

GaN 基 LED 中 V 形坑缺陷的研究进展

刘青明¹, 尚 林¹, 邢茹萍¹, 侯艳艳¹, 张 帅¹, 黄佳瑶¹,
马淑芳¹, 许并社^{1,2}

(1. 陕西科技大学前沿科学与技术转移研究院 材料原子·分子科学研究所, 陕西 西安 710021)

(2. 太原理工大学 新材料界面科学与工程教育部重点实验室, 山西 太原 030024)

摘 要: 自低温 AlN、GaN 形核技术和高温热退火技术实现了外延高质量 GaN 薄膜和激活 p 型 GaN 受主以来, GaN 基光电器件得到了迅猛发展。但是, GaN 基光电器件依然存在诸多基础性问题, 特别是基于异质衬底外延的 GaN 基 LED 外延层中的位错密度高达 10^8 cm^{-2} , 内量子效率却超过 50%。V 形坑是 GaN 基 LED 外延层中一种常见的倒金字塔缺陷, 6 个侧面与 c 面的夹角均为 62° 。基于 V 形坑缺陷对 LED 光电性能影响的研究成果, 介绍了 V 形坑中侧壁量子阱屏蔽位错理论: 侧壁量子阱的 In 含量较低, 其势垒高度大于 c 面量子阱, 故在穿透位错周围形成了高势垒, 阻挡载流子被非辐射复合中心所捕获。此外, 还综述了 V 形坑缺陷的形成机理、附近区域的发光特性、对 LED 电学特性的影响以及通过优化 V 形坑调控 LED 光电性能的研究。

关键词: 氮化镓; V 形坑缺陷; 非辐射复合; 光电性能

中图分类号: TN311⁺.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2020)12-0968-06

Research Progress on V-Shaped Pit Defects of GaN-Based LED

LIU Qingming¹, SHANG Lin¹, XING Ruping¹, HOU Yanyan¹, ZHANG Shuai¹,
HUANG Jiayao¹, MA Shufang¹, XU Bingshe^{1,2}

(1. Institute of Atomic and Molecular Science, Frontier Institute of Science and Technology, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

(2. Key Laboratory of Interface Science and Engineering in Advanced Materials of Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Based on the low-temperature nucleation technology of AlN and GaN, as well as high-temperature thermal annealing technology, the epitaxial growth of high-quality GaN thin films and the activation of p-GaN acceptor has been realized. Since then, GaN-based optoelectronic devices have a great development. However, there are still some fundamental problems for GaN-based optoelectronic devices. Especially, the internal quantum efficiency of GaN-based LED epitaxially grown on heterogeneous substrates is more than 50% while its dislocation density is as high as 10^8 cm^{-2} . V-shaped pits in the shape of inverted pyramid are common defects in the epitaxial layer of GaN-based LEDs. There are six side-walls in V-shaped pits, and these side-walls all have the angle of 62° with c -plane. Based on the research results of influence of V-shaped pits on optical and electrical properties of LEDs, the screening dislocation theory induced by sidewall quantum wells (QWs) in V-shaped pits was introduced. Owing to the low In content, the barrier height of sidewall QWs is much higher than that of c -plane QWs. Therefore, a high barrier formed around the threading dislocation, which prevents carriers

from being captured by the non-radiative recombination center. Moreover, the formation mechanism, surrounding optical properties of V-shaped pits and its influence on electrical properties of LEDs were also reviewed. Meanwhile, the research on optical and electrical properties of LED controlled by V-shaped pits optimization was discussed.

Key words: GaN; V-shaped pit defects; non-radiative recombination; optical and electrical property

收稿日期: 2019-06-28 修回日期: 2020-01-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0401803);
山西省重点研发计划项目(201703D111026)

第一作者: 刘青明, 男, 1990 年生, 博士研究生

通讯作者: 马淑芳, 女, 1970 年生, 教授, 博士生导师,

Email: mashufang@ sust. edu. cn

DOI: 10. 7502/j. issn. 1674-3962. 201906042

1 前言

氮化镓 (GaN) 作为第三代宽禁带直接带隙半导体, 具有耐高温高压、抗腐蚀、高电子饱和漂移速率、结构稳定等优点, 被广泛应用于发光二极管 (LED)、激光二极管 (LD)、光探测器 (PD)、场效应晶体管 (FET) 等光电子和微电子器件中, 极大地推动了半导体照明、移动通讯、高分辨显示、深紫外探测等领域的发展^[1-8]。近年来, GaN 基光电器件发展迅速, 发光波段逐渐由蓝光向高铝 (Al) 含量的深紫外和高铟 (In) 含量的黄光乃至红光波段发展^[9-11]; 类型由发光二极管向外延结构更复杂的边发射、垂直腔发射激光器发展^[12, 13]; 应用领域由照明源向高分辨显示、可见光通讯、杀菌消毒医疗技术等发展。然而, GaN 基 LED 中依然存在诸多悬而未决的基础性问题, 如 V 形坑缺陷、极化、高效 p 型掺杂、光提取效率等问题^[14-17]。异质衬底上生长的 GaN 基 LED 外延层的位错密度高达 10^8 cm^{-2} , 而内量子效率却超过了 50%, 这与传统的砷化镓 (GaAs) 基光电器件显著不同。GaN 基 LED 高位错密度下高发光效率的物理机制一般可通过局域态屏蔽位错理论和 V 形坑屏蔽位错理论进行解释^[18-21]。前者认为在外延 InGaN/GaN 多量子阱时, 由于 In 掺杂不均匀而形成富 In 区, 因此注入有源区的载流子被限制在势能的谷底, 避免被位错处的非辐射复合中心捕获, 从而使 LED 具有较高的发光效率; 后者认为外延 InGaN/GaN 多量子阱时, 穿透位错处会形成具有侧壁量子阱的 V 形坑, 侧壁量子阱的 In 含量较低、禁带宽度较大、势垒较高, 此高势垒可阻挡载流子被非辐射复合中心捕获。

自 2005 年 Hangleiter 等^[20]提出 V 形坑屏蔽位错理论以来, V 形坑中侧壁量子阱的特殊载流子调控机制引起了科研人员的重视。特别是随着外延技术和表征手段的发展, 近年来有关 V 形坑及其附近区域量子阱的载流子传输机制和发光特性、通过 V 形坑调控器件光电性能的相关研究逐渐丰富起来。基于此, 本文从 V 形坑形成机理、V 形坑附近区域量子阱的发光特性、V 形坑对 LED 电学特性的影响和通过 V 形坑调控 LED 光电性能 4 个方面进行综述。

2 V 形坑的形成机制

本文所介绍的 V 形坑存在于具有纤锌矿结构的 GaN 基 LED 的多量子阱中, 形状为倒金字塔状, 有 6 个侧面, 每个侧面为 $\{10\bar{1}1\}$ 面, 侧面与 c 面的夹角均为 62° , 其结构示意图如图 1a 所示^[22]。图 1b 为高分辨电子透射显微镜 (HRTEM) 下观察到的 V 形坑形貌照片^[20], V 形坑中侧壁量子阱的周期数与 c 面量子阱的相同, 厚度约

为 c 面量子阱的 $1/3$, 且其厚度会因生长条件的不同而产生波动。而且, 在后续生长高温 p-GaN 时, V 形坑可以被填平。由利用三维原子探针获得的 V 形坑中 In 原子和 Ga 原子的成分分布图 (图 1c) 可以看出, 侧壁量子阱中 In 原子层的厚度较薄且分布不均匀^[23]。V 形坑中侧壁量子阱屏蔽位错处非辐射复合中心的示意图如图 1d 所示, 由于 V 形坑一般在穿透位错处形成, 且侧壁量子阱的 In 含量较低, 因此在穿透位错周围形成了较高的势垒, 此高势垒可以阻挡载流子被位错处非辐射复合中心捕获^[20]。

关于 V 形坑的形成机制多数观点认为, 生长 InGaN/GaN 多量子阱时, 量子阱/垒间的晶格失配使 c 面量子阱内存在较大应力, 以及其较低的生长温度使量子阱表面原子迁移率降低, 从而形成了 V 形坑。但是, V 形坑的主要形成原因是面内应力还是原子迁移率, 亦或是两者共同作用, 尚存在争议。

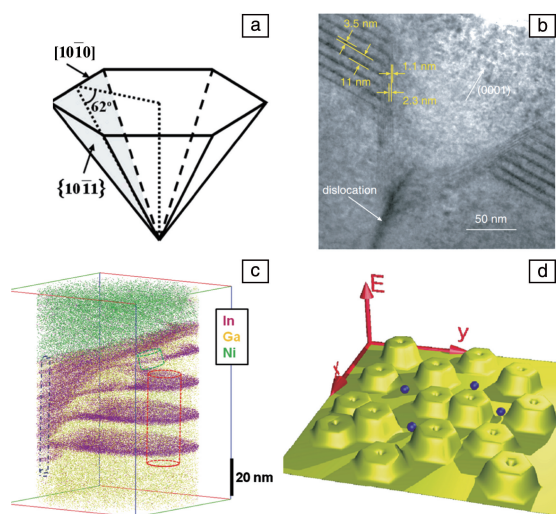


图 1 V 形坑的结构示意图(a)^[22]; InGaN/GaN 多量子阱 (MQWs) 中 V 形坑的 HRTEM 照片(b)^[20]; V 形坑中 Ga, In 原子的成分分布图(c)^[23]; V 形坑屏蔽位错处非辐射复合中心的示意图(d)^[20]

Fig. 1 Structural schematic diagram of V-shaped pit (a)^[22]; HRTEM image of a V-shaped pit in InGaN/GaN MQWs (b)^[20]; composition distribution map of In and Ga in a V-shaped pit (c)^[23]; schematic diagram of V-shaped pits screening non-radiative composite center of dislocations (d)^[20]

Mahanty 等^[24]通过固定量子阱总厚度, 改变 InGaN 阱层和 GaN 垒层的厚度来研究 V 形坑的产生机制。结果表明, V 形坑的出现与多量子阱中 InGaN 的总厚度有关, 固定 In 含量为 12.6% (原子数百分数, 下同), 当 InGaN 总厚度超过临界厚度 25 nm 时, V 形坑开始出现, 且随着 InGaN 总厚度的增加, V 形坑的尺寸也逐渐增加。然而, 在 InGaN 的总厚度不超过临界厚度的情况下, 适当降低阱

层的生长温度, V 形坑也并未出现。因此, 他们认为 V 形坑的出现主要是由 InGaN 和 GaN 间晶格失配所产生的应力导致的, 当 InGaN 总厚度超过临界厚度时, 量子阱中的面内应力通过表面粗糙化的方式进行释放, 即形成 V 形坑。Lin 等^[25]的结果也支持上述理论, 通过增加 In 含量来增加多量子阱中的应力, 结果表明 V 形坑密度随 In 含量的增加而增加, 并认为 InGaN 与 GaN 间失配应力的增加是 V 形坑密度增加的主要原因。Sharma 等^[26]认为低温下较低的 Ga 原子迁移率是形成 V 形坑的主要原因。他们在 n-GaN 上依次生长了 5 个周期的 InGaN/GaN 多量子阱, 在多量子阱中可以清晰地观察到 V 形坑。然而, 后续生长高温 p-GaN 时, V 形坑逐渐被 p-GaN 填平。他们认为在低温生长多量子阱时, (0001) 面 Ga 原子的迁移能力较弱, 破坏了 GaN 的二维台阶流生长模式, 因此形成了 V 形坑; 而后续生长高温 p-GaN 时, Ga 原子迁移率增加, 又将 V 形坑填平。Kim 等^[27]则认为 InGaN 和 GaN 间的失配应力和原子迁移率降低都是 V 形坑形成的主要原因。他们在不改变阱垒厚度比的条件下, 通过增加量子阱的 In 含量和周期厚度来研究 V 形坑的产生机制。结果发现, 当 In 含量为 13%、多量子阱的周期厚度为 5 nm 时, V 形坑未出现; 而当 In 含量超过 20%、多量子阱周期厚度大于

8.4 nm 时, V 形坑出现了。这是由于较高的 In 含量和较大的周期厚度使量子阱中的应力增加。另外, 他们还通过对比分子束外延生长 (MBE) 和金属有机气相外延生长 (MOCVD) 两种方法来研究 V 形坑的形成机制。结果表明, 使用 MBE 技术生长的 InGaN 单层在生长温度更低、In 含量更高、厚度更厚 (温度为 500~600 °C, In 含量约为 20%, 厚度约为 150 nm) 的情况下, 并没有出现 V 形坑, 而以 MOCVD 技术生长的样品在温度更高、In 含量更低、厚度更薄 (温度约为 700 °C, In 含量约为 6%, 厚度约为 100 nm) 的条件下, 却形成了 V 形坑。这可能归因于采用 MBE 技术生长样品时, 通过射频等离子体使 NH_3 分解, 活性 N 原子的原子迁移率更高, 抑制了 V 形坑的出现。

3 V 形坑附近材料的发光特性

Hangleiter 等^[28]在 22 K 下测试不同 V 形坑中侧壁量子阱的发光峰, 如图 2a 所示侧壁量子阱的峰值波长较 c 面量子阱蓝移 20~50 nm 不等。Hao 等^[29]也同样测得了侧壁和 c 面量子阱的发光峰 (图 2b)。Xu 等^[30]利用微区变温光致发光 (PL) 测试, 研究了 V 形坑及其附近 c 面量子阱在不同温度下的发光特性。结果表明, 随着温度的升高, 短波长的峰占主导地位且峰位出现蓝移现象, 如图 2c 所

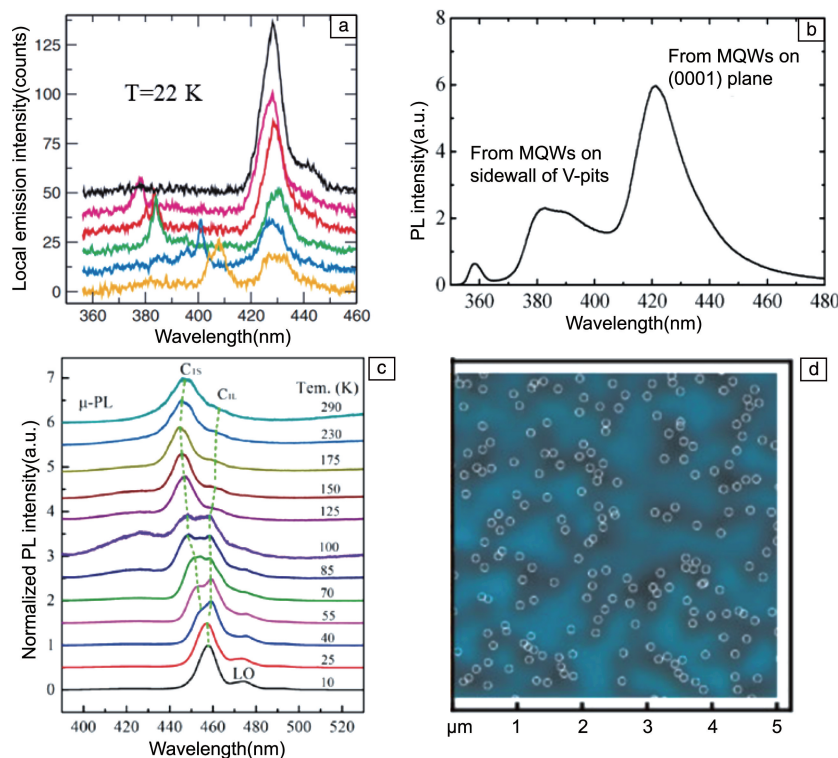


图 2 多量子阱 (MQWs) 的光致发光 (PL) 行为: (a) 穿透位错附近不同纳米尺度区域的低温发射光谱^[28]; (b) V 形坑中侧壁和 c 面量子阱 (QWs) 的 PL 图谱^[29]; (c) 不同温度下侧壁和 c 面量子阱的 PL 图谱^[30]; (d) MQWs 阱的 PL 显微照片^[31]

Fig. 2 Photoluminescence (PL) behaviors of MQWs: (a) low-temperature emission spectrum of different nm-sized areas close to threading dislocations^[28]; (b) PL spectra of sidewall and c-plane QWs in V-shaped pits^[29]; (c) PL spectrum of sidewall and c-plane QWs under different temperatures^[30]; (d) PL microscopy image of MQWs^[31]

示。这归因于在 V 形坑附近的 c 面量子阱中, 载流子迁移率随温度的升高而增加, 使得更高比例的载流子在较高能量处发生跃迁辐射, 在此过程中, 限制在侧壁量子阱中的载流子获得了足够的能量从而传输到 V 形坑附近的 c 面量子阱中。Meyer 等^[31]通过微区光致发光扫描系统(PL mapping)研究了 V 形坑缺陷附近区域量子阱的发光特性, 结果表明 V 形坑附近的 PL 强度明显较弱, 且暗区(V 形坑)附近发光峰的能量比 c 面量子阱高数个 meV, 这说明 V 形坑中的侧壁量子阱显著影响周围 c 面量子阱的发光性能(图 2d)。

还有一些研究同样证实了 V 形坑侧壁量子阱对其附近 c 面量子阱的发光性能产生了重要影响^[32-35]。归纳起来, V 形坑附近 c 面量子阱的 In 含量和厚度有一定的波动, 与远离 V 形坑的 c 面量子阱相比, 其应力较小, 缓解了量子限制斯塔克效应, 使其发光峰蓝移。V 形坑中侧壁量子阱的 In 含量较低, 其势垒高度大于 c 面量子阱的, 故侧壁量子阱能够在穿透位错周围形成高势垒, 阻挡载流子被穿透位错处的非辐射复合中心所捕获。

4 V 形坑对 LED 电学特性的影响

Wu 等^[36]在电致发光(EL)条件下, 通过改变 p-AlGa

N 电子阻挡层中 Mg 掺杂水平来研究 V 形坑对空穴注入的影响机制。随着温度降低, 无掺杂样品的侧壁量子阱发光峰 P3 较强, 如图 3a 中下方的 EL 图谱所示。不同掺杂水平的样品, 其等效电阻不同, 导致注入侧壁量子阱的空穴数量不同, 因此侧壁量子阱的发光强度不同。Han 等^[37]发现 Mg 的掺杂存在各向异性, 与 c 面相比, 侧壁中 Mg 的掺杂量很低。因此, 生长在 V 形坑中的 p-AlGa

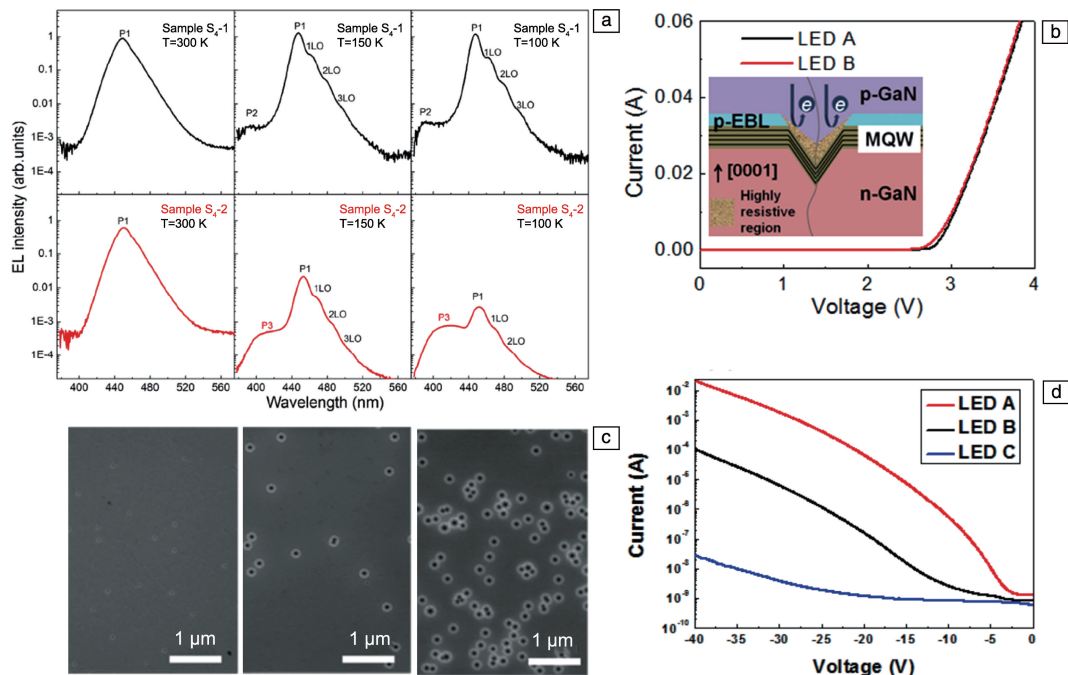


图 3 V 形坑对 LED 电学特性的影响: (a) 不同 Mg 掺杂量下样品的变温电致发光(EL)图谱^[36]; (b) 不同 Mg 掺杂量下 LED 的 I - V 特性曲线(插图为器件 B 中 V 形坑周围形成高电阻区域的示意图)^[37]; (c) 不同尺寸 V 形坑的 SEM 照片^[38]; (d) 具有不同尺寸 V 形坑 LED 的 I - V 特征曲线^[38]

Fig. 3 Effects of V-shaped pits on electrical characteristics of LED: (a) temperature-dependence EL spectrum of samples with different Mg doping concentrations^[36]; (b) I - V characteristic curves of LEDs with different Mg doping concentrations (The inset is the schematic diagram of highly resistive region around V-shaped pits in LED B)^[37]; (c) SEM images of V-shaped pits with different sizes^[38]; (d) I - V characteristics curves of LEDs with different-size V-shaped pits^[38]

深能级电子变成自由电子所需的能量更大, 故器件的反向漏电流减小。

5 通过优化 V 形坑调控 LED 光电性能

Okada 等^[39]通过改变超晶格周期数来调控 V 形坑尺寸, 研究 V 形坑尺寸对器件内量子效率(IQE)的影响。在不改变量子阱周期数(4 个周期)和厚度的前提下, 分别生长超晶格周期为 0, 5, 10, 20 的样品。由原子力显微镜照片(图 4a)可知, 随着超晶格周期的增加, V 形坑尺寸逐渐从 42.9 增加至 177.6 nm, 器件的 IQE 先增加后减小。当超晶格周期为 10 时, 器件的 IQE 最高, 此时 V 形坑的尺寸为 96.2 nm。Okada 等认为在一定范围内增加 V 形坑尺寸, 侧壁量子阱的势垒高度增加, 有助于提高侧壁量子阱对位错的屏蔽效应; 而当其继续增加, 由于侧壁量子阱的均一性变差和 c 面量子阱发光面积减小, 从而导致器件 IQE 的降低。Xu 等^[40]通过控制中高温 GaN 插入层厚度来调控 V 形坑尺寸, 研究了 V 形坑尺寸对器件 EL 强度的影响机制。随着 V 形坑尺寸从 70~110 增加至 110~150 nm, 器件的光输出功率增加了 10%(图 4b)。分析认为, 对于空穴浓度较低的 GaN 基 LED 而言, 随着 V 形坑尺寸的增加, 空穴注入面积增加的同时注入深度也得到提高。V 形坑尺寸的增加, 使由

侧壁量子阱注入至靠近 n-GaN c 面量子阱中的空穴数目增多, 使得空穴浓度分布更均匀, 注入效率增加, 提高了 LED 的光电性能。Tsai 等^[41]通过调控 p-GaN 的生长温度研究了 V 形坑对器件光提取效率和抗静电性能的影响(图 4c)。他们分别通过先高温后低温生长 p-GaN、低温下生长 p-GaN 和高温下生长 p-GaN 的思路制备 LED。前两种方法制备的样品表面均存在大量 V 形坑, 而高温下生长的样品表面平整, 光提取效率最低。先高温后低温的方法可以兼顾光提取效率和抗静电性能。Li 等^[42]通过三维数值模拟研究了电注入下 V 形坑附近载流子的传输行为, 由正向偏压下 V 形坑附近区域的空穴电流传输矢量图(图 4d)可以看出, 空穴可以通过侧壁量子阱注入到 c 面量子阱。这是由于侧壁量子阱的极化势垒低于 c 面量子阱, 注入到 V 形坑区域的空穴可以从侧壁量子阱流向 c 面量子阱。因此, V 形坑给空穴提供了额外的传输通道, 使其除了从 c 面量子阱正上方注入, 还能从侧壁量子阱流向 c 面量子阱, 从而使各 c 面量子阱的空穴分布更加均匀。

6 结 语

近年来, GaN 外延层中 V 形坑的微观结构、侧壁量子阱的发光机制、V 形坑对器件光电性能的影响以及通过

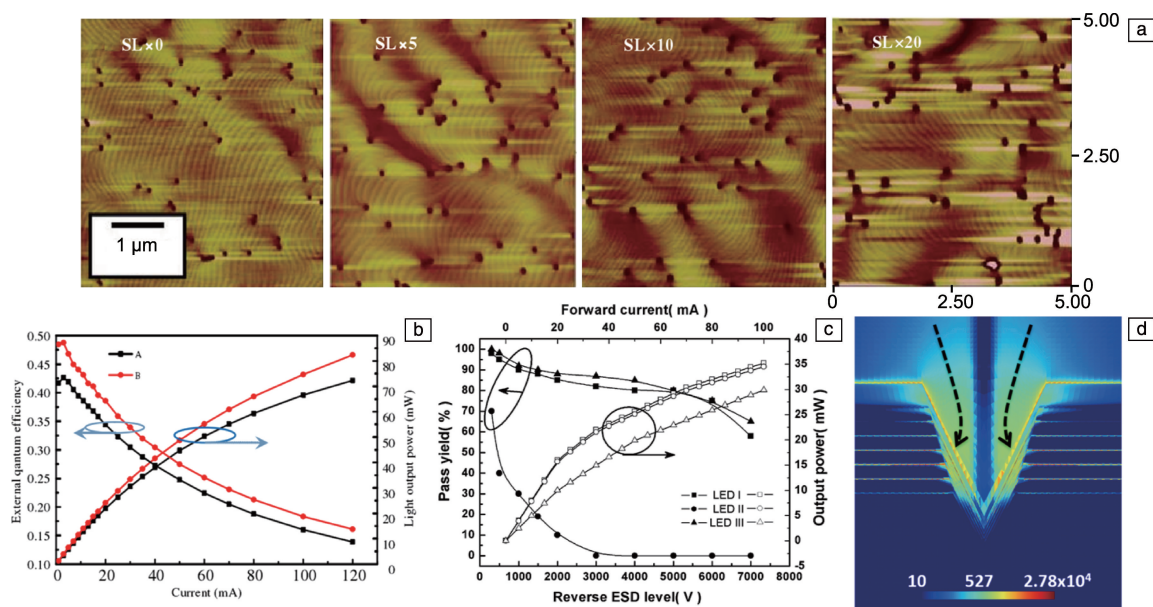


图 4 V 形坑调控器件的光电性能: (a) 不同超晶格周期下 MQWs 表面 V 形坑的原子力显微镜(AFM)照片^[39]; (b) 具有不同尺寸 V 形坑的 LED 的外量子效率(EQE)及光输出功率随注入电流的变化图(样品 A, B 的 V 形坑尺寸分别为 70~110 和 110~150 nm)^[40]; (c) 不同工艺下制备的 LED 的光输出功率和抗静电性能^[41]; (d) V 形坑中空穴传输示意图^[42]

Fig. 4 Optical and electrical properties of LEDs regulated by V-shaped pits: (a) AFM images of V-shaped pits on MQWs surfaces with different superlattice cycles^[39]; (b) EQE and light output power of LEDs with different-size V-shaped pits vs. forward current (V-shaped pits sizes of sample A and B are 70~110 and 110~150 nm, respectively)^[40]; (c) light output power and electrical resistance of LEDs prepared by different processes^[41]; (d) schematic diagram of holes flowing in V-shaped pits^[42]

V 形坑调控器件性能的研究逐渐丰富起来。GaN 基 LED 的发光波段向黄光乃至红光发展, 器件类型向外延结构更为复杂的边发射、垂直腔发射激光器发展, V 形坑缺陷在上述器件中的微观形貌以及对器件性能的影响值得进一步研究。

参考文献 References

- [1] PARK S I, XIONG Y, KIM R H, *et al.* Science[J], 2009, 325(5943): 977-981.
- [2] 李言荣, 朱俊, 罗文博, 等. 中国材料进展[J], 2012, 31(2): 45-53.
LI Y R, ZHU J, LUO W B, *et al.* Materials China[J], 2012, 31(2): 45-53.
- [3] LI Y F, YUN F, SU X L, *et al.* Journal of Applied Physics[J], 2014, 116(12): 123101.
- [4] 陈席斌, 马淑芳, 董海亮, 等. 中国材料进展[J], 2015, 34(5): 337-341.
CHEN X B, MA S F, DONG H L, *et al.* Materials China[J], 2015, 34(5): 337-341.
- [5] MCKENDRY J J D, MASSOUBRE D, ZHANG S, *et al.* Journal of Lightwave Technology[J], 2012, 30(1): 61-67.
- [6] LI X, BAMIEDAKIS N, WEI J, *et al.* Journal of Lightwave Technology[J], 2015, 33(17): 3571-3576.
- [7] WU Y F, SAXLER A, MOORE M, *et al.* IEEE Electron Device Letters[J], 2004, 25(3): 117-119.
- [8] HIGASHIWAKI M, SASAKI K, KAMIMURA T, *et al.* Applied Physics Letters[J], 2013, 103(12): 123511.
- [9] GUNDIMEDA A, KRISHNA S, AGGARWAL N, *et al.* Applied Physics Letters[J], 2017, 110(10): 103507.
- [10] WANG T. Semiconductor Science and Technology[J], 2016, 31(9): 093003.
- [11] NGO T H, GIL B, DAMILANO B, *et al.* Journal of Applied Physics[J], 2017, 122(6): 063103.
- [12] CHI Y C, HSIEH D H, TSAI C T, *et al.* Optics Express[J], 2015, 23(10): 13051-13059.
- [13] HSIEH D H, TZOU A J, KAO T S, *et al.* Optics Express[J], 2015, 23(21): 27145-27151.
- [14] VORONENKOV V, BOCHKAREVA N, GORBUNOV R, *et al.* Japanese Journal of Applied Physics[J], 2013, 52(8S): 08JE14.
- [15] NIU N H, WANG H B, LIU J P, *et al.* Solid-State Electronics[J], 2007, 51(6): 860-864.
- [16] MONEMAR B O, PASKOV P P, POZINA G, *et al.* Physical Review Letters[J], 2009, 102(23): 235501.
- [17] KIM D H, CHO C O, ROH Y G, *et al.* Applied Physics Letters[J], 2005, 87(20): 203508.
- [18] CHICHIBU S, SOTA T, WADA K, *et al.* Journal of Vacuum Science & Technology B[J], 1998, 16(4): 2204-2214.
- [19] CHICHIBU S F, UEDONO A, ONUMA T, *et al.* Nature Materials[J], 2006, 5(10): 810-816.
- [20] HANGLEITER A, HITZEL F, NETZEL C, *et al.* Physical Review Letters[J], 2005, 95(12): 127402.
- [21] TOMIYA S, KANITANI Y, TANAKA S, *et al.* Applied Physics Letters[J], 2011, 98(18): 181904.
- [22] LIN F L, XIANG N, CHEN P Y, *et al.* Journal of Applied Physics[J], 2008, 103(4): 043508.
- [23] TOMIYA S, KANITANI Y, TANAKA S, *et al.* Applied Physics Letters[J], 2011, 98(18): 181904.
- [24] MAHANTY S, HAO M, SUGAHARA T, *et al.* Materials Letters[J], 1999, 41(2): 67-71.
- [25] LIN Y S, MA K J, HSU C, *et al.* Applied Physics Letters[J], 2000, 77(19): 2988-2990.
- [26] SHARMA N, THOMAS P, TRICKER D, *et al.* Applied Physics Letters[J], 2000, 77(9): 1274-1276.
- [27] KIM I H, PARK H S, PARK Y J, *et al.* Applied Physics Letters[J], 1998, 73(12): 1634-1636.
- [28] HANGLEITER A, HITZEL F, NETZEL C, *et al.* Physical Review Letters[J], 2005, 95(12): 127402.
- [29] HAO M, EGAWA T, ISHIKAWA H. Applied Physics Letters[J], 2006, 89(24): 241907.
- [30] HAN D, MA S F, JIA Z G, *et al.* Journal of Physics D: Applied Physics[J], 2017, 50(47): 475103.
- [31] MEYER T, PETER M, DANHOFF J, *et al.* Physica Status Solidi A[J], 2011, 208(7): 1523-1525.
- [32] KIM M K, CHOI S H, LEE J H, *et al.* Scientific Reports[J], 2017, 7(1): 42221.
- [33] CHEN S W, LI H, CHANG C J, *et al.* Materials[J], 2017, 10(2): 113.
- [34] FU Y H, SUN X, BEN J, *et al.* Journal of Nanoscience and Nanotechnology[J], 2018, 18(11): 7527-7531.
- [35] KURAI S, OKAWA K, MAKIO R, *et al.* Journal of Applied Physics[J], 2018, 124(8): 083107.
- [36] WU X, LIU J, QUAN Z, *et al.* Applied Physics Letters[J], 2014, 104(22): 221101.
- [37] HAN S H, LEE D Y, SHIM H W, *et al.* Applied Physics Letters[J], 2018, 102(25): 251123.
- [38] KIM J L, KIM J S, TAK Y J, *et al.* IEEE Electron Device Letters[J], 2013, 34(11): 1409-1411.
- [39] OKADA N, KASHIHARA H, SUGIMOTO K, *et al.* Journal of Applied Physics[J], 2015, 117(2): 025708.
- [40] 刘青明, 卢太平, 朱亚丹, 等. 发光学报[J], 2016, 37(7): 829-835.
LIU Q M, LU T P, ZHU Y D, *et al.* Chinese Journal of Luminescence[J], 2016, 37(7): 829-835.
- [41] TSAI C M, SHEU J K, WANG P T, *et al.* IEEE Photonics Technology Letters[J], 2006, 18(11): 1213-1215.
- [42] LI C K, WU C K, HSU C C, *et al.* AIP Advances[J], 2016, 6(5): 177406.

(编辑 王 瑶)