

# 半磁半导体 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 的 磁光开关效应\*

刘继周 王传敏 王学忠 陈辰嘉

(北京大学物理系, 北京, 100871)

**摘要:** 在半磁半导体  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  中实现了不需改变施加磁场方向的新型磁光开关效应, 该效应是由  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  的巨大法拉第效应和磁光反馈系统的饱和特性产生的. 讨论了该效应用于光控、温控磁光开关及混合型磁光光学双稳态的可能性.

**关键词:** 半磁半导体, 磁光反馈, 巨大法拉第效应.

## 引言

磁光开关效应通常是利用法拉第效应、改变加在样品上的磁场方向来实现的. 1977 年, P. W. Smith<sup>[1]</sup>提出混合型光学双稳态的概念, 后来又有人利用不同手段取代 F-P 腔同样实现了新的混合型光学双稳. 1978 年, E. Garmire<sup>[2]</sup>用  $\text{LiNbO}_3$  电光晶体, 在两端加上偏振元件构成电光调制器, 通过加在晶体上的反馈电压产生由入射线偏振光光强控制的非线性输出, 而加在晶体上的反馈电压是由输出的部分光强经光电转换反馈给晶体的. 利用该非线性输出及光电反馈, 实现了在入射光强连续变化情况下由低通态跳到高通态的电光开关效应.

半磁半导体  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  最引人注目的磁光特性是它的巨大法拉第效应<sup>[3]</sup>, 尤其是在带边附近, 其费尔德系数比普通半导体大 2~3 个数量级. 选用适当的  $x$  值使其带隙与所用光源的光子能量匹配, 可获得巨大的法拉第旋转. 如果将一对偏振元件置于样品两端, 将样品放在电流可调的磁场线圈内, 可实现电流调制的非线性输出, 再用输出的部分光强产生的电信号经光电转换、放大后调制磁场线圈实现磁反馈, 可实现磁光反馈非线性输出. 本文报道了在半磁半导体  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  中实现的新型磁光开关效应的实验结果.

## 1 实验

实验装置如图 1 所示, 用 ~10 mW 的 He-Ne 激光作为光源, 其入射到样品上的光强

本文 1992 年 10 月 28 日收到, 修改稿 1993 年 2 月 6 日收到.

\* 国家自然科学基金资助项目.

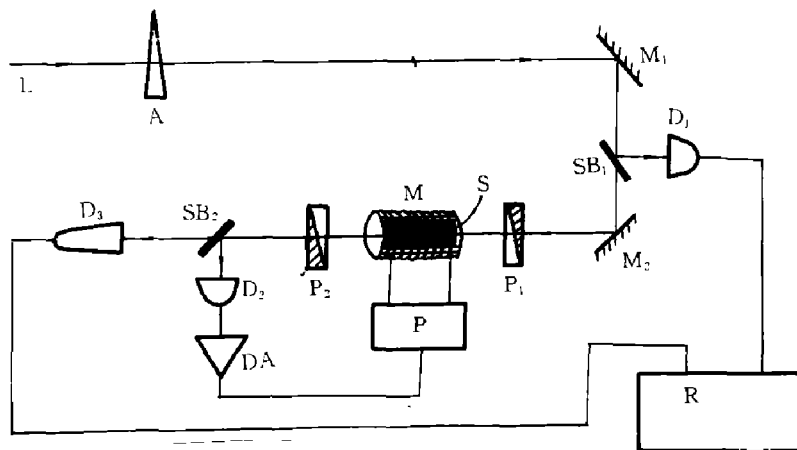


图 1 实验装置

L: He-Ne 激光, A: 光强衰减器,  $M_1, M_2$ : 全反镜,  $SB_1, SB_2$ : 分束器,

$D_1, D_2$ : 光电二极管, DA: 放大器, P: 磁场电源,  $P_1$ : 起偏器,

$P_2$ : 检偏器, M: 磁场, S: 样品, R:  $x-y$  记录仪,  $D_3$ : 光电倍增管

Fig. 1 Experimental apparatus

由衰减器 A 连续可调. 入射光经过分束器  $SB_1$  后, 一束由光电二极管  $D_1$  接收, 产生的电信号驱动  $x-y$  记录仪的  $x$  轴作为入射检测; 另一束经由起偏器  $P_1$ 、样品 S、检偏器  $P_2$  构成的磁光调制器后, 再经分束器  $SB_2$  分束, 其中一束进入光电倍增管  $D_3$ , 其电信号驱动  $x-y$  记录仪  $y$  轴作为透射检测, 而另一束由光电二极管  $D_2$  接收, 经光电转换, 放大后输出的电信号调制磁反馈电源. 当入射光强连续改变从而出射光强也连续改变时, 由该输出的部分光强调制的反馈电源将调制加在样品上的磁场, 实现部分输出光强调制的磁反馈. 所用样品是  $2 \times 2 \times 8 \text{ mm}^3$  的长方体柱, 两端面光学抛光,  $x = 0.45$ , 费尔德系数为  $0.16 \times 10^{-4} \text{ }^\circ/\text{cm} \cdot \text{T}$ .

## 2 理论分析

具有一对偏振元件的磁光调制器和分束器组成传输系统. 光电接收器、放大器和调制磁场组成磁光反馈系统, 除反馈系统的饱和区外, 它们分别具有线性和时间平移不变的特点, 其动态行为分别由下列方程描述<sup>[4]</sup>

$$\tau_1 \dot{y}(t) = -y + T(\varphi)x, \quad (1)$$

$$\tau_2 \dot{\varphi}(t) = -(\varphi - \varphi_0) + ky. \quad (2)$$

式中  $\tau_1, \tau_2$  分别为传输系统和反馈系统的时间常数;  $x, y$  分别为总系统的输入和输出;  $k$  为反馈系统的传输系数, 取  $k > 0$ ;  $T(\varphi)$  为磁光调制器的透射率函数;  $\varphi$  为控制磁光调制器即反馈系统的控制参量, 对应于磁场的激励电流  $i$ ;  $\varphi_0$  为控制参量的初始偏置, 与磁反馈的起始激励电流对应; 平衡时,  $\dot{y} = 0, \dot{\varphi} = 0$ . 由式 (1)、(2) 得

$$y = T(\varphi)x, \quad (3)$$

$$\varphi = \varphi_0 + ky, \quad (4)$$

或者

$$x = \frac{y}{T(\varphi)}. \quad (5)$$

由式 (5) 可知, 不论  $T(\varphi)$  为何种形式,  $x$  永远是  $y$  的单值函数. 但  $y$  可以是  $x$  的单值函数, 也可以是  $x$  的多值函数, 取决于  $T(\varphi)$  的形式和  $\varphi_0$  的选取,  $T(\varphi)$  为磁反馈产生具有非线性特征的透射率函数. 控制参量  $\varphi$  在我们的实验中是可测量反馈电流. 式 (3)、(4)、(5) 反映了传输系统和反馈系统中入射、透射及反馈参量之间的关系. 当入射到反馈系统的光电二极管上的光强大于某一强度时, 反馈系统趋于饱和. 系统的工作点应是非线性透射曲线与反馈曲线的交点.

### 3 结果与讨论

#### 3.1 磁光调制曲线

选定磁光调制器的两个偏振元件光轴间夹角  $\alpha$ , 固定入射光强, 改变反馈磁场的激励电流  $i$ , 测得不同夹角时透射率  $T(i)$  曲线, 如图 2, 图中  $i$  为磁反馈电流,  $i_0$  为初始反馈电流,  $i_m$  为饱和反馈电流. 改变反馈磁场的线圈电流时, 加在样品上的磁场随之改变, 导致通过样品的线偏振光的偏振面转动, 使得偏振面与检偏器  $P_2$  光轴之间夹角随之改变, 产

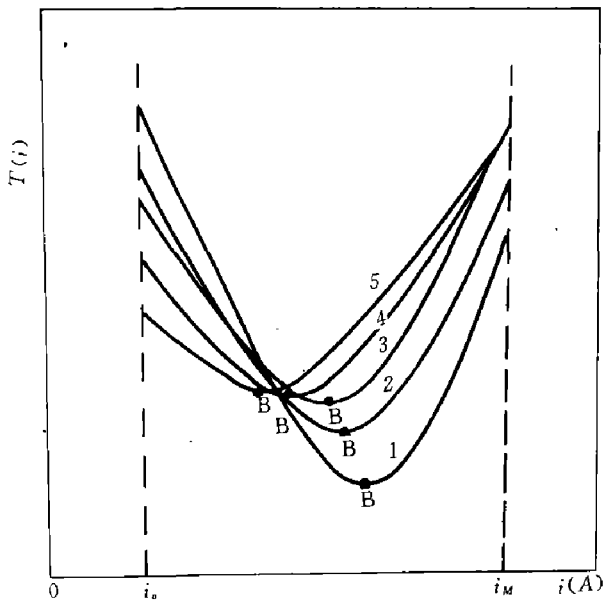


图 2 室温磁光调制曲线  
(1:  $\alpha=0^\circ$ , 2:  $\alpha=8^\circ$ , 3:  $\alpha=15^\circ$ ,  
4:  $\alpha=23^\circ$ , 5:  $\alpha=30^\circ$ )

Fig. 2 Magneto-optical modulation curve at room temperature

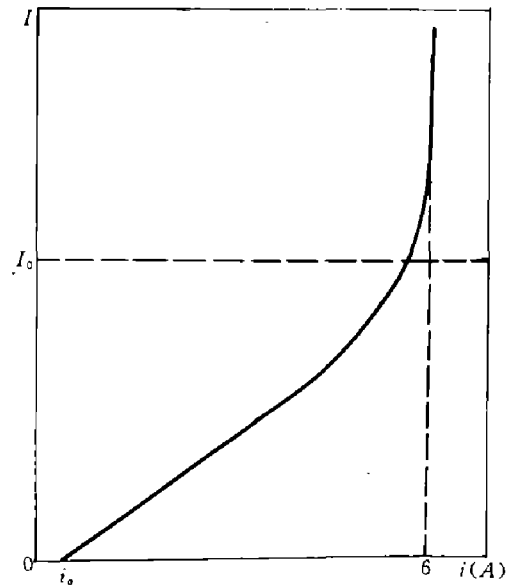


图 3 反馈曲线  
Fig. 3 Feedback curve

生随电流变化的非线性输出.  $\alpha$  角增大, 非线性透射曲线的极小点  $B$  向低激励电流方向移动. 这是由于  $\alpha$  角增大时, 较小的反馈电流即可使线偏振光的偏振面转到与检偏器光轴的正交位置.

用一束强度可变的弱激光直接照射到光电接收器  $D_2$ ,  $D_2$  接收到的光电信号经取样、放大后反馈给调制器的磁场电源, 调制电源的输出电流, 实现磁反馈. 反馈曲线如图 3. 当入射光强  $I < I_0$  时, 反馈曲线近似线性; 当  $I > I_0$  时, 反馈曲线趋于饱和, 这是由探测器和放大器的非线性引起的.

### 3.2 磁光开关特性

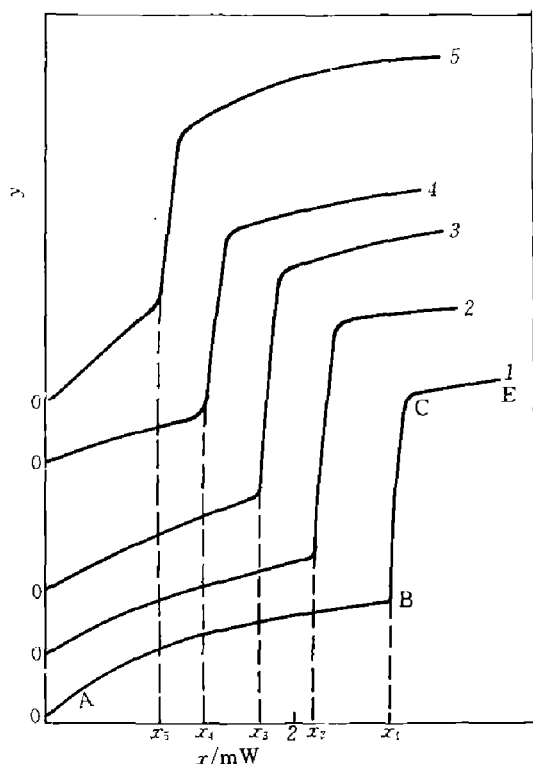


图 4 室温磁光开关特性

(1:  $\alpha=0^\circ$ , 2:  $\alpha=8^\circ$ , 3:  $\alpha=15^\circ$ ,  
4:  $\alpha=23^\circ$ , 5:  $\alpha=30^\circ$ )

Fig. 4 Magneto-optical switch characteristic at room temperature

选定角  $\alpha$ , 逐渐增大入射到样品上的光强, 当光强增强到某一临界值时, 系统的透过率由低通态急剧跳到高通态, 实现磁光反馈的磁光开关效应, 如图 4 所示, 图中  $x$  轴为入射光强,  $y$  轴为透射光强. 改变角  $\alpha$ , 使  $\alpha$  角增大, 磁光开关阈值减小. 最好开关比可达 5:1.

对确定的角  $\alpha$ , 入射光强小时, 反馈系统的反馈直线斜率大, 系统的工作点是调制曲线的低透射率段与反馈系统的反馈直线的交点. 随入射光强增大, 反馈直线斜率变小, 系统工作点随之沿着调制曲线低透射率段移至临界状态  $B$  点, 这一过程使系统处于低通态, 如图 4 中  $AB$  段, 之后, 入射光强略微增大, 由于正磁反馈, 透射率将急剧增大, 反馈系统进入饱和区, 工作点离开临界点  $B$  点跳到调制曲线的高透射率段与反馈曲线的交点, 系统处于高通态, 实现了磁光开关效应. 如入射光强继续增大, 由于反馈系统处于饱和区, 系统透射率的输出不再随反馈电流即反馈磁场变化, 只随入射光强线性缓慢增大, 如图 4 中  $CE$  段. 反之, 光强再连续减小到原来的最小值, 又第一次在  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  中实现了磁光光学双稳态, 详细工作另文发表. 增大角  $\alpha$ , 磁

光开关阈值减小, 这是因为透射率曲线的极小点随  $\alpha$  角增大向小的入射光强移动, 较小的阈值便可使系统离开  $B$  点进入开启的高通态的缘故.

改变样品温度, 开关阈值随之改变, 随着样品的温度升高, 系统的开关阈值增大, 如图 5 所示, 开关阈值随温度升高而增大的原因在于半磁半导体  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  的法拉弟效应和透射率对温度十分敏感. 随样品的温度升高, 等波长入射光下的费尔德系数虽然也增大, 然而由于透射率的迅速降低, 对于确定的角  $\alpha$ , 对更高的入射光强, 反馈磁场才能使线偏振光的偏振面转到与检偏器光轴的正交位置, 通过极小点, 从而系统进入高通态即开启态的阈值增大.

## 4 结语

利用半磁半导体  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  的巨大法拉弟效应和磁光正反馈方法可以实现不需改变磁场方向的磁光开关效应, 该效应可用于弱光信号控制的磁光开关及温控磁光开关, 还可望实现混合型磁光光学双稳态.

**致谢:** 作者感谢石自光工程师在电子技术方面给予的帮助.

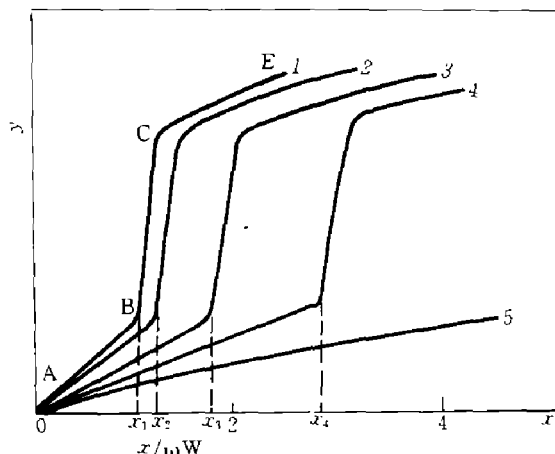


图 5  $\alpha = 30^\circ$  时不同温度下的开关效应  
(1:  $30^\circ\text{C}$ , 2:  $40^\circ\text{C}$ , 3:  $50^\circ\text{C}$ , 4:  $60^\circ\text{C}$ , 5:  $70^\circ\text{C}$ )

Fig. 5 Switch effect at different temperatures for  $\alpha = 30^\circ$

## 参考文献

- 1 Smith P W et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1977, **30**:280
- 2 Garmire E et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **32**:320
- 3 陈辰嘉等. *北京大学学报*, 1992, **28**:101
- 4 李永贵等. *物理学报*, 1983, **32**:301

## MAGNETO-OPTICAL SWITCH EFFECT IN SEMIMAGNETIC SEMICONDUCTOR $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}^*$

LIU JIZHOU, WANG CHUANMIN, WANG XUEZHONG, CHEN CHENJIA

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

**Abstract:** A new class of magneto-optical switch effect, which does not require to change the direction of the magnetic field applied to the sample, was realized in the semimagnetic semiconductor  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ . This effect was due to the giant Faraday effect of  $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$  and the saturation characteristic of the magneto-optical feedback system. The possible applications of the magneto-optical switch for optical and temperature control, and the possibility for realizing the magneto-optical bistability are discussed in this paper.

**Key words:** semimagnetic semiconductor, magneto-optical feedback, giant Faraday effect.

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