



荧光法测定半导体禁带宽度

时凯居 李睿 李长富 王成新 徐现刚 冀子武

Luminescence measurement of band gap

Shi Kai-Ju Li Rui Li Chang-Fu Wang Cheng-Xin Xu Xian-Gang Ji Zi-Wu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 067803 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211894

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211894>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

热光伏能量转换器件的热力学极限与优化性能预测

Thermodynamic limit and optimal performance prediction of thermophotovoltaic energy conversion devices

物理学报. 2020, 69(5): 057202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191835>

掺 Tm^{3+} 和 Tb^{3+} 的 LiMgPO_4 磷光体的发光光谱与能量转移

Luminescence spectra and energy transfer of Tm^{3+} and Tb^{3+} doped in LiMgPO_4 phosphors

物理学报. 2021, 70(16): 167801 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210357>

基于自发辐射相干效应的可调光子带隙反射率的提高方法

Improvement on reflectivity of tunable photonic band gap with spontaneous generated coherence

物理学报. 2018, 67(23): 234204 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181374>

II-VI族稀磁半导体微纳结构中的激子磁极化子及其发光

Excitonic magnetic polarons and their luminescence in II-VI diluted magnetic semiconductor micro-nanostructures

物理学报. 2019, 68(1): 017101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181211>

含双曲超构材料的复合周期结构的带隙调控及应用

Band gap engineering and applications in compound periodic structure containing hyperbolic metamaterials

物理学报. 2020, 69(15): 154205 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200084>

飞秒激光在空气中成丝诱导氮荧光发射的空间分布

Spatial distribution of nitrogen fluorescence emission induced by femtosecond laser filamentation in air

物理学报. 2021, 70(13): 134206 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201704>

荧光法测定半导体禁带宽度*

时凯居¹⁾ 李睿¹⁾ 李长富¹⁾ 王成新²⁾ 徐现刚¹⁾ 冀子武^{1)†}

1) (山东大学微电子学院, 新一代半导体材料研究院, 济南 250100)

2) (山东浪潮华光光电子股份有限公司, 潍坊 261061)

(2021年10月12日收到; 2021年11月26日收到修改稿)

光学带隙或禁带宽度是半导体材料的一个重要特征参数. 本文以3个具有代表性的InGaN/GaN多量子阱结构作为研究对象, 深入探讨了荧光法测定某个目标温度下InGaN阱层的光学带隙所需要满足的测试条件. 由于InGaN阱层是一种多元合金且受到来自GaN垒层的应力作用, 所以该阱层中不仅存在着杂质/缺陷相关的非辐射中心, 也存在着组分起伏诱发的局域势起伏以及极化场诱发的量子限制斯塔克效应. 因此, 为了获得目标温度下InGaN阱层的较为精确的光学带隙, 提出了荧光测量至少应满足的测试条件, 即必须消除该目标温度下非辐射中心、局域中心以及量子限制斯塔克效应对辐射过程的影响.

关键词: 光学带隙, 荧光, 非辐射复合, 局域效应, 量子限制斯塔克效应

PACS: 78.55.-m, 78.67.De, 72.15.Rn, 78.66.Fd

DOI: 10.7498/aps.71.20211894

1 引言

光学带隙或禁带宽度是半导体的一个重要特征参数, 它反映了价电子被束缚的强弱程度和半导体光学性能的优劣, 同时决定了激发该半导体所需要的最小能量^[1-3]. 因此, 在光学研究中, 测定一种新型半导体材料的光学带隙对于了解其结构特性、光学特性和实际用途具有重要的物理意义和现实意义. 目前, 常用的光学测试方法主要有吸收光谱法(或透射光谱法)^[4-6]. 该方法因操作过程简单易行, 而被相关研究者广泛采用. 然而, 在实际应用中吸收光谱法也存在着一些难以克服的缺点: 1) 对于生长在窄带隙衬底上的外延材料或结构, 还必须事先进行衬底剥离才能进行测量, 但这个剥离过程耗时费力, 并有可能导致样品的损伤甚至损坏; 2) 如果外延层是由不同带隙的多层材料组成的复合结构, 那么其他层的吸收也会对目标层的

测量造成不可忽视的干扰; 3) 利用公式 $\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^p$ ^[4] 对实验测得的透射谱的吸收边进行拟合以确定能量带隙时, 有时会因为吸收边的不规则而难以完美拟合, 并因此造成较大的测量误差^[5], 这里 α , $h\nu$, A , E_g 和 p 分别为吸收系数、入射光子能量、比例系数、禁带宽度和由半导体类型所决定的常数; 4) 由于上述测量使用的是宽光源, 相应波长的输出功率较小, 这样也会影响测量精度^[6].

荧光(光致发光(photoluminescence, PL)或电致发光(electroluminescence, EL))测量是研究探讨半导体发光材料或器件结构特性和光电特性不可或缺的重要手段^[7,8]. 利用荧光法测定半导体材料的带隙宽度, 在一定程度上可以克服透射光谱法的固有弊端, 同时也能够深入地洞悉该材料的结构特性与光学特性的内在关联, 揭示载流子的产生、传输和复合发光过程的动力学机制^[9,10]. 因此荧光法也是测定半导体带隙宽度的一个理想候选方法, 并且已经有许多研究将荧光峰位能量默认为

* 国家自然科学基金(批准号: 51872167, 51672163)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jiziwu@sdu.edu.cn

禁带宽度并结合费伽德定律 (Vegard's law) 计算出相关的结构参数^[11–14]. 然而, 上述将荧光峰位能量简单地看作是禁带宽度的做法并不十分妥当, 因为在很多情况下, 样品结构的不完美会导致峰位能量与禁带宽度之间出现较大的偏差. 众所周知, 由于生长工艺的不成熟以及合适衬底的缺乏, 致使所获得的半导体材料的结晶质量或结构质量不够完美, 如杂质/缺陷相关的非辐射中心的存在^[15,16], 多元合金中组分起伏相关的局域中心的存在^[17,18], 以及异质结构中晶格失配所诱发的量子限制斯塔克效应 (quantum confinement Stark effect, QCSE) 的存在等^[19,20]. 这些因素都会使辐射能量发生红移并导致测量结果和实际带隙 (即本征带隙) 之间存在较大的偏差, 即所谓的斯托克斯位移. 因此, 如何优化荧光测试条件以减小或避免上述因素的干扰或影响, 是获得较为精确测量结果的关键.

光学带隙也是温度的函数. 对于本征半导体, 它遵从瓦氏尼定律 (Varshni law), 即依赖温度的禁带收缩效应^[21,22]. 本文采用荧光测量方法, 重点探讨了典型目标温度下具有代表性结构特征的半导体带隙测定应满足的测试条件, 即常温 (300 K) 条件下 InGaN/GaN 多量子阱结构中 InGaN 阱层的光学带隙测定应满足的测试条件, 以期获得较为精确的光学带隙测量结果.

2 实验方法

本研究所涉及的几个样品 (包括绿光样品 S_{G1} 、 S_{G2} 以及蓝光样品 S_B) 均为基于 InGaN/GaN 多量子阱 (MQWs) 结构的发光二极管 (LED), 并且都是通过金属有机化学气相沉积方法在蓝宝石衬底或硅衬底上外延生长而成. 其制备过程简述如下: 以三甲基铝 (TMAI)、三甲基镓 (TMGa)、三甲基铟 (TMIn)、三甲基镓 (TMGa)、氨气 (NH_3)、硅烷 (SiH_4) 和二茂镁 (Cp_2Mg) 分别作为 Al, In, Ga, N, Si 和 Mg 的源, 并且在衬底上依次生长低温成核层、非故意掺杂的 GaN 层、Si 掺杂的 n 型 GaN 层、InGaN/GaN MQWs 层 (即有源区)、Mg 掺杂的 p-AlGaN 电子阻挡层和 p-GaN 接触层. 芯片面积为 $1.16 \text{ mm} \times 1.16 \text{ mm}$, 样品结构及具体参数分别如图 1 和表 1 所示 (具体细节可参见文献 [23–26]).

研究所涉及的与上述样品相关的 EL 数据, 都来自本课题组之前的研究工作^[23–26]. 主要包括:

不同注入电流下 EL 谱的温度依赖性; 目标温度 (300 K) 下 EL 谱的注入电流依赖性. 对于上述 EL 谱的温度依赖性和注入电流依赖性测量, 样品被置于封闭循环液态氦 (He) 制冷的样品室内, 温度可调范围为 6–350 K. 一个 Keithley 2400 源表被用作激发电流源, 可调电流范围为 0.01–350.00 mA. 来自样品的信号经过会聚透镜收集后进入 Jobin-Yvon iHR320 单色仪, 并经单色仪分光后由热电制冷的 Synapse CCD 探测器进行探测.

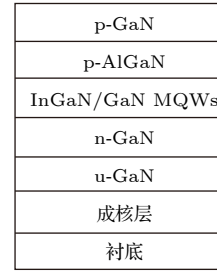


图 1 样品结构示意图

Fig. 1. Schematic diagrams of samples.

表 1 样品的具体参数

Table 1. Specific parameters of samples.

样品	衬底	成核层	阱/垒厚度/nm	In组分/%	文献
S_{G1}	Si	AlN	2 / 14	26	[23]
S_{G2}	Si	AlN	2 / 14	32	[24]
S_B	Al_2O_3	GaN	2 / 10	15	[25, 26]

3 结果和讨论

图 2 为注入电流为 $5 \mu\text{A}$ 时一个基于 InGaN/GaN 多量子阱结构的绿光样品 (S_{G1}) 和蓝光样品 (S_B) 的 EL 峰位能量和线宽的温度依赖性. 由图 2 可见, 绿光样品 S_{G1} 的峰位能量和线宽都显示了一个近似的“V 形”(降低-增加) 温度依赖行为; 相比之下 (图 2 内插图), 蓝光样品 S_B 的峰位能量则显示了一个“S 形”(降低-增加-降低) 温度依赖行为, 同时它的线宽显示了一个近似的“W 形”(降低-增加-降低-增加) 行为. 这两个样品的上述行为均可归因于 InGaN 阱层中组分起伏所诱发的势起伏以及由此产生的载流子复合的局域特征^[27,28]. 然而, 相比之下, 绿光样品 S_{G1} 有一个更强的载流子局域效果, 这是因为在高温范围内 ($> 200 \text{ K}$) 蓝光样品 S_B 所展现的峰位能量随温度降低的行为近似地遵从自由载流子的一般热化过程 (即遵从 Varshni 方程 $E_g(T) = E_g(0\text{K}) - \alpha T^2/(T + \beta)$, 其中 $E_g(T)$

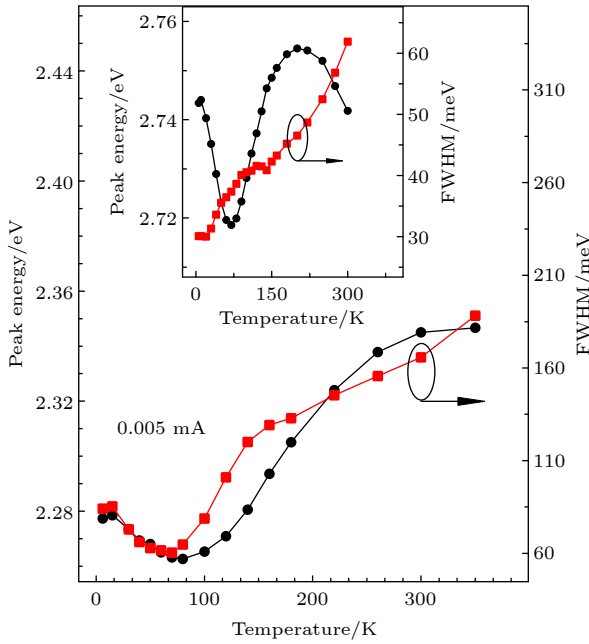


图 2 注入电流为 5 μA 时, S_{G1} 的 EL 峰位能量和半高全宽 (FWHM) 的温度依赖性. 插图为 5 μA 时 S_B 的 EL 峰位能量和 FWHM 的温度依赖性

Fig. 2. Temperature dependence of the EL peak energy and FWHM for S_{G1} measured at 5 μA . The inset is that for S_B measured at 5 μA .

和 $E_g(0\text{K})$ 分别表示温度为 T 和 0 K 时样品的禁带宽度, α 和 β 为常数)^[21,22], 而绿光样品的峰位能量却随着温度的增加而单调增加. 这反映了在上述的高温范围内蓝光样品 S_B 辐射过程是以自由载流子的一般热化为主, 而绿光样品 S_{G1} 则仍以局域载流子的热化为主. 因此, 与绿光样品 S_{G1} 相比, 蓝光样品 S_B 在 300 K 时的辐射能量应当更接近其真实的光学带隙. 换言之, 解局域 (delocalized) 自由载流子 (即自由载流子) 的支配性复合发光是测量其光学带隙不可缺少的前提条件. 而对于深局域绿光样品, 可适当提高注入电流来降低其局域效应, 使其 EL 峰位能量在高温范围内遵从 Varshni 方程, 以满足带隙测量条件.

图 3 显示了绿光样品 S_{G1} 的一个姊妹样品 (S_{G2}) 在不同注入电流下其 EL 峰位能量和线宽的温度依赖性. 需要说明的是, 与绿光样品 S_{G1} 相比, 绿光样品 S_{G2} 有较低的 InGaIn 阱层生长温度, 因此该阱层具有较高的平均 In 含量和较强的局域效果. 由图 3 可见: 在较低的注入电流下 (小于 0.5 mA), 随着温度的增加 (大于 200 K), EL 峰位能量单调

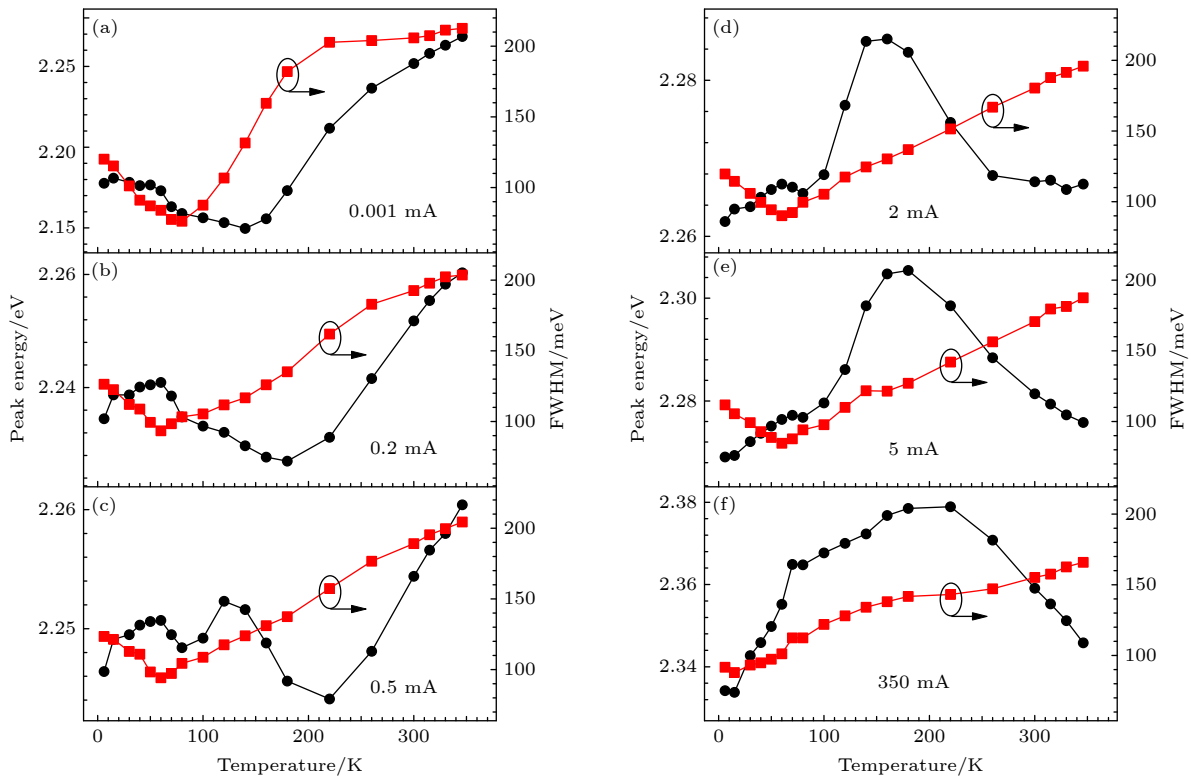


图 3 注入电流为 0.001 mA (a), 0.2 mA (b), 0.5 mA (c), 2 mA (d), 5 mA (e) 和 350 mA (f) 时 S_{G2} 的 EL 峰位能量和 FWHM 的温度依赖性

Fig. 3. Temperature dependences of the EL peak energy and FWHM for S_{G2} measured at 0.001 mA (a), 0.2 mA (b), 0.5 mA (c), 2 mA (d), 5 mA (e), and 350 mA (f).

增加; 在中等注入电流下 (0.5—350.0 mA), 随着温度的增加 (大于 160 K), EL 峰位能量首先以较快的速率降低, 然后以较慢的速率降低. 这表明在上述测试条件下 (即小于 350 mA), 绿光样品 S_{G2} 仍然有较强的载流子局域特征. 而只有当注入电流等于或大于 350 mA 时, 其辐射过程才在高温范围内近似地遵从 Varshni 方程.

图 4 显示了蓝光样品 S_B 在不同注入电流下其峰位能量和线宽的温度依赖性. 结果显示, 在所有的注入电流下, 峰位能量-温度曲线在包含 300 K 在内的高温范围内均遵从 Varshni 方程. 但是, 在不同注入电流下, 300 K 所对应的峰位能量却各不相同. 一般来说, 对于一个特定的结构, 在某个固定温度下它的光学带隙应该是一个定数, 不会随注入电流的变化而变化. 上述结果表明, 峰位能量遵从 Varshni 方程并非是带隙测量的唯一前提条件, 除此之外还需要考虑其他因素的影响.

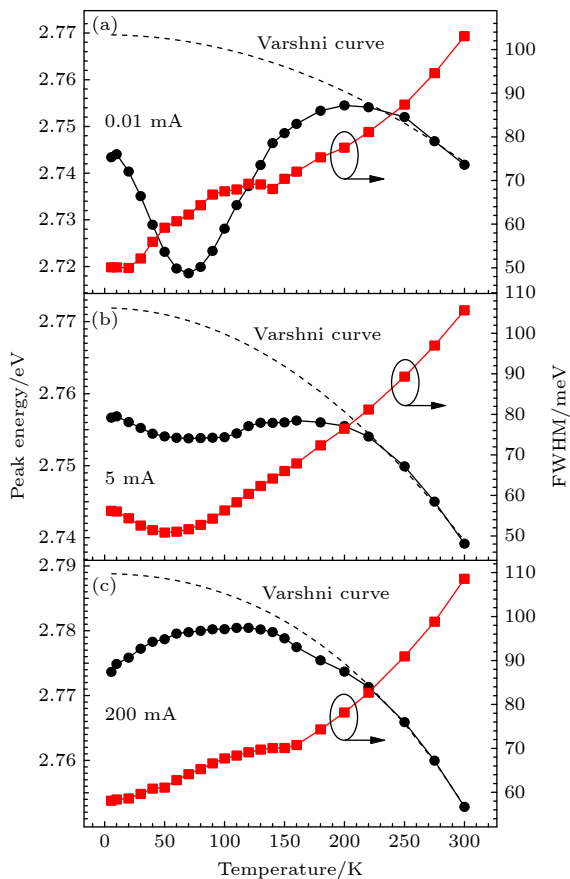


图 4 注入电流为 0.01 mA (a), 5 mA (b) 和 200 mA (c) 时 S_B 的 EL 峰位能量和 FWHM 的温度依赖性 (虚线代表 Varshni 曲线)

Fig. 4. Temperature dependences of the EL peak energy and FWHM for S_B measured at 0.01 mA (a), 5 mA (b), and 200 mA (c). The dashed lines represent Varshni curves.

为了进一步探讨精确测量光学带隙所需要的测试条件, 图 5 给出了蓝光样品 S_B 在 300 K 下其 EL 峰位能量的注入电流依赖性. 由图 5 可见: 随着注入电流从 0.01 mA 增加到 200 mA, 峰位能量首先增加, 并且在 0.02 mA 左右达到最大值, 然后降低, 并且在 2 mA 左右达到最小值; 随着注入电流的进一步增加, 峰位能量单调增加到 200 mA. 相应于上述过程, 其 EL 线宽则表现为首先增加, 并且在 2 mA 左右达到最大值, 然后减小到 10 mA. 随着注入电流的进一步增加 (≥ 10 mA), 线宽单调增加到 200 mA. 上述行为可解释为: 随着注入电流的增加 (≤ 2 mA), 局域态的填充效应首先支配该样品的辐射发光过程 (≤ 0.02 mA), 然后非辐射复合开始增强并占据支配地位; 随着注入电流的进一步增加 (≥ 2 mA), 非辐射中心逐渐变得饱和, 并且 QCSE 的屏蔽效应开始支配该样品的辐射发光过程 (≤ 10 mA), 然后这个屏蔽效应被随后的载流子的高能局域态的填充效应或导带底的填充效应所取代 (10—200 mA). 也就是说, 当注入电流大于 10 mA 时, InGaN 阱层中来自组分起伏相关的局域态 (尤其是低能局域态) 的填充效应、杂质/缺陷相关的非辐射复合以及极化场相关的 QCSE 的屏蔽效应不再明显, 并且来自导带底 (也可能包括近带边处高能局域态) 的填充效应开始占据支配地位 [25,29,30]. 结合图 4 的测量结果 (即 10 mA 时在目标温度附近峰位能量已完全遵从 Varshni 方程), 图 5 中 10 mA 的临界电流值所对应的峰位能量可近似看作是该结构 InGaN 阱层的光学带隙. 需要指出的是, 如果选取的电流远大于 10 mA, 那么阱层中显著的导带底的填充效应将会使得测量结果 (即峰位能量) 明显大于实际的带隙宽度. 其他目标温度下的带隙宽度测量和上述 300 K 目标温度条件下的测量方法类似. 应当注意的是, 在较高的注入电流 (或光激发功率) 下, 量子阱层可能会发生载流子泄漏 (overflow) 现象 [31—33], 但这并不影响对阱层带隙的荧光测量, 因为这些泄漏载流子对阱层的荧光辐射没有贡献. 此外, 在高密度载流子状态下, 阱层中有可能还会发生俄歇复合, 进而降低发光效率. 然而, 据我们所知, 有关俄歇复合对辐射能量的影响机制的研究却鲜有报道. 因此, 俄歇复合是否会影响到本文所述的带隙判定现在还不清楚, 还需要进一步的研究和探讨. 但我们猜想, 俄歇复合对本文所述的带隙判定方法应该不会有明

显的影响, 因为俄歇复合是一种非辐射复合, 并且一般来说, 引起俄歇复合发生时所需要的注入电流 (或光激发功率) 的阈值要大于消除上述因素 (即非辐射复合、局域效应和 QCSE) 所需要的临界值。

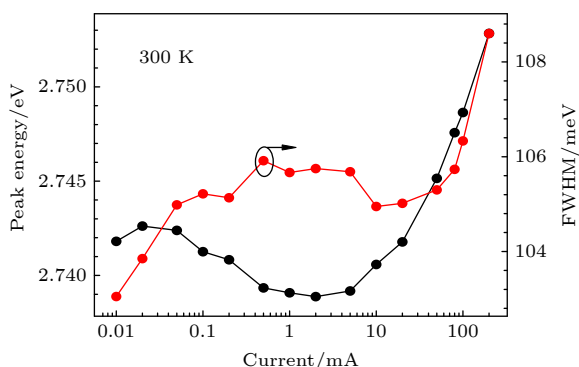


图 5 温度为 300 K 时 S_B 的 EL 峰位能量和 FWHM 的注入电流依赖性

Fig. 5. EL peak energy and FWHM as a function of injection current for S_B at 300 K.

上述带隙测量方法中所包含的两个测量步骤 (即不同注入电流下的 EL 峰位能量和线宽的温度依赖性; 目标温度下的 EL 峰位能量和线宽的注入电流依赖性) 缺一不可, 具体原因如下: 1) 如果只测量某个注入电流下的峰位能量和线宽的温度依赖性, 则只能据此判断在该注入电流下目标温度附近的辐射过程是否符合 Varshni 方程, 而难以判断在该注入电流和目标温度下 QCSE 是否已经消失 [26,27]; 2) 如果只测量目标温度下的峰位能量和线宽的注入电流依赖性, 则只能据此大致确定非辐射中心和局域 (尤其是低能局域) 中心达到饱和以及 QCSE 被屏蔽时所需要的临界注入电流的大小, 而难以判断在该注入电流和目标温度下来自高能局域中心的辐射是否仍然显著 (即是否已经被导带底的填充效应所取代) [27]. 需要注意的是, 由于样品结构的不同或者是测试条件的不同, 当注入电流增加时, 其辐射过程有时会表现为载流子的低能局域态的填充效应 [30], 有时会表现为从高能局域态到低能局域态的载流子散射效应 [34,35], 有时会表现为非辐射复合、QCSE 的屏蔽效应、高能局域态的填充效应以及导带底的填充效应, 甚至有时这些效应会同时出现在某一激发过程中的不同激发阶段, 并且它们出现的次序也不尽相同 [23,25,35]. 但只要遵从上述的两个测量步骤, 基本上就能够消除上述因素的干扰, 判断出导带底的填充效应开始占据

支配地位时的临界注入电流的大小. 在此临界注入电流下, 如果目标温度附近的峰位能量遵从 Varshni 方程, 那么目标温度所对应的峰位能量即可近似地被看作是光学带隙能量. 此外, 尽管 EL 方法和 PL 方法都可被用来测量带隙宽度, 但相比之下, PL 方法应该有更高的测量精度, 因为该方法避免了外加电场对测量过程的干扰. EL 方法在测量中所施加的外部电场会额外增强有源区能带的倾斜程度, 并由此导致 QCSE 的进一步增强, 从而导致阱层的有效禁带宽度降低.

4 结 论

本研究选取了 3 个由金属有机化学气相沉积方法外延生长的 InGaN/GaN 多量子阱 LED 的 EL 数据作为分析对象, 探讨了荧光法测定极化场中多元合金在某个目标温度下的光学带隙所需要满足的测试条件. 对于这些 InGaN/GaN 多量子阱结构, 由于有源区中存在着杂质/缺陷、组分起伏以及界面晶格失配等现象, 其辐射发光过程在不同程度上会受到非辐射复合、局域势起伏以及 QCSE 的影响, 从而导致光学带隙的测量结果会出现不同程度的偏差. 为了获得目标温度下较为精确的光学带隙, 就必须优化测试条件, 例如, 在不同注入电流下测量荧光谱的温度依赖性以及在目标温度下测量荧光谱的注入电流依赖性. 通过综合这些测量结果并选取合适的注入电流, 来降低甚至消除非辐射复合、局域效应以及 QCSE 所带来的不利影响. 在这样的测试条件下, 目标温度所对应的辐射峰位能量便可近似地认为是目标结构的带隙宽度. 一般来说, 由于上述因素 (即非辐射中心、局域中心和极化电场) 会不同程度地存在于目标半导体 (包括元素半导体、二元或多元合金) 或其相关异质结构中, 因此该测试条件可适用于常见半导体 (包括直接带隙和间接带隙材料) 的带隙测量, 尽管样品结构的多样性会导致其具有不同的光学特征. 期待本研究方法或研究思路能对相关半导体材料的带隙测量有所帮助.

参考文献

- [1] Srikant V, Clarke D 1998 *J. Appl. Phys.* **83** 5447
- [2] Bafekry A, Stampfl C 2020 *Phys. Rev. B* **102** 195411
- [3] Tsao J, Chowdhury S, Hollis M, Jena D, Johnson N, Jones K,

- Kaplar R, Rajan S, Walle C, Bellotti E, Chua C, Collazo R, Coltrin M, Cooper J, Evans K, Graham S, Grotjohn T, Heller E, Higashiwaki M, Islam M, Juodawlkis P, Khan M, Koehler A, Leach J, Mishra U, Nemanich R, Pilawa-Podgurski R, Shealy J, Sitar Z, Tadjer M, Witulski A, Wraback M, Simmons J 2018 *Adv. Electron. Mater.* **4** 1600501
- [4] Ghobadi N 2013 *Int. Nano Lett.* **3** 2
- [5] Kumar A, Kumar R, Verma N, Anupama A V, Choudhary H K, Philip R, Sahoo B 2020 *Opt. Mater.* **108** 110163
- [6] Li X J, Huang H, Bin H J, Peng Z X, Zhu C H, Xue L W, Zhang Z G, Zhang Z J, Ade H, Li Y F 2017 *Chem. Mater.* **29** 10130
- [7] Ali H, Alsmadi A M, Salameh M, Mathai M, Shatnawi M, Hadia N M A, Ibrahim E M M 2020 *J Alloy. Compd.* **816** 152538
- [8] Chen Y F, Xi J Y, Dumcenco D O, Liu Z, Suenaga K, Wang D, Shuai Z J, Huang Y S, Xie L M 2013 *ACS Nano* **7** 4610
- [9] Karlicek R F, Schurman M J, Tran C 1996 *J. Appl. Phys.* **80** 4615
- [10] Jeon K J, Lee Z H, Pollak E, Moreschini L, Bostwick A, Park C M, Mendelsberg R, Radmilovic V, Kostecky R, Richardson T J, Rotenberg E 2011 *ACS Nano* **5** 1042
- [11] Soh C B, Liu W, Chua S J, Teng J H, R J N Tan, Ang S S 2009 *Phys. Status Solidi C* **6** S519
- [12] Pantzas K, Gmili Y E, Dickerson J, Gautier S, Largeau L, Mauguin O, Patriarche G, Suresh S, Moudakir T, Bishop C, Ahaitouf A, Rivera T, Tanguy C, Voss P L, Ougazzaden A 2013 *J. Cryst. Growth* **370** 57
- [13] Chowdhury A M, Roul B, Singh D K, Pant R, Nanda K. K., Krupanidhi S B 2020 *ACS Appl. Nano Mater.* **3** 8453
- [14] Jaros A, Hartmann J, Zhou H, Szafranski B, Strassbur M, Avramescu A, Waag A, Voss T 2018 *Sci. Rep.* **8** 11560
- [15] Cherns D, Henley S J, Ponce F A 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 2691
- [16] Abell J, Moustakas T D 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 091901
- [17] De A, Shivaprasad S M 2016 *J. Phys. D Appl. Phys.* **49** 355304
- [18] Lu C H, Li Y C, Chen Y H, Tsai S C, Lai Y L, Li Y L, Liu C P 2013 *J. Alloy. Compd.* **555** 250
- [19] Cho C Y, Park S J 2016 *Opt. Express* **24** 7488
- [20] Kou J Q, Huang S W, Che J M, Shao H, Chu C S, Tian K K, Zhang Y H, Bi W G, Zhang Z H, Kuo H C 2019 *IEEE T. Nanotechnol.* **18** 176
- [21] Wang F, Ji Z W, Wang Q, Wang X S, Qu S, Xu X G, Lv Y J, Feng Z H 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 163525
- [22] Mohanta A, Wang S F, Young T F, Yeh P H, Ling D C, Lee M E, Jang D J 2015 *J. Appl. Phys.* **117** 144503
- [23] Li J F, Li C F, Xu M S, Ji Z W, Shi K J, Xu X L, Li H B, Xu X G 2017 *Opt. Express* **25** A871
- [24] Li C F, Li J F, Xu M S, Ji Z W, Shi K J, Li H D, Wei Y H, Xu X G 2020 *Sci. Rep.* **10** 129
- [25] Lv H Y, Li C F, Li J F, Xu M S, Ji Z W, Shi K J, Xu X L, Li H B, Xu X G 2017 *Mater. Express* **7** 523
- [26] Li C F, Ji Z W, Li J F, Xu M S, Xiao H D, Xu X G 2017 *Sci. Rep.* **7** 15301
- [27] 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
- [28] Lee J C, Wu Y F, Wang Y P, Nee T E 2008 *J. Cryst. Growth* **310** 5143
- [29] Li C F, Shi K J, Xu M S, Xu X G, Ji Z W 2019 *Chin. Phys. B* **28** 107803
- [30] 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
- [31] Domen K, Soejima R, Kuramata A, Tanahashi T 1998 *MRS Internet J. Nitride Semicond. Res.* **3** 2
- [32] Vampola K J, Iza M, Keller S, DenBaars S P, Nakamura S 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 061116
- [33] Li R, Xu M S, Wang C X, Qu S D, Shi K J, Changfu Li C F, Xu X G, Ji Z W 2021 *Superlattice Microst* **160** 107090
- [34] Mu Q, Xu M S, Wang X S, Wang Q, Lv Y J, Feng Z H, Xu X G, Ji Z W 2016 *Physica E* **76** 1
- [35] Li R, Xu M S, Wang P, Wang C X, Qu S D, Shi K J, Wei Y H, Xu X G, Ji Z W 2021 *Chin. Phys. B* **30** 047801

Luminescence measurement of band gap*

Shi Kai-Ju¹⁾ Li Rui¹⁾ Li Chang-Fu¹⁾ Wang Cheng-Xin²⁾

Xu Xian-Gang¹⁾ Ji Zi-Wu^{1)†}

1) (*Institute of Novel Semiconductors, School of Microelectronics, Shandong University, Ji'nan 250100, China*)

2) (*Shandong Inspur Huaquang Optoelectronics Co., Ltd., Weifang 261061, China*)

(Received 12 October 2021; revised manuscript received 26 November 2021)

Abstract

Optical band gap or band gap is an important characteristic parameter of semiconductor materials. In this study, several representative InGa_N/Ga_N multiple quantum well structures are taken as the research objects, and the test conditions that need to be met for the luminescence measurement of the optical band gap of the InGa_N well layer at a certain target temperature are discussed in depth. Since the InGa_N well layer is a multi-element alloy and is subjected to stress from the Ga_N barrier layer, there exist not only impurity/defect-related non-radiation centers in the well layer, but also localized potential fluctuation induced by composition fluctuation and quantum confinement Stark effect (QCSE) induced by polarization field. Therefore, in order to obtain a more accurate optical band gap of the InGa_N well layer, we propose the following test conditions that the luminescence measurement should meet at least, that is, the influence of the non-radiation centers, the localized centers and the QCSE on the emission process at the target temperature must be eliminated. Although these test conditions need to be further improved, it is expected that this test method can provide valuable guidance or ideas for measuring the semiconductor optical band gap.

Keywords: optical band gap, luminescence, non-radiative recombination, localization effect, quantum confinement Stark effect

PACS: 78.55.-m, 78.67.De, 72.15.Rn, 78.66.Fd

DOI: [10.7498/aps.71.20211894](https://doi.org/10.7498/aps.71.20211894)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51872167, 51672163).

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