

# InGaAs-GaAs 短周期应变层超晶格调制反射光谱中的 Franz-Keldysh 振荡

刘伟<sup>1,2</sup> 江德生<sup>1</sup> 王若桢<sup>2</sup> 周钧铭<sup>3</sup> 王凤莲<sup>1,4</sup>

(1 超晶格国家重点实验室 中国科学院半导体研究所 北京 100083)

(2 北京师范大学物理系 北京 100875)

(3 中国科学院物理研究所 北京 100080)

(4 中国科学院电子显微镜实验室 北京 100080)

**摘要** 本文在 p-i-n 结构的 InGaAs-GaAs 应变层短周期超晶格的调制光反射谱中观察并确认了超晶格微带电子的 Franz-Keldysh 振荡,通过对 Franz-Keldysh 振荡的分析,推算出超晶格区内建电场大小;讨论了内建电场对超晶格微带电子的影响,最后指出 Franz-Keldysh 振荡可以作为检验短周期超晶格样品质量的一种手段。

**PACC:** 7865, 7820J

## 1 引言

半导体中的电子在电场作用下,电子状态将发生显著的变化,在光吸收上表现为场助隧穿的带尾吸收及带边以上的衰减振荡,即所谓的 Franz-Keldysh 效应。Franz-Keldysh 效应反映了电子的非局域化的特性,是体材料中电子的特征。其中带边以上的 Franz-Keldysh 振荡 (FKO) 的周期及线形与电场强弱有关,因此 FKO 已被广泛用来研究半导体表面、界面电场<sup>[1,2]</sup>。近年来随着半导体超晶格、微结构研究的日益兴起,FKO 已被用来研究超晶格、微结构中的电场性质<sup>[3,4]</sup>,但这方面的工作大多局限于超晶格、微结构中衬底、缓冲层等体材料部分的电场研究,而来自超晶格微带的 FKO 的报道很少<sup>[5]</sup>。

我们知道,短周期超晶格中,由于势垒较薄,阱间由于共振隧穿耦合较强,超晶格中子能级展宽成微带,电子运动具有准三维特征。这样,在电场满足一定条件的情况下,有可能实现超晶格微带电子的 FKO<sup>[6]</sup>。反之,利用实验中观察到的 FKO,可以研究超晶格区电场及其对微带的影响。

本文报道了在 p-i-n 结构应变层短周期 InGaAs-GaAs 超晶格光调制反射谱 (PR) 中的 FKO,确认了 FKO 来自超晶格微带的贡献,分析了超晶格区电场及其对微带性质的影响,另外还讨论了 FKO 作为检测超晶格区晶格完整性的一种有效手段的可能性,而且与 TEM 的结果进行了对比。

## 2 实验

实验所用的 p-i-n 结构的样品示意图见图 1。

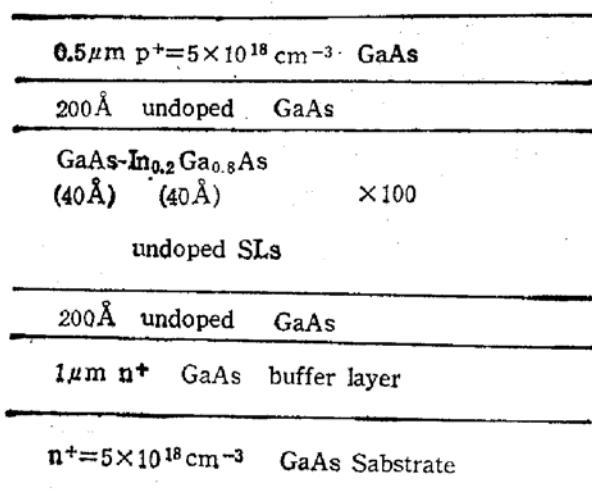


图 1 p-i-n 结构的样品示意图

以将样品体材料 GaAs 部分和超晶格部分的信号分离开来。

(4) 样品超晶格周期设计成阱宽、垒宽各  $40 \text{ \AA}$ , 使得阱区电子微带、轻空穴微带、重空穴微带各只能容纳一个, 这样可以简化谱线分析。

本实验做了室温及  $100\text{K}$  的 PR 谱, 室温及  $10\text{K}$  吸收谱。为检验样品质量, 还做了该样品的透射电镜像 (TEM)。PR 谱实验装置参见文献 [6]。

## 3 实验结果与讨论

从图 2 的室温及  $100\text{K}$  的 PR 谱上, 我们观察到在 GaAs 带边以下有一系列结构, 其中低能端的三个结构 A、B、C 带有明显的衰减振荡特征。

通过 Kronig-Penny 模型计算, 在阱宽、垒宽各为  $40 \text{ \AA}$  的  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As-GaAs}$  短周期

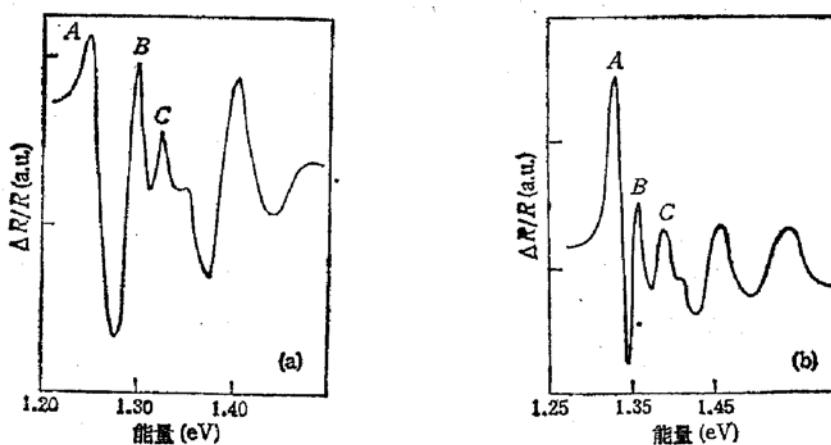


图 2 (a)  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As-GaAs}$  超晶格室温光调制反射谱 (b) 同一样品  $100\text{K}$  下的光调制反射谱

实验选用 p-i-n 结构的应变层短周期  $\text{InGaAs-GaAs}$  超晶格样品, 是考虑其有以下优点:

(1) 样品设计成 p-i-n 结构, 超晶格部分处于 i 区, 电场可近似为空间均匀的, 理论分析比较简单。

(2) 在  $\text{InGaAs-GaAs}$  系统中, 由于单轴应变, 价带顶重空穴子带和轻空穴子带简并分裂, 从而可以将重空穴和轻空穴的信号分开, 有利于谱形分析。

(3) 选用  $\text{InGaAs}$ 、 $\text{GaAs}$  两种基质, 考虑到  $\text{GaAs}$  带隙大于  $\text{InGaAs}$  带隙, 从而可

应变层超晶格中, 电子微带、重空穴微带、轻空穴微带各只有一个, 其中电子微带宽度  $\Delta \approx 60\text{meV}$  左右, 允许的子带间跃迁及跃迁能量如下:

$$1h \rightarrow 1e: E_{1h}(\Gamma) = \begin{cases} 1.274\text{eV} & 300\text{K} \\ 1.330\text{eV} & 100\text{K} \end{cases}$$

$$1l \rightarrow 1e: E_{1l}(\Gamma) = \begin{cases} 1.380\text{eV} & 300\text{K} \\ 1.440\text{eV} & 100\text{K} \end{cases}$$

其中 能带错移比值 (Band offset)  $Q_e$  取 0.66<sup>[7]</sup>.

显然图 2 中 1.380eV (1.440V) 处的结构对应于轻空穴到电子微带的跃迁  $E_{1l}(\Gamma)$ , 而 1.380eV (1.440eV) 以下的三个结构  $A, B, C$  则来自重空穴的贡献。

对于重空穴的这三个结构的指认有两种可能: 一是重空穴吸收边及其高能端的 FKO, 二是 Wannier-Stark ladders<sup>[8]</sup> 的贡献。我们认为在本实验条件下 (标准 PR 装置, 无外加偏压), 第二种可能性处于次要的地位, 而第一种可能性起主要作用。

首先, 我们从图 3 同一样品的吸收谱可见, 这是一个明显的类似体材料吸收线形的曲线, 不同于孤立量子阱的吸收线形<sup>[9]</sup>。这说明, 在无外加偏压情况下, 样品 i 区的内建电场还不足以使电子局域化, 超晶格微带效应仍然占主要地位, 电子是准三维的。其次, 在无外加偏压条件下, 估算样品 i 区内建电场为  $1.9 \times 10^4\text{V/cm}$  左右 (内建电势  $V_b$  取 1.5V,  $F_i = \frac{|V_b|}{W}$ ,  $W$  为 i 区厚度), 而在本样品中 Wannier-Stark 局域化起支配地位所需的电场为  $F \approx \frac{\Delta^{[9]}}{ed} = 7.5 \times 10^4\text{V/cm}$ , 可见, 前者较后者小了 3 倍。因此, 我们认为在本实验中, Wannier-Stark 局域化效应所起的作用是次要的, 不会给谱线带来显著影响。

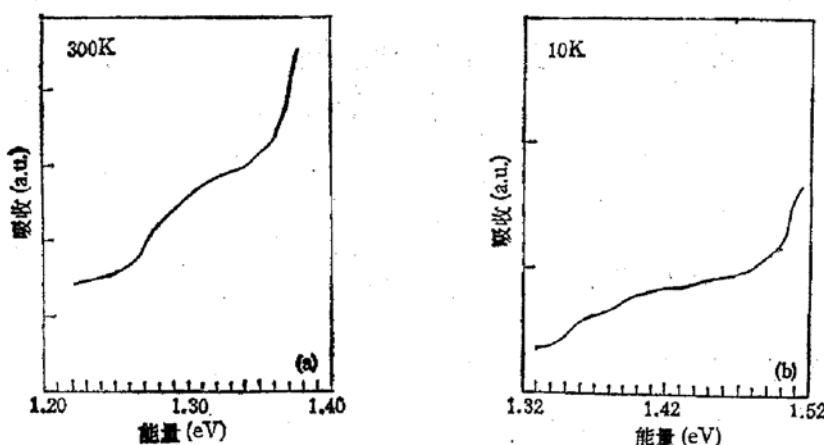


图 3 (a)  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As-GaAs}$  超晶格室温吸收谱 (b) 同一样品 10K 下的吸收谱

另一方面, 假定样品 i 区内建电场为  $1.9 \times 10^4\text{V/cm}$ , 则电光能量  $\hbar\theta = \left[ \frac{e^2 F^2 \hbar^2}{2\mu} \right]^{1/3} \cong 12\text{meV}$ , 和超晶格中展宽参数  $\Gamma$  相近, 恰好满足 FKO 出现的条件:  $\Gamma \lesssim \hbar\theta^{[10]}$ 。FKO 的极值处能量应满足下列关系<sup>[11]</sup>:

$$E_n = E_0 + \hbar Q x_n \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

这里

$$\hbar Q = (e^2 F^2 \hbar^2 / 8\mu)^{1/3},$$

$$x_n = \left[ 3\pi \left( n - \frac{1}{2} \right) / 2 \right]^{2/3}.$$

我们的实验结果与上述关系符合得很好, 如图 4 所示。用最小二乘法作线性拟合得内建电场为  $2.1 \times 10^4 \text{ V/cm}$ , 与前面的粗略估算符合(拟合时取 A 为吸收边, 其后的顺次 4 个极值处的  $(E_n, n)$  与式(1)拟合)。因此, 我们认为与重空穴有关的这些结构是超晶格微带电子的 FKO。

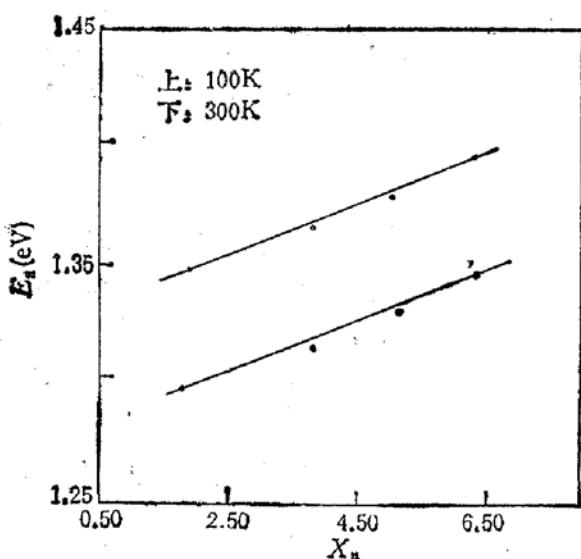


图 4 光调制反射谱中 FKO 的极值处能量满足的关系为  $E_n = E_0 + \hbar Q x_n$ 。其中实线为线性拟合结果

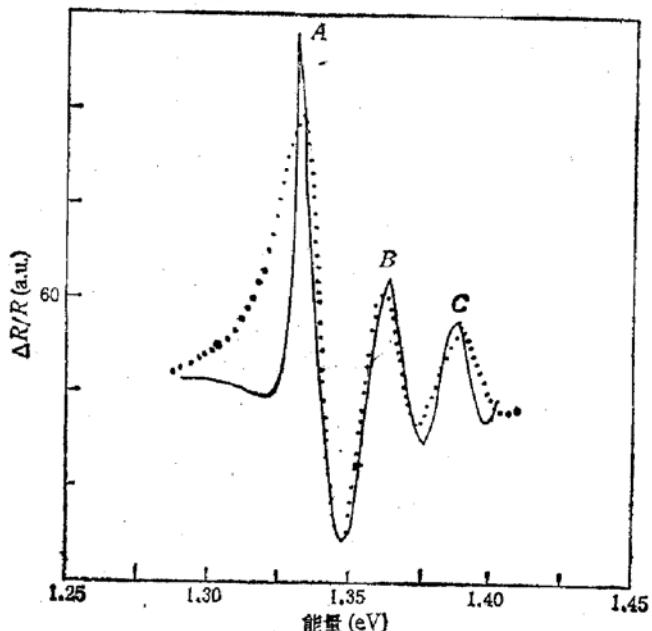


图 5 用 FKO 线形对 100K 的 PR 谱线进行拟合, 其中实线为拟合曲线, 虚线为实验曲线

为进一步证实实验观察到的是超晶格微带电子的 FKO, 并对超晶格区内建电场有个比较准确的估计, 我们用 FKO 线形对 100K 的 PR 实验数据进行了拟合。拟合所用理论如下<sup>[12]</sup>:

电场存在时, 调制的介电函数的变化为:

$$\Delta\epsilon(E, F) = \frac{c}{E^2} (\hbar\theta)^{1/2} [G(\eta) + iF(\eta)]$$

$E$  为光子能量,  $F$  是电场强度,  $c$  是与跃迁几率有关的常数。

$$\hbar\theta = (e^2 F^2 \hbar^2 / 2\mu)^{1/3}$$

$$G(\eta) = \pi [A'_i(\eta)B'_i(\eta) - \eta A_i(\eta)B_i(\eta)] + \eta^{1/2}H(\eta)$$

$$F(\eta) = \pi [A_i^2(\eta) - \eta B_i^2(\eta)] - (-\eta)^{1/2}H(-\eta)$$

这里  $A_i(\eta), B_i(\eta), A'_i(\eta), B'_i(\eta)$  分别是 Airy 函数及其导数,  $H(\eta)$  是单位阶跃函数。

$$\eta = (E_g - E + i\Gamma) / \hbar\theta$$

调制响应

$$\Delta R/R = \alpha \Delta\epsilon_1 + \beta \Delta\epsilon_2.$$

$\alpha, \beta$  为 Seraphin 系数。在吸收边附近,  $\alpha \gg \beta$ , 故

$$\Delta R/R \propto \Delta\epsilon_1.$$

图 5 是理论和实验的比较, 显然二者符合得很好, 证明我们的指认是合理的。拟合所得

的电场为  $1.97 \times 10^4 \text{ V/cm}$ , 也基本与前面的结果符合。理论拟合出的展宽参数为  $\Gamma \approx 10 \text{ meV}$ 。

FKO 的出现表明, 即使在内建电场为  $2 \times 10^4 \text{ V/cm}$  的情况下, 超晶格电子仍具有准三维特征, 即阱间耦合仍然较强, 超晶格微带仍然存在, 而没有被电场破坏。这是由于  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}-\text{GaAs}$  超晶格势垒较低、势垒厚度较薄, 阵间电子耦合很强, 电子扩展程度高, 比较难于局域化, Franz-Keldysh 效应一般处于支配地位。只有在加很强的外电场的情况下, 电子的共有化运动才能被显著破坏, Wannier-Stark 局域化才能表现出来。

至此, 我们已经确认观察到超晶格微带电子的 FKO, 而且室温 PR 谱中 FKO 的报道尚属首次。

我们知道, 超晶格样品的展宽参数  $\Gamma$  与样品界面平整度及周期性重复程度有关, 平整度越差, 周期性重复程度越低, 展宽参数  $\Gamma$  越大; 反之  $\Gamma$  越小。而  $\Gamma$  的大小直接影响 FKO。 $\Gamma$  大时, FKO 衰减很快, 在 PR 谱中, 当  $\Gamma > 3\pi\theta$  时, FKO 线形退化成三阶微商线形;  $\Gamma$  小时, FKO 衰减就比较慢。因此从 FKO 衰减程度可以反推出展宽参数的大小, 从而对界面平整度、周期性等信息有所了解。在我们的实验中, 室温及 100K 下均观察到明显的 FKO, 理论拟合出 100K 时的展宽参数  $\Gamma$  为 10meV 左右, 这正反映了样品超晶格区质量较好。这一点与图 6 所示的 TEM 结果相符。由图 6 (见图版 I) 可见, 失配位错只出现在缓冲层与超晶格区、超晶格区与覆盖层的界面附近, 大部分超晶格区质量是很好的。因此 FKO 可以作为定性检测短周期超晶格样品质量的一种简单、有效的手段。

总之, 本文在  $\text{InGaAs}-\text{GaAs}$  短周期应变层超晶格 PR 谱中观察并确认了超晶格微带电子的 FKO, 通过 FKO 线形分析了电场对超晶格微带的影响, 及提出了 FKO 作为一种检测短周期超晶格样品质量的手段的可能性。

## 参 考 文 献

- [1] C. Van Hoof, K. Deneffe, J. De Boeck, D.J. Arent, and G. Borghs. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **54**: 608.
- [2] H. Shen, M. Dutta, L. Fotiadis, P.G. Newman, R.P. Meorkirk, W.H. Chang and R. N. Sacks. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **57**: 2118.
- [3] P. Voisin, J. Bleuse, C. Bouche, S. Gaillard, C. Alibert, and A. Regreny. *Phys. Rev. Lett.*, 1988, **61**: 1639.
- [4] S.NiKi, A.L. Kellner, S.C. Lin, A. Cheng, A. R. Williams, W.S.C. Chang and H. H. Wieder. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**: 475.
- [5] F. Cerdeira, C. Vazquez-Lopez, M. A. Sacilotti, and A. P. Roth. *Phys. Rev.*, 1990, **B42**: 9480.
- [6] 汤寅生, 江德生, *半导体学报*, 1991, **12**: 53.
- [7] K.J. Moore, G. Duggan, A. Raukema, K. Woodbridge. *Phys. Rev.*, 1990, **B42**: 1326.
- [8] W.T. Masselink, P.J. Poarah, J. Kleim, C.K. Peng, H. Morkoc, G.P. Sanders and Y.C. Chang. *Phys. Rev.*, 1985, **B32**: 8027.
- [9] E.E. Mendez, F. Agullo-Rueda, and J.M. Hong. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **60**: 2426.
- [10] D.E. Aspnes. *Surface Science*, 1973, **37**: 418.
- [11] D.E. Aspnes, A.A. Studna. *Phys. Rev.*, 1973, **B7**: 4605.
- [12] D.E. Aspnes. in *Hand-book of Semiconductors*, edited by J.S. Moss (North-Holland, Amsterdam, 1980), Vol. 2, 109.

## Franz-Keldysh Oscillations in Photoreflectance Spectra of InGaAs/GaAs Short-Period Strained-Layer Superlattices

Liu Wei<sup>1,2</sup>, Jiang Desheng<sup>1</sup>, Wang Ruozhen<sup>2</sup>, Zhou Junming<sup>3</sup>  
and Wang Fenglian<sup>1,4</sup>

(1 National Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors,  
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

(2 Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875)

(3 Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

(4 Beijing Laboratory of Electron Microscopy, The Chinese  
Academy of Sciences, Beijing 100080)

**Abstract** The room-temperature and 100K Photoreflectance spectra of a 80Å period In GaAs/GaAs strained-layer superlattice sample with p-i-n configuration exhibit oscillatory behavior above the absorption edge. This behavior can be consistently interpreted in terms of Franz-Keldysh Oscillations of miniband electrons in the superlattice, induced by the built-in electric field, and are made possible by a rather large electron miniband dispersion ( $\Delta \cong 60$ meV). By analysis of the lineshape of the Franz-Keldysh Oscillations, we can obtain the information about the electric field and its effects on the superlattice miniband.

**PACC:** 7865; 7820J