

研究简报

从势垒区电压波形对照 GaAs 液结 的光调制反射与电调制反射*

曹霞芬 赵冬 蒋文洁 郑国祥 钱佑华

(复旦大学物理系半导体物理研究室, 上海)

1988年5月27日收到

通过直接观察 n 型 GaAs-电解液结表面势垒的电压, 对光反射和电反射的内在规律进行了比较。引入一个新的参数, 来精细地区别这两种调制。从脉冲激光或(和)外加调制电压下空间电荷区中电场的具体分布, 解释了二种调制光谱的共同点和差别。

主题词: 光调制反射, 电调制反射, 调制参数, 脉冲作用深度, 界面态影响

自从光调制反射 (PR) 光谱在超晶格量子阱材料的研究中恢复其所受到的重视以来^[1], 对 PR 光谱与电压调制反射 (ER) 光谱的比较研究, 也随之而重新开展^[2]。PR 谱的实质是什么, 在六、七十年代曾有过一些分歧的看法^[3]。由于实验上十分贴切的对照较难实现, 可以说问题至今未很好解决。

本文试图用一个比较简单的实验来对照 n-GaAs 的 PR 和 ER, 所得结论似乎应具有一定的普遍意义。电解液电极不会在半导体表面引起应力和调制谱线形的畸变。我们就在实验中采用了液结。相应的光谱分别记为 EPR 和 EER。

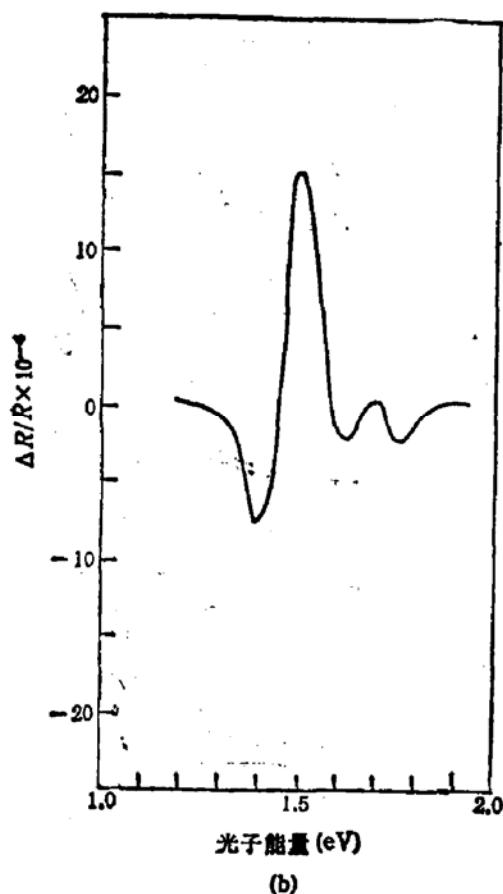
为了进行可靠的对照, EPR 和 EER 的测量在同一套系统中完成。除为 EPR 另加一束 He-Ne 激光 $\lambda_L = 6328 \text{ \AA}$ 作为调制光束外, 测量系统与通常无实质性的差别^[4]。样品为掺 $Te 5.4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 的 n-GaAs 单晶, 放置在特殊设计的 0.1M KCl 电解液池中。6328 \AA 光束的功率为 3mW, 照在样品上的束斑直径约 2mm, 斩波 183Hz, 正入射于样品表面。调制光束带来的杂散光影响, 用加滤色片的方法消除。在 EER 中, 方波电压从同一斩波器输出, 所以相位和频率可保证与 EPR 中的斩波光束同步一致。电压空载输出峰-峰 (p-p) 值为 6.0 伏, 经 1:100 分压后加在 GaAs 样品背面欧姆电极与铂参考电极之间。探测光束取自溴钨灯分光, 小角入射到样品表面, 其光斑与 EPR 调制光斑重合。测量所取光子的能量范围在 1.2—1.9eV 之间, 足以包容 GaAs 的 E_g 和 $E_g + \Delta$ 结构在内。

本实验的特点是不但测量 EPR 和 EER, 而且直接观察并记录光调制和电压调制在两电极间产生的电压降落的实时波形。经过通盘的对照, 来区分光调制与电压调制细微的具体的不同点。应该说明, 铂和 GaAs 背面两电极间的压降, 实际上包含了两极接触

* 本文工作得到国家自然科学基金资助。

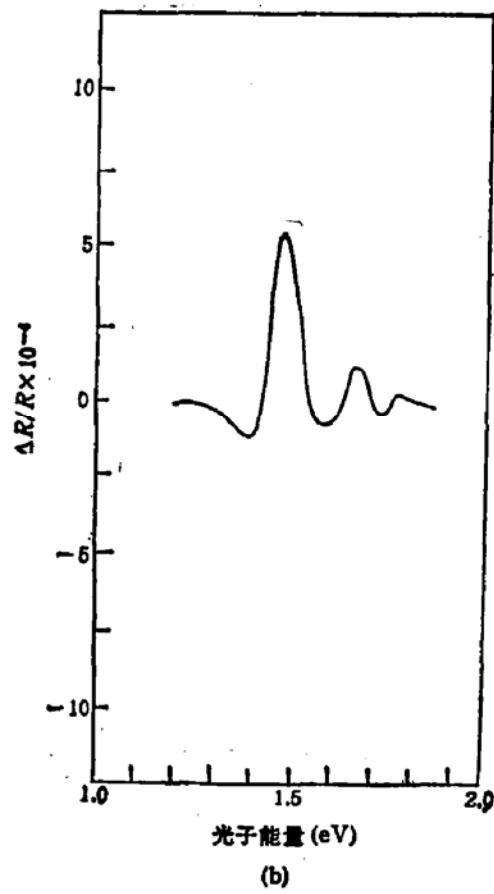
电阻、GaAs 样品厚度电阻、KCl 溶液电阻等引起的压降，以及可能的铂与溶液的界面压降。然而，当 EPR 与 EER 测量时的外回路保持一模一样时，压降实时波形的差异所反映的，无论如何应归诸于调制光在 GaAs 液结势垒区与外加方脉冲电压在同一势垒区所产生的效应的差异。

图 1 所示为 EPR 测量的结果，其中 (a) 为液结 GaAs 表面势垒区光生压降变化的照片，中线左边的半周期对应于脉冲光照的作用期 ($\sim 2.73\text{ms}$)。光生电压的 p-p 值约为 110mV 。波形的上升和下降分别反映势垒区建立起一个附加的（光生）压降和该压降通过光生电子-空穴 ($e-h$) 对的消失（严格地说，是在探测深度极限以内消失）而衰退。(b) 为与 (a) 相应的 E_0 和 $E_0 + \Delta_0$ 结构的 $\frac{\Delta R}{R}(\hbar\omega)$ 。用三点调整法^[5] 算得 $E_0 = 1.45\text{ eV}$ 。整个线形可以说是很典型的，用三阶导数函数形式 (TDFF) 得到了很好的拟合，表明低场近似适用于我们的 EPR 实验条件。另外还注意到 $E_0 + \Delta_0$ 结构有偏离零线而下垂的现象，这个现象在其它样品的 EPR 谱上也常被看到。按照目前的看法，调制光谱谱线偏离零线，常由各种原因引起的密度较高的表面态（或界面态）所导致^[6]。不过在 EPR 实验中， E_0 结构并不偏离零线，似乎说明光调制谱反映表面（界面）态对价带自旋-轨道 (S-O) 分裂态的微扰格外灵敏。从图 1(b) 估算出 $\Delta_0 \approx 0.31\text{eV}$ 。



(b)

与 (a) 相应的 E_0 和 $E_0 + \Delta_0$ 结构的 $\frac{\Delta R}{R}(\hbar\omega)$



(b)

与 (a) 相应的 E_0 和 $E_0 + \Delta_0$ 结构的 $\frac{\Delta R}{R}(\hbar\omega)$

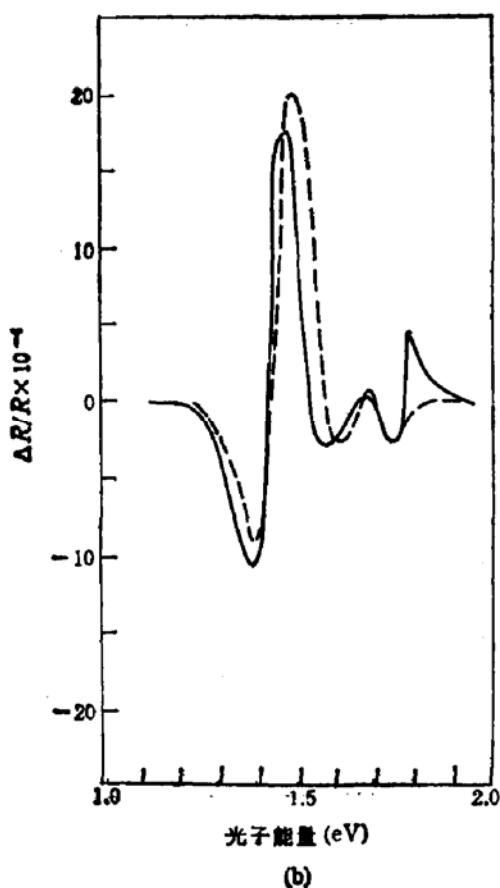
图 1

图 2

图 1(a), 图 2(a), 图 3(a) 见图版 I.

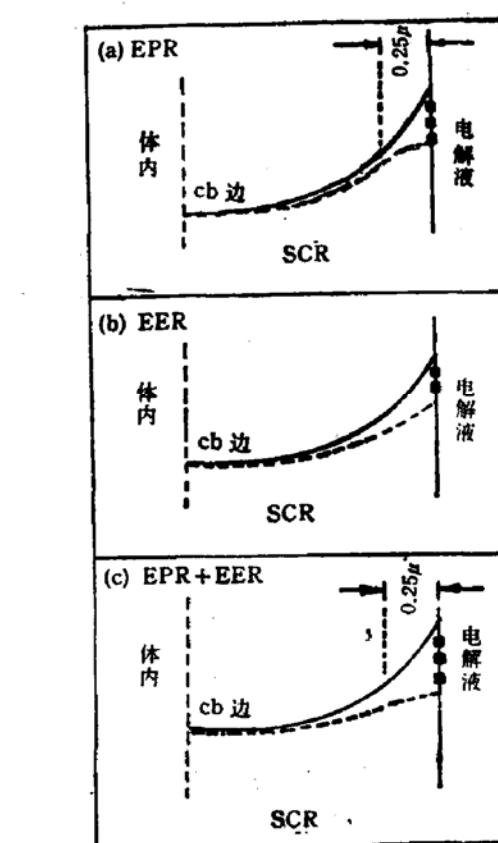
图 2(a) 是 EER 中压降波形的照片, 实验中不加直流偏置, 样品背面接地, 铂电极上加正的方脉冲。虽然我们未曾选取合适的分压比, 致使波的 p-p 值小于图 1(a) 的光调制情况, 不过仍可明显看出其上升与下降均较后者为慢。图 2(b) 是 EER 中的 E_0 和 $E_0 + \Delta_0$ 结构。 $E_0 = 1.47\text{eV}$, 比 EPR 的值高 20meV 。EER 测量 GaAs 的 E_0 能隙比 EPR 所得者宽, 是一个屡次见到的现象^[7]。另外与 EPR 谱不同之处是, 即使改变分压比使 p-p 加大, 也未在 EER 谱上观察到 $E_0 + \Delta_0$ 结构下垂。 $\Delta_0 \approx 0.29\text{eV}$ 。

我们还很方便地测量了 EPR 和 EER 的叠加, 如图 3 所示, 其中调制光强和实加调制电压分别保持为 3mW 和 60mV 不变。从图 3(a) 量得压降 p-p 为 160mV , 而按图 1(a) 与图 2(a) 之和, 此值应为 170mV , 与实测值大体一致而略大。这一差异似乎可以说明光照或电压引起的表面场并不能严格地算术叠加, 例如两者方向的并非完全一致, 就会产生这种后果。(b) 中实线 $\frac{\Delta R}{R}(\hbar\omega)$ 为实测的 EPR + EER 谱, 虚线则为图 1(b) 与图 2(b) 之和, 也存在相应的差别。从三点法计算 $E_0 \approx 1.45\text{eV}$, S-O 分裂 $\Delta_0 \approx 0.31\text{eV}$, 与单独 EPR 的结果基本一致。另外, 从叠加谱的线形也可判断, 光照与电压的联合作用, 仍未使势垒区的场强超出低场范围。



与 (a) 相应之 E_0 和 $E_0 + \Delta_0$ 结构的 $\Delta R/R(\hbar\omega)$, 虚线为图 1(b) 与图 2(b) 之和

图 3



(a) 6328\AA 调制激光束照射样品液结表面引起的 SCR 中能带变化
(b) 样品液结表面加正电压所导致的 SCR 中的能带变化
(c) 同时加正电压和 He-Ne 激光所致的 SCR 中的能带变化

图 4

下面对以上三组实验结果作些分析讨论。首先，我们的实验设计使我们能够引进一个对比 EPR 和 EER 的物理参数，称之为“调制参数” m ，定义为：

$$m_{L_L} = \frac{\partial}{\partial V_{p-p}} \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_{p-p} \Big|_{L_L}$$

其中 V_{p-p} 为表面(界面)势垒区压降的 p-p 值，用 mV 作单位。 $\left(\frac{\Delta R}{R} \right)_{p-p}$ 为反射率相对变化的 p-p 值，对于各不同的临界点结构，其值当然也不同。众所周知，在低场条件下，调制光谱线形不随压降而变，即 $\frac{\Delta R}{R} (\hbar\omega)$ 与电压之间的关系是线性的^[6]。所以 (1) 式可简单地写为：

$$m_{L_L} = \frac{1}{V_{p-p}} \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_{p-p} \Big|_{L_L}$$

根据我们的测量结果， E_0 谱线结构的调制参数 m_{E0} 分别为：

- (i) EPR $m_{E0} = 1.9 \times 10^{-3}/\text{mV}$
- (ii) EER $1.0 \times 10^{-3}/\text{mV}$
- (iii) EPR + EER $1.8 \times 10^{-3}/\text{mV}$

由于 m 反映了调制的有效程度，所以不妨说在我们这里 6328 \AA 激光的光调制比外加的电压调制明显有效。

为什么 EPR 的 m 参数较大？按照我们的测量结果（其中特别是叠加谱）来看，光调制转化为某种电场的调制，是可信的。也就是说，PR 的实质是 ER，至少在我们的条件下是如此。然而，正如 m 参数所揭示的，等同的压降引起的场强有所不同，这便只能归结为光调制的空间深度小于电压调制。情况确实是这样。在我们的掺杂 $5.4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ n-GaAs 与 KCl 的液结样品中，不难估计表面势垒区的厚度为 μm 量级。外加脉冲电压的作用是使电子通过漂移在表面积累。相对于液结的平衡状态，整个势垒区的导带边发生下移，如图 4(b) 所示^[3]。再来观察脉冲光的情形。根据 GaAs 对 6328 \AA 波长的光吸收，调制光有效激发 e-h 对的深度只有约 $0.25 \mu\text{m}$ ^[9]。而且，光照不但导致表面层内的本征跃迁，还直接激发表面(界面)态上的陷落电子，在 $0.25 \mu\text{m}$ 内集中生成高密度的 e-h 对，使 GaAs 与液体的平衡势垒电场受到强烈的激子屏蔽，带边在 $0.25 \mu\text{m}$ 一层内陡降，示意如图 4(a)。当 $\hbar\omega = E_0 = 1.45 \text{ eV}$ 的光反射时，虽然其透入深度为 $1.1 \mu\text{m}$ ，与整个势垒区的厚度具有相同的量级，也能触及光照引起的带边深部的移动，但反射光波的主要信息来源于更靠近表面的区域，则是可信的。这样就可理解为何 EPR 的调制参数 m 较大。PR 与 ER 之间无质的区别，但在具体的实验条件中，往往存在量的差异。同时也解释了表面(界面)态在 PR 中影响更大所导致的种种现象。

综合以上所述，我们设计了一个直截了当的实验，将 PR 与 ER 作了对照。结论是 PR 的实质是 ER，但两种调制的效果并不相同。引进一个新的概念——调制参数 m ，来对比两者的效果。从调制层深度出发，简要地说明了 m 值不同的原因，并解释了有关的实验现象。

关于 $m(L_L)$ 的实验正进行中。

本文中样品由上海冶金所王周成同志提供。徐峻晟参与了系统的建立工作。在照片

印制过程中得到了郑凯同志的帮助。在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] O. J. Glembocki, B. V. Shanabrook, N. Bottka, W. T. Beard, and J. Comas, *Appl. Phys. Lett.*, **46**, 970(1985).
- [2] R. Grosser and N. Bottka, *Proc. of SPIE*, **784**, 88(1987).
- [3] J. L. Shay, *Phys. Rev.*, **B2**, 803(1970).
- [4] 钱佑华、陈良亮,物理学报,31,646(1982)。
- [5] D. E. Aspnes, *Surf. Sci.*, **37**, 418(1973).
- [6] 戴宁,硕士论文,上海技术物理研究所(1985)。
- [7] 曹霞芬等,砷化镓和有关化合物会议论文摘要,1987,10,北京。
- [8] R. Sittig, *Surf. Sci.*, **37**, 987(1973).
- [9] E. D. Palik, *Handbook of Optical Constants of Solids*, Academic Press, p. 429(1985).

Comparison between Photoreflectance and Electroreflectance of GaAs-Electrolyte Interface by Means of Direct Observation on Voltage Waveform across Surface Barrier

Cao Xiafen, Zhao Dong, Jiang Wenjie,

Zheng Guoxiang, and Qian Youhua

(Department of Physics, Fudan University, Shanghai)

Abstract

The properties of the photoreflectance and electroreflectance have been compared intrinsically with each other in the n-GaAs-electrolyte configuration, by means of a direct observation on the voltage drops across the surface barrier. A new parameter is introduced to distinguish finely the small differences existing in the both spectroscopies. Real distributions of the electric field within space charge region under the modulation of pulsed laser irradiation or external electric voltage are considered to explain the apparent differences in the two spectroscopies.

KEY WORDS: Photoreflectance, Electroreflectance, Modulation parameter, Depth of pulse interaction, Effects of interface states