

19

93-96

空间热梯度辅助的热调制反射光谱*

龚红飞 陆卫 陈效双 戴宁 史国良 沈学础

(中国科学院上海技术物理研究所, 红外物理国家重点实验室, 上海, 200083)

TN304.23
C472.3

摘要 给出一种新的通过空间热梯度辅助的热调制反射光谱方法, 其关键是在空间光谱方法基础上加一热场梯度, 无需对材料进行通常空间调制方法的特殊处理, 将该方法应用于典型半导体材料 GaAs, 清晰地观察到 GaAs 材料的带间跃迁 E_0 和其它诸如 $E_0 + \Delta_0$ 、 E_1 、 $E_1 + \Delta_1$ 的高能带跃迁。

关键词 热调制反射光谱, 空间微分反射谱, 热梯度。

砷化镓

引言

自 1964 年以来, 调制光谱已成为研究半导体材料及低维材料能带结构的有效实验手段, 其中电调制反射光谱利用施加在样品上的周期性电场, 引起材料介电函数的变化, 在临界点的附近得到尖锐的三阶微商光谱结构, 然后通过拟合得到临界点的能量位置, 光调制反射谱与电调制反射谱的原理基本相同, 但具有无接触、非损伤等优点, 光调制方法由于受到调制激光光子能量的限制, 在实验中难以观察到具有较大跃迁能量的高能带跃迁, 比如对于闪锌矿结构的半导体材料, 利用光调制方法较难得到 [111] 方向的 Λ 与 L 奇异点及它们的自旋轨道分裂带奇异点的能带结构 E_1 和 $E + \Delta_1$ 。另外, 对于荧光较强的样品, 光调制谱出现由激光激发产生的背景信号, 淹没较弱的反射调制信号, M. Ca^[1,2] 等小组利用空间微分反射技术研究了单量子阱结构材料, 得到与光调制反射光谱一致的能级结构, 此种方法利用的是薄膜材料组分在空间上的不均匀性, 入射光在样品上周期性地扫描, 在临界点附近得到尖锐的谱线结构, 对于组分均匀的 GaAs 外延材料需进行半边离子注入处理, 得到 $E_0 + \Delta_0$ 、 E_1 和 $E_1 + \Delta_1$ 。

本文提出了一种空间热梯度辅助的热调制微分反射光谱方法, 该方法对于组分均匀的材料, 不需对样品作特殊处理, 仍然可以得到较好的能带结构, 用本文方法对典型的半导体材料 GaAs 进行了测量, 获得了 $E_0 + \Delta_0$ 、 E_1 和 $E_1 + \Delta_1$ 的高能带结构。

1 实验方法

空间微分反射光谱的实验系统结构如图 1, 从单色仪出射的单色光经透镜照射到周期性振动的平面反射镜上, 然后反射到样品上, 再被样品反射到探测器。

周期性振动镜面反射的光在样品上进行周期性摆动, 摆动频率为 0~45Hz, 根据单色光

* 国家自然科学基金(编号 109525409 和 69676014)和上海市启明星计划资助项目
稿件收到日期 1998-04-27, 修改稿收到日期 1998-06-12

在样品上的摆动幅度大小和通常的热导系数决定样品尺寸大于 $6\text{mm} \times 5\text{mm}$ 为好. 与振动频率一致的电学信号作为参考信号输入到锁相放大器, 探测器的输出信号由锁相放大器检测, 单色仪的波长扫描和探测器的数据采集由计算机控制.

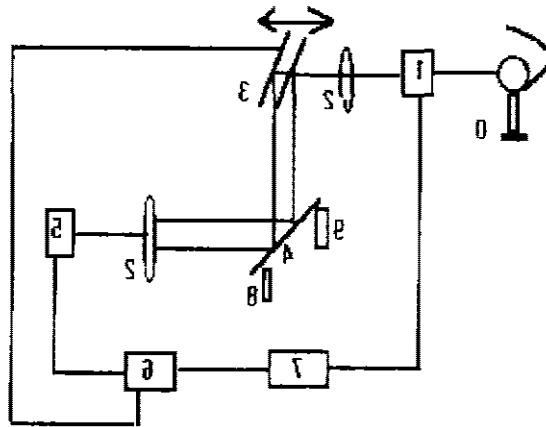


图1 温度梯度空间微分调制反射光谱实验装置
0 光源, 1 单色仪, 2 透镜, 3 平面镜, 4 样品, 5 探测器,
6 锁相放大器, 7 计算机, 8 电阻, 9 散热片

Fig. 1 Experimental setup for space differential thermal gradient assisted reflectance spectroscopy
0 light source, 1 monochromator, 2 lens, 3 mirror, 4 sample, 5 detector,
6 lock-in amplifier, 7 computer, 8 heating resistor, 9 cooling plate

在样品上周期性摆动的光被样品反射后进入探测器, 探测器输出一交流信号, 这种交流信号有两种起源: 一种是样品某种物理参量在空间上的梯度不均匀引起的 ΔR_1 , 这是本文方法需探测的与被测样品物理性能相关联的光谱信号; 另一种是由于探测器光敏面不均匀引起的 ΔR_2 , 这是与被测样品物理特性无关的测量系统自身附加信号, 必须消除. 我们通过优选探测器和调节光路来减小 ΔR_2 , 使其值约为直流的 10^{-4} , 空间微分光谱中 ΔR_2 信号的消除对光路的要求较严格, 对于半导体常规典型衬底约 0.5mm 厚度样品, 不能同时消除从样品上下表面反射产生的 ΔR_2 信号, 因此在上下表面平行的样品在无强吸收的光谱区会形成较大的背景信号 ΔR_2 , 一种实际可行的办法是将样品背面研磨成粗糙表面, 以消除下表面的背景信号 ΔR_2 .

本文方法有两个主要特点: (1) 保持样品不动, 有利于在样品上施加外界变化条件, 如温度、磁场、压力等; (2) 对于组分、厚度均匀(即光学性质在空间上均匀)的材料, 在样品一端加一微小的热场, 在样品的另一端加一散热片, 这样在样品上形成热场梯度, 人为造成样品能带结构的空问不均匀性, 从而得到样品的空问微分光谱. 该方法对材料无需特殊处理, 对样品没有损伤.

2 方法应用

为了检测本文方法的实用性, 我们选择了典型的半导体材料 GaAs 进行试验, 样品为

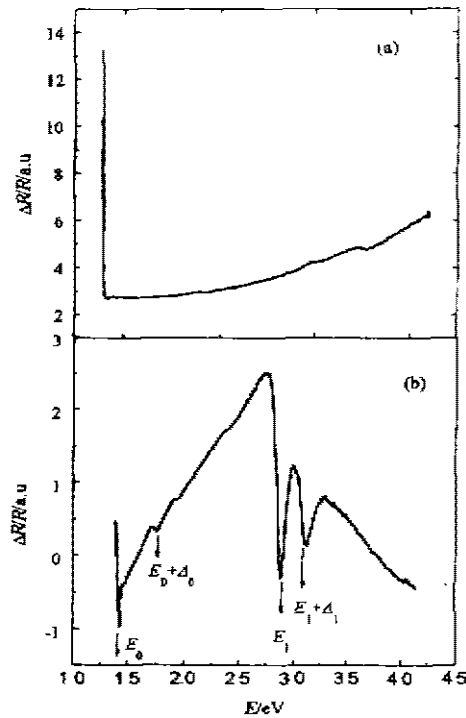


图 2 GaAs 单晶体材料的空间微分反射光谱

(a) 无温度梯度存在时的光谱,

(b) 有温度梯度存在时的光谱

Fig. 2 Space differential reflectance spectra of GaAs

(a) the spectrum without the thermal gradient,

(b) the spectrum of GaAs with thermal gradient

(100)取向的半绝缘单晶样品,厚度为 0.5mm,面积为 $15\text{mm} \times 8\text{mm}$. 图 2(a)是该样品的空间微分光谱图. 由于 GaAs 不存在组分不均匀性,也就是没有材料能带结构在空间上的差异($\Delta R_1 = 0$),所以图(a)中没有与临界点能量相关的光谱结构. 当 $E > E_g$ 时,由于入射光被 GaAs 吸收,从下表面反射到探测器上的光较弱,其背景信号也很弱;当 $E < E_g$ 时,样品对入射光不吸收了,从下表面反射的光增强,导致由下表面产生的 ΔR_2 大幅度增大,进而总体信号急骤上升. 图 2(a)中反映为当入射光能量小于禁带宽度时,信号骤然增大. 这具有吸收边的性质.

为减小背景信号,我们将 GaAs 单晶的背面研磨得较为粗糙,以减小样品下表面的反射. 为形成体材料空间上的不均匀性, M. Cal 等人将 GaAs 外延材料的一半进行离子注入处理^[2],这样对材料有损伤. 我们利用前文论及的本文方法特点(2),在 GaAs 材料的一端放置一加热电阻 ($51\Omega, 41\text{W}$),给 GaAs 这一端加热,样品另一端放在散热片上,其温度较加热端低,在样品上形成一温度梯度. 这样形成 GaAs 的能带宽度在空间上存在微小的差异,此时空间微分光谱就等同

于一种热调制的微分光谱,测量结果如图 2(b)所示.

我们不仅观察了从导带到价带的跃迁能量及其自旋轨道分裂的能量 E_0 和 $E_0 + \Delta_0$,而且还得到了 [111] 方向上更高的能量及其轨道自旋分裂的能量 $E_1, E_1 + \Delta_1$,这一结果与 M. Cardona 的热调制实验结果^[4]一致,这表明本文的方法是一种实用的微分光谱检测方法. 同时相对普通热调制方法而言,本文方法对样品的热容量没有要求. 而普通热调制方法要求样品的热容量要小,以提高温度的交变频率.

3 结论

本文提出一种利用空间热梯度辅助的热反射光谱方法,该方法无需对样品特殊处理,在空间微分光谱上施加一热场梯度,就可以观察到材料结构均匀的能带结构. 实验中我们观察到 GaAs 的 $E_0, E_0 + \Delta_0$, 和 $E_1, E_1 + \Delta_1$ 高能带跃迁,表明这是一种较好的观察结构均匀材料的高能带跃迁的实验方法.

REFERENCES

- 1 Gal M. Shwe C. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**: 545
- 2 Kraisingdecha P, Gal M. *Appl Phys. Lett.*, 1996, **69**: 1355
- 3 Matatagui E, Thompson A G, Cardona Manuel. *Phys. Rev.*, 1968, **176**: 950

THERMO-MODULATION REFLECTANCE SPECTRA ASSISTED BY THE SPACE THERMAL GRADIENT*

DOU Hong-Fei LU Wei CHEN Xiao-Shuang DAI Ning
SHI Guo-Liang SHEN Xue-Chu

(National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract A new method of thermo-modulation reflectance spectrum assisted by space thermal gradient was proposed. The key is to apply a thermal gradient to the usual space modulation spectral method, so that the special sample treatment was avoided. This method was used to study the typical semiconductor GaAs. The interband transition of E_0 , and higher energy transition of $E_0 + \Delta_0$, E_1 , $E_1 + \Delta_1$ in the crystal of GaAs were observed clearly.

Key words thermo-modulation reflection spectrum, space differential reflectance spectrum, thermal gradient.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China and the QMX Project of Shanghai
Received 1998-04-27, revised 1998-06-12