

反对称 n-AlGaIn 层对 GaN 基双蓝光波长发光二极管性能的影响*

严启荣 章勇[†] 闫其昂 石培培 郑树文 牛巧利 李述体 范广涵

(华南师范大学光电子材料与技术研究所, 广州 510631)

(2011 年 4 月 15 日收到; 2011 年 5 月 31 日收到修改稿)

采用数值分析方法对在 InGaIn/GaN 混合多量子阱活性层和 n-GaN 之间引入 n-AlGaIn 层的 GaN 基双蓝光波长发光二极管进行模拟分析. 结果发现, 与传统的具有 p-AlGaIn 电子阻挡层的双蓝光波长发光二极管相比, 这种反对称 n-AlGaIn 层能有效改善电子和空穴在混合多量子阱活性层中的分布均匀性及减少电子溢出, 实现电子空穴在各个量子阱中的平衡辐射, 从而减弱了双蓝光波长发光二极管的效率衰减. 此外, 通过改变 Al 组分可以提高双蓝光波长发光二极管发射光谱的稳定性: 当 Al 组分为 0.16 时, 双蓝光波长发光二极管的光谱在小电流下比较稳定, 而 Al 组分为 0.12 时, 光谱在大电流下比较稳定.

关键词: n-AlGaIn, p-AlGaIn, 混合多量子阱, 双蓝光波长

PACS: 61.72.uj, 68.55.ag, 78.67.De, 85.60.Jb

1 引言

近年来, GaN 基白光发光二极管 (LED) 的发展受到了极大的关注. 由于它具有高效节能、绿色环保、体积小和寿命长等优点被誉为继白炽灯、荧光灯、气体放电灯之后的第四代照明光源. 目前广泛采用的白光 LED 方案有两种: (1) 以 InGaIn 基蓝光或紫光 LED 为基础, 通过荧光粉实现转换的白光 LED^[1]; (2) 多芯片混色的白光 LED. 由于后者发光全部来自 LED, 因此, 制作成本高、驱动复杂, 此外, 三种颜色 LED 之间老化特性的差异, 常导致发光过程中变色. 目前广泛采用 InGaIn 基蓝光或紫光 LED 加荧光粉的方法, 但是, 无机荧光粉一般面临着光致转换效率低和显色指数 (CRI) 差等缺点^[2-4]. 无荧光粉的单芯片白光 LED 已有报道^[5-8], 主要是在同一个蓝宝石衬底上依次生长两种或三种 InGaIn/GaN 多量子阱结构的 LED, 调节 In 组分来实现从蓝光到黄光的发射从而合成白光, 然而, 这些 LED 的电致发光光谱严重地依赖驱

动电流的变化而改变, 对其照明应用是非常不利的. Shi 等通过采用阵列式侧向界面的混合多量子阱的芯片制造技术实现了光谱稳定的无荧光粉单芯片白光 LED^[9], 但是, 相关 LED 的驱动电压较高. Park 等则在同一蓝宝石衬底上侧向生长不同发射波长的多量子阱结构的 LED^[10], 实现了光谱稳定的无荧光粉的白光 LED, 可是相关制造工艺复杂不利于应用. 最近, Mirhosseini 等通过模拟结果显示基于双蓝光波长芯片激发 YAG:Ce 荧光粉能够在保持流明效率的同时得到高显色指数的白光 LED^[11]. 我们采用混合多量子阱结构的 GaN 基双蓝光波长芯片激发 YAG:Ce 荧光粉实现了高显色性的白光 LED, 相关显色性达到 88^[12]. 与无荧光粉的白光 LED 类似, 这种白光 LED 的发光光谱也随电流的变化而改变.

由于 GaN 基材料空穴有效质量 ($1.1 m_0$) 高于电子的有效质量 ($0.2 m_0$), 因此, 电子就更容易穿越活性层进入活性层顶部的量子阱层, 甚至溢流出有源层进入 p-GaN 层, 相反, 空穴就比较难达到活性

* 教育部留学回国人员科研启动基金 (批准号: 20091001)、广东省教育部产学研结合项目 (批准号: 2009B090300338)、国家自然科学基金 (批准号: 8251063101000-007) 和华南师范大学学生课外科研重点课题项目 (10GDKC07) 资助的课题.

[†] E-mail: zycq@snu.edu.cn

层靠近 n-GaN 侧的量子阱, 这样电子空穴在活性层中分布非常不均匀, 导致电子空穴复合发光发生在靠近 p-GaN 侧的几个量子阱内, David 等的光谱测量数据显示 GaN 基多量子阱蓝光 LED 电子空穴的复合区主要集中在靠近 p-GaN 侧的量子阱内^[13]. 这种电子空穴分布不均匀对于单波长 LED 结构的电致发光 (EL) 光谱影响不大, 但是对于混合多量子阱的双波长 LED 的 EL 光谱就产生非常严重影响. 本文运用数值模拟方法, 通过在 InGaN/GaN 混合多量子阱层与 n-GaN 层之间引入 n-AlGaN 层来优化双蓝光波长 LED 的性能, 深入分析这种反对称 n-AlGaN 层及其 Al 组分对双蓝光波长 LED 的发射光谱、发光效率、电子空穴浓度分布、自发发射率等方面的影响, 探索实现光谱稳定的高效率双蓝光波长 LED 芯片的设计方法.

2 模拟参数与器件结构

2.1 模拟参数

Crosslight 公司的半导体器件模拟专用软件 APSYS (Advanced Physical Models of Semiconductor Devices)^[14] 是利用各种的物理模型来架构出模拟各项特性与结果. 在模拟程序中利用二维有限元分析方法, 运用电流连续方程、载流子运输方程、泊松方程、量子力学波动方程、热传输方程等, 以及一些描述载流子特性、边界条件等理论公式, 从而得到 LED 器件的电学和光学特性.

本文使用的三元材料 InGaN 和 AlGaN 的能带间隙为二元化合物的线性叠加和弯曲项^[15], 由以下方程式表示:

$$E_g(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = xE_g(\text{InN}) + (1-x)E_g(\text{GaN}) - B_1x(1-x), \quad (1)$$

$$E_g(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = xE_g(\text{AlN}) + (1-x)E_g(\text{GaN}) - B_2x(1-x), \quad (2)$$

其中, $E_g(\text{InN})$, $E_g(\text{AlN})$ 与 $E_g(\text{GaN})$ 分别表示 InN, AlN 与 GaN 的能带间隙, 而 B_1 和 B_2 分别是 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 和 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 的弯曲系数.

在氮化物半导体器件各层界面中, 考虑内建极化效应机制, 其中极化效应包括自发极化和压电极

化^[16-18]. 在模拟中, 三元材料 InGaN 和 AlGaN 的极化效应公式如下:

自发极化为

$$P_{\text{sp}}(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = -0.0413x - 0.0339(1-x) + 0.0378x(1-x), \quad (3)$$

$$P_{\text{sp}}(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = -0.0898x - 0.0339(1-x) + 0.0191x(1-x), \quad (4)$$

压电极化为

$$P_{\text{pz}}(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = xP_{\text{pz}}(\text{InN}) + (1-x)P_{\text{pz}}(\text{GaN}), \quad (5)$$

$$P_{\text{pz}}(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) = xP_{\text{pz}}(\text{AlN}) + (1-x)P_{\text{pz}}(\text{GaN}), \quad (6)$$

其中,

$$P_{\text{pz}}(\text{InN}) = -1.373\varepsilon + 9.541\varepsilon^2, \quad (7)$$

$$P_{\text{pz}}(\text{GaN}) = -0.918\varepsilon + 9.541\varepsilon^2, \quad (8)$$

$$P_{\text{pz}}(\text{AlN}) = -1.808\varepsilon + 5.642\varepsilon^2 (\varepsilon < 0), \quad (9)$$

$$P_{\text{pz}}(\text{AlN}) = -1.808\varepsilon - 7.888\varepsilon^2 (\varepsilon > 0), \quad (10)$$

ε 为基板与薄膜结构间的应变或称晶格不匹配, 表示为:

$$\varepsilon = (a_{\text{sub}} - a)/a, \quad (11)$$

a_{sub} 为基板晶格常数, a 为薄膜晶格常数.

通常实际的极化电场值会小于理论计算值, 因为内部的极化电场会受到自由电荷、受激载流子、材料缺陷和杂质等的屏蔽与补偿, 其屏蔽程度一般为 20%—80%^[19,20]. 本文使用理论值的 50%进行模拟计算.

2.2 器件结构

本文采用 InGaN/GaN 混合多量子阱结构的发光二极管来实现双蓝光波长发射, 器件尺寸为 $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$, 具体结构如图 1(a) 所示. 具有 p-AlGaN 电子阻挡层的双蓝光波长 LED 从下到上依次为 GaN 缓冲层, $2 \mu\text{m}$ 的 $\mu\text{-GaN}$, $2 \mu\text{m}$ n-GaN 层 (掺杂浓度为 $4 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$)、混合多量子阱的活性层为两个周期的 $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}/\text{GaN}$ 量子阱和两个周期的 $\text{In}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{N}/\text{GaN}$ 量子阱, 15nm 的 p-AlGaN 电子阻挡层 (掺杂浓度 $7 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$) 以及 200nm 厚的 p-GaN 层 (掺杂浓度 $7 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$). 在本文中, 我们提出去掉 p-AlGaN 电子阻挡层, 而

在活性层与 n-GaN 之间引入 15 nm 的 n-AlGaIn 层 (掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), 其他结构一样. 所有量子阱的阱层和垒层厚度分别为 3 nm 和 10 nm.

混合多量子阱采用高 In 组分量子阱在活性层底层是由于 $\text{In}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{N}/\text{GaN}$ 量子阱相对 $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}/\text{GaN}$ 量子阱浅, 对空穴的约束较弱, 使得一部分的空穴能注入到高 In 组分的量子阱中, 从而提高高 In 组分量子阱层的空穴浓度; 另

一方面, 高 In 组分量子阱发出的光子能量比低 In 组分量子阱的小, 当器件发光时, 低 In 组分量子阱对高 In 组分量子阱发出的光子吸收小. 在本文研究中, 通过数值模拟分析 n-AlGaIn 层及 Al 组分对双蓝光波长 LED 性能的影响, 并与传统的具有 p-AlGaIn 层的双蓝光波长 LED 进行比较研究, 以期获得高光效和光谱稳定的双蓝光波长 LED 的设计方法.



图 1 器件结构

3 结果与讨论

3.1 p-AlGaIn 层与 n-AlGaIn 层对双蓝光波长 LED 性能的影响

图 2 表示具有 p-AlGaIn 电子阻挡层和反对称 n-AlGaIn 层的双蓝光波长 LED 内量子效率与电流的变化关系. 结果显示 n-AlGaIn 层的引入能有效改善双蓝光波长 LED 的发光效率在大电流下衰减 (efficiency droop). 具有 p-AlGaIn 电子阻挡层的双蓝光波长 LED 的内量子效率在电流为 12.57 mA 时达到最大值 (90.4%), 当电流升到 120 mA 时减小

到 66.5%, 衰减达到 23.9%. 而具有反对称 n-AlGaIn 层的双蓝光波长 LED 的内量子效率从 12.03 mA 到 120 mA 的范围内却一直保持在 94% 以上, 内量子效率没有明显下降的趋势. 在 120 mA 时, 具有反对称 n-AlGaIn 层 LED 的内量子效率比具有 p-AlGaIn 层 LED 的高出 28%. 图 3 表示相应双蓝光波长 LED 发光功率随电流的变化关系. 结果显示在低电流情况下这两类 LED 的发光功率几乎一样, 当电流超过 20 mA 后, p-AlGaIn 层 LED 的发光功率随电流的增加逐渐偏离线性变化, 而 n-AlGaIn 层 LED 在 120 mA 电流范围内一直接近线性增大.

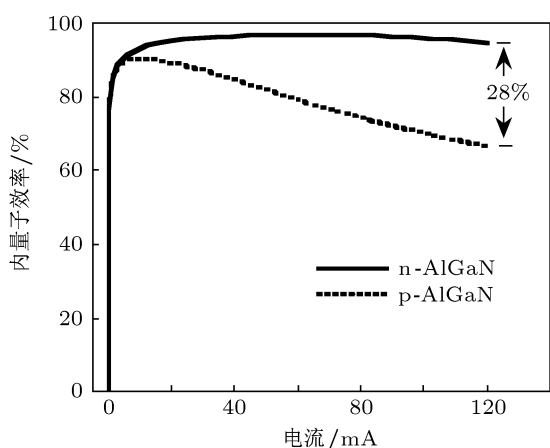


图2 p-AlGaN层与反对称 n-AlGaN层的双蓝光波长 LED 的内量子效率与电流的变化关系

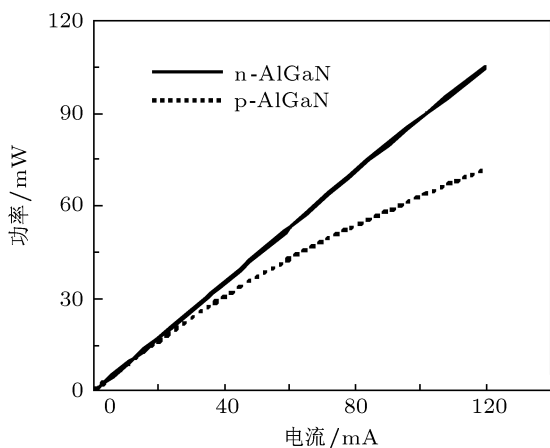


图3 p-AlGaN层与反对称 n-AlGaN层的双蓝光波长 LED 的发光功率与电流的变化关系

图4分别为具有 p-AlGaN 电子阻挡层与反对称 n-AlGaN 层的双蓝光波长 LED 在 120 mA 时电子和空穴的浓度分布. 结果显示反对称 n-AlGaN 层能有效改善电子和空穴在混合多量子阱层的分布. 如图 4(a) 所示, 在具有 p-AlGaN 层的双蓝光波长 LED 中, 紧邻 n-GaN 层量子阱中的电子浓度非常高, 比两个低 In 组分量子阱的总量还要多出 30%. 当随着 p-AlGaN 层的移去与 n-AlGaN 层的引入, 紧邻 n-GaN 层量子阱的电子浓度减小到传统具有 p-AlGaN 层 LED 的 57%, 而其他量子阱中的电子浓度几乎不变. 此外, n-AlGaN 层的引入还使混合多量子阱有源区中的每个量子阱的空穴浓度比传统具有 p-AlGaN 层的 LED 都显著提高, 特别是紧邻 n-GaN 和 p-GaN 层的两个量子阱的空穴浓度比传统具有 p-AlGaN 层的 LED 提高近一倍, 如图 4(b) 所示. 这主要是由于 p-AlGaN 层的移去提高了空穴从 p-GaN 侧注入活性层的能力, 而 n-

AlGaN 层的引入同时阻碍了电子从 n-GaN 侧注入有源层的能力, 这样就导致紧邻 n-GaN 和 p-GaN 层量子阱中的电子和空穴浓度产生显著改变.

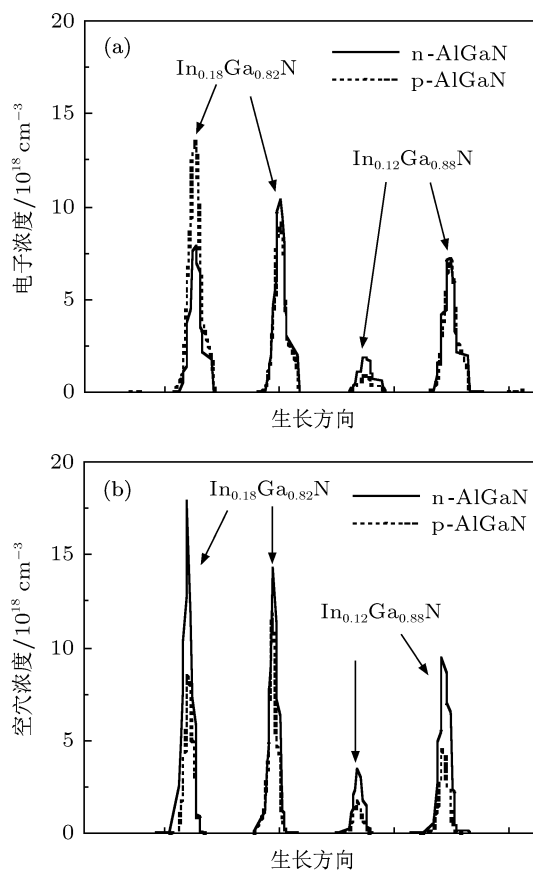


图4 p-AlGaN层和反对称 n-AlGaN层的双蓝光波长 LED 在 120 mA 时电子 (a) 和空穴 (b) 的浓度分布

图5为 p-AlGaN 电子阻挡层和反对称 n-AlGaN 层的双蓝光波长 LED 在 120 mA 时的辐射复合率分布. 结果显示具有 p-AlGaN 层的双蓝光波长 LED 的高 In 组分量子阱的辐射复合率比低 In 组分量子阱多出了近 3 倍. 随着 p-AlGaN 的移去与 n-AlGaN 层的引入使混合多量子阱有源区中所有量子阱的辐射复合率显著增强, 而且还使得低 In 组分量子阱的总辐射复合率提高到与高 In 组分量子阱相当. 尤其是最靠近 p-GaN 层的那个低 In 组分量子阱的辐射复合率, 它比传统具有 p-AlGaN 层的辐射复合率提高了 3 倍多.

GaN 基材料的空穴有效质量远高于电子的有效质量, 因此, 电子相对于空穴就更容易穿过活性层而达到 p-GaN 侧. 对于传统具有 p-AlGaN 层的混合量子阱的 LED, 由于 p-AlGaN 的存在虽然起到阻挡电子溢出的作用, 同时也阻挡了空穴从 p-GaN 层注入活性层, 所以从图 4(a) 与 (b) 可以看出, 具

有 p-AlGaN 层 LED 的所有量子阱层的空穴浓度明显低于电子的浓度, 这样就导致电子空穴在各个量子阱中不能平衡辐射, 存在电子过剩的现象. 随着 p-AlGaN 层的移去和 n-AlGaN 层的引入有效地提高空穴的注入能力, 从图 4(a) 与 (b) 可以看出, 反对称 n-AlGaN 层能显著提高所有量子阱层的空穴浓度, 同时除了对紧邻 n-GaN 层的量子阱中电子浓度有影响外, 其他量子阱的电子浓度几乎没有影响. 所以, n-AlGaN 层的引入能有效改善电子空穴在混合量子阱活性区中的分布, 从而实现电子空穴在各个量子阱中平衡辐射, 最终减弱了双蓝光波长 LED 的效率衰减效应 (如图 2 所示).

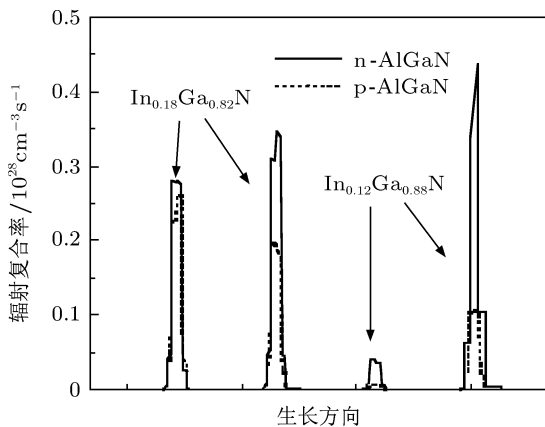


图 5 p-AlGaN 层和反对称 n-AlGaN 层的双蓝光波长 LED 在 120 mA 时的辐射复合率分布

图 6(a) 和 (b) 分别表示具有 p-AlGaN 电子阻挡层和反对称 n-AlGaN 层的双蓝光波长 LED 在 120 mA 时的能带图与准费米能级分布图. p-AlGaN 层对电子起阻挡作用的同时又对空穴起阻挡作用, 这将会导致电子空穴注入非常不平衡, 在高电流下将会更加明显. 在图 6(a) 中, 由于在 GaN 垒层、p-AlGaN 电子阻挡层和 p-GaN 层之间存在很强的极化电场, 导致 p-AlGaN 层和 p-GaN 层界面处价带形成空穴集聚的凹口 (notches), 而在 GaN 垒层与 p-AlGaN 层界面处价带形成了阻挡空穴注入的尖峰 (spikes)^[21,22]. 在大电流情况下, 这种效应对空穴的阻挡作用将加大, 导致空穴浓度不足而电子浓度过剩的现象. 另外, GaN 垒层与 p-AlGaN 层之间的极化电场降低了导带处最后一个垒层的势垒, 减弱了在大电流下对电子的限制. 图 6(b) 也说明了 p-AlGaN 层的移去与 n-AlGaN 的引入明显改善了空穴的注入. 数值模拟发现 n-AlGaN 层的引入能显著提高所有量子阱层的空穴浓度, 并且阻挡电

子溢流比传统的 p-AlGaN 电子阻挡层提高了近三个数量级, 改善电子空穴在活性层中的分布从而减弱器件在大电流下的 efficiency droop 效应.

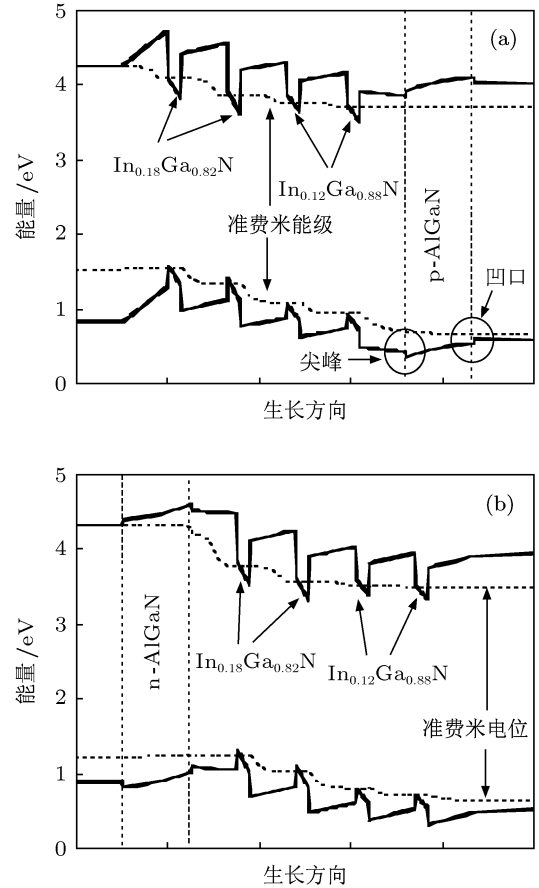


图 6 p-AlGaN 层 (a) 和 n-AlGaN 层 (b) 的双蓝光波长 LED 在 120 mA 时的能带图和准费米能级分布图

从内量子效率 η_{int} 的表达式^[23] 可以进一步解释大电流下反对称 n-AlGaN 层能改善器件的 efficiency droop 效应.

$$\eta_{int} = \frac{I_{rad}}{I} = \frac{I_{rad}}{I_{rad} + I_{nr} + I_{Aug} + I_{leak}}, \quad (12)$$

其中, 总的注入电流 I 包括辐射复合电流 I_{rad} , 非辐射复合电流 I_{nr} , 俄歇复合电流 I_{Aug} 和漏电流 I_{leak} . p-AlGaN 层的移去和 n-AlGaN 层的引入有效地提高了双蓝光波长 LED 的辐射复合率 (见图 5), 即增大了辐射复合电流 I_{rad} , 同时也减少了漏电流 I_{leak} , 那么从式 (12) 可以得出内量子效率 η_{int} 的 Droop 效应得到显著减弱.

图 7(a) 和 (b) 分别为 p-AlGaN 电子阻挡层与反对称 n-AlGaN 层的双蓝光波长 LED 在不同电流

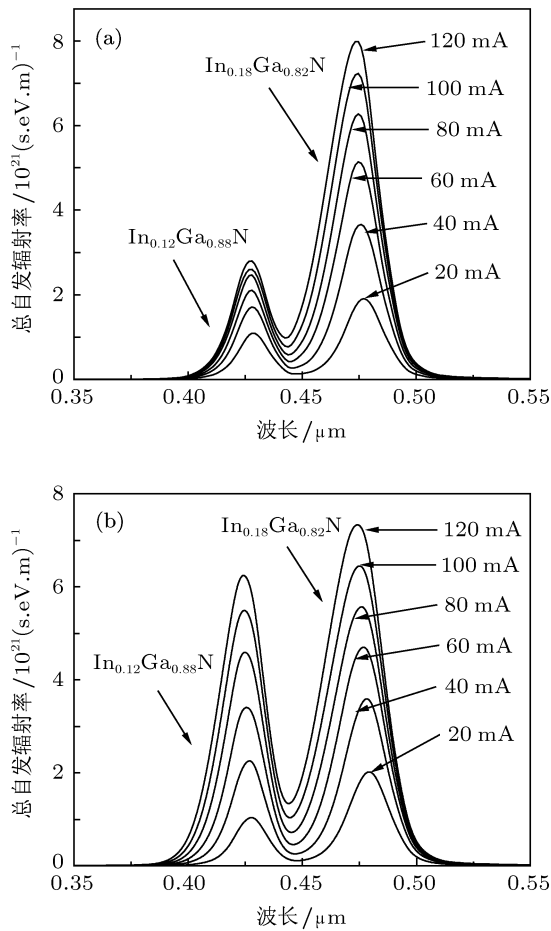


图7 p-AlGaIn层 (a) 与反对称 n-AlGaIn层 (b) 的双蓝光波长 LED 的自发发射率随电流的变化关系

下的自发发射率. 在具有 p-AlGaIn 层的双蓝光波长 LED 中, 高 In 组分量子阱和低 In 组分量子阱的发光峰的峰值都随着电流的增大而增大, 但是高 In 组分量子阱的发光峰的峰值增大的幅度明显大于低 In 组分量子阱. 当电流为 20 mA 时, 高 In 组分量子阱的发光峰的峰值是低 In 组分量子阱的 1.75 倍; 而当电流增大到 120 mA 时, 高 In 组分量子阱的发光峰的峰值比低 In 组分量子阱的多出近 2 倍, 如图 7(a) 所示. 由于具有 p-AlGaIn 层 LED 的电子空穴在各量子阱中分布不均衡, 不能实现均衡辐射, 并存在电子过剩的现象, 从而导致高 In 组分量子

阱中的载流子辐射复合率比低 In 组分量子阱强得多. 随着 p-AlGaIn 层的移去和反对称 n-AlGaIn 层的引入, 显著提高了空穴从 p-GaN 侧注入活性层的能力, 并使得电子空穴浓度在各量子阱中分布更均衡, 从而使双蓝光峰均衡发射 (如图 7(b)).

3.2 Al 组分对光谱的影响

通过上面的研究发现与传统具有 p-AlGaIn 层的双蓝光波长 LED 相比, 反对称 n-AlGaIn 层更能改善双蓝光波长 LED 的性能, 下面将分析 n-AlGaIn 层的不同 Al 组分对双蓝光波长 LED 光谱稳定性的影响. 不同 Al 组分对控制电子注入和对阻挡空穴溢出程度都不同, 将会进一步调节双蓝光波长 LED 发射光谱的稳定性. 定义双蓝光波长 LED 的峰值比: $k = \frac{I_{L-In}}{I_{H-In}}$, 其中, I_{L-In} 表示来自混合量子阱中 $In_{0.12}Ga_{0.88}N/GaN$ 多量子阱发射的峰值强度, I_{H-In} 表示来自混合量子阱中 $In_{0.18}Ga_{0.82}N/GaN$ 多量子阱发射的峰值强度. 如果 k 值随电流变化趋近于 1 且变化缓慢, 说明双蓝光波长 LED 的发射光谱越稳定.

表 1 说明随着 Al 组分的增大, 低 In 组分量子阱的自发发射率逐渐增大, 而高 In 组分量子阱的自发发射率逐渐减少. 当 Al 组分为 0.12 时, 双蓝光波长 LED 的光谱在大电流下比较稳定; 而 Al 组分为 0.16 时, 双蓝光波长 LED 的光谱在小电流下比较稳定. 由于改变 n-AlGaIn 层的 Al 组分能调节其势垒高度, 这样进一步优化电子的注入, 因此, 可以通过调控 Al 的组分优化双蓝光波长 LED 发射光谱的稳定性. 在实际的应用中, 小功率双蓝光波长 LED 的驱动电流一般是 20 mA. 当 Al 组分为 0.16 时, 来自 $In_{0.18}Ga_{0.82}N/GaN$ 多量子阱发射的峰值与 $In_{0.12}Ga_{0.88}N/GaN$ 多量子阱发射的峰值齐平, 这样非常有利于小功率双蓝光波长芯片在 YAG:Ce 荧光粉的白光 LED 封装中的应用, 相关外延生长及芯片制备研究正在我们实验室开展.

表 1 具有反对称 n-AlGaIn 层双蓝光波长 LED 的峰值比 k 随 Al 组分与电流的变化

k	10 mA	20 mA	40 mA	60 mA	80 mA	100 mA	120 mA
Al = 0.04	0.51	0.55	0.59	0.51	0.80	0.84	0.85
Al = 0.08	0.53	0.54	0.65	0.72	0.82	0.86	0.86
Al = 0.12	0.51	0.61	0.74	0.83	0.91	0.96	1.00
Al = 0.16	0.85	1.00	1.01	1.11	1.18	1.17	1.19
Al = 0.20	1.39	1.57	1.62	1.55	1.57	1.58	1.53

4 结论

通过分析比较具有反对称 n-AlGaIn 层的双蓝光波长 LED 与传统 p-AlGaIn 层的双蓝光波长 LED 的内量子效率、发光功率、辐射复合率和自发发射率, 结果表明反对称 n-AlGaIn 层能有效改善电

子空穴在混合量子阱活性区中的分布, 实现电子空穴在各个量子阱中平衡辐射, 最终减弱了双蓝光波长 LED 在大电流下的效率衰减效应. 此外, 改变 Al 组分能进一步优化双蓝光波长 LED 发光光谱的稳定性, 这对双蓝光波长芯片激发 YAG:Ce 荧光粉实现高显色性白光 LED 具有重要意义.

- [1] Nakamura S, Fasol G 1997 *The Blue Laser Diode: GaN Based Light Emitters and Lasers* (Berlin: Springer) p216
- [2] Yamada M, Naitou T, Izumo K, Tamaki H, Murazaki Y, Kameshima M, Mukai T 2003 *Jpn. J. Appl. Phys.* **42** L20
- [3] Sheu J K, Chang S J, Kuo C H, Su Y, Wu L W, Lin Y C, Lai W C, Tsai J M, Chi G C, Wu R K 2003 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **15** 18
- [4] Xue Z Q, Huang S R, Zhang B P, Chen C 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]
- [5] Ozden I, Makarona E, Nurmikko A V, Takeuchi T, Krames M 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 2532
- [6] Chen C H, Chang S J, Su Y K 2003 *Phys. Stat. Sol.* **7** 2257
- [7] Wang X H, Jia H Q, Guo L W, Xing Z G, Wang Y, Pei X J, Zhou J M, Chen H 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 1912
- [8] Wang X H, Guo L W, Jia H Q, Xing Z G, Wang Y, Pei X J, Zhou J M, Chen H 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 1913
- [9] Shi J W, Chen C C, Wang C K, Lin C S, Sheu J K, Lai W C, Kuo C H, Tun C J, Yang T H, Tsao F C, Chyi J I 2008 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **20** 449
- [10] Park I K, Kim J Y, Kwon M K, Cho C Y, Lim J H, Park S J 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 091110
- [11] Mirhosseini R, Schubert M F, Chhajed S, Cho J, Kim J K, Schubert E F 2009 *Opt. Express* **17** 10806
- [12] Chen X W, Zhang Y, Li S T, Yan Q R, Zheng S W, He M, Fan G H 2011 *Status Solid A* **208** 1972
- [13] David A, Grundmann M J, Kaeding J F, Gardner N F, Mihopoulos T G, Krames M R 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 053502
- [14] Crosslight Software Inc <http://www.crosslight.com/products/ap-sys.shtml>. [March 20, 2011]
- [15] Vurgaftman I, Meyer J R, Ram-Mohan L R 2001 *J. Appl. Phys.* **89** 5815
- [16] Fiorentini V, Bernardini F, Amacher O 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 1204
- [17] Bernardini F 2007 "Spontaneous and Piezoelectric Polarization: Basic Theory vs. Practical Recipes" in Nitride Semiconductor Devices: Principles and Simulation (Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA) p49
- [18] Gu X L, Guo X, Wu D, Xu L H, Liang T, Guo J, Shen G D 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4977 (in Chinese) [顾晓玲, 郭霞, 吴迪, 徐丽华, 梁庭, 郭晶, 沈光地 2007 物理学报 **56** 4977]
- [19] Renner F, Kiesel P, Doehler G, Kneissl M A, Van de Walle C G, Jpohnson N M 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 490
- [20] Zhang H, Miller E J, Yu E T, Poblenz C, Speck J S 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 4644
- [21] Heikman S, Keller S, Wu Y, Speck J S, Denbaars S P, Mishra U K 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 10114
- [22] Mao Q H, Jiang F Y, Cheng H Y, Zheng C D 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8078 (in Chinese) [毛清华, 江凤益, 程海英, 郑畅达 2010 物理学报 **59** 8078]
- [23] Kuo Y K, Horng S H, Yen S H, Tsai M C, Huang M F 2009 *Appl. Phys. A* **98** 509

Effect of an asymmetry n-AlGa_N layer on performance of dual-blue wavelength light-emitting diodes*

Yan Qi-Rong Zhang Yong[†] Yan Qi-Ang Shi Pei-Pei Zheng Shu-Wen Niu Qiao-Li
Li Shu-Ti Fan Guang-Han

(*Institute of Optoelectronic Materials and Technology, South China Normal University, Guangzhou 510631, China*)

(Received 15 April 2011; revised manuscript received 31 May 2011)

Abstract

The effect of an n-type AlGa_N layer on the physical properties of dual-wavelength light-emitting diode (LED) is investigated numerically. The simulation results show that compared with the conventional p-type AlGa_N electron-blocking layer (EBL), the n-type AlGa_N layer can improve the distribution of electrons and holes more uniformly and realize the radiation balance between electrons and holes in the quantum wells, and further reduce the efficiency drop of dual-blue wavelength LED at high current. In addition, the spontaneous emission rate of two kinds of quantum wells can be adjusted through the control of Al composition. It can be found from the results that the emission spectrum of dual-blue wavelength LED is more stable at low current with an Al composition of 0.16, while the emission spectrum is more stable at high current with an Al composition of 0.12.

Keywords: n-AlGa_N, p-AlGa_N, mixture multi-quantum wells, dual-blue wavelength

PACS: 61.72.uj, 68.55.ag, 78.67.De, 85.60.Jb

* Project supported by the Ministry of Education Scientific Research Foundation for Returned Students, China (Grant No. 20091001), the Production and Research Program of Guangdong Province and Ministry of Education, China (Grant No. 2009B090300338), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 8251063101000-007), and the Extracurricular Project for Students' Scientific Research of South China Normal University, China (Grant No.10GDKC07).

[†] E-mail: zycq@sclu.edu.cn