

文章编号: 1000-7032(2024)05-0800-09

通过诱导载流子的 V 坑传输提升 GaN 基绿光 LED 的空穴注入效率

张东皓¹, 杨东锴¹, 徐 畅¹, 刘信佑², 包立君^{1*}

(1. 厦门大学电子科学与技术学院 电子科学系, 福建 厦门 361100;

2. 厦门三安光电有限公司, 福建 厦门 361100)

摘要: 为了提升 GaN 基多量子阱 LED 的空穴注入效率, 设计了具有不同最后势垒层结构的 GaN 基多量子阱外延结构, 并将其制备为绿光 mini-LED 发光芯片, 利用低温电致发光光谱、电流电压特性测试对其载流子传输机制进行了研究。结果表明, 在采用 AlGaIn 或 GaN/AlN 最后势垒层的样品中, 有更多载流子可以传输到深层量子阱, 空穴注入效率获得提升。本文对这一现象中的载流子运输机制以及 V 坑缺陷在其中所起的作用进行了研究, 发现这种提升主要来自空穴 V 坑注入比例的增大。实验还发现, 过大的 V 坑注入比例也会造成非辐射复合率上升, 从而抑制了 AlGaIn 最后势垒层样品的电光转换效率。

关键词: 发光二极管; 最后势垒层; 空穴注入; InGaIn/GaN 多量子阱; V 坑

中图分类号: TN383^{+.1} 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20240027

Enhanced Hole Injection of GaN Based Green LEDs by Inducing Carrier Transport Through V-pits

ZHANG Donghao¹, YANG Dongkai¹, XU Chang¹, LIU Hsinyu², BAO Lijun^{1*}

(1. Department of Electronic Science, School of Electronic Science and Engineering, Xiamen University, Xiamen 361100, China;

2. Xiamen San'an Optoelectronic Company Ltd., Xiamen 361100, China)

* Corresponding Author, E-mail: baolijun@xmu.edu.cn

Abstract: In order to improve the hole injection efficiency of GaN based multiple quantum wells LED by utilizing V-pits, mini-LEDs with different structures of last quantum barrier (LQB) layer were fabricated. The LQB structures of the four samples are GaN(10 nm), AlN(10 nm), Al_{0.14}Ga_{0.86}N(10 nm), and GaN(8.6 nm)/AlN(1.4 nm), respectively. The recombination mechanisms were studied in these samples with low-temperature electroluminescence spectra, and further validations were carried out through current voltage characteristics testing. The results indicate that a larger proportion of holes transported to deeper quantum wells in samples with AlGaIn or GaN/AlN LQB. Experimental results show that the main reason of this improvement is the increasing proportion of holes injected through sidewall quantum wells of V-pits due to the suppression of hole injection through the c-plane MQWs, thereby enhancing hole injection efficiency. LEDs with GaN/AlN LQB exhibit lower forward voltage and higher luminous efficiency. On the other hand, a larger V-pits transport ratio can increase the non-radiative recombination rate, whereas limits the efficiency of samples with AlGaIn LQB. We conducted a detailed study on the carrier transport mechanisms and the roles of V-pits in GaN based LED devices.

Key words: light-emitting diodes; last quantum barrier; hole injection; InGaIn/GaN MQWs; V-pits

收稿日期: 2024-01-31; 修订日期: 2024-02-15

基金项目: 国家自然科学基金(62071405)

Supported by National Natural Science Foundation of China(62071405)

1 引言

随着显示技术的发展,市场对于LED显示芯片的性能要求越来越高,氮化镓基多量子阱发光二极管(Light emitting diode, LED)由于其效率高、稳定性强、覆盖波长范围广等优势受到广泛关注以及大量研究^[1-2]。但是,由于GaN衬底的高昂成本,商业GaN基LED一般采用蓝宝石衬底或硅衬底等异质衬底,与衬底之间较大的晶格失配造成GaN基LED的外延晶体质量较差,尤其对于高铜含量的绿光GaN基LED,其器件性能仍有较大提升空间^[3-4]。提升InGaN/GaN多量子阱绿色发光二极管的性能是氮化物LED领域的研究重点。

对于InGaN/GaN多量子阱LED器件,多量子阱中载流子的辐射复合率是决定器件光电转换效率的关键因素,这与载流子的传输机制密切相关。由于空穴相比于电子具有更大的有效质量和更低的迁移率,InGaN/GaN多量子阱中载流子传输主要由空穴的移动主导^[5]。在常规LED结构中,由于受到极化场及电子阻挡层带来的高空穴注入势垒的影响,空穴注入不足,多数空穴集中在接近p区的最后几个量子阱中^[6],这种空穴的不均匀分布造成辐射复合率下降,大大限制了LED的光电效率。

为了改善空穴注入情况,研究人员付出了诸多努力。有文献通过数值模拟证明,通过将p-AlGaN改为n-AlGaN可以有效降低空穴阻塞效应^[7]。也有学者通过对电子阻挡层的特殊设计改善空穴注入^[8]。2014年,Quan等提出GaN基器件生长过程中产生的V坑提供了新的空穴注入路径,增大了空穴的传输深度^[6],这一观点引起广泛关注并已经被诸多实验或仿真证实^[9-12]。V坑是具有6个 $\{10\bar{1}1\}$ 晶面侧壁的倒金字塔结构凹坑,由于其侧壁更小的结构厚度和半极性面更小的极化场,使得空穴更容易注入且提供了直接注入深层量子阱的路径。V坑所具有的增强空穴注入和屏蔽中心位错的特性可能是GaN基多量子阱LED在缺陷密度大于 $10^8/\text{cm}^2$ 的情况下仍然有较高发光效率的原因之一^[13]。

虽然国内外学者对于GaN基LED的空穴注入和V坑的作用进行了相关研究,但是数值模拟较多,并且主动利用V坑改善空穴注入的相关实验设计少有报道。本研究设计了不同的最后势垒层(Last quantum barrier, LQB),通过含Al的高势垒层抑制空穴通过平面量子阱的注入,以诱导更

多空穴通过V坑提供的空穴注入途径直接传输至更深层量子阱。通过低温电致发光光谱的信号分量分析、电流电压特性测试,研究了最后势垒层设计对于V坑载流子传输比例和器件光电性能的影响。实验结果证明,GaN/AlN最后势垒层提升了多量子阱的空穴注入效率和LED的光电效率,本文对该现象的机理展开了深入探讨。

2 实验

样品通过有机金属化学气相沉积系统(Metal-organic chemical vapor deposition, MOCVD)生长于c平面蓝宝石衬底上,采用三甲基铟(Trimethyl indium, TMIn)、三甲基镓(Trimethyl gallium, TM-Ga)、三甲基铝(Trimethyl aluminium, TMAI)作为III族源,以氮气作为载气,在势垒层生长过程中采用氢气和氮气的混合载气。在AlN缓冲层以及无掺杂GaN、n-GaN之后生长由3周期 $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ (2 nm)/GaN(45 nm)构成的预应变层,之后依次沉积10周期的 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ (2 nm)/GaN(8 nm)紫色多量子阱和9周期的 $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$ (3 nm)/GaN(10 nm)绿色多量子阱,随后生长p区结构,外延的详细结构见图1(a)。为了便于比较,本实验中四组样品除最后势垒层外,生长条件、结构均完全一致。在最后一个势垒层的生长过程中,样品一作为参考样品按常规结构生长GaN;样品二以AlN代替GaN;样品三以 $\text{Al}_{0.14}\text{Ga}_{0.86}\text{N}$ 作为最后势垒层;样品四在生长8.6 nm厚的GaN势垒后生长1.4 nm厚度的AlN薄膜,也就是GaN/AlN结构。样品三与样品四的最后势垒层的平均铝含量和总厚度不变。四组样品最后势垒层的生长条件保持一致,生长温度为850 °C,反应腔压力为26.67 kPa,同样在氮气与氢气的混合载气中生长。在外延生长结束后,四组样品采用标准芯片制备工艺,通过电感耦合等离子体(Inductively coupled plasma, ICP)刻蚀和紫外光刻技术切割并沉积透明导电薄膜(Indium tin oxides, ITO)电极,分别制成尺寸为88.9 μm ×144.8 μm 的正装mini-LED芯片。此外,还生长了未沉积p区结构的外延片样品进行扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)和透射电子显微镜(Transmission electron microscope, TEM)的拍摄,以便于直观地观察V坑的结构特征。图1(b)为量子阱表面的SEM成像图,可以清晰地观察到在多量子阱中生长的六角形凹坑结构。

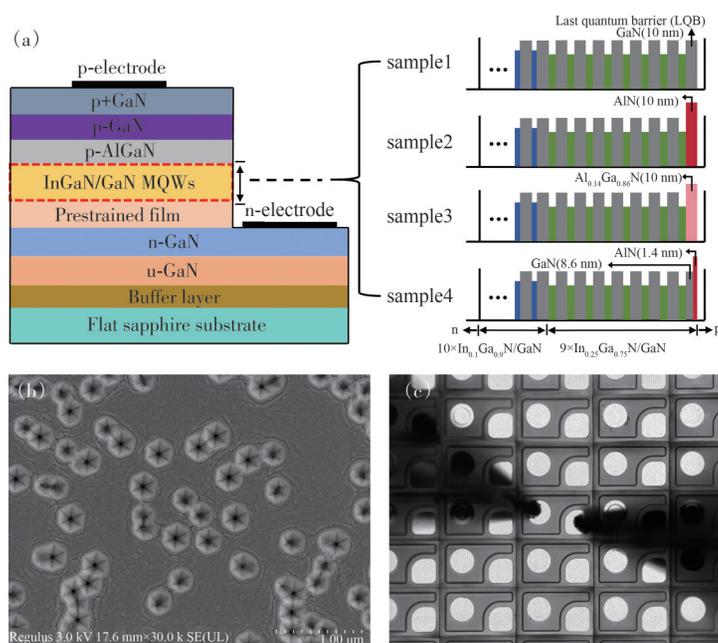


图 1 (a)LED 样品外延结构示意图;(b)多量子阱表面的 SEM 成像;(c)mini-LED 芯片光学显微镜成像图

Fig.1 (a) Schematic diagram of LED epitaxial structure. (b) Plan view SEM image of MQWs. (c) Optical microscopy image of mini-LEDs

SEM 图像由超高分辨场发射扫描电子显微镜 (HITACHI Regulus 8100) 采集;低温电致发光光谱及电流电压特性测试在低温探针台 (Lake-shore Model TTPX) 上将温度下降至 100 K 后完成;TEM 图像由高分辨透射电子显微镜 (FEI Talos F200X G2 TEM) 拍摄;LED 的光电性能利用积分球系统 (Instrument System) 测试。

3 结果与讨论

图 2 展示了在 100 K 温度、不同电流密度下测得 4 个样品的电致发光光谱,可以观察到四组样品均在电流密度逐渐增大时出现明显的除主发光峰之外的波峰 (图中 P2), 发光波长在 420 nm 左右。AlN LQB 样品的光谱与其他样品相比表现出较大差异,在电流密度达到 75 A/cm² 时其光谱中才出现 P2 分量,并且相比于其他样品比较弱,在 500 nm 左右有额外的信号分量,这将在稍后进行讨论。为了确定 P2 的来源,需要排除电子溢出到 p 区可能发生的 Mg 杂质能级相关复合。从图 3 中可以观察到,随着电流密度上升, P2 的波峰轻微蓝移且波形收窄,符合多量子阱的发光特征;并且 P2 的发光波长在 420 nm 左右,符合紫色多量子阱的预期波长,大于常见的 Mg 杂质能级复合发光波长,且波形明显更窄^[14-15],由此我们判断 P2 更有可能为深层紫色多量子阱发光^[16-17]。在 100 K 低温

环境下, Mg 杂质提供的空穴浓度降低,通过 c 平面注入的空穴基本不可能从绿色多量子阱的 9 个周期量子阱中逃逸并注入到紫色多量子阱中^[18],并且更低的空穴密度使得空穴相对更容易通过 V 坑注入^[12]。另外,在 Tao 等的研究中^[17],也观察到了类似的电致发光峰,并发现该发光峰的行为对 V 坑的大小具有依赖性,利用 V 坑侧壁注入的理论对实验现象进行了很好的解释。综合以上观点,我们认为本研究中 P2 主要是空穴通过 V 坑侧壁注入并传输到紫色多量子阱后发出的。

通过图 4 不同样品在 100 A/cm² 的电流密度、100 K 的环境温度下的归一化电致发光光谱对比,我们可以对载流子运输机制进行更深层的探究。在四组样品的 EL 光谱中均观察到明显的来自紫色多量子阱的发光,说明在该测试条件下这些样品中均有一定比例的空穴可以传输到深层紫色多量子阱,发出有效的电致发光信号。

相比于 GaN LQB 样品, AlGaN LQB 样品与 GaN/AlN LQB 样品的 P2 相对于 P1 的强度均增强,更多空穴注入到深层紫色多量子阱并发生辐射复合,这说明两组样品最后势垒层中高势垒材料的引入提高了空穴的纵向传输能力,略微的蓝移是由紫色多量子阱中的载流子密度上升引起的能带填充效应和量子限制斯塔克效应 (Quantum-confined Stark effect, QCSE) 的削弱造成的^[19]。图 5(a)

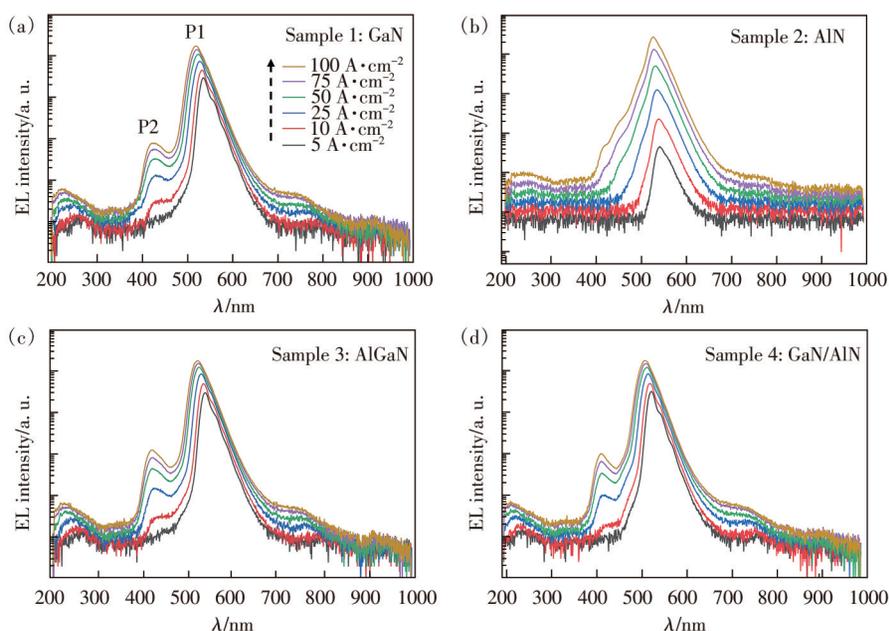


图 2 100 K 温度下测得样品一(a)、样品二(b)、样品三(c)和样品四(d)在不同电流密度下的 EL 光谱
 Fig.2 EL spectra of samples 1(a), 2(b), 3(c) and 4(d) with different current densities measured at 100 K

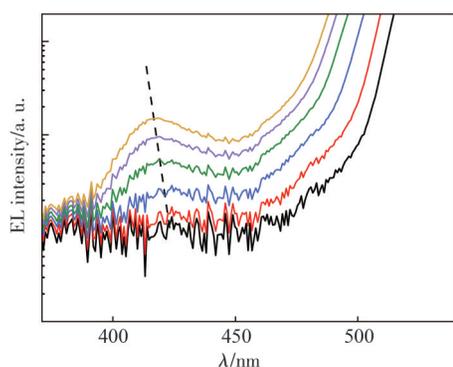


图 3 100 K 温度下样品四 P2 的电致发光光谱
 Fig.3 EL spectra of P2 in sample 4 measured at 100 K

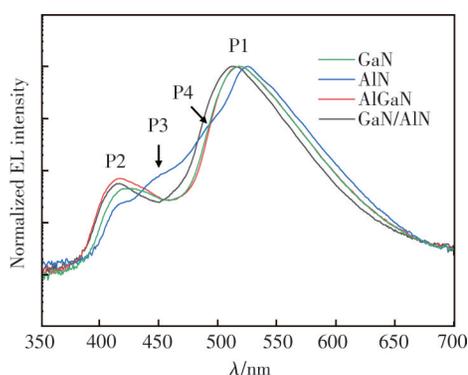


图 4 100 K 温度、100 A/cm² 电流密度下四组样品的归一化 EL 光谱
 Fig.4 Normalized EL spectra of samples measured at a temperature of 100 K and a current density of 100 A/cm²

为样品一中 V 坑的 TEM 图像,可以看到,V 坑以位错为中心,于预应变多量子阱层形成,逐渐扩展至绿色多量子阱顶层,在随后高温 p-GaN 的生长过

程中将被填充。由于四组样品中最后势垒层之前的结构和生长条件一致,在同一温度下生长的 10 nm 厚度不同最后势垒层对 V 坑的尺寸及密度的影响可以忽略不计。此外,在 V 坑的侧壁依然存在量子阱结构,但是厚度明显更小,实际上侧壁结构的厚度仅为平面结构的四分之一左右。AlGaIn LQB 样品与 GaN/AlN LQB 样品中的最后势垒引入了额外的高势垒结构,然而无论是 10 nm 厚度的 AlGaIn 还是 1.4 nm 厚度的 AlN,它们在侧壁的结构都非常薄,对侧壁量子阱的影响小于平面量子阱,使得空穴通过侧壁和 c 平面的注入势垒差距增大,这种差距的增大造成更多空穴倾向于通过 V 坑的侧壁进行传输^[20-21],这些空穴中的一部分又进一步传输到紫色多量子阱中,这是这两组样品的低温电致发光光谱中 P2 与 P1 的强度比例更大的原因。AlGaIn LQB 样品与 GaN/AlN LQB 样品的最后势垒层设计增大了空穴的传输深度,使得紫色多量子阱的发光峰 P2 的相对强度上升,这意味着在工作环境中,这两组样品的空穴在多量子阱中的纵向分布将更加均匀,有利于提升 LED 的辐射复合率。

AlN LQB 样品的 P2 信号分量最弱,但是在 P2 右侧有其他信号分量存在,我们将其分别命名为 P3 和 P4,标注在图 4 中。为了确定它们的来源,我们需要了解空穴在 V 坑附近可能的消耗方式,见图 5(b)。首先,空穴有可能在 V 坑侧壁中发生

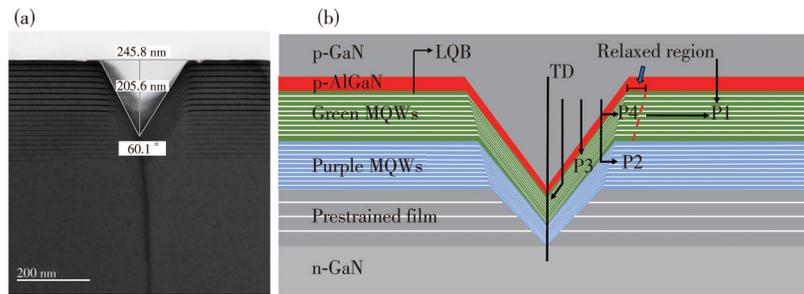


图5 (a)V坑的TEM图像;(b)V坑结构示意图及发光峰对应复合位置

Fig.5 (a)TEM image of V-pits. (b)Schematic diagram of V-pits and corresponding composite positions of luminescent peaks

辐射复合;其次,有可能横向传输至平面量子阱发生辐射复合发出P1^[11];然后,还有可能通过V坑的中心位错泄露^[22];最后,部分空穴进一步传输至深层紫色多量子阱发出P2。在AlN LQB样品中,空穴很难通过c平面量子阱顶部的10 nm厚的AlN注入量子阱,这使得大量空穴倾泻到V坑或其他缺陷中^[23],造成严重的载流子泄露,进而使正向电压大幅降低(见图6),造成空穴的动能不足,更倾向于在V坑或V坑附近发生复合。Song^[24]的研究中提出,V坑的形成提高了InGaIn层的应变弛豫度,这意味着V坑周围的量子阱发射波长将蓝移^[25-26]。我们认为这就是P4的来源,也就是说AlN LQB样品中大量载流子在V坑附近量子阱复合,使得P4信号分量上升,同时,在V坑侧壁量子阱的复合造成P3的发射^[16-17]。而在其他样品中,由于侧壁发光峰波长分布范围较广^[27],且空穴传输距离较远,在侧壁发生辐射复合的概率较小,P3和P4信号分量无法明确分辨。

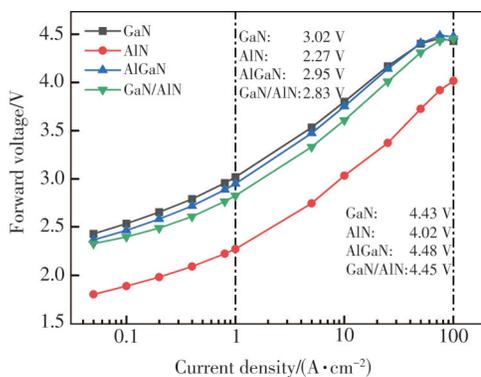


图6 100 K温度下电流电压特性测试结果

Fig.6 I - V curves measured at 100 K

值得一提的是,GaN/AlN LQB样品的P2峰强度比例略小于AlGaIn LQB样品,这可能是由于1.4 nm厚度AlN提供了较高的隧穿几率造成的^[28-29],说明该样品中由空穴注入效率差距引起的载流子诱导效应弱于AlGaIn LQB样品,空穴通过

V坑的传输比例更小。

从图6中的电流电压特性曲线中可以观察到,除AlN LQB样品发生较严重的泄露使得正向电压大幅降低外,AlGaIn LQB样品与GaN/AlN LQB样品均呈现出小电流密度下正向电压小于GaN LQB样品;随着电流密度上升,正向电压增长更快,逐渐与GaN LQB样品持平,在100 A/cm²时,超过GaN LQB样品的趋势。这可以用不同电流密度下的载流子不同传输路径解释。小电流注入时,载流子密度较低,由结构厚度和极化场的差异造成的空穴诱导效应更为有效,通过V坑侧壁传输的载流子比例较高,而侧壁量子阱的阻力小于平面量子阱,使得正向电压下降^[20],然而,在电流密度逐渐升高时,空穴密度上升造成有效注入势垒降低^[30],削弱了平面量子阱与侧壁量子阱的势垒差距,造成平面量子阱的空穴注入比例增大,AlGaIn LQB样品与GaN/AlN LQB样品的正向电压逐渐与GaN LQB样品接近。另一方面,极化场的影响也可能造成这一现象。Li等利用三维模型对V坑的空穴分布情况进行了仿真^[11],发现在电流密度达到100 A/cm²时,极化电场被抵消使得空穴相对更容易从c平面注入,并集中于顶层的几个量子阱周期内。

同时我们注意到,GaN/AlN LQB样品的正向电压明显小于AlGaIn LQB样品,可能有其他机制造成该样品的正向电压进一步降低。在之前的一些报道中^[29,31],也对类似结构进行过研究,发现在有源区和p区之间插入的AlN薄膜会造成价带倾斜率增大,在LQB/p-AlGaIn界面形成空穴聚集,并使以隧穿的方式注入的空穴获得额外的能量,造成正向电压降低。我们认为这一机制可能是本实验中GaN/AlN LQB样品的正向电压比AlGaIn LQB样品更低的原因,也就是说,GaN/AlN LQB样品不仅增大了V坑的空穴传输比例,还使得通过隧穿

注入的空穴获得了更大的动能,进一步降低了正向工作电压。总之, I - V 测试结果可以用空穴通过 V 坑侧壁的传输来很好地解释,并且根据电压差距的变化可以进一步证实,通过 V 坑侧壁的空穴注入比例随电流密度增大而减小。

图 7 和图 8 分别为 4 个样品在常温条件下测试所得 2 A/cm^2 注入下的 EL 光谱和外量子效率 (External quantum efficiency, EQE) 随电流密度的变化曲线。可以看到 GaN/AlN LQB 样品的峰值 EQE 获得了明显提升,达到了 22.5%,相比于常规 GaN LQB 样品的 20.6% 提升了 9.2%;而 AlGaIn LQB 样品介于二者之间,峰值效率为 20.7%;AlN LQB 样品的峰值效率最低,为 19.2%。AlGaIn LQB 样品与 GaN/AlN LQB 样品效率的提升主要来自于空穴注入效率的提升。而 AlN LQB 样品的效率相比于常规样品严重降低,结合上述 EL 与 I - V 测试结果,我们认为除了最后势垒层对空穴注入的巨大阻力造成载流子泄露增多之外,AlN 与 InGaIn 之间较大的失配应力可能在该样品的量子阱中产生了更多微裂纹等缺陷^[32],使得样品的漏电更加严重,进而影响了发光效率。

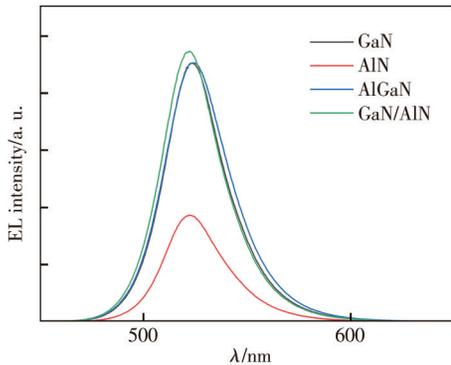


图 7 室温、 2 A/cm^2 注入条件下样品的 EL 光谱

Fig.7 EL spectra of samples at 300 K and current density of 2 A/cm^2

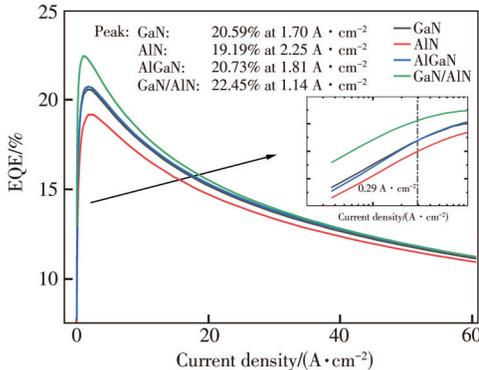


图 8 mini-LED 芯片 EQE 随电流密度变化曲线

Fig.8 EQE of mini-LED chips at different current densities

综合上述测试结果,我们可以发现,LED 的 EQE 并非与 EL 光谱中的 P2 与 P1 的相对强度比例正相关(见图 9)。在之前的分析中,我们发现 GaN/AlN LQB 样品的 P2 强度比例略小于 AlGaIn LQB 样品,但是其 EQE 却明显高于 AlGaIn LQB 样品,这可能与 V 坑的中心位错有关。在上文低温 EL 实验中,由于 100 K 环境温度下 SRH(Shockley-Read-Hall)复合被抑制,所以没有考虑 V 坑中心发生的非辐射复合;但是,在常温条件下,当更多载流子被迫通过 V 形凹坑侧壁传输时,也会有更多载流子有机会被 V 坑中心的非辐射复合中心捕获参与缺陷相关非辐射复合,造成效率降低^[13]。换言之,AlGaIn LQB 样品过大的 V 坑侧壁空穴注入比例提高了非辐射复合率,进而限制了该样品的效率。从图 8 中的插图可以看到,当电流密度小于 0.29 A/cm^2 时,AlGaIn LQB 样品的效率相比于 GaN LQB 样品有所降低;电流密度逐渐升高时,其 EQE 才逐渐与 GaN LQB 样品持平,随后超过 GaN LQB 样品。之前我们讨论过,在小电流密度下,空穴的 V 坑传输比例较高,随着电流密度上升逐渐降低,在小电流密度下更多空穴聚集在 V 坑,使非辐射复合率上升,与 Li 等的仿真结果一致^[11],这是 GaN LQB 样品与 AlGaIn LQB 样品的效率存在交叉的原因。所以通过诱导载流子通过 V 坑进行传输提升 LED 效率需要进行两种效应之间的平衡,增大 V 坑的空穴传输比例一方面提高了平面量子阱中的辐射复合率,同时也增大了 V 坑中的载流子损失,两者互为竞争关系,净效应需要通过实验测定。

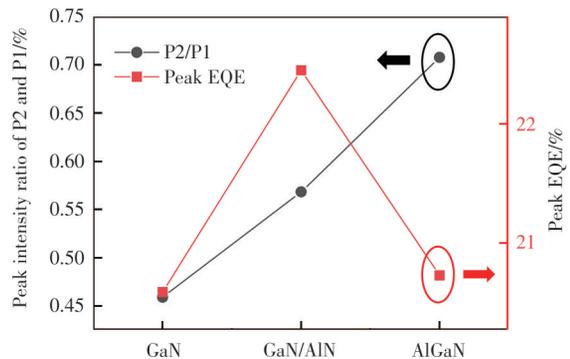


图 9 三个样品低温 EL 光谱 P2 与 P1 的比值与峰值 EQE 的关系

Fig.9 Relationship between the ratio of P2 to P1 in the LTEL spectra and peak EQE of samples

S 值(L - I 对数曲线的斜率)可用于研究 InGaIn 基 LED 的载流子复合机制^[33]。如果 S 值等于 2,则

表示SRH复合占主导地位;如果 S 值等于1,则意味着辐射复合占主导地位;当 S 值小于1时,表示发生载流子泄漏。图10显示了由样品的 $L-I$ 曲线计算的 S 值,当电流密度在 $0.2\sim 1\text{ A/cm}^2$ 之间时,4个样品的 S 值都大于1,并且GaN/AlN LQB样品的 S 值明显更接近于1。这意味着在较低电流密度下,该样品中的非辐射复合率更小,进一步表明GaN/AlN LQB样品的高效率来自于空穴注入增强带来的更高的辐射复合率。同时,AlN LQB样品与AlGaNLQB样品的 S 值更接近2,说明在这两个样品中非辐射复合率较高,这与我们之前提出的过大的V坑传输比例会提高V坑中心位错捕获载流子的概率、并使非辐射复合率上升的观点相一致。

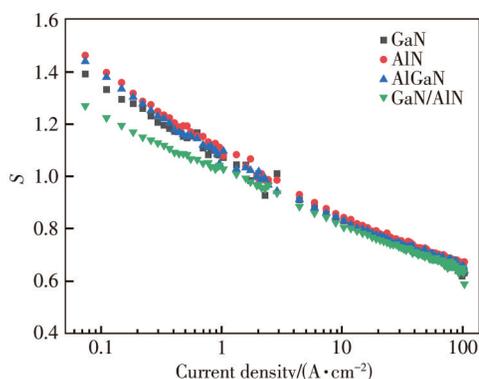


图10 四组样品的 S 值与电流密度的关系

Fig.10 S -values of four samples at different current densities

需要注意,在大电流密度下GaN LQB样品与GaN/AlN LQB样品的EQE趋于接近,GaN/AlN LQB的效率下降更加严重,这是由于当电流密度上升时平面量子阱的空穴传输比例上升造成的。

参 考 文 献:

- [1] 李嘉豪, 韩军, 邢艳辉, 等. 不同Mo层厚度的AlN/Mo/Sc_{0.2}Al_{0.8}N复合结构上MOCVD外延GaN[J]. 发光学报, 2023, 44(6): 1077-1084.
LI J H, HAN J, XING Y H, *et al.* GaN grown on sputtered AlN/Mo/Sc_{0.2}Al_{0.8}N composite structure with different Mo thickness [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(6): 1077-1084. (in Chinese)
- [2] 邝海, 黄振, 熊志华, 等. 氮化镓基Micro-LED侧壁对外量子效率的影响及侧壁处理技术综述[J]. 中国光学(中英文), 2023, 16(6): 1305-1317.
KUANG H, HUANG Z, XIONG Z H, *et al.* A review of the effect of GaN-based micro-LED sidewall on external quantum efficiency and sidewall treatment techniques [J]. *Chin. Opt.*, 2023, 16(6): 1305-1317. (in Chinese)
- [3] WONG M S, NAKAMURA S, DENBAARS S P. Review: progress in high performance III-nitride micro-light-emitting diodes [J]. *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, 2020, 9(1): 015012.
- [4] 林毅, 周雷, 范宝路, 等. 高稳定性ZnO:Ga/InGaIn异质结微型绿光发光二极管[J]. 发光学报, 2022, 43(12): 1965-1973.
LIN Y, ZHOU L, FAN B L, *et al.* High stable micro green light-emitting diodes based on ZnO: Ga/InGaIn heterojunction [J].

当平面量子阱传输处于主导地位时,该样品中由空穴注入增强带来的效率提升逐渐消失,同时最后势垒层中的GaN/AlN界面的电子聚集可能造成更严重的俄歇复合。

4 结 论

本研究通过低温EL光谱和电流电压特性曲线证实,AlGaIn或GaN/AlN最后势垒层可以增强GaN基LED的空穴注入效率,通过V坑侧壁的空穴注入理论可以很好地解释本实验的现象并与实验测试结果相印证。LED性能的提升主要来自于空穴的V坑注入比例的增加,AlGaIn和GaN/AlN最后势垒层抑制了平面量子阱的空穴注入,迫使更多载流子通过V坑侧壁注入更深层量子阱,提高了空穴注入效率。但是,实验也证实过大的V坑注入比例也会增加非辐射复合率,使器件性能下降。其中,GaN/AlN最后势垒层在增大V坑的空穴注入比例的同时也提供了较大的隧穿概率,平衡了通过V坑和 c 平面的空穴注入,并进一步降低了工作电压,获得了最好的性能表现。因此,对于具有V坑缺陷的GaN基LED外延结构,我们建议在最后势垒层中引入高势垒薄膜以提高空穴注入效率。本研究对于理解V坑对GaN基LED的影响和其作用机制以及提升GaN基绿色LED的器件性能具有参考意义。

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.20240027>.

- Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(12): 1965-1973. (in Chinese)
- [5] NAKAMURA S, SENOH M S M, MUKAI T M T. Highly p-typed Mg-doped GaN films grown with GaN buffer layers [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1991, 30(10A): L1708-L1711.
- [6] QUAN Z J, WANG L, ZHENG C D, *et al.* Roles of V-shaped pits on the improvement of quantum efficiency in InGaN/GaN multiple quantum well light-emitting diodes [J]. *J. Appl. Phys.*, 2014, 116(18): 183107.
- [7] YEN S H, TSAI M C, TSAI M L, *et al.* Effect of n-type AlGaIn layer on carrier transportation and efficiency droop of blue InGaIn light-emitting diodes [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2009, 21(14): 975-977.
- [8] ZHANG Y Y, YIN Y A. Performance enhancement of blue light-emitting diodes with a special designed AlGaIn/GaN superlattice electron-blocking layer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 99(22): 221103.
- [9] LI Y F, YUN F, SU X L, *et al.* Deep hole injection assisted by large V-shape pits in InGaIn/GaN multiple-quantum-wells blue light-emitting diodes [J]. *J. Appl. Phys.*, 2014, 116(12): 123101.
- [10] MARCINKEVIČIUS S, EWING J, YAPPAROV R, *et al.* Experimental evidence of hole injection through V-defects in long wavelength GaN-based LEDs [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2023, 123(20): 201102.
- [11] LI C K, WU C K, HSU C C, *et al.* 3D numerical modeling of the carrier transport and radiative efficiency for InGaIn/GaN light emitting diodes with V-shaped pits [J]. *AIP Adv.*, 2016, 6(5): 055208.
- [12] WU X M, LIU J L, QUAN Z J, *et al.* Electroluminescence from the sidewall quantum wells in the V-shaped pits of InGaIn light emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, 104(22): 221101.
- [13] HANGLEITER A, HITZEL F, NETZEL C, *et al.* Suppression of nonradiative recombination by V-shaped pits in GaInN/GaN quantum wells produces a large increase in the light emission efficiency [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, 95(12): 127402.
- [14] OBLOH H, BACHEM K H, KAUFMANN U, *et al.* Self-compensation in Mg doped p-type GaN grown by MOCVD [J]. *J. Cryst. Growth*, 1998, 195(1-4): 270-273.
- [15] KAUFMANN U, KUNZER M, MAIER M, *et al.* Nature of the 2.8 eV photoluminescence band in Mg doped GaN [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, 72(11): 1326-1328.
- [16] ZHANG Y H, LV Q J, ZHENG C D, *et al.* Recombination pathways and hole leakage behavior in InGaIn/GaN multiple quantum wells with V-shaped pits [J]. *Superlattices Microstruct.*, 2019, 136: 106284.
- [17] TAO X X, MO C L, LIU J L, *et al.* Electroluminescence from the InGaIn/GaN superlattices interlayer of yellow LEDs with large V-pits grown on Si (111) [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2018, 35(5): 057303.
- [18] DAVID A, GRUNDMANN M J, KAEDING J F, *et al.* Carrier distribution in (0001)InGaIn/GaN multiple quantum well light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 92(5): 053502.
- [19] NAKAMURA S. The roles of structural imperfections in InGaIn-based blue light-emitting diodes and laser diodes [J]. *Science*, 1998, 281(5379): 956-961.
- [20] WANG Z X, MO C L, ZHENG C D, *et al.* Effect of AlGaIn interlayer in bottom quantum barriers on efficiency enhancement of InGaIn green light-emitting diodes [J]. *Superlattices Microstruct.*, 2019, 128: 307-311.
- [21] DENG F, QUAN Z J, XU Y, *et al.* Effect of hole blocking layer on V-pit hole injection and internal quantum efficiency in GaIn-based yellow LED [J]. *J. Appl. Phys.*, 2020, 127(18): 185704.
- [22] LE L C, ZHAO D G, JIANG D S, *et al.* Carriers capturing of V-defect and its effect on leakage current and electroluminescence in InGaIn-based light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 101(25): 252110.
- [23] KIM J, KIM J, TAK Y, *et al.* Effect of V-shaped pit size on the reverse leakage current of InGaIn/GaN light-emitting diodes [J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 2013, 34(11): 1409-1411.
- [24] SONG T L. Strain relaxation due to V-pit formation in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ epilayers grown on sapphire [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, 98(8): 084906.
- [25] WU X M, LIU J L, JIANG F Y. Hole injection from the sidewall of V-shaped pits into *c*-plane multiple quantum wells in InGaIn light emitting diodes [J]. *J. Appl. Phys.*, 2015, 118(16): 164504.
- [26] SHEEN M H, KIM S D, LEE J H, *et al.* V-pits as barriers to diffusion of carriers in InGaIn/GaN quantum wells [J]. *J. Electron. Mater.*, 2015, 44(11): 4134-4138.
- [27] HITZEL F, KLEWER G, LAHMANN S, *et al.* Localized high-energy emissions from the vicinity of defects in high-efficiency $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ quantum wells [J]. *Phys. Rev. B*, 2005, 72(8): 081309.

- [28] ZHANG Z H, CHEN S W H, ZHANG Y H, *et al.* Hole transport manipulation to improve the hole injection for deep ultraviolet light-emitting diodes [J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(7): 1846-1850.
- [29] CHU C S, TIAN K K, CHE J M, *et al.* On the origin of enhanced hole injection for AlGaIn-based deep ultraviolet light-emitting diodes with AlN insertion layer in p-electron blocking layer [J]. *Opt. Express*, 2019, 27(12): A620-A628.
- [30] CHU C S, TIAN K K, FANG M Q, *et al.* On the $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($x>y$) p-electron blocking layer to improve the hole injection for AlGaIn based deep ultraviolet light-emitting diodes [J]. *Superlattices Microstruct.*, 2018, 113: 472-477.
- [31] TAO G Y, ZHAO X Y, ZHOU S J. Stacked GaN/AlN last quantum barrier for high-efficiency InGaIn-based green light-emitting diodes [J]. *Opt. Lett.*, 2021, 46(18): 4593-4596.
- [32] COSTA P M F J, DATTA R, KAPPERS M J, *et al.* Misfit dislocations in In-rich InGaIn/GaN quantum well structures [J]. *Phys. Status Solidi A*, 2006, 203(7): 1729-1732.
- [33] KIM K S, HAN D P, KIM H S, *et al.* Analysis of dominant carrier recombination mechanisms depending on injection current in InGaIn green light emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, 104(9): 091110.



张东皓(1997-),男,河北邢台人,硕士研究生,2019年于燕山大学获得学士学位,主要从事 GaN 基 LED 外延设计相关的研究。

E-mail: 36620211150374@stu.xmu.edu.cn



包立君(1981-),女,河北张家口人,博士,副教授,2010年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事人工智能、图像处理与分析、光电技术、计算成像相关的研究。

E-mail: baolijun@xmu.edu.cn