

缺陷俘获势垒测定新方法——瞬态光霍耳谱*

封松林¹⁾ 王海龙²⁾ 周洁¹⁾ 杨锡震³⁾

¹⁾中国科学院半导体研究所, 半导体超晶格国家重点实验室, 北京, 100083;

²⁾曲阜师范大学物理系, 山东, 曲阜; ³⁾北京师范大学物理系, 北京, 100875

摘要 以瞬态光霍尔测量为基础, 建立了直接观测俘获过程的深中心分析测试新手段. 该方法不需要做肖特基结、p-n 结、或 MIS 结构, 几乎可在零电场下测量缺陷参数, 克服电场、德拜带尾、非指数瞬态等对缺陷特性的影响, 也克服了深能级瞬态谱技术(DLTS)只能通过载流子发射过程间接测量俘获参数的缺点. 用此方法测量了 Ga_{0.7}Al_{0.3}As 中 DX 中心的俘获势垒.

关键词 瞬态光霍耳谱(TPHS), 深能级瞬态谱(DLTS), DX 中心, 俘获势垒.

缺陷 半导体

引言

深能级俘获势垒是表征缺陷的关键物理量之一, 它的准确测量对缺陷微观结构的认识和缺陷的确认有重要意义. 常规深中心研究手段深能级瞬态谱(DLTS)在这方面取得了许多结果, 但 DLTS 是通过载流子的热发射过程间接获取俘获势垒, 存在诸如电场效应、德拜带尾(Debye tail)、各种瞬态的非指数效应等本质上无法克服的困难, 使得很多结果不太可靠, 而且工作量也很大. DLTS 要求样品是 p-n 结、肖特基结或 MIS 结构, 不少材料 p-n 结或肖特基结不好实现、MIS 结构工艺复杂. 我们针对这些不足, 发展了以瞬态光霍尔测量为基础的深能级分析测试手段. 此方法直接用俘获过程来获取缺陷的俘获势垒、俘获截面等信息, 可以不用做 p-n 结、肖特基结或 MIS 结构. 我们已成功地将瞬态光霍耳谱(TPHS)用于 AlGaAs 中 DX 中心俘获势垒测量.

1 基本原理

对样品受周期性光脉冲照射产生的瞬态霍尔信号用率窗系统进行分析是一种新的缺陷研究手段. 设样品的施主浓度为 N_d 、深中心浓度为 N_t 、测量温度为 T , 如果我们给样品加一光脉冲将深中心上的局域电子全部激发到导带(我们在此仅讨论 n 型情况, p 型情形可以类推), 为讨论简便, 我们忽略了 n 型样品中空穴的俘获与发射. 由于被深中心俘获载流子的热发射势垒大于俘获势垒, 在足够低的温度下被缺陷俘获的这些电子很难重新通过热发射到导带成为自由电子, 因而无光恢复阶段样品中电子浓度可写为

*国家自然科学基金资助项目

本文 1994 年 11 月 15 日收到, 最后修改稿 1995 年 3 月 9 日收到

$$n = n_0 + N_t e^{-C_x t}, \quad (1)$$

其中 n_0 是平衡时电子浓度, $C_x = \sigma_n v n$, σ_n 为深中心对电子的俘获截面, 对许多深中心是温度的函数, 存在俘获势垒 E_B , C_x 可表示为:

$$C_x(T) = \sigma_{n0} e^{-E_B/kT} v n. \quad (2)$$

v 是电子平均热运动速度, 正比于 $T^{1/2}$, n 是自由载流子浓度, 一般可取测量温度范围内 n 为定值. 由式(1)不难得到非简并情况下样品的霍尔电压

$$V_H = -\frac{1}{(n_0 + N_t e^{-C_x t})e} \frac{I_x B_z}{d}. \quad (3)$$

其中 d 为样品的厚度, I_x 为通过样品的电流, B_z 为垂直样品表面方向施加的磁场. 如外加光脉冲是周期性的, 则能用相位差为 $1/4$ 周期的双锁相放大器设置率窗对样品的霍尔电压进行分析, 率窗函数为

$$F(t) = \begin{cases} 0, & 0 < t < t_F/4 \\ 1/t_F, & t_F/4 \leq t \leq t_F/2 \\ 0, & t_F/2 < t < 3t_F/4 \\ -1/t_F, & 3t_F/4 \leq t \leq t_F \end{cases}. \quad (4)$$

经处理后的信号可表示为

$$R(T) = \int_0^{t_F} V_H(t) F(t) dt. \quad (5)$$

积分式(5)可得

$$R(T) = \frac{I_x B_z}{en_0 C_x t_F d} \left\{ \ln\left(e^{\frac{t_F}{4}} + \frac{N_t}{n_0}\right) - \ln\left(e^{\frac{C_x t_F}{2}} + \frac{N_t}{n_0}\right) - \ln\left(e^{\frac{3t_F}{4}} + \frac{N_t}{n_0}\right) + \ln\left(e^{C_x t_F} + \frac{N_t}{n_0}\right) \right\}. \quad (6)$$

对于一定的 N_t/n_0 , 当 $C_x t_F$ 为某一值时(该值由求解式(6)确定), $R(T)$ 取极值. t_F 为设定的周期. 正如传统的 DLTS 方法一样, 对应某一特定的周期都可以从 $R(T)$ 取极值对应的温度获得 $C_x(T)$, 改变周期, 便能得到 $C_x(T)$ 在一定温度范围内随温度的变化关系. 根据式(2)作 $\ln(T^{1/2}/C_x(T)) - 1/T$ 图, 从其斜率可求得俘获势垒 E_B . 与传统的 DLTS 方法比较, TPMS 是用光照使得缺陷电子占有率低于平衡态, 测量期间, 多余的离化缺陷需从导带俘获电子以恢复平衡, 因而是直接测量载流子的俘获过程; 而 DLTS 是利用正向(注入)电脉冲使得空间电荷区内的缺陷电子占有率高于平衡态, 测量期间, 多余的俘获电子需从缺陷向导带热发射以恢复平衡, 因而是直接测量载流子的热发射过程.

2 实验结果及讨论

实验装置的仪器框图如图 1. 我们利用此装置测量 GaAlAs 样品. 样品是由分子束外延在半绝缘的 GaAs 衬底上生长 200 Å 未掺杂的 $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$, 然后是 400 Å Si 掺杂的 $\text{Ga}_{0.7}$

$\text{Al}_{0.5}\text{As}$, 掺杂浓度为 $1.5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, 上面是 100\AA GaAs 覆盖层, 在样品表面做欧姆接触以进行霍尔测量, 图 2 为样品的俯视图, 在 A 和 B 之间通一恒定电流, 在 C 和 D 之间测量霍尔信号。

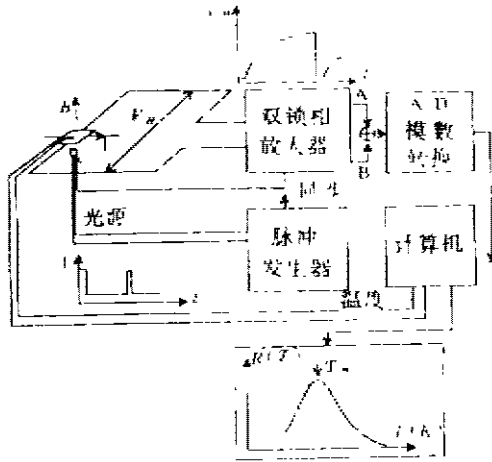


图 1 瞬态光霍尔谱实验装置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set-up of transient photo-Hall spectroscopy

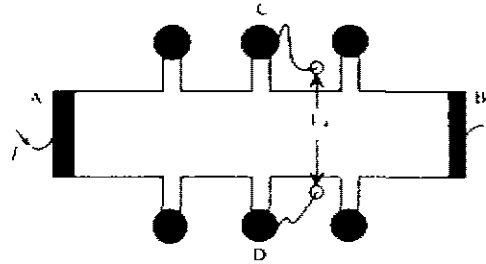


图 2 样品俯视图
Fig. 2 Top view of the sample surface

对该样品进行的 DLTS 测量得到的表观激活能 $E_a = 0.39 \text{eV}$ ($E_a = E_B + E_T$), 典型的实验曲线如图 3. 这表明该样品中主要的缺陷为 DX 中心^[1,2], 其它深中心可以忽略不计(因浓度太小, 较 DX 中心小 2~3 个量级以上). 我们选取 GaAlAs 中的 DX 中心是为了避免其它缺陷的干扰, 即 DLTS 和 THRS 谱均来自同一缺陷(DX 中心), 使两者具有可比性. 对样品进行的瞬态光霍尔测量得到 2 个峰值能量, 其中 $E_1 = 0.32 \text{eV}$, $E_2 = 0.19 \text{eV}$, 典型的实验曲线如图 4. 图 5 中给出了各能量的 Arrhenius 图.

为便于讨论, 我们首先看一下 DX 中心俘获过程. 一种观点认为它只从导带 L 极小俘获电子^[1,4], 而 DX 中心的俘获势垒这一概念在许多文献中并未说清楚, 通常被称之为俘获势垒的 E_B (对导带 Γ 电子的俘获势垒) 和它的本征势垒 E_a (对导带 L 电子的俘获势垒) 概念上的差别. 按照这一观点, 由于 DX 中心只能俘获激发到 L 带的电子, 因而导带 Γ 上的电子必须先被激发到导带 L, 俘获势垒 E_B 是导带 L 极小 E_L 与导带 Γ 极小 E_Γ 间的能量差与本征势垒 E_a 两部分之和, 即 $E_B = E_a + E_L - E_\Gamma$ ^[1,4]. DLTS 实验只能通过不同条件下 DX 中心的填充程度来测量俘获势垒, 而限制其填充程度的势垒是 E_B , 即 DLTS 只能测量 E_B . 文献报道掺 Si 的 $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ DX 中心的 E_B 值为 0.33eV ^[4]. 对于很大范围的 Al 组分, E_a 的导出值为 0.2eV ^[4]. 从我们实验结果可直接观察到 DX 中心从 L 带和 Γ 带的两个不同俘获过程, 与有关文献比较, 不难得出 E_1 峰对应于 Γ 带电子通过 L 带被 DX 中心俘获的过程^[4,5], 即有俘获势垒 $E_B = 0.32 \text{eV}$. 而 E_2 峰则对应于受光照而占据 L 带的电子被 DX 中心俘获的过程, 其俘获势垒是 $E_a = 0.19 \text{eV}$. 其原因是 TPMS 的测量过程中, DX 中心上的电子被光激发后由于持续光电导, 电子将滞留在导带, 与 DLTS 测量相比, 导带电子浓度大为增加, L 带有更

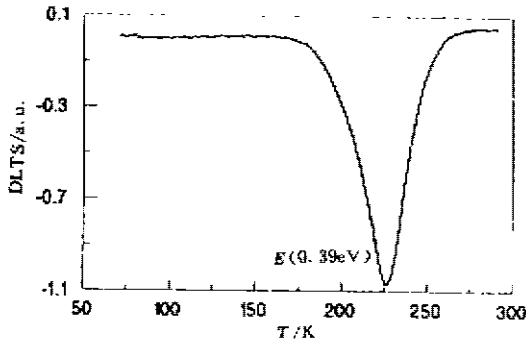


图3 典型的DLTS曲线
Fig. 3 Typical curve of deep level transient spectroscopy

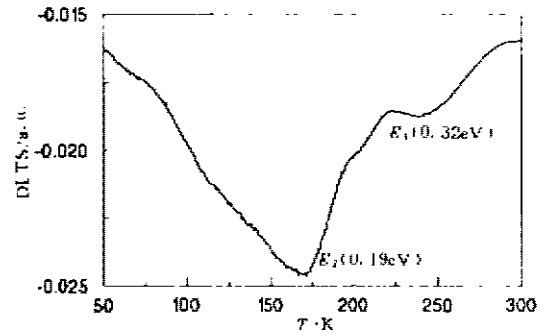


图4 典型的瞬态光霍尔谱
Fig. 4 Typical curve of transient photo-Hall spectroscopy

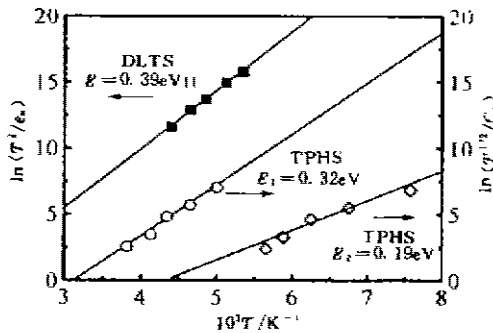


图5 发射(DLTS)和俘获(TPHS)过程的Arrhenius图
Fig. 5 Arrhenius plot of emission (DLTS) and capture (TPHS) processes

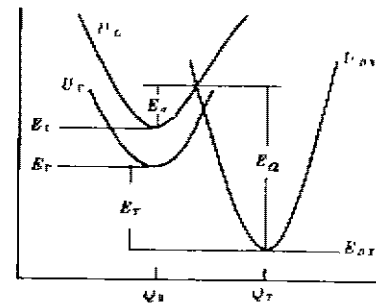


图6 DX中心位置坐标示意图
Fig. 6 Coordinated configuration diagram of DX center

多的电子,这样,在相对比较低的温度下就能测量到从L带的俘获,图6清楚地给出了 E_o 、 E_b 、 E_o 和 E_r 间的关系,在误差范围($kT \sim 15\text{meV}$)内,相互间的自恰性也比较好,以上分析说明我们的结果与其它方法符合得很好^[4],而且对TPHS缺陷俘获机理研究有其独到的特点。

3 结语

我们提出了一种新的深中心分析测试手段——瞬态光霍尔谱(TPHS),由于此法不需要做肖特基结、p-n结或MIS结构,测量的是近似零电场下缺陷的本征特性,不需要考虑电场对深中心的各种影响,克服了深中心瞬态谱技术(DLTS)的缺点,尤其适用于缺陷对载流子俘获机制及一些新材料中缺陷的研究,对GaAlAs中DX中心俘获势垒的测量结果表明,该方法对于研究缺陷俘获过程有其独到的优点,能得到一些其它实验方法不能得到的信息,

并且测量方便、数据处理简单。

参考文献

- 1 Calleja E, Munoz E. *Solid State Phenomena*, 1989, **10**:73
- 2 Mooney P M. *J. Appl. Phys.*, 1990, **67**:R1
- 3 Zhou B L, Ploog K, Gmelin E, *et al.* *Appl. Phys.*, 1982, **A28**:223
- 4 Calleja E, Gomez A, Munoz E. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **52**:383
- 5 Munoz E, Calleja E. *Solid State Phenomena*, 1989, **10**:99

NEW DEEP LEVEL INVESTIGATION METHOD ——TRANSIENT PHOTO-HALL SPECTROSCOPY*

Feng Songlin¹⁾ Wang Hailong²⁾ Zhou Jie¹⁾ Yang Xizhen³⁾

¹⁾ National Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China; ²⁾ Department of Physics, Qufu Normal University, Qufu, Shandong, China; ³⁾ Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract A new analysis method for directly observing deep levels based on photo-Hall transient measurement was developed, in which Schottky or p-n junction or MIS structure is not necessary to be made. The measured parameters of defects were obtained at almost zero electric field. This method overcomes the influence of electric field, Debye tail, etc. on the characteristics of defects, so it can compensate the insufficiency of deep level transient spectroscopy. The capture barrier of DX center in $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ was measured by using this method.

Key Words TPHS, DLTS, DX center, capture barrier.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China