

GaAlAs 薄膜和 GaAs 的热微分反射光谱

戴 宁 冯金福 张 雷 陈良尧

(复旦大学李政道物理学综合实验室 物理系 上海 200433)

陆 卫 刘兴权

(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)

仲嘉林

(常熟高等专科学校物理系 常熟 200150)

摘要 本文描述利用光扫描和外加温度梯度获得热微分反射光谱的方法, 以及用这种方法研究 GaAlAs 薄膜和 GaAs 体材料的结果. 热微分反射光谱显示了材料在一定波长范围内所有的临界点结构, 这些结构主要由临界点能量随温度的变化所引起. 研究表明这种微分光谱具有简单易行, 不破坏样品等特点, 并且对研究较薄的材料显示了很高的灵敏度.

PACC: 7865, 7820, 6860

1 引言

同一般的反射和吸收光谱相比较, 调制光谱(或称为微分光谱)具有很高的灵敏度和分辨率, 因而被广泛用于半导体能带结构及量子阱、超晶格中电子态的研究. 传统的调制手段, 如电调制、光调制、压力调制、热调制等都是通过给样品表面外加一个相应的扰动场来周期性地改变样品的参数^[1], 从而实现对反射光的调制. 除了光调制以外, 其他研究手段均涉及到样品制备. 比如电调制实验中为了给样品施加电场需要在样品表面制备一层绝缘层和透明电极, 这就给实验带来了许多不便, 况且绝缘层本身还可能影响被测样品的表面特性. 光调制的特点是无接触, 不涉及样品制备, 因而简单易行^[2]. 由于光调制过程中需要将价带电子激发到导带, 因此要求调制光的光子能量大于材料的禁带宽度, 这对研究宽禁带的半导体材料显得不太方便. 光调制方法的另一个缺点是容易激发荧光, 这个问题对掺杂半导体材料显得尤为突出.

近年来发展了一种新的方法, 其原理是让入射光在半导体表面的光斑位置随时间作周

期性的变化, 利用半导体材料的不均匀性获得微分反射光谱。为了实现光束同半导体材料之间的相对运动, 一开始采用样品振动的方法^[6,7], 之后又进行了改进, 让光束平行扫描来代替样品振动^[8]。为了研究均匀性较好的材料, 我们采用光束平行扫描的方法研究了 GaAlAs 薄膜和 GaAs 体材料在外加温度梯度下的微分反射光谱^[9], 本文将报道这一研究结果。虽然这种热微分光谱同传统的热调制光谱很相似, 但热调制实验需要周期性地改变被测样品的温度, 这在实验上难度较大。采用光扫描和外加温度梯度获得微分反射光谱无需制备样品, 也不需要外加周期场, 实验上很方便。光扫描热微分光谱的另外一个特点是垂直于样品表面方向, 即探测光的穿透深度范围内温度分布是均匀的, 这使理论上对微分光谱作定量分析成为可能。特别要指出的是, 鉴于光扫描方法可以利用材料本身存在的宏观不均匀性获得微分光谱, 又具有不破坏样品和非接触的特点, 预期可用于材料生长(如分子束外延生长)过程中的实时监测。

2 实验原理

实验装置如图 1 所示。单色仪输出的光经振动反射镜反射后变成平行振动的光。样品放在透镜 1 的焦点上, 振动光束的光斑在样品表面作来回平行扫描。样品两端分别为冷端和热端, 温度梯度大约为 $12 \text{ }^\circ\text{C}/\text{mm}$, 光在样品表面的扫描频率为 22Hz , 扫描范围为 5mm , 光斑的尺寸为 $0.5 \times 3\text{mm}^2$, 扫描方向同外加温度梯度场的方向平行。样品反射的信号经透镜 2 进入硅探测器。探测器放在透镜 2 的焦点上, 因而消除了振动光在探测器表面的扫描(注意这时光束的焦点并不在探测器的光敏面上)。实验装置的其他部分同传统的调制光谱相似。

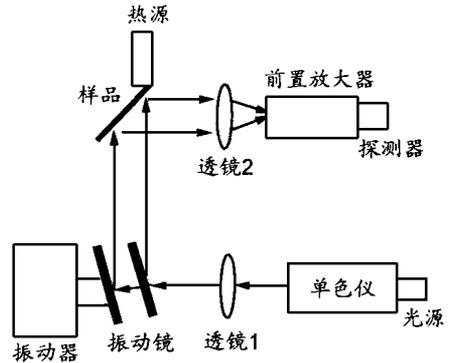


图 1

膜厚分别为 10nm 、 35nm 和 100nm 的 GaAlAs 薄膜用分子束外延方法生长在 GaAs 衬底上, 生长 GaAlAs 薄膜前先外延一层 $0.5\mu\text{m}$ 的 GaAs 缓冲层。GaAs 体材料为外延生长用的衬底。

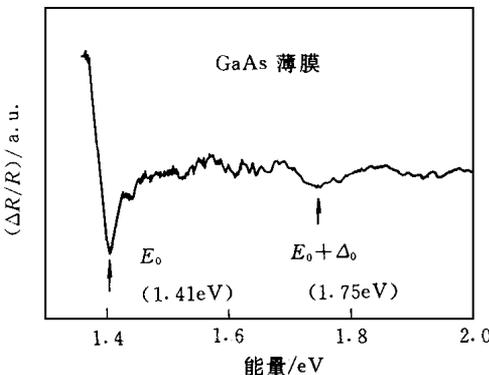


图 2

3 实验结果和讨论

微分光谱的结构起源于半导体材料的不均匀。不均匀可以是材料固有的, 也可以由外场所导致。二元的 GaAs 宏观均匀性一般都比较好(三元合金材料可能存在组分不均匀), 一般需要借助外加场获得微分光谱。图 2 给出了 GaAs 体材料的热微分反射光谱, 在测量的光谱范围内可以观察到明显的 E_0 、 $E_0 + \Delta_0$ 峰。同室温光调制反射谱相比较, 尽管因调制机制不同而结构的相位和强度比不同, 但对应的峰值位置完全一致。撤去

外加温度梯度场以后 $E_0, E_0 + \Delta_0$ 峰随之消失, 说明这些结构由温度梯度所引起

图 3 给出了三块 GaAlAs 外延膜样品的测量结果, 可以看到在测量的波长范围内对应于 GaAlAs $E_0, E_0 + \Delta_0, E_1$ 和 GaAlAs $E_0, E_0 + \Delta_0$ 临界点的光谱结构 图 3a 中 GaAlAs 薄膜的厚度仅为 10nm, 但在微分谱 1.6 和 2.1eV 能量位置附近可以看到明显的 E_0^{GaAlAs} 和 $E_0 + \Delta_0^{\text{GaAlAs}}$ 峰 (注意 E_1^{GaAlAs} 峰在 3.0eV 附近, 超出了我们的观察范围). 对同样的样品也进行了光调制反射谱测量, 没有观测到明显的 E_0^{GaAlAs} 和 $E_0 + \Delta_0^{\text{GaAlAs}}$ 峰 这显示了热微分光谱对很薄的外延层具有较高的灵敏度 图 3a 中的 $E_0^{\text{GaAlAs}}, E_0 + \Delta_0^{\text{GaAlAs}}$ 和 E_1^{GaAlAs} 结构是探测光透过 GaAlAs 膜测到的 GaAs 衬底的临界点跃迁 图 3b 为 35nm GaAlAs 膜的热微分光谱 显然在同样的实验条件下厚度的增加使 E_0^{GaAlAs} 和 $E_0 + \Delta_0^{\text{GaAlAs}}$ 峰明显增强 (比较图 3b 和图 3a). 由于较厚的 GaAlAs 薄膜对光的吸收, E_0^{GaAlAs} 峰已经超过了 $E_0 + \Delta_0^{\text{GaAlAs}}$ 峰 注意这里 35nm 和 10nm 外延层对应峰能量位置的差别是由材料组分的偏差造成的 图 3c 为膜厚为 100nm 的 GaAlAs 外延层的热微分反射谱 尽管外延层的厚度增加了 3 倍, 但 1.6eV 附近 E_0^{GaAlAs} 峰 的强度并不比 35nm GaAlAs 强 (比较图 3c 和图 3b), 说明对光谱的贡献主要来自近表面的 30~40nm 附近 这一范围大致对应于光的穿透深度 正如所预期的, 由于能够穿过外延层到达衬底的光强已经很弱, 很难观察到靠近很强的 E_0^{GaAlAs} 峰的弱的 $E_0 + \Delta_0^{\text{GaAlAs}}$ 峰 至于弱的 $E_0 + \Delta_0^{\text{GaAlAs}}$ 峰则被 E_1^{GaAlAs} 峰所淹没 100nm GaAlAs 薄膜在无外加温度梯度的情况下测得的反射谱显示了明显的 E_0^{GaAlAs} 峰 (见图 3c 上半部框图), 说明外延层存在固有的宏观不均匀 根据分子束外延生长材料的特点估计主要为组分不均匀 考虑到施加了温度梯度后 E_0^{GaAlAs} 峰增强的事实, 可以判断对图 3c 中热微分光谱结构的贡献同时来自温度梯度和组分不均匀 10nm GaAlAs 和 35nm GaAlAs 都只有在外加温度梯度下才能观察到光谱结构, 由此估计这些样品的组分均匀性较好.

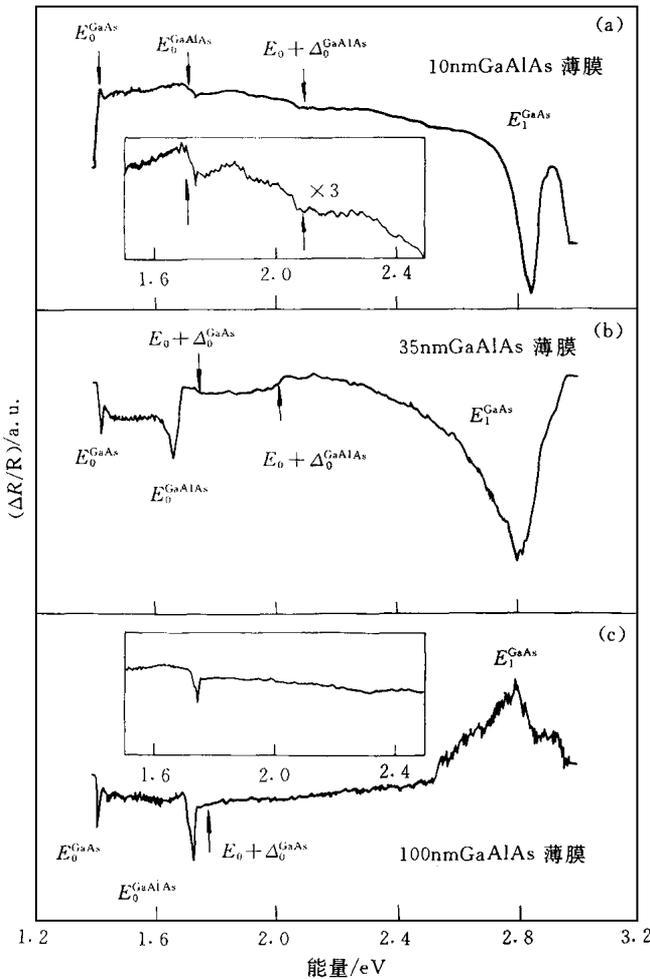


图 3

最后讨论一下微分光谱结构的来源 考虑到光斑的实际大小为 $0.5 \times 3\text{mm}^2$, 样品表面

原子尺度的微观不均匀对微分光谱的贡献将被平均掉,即光谱结构来自材料的宏观不均匀。外延生长的材料主要表现为组分不均匀。对均匀性好的材料,借助温度梯度可使作为温度函数的材料参数形成相应的梯度分布。这些材料参数包括临界点能隙 E_i 、线宽参数 Γ 及洛仑兹振子强度 I 。微分光谱可以根据这些参数表示为^[10]:

$$\Delta R = \frac{\partial R}{\partial I} \Delta I + \frac{\partial R}{\partial \Gamma} \Delta \Gamma + \frac{\partial R}{\partial E_i} \Delta E_i \quad (1)$$

尽管微分光谱的结构取决于 I 、 Γ 、 E_i 的综合贡献,但它们所对应的结构线形(相位)有很大的差别^[10,11]。 E_i 的结构线形为一主峰和两个分布在主峰高能和低能端的弱峰,而 I 和 G 的线形为正负两个强度相等的峰。图 3 中 GaAlAs 的所有结构都是一个主峰两边有两个弱的伴峰(有时其中的一个很难辨认),可以推断对结构的贡献主要来自 $\frac{\partial R}{\partial E_i} \Delta E_i$ 项,即温度梯度分布所引起的材料能隙改变。在 E_0^{GaAs} 峰的低能端 $\frac{\Delta R}{R}$ 的起伏较大是由于 GaAs 的吸收边造成的,即在 E_0^{GaAs} 能量位置附近光扫描范围达到的两个端点分别处于透明和不透明状态(因温度梯度造成 GaAs 衬底上两个光扫描端点的能隙不同),透明时光被衬底粗糙的背面所吸收,从而引起较强的调制信号。

4 结论

用光束的周期性扫描结合对样品施加温度梯度的方法获得了 GaAlAs 薄膜的热微分反射光谱,观察到了对应于 GaAs 衬底的 E_0 、 $E_0 + \Delta_0$ 、 E_1 和 GaAlAs 外延层的 E_0 、 $E_0 + \Delta_0$ 临界点。热微分光谱可用来研究不同宏观均匀性的半导体材料,特别是很薄的外延材料。

参 考 文 献

- [1] B. O. Seraphin and R. B. Hess, Phys. Rev. Lett., 1965, **14**: 138~140.
- [2] E. Y. Wang, W. A. Abers, Jr., and C. E. Bleil, II-VI Semiconducting Compounds, ed. D. G. Thomas, Benjamin, 1967, 136.
- [3] W. E. Engeler, H. Fritzsche, M. Garfinkel *et al.*, Phys. Rev. Lett., 1965, **14**: 1069~1071.
- [4] A. Balzarotti and M. Grandolfo, Solid State Commun., 1968, **6**: 815~817.
- [5] M. Cardona, in Modulation Spectroscopy (Academic, New York, 1969).
- [6] M. Gal and C. Shwe, Appl. Phys. Lett., 1990, **56**: 545~547.
- [7] C. Shwe and M. Gal, Appl. Phys. Lett., 1990, **57**: 1910~1912.
- [8] P. Kraisingdecha and M. Gal, Appl. Phys. Lett., 1996, **69**: 1355~1357.
- [9] N. Dai, J. F. Feng, L. Y. Chen *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1997, **70**: 2271~2273.
- [10] B. V. Shanabrook, O. J. Glembocki and W. T. Beard, Phys. Rev. B., 1987, **35**: 2540~2542.
- [11] D. E. Aspnes, Surf. Sci., 1973, **37**: 418~420.

Thermal Differential Reflectance Spectroscopy of GaAs thin Films and GaAs Bulk

Dai Ning, Feng Jinfu, Zhang Lei, Chen Liangyao

(Department of Physics and T. D. Lee Laboratory, Fudan University, Shanghai 200433)

Lu Wei, Liu Xingquan

*(National Key Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,
The Chinese Academy of Science, Shanghai 200083)*

Zhong Jialin

(Department of Physics, Changshu College, Changshu 200150)

Received 10 November 1997, revised manuscript received 5 March 1998

Abstract This paper describes the way to obtain thermal differential reflectance spectra by light scanning and external applied temperature gradient and its application on GaAs thin film and GaAs bulk. Thermal differential reflectance spectra reveal all the critical points in the given wavelength range induced by the variation of the temperature. Our research suggests that the method is simple and easy to use. In addition, the method does not destroy the samples and has extremely high sensitivity to thin materials.

PACC: 7865, 7820, 6860