

研究简报

调制掺杂结构的光反射光谱研究

汤寅生^{†△} 江德生* 庄蔚华* 孔梅影* 徐英武[†]

(*中国科学院半导体研究所、超晶格微结构国家重点实验室,

[†]中国科技大学物质结构中心和基础物理中心,

北京 912 信箱, 100083)

1989年5月29日收到, 1990年6月26日修改定稿

测量了分子束外延 (MBE) 生长的调制掺杂 $n\text{-GaAlAs/GaAs}$ 的光调制反射光谱 (PR), 研究了光谱结构和三角阱中子能级的关系以及光反射调制谱与二维电子气 (2DEG) 浓度的依赖关系。实验结果与理论分析符合得较好。

主题词 $n\text{-GaAlAs/GaAs}$ 异质结, 调制反射光谱, 二维电子气浓度, MBE

一、引言

分子束外延 (MBE) 技术的发展使许多几十埃的超薄层微结构和微器件的研制已成为现实, 调制掺杂 $n\text{-GaAlAs/GaAs}$ 异质结结构是高速场效应管和光电子学上发射接收系统的重要的材料。在异质结界面处由高浓度 $n\text{-GaAlAs}$ 提供电子, 形成了二维电子气 (2DEG), 此沟道导电区的位置在纯的 GaAs 区域。由于纯 GaAs 区的散射很低, 因而, 二维电子气系统不仅可以达到很高的面浓度也可以具有很高的迁移率。载流子浓度是制作器件时的重要参数。2DEG 的低温量子霍尔效应也可以用作自然的电阻标准, 因而对它的研究已有很多的工作。但目前大部分研究工作都集中在对它的输运特性和磁场下的量子 Hall 效应方面^[1], 光学研究进行得还很少。光调制反射谱对量子阱超晶格等微结构的研究已能提供有关子能级系统、界面能级等许多有用信息^[2-3], 但对调制掺杂异质结结构的研究还不多。本文主要是研究 $n\text{-GaAlAs/GaAs}$ 结构的光调制反射谱及其与二维电子气的浓度的关系, 并研究界面三角形势阱形状对 2DEG 子能级的影响, 同时在实用上希望能用非破坏的光学方法来表征选择掺杂异质结的性能。

二、实验条件及结果

样品是在国产的分子束外延设备上生长的。在半绝缘的 (001) GaAs 衬底上先生长

△ 中国科技大学博士研究生

2 μm 的 GaAs 非故意掺杂层,然后长一层 100 埃的非故意掺杂的 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 层($x = 0.3$),这一缓冲层的作用是减少杂质散射和改进界面质量。随后再生长一层厚度为 600 埃的 n 型掺 Si 的 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 层 ($x = 0.3$),其杂质浓度在 $1-2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 范围内。最后生长一层 100 埃的掺 Si 的 GaAs 顶盖层。样品结构如图 1 所示。77 K 的霍尔测量表明本文所测的一系列样品的 2DEG 的浓度是 $0.5-1.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 范围,其电子迁移率较高,77 K 时, μ_{eH} 在 $0.9-1.3 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 范围内。典型的 50 mk 下量子 Hall 效应的研究见[6]。

实验装置见图 2,调制光源是用波长为 6328 \AA 的 He-Ne 激光器,其调制频率为 125 Hz,为了改进信噪比,用 Si 的 PIN 二极管作光探测器。图 3 所示为室温下 5 个不同 2DEG 浓度的样品的 PR 谱。在 1.420 eV 处的结构反映了 GaAs 缓冲层的直接带隙,各样品在光谱的高能区 ($1.45-1.50 \text{ eV}$) 另有一个结构,这是与 2DEG 有关的,五个样品 1-5 的 2DEG 浓度不同,光谱结构的能量位置也不同,随着样品的 2DEG 浓

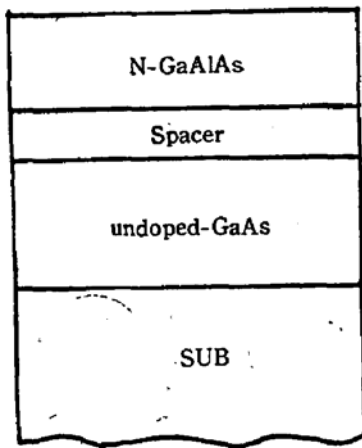


图 1 选择掺杂 n-GaAlAs/GaAs 异质结样品结构示意图

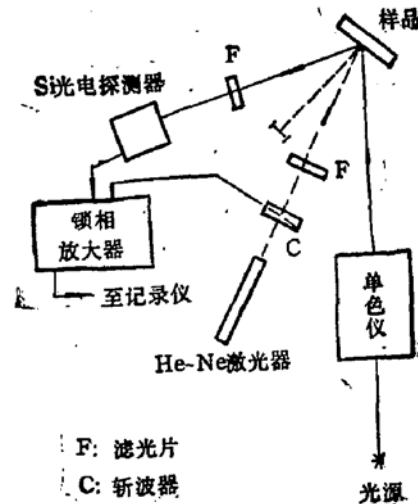


图 2 光反射谱的装置示意图

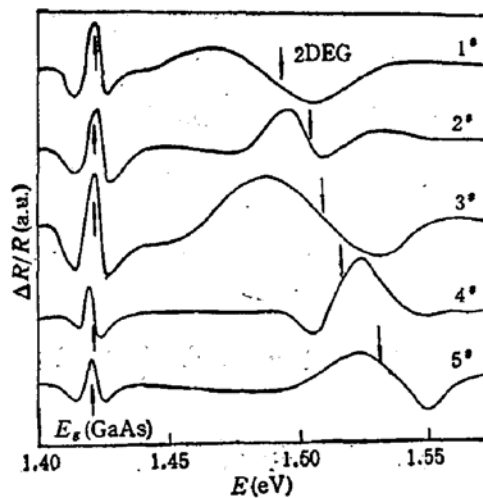


图 3 室温下 5 个样品的光反射谱,箭头 \downarrow 所示是计算得到的异质结三角势阱中 2DEG 能级的临界点

度的增加,光反射结构移向高能.

三、结果的分析与讨论

PR 谱中的特征结构是对应于材料能带结构中的临界点 (Van Hove 奇点). 在调制掺杂 n-GaAlAs/GaAs 中界面上在导带附近存在三角势阱. 在这样的异质结中, 热平衡时, 为使 GaAlAs 与 GaAs 的电子费米能级相同, GaAlAs 中的电子将转移到 GaAs 中, 从而在界面处形成一个很强的内建场, 平衡时能带结构图如图 3 所示. 内建场把导带电子限制在界面的三角势阱中, 阱的宽度与载流子浓度有关, 一般在 100 埃量级. 这样的三角阱中, 电子在垂直于界面方向上的运动是量子化的, 形成一组分立的子能级, 而在沿着界面的平面内, 电子的运动仍是自由的, 由此形成准二维电子气 (2DEG). 阱中的电子分布在量子化子带里. 虽然势阱区域的价带态仍与三维晶体情况接近, 但这不影响在 2DEG 区域形成准二维临界点. 当有垂直于材料生长方向 (z 方向) 偏振分量的光入射到样品上时, 在样品表面反射, 在 PR 谱上应该可以观察到与 2DEG 有关的特征. 基于三角阱近似和 Hall 测量的结果, 2DEG 区的临界点的能量可由下式表之

$$E_i^{2\text{DEG}} = E_g^{\text{GaAs}} - E_v^{\text{GaAs}} + E_i^w \\ = E_g^{\text{GaAs}} + \frac{1}{(2m^*)^{1/3}} \left(\frac{\hbar^2 N_{2D}}{\epsilon} \right)^{2/3} \gamma_i \quad (1) \\ (i = 0, 1, 2, \dots)$$

式中 E_g 是 GaAs 的带隙, m^* 是电子有效质量, $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ 是 Planck 常数, N_{2D} 是二维电子气的浓度, $\gamma_0 = 2.238$, $\gamma_1 = 4.087$, $\gamma_2 = 5.520, \dots$. 对于 i 值大的情况,

$$\gamma_i = \left[\frac{3}{2} \pi \left(i + \frac{3}{4} \right) \right]^{2/3} \dots \quad (2)$$

我们相信, 在单异质结情况, $h\nu > E_g$ 的光的调制作用主要是光生载流子的调制, 交变光产生的载流子使 2DEG 的浓度发生改变, 从而使三角阱不断变陡和变平, 因而也不断地改变着量子化的子能级的位置. 在弱调制的情况下, 由于忽略展宽参数的调制, n-GaAlAs/GaAs 的 PR 谱主要是由于量子化的子能级能量的调制引起的, 所以 PR 谱具有一阶微商函数线型, 取以下形式^[7,8]:

$$\frac{\Delta R}{R} = \text{Re} \left[\sum_n C_n e^{i\theta_n} (E - E_n^{2\text{DEG}} + i\Gamma_n)^{-m} \right] \quad (3)$$

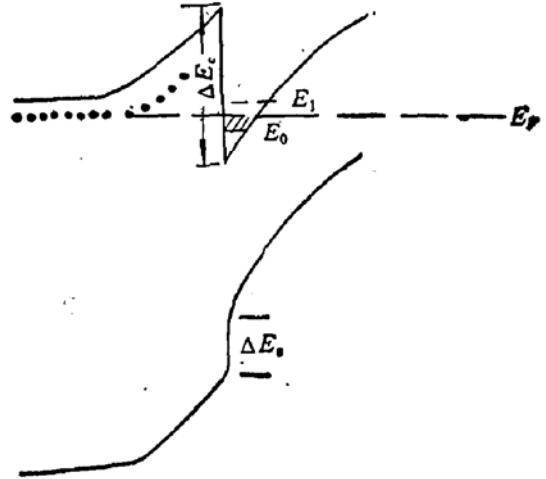


图4 选择掺杂 n-GaAlAs/GaAs 异质结构热平衡能带图

式中 C_n 是振幅, θ_n 是相角, E_n^{DEG} 是跃迁能量, Γ_n 是展宽参数, 求和是对所有的临界点进行的. 对于没有激子效应的二维系统, $m = 1$. 用最小二乘法以 (3) 式拟合实验得到的 PR 谱, 可以给出临界点能量和展宽参数之值. 表 1 列出了实验和计算的结果. 由表可知临界点能量随载流子浓度的增加而增加, 实验结果与理论计算符合得很好.

表 1 选择掺杂 n-GaAlAs/GaAs 样品的参数及 PR 实验结果, 并与计算数据作比较

样品号	2 DEG 浓度 $N_{2D}(\text{cm}^{-2})$	临界点能量 (eV)		展宽参数 (meV)
		实 验	理 论	
1	5.6×10^{11}	1.493	1.494	12.5
2	6.7×10^{11}	1.502	1.502	10.3
3	7.0×10^{11}	1.507	1.506	14.1
4	7.5×10^{11}	1.520	1.507	11.0
5	1.1×10^{12}	1.528	1.527	11.7

当样品的界面质量不好时, 杂质散射将使 2 DEG 的迁移率减小而可能使 PR 的光谱变宽, 或甚至导致与 2 DEG 有关的 PR 谱的特征的消失, 我们在有些低迁移率的样品中曾观察到这种现象.

四、结 语

我们测量了不同 2 DEG 浓度的调制掺杂 n-GaAlAs/GaAs 异质结构的光反射的调制光谱, 用三角势阱的模型计算了 2 DEG 区的临界点能量, 用一次微商函数线型拟合 PR 谱, 所得到的 2 DEG 临界点能量的值与理论相符合.

参 考 文 献

- [1] K. Von Klitzing, *Rev. Mod. Phys.*, **58**, 519(1986).
- [2] O. J. Glembocki, B. V. Shanabrook, N. Bottka, W. T. Beard, T. Comas, *Appl. Phys. Lett.*, **46**, 970(1985).
- [3] Yingsheng Tang, Desheng Jiang, Bingsheng Wang, Weihua Zhuang, *Solid State Commun.* **63**, 793(1987).
- [4] Y. S. Tang and D. S. Jiang, *Chin. Phys. Lett.*, **4**, 283(1987).
- [5] S. H. Pan, H. Shen, Z. Hang, F. H. Pollak, W. H. Zhuang, Q. Xu, A. Roth, R. Maust, C. le Celle, D. Morris, *Phys. Rev.*, **38B**, 3375(1988).
- [6] M. Chmielowski, M. Glinski, W. H. Zhuang, G. B. Liang, D. Z. Sun, M. Y. Kong, W. Plesiewicz, T. Dietl, and T. Skogkiewicz, *Surface Science*, **196**, 299(1988).
- [7] R. Enderlein, D. S. Jiang and Y. S. Tang, *Phys. Sol. St.*, (b) **145**, 167(1988).
- [8] Y. S. Tang, D. S. Jiang and K. Ploog, *Solid State Commun.*, **64**, 655(1987).

Photoreflectance Study on Modulation-Doped Structures

Tang Yinsheng**, Jiang Desheng*, Zhuang Weihua*,
Kong Meiyong* and Xu Yingwu**

**(Institute of Semiconductors and National Laboratory of Semiconductor Superlattices
and Related Microstructures, Academia Sinica, Beijing)*

*** (The Center of Matter Structure analysis and the Center of Fundamental Physics,
The Science and Technology University of China, Hefei)*

Abstract

The photoreflectance (PR) spectra of modulated-doped n-GaAlAs/GaAs structures grown by Molecular Beam Epitaxy (MBE) are measured. The correlation between spectroscopic features and sublevels in the triangular potential well and the dependence of PR spectra on the two-dimensional electron gas (2DEG) concentration, are investigated. The experimental results are in good agreement with the theoretical analysis.

Key words n-GaAlAs/GaAs heterojunction, photoreflectance, Two-dimensional electron gas, MBE