

## 新的电调制反射谱技术及其应用<sup>\* \*</sup>

蔡加法, 陈主荣, 吴正云<sup>\*</sup>

(厦门大学物理系, 福建 厦门 361005)

**摘要:**提出一种微接触电调制反射谱(LCER)测试方法,该方与无接触电调制反射(CER)谱相比较,可极大降低调制电压。给出了自制的详细样品架结构,测量了 InGaAs/GaAs 量子阱样品,并与光调制反射谱(PR)相比较,结果证实了此方法的可行性和高光谱灵敏度,表明样品与电极的轻微接触既对测量结果没有明显的影响,又可简化测试条件,降低对测量环境的要求,是研究半导体材料和微结构一种方便而又有效的方法。

**关键词:**微接触电调制反射谱(LCER);光调制反射谱(PR);量子阱

**中图分类号:**O472+.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-0086(2005)08-0969-04

### A New Type of Electromodulation Spectroscopy and Its Application

CAI Jia-fa, CHEN Zhu-rong, WU Zheng-yun<sup>\*</sup>

(Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:**A new type of light-contact electroreflectance (LCER) spectroscopy technique was proposed. The measurement of the modulation spectroscopy can be simplified by using this method. The structure of the sample holder was presented in detail. The required amplitude of modulation voltage can be largely reduced by comparing with that of CER and the mechanism is analyzed qualitatively. The experimental results in InGaAs/GaAs quantum well samples by using LCER technique are presented and indicate the high spectral sensitivity and high spectral resolution of LCER. Compared with the experimental results of photorefectance (PR), it is shown that both spectra of LCER and PR coincide with each other and the experimental results are not influenced by the light contact between the surface of the sample and the electrode. It is concluded that LCER is an effective and convenient method for the study of semiconductor materials and semiconductor quantum wells.

**Key words:**light-contact electroreflectance (LCER); photorefectance (PR); quantum wells

## 1 引言

调制光谱由于其光谱分辨率高、可进行精确的曲线拟合等优点成为研究半导体材料的有效手段之一<sup>[1]</sup>,其中研究最多、最重要的是电调制技术。根据调制电极与样品表面接触情况,电调制技术分为接触和无接触接入 2 种方式。前者需要特定的电解液或者需要在样品表面制备电极<sup>[2,3]</sup>。而后者,调制电场可以通过如光调制反射谱(PR)<sup>[4]</sup>以及无接触电调制

反射谱(CER)<sup>[5]</sup>等方式施加到样品上,是一种无损测试方法。

PR 谱由于泵浦激光束激发样品产生的光荧光信号和激光杂散光的影响以及其调制机理等原因,测量的信噪比较低<sup>[4]</sup>,光路调节也较麻烦。在传统的 CER 谱测量中,样品放置在金属网格或透明材料制成的前电极和金属板背电极中间,2 个电极间的调制电压通常在 1 kV 左右,由于要用高压脉冲电源,增加了测量的成本和难度,其应用范围因此受到制约。

\* 收稿日期:2004-12-05 修订日期:2005-03-05

\* E-mail: zhywu@xmu.edu.cn

本文提出一种介于接触和无接触接入方式的微接触电调制反射(LCER)谱测试技术。与PR谱相比,它不需要用泵浦激光器从而没有光荧光信号和激光杂散光的影响;与CER谱相比,可以极大地降低所需的调制电压值。同时,它还可以和表面光伏谱(SPS)<sup>[6]</sup>实验有机地结合。

## 2 实验

LCER谱样品架结构如图1所示。在金属(Fe)圆柱体的前表面开约15 mm的圆孔作为探测光的窗口。表面镀有ITO(indium-tin-oxide)导电层的石英玻璃圆片放置在金属圆柱体内,另一金属圆环通过螺纹和金属圆柱体固定在一起,这样,ITO导电层和金属圆环紧贴从而实现电接触,整个金属圆柱体就作为一个电极。另一个电极由装在环氧树脂圆柱体中心的金属(Cu)条组成,环氧树脂圆柱体可以通过螺纹固定在金属圆环上从而实现与金属圆柱体的电绝缘。样品装在ITO导电层和金属条之间,调制电压通过金属圆柱体和金属条加在样品的前后表面上。金属条与样品的接触是通过装在其末端的软弹簧的弹性力实现的。通过调节弹簧长度使其弹力适中,使金属条与样品之间既能接触良好但又不会对样品施加太大的压力而损伤样品表面。测量时整个样品架装在Fe壳中以实现电磁屏蔽。

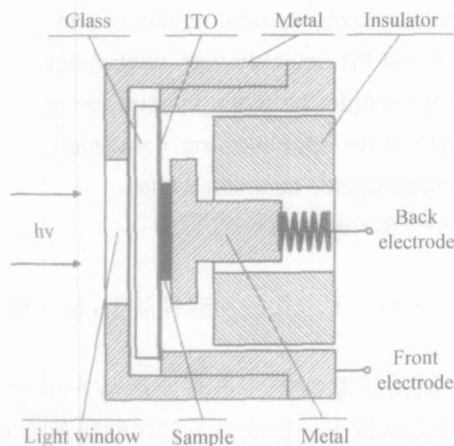


图1 微接触电调制反射谱样品结构  
Fig.1 The sample holder structure of LCER

LCER谱测量装置的其它部分与CER谱大致相同:250 W的溴钨灯经SP-750i单色仪分光后作为探测光聚焦照到样品上,由音频信号发生器或锁定放大器的内部信号发生器产生的交变调制信号同时加到样品上,调制频率为280 Hz。样品的反射光经聚焦后进入光电探测器进行光电转换及前级放大。光电

探测器输出的交直流信号分别由直流电压放大器和锁定放大器放大后送到数据采集系统进行处理和存贮。

测试装置可方便地从LCER转换为SPS测试,转换过程中不需要重新安装样品。二者的区别在于:SPS中,1)入射光需经光学斩波器变为交变光;光学斩波器放在单色仪的出光狭缝处,频率为280 Hz。2)ITO导电层和金属条电极间不需要接调制电压,样品光伏信号直接接入锁定放大器进行放大;3)不需要光电探测器。

作为比较,对样品也进行PR谱测量。在PR谱测量中,调制信号由532 nm半导体激光器经斩波后聚焦照射到样品上,激光器输出功率约2 mW,斩波频率为280 Hz。样品的光谱测试均在室温下进行。

InGaAs/GaAs量子阱样品采用MBE生长方法在GaAs(001)衬底上生长。其中1#样品为单量子阱结构,阱宽为10 nm,In组分为0.132,衬底为半绝缘材料;GaAs缓冲层的生长温度为580,其它各层为520。2#样品为耦合量子阱结构,阱宽为8 nm,In组分为0.2,GaAs势垒层厚度为10 nm,共生长3个周期;样品生长温度为600。

## 3 结果与分析

图2为2#样品在不同调制电压下的LCER谱。从图可以看出,调制电压为0.5 V时就可以得到信噪比很高的调制信号。实验发现,调制电压一般约为5 V就可以获得较理想的信号。

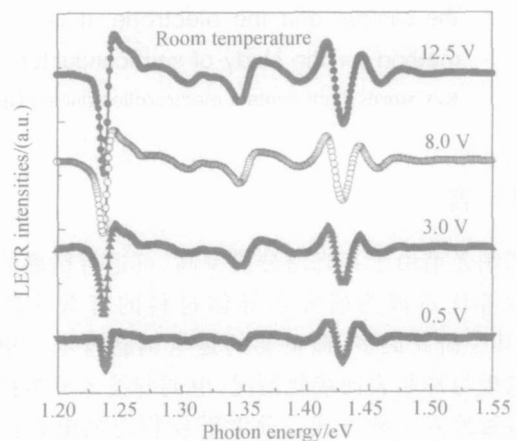


图2 2#样品不同调制电压的LCER谱  
Fig.2 LCER intensities versus modulation voltages of sample #2

调制电压得以极大降低的原因可通过简单的计算进行定性的解释<sup>[7]</sup>。在CER谱中,ITO电极和样

品前表面之间的空隙以及样品本身可分别视同 2 个串联的平板电容器。假设样品的面积为  $0.25 \text{ mm}^2$ , 表面耗尽层厚度为  $1 \mu\text{m}$ , 样品与 ITO 电极间的距离为  $0.1 \text{ mm}$ 。通过计算,可以求得 ITO 电极与样品之间的空隙及样品本身的等效电容值分别为  $C_{\text{air}} = 2.2 \text{ pF}$  和  $C_{\text{sample}} = 2.8 \text{ nF}$ 。若调制电压为  $1 \text{ kV}$ , 则加到样品上的电压为

$$V_{\text{sample}} = V \frac{C_{\text{air}}}{C_{\text{air}} + C_{\text{sample}}} = 0.79 \text{ V} \quad (1)$$

由上可知, CER 谱中, 调制电压大部分是施加在样品与 ITO 之间的空隙上, 只要减小样品与 ITO 的空隙就可以极大地降低调制电压的幅度。

调制电压的降低可以使测量简单化, 即不再需要脉冲高压电源, 而只需要音频信号发生器即可。若所用的锁定放大器内带有信号发生器, 也可以直接利用它来产生调制信号(如 SR830 型锁定放大器, 它能产生  $0 \sim 5 \text{ V}$ 、 $0.01 \sim 512 \text{ K}$  的输出信号)。这样, 一方面, 可以不用额外的信号发生器, 进一步简化测试条件; 另一方面, 信号引线的减少也会提高测量的信噪比。

从图 2 还可以看出, LCER 谱强度随调制电压增大而增大, 但其形状保持不变。这是因为小调制条件下, 调制光谱的信号强度与调制电场强度成对数关系而其线型与调制电场无关<sup>[8]</sup>。

图 3(a) 为利用相同的样品架结构测得的 2# 样品的 SPS 谱。图 3(b) 是通过表面光伏信号随光子能量的变化进行一级数值微分计算, 然后把此值除以光伏信号得到的一级微分表面光伏谱 (NDSPS), 这样可以利用调制光谱的线型分析方法对其进行线型拟合从而得出其子能级的跃迁能量<sup>[9,10]</sup>。图 3(c) 为 2# 样品的 LCER 谱。在图 3(b)、(c) 中, 分立点为测量数据点, 实线是利用<sup>[11]</sup>

$$R/R = \text{Re}[Ae^i (E - E_0 + i)^{-m}] \quad (2)$$

对测量数据进行曲线拟合得到的。其中,  $A$  是振幅; 为相位因子;  $m$  为指数因子(这里取 2);  $E_0$  为跃迁能量值。箭头是用 Kronig-Penney 模型对不同子能级结构进行理论计算后与实验结果相比较得到的不同子能级跃迁能量<sup>[11]</sup>, 用  $nmH(L)$  分别表示导带第  $n$  个子能级到价带重(轻)空穴第  $m$  个子能级的跃迁,  $E_0(\text{GaAs})$  表示 GaAs 的直接跃迁能量。

从图可以看出, 两种光谱均可以观测到丰富的子能级跃迁结构。但在 SPS 中, 除了  $11H$  和  $22H$  峰较明显外,  $11L$ 、 $12H$  和  $13H$  结构强度很弱且较宽, 无法直接从图中得到其跃迁能量值。在 NDSPS 中, 各

个子能级跃迁结构均可以分辨出来, 且具有明显的一级微分谱特性, 与 LCER 谱形基本相一致, 但比 LCER 谱的灵敏度更低些。两种光谱中, GaAs 带边谱形有很大的区别, 这是因为 GaAs 带边的直接跃迁峰应该是三级微分谱线型<sup>[11]</sup>。

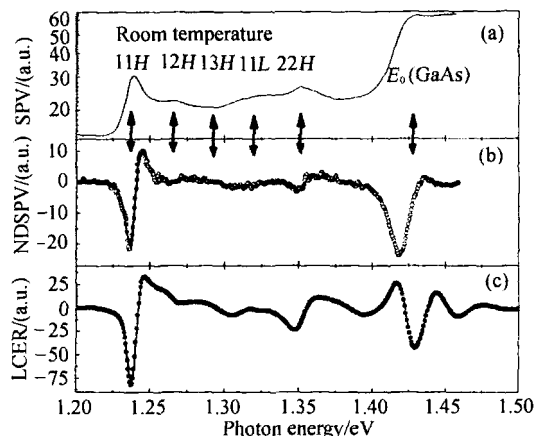


图 3 2# 样品的(a) SPS 谱; (b) NDSPS 谱及(c) LCER 谱

Fig. 3 SPS (a), NDSPS (b) and LCER (c) spectra of sample 2#

图 4、5 分别为 1#、2# 样品的室温 LCER 谱与 PR 谱。从图可以看出, 室温下二者均可测量到丰富的子能级跃迁峰, 表明 LCER 谱和 PR 谱一样具有很高的光谱灵敏度。另一方面, LCER 谱和 PR 谱相比较, 二者在谱形上无本质区别, 这证实采用的 LCER 谱中样品与电极的轻微接触并不会影响测量结果。从信号强度方面看, LCER 谱的信号强度可以达到  $10^{-2}$  量级, 比 PR 谱的要高 1~2 个数量级。这是二者的调制机制不同导致的: 与其它电调制谱(如 LCER、CER、EBER 谱等)相反, 光调制(PR)谱的基本机制是光生伏特效应, 即为少数载流子扩散效应,

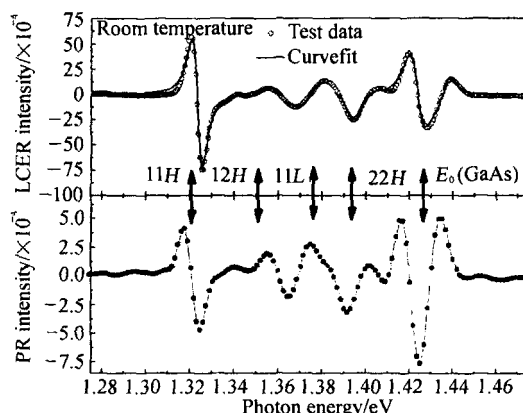


图 4 1# 样品的 LCER 谱与 PR 谱

Fig. 4 LCER and PR spectra of sample 1#

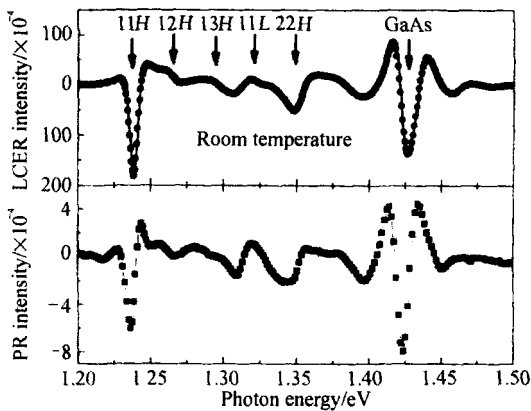


图5 2# 样品的 LCER 谱与 PR 谱  
Fig. 5 LCER and PR spectra of 2# sample at room temperature

它能得到的调制电场强度较其它电调制方法所能得到的低<sup>[12]</sup>。

#### 4 结 论

通过对样品架技术改进从而提出一种新的电调制谱测试方法。该方法可极大地简化测试条件,降低测量成本。利用该方法测量了 InGaAs/ GaAs 量子阱样品,结果证实了方法的可行性和高光谱灵敏度。同时,它又可以和 SPS 谱测量有机地结构在一起。与 PR 谱相比较,表明样品与电极的轻微接触对测量结果没有明显的影响,而且灵敏度更高。LCER 谱既没有 PR 谱中存在的光荧光和激光杂散光干扰的问题,又不需要 CER 谱中所必须的高压脉冲调制电源,其测量成本低、操作简单,是研究半导体材料和微结构的一种方便有效的方法。

#### 参考文献:

[1] Aspnes D E. Handbook on Semiconductors[M]. New York:North-Holland, 1980. 109.  
[2] Silberstein R P, Lyden J K, Tornkiewicz M, et al. Optical investigation of the electrical properties of a polycrystalline semiconductor electrolyte interface using electroreflectance[J]. J Vac Sci Technol, 1981, **19**(3): 406-410.

[3] Studna A A. Schottky diode fabrication for electroreflectance measurements[J]. Rev Sci Instrum, 1975, **46**(8): 735-738.  
[4] Keil U D, Linder N, Schmidt K, et al. Temperature dependence of the photoreflectance spectra of a GaAs/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As doping superlattice [J]. Phys Rev B, 1991, **44**(24): 13504-13512.  
[5] Yin X, Pollak F H. Novel contactless mode of electroreflectance[J]. Appl Phys Lett, 1991, **59**(18): 2305-2307.  
[6] WU Zheng-yun, CHEN Zhu-rong, HUANG Qi-sheng, et al. Temperature behavior of photovoltaic exciton lines in self-organized In<sub>0.4</sub>Ga<sub>0.6</sub>As/ GaAs quantum dots[J]. Journal of Optoelectronics · Laser(光电子 · 激光), 2000, **11**(4): 366-369. (in Chinese)  
[7] Arora B M, Ghosh S, Datta S, et al. Recent developments in spectroscopy of quantum structures[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2001, **4**: 489-495.  
[8] Hughes P J, Weiss B L, Hoesa T J G. Analysis of Franz-Keldysh oscillations in photoreflectance spectra of a Al-GaAs/ GaAs single-quantum well structure [J]. J Appl Phys, 1995, **77**(12): 6472-6480.  
[9] Lagowski J, Walukiewicz W, Sulsarczuk M M G, et al. Derivative surface photovoltage spectroscopy: a new approach to the study of absorption in semiconductors: GaAs [J]. J Appl Phys, 1979, **50**(7): 5059-5061.  
[10] Pollak F H. Contactless electromodulation and surface photovoltage spectroscopy for the nondestructive, room temperature characterization of wafer-scale semiconductor device structures[J]. Materials Science and Engineering, 2001, **180**: 178-183.  
[11] LIAN Jie, WANG Qing-pu, CHENG Xing-kui, et al. Calculation of the band structures for the quantum well infrared detectors[J]. Journal of Optoelectronics · Laser(光电子 · 激光), 2003, **14**(7): 672-674. (in Chinese)  
[12] Pollak F H. Study of semiconductor surfaces and interfaces using electromodulation[J]. Surface and Interface Analysis, 2001, **31**: 938-953.

#### 作者简介:

蔡加法 (1973 - ), 男, 福建人, 实验师, 毕业于厦门大学物理系获理学硕士, 主要从事半导体的光学性质研究。