

# GaAs-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 异质结构界面光激光发 过剩电子的热辅助隧穿俘获

何礼熊

(半导体超晶格国家重点实验室 北京 100083)  
(福州大学电子科学与应用物理系 福州 350002)

**摘要** 在71—163K的不同稳定温度下,对GaAs-Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As调制掺杂异质结构界面的光激发过剩电子的浓度,作了10<sup>-5</sup>—10<sup>3</sup>秒时间范围的瞬变测量.一个包含了热声子辅助隧穿,Si掺杂的Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As层DX中心俘获势垒分布和隧穿后电子的能量弛豫过程的理论计算可以定量地解释实验结果.

PACC: 7240, 7340L

## 1. 前言

Si掺杂的Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As材料中DX俘获中心的存在,导致了这种材料在低温下的持久光电导现象<sup>[1,2]</sup>.对Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As体材料的瞬变输运现象的广泛研究<sup>[3-7]</sup>已确定这种DX俘获中心的浓度对俘获势垒有指数型分布.在 $x=0.3$ 的情况下,分布中心的俘获势垒值约为0.20eV,而宽度为0.045eV.因而光激发过剩载流子(电子)的浓度按其寿命也有一定的分布.高温极限下,过剩电子的寿命都在10<sup>-11</sup>—10<sup>-12</sup>秒左右.

与DX俘获中心有关的持久光电导现象在GaAs-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As调制掺杂异质结构界面得到增强.这是由于在界面二维电子气与掺杂Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As层的DX中心之间存在着一个由界面导带偏移和Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As层导带弯曲形成的宏观势垒<sup>[8,9]</sup>.这个附加的宏观势垒可使俘获瞬变过程的表现俘获势垒在较高温度情况下达到0.37eV,大大超过了Si掺杂体材料Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As的DX中心的俘获能<sup>[10]</sup>.用于解释这一俘获过程的热声子辅助隧穿俘获的理论计算<sup>[10]</sup>虽然在较高温度情况下获得了局部的成功,但该理论计算未考虑到DX中心俘获势垒的分布和隧穿电子的能量弛豫,因而无法定量解释瞬变曲线的形状.而且在本文中还将看到在温度较低时,俘获寿命的实验值与理论值有较大的差别.而考虑了DX中心俘获势垒的分布和隧穿电子的能量弛豫两个因素之后,修正的热声子辅助隧穿俘获瞬变曲线的理论计算结果与实验曲线基本符合.

何礼熊 男,1944年生,副教授,当前从事专业:实验固体物理,电子材料与元器件  
1993年9月29日收到初稿,1994年2月16日收到修改稿

## 2 理论

GaAs-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 异质结构界面光激发过剩电子的热辅助隧穿俘获的基本过程是处于界面的光激发过剩电子受热声子激发后,隧穿由导带弯曲形成的宏观势垒,再在掺杂 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 层的 DX 中心越过微观俘获势垒而被俘获<sup>[10]</sup>(参看图 1,图中未画出微观势垒).

在温度  $T$  时,光激发过剩电子的寿命  $\tau$  可以表示为:

$$\tau = \tau_0 \left\{ \int_0^\infty \frac{1}{kT} e^{-\frac{E_{DX}'}{kT} - \frac{E_{th}}{kT} - \int_0^a (2/\hbar)[2m^*U(z)]^{1/2} dz} dE_{th} \right\}^{-1} \quad (1)$$

其中  $E_{th}$  是处于基态  $E_0$  的界面电子受热激发所获得的垂直界面运动的附加动能. WKB 积分  $\int_0^a (2/\hbar)[2m^*U(z)]^{1/2} dz$  中的  $U(z)$  是从  $E_{th}$  起算的隧穿势垒高度,积分上限  $a$  是 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 层的导带与  $E_{th}$  齐平的位置到界面的距离,  $\hbar$  是普朗克常数,  $k$  是玻尔兹曼常数.  $m^*$  是 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 层电子的有效质量,当  $x=0.3$  时,  $m^*$  取为 0.092 电子静止质量<sup>[9]</sup>.  $\tau_0$  是高温极限下过剩电子的寿命.  $E_{DX}'$  是具有  $E_{th}$  的隧穿电子在掺杂

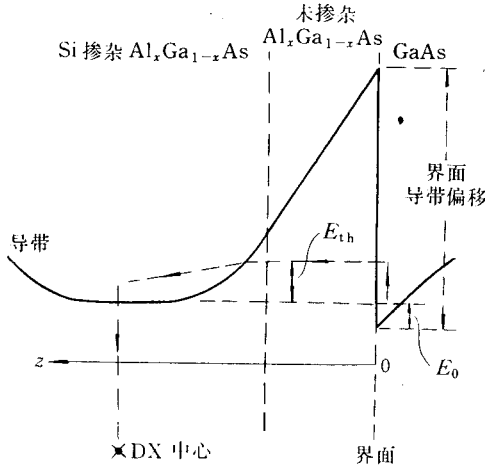


图 1 由导带弯曲形成的宏观势垒和界面过剩电子热辅助隧穿俘获的基本图象

Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 层内被 DX 中心俘获时所克服的有效势垒.

$$E_{DX}' = E_{DX} - E_{th} \quad (2)$$

其中  $E_{DX}$  是 Si 掺杂的 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 体材料的 DX 中心的俘获势垒,而  $E_{th}'$  是隧穿电子在被 DX 中心俘获之前,由于晶格散射作用,其  $E_{th}'$  值所剩余的高于导带的有效部分. 在高温非弹性散射作用强的情况下,  $E_{th}'$  接近于 0; 反之在低温电子迁移率高而且俘获中心处于宏观导带底的位置的情况下,  $E_{th}'$  接近于保持  $E_{th}$ . 注意当  $E_{th}' > E_{DX}$  时,令  $E_{DX}' = 0$ . 与 Si 掺杂的 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 体材料的电子迁移率对温度的关系对比,在 70—370K 温度范围内  $E_{th}'$  对  $E_{th}$  的关系可以定性地下式表示

$$E_{th}' = E_{th} [1 - (T - 70)/300]^3 \quad (3)$$

在温度接近低温 70K 时,电子迁移率变化较快,  $E_{th}'$  也变化较快并到达  $E_{th}$  后不再变化. 在温度接近高温 370K 时,电子迁移率变化较慢,  $E_{th}'$  也变化较慢并趋于 0. 稍后会看到,在 71—163K 温度范围内,表达式(3)也定量地适用于本文实验所用的样品.

由(1)、(2)、(3)式可以计算对应于某一  $E_{DX}$  值的界面光激发过剩电子的寿命  $\tau$ .

进一步考虑到 Si 掺杂的 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 体材料的 DX 俘获中心的浓度对俘获势垒  $E_{DX}$  具有指数型分布,以及把不同  $E_{DX}$  的 DX 中心的俘获看作是并行的过程. 在隧穿势垒不因俘获过程而发生很大变化的情况下,这些并行过程可以认为是不相关的. 于是实验可测量的界面自由电子浓度  $N$  对时间  $t$  的关系为

$$N = N_0 + \int_0^\infty N(E_{DX}) e^{-\frac{t}{\tau(E_{DX})}} dE_{DX} \quad (4)$$

其中  $N_0$  是不参与俘获过程的电子的浓度.  $N(E_{\text{DX}})$  和  $\tau(E_{\text{DX}})$  是对应于不同  $E_{\text{DX}}$  值的俘获量分布函数和俘获寿命.

### 3 实验

本实验采用了中国科学院半导体研究所提供的分子束外延生长的 GaAs-Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As 调制掺杂的样品. 其外延生长层依次为: 未掺杂 GaAs 层 1000nm, 未掺杂 Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As 20nm, Si 掺杂 Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As 层 60nm (掺杂浓度为  $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ), 未掺杂 GaAs 盖层 20nm.

样品做成霍尔桥以便进行二维电子浓度测量. 光源采用波长 700nm 的发光二极管, 余辉时间小于 10 微秒. 光源切断前, 二维电子浓度达到饱和状态. 瞬变过程全部采用微机进行测量记录和数据处理. 数据最终以寿命谱分布函数  $K = -dN/d(\log_{10}t)$  对  $\log_{10}t$  的曲线关系表现出来. 这种表现形式具有寿命谱的功能, 比一般使用的  $N-\log_{10}t$  曲线更适合于研究寿命连续分布的过程<sup>[10]</sup>. 在  $K-\log_{10}t$  关系曲线中, 一个单一寿命的瞬变过程  $n = n_0 \exp(-t/\tau)$  表现为一个  $\log_{10}t$  宽度约为 1.5 个时间数量级的峰形. 峰尖的位置正好与寿命值  $\tau$  对应, 峰尖的幅值等于  $0.847n_0$ , 而峰形面积正是  $n_0$ . 在多寿命过程可以看作是多个单一寿命过程的叠加的简单情况下, 多寿命过程的寿命谱分布函数就是多个单一寿命过程的寿命谱分布函数的叠加.

### 4 讨论

本样品在 71.5—163K 温度范围内各温度的寿命谱分布函数的实验结果显示为图 2 的实线簇. 为了便于比较, 随温度依次降低, 各温度的寿命谱分布曲线比 163K 温度的寿命谱曲线依次向上平移了  $0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ . 从图 2 的实验曲线可以看出以下几个特征: 1) 每条曲线都是一个多寿命瞬变过程, 其寿命展宽可达 6 个时间数量级以上. 2) 每条曲线都是一个明显的峰形, 峰的位置随温度的降低向长寿命方向移动. 从峰的位置对温度的关系可以得到表观的俘获势垒, 其结果在  $71\text{K} < T < 104\text{K}$  时为 70meV, 在  $126\text{K} < T < 163\text{K}$  时为 170meV.

图 2 虚线是根据(1)、(2)、(3)、(4)式和  $K = -dN/d(\log_{10}t)$  计算的理论曲线. 界面导带偏移为  $0.25\text{eV}$ <sup>[11]</sup>, 界面二维电子气基态能量  $E_0$  取为  $0.05\text{eV}$ <sup>[12]</sup>. Si 掺杂 Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As 层受足够光照时, 施主全部电离, 因而电离浓度取为  $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ . 这时 Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As 层有部分尚未耗尽, 其导带底如图 1 所示与界面二维电子气基态齐平. 隧穿 WKB 积分的势垒形状和高度是根据耗尽近似方法计算的<sup>[10]</sup>. 由于 Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As 层内电子密度不能忽略不计的区域仅是与界面相邻的大约 2nm 厚的区域, 这个厚度远小于隧穿势垒的总宽度, 而且 Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As 层内电子仅占总电子数的 1%<sup>[12]</sup>, 这部分电子密度对隧穿势垒的影响在计算 WKB 积分时可以忽略不计. 在计算(4)式时还要考虑到对应不同  $E_{\text{DX}}$  的  $N(E_{\text{DX}})$  分布. 作为简化处理, 直接采用了体材料的  $N(E_{\text{DX}})$  的指数型分布  $N(E_{\text{DX}}) = A \exp(-|E_{\text{DX}} - 0.20|/0.0225)$ . 常数  $A$  由实验测定的  $N(E_{\text{DX}})$  的总量确定. 对 Si 掺杂 Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As 的情况,  $N(E_{\text{DX}})$  总量约占界面电子浓度的 20%. 式(1)中  $\tau_0$  取为  $3 \times 10^{-12}$  秒. 由于界面二维电子气浓度相对变化不大, 而且

计算表明由此引起的势垒变化所导致的寿命变化远小于一个时间数量级,因此计算理论曲线时没有计入界面二维电子气浓度的变化.

图 2 表明在 71—163K 温度范围,理论计算的寿命谱分布函数的峰值位置都与实验结果基本符合.实验曲线的长寿命部分比理论曲线略有滞后和展宽.在上述理论计算中,所有的 DX 中心都设定处于宏观导带的底部,而不处于宏观导带底部的 DX 中心对同样  $E_{cb}$  的隧穿电子有较大的有效势垒  $E'_{DX}$ ,因而有较长的寿命.这可能导致实验曲线的长寿命部分比理论曲线略有滞后和展宽.

如果不考虑 Si 掺杂  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  层 DX 中心俘获势垒具有一定的分布以及隧穿后电子的弛豫过程有强有弱的情况,理论计算会导致如下几个无法解释的结果:1)在高温区域,理论计算的俘获过程变成单一寿命过程<sup>[10]</sup>,寿命谱峰形只能有小于 2 个时间数量级的宽度,而不是实验结果给出的 6 个以上时间数量级的宽度.2)理论计算的寿命谱谱峰处的寿命都比实验值要大.它在 163K 温度时比实验值要大 2 个时间数量级,并随温度下降继续加大,在 71K 温度时比实验值要大 10 个时间数量级.3)理论计算的低温时 0.20eV 的表观俘获势垒远大于 0.07eV 的实验值.

而在考虑了 Si 掺杂  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  层 DX 中心俘获势垒具有一定的分布之后,寿命谱峰的宽度就自然得到解释.再考虑到隧穿后电子的弛豫过程,低温下隧穿电子具有较大的自由程,在被大量处于宏观导带底部位置附近的 DX 中心俘获之前仍保持了隧穿时的动能  $E'_{cb} = E_{cb}$ .这时有有效的微观俘获势垒  $E'_{DX} = E_{DX} - E'_{cb}$  就要比体材料的微观俘获势垒  $E_{DX}$  低很多,于是表现为短得多的俘获寿命和小得多的表观俘获势垒.在上述实验中,71—104K 的表观俘获势垒仅 70meV,在这个温度范围内尽管  $E'_{cb}$  随温度上升而下降,但由于  $E_{cb}$  值比较大(相当一部分接近或大于  $E_{DX}$ ),有效的微观俘获势垒  $E'_{DX}$  仍比较小,寿命主要由宏观势垒决定,因此表观俘获势垒变化不显著.而当温度上升到 104K 以上, $E'_{cb}$  继续下降,而  $E'_{DX}$  开始显著上升,于是表观俘获势垒也开始显著上升.当温度上升到 126K 以上, $E'_{cb}$  变得比较小,随温度上升  $E'_{cb}$  变小的量不大, $E'_{DX}$  的上升变慢,因此表观俘获势垒在 126—163K 温度范围内的变化又趋于平缓.

**致谢** 感谢郑厚植、江德生、程文超、封松林、李 锋、张耀辉、杨富华、李承芳给予的支持和帮助.

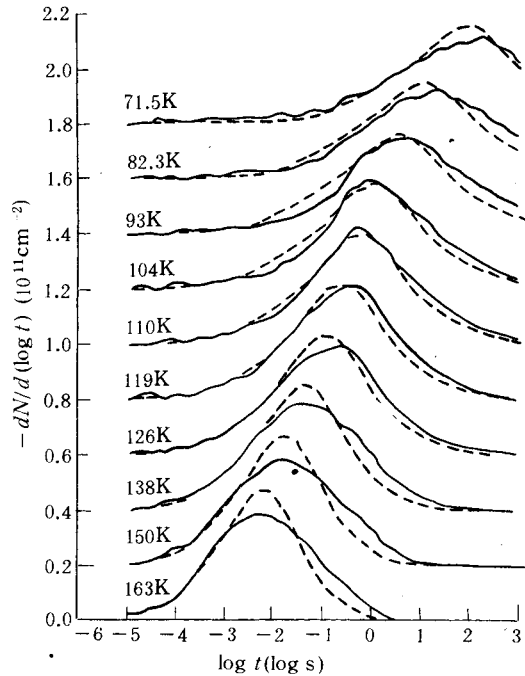


图 2 寿命谱分布曲线的实验结果(实线簇)和理论计算结果(虚线簇)

## 参 考 文 件

- [ 1 ] D. V. Lang and R. A. Logan, Phys. Rev. Lett. ,1977,**39**:635.
- [ 2 ] D. V. Lang and R. A. Logan, Phys. Rev. B,1979,**19**:1015.
- [ 3 ] N. S. Caswell, P. M. Mooney, S. L. Wright and P. M. Solomon, Appl. Phys. Lett. ,1986,**48**:1093.
- [ 4 ] P. M. Mooney, N. S. Caswell and S. L. Wright, J. Appl. Phys. ,1987 **62**:4786.
- [ 5 ] A. C. Campbell and B. G. Streetman, Appl. Phys. Lett. ,1989, **54**:445.
- [ 6 ] P. M. Mooney, J. Appl. Phys. ,1990,**67**:R1.
- [ 7 ] J. Y. Lin, A. Dissanayake, G. Brown and H. X. Jiang, Phys. Rev. B,1990,**42**:5855.
- [ 8 ] E. F. Schubert, A. Fischer and K. Ploog, Phys. Rev. B, 1985, **31**:7937.
- [ 9 ] L. X. He, K. P. Martin and R. J. Higgins, Phys. Rev. B,1987,**36**:6508.
- [ 10 ] L. X. He, K. P. Martin and R. J. Higgins, Phys. Rev. B,1989,**39**:13276.
- [ 11 ] H. Kroemer, Appl. Phys. Lett. ,1985,**46**:504.
- [ 12 ] 虞丽生, 半导体异质结物理, 北京: 科学出版社, 1990, 143.

## Capture of Photo-Induced Excess Electrons of GaAs-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As Heterostructures by Thermal Phonon Assisted Tunneling

He Lixiong

(Dept. of Electronic Science and Applied Physics, Fuzhou University, Fuzhou 350002)

(National Laboratory for Semiconductor Superlattices and microstructures, Beijing 100083)

Received 29 September 1993, revised manuscript received 16 February 1994

**Abstract** We report transient measurements on photo-induced excess electrons on the interface of a selectively doped GaAs-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As heterostructure with temperatures ranging from 71.5K to 163K and a time window of 10<sup>-5</sup>—10<sup>3</sup> seconds. A theoretical calculation of the transient curves based on thermal phonon assisted tunneling, capture barrier distribution of the DX center in Si-doped Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As layer, and the relaxation of the tunneling electrons agrees quantitatively with the experimental results.

PACC:7240,7340L