

GaAs 掺杂超晶格的光反射谱

汤寅生

(中国科学技术大学)

王炳燊 江德生 庄蔚华 梁基本

(中国科学院半导体研究所)

1987 年 2 月 18 日收到

提 要

不同调制光强下测量了 MBE GaAs 掺杂超晶格的室温光反射谱。较低光强下观察到一系列对应于禁戒跃迁 ($\Delta n \neq 0$) 的精细结构,因此否定了它是三阶微商谱的可能性。明确提出了掺杂超晶格的光反射为一阶微商谱,并讨论了其产生机制。理论计算结果能较好地解释实验现象。

一、引 言

自从 1964 年 Seraphin^[1] 首次提出调制光谱技术以来,已成功地将其应用于半导体的电子能带结构及界面等研究之中,特别是由调制(或称电反射)(ER)谱。理论和实验研究表明^[2], ER 谱在低场条件下是材料介电函数的三阶微商谱,室温下即具有尖锐的高分辨谱结构,它对表面(界面)电场极为敏感。但实验中需在样品上做电极并将其浸泡在电解液中,这对某些珍贵样品不利。为此,人们发展了光调制(或称光反射)PR 谱,它通过一束调制光向样品光注入电子-空穴对,以调制材料的光学常数,是一种非接触性“电调制”谱,具有同 ER 谱类似的特点。

最近,有人将 PR 技术用于半导体超晶格、量子阱等微结构的研究之中^[3-5],并用 Aspnes 电调制线形理论^[6]对实验结果作数据处理,得到了一些有意义的结果。掺杂超晶格(又称“nipi 结构”)的光反射测量亦有所报道^[7,8],虽然三阶微商线形理论可很好地拟合实验曲线,但 nipi 结构的 PR 谱是否确是三阶微商谱等问题仍有争议,对其调制机制的讨论则不多。

本文通过对分子束外延(MBE) GaAs nipi 结构室温 PR 谱与调制光强的依赖关系测量,否定了三阶微商谱的可能性,明确提出 nipi 结构的 PR 谱为一阶微商谱,且谱结构与光学跃迁过程非一一对应,并对其调制产生机制进行了讨论。

二、实验结果

实验所用装置与文献报道相似^[2,9],调制光源为 1 mW He-Ne 激光的 6328 Å 线,光强

约为 0.2 W/cm^2 , 调制频率为 125 Hz , 并用通过 $10 \text{ M}\Omega$ 电阻接地的硅 PIN 二极管替代

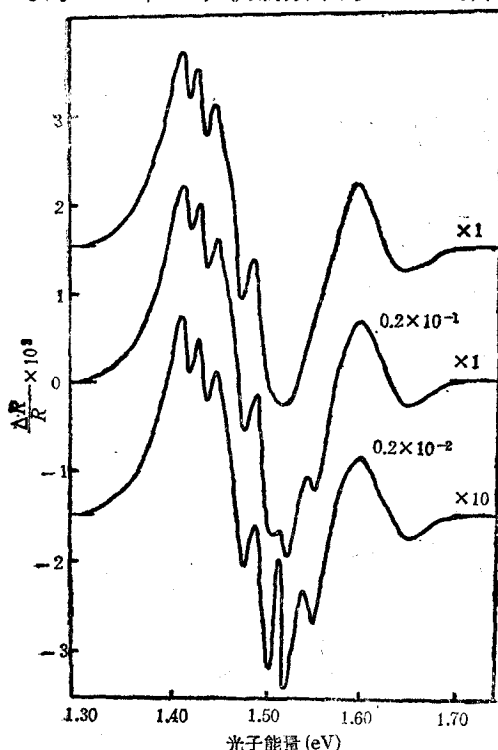


图 1 不同调制光强下样品的 PR 谱

$T = 300 \text{ K}; I = 0.2 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$

光电倍增管作探测器。样品为 15 个周期的 MBE 交替掺杂生长的 nipi 掺杂超晶格, 掺杂浓度 $N_D = N_A = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 周期长度为 $d = d_n + d_p = 400 \text{ \AA}$, 且 $d_n = d_p$ 。

图 1 为室温下样品在不同调制光强下的 PR 谱。可见随着调制光强的衰减, 逐渐出现更多的精细结构, 这与 Gal 等人^[7]在 InP nipi 结构中观察到的现象类似。众所周知, 按低场电调制理论^[2], 改变调制光强时, 三阶微商谱的线形应保持不变, 说明 GaAs nipi 结构的 PR 谱已不再是三阶微商谱。同时, 基于三阶微商谱线形拟合确定的与谱结构——对应的跃迁过程也受到怀疑。或者说, 按 ER 理论定出的特征能量与 nipi 结构中跃迁过程非一一对应, 而可能是几种跃迁过程的共同作用结果。

三、讨 论

对体材料而言, PR 谱与 ER 谱类似, 在低场条件下为三阶微商谱, 其主要产生机制已由实验证明为表面势垒电场调制引起^[10, 11]。但对 nipi 结构而言, 由于通常为高掺杂 ($\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), 其 Debye 长度仅约 $100 \text{ \AA}$, 表面势垒对 nipi 结构的影响只在表面附近一、两个周期内^[12], 且此时表面电场调制是一种特殊状态, 但仍与体材料情形较接近, 不能反映出 nipi 超晶格本身的性质。本文的实验结果证明 GaAs nipi 结构的 PR 谱与体材料 E_0 ($\sim 1.420 \text{ eV}$) 的 PR 谱不同, 说明其机制已与体材料相异。作者认为, nipi 结构的 PR 谱是由于光注入电子-空穴对在其空间电荷势垒区的填充, 引起势垒的相应变化, 从而导致超晶格中子能级位置的调制所致, 它应该对应于一阶微商谱。

对二维晶体, 假设电子、空穴的有效质量均为正, 即 D_0 临界点, 其介电函数^[13]为

$$\varepsilon(\omega) \propto - \sum_{nm} |f_{nm}|^2 \ln(\hbar\omega - E_{nm} + i\Gamma_{nm}). \quad (1)$$

这里 $\varepsilon(\omega)$ 为材料的介电函数, $|f_{nm}|^2$ 为对应于导带第 n 子带到价带第 m 子带 (重空穴、轻空穴子带) 跃迁的振子强度, E_{nm} , Γ_{nm} 分别为对应于上述跃迁的能量及展宽参数, $\sum$ 表示对所有子带求和。

因为子能级受光强影响很大^[13-15], 忽略振子强度 $|f_{nm}|^2$ 随调制信号的变化, 并假设

$$\frac{d\Gamma_{nm}}{dE_{nm}} \ll 1, \text{ 则}$$

$$\frac{d\varepsilon(\omega)}{dE_{nm}} = -\frac{d\varepsilon(\omega)}{d(\hbar\omega)} \propto \sum_{nm} |f_{nm}|^2 (\hbar\omega - E_{nm} + i\Gamma_{nm})^{-1}, \quad (2)$$

所以

$$\Delta R/R \propto \operatorname{Re}\{ |f_{nm}|^2 e^{i\theta} (\hbar\omega - E_{nm} + i\Gamma_{nm})^{-1} \}. \quad (3)$$

这里 $\theta = \operatorname{tg}^{-1}(\beta/\alpha)$, α, β 分别为 Seraphin 系数, Re 表示取实部.

在有效质量近似下, 我们计算了样品的子带及微带色散关系, 并根据上述理论算出了理论光反射谱(如图 2). 计算中由于振子强度 $|f_{nm}|^2$ 计算相当繁杂, 实际上按实验结果选定. 由图 2 可见理论结果与实验基本一致. 理论和实验确定的最强跃迁过程列于表 1, 符号 nmh (nml) 分别表示第 n 导带子带到第 m 重(轻)空穴子带间的跃迁, $0(\pi)$ 分别表示跃迁发生在微带中心(边缘).

在较大光强作用下, PR 谱主要是 $\Delta n = 0$ 的允许跃迁. 当光强下降到一定程度时, 一些禁戒跃迁 ($\Delta n \neq 0$) 随之出现, 因光强较大时样品中散射较强, 各展宽参数较大, 禁戒跃迁被允许跃迁掩盖而无法分辨. $15l$ 及 $51h$ 跃迁几率的加强可能与库仑相互作用(激子作用)有关. 由表 1 还可看出, 对某一谱特征有贡献的可能是几种跃迁过程的作用结果, 而不一定是一一对应关系.

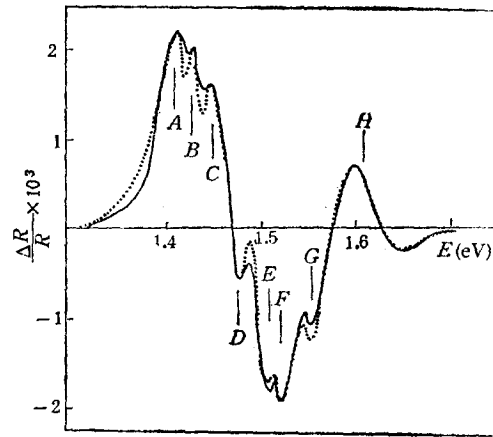


图 2 一定调制光强下样品的理论(——)与实验(·····)曲线对比 $T = 300\text{K}$; $I = 0.02 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$

表 1 样品的跃迁能量及展宽参数

谱 结 构	跃 迁 能 量 (eV)		展宽参数 (meV)	跃 迁 过 程
	理 论	实 验		
A	1.407	1.410	18	15l (0)
	1.411			51h (π)
B	1.427	1.428	12	33l (π)
	1.428			42l (π)
C	1.451	1.451	11	53h (π)
	1.450			46l (π)
D	1.470	1.473	5	55h (0)
E	1.509	1.510	11	66h (π)
F	1.516	1.523	17	66h (π)
	1.518			53l (π)
G	1.558	1.558	12	63l (0)
	1.556			54l (0)
H	1.603	1.608	20	55 l(0)

四、结 论

综上所述, 通过不同调制光强下 GaAs nipi 结构的 PR 谱测量、分析和讨论, 可得出

以下几点结论:

1. *nipi* 结构的 PR 谱不是三阶微商谱,而是一阶微商谱;
2. 对某一谱结构有贡献的可能是几个跃迁过程的混合作用;
3. 产生 *nipi* 结构 PR 谱的根本原因在于光注入电子-空穴对引起超晶格中子能级位置的调制。

感谢黄昆教授对本工作的关心和徐仲英、汪兆平等同志在实验工作中的大力支持。

参 考 文 献

- [1] B. O. Seraphin, in Proc. 7th Int. Conf. of Semiconductors, Paris, (1964), ed. by M. Hulin (Dunod, Paris), p. 165.
- [2] D. E. Aspnes, in Handbook on Semiconductors. ed. by T. S. Moss (North-Holland, N. Y., 1980), p. 109 及其所列文献.
- [3] H. Shen, P. Parayenthal, F. H. Pollak, M. Tomkiewicz, T. J. Drummond and J. N. Schulman, *Appl. Phys. Lett.*, **48**(1986), 653.
- [4] H. Shen, P. Parayenthal, F. H. Pollak, A. L. Smirl, J. N. Schulman, R. A. McFarlane and I. D'Haenens, *Solid State Commun.*, **59**(1986), 557.
- [5] P. Parayenthal, H. Shen, F. H. Pollak, O. J. Glembocki, B. V. Shanabrook and W. T. Beard, *Appl. Phys. Lett.*, **48**(1986), 1261.
- [6] O. J. Glembocki, B. V. Shanabrook, N. Bottka, W. T. Beard and J. Comas, *Appl. Phys. Lett.*, **46**(1985), 970.
- [7] M. Gal, J. S. Yuan, J. M. Viner, P. C. Taylor and G. B. Stringfellow, *Phys. Rev.*, **B33**(1986), 4410.
- [8] X. C. Shen, H. Shen, P. Parayenthal, F. H. Pollak, J. N. Schulman, A. L. Smirl, R. M. McFarlane and I. D'Haenens, in Proc. 2nd Int. Conf. on Superlattices, Microstructures and Microdevices, Goteberg, Sweden, (1986).
- [9] J. L. Shay, *Phys. Rev.*, **B2**(1970), 803.
- [10] B. O. Seraphin, in *Semicond. and Semimetals*. ed. by R. K. Willardson, A. C. Beer, Academic, N. Y., London, (1972), **2**, p. 1.
- [11] Y. Hamakawa and T. Nishino, in *Optical Properties of Solids-New Developments*, ed. by B. O. Seraphin, (1976), p. 256.
- [12] 王炳桑, 待发表.
- [13] K. Ploog, *Ann. Rev. Maser. Sci.*, **12**(1982), 123.
- [14] H. Jung, H. Kunzel, G. H. Döhler and K. Ploog, *J. Appl. Phys.*, **54**(1983), 6965.
- [15] Y. Horikoshi, A. Fischer and K. Ploog, *Appl. Phys. Lett.*, **45**(1984), 919.

PHOTOREFLECTANCE SPECTROSCOPY OF GaAs DOPING SUPERLATTICES

TANG YIN-SHENG

(University of Science and Technology of China, Hefei)

WANG BEN-G-SHEN JIANG DE-SHENG ZHUANG WEI-HUA LIANG JI-BEN

(Semiconductors Institute, Academia Sinica)

ABSTRACT

Room temperature photoreflectances of a MBE GaAs doping superlattice were measured under different pump beam intensities. A series of fine structures corresponding to forbidden transitions ($\Delta n \neq 0$) were observed at lower pump beam intensities. This means it is not a third derivative spectrum. A first derivative lineshape of photoreflectance for doping superlattices was suggested, and the modulation mechanism was discussed. Theoretical calculations give a good explanation to the experiments.