

窄禁带半磁半导体 $Hg_{1-x}Mn_xTe$ 的磁化强度*

陈辰嘉 王学忠 刘继周

(北京大学物理系, 北京)

R. R. Gałazka

(波兰科学院物理研究所)

1988年3月3日收到

本文报道用提拉法测量 $Hg_{1-x}Mn_xTe$ 单晶磁化强度的实验结果。在低温 1.5K—30K 范围内, 磁场强度为 0—7 万高斯下, 测量了不同组分 $x = 0.06, 0.08, 0.12, 0.16$ 的 $Hg_{1-x}Mn_xTe$ 磁化强度与组分, 温度和磁场强度的关系。采用分子场近似模型, 用类布里渊函数, 最小二乘法对实验结果进行了拟合和分析。结果表明在本文 x 值范围内, 理论与实验符合较好, 证实了锰离子间存在强的反铁磁交换耦合。

主题词: 磁化强度, 窄禁带半磁半导体, 交换相互作用, 锰离子集团, 类布里渊函数

在窄禁带的半磁半导体 (Semimagnetic Semiconductor——SMSC) $Hg_{1-x}Mn_xTe$ 中, 由于局域的 Mn 离子的 $3d^5$ 电子与能带中迁移载流子(电子或空穴)间自旋-自旋交换相互作用, 使 SMSC 的载流子行为强烈受温度和外磁场的影响, 因而其运输过程, 光学和磁光性质等在低温和磁场下出现与普通半导体不同的许多独特的性质, 导致产生一系列新的物理现象^[1], 近年来受到了人们的重视。在 SMSC 中, 通常可通过引入自旋热平均 $\langle S_z \rangle$ 正比于宏观体磁化强度 $M(T, H)$ 来描述改变了的载流子行为。为了对 $Hg_{1-x}Mn_xTe$ 的磁性质进行深入研究, 对其磁化强度的测量^[2], 乃是最基本的方法。

在磁场下, SMSC 体系的磁化强度可由下式给出:

$$M = -N_s g_{Mn} \mu_B \langle S_z \rangle \quad (1)$$

式中 N_s 是 $Hg_{1-x}Mn_xTe$ 中 Mn^{++} 离子数/克, g_{Mn} 是锰离子朗道 g 因子, $g_{Mn} = 2.001 \pm 0.001$, μ_B 是玻尔磁子, $\langle S_z \rangle$ 是 Mn^{++} 离子的总自旋 S 在磁场 Z 方向的热平均, 由下式给出

$$\langle S_z \rangle = -SB_z \left(\frac{g_{Mn}\mu_B SH}{kT} \right), \quad (2)$$

$S = 5/2$, 为 Mn^{++} 离子的总自旋, k 是玻尔茨曼常数, T 是温度。 $B_z(Z)$ 是布里渊函数,

* 国家自然科学基金委员会科学基金和第三世界科学院研究资助的课题。

可表为:

$$B_s(Z) = \frac{2S+1}{2S} \coth\left(\frac{2S+1}{2S} Z\right) - \frac{1}{2S} \coth\left(\frac{Z}{2S}\right) \quad (3)$$

当 Mn^{++} 离子含量较高时, 包括单个锰离子, 最近邻锰离子对, 三个锰离子等的小集团近似模型的假设不都再成立, Mn^{++} 离子将组成更大尺寸的、反铁磁束缚的集团。根据分子平均场理论, 可通过经验的类布里渊函数来描述^[3]

$$\langle S_z \rangle = -S_0 B_{5/2} \left(\frac{5}{2} - \frac{g_M \mu_B H}{k(T + T_0)} \right) \quad (4)$$

S_0 是单位自旋有效磁矩, $T_{eff} = T + T_0$ 为有效温度, H 为磁场强度, S_0 和 T_0 是拟合参数, 由实验测量磁化强度结果与(1)、(4)式相比较, 采用最小二乘法拟合求得。磁化强度理论值可表为:

$$M(H, T) = C_1 B_s(Z) + C_2 \quad (5)$$

式中 $C_1 = S_0 g_{Mn} \mu_B N_A$, C_2 为拟合参数。

$Hg_{1-x}Mn_xTe$ 在本文所研究的组分和温度范围属顺磁相互作用区域。大多数顺磁物质的磁化率 χ 与温度 T 的关系服从居里-外斯 (Curie-Weiss) 定律。

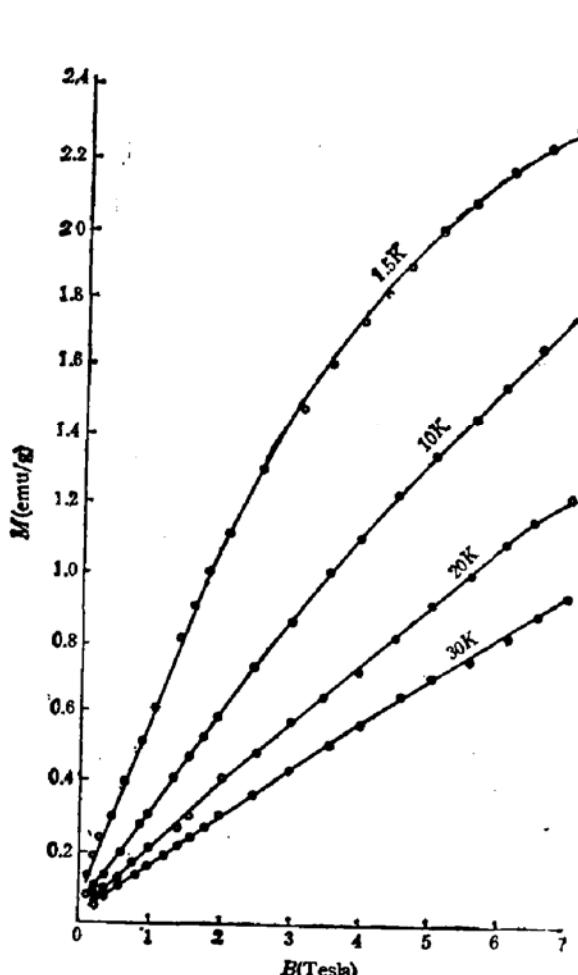


图 1 不同温度下 $Hg_{1-x}Mn_xTe$ 磁化强度与磁场强度关系曲线 $x = 0.16$, ○点为实验值, 曲线为理论值

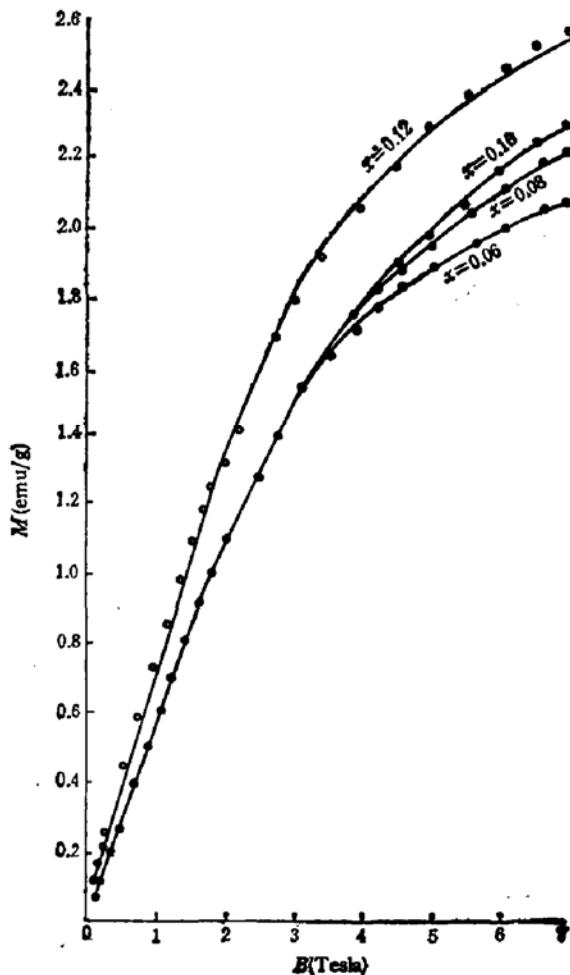


图 2 $T = 1.5K$ 下不同组分 $Hg_{1-x}Mn_xTe$ 磁化强度与磁场关系曲线, ○点为实验值, 曲线为理论值

$$\chi = \frac{P}{T + \theta} + \chi_0 \quad (6)$$

式中 θ 为临界温度, P 和 χ_0 均为拟合参数。如果磁化率在所测量温度范围服从上述居里-外斯定律, 对局域磁矩间的反铁磁相互作用, 参数 P 可表为:

$$P = \frac{N_{eff}S(S+1)g_{Mn}^2\mu_B^2}{3k}, \quad (7)$$

式中 N_{eff} 为 $Hg_{1-x}Mn_xTe$ 中有效磁离子数/克, 可以拟合中决定其值。

$Hg_{1-x}Mn_xTe$ 单晶样品用改进的 Bridgman 方法生长。由波兰科学院物理研究所提供。样品组分 $x = 0.06, 0.08, 0.12, 0.16$, 用密度法测定。用提拉法测量磁化强度, 磁场强度从零至 7 特斯拉连续变化, 温度在 1.5K 至 30K 范围, 测量的全过程由微机自动控制进行。图 1 表示对确定 x 组分的 $Hg_{1-x}Mn_xTe$ 磁化强度 M 在不同温度与磁场强度的关系曲线。图 2 表示低温 1.5K 下不同 x 组分的 $Hg_{1-x}Mn_xTe$ 磁化强度与磁场强度的关系曲线。图中圆点为实验结果, 曲线为根据(5)式与实验拟合的理论曲线。拟合的参数见表 1。

表 1 用类布里渊函数对 $Hg_{1-x}Mn_xTe$ 磁化强度拟合的参数

$x = 0.16$					$T = 1.5K$					
$T(K)$	C_1 (emug^{-1})	S_0	$T_0(K)$	C_2 (10^{-3}emug^{-1})	x	C_1 (emug^{-1})	S_0	$T_0(K)$	C_2 (10^{-3}emug^{-1})	x'
1.5	2.71	0.46	6.1	7.7	0.06	2.30	1.04	4.59	9	0.025
10.3	3.13	0.57	6.5	3.1	0.08	2.54	0.87	5.50	10	0.028
10.6	4.13	0.71	14.8	2.6	0.12	2.83	0.64	4.83	10	0.031
					0.16	2.71	0.46	6.11	7.7	0.029

表 1 中 x' 表示有效组分值, 由 $S_0x = Sx'$ 决定。

图 3 表示 $x = 0.16$ 的 $Hg_{1-x}Mn_xTe$ 样品在低温, 高场下磁化率倒数 χ^{-1} 与温度变化关系曲线。磁场强度分别为 0.6, 3, 5, 6.9 特斯拉时, 与居里-外斯表达式 (6), (7) 进行了拟合。表 2 给出温度为 1.5—30K 范围内的拟合参数 P, θ, χ_0 。

从图 1, 2 得到的结果表明实验与理论值符合得较好, 参数 T_0 随温度和 x 组分的增加而增大。 S_0 值随温度增加而增大且随 x 组分增加而减小, 比 $S = 5/2$ 值小得多。这是由于随着 x 组分增大, 愈来愈多的 Mn^{++} 离子形成了强的反铁磁序排列的集团, 从而使有效磁矩大大降低。例如 $x = 0.16$ 样品的磁化强度就比 $x = 0.12$ 的为小, 其有效组分值 x' 仅为 0.029, 与 $x = 0.06, 0.08$ 样品的有效组分值基本为同一量级。(见表 1) 有效温度

表 2 $Hg_{1-x}Mn_xTe$ 磁化率 χ 的参数。 $1.5K \leq T \leq 30K, x = 0.16, N_s = 3.16 \times 10^{20}/\text{克}$

$B(\text{Tesla})$	$P(10^{-4}\text{emug}^{-1})$	$\theta(K)$	$\chi_0(10^{-6}\text{emug}^{-1})$	$N_{eff}(\text{g}^{-1})$
0.6	5.8	7.3	-1.7	8.0×10^{19}
3	5.5	10.4	-1.1	7.59×10^{19}
5	7.3	16.8	-0.8	1.01×10^{20}
6.9	8.1	21.4	-1.3	1.18×10^{20}

$(T_{\text{eff}} = T + T_0)$ 较实际温度 T 为大也同样反映了 Mn^{++} 离子间存在反铁磁型的相互作用。与文献[3]所得的 S_0 , T_0 值相比, 变化的趋势是一致的。

从图 3 表明在低温范围, 实验结果与居里-外斯表达式符合得很好。说明局域磁矩间存在强的反铁磁的相互作用。在低温, 磁场强度为 0.6T 至 6.9T 范围内, 有效磁离子数 N_{eff} 仅为通常 N 的 $25\%-37\%$ 。从磁化率的测量反映了样品中的实际有效 Mn^{++} 浓度。表 2 中 χ_0 为负值, 其数值量级与 HgTe 的磁化率的抗磁部分相当, 可能对应于 HgTe 系统的抗磁贡献^[4]。

本文结果说明在测量的 χ 值范围内, 可用分子场近似模型, 类布里渊函数描述磁化强度与组分, 温度, 磁场强度的关系; $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 的 Mn^{++} 离子间存

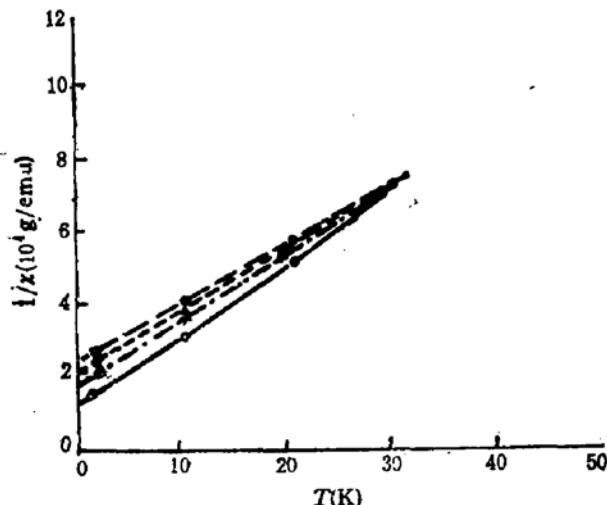


图 3 不同磁场强度下 $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 磁化率倒数 $1/\chi$ 与温度关系曲线
 $x = 0.16, 1.5\text{K} \leq T \leq 30\text{K}$
 $\circ : B = 0.6\text{T}, + : B = 3\text{T}, \Delta : B = 5\text{T}, \bullet : B = 6.9\text{T}$.
 曲线表示理论值

在强的反铁磁交换耦合。实验数据和所确定的拟合参数对了解和解释 $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 中的电学性质, 输运过程, 磁光, 量子振荡等现象都将是十分有用的。

刘尊孝, 兰健同志协助进行实验测量; 李晓明, 江玉磊同志进行了部分拟合计算, 作者对他们表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] 陈辰熹, 物理, 17, 462(1988).
- [2] W. Dobrowolski, M. von Orbenberg, A. M. Sandauer, R. R. Gałazka, A. Mycielski and R. Pauthenet, Physics of Narrow-Gap Semiconductors, Proceedings Linz 1981, Lecture Notes in Physics 152. (Edited by E. Gornik, H. Heinrich, L. Palmetshofer) p. 302—306. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1982).
- [3] J. A. Gaj, R. Planet and G. Fishman, Solid State Commun., 28, 435(1979).
- [4] V. I. Ivanov-Omskii, B. T. Kolomiets, V. M. Melnik and V. K. Ogorodnikov, Sov. Phys. Sol. State, 11, 2076(1969).

Magnetization of Narrow GaP Semimagnetic Semiconductor $Hg_{1-x}Mn_xTe$

Chen Chenjia, Wang Xuezhong, Liu Jizhou

(Department of Physics, Peking University, Beijing)

R. R. Gałazka

(Institute of Physics, Polish Academy of Sciences)

Abstract

The magnetization measurements of $Hg_{1-x}Mn_xTe$ for samples with $x=0.06, 0.08, 0.12, 0.16$ in the temperature range 1.5K to 30K and magnetic fields up to 7T have been carried out by using the extraction method. Based on the mean field theory, a modified Brillouin function is fitted with the data very well over the entire range. The inverse susceptibility is shown a Curie-Weiss behavior even at high field with a paramagnetic Curie temperature and indicates that there is an antiferromagnetic exchange coupling among Mn ions.

KEY WORDS: Magnetization, Narrow-gap semimagnetic semiconductor, Exchange interaction, Mn^{++} ions cluster, Modified Brillouin function