



半导体黄光发光二极管新材料新器件新设备

江凤益 刘军林 张建立 徐龙权 丁杰 王光绪 全知觉 吴小明 赵鹏 刘苾雨 李丹 王小兰 郑畅达 潘拴 方芳 莫春兰

Semiconductor yellow light-emitting diodes

Jiang Feng-Yi Liu Jun-Lin Zhang Jian-Li Xu Long-Quan Ding Jie Wang Guang-Xu Quan Zhi-Jue
Wu Xiao-Ming Zhao Peng Liu Bi-Yu Li Dan Wang Xiao-Lan Zheng Chang-Da Pan Shuan
Fang Fang Mo Chun-Lan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 168503 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20191044

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191044>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

有机添加剂在金属卤化钙钛矿发光二极管中的应用

Applications of organic additives in metal halide perovskite light-emitting diodes
物理学报. 2019, 68(15): 158505 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190307>

InGa_N/Ga_N超晶格厚度对Si衬底Ga_N基蓝光发光二极管光电性能的影响

Influences of InGa_N/Ga_N superlattice thickness on the electronic and optical properties of Ga_N based blue light-emitting diodes grown on Si substrates
物理学报. 2016, 65(7): 077801 <https://doi.org/10.7498/aps.65.077801>

蓝光钙钛矿发光二极管: 机遇与挑战

Blue perovskite light-emitting diodes: opportunities and challenges
物理学报. 2019, 68(15): 158503 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190745>

非周期微纳结构增强有机发光二极管光耦合输出的研究进展

Research progress of light out-coupling in organic light-emitting diodes with non-period micro/nanostructures
物理学报. 2018, 67(20): 207801 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181209>

利用发光层梯度掺杂改善顶发射白光有机发光二极管光谱的稳定性

Improvement of the color-stability in top-emitting white organic light-emitting diodes by utilizing step-doping in emission layers
物理学报. 2015, 64(9): 097801 <https://doi.org/10.7498/aps.64.097801>

InGa_N/Ga_N多量子阱结构发光二极管发光机理转变的低频电流噪声表征

Research on emission transition mechanisms of InGa_N/Ga_N multiple quantum well light-emitting diodes using low-frequency current noise
物理学报. 2015, 64(5): 050701 <https://doi.org/10.7498/aps.64.050701>

专题：纪念黄昆先生诞辰百年

半导体黄光发光二极管新材料新器件新设备

江风益[†] 刘军林 张建立 徐龙权 丁杰 王光绪 全知觉 吴小明 赵鹏
刘蕊雨 李丹 王小兰 郑畅达 潘拴 方芳 莫春兰

(南昌大学, 国家硅基 LED 工程技术研究中心, 南昌 330096)

(2019 年 7 月 8 日收到; 2019 年 8 月 15 日收到修改稿)

在可见光范围内, 半导体发光二极管 (LED) 发展很不平衡, 黄光 LED 光效 (光功率效率) 长期远低于其他颜色光效. 本文基于 GaN/Si 体系, 从材料生长、芯片制造、器件物理和专用装备等方面进行了系统研究, 解决了外延膜龟裂、位错过多、量子阱应力过大、InGaN 黄光阱材料相分离、空穴浓度不足、阱材料生长温度过低、衬底吸光、电极挡光等问题, 率先实现了高光效黄光 LED 关键性突破. 所研制的黄光 LED 器件, 在 20 A/cm² 驱动下波长 565 nm 黄光 LED 光效达 26.7%, 对应 164 lm/W; 在 1 A/cm² 驱动下波长 577 nm 黄光 LED 光效达 42.8%, 对应 248 lm/W. 基于高光效黄光 LED, 开发了无荧光粉、多基色 LED 照明新光源, 实现了纯 LED 照明光源在路灯、氛围灯等方面应用.

关键词: Si, InGaN, 黄光 LED, 金属有机物化学气相沉积**PACS:** 85.60.-q, 85.60.Jb, 81.15.Gh**DOI:** 10.7498/aps.68.20191044

1 引言

历经 57 年发展, 半导体发光二极管 (LED) 红橙黄绿青蓝紫七彩光均研制成功, 并实现了产业化, 为人类提供了色彩缤纷的视觉盛宴和高效节能半导体光源, 被广泛应用于照明、显示、背光、医疗、农业、通信等领域. 对红、黄、蓝光 LED 和金属有机物化学气相沉积 (MOCVD) 生长方法做出开创性贡献的 Holonyak 等七位专家, 先后获得美国总统技术发明奖和诺贝尔物理学奖.

七彩 LED 光功率效率 (简称光效) 发展很不平衡, 其中在人眼对光最敏感的绿黄光区域的光效长期远低于蓝/紫光和红光, 这一现象被称为“绿/黄鸿沟”, 致使高效白光 LED 照明不得不通过蓝光激发荧光粉来实现. 这种“电-光-光”转换技术方案是目前 LED 照明的主流技术, 为节能减排发挥了

重要作用. 但荧光粉在光光转换过程中存在热损耗大、光响应很慢、光品质与照明效率难以兼顾, 在一定程度上制约了 LED 向高质量照明和高速可见光通信等方向的快速发展. 红光 LED 的发明人 Holonyak 教授曾在 2012 年指出: “LED 仍处于婴儿期, 因为没有人能把黄光做好...”.

关于黄光 LED 的研究, 最早可追溯到 1965 年, 美国贝尔实验室的 Thomas 和 Hopfield^[1] 首次在掺氮的磷化镓中观察到黄光光致发光; 1971 年, 美国孟山都公司的 Craford 使用气相外延 (VPE) 技术, 在 GaAs 衬底上制备了首只掺氮的磷砷化镓 PN 结黄光 LED 器件, 波长为 570 nm, 20 A/cm² 电流密度下光效为 0.01% 左右^[2]; 1990 年, 美国 HP 公司使用 MOCVD 技术, 在 GaAs 衬底上生长了铝镓铟磷双异质结黄光 LED, 波长为 574 nm, 30 A/cm² 电流密度下光效达到 0.5%^[3]; 1994 年, HP 公司将 AlGaInP 黄光 LED 外延材料从吸光

[†] 通信作者. E-mail: jiangfengyi@ncu.edu.cn

的 GaAs 衬底上转移到透光性较好的 GaP 基板上, 波长为 571 nm, 44 A/cm² 电流密度下光效提升到 1.3% [4,5]; 2008 年, 诺奖得主 Nakamura 所在的 UCSB 研究组, 使用 MOCVD 技术在半极性 GaN 衬底上生长了 InGaN 单阱黄光 LED, 波长为 562 nm, 7 A/cm² 电流密度下外量子效率达到 13.4% [6], 但电压较高, 光效仅为 5.5%; 2013 年, 日本东芝公司使用 MOCVD 技术, 在蓝宝石衬底上生长了 InGaN 黄光 LED, 波长为 559 nm, 9.5 A/cm² 电流密度下外量子效率达到 18.7% [7], 同样因电压过高, 光效仅为 9.6%.

无论是 AlGaInP 还是 InGaN 材料体系, 在黄光波段的表现长期差强人意. 对于 AlGaInP 材料, 在红光波段光效很高, 但随着波长变短到黄光波段 (570 nm 附近), 其能带会由直接带隙转变为间接带隙 [8], 导致光效急剧下降, 这属于物理瓶颈, 难以克服. 而对于直接带隙 InGaN 材料体系, 最大的问题在于难以生长高质量的 InGaN 量子阱材料, 属于技术瓶颈, 可望通过材料结构、生长方法、工艺技术和设备设计等方面的创新获得突破. 图 1 给出了黄光 LED 光效过去 53 年的发展进程, 其中最新进展是本文作者使用自制的 MOCVD 设备, 在硅衬底上生长 InGaN 基 LED 所取得的突破, 从而结束了长期缺乏高光效黄光 LED 的局面.

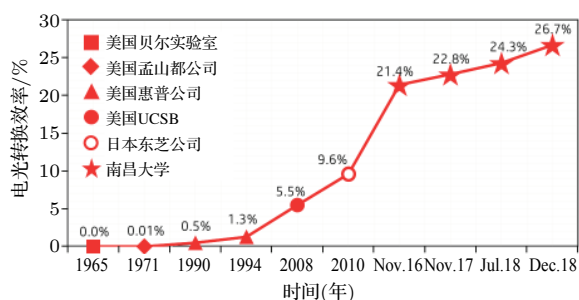


图 1 黄光 LED 光效发展历程

Fig. 1. The efficiency development progress of yellow LEDs.

2 InGaN 基黄光 LED 光效提升研究

InGaN 基黄光 LED 量子阱中的 In 组分高达 30%—35%, 远超过蓝光量子阱中约 15% 的 In 组分. 高 In 组分会带来诸多问题: 一方面, 高 In 组分 InGaN 需要低生长温度, 外延层表面原子的迁移能力随之变差, 导致外延层表面粗糙, 造成阱垒界面模糊、量子阱厚度不一以及 In 组分分布不均

匀; 同时, 氮气的裂解能力会随着生长温度的降低而下降, 导致 InGaN 黄光量子阱材料氮空位增多; 另一方面, InN 与 GaN 的互溶度较低 [9], 仅为 6%, 外延生长 In 组分高达 30% 的黄光量子阱时, 通常会出现 In 偏析, 即相分离; 此外, GaN 材料的一些固有特性, 如强极化、低空穴浓度也对黄光 LED 光效提升带来很大困难; 在硅衬底上生长 InGaN 黄光 LED, 还面临着外延膜龟裂、高位错密度等问题. 由此可见, InGaN 基黄光 LED 光效长期低下的原因是多方面因素综合作用的结果, 很难简单地通过某个单元技术的突破而实现整体器件光效大幅提升.

2.1 黄光 LED 材料结构

图 2(a) 为本团队设计的 GaN/Si 基 LED 材料结构示意图, 衬底是网格化图形 Si(111), 厚度 1 mm. 为了防止 Si, Ga 互溶, 首先在 Si 衬底上生长一层 100 nm 厚的 AlN 缓冲层; 然后利用 GaN 与 AlN 之间的晶格失配在 AlN 上生长三维岛状 GaN, 再改变生长条件形成 GaN 侧向外延将岛合并成平面, 降低外延层位错密度. 随后生长较低位错密度的 n-GaN 主层, 起载流子输运和扩展作用. 为了降低 InGaN 黄光量子阱所受压应力和提高阱材料质量, 在 n-GaN 与有源层量子阱之间生长了三段 In 组分逐步提升的 5 nm-In_xGa_{1-x}N/2 nm-GaN 超晶格结构作为应力准备层; 接着生长了 8 个周期的 2.5 nm-In_{0.3}Ga_{0.7}N/13.5 nm-GaN 多量子阱. 在应力准备层与多量子阱层中, 沿着位错线会生成六角锥状的空洞, 即 V 坑. 多量子阱之后生长 10 nm-Al_{0.2}Ga_{0.8}N 作为电子阻挡层 (EBL), 以及 50 nm 高掺 p-GaN 作为空穴注入层, 然后将 V 坑合并填平, 再生长 180 nm 低掺 p-GaN 层作为空穴扩展输运层, 最后生长 20 nm 高掺的 p-GaN 层用于制作欧姆接触. 其 MOCVD 在线生长曲线见图 2(b), 相关外延层的厚度、组分与掺杂见二次离子质谱 (secondary ion mass spectroscopy, SIMS) 曲线 (图 7).

2.2 GaN/Si 基材料一种选区生长方法

硅衬底 GaN(GaN/Si) 基 LED 材料及器件研发工作已历时 46 年. 1973 年 IBM 申请了第一份 GaN/Si 发明专利 [10], 之后众学者一直在探索器件级材料的生长技术 [11–18]. 但由于 GaN/Si 存在巨

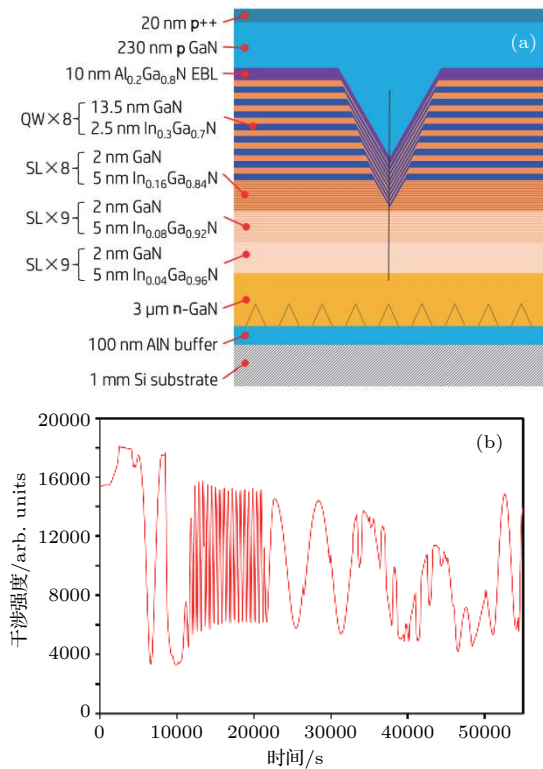


图 2 GaN/Si 基黄光 LED (a) 外延材料结构示意图; (b) 外延生长在线干涉曲线

Fig. 2. (a) Schematic structure and (b) *in-situ* interference curve of GaN based yellow LED on Si substrate.

大的热膨胀系数失配 (46%) 和晶格常数失配 (17%), 导致 GaN/Si 膜材料产生无规则裂纹和过高的位错密度, 无法用来制造实用化器件. 本团队提出并实现了 GaN/Si 材料的一种选区生长方法 [19], 把硅衬底分成尺寸与芯片相同的一个个独立单元, 化整为零, 消除了 GaN/Si 材料整片应力集中效应, 使芯片工作区无裂纹, 如图 3 所示, 即在衬底上人为制造有规则的裂纹 (即网格, 凸或凹) 以替代不规则的裂纹, 解决了因材料龟裂而无法制造芯片问题, 获得了器件级 GaN/Si 材料, 其 X 射线衍射 (XRD) 半高宽 (002)343 弧秒和 (102)520 弧秒的

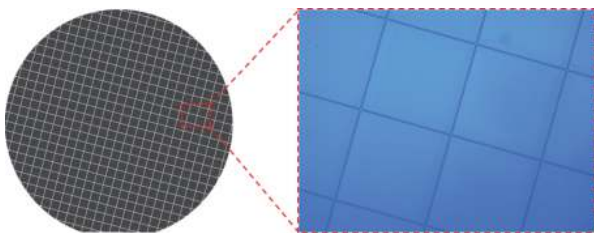


图 3 GaN/Si 基 LED 外延材料网格化选区生长方法示意图

Fig. 3. Schematic of grid patterned Si substrate with GaN film grown on it.

结果 [20], 被评价为当时最好结果 [21]. 在此基础上, 2004 年研制成功达到实用化水平的 GaN/Si 基蓝光 LED [20]. 本方法在解决了外延膜龟裂的前提下, 不需要 Al 组分渐变、多层 AlGaIn 应力调节层, 有利于提高量子阱波长均匀性; 同时, 保持了外延膜受张应力, 提高了量子阱材料的生长温度 [22], 是生长高质量高铟组分黄光有源层的有效途径.

2.3 综合过渡层

过高的位错密度是 GaN/Si 技术面临的另一大挑战. 为了调控薄膜材料中的应力和减少位错密度, 本团队发展了综合过渡层结构及其生长技术 [23]. 首先在 Si 衬底上生长高温 AlN 缓冲层, 再在其上利用 GaN 与 AlN 晶格失配产生的压应力形成三维模式生长岛状 GaN, 然后利用无掩膜在线侧向外延将 GaN 岛合并, 降低位错密度, 最后生长 n-GaN 主层. 综合过渡层结构使 GaN/Si 材料质量提升到新高度 [24], 其 XRD(002) 和 (102) 半高宽分别减小到 325 和 342 弧秒, 位错密度降低至 $5 \times 10^8/\text{cm}^2$.

2.4 铟组分渐变超晶格应力准备层

In 组分为 30% 的 $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 黄光量子阱晶格常数约为 0.3292 nm, 而 n 型 GaN 的晶格常数为 0.3189 nm, 两者失配度达 3.2%. 如果在 n 型 GaN 之上直接生长 $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$, 黄光量子阱受到巨大的压应力, 会带来多方面负面影响: 首先, 压应力不利于量子阱中 In 的并入; 其次, 晶格常数变化过大会导致量子阱中直接产生新的位错; 第三, 过大压应力会导致 InGaIn 相分离 [22], 如图 4(a) 所示, 没有应力准备层、直接在 GaN 上生长 InGaIn 黄光量子阱, 荧光显微镜下观测到大量暗区, 表明该量子阱材料相分离非常严重; 此外, 过大的压电场对提升器件光效不利. 基于上述因素, 本团队在黄光多量子阱与 n 型 GaN 之间, 设计了 In 组分适中的 InGaIn/GaN 超晶格应力准备层, 将晶格从较小的 GaN 过渡到较大的高 In 组分黄光量子阱, 以缓解量子阱受到的压应力. 实验观测到, 使用 32 个周期的 5 nm-In_{0.1}Ga_{0.9}N/2 nm-GaN 超晶格作为黄光 LED 的应力准备层, 既能提高应力弛豫效果, 还能保持较高的材料质量, 如图 4(b) 所示, 插入应力准备层的黄光量子阱均匀性明显改善, 荧光显微形貌中暗区基本消失, 但仍可观察到黄、绿

光两种相.

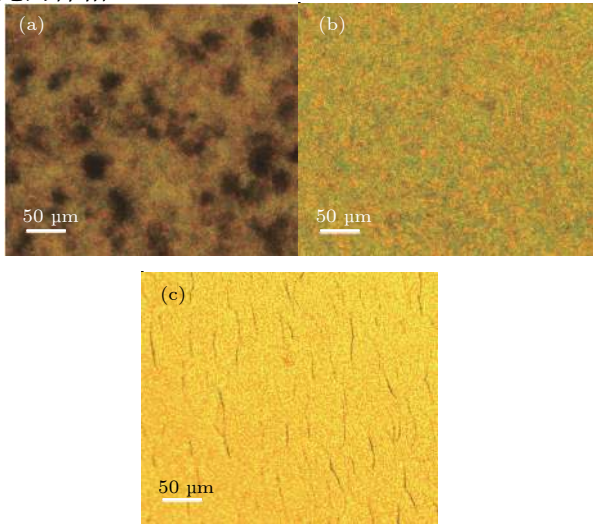


图 4 不同准备层的黄光 LED 量子阱荧光显微镜形貌 (a) 无准备层; (b) 单一 In 组分超晶格准备层; (c) 三段 In 组分逐步提升的超晶格准备层
Fig. 4. Fluorescent luminescence (FL) spectrometry of yellow LED quantum well: (a) Without prestrained layer; (b) with fixed indium content prestrained SLS layers; (c) with three steps of increased indium content prestrained SLS layers.

为了进一步释放量子阱所受压应力、改善材料质量, 本文设计了三段渐变式准备层, 将原来单一组分的 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}/\text{GaN}$ 超晶格准备层, 在保持总厚度不变的情况下, 变为组分逐步提升的三段 $\text{In}_{0.04}\text{Ga}_{0.96}\text{N}/\text{GaN}/\text{In}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{N}/\text{GaN}/\text{In}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}/\text{GaN}$ 超晶格准备层. 如图 4(c) 所示, 采用渐变式超晶格准备层结构的黄光量子阱, 荧光显微形貌中暗区消失, 仅观察到单一黄光相, 从而有效解决了 InGaN 黄光量子阱相分离问题.

2.5 V 形三维 PN 结

第二代半导体磷化物与砷化物发光材料对晶体质量要求非常高, 否则器件光效低; 而第三代半导体氮化物在位错密度高达 $1 \times 10^9/\text{cm}^2$ 时, 蓝光 LED 的光效仍能超过 60%, 其中的机理一直未有定论, 直到 V 坑的概念被提出 [25]. V 坑是 GaN 外延材料中沿着位错线形成的一种六棱锥状体缺陷, 因其截面形状像“V”字而得名, 也被称作 V 型缺陷或 V-pits. 图 5(a) 为本文黄光 LED 量子阱中的 V 坑截面透射电镜 (TEM) 图. 传统器件物理认为, 位错对器件性能是负面的; 在 GaN 基 LED 的发展初期, V 坑也是被敬而远之; 但是随着认识的深入, 发现 V 坑侧壁量子阱较平台量子阱

厚度薄、In 组分低, V 坑量子阱禁带宽度大于平台量子阱, 即载流子在位错附近的势垒较高, 从而有效屏蔽位错 [26], 使得氮化物在高位错密度下仍能保持较高的光效.

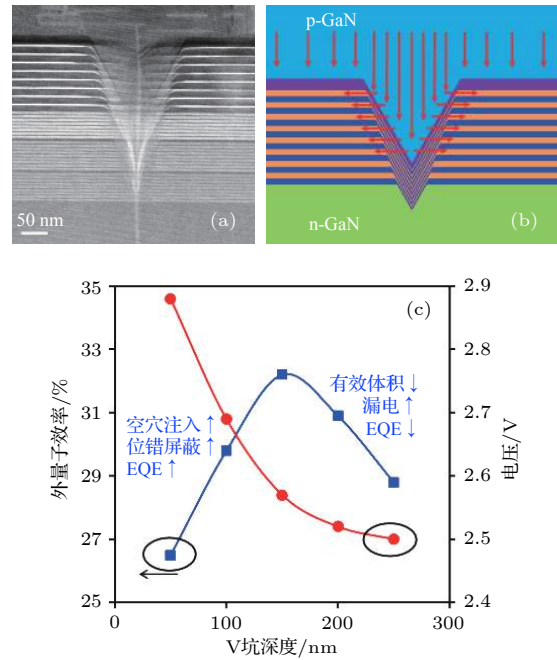


图 5 (a) 含有 V 坑的黄光 LED 多量子阱结构透射电镜图; (b) V 坑增强空穴注入示意图; (c) 室温 $20 \text{ A}/\text{cm}^2$ 下黄光 LED 外量子效率以及电压随 V 坑深度变化曲线
Fig. 5. (a) TEM image of yellow MQWs structure with V-pits; (b) schematic of hole injection enhancement by V-pits; (c) dependence of external quantum efficiency and voltage on V-pits size of yellow LED with $20 \text{ A}/\text{cm}^2$ at room temperature.

本团队观察到含有 V 型坑的 LED 结构在低温下 V 型坑侧壁量子阱的电致发光现象, 表明存在载流子从 V 坑侧壁注入 [27]; 通过数值计算发现 [28–30], 空穴注入到平台量子阱时, 从 V 型坑侧壁方向的势垒小于从垂直样品表面方向, 即空穴优先从 V 型坑侧壁注入到平台量子阱, 也就是说, V 型三维 PN 结增强了空穴注入效果 [31], 如图 5(b) 所示. 从图 5(a) 样品的 TEM 谱可知, 多量子阱之后的电子阻挡层 P-AlGaIn, 其厚度在平台有 10 nm、在 V 型坑侧壁不到 2 nm, 这种差异进一步增强空穴优先从 V 型坑侧壁注入到平台量子阱.

本文实验研究了 V 坑尺寸对黄光 LED 性能的影响, 如图 5(c) 所示, 随着 V 坑尺寸的加大, 外量子效率先增大后减小, 其光效最佳处对应的 V 坑深度约为 150 nm (样品位错密度为 $5 \times 10^8/\text{cm}^2$). 具有增强空穴注入功能的 V 型坑的尺寸和平台发

光量子阱有效体积成反比, V 坑尺寸越大、平台量子阱区域有效发光体积越小, 反之亦然. 因此, V 坑尺寸有一最佳值. 工作电压随着 V 型坑深度的加大而一直下降, 源自 V 型坑对空穴注入的增强.

2.6 黄光 LED 专用材料生长设备

1976 年, Dupuis 开创性地引入 MOCVD 技术生长高质量半导体薄膜材料和器件. 此后, MOCVD 方法很快成为研究和生产半导体薄膜材料及光电子器件非常有效的技术手段. 生长高质量 InGaN 黄光材料是一项富有挑战性课题. 蓝光、绿光和黄光的 InGaN 量子阱中铟组分分别约为 15%, 25% 和 30%, 波长越长发光阱所受到的压应力越大, 越容易引起相分离, 电子空穴分离也越严重, 对载流子复合发光越不利. 目前国内外市场上其他单位的 MOCVD 设备能有效生长蓝绿光 InGaN 材料, 但生长高质量高铟组分 InGaN 黄光材料未见取得重要突破.

2015 年, 作者使用在 2004 年为生长氧化锌自行发明的气体输运同轴套管结构喷头专利^[32], 如

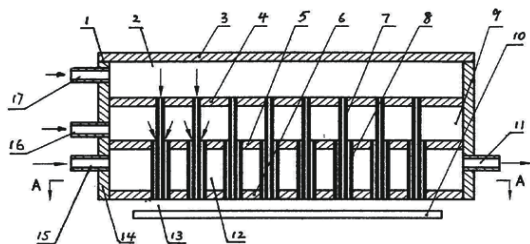


图 6 发明的专用 MOCVD 设备反应管气体输运结构-同轴套管喷头示意图

Fig. 6. The showerhead structure of self-designed MOCVD for yellow LED.

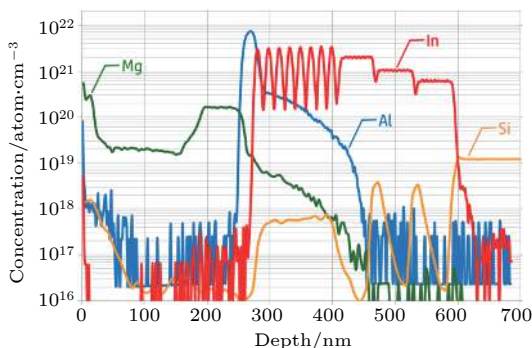


图 7 自制 MOCVD 设备生长的黄光 LED 材料的 SIMS 曲线

Fig. 7. SIMS profile of yellow LED structure grown by self-designed MOCVD.

图 6 所示, 研制成功高铟组分 InGaN 黄光专用 MOCVD 设备 (研究型和生产型两种). 本设备设计 MO 源从内径很小的同轴套管内管输运, 大幅提高了 MO 源的流速, 显著减少了记忆效应, 获得了陡峭的高铟组分量子阱界面, 并提升了黄光量子阱铟镓氮材料生长温度. 图 7 为基于本设备生长的 GaN/Si 基黄光 LED 材料 SIMS 结果, 清晰地表明了各层界面陡峭. 本设备已在企业成功应用于批量生产高光效黄光 LED 外延材料.

2.7 黄光 LED 芯片结构

GaN/Si 基黄光 LED 芯片结构如图 8 所示. 硅对可见光吸收强, 外延材料必须从原有硅衬底上剥离并转移到新的高反射基板上, 才能获得高出光效率, 该过程也称薄膜转移. 在薄膜转移发光芯片制造过程中, 本团队发明和发展了互补电极、高反射低电阻 p 电极、表面粗化, 双面钝化等芯片结构和工艺技术, 获得了高取光效率、良好的电流扩展和导热能力、高可靠性的垂直结构 LED 芯片^[33,34].

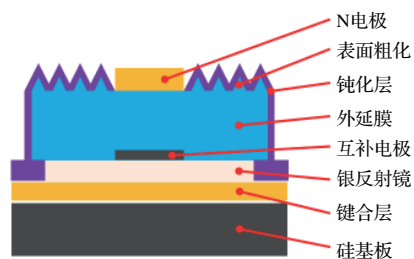


图 8 黄光 LED 芯片结构示意图

Fig. 8. Schematic chip structure of the yellow LED.

2.8 黄光 LED 器件结果

表 1 是研制的黄光 LED 器件在 570 nm 附近三组不同波长的光电性能结果, 电源为 Keithley Instruments 2635A, 光谱仪为 Instrument Systems CAS140CT, 测量方式为稳态电流.

20 A/cm² 电流密度下, 波长 560, 565, 570 nm 的黄光 LED 光效分别为 29.5%, 26.7%, 23.6%, 较之前国外文献报道的最好水平 9.5 A/cm² 下 559 nm 光效 9.6% 有了大幅提升, 对应的流明效率分别为 182, 164, 139 lm/W, 达到照明实用水平. 低电流密度下 (1 A/cm²), 波长 571, 577, 582 nm 的黄光 LED 光效分别高达 47.9%, 42.8%, 38.8%, 对应的流明效率分别为 283, 248, 200 lm/W, 为今后研制

表 1 黄光 LED 器件 (芯片 1 mm²) 室温稳流状态电致发光结果

Table 1. Electroluminescence results of yellow LEDs (size 1 mm²) at room temperature and continues wave mode.

样品	电流密度/A·cm ⁻²	电流/mA	电压/V	主波长/nm	半宽/nm	光功率/mW	外量子效率/%	光功率效率/%	流明效率/lm·W ⁻¹
A	1	10	2.10	571	36.2	10.1	46.3	47.9	283
	20	200	2.43	560	36.8	143.3	32.3	29.5	182
B	1	10	2.09	577	37.8	8.9	41.6	42.8	248
	20	200	2.41	565	38.6	128.7	29.4	26.7	164
C	1	10	2.08	582	39.9	8.1	37.8	38.8	200
	20	200	2.40	570	40.3	113.3	26.0	23.6	139

黄光波段 micro-LED 打下了重要技术基础. 图 9(a) 给出了样品 B 在不同电流密度下室温电致发光光谱, 其波长和半宽度随电流发生改变; 样品 B 在 -5 V 偏压下, 反向漏电流为 1 nA.

样品 B 在不同温度、不同电流密度下的内量子效率, 如图 9(b) 所示, 其中采用了蓝光 LED 器件内量子效率测试常用的假设, 即低温 100 K 小电流密度下 LED 的峰值效率为 100%. 在相同温度下, 内量子效率均随着电流密度的增大先升后降, 这与经典的 LED 内量子效率模型吻合. 内量子效率随着温度升高整体下降, 可归结于缺陷随着温度升高被逐渐激活. 室温 300 K 时, 样品 B 的内量子效率峰值为 64.6%, 说明其量子阱质量较高; 20 A/cm² 电流密度下, 内量子效率下降至 42.1%. 相对蓝光、绿光 LED 而言, 黄光 LED 光效随电流密度 droop 更为严重, 20 A/cm² 电流密度下 IQE 仅为其峰值的 65%, 而蓝光、绿光 LED 对应的比值约为 90%, 80%. 黄光 LED 效率 droop 更严重主要归结于高 In 组分带来更强的压电场. 根据样品 B 在 20 A/cm² 电流密度下, 光功率效率 26.7%、外量子效率 29.4% 和内量子效率 42.1%, 获得了比

较合理的芯片取光效率 (70%), 表明上述内量子效率测试采用的假设相对有效.

2.9 高光效黄光 LED 的应用

近几年来, LED 照明光健康问题被提上了议事日程, 其中蓝光危害问题在全球范围内引起了广泛关注. 高光效黄光 LED 的出现, 为实现无蓝光或少蓝光的 LED 照明提供了技术支撑, 给 LED 照明带来了新活力.

基于本团队研发的高光效硅衬底蓝光 (455 nm)、青光 (490 nm)、绿光 (530 nm)、黄光 (570 nm) LED、和反极性红光 (629 nm) LED, 我们研制出五基色白光 LED, 实现了少蓝光、高显指 (97.5, $R_9 = 96.24$)、低色温 (2941 K)、较高流明效率 (121.3 lm/W)、无荧光粉、纯 LED 照明, 达到了实用水平, 图 10(a) 为其光谱图. 同时, 本团队利用高光效黄光 LED 与红光 LED 配色, 研制了超低色温 (1761 K)、无蓝光成分的金黄光 LED 光源, 其光效达 141.9 lm/W, 光谱如图 10(b) 所示; 开发了金黄光 LED 室内氛围台灯和室外路灯并获得应用, 如图 11 所示.

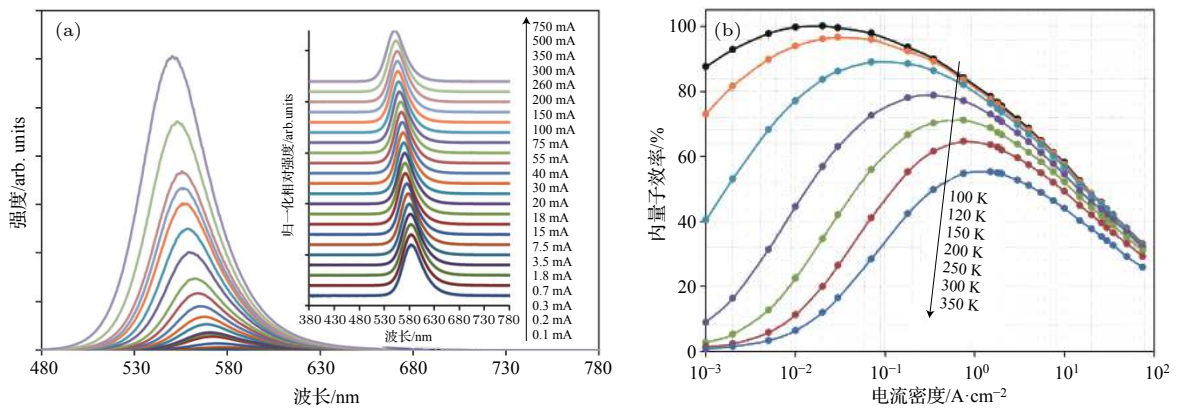


图 9 黄光 LED 样品 B (a) 室温不同电流下发光光谱; (b) 变温变电流内量子效率曲线

Fig. 9. Electroluminescence of 565 nm yellow LED: (a) The room temperature emission spectrum at different current; (b) the internal quantum efficiency at various temperature and current density.

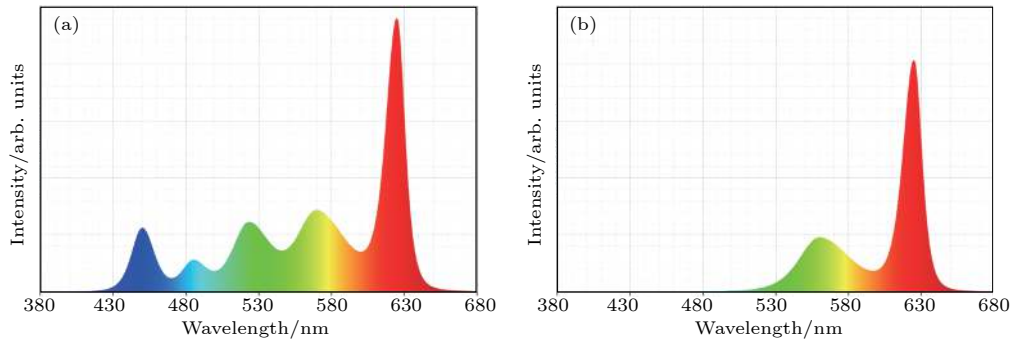


图 10 无荧光粉 LED 照明光源电致发光光谱图 (a) 蓝、青、绿、黄、红五基色白光 LED; (b) 黄、红光组成的金黄光 LED

Fig. 10. EL spectra of phosphor free LEDs: (a) Color mixing white LED with blue, cyan, green, yellow and red LEDs; (b) golden light LEDs with yellow and red LEDs.



图 11 金黄光 LED 照明应用 (a) 户外路灯 (南昌市艾溪湖公园); (b) 室内氛围台灯

Fig. 11. Applications of golden light LEDs as (a) Outdoor street lights and (b) indoor atmosphere lamps.

经光生物医学研究观测^[35], 金黄光 LED 室内照明, 未见抑制褪黑素分泌现象, 还有降低干眼症和红眼症的发生概率、加快受损皮肤愈合、促进毛发再生等功效. 金黄光 LED 室外路灯, 兼有传统高压钠灯色温低、穿透能力强和荧光型 LED 路灯光效高、寿命长的优点.

3 总 结

本团队系统地研究了 GaN/Si 基黄光 LED 材料生长与芯片制造关键工艺技术及有关机理: 发明了网格化选区生长方法, 解决了 GaN 外延膜龟裂问题; 发展了综合过渡层技术, 解决了 GaN 位错密度过高问题; 设计了三段超晶格结构应力准备层, 解决了高 In 组分黄光量子阱相分离问题; 形成大 V 坑三维 PN 结, 增强了空穴注入, 解决了氮化物空穴浓度不足的问题; 研制出 GaN/Si 基黄光 LED 材料专用 MOCVD 设备, 提升了黄光 LED 材料发光性能; 发明了衬底转移技术和互补电极结构, 解决了衬底吸光和电极挡光问题. 所研制和生产的黄光 LED, 在 20 A/cm^2 驱动下波长 560, 565,

570 nm 光效分别达 29.5%, 26.7%, 23.8%, 对应流明效率分别达 182, 164, 139 lm/W, 在 1 A/cm^2 驱动下波长 571, 577, 582 nm 光效分别达 47.9%, 42.8%, 38.8%, 对应流明效率分别达 283, 248, 200 lm/W, 从而结束了长期缺乏高光效黄光 LED 的局面. 由此, 开发了无需荧光粉转换的、少蓝光、五基色 LED 照明新光源和无蓝光、超低色温、金黄光 LED 照明光源, 并应用于户外路灯和室内氛围灯, 给半导体照明技术和产业的发展注入了新的活力.

参考文献

- [1] Thomas D G, Hopfield J J 1966 *Phys. Rev.* **150** 680
- [2] Damilano B, Gil B 2015 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **48** 403001
- [3] Groves W O, Herzog A H, Craford M G 1971 *Appl. Phys. Lett.* **19** 184
- [4] Kuo C P, Fletcher R M, Osentowski T D, Lardizabal M C, Craford M G, Robbins V M 1990 *Appl. Phys. Lett.* **57** 2937
- [5] Kish F A, Steranka F M, DeFevre D C, van der Water D A, Park K G, Kuo C P, Osentowski T D, Peanasky M J, Yu J G, Fletcher R M, Steigerwald D A, Craford M G 1994 *Appl. Phys. Lett.* **64** 2839
- [6] Sato H, Chung R B, Hirasawa H, Fellows N, Masui H, Wu F, Saito M, Fujitob K, Speck J S, DenBaars S P, Nakamura S

- 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 221110
- [7] Saito S, Hashimoto R, Hwang J, Nunoue S 2013 *Appl. Phys. Express* **6** 207
- [8] Gessmann Th 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 2203
- [9] El-Masry N A, Piner E L, Liu S X, et al. 1998 *Appl. Phys. Lett.* **72** 40
- [10] Braslau N, Cuomo J, Harris P, et al. 1973 *US patent* 3849707
- [11] Butter E, Fitzl G, Hirsch D, et al. 1979 *Thin Solid Films* **59** 25
- [12] Takeuchi T, Amano H, Hiramatsu K, et al. 1991 *J. Cryst. Growth* **115** 634
- [13] Watanabe A, Takeuchi T, Hirose K, et al. 1993 *J. Cryst. Growth* **128** 391
- [14] Yang J, Sun C, Chen Q, et al. 1996 *Appl. Phys. Lett.* **69** 3566
- [15] Kobayashi N, Kobayashi J, Dapkus P, et al. 1997 *Appl. Phys. Lett.* **71** 3569
- [16] Wang L, Liu X, Zan Y, et al. 1998 *Appl. Phys. Lett.* **72** 109
- [17] Boo J, Rohr C, Ho W 1998 *J. Cryst. Growth* **189–190** 439
- [18] Guha S, Bojarczuk N 1998 *Appl. Phys. Lett.* **72** 415
- [19] Jiang F Y, Fang W Q, Wang L, Mo C L, Liu H C, Zhou M X 2006 *Chinese Patent* ZL200610072230.4 (in Chinese) [江风益, 方文卿, 王立, 莫春兰, 刘和初, 周毛兴 2006 中国专利 ZL200610072230.4]
- [20] Mo C L, Fang W Q, Pu Y, Liu H C, Jiang F Y 2005 *J. Cryst. Growth* **285** 312
- [21] Li T K, Mastro M, Dadgar A 2011 *III-V Compound Semiconductors, Integration with Silicon-Based Microelectronics* (CRC Press) p107
- [22] Zhang J L, Xiong C B, Liu J L, Quan Z J, Wang L, Jiang F Y 2014 *Appl. Phys. A* **114** 1049
- [23] Liu J L, Zhang J L, Mao Q H, Wu X M, Jiang F Y 2013 *CrystEngComm* **15** 3372
- [24] Jiang F Y, Liu J L, Wang L, et al. 2015 *Sci. China: Phys. Mech. Astron.* **45** 067302 (in Chinese) [江风益, 刘军林, 王立, 等 2015 中国科学: 物理学 力学 天文学 **45** 067302]
- [25] Wu X H, Elsass C R, Abare A, et al. 1998 *Appl. Phys. Lett.* **72** 692
- [26] Hangleiter A, Hitzel F, Netzel C, Fuhrmann D, Rossow U, Ade G, Hinze P 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 127402
- [27] Wu X, Liu J, Quan Z, Xiong C, Zheng C, Zhang J, Mao Q, Jiang F 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 221101
- [28] Quan Z, Wang L, Zheng C, Liu J, Jiang F 2014 *J. Appl. Phys.* **116** 183107
- [29] Wu X, Liu J, Jiang F 2015 *J. Appl. Phys.* **118** 164504
- [30] Quan Z, Liu J, Fang F, Wang G, Jiang F 2015 *J. Appl. Phys.* **118** 193102
- [31] Jiang F Y, Zhang J L, Xu L Q, et al. 2019 *Photon. Res.* **7** 144
- [32] Jiang F Y, Pu Y 2004 *Chinese Patent* ZL200410017471.X. (in Chinese) [江风益, 蒲勇 2004 中国专利 ZL200410017471.X.]
- [33] Jiang F Y, Zhang J L, Sun Q, Quan Z 2019 in Li J M, Zhang G Q ed. *GaN LEDs on Si Substrate, Light-Emitting Diodes, Materials, Processes, Devices and Applications* (Springer) pp133–170.
- [34] Jiang F Y 2018 in Bi W G, Kuo H Z, Ku P C, Shen B ed., *Advanced Optoelectronic Device Processing, Handbook of GaN Semiconductor Materials and Devices* (CRC Press) pp285–304.
- [35] Lin J, Ding X, Hong C, et al. 2019 *Scientific Reports* **9** 7560

SPECIAL TOPIC—In commemoration of the 100th anniversary of the birth of Kun Huang

Semiconductor yellow light-emitting diodes

Jiang Feng-Yi[†] Liu Jun-Lin Zhang Jian-Li Xu Long-Quan
Ding Jie Wang Guang-Xu Quan Zhi-Jue Wu Xiao-Ming
Zhao Peng Liu Bi-Yu Li Dan Wang Xiao-Lan
Zheng Chang-Da Pan Shuan Fang Fang Mo Chun-Lan

(National Institute of LED on Si Substrate, Nanchang University, Nanchang 330096, China)

(Received 8 July 2019; revised manuscript received 15 August 2019)

Abstract

The development of semiconductor light-emitting diode (LED) in the visible emission range is very unbalance, as the power efficiency of yellow LED is far below other colors. Based on the GaN/Si technology, the authors and his team made a systematic research from the aspect of material growth, chip fabrication, device physics and equipment design, resolved the problems of epi-film cracking, high dislocation density, large strain in quantum well (QW), phase separation in QW, low QW growth temperature, low hole concentration, light absorption by substrate and light blocking by electrode, successfully made a breakthrough in fabricating efficient yellow LED. The yellow LED chip achieves a power efficiency of 26.7% at 20 A/cm² with 565 nm wavelength and efficacy of 164 lm/W, and the power efficiency goes up to 42.8% at 1 A/cm² with 577 nm wavelength and efficacy of 248 lm/W. New LED light source with multi-colors and without phosphor was developed based on the efficient yellow LEDs, opened up a new direction of pure LED healthy lighting.

Keywords: Si, InGaN, yellow light-emitting diode, metal-organic chemical vapor deposition

PACS: 85.60.-q, 85.60.Jb, 81.15.Gh

DOI: 10.7498/aps.68.20191044

[†] Corresponding author. E-mail: jiangfengyi@ncu.edu.cn