

发光二极管归一化光谱模型的修正

文玉梅 赵学梅 李 平 文 静 张 敏

(重庆大学光电工程学院光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要 受自吸收等因素的影响,由发光二极管(LED)归一化光谱模型得到的光谱与实测 LED 光谱之间存在差异。为得到与实测 LED 光谱相吻合的归一化光谱模型,将由归一化光谱模型得到的理论光谱与实测光谱相减得到近似的自吸收谱。通过分析自吸收谱的峰值强度和半峰全宽与温度之间的关系以及其峰值能量与实测光谱峰值能量之间的定量关系,结合 LED 光谱的高斯模型和归一化光谱模型给出了自吸收谱的拟合表达式,并作为归一化光谱模型的修正项,对归一化光谱模型进行修正。在不同测试温度下的实验结果表明修正后的平均模型误差小于 4%,证明由修正后的归一化光谱模型得到的光谱与实测光谱相吻合。

关键词 光谱学;归一化光谱模型修正;自吸收效应;发光二极管;自吸收谱

中图分类号 TN364+.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0130001

Modification of Light Emitting Diode's Normalized Spectrum Model

Wen Yumei Zhao Xuemei Li Ping Wen Jing Zhang Min

(Key Laboratory for Optoelectronic Technologies and Systems, Ministry of Education,
College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract Primarily due to self-absorption, there is obvious discrepancy between the spectra from the light emitting diode's (LED) normalized model and the actually measured spectra. In order to make the model fit the actual spectrum, the modification of LED's normalized spectrum model is investigated. The self-absorption spectrum is gotten from the subtraction of the spectrum from the normalized spectrum model and the actual spectrum. Through the analysis of the dependence of the peak light intensity and the full width at half maximum in self-absorption spectrum on temperature and the relation between its peak energy and the actual spectrum's, the self-absorption spectrum's expression is provided. The fitting expression is obtained by combining Gaussian spectrum model and the normalized spectrum model. The expression is used to modify the normalized spectrum model. Experimental results show that errors by the modified model are less than 4% at various temperatures, thus the spectra from the modified normalized model agree with the actual ones.

Key words spectroscopy; modification of normalized spectrum model; self-absorption effect; light emitting diode (LED); self-absorption spectrum

OCIS codes 300.6170; 300.6470; 230.3670; 260.3800; 300.1030

1 引 言

光谱是表征发光二极管(LED)的重要参数,理论上只要已知器件的禁带宽度和结温就可以通过归一化光谱线形函数(也称为归一化光谱模型)计算出 LED 的光谱。然而根据载流子复合发光过程导出的 LED 归一化光谱线形函数在适用范围内(光谱的

高能侧)得到的光谱与 LED 发光光谱存在差异。A. Mooradian 等^[1]指出仅在 LED 发光光谱的高能侧受自吸收的影响,如果考虑自吸收效应,理论估计与实验结果会符合得更好。L. Bechou 等^[2]指出自吸收的影响使由归一化光谱模型得到的光谱与实测光谱在高能侧边缘部分存在差异,但并未给出修正

收稿日期: 2011-04-12; **收到修改稿日期**: 2011-07-23

基金项目: 国家自然科学基金(60676031)和重庆市自然科学基金(CSTC,2009AC4186)资助课题。

作者简介: 文玉梅(1964—),女,教授,博士生导师,主要从事智能化光电仪器和传感技术等方面的研究。

E-mail: ymwen@cqu.edu.cn

该光谱模型的方法。沈海平等^[3]介绍了一种改进的LED光谱高斯模型,展宽了光谱模型的底部,使改进后的高斯模型与实测光谱吻合性提高,模型平均误差由原来的12.6%降低为9.1%。S. Chhajer等^[4]提出用另一高斯模型来表示LED的发光光谱,但并未给出具体的结果。自吸收谱与实测LED发光光谱具有相似的谱形,本文提出将由归一化光谱模型得到的光谱与实测LED发光光谱的高能侧相减得到近似的自吸收谱 $S_{sa}(\lambda)$,在此基础上分析自吸收谱随温度变化的规律,建立两者之间的函数关系。研究发现对自吸收谱中波长小于其峰值波长的部分(称为自吸收谱的高能侧) $S_{sah}(\lambda)$ 可用归一化光

谱模型进行很好的拟合,而对其高于其峰值波长部分(称为自吸收谱的低能侧) $S_{sal}(\lambda)$ 则可用文献[3]中的高斯模型进行很好的拟合。结合归一化光谱模型和文献[3]中的高斯模型给出了自吸收谱的拟合表达式,以此作为修正项对LED归一化光谱模型进行修正。对直接带隙AlGaInP材料黄光和红光LED样品的光谱测试表明由修正后的归一化光谱模型得到的光谱与实测LED发光光谱相吻合,且在不同温度下的平均模型误差分别仅为3.86%和3.78%。

2 修正原理

直接带隙材料LED归一化光谱表达式为

$$\frac{A(\hbar\omega)}{A(\hbar\omega)|_{\hbar\omega_{\text{peak}}}} = \sqrt{2}e^{1/2} \left[\frac{\hbar\omega - E_g(T)}{k_B T} \right]^{1/2} \exp\left[-\frac{\hbar\omega - E_g(T)}{k_B T} \right], \quad (\hbar\omega \geq E_g(T) + k_B T/2) \quad (1)$$

式中 \hbar 为约化普朗克常量, ω 为光子频率, T 为PN结的开尔文温度, k_B 为波尔兹曼常量, $E_g(T)$ 为温度 T 时材料的禁带宽度^[2]。LED发射光谱的峰值能量为^[5]

$$E_p = \hbar\omega_{\text{peak}} = E_g(T) + k_B T/2, \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式得到与实测光谱峰值重合的归一化光谱表达式

$$\frac{A(\hbar\omega)}{A(\hbar\omega)|_{\hbar\omega_{\text{peak}}}} = \sqrt{2}e^{1/2} \left(\frac{\hbar\omega - E_p}{k_B T} + \frac{1}{2} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{\hbar\omega - E_p}{k_B T} - \frac{1}{2} \right), \quad \hbar\omega \geq E_p \quad (3)$$

归一化光谱的推导仅仅考虑了载流子复合的自发辐射情况,实际上自吸收的影响使由归一化光谱模型得到的光谱与实测光谱之间存在差异。自吸收效应是指电子-空穴对复合产生的光子在出射的过程中被再吸收,重新产生另外电子-空穴对。这一过程甚至可以反复发生,导致所谓的光子循环^[6,7]。自吸收会导致出射光子数量降低,限制外量子效率提高^[8],且会改变LED发光光谱的形状^[9]。由于夫兰克-康登(Franck-Condon)效应的存在^[6],自吸收产生的光子能量小于吸收的光子能量,而能量较低的光子不容易被再吸收,导致自吸收谱不对称。由归一化光谱模型得到的光谱与实测光谱高能侧相减得到近似的自吸收谱,与LED发光光谱具有相似的谱形,可用已有的LED光谱模型对自吸收谱进行拟合。当用(3)式表示的LED归一化光谱模型对自吸收谱进行拟合时,表达式里的参数均变为自吸收谱的相应参数,据此表达式的适用条件可知其只适用于 $\hbar\omega \geq E_{p(sa)}$,即自吸收谱的高能侧,而对自吸收谱的低能侧 $\hbar\omega < E_{p(sa)}$ 这一部分则不适用。由文献[3]知,LED发光光谱也可用高斯模型表示,其表达式为

$$S(\lambda) = I \exp\left[-3.2213 \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda} \right)^2 \times \exp\left(-0.3 \left| \frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda} \right| \right) \right], \quad (4)$$

式中 I 为相对光强, λ_0 和 $\Delta\lambda$ 分别为LED发光光谱的峰值波长和半峰全宽。高斯模型是一对称模型^[3],而自吸收谱是不对称的,若用其对自吸收谱进行拟合,则不一定能恰当拟合。综合以上因素,结合LED光谱的归一化光谱模型和高斯模型对自吸收谱进行拟合。拟合时涉及到的参数有自吸收谱的峰值强度 I_{sa} 、峰值能量 $E_{p(sa)}$ 、半峰全宽 $\Delta\lambda_{sa}$ 和峰值波长 $\lambda_{\text{peak}(sa)}$ 。依据(2)式,设自吸收谱的峰值能量满足

$$E_{p(sa)} = \hbar\omega_{\text{peak}(sa)} = E_g(T) + nk_B T, \quad (5)$$

式中 $\omega_{\text{peak}(sa)}$ 表示自吸收谱峰值波长处的光子频率, n 为与材料有关的系数。将(2)式代入(5)式得

$$E_{p(sa)} = E_p - k_B T/2 + nk_B T, \quad (6)$$

据(6)式得自吸收谱的峰值波长

$$\lambda_{\text{peak}(sa)} = hc / (E_p - k_B T/2 + nk_B T), \quad (7)$$

相同材料和器件结构的LED的发光效率参数 n 值相同。通过研究同种LED中多个不同实验样本自吸收谱的峰值能量随温度变化的规律得到此类

LED 的 n 的经验值,则自吸收谱的峰值能量和峰值波长均可由对应温度下实测光谱的峰值能量计算得出,且自吸收谱的峰值能量比对应实测光谱的峰值能量高 $(n-1/2)k_B T$ 。温度升高导致半导体材料的禁带宽度变窄和光谱展宽^[10,11]。由于禁带宽度变窄,使得光子能量大于禁带宽度的光子数增多,自吸收效应增强。对大量 LED 实验样本的实验表明自吸收谱的峰值强度和半峰全宽随温度的变化呈近似线性关系。用一次函数关系去拟合它们之间的关

系,拟合函数分别为

$$I_{sa}(T) = k_1 T + b_1, \quad (8)$$

$$\Delta\lambda_{sa}(T) = k_2 T + b_2, \quad (9)$$

可以通过实测同一种 LED 多个不同样本在不同温度下的自吸收谱峰值强度和半峰全宽,得到此类 LED 的 k_1, b_1, k_2 和 b_2 的经验值。得到这些参数的函数表达式后,则自吸收谱高能侧 $S_{sah}(\lambda)$ 和低能侧 $S_{sal}(\lambda)$ 的拟合函数分别为

$$S_{sah}(\lambda) = I_{sa}(T) \sqrt{2} e^{1/2} \left[\frac{\hbar\omega - E_{p(sa)}(T)}{k_B T} + \frac{1}{2} \right]^{1/2} \exp \left[-\frac{\hbar\omega - E_{p(sa)}(T)}{k_B T} - \frac{1}{2} \right], \quad (10)$$

$$S_{sal}(\lambda) = I_{sa}(T) \exp \left\{ -3.2213 \left[\frac{\lambda - \lambda_{peak(sa)}(T)}{\Delta\lambda_{sa}(T)} \right]^2 \exp \left[-0.3 \left| \frac{\lambda - \lambda_{peak(sa)}(T)}{\Delta\lambda_{sa}(T)} \right| \right] \right\}. \quad (11)$$

得到自吸收谱的拟合函数表达式后将其作为归一化光谱模型的修正项,进而得到修正后的归一化光谱模型,则修正后的归一化光谱表达式为

当 $\lambda \leq \lambda_{peak(sa)}$ 时为

$$\frac{A(\hbar\omega)}{A(\hbar\omega)|_{\hbar\omega_{peak}}} = \sqrt{2} e^{1/2} \left(\frac{\hbar\omega - E_p}{k_B T} + \frac{1}{2} \right)^{1/2} \exp \left(-\frac{\hbar\omega - E_p}{k_B T} - \frac{1}{2} \right) - S_{sah}(\lambda), \quad (12)$$

当 $\lambda > \lambda_{peak(sa)}$ 时为

$$\frac{A(\hbar\omega)}{A(\hbar\omega)|_{\hbar\omega_{peak}}} = \sqrt{2} e^{1/2} \left(\frac{\hbar\omega - E_p}{k_B T} + \frac{1}{2} \right)^{1/2} \exp \left(-\frac{\hbar\omega - E_p}{k_B T} - \frac{1}{2} \right) - S_{sal}(\lambda), \quad (13)$$

根据(10)式和(11)式知,自吸收谱的拟合表达式与归一化光谱模型含有相同的参数,使用修正后模型,也只需要知道禁带宽度、温度,就可以估算出 LED 的发光谱。

3 实验

为了验证修正后模型和实际光谱的符合程度,对实际的 LED 样品进行了测试。试验样品为采用金属有机化合物化学气相沉淀(MOCVD)技术^[12,13]生长的 AlGaInP 材料多量子阱垂直结构的黄光和红光 LED 芯片,中心波长分别为 590.3 nm 和 622.6 nm。芯片面积为 $330 \mu\text{m} \times 330 \mu\text{m}$,厚度为 $100 \mu\text{m}$ 。为便于测量,LED 芯片被固定在引脚式封装的支架上,并引出正负电极。

实验装置如图 1 所示,LED 电致发光的驱动恒流源为 KEITHLEY 6221 型电流源,实验时注入 1 mA 的脉冲驱动电流,以降低对 LED 结温的影响^[14,15]。实验温度为 253~343 K,每次变化量为 10 K,用恒温箱实现温度控制(调节范围 233~523 K,精确度为 ± 0.5 K,温度均匀度小于等于 2 K),在稳定一定的时间以后,认为恒温箱的温度

就是 LED 的结温。用 Ocean Optics USB4000 型光纤光谱仪(探测范围为 200~1100 nm)采集 LED 的电致发光谱。

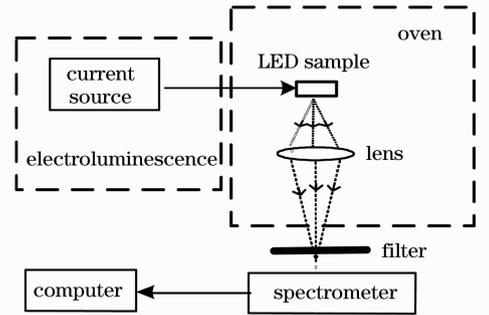


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

4 实验结果及分析

实验测得的黄光 LED Y1 的光谱如图 2 所示。由图 2 可知,随温度的升高 LED 光谱的峰值波长逐渐红移,峰值强度降低,这与文献[16~18]中的实验结果相符。由(3)式得到的归一化理论光谱如图 3 所示,显然在高能侧部分 $[\hbar\omega \geq E_g(T) + k_B T/2]$ 图 3 和图 2(b) 之间存在差异。图 3 和图 2(b) 高能

侧光谱相减得到近似的自吸收谱如图 4 所示。由图 4 可知,随温度的升高自吸收谱的峰值波长逐渐

红移,峰值强度增强。

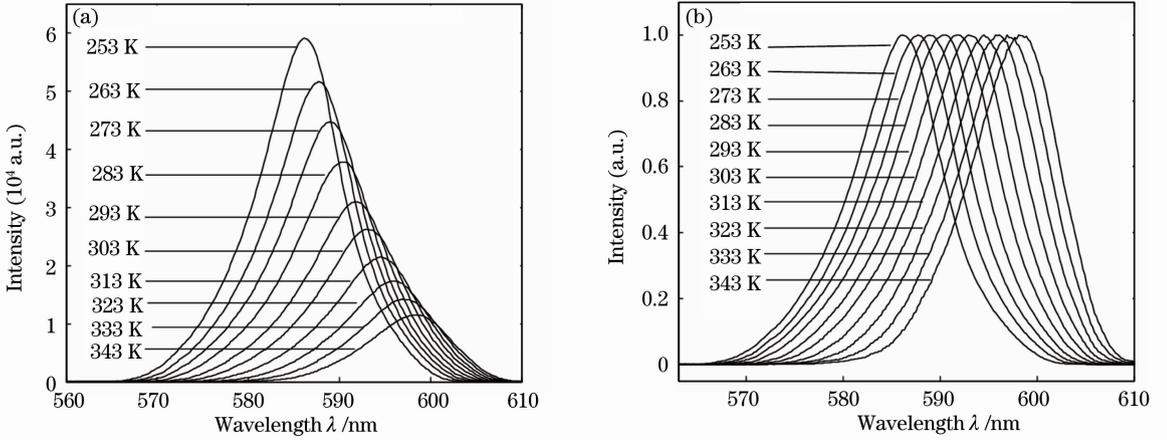


图 2 各种温度下的黄光 LED 的实测光谱。(a)原始谱;(b)归一化谱

Fig. 2 Measured spectra of yellow LED at various temperature. (a) Raw spectra; (b) normalized spectra

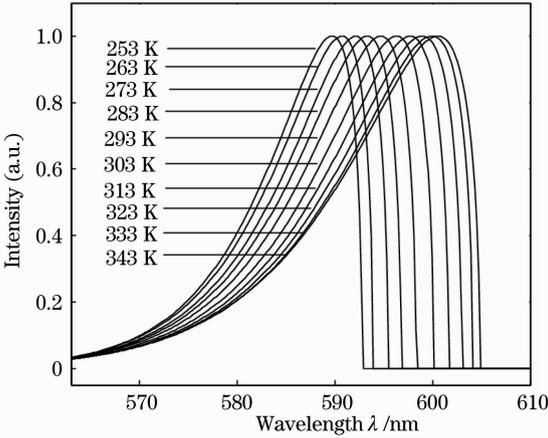


图 3 黄光 LED 的归一化模型预测谱

Fig. 3 Predicted spectra of yellow LED from the normalized spectral model

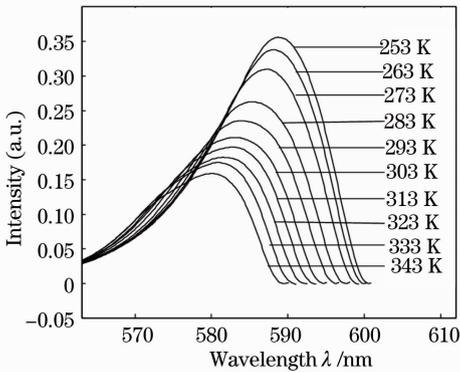


图 4 黄光 LED 的自吸收谱

Fig. 4 Self-absorption spectra of yellow LED

将 3 个黄光 LED 样本(Y1, Y2 和 Y3)的实测光谱和对应的自吸收谱的峰值能量代入(5)式计算得在不同温度下 n 在 1.95~2.05 之间,为使其具有通用性取 $n=2$ 。则自吸收谱的峰值能量为

$$E_{p(sa)} = E_g(T) + 2k_B T, \quad (14)$$

将(2)式代入(14)式得

$$E_{p(sa)} = E_p + 3k_B T/2, \quad (15)$$

据(15)式得自吸收谱的峰值波长 $\lambda_{peak(sa)}$ 为

$$\lambda_{peak(sa)} = hc / (E_p + 3k_B T/2), \quad (16)$$

由(15)式和(16)式可知,自吸收谱的峰值能量和峰值波长均可由对应温度下实测光谱的峰值能量计算得到,且自吸收谱的峰值能量高出对应实测光谱峰值能量 $3k_B T/2$ 。3 个黄光 LED 样本(Y1, Y2 和 Y3)的自吸收谱峰值强度和半峰全宽随温度的变化如图 5 所示,由图 5 可知,峰值强度和半峰全宽与温度之间具有近似的线性关系,拟合得到它们随温度变化的表达式为

$$I_{sa}(T) = 2.24 \times 10^{-3} T - 0.4272, \quad (17)$$

$$\Delta\lambda_{sa}(T) = 0.03277 T + 0.6591. \quad (18)$$

将黄光 LED 自吸收谱的峰值能量、峰值波长、峰值强度和半峰全宽随温度变化的表达式(15)~(18)式代入(10)式和(11)式得到对黄光 LED 自吸收谱通用的拟合表达式为

当 $\lambda \leq hc / (E_p + 3k_B T/2)$ 时

$$S_{sah}(\lambda) = (2.24 \times 10^{-3} T - 0.4272) \times \sqrt{2} e^{1/2} a^{1/2} \exp(-a), \quad (19)$$

当 $\lambda > hc / (E_p + 3k_B T/2)$ 时

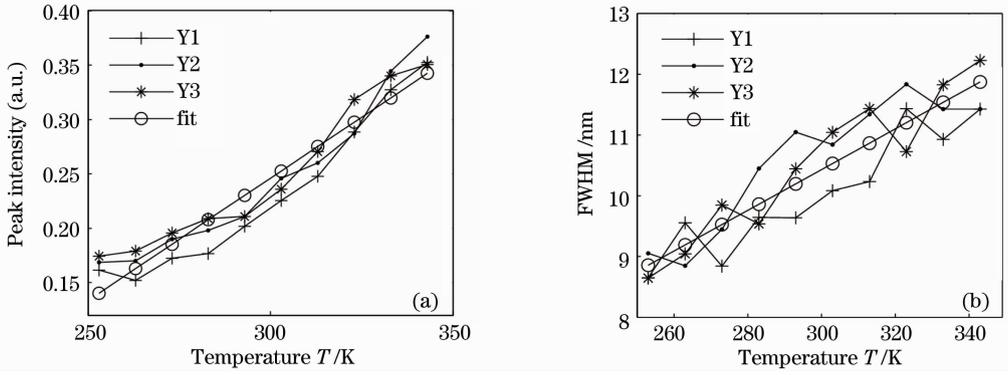


图5 黄光 LED 自吸收谱参数和温度的关系。(a)峰值强度;(b)半峰全宽

Fig. 5 Relation of self-absorption spectral parameters of yellow LED and temperature. (a) Peak intensity; (b) full width at half maximum

$$S_{\text{sal}}(\lambda) = (2.24 \times 10^{-3} T - 0.4272) \times \exp[-3.2213(b)^2 \exp(-0.3|b|)], \quad (20)$$

$$(19) \text{ 式和 } (20) \text{ 式中的 } a = \frac{\hbar\omega - E_p}{k_B T} - 1, \quad b =$$

$$\frac{\lambda - \hbar c(E_p + 3k_B T/2)}{0.03277T + 0.6591}.$$

在结温 323 K 时的自吸收谱的拟合结果和实测谱如图 6 所示。在 323 K 时黄光的归一化光谱和利用自吸收谱修正后的谱以及样品 Y1 的实测光谱如图 7(a) 所示。由图 7(a) 可知,修正后的归一化光谱与样品实测光谱的归一化光谱相吻合,整个测量温度范围内修正后的黄光 LED 归一化光谱如图 7(b) 所示。

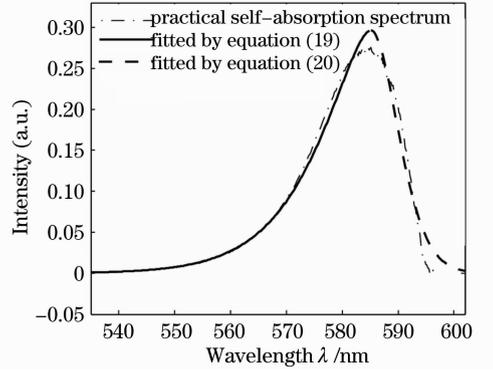


图6 323 K 时黄光自吸收谱

Fig. 6 Self-absorption spectra of yellow LED at 323 K

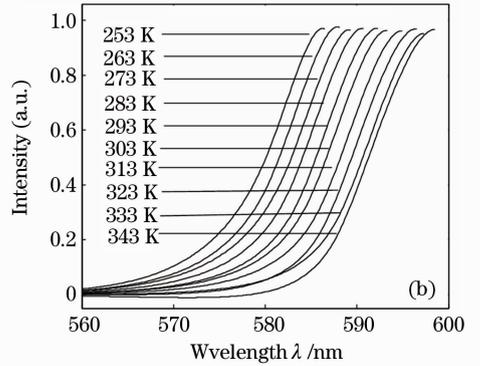
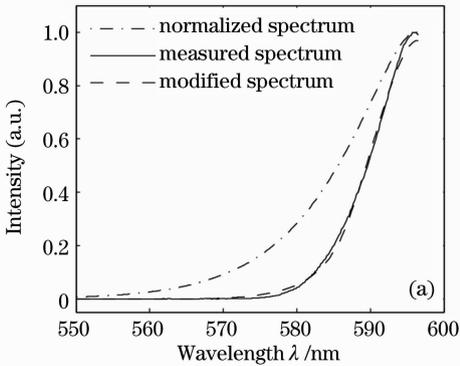


图7 黄光 LED 发光谱。(a) 323 K 的样本实测谱、归一化谱和修正谱;(b)不同温度时的修正谱

Fig. 7 Emission spectra of yellow LED. (a) Measured spectrum of a sample, normalized spectrum and the modified spectrum of sample Y1 at 323 K; (b) modified spectra at different temperatures

对红光 LED 按同样的方法对其修正,此时式中的 $I_{\text{sa}}(T)$ 和 $\Delta\lambda_{\text{sa}}(T)$ 分别满足

$$I_{\text{sa}}(T) = 1.50 \times 10^{-3} T - 0.2382, \quad (21)$$

$$\Delta\lambda_{\text{sa}}(T) = 0.04538T - 0.2352, \quad (22)$$

在 323 K 时,红光 LED 修正前后的归一化光谱以及样本 R3 的实测谱如图 8(a) 所示,可以看出,修正后

的归一化光谱与实测光谱相吻合,整个测量温度范围内修正后的归一化光谱如图 8(b) 所示。

修正后的归一化光谱模型的误差为^[3]

$$\Delta S = \frac{\int |S(\lambda)_{\text{real}} - S(\lambda)_{\text{model}}| d\lambda}{\int S(\lambda)_{\text{real}} d\lambda} \times 100\%, \quad (23)$$

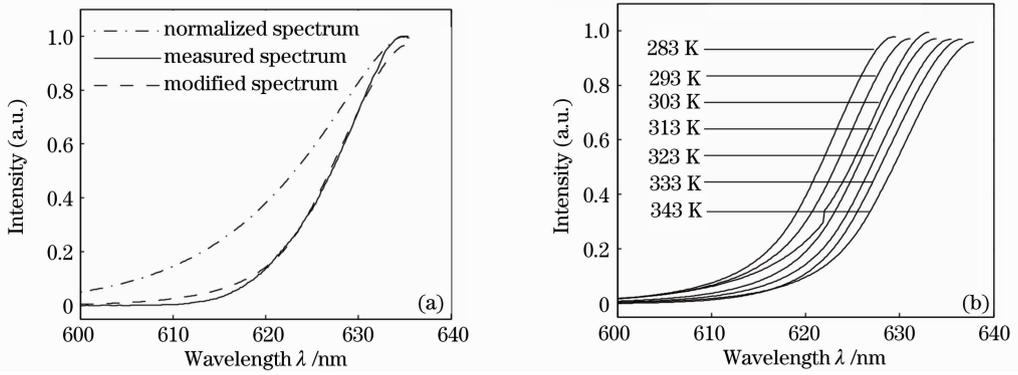


图 8 红光 LED 发光谱。(a) 323 K 时的样本实测谱、归一化谱和修正谱；(b) 不同温度时的修正谱
Fig. 8 Emission spectra of red LED. (a) Measured spectrum of a sample, the normalized spectrum and the modified spectrum of sample R3 at 323 K; (b) modified spectra at different temperatures

通过计算可得黄光 LED 和红光 LED 由修正后的归一化光谱模型得到的光谱与实测光谱在不同温度下的平均误差分别为 3.86% 和 3.78%。由此可见由修正后的归一化光谱模型得到的光谱与实测光谱吻合性很好。修正前, 由于归一化光谱模型与实测光谱之间存在差异, 使得通过归一化光谱模型对禁带宽度、结温等参数的估计不准确。得到与实测光谱相吻合的修正后的归一化光谱模型后, 从实测光谱中估计 LED 的禁带宽度、结温等参数会更加准确。

5 结 论

通过实测同种 LED 的多个样本在不同温度下的光谱, 可以分析出 LED 的自吸收谱和温度的关系, 由此给出 LED 自吸收谱的拟合模型。模型中的变量与原归一化光谱模型中的变量相同, 将自吸收谱的拟合模型当作归一化光谱模型的修正项, 可以弥补归一化光谱推导过程中忽略的自吸收效应。修正后的归一化光谱和修正前的模型一样, 只需要禁带宽度和结温, 就可以算出 LED 的发光谱, 估算光谱和实测光谱基本吻合, 误差小于 4%。这样也可以依据修正后的谱模型, 从实测光谱中比较准确地估算出结温、禁带宽度等 LED 基本参数。同时, 在分析出自吸收谱的基本性质随温度的变化规律后, 可以寻求方法控制自吸收效应, 这对于提高 LED 的外量子效率和合理选择 LED 材料以及设计其结构有重要指导意义。

参 考 文 献

- 1 A. Mooradian, H. Y. Fan. Recombination emission in InSb [J]. *Phys. Rev.*, 1966, **148**(2): 873~885
- 2 L. Bechou, O. Rehioui, Y. Deshayes *et al.*. Measurement of the thermal characteristics of packaged double-heterostructure light emitting diodes for space application using spontaneous optical

- spectrum properties [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2008, **40**(4): 589~601
- 3 Shen Haiping, Feng Huajun, Pan Jianguan *et al.*. Mathematical model for LED spectra and application[C]. About CIE26th-China Illuminating Engineering Society Annual Meeting Proceedings, 2005, 83~85
- 沈海平, 冯华君, 潘建根等. LED 光谱数学模型及其应用[C]. 走进 CIE26th—中国照明学会(2005)学术年会论文集, 2005, 83~85
- 4 S. Chhajed, Y. Xi, Th. Gessmann *et al.*. Junction temperature in light-emitting diodes assessed by different methods [C]. *SPIE*, 2005, **5739**: 16~24
- 5 A. Keppens, W. R. Ryckaert, G. Deconinck *et al.*. Modeling high power light-emitting diode spectra and their variation with junction temperature [J]. *J. Appl. Phys.*, 2010, **108**(4): 043104
- 6 Sheng Xuechu. Optical Spectra and Properties of Semiconductor [M]. Beijing: Science Press, 1997. 97~111, 277~283
- 沈学础. 半导体光谱和光学性质[M]. 北京: 科学出版社, 1997. 97~111, 277~283
- 7 J. L. Balenzategui, A. Marti. Detailed modeling of photon recycling; application to GaAs solar cell [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2006, **90**(7-8): 1068~1088
- 8 P. Altieri, A. Jaeger, R. Windisch *et al.*. Internal quantum efficiency of high-brightness AlGaInP light-emitting devices [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **98**(8): 086101
- 9 D. C. Johnson, I. M. Ballard, K. W. J. Barnham *et al.*. Observation of photon recycling in strain-balanced quantum well solar cells [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(21): 2113505
- 10 S. Chhajed, Y. Xi, Y.-L. Li *et al.*. Influence of junction temperature on chromaticity and color-rendering properties of trichromatic white-light sources based on light-emitting diodes [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **97**(5): 054506
- 11 Su Liwei, You Da, Cheng Haiying *et al.*. Characterization of high-power GaN-based green LED on Si substrate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 1066~1069
- 苏丽伟, 游达, 程海英等. Si 衬底功率型 GaN 基绿光 LED 性能 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 1066~1069
- 12 C. Lee, M. Wu, W. Lin. The influence of window layers on the performance of 650 nm AlGaInP/GaN multi-quantum-well light-emitting diodes [J]. *J. Crystal Growth*, 1999, **200**(3-4): 382~390
- 13 P. X. Li, L. Wang, S. Q. Li *et al.*. MOCVD growth of AlGaInP/GaN quantum well laser diode with asymmetric cladding structure for high power applications [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(6): 489~491

- 14 J. C. Zhang, Y. H. Zhu, T. Egawa *et al.*. Influence of pulse width on electroluminescence and junction temperature of AlInGaN deep ultraviolet light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(19): 191917
- 15 G. X. He, L. H. Zheng. A model for LED spectra at different drive currents [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(11): 1090~1094
- 16 L. Li, P. Li, Y. Wen *et al.*. Temperature dependences of photoluminescence and electroluminescence spectra in light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **94**(26): 261103
- 17 Y. Xi, J.-Q. Xi, Th. Gessmann *et al.*. Junction and carrier temperature measurement in deep-ultraviolet light-emitting diodes using three different methods [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(3): 031907
- 18 Chen Huanting, Lü Yijun, Chen Zhong *et al.*. Analysis of thermal spreading boards for high power AlGaInP red LEDs [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 805~810
陈焕庭, 吕毅军, 陈忠等. 大功率 AlGaInP 红光 LED 散热基板热分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 805~810

栏目编辑: 谢婧