

# 分子束外延高 Mg 掺杂 GaN 的发光特性\*

宋 航<sup>a)</sup> Park S H<sup>b)</sup> Kang T W<sup>b)</sup> Kim T W<sup>c)</sup>

<sup>a)</sup>(中国科学院长春物理研究所, 长春 130021)

<sup>b)</sup>(Department of Physics, Dongguk University, Seoul 100-715, Korea)

<sup>c)</sup>(Department of Physics, Kwangwoon University, Seoul 139-701, Korea)

**摘要** 采用分子束外延技术在蓝宝石衬底上制备 Mg 掺杂的立方相 p-GaN, 并对其不同温度下的光致发光光谱进行了研究. 实验观察到高 Mg 掺杂 GaN 中施主受主对发光的反常温度行为. 理论分析表明, 高 Mg 掺杂 GaN 中施主受主对的发光受到陷阱与受主间竞争俘获非平衡空穴过程和空穴隧穿输运过程的影响.

**关键词** GaN, 光致发光, 隧穿效应

## 1 引 言

GaN 基半导体材料及器件由于可用于实现蓝光和紫光发射而在近年得到迅速发展. 特别是 MOCVD 生长 Mg 掺杂的 GaN 经热处理<sup>[1]</sup>或低能电子辐照<sup>[2]</sup>而获得 p 型材料后, GaN 基商用发光二极管, 半导体激光器的研究取得了很大突破. 最近人们采用分子束外延技术无需任何后处理也成功地获得 Mg 掺杂 p 型 GaN<sup>[3,4]</sup>. 同时人们更加重视对 p 型掺杂剂 Mg 在 GaN 中行为的研究<sup>[5-7]</sup>. 本工作研究分子束外延高 Mg 掺杂 GaN 中施主受主对发光的反常温度行为及 Mg 受主能级间相互作用.

## 2 实 验

采用射频等离子体辅助分子束外延技术, 高纯氮气, 高纯金属镓, 高纯金属镁分别作为氮源, 镓源和 p 型掺杂源. 选用 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>作为衬底, 低温生长 50nm GaN 作缓冲层. 掺杂浓度通过调节镓源温度实现控制. 高能电子衍射(RHEED)和霍尔测试结果表明外延层为立方相, p 型 GaN. 光致发光光谱测量是将样品置于氦循环制冷系统中, He-Cd 激光器作激发源.

## 3 结果与讨论

比较非故意掺杂(n 型载流子浓度  $3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ), 低掺杂浓度(样品 B, p 型载流子浓度  $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ )和高掺杂浓度(样品 A, p 型载流子浓度  $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ )样品 GaN 的低温下(11K)光致发光光谱如图1插图所示. 非故意掺杂样品只有 3.455eV 的发射峰, 对应于束缚于中性施主的激子发射(D<sub>0</sub>, X). 而 Mg 掺杂样品呈现两组发光: 3.46eV 发光峰对应于束缚于浅受主的激子发射(A<sub>0</sub>, X), 和峰值位于 3.27eV 的发光带对应于施主-受主对(DAP)发光及其声子伴线. 由于 GaN 中存在大量起施主作用的 N 空位, 因而随受主掺

\* 中国科学院出国人员回国择优支持基金资助项目

杂浓度提高, 在高掺杂样品 A 中 DAP 发光明显增强. 观察 DAP 发光强度随温度变化关系(如图1所示)发现, 在温度高于100K, 发光强度随温度增加而减弱, 计算得到热激活能为160meV. Akasaki et al<sup>[8]</sup>认为这源于 DAP 的热猝灭, 所得的热激活能即为 Mg 受主电离能. 但在低于100K 温度范围, 样品 A 的 DAP 发光强度随温度变化规律完全不同于 Akasaki 的报道. 随温度升高 DAP 发光强度开始时下降, 然后回升直至100K. 而且可近于达到11K 时的发光强度. 对于这一高掺杂 GaN 中 Mg 施主-受主对发光的反常温度行为, 考虑到 DAP 发光强度与占据施主, 受主上的非平衡电子, 空穴数成正比, 而且人们发现 Mg 在 GaN 中可产生多种受主能级<sup>[5-8]</sup>, 可采用如图2插图所示的三能级系统处理. 图中 D 能级为 GaN 中剩余施主能级, 其热激活能为30meV. 能级 A 为 Mg 受主能级, 其热激活能为160meV. 能级 A' 是与 Mg 深能级有关的空穴陷阱中心. 该空穴陷阱中心与 Mg 受主竞争价带中的非平衡空穴从而影响 DAP 发光强度. 由于温度很低, 忽略热电离引起的施主上俘获的非平衡电子浓度的改变, 则 DAP 发光强度由非平衡空穴在受主能级 A 和空穴陷阱 A' 上的分部所决定. 同时束缚于陷阱 A' 中的空穴可通过隧穿到受主 A 能级. 若忽略反向隧穿则受主 A 能级上空穴浓度变化为

$$\Delta p = N_{A'} C_p [1 - \exp(E_{A'}/k_B T)] - N_A P_T [1 - \exp(-E_A/k_B T)] \quad (1)$$

式中  $N_{A'}$  为束缚于陷阱 A' 中的非平衡空穴浓度,  $C_p = \sigma_h (3k_B T/m^*)^{1/2}$  为俘获系数,  $\sigma_h$  为俘获截面,  $E_{A'}$  为陷阱 A' 的电离能.  $P_T = \exp\{-4\pi(2m^*/\hbar^2)^{1/2} [E(x) - E]^{1/2} dx\}$  为隧穿几率, 取势垒高度  $E(x) = E_{A'}$ , 电子能量  $E = 3/2 k_B T$ ,  $x$  为陷阱与受主间的空间距离, 由于考虑陷阱与 Mg 有关,  $x$  可取为 Mg 间平均距离  $x_0$ . 则由于俘获与隧穿而引起的受主能级 A 上非平衡空穴浓度变化为

$$\Delta p = N_A [1 - \exp(E_{A'}/k_B T)] [\sigma_h (3k_B T/m^*)^{1/2} - \exp\{-4\pi(2m^*/\hbar^2)^{1/2} (E_{A'} - \frac{3}{2} k_B T)^{1/2} x_0\}] \quad (2)$$

可见在相对较低的温度范围内俘获过程占主导, 而在相对较高的温度范围隧穿过程占主导. 同时由于隧穿几率随 Mg 中心间距离按  $e$  指数衰减, 因而低掺杂样品 B 中 DAP 发光强度无明显增强, 只呈现一小平台.

对(2)式中参数  $E_{A'}$ ,  $\sigma_h$ ,  $x_0$  采用最小二乘法对样品 A 实验数据进行拟合(如图2所示), 得到与 Mg 有关的陷阱中心 A 的电离能  $E_{A'} = 126\text{meV}$ , 其俘获截面  $\sigma_h = 3.45 \times 10^{-18} \text{cm}^{-2}$ , Mg 之间平均距离  $x_0 = 3.9\text{nm}$ . 拟合所得到的陷阱 A' 电离能非常接近人们

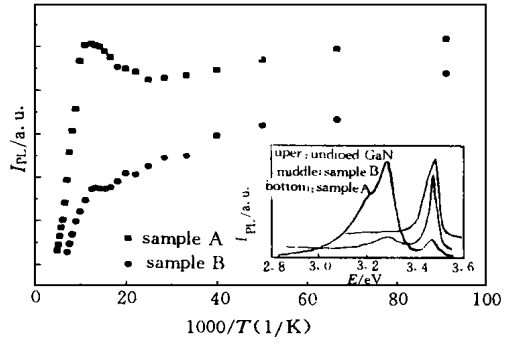


图1 Mg 掺杂 GaN 发光强度与温度的关系. 插图给出不同掺杂浓度及非故意掺杂 GaN 的低温(11K)光致发光光谱

Fig. 1 PL intensities of DAP as a function of the reciprocal of temperature. The inset shows PL spectra of undoped GaN and Mg-doped GaN with different Mg concentrations measured at 11K.

采用频率依赖电容和导纳谱<sup>[6]</sup>及霍尔<sup>[7]</sup>研究测得的一类  $Mg$  中心的电离能. 而且拟合得到样品 A 中  $Mg$  之间平均距离  $x_0$  计算得掺杂剂  $Mg$  的化学浓度为  $1.68 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , 这个值与 SIMS 测得的  $Mg$  浓度相一致. 考虑到通常所掺入的  $Mg$  大约有百分之一激活, 因而该值也与样品 A 的霍尔测量结果一致. 由于拟合得到的陷阱俘获截面在通常电中性陷阱俘获截面数量级, 而且  $Mg$  在 GaN 中可产生多种深中心, 可认为陷阱中心  $A'$  可能起源于  $Mg$  深能级俘获一个空穴而成为中性局域陷阱中心再从价带俘获另一空穴.

## 4 结 论

综上所述, 高  $Mg$  掺杂的 GaN 中 DAP 发光的反常温度行为是由于存在一与  $Mg$  深能级有关的空穴陷阱. 该空穴陷阱与  $Mg$  受主竞争价带非平衡空穴, 同时该空穴陷阱与  $Mg$  受主中心通过隧穿输运俘获空穴从而影响 DAP 发光强度. 低温下非平衡空穴的俘获竞争占主导, 而高温下通过隧穿输运所俘获的空穴过程占主导.

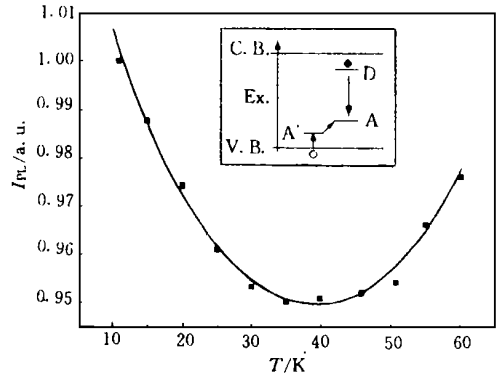


图2 高  $Mg$  掺杂样品 A 施主受主对发光强度随温度的变化( 实验值, —— 计算值) 插图 为跃迁能级图

Fig. 2 PL intensities of DAP of sample A as a function of temperature ( experiment data, —— calculation data). The inset shows schematic energy lever diagram and main transition processes.

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Nakamura S, Mukai T, Senoh M *et al*, Jpn. J. Appl. Phys., 1992, **31**: L139.
- [ 2 ] Amano H, Kito M, Hiramatsu K *et al*, Jpn. J. Appl. Phys., 1989, **28**: L2112
- [ 3 ] Moustakas T D, Molnar R J. Mater. Res. Soc. Symp. Proc., 1993, **218**: 753.
- [ 4 ] Yang Z, Li L K, Wang W I. Appl. Phys. Lett., 1995, **67**: 1686.
- [ 5 ] Smith M, Chen G D, Lin J Y *et al*, Appl. Phys. Lett., 1996, **68**: 1883.
- [ 6 ] Huang J W, Kuech T F, Lu H Q *et al*, Appl. Phys. Lett., 1996, **68**: 2392.
- [ 7 ] Tanaka T, Awatanabe, Amano H *et al*, Appl. Phys. Lett., 1994, **65**: 593.
- [ 8 ] Akasaki I, Amano H, Kito M *et al*, J. Lumin., 1991, **48&49**: 666.

# OPTICAL PROPERTY OF HEAVILY Mg-DOPED GaN GROWN BY MBE

Song Hang<sup>a)</sup> Park S H<sup>b)</sup> Kang T W<sup>b)</sup> Kim T W<sup>c)</sup>

<sup>a)</sup> (*Changchun Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021*)

<sup>b)</sup> (*Department of Physics, Dongguk University, Seoul 100-715, Korea*)

<sup>c)</sup> (*Department of Physics, Kwangwoon University, Seoul 139-701, Korea*)

## Abstract

Mg-doped GaN with cubic structure have been grown by molecular beam epitaxy on sapphire substrate. Temperature-dependent photoluminescence of heavily Mg-doped GaN have been investigated in order to study the properties of donor-acceptor pair recombination. We have found unusual temperature dependent behaviors of donor-acceptor pair recombination in heavily Mg-doped GaN. The photoluminescence intensity of donor-acceptor pair recombination decreases below 35K and then increases as the temperature increases up to 100K. This behavior may be explained by employing three energy level system, e. g. shallow donor level, shallow acceptor level and hole trap level. The main transition processes and their dynamic processes of non-equilibrium holes, which bumped by excited laser, have been studied. The holes are caught in the hole-traps and they subsequently transfer from the traps to shallow acceptors by tunneling, where recombination with electrons takes place. The theoretical calculations are in accordance with the experiment results. The PL intensity of donor acceptor recombination in heavily Mg-doped GaN is determined by the effects of hole trap and tunneling.

**Key words** GaN, photoluminescence, tunneling effect