

# 基于 PID 技术的深能级光离化截面测试方法\*

王 莹<sup>1,†</sup> 李新化<sup>2</sup>

(1 安徽大学电子科学与技术学院, 合肥 230009)

(2 中国科学院固体物理研究所 材料物理重点实验室, 合肥 230031)

**摘要:** 在分析 GaN 中深能级中心与入射光子间相互作用的基础上, 提出了一种基于 PID (proportional-integral-derivative) 技术的深能级中心光离化截面的测试方法. 在针对分子束外延生长 GaN 材料的光离化截面测试中, 使用该方法得到的测试结果同 Klein 等人报道的 HEMTs 器件中光离化谱吻合较好, 表明基于 PID 技术的深能级中心光离化截面测试方法能够精确地测试 GaN 材料中深能级光离化截面. 与现有技术相比, 该方法的优点是操作方便、测试相对准确, 可作为一种缺陷“指纹”鉴定的新方法应用于 GaN 材料的深能级研究中.

**关键词:** 光离化截面; 深能级中心; PID

**PACC:** 7155G; 7240; 3280F

**中图分类号:** TNO474

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2008)08-1585-04

## 1 前言

深能级中心的光离化谱又称为深能级缺陷的“指纹”鉴定, 同一种深能级缺陷在材料和器件结构中 will 展现出相同的光离化谱谱型, 通过深能级中心的光离化谱谱型分析, 可以有效鉴定器件结构中存在的深能级中心是否同材料中的深能级中心一致.

深能级中心光离化谱的测试关键在于测试不同入射光情况下深能级中心的光离化截面. 在 GaAs 体系中, 使用深能级中心瞬态光谱法可以精确测得 AlGaAs 材料和 GaAs/AlGaAs 结构中 DX (donor complex) 中心光离化截面, 使得基于深能级光离化谱分析的 DX 中心缺陷理论和实验研究在指导材料生长和器件制备工作中获得了巨大成功<sup>[1~3]</sup>. 由于 GaN 与 GaAs 同属于 III-V 族化合物半导体材料, 因此, 人们也期待使用同样的方法对 GaN 基材料的深能级中心进行研究. 然而, 由于 GaN 材料禁带较宽, 相应深能级中心能级较深, 使得基于锁相放大技术的深能级中心瞬态光谱法在 GaN 材料体系的光离化截面测试研究中受到限制. Klein 等人是在 GaN 基高电子迁移率晶体管 (high electronic mobility transistors, HEMTs) 的电流崩塌效应的基础上, 提出了深能级缺陷的光离化谱模型, 该模型作为 GaN 基功率器件深能级光谱测试的有效手段被广泛应用. Klein 等人光离化谱测量的原理是: 使用具有一定能量的入射光照射处于崩塌状态的器件, 如果光子能量大于深能级缺陷激发的临界值, 那么, 缺陷中捕捉的载流子将从深能级中释放出来从而导致漏电流的升高, 如果光照射前, 深能级中心全部被载流子占据, 那么深能级吸收光导致的漏极电流升高将正比于深能级中心释放的

载流子浓度<sup>[4]</sup>.

Hirsch 等人分析了分子束外延生长 n-GaN 材料的光电导谱, 他提出持续光电导光电流上升的过程应当遵循指数规律, 可以用下式描述:

$$G(t) = G_D + G_1(t) \quad (1)$$

$$G_1(t) = G_0(1 - e^{-t/\tau_1}) \quad (2)$$

式中 总电导  $G(t)$  是暗电导  $G_D$  和光诱导电导  $G_1(t)$  之和, 其中  $\tau_1$  为光电流上升的时间常数, 由深能级缺陷的特点,  $\tau_1$  展现了对入射光谱的依赖特性, 根据分析可得

$$\tau_1 \propto 1/(\sigma_{opt} \Phi) \quad (3)$$

式中  $\Phi$  对应于光子强度.

通过光电流上升的时间常数  $\tau_1$  和入射光子强度  $\Phi$  的数值, 可以计算出不同入射光照情况下深能级光离化截面的相对值, 并画出光离化截面同入射光子能量的关系, 得到光离化谱<sup>[5]</sup>.

根据以上分析, 我们发现 Klein 和 Hirsch 建立的深能级光离化截面的测量方法均建立在半导体器件和材料的光电流特性分析的基础上. 在 Klein 的方法中, 被测样品是高电子迁移率晶体管, 在入射光子的作用下, 从深能级中心逃逸出的载流子将进入 GaN/AlGaN 二维电子气沟道层, 除非在较高的源漏偏置情况下, 载流子被加速成热载流子 (hot carriers), 否则, 位于 GaN/AlGaN 二维电子气沟道层中的电子很难克服沟道层势垒进入 GaN 缓冲层或者 AlGaN 层, 重新被深能级中心捕捉, 因此可以认为 Klein 的光离化截面测试方法精度较高; Hirsch 的方法针对外延材料中的缺陷进行标定, 该方法建立在持续光电导光电流上升曲线拟合的基础上, 相对而言, 单指数的光电流上升规律中忽略了光电流上升的同时存在深能级中心对载流子的捕捉

\* 安徽省青年教师基金资助项目 (批准号: 2007jq1021)

† 通信作者. Email: iwangying@163.com

2008-03-16 收到, 2008-04-12 定稿

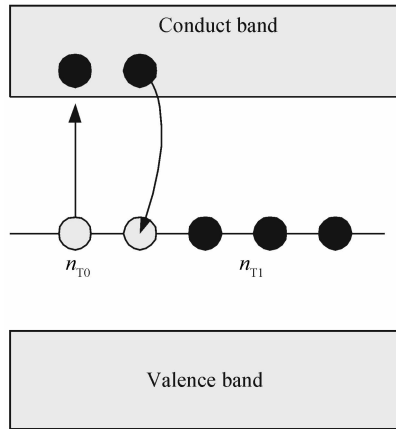


图 1 半导体材料中入射光子同深能级中心相互作用示意图

Fig.1 Diagram illustrating the interaction between incident photon and deep level centers

过程,使用该方法测得光离化谱同 Klein 等人报道的 GaN 基 HEMTs 器件中的光离化谱有一定的误差.迄今为止,就 GaN 基 HEMTs 器件中引起高源漏偏置情况下电流崩塌效应的深能级缺陷是否来自于 GaN/Al-GaN 异质结构的 GaN 层的问题,科研人员仍然无法给出确定性的结论.因此,需要开发一种能够精确测试 GaN 材料中深能级中心光离化截面方法来弥补当前 GaN 材料深能级研究的不足.

本文针对当前 GaN 材料深能级研究中存在的问题,通过分析 GaN 材料深能级中心与入射光子相互作用的过程,提出一种基于 PID (proportional-integral-derivative) 技术的深能级光离化截面测试方法.

## 2 理论分析

假设半导体材料中存在图 1 所示的深能级中心,浓度为  $n_T$ ,样品中自由载流子的初始浓度为  $n_0$ .在恒定温度无光照情况下,样品处于热平衡状态时,样品中被载流子占据的深能级中心浓度为  $n_{T1}$ ,未被占据的深能级中心浓度为  $n_{T0}$ ,应满足:

$$n_{T1} + n_{T0} = n_T \quad (4)$$

在小于禁带宽度的入射光子作用下,深能级中心捕捉的载流子将被激发到导带(价带),形成自由载流子.在平衡时刻,入射光子引起的载流子变化和载流子克服回复势垒回复到深能级中心的几率相同,它们之间的关系可用下式表示:

$$I(h\nu)\sigma(h\nu)n'_{T1} - An'_{T0}n = 0 \quad (5)$$

(2) 式经变化可转换为

$$\sigma(h\nu) = \frac{An'_{T0}n}{I(h\nu)n'_{T1}} \quad (6)$$

其中  $I(h\nu)$  为入射光强度; $\sigma(h\nu)$  为在入射光子能量为  $h\nu$  的情况下深能级中心的光离化截面; $A$  为热激活作用下载流子克服回复势垒回复到深能级中心的几率; $n'_{T1}$ ,  $n'_{T0}$  分别是平衡时刻样品中被载流子占据的深能级中心浓度和未被占据的深能级中心浓度,它们的和仍满足 (4) 式; $n$  为导带(价带)中的载流子浓度.

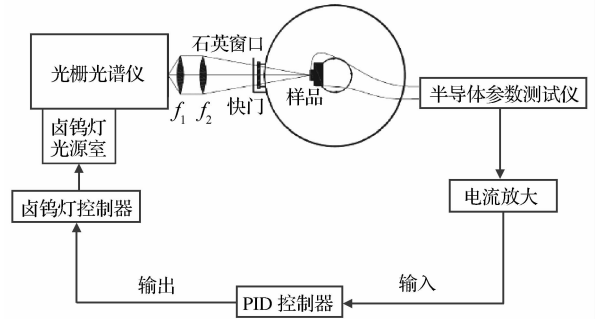


图 2 基于 PID 技术的光离化截面测试原理图

Fig.2 Schematic diagram of the photoionization cross sections measurement technique based on PID control

假设在入射光的作用下,样品中的载流子浓度变化  $\Delta n$  应满足:

$$\Delta n = n - n_0 \quad (7)$$

$$\Delta n = n_{T1} - n'_{T1} \quad (8)$$

如果能够保证在不同入射光作用情况下,载流子浓度变化  $\Delta n$  为恒定值,那么根据 (4)~(8) 式,  $n'_{T1}$ ,  $n'_{T0}$ ,  $n$  也将为定值,在恒定温度下,载流子克服回复势垒回复到深能级中心的几率  $A$  可视为常数<sup>[4]</sup>,因此 (6) 式可以转换为

$$\sigma(h\nu) \propto \frac{1}{I(h\nu)} \quad (9)$$

## 3 实验

(9) 式给出了一种新的深能级中心的测试思路,那就是在控制样品中载流子浓度变化为恒定值的前提下,深能级中心的光离化截面反比于入射光强度.然而,在具体的实验中,我们面临的问题是,如何找出一种有效的手段控制载流子浓度的变化.

PID 控制器是一种在工业控制中常用的控制技术.其基本工作原理是:把收集到的数据与参考值进行比较,然后把这个差别用于计算新的输出值并通过调整输出值的大小使得系统的被控信号达到或者保持在参考值.目前基于 PID 技术的 PID 控制器已经广泛应用于温度、流量控制.根据 (9) 式,深能级中心光离化截面测试要求在不同波长入射光激发下控制样品中载流子浓度变化为恒定值,其实验思路同 PID 控制的基本原理相吻合,因此,可将 PID 技术应用于光离化截面的测试工作中.

图 2 是基于 PID 技术的光离化截面测试原理图,我们以样品中反映载流子浓度变化的电流信号为被控信号,通过调整激发光强度来改变样品中的电流响应.实验时,将被控信号采样输入 PID 控制器的输入端, PID 控制器比较被控信号同目标(参考)信号值之间的差异,通过计算得出新的控制参量并输出到控制电路,控制电路控制卤钨灯的输出功率以调节入射光强度,进而调节样品中光激发电流的数值.

在具体测试过程中,被测样品是分子束外延生长氮

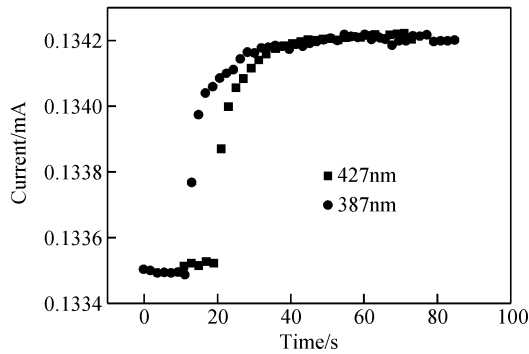


图 3 两个不同激发波长下使用基于 PID 技术的光离化截面测试方法得到的光电流变化曲线

Fig.3 Photocurrent curves at two represent incident excitations by using the photoionization cross sections measurement technique based on PID control

化镓外延薄膜,使用范德堡法测试其室温载流子浓度为  $2.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,迁移率为  $125 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ .光电导测试表明,即使在室温,上述被测样品中仍然存在明显的持续光电导现象,表明该样品中存在深能级中心.选用厦门宇电 AI708 型智能控制调节器为 PID 控制器,选用卓立汉光 LPT75 型卤钨灯光源室配合 SBP150 光栅光谱仪和相应的滤光片为测试提供单色光源,样品测试在自行研制的低温测试设备中进行,该设备可实现  $77 \sim 300 \text{ K}$  温度范围内低温电流-电压测试.使用 Agilent E5273 型半导体参数测试仪在恒压模式下测试样品中的电流变化,测试时将测试电流信号放大后接入 AI708 型智能控制调节器的电流输入端,使用 PID 仪表的线性电流输出模块控制可控硅移相触发器调节卤钨灯的输出功率,当样品中的光电流值达到设定值后测试入射光强度,使用公式(9)计算对应入射波长下深能级中心的光离化截面.

## 4 结果与讨论

图 3 是低温(77K)时两个不同激发波长下,使用基于 PID 技术的光离化截面测试方法得到的光电流变化曲线.我们可以发现,由于 PID 控制器的作用,入射光强度均从初始阶段较弱逐渐增强,即使在不同波长的光入射情况下,光电流均很快达到稳态值.表明基于 PID 技术的光电流控制系统平稳性和快速性较好,控制精度很高,能够达到快速准确地控制被测样品中光电流变化的目标,从而为光离化截面的测试奠定良好的基础.

图 4 是 77K 时使用上述方法测试得到的光离化截面随入射光子能量变化归一化的结果,将该结果同 Hirsch 等人在此光谱范围内的实验结果对比,可以发现两者偏差较大<sup>[5]</sup>,同 Klein 等人提出的在 HEMTs 器件中的位于导带以下 2.85eV 的深能级中心光离化谱吻合得较好<sup>[4]</sup>.进一步分析表明,使用基于 PID 技术光离化截面的测试方法针对 GaN 材料深能级中心的测试结果同 Klein 给出的针对 GaN 基 HEMTs 器件的测试结果相比误差小于 8%,我们认为这种误差可能是由入射光

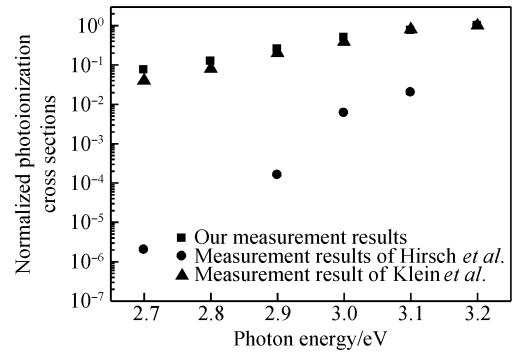


图 4 使用基于 PID 技术的深能级光离化截面测试方法得到的光离化截面数据同 Hirsch 和 Klein 等人报道的结果对比图

Fig.4 Normalized photoionization cross sections measured by photoionization cross sections measurement technique based on PID control (full squares) This spectra are compared to photoionization cross sections results after Hirsch *et al.* (full circle) and Klein *et al.* (full triangle), respectively.

强度测试偏差造成的.分析 Binary 光离化截面的理论推导过程,可以发现,在得出光离化截面前,Binary 等人做了一个假设,那就是在入射光子的作用下,深能级中心只存在载流子的释放过程,忽略了自由载流子克服回复势垒的回复过程.然而,大量研究表明在 GaN 外延材料中,即使在低温下,仍然存在一定几率的载流子克服势垒回复到深能级中心的现象.因此,我们认为,Binary 的光离化截面计算方法并不准确.而 Klein 等的光离化截面测试针对具有电流崩塌效应的 HEMTs 器件,在入射光的作用下,位于 GaN/AlGaIn 结构中的深能级中心捕捉的载流子释放到二维电子气势阱中很难回复,在此过程中可以忽略深能级中心对光生载流子的重新捕捉过程,因此,Klein 的光离化截面测试方法相对准确.在针对 GaN 材料中深能级缺陷同入射光子相互作用的理论分析过程中,我们综合考虑到在入射光子的作用下载流子从深能级中心释放出来的过程中还伴随着回复过程,因此,根据上述模型得到的 GaN 材料中深能级缺陷光离化截面(9)式要比(3)式相对准确.同时,通过实验过程中引入 PID 技术可以较好地控制入射光强度,达到(9)式控制载流子浓度变化的目的,上述工作均为 GaN 材料中深能级缺陷光离化截面的准确测量奠定了基础.

## 5 结论

综上所述,通过综合考虑 GaN 材料中深能级中心与入射光子相互作用同时存在载流子发射和俘获的基础上,给出了一种基于光电流分析的深能级中心光离化截面的新测试思路,即在保证光电流变化为恒定的情况下,深能级中心的光离化截面反比于入射光强度.并给出了一种基于 PID 技术的深能级中心测试方法,使用该方法对 GaN 材料中深能级中心光离化截面进行测试的结果表明,该结果同 Klein 等人针对具有崩塌效应的 HEMTs 器件结构中的光离化谱吻合,表明该方法可以

作为一种快速测试光离化截面的新技术,应用于 GaN 深能级中心的研究.

### 参考文献

- [ 1 ] Lang D V. Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors. *J Appl Phys*, 1974, 45(7): 3023
- [ 2 ] Lang D V, Logan R A, Jaros M. Trapping characteristics and a donor-complex (DX) model for the persistent-photoconductivity trapping center in Te-doped  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . *Phys Rev B*, 1979, 19(2):1015
- [ 3 ] Dobaczewski L, Kaczor P, Missous M, et al. Evidence for substitutional-interstitial defect motion leading to DX behavior by donors in  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . *Phys Rev Lett*, 1992, 68(16):2508
- [ 4 ] Klein P B, Binari S C, Ikossi K, et al. Current collapse and the role of carbon in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors grown by metalorganic vapor-phase epitaxy. *Appl Phys Lett*, 2001, 79(21):3527
- [ 5 ] Hirsch M T, Wolk J A, Walukiewicz W, et al. Persistent photoconductivity in n-type GaN. *Appl Phys Lett*, 1997, 71(8):1098

## A New Photoionization Cross Section Measurement Technique Based on PID Control\*

Wang Ying<sup>1,†</sup> and Li Xinhua<sup>2</sup>

(1 School of Electronic Science and Technology, Anhui University, Hefei 230009, China)

(2 Key Laboratory of Materials Physics, Institute of Solid State Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** A new method based on proportional-integral-derivative (PID) control is proposed to measure photoionization cross sections in GaN materials by analysis of release and recaptures carriers of deep centers by incident light. The measurement results of photoionization cross sections on GaN by this method are consistent with the photoionization spectrum in HEMTs reported by Klein. These results indicate that the photoionization cross section technology based on PID control can measure precisely deep level photoionization cross sections in GaN material. Compared with existing techniques, this method is more operable and applicable. It can serve as a new ‘fingerprint’ analysis method in deep level center detection in GaN.

**Key words:** photoionization cross section; deep level; PID

**PACC:** 7155G; 7240; 3280F

**Article ID:** 0253-4177(2008)08-1585-04

\* Project supported by the Research Foundation of Education Bureau of Anhui Province, China (No. 2007jq1021)

† Corresponding author. Email: iwangying@163.com

Received 16 March 2008, revised manuscript received 12 April 2008

©2008 Chinese Institute of Electronics