

文章编号:1001-9014(2006)03-0207-06

## GaMnAs 的 Raman 光谱研究

马宝珊<sup>1</sup>, 王文杰<sup>1</sup>, 苏付海<sup>1</sup>, 邓加军<sup>1</sup>, 蒋春萍<sup>1</sup>, 刘海林<sup>2</sup>  
丁琨<sup>1</sup>, 赵建华<sup>1</sup>, 李国华<sup>1</sup>

(1. 中国科学院半导体研究所 超晶格国家重点实验室, 北京, 100083;  
2. 武汉大学 物理学院, 湖北 武汉, 430072)

**摘要:**报道了磁性半导体材料 GaMnAs 的拉曼光谱, 发现其空穴等离子体激元与 LO 声子振动耦合形成的 CPLP 模具有类 LO 模的偏振特性. 随着 Mn 组分的增加, CPLP 模的拉曼频率红移, 通过 CPLP 模与耗尽层中未屏蔽的 LO 模的强度比计算了合金中的空穴载流子浓度. 发现空穴浓度随 Mn 组分的增加而迅速增加. 测量了不同温度下 GaMnAs 合金的拉曼光谱. 证实合金中空穴浓度随温度的增加而增加.

**关键词:** GaMnAs; 拉曼光谱; 等离子激元与声子耦合模; 空穴浓度  
**中图分类号:** O472 **文献标识码:** A

## STUDY ON RAMAN SPECTRA OF GaMnAs

MA Bao-Shan<sup>1</sup>, WANG Wen-Jie<sup>1</sup>, SU Fu-Hai<sup>1</sup>, DEN Jia-Jun<sup>1</sup>, JIANG Chun-Ping<sup>1</sup>,  
LIU Hai-Lin<sup>2</sup>, DING Kun<sup>1</sup>, ZHAO Jian-Hua<sup>1</sup>, LI Guo-Hua<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;  
2. Department of Physics, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Raman spectra of diluted magnetic semiconductor GaMnAs alloy were reported. The coupled plamon-LO-phonon (CPLP) mode has LO-like polarization properties. With increasing Mn concentration, the CPLP mode shifts to low frequency. The hole density in the alloy was determined from the ratio of the intensity of the CPLP mode to that of the unscreened LO mode in the depletion layer. The hole density increases with the increase of the Mn composition. The Raman spectra of GaMnAs alloy were measured at different temperature. It is confirmed that the hole density in the alloy increases with the increase of the temperature.

**Key words:** GaMnAs; Raman spectrum; coupled plamon-LO-phonon mode; hole density

### 引言

近年来, 基于同时应用电子的自旋与电荷的半导体自旋电子学得到了迅速发展, 其中一个重要的突破是 Ohno 等人用低温分子束外延 (LT-MBE) 方法成功生长出能与现有半导体材料融合的 GaMnAs 等 III-V 族铁磁半导体<sup>[1]</sup>. 在 GaMnAs 中, 二价 Mn 离子取代 Ga 的位置成为受主杂质, 提供了大量空穴, 使得 Mn 磁性离子之间能够产生以空穴为中介的交换作用, 从而使其具有优良的铁磁性<sup>[2]</sup>. 由此可见, 空穴载流子对 GaMnAs 的磁性起着关键的作用. 但在实际实验中要测量它并非轻而易举, 这主要是因

为 GaMnAs 的霍耳效应与传统的半导体材料有着显著的不同. 一般而言, 霍耳电阻率为<sup>[3]</sup>

$$\rho_{xy} = \rho_{xy}^o + \rho_{xy}^a = R_a B + R_a(\rho_{xx}) M \quad (1)$$

其中第一项为正常霍耳效应项, 与载流子浓度成反比; 第二项为反常霍耳效应项, 并不与载流子浓度成反比. 在一般半导体材料中, 正常霍耳效应是主要的, 因此人们可以很方便地用霍耳效应测量载流子的浓度, 而在一般条件下 GaMnAs 的反常霍耳效应是主要的, 这使得要利用霍耳效应去测量空穴浓度变得十分困难.

为此, 人们需要考虑用其它的替代方法测量空穴的浓度, 其中之一是利用 GaMnAs 拉曼光谱中的

收稿日期: 2005-12-01, 修回日期: 2006-02-16

Received date: 2005-12-01, revised date: 2006-02-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60476045, 10334030)

作者简介: 马宝珊 (1971-), 男, 江苏通州人, 中科院半导体所博士研究生, 主要从事半导体光学性质的研究

长波长纵光学声子(LO)振动与空穴集体运动的等离子体激元耦合形成的耦合模(coupled plasmon-LO-phonon modes, CPLP 模)<sup>[4]</sup>随空穴浓度的变化来测定空穴浓度,这种测量空穴浓度的方法在人们早先研究 p 型 GaAs, 如 GaAs;Zn, GaAs;Be 的 CPLP 模时就已得到了较深入的理论与实验研究<sup>[5,6]</sup>,他们发现在这些 p-GaAs 中 CPLP 模并不象一般 n-GaAs 中有两个模,而是只有一个过阻尼模,并且可以通过谱形拟合、与耗尽层 LO 模的强度比等方法得到空穴浓度. 本文则研究了在 GaAs 中掺 Mn 形成的 GaMnAs 合金的拉曼光谱特点,观察到 CPLP 耦合模类似 LO 模的偏振特性,以及它随 Mn 组分的红移,并根据前人的方法计算出空穴的浓度. 我们还测量分析了 GaMnAs 的拉曼光谱的温度行为,观察到空穴浓度随温度的增加而增加.

## 1 样品与实验

实验所用 GaMnAs 样品是在半绝缘(001) GaAs 衬底上用固源 LT-MBE 的方法生长的. 首先在 560℃ 的衬底温度下生长 100nm 厚的 GaAs 缓冲层,然后将衬底温度降到 250℃,并同时打开 Ga、As、Mn 源,生长 200nm 厚的 GaMnAs 外延层. 所生长样品的 Mn 组分通过双晶 X 射线衍射实验测得,为 2.6% ~ 9.3%. 样品生长的细节详见文献 [7]. 用超导量子干涉仪对剩磁的温度变化行为的测量结果表明,所有样品的居里温度都小于 100K<sup>[7]</sup>.

拉曼光谱由 Jobin-Yvon T64000 型拉曼光谱仪测量,采用 3 减模式,用液氮冷却的 CCD 探测信号,其光谱分辨率为  $0.5\text{cm}^{-1}$ ,物镜放大倍数为 50. 激发光源为 Spectra-Physics 公司的 Stabilite 2017 氩离子激光器的 514.5nm 线,样品上的功率小于 10mW. 样品装在 APD-DE202 型氦气循环制冷系统中,温度范围为 10K ~ 300K. 实验配置为背散射配置.

## 2 实验结果与分析

### 2.1 理论模型

在 GaAs 等极性半导体材料中,声子-等离子体激元耦合系统的介电函数为<sup>[5,8]</sup>:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} \left[ 1 + \frac{\omega_L^2 - \omega_T^2}{\omega_T^2 - \omega^2 - i\gamma\omega} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\Gamma\omega} \right], \quad (2)$$

其中  $\omega_T, \omega_L, \gamma$  分别为 TO 声子模频率, LO 声子模频率及其阻尼常数,  $\omega_p, \Gamma$  分别为等离子体激元的频率与阻尼常数,它们分别为

$$\omega_p = \left( \frac{ne^2}{\varepsilon_0 \varepsilon_{\infty} m^*} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

$$\Gamma = \frac{e}{\mu m^*}, \quad (4)$$

其中  $n, \mu, m^*$  分别为载流子的浓度、迁移率与有效质量,  $\varepsilon_0, \varepsilon_{\infty}$  分别为真空介电常数与高频介电常数.

考虑到一般  $\gamma \ll \Gamma$ , 利用式(2)可以推出 CPLP 模 Stokes 线的 Raman 散射速率为<sup>[5]</sup>:

$$I_s(\omega) = \frac{A(n_{\omega} + 1)\Gamma\omega\omega_p^2[\omega_T^2(1 + C_{FH}) - \omega^2]^2}{D\varepsilon_{\infty}}, \quad (5)$$

式中,  $n_{\omega}, C_{FH}$  分别为平均声子数, Faust-Henry 系数.

$$D = [\omega^2(\omega_L^2 - \omega^2) - \omega_p^2(\omega_T^2 - \omega^2) + \gamma\Gamma\omega^2]^2 + [\Gamma\omega(\omega_L^2 - \omega^2) + \gamma\omega(\omega_p^2 - \omega^2)]^2, \quad (6)$$

式(5)即 CPLP 模的谱形公式,  $I_s(\omega)$  的极值频率即 CPLP 模拉曼峰的峰值频率.

当声子阻尼及等离子体振荡阻尼均很小时,  $I_s(\omega)$  有两个极值, CPLP 模有高频支与低频支两支<sup>[4,9]</sup>; 而当等离子体阻尼  $\Gamma$  较大时,  $I_s(\omega)$  将只有一个极值, CPLP 模逐渐变为只有一支过阻尼的耦合模. 在 GaAs 中当  $\Gamma > 100\text{cm}^{-1}$ , CPLP 模就开始这种过阻尼现象, 由两支模变为只有一个模, 其峰值频率随着载流子浓度的增加从接近 LO 的位置向接近 TO 的位置红移<sup>[6]</sup>. 在一般 P 型 GaAs 中, 载流子为空穴, 其迁移率远小于电子迁移率, 根据式(4)可知有较大的阻尼  $\Gamma$ , 其 CPLP 模将只有一个过阻尼模. 要用这个 CPLP 模来测定空穴浓度, 一个直接的方法就是用式(5)去拟合实验测得的 CPLP 模的谱形, 其中  $A, \omega_p, \Gamma, \gamma$  均为拟合参数, 由拟合得到  $\omega_p$  并由式(3)算得空穴浓度<sup>[5]</sup>.

在空穴浓度大于  $10^{18}\text{cm}^{-3}$  时, 也可以通过一种更简单的方法, 即测量 CPLP 模与耗尽层 LO 模的强度比确定空穴的浓度<sup>[10]</sup>. 由于 GaMnAs 有正的表面势  $\phi_B$ , 在表面会形成厚度为  $d$  的耗尽层. 在耗尽层中没有自由载流子, 所以在耗尽层中只能观察到未耦合的 LO 模(ULO 模). 这样, 在样品的拉曼光谱中可以同时观察到 CPLP 模和 ULO 模, 通过它们的强度比可以得到  $d$ . 而耗尽层厚度  $d$  与空穴载流子浓度  $p$  有如下关系:

$$d = \left( \frac{2\varepsilon_0\varepsilon_s\phi_B}{ep} \right)^{1/2}, \quad (7)$$

这里  $\varepsilon_s$  为静电介电常数.

设未掺杂 GaAs 的 LO 模的拉曼散射强度为  $A_0$ , 并近似地认为耗尽层中 LO 模的拉曼散射效率与未

掺杂的 GaAs 相同. 则耗尽层中的 LO 模强度为

$$A_L = A_0(1 - e^{-2\alpha d}) \quad (8)$$

其中  $\alpha$  为材料的吸收系数. 而 CPLP 模的拉曼散射强度为

$$A_p = \frac{A_0}{\xi_s} e^{-2\alpha d} \quad (9)$$

其中  $\xi_s = R/R'$  为 LO 模的拉曼散射效率  $R$  与 CPLP 模的拉曼散射效率  $R'$  之比. 由式(8)与式(9)相比得到耗尽层厚度为:

$$d = \frac{1}{2\alpha} \ln \left( 1 + \frac{\xi_A}{\xi_s} \right) \quad (10)$$

其中  $\xi_A = A_L/A_p$ . 联立式(7)与式(10), 可得空穴浓度为

$$p = \frac{8\varepsilon_0\varepsilon_s\alpha^2\phi_B}{e \left[ \ln \left( 1 + \frac{\xi_A}{\xi_s} \right) \right]^2} \quad (11)$$

必需指出, 上述模型首先是在重掺杂的  $p$  型 GaAs 中建立起来的<sup>[5,6]</sup>, 其中  $p$  型掺杂还没有影响到 GaAs 基体的振动特性. 近年来, 这种模型被应用到 GaMnAs 合金的拉曼散射研究中<sup>[4]</sup>, 合金中 Mn 的组分已经达到百分之几, 这时, GaMnAs 基体已经不再可以认为与 GaAs 相同. 根据合金拉曼散射的双模理论<sup>[9]</sup>, 合金中的振动模式可以分为类 GaAs 模和类 MnAs 模, 在富 GaAs 的组分中, 主要观察到的模式是类 GaAs 模. 它随 Mn 组分的增加逐渐红移<sup>[4]</sup>. 因此对 GaMnAs 中等离子体激元与 LO 声子模的耦合研究中, 模型中的 LO 模通常不再是未掺杂的 GaAs 的 LO 模, 而是 GaMnAs 合金中的类 GaAs 的 LO 模. 同时, 合金无序造成 TO 模的泄漏也会对分析造成一定影响. 在下面的实验结果分析中我们会给出有关的讨论.

## 2.2 实验结果

图 1 (a) 与 (b) 分别示出了 GaAs 体材料与 Mn 组分为 4.2% 的 GaMnAs 样品在四种配置下的拉曼光谱. 这四种配置分别为  $z(x, y)\bar{z}$ ,  $z(x, x)\bar{z}$ ,  $z(x', y')\bar{z}$ ,  $z(x', x')\bar{z}$ . 其中, 坐标轴  $z, x, y, x', y'$  分别沿  $[001], [100], [010], [110], [\bar{1}\bar{1}0]$ , 晶向.

对于闪锌矿结构的 GaAs, 偏振选择定则<sup>[11-14]</sup>表明, 在第 1、第 4 种配置下 LO 峰是允许的, 而在第 2、3 种配置下 LO 峰则是禁戒的. 同时, 在这 4 种配置下 GaAs 的 TO 峰都是禁戒的. 图 1(a) 中 GaAs 体材料的实验结果与偏振选择定则是一致的. 对图 1(b) 中的 GaMnAs 的散射峰, 我们把它分解为高频的耗尽层 LO 峰 (ULO) 与低频的 CPLP 峰 (虚线表

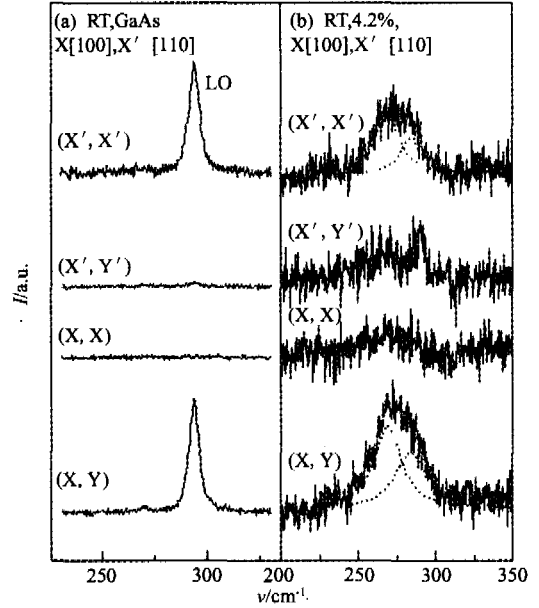


图 1 (a) GaAs 与 (b) GaMnAs 在四种配置下的拉曼光谱

Fig. 1 Raman spectra of (a) GaAs and (b) GaMnAs in four different scattering configurations

示), 可以清楚地看到 CPLP 模与 LO 模具有相同的偏振特性, 即在第一、四种配置下是允许的, 在第 2、3 种配置下是禁戒的. 这一点是不难理解的, 因为 CPLP 模是由 GaAs 的 LO 模与空穴等离子振荡模的耦合而成. 通常, 这也是用来确定所测得的位于 LO 模和 TO 模频率之间的拉曼峰是否为 CPLP 模的检验方法之一. 从图 1(b) 中还可以看到, 在第二种配置下, 仍可以看到弱的 LO 模. 如前一节中的分析所表明的, 这也是反映了 GaMnAs 合金中的混晶和无序效应. 这种效应使选择定则被部分地弛豫了, 原本禁戒的模式得到部分的泄漏. 在 LO 模的低频部分, 也有一个弱的峰, 它可能是包括了部分泄漏的 CPLP 模和部分激活的 TO 模. 通过不同偏振光谱的测量和分析, 我们可以确定, 在所测的样品中观察到的位于 LO 模低频部分的拉曼散射峰是空穴等离子体激元与 LO 模耦合产生的 CPLP 模.

图 2 示出了在  $z(x', x')\bar{z}$  配置下 GaMnAs 拉曼光谱随 Mn 组分的变化. 这里我们已将实际测得的拉曼峰分解为两个洛伦兹型峰, 分别为低频的 CPLP 模与高频的 ULO 模, 如图中虚线所示, 分解过程中得到的数据列于表 1 中, 可以看到, 无论是耗尽层的 ULO 模还是 CPLP 耦合模的拉曼频移均随着 Mn 组分增加而下降. ULO 模随 Mn 组分的红移, 是由于合金效应. 前面已经指出, 在所测的组分范围内, 我们

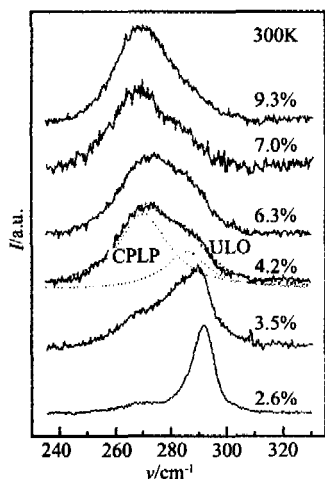


图2 不同 Mn 组分的 GaMnAs 拉曼光谱  
Fig.2 Raman spectra of GaMnAs layers with different Mn concentrations

测到的 ULO 模已经不再是纯 GaAs 的 LO 模,而应该是 GaMnAs 合金中的类 GaAs 模.对于具有双模行为的混晶材料.类 GaAs 的 LO 模会逐渐偏离 GaAs 的 LO 模的频率,并且散射峰的半宽也会逐渐增加.它的谱形也会偏离洛仑兹线形.此外,由于合金无序的影响,在拉曼散射中也会出现一些无序激活的峰<sup>[9]</sup>.如原来禁戒的 TO 模、无序激活的 LA 模、TA 模等.无序激活的 LA 模和 TA 模的频率比 TO 模还要低,在我们讨论的频率范围外.因此不会对我们的谱形分解造成影响.而无序激活的 TO 模和类 GaAs 的 LO 模的线形偏离洛仑兹线形应该对我们的谱形分解造成一定的影响.不过,我们测量的 GaMnAs 合金的组分只到 9.3%,在混晶的拉曼散射中(通常测量组分为 0% ~ 100%),这个组分并不算很大的组分. Limmer 等人<sup>[4]</sup>曾经测量了 GaMnAs 外延片侧面的拉曼光谱.它们观察到的合金中的类 GaAs 的 TO 模基本上还是对称的洛仑兹线形.因此我们在谱形分解中采用洛仑兹线形还是基本合理的.原则上,在谱形分解中还应该包括类 GaAs 的 TO 模.在 2.6% 的样品的谱形分解中,实际上我们已经加入了位于 268cm<sup>-1</sup>附近的 TO 模的成分.而在其它组分的拉曼光谱中,由于 CPLP 模已经覆盖了 TO 模的频率范围,再增加一个 TO 模的谱形来进行谱形分解会使分解的结果更加复杂和不可靠.所以我们在谱形分解中就只用了两个洛仑兹线形.不过由于合金无序造成的泄漏出的 TO 模比较弱,这种近似对下面的分析造成的影响仍比较小.另一方面,CPLP 模也呈现出较大的红移,这种红移可能包括两种因素,其一

表 1 不同 Mn 组分的 GaMnAs 的 CPLP 模与 LO 模的拉曼频移、强度比及空穴浓度

Table 1 Raman shifts of the CPLP mode and LO phonon, Raman intensity ratio between the two Raman modes, and hole density in GaMnAs layers with different Mn concentrations

Mn (%)	ULO (cm <sup>-1</sup> )	CPLP (cm <sup>-1</sup> )	ξ <sub>A</sub>	P(10 <sup>18</sup> cm <sup>-3</sup> )
2.6	292.7 ± 0.1	289.2 ± 0.3	0.796	2.49
3.5	289.1 ± 0.1	276.2 ± 0.9	0.507	5.49
4.2	285.3 ± 0.4	269.9 ± 0.3	0.420	7.71
6.3	285.3 ± 0.4	270.7 ± 0.3	0.382	9.18
7.0	283.2 ± 0.6	267.6 ± 0.3	0.197	31.69
9.3	283.9 ± 0.7	269.3 ± 0.3	0.154	51.17

是合金效应引起的峰位的红移,另一个因素就是空穴载流子浓度的增加造成的 CPLP 模更加向 TO 模的频率靠近.

由 ULO 模与 CPLP 模的强度比可以得到空穴的浓度,表 1 给出了这个强度比,并根据式(11)计算出相应的空穴浓度.这里使用了文献[4,10]中的数据:

$$\xi_s = 2, \phi_B = 0.5, \epsilon_s = 12.8, \alpha = 1.0 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$$

图 3 是所计算的结果.可以看到,随着 Mn 组分的增加,ULO 模强度与 CPLP 强度比急剧减小,相应空穴浓度不断增加.

为了探讨这种通过等离子体激元与 LO 模耦合

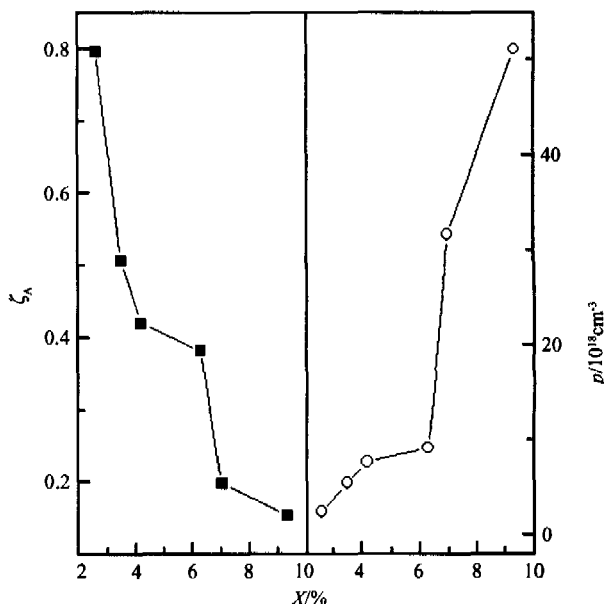


图 3 ULO 模与 CPLP 模强度比 ξ<sub>A</sub> 及空穴浓度 p 随 Mn 组分 x 的变化  
Fig.3 Variations of the Raman intensity ratio between the ULO modes and the CPLP mode and the hole density

的分析能否用来研究 GaMnAs 合金中空穴浓度随温度的变化,我们测量了不同温度下 Mn 浓度为 4.2% 样品的拉曼光谱. 所得的结果在图 4 中示出. 由于测量变温谱要将样品置于低温系统中,这时光谱仪的收集效率较小,测得的拉曼光谱比较弱,信噪比比较差. 但从谱中仍然可以看到,测得的光谱、特别是低温下的光谱在高频端较陡,在低频端则拖得较长. 因而仍能将拉曼谱分解为 ULO 模与 CPLP 模的叠加. 同时我们还看到,随着温度的增加,整个光谱的重心逐渐向低频方向移动. 这种移动在温度高于 100K 后更加明显. 表明随着温度的升高,光谱中 CPLP 模所占的成分逐渐增加,而且 CPLP 模的频率也向 TO 模方向移动. 我们用与上面同样的谱形分解的方法将拉曼峰分解为 ULO 模与 CPLP 模,如图中虚线所示. 通过计算不同温度下的 ULO 模强度与 CPLP 模强度比  $\xi_A$ ,进而可由式(11)得出空穴浓度随温度的变化,其结果如图 5 所示. 可以看到所得的结果比较离散,这主要与测得的光谱的信噪比较差有关. 但仍可以看到,比例  $\xi_A$  在温度大于 100K 后有比较明显的减小,由此算出的空穴浓度也有比较明显的增加. 但由于实验结果的离散比较大还不能完全肯定这种变化是否与样品中顺磁到铁磁的转变有关. 尽管如此,我们的变温散射测量表明,可以通过分析 CPLP 模随温度的变化研究空穴载流子浓度随温度的变化.

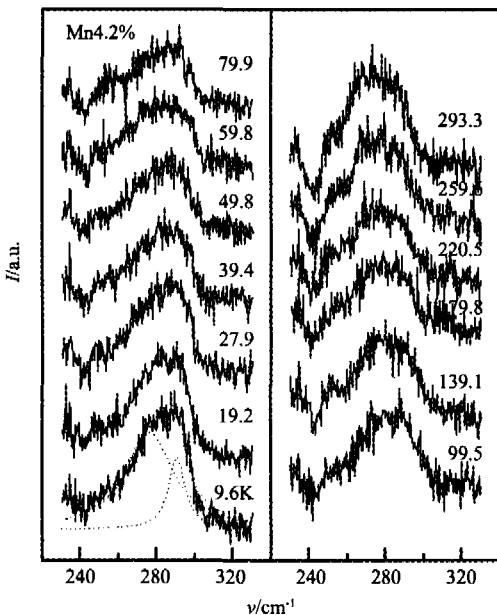


图 4 Mn 含量为 4.2% 的 GaMnAs 在不同温度下的拉曼光谱  
Fig. 4 Raman spectra of GaMnAs with 4.2% Mn at different temperatures

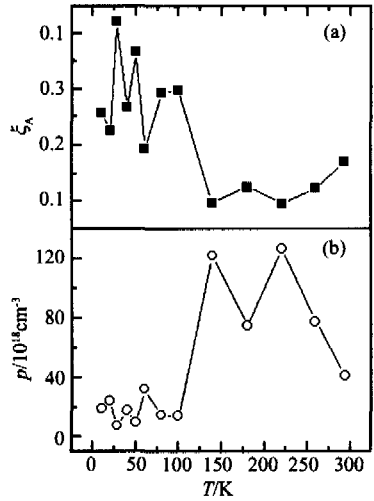


图 5 GaMnAs 中 ULO 与 CPLP 模强度比  $\xi_A$  与空穴浓度  $p$  随着温度的变化  
Fig. 5 Temperature dependence of the Raman intensity ratio between the ULO and the CPLP mode and the hole density

### 3 结论

通过对 Mn 浓度为 2.6% ~ 9.3% 的磁性半导体材料 GaMnAs 的拉曼光谱研究,证实其空穴等离子体振荡与 LO 声子振动耦合形成的 CPLP 模具有类 LO 的偏振特性. 随着 Mn 组分的增加,空穴载流子浓度增加,使得 CPLP 模的拉曼频率红移. 同时,随着 Mn 组分的增加,耗尽层中未屏蔽的 GaMnAs 合金中的类 GaAs 模 (ULO 模) 的频移也逐渐下降. 通过 ULO 模和 CPLP 模的强度比,可以算得 GaMnAs 合金中的空穴载流子浓度. 发现合金中的空穴浓度随 Mn 组分的增加而迅速增加. 还研究了不同温度下 Mn 组分为 4.2% 的 GaMnAs 合金的拉曼散射. 发现随温度的升高,光谱中 CPLP 模所占的成分逐渐增加,而且 CPLP 模的频率逐渐向 TO 模的方向移动. 由谱形分解方法得到的 ULO 模与 CPLP 模的比例随着温度增加而减小,由此算得的空穴浓度随温度增加而增加.

### REFERENCES

[1] Ohno H, Shen A, Matsukura F, *et al.* (Ga, Mn) As: A new diluted magnetic semiconductor based on GaAs. [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69**:363—365.  
 [2] Ohno H. Making nonmagnetic semiconductors ferromagnetic. [J] *Science*, 1998, **281**:951—956.  
 [3] Edmonds K W, Wang K Y, Campion R P, *et al.* Hall effect and hole densities in  $Ga_{1-x}Mn_xAs$  [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**:3010—3012.  
 [4] Limmer W, Glunk M, Mascheck, *et al.* Coupled plasmon-LO-phonon modes in  $Ga_{1-x}Mn_xAs$  [J]. *Phys. Rev.*, 2002,

- B66**,205209.
- [5] Mlayah A, Carles R, Landa G, *et al.* Raman study of longitudinal optical phonon-plasmon coupling and disorder effects in heavily Be-doped GaAs. [J]. *J. Appl. Phys.*, 1991, **69**:4064—4070.
- [6] Imer G, Wenzel M, Monecke J. Light scattering by a multicomponent plasmon coupled with longitudinal-optical phonons; Raman spectra of p-type GaAs:Zn [J]. *Phys. Rev.*, 1997, **B56**:9524—9538.
- [7] DENG Jia-Jun, ZHAO Jian-hua, JIANG Chun-ping, *et al.* Effect of annealing on structural and magnetic properties of a thick (Ga, Mn)As layer [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2005, **22**:466—468.
- [8] LI Zhi-Feng, LU Wei. Raman Spectroscopy study on LO phonon-plasmon coupled mode in GaN thin films [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (李志锋, 陆卫. 氮化镓薄膜中 LO 声子-等离子体激元耦合模拉曼光谱研究. *红外与毫米波学报*) 2003, **22**(1):8—12.
- [9] SHEN Xue-Chu. *Spectroscopy and Optical Properties of Semiconductors* [M]. Second Edition. Beijing: Scientific and Technology Press (沈学础. 半导体光谱和光学性质. 第二版. 北京: 科学出版社) 2002.
- [10] Seong M. J, Chun S H, Cheong H M, *et al.* Spectroscopic determination of hole density in the ferromagnetic semiconductor  $Ga_{1-x}Mn_xAs$  [J]. *Phys. Rev.*, 2002, **B66**, 033202.
- [11] ZHANG Guang-Yan, LANG Guo-Xiang, WANG Yu-Fang. *Lattice Vibration Spectroscopy* [M]. Second edition. Beijing: Higher Education Press (张光寅, 蓝国祥, 王玉芳. 晶格振动光谱学. 第二版. 北京: 高等教育出版社), 2001.
- [12] MA Bao-Shan, FAN Zai-Li, SU Fu-Hai, *et al.* Study on the Raman spectra of GaP nanorods synthesized within carbon nanotube templates [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (马宝珊, 方再利, 苏付海, 等. 纳米碳管模板法制取的 GaP 纳米棒拉曼光谱研究. *红外与毫米波学报*) 2003, **22**(1):1—7.
- [13] JIANG De-Sheng, LIU Jian-Ping, YANG Hui. Investigations on optical properties of AlGaInN epilayers grown by MOCVD [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (江德生, 刘建平, 杨辉. MOCVD 生长 AlGaInN 外延层的光学性质研究. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(3):193—197.
- [14] FENG Qian, WANG Feng-Xiang, HAO Yue. Comparative analysis of characteristics of GaN and GaN: Mg films grown by MOCVD [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (冯倩, 王峰祥, 郝跃. MOCVD 生长 GaN 和 GaN: Mg 薄膜的对比研究. *红外与毫米波报*), 2004, **23**(3):201—204.

(上接第 194 页)

- by principal component analysis and BP model [J]. *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 2005, **3809**:1053—1056.
- [4] SUN Su-Qin, TANG Jun-Ming, YUAN Zi-Min, *et al.* Discrimination of trueborn tuber dioscoreae by fingerprint infrared spectra and principle component analysis [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (孙素琴, 汤俊明, 袁子民, 等. 道地山药红外指纹图谱和聚类分析的鉴别研究. *光谱学与光谱分析*), 2003, **23**(2):258—260.
- [5] YIN Qiu, SU Xiao-Zhou, XU Zhao-An, *et al.* Analysis on the ultra-spectral characteristics of water environmental parameters about lake [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (尹球, 疏小舟, 徐兆安, 等. 湖泊水环境指标的超光谱响应特征分析. *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(6):427—435.
- [6] HE Yong, ZHANG Yun, XIANG Li-Guo. Study of application model on BP neural network optimized by fuzzy clustering [J]. *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 2005, **3789**:712—720.
- [7] Lin Sao-Hu, Zhu Hong, Zhao Yi-Gong. Model for sea clutter based on neural network [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (林三虎, 朱红, 赵亦工. 基于神经网络的海杂波模型. *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(1):55—58.