

研究简报

半绝缘 InP 的铁能级研究

彭 承 孙恒慧

(复旦大学 物理系, 上海, 200433)

唐文国 李自元

(中国科学院上海技术物理所红外物理开放实验室, 上海, 200083)

1990年5月28日收到, 7月24日定稿

本文用光致发光光谱及光激电流瞬态谱研究了掺铁半绝缘 InP 中的铁能级, 发现被测样品可分成两类; 它们分别存在着 $\text{FeI}(\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+})$ 和 $\text{FeII}(\text{Fe}^{4+}/\text{Fe}^{3+})$ 两种不同的铁能级。这可能是由于它们分别对应于浅施主和浅受主补偿的 InP 半绝缘材料, 亦说明有争议的 Fe^{4+} 是在有些半绝缘 InP 中存在的。

一、引言

InP 是一种重要的光电半导体材料, 早在 70 年代初已发现在 InP 中掺入适量的铁杂质可以形成电阻率 $> 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ 的半绝缘材料。铁在 InP 中可以形成多种带电状态, Fung 等^[1]提出铁的带电状态为 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 和 Fe^{4+} 。Eaves 等^[2]则认为应是 Fe^{4+} 、 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 。Clerjaud^[3] 在评论 III-V 族化合物中过渡族杂质的性质时认为还需有更多的工作来证实 Fe^{4+} 是否存在于 InP。本文将用光致发光光谱和光激电流瞬态谱方法来研究 InP 中铁的带电状态, 得到的结论与 Eaves 等的模型相符合。

二、实验方法

光致发光光谱的激发光源为 514.5 nm 的 Ar^+ 离子激光器, 样品置于高真空样品室内, 用液氮降温, 该样品室可按实验需要将样品温度控制在 77 K 以上的任何值, 精度高于 $\pm 0.1 \text{ K}$ 。探测器为致冷的 S-1 型光电倍增管。光激电流瞬态谱的装置请见文献 [4]。

样品采用冶金所和 1413 所提供的掺铁半绝缘 InP 单晶。它们的室温电阻率均大于 $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ 。在测量前先在 $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O} = 4:1:1$ 的溶液中腐蚀清洗, 然后可直接进行光致发光测量。对于用光激电流瞬态谱测量的样品, 还需放入 10^{-6} 托真空中镀 AuGeNi 合金制备欧姆电极, 电极做在同一抛光面上, 间距 5 mm 左右。

三、实验结果及讨论

对于各种掺铁半绝缘 InP 样品进行了 77K 的光致发光光谱的测量, 得到了图 1(a)和 1(b) 的两类结果, 它们的峰位相同, 但强度 I 有明显的差别。 $E_1 = 1.410\text{eV}$ 在图 1(a)和 1(b) 中强度相差几十倍, 该峰随温度变化的规律如图 2, 它对应于带边(BE)跃迁。 $E_2 = 1.374\text{eV}$ 被认为是导带电子到浅受主(BA)的跃迁^[3], 或浅施主到浅受主(DA)的跃迁^[4]。图 1(a)在波长更长的方向 $E_3 = 1.13\text{eV}$ 处还观察到一个宽峰。这个宽峰 Eaves^[5] 和 Demberel^[6] 等均观察到。由 Eaves 等^[2]提出的铁杂质在 InP 中各种带电状态的能级图如图 3 所示。它的特点是在价带上面 0.27eV 处还存在一个 FeII 能级, 这是 $\text{Fe}^{4+}/\text{Fe}^{3+}$ 能级, FeI 为 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 能级。Eaves 等认为 1.1eV 的光致发光宽峰来源于导带电子到 FeII 能级的跃迁, 这时铁的带电状态由 Fe^{4+} 变为 Fe^{3+} 。

由图 1(a) 和 1(b) 的差别可将样品分为两类: A 类样品的带边跃迁峰 E_1 较强, E_3 峰亦较易被观察到。B 类样品 E_1 峰较弱, E_3 峰亦不易显示出来。带边跃迁峰 E_1 的产生对

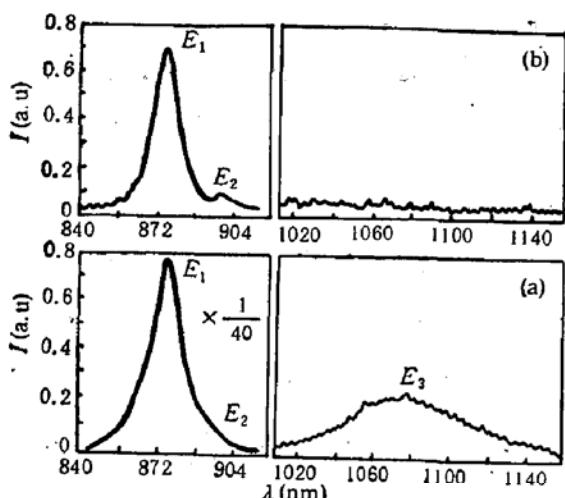


图 1 (a) A 类样品光致发光谱 (b) B 类样品光致发光谱

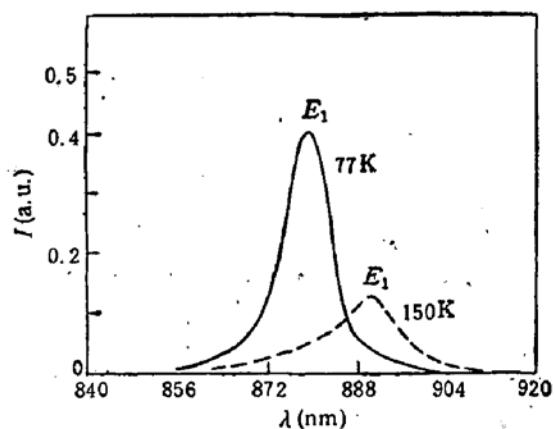


图 2 E_1 峰随温度变化情况

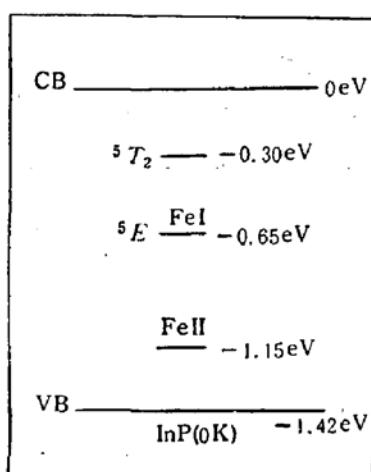


图 3 InP 中铁能级图

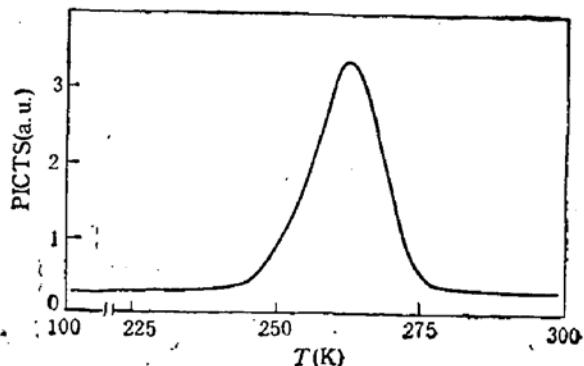
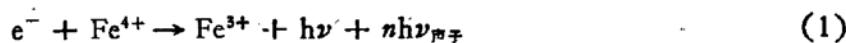


图 4 B 类样品的 PICTS 图

应于载流子的导带至价带间的直接复合过程,它们强度的差别,反映出两类样品的直接复合几率有差别,这种差别可能是由于禁带中存在着间接复合能级所致,光激载流子通过这些能级的复合可以使参与直接复合的载流子数目大大减少。

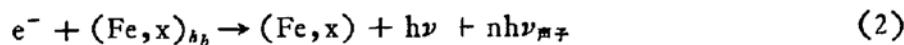
在掺铁的半绝缘 InP 中,一般认为主要的俘获中心为位于禁带中央附近的 FeI 能级。用光激电流瞬态谱 (PICTS) 可以测量半绝缘材料的深能级。测量上述两类 InP 样品,发现在 100—300K 的温度范围内仅在 B 类样品中可以测到表观电离能 ΔE 为 0.67eV 的单个深能级。图 4 为测得的 PICTS 讯号,该能级的位置与图 3 中 FeI 能级相当^[4]。在 A 类样品中则测不到对应于 FeI 能级的 PICTS 讯号,亦观察不到任何 ΔE 为 0.20—0.70eV 范围内的深能级。由光致发光和光激电流瞬态谱的测量可知: A 类样品中观察不到 FeI 能级,光致发光的 E_1 峰较强,还存在一个 E_2 宽峰。B 类样品中存在的深能级为 FeI,光致发光的 E_1 峰较弱, E_2 峰观察不到。这表明 FeI 是一个有效的间接复合中心,由于它的存在,使带边跃迁峰 E_1 的强度减小。在 A 类样品中若存在的深能级为 FeII,则它不是一个有效的间接复合中心,因此带边跃迁峰 E_1 的强度就变得很大。

Eaves 等^[7]发现由于补偿的浅杂质的种类及浓度不同,在不同的半绝缘材料中不是所有的铁的带电状态均存在。在浅受主补偿的高阻样品中,存在 Fe^{4+} 和 Fe^{3+} 带电状态,在浅施主补偿的高阻样品中,存在 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 带电状态。这就能很好的说明本文的一些实验结果。在 A 类样品中 InP 的浅受主与铁间的补偿作用使铁的带电状态为 Fe^{4+} ,光致发光的跃迁过程为



这时铁的带电状态变化为 Fe^{4+}/Fe^{3+} ,对应的能级为 FeII。PICTS 是测量电子由 FeII 向导带热发射的过程,由于测量温度不够高,因此未能观察到此能级的 PICTS 讯号。由于 Fe^{3+}/Fe^{2+} 能级上没有电子,FeI 的 PICTS 讯号亦不能测到。在 B 类样品中 InP 的浅施主与铁间的补偿作用使铁的带电状态为 Fe^{2+} ,测量 PICTS 时,铁的带电状态变化为 Fe^{3+}/Fe^{2+} ,测出的能级对应于 FeI。由于各 Fe^{4+}/Fe^{3+} 能级上充满电子,与导带电子跃迁到 FeII 能级相应的光致发光是观察不到的。

Demberel^[8] 等认为 1.1eV 附近的光致发光宽峰是由于与铁有关的复合体 (Fe, x) 所引起



b 为 (Fe, x) 上的束缚空穴,这是一种可能,但不能解释这里的全部现象,这里的全部现象用 Eaves 的能级图来解释是比较合理的,亦可以证明 Fe^{4+} 带电状态是存在于有些半绝缘 InP 材料中。

李建林同志帮助测量 PICTS 图,特此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] S. Fung, R. J. Nicholas and R. A. Stradling, *J. Phys. C*, 12, 5145(1979).
- [2] L. Eaves, A. W. Smith, P. J. Williams, B. Cockayne and W. R. MacEwan, *J. Phys. C*, 14, 5063(1981).
- [3] B. Clerjaud, *J. Phys.*, C, 18, 3615(1985).
- [4] 彭承、李建林、陆峻、孙恒慧《半导体学报》11卷,170(1990)。
- [5] B. J. Skromme and G. E. Stillman, *Phys. Rev.*, B29, 1982(1984).

- [6] T. S. Kim, S. D. Lester and B. G. Streetman, *J. Appl. Phys.*, **61**, 4598(1987).
[7] L. Eaves, A. W. Smith, M. S. Skolnick and B. Cockayne, *J. Appl. Phys.*, **53**, 4955(1982).
[8] L. Demerel, A. S. Popov, D. B. Kushev and N. N. Zheleva, *Phys. Status Solidi*, **52**, 341(1979).

Study of Fe Deep Levels in Semi-Insulating InP

Peng Cheng and Sun Henghui

(Department of Physics, Fudan University)

Tang Wenguo and Li Ziyuan

(Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica)

Abstract

Fe deep levels in various semi-insulating InP have been investigated by photoluminescence and photoinduced current transient spectroscopy. It is found that there are two types of sample with different Fe deep levels located at Fe I ($\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$) and Fe II ($\text{Fe}^{4+}/\text{Fe}^{3+}$). The two types of sample may be corresponding to the shallow donor and shallow acceptor compensated high resistance material respectively, and it also means that the controversial Fe^{4+} charge state exists in several semi-insulating InP.