

# GaAs/Ga<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>As 异质结的调制 反射光谱研究

章灵军\* 沈学础

(中国科学院上海技术物理研究所, 红外物理国家实验室, 上海, 200083)

陆 飞

(中国科学院上海冶金研究所, 上海, 200051)

**摘要:** 用光调制光谱方法研究了逐层腐蚀的 GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As 异质结, 发现不同厚度的 GaAs 复盖层对异质结表面层电子能带有很大影响, 由 GaAs 带间跃迁的 Franz-Keldysh 效应计算出表面层表面电场随外延层的变薄而增大, 并计算出表面费密能级与导带底的距离  $f=0.27(0.03)$  eV, 通过对 Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As 调制光谱的分析, 发现表面复盖层对 Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As 层的调制光谱线形有调节作用, 不同厚度的复盖层使 PR 线形发生失变化, 这与考虑干涉效应后的理论预计线形一致.

**关键词:** 异质结, 调制光谱, 费密能级, 光失电压.

## 引言

用调制光谱 (PR) 方法研究半导体异质结, 能够测量半导体材料的带隙、掺杂浓度、合金组分、失配应力<sup>[1-3]</sup>等等. 本文用化学腐蚀逐层剥离的方法研究不同 GaAs 复盖层厚度的 GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As 异质结, 避免了通常在不同样品上研究复盖层厚度对 PR 谱影响的复杂性, 而在同一样品上测试不同厚度复盖层对异质结电子结构的影响, 所得结果更为可靠. 同时观测到了 GaAs 衬底, Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As 层以及 GaAs 复盖外延层的光反射谱结构, 并且结构十分清晰. 通过线形分析, 研究了复盖层厚度对 PR 谱线形的影响, 结果表明, 表面复盖层厚度对 PR 谱线形起调节作用, 使其线形发生变化旋转, 还研究了表面态引起的表面费密能级钉扎, 结果表明费密能级离导带底的距离为  $f=0.27(3)$  eV, 此结果

本文 1992 年 10 月 28 日收到, 修改稿 1993 年 7 月 11 日收到.

\* 现在通讯地址: 上海, 大连路 1607 号, 200092.

与 C. V. Hoof 的结果<sup>[3]</sup>相近, 而与其它方法, 如 X 射线光发射  $C-V$ (SXPS)、喇曼散射、测量等结果有差异, 这可能是由于光调制光谱中调制光所产生光生载流子减小了表面电场所致, 若考虑表面光生载流子所产生的光生电压后, 则与其它测量方法的结果相差不多, 而调制光谱测量更为简便.

## 1 实验

本实验中调制光谱采用通常的光反射调制装置参见文献 [4], 调制光为 6328 Å 的 He-Ne 激光, 斩波器频率约为 240 Hz, 激光功率约为 50 mW/cm<sup>2</sup>, 钨卤灯经单色仪后作为探测光, 经样品反射后由 Si 光电二极管探测器接收, 经锁相放大器放大后由微机处理, 整个系统全部由微机控制.

异质结样品为分子束外延 (MBE) 方法生长, 首先在 GaAs(100) 衬底上生长 GaAs 缓冲层, 再生长 N<sup>+</sup>-Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As 层 5 μm, 掺杂浓度大约为 5×10<sup>17</sup> cm<sup>-3</sup>, 然后生长非掺杂的 GaAs 外延层 800 Å, 通过生长时间控制其厚度. 实验中外延层用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>O (1:2.5:50) 腐蚀, 腐蚀速率约为 64 Å/s, 因此不同腐蚀时间对应于不同的腐蚀厚度.

## 2 光调制光谱线形

在光调制光谱中, 激光作为调制光照射在样品表面上, 产生光生载流子, 这些光生载流子在内建电场的作用下漂移, 从而使半导体表面内建电场变小, 当电场变化时, 介质的光学性质会发生变化, 即介质的介电函数发生变化, 从而引起反射率的变化, 所以从这一角度来看, 光调制光谱亦即是电反射的另一种形式, 所得光谱为介电函数的微商谱. 电场下半导体材料的反射率变化为<sup>[2]</sup>

$$\Delta R/R = \alpha \Delta \epsilon_1 + \beta \Delta \epsilon_2, \quad (1)$$

式中  $\alpha$ 、 $\beta$  为 Seraphin 系数,  $\Delta \epsilon_1$ 、 $\Delta \epsilon_2$  分别为介电函数实部和虚部的变化量. 根据 Aspnes 电反射理论, 在弱场情形下,  $\hbar\Omega < \Gamma$  时, 式 (1) 可以写成

$$\Delta R/R = \text{Re} [C e^{i\theta} (E - E_g + i\Gamma)^{-m}], \quad (2)$$

式中  $C$  为强度因子,  $\theta$  为相因子,  $\Gamma$  为展宽参数,  $E_g$  为临界点能量,  $m$  与临界点维数和调制机制有关, 对 GaAs 体材料,  $m = 2.5$ . 在高场情况下,  $\hbar\Omega \gg \Gamma$  时, 则电反射线形出现 Franz-Keldysh 振荡, 式 (1) 可近似写作<sup>[3]</sup>

$$\frac{\Delta R}{R} \propto \cos \left\{ \left[ \frac{2(\hbar\omega - E_g)}{3\hbar\Omega} \right]^{\frac{3}{2}} + \frac{\pi(d-1)}{4} \right\}. \quad (3)$$

对直接跃迁的体材料  $d = 3$ , 式 (3) 中忽略了强度的指数衰减项: 其中  $\hbar\Omega$  为重空穴的电光能量, 有

$$(\hbar\Omega)^3 = e^2 \hbar^2 F^2 / 2\mu, \quad (4)$$

其中  $F$  为电场大小,  $\mu$  为电子和空穴在电场  $F$  方向上的折合质量, 对于 GaAs,  $\mu = 0.055m_0$ . 由式 (3) 我们可以得的 FKO 级值点的能量

$$(\hbar\omega)_j = \hbar\Omega F_j + E_g, \quad j = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

其中  $F_j = [3 \cdot \pi \cdot (j - 1/2)/2]^{2/3}$ . 由式 (5) 作 FKO 极值点与  $F_j$  的关系图, 即可得到临界点的能量  $E_g$  及电光能量  $\hbar\Omega$ , 进而由式 (4) 求出内建电场的大小.

### 3 实验结果与讨论

图 1 给出了不同厚度时 GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As 异质结的光调制反射光谱 (PR), 图中曲线  $a$  为表面复盖层为 800 Å 时的 PR 谱, 曲线  $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$ 、 $f$  分别为 610 Å、490 Å、370 Å、240 Å、0 Å 时的 PR 谱. 分析表明结构 A 应为 GaAs 衬底的 PR 峰, 所以其在表面复盖层 GaAs 全部被腐蚀掉后仍出现; 结构 B 为表面层 GaAs 的 PR 峰, 随着表面层的逐步剥离强度逐渐减弱, 其结构也逐步变化, 将在 3.2 节详细分析其结构变化; 结构 C 为 Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As 层的 PR 峰, 线形拟合表明, 虽然随着复盖层 GaAs 厚度的变化, 线形也随着变化, 而其能量位置基本不变,  $E_g = 1.736 \text{ eV}$ , 对应 Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As 组分为  $x = 0.243$ , 其线形变化将在 3.1 节讨论; 曲线  $a$  中结构 C 附近高能方向一小峰或隆起的结构 D, 为 GaAs 复盖层的自旋-轨道分裂.

#### 3.1 Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As 调制光谱线形随表面层厚度的变化

图 1 表明调制光谱中 Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As 层的调制信号线形随表面复盖层厚度有很大变化, 随着复盖层厚度从 800 Å 变化到 0 Å, 线形从正的峰过渡成负的峰, 或者说位相有近 180° 的变化, 这是由于 GaAlAs 反射光与表面反射光存在干涉效应的缘故, 如图 2 所示, 其出射光应为 GaAs 表面层反射光与 Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As 层反射光的叠加. 我们忽略 Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As/GaAs 缓冲层界面的反射光  $r_b$  及更加弱的多次反射, 并设空气/GaAs 界面反射光为  $R_f$ , GaAs 表面层/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As 界面的反射率为  $R_i$ , 其振幅

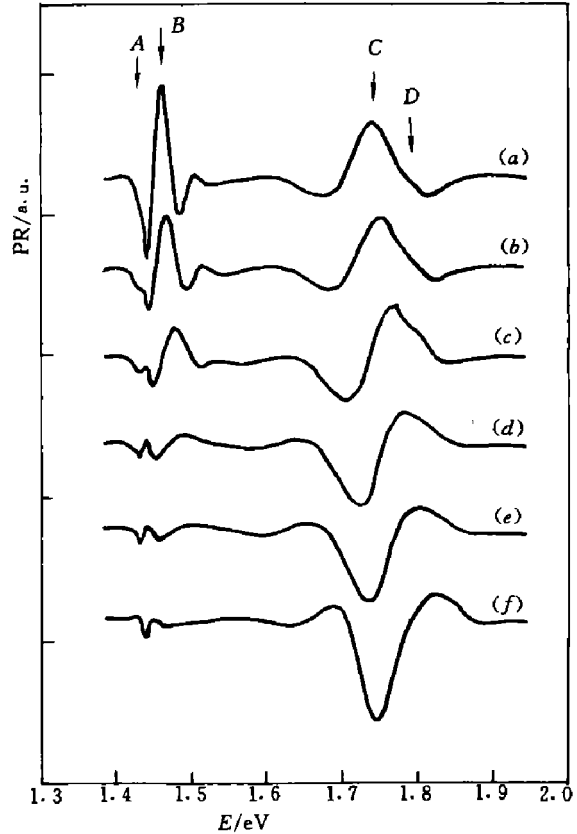


图 1 不同厚度 GaAs 覆盖层的 GaAs/GaAlAs/GaAs 异质结的 PR 图 ( $a$ : 800 Å;  $b$ : 610 Å;  $c$ : 490 Å;  $d$ : 370 Å;  $e$ : 240 Å;  $f$ : 0 Å)

Fig. 1 The photoreflectance spectroscopy of GaAs/GaAlAs/GaAs heterojunction with different thicknesses of cap layer ( $a$ : 800 Å;  $b$ : 610 Å;  $c$ : 490 Å;  $d$ : 370 Å;  $e$ : 240 Å;  $f$ : 0 Å)

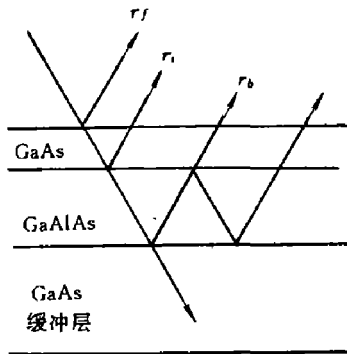


图2 异质结中各层反射光产生干涉效应  
Fig. 2 The interference effect between reflected light from different interfaces in heterojunction

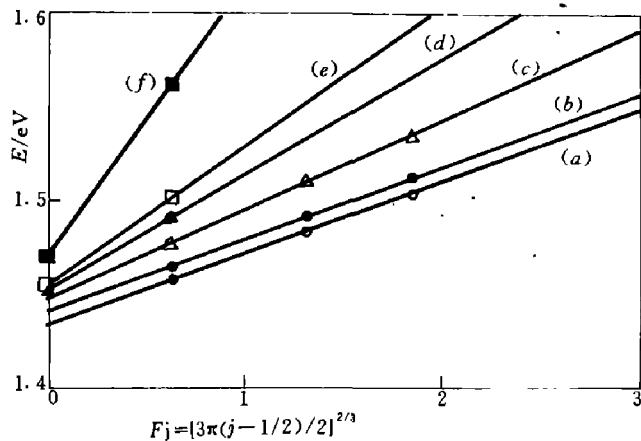


图3 不同厚度覆盖层的FKO极值点能量与  $F_j$  的关系  
Fig. 3 The maximum energies of FKO for different cap layer thicknesses as a function of  $F_j$

反射率分别为  $r_f, r_i$ . 对垂直入射情形, 有

$$R = |r|^2 = \frac{(n - n_0)^2 + k^2}{(n + n_0)^2 + k^2} \tag{6}$$

若忽略消光系数,  $n(\text{GaAs}) = 3.63, n(\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}) = 3.50^{[6]}$ , 则空气/GaAs 界面的反射率  $R_f = 0.32$ , 而 GaAs/GaAlAs 界面的反射率约为  $R_i = 3.3 \times 10^{-4}$ , 总反射率为

$$R_T = \frac{R_i + R_f + 2\text{Re}(r_f \cdot r_i^* \cdot \varphi^*)}{1 + R_i \cdot R_f + 2\text{Re}(r_f \cdot r_i^* \cdot \varphi^*)} \tag{7}$$

其中  $\varphi = e^{ig}$  为位相因子

$$g = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2 \cdot n \cdot d \cdot \cos(\theta_r) \tag{8}$$

式(8)中  $d$  为复盖层的厚度,  $\theta_r$  为入射角. 考虑到  $r_i \ll 1$ , 则有

$$R_T = R_f + 2(1 - R_f) \cdot \text{Re}[r_f \cdot r_i \cdot e^{ig}] \tag{9}$$

现在我们考虑的是 GaAlAs 反射线形, 光子能量远离  $E_g(\text{GaAs})$ , 其介电函数变化对  $R_f$  的影响很小, 即  $dR_f/d\varepsilon \approx 0$ , 则

$$\Delta R \approx \text{Re} \left[ 2r_f \cdot (1 - R_f) \cdot \frac{\delta r_i}{e^{ig}} \right] \tag{10}$$

以光反射线形代入式(10), 则

$$\Delta R \approx C(\delta r_{ir} \cdot \cos g - \delta r_{ii} \cdot \sin g) \approx AC[(E - E_g)^2 + \Gamma^2]^{-\frac{m}{2}} \cdot [\cos(m\theta + \varphi) \cos g - \sin(m\theta + \varphi) \sin g] \tag{11}$$

其中  $\theta$  可由下式决定:

$$\cos(\theta) = \frac{E - E_g}{\sqrt{(E - E_g)^2 + \Gamma^2}}, \quad (12)$$

式中  $C, A, \varphi$  均为常数,  $\theta(E, \Gamma)$  由式 (12) 确定. 按式 (11) 的理论计算结果与实验符合得很好, 表明在不同厚度复盖层情形下, 界面 PR 线形会发生旋转, 位相由  $g = 2\pi/\lambda \times 2nd \cos \theta r$  确定, 本实验中对 Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As ( $x=0.243$ ) 正入射情形, 在表面层厚度约为 800 Å 时, PR 线形反相, 实际上, 这个结论也为表面复盖层的厚度测量提供了一个简便的方法.

### 3.2 不同 GaAs 复盖层厚度对表面电场的影响

在 GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As 异质结中, GaAlAs 层掺杂为  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , 其费密能级将接近导带底, 而表面层 GaAs 能带则由于表面态的作用, 使费密能级钉扎在禁带之中, 离导带底的距离为  $f$ , 因而产生表面内建电场, 光调制光谱也可以用来研究半导体表面内建电场.

如前所述, 在存在表面内建电场情形下, 低场 PR 谱也可以表现为高场情形的结构, 亦即出现 FKO, 如图 1 中结构 B 即是表面 GaAs 复盖层的 PR 结构, 呈现出 FK 振荡. 可以看出, 随着表面复盖层逐渐减薄, 一方面 FK 振荡结构信号逐渐变弱, 另一方面振荡周期逐渐变大意味着表面内建电场逐渐增大. 在上节已经指出, FKO 极值点与  $F_j$  有线性关系, 如图 3 所示, 我们给出了不同厚度时极值点能量与  $F_j$  的关系, 由图 3 可以求出各不同复盖层厚度时的表面电场. 图 5 给出了不同复盖层厚度时的表面内建电场, 可以看出覆盖层越厚, 其表面电场越小.

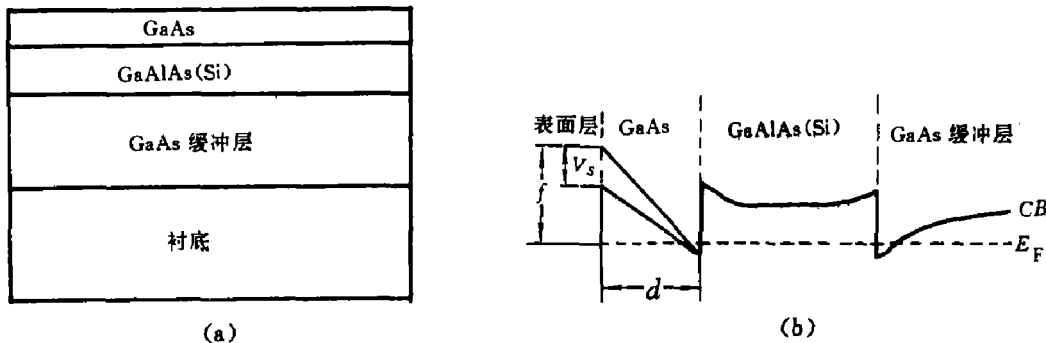


图 4 GaAs/GaAlAs/GaAs 异质结的能带图和样品结构  
Fig. 4 The energy band structure and the sample structure of the heterojunction GaAs/GaAlAs/GaAs

本实验中异质结样品结构如图 4(a) 所示, 其能带图可以画作如图 4(b), GaAs 复盖层由于表面态的作用, 使费密能级钉扎在禁带之中, 离导带底的距离为  $f$ . 样品的 GaAs 复盖层为 800 Å, 所以可以认为在整个表面耗尽层中电场均匀分布. 电场为

$$F = f/d \quad \text{或} \quad f = F \cdot d. \quad (13)$$

由此若已知表面层厚度  $d$  及表面电场  $F$  可以求得费密能级离导带底的距离  $f$ . 图 5 给出了  $f=0.27$  时的表面层厚度与表面电场关系, 这一结果与用其它方法测得的结果相差较

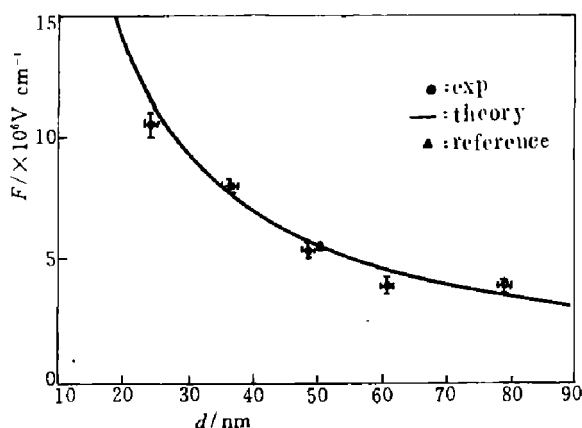


图 5 表面电场与覆盖层厚度之间的关系  
(▲为 N. Pan<sup>[14]</sup> 的实验数值)

Fig. 5 The relation between surface field and thickness of the cap layer, where ▲ shows the experimental value of N. Pan<sup>[14]</sup>

这时得到的费密能级约为 0.68 eV, 与其它方法测量结果相近. 需要指出的是, 以上关于光生电压的计算是很粗略的. 进一步的研究表明, 激光产生的光生载流子对表面电场确实有很大的影响, 详细结果将另文给出.

N. Pan 等研究了调制掺杂的 AlGaAs/GaAs 异质结<sup>[9]</sup>, 研究结果表明, 表面电场约为  $5.4 \times 10^6$  V/m, 考虑到覆盖层厚度为 500 Å, 如图 3 中的“▲”, 与本文结果一致.

M. Sydor 等研究了 GaAs/GaAlAs 界面的 PR 谱<sup>[10,11]</sup>, 表明 3.5 μm GaAlAs 层厚度时, 存在 GaAs 衬底的信号, 而在 7 μm 时衬底的信号则看不到. 本文 GaAlAs 厚度为 5 μm, 可以看到很小的 GaAs 衬底的信号, 与 M. Sydor 的结果相一致. 我们知道在非掺杂的 GaAlAs 材料中, He-Ne 激光的透过深度约为 0.5 μm, 说明调制光谱能探测到约 10 倍于调制光穿透深度的调制信号, 其中具体的调制机制目前还不清楚. M. Sydor 还观察到了很宽的 GaAs/GaAlAs 界面的 PR 信号, 并且表面层的腐蚀不影响 FKO 的周期, 进而推断不会影响耗尽层的电场, 这与本文的实验结果相异, 可能是本文的结果为表面的信号, 而 M. Sydor 文中为 GaAs 覆盖层/GaAlAs 界面的信号, 因而受表面层厚度的影响较小.

另外 R. A. Batchlor 指出<sup>[12]</sup>, M. Sydor 文中 1.42 eV 附近的振荡结构起源于 GaAlAs 层中干涉引起的 Fabry-Perot 振荡, 那么应该确实与表面层的厚度无关, 本文实验同时观察到了表面层 GaAs 和缓冲层 GaAs 的 PR 信号, 结果更为确定.

总之, 实验结果清楚地表明: 在用调制光谱研究半导体异质结或者超晶格量子阱时, 必须注意到各层之间的干涉效应将引起 PR 谱线形的变化. 并且在研究半导体材料特别是掺杂材料时, 表面电场的存在将会产生 FK 振荡, 振荡的产生一方面为我们提供了一个全新的简便的测量表面费密能级的方法, 另一方面肯定会增大 PR 谱分析的难度, 研究指出, 在 GaAs/GaAlAs 异质结中, 当表面层的厚度较小时, 表面耗尽层电场可以看作是均匀的, 并且由于费密能级的钉扎效应, 表面电场的大小与表面层的厚度成反比.

大. C. V. Hoof 等研究了不同厚度 (215, 130, 80, 60 nm) 的 N 型和 P 型半导体的能级钉扎, 求得  $f=0.40$  与本文结果相近, 本文样品较 Hoof 的复盖层更薄, 因而电场更加近于均匀, 但结果还是近似一致的. 至于为何调制光谱的实验结果总是偏小, 这主要是因为还要考虑调制光所引起的光生载流子导致表面电压降低, 在调制光谱中, 费密能级可以写为<sup>[7]</sup>

$$V_F = V_m + V_s + kT, \quad (14)$$

其中  $V_s$  为光生电压,  $V_m$  为实际测得的表面势垒,  $kT$  为温度效应.

因实验中激光功率约为 50 mW/cm<sup>2</sup>, 则  $V_s \approx 0.387$  eV, 300 K 时  $kT = 25.8$  meV,

## 4 结论

本文用光调制反射光谱研究了 GaAs/GaAlAs 异质结, 在调制光谱中, 同时观察到了 GaAs 衬底、GaAlAs 层及 GaAs 表面覆盖层的信号. 采用化学腐蚀的方法, 研究了不同 GaAs 覆盖层厚度对光谱结构的影响. 实验结果指出, 不同厚度的覆盖层会使 GaAlAs 的 PR 线形发生较大变化, 大约在厚度相差 800 Å 时, 线形反相. 根据 GaAs 覆盖层的 PR 谱的 Franz-Keldysh 振荡, 我们得出结论: 在非故意掺杂的 GaAs 复盖层厚度小于 800 Å 时, 电场在整个表面层可以假设为均匀分布, 由此我们得到费密能级离导带底的距离  $f = 0.27(0.03) \text{ eV}$ , 与 Hoof 的结果相近, 而与其它测量结果有差异. 分析表明, 这可能是由于光生电压降低了表面势而改变了表面费密能级, 若考虑到调制激光产生的光生电压  $V_s$ , 则  $f$  就与其它方法测量的结果相近, 因此调制光谱不失为一种简便的测量表面费密能级的方法.

## 参考文献

- 1 Pollak F H. *Superlatt. Microstruct.*, 1991;10(3):333
- 2 Pollak F H, Shen H. *J. Crystal. Growth*, 1989;98:53
- 3 Hoof C V, Deneffe K, Deboeck J et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1989;54(7):608
- 4 Shen H, Shen X C, Pollak F H et al. *Phys. Rev.*, 1987;B36(6):3487
- 5 Shields A J, Klipstein P C. *Superlatt. Microstruct.*, 1990;7(4):397
- 6 Zheng X L, Heiman D, Lax B et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1988;52(4):287
- 7 Yin X, Chen H M, Pollak F H et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1991;58(3):260
- 8 Hecht M H. *Phys. Rev.*, 1990;B41(11):7918
- 9 Pan N, Zhang X L, Hendriks H, et al. *J. Appl. Phys.*, 1990;68(5):2355
- 10 Sydor M, Jahren N, Mitchel W C et al. *J. Appl. Phys.*, 1990;67(12):7423
- 11 Sydor M, Angelo J, Wilson J J et al. *Phys. Rev.*, 1989;B40(12):8473
- 12 Batchlor R A, Hamnett A. *J. Appl. Phys.*, 1992;71(5):2414

## STUDY OF PHOTOREFLECTANCE SPECTROSCOPY ON GaAs/GaAlAs HETEROJUNCTION

ZHANG LINGJUN\*, SHEN XUECHU

*(National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)*

LU FEI

*(Shanghai Institute of Metallurgy, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200051, China)*

**Abstract:** The GaAs/GaAlAs heterojunctions with different thicknesses of cap layer were investigated by the use of photoreflectance (PR) spectroscopy. By analyzing the Franz-Keldysh Oscillation (FKO) in PR spectrum, it was found that the thickness of cap layer would influence the surface band structure of heterojunction, and the surface field was increased with the decrease of thickness of cap layer. It was also found that the PR lineshape would rotate with the varying of the thickness of cap layer. This is coincident with the theoretical calculation while considering the interference effect between different layers.

**Key words:** heterojunction, photoreflectance, Fermi level, photogenerated voltage.

---

\* Present address: 1607 Dalian Road, Shanghai 200092, China.