

GaN 外延材料中持续光电导的光淬灭

李 娜 赵德刚 刘宗顺 朱建军 张书明 杨 辉

(中国科学院半导体研究所 集成光电子国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 研究了非故意掺杂和掺 Si 的 n 型 GaN 外延材料持续光电导的光淬灭. 实验发现, 非故意掺杂 GaN 的持续光电导淬灭程度远大于掺 Si 的 n 型 GaN; 撤去淬灭光后前者的持续光电导几乎没有变化, 后者却明显减小; 稍后再次加淬灭光, 前者的持续光电导仍无变化, 而后者却明显增加. 作者认为两者持续光电导的形成都与空穴陷阱有关, 用空穴陷阱模型解释了非故意掺杂 GaN 持续光电导的形成以及淬灭过程; 掺 Si 的 n 型 GaN 的持续光电导是电子陷阱(杂质能级)和空穴陷阱共同作用的结果, 并且在持续光电导发生的不同阶段其中一种陷阱的作用占主要地位.

关键词: GaN; 持续光电导; 光淬灭

PACC: 7280E; 7240

中图分类号: TN304. 2⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2005)02-0304-05

1 引言

由于 GaN 材料具有宽禁带、耐高温、耐腐蚀等特点, 因此在短波长光电器件以及大功率耐高温电子器件领域有着广泛的应用前景. GaN 材料通常都采用异质外延生长, 生长期间的晶格失配和热失配导致各种各样的缺陷态. 持续光电导 (PPC) 是缺陷亚稳态性质的一种重要表现, 即光电导在光照停止后并不会马上消失, 而是持续相当长的一段时间. 它对 FET 器件以及紫外探测器的灵敏度、噪声特性以及响应速度都具有负面影响. 人们在非故意掺杂 GaN^[1,2], 掺 Si 或 Se 的 n 型 GaN^[3,4], 掺 Mg 的 p 型 GaN^[5,6], AlGaIn^[7], 甚至立方 GaN^[8] 材料中均发现了持续光电导现象. 目前对于 PPC 的起源问题没有统一的说法, 一般认为与导致黄光发射的内禀位错有关^[4,9,10], Qiu 等人^[9]认为非故意掺杂 GaN 的 PPC 是由空穴陷阱引起的, 也有学者认为 PPC 的形成与电子陷阱有关^[12]. GaN 材料光电导的光淬灭也是材料缺陷态的一种表现, 这种现象对于 GaN 基紫外探测器的可靠性是非常有害的. Huang 等人^[13]认为光电导的淬灭是由于材料中的空穴陷阱引起的, 另外一种观点认为它与导致 PPC 和黄光发射的内禀位错有关^[14]. 我们在实验中发现, GaN 的 PPC 也

有光淬灭现象, 即在红外光的照射下 GaN 的 PPC 发生淬灭, 这一现象在非故意掺杂和掺 Si 的 n 型 GaN 材料中都可以观察到, 并且掺 Si 的 GaN 的 PPC 开始阶段在淬灭光照射下是淬灭的, 而稍后再次加淬灭光时, PPC 反而增加, 就我们所知这一现象在国内外文献中还未见报道. 这一现象的发现为研究 PPC 的形成机制提供了一种新的途径.

2 实验

实验所用样品是采用低压 MOCVD 方法在蓝宝石衬底上生长的 GaN 外延材料, 非故意掺杂和掺 Si 的 GaN 厚度相当, 大约在 2.5 ~ 3 μ m 之间, 载流子浓度分别为 1×10^{17} 和 $3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$. 样品分别被切成小片, 然后焊上两个 In 点作为电极, 通过 *I-V* 测试证明为良好的欧姆接触. 光电流激发光源采用紫外灯, 淬灭光源采用 808 和 980nm 的半导体激光器, Keithley 2400 型源表作为电压源和数据采集工具.

3 结果及讨论

图 1 所示为非故意掺杂 GaN PPC 的光淬灭, 在图中看到激发光源关闭后样品在黑暗状态下的电流

李 娜 女, 硕士研究生, 主要从事 GaN 半导体材料及器件研究. Email: lina @red. semi. ac. cn

2004-02-02 收到, 2004-06-15 定稿

缓慢减小,说明有 PPC 现象. 在关闭激发光源的同时用 808nm 激光器照射样品,PPC 的衰减分为两个过程:(1)在开始的瞬间相对于黑暗状态下电流大幅减小,PPC 发生淬灭;(2)在瞬间的大幅度淬灭之后电流几乎不再减小. 撤去淬灭光后 PPC 几乎没有变化. 将淬灭光源换成 980nm 的激光器,有类似的淬灭现象,但淬灭幅度比前者大,这与两种淬灭光的能量以及功率密度均有关. 淬灭后电流值比暗电流大很多,暗电流值是将样品在黑暗环境中放置几天后测得的结果.

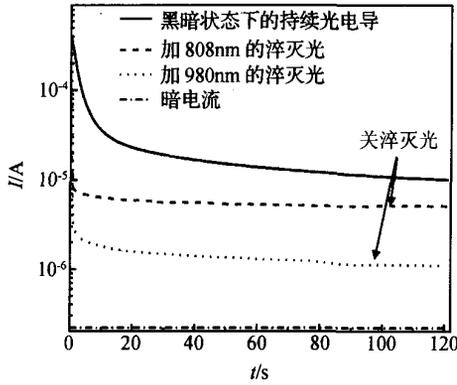


图 1 非故意掺杂 GaN 的持续光电导的光淬灭

Fig. 1 Optical quenching of PPC in unintentional doped GaN

图 2 所示为掺 Si 的 n 型 GaN 在这两种淬灭光照射下 PPC 的淬灭,图中实线表示黑暗状态下 PPC 的衰减过程;虚线表示在加淬灭光的情况下 PPC 的衰减,与非故意掺杂 GaN 类似,也分为两个过程:开始时相对于黑暗状态下电流很明显地减小,说明有淬灭现象发生,但减小的幅度远比前者小,之后减小的速度变慢. 但是与前者不同的是,撤去淬灭光后 PPC 明显减小. 淬灭后的电流值仍然比暗电流大.

由上面的实验结果看到:在撤去淬灭光后非故意掺杂和掺 Si 的 GaN 的 PPC 表现不同. 为此我们比较了不同时刻加淬灭光(808nm)二者 PPC 的变化情况,如图 3 所示. 对于前者,在 PPC 衰减过程中第一次加淬灭光,PPC 迅速减小,撤去淬灭光后几乎没有变化,此后再加淬灭光,PPC 没有什么变化;而对于后者,情况则大不相同:第一次加淬灭光时 PPC 发生淬灭,撤去淬灭光后,PPC 明显减小,稍后再加淬灭光,PPC 反而增加.

上述实验结果表明了非故意掺杂和掺 Si 的 n 型 GaN 的 PPC 均有光淬灭现象,但是二者又有不

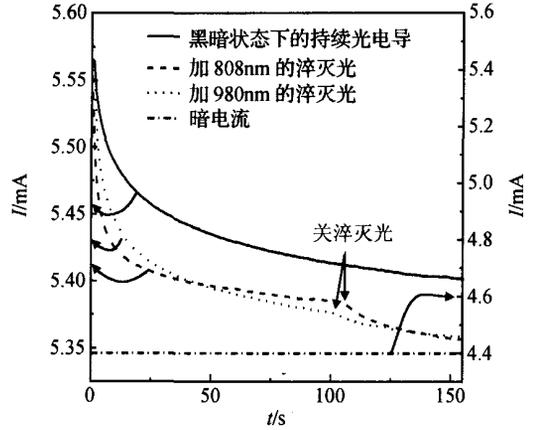


图 2 Si 掺杂 GaN 的持续光电导淬灭

Fig. 2 Optical quenching of PPC in Si-doped GaN

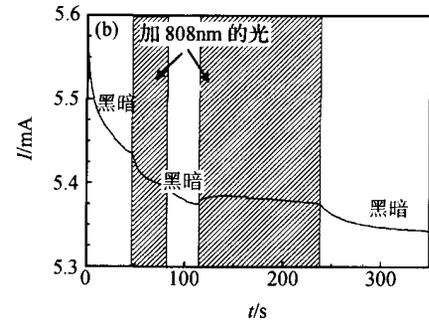
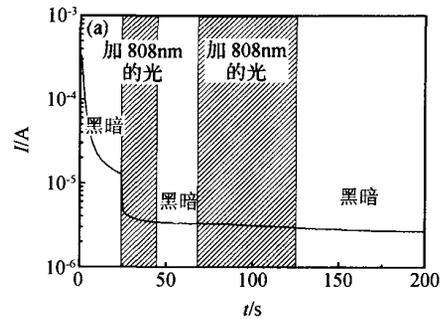


图 3 不同时刻加淬灭光持续光电导的变化 (a) 非故意掺杂 GaN;(b) 掺 Si 的 n 型 GaN

Fig. 3 Variation of PPC under the quenching light at different moments (a) Unintentional doped GaN; (b) Si-doped n type GaN

同之处:(1)前者的淬灭比例远大于后者,如在 808nm 的光照下前者第 3s 时淬灭了约 94%,而后者只有 2.7%,淬灭比例的定义为: $\frac{I_p - I_q}{I_p - I_d}$, 其中 I_p 是黑暗状态下的 PPC, I_q 是加淬灭光后的 PPC, I_d 是暗电流;(2)撤去淬灭光后前者的 PPC 几乎没有

变化,后者有明显减小;(3) PPC 淬灭后再加淬灭光,前者几乎没有变化,后者却有明显增加.因此我们认为二者 PPC 形成机制不同.

对于非故意掺杂 GaN,可以用空穴陷阱模型来解释 PPC 形成及其淬灭过程.文献[11]利用 Rose 的两中心复合理论^[15]很好地解释了非故意掺杂 GaN 光电导的光淬灭,而在我们的实验中非故意掺杂 GaN 的 PPC 发生光淬灭,其中淬灭光能量 1.53eV (808nm) 和 1.265eV (980nm) 分别与文献[14,16]中报道的光电导淬灭对应深能级一致,因此我们认为非故意掺杂 GaN 的 PPC 的形成与空穴陷阱有关.图 4 所示为 PPC 的形成及淬灭过程:(a) 紫外光照射在样品上产生电子-空穴对,由于空穴的迁移率远小于电子,因此很容易被材料中的空穴陷阱俘获,撤去紫外光后,陷阱俘获的空穴并不能立刻完

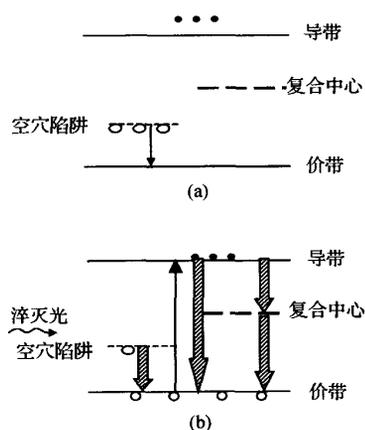


图 4 非故意掺杂 GaN 持续光电导的形成及光淬灭过程 (a) 撤去紫外光后陷阱中空穴缓慢释放,为保持电中性,导带电子不能立即消失,形成持续光电导;(b) 淬灭光激发价带电子到陷阱中,价带空穴数增加,导带电子被复合的几率大大增加,持续光电导淬灭

Fig. 4 Formation and optical quenching process of the PPC in unintentional doped GaN

全释放,为保持材料的电中性,导带的电子电流不能立刻完全消失,在没有外界条件干扰下空穴释放的过程会弛豫很长时间,从而形成 PPC,这对应图 1 中实线所示的 PPC 的衰减过程;(b) 在淬灭光的照射下,价带电子被激发到空穴陷阱,被陷阱俘获的空穴释放到价带,由于淬灭光强度很大,在照射到样品的同时,大量陷阱中的空穴被释放,并迅速与剩余的导带电子复合,PPC 急剧减小,这对应图 1 中 PPC 淬灭的第一个过程.大量电子被激发到陷阱中后,由

于库仑势的阻碍作用,空穴陷阱向价带释放空穴的几率大大降低,PPC 几乎不再减小,对应图 1 中 PPC 淬灭的第二个过程.空穴陷阱释放空穴的过程是从亚稳态过渡到稳态的过程,因此当陷阱中的空穴释放完后,缺陷能级达到稳定状态,此时淬灭光已经不再起作用,因此撤去淬灭光后,PPC 几乎不发生变化,而第二次再加淬灭光,PPC 也不发生淬灭,对应图 3(a)中所示的过程.淬灭后的 PPC 仍比暗电流大很多,说明对 PPC 有贡献的空穴陷阱对应的深能级可能还有很多,而 PPC 是这些深能级共同作用的结果.

对于掺 Si 的 GaN 而言,PPC 的光淬灭说明在淬灭光的照射下空穴陷阱释放空穴与导带电子复合;撤去淬灭光后 PPC 明显减小,我们认为这是因为淬灭光不仅使空穴陷阱释放空穴,还激发电子陷阱中的电子到导带,这一点从图 3(b)中第二次加淬灭光时 PPC 反而增加可以得到证实,这也可以解释它的 PPC 淬灭程度比非故意掺杂 GaN 要小的原因.电子陷阱很可能是 Si 掺杂引入的施主态能级.因此我们认为 Si 掺杂的 n 型 GaN 的 PPC 的形成与电子陷阱(杂质能级)和空穴陷阱都有关:在 PPC 刚开始的阶段空穴陷阱释放空穴的过程占主导地位,因为开始时加淬灭光 PPC 减小;当陷阱中的空穴释放完之后电子陷阱的作用才变得明显.这是因为以下现象的出现:(1) 第一次加淬灭光有淬灭现象,而在第二次加淬灭光时 PPC 反而增加;(2) 在 PPC 衰减较长时间后加淬灭光,PPC 不淬灭反而有少许增加,如图 5 所示.

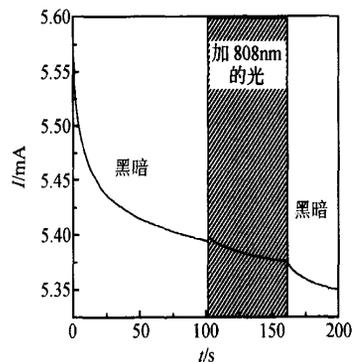


图 5 持续光电导衰减较长时间后加淬灭光持续光电导的变化

Fig. 5 Variation of PPC when applying quenching light long after it begins to decay

关于 n 型 GaN 中的空穴陷阱已有报道^[17,18], 这些深能级对空穴的俘获截面远大于对电子的俘获截面, 在未俘获空穴以前呈负电性. Ga 空位是空穴陷阱的来源之一, 它通常带有三个负电荷, 俘获空穴比较容易. 当然, 它的来源仍需进一步研究.

4 结论

在实验中发现了非故意掺杂以及掺 Si n 型 GaN 的 PPC 的光淬灭. 我们认为 n 型 GaN 的 PPC 与空穴陷阱有关, 利用空穴陷阱模型解释了非故意掺杂 GaN 的 PPC 的形成以及淬灭过程. 分析了掺 Si 的 n 型 GaN 的 PPC 的形成原因, 认为与电子陷阱和空穴陷阱都有关, 在 PPC 开始阶段空穴陷阱起主要作用, 空穴释放后电子陷阱的作用才变得明显. PPC 的光淬灭现象为研究 PPC 的起因提供了一种新的途径.

参考文献

- [1] Hirsch M T, Wolk J A, Walukiewicz W, et al. Persistent photoconductivity in n-type GaN. *Appl Phys Lett*, 1997, 71(8) : 1098
- [2] Chen Zhizhong, Shen Bo, Yang Kai, et al. Transient photoconductivity of GaN thin film on sapphire substrate. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1999, 20(1) : 62 (in Chinese) [陈志忠, 沈波, 杨凯, 等. $\text{-Al}_2\text{O}_3$ 衬底下 GaN 膜瞬态光电导性质研究. *半导体学报*, 1999, 20(1) : 62]
- [3] Beadie G, Rabinovich W S, Wickden A E, et al. Persistent photoconductivity in n-type GaN. *Appl Phys Lett*, 1997, 71(8) : 1092
- [4] Chen H M, Chen Y F, Lee M C, et al. Persistent photoconductivity in n-type GaN. *J Appl Phys*, 1997, 82(2) : 899
- [5] Johnson C, Lin J Y, Jiang H X, et al. Metastability and persistent photoconductivity in Mg-doped p-type GaN. *Appl Phys Lett*, 1996, 68(13) : 1808
- [6] Li J Z, Lin J Y, Jiang H X, et al. Nature of Mg impurities in GaN. *Appl Phys Lett*, 1996, 69(10) : 1474
- [7] Dang X Z, Wang C D, Yu E T, et al. Persistent photoconductivity and defect levels in n-type AlGaIn/GaN heterostructures. *Appl Phys Lett*, 1998, 72(21) : 2745
- [8] Zhang Zehong, Zhao Degang, Sun Yuanping, et al. Investigation on persistent photoconductivity in cubic GaN. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2003, 24(1) : 34 (in Chinese) [张泽洪, 赵德刚, 孙元平, 等. 立方相 GaN 的持续光电导. *半导体学报*, 2003, 24(1) : 34]
- [9] Chung S J, Cha Q H, Kim Y S, et al. Yellow luminescence and persistent photoconductivity of undoped n-type GaN. *J Appl Phys*, 2001, 89(10) : 5454
- [10] Wang Lianshan, Liu Xianglin, Yue Guozhen, et al. Persistent photoconductivity in n-GaN. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1999, 20(5) : 371 (in Chinese) [汪连山, 刘祥林, 岳国珍, 等. N 型 GaN 的持续光电导. *半导体学报*, 1999, 20(5) : 371]
- [11] Qiu C H, Pankove J I. Deep level and persistent photoconductivity in GaN thin films. *Appl Phys Lett*, 1997, 70(15) : 1983
- [12] Polyakov A Y, Smirnov N B, Govorkov A V, et al. Deep centers and persistent photoconductivity studies in variously grown GaN films. *MJ-NSR*, 5s1 : W11. 81
- [13] Huang Z C, Mott D B, Shu P K, et al. Optical quenching of photoconductivity in GaN photoconductor. *J Appl Phys*, 1997, 82(5) : 2707
- [14] Lin T Y, Yang H C, Chen Y F. Optical quenching of the photoconductivity in n-type GaN. *J Appl Phys*, 2000, 87(7) : 3404
- [15] Rose A. Concepts in photoconductivity and allied problems. New York : Wiley, 1963 : 52
- [16] Seitz R, Gaspar C, Monteiro T. Electrical and photoelectronic properties of hexagonal GaN. *Phys Status Solidi A*, 1999, 176(1) : 351
- [17] Muret P, Philippe A, Monroy E, et al. Properties of a hole trap in n-type hexagonal GaN. *J Appl Phys*, 2002, 91(5) : 2998
- [18] Polyakov A Y, Smirnov N B, Govorkov A V, et al. Deep hole traps in n-GaN films grown by hydride vapor phase epitaxy. *J Appl Phys*, 2002, 91(10) : 6580

Optical Quenching of Persistent Photoconductivity in GaN Epilayer

Li Na, Zhao Degang, Liu Zongshun, Zhu Jianjun, Zhang Shuming, and Yang Hui

(*State Key Laboratory on Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

Abstract : Optical quenching of persistent photoconductivity (PPC) in n-type unintentional doped GaN and Si-doped GaN is investigated. Quenching extent of PPC in the former is much larger than that in the latter. After the quench light PPC is removed nearly no change happens in the former while the PPC decreases obviously in the later. When the quenching light is turned on again after a while, PPC is unchanging in the former while increases instead in the later. The origins of the PPC in unintentional doped and Si-doped GaN both are considered having relations with hole traps based on the experimental results. Hole trap model is used to explain the origin of PPC and its optical quenching in unintentional doped GaN. And the PPC of Si-doped GaN is regarded as the effect of both electron traps and hole traps, one of which is dominant at different stages of PPC.

Key words : GaN; persistent photoconductivity; optical quenching

PACC : 7280E; 7240

Article ID : 0253-4177(2005)02-0304-05