

# 立方相 GaN 的持续光电导<sup>\*</sup>

张泽洪 赵德刚 孙元平 冯志宏 沈晓明 张宝顺 冯 淦 郑新和 杨 辉

(中国科学院半导体研究所 集成光电子国家重点联合实验室, 北京 100083)

**摘要:** 研究了金属有机物化学气相外延(MOVPE)方法生长的非故意掺杂的立方相 GaN 的持续光电导效应. 在六方相 GaN 中普遍认为持续光电导效应与黄光发射有关, 而实验则显示在立方 GaN 中, 持续光电导效应与其中的六方相 GaN 夹杂有关系, 而与黄光发射没有关系. 文中提出, 立方相 GaN 与其中的六方相 GaN 夹杂之间的势垒引起的空间载流子分离是导致持续光电导现象的物理原因. 通过建立势垒限制复合模型, 解释了立方相 GaN 的持续光电导现象的物理过程, 并对光电导衰减过程的动力学作了分析. 对实验数据拟合的结果证明以上的模型和推导是与实验相符的.

**关键词:** GaN; 持续光电导; 立方相; 空间载流子分离; 势垒限制复合

**PACC:** 7240

**中图分类号:** TN304.2<sup>3</sup>

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2003)01-0034-05

## 1 引言

GaN 由于具有带隙宽, 热和化学稳定性高等优点, 近年来受到了广大研究人员的密切关注, 该领域研究也取得了长足的进展<sup>[1,2]</sup>. 目前对于 GaN 的研究集中在蓝宝石衬底上生长的六方相 GaN 上. 然而, 可以在 GaAs 衬底上生长的立方相 GaN 具有易于解理, 集成和形成量子阱和异质结等优点<sup>[3]</sup>, 正日益受到人们的关注. 高质量的立方相 GaN 材料和立方相 GaN 基发光二极管的试制成功, 为对立方相 GaN 进一步研究打下了基础<sup>[4,5]</sup>.

持续光电导效应(Persistent photoconductivity, PPC)是一种光照导致的电导改变, 在光照停止后还能持续很长的时间(10<sup>4</sup> 秒的量级). 研究持续光电导效应对于探索光生载流子的产生、复合和输运机制以及提高光电器件的响应速度都有重要的意义<sup>[6]</sup>, 所以人们投入了很大的关注. 目前对于 GaN 的持续光电导效应的研究中, 很多工作都集中在对六方 GaN 的光电导的衰减动力学的探讨上. 人们普遍采用扩展指数复合定律:

$$I(t) = I_{\text{dark}} + (I_0 - I_{\text{dark}}) \exp[-(t/\tau)^\beta] \quad (\beta < 1)$$

描述衰变的动力学过程<sup>[7-13]</sup>, 虽然其中  $\beta$  的物理意义并不明确<sup>[7]</sup>. 在对于持续光电导效应的起源的研究中, 人们普遍认为六方相 GaN 的持续光电导与导致黄光发射的深能级缺陷有关<sup>[8-13]</sup>, 这些深能级缺陷可能是  $V_{\text{Ga}}$  空位, GaI 间隙,  $N_{\text{Ga}}$  反位<sup>[8]</sup> 和  $N_{\text{Ga}}$ -GaI 络合物<sup>[13]</sup>. 六方 GaN 中的立方相 GaN 夹杂也被认为是持续光电导的一个可能的原因<sup>[14]</sup>. 然而, 对于立方 GaN 的持续光电导效应, 目前还很少有报道.

本文报道了立方 GaN 的持续光电导效应的研究结果. 实验显示, 立方 GaN 的持续光电导效应与其中的六方相 GaN 夹杂有关, 而与黄光发射没有关系. 我们建立了一个势垒限制复合模型, 对立方 GaN 的持续光电导的物理过程进行了解释. 在该模型的基础上, 我们对光电导衰变的动力学过程进行了推导, 推导结果与对实验数据的曲线拟合结果相一致.

## 2 实验

实验中使用的样品是在 GaAs(100) 衬底上生

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 69825107), NSFC-RGC 联合基金(Nos. 5001161953, N - HKU028/00)资助项目

张泽洪 男, 1975 年出生, 硕士研究生, 从事 GaN 基紫外探测器的研究.

2002-04-01 收到, 2002-05-25 定稿

©2003 中国电子学会

长的非故意掺杂的立方相 GaN 样品. TEGa、NH<sub>3</sub> 和 H<sub>2</sub> 分别被用作 Ga 源、N 源和载气. 在生长过程中, 先在 550℃ 生长 2min GaN 缓冲层, 然后在 850℃ 下沉积 1μm 厚的立方 GaN. 生长时 NH<sub>3</sub> 的流量是 200sccm, 而 TEGa 的流量是 50sccm. 在以上条件下生长得到的晶片表面非常光滑平整. 通过霍尔测量, 得到样品的电子迁移率为 100cm<sup>2</sup> · V<sup>-1</sup> · s<sup>-1</sup>. 在同一个晶片上, 顺着气流方向解理下四个 10mm × 10mm 的方形样品 A、B、C 和 D.

我们测量了样品的室温光致发光(PL)谱. 激光光源是 325nm 紫外光. 测量持续光电导时, 先在样品上焊上两个相距 8mm 的 In 点作为电极. 通过 *I*-*V* 测试, 证明 In 与 GaN 形成了良好的欧姆接触. 每个样品都在黑暗恒温的环境中放置几天, 然后用白光照射样品, 并用 Keithley Sourcemeter 测试其电导变化. 在光照 40min 后, 白光被撤掉, 继续测量样品的电导约 80min. 测量时使用的外加偏压为 0.03V. 所有的测量均在室温下进行的.

### 3 结果和讨论

图 1 是 4 个样品的 PL 谱和持续光电导曲线的对照图. 从图 1(a) 中看出, 样品 A、B、C、D 的黄光发射是基本相同的, 而六方相 GaN 夹杂的带边发光强度逐渐降低. 相对应地, 从图 1(b) 中看出, 样品 A、B、C、D 的持续光电导是逐渐变弱的. 特别地, 样品 D 的六方相夹杂的发光强度很弱, 相对应的样品 D 就没有持续光电导效应.

需要说明的是, 样品之间的差别主要是由于生长的不均匀性造成的, 该不均匀性的来源需要进一步研究, 不在本文中讨论. 另外, 由于 XRD、PL 和喇曼散射光谱都可以用来测量立方相 GaN 中的六方相的相对含量, 其中 PL 是一种简单而又灵敏的方法<sup>[15, 16]</sup>. 因而, 在本文中用 PL 来表征立方相 GaN 中的六方相夹杂含量.

图 1 表明, 立方 GaN 的持续光电导效应与其中六方相 GaN 夹杂有关系, 而与黄光发射没有关系. Rieger 在讨论六方相 GaN 的持续光电导的起因时认为, 六方相 GaN 中存在着立方相 GaN 夹杂, 因而导致载流子的空间分离, 是产生持续光电导效应的原因<sup>[14]</sup>. 我们提出, 立方 GaN 基体中的六方相 GaN 夹杂, 可能是导致立方 GaN 的持续光电导效应的原因.

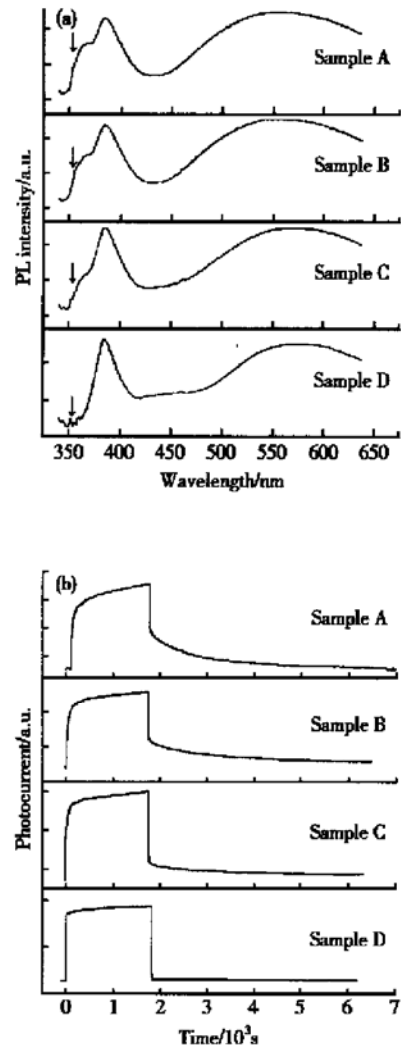


图 1 样品 A、B、C、D 的室温 PL 谱(a)和持续光电导谱(b) 箭头指向六方相 GaN 夹杂的带边发射(365nm 附近)

Fig. 1 PL and PPC spectra of the samples taken at room temperature. Arrows point out the band-edge emission of hexagonal inclusions, which is at about 365nm

Gunato 等认为, 立方相 GaN 和六方相 GaN 共存时, 可以看成一个“立方相/六方相/立方相”的量子阱. 而且他们指出, 六方相价带顶处于比立方相价带顶能量更高的位置; 也就是说, “立方相/六方相/立方相”超晶格是 II 型量子阱<sup>[17-19]</sup>. 在讨论 GaN 的光生电容的衰变过程时, Cheng 使用了一个势垒限制复合模型<sup>[20]</sup>. 在这些研究成果的基础上, 我们作出了立方相 GaN 中含有六方相 GaN 夹杂时的能带图, 如图 2 所示, 并认为立方相 GaN 的持续光电导效应可以解释如下:

光照开始后, 立方相 GaN 基体中迅速产生一定

数量的电子空穴对,使样品的电导迅速增大(见图2过程(1),对应小图中的AB段).由于六方相 GaN 夹杂区的价带顶比立方相 GaN 基体的价带顶高,所以六方相 GaN 夹杂区是一个空穴势阱.一部分光生空穴将被这些势阱俘获,相对应地,光生电子将出现过剩,而且越来越多.这些过剩电子留在立方相 GaN 基体的导带上,致使样品的电导越来越大(过程(2),对应小图中的BC段).当所有的势阱达到饱和后,样品的电导值达到最大(C点).在这个过程中,随着俘获的进行,六方相的价带顶会逐渐下降,能带结构将变化到虚线所示的位置.

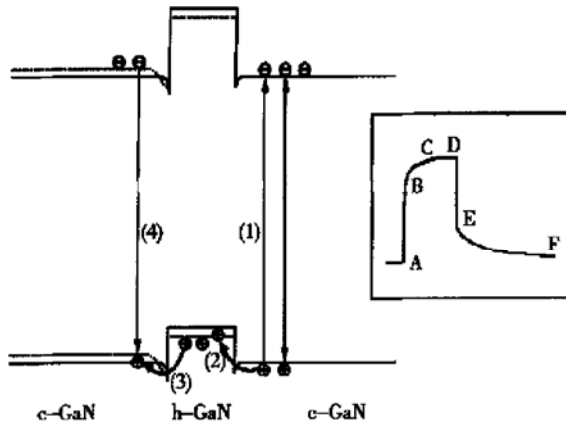


图2 势垒限制复合模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of barrier-limited model

当光照停止后,绝大部分的光生电子将与光生空穴迅速复合,致使样品的电导迅速下降(DE段).而立方相 GaN 基体的导带上的过剩电子,由于不能与束缚在势阱里的空穴马上复合,将滞留在导带上,使样品的电导即使在光照停止一段时间后仍不能回复到暗电导.这就是持续光电导效应.在立方相 GaN 基体区的光生空穴全部被导带上的电子复合掉以后,滞留在势阱里的空穴将逐渐通过热电子发射和隧穿等方式向立方相 GaN 基体区内输运(过程(3)),并与导带上的过剩电子复合(过程(4)),致使样品的电导逐渐变小(小图中的EF段).而且,随着势阱内的空穴逐渐跃出势阱,六方相 GaN 夹杂区的价带顶会上升,使空穴跃出势阱所需要克服的能量越来越大.为了研究该过程的动力学,我们用等效势垒  $\Phi(t)$  来描述空穴跃出势阱所需要克服的能量.从以上分析可知,随着空穴不断地跃出势垒,势垒的高度  $\Phi(t)$  将越来越大.在一级近似的情况下,可以假设,  $\Phi(t)$  的高度与势垒中的空穴浓度  $p(t)$  有如下的

关系:

$$\Phi(t) = \Phi_0 [p_0 - p(t)] / p_0 \quad (1)$$

其中  $\Phi_0$  和  $p_0$  是本实验条件下  $\Phi(t)$  和  $p(t)$  的最大值.只有那些能够跃出势阱的空穴才能与过剩电子复合.于是,空穴与过剩电子复合过程的速率方程可写为:

$$\frac{dp(t)}{dt} = -\sigma v_p n p(t) \exp \left( -\frac{q\Phi(t)}{kT} \right) \quad (2)$$

其中  $v_p$  是空穴的热运动速率;  $\sigma$  是空穴的俘获截面;  $p(t) \exp \left( -\frac{q\Phi(t)}{kT} \right)$  代表能越过势垒的空穴的浓度;  $n$  是势阱外的过剩电子的浓度,由于光电导是暗电导 1% 的量级,我们在计算中假设  $n$  是不变的.

将方程(1)代入方程(2),得到

$$\frac{dp(t)}{dt} = -\sigma v_p n \exp \left( -\frac{q\Phi_0}{kT} \right) p(t) \exp \left( \frac{q\Phi_0 p(t)}{kT p_0} \right) \quad (3)$$

令

$$A = -\sigma v_p n \exp \left( -\frac{q\Phi_0}{kT} \right)$$

$$B = \frac{q\Phi_0}{kT p_0}$$

于是方程(3)可写成

$$\frac{dp(t)}{dt} = A p(t) \exp [B p(t)] \quad (4)$$

由于空穴陷阱中的空穴浓度  $p(t)$  与立方相导带上的过剩电子浓度  $\Delta n(t)$  是相同的,而立方相导带上的过剩电子正是产生持续光电导  $\Delta \theta(t)$  的原因,于是

$$p(t) = \Delta n(t) = \frac{\Delta \theta(t)}{q\mu} = \frac{C \Delta I(t)}{q\mu} \quad (5)$$

其中  $C$  为一常数;  $\Delta I(t)$  为光照停止  $t$  时间后电流与暗电流的差值.

将方程(5)代入方程(4),得到:

$$\frac{d(\Delta I)}{dt} = A \Delta I \exp \left[ \frac{BC \Delta I}{q\mu} \right] \quad (6)$$

方程(6)是根据势垒限制复合模型推导出来的光电流随时间的变化率  $\frac{d(\Delta I)}{dt}$  与光电流  $\Delta I$  的变化关系.我们用该方程来拟合物品 B 的测量结果.图3中的黑点是实验测量所得到的样品 B 的  $\frac{d(\Delta I)}{dt}$  随  $\Delta I$  的变化关系.若光电流随时间的变化是简单的指数衰减

$$\Delta I = I_0 \exp(-t/\tau)$$

则  $\frac{d(\Delta I)}{dt}$  随  $\Delta I$  的变化应为线性关系

$$\frac{d(\Delta I)}{dt} = -1/\tau \exp(-t/\tau) = -\Delta I/\tau$$

而从图 3 中的实验测量曲线可以明显看出  $d(\Delta I)/dt$  与  $\Delta I$  是非线性关系. 用方程(6)来拟合图中的数据点, 拟合结果如图 3 中的实线所示. 可以看出, 方程(6)能很好的与实验数据吻合. 从该拟合结果, 可以认为, 立方相 GaN 的光电导的衰减过程是一个势垒限制复合过程.

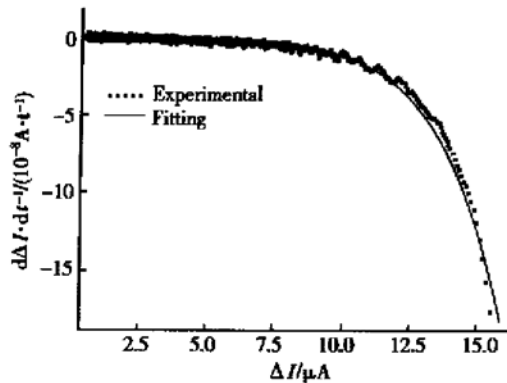


图 3 用方程(6)对样品 B 的电导衰减过程中的数据拟合图

Fig. 3 Data fitting of the decay process in Sample B by using Eq. (6)

## 4 结论

综上所述, 实验显示了立方相 GaN 的持续光电导效应与其中的六方相 GaN 夹杂相关, 而与样品的黄光发射没有关系. 我们提出, 立方相 GaN 与其中的六方相 GaN 夹杂之间的势垒引起的空间载流子分离是导致持续光电导现象的物理原因. 通过建立势垒限制复合模型, 解释了立方相 GaN 的持续光电导现象的物理过程, 并对光电导衰减过程的动力学作了分析. 对实验数据拟合的结果证明以上的模型和推导是与实验相符的.

由于立方 GaN 和六方 GaN 都是直接带隙的半导体材料, 而且它们的晶体结构中, 最近邻原子的排

列是相同的, 只有次近邻的原子排布不同. 以上关于立方 GaN 的持续光电导的研究, 对深入了解 GaN 的持续光电导行为, 有相当的启示意义.

## 参考文献

- [1] Strite S, Morkoc H. J Vac Sci Technol, 1992, B10: 1237
- [2] Nakamura S, Fasol G. The Blue Laser Diode. Berlin: Springer Verlag, 1997
- [3] Li J B, Yang Hui, Zheng L X. MRS Internet J Nitride Semicond Res, 1999, 4S1: G3, 25
- [4] Wu J, Yaguchi H, Onable K, et al. Jpn J Appl Phys, 1998, 37: 1440
- [5] Yang Hui, Zheng L X, Li J B, et al. Appl Phys Lett, 1999, 74: 2498
- [6] Binet F, Duboz J Y, Rosencher E, et al. Appl Phys Lett, 1996, 69: 1202
- [7] Beadie G, Rabinovich W S, Wichenden A E, et al. Appl Phys Lett, 1997, 71: 1092
- [8] Chen H M, Chen Y F, Lee M C, et al. J Appl Phys, 1997, 82: 899
- [9] Chen H M, Chen Y F, Lee M C, et al. Phys Rev B, 1997, 56: 6942
- [10] Lin T Y, Yang H C, Chen Y F. J Appl Phys, 2000, 87: 3404
- [11] Chung S J, Cha O H, Kim Y S, et al. J Appl Phys, 2001, 89: 5454
- [12] Wang Lianshan, Liu Xianglin, Yue Guozhen, et al. Chinese Journal of Semiconductors, 1999, 20(5): 371 [汪连山, 刘祥林, 岳国珍, 等. 半导体学报, 1999, 20(5): 371]
- [13] Reddy C V, Balakrishnan K, Okumura H, et al. Appl Phys Lett, 1998, 73: 244
- [14] Rieger W, Dimitrov R, Brunner D, et al. Phys Rev B, 1996, 54: 17596
- [15] Xu D, Yang H, Zhang S M, et al. Thin Solid Films, 2000, 372: 25
- [16] Xu D, Yang H, Li J B, et al. Thin Solid Films, 2000, 368: 279
- [17] Gunato M, Fujita S, Fujita S. Phys Rev B, 2001, 63: 165319
- [18] Murayama M, Nakayama T. Phys Rev B, 1994, 49: 4710
- [19] Albrecht M, Christiansen S, Salviati G, et al. MRS Symposia Proceedings, 1997, 468: 293
- [20] Chung H M, Pan Y C, Chung W C, et al. Proceeding of International Workshop on Nitride Semiconductors, 2000: 463

## Investigation on Persistent Photoconductivity Effect in Cubic GaN<sup>\*</sup>

Zhang Zehong, Zhao Degang, Sun Yuanping, Feng Zhihong, Shen Xiaoming,  
Zhang Baoshun, Feng Gan, Zheng Xinhe and Yang Hui

(*National Research Center for Optoelectronic Technology, Institute of Semiconductors,  
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

**Abstract:** The persistent photoconductivity (PPC) effect in unintentional doped cubic GaN grown on GaAs(001) substrate by metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD) is studied. It is widely accepted that the PPC effect in hexagonal GaN is related to the yellow luminescence (YL). However, we observe that in cubic GaN, it is induced by the unintentionally incorporated hexagonal crystallites in cubic matrix and has nothing to do with YL. We suggest that the spatial carrier separation caused by the barrier between the cubic matrix and hexagonal crystallites is the reason of the PPC effect. A barrier-limited model is developed to analyze the decay process, and the decay kinetics is discussed. The result of data fitting confirms our model and conclusion.

**Key words:** GaN; persistent photoconductivity; cubic GaN

**PACC:** 7240

**Article ID:** 0253-4177(2003)01-0034-05

---

<sup>\*</sup> Project supported by National Natural Science Foundation of China(No. 69825107), NSFC-RGC Joint Program(Nos. NSFC5001161953 and N - HKU 028/00)

Zhang Zehong male, was born in 1975, graduate student. He is engaged in research on GaN UV detectors.

Received 1 April 2002, revised manuscript received 25 May 2002

©2003 The Chinese Institute of Electronics