

文章编号: 1000-7032(2023)11-1974-07

深紫外 AlGa_{0.38}N 基多量子阱结构中 载流子辐射复合的局域特征

邓建阳¹, 贺龙飞^{2*}, 武智波¹, 李睿¹, 徐明升¹, 王成新³, 徐现刚¹, 冀子武^{1*}

(1. 山东大学微电子学院, 新一代半导体材料研究院, 山东 济南 250100;

2. 广东省科学院半导体研究所, 广东 广州 510650; 3. 山东浪潮华光光电子股份有限公司, 山东 潍坊 261061)

摘要: 利用磁控溅射和金属有机化学气相沉积方法在 *c* 面蓝宝石衬底上生长了深紫外 Al_{0.38}Ga_{0.62}N/Al_{0.55}Ga_{0.45}N 多量子阱结构, 并对其荧光 (PL) 谱进行了测量。其 PL 谱的激发密度依赖性测量结果表明, 该量子阱的辐射过程包含了局域载流子的散射、极化场的屏蔽和局域态的填充效应; 其 PL 谱的温度依赖性测量结果则表明, 该量子阱的辐射过程包含了局域载流子的弛豫、局域载流子的热激发和自由载流子的常规热化效应。这个现象 (即多种辐射复合过程的存在) 在低温和弱激发测试条件下尤为显著, 并且表现出该量子阱结构具有显著的局域深度非均一性和载流子的局域效果, 是浅局域载流子的散射效应和深局域态的载流子填充效应共同作用所致。在较低的温度范围内, 随着温度升高, 该量子阱的辐射过程是由浅局域载流子的弛豫效应和深局域载流子的热激发效应共同作用的结果。这些行为被归因于阱宽起伏所诱发的局域深度的非均一性和载流子的局域效果。

关键词: 深紫外 LED; AlGa_{0.38}N 多量子阱; 光致发光; 载流子局域效应

中图分类号: O469

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20230213

Localization Features of Carrier Emission Recombination in Deep-ultraviolet AlGa_{0.38}N-based Multiple Quantum Well Structure

DENG Jianyang¹, HE Longfei^{2*}, WU Zhibo¹, LI Rui¹, XU Mingsheng¹,WANG Chengxin³, XU Xiangang¹, JI Ziwu^{1*}

(1. Institute of Novel Semiconductors, School of Microelectronics, Shandong University, Jinan 250100, China;

2. Institute of Semiconductor Research, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China;

3. Shandong Inspur Huaguang Optoelectronics Co., Ltd., Weifang 261061, China)

* Corresponding Authors, E-mail: helongfei@gdisit.com; jiziwu@sdu.edu.cn

Abstract: A deep-ultraviolet Al_{0.38}Ga_{0.62}N/Al_{0.55}Ga_{0.45}N multiple quantum well (MQW) structure was grown on a *c*-plane sapphire substrate using magnetron sputtering and metal organic chemical vapor deposition (MOCVD) methods, while the excitation density and temperature dependences of its photoluminescence (PL) spectrum were measured in the wide excitation density (0.1–500 kW/cm²) and temperature (6–300 K) ranges. The excitation density-dependent peak energies and line widths of the PL peak P_w from the MQWs measured at the low temperature of 6 K show that, within the low excitation density range (≤ 10 kW/cm²), the P_w line width remains almost constant, while its peak energy remains almost constant first (≤ 0.5 kW/cm²) and then gradually increases with increasing the excitation density, indicating that the excitation density-dependent emission process of the MQWs is dominated first by the combined effect of the scattering effect of high-energy (shallow)-localized carriers and filling effect of low-energy (deep)-localized states, and then by the combined effect of the filling effect of medium-energy (medium-depth)-

收稿日期: 2023-09-16; 修订日期: 2023-10-04

基金项目: 广州市基础研究计划 (202201010679); 国家自然科学基金 (52272157)

Supported by The Fundamental Research Program of Guangzhou (202201010679); National Natural Science Foundation of China (52272157)

localized states and Coulomb screening effect of free carriers. However, within the high excitation density range ($>10 \text{ kW/cm}^2$), both the P_w peak line width and peak energy increase significantly, indicating that the excitation density-dependent emission process of the MQWs is dominated by the filling effect of high-energy-localized states. On the other hand, the temperature-dependent peak energies and line widths of the P_w peak measured at the low excitation density of 0.1 kW/cm^2 show that, within the low temperature range ($\leq 140 \text{ K}$), the P_w line width remains almost constant, while its peak energy monotonically decreases, indicating that the temperature-dependent emission process of the MQWs may be dominated by the combined effect of the relaxation of high-energy-localized carriers and thermal excitation of low-energy-localized carriers; within the high temperature range ($>140 \text{ K}$), P_w peak line width increases significantly, while its peak energy blue shifts significantly relative to Varshni curve, indicating that the temperature-dependent emission process of the MQWs is dominated by the thermal excitation of localized carriers since the relaxation of the localized carriers is gradually suppressed with increasing the temperature. The above analysis results show the strong inhomogeneity in the depths of the localized states and the localized character of the carrier recombination in the AlGa_N-based MQWs due to the significant fluctuations of well widths. This conclusion is also supported by the measurement of temperature dependent-integrated PL intensity (Arrhenius plot), because this measurement result has shown that the deep-ultraviolet AlGa_N-based MQW structure has two non-radiative recombination channels with different activation energies.

Key words: deep-ultraviolet LED; AlGa_N multiple quantum well; photoluminescence; carrier localization effect

1 引 言

紫外光因其波长短、能量高和抗干扰强,以及具有较强的光化学效应、生物效应、荧光效应和光电效应等特性,已经被广泛应用于农业、工业、生物医学和国防等领域^[1-4]。作为新一代紫外光源,AlGa_N基发光二极管(LED)已经引起了相关研究者的极大关注和浓厚兴趣,这是因为,与传统的汞灯、无电极灯、金属卤素灯和氙灯相比,前者具有尺寸小、重量轻、抗震性强和光效高等优点^[5-6]。此外,还可通过调节 AlGa_N 有源区中的 Al 组分大小,使其发光波长可以覆盖 200~365 nm 较宽的紫外波段范围^[7]。法国 Yole 公司的市场调研报告显示,深紫外 LED 的市场销量到 2025 年有望达到千亿级规模^[8]。鉴于深紫外 LED 的巨大市场需求,许多国内外知名研究机构均加大了投资规模以加强该领域的研发力度,特别是在这次新冠疫情时期,对杀菌消毒产品需求的爆发式增长也为 AlGa_N 基紫外 LED 的发展提供了机遇。

目前,低 Al 含量的近紫外 (NUV) AlGa_N 基多量子阱 (MQWs) LED 已经拥有较为成熟的制备工艺并已投入商业应用。然而,对于高 Al 含量的深紫外 (DUV) AlGa_N 基多量子阱 LED 而言,已报道的最高外量子效率 (EQE) 仅为 20.3% 左右 (波长为 275 nm), 这严重阻碍了它们的商业应用^[9]。相关研究报道已经指出,导致 AlGa_N 基多量子阱

LED 发光效率较低的原因主要有以下几个方面^[3,10-12]: (1) 衬底与外延层之间的晶格失配和热失配所诱发的应力和缺陷; (2) 有源区内极化电场所导致的量子限制斯塔克效应 (QCSE); (3) AlGa_N 材料的高活化能导致的 p 型掺杂困难; (4) 起因于 GaN 和 AlN 的晶体场分裂和自旋轨道耦合效应的价带分裂 (偏振现象) 所导致的较低的光提取效率 (LEE)。此外,随着 Al 组分的增加,来自上述因素的影响将更加显著。为了解决上述困难,相关研究者已经提出了一些改善措施,如 Wu 等于 2017 年采用阶梯型量子阱作为有源区,使其波长约为 350 nm 的内量子效率 (IQE) 提高到 82% 以上^[13]; Yan 等于 2014 年通过采用纳米图形蓝宝石衬底 (NPSS) 外延技术改善了 AlN 模板上外延 283 nm DUV 量子阱 (具有常规的矩形量子阱结构) 的结构质量,使其内量子效率提升了 43%^[14]; Chen 等于 2015 年采用钢表面活性剂辅助的 delta 掺杂方法,使 Mg 掺杂的 Al_xGa_{1-x}N ($x = 0.4$) 实现了高达 $4.75 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的空穴浓度^[15]; Wang 等于 2018 年通过在传统 DUV LED 的蓝宝石衬底背面制备蛾眼微结构,使常规量子阱结构的偏振度提高了 1.26 倍,并因此提高了其光提取效率^[16]。尽管上述措施取得了一定的成效,但仍有许多与之相关的物理机制,特别是与内量子效率相关的 AlGa_N 有源区中载流子的复合发光机制尚有待于进一步地研究和探讨; 并且这对于进一步优化生长工艺和结

构参数,制备高效、高性能 AlGaIn 基深紫外 LED 都具有重要的理论意义和现实意义。

本文同时利用磁控溅射和金属有机化学气相沉积(MOCVD)方法,在 *c* 面蓝宝石衬底上外延生长了一种深紫外 $\text{Al}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{N}/\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{N}$ 基多量子阱结构;在较大的激发密度($0.1 \sim 500 \text{ kW/cm}^2$)和温度($6 \sim 300 \text{ K}$)范围内分别测量了其 PL 谱的激发密度依赖性和温度依赖性,并根据测量结果阐明了其载流子动力学机制。

2 实 验

首先利用磁控溅射方法在 *c* 面蓝宝石衬底上溅射一层 20 nm 的 AlN 缓冲层。然后,再利用 MOCVD 方法在上述 AlN 缓冲层上生长一种深紫外 $\text{Al}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{N}/\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{N}$ 多量子阱结构,如图 1 所示。其中,三甲基镓(TMGa)、三甲基铝(TMAI)、氨气(NH_3)和硅烷(SiH_4)分别为 Ga、Al、N 以及 Si 元素的前驱气体,氢气(H_2)被用作载气。该样品的外延生长过程依次简要叙述如下:(1)在 $650 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下,利用磁控溅射在 *c* 面蓝宝石衬底上溅射一层 20 nm 的 AlN 缓冲层(PVD-AlN);(2)将上述过程制备好的模板转入 MOCVD 中,升温至 $1230 \text{ }^\circ\text{C}$,然后生长约 $1 \mu\text{m}$ 厚的高温 AlN 层;(3)生长一个未掺杂的 $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}$ 层($1170 \text{ }^\circ\text{C}$);(4)生长一个 n 型掺杂的 $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}$ 层($1170 \text{ }^\circ\text{C}$);(5)生长 5 个周期的 $\text{Al}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{N}/\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{N}$ 多量子阱有源区($1150 \text{ }^\circ\text{C}$),并且阱层和垒层的宽度分别为 2 nm 和 10 nm。

MWQs (5 周期)
$\text{Al}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{N}/\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{N}$ (2 nm/10 nm)
n- $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}$ ($1.7 \mu\text{m}$)
u- $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}$ (300 nm)
高低温 AlN 层 (650 nm)
低温 AlN 层 (600 nm)
PVD-AlN (20 nm)
蓝宝石衬底

图 1 $\text{Al}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{N}/\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{N}$ 多量子阱样品结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of the structure of $\text{Al}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{N}/\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{N}$ MQW

对于 PL 谱的激发密度依赖性和温度依赖性测量,则是将样品置于封闭循环液氮冷却系统中,测试温度范围为 $6 \sim 300 \text{ K}$ 。激发光源为德国 Cry-

las 公司生产的脉冲型固体激光器(213 nm),测试脉冲宽度为 1 ns ,脉冲频率为 1 kHz ,激发密度范围为 $0.1 \sim 500 \text{ kW/cm}^2$ 。样品的 PL 信号被 iHR320 单色仪(Jobin Yvon)分光,然后通过半导体制冷的 Synapse CCD 检测器进行检测。

3 结果和讨论

图 2(a)、(b)分别显示了样品在 6 K 和 300 K 时的 PL 谱,激发密度均为 0.1 kW/cm^2 。由图可见,当温度为 6 K 时,样品的 PL 谱包含了两个发光峰:低能发光峰 P_w (约 4.6 eV)和高能发光峰 P_B (约 4.88 eV);当温度为 300 K 时,前述的高能发光峰消失,此时的 PL 谱仅包含低能发光峰(约 4.56 eV)。这个低能峰被认为是来自与阱层近带边相关的载流子辐射复合发光(标记为 P_w),而高能峰则可能主要是来自 n 型 $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}$ 层相关的载流子辐射复合发光(标记为 P_B)^[17]。在 300 K 的高温下,高能发光峰的消失是由于 n 型 $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}$ 层缺乏有效的量子限制效应和局域效应,并因此导致非辐射复合的支配性增强。下面,我们的研究将聚焦于与阱层相关的载流子复合发光特性。

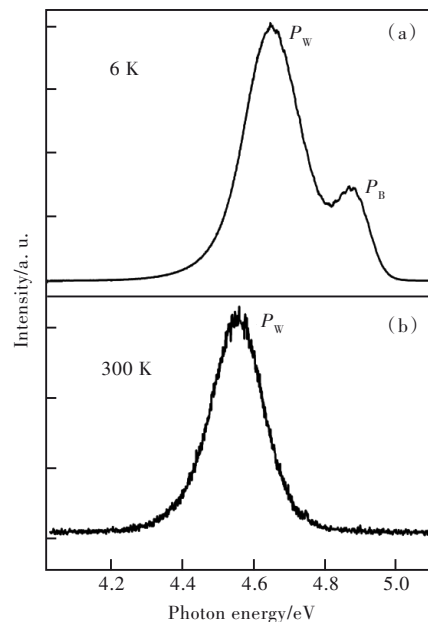


图 2 温度为 6 K (a)和 300 K (b)时样品的 PL 谱

Fig.2 PL spectra of the sample at 6 K (a) and 300 K (b)

图 3(a)、(b)分别显示了样品在 6 K 和 300 K 条件下其 P_w 峰的峰位能量和线宽的激发密度依赖性($0.1 \sim 500 \text{ kW/cm}^2$)。如图 3(a)所示,当温度为 6 K 且激发密度从 0.1 kW/cm^2 增加到 10 kW/cm^2 时, P_w 的线宽几乎保持不变,但其峰位能量却

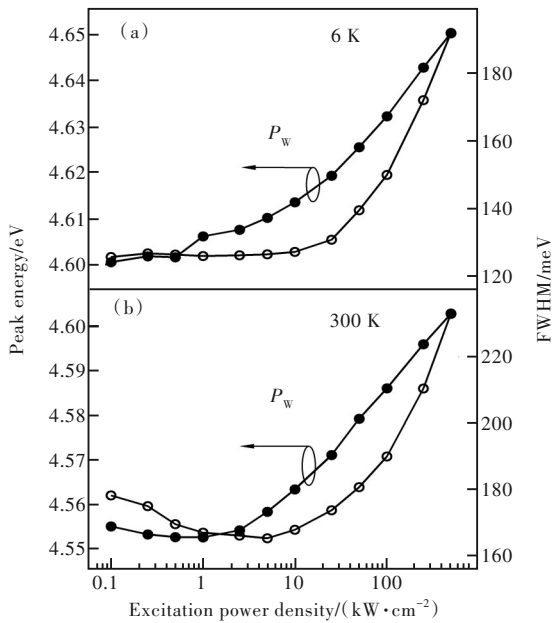


图 3 温度为 6 K(a)和 300 K(b)时样品 P_w 峰的峰位能量和半高宽的激发密度依赖性

Fig.3 Excitation density-dependent peak energies and full width at half maximums (FWHMs) of P_w , measured at 6 K(a) and 300 K(b).

展现了一个不同的行为:首先保持一个近似的常数($\leq 0.5 \text{ kW/cm}^2$),然后逐渐增加。前者主要被归因于阱层中浅局域(即高能局域)载流子的散射效应和深局域(即低能局域)态中的载流子填充效应的共同作用^[18-22],而后者则主要是由于阱层内中等深度局域态的载流子填充效应和自由载流子的库伦屏蔽效应的共同作用^[23-24];然而,随着激发密度的进一步增加($10 \sim 500 \text{ kW/cm}^2$), P_w 的峰位能量和线宽均显示了一个显著的增加,这主要归因于阱层中浅局域态中的载流子填充效应。这是因为随着光生载流子的逐渐增加,阱层内的 QCSE 逐渐被屏蔽、深局域态逐渐变得饱和,取而代之的是,浅局域态中的载流子填充效应开始占据支配地位^[22]。这里,量子阱的局域效果被认为主要起源于阱宽的起伏^[25-26]。

另一方面,当温度为 300 K 且激发密度从 0.1 kW/cm^2 增加到 5 kW/cm^2 时,如图 3(b)所示, P_w 的线宽逐渐降低,但其峰位能量却首先降低($\leq 1 \text{ kW/cm}^2$),然后增加。前者主要被归因于浅局域载流子的散射效应,而后者则主要是起因于自由载流子的库伦屏蔽效应。然而,当激发密度继续增加时($5 \sim 500 \text{ kW/cm}^2$), P_w 的峰位能量和线宽均显示了一个显著的增加,如前所述,这主要起因于阱层中浅局域态中的载流子填充效应。

图 4(a)、(b)分别展示了样品在低激发(0.1 kW/cm^2)和高激发(500 kW/cm^2)密度条件下其 P_w 的峰位能量和线宽的温度依赖性(6~300 K),其中的虚线为 Varshni 曲线^[27]。如图 4(a)所示,当激发密度为 0.1 kW/cm^2 且温度从 6 K 增加到约 140 K 时, P_w 的峰位能量单调降低,但其线宽却几乎保持不变。这个行为主要被归因于局域载流子的温度行为,即应当是温度升高所诱发的浅局域载流子的弛豫效应和深局域载流子的热激发(热膨胀)或深局域态的填充效应的共同作用^[22];前者表现为峰位能量和线宽同时减小,而后者则表现为峰位能量和线宽同时增加。然而,随着温度继续升高(140~300 K), P_w 的峰位能量相对于 Varshni 曲线展现了一个显著的蓝移,并且伴随着线宽的显著增加。该行为可被解释如下:随着温度的进一步升高,前述的载流子从浅局域态到深局域态的弛豫效应逐渐被抑制,同时深局域态中载流子的热激发开始占据支配地位。此外,上述温度依赖性测量结果也显示了一个事实:在 0.1 kW/cm^2 的低激发条件下,局域载流子的辐射复合占据支配地位。

然而,当激发密度为 500 kW/cm^2 且温度从 6 K 升高到 300 K 时(图 4(b)), P_w 的峰位能量则首

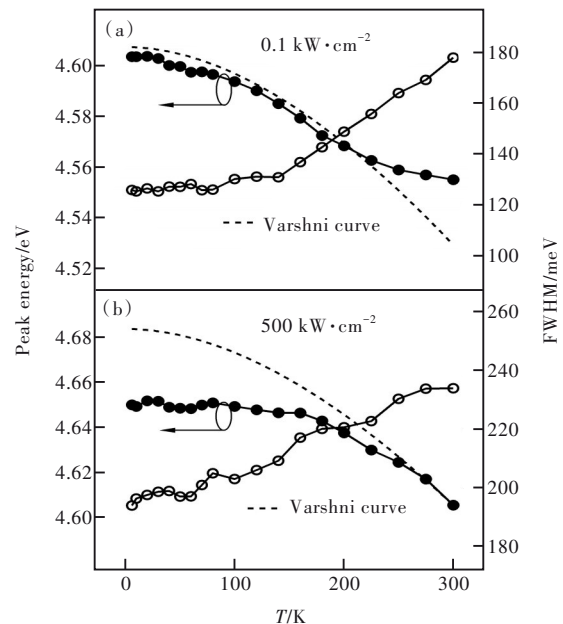


图 4 激发密度为 0.1 kW/cm^2 (a)和 500 kW/cm^2 (b)时样品 P_w 峰的峰位能量和半高宽的温度依赖性。(a)和(b)中的虚线表示 Varshni 曲线。

Fig.4 Temperature-dependent peak energies and FWHMs of P_w , measured at 0.1 kW/cm^2 (a) and 500 kW/cm^2 (b). The dashed lines in (a) and (b) denote the Varshni curves.

先相对于 Varshni 曲线展现了一个蓝移(6~250 K),然后(在 250 K 以上)则近似地遵从 Varshni 曲线。相对于上述过程, P_w 的线宽则在整个温度范围内展现了一个近似单调的增加。这个行为可被解释如下:由于在 500 kW/cm^2 的高激发条件下量子阱的局域效果降低,因此一个初始的温度增加(6~250 K)所诱发的载流子的弛豫效应被抑制,同时深局域载流子的热激发效应相对增强并占据支配地位;作为结果, P_w 的温度行为表现为其峰位能量相对于 Varshni 曲线展现了一个明显的蓝移并伴随着线宽的显著增加。然而,随着温度的进一步升高(250~300 K),局域载流子将逐渐摆脱局域中心的束缚(即解局域),这使得自由载流子的常规热化逐渐占据支配地位,因此 P_w 的温度行为遵从 Varshni 定律,即能量降低、线宽增加。

为了进一步调查该样品 PL 的热猝灭机制,图 5 显示了低激发密度(0.1 kW/cm^2)时其归一化积分 PL 强度的温度依赖性的 Arrhenius 图。通过拟合发现,双非辐射复合通道的 Arrhenius 模型能够很好地与该样品的实验数据相吻合。该 Arrhenius 模型可被表示为^[28-29]:

$$I(T) = \left[1 + C_1 \exp(-E_1/K_B T) + C_2 \exp(-E_2/K_B T) \right]^{-1}, \quad (1)$$

其中 $I(T)$ 表示温度为 T 时的归一化积分 PL 强度, C 是与非辐射复合中心密度相关的系数, E 是与非辐射复合相关的活化能, K_B 是玻尔兹曼常数。拟合结果显示, C_1 和 C_2 分别为 3.93 和 485.6, E_1 和 E_2 分别 12.4 meV 和 89.4 meV。这里, C_1 和 E_1 对应于非辐射复合通道 1(点线),而 C_2 和 E_2 则对应于非辐射复合通道 2(断线)。由图 5 可见,在约 150 K 以下的低温范围内,非辐射复合通道 1 对 PL 强度的降低起主要作用;而在约 150 K 以上的高温范围内,则是非辐射复合通道 2 对 PL 强度的降低起主要作用。对于这两个非辐射通道的起源,我们将在下面讨论。

通常,量子阱的非辐射复合通道被认为与载流子逃离局域中心(解局域,但仍留在阱层内)或逃离阱层(从阱层逃离至垒层)等因素有关^[29]。考虑到本样品结构的导带和价带的带阶比例为 7:3,我们可据此估算得到该量子阱结构其阱层和垒层的导带带阶为 333 meV ^[30-31]。这远大于该结构的活化能 E_1 和 E_2 ,因此我们可以排除因载流子从量子阱逃离至量子垒而导致热猝灭的这种可能性^[32],并认为这两个非辐射复合通道应当与处于不同局域深度的载流子的解

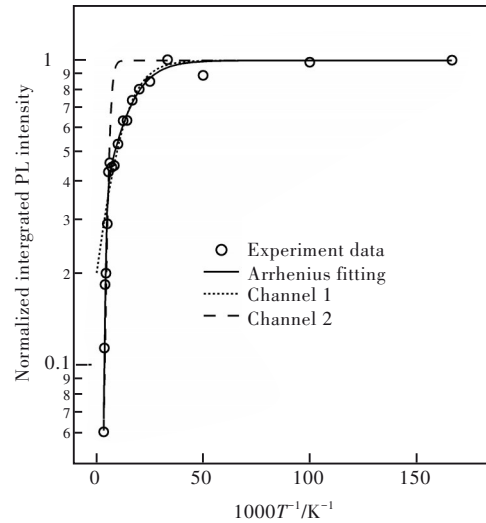


图 5 激发密度为 0.1 kW/cm^2 时归一化积分 PL 强度(空心圆)的温度依赖性的 Arrhenius 图。拟合曲线(点线或断线)假设只有一个非辐射复合过程,而拟合曲线(实线)则考虑了两个非辐射复合过程。

Fig.5 Arrhenius plot of the temperature dependence for normalized integrated PL intensity(empty circles) in the sample at 0.1 kW/cm^2 . The fitted curve (dashed line or dotted line) assumes that there is merely a non-radiative recombination process, while the fitted curve (solid line) considers the two non-radiative recombination processes.

局域有关^[33-34],即活化能 E_1 和 E_2 分别与浅局域载流子(非辐射复合通道 1)和深局域载流子(非辐射复合通道 2)的解局域过程有关。这里需要指出的是,随着激发密度的增加,活化能逐渐降低;同时,由于非辐射复合中心逐渐饱和,辐射复合过程将变得愈加显著,内量子效率在一定激发密度范围内会显著增加^[35]。在本研究中,当激发密度从 0.1 kW/cm^2 增至 500 kW/cm^2 时,该样品的内量子效率从约 6%(参见图 5)增至 40%,并且阱层中的非辐射复合通道也由原来的两个减至一个。

4 结 论

本研究利用磁控溅射并结合 MOCVD 方法在 c 面蓝宝石衬底上制备了一种深紫外 $\text{Al}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{N}/\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{N}$ 多量子阱结构,并测试了其 PL 谱的激发密度依赖性和温度依赖性。其 PL 能量和线宽的激发密度依赖性表明,该辐射过程包含了载流子的散射、极化场的屏蔽和局域态的填充效应;同时,其 PL 能量和线宽的温度依赖性表明,该辐射过程包含了局域载流子的弛豫、局域载流子的热激发和自由载流子的常规热化效应。上述现象(即多种辐射

复合过程的存在)在低温和弱激发测试条件下尤为显著。这些结果显示了该量子阱结构具有显著的局域深度非均一性和载流子的局域效果,并且主要起因于阱层厚度的起伏。这个结论与其PL强度的温度依赖性测量结果也是一致的,因为该测量结果已经表明其阱层中包含有两个具有不同活化能的非辐

射复合通道。期望本研究结果能对高效、高性能 AlGaIn 基深紫外 LED 的制备有所助益。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20230213>.

参 考 文 献:

- [1] SUSILO N, HAGEDORN S, JAEGER D, *et al.* AlGaIn-based deep UV LEDs grown on sputtered and high temperature annealed AlN/sapphire [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2018, 112(4): 041110.
- [2] TANIYASU Y, KASU M, MAKIMOTO T. An aluminium nitride light-emitting diode with a wavelength of 210 nanometres [J]. *Nature*, 2006, 441(7091): 325-328.
- [3] BRYAN Z, BRYAN I, XIE J Q, *et al.* High internal quantum efficiency in AlGaIn multiple quantum wells grown on bulk AlN substrates [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2015, 106(14): 142107.
- [4] HIRAYAMA H, YATABE T, NOGUCHI N, *et al.* Development of 230–270 nm AlGaIn-based deep-UV LEDs [J]. *Electron. Commun. Japan*, 2010, 93(3): 24-33.
- [5] SHUR M S, GASKA R. III-nitride based deep ultraviolet light sources [C]. *Proceedings of the SPIE 6894, Gallium Nitride Materials and Devices III*, San Jose, California, 2008: 689419.
- [6] 文尚胜, 左文财, 周悦, 等. 紫外线消毒技术的研究现状及发展趋势 [J]. *光学技术*, 2020, 46(6): 664-670.
WEN S S, ZUO W C, ZHOU Y, *et al.* Research status and development trend of ultraviolet disinfection technology [J]. *Opt. Tech.*, 2020, 46(6): 664-670. (in Chinese)
- [7] KNEISSL M, RASS J. III-nitride Ultraviolet Emitters: Technology and Applications [M]. Cham: Springer, 2016.
- [8] 吴峰, 戴江南, 陈长清. AlGaIn 基深紫外发光二极管研究进展 [J]. *人工晶体学报*, 2020, 49(11): 2079-2097.
WU F, DAI J N, CHEN C Q. Research progress of AlGaIn based deep ultraviolet light emitting diodes [J]. *J. Synth. Cryst.*, 2020, 49(11): 2079-2097. (in Chinese)
- [9] TAKANO T, MINO T, SAKAI J, *et al.* Deep-ultraviolet light-emitting diodes with external quantum efficiency higher than 20% at 275 nm achieved by improving light-extraction efficiency [J]. *Appl. Phys. Express*, 2017, 10(3): 031002.
- [10] GUO Q, KIRSTE R, MITA S, *et al.* The polarization field in Al-rich AlGaIn multiple quantum wells [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2019, 58(SC): SCCC10.
- [11] ZHANG Y H, ZHENG Y X, MENG R L, *et al.* Enhancing both TM- and TE-polarized light extraction efficiency of AlGaIn-based deep ultraviolet light-emitting diode via air cavity extractor with vertical sidewall [J]. *IEEE Photonics J.*, 2018, 10(4): 8200809.
- [12] YU H B, CHEN Q, REN Z J, *et al.* Enhanced performance of an AlGaIn-based deep-ultraviolet LED having graded quantum well structure [J]. *IEEE Photonics J.*, 2019, 11(4): 8201006.
- [13] WU F, SUN H D, AJIA I A, *et al.* Significant internal quantum efficiency enhancement of GaN/AlGaIn multiple quantum wells emitting at ~350 nm via step quantum well structure design [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2017, 50(24): 245101.
- [14] DONG P, YAN J C, ZHANG Y, *et al.* AlGaIn-based deep ultraviolet light-emitting diodes grown on nano-patterned sapphire substrates with significant improvement in internal quantum efficiency [J]. *J. Cryst. Growth*, 2014, 395: 9-13.
- [15] CHEN Y D, WU H L, HAN E Z, *et al.* High hole concentration in p-type AlGaIn by indium-surfactant-assisted Mg-delta doping [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2015, 106(16): 162102.
- [16] WANG S, DAI J N, HU J H, *et al.* Ultrahigh degree of optical polarization above 80% in AlGaIn-based deep-ultraviolet LED with moth-eye microstructure [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(9): 3534-3540.
- [17] YASAN A, MCCLINTOCK R, MAYES K, *et al.* Photoluminescence study of AlGaIn-based 280 nm ultraviolet light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 83(20): 4083-4085.
- [18] LEE Y J, CHIU C H, KE C C, *et al.* Study of the excitation power dependent internal quantum efficiency in InGaIn/GaN LEDs grown on patterned sapphire substrate [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, 15(4): 1137-1143.
- [19] MU Q, XU M S, WANG X S, *et al.* Influence of the InGaIn/GaN quasi-superlattice underlying layer on photoluminescence in InGaIn/GaN multiple quantum wells [J]. *Phys. E: Low-Dimens. Syst. Nanostruct.*, 2016, 76: 1-5.

- [20] MA Z X, PIERZ K. Carrier thermalization and activation within self-assembled InAs/AlAs quantum dot states [J]. *Surf. Sci.*, 2002, 511(1-3): 57-64.
- [21] SUN H, JI Z W, WANG H N, *et al.* Transfer and recombination mechanism of carriers in phase-separated InGa_N quantum wells [J]. *J. Appl. Phys.*, 2013, 114(9): 093508.
- [22] WANG H N, JI Z W, QU S, *et al.* Influence of excitation power and temperature on photoluminescence in InGa_N/Ga_N multiple quantum wells [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(4): 3932-3940.
- [23] LI J F, LI C F, XU M S, *et al.* “W-shaped” injection current dependence of electroluminescence linewidth in green InGa_N/Ga_N-based LED grown on silicon substrate [J]. *Opt. Express*, 2017, 25(20): A871-A879.
- [24] PORTE H P, TURCHINOVICH D, COOKE D G, *et al.* Terahertz study of ultrafast carrier dynamics in InGa_N/Ga_N multiple quantum wells [J]. *J. Phys. : Conf. Ser.*, 2009, 193: 012084.
- [25] TAMULAITIS G, MICKEVIČIUS J, KAZLAUSKAS K, *et al.* Efficiency droop in high-Al-content AlGa_N/AlGa_N quantum wells [J]. *Phys. Status Solidi C*, 2011, 8(7-8): 2130-2132.
- [26] 徐庆君. 高Al组分AlGa_N薄膜的MOCVD生长及p型掺杂研究[D]. 南京: 南京大学, 2019.
XU Q J. *Study on MOCVD Growth of High Al Fraction AlGa_N and p-type Doping of AlGa_N Films* [D]. Nanjing: Nanjing University, 2019. (in Chinese)
- [27] NEPAL N, LI J, NAKARMI M L, *et al.* Temperature and compositional dependence of the energy band gap of AlGa_N alloys [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 87(24): 242104.
- [28] FRIEL I, THOMIDIS C, FEDYUNIN Y, *et al.* Investigation of excitons in AlGa_N/Ga_N multiple quantum wells by lateral photocurrent and photoluminescence spectroscopies [J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, 95(7): 3495-3502.
- [29] SUN Y P, CHO Y H, KIM H M, *et al.* High efficiency and brightness of blue light emission from dislocation-free InGa_N/Ga_N quantum well nanorod arrays [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 87(9): 093115.
- [30] CHEN S C, LI Y, TIAN W, *et al.* Numerical analysis on the effects of multi-quantum last barriers in AlGa_N-based ultraviolet light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. A*, 2014, 118(4): 1357-1363.
- [31] LI L, MIYACHI Y, MIYOSHI M, *et al.* Ultrathin inserted AlGa_N/InAl_N heterojunction for performance improvement in AlGa_N-based deep ultraviolet light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Express*, 2019, 12(1): 011010.
- [32] 李金钗, 季桂林, 杨伟煌, 等. 高Al组分AlGa_N多量子阱结构材料发光机制探讨[J]. *发光学报*, 2016, 37(5): 513-518.
LI J C, JI G L, YANG W H, *et al.* Emission mechanism of high Al-content AlGa_N multiple quantum well [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2016, 37(5): 513-518. (in Chinese)
- [33] LI L, MIYACHI Y, MIYOSHI M, *et al.* Enhanced emission efficiency of deep ultraviolet light-emitting AlGa_N multiple quantum wells grown on an N-AlGa_N underlying layer [J]. *IEEE Photonics J.*, 2016, 8(5): 1601710.
- [34] HWANG J S, GOKARNA A, CHO Y H, *et al.* Direct comparison of optical characteristics of InGa_N-based laser diode structures grown on pendeo epitaxial Ga_N and sapphire substrates [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 90(13): 131908.
- [35] SHI K J, WANG C X, LI R, *et al.* Influence of in volatilization on photoluminescence in InGa_N/Ga_N multiple quantum wells [J]. *Mater. Express*, 2021, 11(12): 2033-2038.



邓建阳(1997-),男,江西抚州人,硕士,2023年于山东大学获得硕士学位,主要从事低维半导体材料光电特性的研究。

E-mail: jianyang_deng@163.com



冀子武(1962-),男,山东潍坊人,博士,教授,博士生导师,2006年于日本千叶大学获得博士学位,主要从事低维(纳米)化合物半导体材料与器件的光学特性研究(如Ga_N基、ZnSe基、ZnO、ZnTe等材料或结构)。

E-mail: jiziwu@sdu.edu.cn



贺龙飞(1988-),男,湖南衡阳人,博士,高级工程师,2020年于华南师范大学获得博士学位,主要从事化合物半导体(Ga_N、Al_N、SiC等)领域的MOCVD材料外延、器件设计与封装等研究。

E-mail: helongfei@gdisit.com