

## 量子阱数量变化对双波长 LED 作用的研究\*

张运炎 范广涵†

(华南师范大学光电子材料与技术研究所, 广州 510631)

(2010年6月18日收到; 2010年10月28日收到修改稿)

采用软件理论分析的方法分析了 InGaN/GaN 量子阱数量变化对双波长发光二极管发光光谱、内量子效率、电子空穴浓度分布、溢出电流等产生的影响. 分析结果表明, 量子阱数量的增加会引起载流子分配不均的现象, 所以量子阱数量的增加并不能有效地提升载流子复合率、内量子效率和发光强度, 还会引起开启电压升高的现象, 影响能量转化效率. 此外, 不同发光波长的量子阱数量的增加会引起发光光谱强度的变化.

**关键词:** 量子阱, 数量, 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, 随着以金属有机气相沉积 (MOCVD) 为主的材料生长技术和发光二极管 (LED) 器件制备技术的不断进步, LED 的研究应用得到了快速发展<sup>[1-4]</sup>. 特别是在发光效率、使用寿命以及成本控制等方面都取得了长足进展. 目前, 白光 LED 的制作主要有两种主流技术, 一是 RGB (红绿蓝) 三色 LED 混色合成白光; 二是蓝色、紫色或紫外 LED 激发荧光粉混色合成白光. 方法一的驱动电路比较复杂, 而且由于红绿蓝 LED 的光学参数随着温度的升高而变化各异, 因此这样合成的白光 LED 的输出功率、峰值波长对温度、时间、注入电流的变化非常敏感, 导致了它的不稳定性, 因而在实际应用中, 容易出现偏色和各角度色差等问题. 方法二虽然结构简单、便于实现, 但由于荧光粉的无辐射复合使得 LED 效率下降, 转化效率低. 同时老化实验表明, 荧光粉的劣化是 LED 寿命缩短的一大原因<sup>[5]</sup>. 因而, 随着生产运用的需要, 科研人员正把目光注意到无荧光粉的单芯片半导体白光 LED 特别是多波长发光二极管芯片的研制上来<sup>[6-13]</sup>. 多波长发光二极管, 也就是在同一个芯片上能够同时发多种波长. 较我们现在所用的色光组合法, 多波长 LED 芯片有

其独特的优点, 吸引着众人的目光. 它能量转化效率高使用寿命长, 还可以减少生产成本, 特别是芯片制造成本和封装成本. 同时它的体积较小, 有利于提高集成度, 驱动电路也相对简单. 调整芯片光谱, 可以让它发出的各种波长的光直接组合成白光. 因而多波长 LED 芯片是制作白光 LED 的一种最佳选择. 本文对双波长 LED 的发光机理进行软件模拟研究, 并深入讨论了 InGaN/GaN 量子阱数量变化对双波长 LED 发光光谱、内量子效率、电子空穴浓度分布等产生的影响, 对白光 LED 的制作具有指导作用.

## 2. 理论模型和器件结构

## 2.1. 器件模拟的基本方程

Crosslight 公司的半导体器件模拟专用软件 APSYS (Advanced Physical Models of Semiconductor Devices)<sup>[14]</sup> 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

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

\* 2009 年省部产学研结合引导项目 (批准号: 2009B090300338), 粤港关键领域重点突破项目 (批准号: 2007A010501008), 教育部博士点基金 (批准号: 350163) 和 2010 年省部产学研结合引导项目 (批准号: 2010B090400192) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: gfan@scnu.edu.cn

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

为基础,结合边界条件自洽解泊松方程

$$\begin{aligned} & -\nabla \cdot (\epsilon_0 \epsilon_{dc} \nabla V/q) \\ &= -n + p + N_D(1 - f_D) - N_A f_A \\ &+ \sum_j N_{ij}(\delta_j - f_{ij}) \end{aligned} \quad (3)$$

得到 LED 器件电学与光学特性.

(1)和(2)式中

$$J_n = n\mu_n \nabla E_{in}, \quad (4)$$

$$J_p = p\mu_p \nabla E_{ip}, \quad (5)$$

分别是电子流与空穴流密度,其中  $\mu$  为迁移率,  $E_i$  为准费米能级.

器件中的非辐射复合过程采用 Shockley-Read-Hall (SRH) 深能级陷阱复合和俄歇复合.

SRH 复合速率表示为

$$R_{nj}^j = c_{nj}nN_{ij}(1 - f_{ij}) - c_{nj}n_{ij}N_{ij}f_{ij}, \quad (6)$$

$$R_{pj}^j = -c_{pj}nN_{ij}f_{ij} - c_{pj}p_{ij}N_{ij}(1 - f_{ij}), \quad (7)$$

$c_{nj}, c_{pj}$  为载流子俘获系数,  $n_{ij}(p_{ij})$  为电子或空穴准费米能级与  $J$  陷阱中能级  $E_{ij}$  合并时的载流子浓度.  $N_{ij}$  为第  $j$  个 SHR 深能级陷阱的密度;  $f_{ij}$  为电子占据第  $j$  个深能级陷阱的概率,  $\delta$  为 1 代表施主, 为 0 代表受主.

俄歇复合速率表示为

$$R_{au} = (C_n n + C_p p)(np - n_i^2), \quad (8)$$

$C_n, C_p$  为材料的俄歇系数是常数且取决于材料本身,  $n_i$  指本征载流子密度.

$R_{sp}$  代表自发辐射复合速率;  $R_{st}$  代表受激辐射复合速率;  $G_{opt}(t)$  代表光产生率;  $n, p$  为电子与空穴浓度;  $N_A, N_D$  为浅层施主, 受主掺杂密度;  $f_D, f_A$  分别为电子占据施主和空穴占据受主杂质的概率. (3) 式中  $\nabla V$  为电场,  $\epsilon_{dc}$  为相对介电常数.

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,在能带结构上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<sup>[15]</sup>和有效质量近似模型<sup>[16]</sup>. InGaN 与 AlGaIn 的能带间隙可用下列方程式表示:

$$\begin{aligned} E_g(A_{1-x}B_x) &= (1-x)E_g(A) + xE_g(B) \\ &- x(1-x)C, \end{aligned} \quad (9)$$

$A$  表示 GaN 二元合金,  $B$  表示 InN 或 AlN 二元合金,  $C$  为弯曲系数.

在氮化物元件各层交接面中,考虑了内建极化

效应机理<sup>[17-19]</sup>. 在模拟中,三元氮化物材料极化效应公式如下.

自发极化为

$$\begin{aligned} P_{sp}(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) &= -0.0413x - 0.0339(1-x) \\ &+ 0.0378x(1-x), \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} P_{sp}(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) &= -0.0898x - 0.0339(1-x) \\ &+ 0.0191x(1-x), \end{aligned} \quad (11)$$

其单位为  $\text{C}/\text{m}^2$ .

压电极化为

$$\begin{aligned} P_{pz}(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) &= xP_{pz}(\text{InN}) \\ &+ (1-x)P_{pz}(\text{GaN}), \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} P_{pz}(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) &= xP_{pz}(\text{AlN}) \\ &+ (1-x)P_{pz}(\text{GaN}), \end{aligned} \quad (13)$$

其中

$$P_{pz}(\text{InN}) = -1.373\epsilon + 9.541\epsilon^2, \quad (14)$$

$$P_{pz}(\text{GaN}) = -0.918\epsilon + 9.541\epsilon^2, \quad (15)$$

$$P_{pz}(\text{AlN}) = -1.808\epsilon + 5.642\epsilon^2, \epsilon < 0, \quad (16)$$

$$P_{pz}(\text{AlN}) = -1.808\epsilon - 7.888\epsilon^2, \epsilon > 0, \quad (17)$$

$\epsilon$  为薄膜结构与基板间的应变,计算如下:

$$\epsilon = (a_{\text{sub}} - a)/a, \quad (18)$$

$a_{\text{sub}}$  为基板晶格常数,  $a$  为氮化物薄膜晶格常数.

APSYS 模拟程序按照有限元方法在空间离散泊松方程、电流连续性方程、载流子输运方程和量子机理的波方程等方程,形成非线性方程组,然后用求解非线性方程组的方法,如牛顿法进行迭代求解,从而得到 LED 器件电学与光学特性. 软件还考虑了氮化物元件各层交接面的内建极化效应. 同时兼顾了载流子的自发辐射复合和缺陷所造成的 SRH 非辐射复合速率问题. 此软件具有数值稳定和计算速度高的特点.

## 2.2 器件结构

表 1 器件结构表

p-GaN, 0.15 $\mu\text{m}$ , $7 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$
p-Al <sub>0.07</sub> Ga <sub>0.93</sub> N, 0.03 $\mu\text{m}$ , $3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$
活性层(2) In <sub>0.11</sub> Ga <sub>0.89</sub> N/ GaN
活性层(1) In <sub>0.18</sub> Ga <sub>0.82</sub> N/ GaN
n-GaN, 3 $\mu\text{m}$ , $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$

本文研究了 InGaN 量子阱结构的发光二极管,其中器件面积为  $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ ,器件结构如表 1 格所示,从下到上依次为  $3 \mu\text{m}$  GaN (n 型掺杂浓度为  $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ); 活性层(1); 活性层(2);  $0.03 \mu\text{m}$

的  $p\text{-Al}_{0.07}\text{Ga}_{0.93}\text{N}$  ( $p$  型掺杂浓度为  $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) 电子阻挡层;  $0.15 \mu\text{m GaN}$  ( $p$  型掺杂浓度为  $7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ). 每个活性层包括数个量子阱层及它们的垒层, 活性层(1)以  $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$  为阱层材料、活性层(2)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  $\text{GaN}$ , 为  $n$  型掺杂, 掺杂浓度为  $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  厚度均为  $15 \text{ nm}$ . 具体结构如表 1 中所示.

在本文中, 器件设计工作温度为  $300\text{K}$ , 针对量子阱的数量进行了数种设计, 讨论了量子阱数量的变化对 LED 产生的影响.

### 3. 结果与讨论

虽然载流子浓度, 发光强度以及复合率等会随电流大小而变化, 但是根据计算, 量子阱数量变化对 LED 产生的一系列作用, 在其他大小的电流下与在  $20 \text{ mA}$  电流下大体趋势相同. 另外, 限于篇幅原因不可能附上过多不同驱动电流下的图表. 所以我们选取了  $20 \text{ mA}$  作为代表, 并结合大电流下 LED 发光特性进行补充说明论证. 如果没有特别说明, 芯片的电子空穴浓度分布图、载流子复合率位置分布图和自发发射谱图均是在  $20 \text{ mA}$  驱动电流下得到的结果.

模拟过程中先讨论了芯片活性层(1)与活性层(2)均含两个量子阱时的特性, 进而分别改变活性层(1)与活性层(2)的量子阱数量进行分析说明.

#### 3.1. 活性层(1)与活性层(2)均含两个量子阱

从图 1 可以看出, 活性层(1)的平均空穴浓度大于活性层(2)的平均空穴浓度. 这是因为高  $\text{In}$  组分材料禁带宽度小, 由其构成的量子阱, 有较深的阱深, 对于空穴来说能量比较低, 所以相对低  $\text{In}$  组分阱有较强的空穴容纳能力和限制作用. 活性层(1)  $\text{In}$  含量为  $0.18$  高于活性层(2)的  $0.11$ , 所以活性层(1)中的平均空穴浓度较活性层(2)的平均空穴浓度大. 在芯片的设计中把含  $\text{In}$  量低的活性层(2)安排得靠近  $p$  电极, 就是为了让其靠近空穴源, 处于积累空穴的有利位置, 防止出现阱中空穴浓度过低而发光强度偏弱的现象.

从图 2 中可以看出, 活性层(2)虽然处于束缚空穴的有利位置上, 但还是因其载流子浓度低而发光峰强度低于活性层(1). 从图 3 中便可以得到证

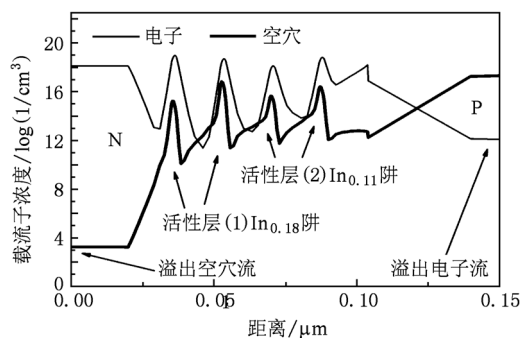


图 1 芯片电子空穴浓度分布图(20 mA)

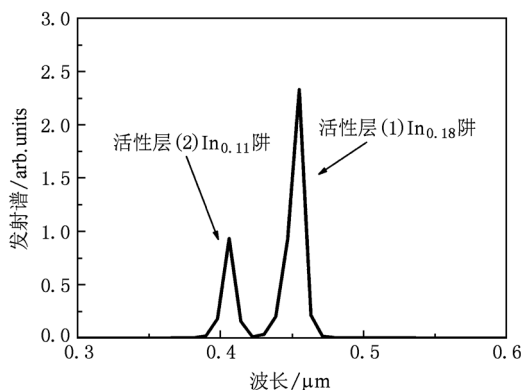


图 2 芯片自发发射谱图(20 mA)

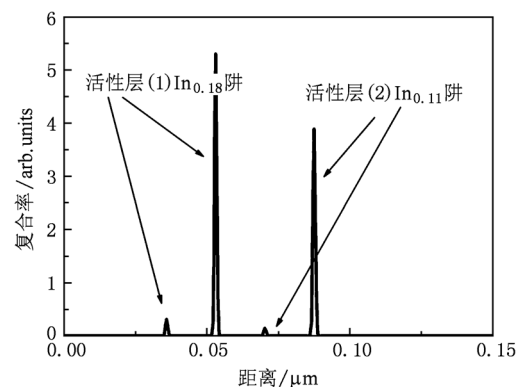


图 3 芯片载流子复合率位置分布图(20 mA)

明. 在图 3 显示了四个阱的载流子复合率, 其中活性层(1)的平均复合率要高于活性层(2). 由图 1, 活性层(1)与活性层(2)各自的靠近  $p$  电极的量子阱的空穴浓度要大于各自远离  $p$  电极的那个阱的空穴浓度. 对比图 3, 靠近  $p$  电极空穴浓度大的两个量子阱, 其阱中的载流子复合率要远远大于远离  $p$  极的那两个空穴浓度小的量子阱. 所以载流子特别空穴载流子浓度的分布会影响载流子复合率, 从而影响

发光光谱的强度. 至于相同 In 组分的阱, 其阱中的载流子分布不均的现象, 在接下来的讨论中会涉及.

图 4 是芯片内量子效率随电流变化图, 从图中可以看出随着电流的增大, 内量子效率下降明显. 从图 1 的载流子分布图可以看出, 溢出电子流是内量子效率不高且随电流增大而下降的一个主要原因. 电子相对于空穴在氮化物材料中有较小的有效质量, 因而有较高的迁移率, 所以容易溢出活性层形成溢出电子流. 大量电子溢出, 用于有效复合发光的载流子减少, 从而导至内量子效率下降.

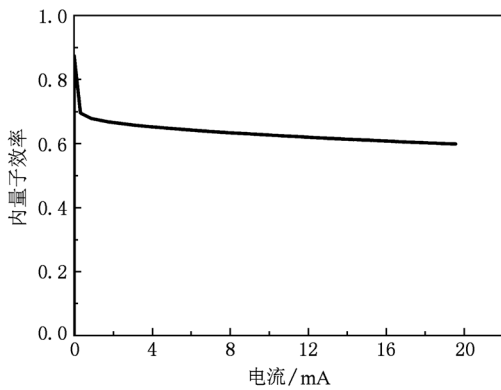


图 4 芯片内量子效率随电流变化图

### 3.2. 增加活性层(1)的量子阱数量

为了探究量子阱数量变化所引起的影响, 使活性层(1)为 14 个量子阱, 活性层(2)为二个量子阱.

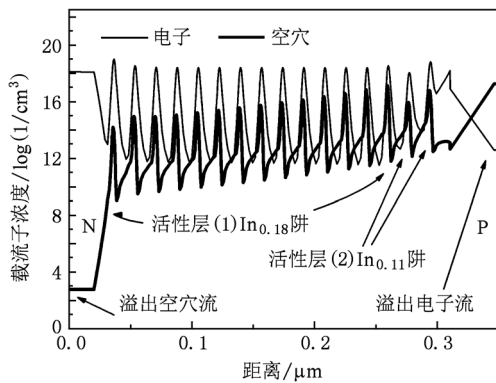


图 5 芯片电子空穴浓度分布图(20 mA)

从图 5 中可以看出, 16 个量子阱中的电子浓度分配相对均匀, 但是活性层(1)的 14 个量子阱出现空穴浓度分配不均的现象. n 型掺杂垒层的活性层对电子来说势垒较低, 且电子的迁移率比较高, 所以在各阱中均能保持相对均匀且较高的浓度. 但也

正是如此, 才使得溢出电子流纵使有 AlGaIn 阻挡层的阻挡也比溢出空穴流大了几个数量级. 从图 5 中可以看出, 溢出空穴流为  $10^3 \text{ cm}^{-3}$ , 溢出电子流为  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$ , 溢出电子流比溢出空穴流大了九个数量级. 对比图 1, 虽然活性层(1)的量子阱数量增加到 14 个, 但溢出电子流并没有减小. 空穴的迁移率较电子低, 同时因为 n 型掺杂的量子阱垒层, 对于空穴来说势垒较高, 所以随着量子阱数量的增加, 特别是量子阱垒层的增加, 对空穴的流动的阻挡作用也增大. 因此, 对于相同 In 组分的阱越是远离 p 电极, 其阱中的空穴浓度越小. 因而随着量子阱数的增多, 空穴的分配不均的现象变得更加严重.

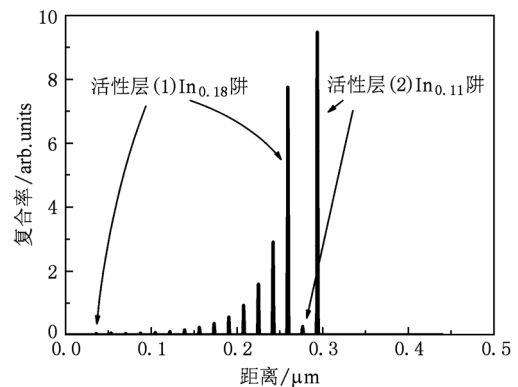


图 6 芯片载流子复合率位置分布图(20 mA)

图 6 对比图 3 可以看出, 在两种活性层各自的量子阱中, 最靠近 p 型层的量子阱的载流子复合率总是最大并且随着活性层(1)中量子阱数量的增加而增大. 仔细观察图 5, 发现这两个阱的空穴浓度均有所增大. n 型掺杂量子阱垒层的增加对空穴流动的阻挡作用是造成空穴浓度增大的原因之一. 观察图 6 中活性层(1)的复合率, 可以看出除了最靠近 p 电极的两个量子阱外, 其他量子阱的复合率都非常小, 最靠近 n 电极的那些量子阱的复合率已经小得难以观察. 可见活性层(1)虽然含有 14 个量子阱, 但大多数的阱都没有起到有效发光的作用.

从图 7 中可以看出, 对比图 2, 芯片发光光谱强度有所增加, 但是增加得非常小. 从图 8 对比图 4 可以看出, 活性层(1)的量子阱数量增加至 14 个并没有明显改善内量子效率.

为了讨论电流变化对 LED 芯片发光特性的影响, 对比分析 20 mA 和 60 mA 驱动电流下 LED 芯片载流子复合率位置分布. 对比图 6 与图 9, 可以看出, 当驱动电流增大到 60 mA 时, 两种活性层的载

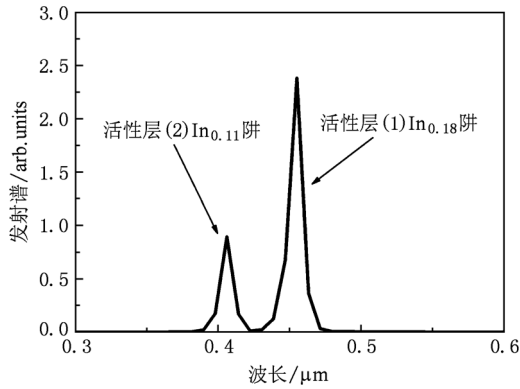


图7 芯片自发射谱图(20 mA)

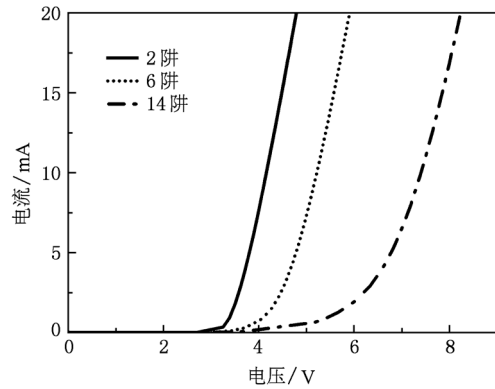


图10 芯片电流-电压(I-V)特性图

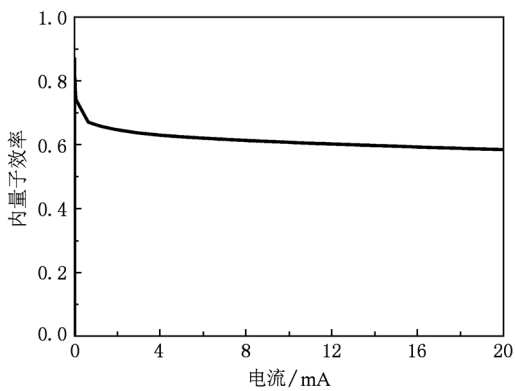


图8 芯片内量子效率随电流变化图

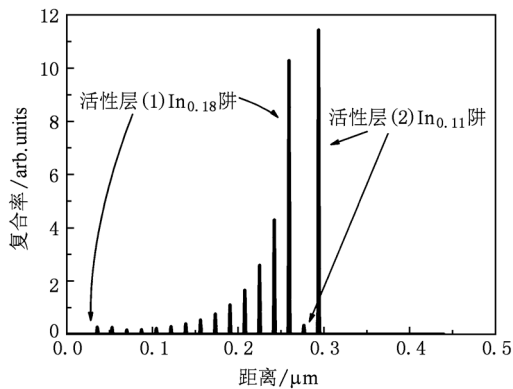


图9 芯片载流子复合率位置分布图(60 mA 驱动电流)

流子复合率均有所上升,特别是各个活性层最靠近 p 电极的量子阱.但在活性层(1)中最靠近 n 电极的那些量子阱,其阱中的复合率仍然非常低,不能起到有效复合发光的作用.

从图 10 中可以看出,随着活性层(1)的量子阱数量的增加,开启电压不断升高.这是由于量子阱数

量的增加,导致芯片内串联电阻增大,从而引起开启电压的升高.开启电压的升高降低了能量转化效率,也使得芯片发热量增大,对散热提出了更高的要求.这种情况在 3.3 中也有出现,限于篇幅原因在 3.3 中不再赘述.

从以上分析可以看出,活性层(1)的量子阱数量增加引起了载流子分配不均的现象,使得活性层(1)靠近 n 电极的那些量子阱因空穴浓度过小而复合率偏低,阱中载流子不能起到有效复合发光的作用.所以对发光光谱与内量子效率并没有明显的改善.同时引起开启电压升高降低了能量转化效率,也加大了散热的难度,所以增大活性层(1)的量子阱数量,弊大于利.

### 3.3. 改变活性层(2)的量子阱数量

为了进一步论述量子阱变化对 LED 发光特性的影响,本小节增加活性层(2)的量子阱数量,使活性层(2)含 11 个量子阱,活性层(1)含 2 个量子阱.

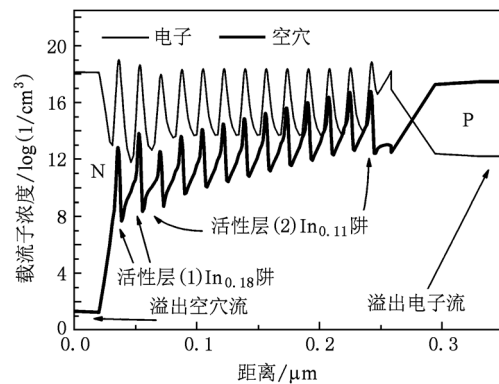


图11 芯片电子空穴浓度分布图(20 mA)

从图 11 可以看出,随着活性层(2)量子阱数量

的增加,其阱中载流子也如 3.2 中的情形,出现严重的空穴浓度分配不均的现象. 而且活性层(1)中的空穴浓度也受到极大的影响,对比图 1,下降了 3 个数量级.

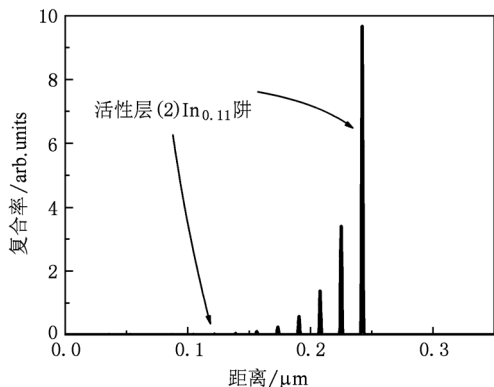


图 12 芯片载流子复合率位置分布图

受空穴浓度分配不均的影响,芯片各量子阱中的载流子复合率也相差比较大,除了最靠近 p 电极的三个量子阱的载流子复合率较高外,其他量子阱的复合率均很小. 活性层(1)的量子阱,其复合率更是小得难以在图 12 中观察到.

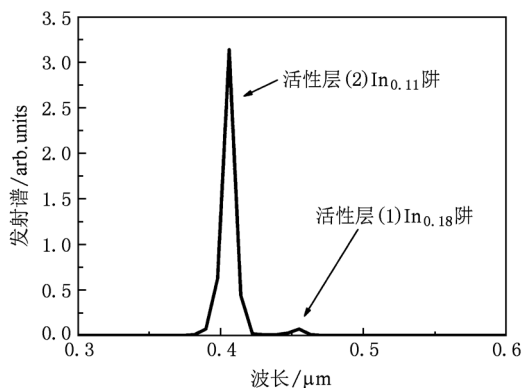


图 13 芯片自发发射谱图

从图 13 可以看出,由于活性层(2)的量子阱数量的增加,导致空穴浓度分配不均,使得载流子的复合发光集中在活性层(2)的最靠近 p 电极的那几个量子阱中,从而活性层(2)所发的 0.41 μm 的发光峰强度相比 3.1 中的发光峰大大增强. 而活性层(1)仅发出非常微弱的光.

从图 14 对比图 4 与图 8,可以看出,虽然活性层(2)量子阱数增加到 11 个,但是内量子效率并没有得到改善.

从本节分析可以看出,活性层(2)量子阱数量

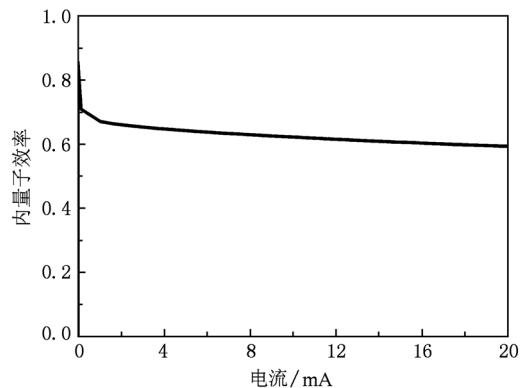


图 14 芯片内量子效率随电流变化图

的增加,不仅不能提升内量子效率,反而引起空穴浓度分配不均,导致两种阱发光强度相差太大,使得双波长设计变得毫无意义.

### 3.4. 渐变活性层(1)与(2)中量子阱数量

为了论证以上结论,同时研究活性层中量子阱数量渐变对双波长 LED 器件影响,本文设计了 16 种量子阱数量组合并将其自发辐射谱图绘于图 15 中. 图中标示的比例关系前一个数字为活性层(2)的量子阱数量,后一个数字为活性层(1)中的量子阱数量,比如 1:2 表示活性层(2)中含 1 个量子阱,活性层(1)中含 2 个量子阱. 箭头旁边的数字 I 表示该发光峰为活性层(1)所产生,II 表示该发光峰为活性层(2)所产生. 为了便于观察,图中不同组合的发射谱的横坐标有一定的偏移.

从各单幅小图可以看出,活性层(1)量子阱数量的增加,使得其相应的发光强度增大. 但是随着量子阱数量的增加,发光峰高度增幅越来越小. 活性层(1)中量子阱数量由 1 增至 2 时,其发光峰增高明显. 但是活性层(1)中量子阱数量由 3 增至 4 时,其发光峰增高就变得难以察觉. 这是由于随着活性层(1)中量子阱的增加,其活性层中远离 p 电极的量子阱中的空穴浓度变得越来越低,其阱中载流子复合发光机率越来越小,所以对发光峰增高的贡献就越小. 同时可以看出,活性层(1)中的量子阱数量的增加,对活性层活性层(2)的发光强度影响较小. 因为活性层(1)的量子阱数量的增加对活性层(2)中的载流子浓度产生的影响较小,不会明显改变其活性层辐射复合率.

观察图 15(a),(b),(c),(d)四图,对比活性层(1)中有相同量子阱数的组合,可以发现活性层(2)

量子阱数量的变化,会对发射谱产生很大的影响.这是因为活性层(2)中的量子阱数量变化会对两种活性层中的空穴分配比例产生巨大影响.

从上分析可以看出,在进行双波长 LED 设计时,必须合理考虑两种活性层的量子阱数量组合,从而获得理想的光谱分布.

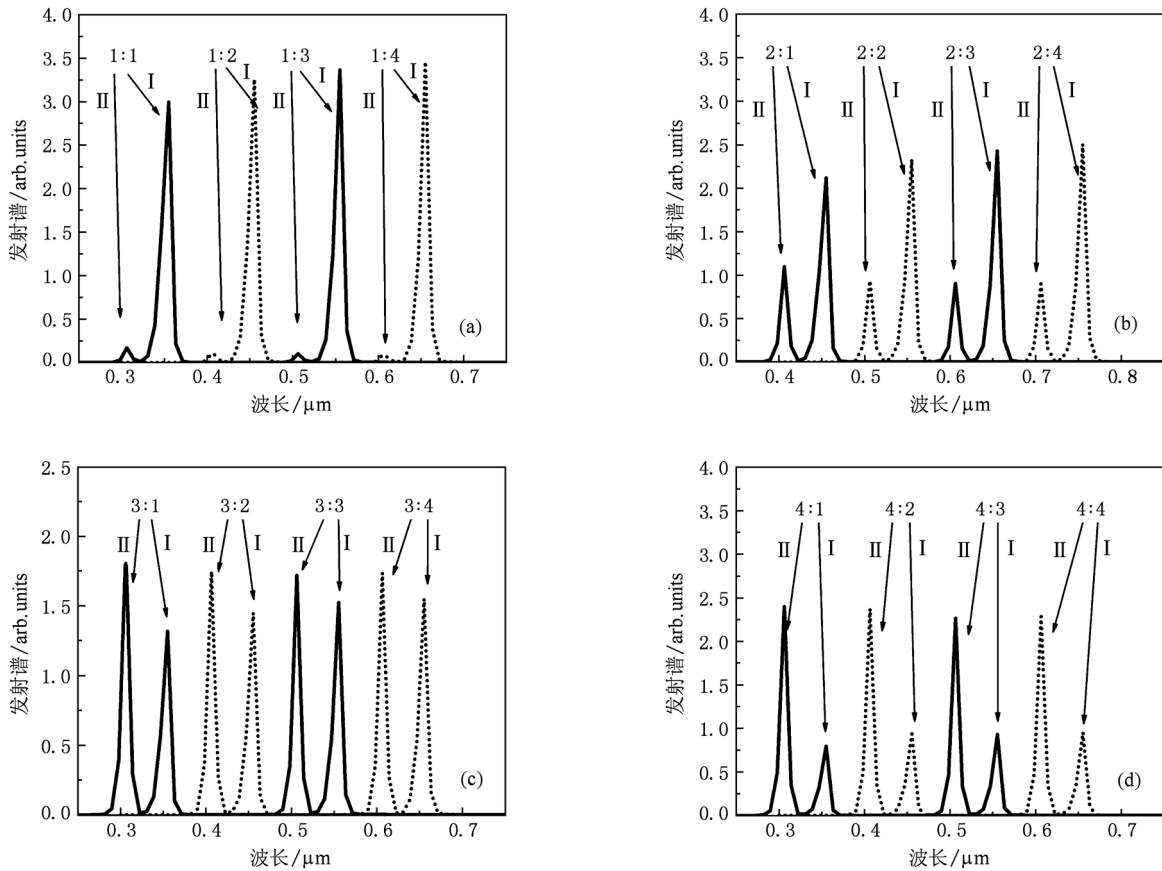


图 15 渐变活性层(1)与(2)中量子阱数量时芯片自发发射谱图 (a)活性层二为 1 个阱且渐变活性层一量子阱数;(b)活性层二为 2 个阱且渐变活性层一量子阱数;(c)活性层二为 3 个阱且渐变活性层一量子阱数;(d)活性层二为 4 个阱且渐变活性层一量子阱数

#### 4. 结 论

通过对比分析不同数量量子阱的 LED 芯片的电子空穴浓度分布图、自发发射谱图、载流子复合率位置分布图和内量子效率随电流变化图,可以看出,在 LED 芯片中增加量子阱数量,因为会引起空穴浓度分配不均,从而使得许多阱并没有起到促使载流子有效复合发光的作用,所以并不能起到提高

内量子效率,增大发光光强的目的.反而会引引起开启电压升高,降低能量转化效率,使发热量增加.特别是活性层(2)的量子阱数增加,会严重影响活性层(1)中的空穴浓度,从而强烈地影响发光光谱光强分布.此外,增加量子阱数量,在外延生长时不仅浪费源材料,还会增加量子阱生长难度,难以制备高质量的量子阱.所以在双波长 LED 芯片设计时一定要慎重考虑量子阱数量所带来的影响.这对白光 LED 的制作具有重要的指导意义.

[1] Sheu J K, Chang S J, Kuo C H, Su Y K, Wu L W, Lin Y C, Lai W C, Tsai J M, Chi G C, Wu R K 2003 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15** 18

[2] Chen C H, Chang S J, Su Y K, Sheu J K, Chen J F, Kuo C H, Lin Y C 2002 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **14** 2532

[3] Li Y, Zheng R S, Feng Y C, Liu S H, Niu H B 2006 *Chin.*

- Phys.* **15** 702
- [4] Shao J P, Hu H, Guo W P, Wang L, Luo Y, Sun C Z, Hao Z B 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3905 (in Chinese) [ 邵嘉平、胡卉、郭文平、汪 莱、罗 毅、孙长征、郝智彪 2005 物理学报 **54** 3905 ]
- [5] Zheng D S, Qian K Y, Luo Y 2005 *Semiconductor Optoelectronics* **26** 87
- [6] Shen G D, Zhang N G, Liu J P, Niu N H, Li T, Xing Y H, Lin Q M, Guo X 2007 *Semiconductor Optoelectronics* **28** 349
- [7] Yamada M, Narukawa Y, Mukai T 2002 *J. Appl. Phys.* **41** 246
- [8] Qi Y D, Liang H, Tang W, Lu Z D, Kei May Lau 2004 *Journal of Crystal Growth* **272** 333
- [9] Damilano B, Grandjean N, Pernot C, Massies J 2001 *J. Appl. Phys.* **40** 918
- [10] Li Y L, Gessmann T H 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 2167
- [11] Yamada M, Narukawa Y, Mukai T 2002 *J. Appl. Phys.* **41** 246
- [12] Chen H S, Yeh D M, Lu C F 2006 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18** 1430
- [13] Ozden I, Makarona E, Nurmikko A V, Takeuchi T, Krames M 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 2532
- [14] Crosslight Software Inc <http://www.crosslight.com> [ february 2, 2010 ]
- [15] Chuang S L, Chang C S 1997 *Semicond. Sci. and Technol.* **12** 252
- [16] Chuang S L, Chang C S 1996 *Phys. Rev. B* **54** 2491
- [17] Goano M, Bellotti E, Ghillino E, Garetto C, Ghione G, Brennan K F 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 6476
- [18] Bernardini F, Fiorentini V, Vanderbilt D 1997 *Phys. Rev. B* **56** 10024
- [19] Fiorentini V, Bernardini F, Ambacher O 2002 *App. Phys. Lett.* **80** 1204

## Theoretical study of the effect of changes in the number of quantum wells of dual-wavelength LED\*

Zhang Yun-Yan Fan Guan-Han<sup>†</sup>

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

(Received 18 June 2010; revised manuscript received 28 October 2010)

### Abstract

A two-dimensional simulation of electrical and optical characteristics of the dual-wavelength LED with different numbers of quantum wells is conducted with APSYS software. The results show that the increase of the number of quantum wells will cause uneven distribution of hole concentrations. Therefore, the increase in the number of quantum wells cannot effectively enhance carrier recombination rate, internal quantum efficiency and luminous intensity. Furthermore, it will lead to the rising of threshold voltage and affect the energy conversion efficiency.

**Keywords:** quantum well, number, numerical simulate, dual-wavelength LED

**PACS:** 85. 60. Jb, 85. 50. -n, 87. 15. A- , 78. 60. Fi

\* Project supported by the Project of Combination of Production and Research Guided by Ministry in 2009 (Grant No. 2009B090300338), the Crucial Field and Key Breakthrough Project of Guangdong Province and Hongkong, China (Grant No. 2007A010501008), the Doctorate Foundation of the State Education Ministry of China (Grant No. 350163), and the Project of Combination of Production and Research Guided by Ministry in 2010 (Grant No. 2010B090400192).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: gfan@sclu.edu.cn