

InSb 中双光子带间磁光吸收的实验研究*

王学忠 陈辰嘉 刘继周 朱印康 曹树石 史守旭 刘彩霞

(北京大学物理系)

摘要——用测量样品光电导变化的方法,以二氧化碳激光器作为入射光源,InSb 研究了在 0~40 KG 磁场下,对选支 $9.6\mu\text{m}$ 和 $10.6\mu\text{m}$ 的吸收。观察到一系列的吸收峰。和相应的理论计算进行了比较,发现大部分的吸收峰都可以用价带和导带的朗道能级间的二级跃迁来解释。但也有一些不能归结为朗道能级间的二级跃迁的吸收峰,它们也许是来自禁带中束缚能级对导带朗道能级的跃迁。

一、前言

在自旋反转喇曼散射激光器中使用 InSb,以及在强光红外光学中应用 InSb 时,InSb 的带间多光子吸收是一个重要的问题。关于 InSb 的带间双光子吸收,特别是双光子磁光吸收,过去已有一些实验的研究和理论分析^[1,2],但是,对跃迁的具体机构,以及对应的磁能级和相应的选择定则方面,都有一些未完全解决的问题。我们用测量样品光电导变化的方法,研究了 InSb 在 0~40 KG 磁场下,用二氧化碳激光器作为入射光源,对选支 $9.6\mu\text{m}$ 和 $10.6\mu\text{m}$ 的吸收,实验观察到一系列的吸收峰。和相应的理论计算进行了比较,发现大部分的吸收峰都可以用价带和导带的朗道能级间的二级跃迁来解释,但也有一些不能归结为朗道能级间的二级跃迁的吸收峰,它们也许是来自禁带中束缚能级对导带朗道能级的跃迁。

二、实验方法与装置

实验装置示意图见图 1,用 TEA CO₂ 激光器作为入射光泵浦,用光栅调谐选支,在 $9.6\mu\text{m}$ 和 $10.6\mu\text{m}$ 范围内选择所需的不同频率。样品置于超导磁体中心场处。此磁体由北大物理系低温物理教研室用铌三锡 (Nb₃Sn) 材料绕制而成,磁场强度从 0 变到 40 KG。光电导的变化用自制的脉冲幅度读出器直接计数读出(并与在脉冲示波器上显示脉冲高度相对照)。测量线路中 R 为终端电缆负载,测量时连接终端电缆负载为 50Ω 。 R_I 为恒偏流线路中调节电阻。

本文 1982 年 9 月 27 日收到。

* 本文曾于 1982 年 6 月在中国光学学会第一届基础光学学术会议上宣读。

n -InSb 样品浓度 $n \sim 10^{24}/\text{cm}^3$, 迁移率 $\mu_n \sim 1 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ (77 K)。样品安装在铜支架上, 温度约为 7 K。样品在峰值光电导整个测量范围内保持欧姆接触。

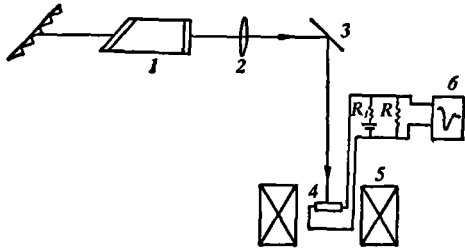


图 1 双光子带间磁光吸收实验装置示意图

- 1—TEA CO_2 激光器(光栅选支); 2—锩透镜;
3—反射镜; 4— n -InSb 样品; 5— Nb_3Sn 超导
磁体; 6—脉冲幅度读出器或示波器

光电导测量中使用的恒定偏流为 10 mA。入射光偏振方向垂直于磁场 ($E \perp H$), 光斑孔径由样品前置光栏孔径限定, 圆孔直径 $\phi = 1.2 \text{ mm}$ 。

由测量线路可知, 峰值光电导变化 $\Delta\sigma$ 应由下式表示:

$$\Delta\sigma = \frac{l}{A} G \left(\frac{V_0}{V} - 1 \right) = \frac{l}{A} G \frac{\Delta V}{V_0 - \Delta V},$$

式中 V_0 是无光照时样品两端电压, V 是光照后样品两端电压, $\Delta V = V_0 - V$ 是脉冲幅度读出器

上直接测量值, G 为总电导(包括样品的和终端负载电缆的电导等), l 、 A 分别为样品欧姆接触间距离和截面积。

三、实验结果和讨论

InSb 的磁能级结构如图 2 所示。在磁场下, InSb 导带和价带的重、轻空穴带都分别裂为一系列朗道子能级(图中略去自旋分裂带的能级)。当入射光强较低时, InSb 中价带和导带不同朗道能级之间在不同磁场下产生带间磁光跃迁, 不同磁场下朗道能级之间跃迁能量的理论计算与实验符合得相当好, 这是单光子的跃迁过程。当用高强度激光照射 InSb 样品时, 价带、导带间不同朗道能级之间在不同磁场下能同时吸收两个光子, 对应二级跃迁过程, 产生双光子带间磁光共振吸收。

1. 图 3 为零磁场、7 K 下峰值光电导与峰值入射光强的关系曲线。入射光强由能量计测得总能量、用光子牵引探测器测得脉冲入射光波形而得。用乙醚衰减器衰减改变入射光强。图 3 表明在低强度区, 峰值光电导 $\Delta\sigma$ 与入射光强度是一次方关系(在对数坐标上斜率为 1), 对应于单光子吸收过程; 当光强进一步增强时, $\Delta\sigma$ 与入射光强是二次方关系(在对数坐标上斜率为 2), 这时对应于主要是双光子吸收过程; 更高强度时, 由于价带间自由空穴的吸收饱和, 斜率 ~ 1 。我们在下述实验中, 选用入射光强在 $50 \sim 100 \text{ KW}/\text{cm}^2$ 范围, 所发生的磁光吸收主要是双光子过程。

图 4 为双线示波器上显示的样品上光电导变化波形和通过光子牵引探测器测量的入射

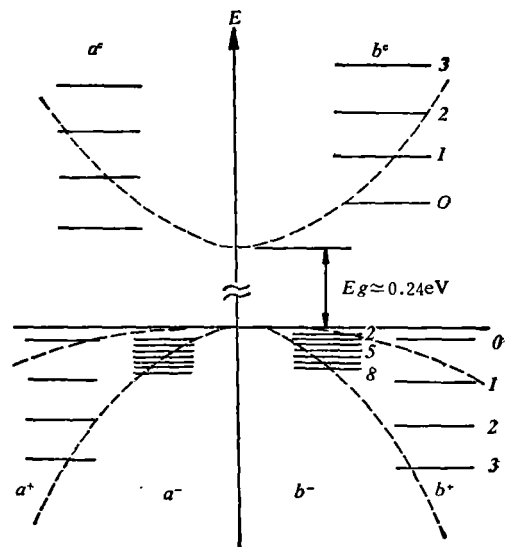


图 2 InSb 磁能级结构示意图

a, b 分别对应于自旋向上, 自旋向下能级; +, -, c 分别对应轻空穴, 重空穴和导带; 0, 1, 2, ... 为朗道量子数

光波形。

2. 典型的磁双光子吸收实验结果如图 5 所示。图 5 中(a)、(b)分别对应不同频率下

双光子光电导变化与磁场的关系曲线，图中的标号数字分别对应于价带和导带不同朗道能级间的双光子共振吸收峰。吸收峰所对应的磁场强度实验值列于表 1 中，磁场强度测量误差为 5%。

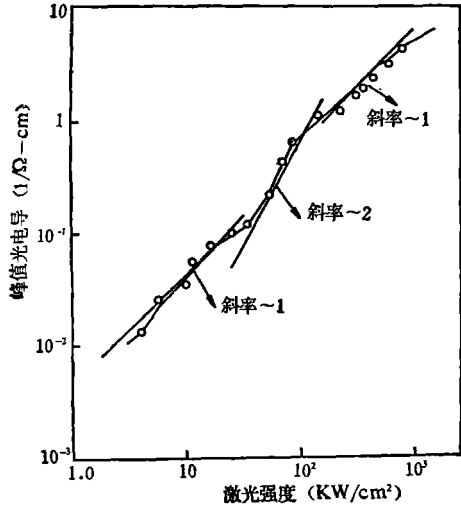


图 3 InSb 的峰值光电导与入射光强度关系曲线
 $\tilde{\nu}=1042\text{cm}^{-1}$, A-2 样品, $T=7\text{K}$

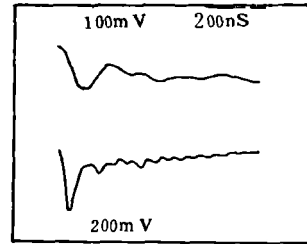


图 4 光电导变化波形(上)和入射光波形(下)

我们的实验结果与参考文献 [1] 比较：在 $\tilde{\nu}=1045\text{cm}^{-1}$ 没有观察到标号 2 吸收峰，在较高磁场下观察到标号 12 吸收峰；在 $\tilde{\nu}=973.5\text{cm}^{-1}$ 没有观察到标号 4 吸收峰，但观察到标号 12 吸收峰，在较高磁场下还观察到标号 17 吸收峰，其他结果相一致。

3. Pidgeon^[31] 和 Zawadzki^[32] 等人已经以 InSb 为例计算了窄禁带半导体的磁能级和

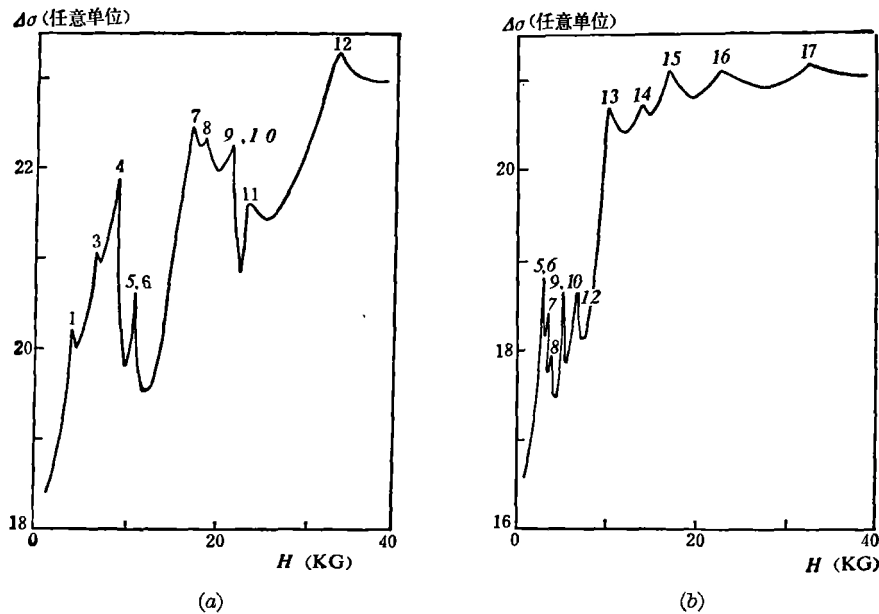


图 5 光电导变化与磁场的关系

(a) $\tilde{\nu}=1045\text{cm}^{-1}$

(b) $\tilde{\nu}=973.5\text{cm}^{-1}$

(图中标号数字分别对应于价带和导带不同朗道能级间双光子共振跃迁, 详见表 2^[11])

表 1 双光子吸收峰对应的磁场强度值

$\bar{\nu}=1045\text{ cm}^{-1}$	峰值标号	1	3	4	5,6	7	8	9,10	11	12	
	磁场强度(KG)	3.7	7.3	8.4	10.6	16.8	18.2	21.3	23.1	33.3	
$\bar{\nu}=973.5\text{ cm}^{-1}$	峰值标号	5,6	7	8	9,10	12	13	14	15	16	17
	磁场强度(KG)	3.3	3.7	3.8	4.9	6.8	10.0	13.7	17.8	22.5	32.0

表 2 双光子共振吸收跃迁标记^[1]

标号	跃迁标记	标号	跃迁标记	标号	跃迁标记	标号	跃迁标记
1	$b^-(8)a^c(6)$	6	$a^+(3)a^c(0)$ $a^-(2)a^c(2)$	11	$b^-(2)a^c(1)$ $a^+(0)a^c(1)$ $b^+(0)a^c(1)$	16	$a^-(2)a^c(0)$
2	$b^-(7)a^c(5)$	7	$a^+(1)a^c(1)$	12	$a^+(1)b^c(0)$	17	$b^-(2)a^c(0)$ $a^+(0)a^c(0)$ $b^+(0)a^c(0)$
3	$b^-(6)a^c(5)$	8	$b^-(2)b^c(1)$ $b^+(0)b^c(1)$ $a^+(0)b^c(1)$	13	$a^-(2)b^c(0)$		
4	$b^-(5)a^c(3)$ $a^+(3)a^c(1)$	9	$b^+(1)b^c(0)$ $b^-(3)a^c(0)$	14	$a^+(1)a^c(0)$ $a^+(0)b^c(0)$ $b^+(0)b^c(0)$ $b^-(2)b^c(0)$		
5	$b^-(4)a^c(2)$ $a^+(2)a^c(1)$	10	$a^-(2)a^c(1)$	15	$b^-(3)a^c(0)$		

注: 朗道量子数在括号中给出; +, -, c 分别对应轻空穴, 重空穴和导带; a, b 分别对应于自旋向上, 自旋向下能级。

波函数, 并研究了跃迁选择定则。在磁场下, 考虑自旋轨道耦合项, 把导带包括进去, 根据 Luttinger 和 Kohn 的有效质量方程, 零级解为

$$\Psi = \sum_j f_j(\mathbf{r}) u_{j,0}(\mathbf{r}), \quad (1)$$

$u_{j,0}(\mathbf{r})$ 即能带 j 在 Γ 点的 Bloch 函数。 $f_j(\mathbf{r})$ 满足方程组

$$\sum_{j'} D_{jj'} f_{j'}(\mathbf{r}) = \epsilon f_j(\mathbf{r}). \quad (2)$$

j, j' 是对 2 个导带和 6 个价带取值。 D 为左边有效质量方程的哈密顿量, 是 8×8 矩阵; ϵ 为能量本征值。

由于 D 没有精确解, Pidgeon 等采用微扰法求出 D 中的零级近似 D_0 , $D = D_0 + D_1$, 再考虑其他部分的微扰作用。 D_0 是 $K_z = 0$ 的球形对称部分, 可严格求解。 D_1 是各向异性部分, 包括 $K_z \neq 0$ 的部分, 以及反演不对称等部分。

D_0 解相当于“球形近似”, 它又可分为两个 4×4 的矩阵:

$$D = \begin{bmatrix} D_a & \\ & D_b \end{bmatrix}. \quad (3)$$

柳树政¹⁾根据 Pidgeon 等人给出的参数,重新计算了 InSb 在磁场下的能级和波函数,图 6 给出了对于部分紧靠带边的双光子跃迁,可由磁能级的计算结果作出不同磁场下跃迁能级曲线。柳树政还计算讨论了跃迁几率和对应共振峰强度。表 3 列出 $E \perp H$ 时,在紧靠带边的几个主跃迁双光子共振峰的位置与强度(相对值)关系的理论计算值,并与我们的实验结果进行了比较(见表 4)。

比较结果表明:表 4 中强度较大的六个峰,理论计算的共振位置与实验符合较好,而对强度较小的峰,有些实验上没有观察到。这说明强度的计算,有助于判断共振峰的跃迁性质,结果表明绝大部分的吸收峰都可以用价带和导带朗道能级间的二级跃迁过程来解释。

4. 当 $\tilde{\nu}=942.7 \text{ cm}^{-1}$ 时,在 7 K 下双光子的能量略小于能隙(禁带宽度),因此不可能发生带间双光子吸收。然而在磁场强度 25 kG 到 40 kG 范围内,在 $\tilde{\nu}=942.7 \text{ cm}^{-1}$ 和 948 cm^{-1} 下分别都观察到几个吸收峰,如图 7(a), (b) 和表 5 所示。这可能是由禁带中束缚能级对导带朗道能级间的跃迁引起的。

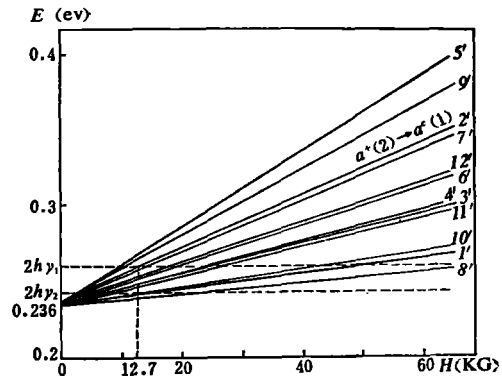


图 6 双光子共振跃迁能级图

$\tilde{\nu}_1=1045 \text{ cm}^{-1}$, $\tilde{\nu}_2=973.5 \text{ cm}^{-1}$ 。 $2h\nu_1$, $2h\nu_2$ 分别为对应 ν_1 和 ν_2 频率的双光子能量, 标号 1', 2', ... 表示不同跃迁标记(见表 3)

表 3 紧靠带边的几个主跃迁双光子共振峰的位置与强度理论值

标号	跃迁标记	$\tilde{\nu}=1045 \text{ cm}^{-1}$		$\tilde{\nu}_2=973.5 \text{ cm}^{-1}$	
		H (kG)	强度(相对值)	H (kG)	强度(相对值)
1'	$a^+(1) \rightarrow a^c(0)$	49.5	2.8×10^2	12.4	29
2'	$a^+(2) \rightarrow a^c(0)$	12.7	40	3.3	11
3'	$a^-(2) \rightarrow a^c(1)$	22.7	84	5.7	19
4'	$b^+(1) \rightarrow b^c(0)$	22.2	1.1×10^3	5.6	1.0×10^2
5'	$b^+(2) \rightarrow b^c(1)$	9.2	2.9×10^2	2.3	25
6'	$b^-(2) \rightarrow b^c(1)$	18.2	2.2×10^2	4.7	32
7'	$a^+(3) \rightarrow a^c(0)$	13.2	17	3.6	1.5
8'	$a^-(3) \rightarrow a^c(0)$	68.5	2.9×10^3	17.3	13
9'	$b^+(3) \rightarrow b^c(0)$	10.2	1.3×10^2	2.4	10
10'	$b^-(3) \rightarrow b^c(0)$	43.0	73	11.9	15
11'	$a^+(0) \rightarrow a^c(1)$	23.1	42	5.8	3.0
12'	$b^+(0) \rightarrow b^c(1)$	18.0	4.7×10^2	4.7	41

1) 柳树政,“磁场中窄禁带半导体的高阶光学性质”,北京大学物理系研究生毕业论文(1981)。

表4 双光子共振峰位置的比较

$\bar{\nu}_1=1045\text{ cm}^{-1}$	标号	4'(9)	12', 6'(8)	5*(4)	9*(5)	3'(9, 10)	11'(11)
	实验值(kG)	21.3	18.2	8.4	10.6	21.3	23.1
	理论值(kG)	22.2	18.0	9.2	10.2	22.7	23.1
$\bar{\nu}_2=973.5\text{ cm}^{-1}$	标号	4'(9)	12', 6'(8)	1'(14)	2'(5, 6)	3'(9, 10)	10*(14)
	实验值(kG)	4.9	3.8	13.7	3.3	4.9	13.7
	理论值(kG)	5.6	4.7	12.4	3.3	5.7	11.9

注: 括号内标号对应跃迁标记由参考文献[1]给出, 详见表2。带*标号表示柳树政的跃迁标记, 与参考文献[1]结果不相一致。

表5 吸收峰对应的磁场强度($\bar{\nu}=942.7\text{ cm}^{-1}$)

峰值标号	1	2	3
磁场强度(kG)	27.3	30.4	38.5

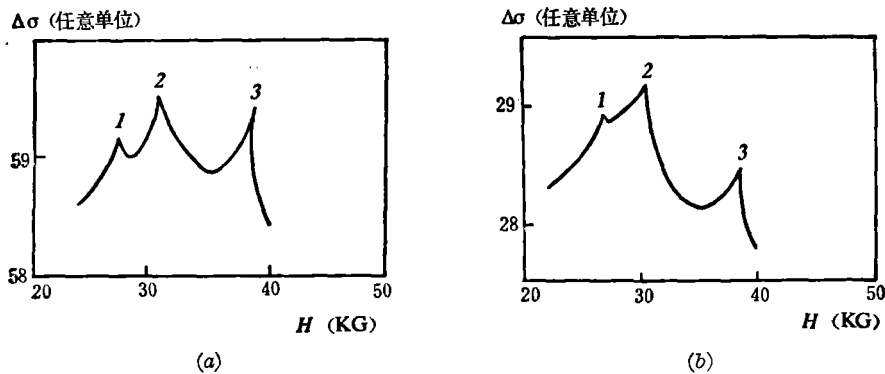


图7 光电导变化与磁场的关系

(a) $\bar{\nu}=942.7\text{ cm}^{-1}$

(b) $\bar{\nu}=948\text{ cm}^{-1}$

致谢——本实验研究用的部分 InSb 样品由中科院上海技术物理研究所提供; 此项工作得到甘子钊同志热情关心并进行有益讨论, 一并在表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Manlief S. K. and Palik, E. D., *Solid State Commun.*, **12** (1973), 1071~10751.
- [2] Wlodek Zawadzki and Jacek Wlasak, *J. Phys. C: Solid State Phys.*, **9** (1976), L663.
- [3] Pidgeon C. R. and Brown, R. N., *Phys. Rev.*, **146** (1966), 575.

EXPERIMENTAL STUDIES OF TWO-PHOTON INTERBAND MAGNETOABSORPTION IN InSb

WANG XUEZHONG CHEN CHENJIA, LIU JIZHOU, ZHU YINKANG,
CAO SHUSHI, SHI SHOUXU, LIU CAIXIA

(Department of Physics, Peking University)

ABSTRACT

Two-photon interband magnetoabsorption in InSb is studied by measuring the resulting changes in the photoconductivity as a function of magnetic field from 0 up to 40 KG. Using a TEA CO₂ laser as a source, at 9.6 μm and 10.6 μm wavelength range, we have observed peaks of absorption due to two-photon interband transitions between the different Landau levels. Comparison with the calculation indicates that most of the peaks can be explained by the second order transitions between Landau levels of the valence and conduction band while some results are not in agreement with the existing theories of two-photon magnetoabsorption. May be these transitions come from the bound level in the energy gap to the Landau levels of conduction band.