

硅中浅杂质的激光感应光电导谱

张 兵 临

(郑州大学物理系)

A. Kangarlou H. R. Chandrasekhar

(Department of Physics and Astronomy University of Missouri-Columbia, U.S.A.)

提 要

首次采用光子能量小于硅中浅受主杂质电离能的可调谐远红外激光器作为激发源, 获得了硅中浅受主杂质的光电导谱。可调谐半导体远红外激光器的调谐范围为 $380\sim 500\text{ cm}^{-1}$, 光子流密度约 $10^{18}/\text{cm}^2\cdot\text{sec}$, 用双光子跃迁对光电导谱进行了解释。对于 Si:Al 样品, 光电导谱中的双峰分别相应于 $2P^1$ 和 $2P^2$ 中间态的双光子共振跃迁。也观察到了双光子透明的反共振现象。

关键词: 光电导谱; 双光子跃迁; 浅受主杂质。

一、引 言

人们对本征半导体的双光子光谱已作了大量的研究, 然而对半导体浅杂质中心的双光子过程研究极少。近年来 Bassani 和 Quattropani^[1] 从理论上强调了研究浅杂质中心的双光子光谱对于了解杂质的激发态细节具有重要意义。Golka 和 Mostowski^[2] 的理论工作提出了在半导体浅施主杂质的双光子光谱中采用光热电离技术的建议^[2]。关于浅杂质中心的双光子光谱实验研究, 迄今仅有一篇报道^[3]。本文采用小功率可调谐远红外激光器作为激发源, 其光子能量远小于浅杂质电离能, 获得了具有双光子跃迁结构的光电导谱。文中给出了实验结果, 并对实验结果给出了双光子跃迁的解释。

二、实验装置

实验装置简图如图 1 所示。样品是 Si:Al 杂质浓度为 10^{15} cm^{-3} , 其尺寸为 $0.4\times 1\times 1\text{ mm}^3$, 样品被置于低温样品池内, 温度为 1.5 K , 低温是靠泵浦液氮技术而实现的。可调谐远红外激光二极管作为激发源, 调谐范围 $380\sim 500\text{ cm}^{-1}$ 波数。光子流密度约为 $10^{18}\text{ cm}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$ 线宽为 5 cm^{-1} 波数。激光功率为毫瓦级。调谐是靠改变半导体激光二极管的温度来实现的。其温度变化由计算机来控制。样品受激光辐照所产生的光电导信号进入锁相放大器, 放大后输入计算机处理。样品的单光子光电导谱是由傅里叶变换光谱仪测得的。

三、实验结果与讨论

1. 半导体浅杂质中心的双光子光电导谱的成因

收稿日期: 1988年11月21日; 收到修改稿日期: 1989年6月22日

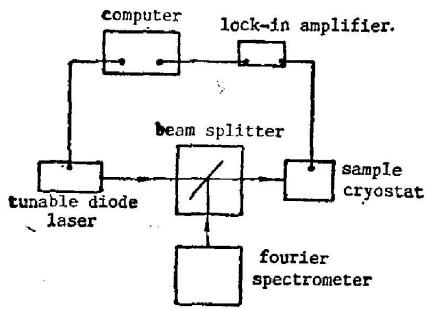


Fig. 1 Schematic of experimental set-up

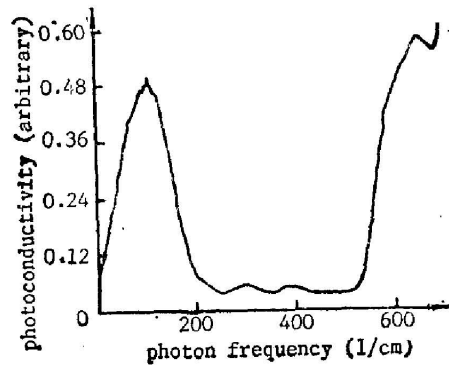


Fig. 2 Photoconductivity spectrum of Si:Al at 1.5 K

为了探测样品在 $380\sim 500\text{ cm}^{-1}$ 波数的光谱区域(即激光器的调谐区域)内是否存在单光子吸收,我们首先利用傅里叶变换光谱仪测得单光子吸收的光电导谱,如图 2 所示。实验

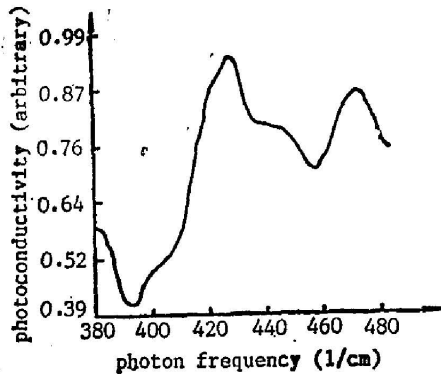


Fig. 3 Two photon photoconductivity spectrum of Si:Al at 1.5 K using tunable semiconductor laser

是在 1.5 K 的低温下进行的,因此可完全排除热电离的可能性,由图 2 可见,在 550 cm^{-1} 附近光电导响应突然上升,它相应于硅中铝杂质中心从基态到价带的电离过程。铝杂质中心结合能约为 550 cm^{-1} 。在 100 cm^{-1} 波数附近的另一峰值是由于 A^+ 中心的光电导响应。 A^+ 中心是由于一个杂质原子束缚两个空穴而形成的一个新的浅杂质中心。从图 2 明显看出,在 $380\sim 500\text{ cm}^{-1}$ 光谱区域内,光电导响应基本上接近于零*。从 A 态及 A^+ 态的光谱宽度可以判断 A 态及 A^+ 态到价带的单光子吸收跃迁几率在 $380\sim 500\text{ cm}^{-1}$ 范围接近于零。因此,几乎不存在单光子吸收过程。然而,当采用半导体可调谐激光器

作为光源时,在 $380\sim 500\text{ cm}^{-1}$ 同一光谱区域内调谐,则获得了明显的光电导响应,其光电导谱如图 3 所示。作者认为这是由于双光子吸收所呈现的光电导响应。从图 3 可见,在 433 cm^{-1} 和 466 cm^{-1} 位置呈现两个峰。由激发谱给出的铝杂质的激发态 $2P^1$, $2P^2$ 谱线位置分别为 422 cm^{-1} 和 471 cm^{-1} ^[4,5]。我们的实验结果与此数据在实验误差所允许的范围内基本上符合。由此可见,图 3 中的两个峰是由于在 $2P^1$ 和 $2P^2$ 态呈现双光子共振跃迁的结果。从图 3 中还可以看到在第一个峰值之前,约在 392 cm^{-1} 位置呈现双光子透明凹陷,即反共振响应。这些实验结果均与 Bassani^[1] 的理论预言相一致。

Quattropani 等^[6]给出了氢原子双光子电离跃迁几率为

$$\bar{W} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{e^4 a_0^4 |E_1 E_2|^2}{72 (2\pi \hbar^2)^2 R^3} |D_1^n|^2 n^3, \quad (1)$$

式中 a_0 为玻尔半径, R 为里德堡常数, E 为光波场, e 为电子电荷, \hbar 为普朗克常数。 $|D_1^n|$ 为无量纲跃迁几率幅。

* 严格讲,处于噪音水平。

根据有效质量理论, 半导体浅杂质中心的有效里德堡常数和有效玻尔半径可分别表示为

$$R^* = \frac{Rm^*}{m\epsilon^2}, \quad (2)$$

$$a_0^* = \frac{a_0\epsilon m}{m^*}, \quad (3)$$

式中 m 为电子质量, m^* 为空穴或电子的有效质量, ϵ 为半导体的介电系数。将半导体中浅杂质中心作为类氢原子模型处理, 并且采用有效质量近似, 则浅杂质中心的双光子电离跃迁几率为

$$\bar{W} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{e^4 (a_0^*)^4 |\mathbf{E}\mathbf{E}|^2}{72(2\pi\hbar^3)^2 (R^*)^3} |D_1^n|^2 n^2, \quad (4)$$

作为近似, 式中仍采用了氢原子的无量纲跃迁几率幅 $|D_1^n|$ 。

由(3)、(4)式可以估算出半导体浅杂质中心的有效里德堡常数比氢原子的里德堡常数小三个量级, 而有效玻尔半径则比氢原子玻尔半径大两个量级。比较(4)式和(1)式, 则得出半导体浅杂质中心的双光子跃迁几率比氢原子的双光子跃迁几率增强约 10^{17} 倍。这就是为什么我们采用小功率连续波半导体可调谐激光器能观察到半导体浅杂质中心的双光子光电导的原因。

2. 双光子光电导与入射光强(或光功率)之间的关系

在样品中通过 dx 距离, 光强变化可表示为^[7, 8]

$$dI = -\alpha I dx - \beta I^2 dx - \gamma I^2 dx, \quad (5)$$

式中 α 为线性吸收系数, β 为双光子吸收系数, γ 为非平衡空穴的吸收系数。(5)式的解为

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x} \left\{ 1 + \frac{\beta + \gamma}{\alpha} I_0 [-e(-\alpha x)] \right\}^{-1}, \quad (6)$$

式中 I_0 为入射于样品表面的入射光强。采用 $e^{\alpha x} \simeq 1 + \alpha x$ 近似, 可得

$$I(x) = \frac{I_0}{1 + [\alpha + (\beta + \gamma) I_0] x}. \quad (7)$$

受主杂质光电导可以写为

$$\Delta\sigma = e\mu_+ \int_0^d \Delta N(x) dx, \quad (8)$$

式中 μ_+ 为空穴迁移率, $\Delta N(x)$ 为在 x 深度处非平衡空穴浓度, d 为样品厚度。在样品中 dx 厚度内双光子吸收所产生的非平衡载流子数目为 $(\beta I^2 / 2\hbar\omega) dx$, 在稳态情况下, 有

$$\frac{\beta I^2}{2\hbar\omega} dx = \frac{\Delta N(x)}{\tau_0}, \quad (9)$$

式中 $(1/\tau_0)$ 为非平衡载流子复合速率。由(8)、(9)两式得

$$\Delta\sigma = \frac{e\mu_+ \beta \tau_0}{2\hbar\omega} \int_0^d I^2(x) dx. \quad (10)$$

将(7)式代入(10)式, 并考虑到单光子吸收跃迁几率在激光波长范围内接近于零。积分(10)式可近似得到

$$\Delta\sigma \simeq \frac{e\mu_+ \beta \tau_0}{2(\beta + \gamma)\hbar\omega} I_0, \quad (11)$$

即双光子光电导与入射光强近似成线性关系, 与我们的实验结果基本符合。我们在两个波

长(433 cm^{-1} , 466 cm^{-1})下分别测量了光电导与入射光强的关系,基本上是线性的。

尚需说明的是激光透过率与入射光强依赖关系的测量是双光子跃迁的又一判断性实验。但由于实验装置困难,未能予以测量。

四、结 论

用小功率连续波可调谐远红外半导体激光器作激发源,在 1.5 K 低温条件下对 Si:Al 样品测得了激光感应光电导谱,其光谱结构与双光子跃迁的理论预言相一致。

参 考 文 献

- [1] F. Bassani, A. Quattropani; *Solid State Commun.*, 1985, **53**, No. 12 (Mar), 1077~1081.
- [2] J. Golka, J. Mostowski; *Phys. Rev. (B)*, 1978, **B18**, No. 6 (15 Sep), 2755~2760.
- [3] W. Bohm, E. Ettliger *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1981, **47**, No. 17 (26 Oct), 1198~1201.
- [4] A. Onton, P. Fisher *et al.*; *Phys. Rev.*, 1967, **163**, 686.
- [5] D. W. Fisher J. Rome; *Phys. Rev. (B)*, 1983, **B27**, No. 8 (15 Apr), 4826~4832
- [6] A. Quattropani, F. Bassani *et al.*; *Phys. Rev. (A)*, 1982, **A25**, No. 5 (May), 3079.
- [7] A. M. Danishevskii *et al.*; *Soviet Phys. JEPT*, 1970, **29**, 781.
- [8] V. V. Arsenov *et al.*; *Soviet Phys. JEPT*, 1969, **29**, 413.

Laser-induced photoconductivity spectroscopy from shallow acceptor impurities in silicon

ZHANG BINGLIN

(Physics Department, Zhengzhou University)

A. KANGARLU, H. R. CHANDRASEKHAR

(Department of Physics and Astronomy, University of Missouri-Columbia, U.S.A.)

(Received 21 November 1988; revised 22 June 1989)

Abstract

Using a tunable semiconductor laser in the spectral range of 380 cm^{-1} to 500 cm^{-1} , laser-induced photoconductivity spectrum from shallow acceptor impurities in silicon was observed for the first time. The photon flux on the sample was typically 10^{18} per $\text{cm}^2\text{-sec.}$, and the photon energy was smaller than the ionization energy of the impurities. Two photon transition is suggested for the representation of the spectrum. Resonances in the photoconductivity spectrum are observed for the photon energies corresponding to the $2p^1$ and $2p^2$ states of Si:Al which act as intermediate states for the two photon transition. Anti-resonance due to two photon transparency is also observed.

Key words: photoconductivity spectroscopy, two photon transition, shallow acceptor impurities.