

量子阱垒层掺杂变化对双波长 LED 调控作用研究*

刘小平 范广涵[†] 张运炎 郑树文 龚长春 王永力 张涛

(华南师范大学光电子材料与技术研究所, 广州 510631)

(2011年9月5日收到; 2011年11月29日收到修改稿)

采用 APSYS 软件研究了 InGaN/GaN 量子阱垒层掺杂变化对双波长发光二极管发光光谱的调控问题. 在不同掺杂类型和浓度下对器件电子空穴浓度分布、载流子复合速率、能带结构、发光光谱进行分析, 结果表明, 调节量子阱垒层 n 型和 p 型的掺杂浓度可以精确而有效地根据需要调控发光光谱, 解决发光光谱调控难的问题. 这些现象归因于掺杂的量子阱垒层对电子空穴分布的调控作用.

关键词: 量子阱垒层, 掺杂浓度, 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

随着材料生长技术和器件制备技术取得突破性进展, GaN 基发光二极管 (LED) 的研究应用得到了快速发展^[1-4]. LED 产品在照明、显示、路灯等领域发挥越来越大的作用, 功率型 GaN 基白光 LED 的发展受到极大的关注. 目前白光 LED 的制备方法主要有: 红、绿、蓝三色 LED 混色合成白光; 蓝色、紫色或紫外 LED 激发相应的荧光粉组合成白光. GaN 基蓝光 LED 激发荧光粉的白光 LED 已经商业化, 而部分研究组对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也进行了研制. Damilano 等^[5,6] 通过调整同一有源区内不同量子阱的宽度, 实现芯片双波长同时发射, 获得单芯片白光 LED; Ozden 等^[7] 把 GaN 隧道结引入器件, 获得三电极时分复用双波长 LED; Chen 等^[2] 也实现了单一衬底上蓝光和绿光的同时发射而获得近白光, 该白光器件结构类似于 p-n-p-n 结构的闸流管, 芯片尺寸为 $2.1 \times 2.1 \text{ mm}^2$, 在注入电流为 120 mA 情况下, 输出光功率为 4.2 mW; Qi 等^[8] 通过调节单有源区多量子阱不同阱中的 In 组分, 制备了单有源区双波长 LED; 顾等^[9] 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; 张等^[10,11] 对 GaN 基 LED 采用掺杂 GaN 间隔层和调节有源区中量子阱数量对双波长 LED 进行了理论分析, 对双波长 LED 的发光机理和光谱调控方法进行了解释. 虽然以上各研究小组对单芯片白光 LED 或双波长 LED 进行了不同的研究, 但对其的研究还要进行更深入和更广泛的研究, 为单芯片白光 LED 和双波长 LED 的设计提供依据.

双波长 LED 的一个重要应用就是制备大功率白光 LED^[12], 采用其制备的白光 LED 能量转化效率高、使用寿命长、生产成本低, 特别是芯片制造成本和封装成本; 体积较小, 有利于提高集成度, 驱动电路相对简单. 双波长 LED 通过调整芯片光谱让它发出不同波长的光组合成白光, 也可加荧光粉再制备白光 LED. 本文设计的双波长 LED 发光峰波长为近紫外光 400 nm 与蓝光 460 nm, 可通过激发荧光粉制备白光 LED, 而近紫外光激发荧光粉有更高的转化效率, 制备白光 LED 在低色温下能获得高的显色指数. 通常双波长 LED 光谱的调控是通过改变量子阱数量来实现, 但是量子阱数量的改变很难根据需要精确地调控双波长 LED 发光光谱中两种波长光的相对强度, 而且随着量子阱数量的增加芯片内串联电阻也会增加, 从而增大开启电压, 降低能量转化效率增加发热量. 本文对双波长 LED

* 2009 年广东省教育部产学研结合项目 (批准号: 2009B090300338, 2010B090400192)、教育部博士学科点专项科研基金 (批准号: 20060574007)、广州市花都区科技项目 (批准号: HD10CXY-G002, HD10CXY-G013) 和 2011 年广东省战略性新兴产业专项资金 LED 产业项目 (批准号: 2010A081002005) 资助的课题.

[†] E-mail: gfan@scnu.edu.cn

的发光机理进行软件模拟研究,并深入讨论了 InGaN/GaN 量子阱垒层掺杂变化对双波长 LED 电子空穴浓度分布、载流子复合速率、能带结构、发光光谱等产生的影响,对双波长 LED 的设计提供理论依据.

2 器件结构与理论

2.1 器件结构

图 1 中示出了本文研究的 InGaN 发光二极管的结构,从下到上依次为蓝宝石衬底;未掺杂 GaN; $3\ \mu\text{m}$ 厚 n-GaN(n 型掺杂浓度为 $5.0 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$); 有源区 I; 有源区 II; $0.02\ \mu\text{m}$ 厚 p-Al_{0.15}Ga_{0.85}N (p 型掺杂浓度为 $7 \times 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$) 电子阻挡层; $0.20\ \mu\text{m}$ 厚 p-GaN(p 型掺杂浓度为 $1.0 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$). 每个有源区由两个量子阱层和三个垒层组成,有源区的阱层材料为 In_{0.2}Ga_{0.8}N, In_{0.1}Ga_{0.9}N, 厚度均为 $2.2\ \text{nm}$; 两个有源区的垒层均为 GaN, 厚度均为 $15\ \text{nm}$. LED 器件大小为 $300\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$.

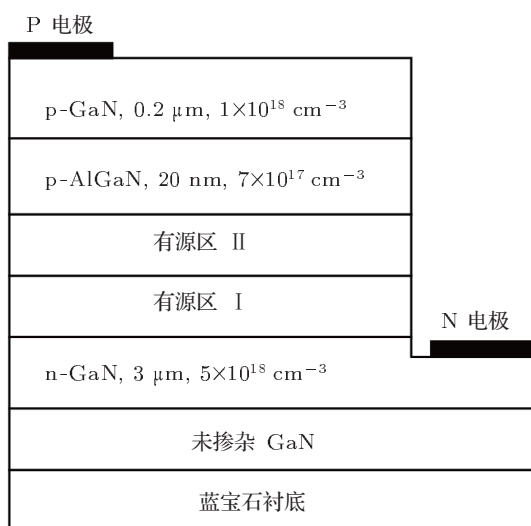


图 1 器件结构图

2.2 器件模拟的基本原理

Crosslight 公司的半导体器件模拟专用软件 APSYS(Advanced Physical Models of Semiconductor Devices)^[13] 利用各种特性方程式架构出模拟的各项特性与结果,模拟程序中整合了泊松方程、电流连续性方程、载流子传导方程、量子机理波方程、光子速率方程以及热传导方程等基本理论公式.

器件中的非辐射复合过程采用俄歇复合和 Shockley-Read-Hall (SRH) 深能级陷阱复合. 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^[14]和有效质量近似模型^[15]. 由于 III-V 族化合物材料特殊的极化性质,各层界面之间考虑了内建极化效应机理^[16-18]. APSYS 模拟程序基于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,结合边界条件采用牛顿迭代法自洽求解泊松方程得到 LED 器件的电学与光学特性.

在本文中,器件设计工作温度为 $300\ \text{K}$,针对量子阱垒层掺杂进行不同设计,讨论量子阱垒层掺杂的变化对 LED 产生的影响.

3 结果与讨论

虽然载流子浓度分布,发光强度以及载流子复合率等会随电流大小而变化,但是根据计算,量子阱垒层掺杂变化对双波长 LED 产生的一系列作用,在其他大小的电流下与在 $20\ \text{mA}$ 电流下趋势大体相同. 另外,限于篇幅原因不能附上过多不同驱动电流下的图表,所以以 $20\ \text{mA}$ 为例进行说明论证. 如无特别说明,器件的载流子浓度分布图、载流子复合率位置分布图和自发射谱图均是在 $20\ \text{mA}$ 驱动电流下得到的结果.

3.1 载流子限制作用与 In 含量的关系

为了讨论量子阱垒层掺杂对双波长 LED 产生的影响,本文预先探究了量子阱 In 含量对载流子限制作用强弱的影响,这在下文中具有重要应用. 文中设计一个器件结构,其有源区 I, II 阱层都由一个 In_{0.2}Ga_{0.8}N 与一个 In_{0.1}Ga_{0.9}N 量子阱组成,量子阱垒层为非故意掺杂的本征态,其余结构均与图 1 相同.

图 2—5 指出器件中较高 In 含量的阱对载流子有更强的限制作用. 图 2 中 In_{0.1} 阱中的空穴浓度和电子浓度均比 In_{0.2} 阱小. 图 3 中 In_{0.2} 阱比 In_{0.1} 阱有更大的阱深. 这是因为 InGaN/GaN 量子阱随着阱中的 In 含量的增加,阱的深度也随着增加,从而有更强的载流子限制效应,因而有更高的载流子浓度. 由图 4 知,载流子浓度大的 In_{0.2} 阱,其阱中的载流子复合率要远大于 In_{0.1} 阱. 由图 5 可知, In_{0.2} 阱发出的发光峰强度很大,而未出现 In_{0.1} 阱的发光峰.

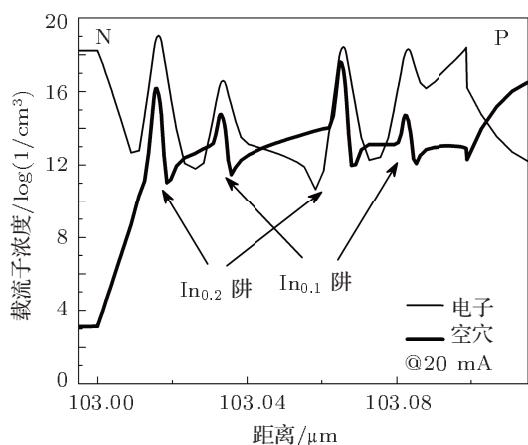


图2 器件载流子浓度分布图

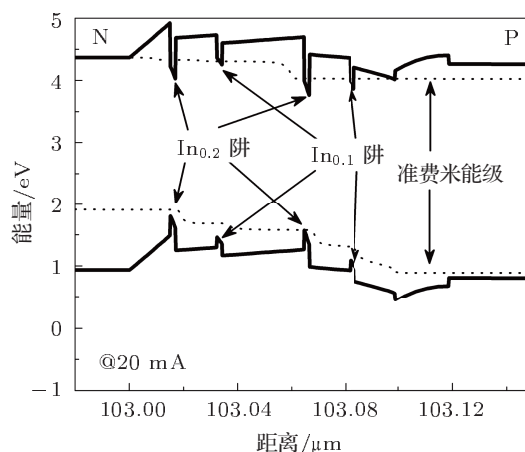


图3 器件能带结构图

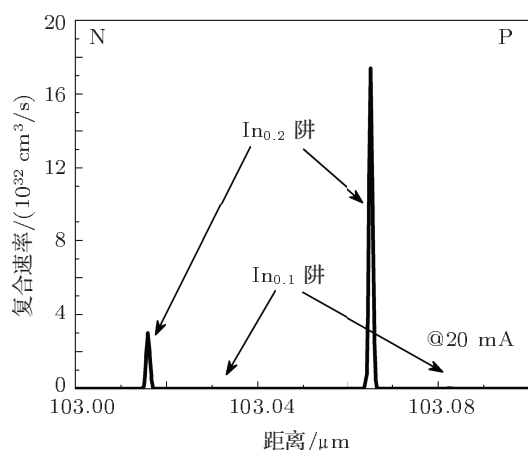


图4 器件载流子复合率位置分布图

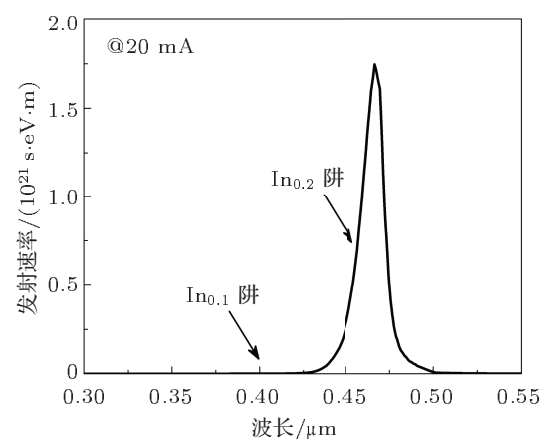


图5 器件自发射谱图

通过以上分析,高In含量的阱对载流子的限制作用更强,这与张等人^[19]的研究结果相同.因此对于垒层n型掺杂时,图1中有源区I设计成In_{0.2}的量子阱,有源区II为In_{0.1}阱;这样把含In量低的有源区II安排得靠近P区,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.对于垒层p型掺杂时,图1中有源区I设计成In_{0.1}的量子阱,有源区II为In_{0.2}阱;把低In含量的阱制作得靠近N区,减少对电子的限制作用,让其有更多的电子移动到近P区,防止出现阱中电子浓度低而导致发光强度偏弱的现象.

3.2 量子阱垒层n型掺杂浓度变化对双波长LED的影响

3.2.1 量子阱垒层n型掺杂 2.0 × 10¹⁷ cm⁻³

图6—8示出器件量子阱垒层n掺杂浓度较

低(2.0 × 10¹⁷ cm⁻³)时,发光峰主要由In_{0.2}的有源区I产生.由图6知,由于两种有源区的In含量不同,所以对载流子的限制作用不同.有源区I中In含量为0.2,大于有源区II中的,所以有源区I量子阱中的载流子浓度大于有源区II中的.载流子浓度大,其电子与空穴的复合率也相应地较高,由图7载流子复合率位置分布图知,载流子浓度大的有源区I,其两个量子阱的复合率远远大于有源区II.图8器件发射谱图知,有源区I的发光峰很强,而有源区II的发光峰跟有源区I比起来显得非常小.

3.2.2 量子阱垒层n型掺杂 4.9 × 10¹⁷ cm⁻³

图9—11示出器件中增大量子阱垒层n型掺杂浓度(4.9 × 10¹⁷ cm⁻³)时,发光光谱来自两个有源区,并且发光峰基本齐平.增大量子阱垒层的n型掺杂浓度,将使n型薄膜的能带结构受准费米能级的影响而降低,因而能减小有源区中量子阱垒层对电子的势垒高度而增大对空穴的势垒高度.所以

电子因量子阱垒层的阻碍减小而更加容易在有源区中移动,使阱中电子浓度分布均匀;空穴却因量子阱垒层的势垒高度增大而迁移阻力增强,因而更不易注入远离P区的量子阱中。

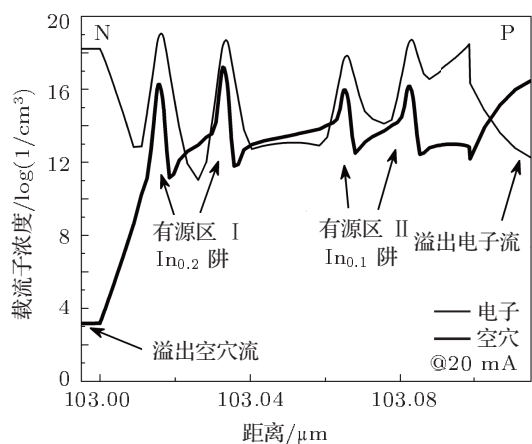


图6 器件载流子浓度分布图

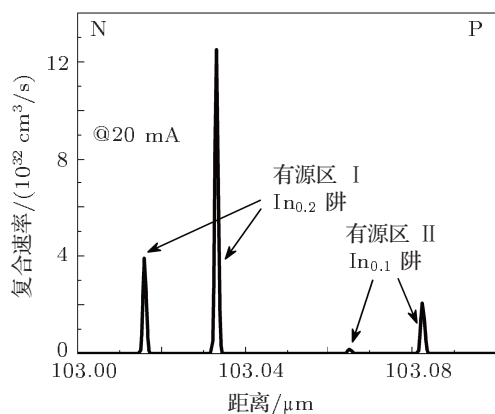


图7 器件载流子复合率位置分布图

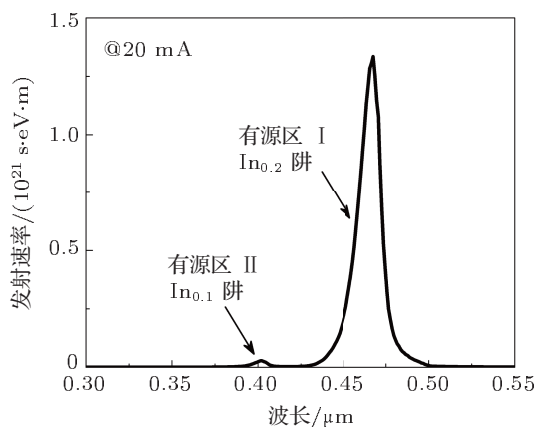


图8 器件自发发射谱图

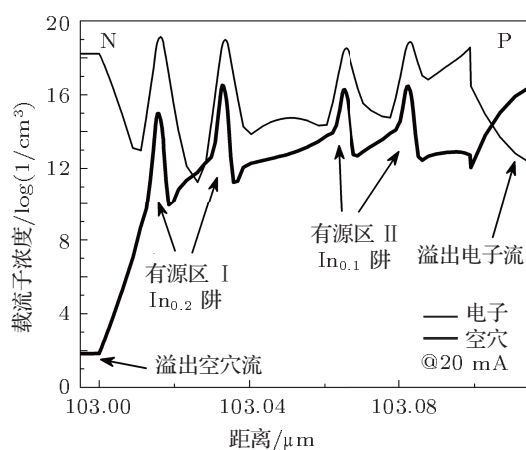


图9 器件载流子浓度分布图

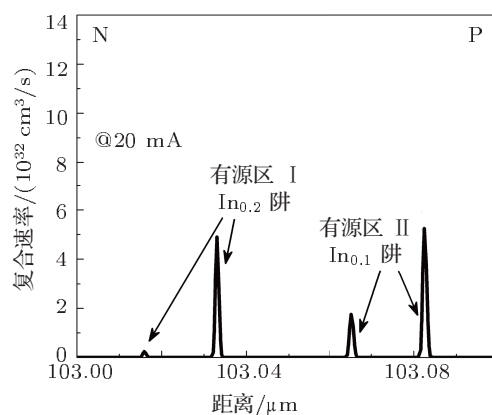


图10 器件载流子复合率位置分布图

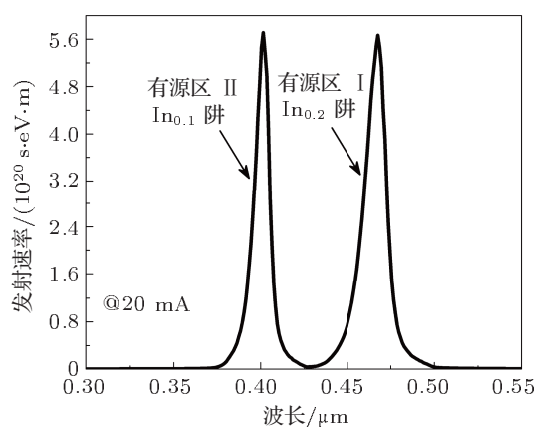


图11 器件自发发射谱图

图9对比图6知,随着量子阱垒层n型掺杂浓度的增大,电子因迁移阻力减小而分布变得更加均匀,有源区II的量子阱中的电子浓度增大,并且其量子阱中的电子浓度大小与有源区I量子阱中的电

子浓度大小相差很小. 空穴因量子阱垒层势垒高度的增大, 从 P 区流往 N 区的迁移阻力也随着增强, 一部分空穴被限制在有源区 II 中. 所以有源区 II 中的空穴浓度增大, 有源区 I 中的空穴浓度减小. 有源区 II 中的两个量子阱, 其中靠近 P 区的那个阱中的空穴浓度要大于另一个阱中的空穴浓度, 也是因为 n 型量子阱垒层的阻挡作用造成的, 在有源区 I 中也有相同的现象. 虽然有源区 I 与 II 中各自的量子阱内的载流子浓度不同, 但是两种有源区中的平均载流子浓度大小基本相同.

观察图 10 并对比图 7, 有源区 II 的自发辐射复合速率大大增强. 受此影响, 图 11 发光光谱中的两种活性层的发光峰强度基本齐平.

3.2.3 量子阱垒层 n 型掺杂 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

图 12—14 示出器件中进一步增大量子阱垒层的 n 型掺杂浓度 ($1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 时, 发光光谱主要由 $\text{In}_{0.1}$ 的有源区 II 控制. 图 12 示出了 20 mA 下器件量子阱垒层 n 型掺杂为 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (实线) 与 $4.9 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ (虚线) 时的能带对比图. 从图中看出, 随着量子阱 n 型掺杂浓度进一步增大, 能带受准费米能级的影响也增强, n 型薄膜的能带降低越大. 因此, 电子的迁移阻力变得更小, 空穴的迁移阻力增得更大. 对比图 13 和图 6、图 9 可知, 图 13 中量子阱中的电子浓度变得更大, 也更加均匀; 活性层中量子阱内的空穴浓度受 n 型掺杂量子阱垒层的影响, 空穴更难注入靠近 N 区的量子阱中, 量子阱中空穴浓度更小, 随着量子阱与 P 区距离的增大, 空穴浓度减小得更加厉害. 因为有源区 I 中的空穴浓度非常小而复合率极低, 因此发光峰小得难以在图 14 中观察到.

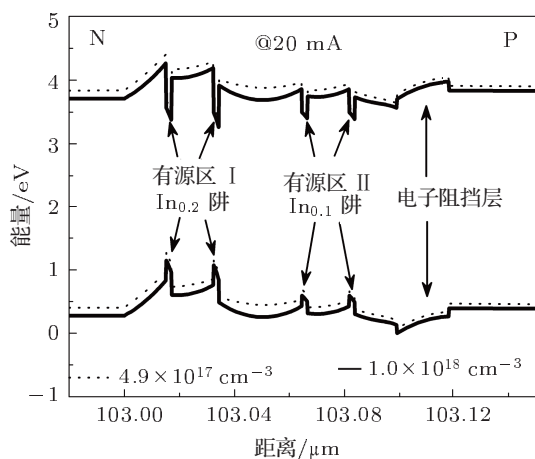


图 12 器件能带结构图

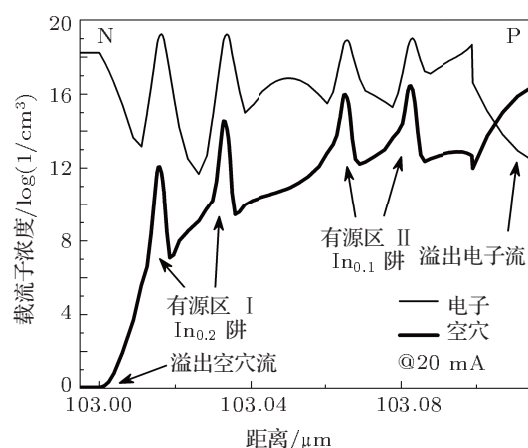


图 13 器件载流子浓度分布图

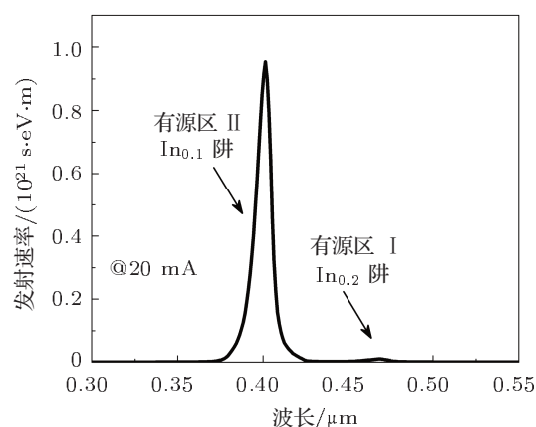


图 14 器件自发发射谱图

3.2.4 小结

由上分析可知, 对于 n 型掺杂量子阱垒层时, 通过调节 n 型掺杂浓度大小, 可以有效调节双波长 LED 发光光谱. 当 n 型掺杂浓度小时 (本文中 $2.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 为例), 电子、空穴都容易在深阱的有源区 I 中积累, 使长波的发光峰强度大于有源区 II 的短波发光峰; 随着量子阱垒层掺杂浓度增大 (本文中 $4.9 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 为例), 受准费米能级的影响, 量子阱垒层对电子的迁移阻力随之减小, 空穴迁移阻力也随着增大, 使得电子容易到达有源区 II 而空穴也更容易在有源区 II 中积累, 从而有源区 I 的长波发光峰减弱而有源区 II 中的短波发光峰增强; 随着掺杂浓度进一步增大 (本文中 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 为例), 量子阱垒层对电子的迁移阻力进一步减小, 空穴迁移阻力也进一步增大, 因此空穴更加难以迁移而积累于有源区 II, 使得有源区 I 中空穴浓度更小, 这样就可以达到减小有源

区 I 中发光峰强度的目的.

由图 8, 11 和 14 可知, 通过调控量子阱垒层的 n 型掺杂浓度大小, 可以连续调节并且精确控制发光光谱中两种波长光的强度, 获得所需的光强组合.

3.3 量子阱垒层 p 型掺杂浓度变化对双波长 LED 的影响

3.3.1 量子阱垒层 p 型掺杂 $1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

图 15—17 示出器件中量子阱垒层较低 p 型掺杂浓度 ($1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) 时, 发光峰主要由 $\text{In}_{0.2}$ 的有源区 II 产生. 由图 15 可知, 尽管高 In 组分的阱远离电子源, 但其依然有较高的电子浓度, 这是由于电子有较小的有效质量和较大的迁移率所致; 然而由于空穴相比电子有较大的有效质量和较低的迁移率, 导致靠近 N 区的空穴浓度低; 并且由于两有源区中 In 组分的差别, 高 In 组分的量子阱对载流子的限制作用强, 载流子浓度大. 图 16 中的载流子复合速率图看出, 高 In 组分的有源区 II 中的量子阱复合速率远大于低 In 组分的有源区 I 的复合速率, 这与其对应的载流子浓度相关. 从图 17 的器件发射光谱中进一步看出, 高 In 组分有源区 II 的发光峰明显强于低 In 组分有源区 I 的发光峰.

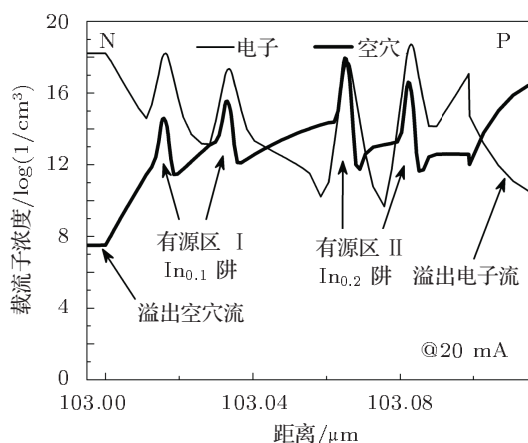


图 15 器件载流子浓度分布图

3.3.2 量子阱垒层 p 型掺杂 $4.6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

图 18—20 示出器件中增大量子阱垒层 p 型掺杂浓度 ($4.6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) 时, 发光光谱由两有源区共同产生, 两发光峰强度相当. 图 18 及与图 15 对比知, 增大量子阱垒层 p 型掺杂浓度, 空穴因掺杂浓度增大, 使得各阱层中的空穴浓度都增大, 并且靠近 n 区的低 In 组分阱中的空穴浓度增加到较高的浓度, 这是由于垒层 p 型掺杂时价带中对空穴的

有效势垒高度减少, 有利于增加空穴注入. 电子因导带中有效势垒高度的增大, 导致迁移阻力的增大, 致使电子浓度在各阱中下降, 但因其有效质量低和迁移率大, 即使远离 n 区, 依然维持较高的浓度. 图 19 及与图 16 对比得知, 低 In 组分的有源区 I 的辐射复合速率明显加强. 由图 20 的器件发光光谱中看出两有源区的发光峰强度相当.

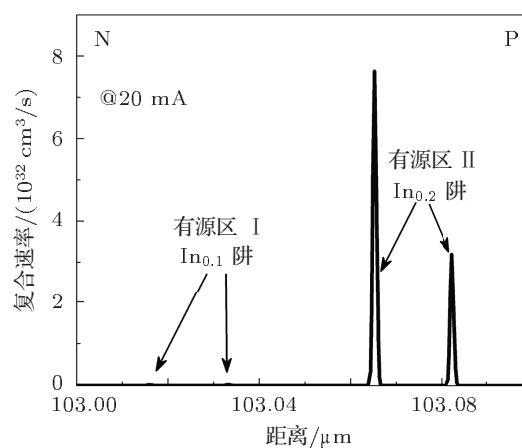


图 16 器件载流子复合率位置分布图

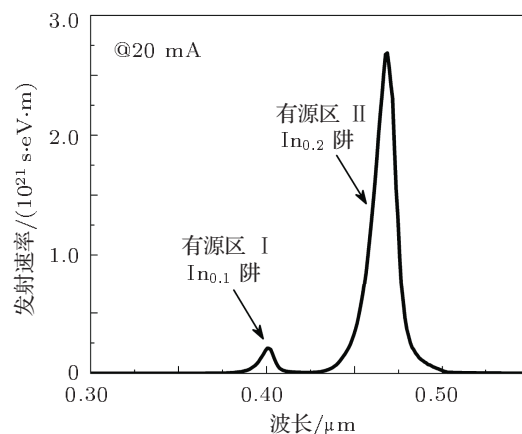


图 17 器件自发射光谱图

3.3.3 量子阱垒层 p 型掺杂 $7.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

图 21—23 示出器件中进一步增大量子阱垒层 p 型掺杂浓度 ($7.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) 时, 发光光谱主要由 $\text{In}_{0.1}$ 的有源区 I 产生. 图 21 示出了 20 mA 下器件量子阱垒层 p 型掺杂浓度为 $4.6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ (虚线) 与 $7.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ (实线) 时能带对比图. 由图中知, 量子阱垒层 p 型掺杂浓度增加, 近 P 区的能带上升, 而近 N 区的能带无明显变化, 这与近 N 区有高的电子浓度有关, 使其能带受掺杂影响不大, 但从 P 区向 N 区, 能带依然是上升的, 只是上升幅度较小. 近 P 区的能带上升, 使价带中对空穴的有

效势垒高度减小, 空穴迁移阻力减小, 有利于空穴向 N 区移动; 而导带中对电子的有效势垒高度增加, 对电子的迁移阻力增大. 对比图 22 和图 15、图 18 知, 各量子阱中的空穴浓度更大且更均匀. 有源区中量子阱内的电子浓度因受垒层 p 型掺杂的

影响, 电子难以注入到近 P 区的量子阱中, 致使量子阱中的电子浓度降得更低, 并且随量子阱与 N 区距离的增大, 电子浓度更低. 因有源区 II 中电子浓度的降低导致载流子复合降低, 其对应的发光峰强度也降低, 如图 23 所示.

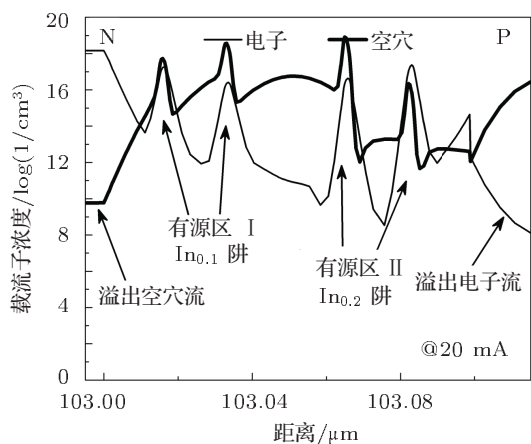


图 18 器件载流子浓度分布图

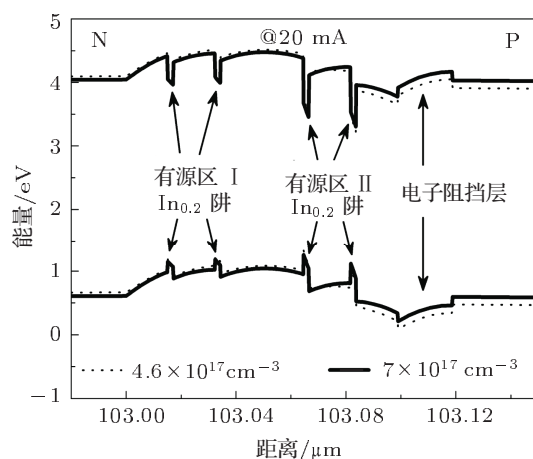


图 21 器件能带结构图

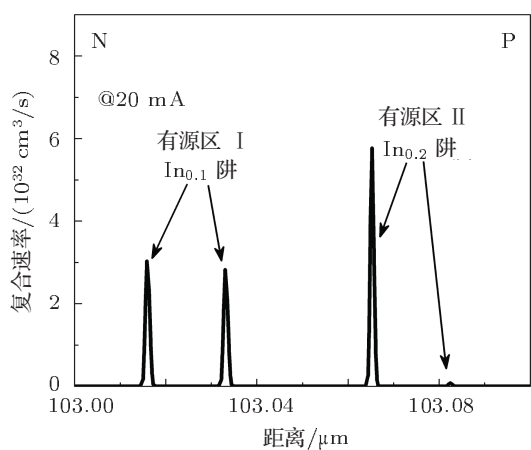


图 19 器件载流子复合率位置分布图

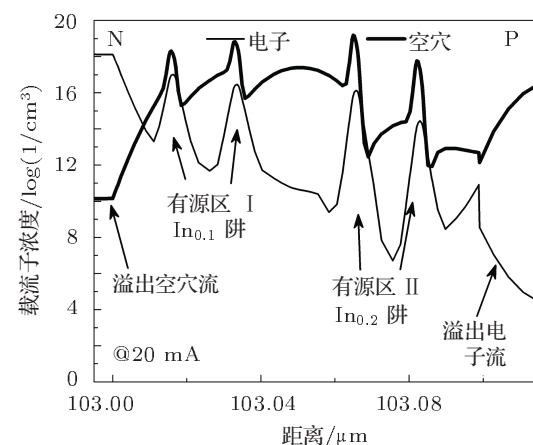


图 22 器件载流子浓度分布图

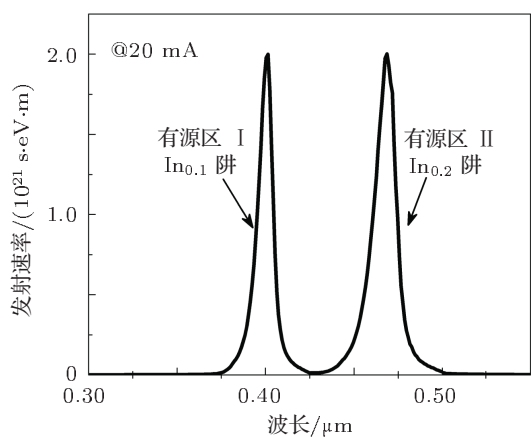


图 20 器件自发射谱图

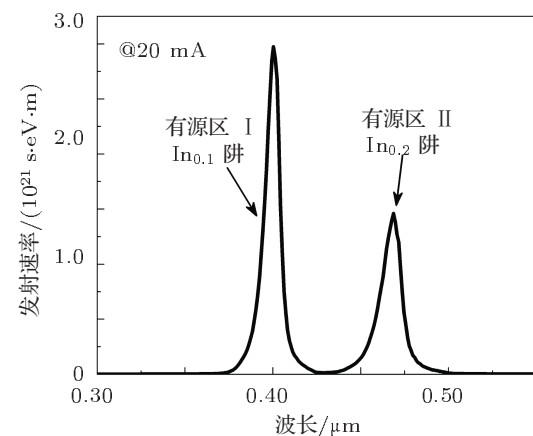


图 23 器件自发射谱图

3.3.4 小结

由以上分析知,对量子阱垒层 p 型掺杂时,调节 p 型掺杂浓度大小,也可以精确调控双波长 LED 发光光谱.当垒层掺杂浓度低时(本文以 $1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 为例),电子与空穴在深阱的有源区 II 中的浓度都较大,致使其长波发光峰强于短波发光峰;随垒层 p 型掺杂浓度增大(本文以 $4.6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 为例),准费米能级影响导致的能带结构变化,使垒层对电子迁移阻力增大,空穴迁移阻力减小,使得电子注入近 P 区有源区的浓度减小,而空穴注入近 N 区有源区的浓度增加,从而在两有源区中的电子空穴浓度都比较均匀,高 In 组分的有源区 II 的长波发光峰与低 In 组分有源区 I 的短波发光峰强度相当;随垒层 p 型掺杂浓度进一

步增大(本文中以 $7.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 为例),垒层对电子的迁移阻力进一步增强,空穴迁移阻力进一步减小,从而电子难以注入到近 P 区的有源区中,这样导致有源区 II 的长波发光峰减弱.

由图 17, 20 和 23 可知,通过对量子阱的 p 型掺杂浓度大小调控,可以连续调节并且精确控制发光光谱中两种波长光的强度,获得所需的光强组合.

4 结论

通过调控 LED 有源区中量子阱垒层 n 型和 p 型掺杂浓度的大小,可以连续调节并且精确控制发光光谱中两种波长光的强度,获得所需的光强组合.这对双波长 LED 的设计与制作有一定的指导意义.

- [1] Damilano B, Demolon P, Brault J, Huault T, Natail F, Massies J 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 073115
- [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** 908
- [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] Damilano B, Grandjean N, Pernot C, Massies J 2001 *Jpn. J. Appl. Phys.* **40** 918
- [6] Dalmaso S, Damilano B, Pernot C, Dussaigne A, Byrne D, Grandjean N, Lerous M, Massies J 2002 *Phys. Stat. Sol.* **192** 139
- [7] Ozden I, Makarona E, Nurmikko A V, Takeuchi T, Krames M 2001 *App. Phys. Lett.* **79** 2532
- [8] Qi Y D, Liang H, Tang W, Lu Z D, Lau K M 2004 *Journal of Crystal Growth* **272** 333
- [9] 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]
- [10] 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]
- [11] Zhang Y Y, Fan G H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 078504 (in Chinese) [张运炎, 范广涵 2011 物理学报 **60** 078504]
- [12] Yan Q R, Zhang Y, Yan Q A, Shi P P, Zheng S W, Niu Q L, Li S T, Fan G H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 036103 (in Chinese) [严启荣, 章勇, 闫其昂, 石培培, 郑树文, 牛巧利, 李述体, 范广涵 2012 物理学报 **61** 036103]
- [13] Crosslight Software Inc <http://www.crosslight.com> [February 2, 2010]
- [14] Chuang S L, Chang C S 1997 *Semicond. Sci. and 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 *App. Phys. Lett.* **80** 1204
- [19] 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]

Numerical study of spectrum-control in dual-wavelength LED with doped quantum well barriers of different doping concentration*

Liu Xiao-Ping Fan Guang-Han[†] Zhang Yun-Yan Zheng Shu-Wen
Gong Chang-Chun Wang Yong-Li Zhang Tao

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

(Received 5 September 2011; revised manuscript received 29 November 2011)

Abstract

Dual-wavelength LEDs with doped quantum well barriers of different doping concentrations are numerically investigated by using the APSYS simulation software. The carrier concentrations, radiative recombination rates, energy band diagrams and spectra are investigated at different doping types and different doping concentrations. The results show that through adjusting the doping concentration of the quantum well barrier a suitable spectrum can be obtained, which will satisfy the need of application. And the effect of spectrum-control in dual-wavelength LED is due to the blocking effect of electrons and holes by doped quantum well barriers.

Keywords: quantum well barrier, doping concentration, numerical simulate, dual-wavelength LED

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

* Project supported by the Production and Research Project of Guangdong Province and Ministry of Education (Grant Nos. 2009B090300338, 2010B090400192), the Doctoral Fund of Ministry of Education of China (Grant No. 20060574007), the Science and Technology Program of Guangzhou Huadu District (Grant Nos. HD10CXY-G002, HD10CXY-G013), and the LED Industry Project of Special Funds of Strategic Emerging Industries of Guangdong Province, China (Grant No. 2010A081002005).

[†] E-mail: gfan@senu.edu.cn