

α -Al₂O₃ 衬底上 GaN 膜 瞬态光电导性质研究

陈志忠 沈波 杨凯 张序余 陈浩 陈鹏 臧岚 周玉刚 郑有

(南京大学物理系 南京 210093)

吴宗森 孙晓天 陈峰

(南京大学电子工程系 南京 210093)

摘要 本文报道了蓝宝石(α -Al₂O₃)衬底上 GaN 薄膜的瞬态光电导性质。用 YAG:Nd 脉冲激光器测量的光电导衰减曲线存在两个特征区域,即起始衰减区域和拖尾区域,分别对应时间常数: $\tau_{01} \sim 0.1 \text{ms}$ 和 $\tau_{02} \sim 1.0 \text{ms}$ 。在相同偏压和光强下,加热样品至 300℃,光电导衰减曲线的两个特征区域均发生变化,对应的两个时间常数都相应变小。实验结果说明在导带边几十 meV 内存在大量陷阱。对衰减曲线起始 200ns 取样,发现光照时光电导呈“S”形上升,停止光照,光电导锐利下降并出现振荡,表明光照停止后,载流子在导带和深陷阱能级的再分布。用一个浅能级陷阱和一个深能级陷阱的模型来近似导带边陷阱结构能很好的解释实验结果。另外,测得的光电导随光强的变化关系也进一步证实了模型的合理性。

PACC: 7240, 7125T

1 引言

GaN 作为蓝光发光二极管(LED)^[1]和高温大功率器件^[2,3]的优选材料正被受到广泛重视。七十年代人们就发现 GaN 材料中的缺陷对蓝光发射起重要作用^[4],而用于电子器件的制造却要求缺陷尽可能少。目前,由于没有大块的体材料和合适的衬底材料,GaN 外延生长中的晶格失配和热失配造成的位错密度最低也高达 10^8cm^{-2} 。研究 GaN 缺陷的性质、形成机理以及控制方法对 GaN 材料及器件的制备都具有极其重要的意义。人们对 GaN 材料中的杂质、缺陷所形成的禁带结构的机理研究才刚刚开始,如关于“黄带”的研究^[5-8]以及关于带边激子态的研究^[9-11]都还未能给出能带的清晰图象。光生载流子的产生、复合、输运与材料的能带结构关系密切,有关 GaN 的光电导研究已有一些报道^[12-15],并且得到了一些禁带结构的图象,但是瞬态光电导作为研究材料寿命及带内缺陷态的一种手段在 GaN 的研究中

陈志忠 男,1971 年出生,硕士研究生,从事 GaN 光学性质和电学性质研究
沈波 男,1963 年出生,博士,副教授,从事 GaN 材料和器件的研究
1997-07-18 收到,1997-12-10 定稿

尚未引起重视

本文对 α -Al₂O₃ 衬底上 GaN 膜进行了瞬态光电导的研究, 通过实验测量和理论模拟, 初步确定了载流子的复合机制和导带边的陷阱结构

2 实验

本文所用样品是 MOCVD 方法生长在蓝宝石 (α -Al₂O₃) (0001) 面上的单晶六角 GaN 薄膜, 气源为 TM Ga, NH₃, H₂, 其中 H₂ 为载气, 先在 550 °C 下生长 50nm 厚的 GaN 缓冲层, 然后温度升到 1050 °C 生长 GaN 外延层, GaN 外延层的生长速率为 1 μ m/h. Van der Pauw 法霍尔测量表明样品为非故意掺杂 n 型, 双晶回摆曲线半高宽为 170 μ m, 表明样品是质量较高的单晶, 透射谱测得膜厚为 1 μ m, Raman 光谱表明样品是单晶六角结构, 对 Raman 光谱 A₁(LO) 峰拟合得到载流子浓度^[16]为 $n = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

我们在 GaN 薄膜上蒸铝电极, 200~300 °C 退火. 光电流通过取样电阻读出. 瞬态光电导谱的测量是在脉冲激光激发下进行的, 使用的是 YAG:Nd 激光器三倍频激发光 ($\lambda = 355 \text{ nm}$), 脉冲宽度为 20ns, 脉冲频率为 10Hz, 用 HP54510B 型数字示波器采集数据, 时间分辨率为 1ps.

3 结果与讨论

在相同偏压和光照下, 我们分别测量了室温和加热样品至 300 °C 下光电导的衰减曲线, 结果如图 1 所示. 用双指数函数对光电导衰减曲线进行拟合, 得到两个时间常数: $\tau_{01} \sim 0.1 \text{ ns}$, $\tau_{02} \sim 1.0 \text{ ns}$, 后者与稳态光电导的响应时间处于同一量级^[14]. 300 °C 下的光电导值比室温时的小, 且 τ_{01} 和 τ_{02} 比室温值都有下降. 为了研究光电导的上升过程和光照停止后的瞬态弛豫过程, 对图 1 中室温下的光电导衰减曲线在 200ns 内取样, 得到如图 2 的曲线, 在光照时, 光电导随时间呈“S”形增长, 光照停止后, 光电导锐利下降并出现振荡现象, 振幅不断减小. 图 3 是室温下不同光强下的光电导衰减曲线, 随着光强增大, 光电导值增加. 光强为

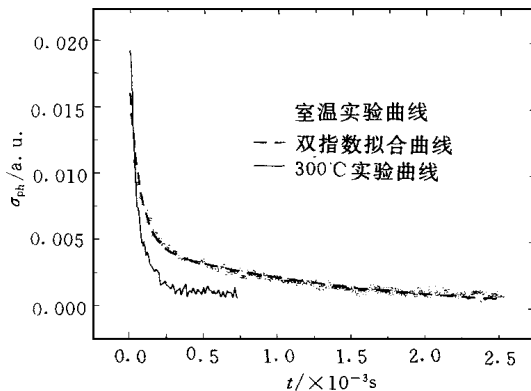


图 1 GaN 膜光电导衰减的实验曲线和拟合曲线

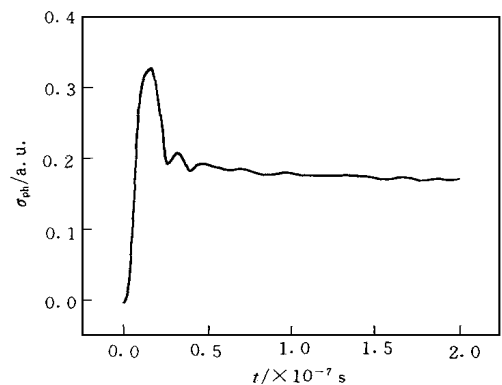


图 2 起始 200ns GaN 膜光电导随时间变化的曲线

30W/mm² 和 110W/mm² 的衰减时间常数几乎一致, 而 10W/mm² 的时间常数 τ_{01} 比上述两个强度下的要大

在高阻 n 型半导体中, 光电导一般是光生电子起作用, 而光生空穴常常被一些能级束缚住^[18], 因而光生电子与束缚空穴的复合是载流子复合的主要机制 我们知道, 温度升高将使得陷阱所陷载流子热发射几率增加, 进而导致光电导衰减曲线的变化 GaN 材料具有耐高温的性能^[2,3], 我们认为 300 处理不会改变 GaN 的能带结构

光电导的弛豫机制国际上已有一些研究 C. H. Qiu 等人认为^[12,13], 本征 n 型 GaN 价带边存在带尾态, 因而空穴很快陷入这些能态, 光电导就由光生电子起作用, 光电导的衰减是被陷空穴弛豫的结果 根据我们实验的结果, 光电导的衰减应是被陷电子弛豫的结果 GaN 外延薄膜在生长过程中会出现大量的氮空位, 非故意掺杂的 GaN 表现为 n 型, 其导带边有大量的离化施主缺陷, 据文献[15, 18]报道, 此离化施主浓度 > 10¹⁶cm⁻³, 室温下位于 30meV, 而且在离导带边几个 kT 处还存在深能级 因此我们假定了如下的模型(如图 4). 在禁带中存在两个电子陷阱能级, 一个为浅陷阱(E_{t1}), 一个为深陷阱(E_{t2}), E_r 是空穴陷阱, 在禁带中充当复合中心, 我们认为光电导的弛豫是被陷电子的弛豫(陷阱电子激发到导带, 再从导带跳到复合中心与被陷空穴复合), 被陷空穴的弛豫几乎被忽略 理由是如果价带带尾态对光电导的弛豫起作用, 那么载流子复合就在导带电子和价带空穴间进行, 载流子寿命将很长, 但据文献[18]报道, 载流子寿命是几百 ps 的量级, 这表明我们的假设是合理的

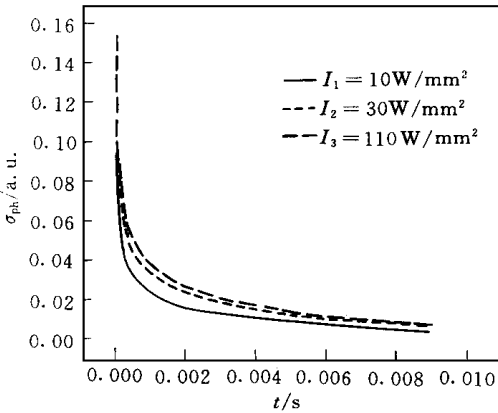


图 3 GaN 膜光电导衰减曲线和光强的关系

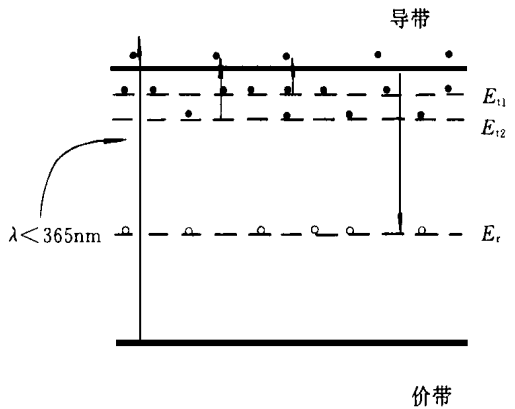


图 4 GaN 能级结构图

用我们的模型来解释实验结果 波长 $\lambda < 365\text{nm}$ 的光子激发价带电子到导带, 光生电子很快地在导带和陷阱中重新分布, 且光生空穴陷于复合中心 据文献[19], 在多陷阱能级系统中, “S”形上升的条件是载流子的复合寿命要远大于载流子重新分布的时间 在光照停止后, 导带中的光生电子浓度要小于陷阱中的电子浓度, 因而光电导弛豫主要是电子陷阱起作用 而电子从陷阱热激发到导带需要一定的能量, 产生时间要比电子复合寿命长, 深能级的产生时间更要长于浅能级的, 因此我们认为衰减曲线的两个时间常数分别对应于深、浅能级陷阱的作用 加热样品, 被陷电子热发射几率增加, 产生时间减小, 两个陷阱对应的时间常数也都减小 上面已说明了光电导弛豫的上升过程, 光照后的光电导锐利下降则是载流子复合和其在深陷阱的重新分布的共同作用结果 下降持续了近 1ns, 一方面可能是取样的精度较

低(为 $1/3\text{ns}$), 另一方面可能是样品的高频响应性能较差, 因为 GaN 膜表面蒸的是铝电极, 不完全是欧姆接触, 这样就有一个势垒电容, 所以影响了其高频响应。锐利下降后出现振荡现象, 振幅渐渐变小, 这主要是起始阶段的非线性效应引起的, 文献[20]描述的自由电子和被陷电子的连续性方程是非线性方程, 这种非线性效应在电导趋于稳定衰减时消失; 另一方面, 可能也与测量电路的高频响应有关。有关光电导衰减曲线与光强的关系, 我们的结果与 Binet 等报道的^[15]一致, 光强在 $10\sim 30\text{W}/\text{mm}^2$ 时, 光强增加, 时间常数 τ_{01} 减小, Binet^[15] 解释为低激发下光生载流子是非本征复合, 而高激发下是本征复合, 光强到达 $30\text{W}/\text{mm}^2$ 时, 载流子基本上是本征复合, 光强增加时间常数 τ_{01} 基本不变。 τ_{02} 在 $10\sim 110\text{W}/\text{mm}^2$ 范围内基本不变。用上面建立的模型来解释, 浅陷阱在大光强条件下, 电子占据率高, 陷阱产生率要大于俘获率, 因而 τ_{01} 要变小, 当光强到达足够大时, 浅陷阱电子占据数和导带电子浓度均趋于饱和, 此时 τ_{01} 基本不变。深陷阱电子占据对光强不敏感, 因而光强的改变并不影响 τ_{02} 的值。

4 结论

通过瞬态光电导谱我们知道了光电导衰减曲线存在两个特征区域, 起始衰减区域和拖尾区域, 其时间常数分别为 $\tau_{01}\sim 0.1\text{ms}$, $\tau_{02}\sim 1.0\text{ms}$, 分别对应于浅陷阱和深陷阱对光生载流子的作用, 由一个浅能级陷阱和一个深能级陷阱来近似带边陷阱结构, 从而建立载流子的复合模型, 能解释实验结果。改变温度, 光电导值增加, 衰减特征区域对应的时间常数均减小。起始 200ns 内光电导的锐利下降, 表明载流子的复合和在深能级陷阱的再分布, 对于振荡衰减, 我们解释为起始光电导非线性效应。其衰减曲线的时间常数 τ_{01} 在低激发时随光强增加而减低, 高激发时则基本不变, 而 τ_{02} 值在本实验的激发范围内都没有变化, 进一步证实了模型的准确性。

参 考 文 献

- [1] S. N. Nakamura, T. Mukai and M. Senoh, Appl Phys Lett, 1994, **64**: 1687.
- [2] M. A. Sif Khan, J. N. Kuznia *et al*, Appl Phys Lett, 1993, **62**: 1786.
- [3] M. A. Sif Khan, A. R. Bhattarai *et al*, Appl Phys Lett, 1993, **63**: 1214.
- [4] J. I. Pankove, E. A. Miller *et al*, RCA Rev., 1971, **32**: 383.
- [5] J. I. Pankove, J. A. Hutchby, J. Appl Phys, 1976, **47**(12): 5387.
- [6] L. Balagurov, P. J. Chong, Appl Phys Lett, 1996, **68**(1): 43.
- [7] W. Gotz, N. M. Johnson *et al*, Appl Phys Lett, 1996, **68**(24): 3470.
- [8] Jorg Neugbauer and Chris G. Van de Walle, Appl Phys Lett, 1996, **69**(4): 503.
- [9] C. Merz, M. Kunzer *et al*, Semicond Sci Technol, 1996, **11**: 712.
- [10] G. D. Chen, M. Smith *et al*, Appl Phys Lett, 1996, **68**(20): 2784.
- [11] D. Volm, K. Oettinger *et al*, Phys Rev. B, 1996, **53**(24): 16543.
- [12] C. H. Qiu, C. Hoggatt *et al*, Appl Phys Lett, 1995, **66**(20): 2712.
- [13] C. H. Qiu and J. I. Pankove, Appl Phys Lett, 1997, **70**(15): 1983.
- [14] Yang Kai, Q. Linhong *et al*, Chin Phys Lett, 1996, **13**(11): 874.
- [15] F. Binet, J. Y. Duboz *et al*, Appl Phys Lett, 1996, **69**(9): 1202.
- [16] R. Zhang, K. Yang *et al*, J. Vac. Sci. Technol., 1996, **A14**(30): 840.

- [17] 刘恩科, 半导体物理学, 北京: 国防工业出版社, 1989, 266
- [18] G. D. Chen, M. Smith *et al* , Appl Phys Lett , 1996, **68**(20): 2784
- [19] A. Tybulewicz, B. Sc *et al* , Photoelectric Effects in Semiconductors(New York), 1964, 152
- [20] 应根裕, 光电物理及其应用, 北京: 电子工业出版社, 1990, 39

Transient Photoconductivity of GaN Thin Film on Sapphire Substrate

Chen Zhizhong, Shen Bo, Yang Kai, Zhang Xuyu, Chen Hao,
Chen Peng, Zang Lan, Zhou Yugang, Zheng Youdou

(Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093)

Wu Zongsen, Sun Xiaotian and Chen Feng

(Department of Electronic Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093)

Received 18 July 1997, revised manuscript received 10 December 1997

Abstract In this paper we have studied the transient photoconductive properties of GaN thin film on sapphire oriented along [0001] direction. The decay curves of photoconductivity are obtained by YAG Nd pulse laser. They are characterized by two special regions, including the beginning decay region and tail region corresponding to two time constants ($\tau_{01} \sim 0.1 \text{ ns}$ and $\tau_{02} \sim 1.0 \text{ ns}$). With the same light intensity and voltage, when the sample is heated to 300°C , the time constants are both reduced. It shows that there are a large number of traps near the conduction band in the band gap. We use a model which involved two trap-levels to explain the experiment results. The model can explain the two constants of the decay curves as well as the configuration of the curves during first 200ns. Moreover, the curves varying with the light intensity are also explained by the model.

PACC: 7240, 7125T