localized states. Based on the fitting of the temperature-bandgap relationship, the potential distribution of the MQWs structure containing localized states was proposed, and the recombination mechanism of the localized state carriers and free carriers was revealed. The optical properties of localized states at different depths under different excitation power densities were studied with the help of excitation power-dependent PL measurement.

Key words: InGaAs/GaAs MQWs; localized states; high strain; metal-organic chemical vapor deposition(MOCVD)

收稿日期: 2022-10-23; 修订日期: 2022-11-08

基金项目: 吉林省科技发展计划(20210201089GX); 重庆市自然科学基金(cstc2021jcyj-msxmX1060)

Supported by Jilin Science and Technology Development Plan(20210201089GX); Natural Science Foundation of Chongqing City(cstc2021jcyj-msxmX1060)

1 引 言

半导体激光器具有体积小、重量轻、价格便宜、寿命长、可靠性高、易于集成等优点,适用于工业加工、国防军事、医疗、通讯等领域,现已成为光电子领域的核心器件^[1-2]。高应变 InGaAs/GaAs 多量子阱结构在光电器件中具有广泛的应用,尤其是作为半导体激光器的有源区。因为量子限制效应可以降低器件的阈值电流密度、提高温度稳定性和量子效率等性能,所以,针对高质量高应变 InGaAs/GaAs 多量子阱外延材料的研究具有很高的实用价值和重要的研究意义^[3-7]。

在 InGaAs/GaAs 多量子阱结构中,In 含量的高低可以实现对量子阱结构波长的调节。然而 In 含量越高,InGaAs 材料的晶格常数就越大,与 GaAs 衬底的失配程度也随之加剧。当然,适当的失配带来的应变可以提高 InGaAs/GaAs 量子阱激光器的性能。InGaAs 阱层所承受的双轴压应变和切向张应变会使价带顶部的重空穴带和轻空穴带分裂,从而改变量子阱的能带结构,提高激光器的光学增益、内量子效率、高温特性等,还可以降低器件的阈值电流,使调制带宽变大,线宽变小^[8-9]。而高失配应变的存在则会给量子阱材料外延生长过程中带来许多难题,如原子聚集、组分波动、厚度不均、界面粗糙等^[10-11]。一旦 InGaAs 的外延厚度超出临界厚度,InGaAs 层再也无法以赝晶生长的模式承受巨大的失配应变,材料内部便会产生失配位错等缺陷^[12]。这些材料内部的无序表现会在量子阱结构中引起局部电势波动,产生一个波动的能量位置,即局域态^[13]。当载流子经过时,很有可能被捕获,其运动范围则被限制在局域态中,这些载流子被称为局域化载流子。

研究人员针对不同材料体系量子阱的局域态问题开展了一些研究工作,发现 Sb 原子由于原子粒径较大而引起含量分布不均匀,所以在 GaAs-Sb/GaAs^[14]、GaAsSb/AlGaAs^[15] 量子阱中极易出现局域态。InGaN 的生长过程中发生相分离,也会造成材料内元素含量的波动,在 InGaN/GaN 和 GaInNAs/GaAs 量子阱中引入局域态^[16-19]。这些结果表明量子阱结构中的合金问题,如组分波动、厚度不均等,都会导致局域态的出现。而且在低温下载流子的动量小,陷入局域态后难以摆脱束缚。随着温度和激发功率的变化,局域态对发光谱的

影响也会发生变化。因此,变温和变功率 PL 测试往往被用来研究局域态的性质。

在这些报道中,含有 Sb 或 N 元素的量子阱中的局域态通常位于低于带边几十毫电子伏特的带尾,对于高应变 InGaAs/GaAs 量子阱而言,其局域态深度往往只有几个毫电子伏特^[20],所以在低温光谱中变化相对较小,不易被发现。但是载流子局域化现象的存在必然会影响半导体材料中的复合机制,况且 GaAs 基半导体激光器在长波长器件中仍然具备 InP 基材料无法超越的技术优势^[21]。因此,研究高 In 组分的高应变 InGaAs/GaAs 多量子阱中的局域态仍然是优化高应变 InGaAs/GaAs 多量子阱激光器性能的必要课题。

本文针对这一问题,利用 MOCVD 技术生长了高应变 InGaAs/GaAs 多量子阱材料,通过 AFM、变温 PL 和变功率 PL 测试,验证局域态的存在及发光特性,推演载流子在不同温度和激发功率下的复合行为,并探究其对高应变 InGaAs/GaAs 多量子阱的影响。本文对研究含有局域态的高应变 InGaAs/GaAs 多量子阱材料的发光性能及辐射复合机制具有重要意义。

2 实 验

实验采用德国 Aixtron 公司 200/4 型 MOCVD 设备进行高应变 InGaAs/GaAs 多量子阱的外延生长制备。以三甲基镓(TMGa)和三甲基铟(TMIn)作为 III 族源,砷烷(AsH₃)作为 V 族源,高纯氢气(H₂)作为 III 族源的载气。生长时反应腔室压力维持在 10 kPa (100 mbar),且在富 V 族气体的氛围下进行。

图 1 给出了生长的高应变 InGaAs/GaAs 多量子阱结构示意图,InGaAs/GaAs 多量子阱结构生长在 N 型无偏角的 GaAs 衬底和缓冲层上。在生长前,对衬底在 660 °C 的温度下进行 5 min 的退火处理,以去除表面氧化物。之后将温度降低至 600 °C 生长 500 nm 厚的 GaAs 缓冲层,并维持 600 °C 生长 5 个周期的量子阱结构。其中,每个量子阱结构包括 10 nm 厚的 In_{0.3}Ga_{0.7}As 量子阱层和 20 nm 厚的 GaAs 势垒层,两者的生长速率分别为 0.54 μm/h 和 0.81 μm/h。最后,生长 50 nm 厚的 GaAs 盖层以保护量子阱。生长结束后在 AsH₃ 气体的保护下,将反应室的温度降至室温,以便后续测试表征。

本文生长获得的量子阱材料的表面形貌由原

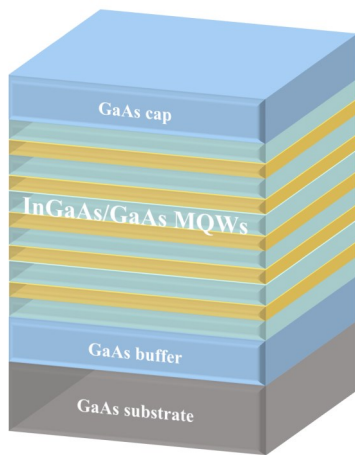


图 1 InGaAs/GaAs 多量子阱结构示意图

Fig.1 Schematic structure of InGaAs/GaAs MQWs

子力显微镜(AFM, Bruker ULTIMODE8)在室温下获取,测试时针尖模式为接触模式。变温及变功率 PL 由 HORIBA iHR550 光谱仪完成,选用 InGaAs 探测器,激发光源为波长为 655 nm 连续输出的半导体激光器,光斑直径为 0.4 cm。样品放置在液氮制冷台上,用带有 CaF₂ 窗口镜片的真空罩保护。变温 PL 测试的温度调节范围为 15~250 K,功率密度维持在 300 mW/cm²,变功率 PL 测试的功率密度调节范围为 5~100 mW/cm²,温度维持

在 15 K。

3 结果与讨论

3.1 AFM 结果与分析

图 2 给出了 InGaAs/GaAs 多量子阱材料表面形貌的测试结果,发现在随机选取的两个测试位置(针尖扫描范围为 10 μm×10 μm)都出现了同样的表面形貌,如图 2(a)、(b)所示。从图中可以看到,两个位置的表面都出现了明显的凸起条纹,在两图中左下角用白色实线粗箭头标注。这表明所生长的量子阱材料内部出现了缺陷,这种缺陷很有可能是量子阱材料为了释放大失配带来的高应变而产生的失配位错所致。此外,从两个测试位置呈现的表面形貌可以推测,除去凸起的条纹,整个表面都存在很多二维岛屿和凹坑交错分布。且参照尺寸颜色条可以看出,凹坑的深度较深,样品表面凹凸不平。为了进一步反映材料的表面形貌,我们对图 2(a)进行了三维显示模式处理,结果如图 2(e)所示。从三维显示图中可以看出,样品表面平整度确实很差,凸起处为二维岛屿相互堆叠形成的局部多层岛屿簇,凹陷处紧邻其畔。在图 2(e)中选取同时存在岛屿簇和凹陷处的位置并放大,如图 2(f)所示,可以很清楚地看到堆叠

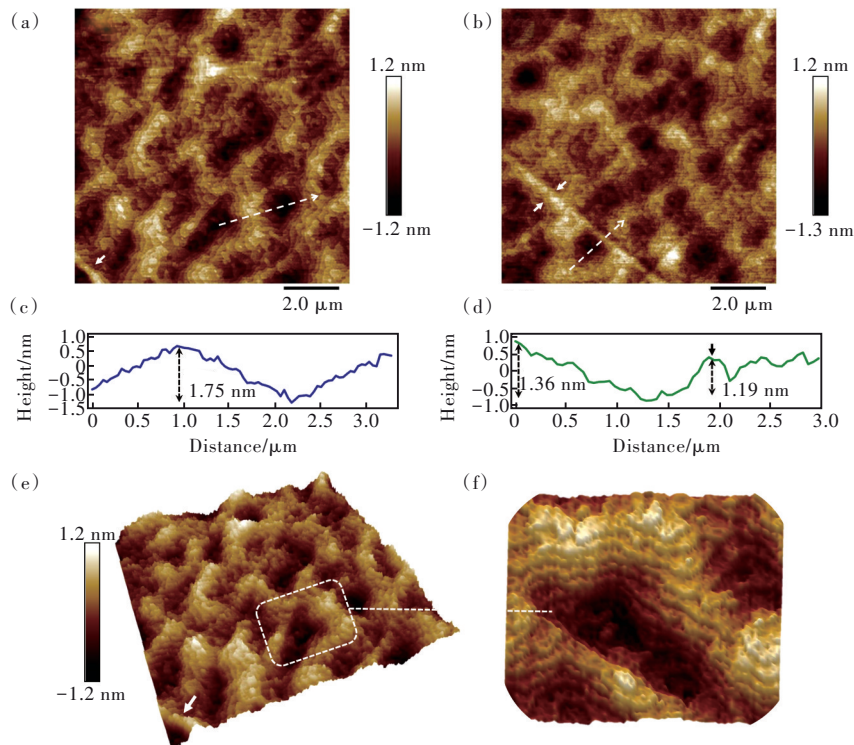


图 2 不同测试位置的 AFM 图

Fig.2 AFM results of different measurement positions

岛簇构成了“多层蛋糕”的形状,从生长方向看二维岛屿的面积越来越小。而且伴随堆叠岛屿形成的是由这些岛屿边缘围成的凹陷“洞穴”。

利用 Nano Analysis 软件,分别在两个测量位置画线获取表面高度数据,画线位置及方向在图 2(a)、(b)中以白色虚线箭头标识,对应的高度数据分别呈现在图 2(c)、(d)中。在图 2(c)中可以很清晰地分辨出图 2(a)中画线起始位置为凹坑,经过若干层二维岛屿,达到该岛簇的最高点。之后高度沿着岛屿簇逐渐下降,到达第二个凹坑,高度差为 1.75 nm。图 2(b)中的画线除了岛屿簇与凹坑外,还经过了凸起条纹,这些在图 2(d)中均有依次呈现,凹坑与相邻的岛屿簇的高度差为 1.36 nm,与另一侧的凸起条纹高度差为 1.19 nm。通过软件还可以得到两个测量位置的表面粗糙度 R_q ,分别为 0.349 nm 和 0.365 nm。可见,样品表面存在大高度差的凹凸处正是造成表面粗糙的原因。

这种形貌表明,该量子阱材料的生长模式并不是理想的台阶流生长模式,样品表面的台阶簇和凹陷更像是原子受局部应变影响下的层状生长模式。有研究报道,在 InGaAs/GaAs 量子阱材料的生长中,InGaAs 层对 In 原子的容纳率是存在上限的^[10]。当生长高应变 InGaAs/GaAs 多量子阱时,需要提供大量 TMIIn 源,材料体系为了降低失配应变从而降低总化学势,会抑制 In 原子的并入,所以整个 InGaAs 层内部会存在 In 组分分布不均匀的情况。如果 In 供应过量,大量的 In 吸附原子滞留在表面,最终形成 In 原子聚集的三维结构(In-cluster)。组分不均匀即内部应力分布不均匀,In 组分高处,即晶格偏大处,而 In 组分低处的晶格常数更接近 GaAs。当生长达到最上层的 GaAs 层时,底下的多量子阱结构已经形成了应力不均匀的表面, Ga 原子则会选择在低 In 组分处成核,而避开会承受更大的应力的 In 组分处,以层状生长的模式形成二维岛屿。随着沉积的继续进行,当二维岛屿的边缘触及到高 In 组分的区域, Ga 原子为了降低应变能会牺牲表面能,在二维岛屿上成核,最终形成了叠层二维岛屿簇,而高 In 组分处最终成为了凹坑。通过以上分析可以知道,材料内部存在着组分波动和缺陷,很有可能引入局域态。然而,AFM 只能获取材料的表面形貌信息,下面将通过 PL 测试对材料的发光性质进行详细探究。

3.2 变温 PL 结果与分析

对 InGaAs/GaAs 多量子阱材料进行变温 PL 测试,随机选取多个位置,得到的 PL 光谱表现出完全不同的特性,可以归纳为如下两种情况,如图 3 位置 A 和 B 的光谱所示。位置 A 获得的光谱在低温范围内包含低能量的肩峰,说明此时材料内部含有两种辐射复合机制。对其每个温度下的光谱进行分峰高斯拟合,发现在 15~80 K 温度范围内是双峰,高能端的峰强更大,一直占据主峰位置;低能端肩峰的峰强则随着温度的升高逐渐减弱,最终猝灭,峰位随温度的升高发生红移。在 90 K 及以上测试温度下光谱是单峰模式,峰位随着温度的升高一直在红移。位置 B 的光谱在所有温度下都是单峰,但是其峰位在 15~30 K 时随着温度的升高而红移;在 30~70 K 的温度区间,峰位随温度的升高发生蓝移;在 70~250 K,峰位随温度的升高再次红移。可以看出,位置 B 的峰位整体随温度的升高呈现“S”型变化。位置 A 光谱中低能量肩峰存在又消失现象,以及位置 B 光谱中峰位的“S”型变化现象,均符合材料中局域态发光 (Localized states emission, LE) 的特征。

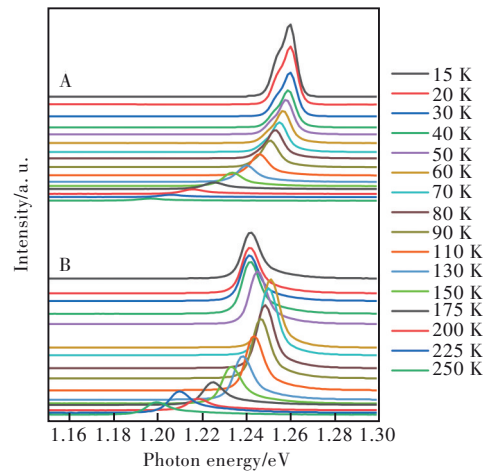


图 3 位置 A 和 B 的变温 PL 测试图

Fig.3 Temperature-dependent PL results of position A and B

图 4 统计了两个位置在不同温度下的发光峰位数据,用彩色图形标识。图 4 中的黑色实线为通过 O'Donnell 与 Chen 优化的 Varshni 公式拟合而成的曲线,该公式常用来分析半导体材料的带边发光规律^[22]:

$$E_g(T) = E_g(0) - S \left\langle \frac{\hbar\omega}{2kT} \right\rangle \left(\coth \frac{\hbar\omega}{2kT} - 1 \right), \quad (1)$$

其中, T 是温度, $E_g(0)$ 是温度为 0 K 时半导体材料的带隙, S 是无量纲耦合常数, $\langle \hbar\omega \rangle$ 是半导体材料

中声子的平均能量。通常来说,半导体的带隙随着温度的升高变小。从位置 A 的拟合结果看,高能量峰与温度的关系与公式拟合得很好,说明该峰为自由载流子(Free carrier emission, FE)在多量子阱材料的导带-价带的带边发光。低能量峰则为局域态发光,其与高能量峰的能量差为该温度下的局域能。因此,在 15 K 时,位置 A 的局域态深度为 5.92 meV。位置 B 的光谱由于“S”型变化,在低温区域与拟合曲线稍有不符。15 K 时拟合得到的带隙与实验测得的发光峰峰位之差即为该温度下位置 B 的局域态深度,为 8.90 meV。可见两位置的局域态深度不同,发光谱随温度变化的规律也不同,说明在 InGaAs/GaAs 多量子阱材料内部引起这两处局域态的原因是不同的。正如 3.1 中对 AFM 测得的表面形貌进行分析得到的结论所述,InGaAs/GaAs 多量子阱材料内部不仅存在缺陷,还存在着 In 和 Ga 组分波动的情况。这些材料内部的无序性出现的位置随机,程度各异,在材料的能带引起的电势波动范围也不同,所以同一 InGaAs/GaAs 多量子阱结构中的局域态的深度有深有浅。

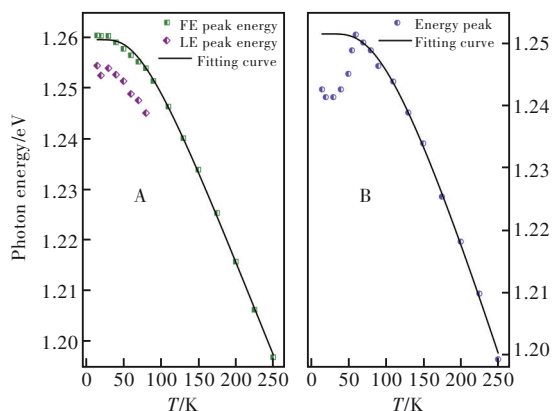


图4 位置 A 和 B 的温度-带隙关系及拟合图

Fig.4 Temperature-dependent peak position and fitting curve of position A and B

根据以上对变温 PL 数据及拟合结果的分析,图 5 给出了 InGaAs/GaAs 多量子阱材料的电势分布情况,图 5(a)~(c)为位置 A,图 5(d)~(g)为位置 B。通过上面的计算得知,位置 A 的局域态深度比位置 B 浅,即位置 A 的局域态对载流子的限制作用比位置 B 弱,能捕获的载流子数目相对较少;所以在低温下,部分载流子被局域态陷阱捕获,没有足够的能量逃离,剩余部分载流子在带边发生复合。因此,低温时位置 A 的光谱同时出现了局

域态载流子与自由载流子的发光峰,如图 5(a)所示。当温度升高时,一些弱局域态中的载流子发生了热逃逸,又被其他强局域态重新捕获,如图 5(b)所示,这种载流子再分布的行为使低能峰随温度的升高发生红移。随着温度的进一步升高,局域态中的载流子获得了足够高的能量,发生离域效应,全部转变为自由载流子,低能峰猝灭,如图 5(c)所示。对于位置 B 来说,在 15 K 的最低温度下,载流子随机分布在势能极小处,如图 5(d)所示。当温度稍有升高时,弱局域态的载流子被热激活,随后通过跳跃弛豫到更强的局域态中,如图 5(e)所示,强局域态的深度更深,这是位置 B 峰位第一次红移的原因。当温度继续升高时,高温使载流子能够实现与晶格的热平衡,并占据局域态的更高能级,如图 5(f)所示,因此,局域态发光峰发生了蓝移。当温度足够高时,载流子可以摆脱局域态的限制,完全解局域,如图 5(g)所示,位置 B 光谱中的发光峰为自由载流子的带边复合所致,其峰位随着温度的升高而红移。

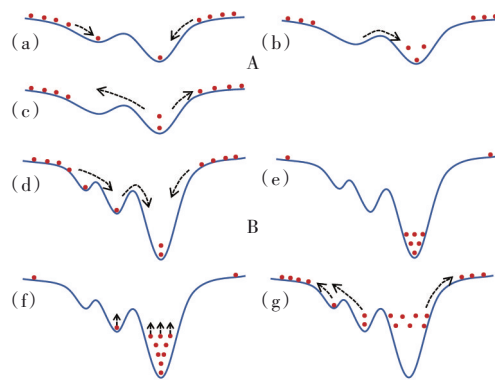


图5 位置 A 和 B 的电势分布及载流子复合图

Fig.5 Schematic diagram of potential distribution and carrier recombination of position A and B

3.3 变功率 PL 结果与分析

为了进一步研究 InGaAs/GaAs 多量子阱材料中局域态的发光特性,在 15 K 的低温下对两个位置进行变功率 PL 测试,测试结果如图 6 所示。位置 A 的光谱在所有测试功率密度下都呈现双峰分布,并且随着功率密度的增加,两个峰强度均增强,如图 6(a)所示。当功率密度较低时,光生载流子较少,又由于此处局域能小,部分载流子被局域态捕获,剩余的部分载流子可以在带边复合,所以 LE 与 FE 峰强相当。当功率密度增加,载流子的数量随之增加,由于局域态较浅,能容纳的载流子有限,所以多数载流子作为自由载流子在带边

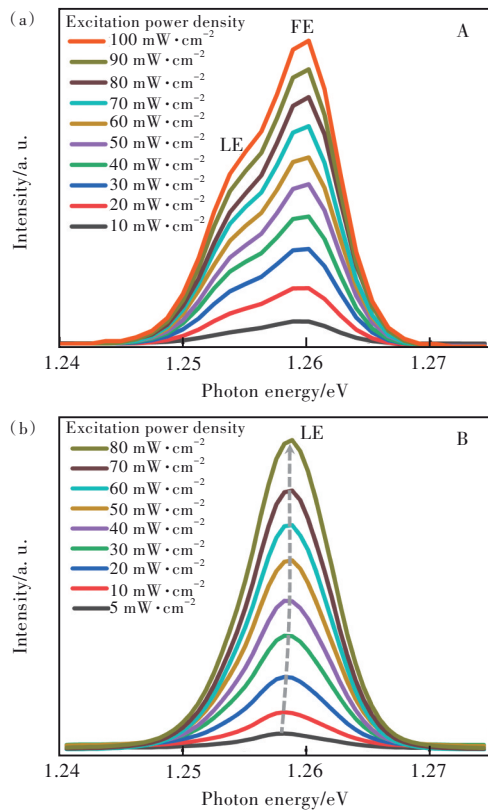


图6 位置A和B的变功率PL测试图

Fig.6 Excitation power-dependent PL results of position A and B

进行辐射复合。因此,FE峰强度迅速增加,并逐渐主导光谱。根据变温PL可知,位置B在15 K时是局域态载流子的复合,因此图6(b)中为局域态在不同功率密度下的发光特性。随着功率的增加,峰位发生轻微蓝移。这可能是局域态的能带填充效应^[15,23]。当激发功率较低时,载流子倾向于首先填充局域态较低的能级。随着激发功率密度增加,低能级达到饱和,载流子将填充到更高的能级。因此,可以观察到LE蓝移。位置A由于局域态较浅,在低激发功率密度下载流子就填满了整

个局域态,因此位置A中的LE峰并没有随着功率密度的增加发生蓝移。

4 结 论

本文通过MOCVD技术生长了五周期的 $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}$ 多量子阱材料。首先通过AFM测试不同位置的表面形貌,发现样品表面存在凸起条纹,这表明多量子阱材料存在缺陷,堆叠的二维岛屿簇表面在InGaAs层中存在In组分不均匀。随后变温PL测试不同位置的光学特性,发现位置A的光谱在低温下包含两个峰,低能量峰峰位随温度的升高发生红移,直至低能量峰猝灭,高能量峰一直存在,峰位随着温度的升高持续红移;位置B的光谱只有一个峰,且峰位随温度的升高呈现“S”型变化。利用Varshni公式对不同温度下的峰位进行拟合,经分析得知,多量子阱材料内部存在不同深度的局域态,正是局域态载流子和自由载流子的竞争发光使光谱发生以上变化。而AFM观察到的材料无序性是给多量子阱材料电势造成波动、引入局域态的原因。依据变温PL数据,给出了多量子阱材料的电势分布图,揭示了不同温度下两种载流子的复合机制。最后,通过变功率PL测试探究了位置A和B的局域态的发光特性,以及局域态中的载流子在不同激发功率下的行为。本研究可以加深对高应变InGaAs/GaAs多量子阱材料的辐射复合机制的理解,并且对研究含有局域态的高应变InGaAs/GaAs多量子阱材料发光性能具有重要意义。

本文专家审稿意见及作者回复内容下载地址:
<http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20220375>.

参 考 文 献:

- [1] 王立军, 宁永强, 秦莉, 等. 大功率半导体激光器研究进展[J]. 发光学报, 2015, 36(1): 1-19.
 WANG L J, NING Y Q, QIN L, *et al.* Development of high power diode laser [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015, 36(1): 1-19. (in Chinese)
- [2] 陈良惠, 杨国文, 刘育衡. 半导体激光器研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500001-1-23.
 CHEN L H, YANG G W, LIU Y X, *et al.* Development of semiconductor lasers [J]. *Chin. J. Lasers*, 2020, 47(5): 0500001-1-23. (in Chinese)
- [3] QIAO Z L, LI X, WANG H, *et al.* High-performance 1.06- μm InGaAs/GaAs double-quantum-well semiconductor lasers with asymmetric heterostructure layers [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2019, 34(5): 055013-1-6.
- [4] KALYUZHNYI N A, EMELYANOV V M, EVSTROPOV V V, *et al.* Optimization of photoelectric parameters of InGaAs

- metamorphic laser ($\lambda = 1\ 064\ \text{nm}$) power converters with over 50% efficiency [J]. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2020, 217: 110710-1-8.
- [5] YANG H M, ZHENG Y L, TANG Z, *et al.* MBE growth of high performance very long wavelength InGaAs/GaAs quantum well infrared photodetectors [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2020, 53(13): 135110-1-7.
- [6] HSU K C, HO C H, LIN Y S, *et al.* Optical and electrical characteristics of GaAs/InGaAs quantum-well device [J]. *J. Alloys Compd.*, 2009, 471(1-2): 567-569.
- [7] SAIDI F, HAMILA R, MAAREF H, *et al.* Structural and optical study of $B_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{As}/\text{GaAs}$ and $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}$ QW's grown by MOCVD [J]. *J. Alloys Compd.*, 2010, 491(1-2): 45-48.
- [8] CHAN C H, WU J D, HUANG Y S, *et al.* Photoluminescence and surface photovoltage spectroscopy characterization of highly strained InGaAs/GaAs quantum well structures grown by metal organic vapor phase epitaxy [J]. *Mater. Chem. Phys.*, 2010, 124(2-3): 1126-1133.
- [9] ROY S, HASSAN M, KARMAKER A, *et al.* Strain-dependent optical properties of [113]-oriented InGaAs/GaAs quantum well [C]. *2015 International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE), Dhaka*, 2015: 340-343.
- [10] BUGGE F, ZEIMER U, SATO M, *et al.* MOVPE growth of highly strained InGaAs/GaAs quantum wells [J]. *J. Cryst. Growth*, 1998, 183(4): 511-518.
- [11] SCHLENKER D, MIYAMOTO T, CHEN Z, *et al.* Growth of highly strained GaInAs/GaAs quantum wells for 1.2 μm wavelength lasers [J]. *J. Cryst. Growth*, 2000, 209(1): 27-36.
- [12] KANG S, KIM J, JANG C W, *et al.* Thermally induced metastability of InGaAs single-layer for highly strained superlattices by metal-organic chemical vapor deposition [J]. *J. Alloys Compd.*, 2022, 905: 164252-1-7.
- [13] WANG Q, GAO X G, XU Y L, *et al.* Carrier localization in strong phase-separated InGaN/GaN multiple-quantum-well dual-wavelength LEDs [J]. *J. Alloys Compd.*, 2017, 726: 460-465.
- [14] MAROS A, FALEEV N N, BERTONI M I, *et al.* Carrier localization effects in $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x/\text{GaAs}$ heterostructures [J]. *J. Appl. Phys.*, 2016, 120(18): 183104-1-7.
- [15] GAO X, FANG X, TANG J L, *et al.* The strain, energy band and photoluminescence of $\text{GaAs}_{0.92}\text{Sb}_{0.08}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ multiple quantum wells grown on GaAs substrate [J]. *Solid State Commun.*, 2020, 309: 113837-1-5.
- [16] SHIMOSAKO N, INOSE Y, SATOH H, *et al.* Carrier-density dependence of photoluminescence from localized states in InGaN/GaN quantum wells in nanocolumns and a thin film [J]. *J. Appl. Phys.*, 2015, 118(17): 175702-1-5.
- [17] MARCINKEVICIUS S, KELCHNER K M, NAKAMURA S, *et al.* Optical properties of extended and localized states in *m*-plane InGaN quantum wells [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 102(10): 101102-1-5.
- [18] JOHNSON N M, NURMIKKO A V, DENBAARS S P. Blue diode lasers [J]. *Phys. Today*, 2000, 53(10): 31-36.
- [19] ULLOA J M, HIERRO A, MIGUEL-SÁNCHEZ J, *et al.* Correlation between quantum well morphology, carrier localization and the optoelectronic properties of GaInNAs/GaAs light emitting diodes [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2006, 21(8): 1047-1052.
- [20] WANG J, WANG H Z, WANG Q H, *et al.* Effect of localized states on the optical properties in InGaAs/GaAs multiple quantum wells grown by MOCVD [J]. *Photonic. Nanostruct.*, 2022, 51: 101047.
- [21] SU Y K, CHEN W C, WAN C T, *et al.* Optimization of the highly strained InGaAs/GaAs quantum well lasers grown by MOVPE [J]. *J. Cryst. Growth*, 2008, 310(15): 3615-3620.
- [22] O'DONNELL K P, CHEN X. Temperature dependence of semiconductor band gaps [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, 58(25): 2924-2926.
- [23] GE X T, WANG D K, GAO X, *et al.* Localized states emission in type-I GaAsSb/AlGaAs multiple quantum wells grown by molecular beam epitaxy [J]. *Phys. Status Solidi RRL*, 2017, 11(3): 1700001-1-5.



王曲惠(1994-),女,吉林四平人,博士研究生,2016年于长春理工大学获得学士学位,主要从事半导体外延生长的研究。

E-mail: 936356566@qq.com



马晓辉(1965-),男,吉林长春人,博士研究生,研究员,博士生导师,2008年于长春理工大学获得博士学位,主要从事光电子器件,光电子技术及应用的研究。

E-mail: mxh@cust.edu.cn