

研究快报

异质结 NIPI 结构的光调制反射光谱

汤寅生

(中国科技大学基础物理中心, 合肥)

江德生

(中国科学院半导体研究所, 北京)

1987年7月8日收到

本文首次报道了异质结 NIPI 结构的室温光调制反射光谱及其随调制光强的变化, 并对调制机制进行了讨论。最后, 通过比较理论与实验结果, 对所观测到的跃迁过程进行了指派。

主题词: 超晶格, 调制光谱, 光反射, GaAs, 二维电子气

通常半导体超晶格可分为两类: 其一为组分超晶格, 如 $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 结构, 由交替生长的不同半导体材料薄层形成^[1], 其中载流子被限制于势阱中, 形成量子化态。由于电子、空穴通常处于空间同一区域, 光学跃迁过程具有明显的二维限制的激子特征, 甚至在室温下亦是如此。另一种超晶格为掺杂超晶格(又称 NIPI 结构), 如同质 NIPI 结构, 由同一种材料交替的 n 型和 p 型掺杂层构成^[2], 其能带形成周期性的空间调制。由于内建电场的作用, 光激发的电子、空穴产生空间上的分离, 使得波函数重叠较小, 因而复合速率较小, 载流子寿命较长。因为过剩载流子的积累效应, 材料的有效带隙可调。上述两种结构的结合即产生一种新的超晶格——异质结 NIPI 结构^[3]。这类结构可由分子束外延制成, 其能带图如图 1(a) 所示, 其中 n、p 型掺杂层均为 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, 不掺杂层为 GaAs。在同质 NIPI 结构中, n 型和 p 型 GaAs 都是重掺杂材料, 非平衡空穴主要占据受主杂质态; 而在异质结 NIPI 结构中, 电子和空穴分别被限制在异质结界面附近不掺杂 GaAs 区内的三角形势阱中, 电子、空穴各占据三角阱中量子化的子能级。因为其能级展宽较小, 因此光致发光光谱(PL) 中较容易分辨出量子化的跃迁过程^[4]。本文首次报道了不同调制光强下异质结 NIPI 结构的光调制反射光谱(以下简称 PR 谱), 讨论了其调制产生机制, 并与理论计算结果对比, 对实验观测到的跃迁过程进行了分析。

实验样品结构示于图 1(b), 其中 n、p 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 层分别掺 Si 和 Be, 掺杂浓度为 $1-2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 层厚 250 \AA 。不掺杂的 GaAs 层厚 500 \AA (生长参数)。为了减小杂质散射及杂质对三角阱(GaAs)中量子化子带展宽的影响, 样品中还增加了 50 \AA 厚的不掺杂 AlAs 和 100 \AA 不掺杂 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 隔离层[图 1(b)]。 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 中 AlAs 的摩尔分数 $x \approx 0.3$ 。PR 测量的实验装置类似于以前报道^[5]: 采用 5 mW He-Ne 激光的 6328 \AA 线, 通过斩波频率为 125 Hz 的斩波器作调制激发光源, 其功率密度约为 $50 \text{ mW}/$

cm^2 . 为改进实验测量过程中的信噪比, 用 PIN 硅二极管作探测器。

图 2 示出了不同调制光强下样品的室温 PR 谱。在弱调制下观察到明显的光谱结构。随着调制光强的增大, 信号逐渐减弱, 或者说调制作用下降。最后, 当光强很强时, 则无法分辨出与跃迁过程相对应的光谱结构。

如图 1(a) 所示, 在异质结 NIPI 结构材料中, 不掺杂 GaAs 中电子、空穴分别占据在各自三角形势阱中的量子化子能级上, 可以说, 该结构是由二维电子气 (2DEG) 和二

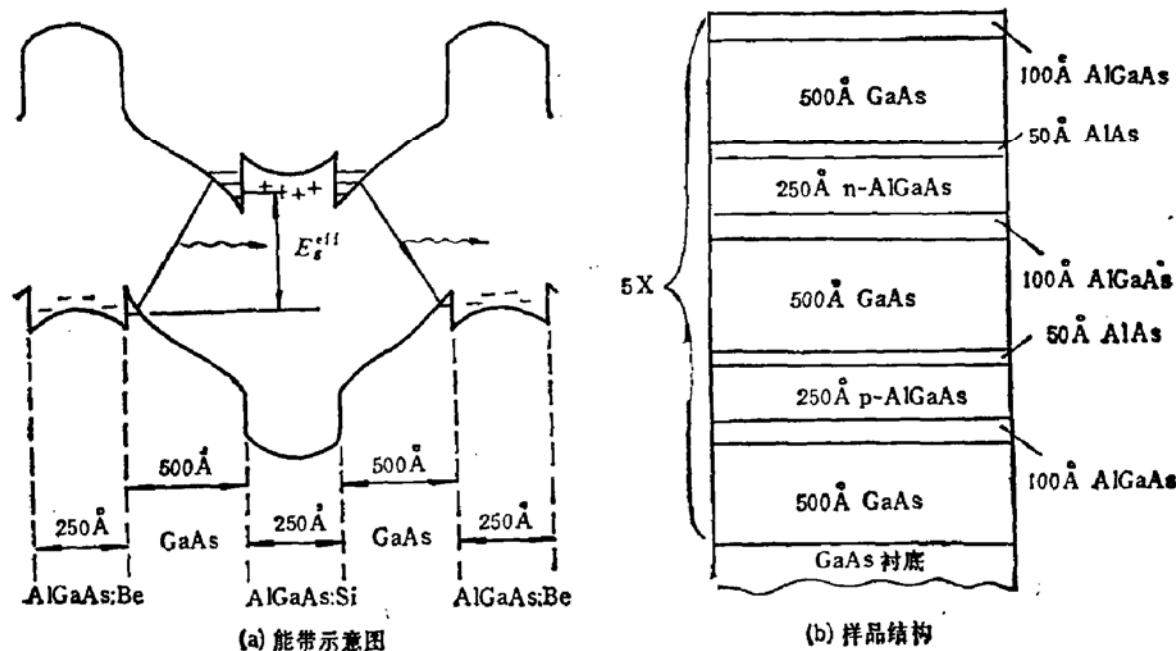


图 1 异质结 NIPI 结构

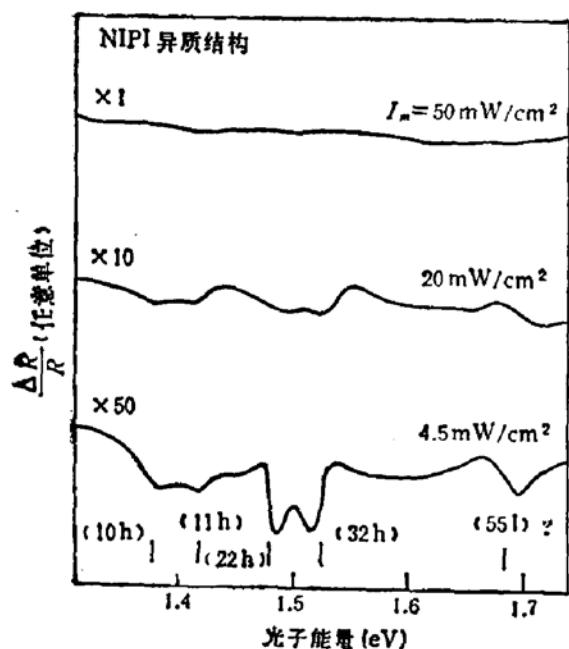


图 2 不同调制光强下样品的室温 PR 谱

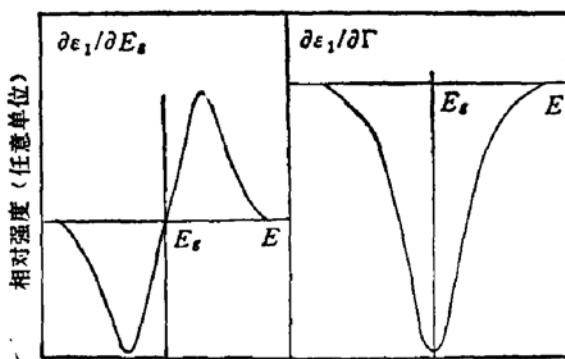


图 3 二维晶体介电函数实部的一阶微商

维空穴气(2DHG)系统结合形成的。当它受到光子能量大于 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 带隙的光照时,由光吸收产生的非平衡电子、空穴将分别被 n 和 p 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 层中电离施主和电离受主杂质所补偿,使部分杂质离子变为电中性。这将导致异质结界面附近 2DEG 和 2 DHG 浓度的下降。由于在 GaAs 中电场的大小取决于 2DEG 和 2DHG 的浓度,因此 GaAs 中能带的倾斜程度将减小,三角形势阱将变得较为平坦。而三角阱的深度改变将产生对该三角阱中量子化子能级位置的调制。类似于同质 NIPI 结构的情况^[6],这将主要产生一阶微商调制光谱。图 3 示出了典型二维晶体的洛伦兹线形介电函数实部对临界点能量(子带间跃迁能量) E_g 及其展宽参数 Γ 的一阶微商线形。由图 3 可见,临界点能量的一阶微商能产生具有正、负双极值的“N”线形,因此可以认为,异质结 NIPI 结构的 PR 谱主要由临界点能量的调制决定。在上述这种调制机构作用下,我们认为,随着调制光强的增大,更多的电离杂质被光注入载流子所补偿,异质结 NIPI 结构的内建电场将逐渐削弱,界面三角阱中量子化子能级位置的调制幅度随之增大。但此时还必须考虑到展宽参数及振子强度受调制光的影响。这些效应将使 PR 谱中光谱结构分辨能力下降,甚至最终无法看到与超晶格结构有关的任何 PR 信号。这正是实验上所见到的现象。

为了对弱调制下 PR 谱中观测到的跃迁过程进行指派,根据样品参数及霍尔测量数据,采用三角形势阱近似,我们对样品中量子化的子能级、各跃迁能量及相应的振子强度进行了理论计算。三角形势阱中量子化子能级的计算可近似表示为:^[7]

$$E_i = \frac{1}{(2m^*)^{1/3}} \left(\frac{\hbar e^2 N_s}{\epsilon_s} \right)^{1/3} r_i \quad (1)$$

这里 $r_0 = 2.338$, $r_1 = 4.087$, $r_2 = 5.520$, … 对较大的 i , $r_i = \left[\frac{3\pi}{2} \left(i + \frac{3}{4} \right) \right]^{1/3}$; m^*

为电子或重(轻)空穴的有效质量; $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ 为 Planck 常数; ϵ_s 为半导体的介电函数; N_s

为 2DEG 或 2DHG 浓度。界面电场 $F_s = \frac{eN_s}{\epsilon_s}$ 。实际计算中假设不掺杂 GaAs 层中电场均匀分布,并取室温下 GaAs 的带隙 $E_g = 1.424 \text{ eV}$, $Q_s = 0.60$, $m_e^* = 0.0665 m_0$, $m_{hh}^* = 0.34 m_0$, $m_{ch}^* = 0.094 m_0$ ^[8]。室温下霍尔测量测出每层的电子、空穴面密度 $N_{2D} = (3.4-4) \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, 这时该异质结 NIPI 结构产生有效带隙 $E_g^{\text{eff}} \simeq 1.338 \text{ eV}$ 。表 1 列出了实验观测到的跃迁能量与理论跃迁能量,同时还列出了对跃迁过程的指派。符号 $mnh(l)$ 为第 m 个电子子带到第 n 个重(轻)空穴子带间的跃迁。由表 1 可见,理论计算结果与实验值基本上一致,从而对异质结 NIPI 结构的 PR 谱进行了较好地解释。

表 1 实验与理论跃迁能量及其指派

跃迁过程 跃迁能量(eV)	10h	11h	22h	32h	55h(?)
实验值	1.386	1.409	1.482	1.510	1.693
理论值	1.386	1.413	1.474	1.506	1.682

感谢西德马克斯-普兰克固体所 K. Ploog 博士提供异质结 NIPI 结构分子束外延样品。本课题为国家自然科学基金资助项目，并得到了中国科技大学结构分析实验室的部分资助，在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 如 L. Esaki, Proc. 17th Int. Conf. on Phys. of Semiconductors, San Francisco, 1984, ed. by J. D. Chadi & W. A. Harrison (Springer, N. Y., 1985), 473.
- [2] G. H. Döhler, *Phys. Stat. Sol.*, (b) 52, 79(1972); 52, 533(1972).
- [3] G. H. Döhler and P. P. Ruden, *Surf. Sci.*, 142, 474(1984).
- [4] R. A. Street, G. H. Döhler, J. N. Miller and P. P. Ruden, *Phys. Rev.*, B33, 7043(1986).
- [5] Tang Yinsheng (汤寅生) and Jiang Desheng (江德生), *Chin. Phys. Lett.*, 4, 283(1987).
- [6] Y. S. Tang (汤寅生), B. S. Wang (王炳森), D. S. Jiang (江德生), W. H. Zhuang (庄蔚华) & J. B. Liang (梁基本), Proc. 3rd Int. Conf. on Superlattices, Microstructures and Microdevices, Chicago, Aug. 17—20, 1987; *Solid State Commun.*, 63, 793(1987).
- [7] 御子柴宣夫, 半导体の物理, 第8章
- [8] R. C. Miller and D. A. Kleinman, *J. Lumin.*, 54, 520(1985).

Photo-modulated Reflectance Spectroscopy of Hetero NIPI Structures

Tang Yinsheng

(Centre of Fundamental Physics, University of Science and Technology of China, Hefei)

Jiang Desheng

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica, Beijing)

Abstract

The room temperature photo-modulated reflectance and its dependence on the modulation intensity of hetero-NIPI structures are reported for the first time. The modulation mechanism in such structures is discussed. Comparison of the experiments with theory makes an assignment of the transition processes observed experimentally.

KEY WORDS: Superlattice, Modulation spectroscopy, Photoreflectance, GaAs, Two-dimensional electron gas