

AlGaAs 混晶中的 Te 施主能级*

康俊勇 黄启圣 林虹 陈朝

(厦门大学物理系, 厦门 361005)

唐文国 李自元

(红外物理国家实验室, 上海, 200083)

1991年3月23日收到, 8月11日修改定稿

用低温光致发光光谱, 暗条件及光照条件下的深能级瞬态谱方法, 对组分范围为 $x = 0.23 - 0.77$ 的掺 Te 的 AlGaAs 混晶的杂质能级进行了研究。结果表明, Te 杂质形成包括多个施主能级的复杂能级结构。本文对实验结果作了讨论。

PACC: 7155, 7855, 7280E

一、引言

AlGaAs 混晶中有关 Si、Sn、Te 等施主深中心即 DX 中心的研究已有 15 年了^[1,2], 就与 DX 中心有关的能级而言, 迄今多数实验及理论讨论常常仍以一个在导带边各与 Γ 带和 X 带相关的类氢浅能级及一个其性质依赖于混晶组分并主要与 L 带相关的深能级(记为 DX 能级)为依据。但越来越多的实验事实表明, DX 中心具有包括多个能级的复杂能级结构。例如对 Si, 除早期在深能级瞬态谱(DLTS)上看到重叠的双峰结构外, 最近, 由于光照下 DLTS 出现新谱峰, 认为它是反映 DX 能级以外的较浅施主能级^[3]; 对光致发光(PL)谱中多个谱峰的重新指认, 得出与 Si 杂质有关的有别于类氢浅能级的多个施主能级^[4,5]。

本文通过对掺 Te 的 AlGaAs 混晶样品, 在较宽混晶组分及不同的温度及激发条件下的 PL 光谱及其指认, 结合 DLTS 及光照下 DLTS 测量, 提出在 AlGaAs 中存在与 Te 杂质相关的多个施主能级的证据, 并对实验结果作出讨论。

二、实验方法

实验样品是组分不同 ($0.23 \leq x \leq 0.77$) 的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As:Te}$, 用液相外延方法在 $n^+ \text{-GaAs}$ 衬底上生长 $n\text{-AlGaAs}$ 层, 其层厚约 $5 \mu\text{m}$, 生长过程中掺入适量的 Te 杂质。用电容-电压法测得室温电子浓度为 $2 \times 10^{15} - 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 混晶组分由双晶 X 射线衍射测量决定。在 $n\text{-AlGaAs}$ 层上再扩散 Zn, 获得 p^+n 结, 用作 DLTS 测量。

在液氮温区进行 PL 光谱测量时, 样品置于 Oxford CF 1104 连续流液氮恒温器里, 用 Ar^+ 激光器的 4880 \AA 线为激发光源, 分光及测量设备包括: Jobin Yvon HRS,

* 国家自然科学基金及红外物理国家实验室资助课题。

光栅单色仪, EMI 968B 光电倍增管及液氮冷却的 Ge 探测器, 锁相放大器及微机数据处理器等, 温度高于 20 K 的 PL 光谱测量, 还使用 CSA-202E 氦气循环致冷机, SPEX-1403 光谱仪及 SPEX DATA MATE 数据处理器等组成的系统。样品温度变化范围为 4.2—150 K, 激发功率可在 1.5—500 mW 间调节。PL 测量系统的光谱响应均经过校正。

DLTS 谱仪包括经改进后响应时间为 0.1 ms 的 Boonton 72BD 电容仪, PAR 162 Boxcar 取样积分器等。测量率窗可取 $0.5\text{--}6 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 。用白炽灯作光源, 进行光照下的 DLTS 测量。

三、结果和讨论

(1) 在液氮 (4.2K) 温区及较宽光谱范围 (5500—17000 Å) 内, 测量得到的 PL 光谱表明, 组分不同的样品, 其带边发射谱形结构变化显著。此外, 在较低能量区的 $0.86 \mu\text{m}$ (1.44 eV) 处都出现发光强度不同, 来源于 $n^+ \text{-GaAs:Si}$ 衬底的 D-A 对发光带^[6]。但是, 在较高掺 Te 浓度及测量系统的极限灵敏度下, 未观察到其它发射, 例如在掺 Si 样品中的 $1.5 \mu\text{m}$ 强发射带^[7]。

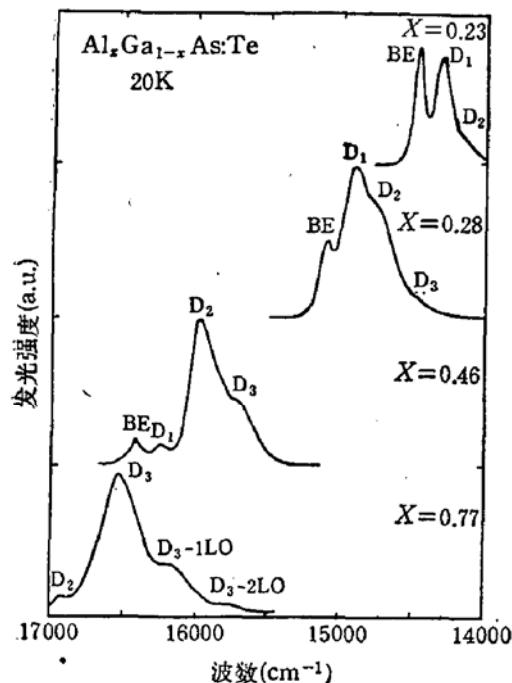


图 1 组分不同的 AlGaAs:Te 样品的 PL 光谱

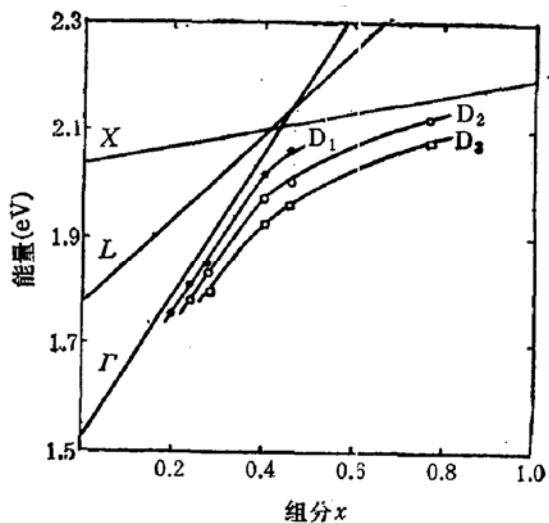


图 2 AlGaAs PL 光谱中 Te 施主各能级随组分的变化

图 1 示出几个不同组分 ($x = 0.23, 0.28, 0.46, 0.77$) 样品的典型带边 PL 光谱。根据变温及变激发强度下各谱峰位置及强度的变化, 可以分辨各谱峰的性质。图中除 $x = 0.77$ 样品外, 位于最高能量位置的尖锐谱峰, 其位置不随激发强度的增加变化, 但其积分强度随激发强度增大, 且在强激发条件下, 达到与激发强度的平方成正比。因此可指认为束缚激子复合发光峰, 图中记为 BE。与 BE 发光不同, 图中其余各个 D_1, D_2, D_3 谱峰

(包括 $x = 0.77$ 样品位于最高能量位置的谱峰 D_2) 的位置均随激发强度增加向高能位置移动, 显示出 D-A 对复合发光的特性。其发光强度随激发强度增大的速率不同, D_1 最大, D_2 次之。各 D 峰发光强度随温度上升减弱, 根据 20 K 以上各 D 峰的强度-温度实验曲线, 得到的发光猝灭激活能, 与相应组分下 AlGaAs 混晶中的 C 受主束缚能^[8]一致。此外, 各 D 峰强度也随掺 Te 浓度的增加明显增大。因此, 可认定各 D 峰对应于 Te 施主的不同能态与 C 受主之间的 D-A 对复合发光。对于 $x = 0.77$ 高组分样品, 观察到 D_3 峰及其声子伴线 D_3-1LO 、 D_3-2LO , 它们之间相对的发光强度不随激发强度变化。根据拟合计算得到 D_3 发射的声子能量约 40 meV, 黄昆因子 $S \sim 0.35$, 显示出 D_3 能态有较弱的电声耦合。

根据 4.2 K 弱激发下各 D-A 对发射能量再加上 C 受主束缚能, 得到 D_1-D_3 施主能级的能量随混晶组分的变化如图 2。由图可见, D_1 能级跟随 Γ 带变化, 可指认为与 Γ 带相关的类氢浅能级, 记为 D_r 。但 D_2 及 D_3 施主能级并不跟随某一能带变化, 其最大束缚能位于 Γ 和 X 带交叉组分附近, 分别约为 90 meV 和 130 meV, 低于由电学方法 (Hall 及 DLTS 测量) 得到的 DX 能级的最大束缚能 (约 160 meV)^[2]。并且, D_3 能级的弱电声耦合, 也与由光电容方法得到 DX 能级的大晶格弛豫的性质 ($S \sim 70$)^[1,9], 差异非常大。

为了解 D_2 及 D_3 能级的性质, 我们考察了各 D-A 对归一化发射强度的组分关系, 图 3 实验点是由 4.2 K 下饱和谱线的线性拟合得到的。由图可见, 在低和高组分, D_r-A 及 D_3-A 发射分别占主要, 而在 Γ 与 X 带交叉附近组分, D_2-A 则相对较强。这一图象与导带电子在 Γ 、 L 和 X 带的统计分布相似^[5,10]: 即在低组分, 电子多数分布在最低的 Γ 带, 在高组分, 多数电子分布在最低的 X 带, 而在 Γ 与 X 交叉的组分附近, L 带由于与 Γ 及 X 带接近, 带上的电子数相对增多。如果光激发后, 占据各施主态的电子与有关导带的电子分布有关, 似乎可以由 D_r 束缚于 Γ 带的实验事实, 推测 D_2 及 D_3 态分别可能主要与 L 及 X 带相关。

(2) 在 80—250 K 温区, 测量了样品的 DLTS 及光照下的 DLTS 谱。图 4 示出在较高率窗下两种组分 ($x = 0.40$ 及 0.46) 的典型 DLTS 谱。可以看到, 它们由两个谱峰即主峰 E_3 及次峰 E_2 组成, 并随组分增加, E_2 峰相对增高。光照 DLTS 谱如图 5, 除 E_3 、 E_2 峰外, 还在较低温度处显示出较强的新谱峰 E_1 。由样品主峰 E_3 的发射及俘获测量而得到的能级束缚能, 比 D_2 、 D_3 大, 与已知的 DX 能级一致, 因此 E_3 应即为 DX 能级。由于各谱峰重叠, 尚难于由瞬态电容方法的发射与俘获测量, 准确得到 E_1 及 E_2 能级的束缚能。最近的实验结果认为, AlGaAs:Si 的 DX 能级只有在很弱的激发及温度 $70 \leq T \leq 140$ (K) 条件下才可能在 PL 光谱中出现^[11]。我们认为, 如果 DX 能级具

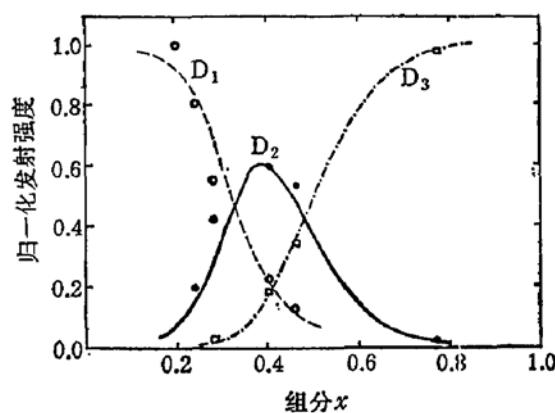


图 3 AlGaAs:Te 各 D-A 对归一化发射强度与组分的关系

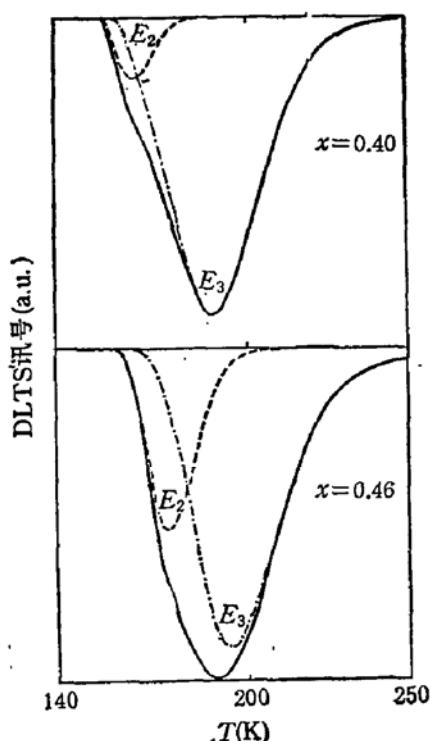


图4 组分为 $x = 0.40$ 及 $x = 0.46$ 的 AlGaAs:Te 样品的 DLTS 谱
($\epsilon_s = 2310 \text{ s}^{-1}$)

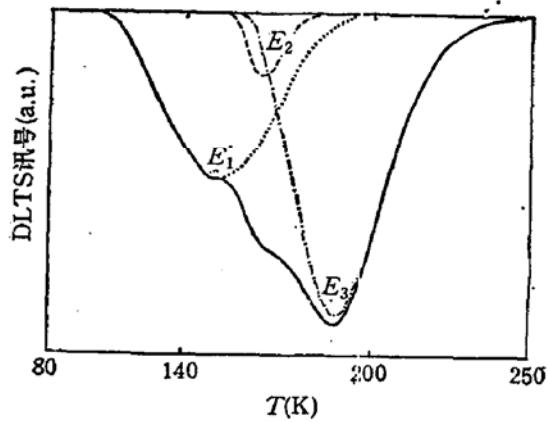


图5 组分为 $x = 0.40$ 的 AlGaAs:Te 样品的光照 DLTS 谱
($\epsilon_s = 2310 \text{ s}^{-1}$)

有大晶格弛豫的性质,一般条件下在低温区要观测到这一能级的 PL 光谱应是很困难的。这里,我们根据上述讨论及 PL 光谱中 D_2D_3 和 DLTS 谱中 $E_3E_2E_1$ 能级的能量顺序,认为 D_2 应与 E_1 对应, D_3 与 E_2 对应,而 E_3 ,即 DX 能级未在本文的 PL 光谱中出现。

(3) 以上结果表明,在 AlGaAs 混晶中,存在与 Te 杂质相关的 4 个施主能态,即 D_r 、 D_2 、 D_3 及 E_3 。此外, Dmochowski 等在掺 Te 的间接带组分的 AlGaAs 中,由红外光吸收测量,还得到区别于上述 4 个能级特性的,与 X 带相关的类氢浅能级^[9],这里记为 D_x 。这一与 X 带相关的浅能级未能在本文的 PL 光谱中观测到,其原因可能是光激发后,电子停留在这一能态上的时间很短,而更多地分布在与 X 带相关的更深的 D_3 态,因此也使高组分下的持久光电导变得很小^[9,10]。总之, Te 杂质表现出丰富而复杂的能级图象,按照本文分析,可能有:与 Γ 带相关的浅能级 D_r ,主要与 L 带相关的 D_2 及 DX 能级^[13],主要与 X 带相关的 D_x 浅能级^[9]及 D_3 能级。目前要对这一多能级图象作出完满解析是很不容易的。

最近对 AlGaAs 中 Si 施主的 PL 光谱的研究^[4],得到与本文结果相似的能级图象,并提出 4 个施主能级与替位 Si 能级的晶场分裂有关,类似于本文的 D_2 及 D_3 是互相靠近的 $T_2(L)$ 及 $T_2(X)$ 能级相互作用的结果。外自陷模型^[9]解析了在间接带组分观察到的 D_x 及 DX 能级,认为前者是 DX 中心的亚稳激发态,后者是其基态。对负 U 模型的修正用来说明与本文 D_2 态类似的光诱导施主能态及 DX 能级^[12]。计入谷间混合效应的有效质量理论^[13]说明了 D_r 、 D_x 及 DX 能级,认为 DX 能级的深化起因于 L 带能谷

间电子的耦合,但 DX 能级的大光离化能只是反映 DX 基态至其共振激发态 $A_1(L) \rightarrow T_2(L)$ 的内部跃迁,不是伴随大的晶格弛豫的结果。其它一些模型,例如混晶无序效应^[14,15],也用来说明各自观察到的实验事实。

本文的讨论,限于由 DX 中心形成的多能级事实,把各施主能态与性质各异(对称性、能量、简并度、电子有效质量等)的 Γ 、 L 、 X 导带相联系,认为 D_L 是联系 Γ 直接带的类氢浅能级,把 DX 及 D_2 能级、 D_3 及 D_X 能级看成是两组分别主要与 L 及 X 带相关的基态及其激发态,其中 L 带的基态(DX 能级)具有大晶格弛豫的性质, X 带的基态(D_X)与点阵有弱的耦合。这里并未涉及施主杂质在晶体中的结构。对 DX 中心在 III-V 族混晶中的微观构造,它们是否有多种不同的占位或荷电状态,如何看待各种实验及理论结果以真实反映 DX 中心的本质,已有很多讨论。有关基态的复杂性质,可能来自某些物理过程,例如上述的自陷、负 U 等效应,也可能涉及不同占位(移位替位或间隙)或不同杂质类型。最近我们在 AlGaAs:Sn 中观察到两个与 Sn 相关的深能级,都具有大晶格弛豫的特性,明显与 Si 及 Te 中心的情形不同。总之,由于施主杂质形成多能级,不同作者由于实验条件不同,可能只观察到复杂能级结构的局部,因而有时可能导致不同的甚至是互相矛盾的结果。看来, DX 中心问题的解决还需要实验及理论两方面作出相当的努力。

参 考 文 献

- [1] D. V. Lang and R. A. Logan, *Phys. Rev. Lett.*, **39**, 635(1977).
- [2] P. M. Mooney, *J. Appl. Phys.*, **67**, R1(1989).
- [3] Y. B. Jia, M. F. Li, J. Zhou, J. L. Gao, M. Y. Kong, P. Y. Yu, and K. T. Chan, *J. Appl. Phys.*, **66**, 5632(1989).
- [4] J. C. M. Henning, J. P. M. Ansems and P. J. Roksnoer, *Semicond. Sci. Technol.*, **3**, 361(1988).
- [5] J. Y. Kang, Q. S. Huang, H. Lin and C. Chen, in *Spectroscopy and Optoelectronics in Semiconductors and Related Materials*, p. 331, World Scientific, 1990.
- [6] J. Y. Kang, Q. S. Huang, H. Lin and C. Chen, *Chin. Phys. Lett.*, **7**, 421(1990).
- [7] E. A. Montie and J. C. M. Henning, *J. Phys. C*, **21**, L311(1988).
- [8] V. Swaminathan and K. D. Sturge, *J. Appl. Phys.*, **53**, 5163(1982).
- [9] J. E. Dmochowski, L. Dobaczewski, J. M. Langer and W. Jantsch, *Phys. Rev.*, **B40**, 9671(1989).
- [10] N. Chand, T. Henderson, J. Klen, W. T. Masselink, R. Eisher and H. Morkoc, *Phys. Rev.*, **B8**, 4481(1984).
- [11] G. Oelgert, G. Grummt, G. Lippold, R. Pickenhain, R. Schwabe and L. Lehmann, *Semicond. Sci. Technol.*, **5**, 894(1990).
- [12] M. F. Li, Y. B. Jia, P. Y. Yu, J. Zhou and J. L. Gao, *Phys. Rev.*, **B40**, 1430(1989).
- [13] J. C. Bourgois, S. L. Feng and J. Von Barthleben, *Phys. Rev.*, **B40**, 7663(1989).
- [14] 康俊勇, 黄启圣, 科学通报, **33**, 1455(1988).
- [15] P. M. Mooney, T. N. Theis, and S. L. Wright, *Appl. Phys. Lett.*, **53**, 2546(1989).

Donor Levels in Te-Doped AlGaAs

Kang Junyong, Huang Qisheng, Lin Hong and Chen Chao

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

Tang Wenguo and Li Ziyuan

(National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai, 200083)

Abstract

Impurity levels in Te-doped $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ for the composition range of $x=0.23-0.77$ have been studied by photoluminescence and Deep Level Transient Spectroscopy under dark and illumination conditions. The results show that a complicated level structure consisting of several donor levels is formed by substitutional Te impurity. A discussion on the results is given.

PACC: 7155, 7855, 7280E