

激光与光电子学进展

载流子复合机制对不同发光波长 InGaN 基 LED 调制带宽的影响

赵勇兵*, 钱晨辰

盐城师范学院物理与电子工程学院, 江苏 盐城 224007

摘要 传统的 ABC 模型主要用于研究 InGaN 量子阱中载流子的复合动态过程。使用传统的 ABC 模型计算载流子的复合速率和复合寿命, 研究不同发光波长 InGaN 基 LED 的 3 dB 调制带宽与载流子复合机制的关系。计算分析结果表明, 在相同的注入电流下, 随着有效有源区厚度和量子阱层厚度的减小, 400 nm 近紫外、455 nm 蓝光以及 525 nm 绿光三种发光波长 LED 的 3 dB 调制带宽均明显增大; 在 100 A/cm² 的注入电流密度下, 400, 455, 525 nm 三种发光波长 LED 的 3 dB 调制带宽分别为 62, 88, 376 MHz; 在相同的电流密度下, LED 的 3 dB 调制带宽随着 In 组分 (In 元素的原子数分数占 In 元素与 Ga 元素的原子数分数总和的比) 的增加而增大; 由于 525 nm 波长 LED 的 In 组分高, 有效有源区厚度薄, 所以源区载流子浓度高, 在大电流密度下 525 nm 绿光 LED 的 3 dB 调制带宽达到 376 MHz。

关键词 光学器件; 镓氮; 发光二极管; 载流子复合机制; 调制带宽

中图分类号 TN2; TN3

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2123001

Effect of Carrier Recombination Mechanism on Modulation Bandwidth of InGaN-Based LEDs with Different Emission Wavelengths

Zhao Yongbing*, Qian Chenchen

School of Physics and Electronics, Yancheng Teachers University, Yancheng, Jiangsu 224007, China

Abstract The traditional ABC model is used to study the dynamic recombination process of carriers in InGaN quantum wells. Based on the traditional ABC model, the carrier recombination rate and lifetime are calculated and the relationship between the 3 dB modulation bandwidth of InGaN-based LEDs with different emission wavelengths and the carrier recombination mechanism is studied. The calculation and analysis results show that under the same injection current, with the reduction in the effective active region thickness and quantum well layer thickness, the 3 dB modulation bandwidth of the 400 nm near-ultraviolet, 455 nm blue, and 525 nm green light-emitting wavelength of LEDs increases significantly. At the injection current density of 100 A/cm², the 3 dB modulation bandwidth of the 400, 455, and 525 nm wavelength LEDs are 62, 88, and 376 MHz, respectively. At the same current density, the 3 dB modulation bandwidth of LED increases with the increase of the In composition (the ratio of the atomic number fraction of In element to the sum of the atomic number fraction of In and Ga elements). Moreover, because of the high In composition of the 525 nm wavelength LED, the thickness of effective active region is small and the carrier concentration in the active region is high. Moreover, the 3 dB modulation bandwidth of the 525 nm green LED reaches 376 MHz at high current density.

Key words optical devices; InGaN; light-emitting diodes; carrier recombination mechanism; modulation bandwidth

OCIS codes 230.0250; 230.3670

收稿日期: 2021-01-19; 修回日期: 2021-02-16; 录用日期: 2021-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(61904158)

通信作者: *zhaoyb@yctu.edu.cn

1 引言

InGaN 基 LED (Light-Emitting Diode) 已经广泛应用于通用照明、LCD (Liquid Crystal Display) 显示背光、户外显示、景观照明以及汽车照明等领域^[1-3]。由于 LED 属于电子器件,除了在照明和显示领域应用以外,还可以应用在可见光通信领域^[4]。相比于传统的无线通信,可见光通信具有带宽宽、安全性高以及无电磁干扰的特点,同时还具备较低的制备成本等优点。实现高速、高质量的可见光通信取决于 LED 的调制带宽,而 LED 的调制带宽取决于其载流子复合寿命和寄生电容^[5]。

文献[6-10]中的传统 ABC 模型(A 为 Shockley-Read-Hall 复合系数,B 为辐射复合系数,C 为俄歇复合系数)主要用于研究 InGaN 量子阱中载流子的复合动态过程,本文基于传统 ABC 模型计算载流子的复合速率和复合寿命,研究不同发光波长 InGaN 基 LED 的 3 dB 调制带宽与载流子复合机制的关系^[11-12]。

2 实验

本文采用本课题组先前使用的实验样品^[7],样品制备过程如下。采用金属有机化学气相沉积 (MOCVD) 技术在 2 inch (1 inch=2.54 cm) C 平面 (0001) 图形化蓝宝石衬底上分别外延生长近紫外 (400 nm)、蓝光 (455 nm) 以及绿光 (525 nm) InGaN 基 LED。LED 的外延层结构为 3.0 μm 厚的未掺杂 GaN 层、3.0 μm 厚的掺硅 n 型 GaN 层、InGaN/GaN 多量子阱 (MQWs)、20 nm 厚的 p 型 Al_{0.15}Ga_{0.85}N 电子阻挡层以及 250 nm 厚的 p 型 GaN 层。X 射线衍射 (XRD) 测试结果表明,近紫外、蓝光以及绿光 LED 的量子阱中 In 组分 (In 元素的原子数分数占 In 元素与 Ga 元素的原子数分数总和的比) 分别为 6%、15% 和 30%^[13]。铟锡氧化物 (ITO) (厚度为 100 nm) 沉积在 p 型 GaN 上作为欧姆接触和电流扩展层,将 Ti、Al、Ni 和 Au (厚度分别为 10, 100, 100, 100 nm) 作为 n 型接触电极。大功率 LED 器件的尺寸为 1 mm×1 mm。

3 分析与讨论

在传统的 ABC 模型中,内量子效率 (IQE)^[6-8] 可表示为

$$I_{\text{IQE}} = \frac{Bn^2}{An + Bn^2 + Cn^3}, \quad (1)$$

式中:A 为 Shockley-Read-Hall (SRH) 复合系数;B 为辐射复合系数;C 为俄歇复合系数;n 为 LED 有源区内的载流子浓度。

同时,IQE 的一阶近似的表达式^[6-8]为

$$I_{\text{IQE}} = V_{\text{ac}} B n^2 / (I/q), \quad (2)$$

式中: V_{ac} 为 LED 的有源区体积;I 为注入 LED 有源区的电流;q 为基本电子电量。

文献[14]报道载流子在有源区的分布是不均匀的,通常局限于富 In 区域,因此实际的有效有源区体积 (V_{eff}) 比真实的物理体积 (V_{ac}) 小。在先前的研究中^[7],获得 400 nm 近紫外、455 nm 蓝光以及 525 nm 绿光 LED 的有效有源区厚度 D_{eff} 分别为 2.07, 1.27, 0.24 nm, 而实际的量子阱有源区厚度为 3 nm, 特别是长波长的绿光 LED 的有效有源区厚度仅为 0.24 nm。

因此,LED 器件的有源区中载流子浓度的表达式^[6-8]为

$$n = \frac{\sqrt{I_{\text{IQE}} \cdot I}}{\sqrt{BqV_{\text{eff}}}}. \quad (3)$$

在以前的研究报告中^[7],通过拟合分析分别得到不同波长 LED 的 ABC 模型参数数值,如表 1 所示。

表 1 LED 在不同波长下的 ABC 模型参数数值^[7]

Table 1 ABC model parameters of LED at different wavelengths^[7]

Wavelength /nm	A /s ⁻¹	B / (cm ³ ·s ⁻¹)	C / (cm ⁶ ·s ⁻¹)
400	6.07×10 ⁶	3.00×10 ⁻¹¹	0.80×10 ⁻³⁰
455	8.65×10 ⁶	3.00×10 ⁻¹¹	1.00×10 ⁻³⁰
525	3.07×10 ⁷	3.00×10 ⁻¹¹	1.66×10 ⁻³⁰

使用基于 InGaN 量子阱中载流子复合的传统 ABC 模型来计算载流子的复合速率 $R(n)$, 表达式^[12]为

$$R(n) = An + Bn^2 + Cn^3. \quad (4)$$

载流子的复合寿命 τ 与复合速率的关系^[12]可表示为

$$\tau = \frac{n}{R(n)}. \quad (5)$$

LED 的调制带宽 $f_{3\text{dB}}$ 与载流子复合寿命的关系^[11-12]可表示为

$$f_{3\text{dB}} = 1/2\pi\tau. \quad (6)$$

将(4)式和(5)式代入(6)式^[12],可以得到

$$f_{3\text{dB}} = (A + Bn + Cn^2)/2\pi. \quad (7)$$

基于传统 ABC 模型进行理论计算分析,图 1 为在不同的有效有源区厚度 D_{eff} (0.24~3.00 nm) 下不

同波长 LED 的 3 dB 调制带宽与注入电流的关系, 图 2 为在不同的量子阱层有源区厚度 Q_w (3~6 nm) 下不同波长 LED 的 3 dB 调制带宽与注入电流的关系。从图 1 可以看到, 随着注入电流的增大, 三种发光波长 LED 的 3 dB 调制带宽均明显增大, 但是在相同的有效有源区厚度下, 相比于 400 nm 和 455 nm 波长 LED, 525 nm 波长 LED 的 3 dB 调制带宽较宽, 在 100 A/cm^2 的注入电流密度下, 3 dB 调制带宽最宽为 376 MHz。同时从图 1 也可以看到, 在

相同的注入电流下, 三种发光波长 LED 的 3 dB 调制带宽均随着有效有源区厚度的增加而明显下降。从图 2 可以看到, 在相同的注入电流下, 随着 InGaN 量子阱宽度的增加, 三种发光波长 LED 的 3 dB 调制带宽均有所下降, 在 100 A/cm^2 的注入电流密度下, 400 nm 波长 LED 的 3 dB 调制带宽从 62 MHz 下降到 41 MHz, 455 nm 波长 LED 的 3 dB 调制带宽从 88 MHz 下降到 57 MHz, 525 nm 波长 LED 的 3 dB 调制带宽从 376 MHz 下降到 220 MHz。

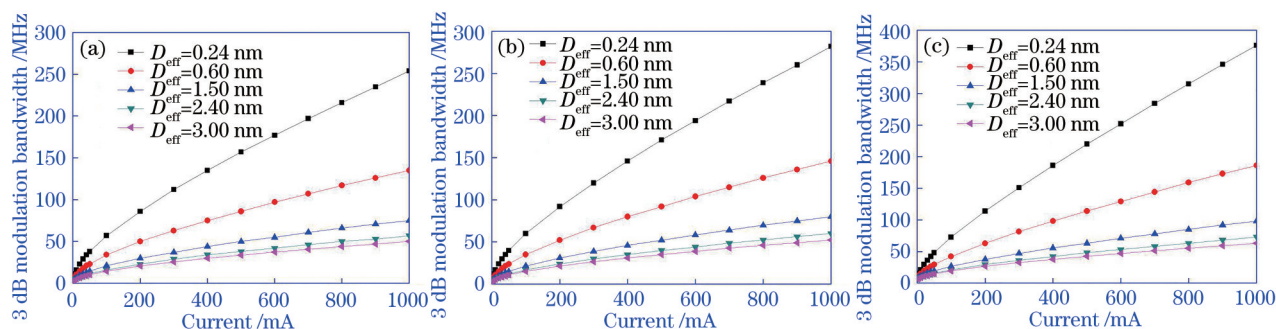


图 1 不同发光波长的 LED 在不同有效有源区厚度下的 3 dB 调制带宽与注入电流的关系。(a) 400 nm; (b) 455 nm; (c) 525 nm
Fig. 1 Relationship between 3 dB modulation bandwidth and injection current of LEDs with different luminous wavelengths under different effective active area thickness thickness. (a) 400 nm; (b) 455 nm; (c) 525 nm

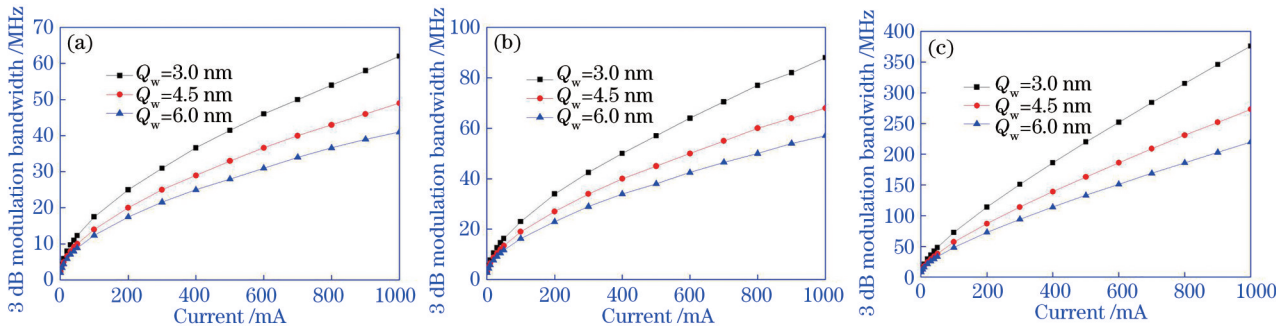


图 2 不同发光波长的 LED 在不同量子阱层有源区厚度下的 3 dB 调制带宽与注入电流的关系。(a) 400 nm; (b) 455 nm; (c) 525 nm
Fig. 2 Relationship between 3 dB modulation bandwidth and injection current of LEDs with different luminous wavelengths under different thickness of active region of quantum well layer. (a) 400 nm; (b) 455 nm; (c) 525 nm

在先前的研究报道中, 400, 455, 525 nm 波长 LED 的 D_{eff} 分别为 2.07, 1.27, 0.24 nm^[7]。基于传统的 ABC 模型进行理论计算, 三种发光波长 LED 的 3 dB 调制带宽与电流的关系如图 3 所示, 三种发光波长 LED 在不同的电流密度下, 3 dB 调制带宽与 In 组分的关系如图 4 所示。从图 3 可以看到, 在 100 A/cm^2 的注入电流密度下, 400, 455, 525 nm 波长 LED 的 3 dB 调制带宽分别为 62, 88, 376 MHz, 525 nm 波长 LED 的 3 dB 调制带宽非常宽。从图 4 可以看到, 在相同的电流密度下, LED 的 3 dB 调制带

宽随着 In 组分的增加而增大, 特别是在大电流密度下, 3 dB 调制带宽的增加趋势较快。从图 3 和图 4 可以看到, 得益于 525 nm 波长 LED 的高 In 组分, 所以其有效有源区的厚度非常薄, 从而载流子浓度高, 特别是在大电流密度下 525 nm 波长 LED 的 3 dB 调制带宽非常宽。若实现宽的 3 dB 调制带宽, 可以降低有效有源区的厚度或者采用窄量子阱, 但是与降低 LED 的 droop 效应 (LED 的发光效率随着注入电流密度的增大而下降) 是矛盾的, 如何既获得宽的 3 dB 调制带宽, 又降低 droop 效应, 成为今后的研究方向。

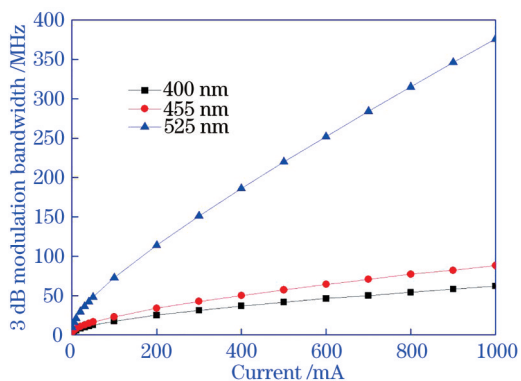


图 3 不同发光波长的 LED 的 3 dB 调制带宽与电流的关系
Fig. 3 Relationship between current and 3 dB modulation bandwidth of LED with different emitting wavelengths

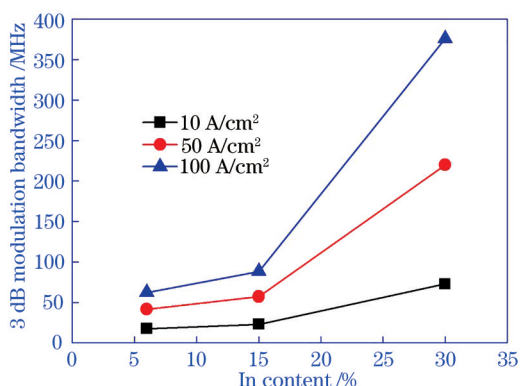


图 4 不同电流密度下 LED 的 3 dB 调制带宽与 In 组分的关系
Fig. 4 Relationship between 3 dB modulation bandwidth of LED and In component under different current densities

4 结 论

使用基于 InGa_N 量子阱中载流子复合的传统 ABC 模型计算载流子的复合速率和复合寿命, 研究不同发光波长 InGa_N 基 LED 的 3 dB 调制带宽与载流子复合机制的关系。计算分析结果表明, 随着注入电流的增大, 400, 455, 525 nm 发光波长 LED 的 3 dB 调制带宽均明显增大, 但是在相同的有效有源区厚度下, 相比于 400 nm 和 455 nm 波长 LED, 525 nm 波长 LED 的 3 dB 调制带宽最宽, 在 100 A/cm² 的注入电流密度下, 3 dB 调制带宽最宽为 376 MHz。在相同的注入电流下, 三种发光波长 LED 的 3 dB 调制带宽随着有效有源区厚度和 InGa_N 量子阱宽度的增加而明显下降。在相同的电流密度下, LED 的 3 dB 调制带宽随 In 组分的增加而增大, 特别是在大电流密度下, 3 dB 调制带宽的增加趋势较快。得益于 525 nm 波长 LED 的高 In 组分, 所以其有效有源区的厚度非常薄, 从而载流子

浓度高, 特别是在大电流密度下 525 nm 波长 LED 的 3 dB 调制带宽非常宽。

参 考 文 献

- [1] Liu S B, Wang G X, Wu X M, et al. Electro-static failure evolution of GaN-based LED thin film chip with Ag mirrors[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(10): 1023001.
刘时彪, 王光绪, 吴小明, 等. 集成 Ag 基反射镜的 GaN 基 LED 薄膜芯片的静电失效演变[J]. 光学学报, 2020, 40(10): 1023001.
- [2] Tian H J, Hu Y, Chen T, et al. Spectral optimization of a mixed white light-emitting diode (LED) cluster comprising a red/green/blue/cyan/yellow/warm white LED[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(8): 0823001.
田会娟, 胡阳, 陈陶, 等. 基于红/绿/蓝/青/黄/暖白 6 色 LED 的白光光谱优化方法[J]. 光学学报, 2020, 40(8): 0823001.
- [3] Chao P F, Xu Y C, Liu C H, et al. Optimization and preparation of GaN-based LED chip electrode structure[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(7): 072301.
晁鹏飞, 许英朝, 刘春辉, 等. GaN 基 LED 芯片电极结构的优化及制备[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(7): 072301.
- [4] Komine T, Nakagawa M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2004, 50(1): 100-107.
- [5] Liu Y S, Smith D A. The frequency response of an amplitude-modulated GaAs luminescence diode[J]. Proceedings of the IEEE, 1975, 63(3): 542-544.
- [6] Li H J, Li P P, Kang J J, et al. Analysis model for efficiency droop of InGa_N light-emitting diodes based on reduced effective volume of active region by carrier localization[J]. Applied Physics Express, 2013, 6(9): 092101.
- [7] Li P P, Zhao Y B, Yi X Y, et al. Effects of a reduced effective active region volume on wavelength-dependent efficiency droop of InGa_N-based light-emitting diodes[J]. Applied Sciences, 2018, 8(11): 2138.
- [8] Zhao Y B, Li P P. Toward ultra-low efficiency droop in C-plane polar InGa_N light-emitting diodes by reducing carrier density with a wide InGa_N last quantum well[J]. Applied Sciences, 2019, 9(15): 3004.
- [9] Karpov S. ABC-model for interpretation of internal

- quantum efficiency and its droop in III-nitride LEDs: a review[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2015, 47(6): 1293-1303.
- [10] Verzellesi G, Saguatti D, Meneghini M, et al. Efficiency droop in InGaN/GaN blue light-emitting diodes: physical mechanisms and remedies[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114(7): 071101.
- [11] Zhan S Z. High frequency modulation characteristics of GaAs-GaAlAs DH LEDs for optical fiber communication[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1984, 11(5): 283-289.
詹素真. 光纤通信用 GaAs-GaAlAs DH LED 的高频调制特性[J]. *中国激光*, 1984, 11(5): 283-289.
- [12] Yang J, Zhu S X, Yan J C, et al. Effect of carrier recombination mechanism on modulation bandwidth of InGaN multiple-quantum-wells blue light emitting diodes[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(2): 202-207.
杨杰, 朱邵歆, 闫建昌, 等. 载流子复合机制对 In-GaN 多量子阱蓝光 LED 调制带宽的影响[J]. *发光学报*, 2018, 39(2): 202-207.
- [13] Dai Q, Shan Q F, Wang J, et al. Carrier recombination mechanisms and efficiency droop in GaInN/GaN light-emitting diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(13): 133507.
- [14] Watson-Parris D, Godfrey M J, Dawson P, et al. Carrier localization mechanisms in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ quantum wells[J]. *Physical Review B*, 2011, 83(11): 115321.