

用连续调谐 CO₂ 激光器研究 InSb 自由载流子法拉第旋转

邢启江 陈辰嘉 王学忠 史守旭 朱印康

王威礼 曹树石 刘继周 刘彩霞

(北京大学物理系)

1982年10月23日收到

提 要

在室温、液氮和液氦温度下,首次用连续调谐的 CO₂ 激光器研究了 n-InSb 自由载流子法拉第旋转. 对于载流子浓度为 $3.26 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 的样品, 测得电子的有效质量: $m^*(10\text{K}) = 0.0172m$, $m^*(77\text{K}) = 0.0177m$, $m^*(296\text{K}) = 0.0192m$. 精确测量表明: 当波长 $\lambda < 9.5 \mu\text{m}$ 时, 带间法拉第旋转的影响就越来越明显.

一、引 言

法拉第旋转指的是一束线偏振光沿着磁场方向通过某些物质时, 偏振面发生旋转. 这是在 1845 年 Michael Faraday 首先发现的^[1]. 从本世纪 50 年代开始, 法拉第效应作为研究固体能带结构的重要实验方法, 一直受到人们极大的关注. 1959 年 S. D. Smith 和 T. S. Moss^[2] 进行了红外自由载流子法拉第旋转测量, 证明了法拉第旋转的测量是确定自由载流子有效质量的精确方法. 他们按法拉第效应实验测量得到的 InSb 导带结构形状与 Kane^[3] 用 K. P 微扰理论计算结果完全相一致. 1963 年 C. R. Pidgeon 和 S. D. Smith 通过测定同一样品的法拉第旋转和 Voigt effect 可以不用任何其他电学测量就可以定出自由载流子的有效质量 m^* 和弛豫时间 τ ^[4]. 与回旋共振相比较, 法拉第旋转实验方法比较简单、方便、具有很大的灵活性. 对于大多数材料, 为了观察回旋共振吸收, 必须满足条件 $\omega_c \tau \gg 1$. 这里 τ 是载流子的弛豫时间 ($\tau \sim 10^{-13}$ 秒), $\omega_c = \frac{eB}{m^*}$ 是回旋共振频率. 显然要满足上述条件, 必须具备低温、强磁场和要求比较高的远红外技术. 相比之下, 法拉第效应可以在很大的磁场、波长、温度变化范围内进行连续地精确测量. 到目前为止, 用法拉第旋转已精确地测定了几十种材料的有效质量^[5-9]. 测得的结果与理论计算十分接近.

由于法拉第旋转与光的传播方向无关, 故在激光技术中利用法拉第旋转做的光学隔离器也有着极其重要的应用^[10,11,12]. 在光开关 ($\sim 10^{-9}$ 秒) 和磁光调制器等研制方面, 法拉第效应的研究也是人们颇感兴趣的课题.

本文详细地介绍我们在不同温度下, 用调谐 CO₂ 激光器测量不同载流子浓度的 n-

InSb 自由载流子法拉第旋转。并把我们的测量结果与用常规光源的测量结果相比较。温度、磁场对电子的有效质量的影响,我们也作了一定的讨论。

二、实验原理

根据菲涅尔的解释,当一束线偏振光沿着磁场方向通过样品时,将分解为左旋和右旋两支同频率的圆偏振光。由于左旋和右旋圆偏振光在样品中传播的速度不同,通过厚度为 l 的样品后,该线偏振光的偏振面发生了旋转,旋转角为

$$\theta = \frac{\omega l}{2c} (n_- - n_+) \quad (1)$$

式中 ω 为入射光的圆频率, n_- 和 n_+ 分别为左旋和右旋圆偏振光的折射率, c 为光速。旋转角的正负决定于两束光在样品中传播的相速度差。沿着光的传播方向来观察、取逆时针方向的旋转为正、顺时针方向的旋转为负。

对于一个球等能面,抛物线能带结构的晶体,自由载流子法拉第旋转可以简单地用经典色散理论来解释^[3]。设若晶体的载流子浓度为 N , 在吸收比较小的情况下,左旋和右旋圆偏振光的折射率可表示为:

$$n_{\pm}^2 = \epsilon - \frac{N e^2 (\omega \pm \omega_c)}{m^* \omega \epsilon_0 (-\omega \pm \omega_c)^2 + \frac{1}{\tau^2}} \quad (2)$$

式中的 ϵ 是晶体的介电常数, ϵ_0 是自由空间的介电常数, e 是电子电荷。在低磁场条件下,亦即 $\omega_c^2 \ll \omega^2$ 。频率范围满足 $\omega^2 \gg \frac{1}{\tau^2}$, 且作近似 $n \approx \frac{n_+ + n_-}{2}$ 。由(1)(2)两式可得下式关系式:

$$\frac{n\theta}{l} = \frac{BN e^3}{2c \epsilon_0 m^{*2} \omega^2} \quad (3)$$

式中的 n 为零场折射率, θ 旋转角单位为弧度。由(3)式可得:自由载流子法拉第旋转与载流子的有效质量的平方成反比。我们通过霍尔测量求得载流子浓度 N , 利用测得的磁感应强度 B , 样品厚度 l 和法拉第旋转角 θ , 就可以算出该种材料的有效质量 m^* 。

三、装置和实验方法

图1是测量法拉第旋转的实验装置。调谐范围为 $9.2-10.8 \mu\text{m}$ 的光栅选频连续调谐 CO_2 激光器输出偏振特性极好的单色光,经反射镜1和反射镜2,入射到带窗口的金属杜瓦瓶的输入端,再经过置于两块直角棱镜中间的样品,然后穿出金属杜瓦瓶的输出窗口,经检偏器,最后由热释电探测器接收。讯号通过锁定放大器放大后,由毫伏表直接读数。我们的激光器选用的光栅是每毫米150条刻线、闪烁波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 的原刻光栅。为了便于准直,谐振腔的设计采用1级输出。斩波器的调制频率为 20c/s 。检偏器是六片 ZnSe 组成的透射式偏振器。带窗口的金属杜瓦瓶是我们自己设计研制成功的,窗口用 NaCl 或

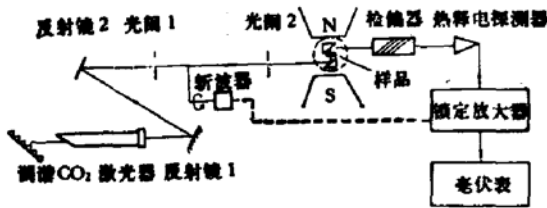


图 1 测量 n-InSb 自由载流子法拉第旋转的光路图



图 2 调节两块直角棱镜反射面平行的光路图

ZnSe 窗片密封^[14]。为了与金属杜瓦的冷端相配,铁磁体的磁极之间距离选为 4.5cm, 磁场强度的变化范围为 0—12,000 高斯。为了确保光的传播方向与磁场强度方向一致,必须使两块直角棱镜反射面严格平行。调节两块直角棱镜反射面平行的光路如图 2 所示。

首先把两块直角棱镜移开,调节平面反射镜,使平面反射镜垂直光的传播方向。将两个光阑的位置固定(如图所示)。再把两块直角棱镜移进光路中,调节两块直角棱镜的相对位置,使从平面镜表面反射回来的光经两块直角棱镜,穿过两个固定光阑。最后把直角棱镜固定好,装入金属杜瓦瓶内。调节图 1 中的人射光束,使之与磁极头表面平行。这样入射光经第一块直角棱镜反射后,必与磁场方向平行。样品用 305# 金钢砂和白钢玉研磨抛光以后,用银、铜压焊在杜瓦的冷端。整个光路先用 He-Ne 激光器进行调试,然后使 CO₂ 激光束与之实行同光路。在测量时,先不加磁场转动检偏器以确定出消光位置。然后加磁场,再转动检偏器找出偏振面经过旋转以后的消光位置。由于光强存在着起伏,测量精度为 ± 1 度。

四、测量结果和讨论

我们主要测量了 n-InSb 自由载流子法拉第旋转。样品的载流子浓度为 $1.36 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $3.26 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 和 $8.1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。其中载流子浓度为 $3.26 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 样品,在液

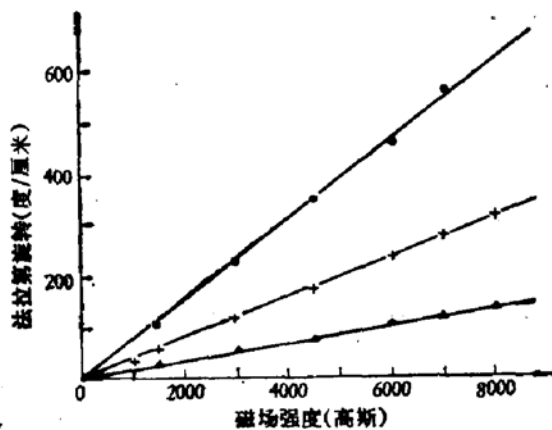


图 3 室温下 n-InSb 自由载流子法拉第旋转与磁场强度之间的关系

$\lambda = 10.6 \mu\text{m}$. \bullet $8.1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $+$ $3.26 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, \blacktriangle $1.36 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

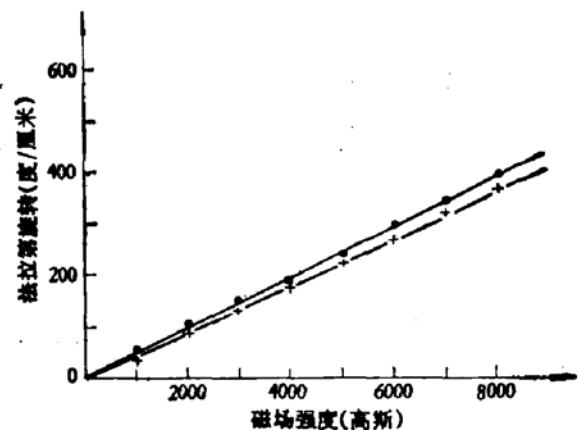


图 4 在低温下, n-InSb 自由载流子法拉第旋转与磁场强度间的关系

$n = 3.26 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$, \bullet 10K, $+$ 77K

氮和液氮温度下作了进一步的测量。图3和图4表示了 n-InSb 自由载流子法拉第旋转与磁场强度之间的关系。实验结果表明：在我们实验所选用的磁场变化范围内，自由载流子法拉第旋转与磁场强度之间具有良好的线性关系。这种线性关系，说明了在上述的磁场变化范围内，可以用(3)式来确定导带内电子的有效质量 m^* 。从图中我们还可以清楚地看到：自由载流子法拉第旋转随着载流子浓度的增加而迅速增加。但是实验表明这种增加是非线性的^[12]。

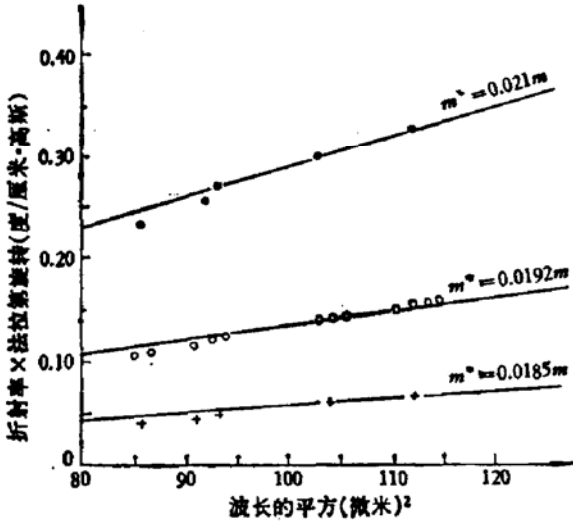


图5 在室温下，不同载流子浓度 n-InSb 自由载流子法拉第旋转与波长平方的关系
 ● $8.1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$, ○ $3.26 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$,
 + $1.36 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$, $B = 7000$ 高斯

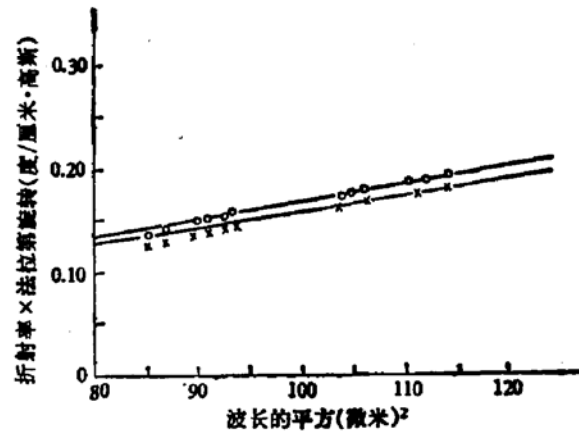


图6 在低温下 n-InSb 自由载流子法拉第旋转与波长平方的关系
 ○ 10K, × 77K, $n = 3.26 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$,
 $B = 7000$ 高斯, $m^*(10\text{K}) = 0.0172m$,
 $m^*(77\text{K}) = 0.0177m$

图5和图6表示的是 n-InSb 自由载流子法拉第旋转与波长平方的关系。我们选用的磁场强度为7000高斯，波长变化范围为 $9.2-10.8 \mu\text{m}$ 。由于 InSb 的折射率与自由载流子浓度有关，图中的折射率我们采用了 Moss T. S. 等人的实验结果^[15]。从图上我们看到：当波长 $\lambda > 9.5 \mu\text{m}$ 时， $\frac{n\theta}{Bl}$ 与 λ^2 之间具有良好的线性关系(实验曲线经过原点)。这种线性关系表明了：引起这种法拉第旋转主要是导带内的自由电子。带间法拉第旋转在这里是可以忽略的。在 $\lambda < 9.5 \mu\text{m}$ 范围内，实验点逐渐偏离直线。这是因为沿负方向旋转的带间法拉第旋转影响所致。本文利用曲线的斜率来求有效质量 m^* ，这样一方面可以通过求实验平均值来提高 m^* 值的精度，另一方面可以消除带间法拉第旋转的影响。

在室温下，从我们测量的三个样品中可以看到：InSb 的有效质量随着载流子浓度的增加而迅速增加。这是因为 InSb 具有窄禁带 ($E_g(296\text{K}) = 0.18\text{eV}$)，非抛物线能带结构的缘故。在低温下，载流子浓度为 $3.26 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 样品，测得的有效质量 m^* 为： $m^*(10\text{K}) = 0.0172m$, $m^*(77\text{K}) = 0.0177m$ 。这与 S. D. Smith 等人^[2]的测量结果是一致的。温度从10K至296K，有效质量增加了11.6%。1961年 Cardona^[16]指出：有效质量随温度升高而增加的原因有二个。(i) 在高温情况下，电子分布在非抛物能带的很大的

范围内,测量时 m^* 就增加。(ii) 随着温度的升高,禁带宽度下降(4.2K 时 $E_g = 0.2357$ eV,而在 296K 时 $E_g = 0.18$ eV),这就使 m^* 随温度升高而减小。但是在 InSb 中,电子随温度分布效应是主要的。这两种效应竞争结果, m^* 随温度升高而增加。把室温测量结果与 1962 年 S. D. Smith 等人^[17]的测量结果作比较,我们的结果略偏小一些。

磁场对自由载流子有效质量也有很大的影响。E. D. Palik^[18] 等人用回旋共振实验测得电子的有效质量随磁场升高而增加。图 7 所示的是磁场为 5000 高斯情况下的测量结果。与图 5 和图 6 相比较,磁场由 5000 高斯升高到 7000 高斯,在温度为 10K 时,有效质量增加 1.2%。在室温下,有效质量增加 3.8%。

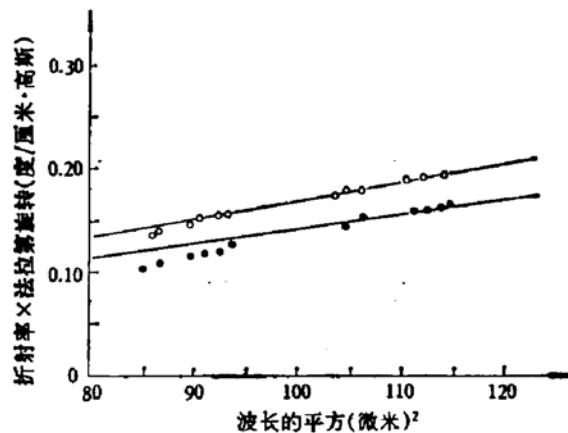


图 7 n-InSb 自由载流子法拉第旋转与波长平方的关系
 $n = 3.26 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$, $B = 5000$ 高斯,
 ○ 10K, ● 296K
 $m^*(10\text{K}) = 0.017m$ $m^*(296\text{K}) = 0.0185m$

五、结 束 语

连续可调谐 CO₂ 激光器虽然波长变化范围比较窄,但是由于它具有单色性好、能量集中而且偏振特性极好等优点,无疑它是研究晶体法拉第效应的极好光源。尤其是用它来研究 Hg_{1-x}Cd_xTe 的带间法拉第旋转,禁带宽度较宽一些的 GaAs 和 InP 等材料的自由载流子法拉第旋转更为理想。

此项工作得到甘子钊同志热情的关心和帮助,还得到我系低温车间的大力支持,在此谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] M. Faraday, *Phil. Mag.*, 29, 153(1846).
- [2] S. D. Smith, T. S. Moss and K. W. Taylor *J. Phys. Chem. Solids*, 11, 131(1959).
- [3] E. O. Kane, *J. Phys. Chem. Solids*, 1, 249(1957).
- [4] C. R. Pidgeon and Smith, *Infrared Physics*, 4, 13(1964).
- [5] A. K. Walton and T. S. Moss, *J. Appl. Phys.*, 30, 951(1959).
- [6] T. S. Moss and A. K. Walton, *Proc. Phys. Soc. (London)*, 74, 131(1959).
- [7] T. S. Moss and A. K. Walton, *Physica*, 25, 1142(1959).

- [8] I. G. Austin, *J. Electronics and Control*, **8**, 167(1960).
[9] I. G. Austin, *Proc. Phys. Soc. (London)*, **76**, 169(1960).
[10] L. R. Tomasetta, D. H. Bates and W. E. Bicknell *IEEE J. Quantum Electronics*, **QE-15**, 266 (1979).
[11] C. R. Phipps and S. T. Thomas, *J. Appl. Phys.*, **47**, 204(1976).
[12] W. T. Boord, Y-H Pao, *IEEE J. Quantum Electron*, **QE-10**, 273(1974).
[13] S. D. Smith, *Handbuch der Physik*, Bd XXV/2a.
[14] 陈辰嘉、曹树石、王学忠: “磁光实验用的液氮杜瓦瓶的研制”, *物理*, **12**, 174(1983).
[15] T. S. Moss, S. D. Smith and T. D. H. Hawkins, *Proc. Phys. Soc.*, **70B**, 776(1957).
[16] M. Cardona, *Phys. Rev.*, **121**, 752(1961).
[17] S. D. Smith, C. R. Pidgeon and V. Prosser, *Proc. Int. Conf. On Physics of Semiconductors, Exeter, 1962*, p. 301.
[18] E. D. Palik, S. Teitler and R. F. Wallis, *J. Appl. Phys.*, **32**, 2132(1961).

Study of the Free Carrier Faraday Rotation in InSb through a Tunable CW CO₂ Laser

Xing Qijiang, Chen Chenjia, Wang Xuezhong, Shi Shouxu,
Zhu Yinkang, Wang Weili, Cao Shushi, Liu Jizhou and Liu Caixia
(Department of Physics, Peking University)

Abstract

The free carrier Faraday rotation in n-InSb has been studied by using a tunable CW CO₂ laser for the first time at room temperature, liquid nitrogen and liquid helium temperature. Measurements on carrier concentration of $3.26 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ are made to have the effective mass m^* (10K) = 0.0172 m , m^* (77K) = 0.0177 m and m^* (296K) = 0.0192 m . The accurate measurements show that the effect of interband Faraday rotation becomes more apparent when wavelength is less than 9.5 micron.