

# 用 Laplace 谱研究缺陷深能级精细结构

余 辛, 詹华瀚, 康俊勇, 黄启圣

(厦门大学 物理系, 福建 厦门 361005)

**摘 要:** 用 Laplace 缺陷谱仪(LDS)实验研究了 GaAsP 中 Fe 深空穴发射和 AlGaAs 中 Sn DX 中心上电子发射引起的非指数瞬态,发现它们起因于混晶无序效应。与 DLTS 的单一谱峰比较,LDS 谱呈现出多峰结构。由深能级上空穴与电子热发射率随温度关系的直线拟合,得到多峰结构各峰谱的激活能,认为它们反映杂质深中心与其近邻原子的不同结构。研究表明,LDS 适用于深能级精细结构的研究。

**关键词:** 杂质缺陷; 深能级; Laplace 谱

**中图分类号:** O474 **文献标识码:** A

## Study of Deep-level Fine Structure by Laplace Defect Spectroscopy

YU Xin, ZHAN Hua-han, KANG Jun-yong, HUANG Qi-sheng

(Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** A Laplace defect spectrometer (LDS) is applied to study non-exponential transients resulting from hole emission from Fe-related deep acceptors in GaAsP and electron emission from Sn-related DX centers in AlGaAs. The non-exponential transients which bear a relationship to the alloy random effect are investigated under different conditions. Their LDS spectra exhibit several well-resolved sharp peaks assigned to the fine structures of the Fe-related deep acceptors and the two DX centers, respectively. The activation energies of the fine structures are determined by linear fitting of the slopes of temperature dependences of hole and electron emission rates. The results show that the LDS is useful for investigation of deep-level fine structures.

**Key words:** defect; deep level; Laplace defect spectroscopy

### 1 引言

杂质和缺陷对半导体材料及其器件的性能具有重要的影响,它们在禁带中的能级位置可以通过测量缺陷能级上电子的发射过程来确定。单一能级上电子的发射是一个随时间呈单指数变化的过程。由于半导体中一般存在多个缺陷能级,以及某些复杂缺陷存在能级的精细结构,测到的电子发射过程常

常呈现为随时间变化的多个指数之和的瞬态。为了确定能级的位置,必须寻求一种可以分解多个单指数瞬态之和的电子发射瞬态的有效方法。

数十年来,人们对相应的实验技术进行了广泛的研究,其中结电容和结电流瞬态方法是最为普遍的技术之一。为了简化分解瞬态过程中各时间分量,人们在结电容瞬态方法的基础上发展了深能级瞬态谱(DLTS)技术<sup>[1]</sup>,并得到普遍的应用。然而,DLTS 技术的分辨率不能分辨由深能级精细结构引起的非指数瞬态。为此,人们通常用拟合法、曲线剥离法等来分解瞬态信号的各指数分量。但这些方法都需要预先人为地假设一些参数,因此带有很大的

收稿日期: 2001-02-26.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(69976023); 福建省自然科学基金资助项目.

主观因素。十年前,人们提出了用 Laplace 深能级瞬态谱(Laplace DLTS)方法<sup>[4]</sup>,直接对非指数瞬态进行数值 Laplace 交换,免除了任何预先的假设,因而其结果能真实地反映载流子跃迁过程的精细结构。然而,这种方法计算量大,不适合于在微机上运行。我们经过努力,建立了数值 Laplace 缺陷谱法(LDS)<sup>[3]</sup>,并对一些缺陷能级上载流子跃迁瞬态的实时数值进行了 Laplace 交换,得到一些材料中缺陷能级的精细结构。

## 2 实验方法

本文所用的两类半导体光电材料实验样品,其中 GaAs 和 GaAsP 为单边突变结  $p^+n$  二极管,以避免  $p$  型层的影响。其中  $n$  型层是在  $n^+-GaAs$  衬底上,通过金属有机物汽相外延生长的,用电容-电压特性测得的净自由电子浓度为  $1 \times 10^{15} \sim 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。 $p$  型层通过 Zn 扩散形成。用扩散法掺入 Fe 杂质,其浓度约为浅施主的 5%。

实验所用 AlGaAs 样品也为单边突变结  $p^+n$  二极管。其中  $n$  型 AlGaAs 是在  $n^+-GaAs$  衬底上,通过液相外延法生长的,生长过程中掺入 Sn 施主杂质,其净自由电子浓度约为  $(3 \sim 6) \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。 $p$  型层通过 Zn 扩散形成。

图 1 示出了 Laplace 缺陷谱仪的方框图。 $p^+n$  结实验样品置于液氮冷却的恒温器中(温度稳定性约为 0.2 K),样品可在 77 ~ 400 K 温度范围内变化。当样品在待测温度下恒定 30 min 后,由偏压控制器改变  $p^+n$  结偏压,使载流子从填满的深能级上热发射并形成电容瞬态。每一温度下的电容瞬态由响应时间小于 0.1 ms 的电容仪(Boonton72BD)测量,其电压输出由 A/D 转换器直接取样记录和显示,并由计算机分析。

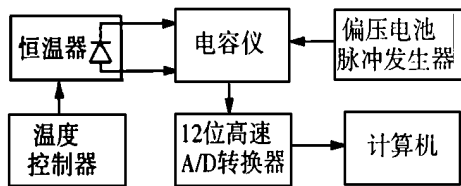


图 1 Laplace 缺陷谱仪框图

Fig. 1 Schematic diagram of Laplace defect spectrometer

## 3 实验结果分析

对于掺 Fe 杂质的 GaAsP Fe 样品,Fe 能级空穴热发射的电容瞬态信号在 GaAs 中呈直线,为单指数;而在 GaAsP 中的则成曲线,为非指数。分析表明,GaAsP 中 Fe 能级空穴发射的非指数瞬态是混晶

无序效应所引起的。本文对瞬态信号进行数值 Laplace 变换所得到的 LDS 谱如图 2 所示。由 LDS 谱可见,GaAs 中 Fe 的谱线呈单峰结构,而对组分  $x = 0.23$  的  $GaAs_{1-x}P_x$  中 Fe 的谱线则成多峰结构,谱峰的个数随组分  $x$  接近 0.5 而增多。当变换的计算精度下降时,谱峰将展宽,多峰结构将最后退化成单峰,并与在相应温区用 DLTS 测量得到单一宽谱峰的结果一致<sup>[4]</sup>。因此,我们认为  $GaAs_{1-x}P_x$  中 Fe 的 LDS 谱中多峰结构反映了 Fe 能级的精细结构。

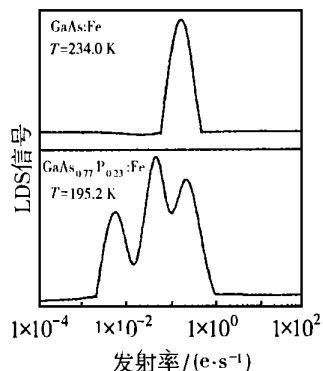


图 2 掺 Fe 的 GaAs 及 GaAsP 中的 LDS 谱

Fig. 2 LDS spectra of Fe-doped GaAs and GaAsP

从不同温度的 LDS 谱图中测量得到的发射谱峰的位置  $e$ ,作  $\log(e/T^2)$  对  $1/T$  的关系图,并分别线性拟合各谱峰的数据,从所得到的直线斜率获得各谱峰相对应的热激活能。对于 GaAs 中 Fe 能级,热激活能为 0.54 eV;对于组分  $x = 0.23$  的 GaAsP 中 Fe 能级的热激活能分别为 0.50, 0.46 和 0.41 eV,相邻热激活能相差为 40 ~ 50 meV,它们的平均值也与 DLTS 的测量结果相一致。由于预先没有假设任何结构,因此上述结果反映了 Fe 能级空穴热激活能真实的精细结构。

我们知道,Fe 原子通常占据 III 族原子的位置,其周围 As 和 P 原子的局域组分涨落从最近邻就开始,它们产生的几率服从二项式分布。在 4 个最近邻原子位置上,可能有 5 种局域组分。在 P 组分为 0.23 的 GaAsP 中,局域组分含有 0, 1 和 2 个 P 原子的几率明显高于 3 和 4 个 P 原子的几率。因此,可以认为,这 3 种高发生几率的局域组分可能对应于测量得到的 GaAsP 中 Fe 能级空穴热发射 LDS 谱的 3 个精细结构。

对于掺 Sn 的 AlGaAs 样品,Sn 施主在其中形成的缺陷能级相当复杂,具有许多奇异的性质,称为 DX 中心。DX 中心的定电容电压瞬态信号为非指数,经数值 Laplace 变换,本文得到组分  $x = 0.26$  的

AlGaAs 中 Sn 形成的 DX 中心电子热发射的 LDS 谱如图 3(b)所示。由图可见 6 个分立的发射谱峰,这些峰随测量温度的升高向高发射率方向移动。当数值变换的计算精度降低时,发射峰渐渐展宽。最后,谱图中较低和较高的 3 个谱峰分别退化展宽的峰,与图 3(a)所示用 DLTS 观察到的两个谱峰一致<sup>[5]</sup>。此结果表明,DX 中心电子热发射的 LDS 谱中的分立谱峰与 DX<sup>-</sup>中心电子热激活能精细结构有关。

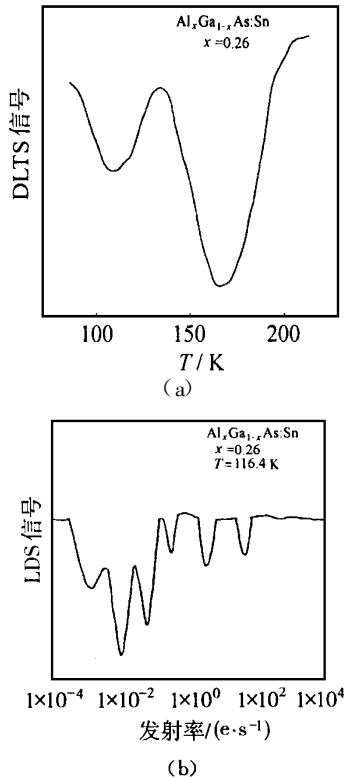


图 3 掺 Sn 的 AlGaAs 的 DLTS (a)和 LDS (b)谱

Fig.3 DLTS (a) and LDS (b) spectra of Sn-doped AlGaAs

从各谱峰的温度依赖关系所得的热激活能分别为 0.33, 0.31, 0.29, 0.19, 0.17 和 0.16 eV。由于预先没有假设任何结构,因此上述结果反映了 DX 中心电子热激活能真实的精细结构<sup>[6]</sup>。前后各 3 个热激活能的数值相差较大,可能表明它们分别具有不同的起源。与理论计算比较表明<sup>[7]</sup>,电子热激活能较大的 3 个可能起源于 DX<sup>-</sup>中心;热激活能较小的 3 个可能起源于 DX' 中心。

Sn 原子通常占据 III 族原子的位置,其周围 Al 和 Ga 原子的局域组分涨落从次近邻开始,理应有 13 种局域组分。然而,由于 DX 中心的大晶格弛豫,Sn-As 键将断裂,导致了新位置上的 Sn 原子与靠得最近的次近邻 Ga 或 Al 原子的再构<sup>[8]</sup>。再构

后,离 Sn 原子最近仅 3 个 Ga 或 Al 原子,所具有的 4 种局域组分中 Al 原子的个数分别为 0, 1, 2 和 3。在 Al 组分为 0.26 的 AlGaAs 中,局域组分含有 0, 1 和 2 个 Al 原子的几率较高。因此,我们认为 3 种高发生几率的局域组分可能对应于测量得到两类 DX 中心(DX<sup>-</sup>和 DX')

## 4 结论

用 Laplace 缺陷谱仪(LDS),对两种光电子材料,即掺 Fe 的 GaAsP 和掺 Sn 的 AlGaAs 进行了测量,结果表明,与 DLTS 谱比较,原来展宽的单个谱峰都呈现出多峰结构,证明 LDS 比 DLTS 的分辨能力高得多。分析表明,这些分裂的谱峰来自杂质深能级的精细结构,它们与杂质深中心近邻的晶体原子的组构有关,多峰结构的出现是合理的。

### 参考文献:

- [1] Lang D V. Deep - level transient spectroscopy : A new method to characterize traps in semiconductors [ J ]. J. Appl. Phys., 1974, 45(7): 3 023—3 032.
- [2] Dobaczewski L, Kaczor P, Missows M, et al. Evidence for substitutional-interstitial defect motion leading to DX behavior by donors in AlGaAs [ J ]. Phys. Rev. Lett., 1992, 68(16): 2 508—2 511.
- [3] 詹华瀚, 康俊勇, 黄启圣. Laplace 缺陷谱方法研究 [ J ]. 半导体学报, 1997, 18(7): 492—495.
- [4] 洪, 黄启圣. GaAsP 中混晶无序与 Fe 深中心的性质 [ J ]. 发光学报, 1987, 8(3): 182—191.
- [5] Kang J Y, Huang Q S. A multistate model for DX centres in AlGaAs alloy [ J ]. J. Luminescence, 1988, 40&41: 365—366.
- [6] Zhan H H, Kang J Y, Wu Z Y, et al. Fine structure of DX (Sn) centers in AlGaAs [ J ]. J. Appl. Phys., 1998, 84(5): 2 497—2 500.
- [7] Chadi D J. Tetrahedrally symmetric DX - like states of substitutional donors in GaAs and AlGaAs alloy [ J ]. Phys. Rev., 1992, B46(11): 6 777—6 780.
- [8] Morgan T N. Analysis of the vacancy - interstitial model for DX centers [ J ]. J. Electron. Mater., 1991, 20: 63—70.

### 作者简介:



余 辛(1956—),男,工程师,福建永春人,1986 年毕业于厦门大学电子学专业,主要从事半导体光电子材料与器件的实验研究,已发表论文数篇。