

关于InGaN/GaN多量子阱结构内量子效率的研究*

王雪松¹⁾ 冀子武^{1)†} 王绘凝¹⁾ 徐明升²⁾
徐现刚²⁾ 吕元杰³⁾ 冯志红³⁾

1) (山东大学物理学院, 济南 250100)

2) (山东大学晶体材料国家重点实验室, 济南 250100)

3) (河北半导体研究所, 专用集成电路国家级重点实验室, 石家庄 050051)

(2013年11月3日收到; 2014年3月10日收到修改稿)

利用金属有机物化学气相沉积技术在蓝宝石衬底(0001)面生长了InGaN/GaN多量子阱结构, 并测量了其荧光(PL)光谱的峰位能量和发光效率对温度和注入载流子密度的依赖性. 结果显示, 该样品PL的峰位能量对温度的依赖性呈“S形”(降低-增加-降低), 并且最大发光效率出现在50 K左右. 前者反映了InGaN阱层中势能的非均匀性和载流子复合的局域特征, 后者则表明了将极低温度下的内量子效率设定为100%的传统界定方法应当被修正. 进一步的研究结果显示, 发光效率不仅是温度的函数, 同时也是注入载流子密度的函数. 为此我们对传统的基于PL光谱测量来确定某结构(或器件)内量子效率的方法进行了修正: 在不同温度下测量发光效率对注入载流子密度的依赖性, 并将发光效率的最大值设为内量子效率是100%, 这样, 其他温度点和注入载流子密度点所对应的内量子效率也就随之确定.

关键词: InGaN/GaN, 发光效率, 荧光峰位能量, 内量子效率

PACS: 78.55.-m, 73.21.-b, 73.61.-r, 78.60.-b

DOI: 10.7498/aps.63.127801

1 引言

近年来随着材料生长和器件制备技术的发展, 氮化镓(GaN)基发光二极管(LED)已经在半导体照明、信号指示及图像处理等领域进入了实用化阶段^[1-3]. 然而, 由于合适衬底的缺乏和生长工艺的成熟, 使得GaN基外延层结构中存在着很高的位错密度和很大的极化电场强度, 这些因素极大地降低了LED的发光效率^[4-6]. 因此, 如何提高GaN基LED的发光效率已成为人们关注的焦点^[7-9]. LED作为一种光源, 衡量其性能优劣的一个重要指标就是它的内量子效率. 内量子效率是指LED内部(即有源区)产生的光子数与注入电子

空穴对数的比值. 内量子效率主要取决于外延材料的品质, 如材料的能带、缺陷、杂质、垒晶组成及结构等因素. 对基于InGaN/GaN多量子阱结构的LED, 主要通过降低材料的缺陷密度、弱化InGaN阱层中的极化电场等途径来实现内量子效率的提高.

在实际研究中对于LED内量子效率的确定, 研究者们通常采取以下方法: 首先, 对于光致发光(PL)而言, 通常将低温条件下的PL内量子效率设定为100%^[10-12]. 该设定是基于这样一个共识: 在低温条件下非辐射复合中心被冻结, 载流子的辐射复合机制占主导地位^[13]; 如作为该方法的代表文献^[14, 15]即是将最低温度(8和10 K)下的内量子

* 高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20120131110006)、山东省科技发展计划(批准号: 2013GGX10221)和国家自然科学基金(批准号: 61306113)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: jiziwu@sdu.edu.cn

效率设为100%, 并通过公式

$$\eta_{\text{PL}} = C \frac{I_{\text{PL}}/E_{\text{PL}}}{I_{\text{EX}}/E_{\text{EX}}} \quad (1)$$

来计算内量子效率的, 其中 I_{PL} 和 I_{EX} 分别是PL强度和激发光强度, E_{PL} 和 E_{EX} 分别是PL的光子能量和激发光的光子能量, C 是一个与载流子的注入效率和光的提取效率相关的常数, 与激发功率密度和测量温度无关. 此外, 文献 [16] 也是将最低温度 (0 K) 下的内量子效率设为100%, 并通过公式

$$\eta(T) \equiv \frac{I_{\text{R}}(T)}{I_0} = \frac{\frac{1}{\tau_{\text{R}}(T)}}{\frac{1}{\tau(T)}}, \quad (2)$$

其中

$$\frac{1}{\tau(T)} = \frac{1}{\tau_{\text{R}}(T)} + \frac{1}{\tau_{\text{NR}}(T)}, \quad (3)$$

来计算内量子效率的, 其中 $I_{\text{R}}(T)$ 和 I_0 分别代表积分PL强度和激发功率, $\tau(T)$ 为载流子的复合寿命, 下标 R 和 NR 分别代表辐射复合和非辐射复合. 然而上述文献的所述方法只能适用于积分PL强度随温度升高而降低的情形. 另外, 对于电致发光 (EL) 的场合, 人们通常只是用EL效率 (EL强度与电流强度的比值) 来评价器件的电/光转换性能, 而这个EL效率与外量子效率成正比 [17,18]. 之所以较少涉及EL的内量子效率, 是因为确定EL内量子效率的实施过程要比PL复杂得多. 因为PL测量中的注入效率被认为是一个常数, 而EL测量中的注入效率是随注入电流和温度而变化的, 因此不能简单地借鉴上述确定PL内量子效率的方法来确定EL的内量子效率. 为此, 文献 [14] 给出了确定某温度、某注入电流条件下EL内量子效率的方法: 在该温度下测量该样品PL峰位能量随激发功率的依赖性, 找出与上述EL峰位能量相同的PL谱, 那么该PL谱的内量子效率即为上述EL谱的内量子效率. 然而, 文献 [14] 给出的确定EL谱内量子效率的方法, 最终还是需要将低温下的PL内量子效率设定为100% 才能实现. 然而, 据我们所知, 将低温PL内量子效率设定为100% 的方法, 迄今为止仍然是人们评估LED性能普遍采用的方法, 尽管该方法只能适用于PL强度或PL效率随温度增加而单调降低的情形 [10-16].

然而, 在研究InGa_N/Ga_N多量子阱LED等结构的发光特性时, 人们却经常发现随着温度的增加PL效率并非单调降低, 也就是说PL效率的最大值

并非总是出现在最低温度处. 此外, 还发现PL效率对注入载流子密度的依赖性有时也是不规则的, 前者被认为与载流子从浅局域态到深局域的弛豫过程、热膨胀及非辐射复合等因素有关, 而后者则被解释为与非辐射复合、斯塔克效应屏蔽及带尾填充等因素有关. 也就是说, PL效率是多种因素相互竞争的结果, 是温度和注入载流子密度两个变量的函数. 因此, 将某个注入载流子密度下的低温PL内量子效率设定为100% 的方法并不准确, 有必要对此做进一步的探讨和修正.

本文采用InGa_N/Ga_N多量子阱结构作为研究对象, 在不同注入载流子密度下来测量其PL谱的温度依赖性. 通过研究分析温度和注入载流子密度对载流子的产生、传输和复合跃迁过程的作用机制, 来探讨确定PL内量子效率的更为准确的方法.

2 实验过程

本研究所用的InGa_N/Ga_N多量子阱结构是通过金属有机化学气相沉积 (MOCVD) 方法在蓝宝石 (Al₂O₃) 衬底的 (0001) 面上生长而成的. 采用三甲基镓 (TMGa)、三甲基铟 (TMIn)、高纯氨 (NH₃) 分别作为Ga, In, N源, 硅烷 (SiH₄) 用作n型掺杂源, 氮气用作各层的载气. 首先, 在蓝宝石衬底上生长一层厚度为1.5 μm的非掺杂Ga_N缓冲层, 然后再在其上沉淀2.5 μm厚的Si掺杂n型Ga_N层, 最后生长8个周期的InGa_N/Ga_N多量子阱作为有源层. 其中InGa_N阱层和Ga_N垒层的厚度分别是3和14 nm, InGa_N阱层中In组分约为15%.

该样品PL谱对温度和注入载流子密度的依赖性测量是在封闭循环液He低温系统中进行的, 实验温度在6—300 K范围内连续可调. 用作激发光源的半导体激光器的波长为405 nm, 光斑直径约为170 μm, 功率变化范围5 × 10⁻⁴—50 mW, 对应的注入载流子密度为6 × 10¹¹—6 × 10¹⁶ cm⁻³. 来自样品的PL信号用Jobin-Yvon iHR320单色仪分光, 并且用半导体制冷的Synapse CCD进行探测.

3 结果与讨论

图1显示了注入载流子密度为6 × 10¹⁴ cm⁻³时样品PL谱随温度的演变过程. 由图可见, 在6 K的低温下, PL谱主发光峰 (P_{M}) 的峰位位于2.66 eV, 这个 P_{M} 是来自InGa_N阱层的近带边跃

迁^[19]. 位于 P_M 低能端的两个较弱的发光峰分别是 P_M 的一级和二级声子伴线, 依次被标记为 1 LO 和 2 LO. 同时, 图 1 也显示了该样品的 PL 谱明显地依赖于温度变化. 图 2(a) 显示了上述 PL 谱的峰位能量以及半高宽对温度的依赖性. 由图可见, 随着温度从 6 K 增加到 300 K, 峰位能量展现了一个明显的“S 形”温度依赖行为(降低-增加-降低), 同时半高宽先减小后增加. 关于这个“S 形”的依赖行为, 已有许多文献报道将其归因于 InGaN 阱层中 In 组分的轻微起伏所导致的势能的非均一性和载流子复合的局域特征^[19-22]. 其详细机制将在后续部分叙述.

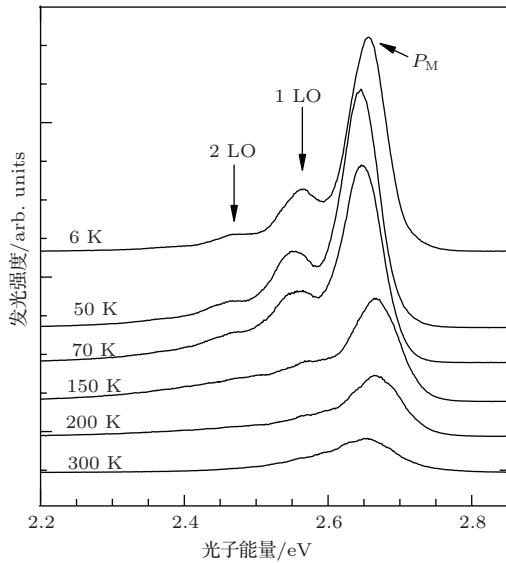


图 1 样品在 $6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 的注入载流子密度下的变温光谱图

图 2(b) 显示了该样品发光效率对温度的依赖性. 由图可见, 随着温度从 6 K 增加到 300 K, 发光效率首先增强, 并在 50 K 左右达到最大值, 然后随

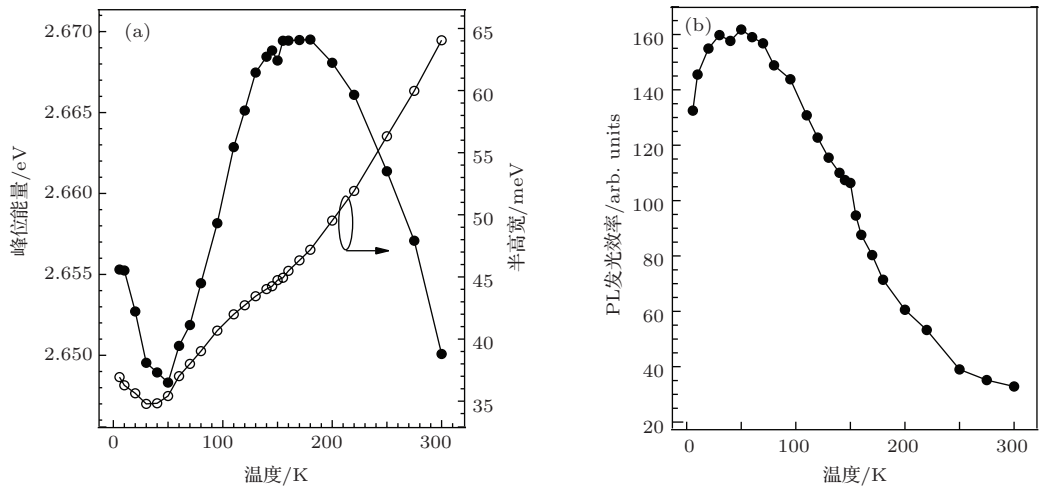


图 2 $6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 的注入载流子密度下 PL 峰位能量、半高宽 (a) 和发光效率 (b) 对温度的依赖性

温度的增加而单调降低. PL 强度的这种反常增强行为已经有一些文献报道^[23-25]. 事实上, 图 2(b) 所示的温度反常行为与图 2(a) 所示的“S 形”温度依赖行为是一致的, 现解释如下: 由于 In 原子和 Ga 原子在体积上有较大的差别, 同时 InN 和 GaN 之间也存在着较大的晶格失配 (11%), 因此在 InGaN 外延层中会出现 In 组分起伏 (或相分离) 现象, 并导致 InGaN 层中存在着不同程度的局域势. 在 6 K 时, 由于冷冻效应光子载流子将随机地分布在势能最小值处. 在温度从 6 K 升高到 50 K 的过程中, 载流子因获得热能而迁移率增加, 并从较浅的局域态弛豫到较深的局域态中, 这样导致了图 2(a) 中最初的红移以及半高宽的减小. 同时, 这个弛豫过程也增强了电子和空穴波函数的交叠, 并且抑制了这些载流子流向周围 InGaN 母体中的非辐射中心, 因此增强了发光效率, 其情形如图 2(b) 所示^[19,26-28]. 然而, 随着温度从 50 K 升高到 300 K, 我们发现, 峰位能量先增大, 并且在 180 K 时达到最大值, 然后再减小, 同时伴随着半高宽的单调增加 (如图 2(a) 所示). 前者是因为温度的升高使部分载流子获得能量并占据局域态中较高的能级, 后者是由于禁带收缩效应 (即 Varshni 效应) 和一般的热化效应^[19]. 同时, 在这个温度范围内 (50—300 K) 发光效率的单调降低则是由于局域效果的降低和非辐射复合的增强. 如前所述, 在 PL 测量中由于载流子的注入效率和光子的提取效率可以被看作是一个常量, 因此发光效率的温度行为也代表了内量子效率的温度行为 (即发光效率正比于内量子效率). 因此可以认为, 在 $6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 的注入载流子密度下该样品的最大内量子效率是出现在 50 K 左右, 而非出现在最低温度 (6 K).

测量中由于载流子的注入效率和光子的提取效率可以被看作是一个常量, 因此发光效率的温度行为也代表了内量子效率的温度行为 (即发光效率正比于内量子效率). 因此可以认为, 在 $6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 的注入载流子密度下该样品的最大内量子效率是出现在 50 K 左右, 而非出现在最低温度 (6 K).

图 3(a) 显示了 300 K 下该样品 PL 发光效率对注入载流子密度的依赖性. 从图中可以清晰地看到, 在我们的测量范围内随着注入载流子密度的增加, 发光效率首先快速地增加, 然后趋于饱和. 为了探索这个现象的内部物理机制, 图 3(b) 给出了积分 PL 强度对注入载流子密度的依赖性. 积分 PL 强度与注入载流子密度之间的关系可以表示为 [19,29,30]

$$L \propto I^F, \quad (4)$$

式中 L 为积分 PL 强度, I 为注入载流子密度, 系数 F 直观地反映了载流子的复合机制. 如果 $F > 1$, 说明发生了 Shockley-Read-Hall 复合, 即这种情况下非辐射复合机制占支配地位; 如果 $F = 1$, 说明

此时辐射复合机制占据支配地位. 在本研究中, 从图 3(b) 可以明显地看到在 300 K 的高温下, 随着增加注入载流子密度, F 值逐渐地从 1.22 降低到 1. 这说明随着注入载流子密度的增加, 非辐射复合中心逐渐饱和, 辐射过程也相应地从非辐射复合逐渐转变成辐射复合, 这个复合转变过程也体现在峰位能量和半高宽对注入载流子密度的依赖性上. 我们发现, 在弱激发范围内, 随着注入载流子密度的增加, 峰位能量减小, 同时半高宽增加; 然而, 在较强的激发范围内, 随着注入载流子密度的增加, 峰位能量单调增加, 同时半高宽先减小后增加. 前者是由于室温下非辐射复合中心被激活, 在低注入载流子密度的条件下非辐射复合在复合机制中占据支配地位; 后者是因为在高注入载流子密度的条件下非辐射复合中心近似饱和, 并且辐射复合开始占据支配地位, 因此斯塔克效应逐渐减弱、能带填充效应增强 [19]. 上述实验结果与图 3(a) 所示发光效率的注入载流子密度行为也是一致的, 并且反映了内量子效率也是注入载流子密度的函数.

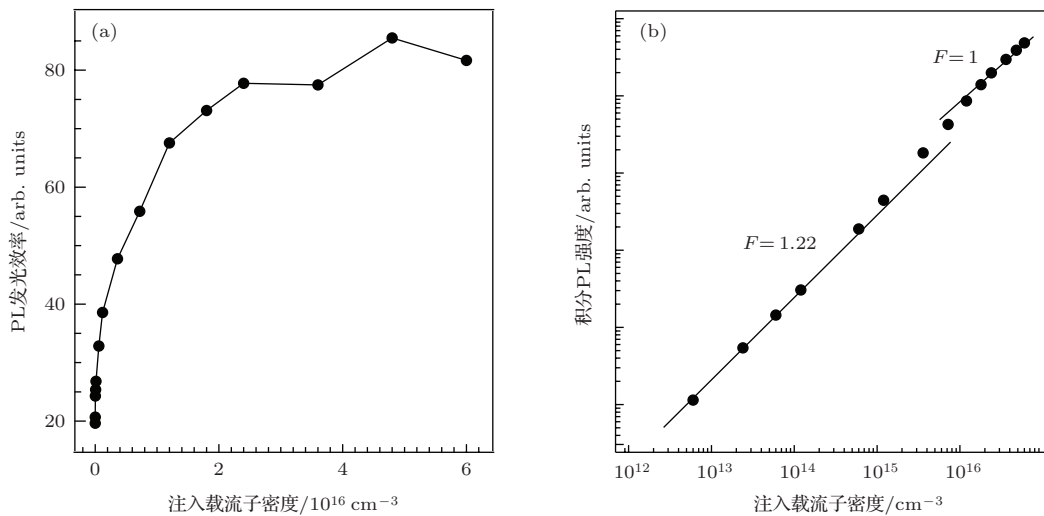


图 3 300 K 下 PL 发光效率 (a) 和积分 PL 强度 (b) 对注入载流子密度的依赖性

综上所述, 我们可以得出结论: 内量子效率是温度和注入载流子密度两个变量的函数. 也就是说, 所谓某个结构 (或器件) 的内量子效率, 应当指的是该结构 (或器件) 在某个特定温度和特定注入载流子密度下的内量子效率. 基于这个观点, 本文对现有的基于 PL 光谱测量来确定某结构 (或器件) 内量子效率的方法进行了修正, 并简述如下. 在较大的温度范围 (如 6—300 K) 和注入载流子密度范围内 (如 $6 \times 10^{11}—6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$), 测量样品 PL 谱的温度、注入载流子密度依赖性 (即所谓的正交实

验). 通过显示不同注入载流子密度下 PL 效率对温度的依赖性 (或不同温度下 PL 效率对注入载流子密度的依赖性), 找出 PL 效率的最大值. 如前所述, 由于在 PL 测量过程中激发的注入效率和辐射光的提取效率可以被看作是不随温度和注入载流子密度变化的一个常数, 因此可将上述 PL 效率的最大值设定为内量子效率是 100%. 这样, 其他温度点和注入载流子密度点所对应的内量子效率也就随之确定. 进一步说, 对于该样品的内量子效率, 仅通过 PL 谱测量即可完全确定. 图 4(a) 显示

了几个典型温度下该样品 PL 效率对注入载流子密度的依赖性. 由图可见, 最大的 PL 效率值出现在约 $1.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 和 60 K 处. 图 4(b) 则显示了将这个最大 PL 效率值设定为内量子效率是 100% 后, 其他温度点和注入载流子密度点所对应的内量子

效率的分布情形. 例如, 300 K 下内量子效率的最大值位于 $4.8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 左右, 约为 44.6%. 显然, 与传统方法相比 (即设定最低温度下的内量子效率为 100%), 通过这种方法得到的 300 K 下的内量子效率要相对较小.

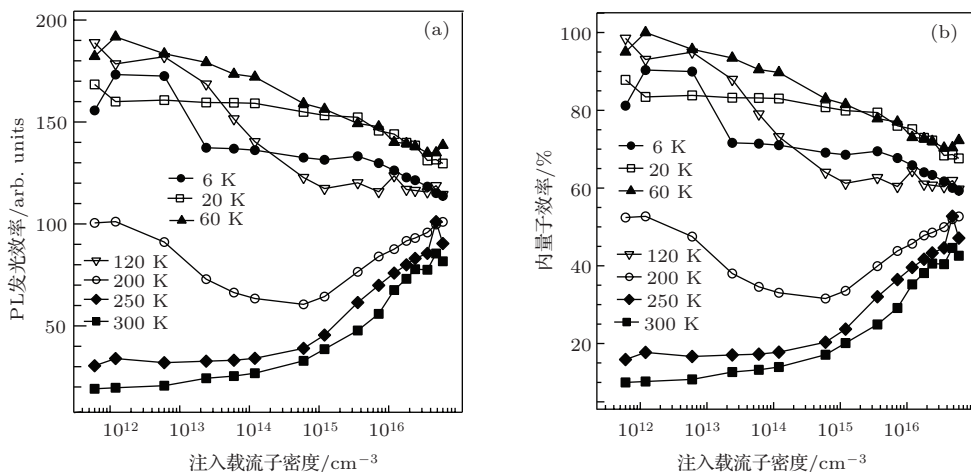


图 4 不同温度下 PL 效率 (a) 和内量子效率 (b) 对注入载流子密度的依赖性

4 结 论

利用 MOCVD 技术在蓝宝石衬底上生长了 In-GaN/GaN 多量子阱结构, 并在不同温度下对其 PL 谱的注入载流子密度依赖性进行了测量. 结果发现, 将最低温度下的发光效率设定为内量子效率是 100% 的这种传统的评估方法并不能很好地反映该结构的真实内量子效率, 因为这种传统的评估方法只能适用于发光强度随温度增加而单调降低的情形. 针对上述基于 PL 光谱测量来确定某结构 (或器件) 内量子效率的传统评估方法在应用方面的局限性, 我们对其进行了修正和补充: 在较大的温度范围和注入载流子密度范围内, 测量样品发光效率的温度、注入载流子密度依赖性. 通过设定发光效率的最大值为内量子效率是 100%, 来确定其他温度点和注入载流子密度点所对应的内量子效率. 与传统方法相比, 尽管该方法的实施过程稍显复杂, 但作为一种更合理、更准确的评价方法, 在一些特殊情况下可以满足对器件内量子效率更为精准的评估需求. 因此该方法对于评估 LED 结构或其他相关结构的发光性能具有一定参考价值和现实意义.

参考文献

- [1] Hu X L, Zhang J Y, Shang J Z, Liu W J, Zhang B P 2010 *Chin. Phys. B* **19** 117801
- [2] Jiang R L, WANG J Z, Chen P, Zhao Z M, Mei Y F, Shen B, Zhang R, Wu X L, Zheng Y D 2002 *Chin. Phys. Lett.* **19** 1553
- [3] Zhang J C, Dai L, Qin G G, Ying L Z, Zhao X S 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 629 (in Chinese) [张纪才, 戴伦, 秦国刚, 应丽贞, 赵新生 2002 物理学报 **51** 629]
- [4] Xing Y H, Deng J, Han J, Li J J, Shen G D 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 590 (in Chinese) [邢艳辉, 邓军, 韩军, 李建军, 沈光地 2009 物理学报 **58** 590]
- [5] Kim M H, Schubert M F, Dai Q, Kim J K, Schubert E F, Piprek J, Park Y 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 183507
- [6] Hader J, Moloney J V, Koch S W 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 221106
- [7] Zhu J H, Wang L J, Zhang S M, Wang H, Zhao D G, Zhu J J, Liu Z S, Jiang D S, Yang H 2011 *Chin. Phys. B* **20** 077804
- [8] Xu G Z, Liang H, Bai Y Q, Liu J M, Zhu X 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5344 (in Chinese) [徐耿钊, 梁琰, 白永强, 刘纪美, 朱星 2005 物理学报 **54** 5344]
- [9] Yan Y H, Han J, Liu J P, Deng J, Niu N H, Shen G D 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 7295 (in Chinese) [邢艳辉, 韩军, 刘建平, 邓军, 牛南辉, 沈光地 2007 物理学报 **56** 7295]
- [10] Lee Y J, Chih C H, Ke C C, Lin P C, Lu T C, Kuo H C, Wang S C 2009 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **15** 1137
- [11] Hangleiter A, Fuhrmann D, Grewe M, Hitzel F, Klewer G, Lahmann S, Netzel C, Riedel N, Rossow U 2004 *Phys. Status Solidi A* **201** 2808

- [12] Yoichi Y, Kazuto I, Takahiro K, Naohiko S, Tsunemasa T, Hiromitsu K, Hiroaki O 2008 *J. Light Vis. Env.* **32** 191
- [13] Takakazu K, Yasuhiro S, Masaki Y, Kazuya M, Hiromitsu K, Hiroaki O, Yoichi Y 2012 *Jpn. J. Appl. Phys.* **51** 072102
- [14] Satoshi W, Norihede Y, Masakazu N, Yusuke U, Chiharu S, Yoichi Y, Tsunemasa T, Kazuyuki T, Hiroaki O, Hiromitsu K 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 4906
- [15] Lee Y J, Kuo H C, Lu T C, Wang S C, Ng K W, Lau K M, Yang Z P, Chang A S P, Lin S Y 2008 *J. Lightwave Technol.* **26** 1455
- [16] Sasaki A, Shibakawa S, Kawakami Y, Nishizuka K, Nurukawa Y, Mukai T 2006 *Jpn. J. Appl. Phys.* **45** 8719
- [17] Jimi H, Inada T, Fujiwara K 2008 *Phys. Status Solidi (RRL)* **2** 50
- [18] Yamane Y, Fujiwara K, Sheu J K 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 073501
- [19] Wang H N, Ji Z W, Qu S, Wang G, Jiang Y Z, Liu B L, Xu X G, Mino H 2012 *Opt. Express* **20** 3932
- [20] Feng Z C, Zhu L H, Kuo T W, Wu C Y, Tsai H L, Liu B L, Yang J R 2013 *Thin Solid Films* **529** 269
- [21] Cho Y H, Gainer G H, Fischer A J, Song J J, Keller S, Mishra U K, Denbaars S P 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 1370
- [22] Ramaiah K S, Su Y K, Chang S J, Kerr B, Liu H P, Chen I G 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 3307
- [23] Wang F, Ji Z W, Wang Q, Wang X S, Qu S, Xu X G, Lü Y J, Feng Z H 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 163525
- [24] Ma J, Ji X L, Wang G H, Wei X C, Lu H X, Yi X Y, Duan R F, Wang J X, Zeng Y P, Li J M, Yang F H, Wang C, Zou G 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 131101
- [25] Feng S W, Cheng Y C, Chung Y Y, Yang C C, Ma K J, Yan C C, Hsu C, Lin J Y, Jiang H X 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 1377
- [26] Eliseev P G 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 5404
- [27] Eliseev P G, Perlin P, Lee J, Osinski M 1997 *Appl. Phys. Lett.* **71** 569
- [28] Sun H, Ji Z W, Wang H N, Xiao H D, Qu S, Xu X G, Jin A Z, Yang H F 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 093508
- [29] Martil I, Redondo E, Ojeda A 1997 *J. Appl. Phys.* **81** 2442
- [30] Cao X A, Stokes E B, Sandvik P M, LeBoeuf S F, Kretchmer J, Walker D 2002 *IEEE Electr. Dev. L* **23** 535

Internal quantum efficiency of InGaN/GaN multiple quantum well*

Wang Xue-Song¹⁾ Ji Zi-Wu^{1)†} Wang Hui-Ning¹⁾ Xu Ming-Sheng²⁾ Xu Xian-Gang²⁾
Lü Yuan-Jie³⁾ Feng Zhi-Hong³⁾

1) (School of Physics, Shandong University, Jinan 250100, China)

2) (State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100, China)

3) (National Key Laboratory of Application Specific Integrated Circuit (ASIC), Hebei Semiconductor Research Institute, Shijiazhuang 050051, China)

(Received 3 November 2013; revised manuscript received 10 March 2014)

Abstract

The InGaN/GaN multiple quantum wells are grown on a (0001)-oriented sapphire by using metalorganic chemical vapor deposition. Dependences of the photoluminescence (PL) peak energy and PL efficiency on injected carrier density and temperature are studied. The results show that the temperature-dependent behavior of the peak energy is in the manner of decrease-increase-decrease (S-shaped), and the maximum of the PL efficiency is observed at about 50 K. The former is attributed to the potential inhomogeneity and local characteristics of the carrier recombination in the InGaN matrix. The latter indicates that the traditional method that the internal quantum efficiency (IQE) is considered to be 100% at low temperature, should be corrected. Furthermore, it is found that the IQE depends on not only temperature but also injected carrier density. Based on the above discussion, an improved method of setting the IQE, i.e., measuring the dependence of PL efficiency is proposed.

Keywords: InGaN/GaN, PL efficiency, PL peak energy, internal quantum efficiency

PACS: 78.55.-m, 73.21.-b, 73.61.-r, 78.60.-b

DOI: 10.7498/aps.63.127801

* Project supported by the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20120131110006), the Key Science and Technology Program of Shangdong Province, China (Grant No. 2013GGX10221), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61306113).

† Corresponding author. E-mail: jiziwu@sdu.edu.cn