

LPE n-GaAlAs:Te 中 DX 中心的导纳谱分析

葛 惟 镜 吴 萍 汉

(中国科学院半导体研究所)

1985年4月8日收到

在测量较深能级和最浅能级两种情况时, 导纳谱(DLAS)得到的速率值具有完全不同的含义。对于前者, DLAS 和 DLTS 结果一致, 给出能级的热发射深度 ΔE_{em} ; 对于后者, DLAS 和 Hall 结果一致, 给出能级的热平衡深度 ΔE_{eq} 。当深中心的晶格弛豫很大时, 这种区分十分重要。用 DLAS 和 DLTS 技术测量了 LPE 法生长的 $n\text{-Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As:Te}$ 中的具有复杂性质的 DX 中心, 可以分辨两个能级, ΔE_{em} 分别为 $\sim 0.35\text{eV}$ 和 $\sim 0.20\text{eV}$, ΔE_{eq} 分别约为 0.10eV 和 36meV 。

导纳谱 DLAS (Deep Level Admittance Spectroscopy) 是比电容瞬态谱 DLTS 更先发展起来的一种测量深能级的实验手段^[1-3]。它简便易行, 但灵敏度不如 DLTS, 且在诠释上一直不十分统一。在实际应用中, 特别着重于不太深的多子能级的研究, 因为这些能级的载流子发射率在一般测量温度范围里, 可能太高, 对 DLTS 的瞬态过程观察存在技术上的困难。由下面的分析还可以看到, DLAS 在某种条件下可以给出能级的热平衡深度 ΔE_{eq} , 与 DLTS 得到的热发射深度 ΔE_{em} 互相补充。

$n\text{-GaAlAs}$ 中的 DX 中心是一个典型的大晶格弛豫的深中心, 其位形坐标图呈现出外交叉^[4], 即能级被占据和不被占据的位形曲线的交点处在两曲线的平衡点坐标之间, 如图 1(b) 所示。DX 中心的光学深度 ΔE_{op} (由光吸收峰值位置得到)、热发射深度 ΔE_{em} (由发射率与温度关系得到) 和热平衡深度 ΔE_{eq} (由准平衡态载流子浓度与温度关系得到) 很不相同。关于 DX 能级的本质, 目前尚不清楚, 看法也不一致^[4-6,9]。当施主为磷时, 霍耳测量所得 ΔE_{eq} 随 x 值 (Al 的百分比) 的变化很大^[13]。而结电容技术在本实验

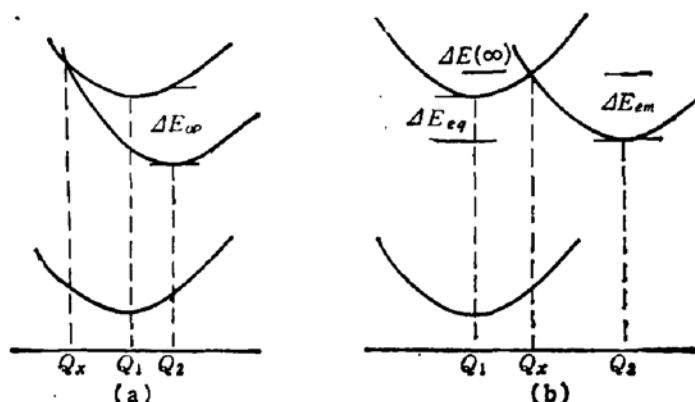


图 1 内交叉 (a) 和外交叉 (b) 位形坐标图

所用的 $x \sim 0.30$ 的情况下, 通常给出的结果为 $\Delta E_{op} \sim 1.1\text{eV}$, $\Delta E_{em} \sim 0.3\text{eV}$, $\Delta E_{eq} \sim 0.1\text{eV}$ ^[6]. 而导纳谱的测量尚未见报道. 为了分析 LPE 法生长的 n-GaAlAs:Te 中 DX 中心的导纳谱, 本文将首先澄清导纳谱诠释中的一些重要问题, 继而给出实验结果, 最后加以讨论和总结.

一、导纳谱的诠释

在导纳谱诠释中, 首先要区分较深能级和最浅能级. 前者在测量温度范围内, 不是决定自由载流子浓度的主要能级, 一般可写成 $N_T \ll N_D$, N_D 是主要贡献载流子的浅施主浓度. 后者虽然称为最浅能级, 实质上是指在测量温度范围内决定自由载流子浓度的主要能级, 在本文以后的叙述中, “最浅能级”都具有这样的含意. 如果它不是实际上的最浅能级, 显然至少要满足 $N_T \gg N_D$ 的条件. 这两者的区别过去已有人注意到, 并做了定性的说明^[3]. 本文将明确地从物理上分析这两种情况下导纳谱测量所对应的不同的等效电路, 并从而正确解释导纳谱所观测的速率的不同含意.

1. 较深能级的情况——并联等效电路

肖特基结区的能带图示于图 2(a), 其 E_D 和 E_T 分别代表浅能级和深能级. E_F 代表电子的费米能级, 在测量温度范围内取决于 E_D 和 N_D . 在这种情况下, E_T 能级所对应的导纳峰出现在较高的温度, 在该温度下, 浅杂质可以认为是全电离的. 由此引出的重要



图 2 肖特基结能带图

(a) 一般情况

(b) 最浅能级情况

结果就是耗尽层以外的体电阻可以忽略不计. 在微小交变讯号 $\delta\nu$ 的作用下, E_T 能级被电子占据的能级数是一个复变量, 显然其实部 δn_T^r 代表深能级对电容的贡献, 虚部 δn_T^i 代表对电导的贡献, 可以分别写为^[7]

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta n_T^r = N_T \frac{qe_n^2(\delta\nu/\delta T)f(1-f)}{\epsilon_n^2 + \omega^2(1-f)^2}, \\ \delta n_T^i = \frac{\omega(1-f)}{\epsilon_n} \delta n_T^r. \end{array} \right. \quad (1a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta n_T^r = N_T \frac{qe_n^2(\delta\nu/\delta T)f(1-f)}{\epsilon_n^2 + \omega^2(1-f)^2}, \\ \delta n_T^i = \frac{\omega(1-f)}{\epsilon_n} \delta n_T^r. \end{array} \right. \quad (1b)$$

式中, ω 是 $\delta\nu$ 的交变频率, ϵ_n 是深能级的电子发射率, f 是深能级的电子占据率. 由(1)式对 ω 求微分可知, 当改变小讯号的频率进行观测时, 电容部分出现台阶, 而电导部分出现极值, 与实际的导纳谱相符. 电导极值的条件为

$$\epsilon_n = (1-f)\omega, \quad (2)$$

在此条件下, 显然有 $\delta n_T^f = N_T \left(\frac{q\delta\nu}{2kT} \right) f(1-f)$. 进一步考虑当 f 取何值时对 δn_T^f (即电导) 贡献最大. 实际上, $f(1-f)$ 由费米-狄拉克统计的具体形式可知是一个类似 δ 函数的极值函数, 当 $f = \frac{1}{2}$ 时取极大. 由 (2) 式得到此时 $\omega = 2\epsilon_n$.

以上即一般文献中对导纳谱公式的推导, 它表明在一定温度下改变频率来测量结区电导的峰值时, 相应的 ω 即代表 ϵ_n 值. 从而利用与 DLTS 同样的 Arrhenius 作图方法, 即可从 $\ln(\epsilon_n/T^2) \sim 1/T$ 的斜率值确定能级的深度 ΔE_{em} . 从物理上分析, DLAS 和 DLTS 的区别在于后者观测的是单纯热发射过程, 以时间常数 $\tau = (\epsilon_n)^{-1}$ 来表征; 而前者观测的是深能级上电子填充与发射综合的过程, 以时间常数 $\tau = (\epsilon_n \cdot n_0 + \epsilon_n)^{-1}$ 来表征 (ϵ_n 和 n_0 分别为深能级的俘获系数和平衡自由电子浓度), 峰值表现的是俘获率与发射率相等并与外加讯号频率共振的情况. DLTS 是瞬态特性的观测, 而 DLAS 是准平衡态小讯号扰动特性的观测, 但结果都得到发射率与温度的关系, 所以没有实质上的区别. 也就是说, 对于满足上述条件的能级, DLAS 和 DLTS 的结果应当一致, 都给出能级的热发射深度 ΔE_{em} . 实验上典型的例子如吴荣汉等^[8] 和 M. Derdouri 等所报道的分别用 DLTS 和 DLAS 研究的硅中金施主的能级.

根据以上分析, 可以把测量样品等效于一个并联电路, 其两支分别为结的电容 C_s 和电导 G_s , 如图 3(a) 所示. C_s 及 G_s 的具体表达式可参看文献[18]. 其间的关系为

$$G_s = C_s \omega^2 \tau / (1 + \omega^2 \tau^2).$$

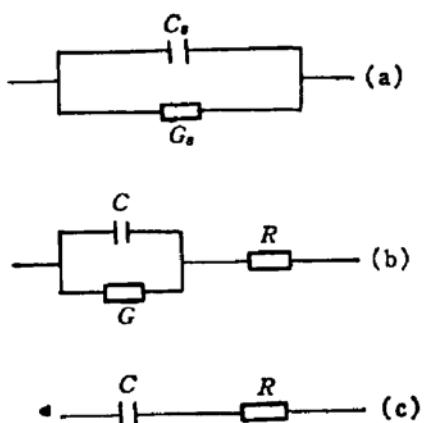


图 3 导纳测量的等效电路

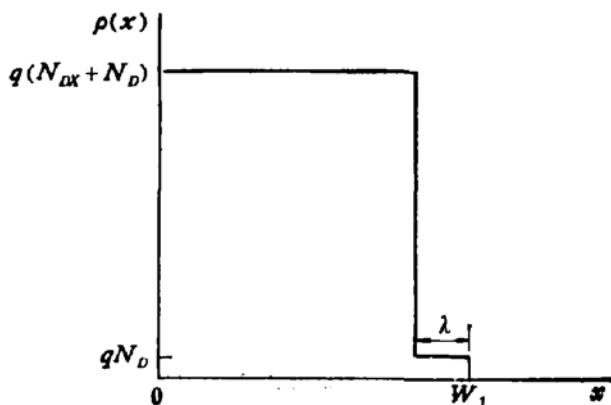


图 4 肖特基结内电荷分布示意图

2. 最浅能级的情况——串联等效电路

已定义最浅能级为决定载流子浓度的能级. 假定深能级 E_T 在更浅能级 E_D 存在时在测量的温度范围内决定载流子浓度, 显然要求 E_T 位置不要太深, 且 $N_T \gg N_D$. 这种能级在完全离化的较高温度下不可能由 DLAS 观察到. 因为那相当于体内 E_F 在 E_T 之下, 结内 E_F 与 E_T 无交点. 即不可能由外加交变弱讯号引起发射与俘获的共振. 但只要 E_F 与 E_T 在结内交叉, 体内自由载流子就要有一定程度的冻结, 从而引起不可忽视的体电

阻。这一点从我们观察之导纳谱峰出现的实际温度范围内也可估计到。 E_F 的表达式可写为

$$E_F \approx \frac{E_C + E_T}{2} + \frac{KT}{2} \ln \left(\frac{N_T}{2N_C} \right). \quad (3)$$

由于 N_T (即本文中的 N_{DX}) 相当大 (见下文), 可见 E_F 的位置符合上面的分析。

载流子冻结的直接后果是耗尽层以外的体电阻不可以忽略不计。假如体电阻为 R , 它显然是温度的函数。由于 R 的存在, 上述并联等效电路的近似显然已不适用, 一般就要考虑如图 3(b) 所示的并联+串联的等效电路。下面着重分析其并联部分, 即结内的情况。

图 4 是 Lang 等用于分析 n-AlGaAs:Te 肖特基结内电荷分布的示意图^[4]。 $x = \omega - \lambda$ 点对应 DX 中心能级与费米能级交点, 在低温下取占据因子 f 的阶梯近似, $\lambda = (2\epsilon\phi_{FT}/qN_D)^{1/2}$, $\phi_{FT} = \frac{(E_F - E_T)}{q}$ 。由泊松方程很容易得到

$$2\epsilon(V_{bi} + V) = q[N_{DX}(\omega - \lambda)^2 + N_D\omega^2]. \quad (4)$$

由于 $N_{DX} \gg N_D$, 且 λ 值很小, 结电容可以近似为 $C = \epsilon A/\omega$, A 为结面积。可以选用测量频率很高, 使 DX 中心上电子的俘获和发射无法响应, 所以 $\delta\nu$ 小讯号只引起耗尽层边缘处小的电荷变量 $N_D\delta\omega$ 。这相当于一个理想电容, 电荷改变与偏压改变同相位, 即并联电路中的 G 值近似为零。对真正的最浅能级情况, 没有一个更浅的 E_D 能级来提供电容讯号, 这时要测得其导纳谱必须选用该能级上电子的俘获和发射可以响应的频率, 但电荷的变化仍发生在结区的边缘, 仍满足 $G \sim 0$ 的近似。

根据以上分析, 对最浅能级的导纳测量, 可以用一个电容 C 和一个电阻 R 串联的等效电路来近似(图 3(c))。由于实际测量时提取的讯号是样品的总导纳 $Y_s = G_s + i\omega C_s$, 所以要建立实测量 G_s 、 C_s 与 R 、 C 的关系:

$$C_s = \frac{C}{1 + R^2\omega^2C^2} = \frac{1}{R} \cdot \frac{\tau}{1 + \omega^2\tau^2}, \quad (5a)$$

$$G_s = \frac{R\omega^2C^2}{1 + R^2\omega^2C^2} = \frac{1}{R} \cdot \frac{\omega^2\tau^2}{1 + \omega^2\tau^2}. \quad (5b)$$

式中, $\tau = RC$ 是迴路的时间常数。由 (5b) 式得到当 ω 固定时, G_s 对 R 取极值的条件为 $R_p = \frac{1}{\omega C}$, 或 $\omega\tau_p = 1$, $\tau_p = R_pC$, R_p 是对应于 G_s 极大值 $G_{s_{max}}$ 的体电阻值。由

于 C 值(注意与 C_s 的区别)实际上可近似为 $\epsilon A/\omega$, 不是温度的显函数, 所以对 R 取极值也可以认为是对温度 T 取极值。由导纳峰值处 ω 与 R_p 的关系可知 $\omega \sim T$ 曲线也反映了 $R_p \sim T$ 关系, 而 R 值又与迁移率和载流子浓度相联系, 所以, 从 $R \sim T$ 曲线可以采用与 Hall 测量类似的方法求得能级的热平衡深度 ΔE_{eq} 。具体来看, R 实际上可看作样品的扩展电阻^[3], 即 $R = \rho/4r$, ρ 是材料电阻率, r 是肖特基结半径。对 n 型样品, $\rho = (nq\mu_n)^{-1}$, μ_n 是电子迁移率, n 是电子浓度。Saxena^[10] 讨论了 AlGaAs 中各种散射机构, 包括三元合金的无序散射, 但低温仍可以 GaAs 型极化半导体的总迁移率来表示, 即^[11]

$$\mu_s = C'(m^*)^{-3/2} T^{1/2}. \quad (6)$$

式中, C' 是不含 m^* (电子有效质量) 和 T 的量。同时, 在 $\phi_{FT} \sim 0$ 的近似下, 可以认为

$$n = N_c \exp \left[-\frac{(E_c - E_F)}{KT} \right] \propto T^{3/2} \exp \left[-\frac{(E_c - E_F)}{KT} \right]. \quad (7)$$

因此有

$$\begin{cases} R_p \propto T^{-1} \exp \left[\frac{E_c - E_T}{KT} \right], \\ \omega \propto T^2 \exp \left[-\frac{(E_c - E_T)}{KT} \right]. \end{cases} \quad (8a)$$

$$\begin{cases} R_p \propto T^{-1} \exp \left[\frac{E_c - E_T}{KT} \right], \\ \omega \propto T^2 \exp \left[-\frac{(E_c - E_T)}{KT} \right]. \end{cases} \quad (8b)$$

由 $\omega\tau_p = 1$ 的极值条件及 (5b) 式可知, 极值的 G_s 值实际上就是 $(2R_p)^{-1}$, 所以利用极值条件下 $\ln(G_s/T^2) \sim 1/T$ 或 $\ln(\omega/T^2) \sim 1/T$ 直线的斜率, 均可确定能级位置 $E_c - E_F = \Delta E_{eq}$, 即热平衡深度。

以上方法依赖于共振频率与温度的关系; 可以称为多频测量。

3. 单频测量

以上分析表明, 深能级的导纳在不同的条件下可分别等效于并联 GC 或串联 RC 回路, 所得到的二极管电导的表示式具有不同的含意和形式。现把它们分别写成下列形式

①并联电路

$$G_s = \frac{\omega^2 \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} C_s. \quad (9)$$

②串联电路

$$G_s = \frac{R/R_p^2}{1 + R^2/R_p^2}. \quad (10)$$

显然, 从形式上看, $\omega\tau$ 与 R/R_p 处于对应的地位。对于任一给定频率, 不难得到

①并联电路

$$\tau^{-1} = \omega \left[\frac{G_{s_{max}}}{G_s} \pm \sqrt{\left(\frac{G_{s_{max}}}{G_s} \right)^2 - 1} \right]. \quad (11)$$

②串联电路

$$R = \frac{1}{2G_{s_{max}}} \left[\frac{G_{s_{max}}}{G_s} \pm \sqrt{\left(\frac{G_{s_{max}}}{G_s} \right)^2 - 1} \right]. \quad (12)$$

其中, $G_{s_{max}}$ 为实测导纳谱的电导峰值, G_s 为导纳峰两侧电导值。采用温度扫描, 根据 (11)、(12) 两式, 从单一频率下导纳峰两侧诸点 G_s 随温度的变化, 可以按不同的电路模式确定 τ 或 R 随温度的变化, 从而推导出能级位置(分别对应于 ΔE_{cm} 和 ΔE_{eq})。在本工作中, 首先导出和使用了这种方法, 并称之为单频测量。

4. 并联、串联两种情况的比较

前面已说明, 虽然并联和串联两种等效电路的谐振条件都是 $\omega\tau = 1$, 但 τ 的物理

内容完全不同。对于前者, $\tau = (2e_s)^{-1}$, 是深能级的特征时间常数; 对于后者 $\tau = RC$ 是二极管回路的时间常数。这样, 并联等效电路测得的是能级的热发射深度 ΔE_{cm} , 串联等效电路测得的是能级的热平衡深度 ΔE_{eq} 。

ΔE_{cm} 和 ΔE_{eq} 的区别可以通过位形坐标图予以说明。在图 1 中, 我们说明了能级的各种深度的含意, 在晶格弛豫很大时, ΔE_{cm} , ΔE_{eq} 很不相同; 其差值给出俘获过程的激活能 $\Delta E(\infty)$, 即 $\Delta E_{cm} = \Delta E_{eq} + \Delta E(\infty)$ 。在图 1 中, 还给出了能级的光学深度 ΔE_{op} 。由于 DLAS 可能在不同条件下分别测出 ΔE_{cm} 或 ΔE_{eq} , 而 DLTS 只能给出 ΔE_{cm} , 对于多声子跃迁型俘获机构, 晶格弛豫较大的能级, 实验结果的分析要特别慎重。DX 中心能级正属于这种情况。

二、实验结果

以上以肖特基结为例进行分析, 其结果显然也适用于 P+N 结的浅掺部分。就我们所知, 采用导纳谱技术对 n-GaAlAs:Te 中 DX 能级的研究尚无报道。本实验着重于导纳谱的测量和分析, 同时也作了 DLTS 测量, 以进行比较。

实验采用液相外延生长样品、铝含量 $x \approx 0.3$, 室温电子浓度为 $\sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 采用 p+n 结或蒸金肖特基结。以 HP4274, HP4275 多频表进行电导和电容测量, 负偏置电压为 0—8 伏, 调制讯号电压为 10—30mV, 测温范围 15—350K。在所测样品中, DX 为主要能

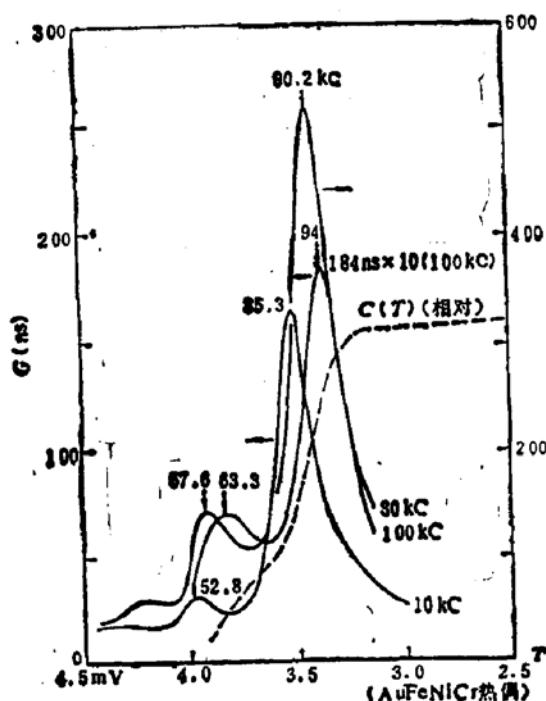


图 5 Ga_{0.7}Al_{0.3}As 中 DX 中心导纳谱

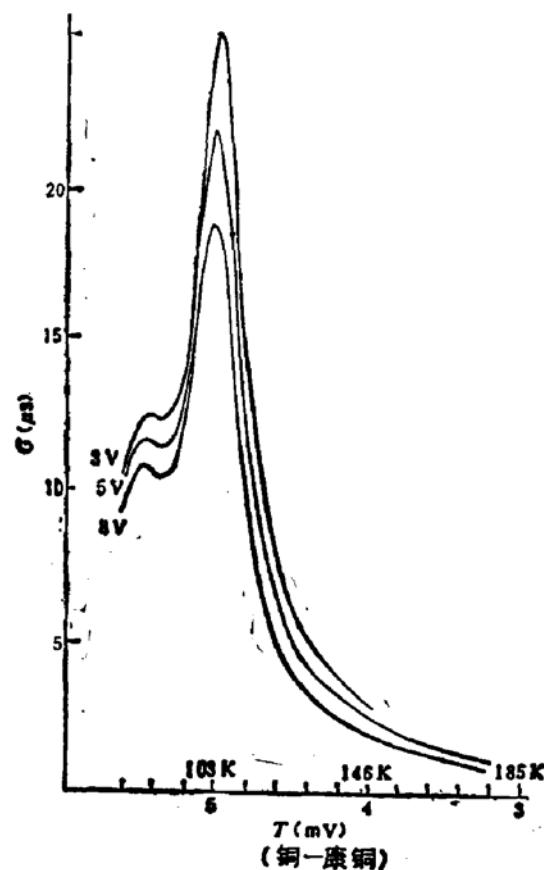


图 6 不同偏置下 DX 中心导纳谱

级，其浓度远大于剩余施主浓度 ($N_{DX} \gg N_D$)，多频测量和单频测量给出互相一致的结果，计算均基于串联等效电路的分析。

图 5 给出典型的 DX 中心导纳谱。 $G_s \sim T$ 曲线一般表现为双峰，并且，其相对高度不随所用频率发生明显的变化。用多频及单频方法都得到两峰相应的能级深度 $\Delta E_{eq} = E_c - E_T$ 分别为 100meV 和 36meV，如图 7 所示。从图 5 可以看到电导分量 G_s 相对于 G_{smax} 表现出良好的对称性。

图 6 为在同一频率 ($\omega = 2\pi M C$)，不同偏置情况下，电导峰的相对变化。根据单频分析所得能级位置也如图 7 所示。显见，不同偏置引起的能级位置变化很小；这是可以理解的，因为串联等效电路近似的测量相当于零场测量，它与发射率受电场影响无关。

为对比导纳实验结果，我们对同样样品进行了 DLTS 测量，其谱图和能级分别如图 8 和图 7 所示。按所测结果，可以分辨出 $\Delta E_{cm} \approx 0.3-0.4eV$ 和 $\Delta E_{cm} \approx 0.2eV$ 的两个能级。虽然 D. V. Lang 等人的某些样品的谱图中也出现过双峰，但根据 DLTS 及 DLAS 的测量结果，两个能级位置是本文第一次明确指出（当然，其本质尚待进一步讨论）。需要说明的是，按 DLTS 测量的 DX 中心对应的峰值位置明显地依赖于测量条件（如率窗，注入脉宽，偏置电压等），如图 8 所示。这一方面，说明 DX 中心的复杂结构，另外，也表明该能级族俘获截面强烈的温度关系影响着注入载流子对能级的相对填充量，从而使 DLTS 热发射率 e_s 的测量可靠性降低，不易准确确定能级的位置。

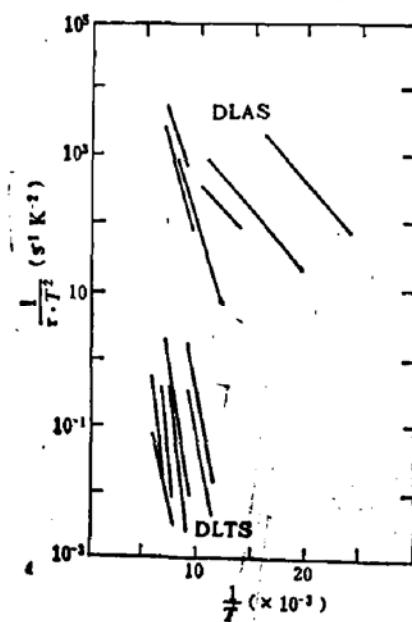


图 7 由 DLTS 及 DLAS 确定的 $Ga_{0.7}Al_{0.3}As:Te$ 中的 DX 中心速率值的 Arrhenius 图
(样品取自不同外延片)

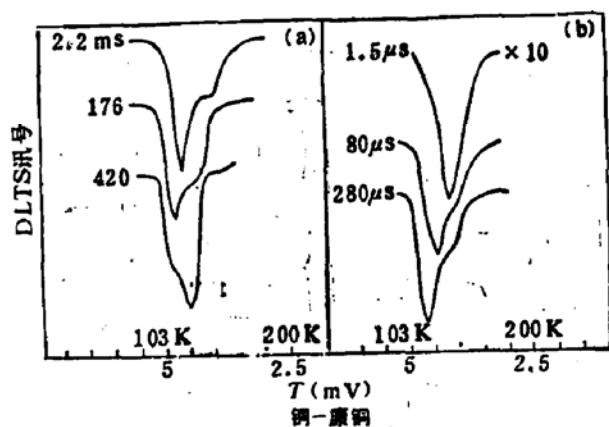


图 8 DX 中心 DLTS 信号随率窗 (a) 及注入脉冲宽度 (b) 的变化

表 1 给出用不同的外延片 (x 均为 ~ 0.3) 所制备的样品的测量结果。从表中可以看出，DLTS 所确定的 ΔE_{cm} (亦即热发射激活能) 与 DLAS 的结果很不一致，后者与霍尔测量^[12,13]所确定的 ΔE_{eq} 基本一致 (霍尔测量给出 $\Delta E_{eq} \approx 40-60meV$)。文献 [12,13] 均只提供了单一的 ΔE_{eq} 值，估计是未能分辨两个能级，所得值应当认为是两个能级

表 1. 按 DLTS 及 DLAS 所测定的能级位置
(样品取自不同外延片)

样品编号	DLTS	DLAS	
		多 频	单 频
1	0.41 eV	93.8 meV	93.6* 115* meV
	0.22	33	
2	0.35		92
	0.19	37	
3	0.47	114	
	0.25		36
4	0.20	36.3	
5	0.35		

* 93.6meV 对应负偏置 3V. 5V. 8V.

* 115meV 对应零偏置

ΔE_{eq} 值的某种混合。上述两种方法所得的能量之差,即 $\Delta E_{em} - \Delta E_{eq} - \Delta E(\infty)$ 应为能级俘获截面的激活能。把各个样品取平均,则高温能级(DXI)俘获截面激活能约为 0.2eV,低温能级(DXII)俘获截面激活能约为 0.16eV,这与 Lang 等^[4]直接测定的相应能量值大致符合。但他们只给出一个能级及其相应的激活能值(虽然他们有时也观察到双峰),因此其温度关系也具有混合平均的含意。一般说来,DLTS 采用的门脉冲法确定俘获截面不易区分开两个热发射率相近,俘获截面值也接近的能级。在 DLTS 测量中,不同的作者都说明了 DX 中心可能具有复杂的能级结构。可以认为导纳谱测量有助于分辨 DX 中心的多能级状况并确定它们各自的俘获截面激活能。

三、讨 论

1. DX 中心普遍存在于 LPE^[4]、MOCVD^[14] 及 MBE^[15] 生长的掺 Te、Sn、Si、S、Se 的 n 型 AlGaAs 材料中,对它的电学、光学特性及其能级本质有过深入的研究^[4,15,16,19],但迄今尚不完全清楚。除了 DX 能级本身的物理特性需要深入研究外,它对 n-AlGaAs 材料及相应器件(如短波长激光器,探测器及二维电子气器件)的影响自然也引起了重视。DX 中心是具有大晶格弛豫的外自陷能级,表现出强烈的 Stokes 移动和低温的持久光电导(很小的电子俘获截面所致);它的浓度与残余施主的相对关系随样品而变,但一般总满足 $N_{DX} \gg N_D$ 的条件。本实验所测能级的位置和特性均与 DX 中心相符,

2. 为了肯定上节对实验结果的处理,必须首先明确所测样品的等效电路为串联电路。Lang 等^[4]曾试图获得 n-AlGaAs:Te 中 DX 中心的导纳谱。他们采用 1MC 的频率,在 $T = 250K$ 附近寻找导纳值而未能发现,并解释为 ϕ_{FT} 太接近于零,以及(或者)讯号太宽和太弱。实际上,他们是根据 DLTS 结果估计 DX 中心在 250K 下的发射率 e_s 与测量频率 ω 接近而判断该处可能出现导纳峰值。但当 $\phi_{FT} \rightarrow 0$ 时,如果 DX

中心是绝对占优势的施主,那么体电阻已受到很大的影响,导纳谱应测量出热平衡深度而不是热发射深度,即 ω 应对应于 $(RC)^{-1}$ 值,这时,如采用 1MC 频率测量,如本文结果所证实的,导纳峰出现在约 100K 的低温区。从文献[4]给出的热激电容曲线看,在 $T > 100K$ 处已出现一个电容台阶,预计他们的样品再往 $T < 100K$ 的温度下观测,也会得到相应于热平衡深度的导纳峰。

Künzel 等^[12]在分子束外延掺 Si 的 n-AlGaAs 中,测得 DX 中心的导纳峰值出现在 $T \sim 250K$,但测量频率已低到 100Hz;给出的能级深度约为 0.41eV。这是唯一报道过 DX 中心导纳谱的文献。很明显,此处 DX 中心的发射性质与文献[4]及本文研究的情形有很大不同。如 Lang 等^[13]已经指出的,掺 Si 的 AlGaAs DX 中心的热发射深度比掺 T_e 的相应深度要大许多。Künzel 等所测的结果作为热发射深度看是合理的。该结果表明 DX 中心的导纳峰未必一定对应热平衡深度,实际上是取决于该能级是否可处理为“最浅能级”,在测量温度下,自由载流子浓度(或体电阻)是否受该能级控制。简言之,取决于 N_{DX} 与可能存在的浅施主浓度 N_D 的相对关系。文献[15]虽然也得到 N_{DX} 比 N_D 大许多的结果,但由于与 Si 有关的 DX 中心的深度太大,仍不足以使 DX 能级成为最浅能级。比较本文的图 5 和文献[15]的图 6 即可看出,本工作所测样品 $C_s(T)$ 关系在 $T < 100K$ 时一直下降,15K 时几乎为零;而文献[15]所用样品的 $C(T)$ 曲线在 $T < 100K$ 时平缓下降,直到 $T \sim 15K$ 时仍有大于 200pF 的电容值。还应指出,如(5)式所示,所测电容在低温下体电阻必须考虑时也并非真正的结电容值。从本文图 5 中零偏压下 G_s 、 C_s 和 ω 值可推算出相应的体电阻约为 7600Ω 、载流子浓度 $n \sim 10^{14}cm^{-3}$,确实是串联等效电路所模拟的情况。更进一步看, ω 值也和 $(RC)^{-1}$ 值符合得很好。而文献[15]的情况则不同,如以串联电路来分析,将得到在 250K 下,体电阻 $R \sim 3 \times 10^3\Omega$ 的不合理结果,也得不到 $\omega \sim (RC)^{-1}$ 的关系。相反,在考虑到浅能级存在的修正情况下^[13],实验数据与并联等效电路的分析基本相符。

3. 本文对 DX 中心所表现的双峰结构首次给予明确定量的说明。从 DLTS 和 DLAS 都可分辨出这两个峰,即

$$DXI \quad \Delta E_{cm} \approx 0.3 - 0.4eV, \quad \Delta E_{eq} \approx 0.10eV,$$

$$DXII \quad \Delta E_{cm} \approx 0.2eV, \quad \Delta E_{eq} \approx 0.036eV.$$

双能级的存在,可能是 DX 中心的 DLTS 谱形较宽以及 $n(T)$ 曲线得到的热离化激活能值比较分散的原因之一。由 ΔE_{cm} 和 ΔE_{eq} 的明显差别看出这两个能级都属于具有大晶格弛豫的外自陷情况。其弗兰克-康登移动 $d_{FC} = \Delta E_{op} - \Delta E_{eq}$ 都会表现得异乎寻常的大; DX 中心的光离化截面曲线也应当是两个能级共同作用的结果。在 DLTS 和 DLAS 谱中,也常只看到一个 DX 中心相应的峰;这可能是某一能级掩盖了另一个,或者两峰交叠混合为一的结果。两能级的起源尚待分析。

四、结 论

1. 从位形坐标考虑,热平衡深度 ΔE_{eq} 和热发射深度 ΔE_{cm} 都是描述深能级位置的重要参数,对于多声子跃迁型俘获,两者之差决定俘获深度 $\Delta E(\infty)$,即 $\Delta E_{cm} - \Delta E_{eq} =$

$\Delta E(\infty)$, DLTS 谱给出能级的 ΔE_{cm} 值; DLAS 谱在一般情况下, 也是通过发射率与温度的关系而给出能级的 ΔE_{cm} , 其结果按并联等效电路分析; 但能级应当做“最浅能级”处理时, DLAS 谱则通过时间常数 RC 与温度的关系而给出能级的 ΔE_{eq} , 其结果可由串联等效电路分析。

2. 本文第一次由导纳谱测量出 n-GaAlAs:Te 中 DX 中心的 ΔE_{eq} , 一方面支持 DX 中心的外交叉位形坐标图^[4], 另一方面说明 LPE 法生长的 n-AlGaAs:Te 中 DX 中心的浓度可能很大, 并且具有复杂的结构。

3. 本文同时第一次明确给定在 DX 中心测量中出现的两个可分辨能级的位置。

4. 发展了单频导纳测量技术。

作者对于周洁、阮圣央、陈克铭、高小平、谭飞等同志在实验工作中的热情帮助和有益的讨论深表谢意。

本工作为中国科学院基金资助项目。

参 考 文 献

- [1] D. L. Losee, *Appl. Phys. Lett.*, **21**, 54(1972).
- [2] D. L. Losee, *J. Appl. Phys.*, **46**, 2204(1975).
- [3] J. L. Pautrat, B. Katircioglu, N. Magnea, D. Bensahel, J. C. Pfister and L. Rovoil, *Solid State Electronics*, **23**, 1159(1980).
- [4] D. V. Lang, R. A. Logan and M. Jaros, *Phys. Rev.*, **B19**, 1015(1979).
- [5] D. V. Lang and R. A. Logan, *Inst. Phys. Conf.*, **43**, 433(1979).
- [6] D. V. Lang and R. A. Logan, *Phys. Rev. Lett.*, **39**, 635(1977).
- [7] J. Bourgoin and Lannoo, *Point Defects in Semiconductors II*. Springer-Verlag (1983).
- [8] R. H. Wu (吴荣汉) and A. R. Peaker *Solid State Electronics*, **25**, 643(1982).
- [9] M. Derdouri, L. Mahdjoubi and M. Benmalek, *Solid State Electronics*, **25**, 925 (1982).
- [10] A. K. Saxena, *J. Electronic Materials*, **11**, 453(1982).
- [11] 王家骅等, 半导体器件物理, 科学出版社(1983).
- [12] R. J. Nelson, *Appl. Phys. Lett.*, **31**, 351(1982).
- [13] A. J. Springthorpe, F. D. King and A. Becke, *J. Electronic Materials*, **4**, 101(1975).
- [14] J. J. Yang, L. A. Monday and W. I. Simpson, *Appl. Phys. Lett.*, **40**, 244(1982).
- [15] H. Künzel, A. Fischer, J. Knecht and K. Ploog, *Appl. Phys.*, **A32**, 69(1983).
- [16] O. Kumagai, H. Kawai, Y. Mori and K. Kaneko, *Appl. Phys. Lett.*, **45**, 1322(1984).
- [17] E. H. Rhoderick, *Metal-Semiconductor Contacts*, Oxford (1980).
- [18] G. Vincent, D. Bois and P. Pinard, *J. Appl. Phys.*, **46**, 5173(1975).
- [19] M. Mizuta, M. Tachikawa, H. Kukimoto and S. Minomura, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **24**, L143(1985).

Admittance Analysis of DX Centers in Te-Doped LPE n-Type AlGaAs Material

Ge Weikun and Wu Ronghan

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica)

Abstract

We have measured the DX centers in LPE n-type $\text{Al}_{0.3} \text{Ga}_{0.7} \text{As:Te}$ samples by both DLAS and DLTS techniques. Two energy levels which might be associated with DX center were resolved: ΔE_{cm} equals $\sim 0.35\text{eV}$ and $\sim 0.20\text{eV}$, ΔE_{eq} equals $\sim 0.10\text{eV}$ and $\sim 36\text{meV}$, respectively.