

含有量子点的双波长 LED 的光谱调控*

张盼君 孙慧卿[†] 郭志友 王度阳 谢晓宇 蔡金鑫 郑欢 谢楠 杨斌

(广东省微纳光子功能材料与器件重点实验室, 华南师范大学, 光电子材料与技术研究所, 广州 510631)

(2012 年 12 月 11 日收到; 2013 年 1 月 30 日收到修改稿)

本文通过对含有高 In 组分量子点的双波长 LED 进行了模拟计算, 并对器件的能带结构、载流子浓度、复合速率和辐射光谱进行了研究. 通过对器件结构的调整与对比, 发现蓝绿双波长 LED 的绿光量子阱中加入高 In 组分量子点后, 可以拓宽辐射光谱, 使 LED 光谱具有更高的显色指数, 为实现无荧光粉的白光 LED 提供指导. 量子点对载流子具有很强的束缚能力, 并且载流子在量子点处具有更短的生命, 载流子优先在量子点处复合, 量子点处所对应的黄光与量子阱润湿层所对应的绿光的比例随量子点浓度的增大而增大, 载流子浓度较低时以量子点处的黄光辐射为主, 载流子浓度变大后, 量子点复合逐渐达到饱和, 绿光辐射开始占据主导. 对间隔层厚度和间隔层掺杂浓度的调节可以很方便地调控载流子的分布, 从而实现对含有量子点的双波长 LED 两个活性层辐射速率的调控. 结果表明, 通过对量子点浓度、间隔层厚度、间隔层掺杂浓度的控制可以很好地实现对 LED 辐射光谱的调控作用.

关键词: GaN, 量子点, 光谱调控, 双波长 LED

PACS: 73.61.Ey, 73.21.La, 78.45.+h, 85.60.Jb

DOI: 10.7498/aps.62.117304

1 引言

近年来, 发光二极管 (LED) 以其产品体积小、寿命长、效率高、抗震耐冲击、光响应速度快等诸多特点, 进入了多种应用领域. 随着材料生长技术和器件制备技术的突破性发展, LED 获得了人们前所未有的关注, 其研究应用得到了快速地发展^[1]. GaN 基 LED 备受人们的重视, 因为 GaN 系材料禁带宽度大, 并且是直接带隙半导体, 通过生长不同 In 组分的 InGa_N, 其禁带宽度可以覆盖全部可见光在内从近紫外 (365 nm) 到红外 (1770 nm) 的宽广波段.

传统白光 LED 的发光机理主要有三种: 蓝光激发黄色荧光粉, 紫外光激发混合荧光粉, 以及红绿蓝三色混合 LED. 荧光粉转换效率低, 稳定性差, 长时间工作将发生老化导致光衰等问题, 而三基色混合 LED 生产成本又比较昂贵^[2]. 随着科研人员对 LED 发光机理和提升其性能的探索, 人们开始关注无荧光粉多波长单芯片的白光 LED 研制.

Qi 等^[3]通过调节有源区内不同阱层 In 含量、蓝色和绿色量子阱个数及量子阱生长顺序, 实现了双波长 LED 发光. 顾等^[4]通过同时调节同一有源区内不同阱层和垒层的 In 组分, 制备了 GaN 基单有源区蓝、绿光双波长 LED, 实现了 20 mA 下蓝、绿光同时发射. 但蓝绿双波长 LED 光谱范围较窄, 显色指数低, 而高 In 组分量子阱的生长会加剧 LED 外延层的晶格失配, 在阱内产生强的极化电场, 使得电子和空穴的波函数重叠变小, 减小了符合率和发光强度. Fuhrmann 等^[5]对高 In 组分量子阱的生长进行了深入研究, 生长了多种单波长量子阱, 并得到了较高的内量子效率. Huang 等^[6]通过预应变生长获得了高效率发射黄光的量子阱, 并通过增加一个蓝光量子阱实现了蓝黄双波长白光 LED. Soh 等^[7]通过在黄光量子阱里生长高 In 含量的量子结构实现了宽光谱的蓝黄双波长白光 LED.

目前量子点的主要生长方式有自组装模式 (S-K)^[8]和选择性区域生长模式 (SAG)^[9]两种, Zhao 等^[10]对量子点的生长方式进行了深入的理论分析. Zhang 等^[11]成功生长了含高浓度量子点的绿

* 国家自然科学基金 (批准号: 60877069) 和广东省战略新兴产业专项资金 (批准号: 2011A081301004, 2012A080304006) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: sunhq@scnu.edu.cn

光量子阱. 量子点的生长不仅拓宽了 LED 的辐射光谱, 使得量子阱可以发出更长波长的光, 提高了双波长 LED 的显色指数, 而且可以释放量子阱内的晶格失配带来的应力, 使得含有量子点的量子阱内极化效应降低, 增大了电子和空穴的波函数空间交叠积分, 缓解应力带来的影响, 减小了 droop 效应, 同时, 减小了量子点处载流子的寿命, 增加了载流子符合率^[11]. 生长含高 In 组分量子点的双波长 LED, 成为实现无荧光粉白光 LED 很有前景的一个课题.

张等^[12-14]对 GaN 基双波长 LED 的光电性质进行了一系列模拟实验和理论分析, 王等^[15]、Xia 等^[16]和李等^[17]对量子点模型进行了模拟分析. 能够影响双波长 LED 辐射光谱的因素有很多, 但目前对含有量子点的双波长 LED 辐射光谱的研究却很少. 本文将对含高 In 组分量子点的双波长 LED 的发光机理进行软件模拟研究, 通过改变量子点浓度、间隔层掺杂浓度及间隔层厚度, 讨论对含高 In 组分量子点的双波长 LED 辐射光谱的调控作用, 最后分析电流对器件辐射光谱的影响, 为双波长 LED 的设计提供理论依据.

2 理论模型与器件结构

2.1 器件模拟的基本方程

APSYS (advanced physical models of semiconductor devices)^[18]——模拟软件是利用二维有限元分析方法, 以漂移-扩散模型和电流连续性方程为基础, 结合边界条件自洽解泊松方程得到 LED 的电学和光学特性.

$$\begin{aligned} \nabla \cdot J_n - \Sigma_j R_n^{lj} - R_{sp} - R_{st} - R_{au} + G_{opt}(t) \\ = \frac{\partial n}{\partial t} + N_D \frac{\partial f_D}{\partial t}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \nabla \cdot J_p + \Sigma_j R_p^{lj} + R_{sp} + R_{st} + R_{au} - G_{opt}(t) \\ = -\frac{\partial n}{\partial t} + N_A \frac{\partial f_A}{\partial t}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} -\nabla \cdot \left(\frac{\epsilon_0 \epsilon_{dc}}{q} \nabla V \right) = -n + p + N_D(1 - f_D) \\ - N_A f_A + \Sigma_j N_{lj}(\delta_j - f_{lj}). \end{aligned} \quad (3)$$

(1) 和 (2) 式中 $J_n = n\mu_n \nabla E_{fn}$, $J_p = p\mu_p \nabla E_{fp}$ 分别为电子流与空穴流密度, 其中 μ_n , μ_p 分别为电子和空穴的迁移率, E_{fn} 和 E_{fp} 分别为电子和空穴的准费米能级, R_p^{lj} , R_{sp} , R_{st} , R_{au} , $G_{opt}(t)$ 分别表示第 j 个

SRH 深能级陷阱复合速率, 自发辐射复合速率, 受激辐射复合速率, 俄歇复合速率和光产生率. f_D , f_A 分别为电子占据施主和空穴占据受主杂质的概率. (3) 式中 ∇V 为电场, ϵ_{dc} 为相对介电常数, n , p 为电子与空穴浓度, N_A , N_D 为浅层施主, 受主掺杂浓度, N^{lj} 为第 j 个 SRH 深能级陷阱的密度, f^{lj} 为电子占据第 j 个深能级陷阱的概率, δ 为 1 代表施主, 为 0 代表受主.

器件的非辐射复合过程采用间接复合 (Shockley-Read-Hall, SRH 复合) 和俄歇复合. SRH 复合表示为

$$R_n^{lj} = c_{nj} n N^{lj} (1 - f_{lj}) c_{nj} n_{1j} N_{lj} f_{nj}, \quad (4)$$

$$R_p^{lj} = -c_{pj} n N^{lj} - c_{pj} p_{1j} N_{lj} (1 - f_{lj}), \quad (5)$$

(4) 和 (5) 式中 c_{nj} , c_{pj} 为载流子俘获系数, n_{1j} , p_{1j} 分别为电子和空穴准费米能级与 J 陷阱中的能级 E_{lj} 合并时载流子浓度. 俄歇复合速率表示为

$$R_{au} = (C_n n + C_p p)(np - n_i^2), \quad (6)$$

式中 c_n , c_p , 为材料的俄歇系数.

为了简化能级计算, 在处理含应力的 InGaN 量子阱导带和价带能级时, 在能带结构求解上忽略了导带和价带能级之间的耦合作用, 采用抛物带模型和有效质量近似模型, 氮化物元件各界面之间考虑了内建极化效应.

APSYS 模拟程序结合有限元方法在空间离散泊松方程、电流连续性方程、载流子运输方程和量子机理的波方程等, 形成非线性方程组, 然后用牛顿迭代法求解非线性方程组, 从而得到 LED 器件的电学与光学特性. 此软件具有数值稳定和计算速度快的特点.

2.2 器件结构

本文对含有量子点的 InGaN 量子阱结构发光二极管进行了研究, 器件面积为 $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$, 工作环境为 300 K, 器件结构如表 1 所示, 从下到上依次为 $2.5 \mu\text{m}$ 的 n-GaN(掺杂浓度 $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$); $0.1 \mu\text{m}$ 的 n-GaN(掺杂浓度 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$); 活性层 I; 间隔层; 活性层 II; $0.18 \mu\text{m}$ 的 p-AlGaIn(掺杂浓度 $0.3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$) 电子阻挡层; 15nm 的 p-GaN(掺杂浓度 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$). 每个活性层由三个量子阱和四个势垒组成, 活性层 I 阱中的润湿层材料是厚度为 4.5nm 的 $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$, 润湿层中生长 In 组分为 0.45 的量子点, 垒层材料是厚度为 9nm 的 GaN;

活性层 II 的阱层材料是厚度为 4 nm 的 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$, 垒层材料是厚度为 10 nm 的 GaN.

表 1 器件结构

p-GaN, 15 nm, 掺杂浓度 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
p-AlGaIn, 0.18 μm , 掺杂浓度 $0.3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
活性层 II $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$
间隔层 n-GaN
活性层 I 润湿层 $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}/\text{GaN}$ 量子点 $\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{N}$
n-GaN, 0.1 μm , 掺杂浓度 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
n-GaN, 2.5 μm , 掺杂浓度 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

本文将活性层 I 和活性层 II 的阱层材料分别设为 $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 和 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 主要考虑了两方面因素. 第一, 工艺上 n 型掺杂比 p 型掺杂更易于实现. In 组分高的材料对载流子具有更强的限制能力, 因此高 In 阱层设置在靠近 n 端, 对电子具有更强的束缚能力, 为了进行光谱调控间隔层将进行 n 型掺杂, 而不是工艺上更难实现的 p 型掺杂 [13]. 第二, 高 In 组分材料会吸收 $\text{In}_{0.2}$ 组分量子阱产生的蓝光, 发生光抽运效应, 降低蓝光的出光率, 甚至使蓝光在大电流下光谱峰值更快达到饱和 [3], 将 $\text{In}_{0.2}$ 组分的量子阱设置在靠近上层的出光端, 可以降低光抽运效应, 使器件的蓝光在大电流下具有更高的光谱发光峰值. 另外, 由于篇幅限制, 本文只讨论 In 组分为 0.45 时的情况.

3 结果与讨论

3.1 量子点浓度变化

本文首先计算电流为 60 mA, 间隔层厚度为 13 nm, 间隔层 n 型掺杂浓度为 $0.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时, 活性层 I 无量子点和量子点分布密度分别为 $0.5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, $2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, $4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, $8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 的自发辐射谱, 其结果如图 1 所示.

从图 1 可以看出, 活性层 I 量子点浓度的变化对活性层 II 的光谱波长并无明显影响, 但随着量子点浓度的增大, 活性层 II 的光谱峰值有所减小, 活性层 II 发出的蓝光和活性层 I 发出的黄绿光的发光峰值强度之比逐渐减小. InGaIn 量子阱在其生长方向上具有量子限制效应, 而 InGaIn 量子点在三维方向上都存在纳米尺度, 在三维方向上都受到量子限制, 因此, 量子点对载流子在三维方向都会有很

强的束缚能力, 抑制载流子向非辐射复合中心迁移. 量子点的引入还会引起能带的进一步倾斜, 使载流子更容易扩散. 蓝光发光峰值的减小正是因为量子点的引入使得活性层 I 对载流子的束缚能力加强, 电子需要克服一个附加的势垒才能扩散到上端的活性层 II 中; 同时, 由于能带的倾斜有效质量大的空穴更容易扩散到活性层 I 中, 使更多的载流子在活性层 I 中复合, 减小了蓝光量子阱的复合率, 各个量子阱在不同量子点浓度时的复合速率如图 2 所示. 由于活性层 I 在靠近 n 型层一端, 所以量子点对载流子的束缚主要地表现为对电子的束缚, 这为下文 3.2 节中间隔层 n 型掺杂浓度的变化调控辐射光谱提供了依据.

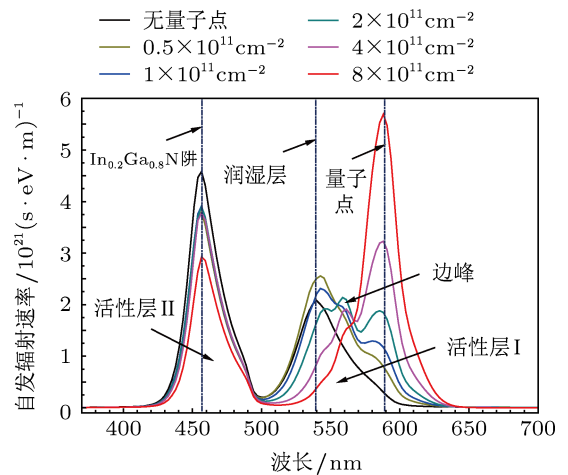


图 1 无量子点及不同量子点分布密度 (分布密度分别为 $0.5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, $2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, $4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, $8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$) 的辐射光谱

从图 2 可以看出, 当活性层 I 中的量子点分布密度为 $8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 时, $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 阱对应的载流子复合率几乎都提高了一倍以上, 活性层 I 的发光量显著提升; 而 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 阱对应的载流子复合率都大幅下降, 但活性层 II 中的三个阱下降的幅度有所不同. 靠近 p 端的 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 量子阱复合率下降幅度比较小, 这是因为电子阻挡层的存在使得靠近 p 端的量子阱中的电子浓度高于另外两个 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 量子阱, 并且 p 端是空穴源, 可以提供充足的空穴载流子. 靠近 n 端的 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 量子阱载流子复合率下降幅度最大, 这是因为在无量子点时, 载流子主要集中在活性层 II 中, 间隔层的存在起到了对空穴扩散的阻挡作用, 使得靠近 n 端的 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 量子阱空穴浓度高于另外两个阱, 使其对载流子的复合更有优势; 而当掺杂量子点之后, 载流子开始向活性层 I 集中, 电子浓度的下降使得

靠近 n 端的 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 量子阱的复合率大幅度地减小了。

间隔层的存在对空穴扩散具有强烈的限制作用, 影响到载流子在不同区域的浓度, 从而影响到 LED 辐射光谱中蓝光与黄绿光的比例, 这将在 3.2 节继续对比讨论。

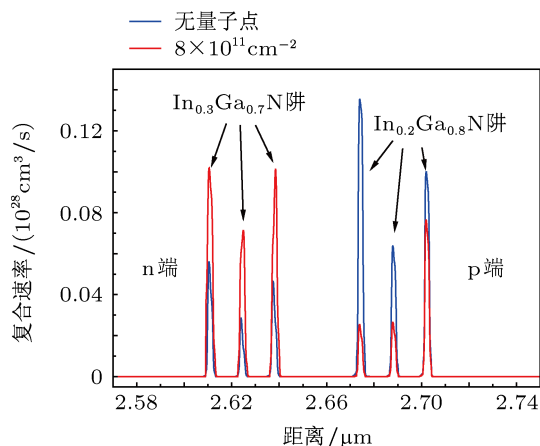


图 2 无量子点和量子点分布密度为 $8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 时的复合速率

通过图 1 还可以明显地看出, 随着量子点浓度的增加, 活性层 I 中量子点对应的光谱峰值不断增高, 润湿层 (即 $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$) 对应的光谱发光峰不断减小. 这是由于量子点的引入降低了量子点处载流子的寿命^[11], 载流子优先在量子点处复合, 相同电流下, 量子点浓度越大, 量子点发光占活性层 I 的比重越大, 润湿层对应的光谱峰值占辐射光谱的比重越小. 但随着量子点浓度的增大, 活性层 I 整体对应的光谱面积在不断增大, 由于能带更加倾斜, 活性层 I 的光谱整体发生红移; 同时, 量子阱内的 In 含量逐步提高, 晶场分裂势和导带之间的辐射复合增强, 辐射光谱出现边峰^[16]. 电流大小对活性层 I 的辐射光谱形状也有很大的影响, 将在 3.3 节中讨论。

通过以上分析可以得出, 增加量子点浓度有利于活性层 I 中载流子的复合, 增加黄绿光在 LED 光谱中的比例; 随着量子点浓度的增加, 量子点与润湿层发光强度的比重同时增加。

3.2 间隔层变化

3.2.1 间隔层 n 型掺杂浓度变化

图 3 示出电流为 60 mA, 间隔层厚度为 13 nm, 活性层 I 量子点分布密度为 $2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 时, 间隔层不掺杂和间隔层 n 掺杂浓度分别为

$0.4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $0.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $0.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $1.4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的自发辐射光谱。

从图 3 可以明显看出, 间隔层 n 型掺杂浓度越大, 活性层 I 的发光越弱, 活性层 II 的发光越强烈, 两个发光峰成此消彼长之势. 当间隔层不掺杂时, 处于活性层 I 的 $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 量子阱由润湿层和量子点共同发出一个宽广的黄绿色光谱, 处于活性层 II 的 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 量子阱几乎不发光; 当间隔层 n 掺杂浓度为 $1.4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时, 处于活性层 I 的 $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 量子阱几乎不发光, 量子点对应的光谱峰值也小到难以观察, 处于活性层 II 的 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 量子阱发出类似单波长蓝光 LED 的光谱. 如图 4 所示, 增加间隔层 n 掺杂的浓度, 间隔层能带向下弯曲成凹形, 使 LED 的两个活性层和 p 端的能带下移, 增加了能带的倾斜程度. 由图 4 可以推出, 随着 n 掺杂浓度的加大, 电子因势垒高度变低更容易向 p 端扩散, 而空穴由于势垒高度增大而更难向 n 端扩散, 载流子将逐步集中在活性层 II, 从而导致活性层 I 的复合率下降, 活性层 II 的复合率提升. 图 5 和图 6 分别是间隔层不掺杂和间隔层 n 型掺杂浓度为 $1.4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时的载流子浓度分布图, 从图中可以看出间隔层掺杂对载流子具有很强的调控作用, n 型掺杂浓度越大, 载流子将越集中于活性层 II, 同时溢出空穴流将越小, 溢出电子流越大。

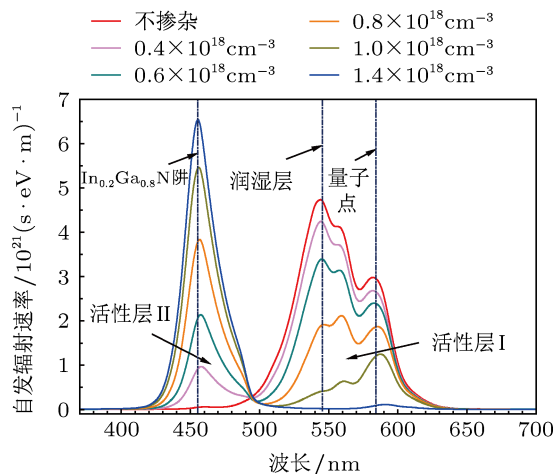


图 3 间隔层不掺杂及间隔层不同掺杂浓度 (n 掺杂浓度分别为 $0.4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $0.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $0.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $1.4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 时的辐射光谱

从图 3 中还可以看出, 随着间隔层 n 掺杂浓度的增大, 活性层 I 的辐射光谱逐渐变窄变矮, 并且润湿层对应的发光峰值强度减小幅度大于量子点对应的减小幅度, 活性层 I 变得逐渐以量子点辐射为主. 量子点对载流子具有比润湿层更强的束缚能

力, 从三维方向上约束载流子的迁移, 而且载流子在量子点处的寿命更短, 因此载流子优先在量子点处复合. 间隔层不掺杂时, 活性层 I 的载流子浓度比较充足, 大量载流子可以在润湿层中复合, 量子点处的复合趋近于饱和, 活性层 I 的辐射光谱以润湿层对应的波长为主. 随着 n 掺杂浓度的提升, 载流子越来越集中于活性层 II, 活性层 I 中的载流子逐渐减少, 量子点对载流子的束缚能力得以体现, 量子阱润湿层中的电子优先扩散到活性层 II 中, 量子点也优先捕获从活性层 II 扩散来的空穴, 润湿层对应的发光峰值强度比量子点对应的发光峰值强度减小幅度更大. 当载流子浓度足够低时量子点对应的波长将占活性层 I 辐射光谱的主要部分.

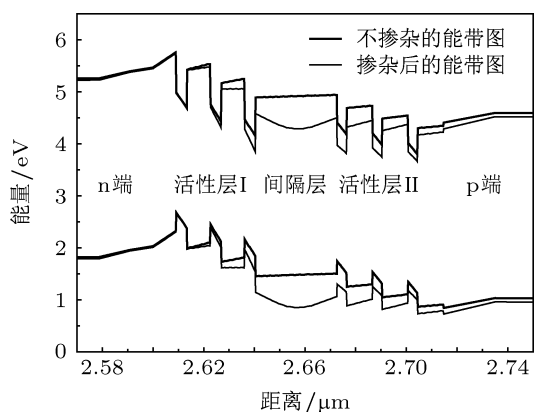


图4 间隔层不掺杂和间隔层 n 型掺杂浓度为 $1.4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时的能带图

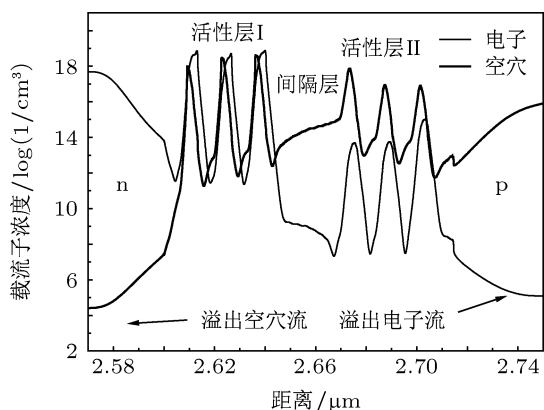


图5 间隔层不掺杂时的载流子浓度分布图

3.2.2 间隔层厚度变化

图 7 示出电流为 60 mA, 间隔层 n 掺杂浓度分 $0.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 活性层 I 量子点分布密度为 $2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 时, 间隔层厚度分别为 0 nm, 6 nm, 9 nm, 12 nm, 15 nm, 18 nm, 21 nm 的自发辐射光谱.

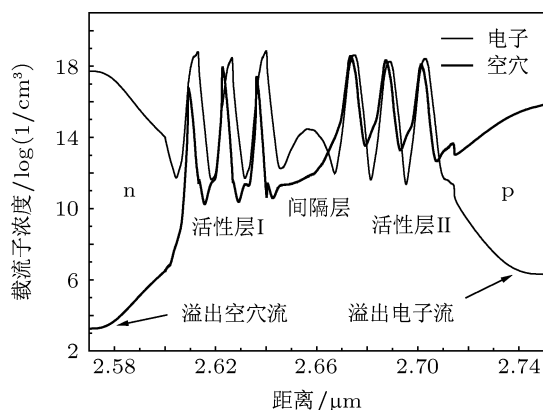


图6 间隔层 n 型掺杂浓度为 $1.4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时的载流子浓度分布图

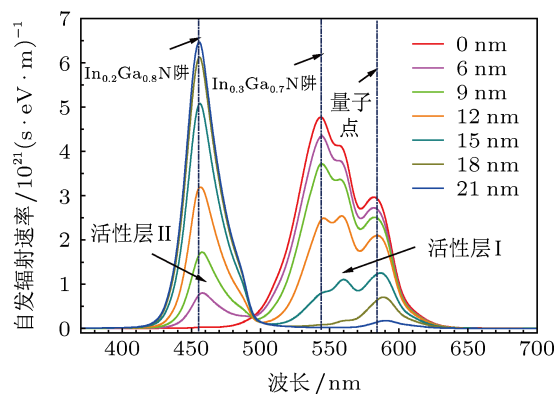


图7 不同间隔层厚度 (0 nm, 6 nm, 9 nm, 12 nm, 15 nm, 18 nm, 21 nm) 时的辐射光谱

由图 7 对比图 3 可见, 改变间隔层厚度与改变间隔层 n 掺杂浓度所得的 LED 辐射光谱形状基本一致, 说明这两种对光谱的调控方式具有类似的机理. 图 8 和图 9 分别为不加间隔层 (间隔层厚度为 0) 和间隔层厚度为 21 nm 时的载流子浓度分布图. 从图 8 可以看出, 虽然活性层 II 更靠近 p 端, 但其空穴浓度依然低于活性层 I, 活性层 II 中的电子浓度则远低于活性层 I, 体现出活性层 I 中窄禁带宽度的 $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 和量子点对载流子的强烈束缚能力. 对应于图 7 中的红色光谱线, 无间隔层时活性层 II 几乎不发光, 辐射光谱由活性层 I 占据. 从图 9 可以看出, 当间隔层厚度为 21 nm 时, 间隔层的存在对空穴流起到了阻碍作用, 使得活性层 II 中空穴的浓度大于活性层 I, 这样可以使活性层 I 中的电子在没有足够的空穴与之复合的情况下扩散到活性层 II 中, 对载流子起到了调节作用. 结合图 7 的辐射光谱可以看出, 在加入间隔层后, 载流子在 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 组分所在量子阱中得到了充分的复合. 同时, 随着间隔层的加厚, 器件的溢出空穴流得到

了抑制,但加大了溢出电子流的浓度.

图 7 中活性层 I 的辐射光谱与图 3 具有相同的规律,其机理也是由间隔层厚度的变化引起了载流子浓度的改变,如上 3.2.1 所讨论,载流子浓度对活性层 I 的发光光谱具有重要的影响,此节不再重复叙述.

3.2.3 小结

由以上分析可以得出,载流子浓度对含有量子点的量子阱的辐射光谱有很大的影响,间隔层掺杂浓度的变化和间隔层厚度的变化可以很好地调控双波长 LED 两个活性层中载流子的浓度,从而调控 LED 辐射光谱中两个活性层的发光比例,载流子浓度低时以量子点复合为主,载流子浓度高时量子点复合达到饱和以润湿层复合为主.

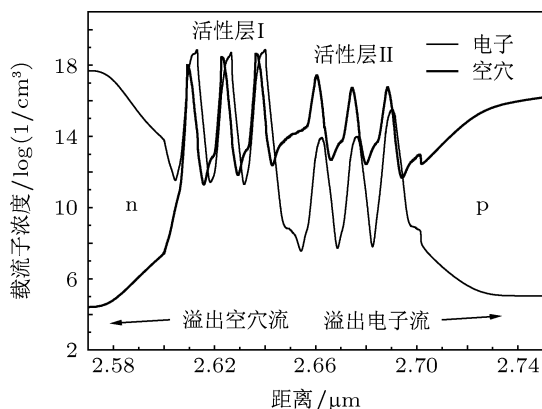


图 8 无间隔层时的载流子浓度分布图

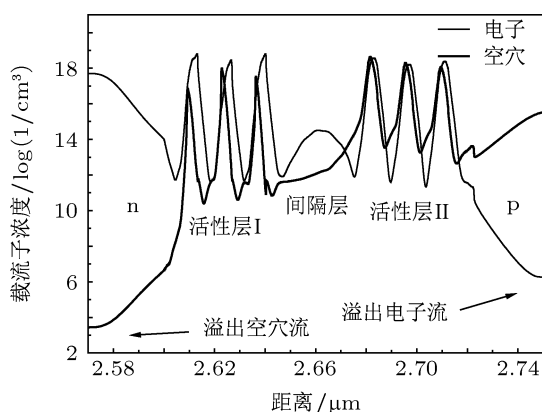


图 9 间隔层厚度为 21 nm 时的载流子浓度分布图

3.3 电流变化

电流是 LED 的一项重要参数,双波长 LED 的辐射光谱对电流的变化有很强的依赖性.图 10 示出间隔层厚度为 13 nm,间隔层 n 掺杂浓度

分 $0.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,活性层 I 量子点分布密度为 $2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 时,电流大小分别为 20 mA, 40 mA, 60 mA, 80 mA 的自发辐射光谱.

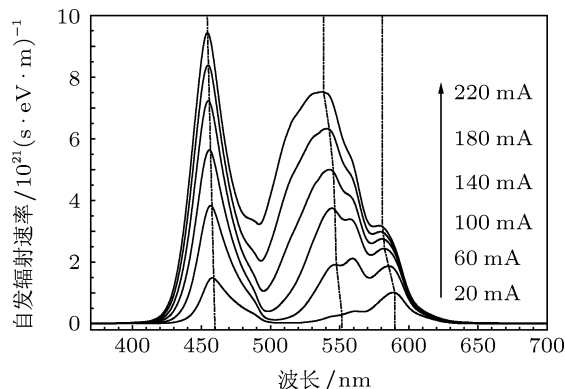


图 10 不同电流时的辐射光谱

从图 10 可以看出,随着电流的增加,LED 的辐射速率持续增长,绿光比重越来越大,辐射光谱变得宽广,蓝光发光峰、绿光发光峰及量子点发出的黄光发光峰均出现了蓝移现象.

电流越大器件中单位时间内通过的载流子越多,载流子浓度变高,量子阱辐射速率自然得到提升,光谱发光峰值会随着载流子浓度的增长而增高,但增长幅度会越来越小,因为电流增大的同时电子和空穴的漏电流也在增大,减小了器件的内量子效率.量子效率的减小限制了电流的增加.

由于载流子浓度随电流增大而增大,所以由 3.2 节的结论可知,载流子浓度越大,活性层 I 中 $\text{In}_{0.3}$ 组分的润湿层所发的绿光比重会越大.如图 10 所示,当电流为 100 mA 时量子点对应的峰值增长速度逐渐达到饱和,而润湿层发出的绿光发光峰值仍在较快地增长并占据活性层 I 发光的主导地位.因此,大电流时量子点主要表现为对光谱发光峰的拓宽作用,若无量子点存在,与 3.1 节讨论结果一致,绿光的光谱将只覆盖波长为 540 nm 附近如蓝光一样尖锐而窄小的波段.

如图 10 所示,在电流增加的同时,光谱会变得更加宽广,一方面,随着电流的增大,LED 器件承受的电压值也在增加,LED 的能带更加倾斜,加剧了量子斯塔克效应,使光谱产生红移趋势;另一方面,增大电流后电子和空穴的分离对极化电场产生屏蔽作用,使光谱发光峰产生蓝移.在图 10 中可以看出电流为 220mA 时,屏蔽作用使黄绿光的发光峰蓝移了十几个纳米,而蓝光只蓝移了 5 nm 左右,这是由于发出黄绿光的活性层 I 具有更高的 In 含量,

其晶格失配所引起的极化电场更强, 所以屏蔽作用对其影响也更大.

在大电流下, 量子阱内有充足的载流子进行辐射复合, 绿光随着载流子浓度的增多而迅速增多, 同时量子点拓宽了器件的光谱范围, LED 辐射光谱呈现出更高的显色指数.

4 结论

本文通过对含有高 In 组分量子点的双波长 LED 进行了模拟计算, 发现蓝绿双波长 LED 的绿光量子阱中加入高 In 组分量子点后可以得到更宽广的黄绿蓝光谱, 具有更高的显色指数, 为实现无

荧光粉白光 LED 外延的生长提供指导. 量子点对载流子具有更强的束缚能力, 黄光与绿光的比例随量子点浓度的增大而增大, 载流子浓度较低时以量子点处的黄光辐射为主, 载流子浓度变大后, 量子点复合逐渐达到饱和, 绿光辐射开始占据主导. 对间隔层厚度和间隔层掺杂浓度的调节可以很方便地调控载流子的分布, 从而实现对含有量子点的双波长 LED 光谱的调控.

通过文中讨论可以得出, 量子点浓度和电流越大器件所呈现的光谱越宽广, 在实际应用中, 我们可以根据不同的外延生长工艺设计适当的量子点浓度、间隔层厚度及间隔层掺杂浓度进行生长, 并根据器件效率要求加以适当的电流以满足需要.

- [1] Damilano B, Demolon P, Brault J, Huault T, Natail F, Massies J 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 073115
- [2] Pimputkar S, Speck J S, DenBaars S P, Nakamura S 2009 *Nature Photonics* **3** 180
- [3] Qi Y D, Liang H, Tang W, Lu Z D, Lau K M 2004 *J. Cryst. Growth* **272** 333
- [4] Gu X L, Guo X, Liang T, Lin Q M, Guo J, Wu D, Xu L H, Shen G D 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5531 (in Chinese) [顾晓玲, 郭霞, 梁庭, 林巧明, 郭晶, 吴迪, 徐丽华, 沈光地 2007 物理学报 **56** 5531]
- [5] Fuhrmann D, Rossow U, Netzel C, Bremers H, Ade G, Hinze P, Hangleiter A 2006 *Phys. Stat. Sol. (c)* **3** 1966
- [6] Huang C F, Lu C F, Tang T Y, Huang J J, Yang C C 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 151122
- [7] Soh C B, Liu W, Teng J H, Chow S Y, Ang S S, Chua S J 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 261909
- [8] Hirayama H, Tanaka S, Ramvall P, Aoyagi Y 1998 *Appl. Phys. Lett.* **72** 1736
- [9] Wang J, Nozaki M, Lachab M, Ishikawa Y, Qhalid Fareed R S, Wang T, Hao M, Sakai S 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 950
- [10] Zhao W, Wang L, Wang J X, Hao Z B, Luo Y 2011 *J. Cryst. Growth* **327** 202
- [11] Zhang M, Bhattacharya P, Guo W 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 011103
- [12] Zhang Y Y, Fan G H 2011 *Acta. Phys. Sin.* **60** 018502 (in Chinese) [张运炎, 范广涵 2011 物理学报 **60** 018502]
- [13] Zhang Y Y, Fan G H, Zhang Y, Zheng S W 2011 *Acta. Phys. Sin.* **60** 028503 (in Chinese) [张运炎, 范广涵, 章勇, 郑树文 2011 物理学报 **60** 028503]
- [14] Liu X P, Fan G H, Zhang Y Y, Zheng S W, Gong C C, Wang Y L, Zhang T 2012 *Acta. Phys. Sin.* **61** 138503 (in Chinese) [刘小平, 范广涵, 张运炎, 郑树文, 龚长春, 王永力, 张涛 2012 物理学报 **61** 138503]
- [15] Wang D Y, Sun H Q, Xie X Y, Zhang P J 2012 *Acta. Phys. Sin.* **61** 227303 (in Chinese) [王度阳, 孙慧卿, 谢晓宇, 张盼君 2012 物理学报 **61** 227303]
- [16] Xia C S, Hu W D, Wang C, Li Z F, Chen X S, Lu W, Simon Z M, Li Z Q 2007 *Opt. Quant. Electron.* **38** 1077
- [17] Li W J, Zhang B, Xu W L, Lu W 2009 *Acta. Phys. Sin.* **58** 3421 (in Chinese) [李为军, 张波, 徐文兰, 陆卫 2009 物理学报 **58** 3421]
- [18] Crosslight Software Inc general manual <http://www.crosslight.com> [2011-11]

The spectrum-control of dual-wavelength LED with quantum dots planted in quantum wells*

Zhang Pan-Jun Sun Hui-Qing[†] Guo Zhi-You Wang Du-Yang Xie Xiao-Yu
Cai Jin-Xin Zheng Huan Xie Nan Yang Bin

(Laboratory of Nanophotonic Functional Materials and Devices, Institute of Opto-Electronic Materials and Technology, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

(Received 11 December 2012; revised manuscript received 30 January 2013)

Abstract

A theoretical simulation of electrical and optical characteristics of GaN-based dual-wavelength light-emitting diodes (LED) with high In content in the quantum dots (QDs) which are planted in quantum wells is conducted with APSYS software. The adjustment and contrast of the structure of the devices showed that the blue and green dual-wavelength LEDs will have a broader radiation spectrum and a higher color rendering index when QDs are planted in the green quantum wells. QDs have strong blinding capacity with the carriers, and the carriers at the QDs have shorter lifetime than they are in the wetting layers, so the carrier recombination will give preference to the QDs. It is shown that the distribution of the carriers could be easily controlled by adjusting the spacing layer thickness and the spacing layer doping concentration, so as to control the radiation rate of the two active layers of the dual-wavelength LEDs. Therefore, the spectrum-control of the dual-wavelength LED with QDs planted in QWs could be realized by adjusting the concentration of quantum dots, the thickness of the spacing layer and the doping concentration in the spacing layer. This article can provide guidance for the realization of the non-phosphor white LED.

Keywords: GaN, quantum dots, spectrum-control, dual-wavelength LED

PACS: 73.61.Ey, 73.21.La, 78.45.+h, 85.60.Jb

DOI: 10.7498/aps.62.117304

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60877069), the Science and Technology Key Program of Guangdong Province, China (Grant Nos. 2011A081301004, 2012A080304006).

[†] Corresponding author. E-mail: sunhq@scnu.edu.cn