

低温分子束外延生长的 GaMnAs 反射 光谱的低能振荡现象*

罗向东^{1) 2) †} 姬长建²⁾ 王玉琦²⁾ 王建农¹⁾

1) 香港科技大学物理系, 香港)

2) 中国科学院固体物理研究所, 合肥 230031)

3) 南通大学专用集成电路设计重点实验室, 南通 226007)

(2007 年 10 月 11 日收到, 2008 年 1 月 21 日收到修改稿)

通过傅里叶变换红外光谱和光调制反射光谱技术测量了不同 Mn 含量的低温分子束外延生长在 GaAs 衬底上的 GaMnAs 样品的反射光谱. 在低于 Ga(Mn)As 带边的红外反射光谱和光调制反射光谱上观测到低能振荡现象. 通过分析振荡产生的原因并使用双层界面反射模型拟合了红外反射光谱的低能振荡过程, 拟合结果与实验相符. 研究表明, 反射光谱的低能振荡是由于 GaMnAs 中空穴浓度的变化导致 GaMnAs 中的折射率发生变化, GaMnAs 与衬底 GaAs 之间的折射率差导致了不同 Mn 含量的 GaMnAs 材料的反射谱的低能振荡现象. 测量了不同 GaMnAs 材料在室温和低温下的光调制光谱, 进一步说明 GaMnAs 材料中空穴浓度对反射光谱的低能振荡现象的影响.

关键词: GaMnAs, 反射光谱, 空穴浓度, 折射率

PACC: 7865K, 7820D, 7550P, 7850G

1. 引 言

近年来, 由于 GaMnAs 磁性半导体材料在自旋电子学领域中的巨大潜在应用价值而引起了众多研究人员的注意^[1-3]. 然而, 由于 Mn 在 GaAs 晶体中的饱和固溶度很小的缘故使得 GaMnAs 必须在非平衡生长条件下才能生长成功, 例如低温分子束外延(LT-MBE)生长. 低温生长的 GaMnAs 材料中由于低温生长方式带来了大量的 Mn 间隙原子和 As 反位缺陷, 这些缺陷大大降低了材料的磁学和光学性质^[4-7]. 在过去的数年中, 尽管已经有很多工作研究了 GaMnAs 中的磁性和其他物理性质, 然而对于其光学性质的研究, 除了有少量文献通过拉曼谱研究表明空穴浓度和拉曼峰的关系以外, 很少有文献研究低温生长的 GaMnAs 的空穴浓度对材料其他光学性质的影响, 尤其是空穴浓度对材料的反射率以及介电常数等性质的影响^[8-17]. 本文通过傅里叶变换红外光谱和光调制反射(photo-modulated reflectance, 简记为 PR)光谱技术测量了不同 Mn 含量的低温生长

GaMnAs 的反射谱和 PR 谱. 在 GaMnAs 的反射谱和 PR 谱的低能端(低于 Ga(Mn)As 带边)观察到光谱振荡现象. 通过对红外反射光谱的数值模拟和分析, 表明不同 Mn 含量的 GaMnAs 反射光谱上的低能振荡现象是由于 GaMnAs 中空穴浓度的变化使得材料的折射率发生变化所致. 通过比较具有不同电阻温度关系的 GaMnAs 样品在室温和低温下的 PR 谱的差异, 进一步说明材料空穴浓度的变化引起折射率变化是导致光谱低能振荡的最可能原因.

2. 实 验

本文研究的 GaMnAs 材料通过 LT-MBE 方法生长在半绝缘的 GaAs 上, 生长温度为 240 °C, 生长时 III, V 族元素摩尔比为 1:10. 整个生长过程通过高能电子衍射监控. 材料厚度为 1 μm, 材料组分通过高分辨 X 射线衍射谱仪测量决定. 室温反射谱通过 FTS 6000 型傅里叶变换红外光谱仪测量. PR 光谱通过标准的调制光谱系统测量, 样品放置在闭循环的变温杜瓦(10—320 K 变温)中, 通过斩波器调制的

* 江苏省自然科学基金(批准号: BK2004403), 南通市应用研究计划(批准号: K2007016)和南通大学自然科学基金(批准号: 07Z122)资助的课题.

† E-mail: luoxd00@yahoo.com.cn

488 nm 波长的激光被用来激发样品,100 W 的钨灯通过单色仪聚焦在样品上作为探测光源,Si 或者 InGaAs 探测器用于接收反射探测信号,SR570 电流放大器和 SR830 锁相放大器用来同时提取探测反射光的强度 R 以及强度变化 ΔR 并分析信号.

3. 结果分析及讨论

图 1 是一个典型的 GaMnAs 材料的室温 PR 光谱(Mn 的摩尔含量 C_{Mn} 为 3%),其中图 1(a)是 ΔR 随探测光能量 E 变化的 PR 谱,图 1(b)是 $\Delta R/R$ 随探测光能量 E 变化的 PR 谱.显然,图 1(a)和(b)中光谱的基本特征完全一致.从图 1(b)可以看到, $\Delta R/R$ 的最大值约为 3.6×10^{-4} ,即 ΔR 比 R 小三个数量级以上.因此,尽管在 R 随探测光能量变化的光谱上存在 ΔR 的变化,但 ΔR 对 R 的影响几乎可以忽略,结果使得 R 反映的是光源经过调制光谱测量系统后的总响应曲线.这样 $\Delta R/R$ 的光谱特征基

本不受 R 的影响,它与 ΔR 的光谱特征一致,如图 1 所示.另外,从图 1 还可以看到,Ga(Mn)As 带边附近的调制信号(从 1.25 到 1.6 eV)强烈而明显,光谱上能够清楚地看到带边的 Franz-Keldysh 振荡(FKOs)以及 GaAs 能带的自旋轨道分裂能级的调制信号($E_{\text{film}} + \Delta_{\text{SO}}$).对图 1 的分析可知,GaMnAs 的 PR 谱在我们测量的范围内(0.7—1.9 eV)具有以下特征:(1)对于 GaMnAs 能带带边的调制信号,调制中心能量位置大约在 1.40 eV(标记为 E_{film});(2)在 E_{film} 附近高能端的 FKOs,范围从 1.4 到 1.55 eV,它来源于 GaMnAs 层;(3)来源于 $E_{\text{film}} + \Delta_{\text{SO}}$ 的调制信号,调制中心能量位置位于 1.78 eV 附近,它来源于 GaMnAs 层;(4)在低于 E_{film} 能量位置的低能振荡来源不明,是本文分析的一个重点;(5)从图 1 还能够看到叠加在 E_{film} 和 FKOs 上的 GaAs 带边的调制信号,调制中心能量位置在 1.42 eV 左右(标记为 E_{sub}),如图 1(a)中箭头所指位置,它来源于 GaAs 衬底.

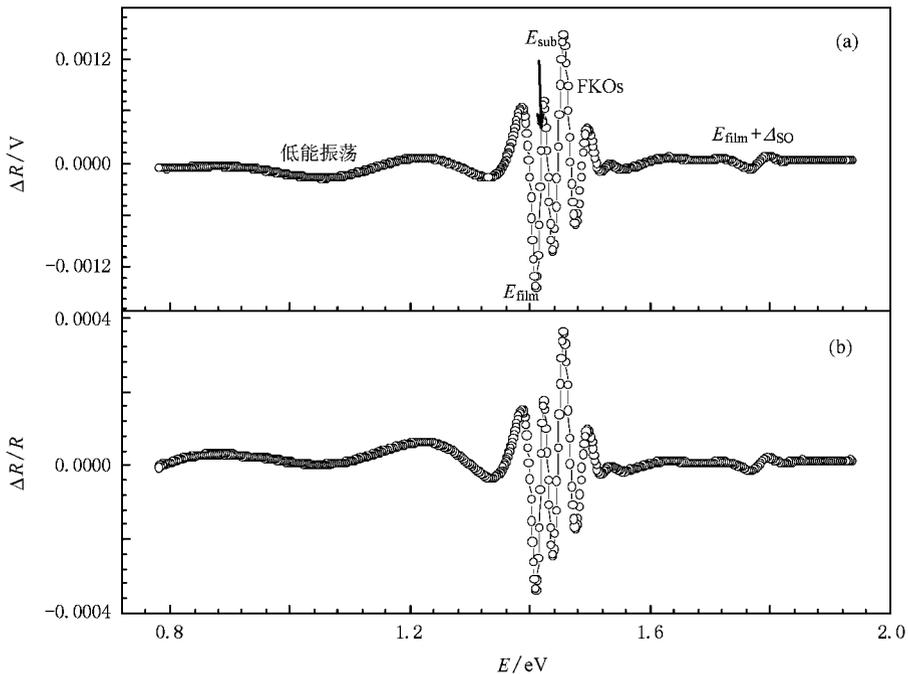


图 1 Mn 含量为 3% 的 GaMnAs 样品的 ΔR 和 $\Delta R/R$ 随探测光能量 E 变化的室温 PR 谱 (a) ΔR (b) $\Delta R/R$

显然,如果在 1.4—1.55 eV 之间的调制信号仅仅是 GaMnAs 带边的调制信号和 FKOs,它既不符合调制光谱的基本特征也无法通过 GaMnAs 层和 FKOs 的调制光谱公式来拟合.这是由于调制光谱在 1.42 eV 附近还存在一个调制信号,它来源于 GaAs 衬底.该调制信号与 GaMnAs 带边的调制信号以及 FKOs

之间有较强的干涉.由于它的调制强度远弱于 GaMnAs 带边的调制强度,因此 PR 谱上的这个调制信号不明显.GaAs 的调制信号能够被测量到是由于 GaMnAs 中的载流子快速输运到衬底的缘故.虽然我们使用的激发光源是 488 nm 波长的激光,它在 Ga(Mn)As 中的穿透深度仅为 200 nm,远小于 GaMnAs

层的厚度(1 μm),但由于 GaMnAs 与 GaAs 之间的势垒很可能非常低且 GaMnAs 中具有大的空穴浓度,因此 GaMnAs 中光激发产生的部分非平衡载流子很快就能输运到衬底中从而在 GaAs 中产生调制电场而被探测光所探测.这正是我们能够在调制光谱上同时看到 GaMnAs 和 GaAs 调制信号的原因.这些调制信号包括 E_{film} ,FKOs, E_{sub} 和 $E_{\text{film}} + \Delta_{\text{SO}}$.

通过对图 1 的分析, E_{film} ,FKOs, E_{sub} 以及 $E_{\text{film}} + \Delta_{\text{SO}}$ 的来源都已清楚,而低于 E_{film} 的低能振荡尚不清楚其来源.该低能振荡的特征不同于以上所述的来源于不同层的调制信号的调制特征.首先,低能振荡的振荡峰之间的宽度远远大于来源于各层的调制信号.其次,该振荡过程无法用一个或者两个典型的调制光谱的线型来拟合.因此,该低能振荡不是来源于材料能带结构的调制信号.事实上,在过去的研究中已经发现,由于材料之间的折射率差异或者热效应,容易导致多层结构材料的 PR 谱以及反射谱在其低能端发生光谱振荡现象,例如 GaAs/n-GaAs,CdTe/Si 等^[18-21].我们经过斩波器调制的激发光功率大约为 5 mW,并且照射在样品上的光点直径大约为 1.5 mm,因此激光引起的周期温度调制效应在样品测量过程中不可能存在^[21].另一方面,研究表明载流子浓度的变化可以导致材料的折射率发生较大变化,例如在 GaAs 中增大 GaAs 中的电子浓度将导致材料的折射率发生明显变化^[22],这也是 GaAs/n-GaAs 能够观察到低能振荡现象的一个重要原因.同样,GaMnAs 中由于大量的空穴存在也非常可能导致 GaMnAs 的折射率发生明显变化.因此,GaMnAs 和 GaAs 界面之间折射率的差异是产生图 1 中低能端振荡现象的最可能原因.

图 2 所示为不同 Mn 含量的 GaMnAs 的室温 PR 光谱,再次显示出 GaMnAs 的 PR 谱的低能振荡现象.为了更加清楚地显示我们所关心的低能振荡现象,能量高于 1.53 eV 的光谱没有显示在图 2 中,并且 Mn 含量 $C_{\text{Mn}} < 3\%$ 的 GaMnAs 样品的 PR 谱高能端强的调制信号被缩小以便更清楚地显示光谱的低能振荡部分.首先关注 Mn 含量的变化对 GaMnAs 各层调制信号的影响.Mn 含量 $C_{\text{Mn}} \leq 3\%$ 的 GaMnAs 样品的 PR 谱与图 1 中的光谱相似,除了低能振荡外,PR 谱上还能够清晰地看到 E_{film} 和 FKOs 的调制信号, E_{sub} 的调制信号也能够被观测到.而对于 Mn 含量 $C_{\text{Mn}} > 3\%$ 的 GaMnAs, E_{film} 和相应的 FKOs 几乎不能被观测到,在这些 PR 谱上仅仅能够观测到

GaAs 衬底的微弱调制信号,而低能振荡仍然非常明显.当 Mn 含量较低时($C_{\text{Mn}} \leq 3\%$),尽管低温生长的 GaMnAs 中存在许多 Mn 缺陷以及 As 的反位缺陷,但是 GaMnAs 的晶格常数受到掺入 Mn 的影响相对较小,GaMnAs 材料的晶体质量与低温 GaAs 相比差别不大.因此其调制信号的光谱特征与低温 GaAs (即 $C_{\text{Mn}} = 0$)相似.通过对 PR 光谱的拟合,我们得到 E_{film} 调制信号的展宽因子 Γ 随着 Mn 含量的增加而增大.这是由于大量的缺陷使得 GaMnAs 的光学质量比低温 GaAs 差的缘故,Mn 含量越大,GaMnAs 材料的光学质量越差,因此 Γ 也越大.随着 Mn 含量的增大($C_{\text{Mn}} > 3\%$),由于 Mn 在 GaAs 中固溶度的限制,材料中的缺陷急剧增加,因而导致材料晶体质量迅速下降.因此,在高 Mn 含量的 GaMnAs 中, E_{film} ,FKOs 和 $E_{\text{film}} + \Delta_{\text{SO}}$ 等能带结构的调制信号因为材料晶体质量变差而难以测量.其次,Mn 含量的变化对 GaMnAs 的 PR 谱上的低能振荡有明显的影响.在低温 GaAs 的 PR 谱上,除了 GaAs 的调制信号外,看不到任何低能振荡现象,仅仅在 1.3 eV 能量位置附近有一个宽的调制信号,该调制信号可能来源于低温 GaAs 材料中的一个缺陷能级^[23].而在所有 Mn 含量 $C_{\text{Mn}} > 0$ 的 GaMnAs 样品的 PR 光谱上,低能振荡都能被清楚地观测到.不同 Mn 含量样品的 PR 谱上的低能振荡具有不同的振荡频率.当 Mn 含量从 1% 变化到 5% 时,PR 谱上的低能振荡的频率逐渐增加;而当 Mn 含量从 5% 变化到 6%,低能振荡的频率降低.这一规律与 GaMnAs 的空穴浓度变化规律十分相似.拉曼光谱研究以及其他研究表明:当 Mn 含量较低时 GaMnAs 中的空穴浓度随 Mn 含量增大而增大,当 Mn 含量增大到 6% 左右时,由于 Mn 缺陷和 As 反位缺陷的自补偿效应而导致空穴浓度降低,在 Mn 含量为 4% 到 6% 之间存在一个极大值^[10,16].PR 谱上低能振荡的频率随 Mn 含量的变化规律与空穴浓度随 Mn 含量的变化规律基本一致.这一结果再次表明,PR 谱上的低能振荡与 Mn 含量的变化以及 Mn 掺入导致大的空穴浓度变化有密切关系.

为了进一步研究 PR 谱上的低能振荡,我们测量了样品的红外反射谱,结果如图 3 所示.从图 3 可以看出,低能振荡同样出现在 GaMnAs 样品的反射谱上,其振荡规律与图 2 的 PR 谱一致.Mn 含量 $C_{\text{Mn}} = 0$ 的 GaMnAs 红外反射谱的低能端看不到低能振荡存在.随着 Mn 含量的增加低能振荡频率增大,在 $C_{\text{Mn}} = 5\%$ 左右振荡频率出现极大值,Mn 含量继续增

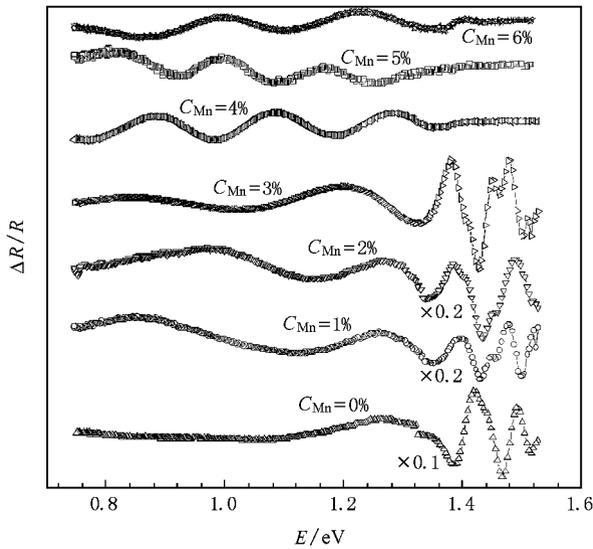


图2 不同 Mn 含量的 GaMnAs 样品的室温 PR 光谱 激发光波长为 488 nm 功率为 5 mW 测试温度为 300 K

大时振荡频率降低. 显然, 无论是 GaMnAs 样品的 PR 谱还是反射谱, 都存在低能振荡现象, 该低能振荡与 Mn 掺入所引起的空穴浓度变化密切相关. 我们已经知道, GaMnAs 中的空穴浓度变化会改变材料的折射率, 使得 GaMnAs 与 GaAs 衬底之间产生折射率差. 两层材料之间的折射率差导致 GaMnAs 反射谱上的低能振荡, 类似于 GaAs 与 n-GaAs 之间由于载流子浓度导致的折射率差引起的反射谱的低能振荡^[18—20].

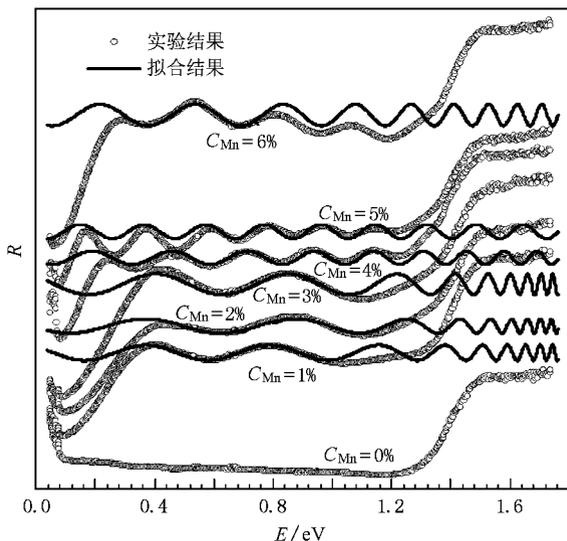


图3 不同 Mn 含量的 GaMnAs 样品的室温红外反射光谱 测试温度为 300 K

为了更好地说明 GaMnAs 样品的 PR 光谱上的低能振荡是由于 GaMnAs 与 GaAs 之间的折射率差所致, 我们利用文献^[17—19]中的反射相干模型来对图 3 的红外反射谱的低能振荡进行数值模拟. 该模型根据不同层材料之间的折射率差得到反射光的强度 R_r , 能够模拟两层或者多层材料的 R_r . 我们的 GaMnAs 样品只有两层界面, 第一层界面是从空气中入射到 GaMnAs 层, 第二层界面是从 GaMnAs 入射到衬底 GaAs 中. 为了简单起见, 我们考虑单色偏振光照射样品, 从空气进入 GaMnAs 的反射光振幅系数为 r_{af} , 而从 GaMnAs 进入 GaAs 的反射光振幅系数为 r_{fs} . 反射光的强度可表示为^[17—19]

$$R_r = r_{af}^2 + (1 - r_{af}^2)^2 r_{fs}^2 e^{-2\gamma k_f} + 2r_{af}(1 - r_{af}^2)r_{fs} e^{-\gamma k_f} \cos[\gamma n_f + \delta], \quad (1)$$

其中 $\gamma = 2d \cos \theta_f \frac{2\pi}{\lambda}$, n_f 为折射率, k_f 为消光系数, δ 为相位因子, d 为 GaMnAs 层的厚度, θ_f 为折射角, λ 为入射波波长. 通过对 (1) 式进行微分可以得到 ΔR 的表达式.

(1) 式等号右边第一项和第二项只影响反射谱的强度, 而与反射谱的振荡无关, 只有含余弦函数 ($\cos[\gamma n_f + \delta]$) 的第三项与反射谱的振荡有关. r_{af} , r_{fs} 和 k_f 仅仅与余弦函数前的系数有关. 对于本文所研究的 GaMnAs 材料而言, 材料厚度基本确定, n_f 和 k_f 与材料中的空穴浓度相关, 而在入射角固定的情况下, r_{af} , r_{fs} 以及 θ_f 都是 n_f 和 k_f 的函数. k_f 与振荡无关, 因此只有 n_f 与振荡项密切相关, 或者是振荡频率仅仅与 n_f 有关. 由于振荡强度难以模拟, 我们仅模拟了反射谱的振荡过程而将振荡强度固定, 拟合结果如图 3 中的实线所示. 从图 3 可以看到, 拟合结果与测量结果相符很好.

为了进一步说明空穴浓度对红外反射光谱和 PR 光谱低能振荡的影响, 我们测量了 3 个典型的 GaMnAs 样品的横向电阻随温度 T 的变化曲线 (图 4) 以及它们在不同温度下的 PR 光谱 (图 5). 从图 4 所示的 3 个不同 Mn 含量的 GaMnAs 样品 ($C_{Mn} = 4\%$, 5% , 6%) 的横向电阻与温度的关系可以看出: 在室温下, 3 个样品的电阻都很小. 随着温度的降低, Mn 含量 C_{Mn} 为 4% 和 6% 的 GaMnAs 样品表现出典型磁性半导体的电阻温度关系, 在 30—70 K 之间出现一个电阻极值点, 这是磁性半导体的磁性转变点. 在我们测量的温度范围内, C_{Mn} 为 4% 和 6% 的样

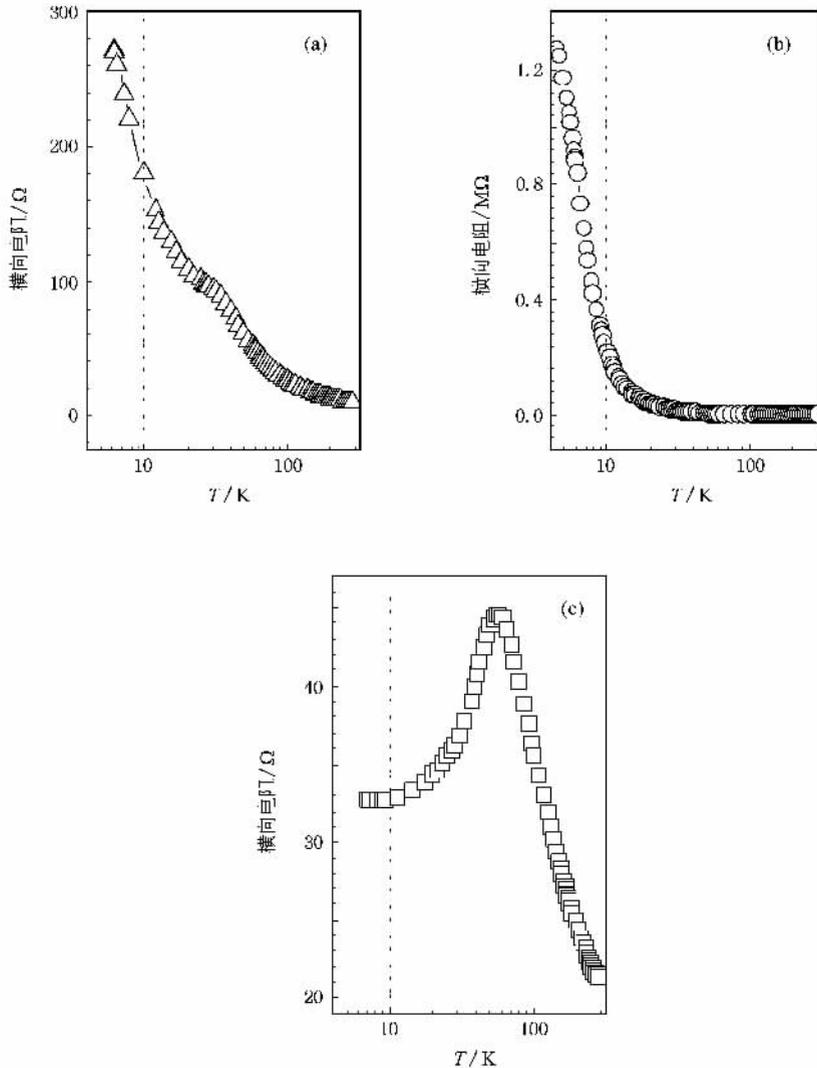


图4 $C_{Mn} = 4\%$ 5% 6% 的 3 个 GaMnAs 样品的横向电阻随温度 T 的变化 (a) $C_{Mn} = 4\%$ (b) $C_{Mn} = 5\%$ (c) $C_{Mn} = 6\%$

品电阻都没有超过 300Ω . 这表明无论是低温还是室温, 材料中都存在大的空穴浓度. 然而对于 $C_{Mn} = 5\%$ 的 GaMnAs 材料, 它的电阻变化是温度的指数函数, 接近典型的本征半导体的电阻温度特性, 不存在磁性转变点. 在 10 K 时测量的电阻超过 $200 \text{ k}\Omega$, 是室温时的 1000 倍. 这表明低温下该样品中的空穴浓度远远低于其在室温时的空穴浓度, 也远远低于其他两个样品在低温或室温时的空穴浓度. 样品的空穴浓度差异直接反映在它们的室温和低温 PR 谱上 (图 5). 首先, 为了保证样品在不同温度下其他测试条件一致, 变温测量的样品被放置在变温杜瓦中并密封, 测量过程都是通过密封杜瓦的石英窗口来进行. 而在测量图 1 和图 2 所示的光谱时, 实验过程是在敞开的杜瓦中进行, 探测光和激发光直接照射在

样品上进行测量. 因此, 图 5 中的 PR 光谱的信号强度比图 1 和图 2 中的光谱强度要弱得多. 其次, 从图 5 中不同温度的 PR 谱上可以看到, GaMnAs 带边附近的调制信号难以被测量到 (与图 2 的实验结果类似). 再次, 对于 Mn 含量 C_{Mn} 为 4% 和 6% 的样品而言, 无论是低温还是室温, 光谱上的低能振荡都能够被测量到. 然而, 对于 Mn 含量 $C_{Mn} = 5\%$ 的样品, 其在室温时的光谱低能振荡十分明显, 而在低温下的 PR 谱则基本看不到低能振荡现象. 这是由于低温下该样品的空穴浓度急剧降低, 远远低于其在室温时的空穴浓度. 低的空穴浓度导致样品的折射率与衬底 GaAs 的折射率相近, 从而使得界面散射不明显而无法观测到光谱低能端的振荡现象. 显然, 不同温度下的 PR 谱结果与相应样品的空穴浓度变化完全一

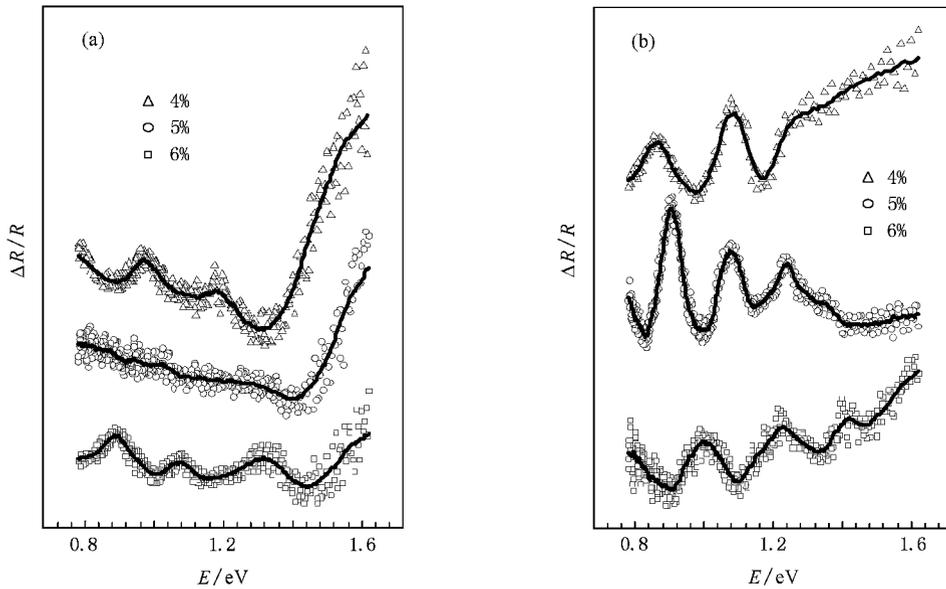


图5 $C_{Mn} = 4\%$ 5% 6% 的 3 个 GaMnAs 样品在 10 和 300 K 下的 PR 谱 (a) 10 K (b) 300 K

致,这一结果再次表明 GaMnAs 低能振荡现象与空穴浓度的密切关系。

4. 结 论

本文通过傅里叶变换红外光谱和 PR 光谱技术测量了不同 Mn 含量的 LT-MBE 生长的 GaMnAs 样品的反射谱.在低于 Ga(Mn)As 带边的光谱上我们观测到明显的低能振荡现象.通过分析低能振荡产生的原因并使用双层界面反射模型拟合了红外反射

光谱低能振荡过程,拟合结果与实验结果相符.研究表明,由于 GaMnAs 中空穴浓度变化导致 GaMnAs 中的折射率发生变化,GaMnAs 与衬底 GaAs 之间的折射率差导致了 GaMnAs 材料反射谱的低能振荡现象,并且由于不同 Mn 含量的 GaMnAs 材料中空穴浓度不同导致其反射谱的低能振荡频率不同.最后,利用具有不同电阻温度特性的 GaMnAs 材料在室温和低温下的 PR 光谱的差异,进一步说明材料的反射谱低能振荡是由于材料中空穴浓度变化导致折射率变化的结果.

- [1] Ohno H 1998 *Science* **281** 951
- [2] Prinz G A 1998 *Science* **282** 1660
- [3] Jungwirth T, Sinova J, Mašek J, Kučera J, MacDonald A H 2006 *Rev. Mod. Phys.* **78** 809
- [4] Dietl T, Ohno H, Matsukura F, Cibert J, Ferrand D 2000 *Science* **287** 1019
- [5] Champion R P, Edmonds K W, Zhao L X, Wang K Y, Foxon C T, Gallagher B L, Staddon C R 2003 *J. Cryst. Growth* **247** 42
- [6] Korzhavyi P A, Abrikosov I A, Smirnova E A, Bergqvist L, Mohn P, Mathieu R, Svedlindh P, Sadowski J, Isaev E I, Vekilov Y K, Eriksson O 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 187202
- [7] Yu K M, Walukiewicz T, Wojtosicz T, Kuryliszyn I, Liu X, Sasaki Y, Furdyna J K 2002 *Phys. Rev. B* **65** 201303
- [8] Hankiewicz E M, Jungwirth T, Dietl T, Timm C, Sinova J 2004 *Phys. Rev. B* **70** 245211
- [9] Seong M J, Chun S H, Cheong H M, Samarth N, Mascarenhas A 2002 *Phys. Rev. B* **66** 033202
- [10] Limmer W, Glunk M, Mascheck S, Koeder A, Klarer D, Schoch W, Thonke K, Sauer R, Waag A 2002 *Phys. Rev. B* **66** 205209
- [11] Singley E J, Kawakami R, Awschalom D D, Basov D N 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 097203
- [12] Hirakawa K, Katsumoto S, Hayashi T, Hashimoto Y, Iye Y 2002 *Phys. Rev. B* **65** 193312
- [13] Szcztyko J, Mac W, Twardowski A, Matsukura F, Ohno H 1999 *Phys. Rev. B* **59** 12935
- [14] Gurevich A, Vinokur V M 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 3037
- [15] Yee K J, Lee D, Liu X, Lim W L, Dobrowolska M, Furdyna J K, Lim Y S, Lee K G, Ahn Y H, Kim D S 2005 *J. Appl. Phys.* **98** 113509
- [16] Weber Z J, Peiris F C, Liu X, Furdyna J K 2005 *J. Vac. Sci. Technol. B* **23** 1313

- [17] Wang C , Chen P P , Liu Z L , Li T X , Xia C S , Chen X S , Lu W 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3636 (in Chinese) [王 堯、陈平平、刘昭麟、李天信、夏长生、陈效双、陆 卫 2006 物理学报 **55** 3636]
- [18] Huang D , Mui D , Morkoç H 1989 *J. Appl. Phys.* **66** 358
- [19] Kallergi N , Roughani B , Aubel J , Sundaram S 1990 *J. Appl. Phys.* **69** 4656
- [20] Lipsanen H K , Airaksinen V M 1993 *Appl. Phys. Lett.* **63** 2863
- [21] Ghosh S , Arora B M 1997 *J. Appl. Phys.* **81** 6968
- [22] Sell D D , Casey H C Jr , Wecht K W 1974 *J. Appl. Phys.* **45** 2650
- [23] Pikhtin A N , Airaksinen V M , Lipsanen H , Tuomi T 1989 *J. Appl. Phys.* **65** 2556

Low energy oscillatory phenomena in photoreflectance and photo-modulation reflectance spectra of GaMnAs films grown by low temperature molecular-beam epitaxy^{*}

Luo Xiang-Dong^{1 2 3 †} Ji Chang-Jian²⁾ Wang Yu-Qi²⁾ Wang Jian-Nong¹⁾

¹ *Department of Physics , Hong Kong University of Science and Technology , Hong Kong , China*

² *Institute of Solid State Physics , Chinese Academy of Sciences , Hefei 230031 , China*

³ *Key Laboratory of Application Specific Intergrated Circuits Design , Nantong University , Nantong 226007 , China*

(Received 11 October 2007 ; revised manuscript received 21 January 2008)

Abstract

GaMnAs grown by low temperature molecular beam epitaxy have been investigated by Fourier transform infrared and photo-modulation reflectance (PR) measurements. Besides the band gap of Ga(Mn)As , Franz-Keldysh oscillations and spin-orbit coupling energy , low energy oscillations , lower than the GaAs band gap , were well observed in the PR spectra of GaMnAs. And these oscillations were also observed clearly in reflectance spectra of GaMnAs. By fitting the oscillations of the reflectance spectra , it was attributed to the variable refractive indexes induced by the high hole density in GaMnAs , which was caused by Mn doping in GaAs. At the same time , the PR spectra of high-resistance GaMnAs at low temperature were also studied.

Keywords : GaMnAs , reflectance spectrum , hole density , refractive index

PACC : 7865K , 7820D , 7550P , 7850G

^{*} Project supported by the Natural Science Foundation of Jiangsu , China (Grant No. BK2004403) , the Application Research Program of Nantong , China (Grant No. K2007016) and the Natural Science Foundation of Nantong University , China (Grant No. 07Z122).

[†] E-mail : luoxd00@ yahoo. com. cn