

用傅里叶变换光谱仪同时测定半导体 浅施主和浅受主杂质浓度的装置

肖金才* 俞志毅 陆 卫 叶红娟 张继昌**

(中国科学院上海技术物理研究所红外物理开放研究实验室)

摘要——报道了一个与 Nicolet 200SXV 傅里叶变换光谱仪联用的可同时测定半导体样品中浅施主和浅受主杂质浓度的实验装置,介绍了用该装置同时测定硅样品中杂质硼和磷浓度的实验。

一、引 言

吸收光谱是研究半导体能带结构、晶格振动以及其它有关性质的一种最基本最有效的光学方法^[1~3]。与常规光谱仪相比,傅里叶变换光谱仪具有光通量大、分辨率高、频带宽等突出优点,近年来已成为研究半导体中浅杂质电子跃迁等过程的一种有力手段^[4~6]。

由于半导体中浅杂质的电离能较低($<0.1\text{eV}$),所以采用通常的远红外吸收光谱方法只能观察到受到部份补偿后的某一种类型(施主或受主)杂质的电子态,而不能同时测量施主和受主的激发。本文报道一种与 Nicolet 200SXV 傅里叶变换红外光谱仪联用的外激发实验装置,利用该装置,从傅里叶光谱仪引一束能量大于待测半导体样品禁带宽度的连续激发光束($h\nu \gg E_g$)与光谱仪内调制红外光同时照射在样品上,以产生足够量的电子-空穴对,使样品中原来已经电离的杂质重新成为可用光学方法探测的中性杂质。由于低温下宽禁带半导体材料的电子-空穴对直接复合几率较小(GaAs 除外),因而在低温红外吸收光谱中会同时出现 N 型和 P 型杂质的吸收峰,进而可同时算出它们的浓度及杂质补偿度。该实验装置已成功地用于硅样品中硼、磷杂质含量的同时测定。

二、实验装置的设计和调试

Nicolet 200SXV 傅里叶光谱仪光学台系统和我们设计的实验装置的光路如图 1 所示。

本文 1987 年 10 月 27 日收到,修改稿 1988 年 1 月 12 日收到。

* 中国科学院上海技术物理研究所。

** 同济大学物理系。

图中实线方框内是用液氮致冷可从 4.2~300 K 连续变温的牛津光测杜瓦瓶, 待测样品 SM

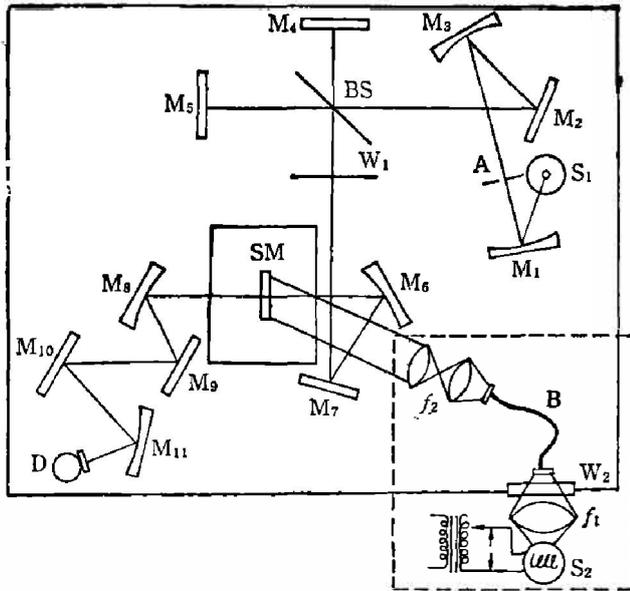


图1 实验装置及 Nicolet 200 SXV 傅里叶变换红外光谱仪的光学系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the optical system of the experimental set-up and the Nicolet 200 SXV Fourier transform spectrometer

S_1 ——光源(硅碳棒), A——孔径光栏, BS——分束器, D——探测器, $M_1, M_3, M_5, M_8, M_{11}$ ——离轴抛物面反射镜, $M_2, M_4, M_6, M_7, M_9, M_{10}$ ——平面反射镜, S_2 ——钨卤素灯, f_1 ——会聚透镜, f_2 ——透镜组, W_1 ——黑聚乙烯薄膜, W_2 ——光学玻璃窗口, B——光导管, SM——待测样品

置于杜瓦瓶内铜制的样品架上, 杜瓦瓶窗口材料根据样品的测量要求而定。用黑聚乙烯薄膜 W_1 滤去硅碳棒光源中 $h\nu \geq E_g$ 的可见光和近红外辐射, 来自干涉仪的平行相干光束聚焦在样品上。

虚线方框即为我们设计的实验装置, 它由外激发光源 S_2 、会聚透镜 f_1 、光导管 B 及准直系统 f_2 组成。实验中为了尽量减少外激发光源 S_2 对样品的升温作用并滤去波长大于 $1.4 \mu\text{m}$ 的红外辐射, f_2 中还用了 10 mm 厚的水层。从 S_2 发出的光经过透镜 f_1 和窗口 W_2 会聚在光导管的进口端面上, 光导管输出的光经过透镜组 f_2 准直后以适当的角度照射在样品上。对于硅样品 ($E_g = 1.11 \text{ eV}$, 对应 $\lambda = 1.12 \mu\text{m}$), 外激发光源 S_2 采用钨卤素灯, 杜瓦瓶窗口选用 KRS_5 。光学玻璃窗口 W_2 是利用光谱仪中已有的气相摄谱通道改装而成的, 由于 Nicolet 200SXV 傅里叶变换光谱仪是真空型仪器, 所以在设计和按装时需保证窗

口 W_2 与光学台有良好的密封性。测量时, 外激发光斑充满整个样品, 辅助测量表明, 外激发光能穿透 5~10 mm 的硅样品, 钨卤素灯的发射光谱和光导管的传输效率如图 2 所示。由图可见, 光导管对可见光和近红外辐射均有较好的传输性能, 在 $1.1 \mu\text{m}$ 处的传输效率约为 37%。反复试验表明, 该装置调试简便、可靠, 实验重复性好。

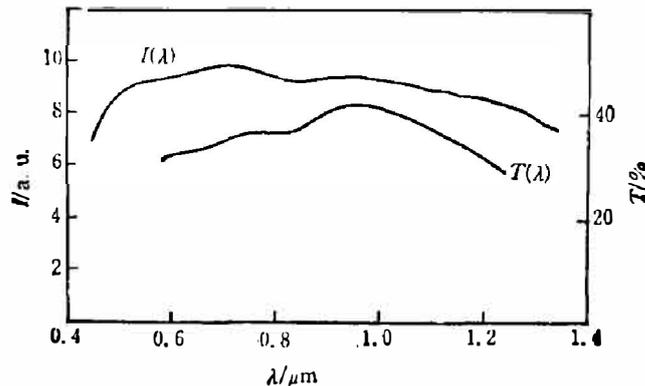


图2 钨卤素灯的发射光谱和光导管的传输效率

Fig. 2 Emission spectrum of the W-halogen lamp and transfer efficiency of the optical fiber.

三、实验测量结果

我们用该实验装置多次测量了电阻率从 $10 \sim 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ 的 P 型和 N 型硅样品在未加外

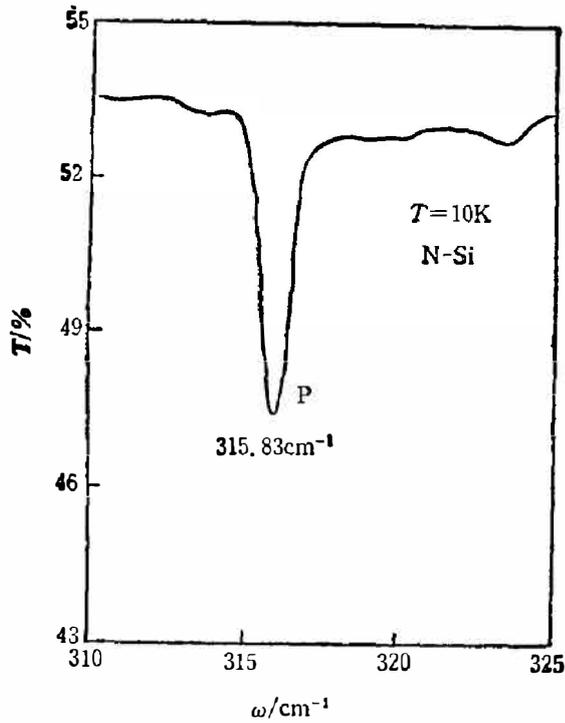


图3 N型硅样品($\rho=3050 \Omega \cdot \text{cm}$, $d=5 \text{ mm}$)在 $T=10 \text{ K}$ 时的远红外透射光谱
 Fig. 3 Far-infrared transmission spectrum of an N-type silicon sample ($\rho=3050 \Omega \cdot \text{cm}$, $d=5 \text{ mm}$) at $T=10 \text{ K}$.

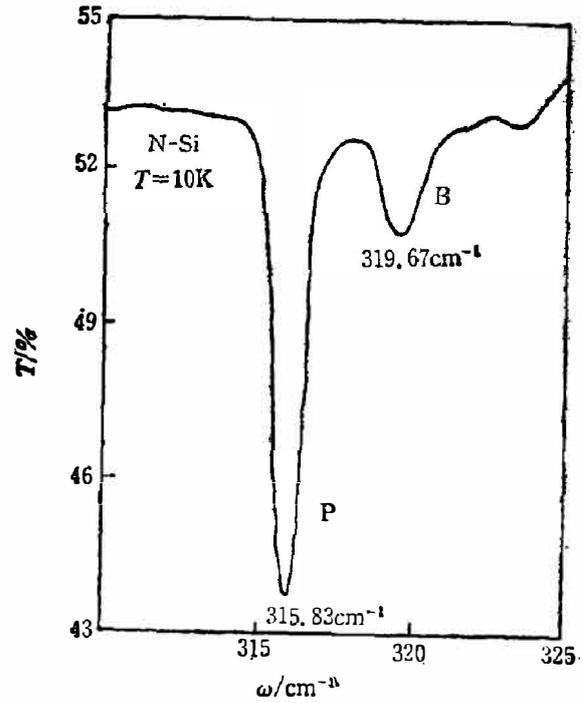


图4 有外激发光照情况时 N型硅样品($\rho=3050 \Omega \cdot \text{cm}$, $d=5 \text{ mm}$)在 $T=10 \text{ K}$ 时的远红外透射光谱
 Fig. 4 Far-infrared transmission spectrum of an N-type silicon sample ($\rho=3050 \Omega \cdot \text{cm}$, $d=5 \text{ mm}$) under external illumination at $T=10 \text{ K}$.

激发光照和外激发光照下的低温红外吸收光谱,典型结果示于图3、4。图3是厚度为5 mm,电阻率为 $3050 \Omega \cdot \text{cm}$ 的 N型硅样品在无外激发光照情况下的低温红外透射光谱,图中位于 315.83 cm^{-1} 的吸收峰为磷杂质的特征吸收峰,谱线强度表征了净杂质浓度。图4为同一样品在外激发光照情况下的低温红外透射光谱,由图中可以清楚地看出,原先已电离了的硼杂质的位于 319.67 cm^{-1} 特征吸收峰与 315.83 cm^{-1} 处磷特征吸收峰同时出现。减小外激发光能量,硼吸收峰强度会随之减小,反之增大以至饱和,图4给出的是饱和时的情况。根据硼、磷特征吸收峰的吸收强度和由样品电阻率得出的净杂质浓度,可同时得到该样品中硼、磷杂质浓度分别为 $1.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 和 $2.9 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 。

详细的实验数据处理、结果分析和讨论将另文报道。

四、结 论

采用本文报道的实验装置已同时测得了硅样品中杂质硼、磷的浓度,这是一种简便有效的测量方法,如果进一步扩大测试波段范围,还可以观察到硅中的其它杂质(如砷、铝)的特征吸收峰,算得它们各自的浓度及杂质补偿度。只要更换窗口和透镜便可引入测量其它半导体样品所需要的激发光,从而扩大研究范围。另外值得一提的是,本实验装置还可用于光热电离谱(PTIS)技术研究高纯半导体材料中的浅施主和浅受主电子态。

致谢——中国科学院上海技术物理研究所红外物理开放实验室主任沈学础研究员对本工作

给予了热情的关心和支持并修改了本文初稿, 复旦大学物理系屈逢源教授对本项研究进行了热忱指导, 作者们表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] Balkanski M., in *Handbook on Semiconductors*, Ed. by Balkanski M., North-Holland, 1980, Vol. 2, P. 497.
- [2] Pankove J. I., *Optical Processes in Semiconductors*, Printice-Hall, 1971, P. 34.
- [3] Moss T. S., *Optical Properties of Semiconductors*, Butterworths, 1959, P. 34.
- [4] 沈学础, 物理学进展, 2(1982), 275.
- [5] Vidrine D. W., *Anal. Chem.*, 52(1980), 92.
- [6] Baber S. G., *Thin Solid Films*, 72(1980), 201.

AN EXPERIMENTAL SET-UP COMBINED WITH A FOURIER TRANSFORM SPECTROMETER FOR SIMULTANEOUS DETERMINATION OF CONCENTRATIONS OF BOTH SHALLOW ACCEPTORS AND DONORS IN SEMICONDUCTORS

XIAO JINCAI, YU ZHIYI, LU WEI, YE HONGJUAN, ZHANG JICHANG
(*Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

An experimental set-up combined with a Nicolet 200SXV Fourier transform spectrometer used for simultaneous determination of concentrations of both shallow acceptors and donors in semiconductor samples under the illumination of an external light beam ($h\nu \geq E_g$) is reported. As an example, the concentrations of both boron and phosphorus impurities in silicon have been simultaneously measured using this set-up.