

In_{0.49}Ga_{0.51}P 中缺陷的俘获行为

王海龙^{a, b)} 封松林^{a)}

^{a)}(中国科学院半导体研究所超晶格国家重点实验室, 北京 100083)

^{b)}(曲阜师范大学物理系, 曲阜 273165)

摘要 利用深能级瞬态谱(DLTS)和瞬态光电阻率谱(TPRS)研究了利用金属有机物化学汽相沉淀(MOCVD)生长的未有意掺杂的 In_{0.49}Ga_{0.51}P 中缺陷对载流子的俘获过程和发射过程. 利用 DLTS 测量观测到了一个激活能为 0.37eV 的缺陷, 该缺陷的俘获势垒值介于 180meV 到 240meV 之间. 该缺陷的俘获势垒值的大分布被解释为缺陷周围原子重组的微观波动. 在研究中发现研究这些缺陷的俘获过程比发射过程更有效, 俘获势垒为 0.06eV 和 0.40eV 的两个缺陷在俘获过程中被观测到, 而在发射过程中并没有观测到.

关键词 深能级瞬态谱(DLTS), 瞬态光电阻率谱(TPRS), 俘获势垒

1 引 言

外延生长的 III-V 族化合物半导体材料在光电子应用方面起到越来越重要的作用. 由于 InGaP 对于制造红光发光二极管和其它电子器件的优越性^[1], 近年来对它的光电特性进行了细致的研究. 在 GaAs 衬底生长 In_{1-x}Ga_xP 对于制造短波长的半导体激光器很具有吸引力^[2,3]. 当 $x = 0.51$ 时 In_{1-x}Ga_xP 与 GaAs 晶格匹配, 带隙为 1.9eV, 并且当 $x < 0.73$ 时它是直接带隙半导体.

在金属有机物化学汽相沉淀(MOCVD)和液相外延(LPE)生长的 *n* 型 InGaP 样品中, 激活能为 0.35eV 的一个多数载流子陷阱是普遍存在的本征缺陷^[4~6]. 但该缺陷的起源仍然不是很清楚, 该缺陷可能造成由 InGaP 制造的光学器件的退化^[5]. 因此关于该缺陷的行为应该进一步研究.

在半导体中研究深中心对载流子的俘获行为和发射行为同样对于表征深能级很有意义. 但外延生长的 InGaP 合金中缺陷的载流子俘获行为很少报道. 利用我们独自装备的瞬态光电阻率谱(TPRS)设备, 观测了 MOCVD 生长的 GaInP/GaAs 外延层中主要缺陷的俘获势垒.

深能级瞬态谱(DLTS)^[7]被广泛的用来确定缺陷的热激活能. 但用它来测量缺陷的俘获势垒则是通过改变填充脉冲的宽度来根据缺陷的俘获截面随温度的依赖关系来确定的. 这种方法非常间接并且需要测量大量的数据来得出结果. 试验误差的主要来源在于随着填充脉冲减小, 填充脉冲会发生畸变, 当俘获行为为非指数时, 这种情况更加严重.

2 实验原理

为了克服这些困难, 我们发展了一套基于瞬态光电阻率测量的分析深中心的俘获行为的新方法—瞬态光电阻率谱(TPRS). 该方法利用光脉冲激发载流子然后被深中心俘获, 进而分析俘获的瞬变过程^[8,9]. 测量的过程是在低温下利用适当波长的周期性光脉

冲来照射样品, 深中心上的载流子将发生光电离, 当光脉冲结束后, 由光照产生的过剩载流子主要通过非辐射复合过程被深中心俘获. 这个恢复的瞬变过程和俘获率有关, 而俘获率通常又是温度的函数. 我们可以通过分析俘获率来得到俘获势垒和俘获截面等有用的信息. 为了方便, 下面以 n 型非简并半导体为例来给出公式. 假设深中心的载流子浓度为 N_T , 深中心上被载流子占据的浓度为 n_T , 在热平衡时电子浓度为 n_0 , 空穴浓度为 p_0 , 被占据的深中心的浓度为 n_{T0} . 光照结束后 t 时刻导带载流子浓度可表示为

$$n(t) = n_0 - \frac{e^{Pt}}{\frac{1}{\Delta n_T(0)} - \frac{Q}{P}(1 - e^{Pt})} \quad (1)$$

其中

$$P = - \left[\sigma_n U_n N_T - \sigma_n U_n n_{T0} + \frac{\sigma_n U_n n_0 N_T}{n_{T0}} + \frac{\sigma_p U_p p_0 N_T}{N_T - n_{T0}} \right],$$

$$Q = - \sigma_n U_n, \quad \Delta n_T(0) = n_T(0) - n_{T0},$$

σ_n 和 σ_p 是分别对电子和空穴的热俘获截面, U_n , U_p 是电子和空穴的热平均速率, e_n , e_p 分别是电子和空穴的热发射率.

四探针方法电阻率测量的信号反映了俘获过程的瞬变. 我们利用双通道取样积分器组成率窗来分析信号. 由取样积分器得到的信号除以直接测量的瞬态电压信号我们得到

$$\Delta S = n_0 \left[\frac{1}{n_0 - \frac{1}{\frac{1}{\Delta n_T(0)} - \frac{Q}{P}(1 - e^{Pt_2})}} - \frac{1}{n_0 - \frac{1}{\frac{1}{\Delta n_T(0)} - \frac{Q}{P}(1 - e^{Pt_1})}} \right] \quad (2)$$

该结果不依赖样品的形状. 方程(2)表明 ΔS 是 P 的函数, 由方程(2)得知: 当 ΔS 为极大时的 P 值可由 t_1 和 t_2 决定. 通过改变 t_1 和 t_2 重复温度扫描可以得到 P 随温度的变化. P 中包含缺陷的信息.

对于许多深中心俘获截面是热激活的, 可以表示为

$$\sigma_n = \sigma e^{-\frac{E_B}{kT}} \quad (3)$$

这里 E_B 表示俘获势垒, σ 是一个不依赖温度的常数. 当深中心的浓度远小于浅施主的浓度时, 即 $N_T \ll n_0$, 在 P 的表达式中最主要的项为 $\sigma_n U_n n_0 N_T / n_{T0}$, U_n 正比于 $T^{1/2}$. 因此 P 可以表示为:

$$P = B T^{1/2} e^{-E_B/kT} \quad (4)$$

这里 B 是一个只与材料的特性有关而与温度无关的常数. 作 $\ln(P/T^{1/2})$ 和 $1/T$ 图由斜率可以得到俘获势垒 E_B . 该方法同样可以分析大浓度中心, 如对 GaAlAs 中的 DX 中心我们已经得到了一些有意义的结果^[8].

3 实验结果与讨论

用前面给出的方法来测定 InGaP 中缺陷的俘获势垒. 样品利用 MOCVD 方法在半

绝缘 GaAs 衬底生长 10nm GaAs 缓冲层, 然后生长 $1\mu\text{m}$ 的 $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$ ($x = 0.50$ 或 $x = 0.51$). 霍尔测量表明材料为 n 型, 残留载流子浓度对 $x = 0.51$ 的样品在 300K 下为 $2.7 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$, 在 77K 下为 $1.4 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$. 样品表面蒸金形成肖特基势垒进行 DLTS 测量, 合金 In 形成欧姆接触进行 TPRS 测量.

DLTS 测量使用瑞典 Innovance AB 型深能级瞬态谱仪. 在图 1 中给出了典型的 DLTS 谱. 对于 $x = 0.51$ 的样品测得热激活能为 0.37eV 的多数载流子陷阱. 该缺陷可能与 LPE 生长的 InGaP 中的本征缺陷或者与 Te 掺杂的 InGaP 晶体中的 SGE2 缺陷属于同一缺陷^[4-6,10]. DLTS 谱的展宽和热激活能数值的分散可能是由于多元合金系统中原子排列的微观波动有关. 半导体中缺陷的电离能和(或者)俘获截面值可能由于缺陷周围的原子的微观排列波动而发生变化. 据报道该缺陷的俘获动力学是非指数的, 因此通过改变填充脉冲宽度间接测量它的俘获势垒是不可靠的. 由于 DLTS 峰值温度随着 t_p 的变化而改变, 根据俘获过程中 DLTS 峰值高度随 t_p 的变化来确定俘获势垒是很困难的. 据报道当 $t_p = 100\text{ms}$, 俘获势垒值为 0.12eV , 而当 $t_p = 1\text{ms}$, 俘获势垒值为 0.23eV ^[10]. 在这种情况下误差的主要来源为窄的填充脉冲的实际形状的不确定性和很难确切定出填充脉冲恰好饱和时的峰高(这是大俘获势垒的行为), 而这是计算俘获截面进而得到俘获势垒所需要的. 当然还有当存在不止一个深中心时并不总是通过改变填充脉冲来分别得到每一个深中心的俘获激活能. 这也许是各种文献所得到的俘获势垒的数值的分散性的一个原因.

图 2 给出了 $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$ 的典型 TPRS 实验曲线. 在图中观测到了四个与缺陷电子俘获有关的俘获过程. 我们把这些电子陷阱分别记为 E_{B1} 、 E_{B2} 、 E_{B3} 和 E_{B4} . 俘获势垒值分别为 $E_{B3} = 0.06\text{eV}$, $E_{B2} = 0.18\text{eV}$, $E_{B1} = 0.24\text{eV}$ 和 $E_{B4} = 0.40\text{eV}$. 在 TPRS 测量中比 DLTS 测量中观测到了更多的峰. 说明 $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$ 中存在的一些缺陷在 DLTS 测量载流子发射过程中不能观测到. 根据和一些文献的对照我们指认 E_{B1} 和 E_{B2} 对应于 DLTS 测量过程中测到的主要缺陷. 俘获激活能分布在 60meV 之间. 该缺陷的俘获激活能的分布

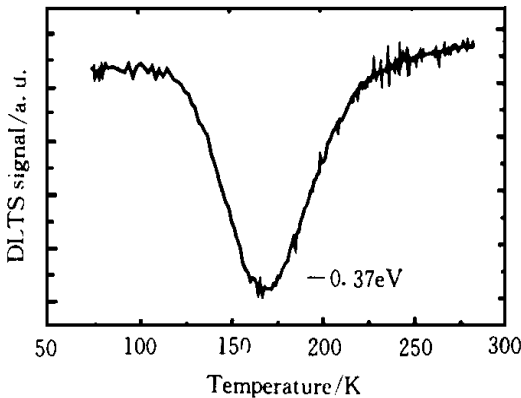


图1 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$ 的典型 DLTS 谱
Fig. 1 Typical curves of DLTS spectra for $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$.

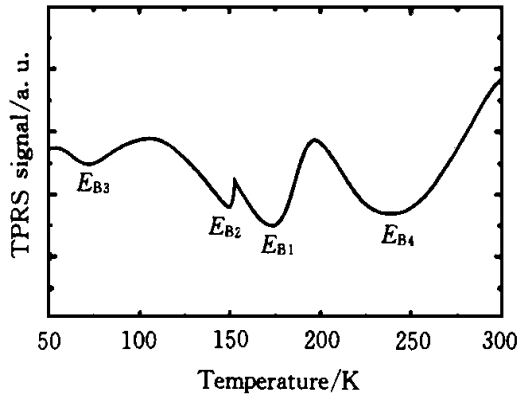
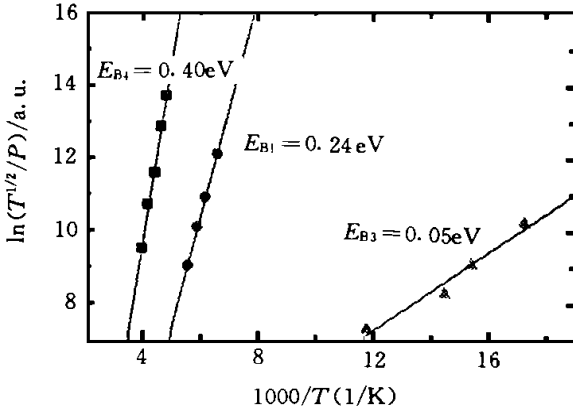


图2 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$ 的典型 TPRS 谱
Fig. 2 Typical curves of TPRS spectra for $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$.

解释为前面提到的合金系统中原子的微观排列的波动性. 峰 E_{B3} 出现在所有的样品中, 它可能与一个在 DLTS 谱测量中没有观测到的缺陷有关. 俘获势垒 E_{B3} 和在 Te 掺杂 InGaP 的体晶体中的 SGE1 缺陷相似, 俘获势垒 E_{B4} 和缺陷 SGE3 相近^[10]. 图 3 给出了 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$ 中缺陷俘获势垒的 Arrhenius 图.



总之, 我们利用 TPRS 和 DLTS 技术研究了由 MOCVD 生长的未掺杂的组分为 $x = 0.51$ 的 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$. 由 DLTS 测量得到样品中主要缺陷的热发射激活能为 0.37eV . 该缺陷的俘获激活能有着从 180meV 到 240meV 之间 60meV 范围的分布. 俘获势垒值的分布可以解释为缺陷周围的原子排列的微观波动. 这种特性也与发射激活能的分布相一致. 两个新的缺陷 E_{B3} 和 E_{B4} 被测量到. 它们的俘获势垒值分别为: $E_{B3} = 0.06\text{eV}$ 和 $E_{B4} = 0.40\text{eV}$.

图 3 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$ 中缺陷俘获势垒的 Arrhenius 图
Fig. 3 Arrhenius plots of the capture barriers of the defects in $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$.

参 考 文 献

- [1] Feng S L, Bourgoin J C, Omens F *et al*, Appl. Phys. Lett., 1991, **59**: 941.
- [2] Kobayashi K, Kawata S, Gomyo A *et al*, Electron. Lett., 1985, **21**: 931.
- [3] Ishikawa M, Ohba Y, Sugawara H *et al*, Appl. Phys. Lett., 1986, **48**: 207.
- [4] Su Y K, Wu M C, Chang C Y *et al*, J. Cryst. Growth, 1986, **76**: 299.
- [5] Zhu Q S, Hiramatsu K, Tanaka S *et al*, J. Cryst. Growth, 1990, **103**: 367.
- [6] Yoshino J, Tachikawa M, Matsuda N *et al*, Jpn. J. Appl. Phys., 1984, **3**: L29.
- [7] Lang D V. J. Appl. Phys., 1974, **45**: 3023.
- [8] Wang H L, Feng S L, Zhou J *et al*. ACTA Physica Sinica (Over Sea Edition), 1996, **5**: 1
- [9] Feng S L, Wang H L, Zhou J *et al*, The 8th National Conf. on Compound Semiconductors and Devices of Microwave and Photoelectric, 1994 (in Chinese).
- [10] Matsumoto T, Kato T, Takiguchi M *et al*, Jpn. J. Appl. Phys., 1989, **28**: 410.

NATIVE DEFECTS IN UNDOPED $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$ GROWN BY MOCVD

Wang Hailong^{a, b)} Feng Songlin^{a)}

^{a)}(National Laboratory for Superlattices and Microstructures,
Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

^{b)}(Department of Physics, Qufu Normal University, Qufu 273165)

Abstract

We have investigated the emission and capture process of native defects in undoped $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$ grown by MOCVD using DLTS technique and transient photo-resistivity spectroscopy (TPRS) technique. A common defect with an activation energy of about 0.37eV was observed with DLTS technique. It's found that the capture barriers of the defect distributed over 60meV from 180meV to 240meV by TPRS measurements. The distribution can be interpreted as the microscopic fluctuation of atomic arrangements around the defect. The investigation of capture process seems more powerful than emission process in these materials, because of two defects with capture barrier energy 0.06 and 0.40eV, that can not be detected with DLTS technique, were also observed with TPRS measurements.

Key words deep level transient spectroscopy (DLTS), transient photo-resistivity spectroscopy (TPRS), capture barriers