

磁场下硅中硼受主的光热电离光谱

石晓红 刘普霖 陈张海 史国良 沈学础

(中国科学院上海技术物理研究所, 红外物理国家重点实验室, 上海, 200083)

A **摘要** 用光热电离光谱方法研究了硅中硼受主杂质能级在 0~11T 磁场下的塞曼效应。观察到硅中硼受主激发态的塞曼分裂与移动。实验结果与讨论表明, 由于价带的复杂性、浅受主的基态和激发态在磁场下简并的解除以及大的空穴有效质量, 硅中浅受主的塞曼效应较浅施主更为复杂。

关键词 光热电离光谱, 浅受主, 塞曼效应。

硅 半导体

引言

0472

通过研究半导体中浅杂质的塞曼效应, 能得到半导体主晶格能带结构、载流子有效质量、杂质品种、杂质电子态以及磁场对它们的影响等许多重要信息^[1,2]。70年代以来, 光热电离光谱方法成为测定高纯半导体纯度、识别残留施主和受主、确定杂质浓度的最有用的半导体特性鉴定技术之一, 因为它把电学方法的高灵敏度和傅里叶变换光谱法的高分辨率、大光通量及多频道等优点结合为一体^[3]。1975年, Merlet 等^[4]用红外吸收光谱测量了硅中硼受主在 Voigt 及 Faraday 位形下的塞曼效应, 观察到了 1~4 线的塞曼效应, 但据作者了解, 利用光热电离光谱方法研究硅中浅受主的塞曼效应还未见报道。本文首次报道了硅中硼受主在 0~11T 磁场范围内的光热电离光谱的实验研究, 并定性讨论了硼受主随磁场的变化行为。

1 实验

实验所用样品是硼掺杂(100)p型硅片, 样品尺寸为 8mm×6mm×0.3mm。为了制备高质量欧姆电极, 首先对样品进行清洗处理, 并在两个要制备电极的部位进行硼离子注入, 为了保证电极处的表面附近有足够高的杂质浓度, 注入分两步进行。然后将样品在 1000℃ 下进行快速热退火 10s, 以消除离子注入层的晶格缺陷, 再在离子注入处蒸铝, 在 450℃ 温度下合金化 20min, 最后将铝丝超声压焊, 或用导电银浆将电极引线涂粘在电极表面即可。

实验中, 样品放在与 Bruker IFS-113V 型红外傅里叶光谱仪相连的 Oxford 螺线管型超导磁体中心的变温内杜瓦中^[5], 傅里叶光谱仪的远红外干涉光束经镀金反射镜沿光导管传输至样品室, 垂直入射到样品表面, 样品构型为 $\vec{B} // \vec{K} // (100)$, 即法拉第位形。样品的光热电离光谱信号首先经过 EG & G 113 型低噪声前置放大器放大, 再输入傅里叶光谱仪的数据处理系统。

2 实验结果

2.1 零磁场下杂质浓度引起的谱线展宽

作为比较,图 1 给出 2 块不同纯度的样品在无外磁场时, 18K 温度下硼受主的光热电离光谱测量结果,其中样品 1[#]和 2[#]的室温载流子浓度分别为 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 及 $4 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$. 图 1 清楚地显示了硼受主从 3 至 10 线的一系列谱线,表 1 给出了由图 1 获得的对应于硼受主基态到各激发态跃迁谱线的能量位置.

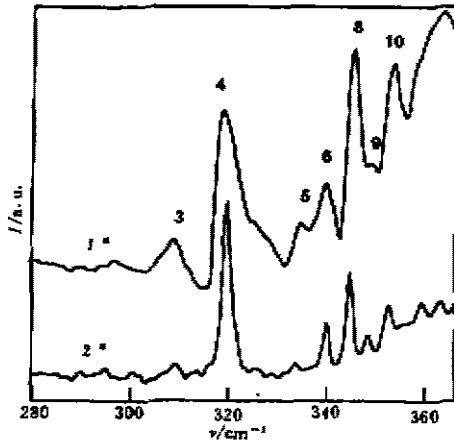


图 1 硅中硼受主的光热电离光谱
Fig. 1 Photothermal ionization spectroscopy of B acceptor in Si

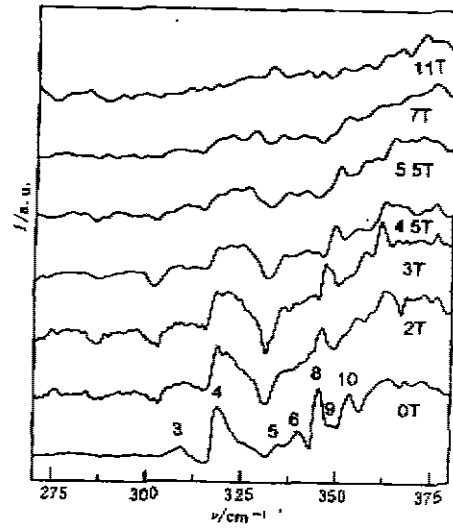


图 2 硅中硼受主在不同磁场强度下的光热电离光谱
Fig. 2 Photothermal ionization spectroscopy of B-doped Si in different magnetic field

由图 1 可以看到,样品 1[#]与 2[#]的结果相比,其谱线明显展宽,例如 8 线的线宽增大了大约 1 倍,4 线的半高宽由后者的 2.4cm^{-1} (0.3meV) 增加到约 5.3cm^{-1} (0.66meV). 这主要是由于浓度展宽效应引起的. Baltensperger^[7]的计算表明,当 $N_i \approx \frac{3}{4\pi r_s^3}$, $r_s = 6na_0$ 时,杂质浓度引起的谱线展宽变得不可忽视. 这里 N_i 为杂质浓度, n 为能级主量子数, a_0 为束缚载流子的有效玻尔半径. 硅的类氢玻尔半径 $a_0 \approx 20 \text{Å}$, 代入上式得 $N_i \approx \frac{1.38}{\pi^3} \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, 对 3 线, $N_i \approx 5.11 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$. Newman^[8]的实验结果也表明,对硅中受主杂质,当其浓度约为 10^{16}cm^{-3} 时,杂质谱线开始展宽,这与计算结果一致. 由于样品 1[#]的硼杂质浓度为 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$, 所以其谱线与高纯硅(半高宽为 0.01meV)^[9]相比有明显展宽.

2.2 磁场下浅受主硼的能级分裂与移动

图 2 为磁场平行于 (100) 晶向时,样品 1[#]在 0~11T 不同磁场强度下的光热电离光谱,

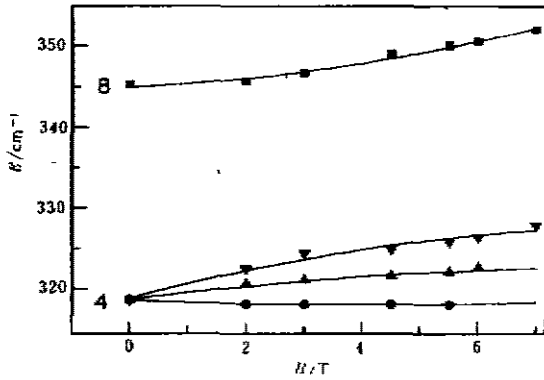


图3 硅中硼受主的4线和8线的塞曼分裂能量随磁场的变化关系图
Fig. 3 Magnetic field dependence of the Zeeman splitting of lines 4,8 for boron acceptor in Si

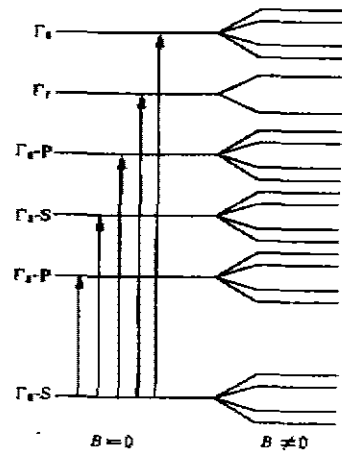


图4 锗中浅受主的塞曼分裂能级示意图
Fig. 4 Energy-level scheme of the Zeeman splitting for the shallow acceptor in Ge

样品温度为18K,光谱范围为260~380cm⁻¹,分辨率为1cm⁻¹.图3给出了图2中的4线和8线的能量位置随磁场变化的扇形图.

从图2中可以看出,在磁场作用下,谱线发生明显的能级分裂和移动现象.当B=2T以上,我们观察到了硼杂质激发态4线的塞曼分裂,8线则发生明显移动;当磁场B增加到77T,8线的位移量为6.75cm⁻¹.其它谱线也发生分裂或漂移.但由于在磁场中信噪比降低,所以弱的分裂难以分辨,只能观察到它们随磁场增加的展宽.另外,随着磁场的增加,虽然高激发线的分裂和移动的总趋势较明显,但具体指认则很困难.

表1 硅中硼受主各激发谱线的能量位置
Table 1 Position of the excited lines of B acceptor in Si

线 No.	3	4	5	6	8	9	10
跃迁 ^[6]	3P _{3/2} -1S _{3/2} (3Γ ₇ -Γ ₇)	2P _{5/2} -1S _{3/2} (1Γ ₆ -Γ ₇)					
位置(cm ⁻¹)	309.04	318.68	334.59	339.90	345.20	348.57	353.39

3 结果分析

Lin-chung 和 Wallis^[10]用有效质量理论及 Mendelson 和 James^[11]的波函数计算了锗中浅受主态的塞曼分裂,在无外磁场的情况下,受主杂质的基态是四重简并的,在加外磁场后,具有Γ₆对称的基态能级和激发态能级均分裂为4个能级,而具有Γ₇和Γ₈对称的态则分裂

为 2 个态, 如图 4 所示. 由于这些塞曼能级彼此能量相隔很近, 通常很难实验分辨.

对于硅, 由于它和锗的价带具有类似的结构特点, 可以预期硅中浅受主的塞曼分裂应该与锗的相似, 但由于更大的空穴有效质量和较小的自旋轨道耦合分裂, 使得实验上硅中浅受主的塞曼分裂更加难以分辨. 1975 年, Merlet 等人利用红外透射光谱观察到 $\bar{B} // \bar{K} // (100)$ 位型下硅中硼受主 7 条分裂的 1 线、3 条分裂的 2 线、5 条分裂 3 线及 8 条分裂的 4 线^[4]. 但限于吸收光谱实验的灵敏度, 很难看到 4 线以上的硼受主激发线的塞曼效应. 而我们利用高灵敏度的光热电离光谱观察到了直至 10 线的高激发态的塞曼效应. 从我们的图 2 可以看到, 由于各分裂谱线能级相隔很近, 谱线间互相交叠, 导致随着磁场的增加, 谱线明显展宽, 因此这种展宽可以认为是塞曼分裂效应引起的. 只是对多数谱线来说 (例如 3 线、5 线、6 线和 9 线), 信号较弱, 并且随磁场增大, 其光热电离光谱信噪比下降, 因而难以分辨其分裂状况. 4 线在 2T 时明显分裂为两条, 而且在 $B > 3T$ 时分裂为 3 条, 8 线及 10 线随磁场的增加则发生明显的塞曼移动, 其塞曼分裂未被观察到. 图 3 是 4 线和 8 线跃迁能量随磁场的关系图, 这与锗中浅受主的情况相似^[12], 能级随磁场的分裂和移动是非线性的, 这是因为受主基态和多数激发态在磁场下均分裂成 4 个态, 致使受主激发态、特别是高激发态能量彼此相隔很近, 使它们的塞曼分量相互作用所致. 另外我们知道, 硅中硼受主的谱线中, 在无磁场下, 4 线与 8 线分别对应于硼受主四重简并的基态至两重简并的或四重简并的激发态的跃迁, 因此, 按照理论分析, 实验中应该能观察到 8 线的多个分裂谱线, 但是我们在实验中并没有观察到 8 线的分裂, 只观察到 8 线的移动. 这一现象使谱线的解释复杂化, 因此, 理论上对磁场中硅的受主态的进一步研究和计算似乎很有必要.

4 结 语

在磁场下测量了硅中硼受主的光热电离光谱, 观察到了硅中硼受主激发态 4 线的非线性塞曼分裂与 8 线的非线性塞曼移动. 分析表明, 这些非线性现象是能态之间相互作用的结果.

参 考 文 献

- 1 Ramdas A K, Rodriguez S. *Rep. Prog. Phys.*, 1981, **44**:1297
- 2 沈学础. *半导体光学性质*, 北京: 科学出版社, 1992
- 3 沈学础. *近代傅里叶变换红外光谱技术及应用*, 第十九章, 上海: 科学技术文献出版社, 1994
- 4 Merlet F, et al. *Phys. Rev.*, 1975, **B12**:3297
- 5 刘普霖, 史国良, 等. *红外与毫米波学报* 1993, **12**:271
- 6 Baldereschi A, Lipari N. *Phys. Rev.*, 1974, **B9**:1525
- 7 Baltensperger W. *Phil. Mag.*, 1953, **44**:1355
- 8 Newman R. *Phys. Rev.*, 1956, **103**:103
- 9 Shen S C, Yu Z Y, Huang Y X. *Int. J. IR mm Waves*, 1990, **11**:595
- 10 Lin-Chung P J, Wallis R F. *J. Phys. Chem. Solids*, 1969, **30**:1453
- 11 Mendelson K S, James H M. *J. Phys. Chem. Solids*, 1964, **25**:729
- 12 Moore W J. *Phys. Chem. Solids*, 1971, **32**:93

PHOTOTHERMAL IONIZATION SPECTROSCOPY OF BORON ACCEPTOR IN SI UNDER MAGNETIC FIELD

Shi Xiaohong Liu Pulin Chen Zhanghai Shi Guoliang Shen Xuechu

(National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract The Zeeman effect of B acceptor in Si was investigated with PTI technique under magnetic field up to 11T with $\vec{B} // \vec{K} // (100)$. The Zeeman splitting of the excited state for B in Si was observed. The experimental results and analysis show that the Zeeman effect of shallow acceptor is complicated as compared with that of shallow donor in Si due to the complicated valence band, large hole effective mass and the splittings of the ground state and excited state of acceptor.

Key words photothermal ionization spectroscopy, shallow acceptors, Zeeman effect.