

硅 $n^+ - p$ 结中金深受主能级 DLTS 中的反常现象* **

傅春寅 鲁永令 曾树荣
(北京大学物理系,北京)

摘要 在研究硅 $n^+ - p$ 结中金深受主能级 E_A 的 DLTS 信号强度(峰高)与多子脉冲的关系中发现,当脉冲宽度宽于 $1\mu s$ 时,峰高反而随着脉冲宽度增加而单调下降。给出了典型的实验结果,并指出这是由于 E_A 同时具有多子及少子两种响应区的结果。

关键词 硅 $n^+ - p$ 结,金深受主能级, DLTS

一、引言

根据目前有关半导体中深能级统计理论,深能级在多子脉冲下 DLTS 的强度随着多子脉冲宽度而增强,最终趋向饱和,利用这一现象可进行该深能级的多子俘获截面的测量。按 D. V. Lang^[1] 对电子陷阱及空穴陷阱的定义,对于那些典型的电子陷阱及空穴陷阱(即明显偏离位于禁带中央的 E_i 者)情况确实如此,如硅 $n^+ - p$ 结中金的深施主 E_D , ($E_D - E_V = 0.35eV$)。但本文在研究硅 $n^+ - p$ 结中处于禁带中央附近的金深受主 E_A ($E_A - E_V = 0.58eV$) 的 DLTS 中,却观察到截然相反的现象。在本文实验条件下, E_A 在多子脉冲下的 DLTS 峰高随脉宽(从 $1\mu s$ 起)单调下降,一直到完全消失,甚至使峰从正峰(多子发射谱)变成负峰(少子发射谱)。

硅中金的深能级行为曾被广泛研究,但从实验上指出其信号强度与脉冲宽度之间的反常关系尚属首次。

二、实验现象

本文所用掺金硅 $n^+ - p$ 结的基本参数如下:浅受主杂质浓度 $N_A = 2.6 \times 10^{15} cm^{-3}$, 在实验条件下 (E_A 峰和 E_D 峰出现的温度,最低在 170K 以上)已全部电离。深中心的浓度 N_T 有, $\frac{N_T}{N_A} \approx 0.11$ 。图 1 给出了该 $n^+ - p$ 结 E_D 及 E_A 的典型的 DLTS 实验谱。其中在直流反向偏压 $-V_R = -0.2V$, 正向方脉冲 $V_P = 0.2V$ 下的结果表明, E_D 峰作为典型的空穴陷阱,其峰高随脉宽 t_P 单调上升,这正是一般理论的典型结果。相反, E_A 却

* 1987年7月30日收到,1988年3月17日修改定稿。

** 第三世界科学院研究基金(TWAS, RG, 86-11)资助课题。

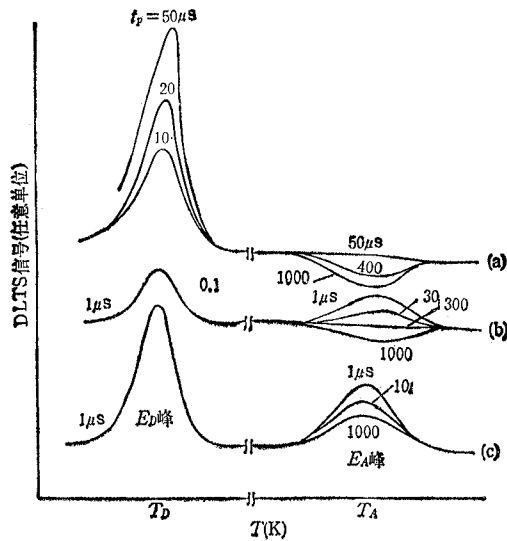


图 1 硅 $n^+ - p$ 结中金深能级 E_D 及 E_A 的 DLTS

(a) $-V_R = -0.2V$, $V_P = 0.2V$; (b) $-V_R = -1.0V$, $V_P = 1.0V$;
(c) $-V_R = -3.0V$, $V_P = 3.0V$

表现为少子(电子)发射峰(负峰), 其峰高随 t_p 单调增加. 这种在 $n^+ - p$ 结中 E_A 能级提供电子发射谱(在多子脉冲下)是首次报道. 当 $-V_R = -1.0V$, $V_P = 1.0V$ 时, 在 $1 - 300\mu s$ 的脉冲宽度内, E_A 峰为正峰, 峰高随着 t_p 单调下降. $t_p = 300\mu s$ 时, DLTS 峰消失. $t_p > 300\mu s$ 时 E_A 峰竟变成了负峰(少子发射峰). $-V_R = -3V$, $V_P = 3V$ 时, E_A 峰恒为正峰, 但峰高仍然随 t_p 单调下降.

三、 E_A 的响应区

图2给出了 $n^+ - p$ 结能带的示意图. 照单边 $p - n$ 结多子脉冲 DLTS 惯例, 在 $n^+ - p$ 结上加一反向直流偏压 $-V_R$, 并在其上叠加一正向方脉冲 V_P , 使 $V_P = V_R$. 于是脉冲期间, $n^+ - p$ 结处于零偏状态, 造成载流子对深能级的填充. 脉冲结束时刻提供了脉冲后深能级电容瞬态的初态. 深能级能否对脉冲做出响应, 则要看脉冲前后深能级被载流子占据状态是否改变. 而这种响应能否在实验上被观测到, 则与其响应区的位置及特点有关.

1. E_A 响应区的特点

由深能级统计理论, 当 $p - n$ 结处于反偏时, 其空间电荷区中, 处于电子及空穴准费米能级 $(E_F)_n$ 及 $(E_F)_p$ 之间区域内的深能级之上的电子浓度 n_T 及空穴浓度 p_T 有

$$n_T = \frac{e_p}{e_n + e_p} N_T, \quad p_T = \frac{e_n}{e_p + e_n} N_T$$

故有

$$\frac{n_T}{p_T} = \frac{e_p}{e_n} \quad (1)$$

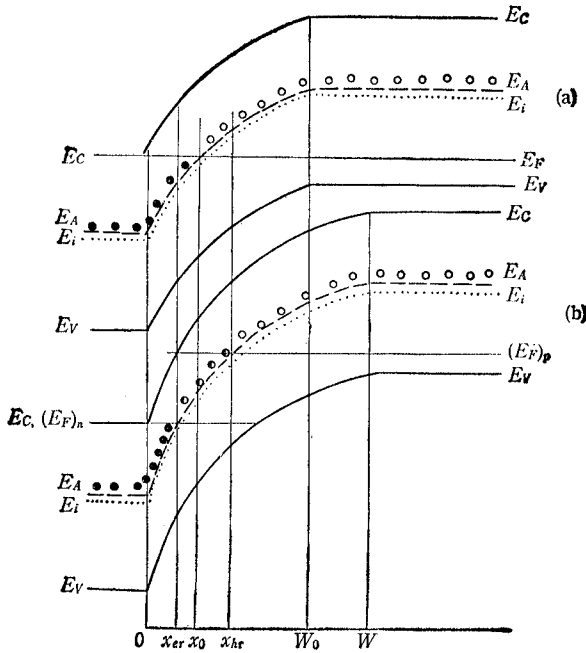


图 2 p⁺-p 结能带图, E_A 被载流子占据的状况。
(a) 脉冲期间,零偏; (b) 脉冲过后, (t → ∞)

其中 e_n, e_p 分别为电子及空穴的热发射率。对于单边结的空间电荷区中存在着多子响应区及少子响应区^[2], 对于 E_A 由于它处在禁带上半部分(虽然很接近 E_i)故可望有 $e_n \gg e_p$, 但由于 $\sigma_p \approx 10^2 \sigma_n$ ^[3], 这将使得 e_n 与 e_p 相比不能完全被忽视, 即 $n_T/p_T = e_p/e_n$ 虽然明显地小于 1, 但却不能视为 0, 也就是说, 脉冲过后, $t \rightarrow \infty$ 时, E_A 上(处在响应区内部分)虽然以空穴占据为主, 但同时又必须注意到其中被电子占据的部分不容忽视。由此可见, E_A 将与那些典型的空穴或电子陷阱的行为有所不同。若用 \circ 表示能级被空穴占据, 用 \bullet 表示能级被电子占据, 对于 E_A 的上述特点则可表示为 \ominus 。

用上述物理图象结合图 2 去分析 E_A 的响应区。脉冲期间, n^+ -p 结中 E_A 与费米能级 E_F 相交于 x_0 , $x \leq x_0$ 为电子占据, $x \geq x_0$ 为空穴占据。脉冲过后, 并 $t \rightarrow \infty$, E_A 与 $(E_F)_n$ 及 $(E_F)_p$ 分别相交于 x_{cr} 及 x_{hr} , 于是 x_{cr} 至 x_{hr} 处于两个准费米能级之间, 此间

表 1 n⁺-p 结中深能级 DLTS 举例

类	别	脉冲期间 $t = t_p$	脉冲过后 $t \rightarrow \infty$	电容瞬态过程	DLTS 极性
硅中金 E_A	电子响应区	●	⊙	绝大部分电子发射	V(负峰)
	空穴响应区	⊙	●	小部分空穴发射	Λ(正峰)
典型 陷阱	电子陷阱	●	⊙	少子发射	V(负峰)
	空穴陷阱	⊙	●	多子发射	Λ(正峰)

E_A 上虽然以空穴占据为主, 但其中电子占据部分不容忽视, 可表示为 \ominus , 见图 2(b). 把图 2(a) 与图 2(b) 对比, 就会发现, 在 $x_{cr}-x_0$ 内有从 \ominus 变到 \ominus , 即电子发射; 而在 x_0-x_{hr} 内, 则有从 \ominus 变到 \ominus , 即空穴发射, 故称 x_0-x_{hr} 为 E_A 的空穴(多子)响应区; 而 $x_{cr}-x_0$ 则称为 E_A 的电子(少子)响应区. 其中 x_{cr} 及 x_{hr} 为这两个响应区的边界, 由 $-V_R$ 决定. 把上述过程用表 1 给出.

其中 E_A 在 n^+p 结中有小量空穴发射(即空穴响应区的存在)是人们所熟悉的. 但同时还有一个电子响应区的存在(可做电子发射).

2. E_A 在 n^+p 结中的电容瞬态

由深能级统计理论, 在电子响应区 ($x_{cr}-x_0$) 内, 在多子脉冲期间以电子俘获为主. 而在脉冲过后, 由于自由载流子尾的明显地收缩, 该区出现以电子发射为主的情况, 此时 E_A 上的电子浓度有:

$$n_T(x, t) = \frac{N_T}{1 + (e_n/e_p)} + \frac{N_T}{1 + (e_p/e_n)} [1 - e^{-C_n n_0(x)t_p}] e^{-(e_n+e_p)t} \quad (2)$$

其中第二项给出了电子响应区的电子发射量, 由此而引起的 n^+p 结电容瞬态 $\Delta C_c(t)$ 为:

$$\frac{\Delta C_c(t)}{C_\infty} = \frac{N_T}{2N_A W^2} \cdot \frac{1}{1 + (e_p/e_n)} e^{-(e_n+e_p)t} \int_{x_{cr}}^{x_0} 2x [1 - e^{-C_n n_0(x)t_p}] dx \quad (3)$$

同理, 在 E_A 的空穴响应区内 (x_0-x_{hr}) 之内, 脉冲过后以空穴发射为主, 故该区内 E_A 上的空穴浓度 p_T 为:

$$p_T(x, t) = \frac{N_T}{1 + (e_p/e_n)} + \frac{N_T}{1 + (e_n/e_p)} [1 - e^{-C_p p_0(x)t_p}] e^{-(e_n+e_p)t} \quad (4)$$

其中第二项给出了 E_A 在空穴响应区内的空穴发射量, 由这部分空穴发射引起的 n^+p 结电容瞬态 $\Delta C_h(t)$ 为:

$$\frac{\Delta C_h(t)}{C_\infty} = -\frac{N_T}{2N_A W^2} \cdot \frac{1}{1 + (e_n/e_p)} e^{-(e_n+e_p)t} \int_{x_0}^{x_{hr}} 2x [1 - e^{-C_p p_0(x)t_p}] dx \quad (5)$$

其中 $n_0(x)$, $p_0(x)$; C_n , C_p 及 W 分别为脉冲期间自由电子尾及自由空穴尾浓度; 电子及空穴的俘获率, 脉冲过后 n^+p 结反向空间电荷区宽度.

总的电容瞬态 $\Delta C(t)$ 为:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta C(t)}{C_\infty} &= \frac{\Delta C_c(t) + \Delta C_h(t)}{C_\infty} = \frac{N_T}{2N_A W^2} \left\{ \frac{1}{1 + (e_p/e_n)} \int_{x_{cr}}^{x_0} 2x [1 - e^{-C_n n_0(x)t_p}] dx \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{1 + (e_n/e_p)} \int_{x_0}^{x_{hr}} 2x [1 - e^{-C_p p_0(x)t_p}] dx \right\} e^{-(e_n+e_p)t} \end{aligned} \quad (6)$$

由(6)式可以看出, E_A 的两个响应区所提供的载流子热发射信号极性相反, 但两者又具有同一时间常数 $(e_n + e_p)^{-1}$, 故两者互相重叠成为统一的 DLTs 信号, 由于两者都随着 t_p 增加而得到加强, 因此观察到的总的信号可能为正, 为负, 甚至为 0. 利用(6)式基本上可以解释实验上观察到的 E_A 的反常行为.

对于典型的电子陷阱(或空穴陷阱)有 $e_n \gg e_p$, 且 $e_p/e_n=0$ (或 $e_p \gg e_n, e_n/e_p=0$) 故使(6)式中只有第一项电子响应区起作用(或第二项, 空穴响应区起作用). 只有在 e_p/e_n 之比不能完全视为 0 时, (6)式中两项才会同时起作用. 此时(6)式更具有普遍性.

四、直流反向偏压及多子脉冲宽度

E_A (以及与 E_A 相类似的陷阱) 在多子脉冲下两个响应区中那个的响应占优势与外部控制条件 $-V_R$ 及脉冲宽度 t_P 有关。 t_P 决定着各区的俘获量及以后的发射量, 而 $-V_R$ 则决定着响应区的边界点。由图 2 有:

$$\begin{aligned} x_{hr} &= W - \Delta x_0 \\ x_{er} &= W - \Delta x_r \\ \Delta x_0 &= \sqrt{2} \left[\frac{E_T - E_V}{kT} - \ln \left(\frac{N_V}{N_A} \right) \right]^{1/2} L_D \\ \Delta x_r &= \sqrt{2} \left[\frac{E_T - E_V}{kT} - \ln \left(\frac{N_V}{N_A} \right) + \frac{qV_R}{kT} \right]^{1/2} L_D \end{aligned} \quad (7)$$

其中 E_T, N_V 及 L_D 分别为深能级, 出现 E_T 峰温度下的价带顶等效态密度及德拜长度。 V_R 增加, W 增加, 使 x_{hr} 点向右扩展, 有利于多子(空穴)响应区扩大, 但由于(6)式前面有 $[1 + (e_n/e_p)]^{-1} \ll 1$ 的因子存在, 而使其作用受到明显的抑制; 少子(电子)响应区虽然也可能扩大, 然而受到 0 点(n^+ 区)的限制, 不能有明显扩大, 但由于 $[1 + (e_p/e_n)]^{-1} \approx 1$ 因子的存在, 相比之下, 其信号还是增强了, 并使其在电容瞬态中不容忽视。从本文的实验结果看, V_R 增加有利于多子作用占优势, 但一直到 $-V_R = -3V$ 时, 少子仍然在明显起作用, 虽然不占优势。

利用(6)及(7)式对本文样管的 DLTS 做一个粗略, 虽然很粗略, 但可以给出定性的概念。(见表 2, 这里取 $e_p/e_n = 1/18^{[4,5]}$.)

表 2

$-V_R/V_P$ (V/V)	-0.2/0.2		-1/1		-3/3	
t_P (μs)	1	1000	1	1000	1	1000
电子响应区贡献	0.6×10^{-3}	6×10^{-1}	8×10^{-2}	4	> 1.6	7
空穴响应区贡献	-7×10^{-3}	-4×10^{-1}	-1.4	-2.3	-8	-8
DLTS 信号	~ 0	负峰	正峰	负峰	正峰	正峰

五、讨 论

硅中金的深能级的行为, 尤其是深受主 E_A 的行为, 曾有许多作者从不同角度进行过广泛的研究^[2,6-9]。但他们都是基于“一个深能级对应着一个响应区”这一基本观点。无论是考虑单边 p-n 结空间电荷区本身具有两个响应区^[2], 还是考虑自由载流子尾的作用^[6]都是如此。如硅中金的 E_D (深施主), 做为一个典型空穴陷阱, 它只有一个空穴响应区。在 n^+ -p 结中在多子脉冲下发射空穴; 在 p^+ -n 结中的少子响应区内^[2], 也只能发射空穴。对于 E_A , 虽然人们早已发现它既可发射电子, 又可发射空穴, 但一直认为在 n^+ -p 结中只能

发射空穴,在 p^+-n 结中只能发射电子,即只有一个响应区做出响应。而在考虑到 c_p/c_n 不为 0 的作用时,则认为是只表现为在 n^+-p 结中 E_A 发射空穴峰高的修正^[8]。本文则认为 c_p/c_n 的作用是由于存在另一个响应区。

许多杂质和缺陷都会在 E_i 附近引入深能级^[10],很有可能形成如硅中金的 E_A 那样类型的深能级。 E_i 附近的深能级往往成为半导体中最有效的复合中心,因而也是人们比较关注的。对于既能发射电子,又能发射空穴的这类陷阱,可根据其 DLTS 信号与 t_p 的关系,对两种载流子俘获率之比 C_p/C_n 做出推断,以弥补由于少子参数不易直接测量之不足。

深中心的浓度是深能级的一个重要参数。在比较或判别同一谱中若干个 DLTS 峰所对应的深能级是否为同一杂质或缺陷所形成时,比较它们的浓度是一个重要判据。而浓度则与 DLTS 峰高成正比,因此必须注意峰高与 t_p 的关系是否反常,以免造成差错。

六、结 论

在掺金硅 n^+-p 结的金深受主能级 E_A 的 DLTS 中,发现其峰高与多子脉冲宽度之间具有反常关系。在 $-V_R = -0.2V$ 时, E_A 峰恒为少子发射谱;在 $-V_R = -1V$ 时,峰从正变到负; $-V_R = -3V$ 时,恒为正峰,但却随着 t_p 增加而下降。这是由于处在 E_i 近的 E_A 存在着电子响应区及空穴响应区这两种极性相反响应区的结果。

预计了解硅中金深受主 E_A 的这一特点将有助于对类似深能级的研究。

参 考 文 献

- [1] D. V. Lang, *J. Appl. Phys.*, **45**(1974), 3023—3032.
- [2] 傅春寅等,物理学报,**34**(1985),1559—1566.
- [3] C. T. Sah, *Solid-State Electron.*, **13**(1970), 759—788.
- [4] C. T. Sah, et al., *Appl Phys. Lett.*, **15**(1969), 145—148.
- [5] H. E. Maes, C. T. Sah, *IEEE Trans on ED*, **ED-23**(1979), 1131—1143.
- [6] E. Meijer, et al., *Solid-State Communications*, **46**(1983), 255—258
- [7] S. D. Brotherton, et al., *J. Appl. Phys.*, **49**(1978), 667—671.
- [8] 秦国刚等,半导体学报,**2**(1981),169—181.
- [9] R. H. Wu, et al., *Solid-State Electron.*, **25**(1982), 643—649.
- [10] A. G. Milnes, *Deep Impurities in Semiconductors*, Wiley, New York, 1973.

THE ANOMALOUS PHENOMENA ON DLTS OF GOLD DEEP ACCEPTOR LEVEL IN Si n^+-p JUNCTION

Fu Chunyin Lu Yongling Zeng Shurong

(Department of Physics, Beijing University, Beijing)

Abstract The relationship between the majority carrier pulse width t_p and DLTS' intensity of gold acceptor E_A in Si n^+-p junction is studied. It is found that the DLTS' intensity decreases monotonously with the increasing pulse width when $t_p > 1 \mu s$. Some typical experimental results are given. The E_A has two response regions: the majority carrier response region and minority carrier one. Just the two response regions caused the anomalous phenomena.

Key words Si n^+-p junction; Gold deep acceptor level; DLTS