

(Ga,Mn)As 中电流诱导自旋极化的磁光 Kerr 测量*

谷晓芳 钱轩 姬扬[†] 陈林 赵建华

(中国科学院半导体研究所超晶格国家重点实验室, 北京 100083)

(2011 年 5 月 16 日收到; 2011 年 6 月 8 日收到修改稿)

在 GaAs 吸收带边附近, 利用磁光 Kerr 效应测量了 (Ga,Mn)As 和 p-GaAs 样品的电流诱导 Kerr 旋转谱和反射谱, 两者都呈现出 Lorentz 曲线形状. 电流诱导 Kerr 旋转角和反射率随着电流的增大而增大, Kerr 角与电流的大小成正比关系, 反射率与电流的平方成正比关系. (Ga,Mn)As 的 Kerr 旋转角比 p-GaAs 的大了一个数量级, 这说明 Mn 原子的掺杂使得电流诱导的自旋极化增强. 另外, 还测量了温度和入射光偏振方向对电流诱导 Kerr 旋转谱和反射谱的影响. 发现随着温度的升高, Kerr 谱和反射谱均向长波方向移动, 这与 GaAs 带边随温度的变化是一致的.

关键词: 自旋电子学, 稀磁半导体, 电流诱导自旋极化

PACS: 78.20.Ls, 78.40.-q, 78.66.Fd

1 引言

自旋电子学的一个重要研究目标就是控制自旋的状态^[1-5]. 实验上一般是通过光场、电场、磁场对自旋进行调控^[6-10]. 比如硬盘的数据读取就是通过磁头磁化磁盘上的区域. 随着器件尺寸的不断缩小, 在很小的区域内产生高磁场是非常困难的. 虽然用光学的方法也可以实现对自旋态的控制^[11-13], 但是光学方法很不利于实现自旋电子学器件的小型化和集成化. 因此通过电场或电流调制电子自旋成为当前研究的热点之一^[8].

为了在无磁场条件下实现电子自旋的产生和调制, 人们研究了电流或电场对载流子自旋极化的影响. 早期的理论和实验工作主要是集中在二维电子气等低维材料中的^[14,15]. 通过电场或电流调制电子自旋可以简单理解为电流流过样品时使其电子产生自旋极化, 这也被称为电流诱导自旋极化 (current-induced spin polarization, CISP). 早期的理论是通过 Dresselhaus 自旋分裂和 Rashba 自旋分裂解释的^[16]. 在半导体中 (闪锌矿或纤锌矿结构), 由于自旋轨道相互作用, 晶格反演不对称性 (BIA) 和结构反演不对称性会分别引起 Dresselhaus 自旋分裂和 Rashba 自旋分裂^[17,18], 使得电子自旋简并解除, 在电子的 Hamilton 量中出现波失 k 的线性

项, 这个线性项使得电子角动量和电子自旋可以相互转移, 而这种转移是自旋轨道相互作用导致的有效磁场或有效动量的直接后果, 也就是动量 (由电流携带或由电场赋予) 在 Dresselhaus 或 Rashba 系统中可以引发电子自旋. 有理论表明, 在二维体系中, 通过推导具有自旋-轨道耦合的无序 2DEG 系统扩散电导张量, 也可以证明外加电压可以导致自旋积累, 而且自旋极化是正比于电场^[19]. 最近, 在应变体材料中也获得了这一效应的直接实验证据^[9]. 由应变引起的 Dresselhaus 效应或 Rashba 效应使自旋向上和向下的电子能级分裂, 分裂能量与电子的波失成正比, 因此在低温下电子将位于能量较低的能带上, 具有自旋极化. 目前在许多不同基于 GaAs, InAs, ZnSe, 和 GaN 的低维结构中, 已经观测到了电流诱导自旋极化, 然而对于体材料的报道却很少.

本文主要研究入射光 (探测光) 波长对电流诱导自旋极化的影响. 在 (Ga,Mn)As 吸收带边附近, 我们发现 Kerr 旋转角与入射光的波长有很大的关系. 我们也测量了电流诱导的反射率变化.

2 实验装置与样品

本文中用到了两个样品, 一块是刻有 Hall bar

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2009CB929301) 和国家自然科学基金 (批准号: 10911130232) 资助的课题.

[†] E-mail: jiyang@semi.ac.cn

(宽度为 300 μm)、居里温度 (T_C) 为 77 K 的 (Ga,Mn)As 薄膜, 是通过低温分子束外延生长成的. 首先在半绝缘的 GaAs 衬底 (100) 晶面方向上生长一层 500 nm 厚的 GaAs 缓冲层, 然后再生长掺杂浓度为 8%, 厚度为 100 nm 的 (Ga,Mn)As 层. 另一块是刻有 Hall bar (宽度为 300 μm) 的 p-GaAs 薄膜, 也是通过低温分子束外延生长的, 首先在半绝缘的 GaAs 衬底 (100) 晶面方向上生长一层 500 nm 厚的 GaAs 缓冲层, 然后再生长厚度为 100 nm 的 p-GaAs 层. 之后按照严格的标准半导体工艺清洗、光刻和湿法化学腐蚀样品, 得到规则的 Hall bar 形状的 (Ga,Mn)As 和 p-GaAs. 样品放在低温液氮杜瓦里面, 样品的 Hall bar 两端通交流电, 用来给 (Ga,Mn)As 和 p-GaAs 样品施加交流驱动电流. 在没有专门的说明下, 所有的测量结果都是在 $T = 3.5$ K 的温度下没有外加磁场的情况下得到的.

实验装置如图 1 所示. 所用的激光光源是 Ti:sapphire 锁模飞秒/皮秒激光器, 波长调谐范围为 780 nm 到 900 nm, 脉冲重复频率为 76 MHz, 单脉冲能量可达 18 nJ. 它发出的光经过偏振片后入射到放置在低温杜瓦里的样品 Hall bar 中心. 反射光先通过旋光镜, 再通过沃拉斯顿棱镜 PBSI 分为两束, 最后用光桥接收器把两束光强度的差值转化为电信号; 光桥输出的电信号输入到锁相放大器. 我们给样品 Hall bar 两端加上频率为 $f_E = 7.510$ kHz 的交流电, 这个交流电是由锁相放大器提供的, 同时锁相放大器以本身提供的交流电频率作为自己的参考频率. Kerr 旋转角 $\theta_K = I_{\text{Kerr}}/2I_{\text{Tot}}$, 其中 I_{Kerr} 是锁相放大器读出的光桥信号强度 I_{Tot} 是反射光总的光强度. 当调节光桥输出为零时, 也就是光桥两臂的光强相等时, 用挡光板挡住其中一束光, 再用示波器读出其中一束光强度大小就可以得到总的光强 I_{Tot} .

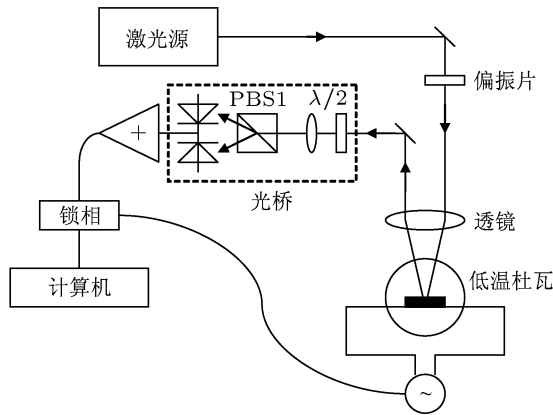


图 1 电流诱导 Kerr 旋转角测量系统 ($\lambda/2:1/2$ 波片)

3 (Ga,Mn)As 中电流诱导磁光 Kerr 效应和反射谱的测量

首先我们测量了 (Ga,Mn)As 中电流诱导 Kerr 旋转角随激光波长的变化. 测量时先在初始波长处无诱导电流下将光桥调零, 再扫波长, 其间不再做 Kerr 调零 (因为在实验中发现, 在初始波长调零后, 其他波长处光桥也基本上处于零状态). 图 2(a) 中给出了电流诱导 Kerr 旋转随激光波长的变化图. 从图 2(a) 中可以看出, Kerr 旋转角随激光波长的变化呈现出 Lorentz 曲线形状, 这与调制反射谱形状很相似. 我们用两个 Lorentz 曲线方程相减的公式对 Kerr 谱和反射谱做了拟合. 公式如下:

$$\theta_K = A_0 + A_1 \frac{W_1}{4(\lambda - \lambda_{c1})^2 + W_1^2}$$

$$-A_2 \frac{W_2}{4(\lambda - \lambda_{c2})^2 + W_2^2}, \quad (1)$$

其中 A_0 是初始信号, A_1 和 A_2 是两个峰的幅度, λ_{c1} 和 λ_{c2} 是两个峰的位置, W_1 和 W_2 是两个 Lorentz 曲线的半高宽度. 图中黑线就是拟合曲线, 从中可以看出, 拟合曲线与实验曲线符合得很好. 这与调制反射谱很相似, 这些峰与电子和空穴在能级之间的跃迁有很大关系, 因此, 通过 Kerr 谱我们就能够了解电子空穴能级的一些情况. 外加电流可以使得部分电子产生自旋极化, 电子的自旋极化与入射线偏光发生相互作用, 使得反射光的偏振面相对于入射光的有一个很小的偏转角, 也就是 Kerr 旋转角. 因为材料中的载流子都是处于某个能级上的, 只有入射光的光子能量与载流子跃迁能级接近时, 线偏光才能与载流子自旋发生相互作用. 因此, 我们测量到的 Kerr 旋转角的峰位也应该对应于载流子不

同的跃迁能级. 同样, 通过对 Kerr 角的测量, 可以了解材料中载流子能级的一些信息.

我们进一步的研究了电流大小对 Kerr 旋转角的影响. 图 2(b) 中给出了 Kerr 旋转角在峰位处 (814 nm 和 820 nm) 随电流密度的变化. 从图中可以看出, Kerr 旋转角随着电流密度的增大而增加. 用一个线性函数对其进行拟合, 图中黑线就是拟合曲线. 从图中可以看出, 当电流密度小于 $0.15 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$ 时, 拟合曲线与实验曲线符合得较好, 也就是说 Kerr 旋转角与电流成正比关系, 这与低维材料中自旋极化与电流成正比的理论也是一致的. 我们的样品是体材料, 这说明该理论在体材料中也可能成立, 这也给体材料中电流诱导自旋极化提供了实验依据. Kerr 旋转角与电流是成正比的, 当电流逐渐增大时, 实验曲线与拟合曲线差别也随之增大, 可以说是完全不符合. 估计有两种因素导致这种偏离. 首先是由于电流导致的 Joule 热引起的, Joule 热与电流的平方是成正比的. 当电流较小时, Joule 热很小, 可以忽略掉, Kerr 信号与拟合直线符合得很好. 但是随着电流的增大, Joule 热量也随之增强, Kerr 信号就会逐渐偏离正比关系. 这与我们测量的结果是一致的. 其次由于自旋弛豫时间也受到电流或电场的影响. 自旋弛豫时间随着电流的增大是减小的, 这个在早期的实验中也观察到了 [20,21], 自旋弛豫时间的减小会引起自旋极化和自旋密度的降低, 因而 Kerr 旋转角在高电流

下出现饱和现象, 我们在实验中也观察到了这种现象 (图 2(b) 中所给出的电流范围太小, 并没有显示出这一现象, 但随着电流的继续增加, 我们确实观察到了这种饱和现象).

电流诱导 Kerr 旋转角随激光波长的变化与调制反射谱很相似, 而且在我们的系统中给样品施加的交流电很小, 因此我们也可以测量电流诱导反射率随激光波长的变化曲线, 这也可以称为电调制反射谱. 我们定义反射率的变化为 $\Delta R/R$, 其中 R 是样品没有加电流时的反射率, ΔR 是加上电流后的反射率相对于 R 的变化量. 图 2(c) 中给出了反射谱曲线图. 相对于 Kerr 旋转角随激光波长的变化来说, 反射谱变化在形状上和 Kerr 旋转角的变化很相似. 同样用 (1) 式可以对其拟合 (在这里, (1) 式中 θ_K 应表述为 $\Delta R/R$), 图中的黑线就是拟合曲线, 可以看出其与实验曲线符合得很好. 同样我们也测量了反射率在峰位处随电流密度的变化, 如图 2(d) 所示. 与 Kerr 旋转角的变化类似, 反射率随着电流密度的增大而增大. 根据电调制反射谱理论 [22], 调制信号的振幅与外加电场的平方成正比, 因此我们用一个平方函数对其做了拟合, 图中的黑线是对实验数据做的拟合. 从图中可以看出, 拟合曲线和实验曲线符合得很好. 我们知道, 反射谱可以反映样品的各种参数, 像掺杂浓度、带隙和能级跃迁等 [23], 因此与之相似的 Kerr 谱应该也能反映这些参数.

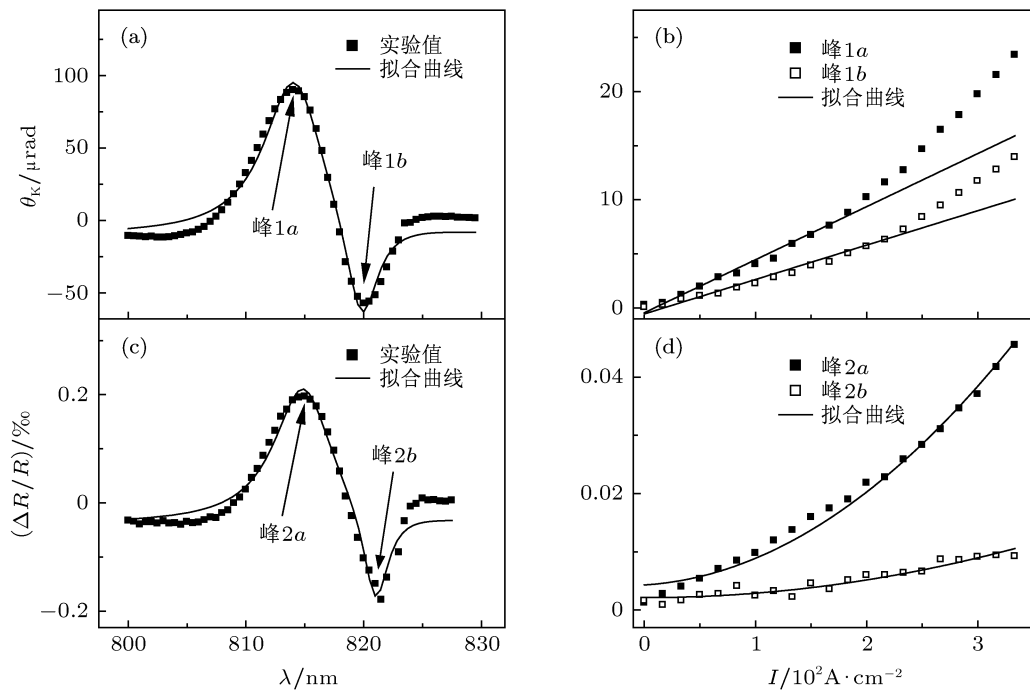


图 2 (Ga,Mn)As 电流诱导 Kerr 旋转角和反射率, $T = 3.5 \text{ K}$ (a), (c) Kerr 旋转角和反射率随入射光波长的变化, $I = 8.3 \times 10^2 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$; (b) Kerr 旋转角在 (a) 中两个峰位处随电流密度变化; (d) 反射率在两个峰位处随电流密度变化

4 p-GaAs 中电流诱导 Kerr 谱与反射谱测量

Kerr 旋转角与样品中电子在光传播方向上的自旋极化有很大的关系, 它反映了样品的磁化信息. 而上面测量的样品 (Ga,Mn)As 的磁性质与掺杂的 Mn 粒子有很大关系. 为了确定我们测量到的电流诱导 Kerr 旋转效应是否与 Mn 粒子有关, 我们用 p-GaAs 样品做了同样的测量, 如图 3 所示. 图 3(a) 和 3(c) 给出了 Kerr 旋转角和反射率随激光波长的变化曲线, 施加电流密度为 $1.67 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$.

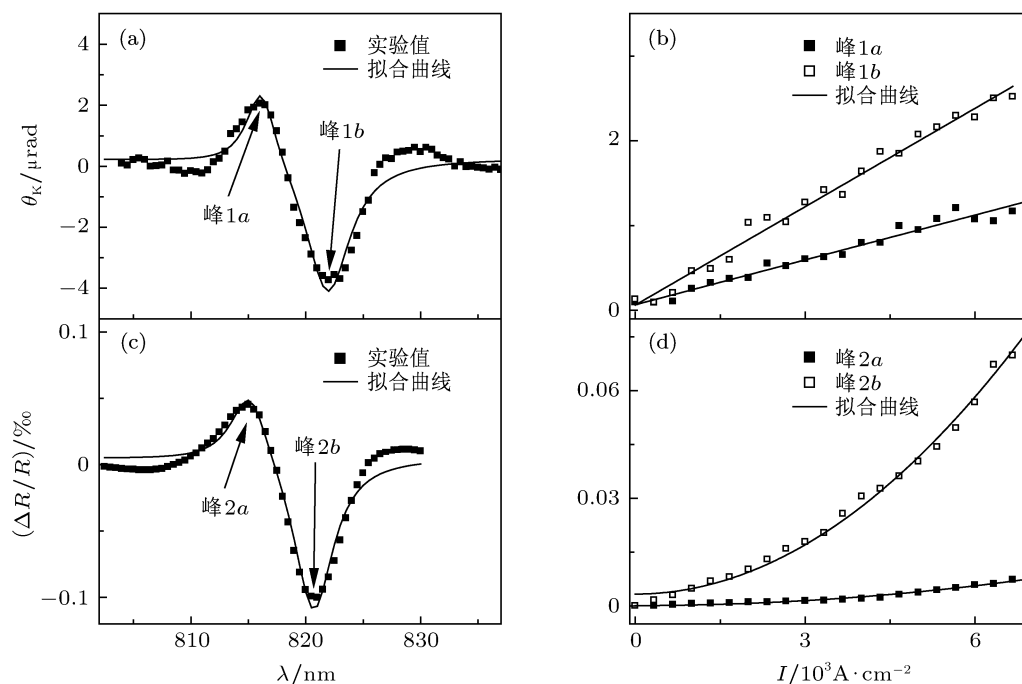


图 3 p-GaAs 电流诱导 Kerr 旋转角和反射率, $T = 3.5 \text{ K}$ (a), (c) Kerr 旋转角和反射率随入射光波长的变化, $I = 1.67 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$; (b) Kerr 旋转角在 (a) 中两个峰位处随电流密度变化; (d) 反射率在 (c) 中两个峰位处随电流密度变化

虽然 (Ga,Mn)As 和 p-GaAs 的测量结果在形状上都相似, 但比较其大小时, 我们发现它们的差别很大. 对于 p-GaAs 来说, 在电流密度为 $1.67 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 时 Kerr 旋转角的峰值大约为 $2 \mu\text{rad}$, 而 (Ga,Mn)As 在电流密度仅仅为 $8.3 \times 10^2 \text{ A/cm}^2$ 时 Kerr 旋转角的峰值就达到了 $90 \mu\text{rad}$. 而在反射率方面, p-GaAs 在电流密度为 $1.67 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 时 $\Delta R/R$ 的峰值大约为 0.01% , 而 (Ga,Mn)As 在电流密度为 $8.3 \times 10^2 \text{ A/cm}^2$ 时 $\Delta R/R$ 的峰值为 0.02% . 两者的 $\Delta R/R$ 相差 2 倍左右, 而 Kerr 旋转角却相差高达 45 倍. 这说明 (Ga,Mn)As 中电流诱导 Kerr 旋转机制与 p-GaAs 的是不一样的, (Ga,Mn)As 中电流诱导 Kerr 旋转与 Mn 粒子和 Mn 粒子与空穴间相互作用有关. 由于反演不对称性

从图中可以看出, 两者在形状上与 (Ga,Mn)As 的很相似. 图 3(b) 和 3(d) 中给出了 Kerr 旋转角和反射率在峰位处随电流密度的变化. 同样我们分别用线性方程对 Kerr 旋转角做拟合, 图中黑线即为拟合曲线. 从图中可以看出, Kerr 旋转角的实验曲线与拟合曲线符合得很好. 这主要是由于 p-GaAs 的 Kerr 旋转角本身就很小, Joule 热对 Kerr 角的影响也相应地变得很小, 几乎和噪音相当. 对于 p-GaAs 样品来说, 其调制反射谱幅度也是与电流密度的平方成正比的, 因此, 我们也用一个平方函数对其做了拟合, 从图中可以看出, 两者符合得很好.

引起的自旋分裂会使得电子自旋简并解除, 外加电流时, 如果没有自旋弛豫或自旋散射过程, 解除简并的两个自旋子带将被相等的占据, 对总的自旋取向是没有贡献的. 然而电子在外加电流的驱动下移动时, 电子自旋都有或多或少的自旋散射过程, 而且自旋向上和自旋向下载流子对自旋散射的贡献是不同的, 这样就产生了静态的自旋取向, 我们在 (Ga,Mn)As 和 p-GaAs 中都观测到了电流诱导自旋极化. 对于稀磁半导体 (Ga,Mn)As 来说, 它的能带结构是半金属性的^[24], 即在 Fermi 能级处自旋向上的电子态密度很大, 而自旋向下的电子态密度却为零, 也就是半金属在 Fermi 能级处只有一种自旋取向, 因此很容易在 (Ga,Mn)As 中得到很高的自旋极化. 外加电流诱导的自旋极化相应

地也会被这种效应放大. 另外, 由于 sp-d 轨道交换相互作用, Mn 粒子与空穴之间的交换相互作用很强, 这也会使得电流诱导自旋极化效应增强. 因此我们在 (Ga,Mn)As 中观测到的电流诱导自旋极化比 p-GaAs 的要大很多.

5 温度和入射光偏振方向的影响

为了排除 Kerr 信号可能是反射率变化或 Joule 热引起的, 我们也研究了其他一些变量对 (Ga,Mn)As 和 p-GaAs 中电流诱导 Kerr 旋转角的影响, 主要包括温度和入射光偏振方向. 由于反射谱能反映材料中电子能级的一些情况, 而且对于 GaAs 样品来说, 其吸收带边是随着温度的升高

向长波方向移动的, 因此, 我们在不同温度下分别测量了两个样品的电流诱导 Kerr 旋转谱和反射谱, 如图 4 所示. 从图中可以看出, 不同温度下, 对于两个样品来说, 无论反射谱还是 Kerr 谱它们的形状都很相似, 都是 Lorentz 曲线形状, 但是峰位随着温度的升高都向长波方向移动, 也就是红移现象. 这与 GaAs 样品吸收带边随着温度的升高向长波方向移动的现象一致. 这也进一步说明了电流诱导 Kerr 旋转谱和反射谱能反映载流子能级的一些信息. 而且从图中可以看出, Kerr 谱和反射谱两者在形状上虽然很相似, 但两者的峰位并不一样, 而且两个峰的相对大小也不一样, 这说明了 Kerr 旋转角并不是由反射率变化引起的.

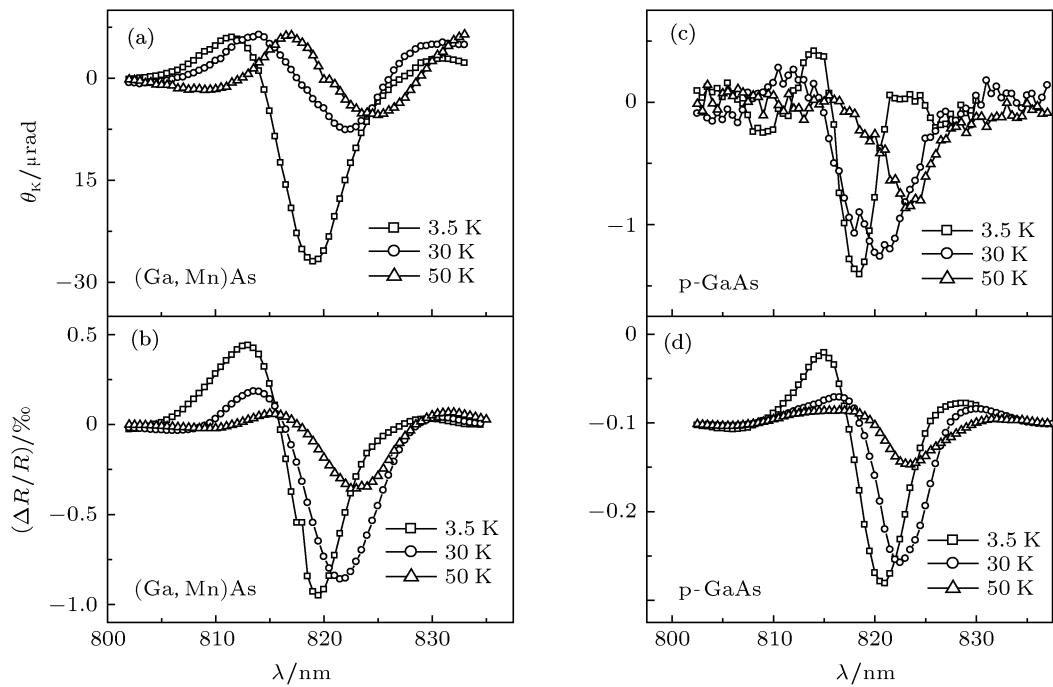


图 4 不同温度下, (Ga,Mn)As 和 p-GaAs 的电流诱导 Kerr 旋转谱和反射谱 (a) (Ga,Mn)As Kerr 谱; (b) (Ga,Mn)As 反射谱; (c) p-GaAs Kerr 谱; (d) p-GaAs 反射谱

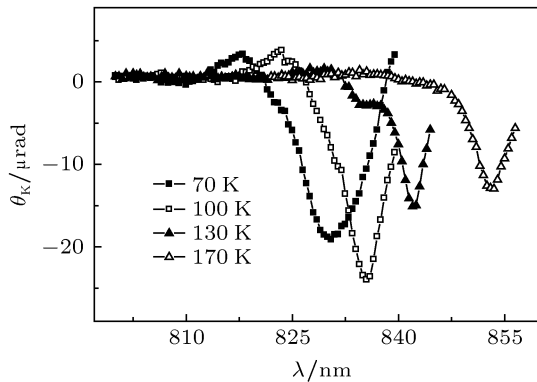


图 5 居里温度以上, (Ga,Mn)As 电流诱导 Kerr 旋转角随激光波长的变化

为了进一步了解 (Ga,Mn)As 电流诱导 Kerr 旋转角与 Mn 粒子磁化是否有关, 我们在其 $T_C = 77\text{ K}$ 以上也测量了电流诱导 Kerr 角的变化. 在 T_C 温度以下时, (Ga,Mn)As 属于铁磁相, 载流子本身就有自旋取向, 电流的增加会导致自旋分裂能带倾斜加剧, 这也会引起 Kerr 信号的增强, 但这并不是电流对 Mn 粒子的调制效应, 只是一种带隙调制效应. 因此我们有必要观测 T_C 温度以上 (这时 Mn 离子是无序的) 的 Kerr 谱. 图 5 中给出了在居里温度以上 (Ga,Mn)As 电流诱导 Kerr 谱. 从图中可以看出, 在温度高于 T_C 时, (Ga,Mn)As 的电流诱导 Kerr 信号仍比较大. 而 p-GaAs 的 Kerr 角在温度为 100 K

时就被噪音全部淹没了(图中没有给出). 这进一步证明了(Ga,Mn)As 电流诱导自旋极化是与 Mn 粒有关的.

另外也观测了入射光偏振方向对信号的影响. 由于我们用的光是偏振光, 施加电流是交流电, 而偏振光会与样品内载流子自旋有相互作用, 因此我们测量了不同偏振方向的线偏振光对电流驱动 Kerr 旋转谱和反射谱的影响. 两个样品的结果一

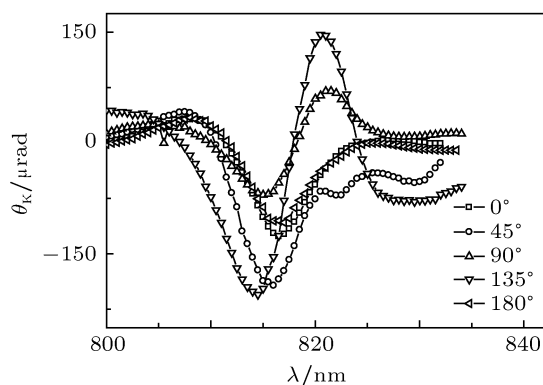


图 6 不同入射光偏振方向下, (Ga,Mn)As 的电流诱导 Kerr 谱

致, 入射光偏振方向的改变对反射谱几乎没有任何影响, 不同偏振方向下电流诱导反射谱的 Lorentz 曲线完全一样, 峰位和大小都没有变化; 而电流诱

导 Kerr 旋转谱的 Lorentz 曲线形状却发生了明显的变化, 峰位和大小都有很大的变化, 如图 6 所示. 图 6 给出了不同入射光偏振方向下的 (Ga,Mn)As Kerr 旋转角的曲线. 我们设置光的偏振方向沿着电流方向时为 0° , 从图中可以看出, 入射光偏振面在 135° 和 45° 时 Kerr 谱的峰值比较大, 这个现象在 p-GaAs 样品中也观察到了. 这可能与样品的各向异性有关, 不过对于这种现象产生的具体机制还有待于进一步的研究, 但这也再次证明了 Kerr 旋转角并不是反射率的变化引起的.

6 结论

我们测量了 (Ga,Mn)As 和 p-GaAs 样品的电流诱导 Kerr 旋转谱和反射谱, 电流诱导 Kerr 旋转角随着电流的增大而增大, 与电流大小成正比关系. 同样反射率也随着电流的增大而增大, 与电流的平方成正比关系. (Ga,Mn)As 的 Kerr 旋转角比和 p-GaAs 的大了一个数量级, 这说明由于 Mn 粒子的掺杂使得电流诱导的自旋极化增强. 另外测量了温度和入射光偏振方向对电流诱导 Kerr 旋转谱和反射谱的影响. 当然, 要完全探明、解释这种现象, 还有待于进一步的理论和实验探讨.

- [1] Zutic I, Fabian J, Das Sarma S 2004 *Rev. Mod. Phys.* **76** 323
- [2] Awschalom D D, Flatte M 2007 *Nature Phys.* **3** 153
- [3] Awschalom D D, Loss D, Samarth N 2002 *Semiconductor Spintronics and Quantum Computation* (Berlin: Springer)
- [4] Wolf S A, Awschalom D D, Buhrman R A, Daughton J M, Molnár S V, Roukes M L, Chtchelkanova A Y, Treger D M 2001 *Science* **294** 1488
- [5] Dyakonov M I 2008 *Spin Physics in Semiconductors* (Berlin: Springer) p1
- [6] Joffre M, Hulin D, Migus A, Combescot M 1989 *Phys. Rev. Lett.* **62** 74
- [7] Gupta J A, Knobel R, Samarth N, Awschalom D D 2001 *Science* **292** 2458
- [8] Ren J F, Zhang Y B, Xie S J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4785 (in Chinese) [任俊峰, 张玉滨, 解士杰 2007 物理学报 **56** 4785]
- [9] Kato Y K, Myers R C, Gossard A C, Awschalom D D 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 176601
- [10] Stern N P, Ghosh S, Xiang G, Zhu M, Samarth N, Awschalom D D 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 126603
- [11] Koshihara S, Oiwa A, Hirasawa M, Katsumoto S, Iye Y, Urano C, Munekata H 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 4617
- [12] Liu X D, Wang W Z, Gao R X, Zhao J H, Wen J H, Liu W Z, Lai T S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3857 (in Chinese) [刘晓东, 王玮竹, 高瑞鑫, 赵建华, 文锦辉, 林位株, 赖天树 2008 物理学报 **57** 3857]
- [13] Oiwa A, Mitsumori Y, Moriya R, Slupinski T, Munekata H 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 137202
- [14] Ganichev S D, Danilov S N, Schneider P, Bel'kov V V, Golub L E, Wegscheider W, Weiss D, Prettl W 2006 *J. Magn. Magn. Mater.* **300** 127
- [15] Silov A Y, Blajnov P A, Wolter J H, Hey R, Ploog K H, Averkiev N S 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 5929
- [16] Edelstein V M 1990 *Solid State Commun.* **73** 233
- [17] Dresselhaus G 1955 *Phys. Rev.* **B 100** 580
- [18] Bychkov Y A, Rashba E I 1984 *J. Phys. C* **17** 6039
- [19] Inoue J, Bauer G E W, Molenkamp L W 2003 *Phys. Rev. B* **67** 033104
- [20] Yang C L, He H T, Ding L, Cui L J, Zeng Y P, Wang J N, Ge W K 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 186605
- [21] Kato Y K, Myers R C, Gossard A C, Awschalom D D 2004 *Science* **306** 1910
- [22] Shen X C 2002 *The Spectrum and Optical Property of Semiconductor* (Beijing: Science Press) p168 (in Chinese) [沈学础 2002 半导体光谱和光学性质 (北京: 科学出版社) 第 168 页]
- [23] Sydor M, Angelo J, Mitchel W, Haas T, Yen M Y 1989 *J. Appl. Phys.* **66** 155
- [24] Bergqvist L, Smirnova E A, Mohn P, Svedlindh P, Eriksson O 2003 *Phys. Rev. B* **67** 205201

Observation of current-induced polarization in (Ga,Mn)As via magneto-optic Kerr measurement*

Gu Xiao-Fang Qian Xuan Ji Yang[†] Chen Lin Zhao Jian-Hua

(State Key Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(Received 16 May 2011; revised manuscript received 8 June 2011)

Abstract

Current-induced Kerr rotation spectra and reflectivity spectra of (Ga,Mn)As and p-GaAs are measured in the absence of the magnetic field via magneto-optic Kerr effect around the energy gap. The dependences of the Kerr rotation and the reflectivity on the laser wavelength show Lorentzian profile. The Kerr rotation depends linearly on the current, and the reflectivity depends linearly on the square of the current. The Kerr rotation of p-GaAs is much weaker than that of the (Ga,Mn)As, which indicates that the doping of Mn enhances the current-induced spin polarization. The dependences of the Kerr rotation and the reflectivity on temperature are also measured, both showing red shifts of their Lorentzian peaks, a familiar behavior as the absorption edge of GaAs. In addition, we observe the dependence of the Kerr signal on the polarizational direction of the incident beam.

Keywords: spintronics, diluted magnetic semiconductor, current-induced spin polarization

PACS: 78.20.Ls, 78.40.-q, 78.66.Fd

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2009CB929301) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10911130232).

[†] E-mail: jiyang@semi.ac.cn