

# 未掺杂半绝缘砷化镓中 EL2 能级 的光电离截面谱\*

朱永刚 孙恒慧

(复旦大学物理系, 上海, 200443)

**摘要**——采用恒流光电导方法, 在不同温度下测量了未掺杂半绝缘 LEO 砷化镓中 EL2 能级的光电离截面谱  $\sigma_n^0-h\nu$ . 发现截面谱中有三个上升较快的台阶, 认为它们来源于 EL2 能级上的电子向导带上三个极点  $\Gamma$ 、 $L$ 、 $X$  的光跃迁.  $\sigma_n^0-h\nu$  的理论计算和实验曲线符合得很好, 并得出有关 EL2 能级的物理量即束缚能  $E_T$ 、Frank-Condon 移动  $d_{FC}$  和波函数扩展长度  $\alpha^{-1}$ .

**关键词**——恒流光电导, 半绝缘砷化镓, EL2 能级.

## 1. 引 言

半绝缘砷化镓材料中的深能级缺陷对它的特性有很大的影响, 特别是广泛存在于各种生长模式砷化镓晶体中的 EL2 本征缺陷<sup>[1]</sup>对材料的半绝缘性、均匀性和热稳定性起着重要作用<sup>[2]</sup>. 通过 EL2 缺陷的光电离截面谱  $\sigma_n^0-h\nu$  的研究, 可以获得该缺陷波函数的对称性及其空间扩展长度、缺陷势场及晶格弛豫等信息, 加深对深能级缺陷的物理性质的认识. 到目前为止, 有关 EL2 的光电离截面谱的报道很少, 关于半绝缘砷化镓 EL2 的光电离截面谱则更少<sup>[2]</sup>, 本文通过恒流光电导方法测量半绝缘砷化镓中 EL2 能级的  $\sigma_n^0-h\nu$  谱, 并进行了理论计算及有关分析和讨论.

## 2. 实 验 方 法

本实验采用恒流光电导(OCPD)方法测量样品的  $\sigma_n^0-h\nu$  谱. 假设样品为 N 型, 导带下深能级为  $E_T$ , 浓度为  $N_T$ , 在低温光照下达到稳态时, 应有<sup>[3]</sup>

$$I(h\nu)\sigma_n^0(h\nu)n_T - C_n(N_T - n_T)n = 0, \quad (1)$$

式中  $I(h\nu)$  为入射光强,  $n_T$  为能级  $E_T$  上电子占有浓度,  $C_n$  为电子俘获系数,  $\sigma_n^0(h\nu)$  为电子

本文 1989 年 8 月 11 日收到, 修改稿 1990 年 1 月 12 日收到.

\* 中国科学院科学基金资助课题.

光电离截面,  $n$  为导带上电子浓度. 在稳态条件下光电流恒定, 则  $n, n_T$  均为常数, 式(1)可变为

$$\sigma_n^0(h\nu) = C_n(N_T - n_T)n/n_T I(h\nu) = \text{const}/I(h\nu). \quad (2)$$

在改变入射波长的同时调整入射光强, 保持光电流恒定, 就可以通过测量不同入射光子能量  $h\nu$  下的光强作出  $1/I-h\nu$  曲线, 得到相应的  $\sigma_n^0-h\nu$  谱. 显然, 这样测得的光电离截面是相对值. 当入射光子能量  $h\nu > E_T - E_0$  时, 将发生价带向  $E_T$  能级发射电子的过程. 已证明当光强足够弱时, 空穴对光电流的影响可以忽略<sup>[3]</sup>.

实验装置如图 1. 光源为 400 W 溴钨灯, 光的强度由调压变压器调节, 入射光波长由单色仪控制, 波长范围  $1.7 \sim 0.83 \mu\text{m}$  (约  $0.73 \sim 1.5 \text{ eV}$ ). 样品是用 LEC 方法生长的未掺杂砷化镓, 电阻率  $\rho > 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ . 两端镀 Au-Ge-Ni 合金后, 在  $480^\circ\text{C}$   $\text{N}_2$  气氛中合金化 3 min 制作电极. 样品置于 Air Products 生产的闭循环致冷系统, 该系统温度可在  $12 \sim 300\text{K}$  内自动控制, 恒温控制优于  $\pm 0.05\text{K}$ . 入射光路单色仪分光后, 照射到半反射镜上. 一部分光透射到样品上产生光电流, 用锁相放大器 I 监控, 以保持其指示值恒定, 另一部分入射光反射到热释电探测器上, 由锁相放大器 II 测量光强大小. 锁相放大器 I、II 分别为 EG & G 9505 和 5206 型. 在测量  $\sigma_n^0-h\nu$  前, 先测出各种波长入射光经过半反射镜后透射光强与反射光强之比, 作出光强校正曲线, 这样就可以根据锁相放大器 II 得到的反射光强、由校正曲线推算出实际照射到样品上的光强. 通过控制入射光的波长和光强使光电流恒定, 即可根据式(2)的  $1/I-h\nu$  曲线, 在测量光子能量范围内得到深能级的光电离截面谱.

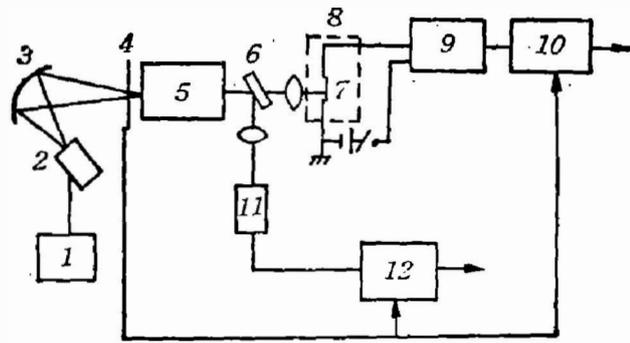


图 1 恒流光电导的实验装置图

1 调压变压器, 2 溴钨灯, 3 凹面镜, 4 斩波器, 5 单色仪, 6 半反射镜, 7 样品, 8 闭循环致冷系统, 9 电流放大器, 10 锁相放大器 I, 11 热释电探测器, 12 锁相放大器 II

Fig. 1 Experimental set-up used for measuring constant current photoconductivity.

### 3. 实验结果

在 12.5、151.5、218.0、300.0K 温度下测得的样品的光电离截面谱如图 2. 为了清楚地看到光电离截面的变化, 对入射光子能量  $h\nu$  为  $0.7 \sim 0.9 \text{ eV}$  一段进行了放大. 全部实验数据的重复性很好. 从图 2 看出 4 条谱线形状相似, 都清楚地呈现出三个光电离截面上升较快的台阶. 以 218.0 K 为例, 其阈值能大致在 0.82、1.10 和 1.28 eV 附近.

在对样品进行恒流光电导测量的同时, 也测量了该样品的光致电流瞬态谱 (PICTS). 结果在 PICTS 谱的较高温度处 (约 320 K) 出现一能级峰, 用 Arrhenius 公式拟合<sup>[4]</sup>, 得到其表观电离能  $E_0$  为 0.74 eV, 热俘获截面为  $1.2 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$ . 与文献[6]比较, 判断该能级为 EL2 能级.

Chantre<sup>[4]</sup> 等曾用深能级光谱方法 (DLIS), 在 85 K 下测量了非高阻 GaAs 中 EL2 能

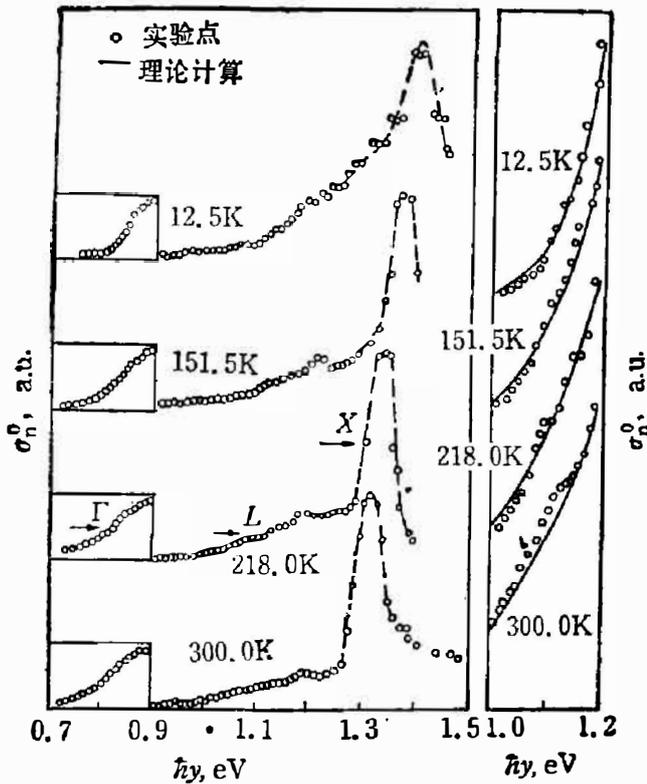


图 2 半绝缘 GaAs 中 EL2 能级的实验与理论光电离截面谱

Fig. 2 The experimental and theoretical photoionization cross section spectra of EL2 level in semi-insulating GaAs.

级的光电离截面谱, 光谱中 0.6~1.5 eV 范围也有三个明显上升的台阶. 经分析, 这是由于入射光子能量增加而引起的 EL2 深能级上电子向导带  $\Gamma$ 、 $L$ 、 $X$  各能谷的光跃迁. 本实验中如果认为这三个台阶是由三个不同的缺陷能级跃迁所产生的, 则与 PICTS 结果相矛盾. 因此, 同非绝缘的砷化镓一样, 半绝缘砷化镓中也存在着 EL2 能级上电子向导带三个能谷点的光跃迁, 三个上升较快的台阶即是 EL2 能级向三个极点的光跃迁所致.

为了更进一步确证上面的分析, 本文选用下面的模型进行  $\sigma_n^0-h\nu$  理论计算: (1) 深能级上电子向导带光跃迁的几率是电子向导带上所有极点光跃迁几率之和, 对于砷化镓的能带结构, 是向  $\Gamma$ 、 $L$ 、 $X$  三个极点的跃迁; (2) EL2 能级的缺陷势为 Dirac 势, 它的波函数正比于  $\propto r^{-1}\exp(-\alpha r)$ , 波函数的扩展长度为  $\alpha^{-1}$ ; (3) 极点附近为抛物线能带结构;

(4) 光电离为禁戒跃迁; (5) 考虑强声子耦合效应. 基于这些模型, 经过推导, 由电子的光跃迁几率可以得到电子由缺陷能级  $E_T$  跃迁至能谷  $i$  的光电离截面为<sup>[5]</sup>

$$\sigma_i^0 \left( \frac{h\nu}{E^0} \right) \propto P_i M_i \frac{E^{02}}{h\nu (4kTd_{FC})^{3/2}} \left( \frac{m_i^*}{m_r^*} \right)^{1/2} \times \int_{1+\frac{E_T-E_r}{E^0}}^{\infty} \frac{\left( E - \frac{E_i - E_r}{E^0} - 1 \right)^{3/2}}{\left[ \left( E - 1 - \frac{E_i - E_r}{E^0} \right)^2 + \frac{\hbar^2 \alpha^2}{2m_i^* E^0} \right]^2} \exp\left( -\frac{\left( \frac{h\nu}{E^0} - E \right)^2 E^{02}}{4kTd_{FC}} \right) dE, \quad (3)$$

式中  $i$  表示某一极点 (即  $\Gamma$ 、 $L$ 、 $X$ ),  $E_i$  为极点  $i$  的能量, 光电离阈值能  $E^0$  为束缚能  $E_T$  与 Franck-Condon 移动  $d_{FC}$  之和,  $M_i$  为等效极点数,  $P_i$  为向  $i$  极点跃迁的相对强度, 总的光电离截面即为

$$\sigma^0 \left( \frac{h\nu}{E^0} \right) = \sum_i \sigma_i^0 \left( \frac{h\nu}{E^0} \right). \quad (4)$$

在此理论公式下, 用  $\sigma_n^0-h\nu$  理论曲线拟合实验曲线中上升较快的台阶. 计算中选用的和拟合得到的参数分别列于表 1 与表 2. 拟合曲线为图 2(b) 中实线. 由图可知理论曲线与实验点符合很好. 由于在光子能量较高的区域, 入射光子能量或入射光强略有变化就会导致光电流较大的变化, 并且这时光源较暗, 不易控制, 数据涨落大, 所以没有对较高能量处的第三

表 1 选用参数( $m_i^*$ ,  $E_i - E_\Gamma$  及  $M_i$  选自 Aspnes 结果<sup>[6]</sup>)

Table 1 The Values of coefficients ( $m_i^*$ ,  $E_i - E_\Gamma$  and  $M_i$  are from Aspnes's results).

$i$	$m_i^*$	$m_\Gamma^*/m_i^*$	$E_i - E_\Gamma$	$M_i$	$E_i/P_\Gamma$
$\Gamma$	$0.067 m_0$	1	0	1	$\Gamma$
$L$	$0.22 m_0$	0.30	0.29	4	0.35
$X$	$0.41 m_0$	0.16	0.46	3	0.1

表 2 理论拟合得到的 EL2 能级物理量

Table 2 The Physical parameters of EL2 level obtained by fitting calculation.

$T(K)$	12.5	151.5	218.0	300
$E_T(eV)$	0.70	0.70	0.69	0.67
$d_{FC}(eV)$	0.12	0.12	0.12	0.12
$\alpha^{-1}nm$	0.30	0.30	0.40	0.50

个台阶进行拟合,在图 2(a) 中该区域用虚线表示。如果认为第三个台阶是 EL2 能级向  $X$  点的光跃迁,则由实验曲线(218 K)可知,该阈值能应在 1.28 eV 附近。根据拟合结果,  $X$  点的阈值能应为

$$E_T + d_{FC} + (E_X - E_\Gamma) = 0.69 + 0.12 + 0.46 = 1.27 \text{ eV},$$

与实验值符合。而在 50~273K 范围内,半绝缘砷化镓中 EL2 能级的束缚能满足<sup>[7]</sup>

$$E_T = 0.73 - 3.5 \times 10^{-4} T^2 / (T + 204) \text{ eV}, \tag{5}$$

式中  $T$  为温度。表 2 所列  $E_T$  值在 151~300K 范围内与式(5)相符。这些均表明半绝缘砷化镓中 EL2 能级上电子向导带各极点  $\Gamma$ 、 $L$ 、 $X$  的跃迁是存在的,假定的理论模型是合理的。

在考虑了电子-声子相互作用后,由  $\sigma_n^0 - h\nu$  谱的拟合中可以求得 EL2 能级的 Franck-Condon 移动  $d_{FC} = 0.12 \text{ eV}$ 。已报道的有关 EL2 能级的  $d_{FC}$  值均为  $0.12 \sim 0.14 \text{ eV}$ <sup>[2,4]</sup>,与本实验结果一致,据此可以得到半绝缘砷化镓中 EL2 能级的空间位形坐标图(参见图 3,图中  $Q$  为位形坐标)。图 3 反映了 EL2 缺陷能级的晶格弛豫效应,由此还可以估算出 EL2 能级的俘获截面激活能  $E_\sigma = E_\sigma - E_T = 0.74 - 0.67 = 0.07 \text{ eV}$ ,这与文献[8]是一致的。

拟合得到波函数扩展长度  $\alpha^{-1}$  为  $0.3 \sim 0.5 \text{ nm}$ ,考虑到砷化镓的晶格常数为  $0.56 \text{ nm}$ ,最近邻原子间距为  $0.24 \text{ nm}$ ,这一  $\alpha^{-1}$  值是合理的。而扩展长度随温度升高而增大表明在

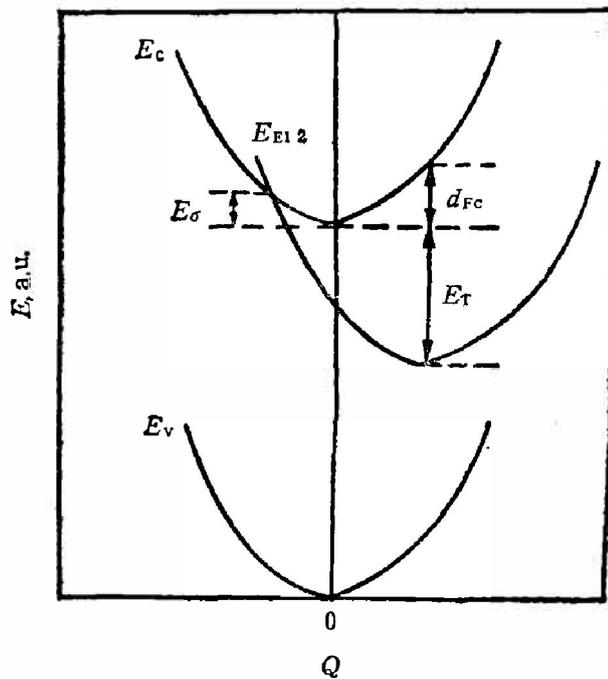


图 3 EL2 能级位形坐标图

Fig. 3 Configuration Coordinate diagram for EL2 level in semi-insulating GaAs.

较高温度下, EL2 能级对电子的束缚强度减弱, 电子具有较大的运动空间, 这一结果也符合普通物理规律.

**致谢** 感谢彭承同志在实验过程中给予的大力帮助及进行的有益讨论, 感谢屈逢源先生为作者提供的有关资料.

### 参 考 文 献

- [1] Bourgoïn J. O., Von Bordeleben H. J., Strievener D., *J. Appl. Phys.*, **64** (1988), R65.
- [2] Tyler E. H., Jaros M., Penchina C. M., *Appl. Phys. Lett.*, **31** (1977), 208.
- [3] Grimmeiss H. G., Ledebor L-A, *J. Appl. Phys.*, **46** (1975), 2155.
- [4] Sah C. T., *Proceedings of the Third International Symposium on Silicon Materials Science and Technology*, 1977, p. 877.
- [5] Chantre A., Vincent G., Bois D., *Phys. Rev.*, **B23**(1981), 5335.
- [6] Aspnes D. E., *Phys. Rev.*, **B 14** (1976), 5331.
- [7] Makram-Ebeid S., Langlade P., Martin G. M., *Semi-Insulating III-V Materials*, 1984, Ed. by D. C. Look and J. S. Blakemore, p. 184.
- [8] Mitonneau A et al., *Rev. Phys. Appl.*, **14** (1979), 853.

## SPECTRAL DISTRIBUTION OF PHOTO-IONIZATION CROSS SECTIONS FOR EL2 LEVEL IN UNDOPED SEMI-INSULATING GaAs

ZHU YONGGANG, SUN HENGHUI

(Physics Department, Fudan University, Shanghai, 200433, China)

### ABSTRACT

The spectral distribution of photo-ionization cross sections  $\sigma_n^0 - h\nu$  for the EL2 level in undoped LEO semi-insulating GaAs is measured at different temperature using constant current photoconductivity. Three steps have been clearly found in the spectra. The spectral shape of all  $\sigma_n^0(h\nu)$  curves appears to be related to the electron transitions from EL2 level to  $\Gamma$ ,  $L$ ,  $X$ , minima of the conduction band. The theoretical calculation agrees well with the experimental data, moreover, the physical parameters of EL2 level, such as binding energy  $E_T$ , Frank-Condon shift  $d_{FC}$  and extension length of wave function  $\alpha^{-1}$ , have been obtained.

---

\* The Project supported by the Science Foundation of the Chinese Academy of Sciences.