

选择性 p 型量子阱垒层掺杂在双波长发光二极管光谱调控中的作用*

陈峻¹⁾²⁾ 范广涵^{1)†} 张运炎¹⁾

1) (华南师范大学光电子材料与技术研究所, 广州 510631)

2) (广东工业大学实验教学部, 广州 510006)

(2011年6月9日收到; 2011年12月19日收到修改稿)

采用软件理论分析的方法对选择性 p 型掺杂量子阱垒层在 InGaN 双波长发光二极管 (LED) 中的光谱调控作用进行模拟分析. 分析结果表明, 选择性 p 型掺杂对量子阱中电子和空穴浓度分布的均衡性起到一定的调控作用, 在适当选择 p 型掺杂量子阱垒层层数的条件下, 能够改善量子阱中载流子的辐射复合速率, 降低溢出电子浓度, 从而有效提高芯片内量子效率, 并减缓内量子效率随驱动电流增大而快速下降的趋势. 随着活性层量子阱增加到特定数量, 选择性 p 型掺杂的调控效果更加明显, LED 芯片的双波长发光峰强度达到基本均衡.

关键词: InGaN, p 型掺杂, 数值模拟, 双波长发光二极管

PACS: 85.60.Jb, 85.50.-n, 87.15.A-, 78.60.Fi

1 引言

近年来, 随着材料生长和器件制备技术的不断发展, 氮化物发光二极管 (LED) 及其相关应用成为重要的研究课题^[1-4]. 高效率的 GaN 基紫外和蓝光 LED 的发展使得户外全彩色显示技术和大功率白光 LED 照明成为可能^[5]. 传统 LED 的制作方法通常有以下两种: 一是用蓝色、紫色或紫外 LED 芯片激发荧光粉后混色合成所需要的光, 这种方法较为简单, 便于实现, 但是传统荧光粉长时间工作的老化问题和发光衰减问题严重, 特别是高亮度发光对荧光粉要求非常高, 荧光粉的劣化是 LED 寿命缩短的一个重要原因^[6]. 二是采用红绿蓝三色 LED 混色制作, 此种方法的缺点是由于三种颜色的 LED 量子效率随着温度和驱动电流的变化不一致, 随时间的衰减速度也各不相同, 因此复杂的驱动电路会造成较大效率损失. 因此, 一种无荧光

粉的多波长 LED 成为近期的一个研究热点^[7-10], 这种多波长 LED 芯片有别于传统的发光二极管制备方法, 是在同一个芯片中生长出多个活性层的叠加结构^[11,12], 各个活性层由不同光波段的量子阱构成, 其发出不同波长的光混色得到所需要的色光, 通过控制电极所加的电流、电压的大小就能够控制各个不同光波段的量子阱的发光强度. 这种多波长 LED 具有器件电路简单、寿命长、光电转换效率高的特点. 但是, 多波长 LED 的混色发光受各活性层量子阱的掺杂情况、In 组分调节、量子阱尺寸、量子阱数量等各种情况的制约, 具有更大的复杂性, 这也成为该领域的一个研究难点. 为了进一步改善和调控单芯片多波长 LED 的发光特性, 本文对双波长 LED 的发光机理进行软件模拟研究, 并深入讨论选择性 p 型掺杂量子阱垒层对双波长 LED 发光强度、内量子效率、电子和空穴浓度分布、载流子溢出等的影响.

* 国家自然科学基金 (批准号: 61176043)、广东省战略性新兴产业专项基金 (批准号: 2010A081002005) 和广东省产学研计划 (批准号: 2010B090400192) 资助的课题.

† E-mail: gfan@scnu.edu.cn

2 理论模型和器件结构

2.1 器件模拟的基本方程

APSYS 模拟软件^[13] 是利用二维有限元的分析方法, 以漂移-扩散模型和电流连续方程

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

$$\begin{aligned} \nabla \cdot J_p + \sum_j R_p^{tj} + R_{sp} + R_{st} + R_{Au} - G_{opt}(t) \\ = -\frac{\partial p}{\partial t} + N_A \frac{\partial f_A}{\partial t} \end{aligned} \quad (2)$$

为基础, 并结合边界泊松方程

$$\begin{aligned} -\nabla \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_{dc} \nabla V / q) = -n + p + N_D(1 - f_D) \\ - N_A f_A + \sum_j N_{tj}(\delta_j - f_{tj}) \end{aligned} \quad (3)$$

得到 LED 器件的电学与光学特性. 方程 (1)–(3) 中, J_n 和 J_p 分别是电子流密度和空穴流密度,

$$J_n = n\mu_n \nabla E_{Fn},$$

$$J_p = p\mu_p \nabla E_{Fp},$$

其中 μ 为迁移率, E_F 为准费米能级; R_p^{tj} 为通过边界上第 j 个能级时单位体积的空穴结合速率; R_{sp} 为自发辐射复合速率; R_{st} 为受激辐射复合速率; R_{Au} 为俄歇复合速率,

$$R_{Au} = (C_n n + C_p p)(np - n_i^2),$$

其中 C_n 和 C_p 均为材料的俄歇系数, 其值取决于材料本身, n_i 为本征载流子浓度; $G_{opt}(t)$ 为光产生率; ∇V 为电场; ε_{dc} 为相对介电常数; n 和 p 分别为电子浓度和空穴浓度; N_D 和 N_A 分别为浅层施主掺杂浓度和受主掺杂浓度; f_D 和 f_A 分别为电子占据施主和空穴占据受主杂质的概率; N_{tj} 为第 j 个肖克莱-里德-霍尔 (SRH) 深能级陷阱的密度; f_{tj} 为电子占据第 j 个深能级陷阱的概率; $\delta = 1$ 代表施主, $\delta = 0$ 代表受主.

载流子的传输机理包含了电子和空穴在元件内部的漂移和扩散, 同时还考虑了载流子的自发辐射复合和缺陷所造成的 SRH 非辐射复合. 在处理含应力的 InGaN 量子阱导带和价带能级时, 为了简化能级计算, 在能带结构求解上忽略了导带和价带

的能级之间的耦合作用, 分别采用抛物带模型^[14] 和有效质量近似模型^[15]. InGaN 与 AlGaN 的能带带隙可以用下列方程表示:

$$\begin{aligned} E_g(A_{1-x}B_x) = (1-x)E_g(A) \\ + xE_g(B) - x(1-x)T, \end{aligned} \quad (4)$$

其中, A 代表 GaN 二元合金, B 代表 InN 或 AlN 二元合金, T 为弯曲系数.

在氮化物元件各层的界面中, 考虑内建极化效应机理^[16–18]. 下面给出在模拟中所使用的三元氮化物材料极化效应公式. In_xGa_{1-x}N 材料和 Al_xGa_{1-x}N 材料中的自发极化强度为

$$\begin{aligned} P_{sp}(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = -0.0413x - 0.0339(1-x) \\ + 0.0378x(1-x), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} P_{sp}(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = -0.0898x - 0.0339(1-x) \\ + 0.0191x(1-x); \end{aligned} \quad (6)$$

In_xGa_{1-x}N 材料和 Al_xGa_{1-x}N 材料中的压电极化强度为

$$\begin{aligned} P_{pz}(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = xP_{pz}(\text{InN}) \\ + (1-x)P_{pz}(\text{GaN}), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} P_{pz}(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = xP_{pz}(\text{AlN}) \\ + (1-x)P_{pz}(\text{GaN}). \end{aligned} \quad (8)$$

这里,

$$P_{pz}(\text{InN}) = -1.373\varepsilon + 9.541\varepsilon^2, \quad (9)$$

$$P_{pz}(\text{GaN}) = -0.918\varepsilon + 9.541\varepsilon^2, \quad (10)$$

$$P_{pz}(\text{AlN}) = -1.808\varepsilon + 5.642\varepsilon^2 \quad (\varepsilon < 0), \quad (11)$$

$$P_{pz}(\text{AlN}) = -1.808\varepsilon - 7.888\varepsilon^2 \quad (\varepsilon > 0), \quad (12)$$

式中, ε 为薄膜结构与基板间的应变,

$$\varepsilon = (a_{\text{sub}} - a)/a, \quad (13)$$

其中, a_{sub} 为基板晶格常数, a 为氮化物薄膜晶格常数.

以上方程按照有限元方法在空间离散后形成非线性方程组, 然后用求解非线性方程组的方法 (如牛顿迭代法) 进行求解. 本文采用 Crosslight 公司的半导体器件模拟专业软件 APSYS 进行数值计算, 该软件具有数值稳定和计算速度高的特点.

2.2 器件结构

本文研究的 InGaN 量子阱结构的发光二极管以蓝宝石为衬底, 采用金属有机化合物化学气相沉积 (MOCVD) 技术进行生长, 其器件面积为 $300\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$, 从下到上依次是厚度为 $3\ \mu\text{m}$ 的 GaN 层 (n 型掺杂浓度为 $5 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$)、活性层 I、活性层 II、厚度为 $0.03\ \mu\text{m}$ 的 p 型 $\text{Al}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{N}$ (p 型掺杂浓度为 $3 \times 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$) 电子阻挡层、厚度为 $0.15\ \mu\text{m}$ 的 GaN 层 (p 型掺杂浓度为 $7 \times 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$). 每个活性层都包括多个量子阱层及其垒层, 活性层 I 以 $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ 为阱层材料、活性层 II 以 $\text{In}_{0.11}\text{Ga}_{0.89}\text{N}$ 为阱层材料, 厚度均为 $2.2\ \text{nm}$. 两种量子阱结构的垒层为 GaN, 厚度均为 $15\ \text{nm}$.

在本文中, 器件设计工作温度为 $300\ \text{K}$, 对量子阱垒层的 p 型掺杂进行了不同的设计. 文中先讨论了芯片活性层 I 与活性层 II 均含两个量子阱时的基本特性. 然后对量子阱的不同垒层进行有选择性的 p 型掺杂, 并讨论了 LED 芯片发光特性和机理, 再增加活性层 II 的量子阱数量为四个, 对其发光特性和机理加以进一步的分析讨论.

3 结果及讨论

虽然载流子浓度分布、发光强度及辐射复合速率等会随电流大小而变化, 但是根据计算结果显示, 量子阱垒层的 p 型掺杂对 LED 发光所产生的一系列作用, 在其他电流下与在 $20\ \text{mA}$ 电流下趋势大体相同. 如无特别说明, 本文中芯片的电子浓度和空穴浓度分布图、载流子辐射复合速率分布图和自发发射光谱图均是在 $20\ \text{mA}$ 驱动电流下得到的结果.

3.1 活性层 I 与活性层 II 均含两个量子阱及其垒层, 垒层未掺杂

图 1 所示为量子阱垒层未掺杂时 LED 芯片电子浓度和空穴浓度分布. 从图 1 可以看出, 活性层 I 虽然远离 p 电极的空穴源, 但其空穴浓度仍然大于活性层 II 的空穴浓度, 可见高 In 组分的量子阱对空穴的限制作用强于低 In 组分的量子阱. 因此, 采用高 In 组分的量子阱作为远离空穴源的活性层 I,

而采用低 In 组分的量子阱作为靠近空穴源的活性层 II 可以对平衡量子阱中的空穴浓度起到一定作用. 另外, 由图 1 还可以看出, 芯片的溢出电子流高达 $10^{11}\ \text{cm}^{-3}$ 量级, 可见电子阻挡层对电子溢出的阻挡作用并不明显.

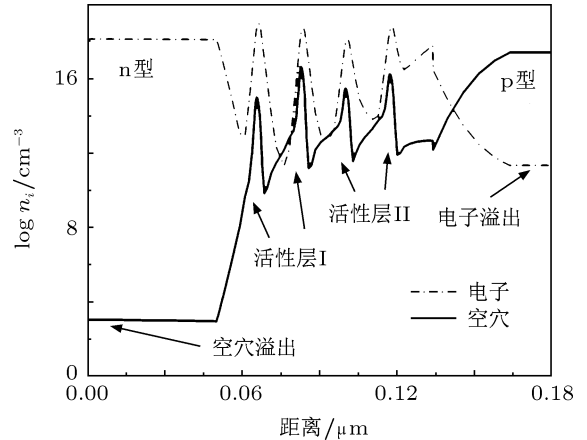


图 1 垒层未掺杂时 LED 芯片的电子和空穴浓度分布

图 2 所示的是 LED 芯片自发发射光谱. 从图 2 可以看出: 虽然量子阱 $\text{In}_{0.11}\text{Ga}_{0.89}\text{N}$ 处于靠近空穴源的有利位置, 但由于其低 In 组分材料禁带宽度较大, 所构成的量子阱阱深较浅, 对于空穴而言, 这种情况下量子阱的能量较高而不利于对空穴的限制, 因而空穴浓度较低. 而电子在 InGaN 量子阱中的迁移率较大, 所以两个活性层中的电子浓度变化并不大, 这就使得两个活性层中的电子和空穴浓度分布不均衡, 从而导致了活性层 II 的发光谱峰值强度远远低于活性层 I.

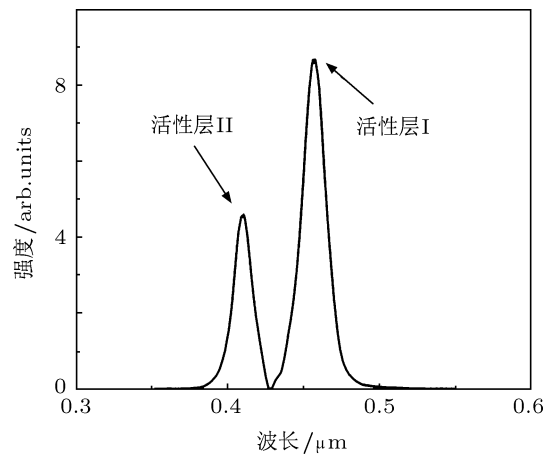


图 2 垒层未掺杂时 LED 芯片的自发发射光谱

图 3 所示的是不同活性层中载流子的辐射复合速率分布 (横坐标为外延芯片生长方向的距离,

下同). 从图 3 可以看出, 活性层 I 的平均辐射复合速率要高于活性层 II. 这说明在活性层 II 中, 较低的空穴浓度降低了和电子进行有效复合发光的效率.

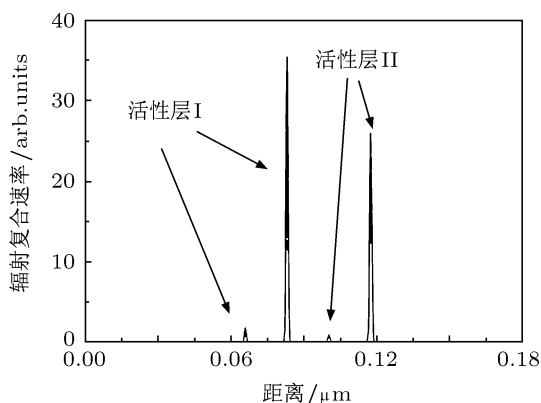


图 3 垒层未掺杂时 LED 芯片的载流子辐射复合速率分布

3.2 活性层 I 与活性层 II 均含两个量子阱及其垒层, 选择性 p 型掺杂垒层

为了促使活性层 I 和活性层 II 中的电子和空穴浓度分布达到均衡, 提高 LED 芯片的发光效率, 对靠近 p 电极的多个量子阱垒层进行选择性 p 型掺杂, 分为三种掺杂方式. 方式 A 对靠近 p 电极的第一个垒层进行掺杂; 方式 B 对靠近 p 电极的第一个和第二个垒层进行掺杂; 方式 C 对靠近 p 电极的第一个、第二个和第三个垒层进行掺杂; 掺杂浓度均设定为 $p=3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

图 4 所示为采用方式 A 进行掺杂时 LED 芯片的电子和空穴浓度分布. 从图 4 可以看出, 活性层

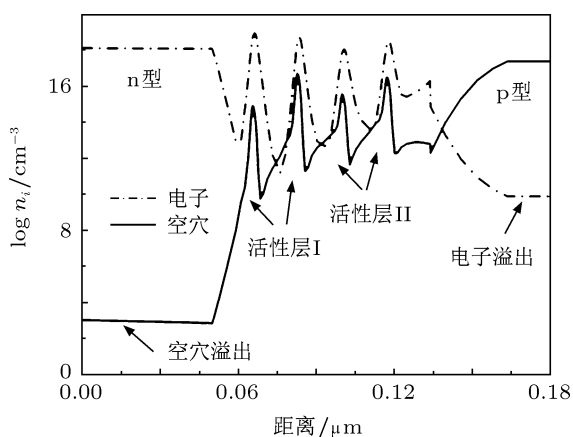


图 4 采用方式 A 掺杂时 LED 芯片的电子和空穴浓度分布

II 靠近 p 电极的两个量子阱的空穴浓度均有少量增加, 而四个量子阱中的电子浓度均未明显变化, 溢出电子浓度则下降到 10^{10} cm^{-3} , 较图 1 下降了一个数量级.

从图 5 可以发现, $\text{In}_{0.11}\text{Ga}_{0.89}\text{N}$ 阱所发出的波长为 $0.42 \mu\text{m}$ 发光峰和 $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ 阱发出的波长为 $0.46 \mu\text{m}$ 发光峰的平均强度较图 2 有一定程度的增加. 同样, 从图 6 可以看出, 载流子的辐射复合速率也较图 3 有所增加.

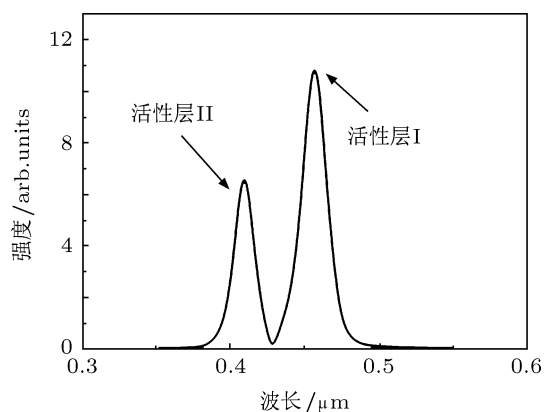


图 5 采用方式 A 掺杂时 LED 芯片的自发射光谱

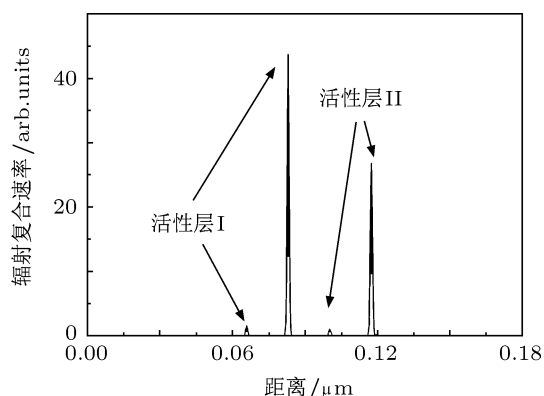


图 6 采用方式 A 掺杂时 LED 芯片的载流子辐射复合速率分布

图 7 所示为采用方式 B 进行掺杂时 LED 芯片的电子和空穴浓度分布. 从图 7 可以看出: 由于 p 型掺杂的增强, 芯片的溢出电子浓度进一步下降, 较图 1 下降了两个数量级. 活性层 II 靠近 n 电极的量子阱空穴浓度增加最大, 较图 1 增加了近一个数量级. 量子阱空穴浓度分布的均衡性较图 1 和图 4 的情况有所增加. 进一步观察发现, 活性层 I 靠近 n 电极的空穴浓度却未明显增大. 这是因为氮化物材料中空穴的有效质量较大, 迁移率较低, 所以 p 型掺杂一般只对邻近的量子阱空穴浓度增大有明显作用, 并不能有效增大距掺杂垒层最远的量子阱中

的空穴浓度. 活性层 II 靠近 n 电极的量子阱电子浓度发生了一定程度的下降, 这是由于较多的 p 型掺杂使得其电子势垒增加较多, 特别是空穴浓度增加最大的量子阱对电子势垒的增加也最大. 最靠近 p 电极的量子阱由于受到电子阻挡层的作用使其电子浓度仍然保持较高的水平.

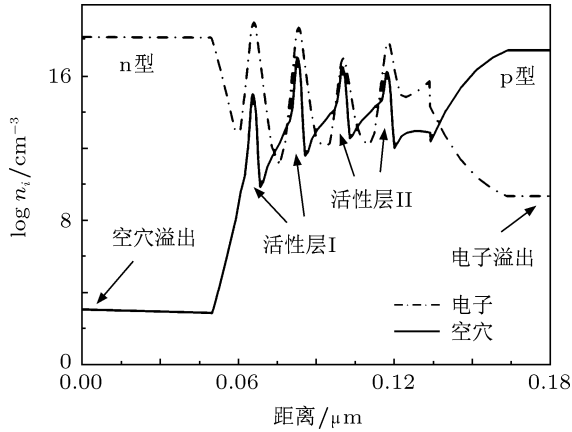


图 7 采用方式 B 掺杂时 LED 芯片的电子和空穴浓度分布

从图 8 可以看出, 发射光谱的发光峰强度均值较图 5 的情况有所增加, 但两发光峰之间的发光强度相差较大, 活性层 I 的发光峰强度约是活性层 II 的四倍. 由此可知, 由于 p 型掺杂两个量子阱垒层, 使得量子阱电子浓度分布出现了一定的不均衡情况, 从而导致发射光谱中双波长发光峰的峰值强度不均衡. 结合图 7 和图 9 可知, 活性层 I 靠近 p 电极的阱层, 其电子浓度和空穴浓度均同时达到较大值, 因而其载流子辐射复合速率大大增强, 而活性层 II 中由于其电子浓度和空穴浓度分布非常不均衡, 导致其辐射复合速率非常低.

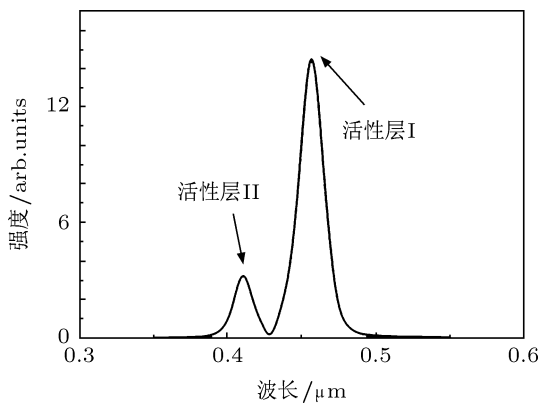


图 8 采用方式 B 掺杂时 LED 芯片的自发射光谱

图 10 所示为采用方式 C 进行掺杂时 LED 芯片的电子和空穴浓度分布. 从图 10 可以看出: 随 p

型掺杂层数的进一步增加, 溢出电子浓度较图 1 下降了三个数量级以上. 各量子阱中的平均空穴浓度均有较大的提升. 而活性层 II 中靠近 n 电极的量子阱电子浓度却有严重的下降, 较图 1 下降了近三个数量级. 由此可知, 过量的 p 型掺杂使得量子阱对电子的势垒大大增加, 从而导致电子浓度下降较多, 影响了量子阱中电子浓度分布的均衡性. 从图 11 可以看出, $\text{In}_{0.11}\text{Ga}_{0.89}\text{N}$ 阱的发光峰基本消失. 图 12 的载流子辐射复合速率显示大量的电子和空穴在 $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ 阱中发生复合, 而 $\text{In}_{0.11}\text{Ga}_{0.89}\text{N}$ 阱中的辐射复合速率小到几乎无法观测.

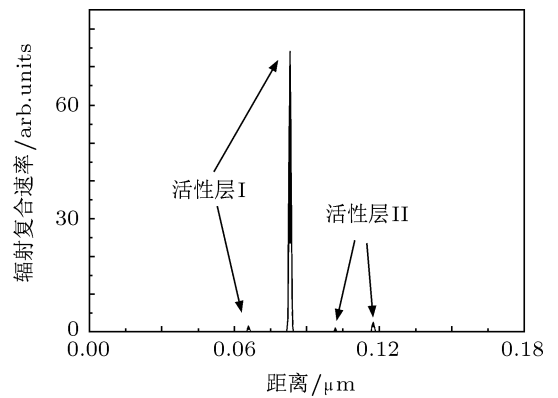


图 9 采用方式 B 掺杂时 LED 芯片的载流子辐射复合速率分布

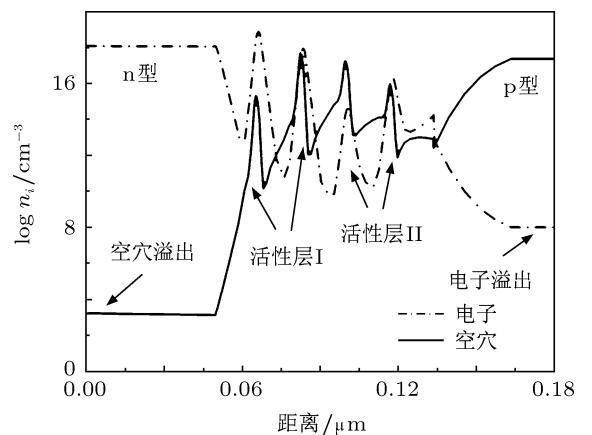


图 10 采用方式 C 掺杂时 LED 芯片的电子和空穴浓度分布

图 13 所示的是采用方式 A、方式 B、方式 C 三种不同垒层掺杂方式与未掺杂情况下 LED 芯片的内量子效率随电流的变化情况. 由图 13 可以发现, 芯片内量子效率随电流的增大均呈一定的下降趋势, 其中未掺杂时内量子效率下降得最为明显. 随着掺杂量子阱垒层数量的增多, 内量子效率下降

逐渐得到改善. 当采用方式 C 掺杂时, 内量子效率随电流增大而迅速下降的趋势得到了有效的控制.

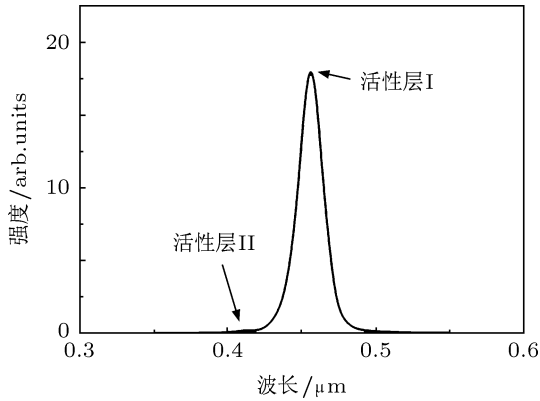


图 11 采用方式 C 掺杂时 LED 芯片的自发发射光谱

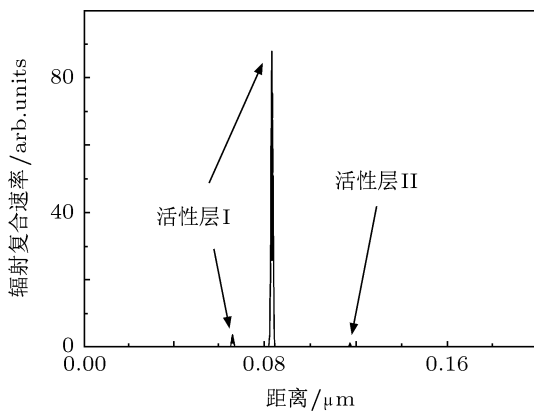


图 12 采用方式 C 掺杂时 LED 芯片的载流子辐射复合速率分布

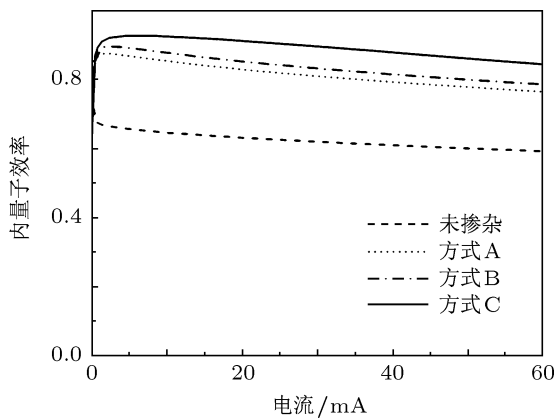


图 13 不同掺杂方式下 LED 芯片内量子效率随电流的变化

3.3 增加活性层 II 的量子阱层数为四层, 选择性 p 型掺杂垒层

选择性 p 型掺杂垒层对载流子浓度分布的均衡性起到一定作用, 但由于量子阱的层数限

制, 很难有效地进行调控. 下面将活性层 II 中的 $\text{In}_{0.11}\text{Ga}_{0.89}\text{N}$ 阱的层数由二层增加到四层, 再对其各垒层进行选择性掺杂. 选择性 p 型掺杂垒层分为以下两种掺杂方式: 方式 D 是对活性层 II 靠近 p 电极的第一个垒层进行 p 型掺杂; 方式 E 是对活性层 II 靠近 p 电极的第一个、第二个和第三个垒层进行 p 型掺杂. 掺杂浓度均设定为 $p = 3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

图 14 所示为采用方式 D 进行掺杂时 LED 芯片的电子和空穴浓度分布. 从图 14 可以看出, 在活性层 II 中量子阱数量增加的情况下对其进行 p 型掺杂, 使得靠近 p 电极的三个量子阱空穴浓度有所增加, 活性层 II 中量子阱空穴浓度整体上大于活性层 I.

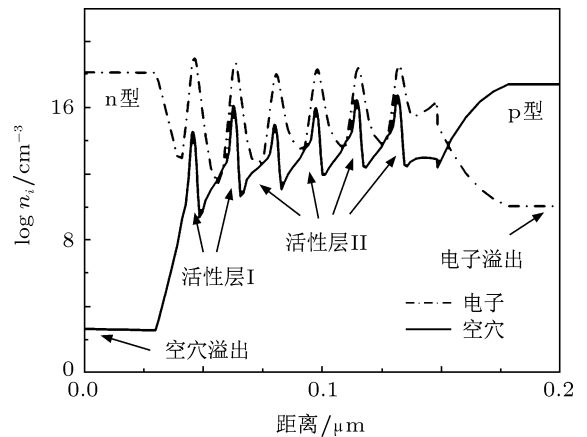


图 14 采用方式 D 掺杂时 LED 芯片的电子和空穴浓度分布

从图 15 可以发现, 活性层 II 的发光峰强度反而远远大于活性层 I. 从图 16 也可以看出, 活性层 II 的平均辐射复合速率远远大于活性层 I. 这是由于活性层 II 的量子阱靠近空穴源, 由于空穴的迁移率较低, 增加其量子阱的数量可以使得大部分空穴限制于其中, 从而使得远离空穴源的活性层 I 中空穴浓度显著下降, 而对活性层 II 的 p 型掺杂加重了这种不平衡.

图 17 所示为采用方式 E 进行掺杂时 LED 芯片的电子和空穴浓度分布. 从图 17 可以看出, 活性层 II 中量子阱的 p 型掺杂垒层增加到三个时, 所有量子阱 (包括活性层 I 中的量子阱) 的空穴浓度均有增加, 其中活性层 II 靠近 p 电极的第二个量子阱和第三个量子阱的空穴浓度增加较多, 而活性层 I 中靠近 p 电极的量子阱的空穴浓度也有一定的增

加. 量子阱的空穴浓度分布整体较为均衡. p 型掺杂垒层数的增多减小了空穴的势垒, 从而大大增强了空穴的流动性. 图 17 中溢出电子浓度较图 14 降低了约一个数量级.

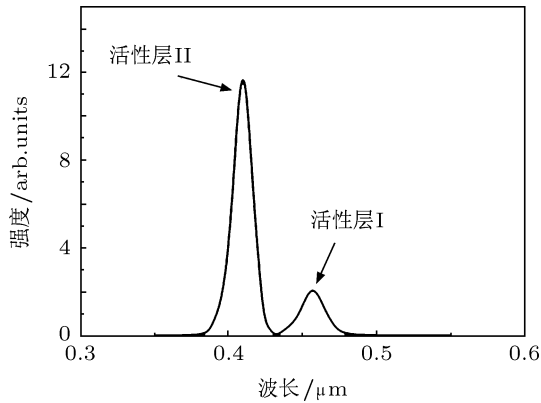


图 15 采用方式 D 掺杂时 LED 芯片的自发发射光谱

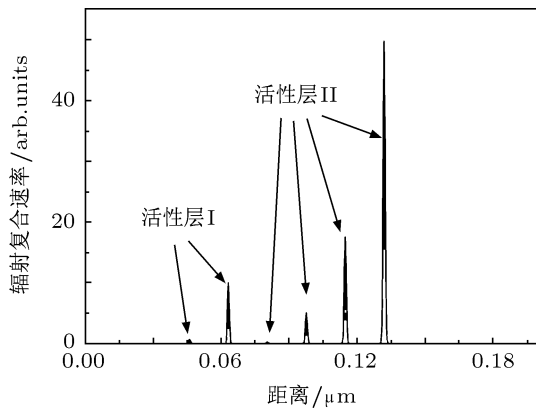


图 16 采用方式 D 掺杂时 LED 芯片的载流子辐射复合速率分布

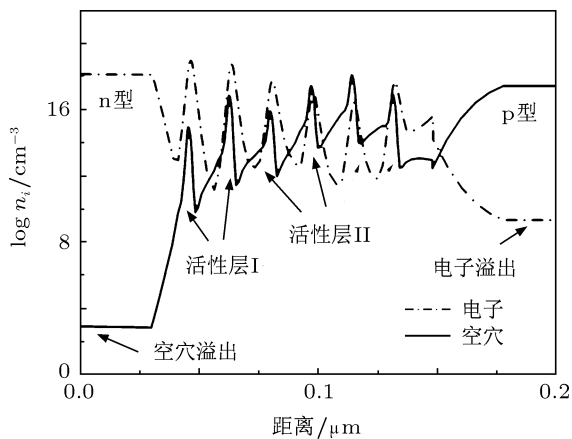


图 17 采用方式 E 掺杂时 LED 芯片的电子和空穴浓度分布

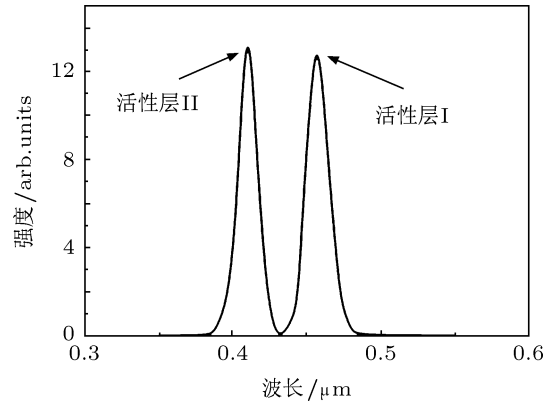


图 18 采用方式 E 掺杂时 LED 芯片的自发发射光谱

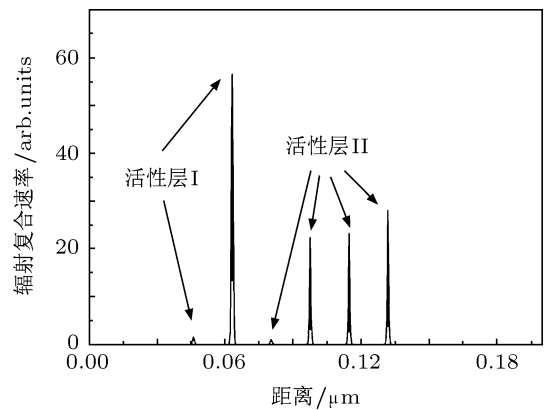


图 19 采用方式 E 掺杂时 LED 芯片的载流子辐射复合速率分布

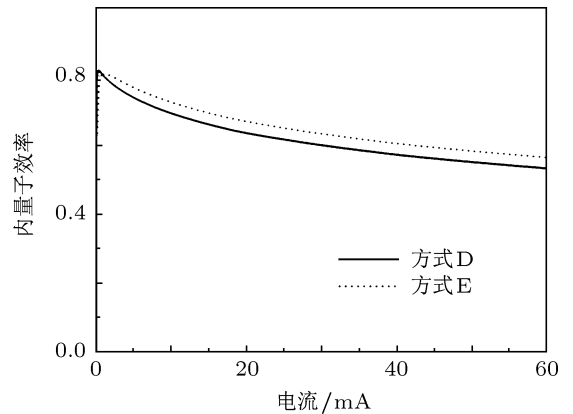


图 20 采用方式 D 和方式 E 进行掺杂时 LED 芯片内量子效率随电流的变化

从图 18 可以看出, 活性层 I 的发光峰强度和活性层 II 的发光峰强度基本相同, 这对双波长 LED 的发光具有重要意义. 从图 19 可以看出, 活性层 II 中有三个量子阱的载流子辐射复合速率较为明显, 而活性层 I 中则只有最靠近 p 电极的一个量子阱参与了有效的复合, 另一个量子阱的辐射复合速率非常小. 从图 20 可以看出, 采用方式 E 掺杂较采用

方式 D 掺杂在一定程度上提高了芯片的内量子效率. 因此, 通过适当增加量子阱数量与选择性 p 型垒层掺杂相结合的方式, 增强了量子阱中电子和空穴浓度分布的均衡性, 可对双波长发光进行更为有效的调控.

4 结论

本文对比分析了双波长 LED 芯片的电子和空穴浓度分布、自发发射光谱、载流子辐射复合速率分布和内量子效率随电流的变化. 研究表明, 对量子阱垒层的特定层数进行 p 型掺杂, 有利于促使

各量子阱的电子和空穴浓度达到均衡分布, 并且使得溢出电子流浓度显著下降, 从而增强了芯片的内量子效率并且改善内量子效率随电流增大而快速下降的现象. 通过增加活性层 II 中量子阱的数量并与选择性 p 型垒层掺杂相结合, 能进一步改善载流子浓度分布的均衡性, 使得双波长发光峰强度达到基本相同. 模拟计算结果及理论分析表明, 选择性 p 型掺杂量子阱垒层对双波长 LED 发光特性的调控起到了一定的积极作用, 合理地选择量子阱垒层的掺杂层数和适当的量子阱数量可以有效地改善发光特性和提高发光效率.

-
- [1] Kim M H, Schubert M F, Qi D, Jong K K, Schubert F, Joachim P 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 183507
- [2] Hun J C, Rak J C, Min H K, Jae W H, Young M P, Yu S K, Ho S P, Cheol S S, Yong J P, Jong K K, Schubert E F 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 241109
- [3] Chen G F, Tan X D, Wan W T, Sheng J, He Q Y, Tang C C, Zhu J J, Liu Z S, Zhao D G, Zhang S M 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 076104 (in Chinese) [陈贵锋, 谭小动, 万尾甜, 沈俊, 郝秋艳, 唐成春, 朱建军, 刘宗顺, 赵德刚, 张书明 2011 物理学报 **60** 076104]
- [4] Wang B, Li Z C, Yao R, Liang M, Yan F W, Wang G H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 016108 (in Chinese) [王兵, 李志聪, 姚然, 梁萌, 闫发旺, 王国宏 2011 物理学报 **60** 016108]
- [5] Kish F A, Steranka F M, Defevere D C, Vanderwater 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, Robbins V M 1994 *Appl. Phys. Lett.* **64** 2839
- [6] Xue Z Q, Huang S R, Zhang B P, Chen Z 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5002 (in Chinese) [薛正群, 黄生荣, 张保平, 陈朝 2010 物理学报 **59** 5002]
- [7] Chen H S, Yeh D M, Lu C F 2006 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18** 1430
- [8] Ozden I, Makarona E, Nurmikko A V, Takeuchi T, Krames M 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 2532
- [9] 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]
- [10] 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]
- [11] Yamada M, Narukawa Y, Mukai T 2002 *Jpn. J. Appl. Phys.* **41** L246
- [12] Damilano B, Grandjean N, Pernot C, Massies J 2001 *Jpn. J. Appl. Phys.* **40** L918
- [13] Simon L Z 1998 *Crosslight* (Burnaby: Crosslight Software Inc.)
- [14] Chuang S L, Chang C S 1997 *Semicond. Sci. Technol.* **12** 252
- [15] Chuang S L, Chang C S 1996 *Phys. Rev. B* **54** 2491
- [16] Goano M, Bellotti E, Ghillino E, Garetto C, Ghione G, Brennan K F 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 6476
- [17] Bernardini F, Fiorentini V, Vanderbilt D 1997 *Phys. Rev. B* **56** 10024
- [18] Fiorentini V, Bernardini F, Ambacher O 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 1204

Investigation of spectral regulation in dual-wavelength light-emitting diodes by using the selective p-doped barriers*

Chen Jun¹⁾²⁾ Fan Guang-Han^{1)†} Zhang Yun-Yan¹⁾

1) (*Institute of Opto-Electronic Materials and Technology, South China Normal University, Guangzhou 510631, China*)

2) (*Experimental Teaching Center, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China*)

(Received 9 June 2011; revised manuscript received 19 December 2011)

Abstract

The electrical and the optical characteristics of dual-wavelength light-emitting diode (LED) with the newly designed selective p-doped barriers are investigated numerically. The simulation results show that the selective p-doped barriers can improve the distribution equilibria of electron and hole concentrations in each quantum well (QW). The radiative recombination rate of QW is enhanced remarkably when specific number of p-doped barriers is adopted, and the electron leakage current is suppressed obviously with this new design. Therefore, the internal quantum efficiency is improved and the trend of efficiency drooping with the increase of current injection is also alleviated. Moreover, the curve peaks of the spectrum become quite uniform when the specific number of vertically-stacked QWs is adopted, and the spectral regulation of the dual-wavelength LED is more effective.

Keywords: InGaN, p-doping, numerical simulation, dual-wavelength light-emitting diode

PACS: 85.60.Jb, 85.50.-n, 87.15.A-, 78.60.Fi

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61176043), the Foundation for Strategic and Emerging Industries of Guangdong Province, China (Grant No. 2010A081002005), and the Program of Combination of Production and Research of Guangdong Province, China (Grant No. 2010B090400192).

† E-mail: gfan@senu.edu.cn