

稀磁半导体 $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 的 巨法拉第旋转和激子能量

王学忠 王荣明 刘继周 陈辰嘉
(北京大学物理系, 北京, 100871)

W. Giriat

(Centro de fisica, Instituto Venezolano de Investigaciones Cientificas,
Apartado 21827, Caracas 1020A, Venezuela)

摘要 在 90~300K 温度范围测量和研究了组分为 $0.2 \leq x \leq 0.6$ 的稀磁半导体 $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 的法拉第旋转随入射光子能量和组分的变化. 利用单振子模型获得了激子能量与组分的关系. 还研究了法拉第旋转随温度的变化, 得到激子能量的温度系数为 $-7.3 \times 10^{-4} eV/K (x=0.3)$, 首次从法拉第旋转测量获得了该晶体的居里温度.

关键词 稀磁半导体, 巨法拉第旋转, 激子能量.

引言

在稀磁半导体(DMS)或半磁半导体(SMSC) $A_{1-x}^{II}Mn_xB^VI$ 合金(如 $Cd_{1-x}Mn_xTe$, $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 晶体)中, Mn^{2+} 与导带类 s 和价带类 p 电子间很大的自旋耦合交换相互作用(也称 sp-d 交换作用)使有效 g 因子 g_{eff} 比普通半导体大 2~3 个数量级. 在宽禁带 DMS $A_{1-x}^{II}Mn_xB^VI$ 中, 由于 sp-d 交换作用引起的极大塞曼分裂比通常的 sp 能带理论推断的朗道和自旋分裂大很多, 导致了巨法拉第旋转^[1]. 激子跃迁对巨法拉第旋转起到重要作用^[1,2]. 低组分 $Zn_{1-x}Mn_xTe (x \leq 0.1)$ 晶体的法拉第旋转已有报道^[2]. 在低组分范围, 已发展了一种多振子模型描述法拉第旋转, 即除了基本带隙 Γ 点外, 还包括布里渊区的 L 和 X 点的带间跃迁对法拉第旋转的贡献^[3]. 对于 $x \leq 0.45$ 的 $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 晶体, 已有报道用压电调制反射谱获得激子能量^[4].

本文报道了在 90~300K 温度范围内, 较高组分 $Zn_{1-x}Mn_xTe (0.2 \leq x \leq 0.6)$ 晶体的巨法拉第旋转测量结果, 并用只包括基本带隙的激子跃迁对法拉第旋转贡献的单振子激子模型描述实验结果, 获得了激子能量 E_0 随组分 x 的变化规律. 同时还研究了法拉第旋转的温

•国家自然科学基金资助项目

本文 1994 年 8 月 9 日收到, 修改稿 1994 年 8 月 30 日收到

度关系,并首次由测量法拉第旋转获得 $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 的居里温度.

1 原理和实验

$Zn_{1-x}Mn_xTe$ 单晶样品用 Bridgman 方法生长. 样品置于电磁铁间, 磁场强度 $B \leq 0.3T$. 起偏器和检偏器互为 45° . 用单光栅单色仪及卤钨灯作为单色光源. 透射光用光电倍增管和锁相放大器检测. 法拉第旋转角由下式确定:

$$\sin(2\theta_F) = |I_+ - I_-| / pI,$$

其中 $p = (I_{//} - I_{\perp}) / (I_{//} + I_{\perp})$, I 是零磁场下透过的光强, I_+ 和 I_- 分别为确定正负磁场下透过的光强, $I_{//}$ 和 I_{\perp} 分别为检偏器旋转一周透过光强的极大和极小值. 通常, 法拉第旋转角 θ_F 表示为

$$\theta_F = \frac{El}{2\hbar c} (n_- - n_+), \quad (1)$$

其中 E 为入射光子能量, l 为样品厚度, c 是真空中光速, n_{\pm} 分别对应于左、右旋圆偏振光的折射率.

对于宽禁带 DMS (如 $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 等) 晶体, 法拉第旋转角通常比非磁半导体 $ZnTe$ 大很多, 并且符号相反. 一般而言, 对法拉第旋转有贡献的可能电子跃迁包括: 激子、带间、带内跃迁以及与 Mn^{2+} 离子内部能级、杂质、晶格缺陷等有关的跃迁过程. 已有的研究表明, 对低组分 ($x \leq 0.1$) 的 $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 晶体, 离吸收边较远时, 其法拉第效应具有小的正旋转角^[2], 随组分 x 增大, 由于 sp-d 交换作用对激子的影响而产生的负旋转角将补偿其正旋转角. 在单振子激子模型中, 振子完全由 sp-d 交换作用决定的塞曼分裂所贡献, 法拉第旋转在整个光谱范围内都为负值. 对于较高组分 ($0.2 \leq x \leq 0.6$), 我们认为激子跃迁对法拉第旋转的贡献是主要的, 外磁场引起的巨自旋分裂是引起 $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 法拉第旋转增大的关键因素. 因此, 我们用只包含带间激子跃迁的单振子激子模型^[2,5]讨论和分析本实验的法拉第旋转结果. 在单振子模型近似下, 法拉第旋转角 θ_F 为

$$\theta_F = \frac{\sqrt{F_0}l}{2\hbar c} \cdot \frac{E^2}{(E_0^2 - E^2) \cdot \Delta E_0}, \quad (2)$$

其中 F_0 为与激子跃迁振子强度相关的参量, ΔE_0 是左、右旋圆偏振下观测到的激子跃迁的能量差, E 为入射光子能量, 因此 Verdet 常数为

$$V(E) = D \cdot \frac{E^2}{(E_0^2 - E^2)^{3/2}}, \quad (3)$$

其中

$$D = \frac{\sqrt{F_0}}{2\hbar c} \cdot \frac{\partial \Delta E_0}{\partial H}. \quad (4)$$

2 结果和讨论

在 90K 温度下, 不同组分 $Zn_{1-x}Mn_xTe$ ($x=0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$) 的 Verdet 常数随入射光子能量变化的典型结果如图 1 所示. 图中圆点为实验结果, 曲线为用单振子模型对实验结果的最佳拟合 (D 和 E_0 为拟合参量, 其误差分别为 $\pm 5\%$ 和 $\pm 5meV$). 对于确定的组分 x , 在整个光谱范围, Verdet 常数随入射光子能量增加, 并为负值. 应指出的是, 实验中未能测得 2.15eV 以上的法拉第旋转谱 (见图 1), 这是由于 Mn^{++} 离子内部能级 ${}^6A_1 \rightarrow {}^4T_1$ 的强烈吸收所致, 因而不能测得很接近激子基本吸收边附近的数据, 但单振子模型仍与实验结果很好吻合. 由拟合获得的 90 和 300K 下激子能量与 $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 组分 x 的关系如图 2 所示, 图中圆点是我们的实验结果, “ \times ”号为文献[4]结果. 激子能量随组分 x 线性变化, 可表示为

$$E_0(eV) = 2.28 + 0.53x, \quad (300K)$$

$$E_0(eV) = 2.36 + 0.70x. \quad (90K)$$

我们获得的激子能量与压电调制反射结果^[4]一致, 见图 2. 这一事实进一步说明: 对 $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 晶体, 在我们研究的组分范围内, 激子跃迁起到主要作用. 另外, 由图 1 可见, Verdet 常数先随组分 x ($0.2 \leq x \leq 0.4$) 增加而增大, 然后随 x 增加而减小 ($0.4 \leq x \leq 0.6$), 这一现象反映了 Mn^{++} 离子间反铁磁相互作用和这种作用随组分 x 增大.

在 90~300K 范围内, 研究了法拉第旋转随温度的变化. 当温度降低时, sp-d 交换作用

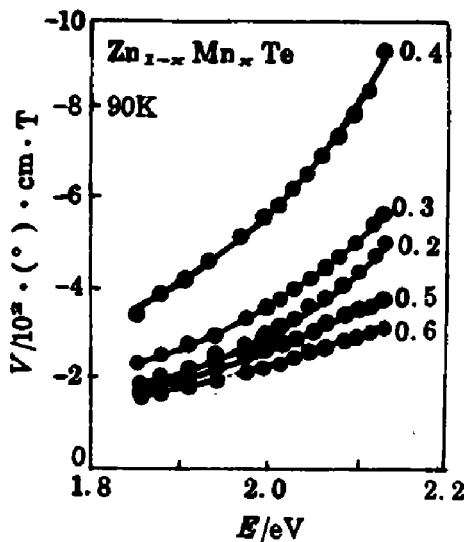


图 1 $T=90K$ 下不同组分 $Zn_{1-x}Mn_xTe$ ($x=0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$) 的 Verdet 常数随入射光子能量变化
Fig. 1 Verdet constant as a function of photon energy at 90K for $Zn_{1-x}Mn_xTe$ with different compositions ($x=0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$).

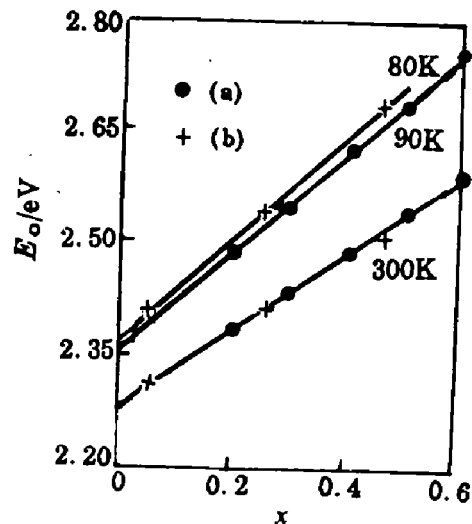


图 2 300K 和 90K 下, $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 的激子能量与组分的关系
Fig. 2 Exciton energy as a function of composition for $Zn_{1-x}Mn_xTe$ at 90K and 300K

增强,因而 Verdet 常数增大. 图 3 为 $x=0.3$ 的样品在不同温度(90、160、300K)下法拉第旋转随入射光子能量变化的典型结果. 图中圆点为实验结果,曲线为单振子激子模型与实验结果的最佳拟合.

激子能量 E_0 随温度变化如图 4 所示,在所研究的温度范围内,激子能量随温度线性变化,对 $x=0.3$ 的样品,其温度系数 $dE_0/dT = -7.3 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$. 不同组分样品的实验结果表明,温度系数随组分 x 增大而增大,这种变化趋势与 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 结果^[5]相同,但其相应的数值大于后者.

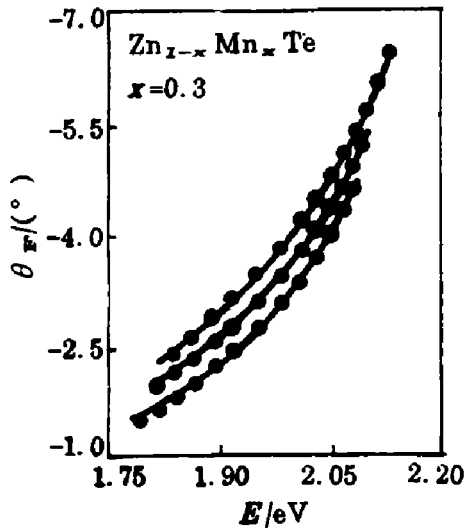


图 3 在 90K、160K 和 300K 下 $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ ($x=0.3$) 的法拉第旋转与光子能量的关系
Fig. 3 Faraday rotation versus photon energy for $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ with $x=0.3$ at 90K, 160K and 300K, respectively

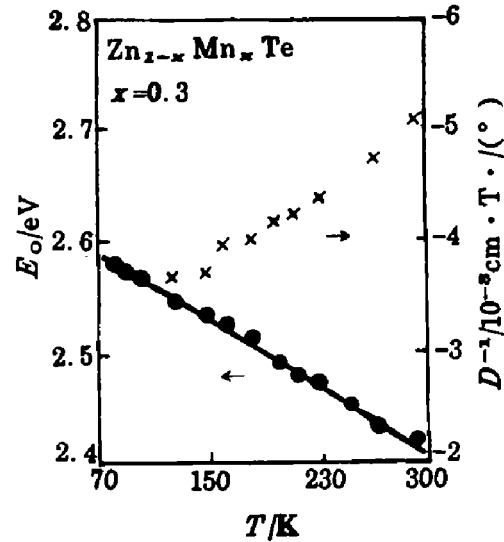


图 4 $x=0.3$ 的 $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 的激子能量和 D^{-1} 与温度的关系
Fig. 4 Exciton energy and D^{-1} versus temperature for $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ with $x=0.3$

在高温区,磁化强度 M 随磁场 H 线性变化,磁化率 χ 遵循 Curie-Weiss 定律,因此,对 $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$,式(3)中单振子参量 D 可表示为^[5]

$$D = \frac{35}{12} \cdot \frac{\sqrt{F_0}}{2hc} \frac{g_{\text{Mn}} \mu_B N_0 (\beta - \alpha) x}{k_B (T + \Theta_0 x)}, \quad (5)$$

其中 α 和 β 分别为导带和价带电子的交换积分, $g_{\text{Mn}} = 2$ 为 Mn^{++} 离子的 g 因子, μ_B 为玻尔磁子, N_0 是单位体积内的元胞数,可见 $D^{-1} \propto T + \Theta_0 x$. 因此,由法拉第旋转与温度关系的测量可获得相应晶体的居里温度 Θ_0 . 对 $x=0.3$ 的 $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 样品,其 D^{-1} 随温度的变化如图 4 所示,图中“ \times ”号为实验数据与单振子模型的最佳拟合结果. 由此获得的居里温度 $\Theta_0 = -827\text{K}$,这与由磁化率测量结果 $(-831 \pm 63\text{K})$ ^[6]一致,这表明巨法拉第效应是研究稀磁半导体的一种有效手段.

3 结论

对较高组分 ($0.2 \leq x \leq 0.6$) $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 的法拉第效应的研究表明,单振子激子模型能很好地描述其巨法拉第效应.在所研究的温度和组分范围内,激子能量随组分 x 线性变化.获得了激子能量的温度系数,并首次由测量法拉第效应获得了 $Zn_{1-x}Mn_xTe$ 的居里温度.这些都表明,在研究的组分和温度范围内,激子跃迁对巨法拉第效应的贡献起到决定性的作用.

参考文献

- 1 Furdyna J K. *J. Appl. Phys.*, 1988, **64**:R29
- 2 Bartholomew D U, *et al. Phys. Rev.*, 1986, **B34**:6943
- 3 Jimenez-Gonzalez H J, *et al. Phys. Rev.*, 1992, **B45**:14011
- 4 Lee Y R, *et al. Proceedings of the 18th International Conference on the Physics of Semiconductors*, Stockholm, Sweden, 1986:1759
- 5 王学忠,陈辰嘉,王荣明,等. *半导体学报*, 1994, **15**:333
- 6 Spalek J, *et al. Phys. Rev.*, 1986, **B33**:3407

GIANT FARADAY ROTATION AND EXCITON ENERGY IN DILUTED MAGNETIC SEMICONDUCTOR $Zn_{1-x}Mn_xTe$ *

Wang Xuezhong Wang Rongming Liu Jizhou Chen Chenjia

(Department of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

W. Giriat

(Centro de Fisica, Instituto Venezolano de Investigaciones Cientificas, Apartado 21827, Caracas 1020A, Venezuela)

Abstract Faraday rotation as a function of photon energy and composition was measured and studied for $Zn_{1-x}Mn_xTe$ with $0.2 \leq x \leq 0.6$ at a temperature range from 90K to 300K. Exciton energy as a function of composition was obtained by using a single-oscillator model. Faraday rotation as a function of temperature was investigated. The temperature coefficient of the exciton energy was found to be $-7.3 \times 10^{-4} eV/K$ for $x=0.3$. The Curie temperature was obtained from Faraday rotation measurement for the first time.

Key words diluted magnetic semiconductors, giant Faraday rotation, exciton energy.

*The project supported by the National Natural Science Foundation of China