

一种新的空间调制光谱技术 及其对几种半导体材料的应用

查访星 黄醒良 沈学础

(中国科学院上海技术物理研究所 红外物理国家实验室 上海 200083)

摘要 本文提出了另一种新的对样品实行空间调制的微分反射光谱技术. 文中给出了实验方法, 讨论了调制机理, 指出即使纯的体材料表面未经不均匀性处理, 该方法也可直接给出其能隙大小, 对 GaAs 的实验结果说明了这一观点. 本文还分析了微分反射方法研究量子阱超晶格等薄膜半导体材料时的物理机理, 给出并解释了 InGaAs/GaAs 单量子阱, AlGaAs/GaAs HBT 等材料的微分反射谱. 为了比较起见, 文中还对照给出了每一样品的光调制反射谱.

PACC: 7865, 7135, 6855

与通常的电调制反射光谱方法(ER)相比, 光调制反射(PR)方法用于探测研究半导体能带或子能带结构以及材料微结构等参数时, 不仅技术上简单而且对样品无损伤(contactless method). 因此近十年来特别是在半导体薄膜材料(包括量子阱、超晶格材料)的研究方面发挥了重要作用. 最近 Gal 和 Shwe 等人的实验表明一种称之为微分反射术(DR)的空间调制光谱技术是与 PR 具有同样优点的光学调制手段^[1~3]. 本文提出和实现了另一种微分反射术的光谱方法. 该方法经由样品的转动来实现空间调制或者说样品的位置调制, 因而在原理上与 Gal 等人的方法^[1~3]基本一致, 但实现空间调制的方法则有别.

实验光路大致和微分反射谱方法类似, 见图 1. 经单色仪出射的准单色光聚焦于样品上, 再被样品反射, 入射到硅探测器上. 该方法的主要特点在于样品被贴在一转动盘中心, 转动由一直流马达驱动, 转动频率可在 0 到 200Hz 的范围内调节, 转动频率的值由一光电耦合器取给锁相放大器, 被此频率锁定的信号经锁相输出. 单色仪的扫描和数据采集过程由一 486 计算机控制. 通常样品的尺寸要不小于 5mm×5mm, 样品上光点的大小约 0.5mm×1mm, 光点的扫描径迹的半径是可调的, 一般取 1~2mm. 调制信号的产生来源于两方面的贡献. 理想情况下, 如果样品本身结构, 组分, 表面状态, 缺陷在空间分布上完全均匀; 其次, 样品本身的厚度严格地均匀, 并且毫无倾斜地贴在转盘上, 同时转盘也与转轴绝对垂直, 换言之, 光路是严格保持静态的, 那么就不会有任何调制信号产生, 而事实上与此设想情况的

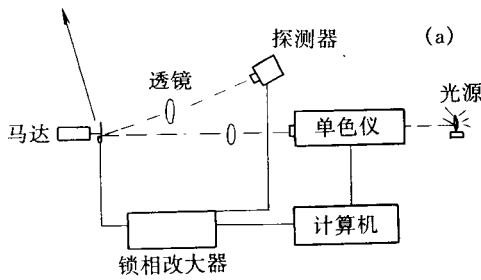


图 1(a) 实验装置框图

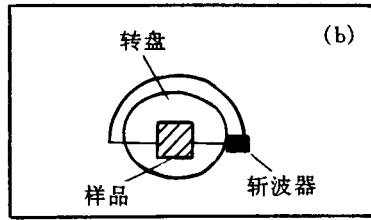


图 1(b) 样品安置

微小差异总是存在的. 一方面, 光点扫过样品时, 样品各处微结构的差异引起反射信号有一与转动频率一致的周期性起伏. 另一方面, 伴随着转动, 反射到探测器上的光斑也可能产生一小的具有相应周期的移动, 加之探测器光敏面上不同点响应率的差异, 从而构成探测器输出中周期性信号的另一来源, 所有这些由转动引起的周期性变化将被锁相放大器锁定而构成一测量的背景信号. 这一背景信号的大小一般为直流信号的 10^{-3} 量级.

如果调制信号单纯地由样品不均匀性所贡献, 则对于均匀性材料如单一体材料就不会观察到任何调制信号. 当用 Gal 和 Shwe 装置的微分反射术来研究这类材料时^[1,4,5], 就必须事先对样品表面进行不均匀性处理. 然而在我们的实验里, 既然还存在着上述由光路微小扰动所引起的对调制信号的贡献, 使得即使对于均匀材料也可观察到明显的与带隙对应的光谱结构. 例如对于均匀的表面良好的 GaAs 体材料, 直接由静态反射谱, 或者用 Gal 等的微分反射谱手段而不对样品表面进行不均匀性处理时, 就很难观察到与基本带隙对应的光谱特征. 但是图 2, 显示用我们的方法可直接观察到的 GaAs 体材料带间跃迁对应的单一谱结构, 作为比较, 图中还同时给出了该材料的 PR 谱, 二者有着一致的对应关系.

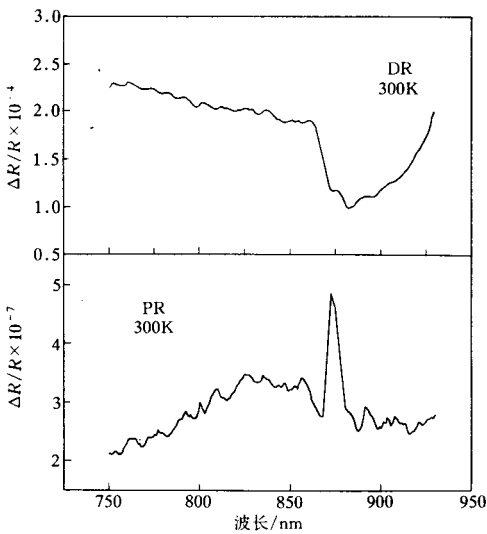


图 2 GaAs 的 DR 和 PR 谱

当微分反射术用于研究半导体薄膜样品时, 调制机制应与体材料样品有所不同, 设想样品是一单一薄膜材料, 当入射光照射在样品上, 将会有两束反射光为探测器所接受, 一束来自薄膜样品上表面的反射, 另一束来自下表面的反射, 一般说来对于超晶格或量子阱等薄膜材料, 材料每层的厚度以至各层总的厚度至多不过 μm 量级, 这样小的厚度要求来自薄层上下表面的反射光束同时被考虑. 如上所提及在 Shwe 等人的实验中, 通常体材料样品用于 DR 谱实验时必须对表面进行不均匀性处理^[1,4,5]. 但对超晶格材料则可以利用样品自身的不均匀性而获得很好的结果, 毋须经任何样品处理^[2,3]. 据其结果, 调制信号的强度, $\Delta R/R$ 一般为 10^{-3} 量级, 至少高出光反射方法所给信号强度两个量级. 如果单片考虑薄层

上表面的反射, MBE 材料的表面不均匀性是否如此之大以至给出这样强的调制信号, 我们表示怀疑. 但是若考虑到来自下表面的第 2 束光的贡献, 结果则易于理解: 既然第 2 束光与

整个材料层联系而具有透射光束的特性,它对样品的空间不均匀性,如组分无序,层厚涨落及膜层的应变等因素,更敏感.固然表面的不均匀性对微分信号必然有贡献,但若认为主要贡献也可能来自第 2 束光则似更易理解超晶格量子阱材料在 DR 谱中所表现出的强烈的调制信号.由此看来对于薄膜材料而言,DR 与其被称作反射微分术,不如理解成透射微分术更恰当.

上文已述,样品的转动同时还引起对光路的微扰,从而也构成对调制信号的重要贡献.既然对薄膜材料,来自膜层界面的反射光束不可被忽略,材料对这部分光束的吸收发生改变时,也必然影响到调制信号强度.我们用本文设计的 DR 方法研究了 $In_{0.14}Ga_{0.86}As/GaAs$ 单量子阱材料,结果见图 3.该材料由 MBE 生长,阱宽 25nm,GaAs 缓冲层和覆盖层分别为 $1\mu m$ 和 200nm.为了比较,图 4 同时给出了 PR 谱.图中显示 DR 与 PR 谱有着很好的对应关系;GaAs 信号在 PR 谱中很强,但在 DR 谱中却比 InGaAs 的信号弱.这一现象说明了我们这一方法的空间调制特征:由于合金的组分无序,特别是由于 InGaAs 材料的应变性,InGaAs 因而表现出较强的调制信号.DR 曲线在 GaAs 结构之后的陡降则正说明了光路微扰对调制信号所起的作用:当光子能量低于 GaAs 吸收边能量之后,GaAs 对于光线是透明的了,来自内界面的反射光必须被考虑,所以光谱有一增强的信号背景.可注意到,这一陡降的能量位置并不正好对应于 GaAs 能隙的位置而是在其能隙略低的方向.这可以理解 GaAs 带尾吸收的效应,如所周知,半导体材料的吸收边并不在 E_g 处降为 0,而是存在一个吸收带尾尤其在室温等较高温度下这个带尾可以较宽较强的.

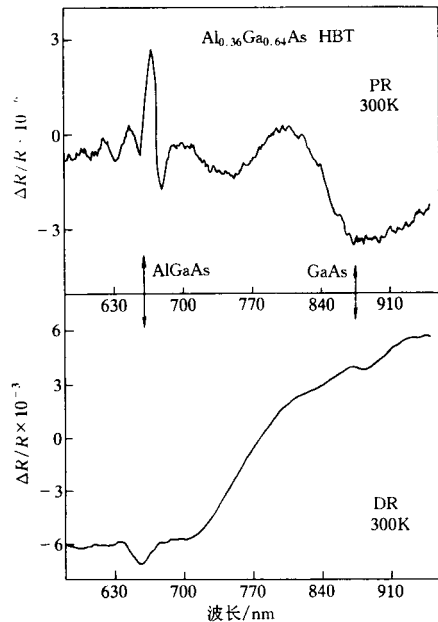
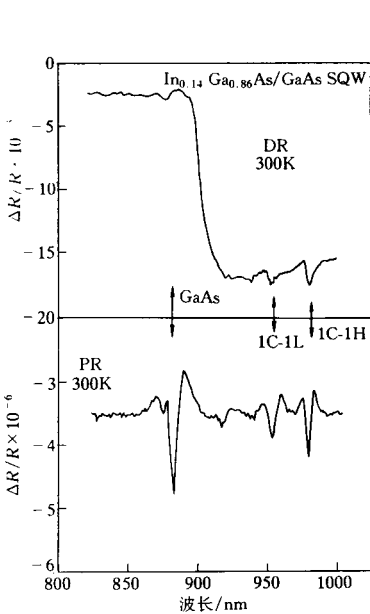


图 3 $InGaAs/GaAs$ 单量子阱材料的 DR 和 PR 谱

图 4 $AlGaAs/GaAs$ HBT 材料的 DR 和 PR 谱

图 4 给出的是 MBE 生长的 $Al_{0.36}Ga_{0.64}As/GaAs$ 异质结双极晶体管(HBT)材料的 DR 和 PR 谱,该材料的 AlGaAs 层厚 100nm,GaAs 的缓冲层和覆盖层分别为 $1\mu m$ 和 40nm.可看到 DR 谱给出了清晰的 AlGaAs 的调制信号.并且能够看到明显的 GaAs 信号,但 GaAs

信号在 PR 谱上并不明显,其原因可能是由于 AlGaAs 较厚,而在光调制反射实验中,我们所用的 Ar^+ 514.5nm 波长的调制激光的能量,远远大于 AlGaAs 的带隙,所以调制激光多被 AlGaAs 层吸收而很难对 GaAs 层起到调制作用。

综上所述,我们提出和实现了另一种空间调制光谱技术,该方法属于非接触式内调制方法。在这一光学调制方法中,调制信号来自于材料结构不均匀性和转动引起的对反射光强的周期性微扰两方面的贡献。由于后一原因,即使对均匀的 GaAs 体材料未经任何处理我们也观察到了其带隙结构。从这一意义上讲,这一实验构形较文献[1~5]报道的方法 DR 装置有其自身的优点。我们还指出,对超晶格量子阱等薄膜材料,应该认为其 DR 信号包括来自各层反射光束的总体贡献。基于这样一种思想,可以很好地解释我们的实验结果。我们相信该方法对于半导体薄膜材料的研究将会是非常有意义的。

致谢 感谢史国良工程师在实验装置建立过程中所给予的热情帮助。AlGaAs/GaAs HBT 样品由上海冶金所陈建新先生提供,并致谢意。

参 考 文 献

- [1] M. Gal and C. Shwe, Appl. Phys. Lett., 1990, **56**:545.
- [2] C. Shwe and M. Gal, Appl. Phys. Lett., 1990, **57**:1910.
- [3] M. Gal, C. Shwe, J. Tann *et al.*, SPIE, 1990, **1268**:136.
- [4] R. E. Hummel, Phys. Stat. Sol. (a), 1983, **76**:11.
- [5] J. Alfaro Holbrook and R. E. Hummel, Rev. Sci. Instrum., 1973, **44**:463.

A New Type of Space-Modulation Spectroscopy and Its Application to some Semiconductor Materials

Cha Fangxing, Huang Xingliang and Shen Xuechu

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

Received 14 March 1996, revised manuscript received 29 September 1996

Abstract Another kind of differential reflectometry is proposed. The experimental method is presented and the spectra modulation mechanism is discussed. It is pointed out that the energy gap of the pure bulk material can be directly obtained without any inhomogeneity processing of the material. The result of GaAs supports this view. The paper provides also a view to understand the results of thin film semiconductor materials in this measurement. The results of InGaAs/GaAs SQW and AlGaAs/GaAs HBT are shown and interpreted. For comparison, the PR spectra of the samples are also presented.

PACC: 7865, 7135, 6855