

SIN⁺ GaAs 结构中的 Franz-Keldysh 振荡的 傅里叶变换研究*

金 鹏 潘士宏

(南开大学物理系, 天津 300071)

梁基本

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

(1999 年 7 月 15 日收到 2000 年 1 月 15 日收到修改稿)

利用傅里叶变换(FT)方法,对 Franz-Keldysh 振荡(FKO)的理论线性作了详细的数值模拟,并用光调制反射谱(PR)测量了一组本征层(I 层)厚度不同的表面-本征层-n 型重掺杂层(SIN⁺)结构的 GaAs 样品的 FKO. PR 谱的 FT 分析表明,一部分样品的 FT 谱,包括其实部、虚部和模,与理论线性符合得比较好,由此求出轻空穴(LH)和重空穴(HH)的约化质量平方根之比 $\sqrt{\mu_V}/\sqrt{\mu_h}$ 对不同样品在 0.805—0.816 之间,同时也可以求出样品中的内建电场强度 F_1 ,和调制光引起的调制电场 $\delta F = F_1 - F_2$. 有一些样品的 FT 谱实部和虚部与理论线性差别很大,用 FT 的模仍可以给出有用的信息.

关键词: Franz-Keldysh 振荡, 傅里叶变换, GaAs

PACC: 7340L, 7865

1 引 言

自 Van Hoof 等人^[1]发现在表面-本征层-重掺杂层(SIN⁺或 SIP⁺)GaAs 结构中, I 层内的均匀电场使得在光调制反射谱(PR)中可以观察到几乎理想的 Franz-Keldysh 振荡(FKO),至今已有大量关于 FKO 本身及其应用的研究工作的报道^[2]. 在这些研究中一般都是利用 Aspnes 等^[3]提出的方法由 FKO 确定样品内的电场. 关于能否从 FKO 谱获取更多的关于样品的信息的问题一直没有受人注意. Alperovich 等^[4]曾提出过用傅里叶变换(FT)来分析 FKO,但没有作深入探讨. 最近发表了几篇专门研究 FKO 的 FT 谱的文章^[5-8],对 PR、电调制反射谱(ER)和无接触电调制反射谱(CER)测量的 FKO 作了比较详细的研究. 但这些工作中只用 FT 谱的模来分析问题,没有研究 FT 谱的实部和虚部所包含的信息. 本文利用 FKO 理论对 FKO 的 FT 谱的实部、虚部和模的理论线性作了详细的数值模拟,并用 FT 分析了一组 SIN⁺ GaAs 样品由 PR 实验测量的

FKO,把实验结果和理论线性作了详细的比较. 由此得出了轻空穴(LH)和重空穴(HH)的约化质量平方根之比 $\sqrt{\mu_V}/\sqrt{\mu_h}$,内建电场和光调制引起的电场调制.

2 理论背景

Franz-Keldysh 效应是一种纯粹的量子现象. 对于在静电场 F 中半导体的光吸收,如果电场 F 比较强可以忽略电子-空穴对(激子)之间的库仑相互作用,采用有效质量近似可以求得 Schrödinger 方程的解析解,称为 Airy 函数. 据此可以进一步求出电场对介电函数的影响,可表示为^[9]

$$\begin{aligned}\Delta\epsilon(E, F) &= \Delta\epsilon_1 + i\Delta\epsilon_2 = \epsilon(E, F) - \epsilon(E, 0) \\ &= B \frac{(\hbar\theta)^{1/2}}{E^2} [G(\eta) + iF(\eta)],\end{aligned}\quad (1)$$

式中 $\Delta\epsilon_1$ 和 $\Delta\epsilon_2$ 分别为电场引起的介电函数的变化 $\Delta\epsilon$ 的实部和虚部, B 是一个与跃迁矩阵元相关的常数, $E = h\nu$ 是光子能量. 参数 θ 和 η 分别定义为

* 国家自然科学基金(批准号 59776019)资助的课题.

$$(\hbar\theta)^3 = \frac{e^2 \hbar^2 F^2}{2\mu}, \tag{2}$$

$$\eta = \frac{E_g - E + i\Gamma}{\hbar\theta}, \tag{3}$$

式中 e 是电子电荷, $\hbar$ 是普朗克常数, E_g 是能隙, μ 是电子-空穴约化质量, Γ 是谱线的加宽因子. $G(\eta)$ 和 $F(\eta)$ 称为电光函数, 分别用 Airy 函数 $\text{Ai}(\eta)$ 和 $\text{Bi}(\eta)$ 及其导数表示

$$G(\eta) = \pi[\text{Ai}'(\eta)\text{Bi}'(\eta) - \eta\text{Ai}(\eta)\text{Bi}(\eta)] + \sqrt{\eta}H(\eta), \tag{4}$$

$$F(\eta) = \pi[\text{Ai}'^2(\eta) - \eta\text{Ai}^2(\eta)] - \sqrt{-\eta}H(-\eta), \tag{5}$$

式中 $H(\eta)$ 是单位阶跃函数.

在 ER 和 PR 实验中测量的是反射率的相对变化

$$\frac{\Delta R}{R} = \alpha\delta\epsilon_1 + \beta\delta\epsilon_2, \tag{6}$$

式中 α, β 是 Seraphin 系数^[9]. $\delta\epsilon_1$ 和 $\delta\epsilon_2$ 分别是调制引起的介电函数变化 $\delta\epsilon$ 的实部和虚部. 实验中的调制是非平带调制, 电场由 F_1 变到 $F_2 = F_1 - \delta F$. 于是 $\Delta\epsilon$ 和 $\delta\epsilon$ 之间的关系为

$$\begin{aligned} \delta\epsilon &= \epsilon(E, F_1) - \epsilon(E, F_2) \\ &= \Delta\epsilon(E, F_1) - \Delta\epsilon(E, F_2). \end{aligned} \tag{7}$$

在 III - V 族化合物的基本能隙附近, 一般 $|\alpha| \gg |\beta|$, 所以 $\frac{\Delta R}{R} \approx \alpha\delta\epsilon_1$. 这就是说, 由 $\frac{\Delta R}{R}$ 给出的 ER 和 PR 线性主要由介电函数的实部决定.

对于 III - V 族化合物, 价带顶的重空穴(HH)带和轻空穴(LH)带是简并的, 它们对介电函数变化的实部和虚部都有贡献, 所以

$$\delta\epsilon_1 = \sum_i B_i \frac{(\hbar\theta_i)^{\nu/2}}{E^2} [G(\eta_{1i}) - G(\eta_{2i})], \tag{8}$$

$$\delta\epsilon_2 = \sum_i B_i \frac{(\hbar\theta_i)^{\nu/2}}{E^2} [F(\eta_{1i}) - F(\eta_{2i})], \tag{9}$$

式中下标 i 是 HH, LH, 而 η_{1i} 和 η_{2i} 分别对应于由电场 F_1 和 F_2 计算得到的 η 值.

在 PR 和 ER 的实验数据分析中, 利用 Aspnes 等^[3]提出的方法, 由函数 $G(\eta)$ 和 $F(\eta)$ 对大的 $(E - E_g)$ 的渐近行为, 可以求出电场 $\frac{\Delta R}{R}$ 的渐近公式为^[3]

$$\frac{\Delta R}{R} \sim \exp\left[-\frac{2\Gamma(E - E_g)^{\nu/2}}{(\hbar\theta)^{3/2}}\right] (E - E_g)^{-1}$$

$$\cdot \cos\left[\frac{4}{3}\left(\frac{E - E_g}{\hbar\theta}\right)^{3/2} + \varphi\right], \tag{10}$$

式中 φ 是一个相因子, 其数值表示 (6) 式中 $\delta\epsilon_1$ 和 $\delta\epsilon_2$ 贡献的相对大小, 可由实验确定. (10) 式表示一个衰减振荡, 其极大和极小值的位置由

$$\frac{4}{3}(\hbar\theta)^{-3/2}(E_m - E_g)^{3/2} + \varphi = m\pi \tag{11}$$

决定. 由实验数据确定第 m 个极值位置 E_m , 按 (11) 式 $(E_m - E_g)^{3/2}$ 与 m 成直线关系. 由直线的斜率可以确定电场强度 F . 在此方法中忽略了轻空穴的贡献和电场 F_1 和 F_2 的差别.

最近报道利用傅里叶变换(FT)来分析 FKO 数据可以分别观察到 HH 和 LH 的贡献^[4-8]. 这是一种简单而又方便的方法. 如果把 (10) 式中余弦函数的宗量写作

$$\frac{4}{3}\left(\frac{E - E_g}{\hbar\theta}\right)^{3/2} = 2\pi\nu t, \tag{12}$$

其中

$$t = (E - E_g)^{3/2}, \tag{13}$$

和

$$\nu = \frac{2}{3\pi}(\hbar\theta)^{-3/2} = \frac{2}{3\pi}\sqrt{2\mu}/e\hbar F. \tag{14}$$

(10) 式 $\frac{\Delta R}{R}(t)$ 的傅里叶变换 $\frac{\Delta R}{R}(\nu)$ 在 $\nu = \frac{2}{3\pi}\sqrt{2\mu}/e\hbar F$ 处将出现一个峰或突变, 由此可以得到关于 $\sqrt{\mu}/F$ 的信息.

3 理论线性的 FT 分析

在这一节中将给出 FKO 理论线性及其 FT 的数值计算的结果. 这对识别 PR 和 ER 实验数据的 FT 谱是有用的.

图 1 给出由 (1-5) 式表示的电场引起的介电函数变化的实部 $\Delta\epsilon_1$ 和虚部 $\Delta\epsilon_2$ 的数值计算结果. 计算中只考虑了 HH 的贡献, 电场强度 $F = 22000 \text{ V/cm}$, 其他参数的数值 (对于 GaAs) 列于表 1 中. $\Delta\epsilon_1$ 和 $\Delta\epsilon_2$ 都是衰减的变周期振荡, 衰减快慢依赖于加宽因子的大小. 用 $\Delta\epsilon_1(\nu)$ 和 $\Delta\epsilon_2(\nu)$ 分别表示 $\Delta\epsilon_1$

表 1

能隙 E_g/eV	有效质量 m^*/m_0		加宽因子 Γ/eV	
	电子	轻空穴	重空穴	
1.42	0.067	0.087	0.45	0.006

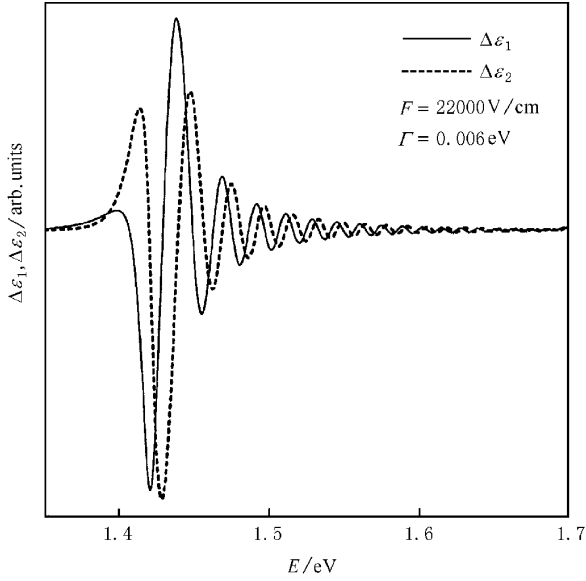


图1 电场引起的介电函数变化的实部 $\Delta\epsilon_1$ 和虚部 $\Delta\epsilon_2$ 电场强度 $F = 22000 \text{ V/cm}$, 其他参数见表1. 计算中只考虑了重空穴的贡献

和 $\Delta\epsilon_2$ 的 FT, 二者都是复数. 图 2(a) 是图 1 中 $\Delta\epsilon_1$ 的 FT, 即 $\Delta\epsilon_1(\nu)$. 图中用 Re, Im 和 Mo 标记的三条曲线分别是 $\Delta\epsilon_1(\nu)$ 的实部 $\text{Re}[\Delta\epsilon_1(\nu)]$ 、虚部 $\text{Im}[\Delta\epsilon_1(\nu)]$ 和模 $\text{Mo}[\Delta\epsilon_1(\nu)]$. $\text{Re}[\Delta\epsilon_1(\nu)]$ 在主频 $\nu = \frac{2}{3\pi} \sqrt{2\mu}/e\hbar F$ 处有一个阶跃, 而 $\text{Im}[\Delta\epsilon_1(\nu)]$ 在主频处则是一个尖峰. 图 2(b) 是图 1 中 $\Delta\epsilon_2$ 的 FT, 即 $\Delta\epsilon_2(\nu)$. 与图 2(a) 比较明显地有以下关系:

$$\begin{aligned}\text{Re}[\Delta\epsilon_2(\nu)] &\approx -\text{Im}[\Delta\epsilon_1(\nu)], \\ \text{Im}[\Delta\epsilon_2(\nu)] &\approx \text{Re}[\Delta\epsilon_1(\nu)], \\ \text{Mo}[\Delta\epsilon_2(\nu)] &\approx \text{Mo}[\Delta\epsilon_1(\nu)].\end{aligned}$$

在调制反射谱实验中观察的是介电函数的变化 $\delta\epsilon_1$ 和 $\delta\epsilon_2$, 它们由方程(8)和(9)描述. 考虑到非平带调制和轻重空穴的贡献, 在其 FT 谱中包含 4 个主频, 分别为

$$\begin{aligned}\nu_{11} &= C \frac{\sqrt{\mu_1}}{F_1}, \nu_{21} = C \frac{\sqrt{\mu_1}}{F_2}, \\ \nu_{1h} &= C \frac{\sqrt{\mu_h}}{F_1}, \nu_{2h} = C \frac{\sqrt{\mu_h}}{F_2},\end{aligned}\quad (15)$$

式中 $C = \frac{2\sqrt{2}}{3\pi e\hbar}$, μ_1 和 μ_h 分别为电子-轻空穴和电子-重空穴的约化质量. 这四个主频不是完全独立的, 它们之间存在以下比例关系:

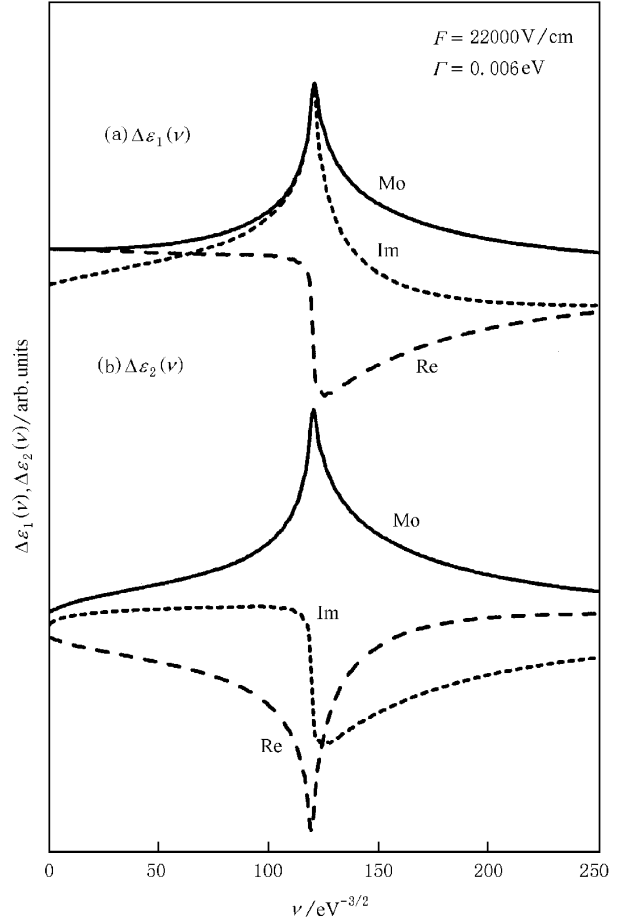


图2 (a) 图1中介电函数变化的实部 $\Delta\epsilon_1$ 的 FT 谱 $\Delta\epsilon_1(\nu)$ 的实部, 虚部和模; (b) 图1中介电函数变化的虚部 $\Delta\epsilon_2$ 的 FT 谱 $\Delta\epsilon_2(\nu)$ 的实部, 虚部和模. 图中实部, 虚部和模分别用 Re, Im 和 Mo 标记

$$\begin{aligned}\frac{\nu_{11}}{\nu_{21}} &= \frac{\nu_{1h}}{\nu_{2h}} = \frac{F_2}{F_1}, \\ \frac{\nu_{11}}{\nu_{1h}} &= \frac{\nu_{21}}{\nu_{2h}} = \frac{\sqrt{\mu_1}}{\sqrt{\mu_h}}.\end{aligned}\quad (16)$$

利用 $\frac{\Delta R}{R}$ 的 FT 谱可以从实验数据求出这四个主频, 从而由(15)式求出 μ_1, μ_h, F_1 和 F_2 四个量. 实际上由于比例关系(16), 不能同时确定这四个量, 但是只要这四个量中任一个是已知的, 就可以用(15)式求出其余三个.

图3是 $\delta\epsilon_1$ 和 $\delta\epsilon_2$ 的典型线性. 三组曲线分别代表不同的调制度: (a) $F_1 = 22000 \text{ V/cm}$, $F_2 = 21000 \text{ V/cm}$; (b) $F_1 = 22000 \text{ V/cm}$, $F_2 = 18000 \text{ V/cm}$; (c) $F_1 = 22000 \text{ V/cm}$, $F_2 = 16000 \text{ V/cm}$. 图中实线表示 $\delta\epsilon_1$, 虚线表示 $\delta\epsilon_2$. 用 $\delta\epsilon_1(\nu)$ 和 $\delta\epsilon_2(\nu)$ 分别表示 $\delta\epsilon_1$ 和 $\delta\epsilon_2$ 的 FT. $\delta\epsilon_1(\nu)$ 表示在图4中, 图中

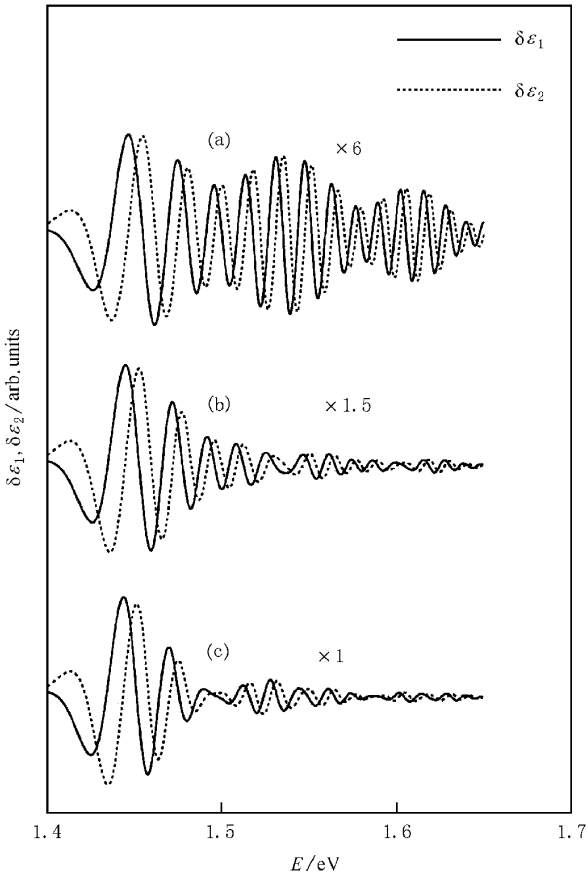


图 3 非平带调制引起的介电函数变化的实部 $\delta\epsilon_1$ 和虚部 $\delta\epsilon_2$. (a), (b), (c) 3 组曲线分别对应于不同的电调制: (a) $F_1 = 22000$ V/cm, $F_2 = 21000$ V/cm; (b) $F_1 = 22000$ V/cm, $F_2 = 18000$ V/cm; (c) $F_1 = 22000$ V/cm, $F_2 = 16000$ V/cm (其它参数的数值见表 1)

(a), (b), (c) 三组曲线分别对应于图 3 中 (a), (b), (c) 三组数据中的 $\delta\epsilon_1$. 图 4 中虚线表示 $\text{Re}[\delta\epsilon_1(\nu)]$, 点线表示 $\text{Im}[\delta\epsilon_1(\nu)]$, 实线表示 $\text{Mo}[\delta\epsilon_1(\nu)]$. 对于调制度很小的情形 (a), $\delta F = 1000$ V/cm, $\text{Re}[\delta\epsilon_1(\nu)]$ 是两个倒置的峰, 分别对应于 LH 和 HH. LH 峰的后沿和前沿的中点(半高点)分别对应于 ν_{1l} 和 ν_{2l} , 同样 HH 峰的后沿和前沿的中点对应于 ν_{1h} 和 ν_{2h} . 四个主频按大小排列 $\nu_{1l} < \nu_{2l} < \nu_{1h} < \nu_{2h}$. 保持 F_1 不变, 增大调制度 δF , 即减小 F_2 , 则 ν_{1l} 和 ν_{1h} 保持不变, ν_{2l} 和 ν_{2h} 增大. 图 4 中 (b) 相当于 $\nu_{2l} \approx \nu_{1h}$ 的情形, 曲线 $\text{Re}[\delta\epsilon_1(\nu)]$ 呈现两层台阶状. 进一步增加调制度到 $\nu_{2l} > \nu_{1h}$, 相应于图 4 中 (c) 的情形. 在情形 (a) 中 $\text{Im}[\delta\epsilon_1(\nu)]$ 有 4 个尖锐的峰, 它们分别对应于 4 个主频; 在情形 (b) 中, $\nu_{2l} \approx \nu_{1h}$, $\text{Im}[\delta\epsilon_1(\nu)]$ 的极值变为 3 个; 在情形 (c) 中, $\nu_{2l} > \nu_{1h}$,

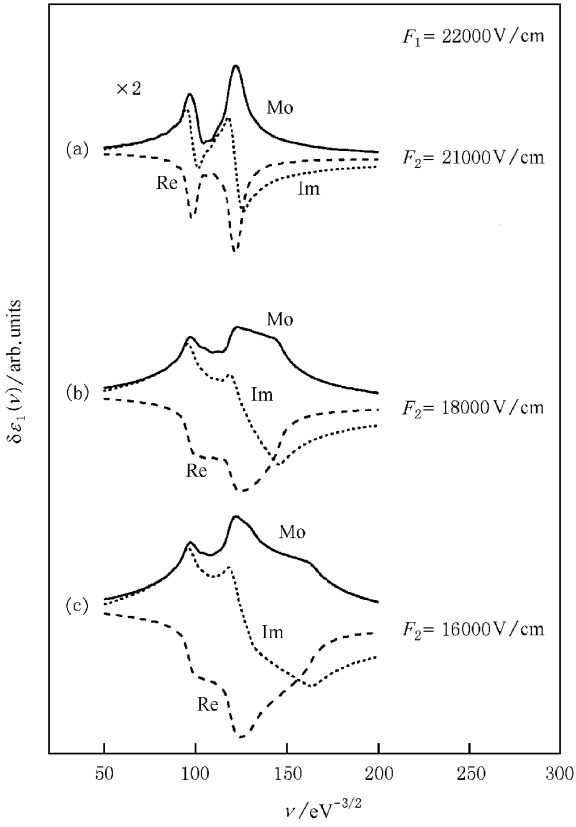


图 4 图 3 中 $\delta\epsilon_1$ 谱的 FT 谱 $\delta\epsilon_1(\nu)$ 的实部, 虚部和模, 分别用 Re, Im 和 Mo 标记

ν_{2l} 不再是一个极值, 变成一个转折点. 图中实线表示 $\delta\epsilon_1(\nu)$ 的模 $\text{Mo}[\delta\epsilon_1(\nu)]$. 调制度很小时, 它的两个主要的峰值近似对应于 ν_{1l} 和 ν_{1h} . 对于调制度相当大的情形, 如 (b) 和 (c), 中间的高峰是 ν_{2l} 和 ν_{1h} 叠加形成的.

$\delta\epsilon_2(\nu)$ 也可以作类似的分析, 为节省篇幅这里没有给出 $\delta\epsilon_2(\nu)$ 的图解. $\delta\epsilon_2(\nu)$ 和 $\delta\epsilon_1(\nu)$ 有以下几个重要关系:

$$\begin{aligned}\text{Re}[\delta\epsilon_2(\nu)] &\approx -\text{Im}[\delta\epsilon_1(\nu)], \\ \text{Im}[\delta\epsilon_2(\nu)] &\approx \text{Re}[\delta\epsilon_1(\nu)], \\ \text{Mo}[\delta\epsilon_2(\nu)] &\approx \text{Mo}[\delta\epsilon_1(\nu)],\end{aligned}$$

4 实 验

样品是在中国科学院半导体研究所用分子束外延方法生长的. 样品的结构如下. 在 n^+ GaAs 衬底上生长 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的 GaAs 缓冲层, 掺杂浓度为 $10^{18}/\text{cm}^3$, 然后再生长一层非故意掺杂的 300 nm GaAs, 形成 SIN^+ 结构. 先后生长了两块这种结构的样品. 为了

得到不同 I 层厚度的样品,用 H_2O_2 (30%) : $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (25%) : H_2O = 1:2:200 的腐蚀液腐蚀使 I 层减薄.在 SiN^+ 结构的 I 层中的电场近似为均匀电场.这是因为表面费米能级钉扎在能隙中央附近,而重掺杂层与 I 层界面的费米能级则钉孔在导带边,这样表面态中的负面电荷与 I-n^+ 界面的正电荷在 I 层中形成一个均匀电场.电场的大小与 I 层的厚度成反比.

用 PR 来观测 FKO,实验装置如前所报道^[10].用作调制光的氦氖激光束 (632.8 nm) 经透镜散焦,再用衰减片衰减,光强能在 $10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ — $2 \text{mW}/\text{cm}^2$ 范围内变化.

5 实验结果和讨论

图 5 是一块 I 层厚度 300 nm 的 $\text{SiN}^+ \text{GaAs}$ 样品 (1 号) 的 PR 谱.图中谱线分别对应于不同的调制光强度:(1) $15 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, (2) $30 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, (3) $60 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, (4) $280 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, (5) $800 \mu\text{W}/\text{cm}^2$.图 6 是图 5 中 3 条谱线 (1), (3), (5) 的 FT 谱,每一组 FT 谱都

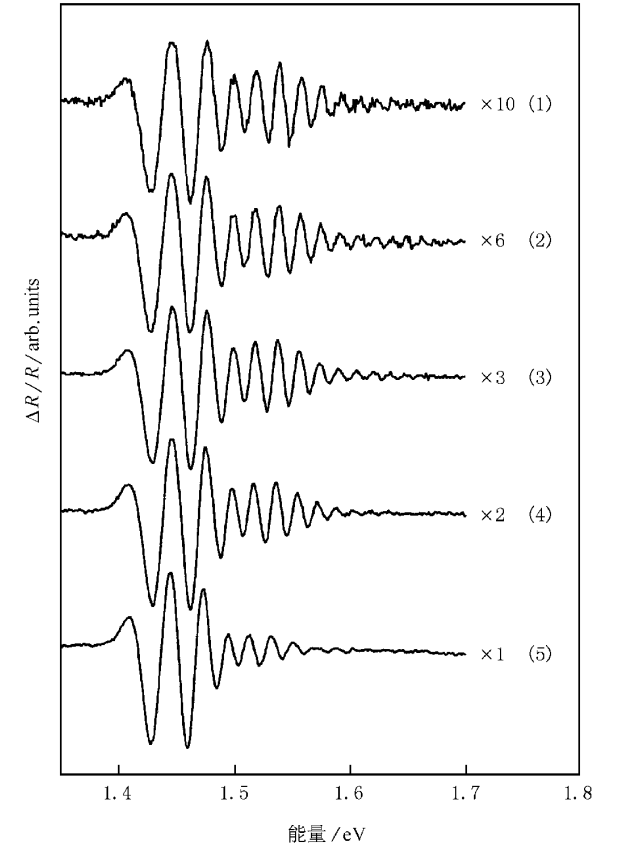


图 5 1 号样品的 PR 谱(调制光强度:(1) $15 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, (2) $30 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, (3) $60 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, (4) $280 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, (5) $800 \mu\text{W}/\text{cm}^2$)

包括其实部(Re),虚部(Im)和模(Mo)3 条谱线.从线形上看这三组谱与图 4 中 $\delta\epsilon_1(\nu)$ 的理论计算的 FT 谱相当相似,因而可以认为对该样品的 PR 谱 $\delta\epsilon_1$ 有主要贡献,而 $\delta\epsilon_2$ 的贡献可以忽略.利用第三节中的方法容易从 FT 谱中求出 4 个主频 $\nu_{11}, \nu_{21}, \nu_{1h}, \nu_{2h}$,这些数据列在表 2 中.表中(1) — (5) 行的数据与图 5 中(1) — (5) 不同调制光强的 PR 谱相对应.

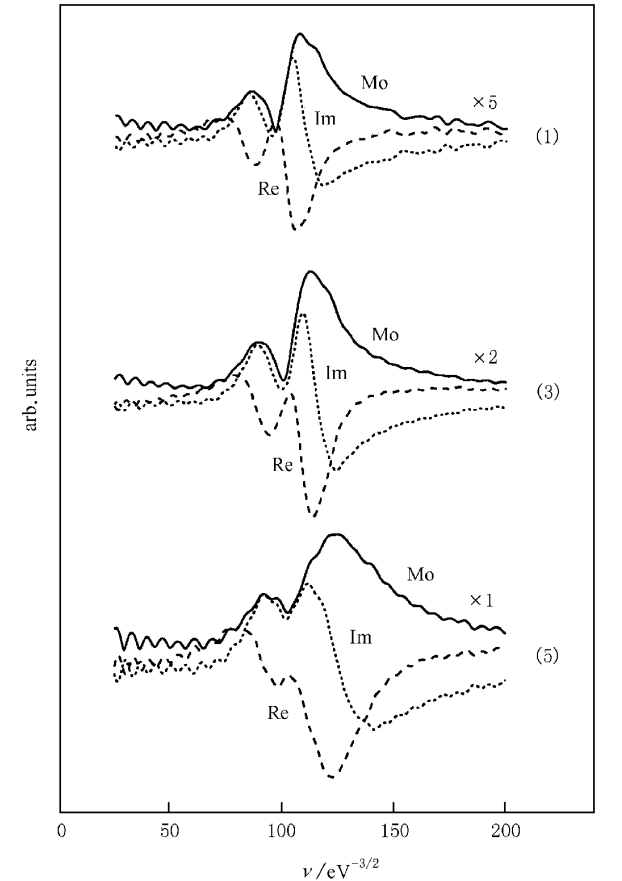


图 6 图 5 中 PR 谱 (1), (3), (5) 的 FT 谱(每组 FT 谱的实部,虚部和模分别用 Re, Im 和 Mo 标记)

FT 谱的主要优点之一是可以从这 4 个主频中获得 LH 和 HH 有效质量的信息.按 (16) 式 LH 和 HH 约化质量平方根之比与 4 个主频满足关系 $\frac{\nu_{11}}{\nu_{1h}}$

$$= \frac{\nu_{21}}{\nu_{2h}} = \frac{\sqrt{\mu_l}}{\sqrt{\mu_h}}$$

比值 ν_{1h}/ν_{1h} 和 ν_{2h}/ν_{2h} 的数值列于表 2 中.对于不同的调制光强度这两个比值在实验误差范围内保持不变,其平均值等于 0.805.我们用另一块用同样参数 (I 层 300 nm) 生长的 SiN^+ 样品 (2 号) 作了实验,FT 谱分析得出 $\sqrt{\mu_l}/\sqrt{\mu_h} = 0.816$.关于 GaAs 电子和空穴的有效质量有不少报道^[11].如电子和轻空穴的有效质量选取表 1 中数值

表 2

	$\nu_{1l}/\text{eV}^{-3/2}$	$\nu_{2l}/\text{eV}^{-3/2}$	$\nu_{1h}/\text{eV}^{-3/2}$	$\nu_{2h}/\text{eV}^{-3/2}$	ν_{1l}/ν_{1h}	ν_{2l}/ν_{2h}	$F_1/(\text{V}/\text{cm})$	$F_2/(\text{V}/\text{cm})$
(1)	81.7	92.3	101.3	114.3	0.807	0.808	25900	23000
(2)	82.2	93.2	102.3	116.3	0.804	0.802	25700	22600
(3)	82.7	94.2	102.8	117.2	0.804	0.804	25600	22400
(4)	84.7	97.7	105.2	121.3	0.805	0.805	25000	21600
(5)	87.2	103.3	108.3	128.3	0.805	0.805	24300	20500

$m_e^* = 0.067\ m_0$ 和 $m_l^* = 0.087\ m_0$, 则由 $\sqrt{\mu_l}/\sqrt{\mu_h}$ $= 0.805$ 计算 1 号样品重空穴有效质量为 $m_h^* = 0.455\ m_0$. 用比值 $\sqrt{\mu_l}/\sqrt{\mu_h} = 0.816$ 计算 2 号样品的重空穴有效质量 $m_h^* = 0.375\ m_0$. Miller 等^[12] 在分析量子阱的光谱数据时提出 GaAs 有效质量的数据, $m_e^* = 0.0665\ m_0$, $m_l^* = 0.094\ m_0$, $m_h^* = 0.34\ m_0$. 用我们的实验值 $\sqrt{\mu_l}/\sqrt{\mu_h} = 0.805$ 和 0.816 分析, 他们给出的 m_l^* 太大, 而 m_h^* 太小.

用 PR 谱的 FT 分析的另一个优点是能求出样品中的电场 F_1 和 F_2 . 在 PR 实验中调制光束被斩波, 在暗的半周期中 I 层中的电场为 F_1 , 即未经外界干扰的自建电场. 在明的半周期中 I 层中的电场因光伏效应减小为 F_2 . 理想情况下 F_1 不随调制光强度而变化, F_2 则随调制光增强而减小. 表 2 最后两列是用 (15) 式求出的 F_1 和 F_2 值. μ_l 的值由表 1 的 m_e^* 和 m_l^* 计算, 再由比值 $\sqrt{\mu_l}/\sqrt{\mu_h} = 0.805$ 求得 $\sqrt{\mu_h}$. 表 2 中的 F_1 和 F_2 是由 LH 和 HH 求出的平均值.

一个值得注意的现象是随着调制度的增加 F_1 有一定程度的减少. 调制度大时 (如谱线 (5)) F_1 的减少比较显著. F_1 的这种变化说明光调制是一个弛豫过程^[13], 光生电子和空穴在 $I-n^+$ 界面和表面的聚集和复合有一个弛豫时间. 只有在调制度很弱时测量到的 F_1 才接近于样品的内建电场. 具体比较 FT 方法和用 (11) 式的方法确定样品中的电场, 由谱 (1) 和 (4) FT 法给出 $F_1 = 25900\ \text{V}/\text{cm}$ 和 $25000\ \text{V}/\text{cm}$, 而用 (11) 式得到 $25500\ \text{V}/\text{cm}$ 和 $23800\ \text{V}/\text{cm}$. 可以认为 FT 方法精确度较高.

表 2 可以给出由光调制引起的电场调制 $\delta F = F_1 - F_2$. 随调制光强的增加 δF 由 $2900\ \text{V}/\text{cm}$ 增加至 $3800\ \text{V}/\text{cm}$. 最小的 δF 主要受实验中信噪比的限制. 由 2 号样品得到的最小 $\delta F \approx 1900\ \text{V}/\text{cm}$. 折合成调制电压相当于最小的电压调制约 60 至 80 mV.

以上关于 1 号和 2 号样品的 PR 谱的 FT 分析

表明, 数值模拟和实验符合得很好, 同时也说明这些 PR 谱基本上是由介电函数的实部 $\delta\epsilon_1$ 构成, 介电函数虚部的贡献可以忽略.

SIN⁺ 结构的样品的本征层 I 中的电场随本征层 I 变薄而增加. 利用化学腐蚀容易得到 I 层厚度不同的样品. 我们对这些样品的 PR 谱及其 FT 谱作了研究. 有一些样品的 FT 谱显示出比较复杂的情况, 但其 PR 谱看起来并没有什么差异. 例如, 图 7 是一块样品 (3 号) 的一组 PR 谱. 利用 (11) 式确定 I 层中的电场强度, 并由此推断 I 层的厚度约为 140 nm. 图 8 是图 7 中 PR 谱 (3) 的 FT 谱, 其实部, 虚部

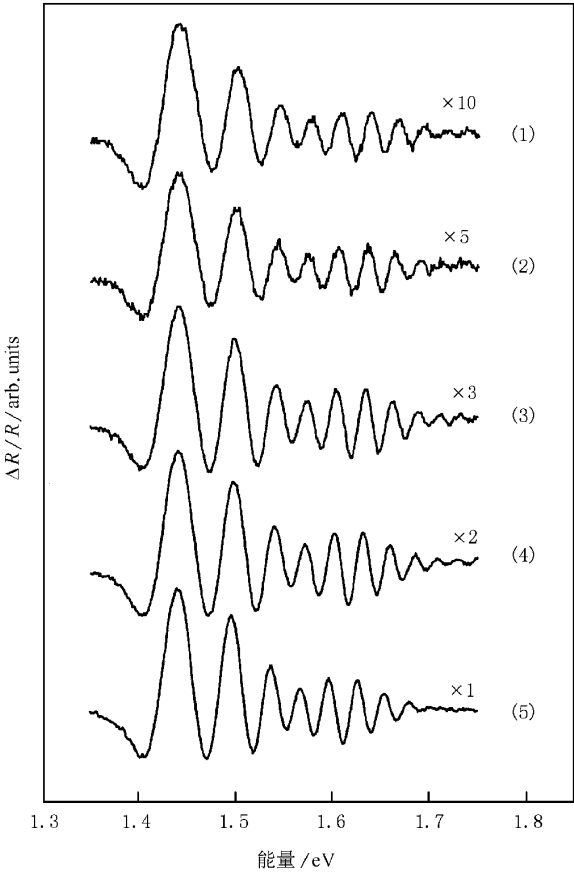


图 7 3 号样品的 PR 谱 (调制光强度: (1) $10\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$, (2) $20\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$, (3) $30\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$, (4) $100\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$, (5) $300\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$)

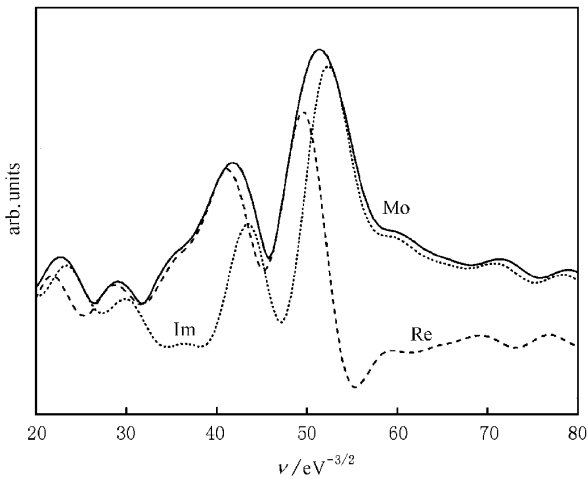


图 8 图 7 中 PR 谱 (3) 的 FT 谱 (图中实部, 虚部和模分别用 Re, Im 和 Mo 标记)

和模分别用 Re, Im 和 Mo 标记. 由图 8 可以看出一个主要的特点, 就是 FT 谱中 LH 和 HH 带的行为不同, 也与图 4 中的理论线性不同. 理论上 FT 谱的实部是两个形状相似的峰状 LH 带和 HH 带, 其虚部则是两个形状相似的振荡形 LH 带和 HH 带. 但是, 图 8 中不论是 FT 谱的实部和虚部 LH 带和 HH 带的形状都不相同. 在这种情况下利用 FT 谱的实部和虚部来确定 4 个主频就很困难. 为此可以利用 FT 谱的模. 图 9 是图 7 中 PR 谱的 FT 谱的模, 其 LH 带和 HH 带都是清晰可辨的峰状带. 由 LH 和 HH 带的峰位确定 $\sqrt{\mu_v}/\sqrt{\mu_h}$ 的平均值为 0.801, 同时也可以求出平均电场, 但很难区分电场 F_1 和 F_2 .

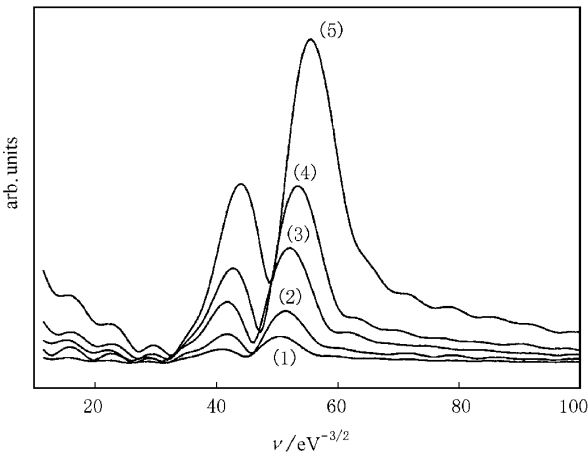


图 9 图 7 中 PR 谱的 FT 谱的模 $\text{Mo}[\delta\epsilon_1(\nu)]$

上述 PR 谱的 FT 谱中 LH 带和 HH 带的行为

不同的现象是一个没有完全弄清楚的问题. 现有的实验资料表明这种现象很可能与 I 层的厚度有关, 但也不能完全排除表面和界面的影响. 这个问题有待进一步研究.

6 结 论

我们利用 FT 方法对 FKO 的理论线性进行了详细的数值模拟, 并提出了利用 FT 谱的实部和虚部确定内建电场 F_1 , 调制电场 $\delta F = F_1 - F_2$ 以及轻重空穴约化质量平方根之比 $\sqrt{\mu_v}/\sqrt{\mu_h}$ 的方法. 对一组 SiN^+/GaAs 样品的 PR 实验的 FKO 进行了 FT 分析. 一部分样品的 FKO 的 FT 谱与理论分析符合得很好, 给出了比值 $\sqrt{\mu_v}/\sqrt{\mu_h}$ 在 0.805—0.816 之间, 并给出了内建电场 F_1 和由光调制引起的电场调制. 另一部分样品的 FKO 的 FT 谱的实部和虚部与理论线性有很大差别, 主要表现为 LH 带与 HH 带的行为不同. 这部分样品的 FT 谱的模与理论线性符合得很好, 仍然可以用来求出平均电场和约化质量平方根之比.

[1] C. Van Hoof, K. Deneffe, J. De boeck, D. J. Arent, G. Borghs, *Appl. Phys. Lett.*, **54**(1989), 608.
[2] H. Shen, M. Dutta, *J. Appl. Phys.*, **78**(1995), 2151.
[3] D. E. Aspnes, A. A. Studna, *Phys. Rev.*, **B7**(1973), 4605.
[4] V. L. Alperovich, A. S. Jaroshevich, H. E. Scheibler, A. S. Terekhov, *Solid-State Electron.*, **37**(1994), 657.
[5] D. P. Wang, C. T. Chen, *Appl. Phys. Lett.*, **67**(1995), 2069.
[6] D. P. Wang, K. M. Huang, T. L. Shen, K. F. Huang, T. C. Huang, *J. Appl. Phys.*, **83**(1998), 476.
[7] W. H. Chang, T. M. Hsu, W. C. Lee, R. S. Chuang, *J. Appl. Phys.*, **83**(1998), 7873.
[8] S. J. Chiou, Y. G. Sung, D. P. Wang, K. F. Huang, T. C. Huang, A. K. Chu, *J. Appl. Phys.*, **85**(1999), 3770.
[9] D. E. Aspnes, in *Handbook on Semiconductors*, ed. by T. S. Moss (North Holland, New York, 1980), Vol. 2.
[10] Shi-hong Pan, Yi Liu *et al.*, *Chinese Journal of Semiconductors*, **13**(1992), 343 (in Chinese) [潘士宏、刘毅等, *半导体学报*, **13**(1992), 343].
[11] Landolt-Börnstein Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology, New series, III/17a (Springer-Verlag, Berlin, 1982).
[12] R. C. Miller, D. A. Kleinman, A. C. Gossard, *Phys. Rev.*, **B19**(1984), 7085.
[13] H. Shen, M. Dutta, R. Lux, W. Buchwald, L. Fotiadis, R. N. Sacks, *Appl. Phys. Lett.*, **59**(1991), 321.

FOURIER TRANSFORMATION STUDY OF THE FRANZ-KELDYSH OSCILLATION IN SiN^+ GaAs STRUCTURES^{*}

JIN PENG PAN SHI-HONG

(*Department of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China*)

LIANG JI-BEN

(*Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

(Received 15 July 1999 ; revised manuscript received 15 January 2000)

ABSTRACT

Fourier transformation (FT) method has been used in the theoretical lineshape analysis of the Franz-Keldysh Oscillation (FKO) in detail by numerical simulation. The FKO of a set of GaAs SiN^+ samples was obtained in photoreflectance measurements. The FT spectra of a part of the samples, including of the real part, imaginary part, and mode of the FT, are well consistent with the theoretical lineshapes. The ratio of the square root of the reduced mass of the light hole (LH) to the heavy hole (HH), $\sqrt{\mu_l}/\sqrt{\mu_h}$, obtained in the analysis was in the range of 0.805 to 0.816 for different samples. In addition, the built-in electric field F_1 , and the modulation field $\delta F = F_1 - F_2$ induced by photo-modulation were also obtained in the analysis. However, for a few samples great difference was found in the lineshape of the real part and imaginary part of their FT spectra from the theoretical lineshape. In this case the mode of the FT spectra still can be used to obtain useful information.

Keywords : Franz-Keldysh Oscillation, Fourier transformation, GaAs

PACC : 7340L, 7865

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 69776019).