

# 正向小注入脉冲下多子陷阱响应和 两种载流子俘获率之比\* \*\*

傅春寅 鲁永令 曾树荣  
(北京大学物理系,北京)

**摘要** 正向小注入下分析了  $p^+-n$  结的多子陷阱响应。指出了其中的少子注入俘获效应。当  $p-n$  结反向偏压足够小,以致其响应区中尾区的作用不容忽视时,多子陷阱的少子注入俘获效应就在其 DLTS 中明显地表现出来。这种效应可用于在小注入条件下,测量多子陷阱两种载流子俘获率之比  $C_p/C_n$ 。

**关键词** 半导体物理;  $p-n$  结; DLTS

## 1. 引言

自从 D. V. Lang 提出利用单边  $p-n$  结电容的深能级瞬态谱 (DLTS)<sup>[1]</sup> 以来,研究半导体中深能级的工作有了更为深入的发展。深能级的参数凡与多子相关的都较易于直接测量得到,而与少子相关的一般不易于从实验直接得到。如多子陷阱的少子俘获截面,就是通过两种载流子俘获率之比加上多子截面参数推导出来的。

人们在测量  $C_p/C_n$  中,往往只着眼于电中性区的少子俘获<sup>[2]</sup>,而对自由载流子尾区(即边界区)则采取回避的作法。这样一般要采用大注入,而正向大注入下的  $p-n$  结空间电荷区已在弥散开来,电位函数难于解析表示,这给理论分析造成很大的不方便。其次大注入将造成严重的自由少子储存效应,干扰 DLDS 信号,引起较大误差。此外,在许多情况下,高阻样品实现大注入较困难。

本文则着眼于尾区,指出在小注入下,当电中性区的少子注入俘获效应尚不明显时,尾区却可能已发生了很明显的少子注入俘获效应。因此  $C_p/C_n$  这个量就可能在小注入下进行测量。为给出明确物理图象,本文从 DLTS 基本物理过程出发进行讨论。以掺 Au 的 Si  $p^+-n$  结中 Au 受主  $E_A$  为例加以说明。

## 2. 原理

图1为  $p^+-n$  结小注入脉冲能带图。在  $p^+-n$  结上加一直流反偏压  $-V_R$ , 再迭加一正向方脉冲电压  $V_P$ 。图中  $x_l$  及  $x_r$  为脉冲期间及过后深能级  $E_T$  与电子准费米能级  $(E_F)_n$  的交点。 $x_l-x_r$  的区域为响应区<sup>[3]</sup>。令  $V_f = V_P - V_R$ , 当  $V_f > 0$  时, SCR (空间电荷区)内的自由空穴  $p(x)$  及自由电子  $n(x)$  相互扩展,在响应区内同时被俘获,  $V_f$  取值越大越明显。当少子脉冲宽度  $t_p$  足够长时,  $E_T$  上多子俘获量  $n_T(x)$  有

\* 1988年2月23日收到,1989年3月15日修改定稿。

\*\* 第三世界科学院资助课题 (TWAs. RG. 86-11)。

$$n_T(x) = \frac{N_T}{1 + (C_p/C_n)J(x)} \tag{1}$$

式中  $N_T$ 、 $C_p$ 、 $C_n$  分别为  $E_T$  浓度、空穴及电子俘获率。  $J(x) \equiv p(x)/n(x)$ ， $(C_p/C_n)J(x)$  因子体现少子注入俘获效应，当  $V_f = 0$  时，此项消失。由图可见，一般响应区由尾区 ( $x_f - w_c$ ) 及电中性区 ( $w_c - x_r$ ) 构成。  $x_f$  及  $w_c$  由  $V_f$  决定，与  $-V_R$  无关。  $x_r$  则由  $-V_R$  决定，当  $V_R$  足够小时，有  $x_r \leq w_c$ ，这时响应区中电中性区部分消失。若  $n$  区浅施主浓度  $N_D$  为常数，且  $N_T \ll N_D$ ，则有

$$x_r = w - \left\{ 2 \left[ \frac{E_C - E_T}{KT} - \ln \frac{N_C}{N_D} \right] \right\}^{1/2} L_D \tag{2}$$

其中  $w$  为  $-V_R$  下 SCR 宽度。  $L_D$  为德拜长度， $N_C$  为导带底有效态密度。脉冲过后，多子(电子)发射，结电容瞬态  $\Delta C(t)$  为

$$\frac{\Delta C(t)}{C_\infty} = \frac{1}{2N_D w^2} \left[ \int_{x_f}^{w_c} 2x n_T dx + \int_{w_c}^{x_r} 2x n_T dx \right] e^{-e n t} \tag{3}$$

(B) (A)

当  $V_R$  足够小，使  $x_r \leq w_c$  时，(3) 式中 (A) 项消失，反之 (A) 项被加强，并造成对尾区

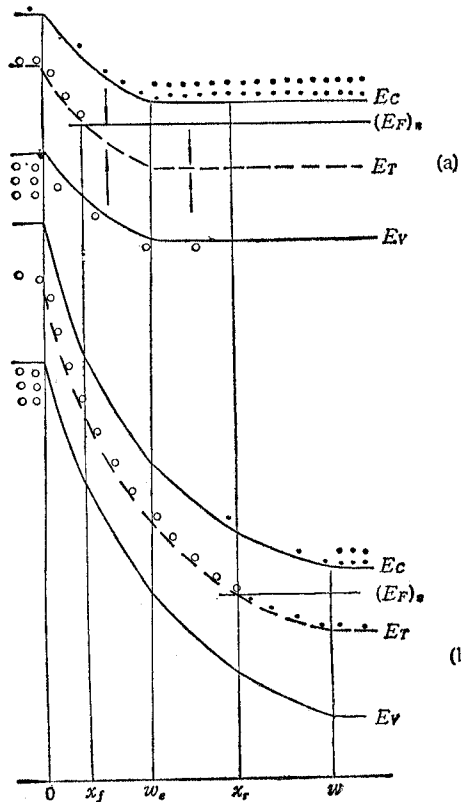


图1  $p^+-n$  结正向小注入脉冲能带图  
(a) 小注入脉冲下的自由载流子俘获  
(b) 脉冲过后， $t \rightarrow \infty$ ，多子发射光

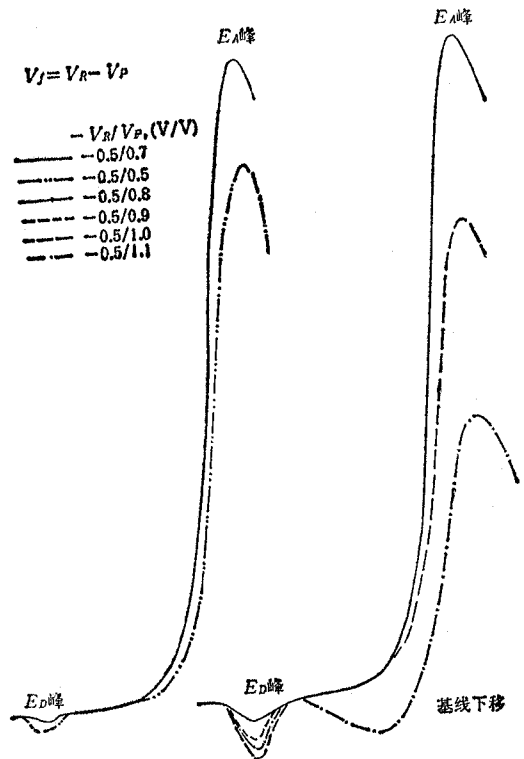


图2  $-V_R = 0.5V$ ， $p^+-n$  结中  $E_A$  和  $E_D$  峰与  $V_f$  的关系(横坐标为温度， $t_p = 1ms$ )

(B) 项的掩盖。

由(2)及(3)式  $n_T$  中的  $J(x)$  因子决定着少子注入效应,对于  $p^+-n$  结,近  $p^+$  区的自由少子  $p(x)$  浓度高,因此尾区有比电中性区更大的  $J(x)$  因子。当  $V_R$  足够小,(3)式中(B)项被明显突出时,其中的少子注入俘获效应就会在 DLTS 中表现出来。

令(3)式中  $t = 0$ , 两端乘以  $w^2$  并对  $w$  求微商有

$$\frac{d}{dw} \left[ w^2 \frac{\Delta C(0)}{C_\infty} \right] = \frac{n_T(x_r)x_r}{N_D} = \begin{cases} f_0 & V_f = 0 \\ f_1 & V_f > 0 \end{cases} \quad (4)$$

(4)式中  $f_0$  及  $f_1$  为实验曲线 " $w^2 \frac{\Delta C(0)}{C_\infty} - w$ " 各点斜率,可由实验结果得到,由(4)式有

$$1 + \frac{C_p}{C_n} J(x_r) = \frac{f_0}{f_1} [1 - e^{-C_n n_0(x_r)t_p}]^{-1} \quad (5)$$

$J(x_r)$  可从分析中得到。由(5)式可得到  $C_p/C_n$ 。

### 3. $p^+-n$ 结中 Au 受主 $E_A$ 的实验结果

图 2 给出了  $V_p$  从 0.5 V 到 1.1 V 的实验结果。

$E_A$  峰从  $V_f = 0$  起,先随  $V_f$  上升,  $V_f = 0.3V$  时为极大,与  $V_f = 0$  相比上升了约 22%。由表 2 可知  $V_f = 0.3V$  时,  $J(x)$  尚小,  $(C_p/C_n)J(x)$  不足以使  $n_T$  下降。相反  $V_f > 0$ , 却使  $x_f$  减小,扩大了响应区,并使同一  $x$  点上的多子浓度  $n(x)$  上升,多子俘获时常数  $\left[ C_n n(x) \left( 1 + \frac{C_p}{C_n} J(x) \right) \right]^{-1}$  明显减小,使俘获量  $n_T(x)$  上升,故有 DLTS 峰随  $V_f$  上升。这种情况随  $V_R$  取值越小越明显。

$V_f \geq 0.4V$ , DLTS 下降,  $V_f = 0.5V$ , 下降更明显,与  $V_f = 0.3V$  相比,下降 29%。由表 1 可看出,  $V_f \geq 0.3V$  至 0.5 V 内有基本相同的响应区,并且  $t_p = 1ms$  也足够长,故少子注入俘获效应开始表现出来,造成了  $V_f \geq 0.4V$  后的 DLTS 的下降。从中可以得到  $C_p/C_n$  的信息。

$p^+-n$  结非大注入的非耗尽分析<sup>[4]</sup>指出,该样管在  $V_f = 0.5V$  时仍为小注入。从  $E_D$  峰的实验结果得到证明。 $E_D$  是  $p^+-n$  结中典型少子陷阱。 $V_f = 0$  时已出现<sup>[3]</sup>,  $V_f > 0$  后随  $V_f$  单调上升直到  $V_f = 0.5V$ , 这是少子注入不断被加强的反映。但  $V_f = 0.6V$  时,  $E_D$  峰反而下降(在  $V_R < 0.5V$  时更突出)。这种现象正是自由少子大注入时储存效应的反应<sup>[2]</sup>。因此  $E_D$  峰下降可做为大注入的标志。 $E_A$  峰在  $V_f = 0.6V$  时继续下降,并在峰的低温一侧出现基线下移,使峰高无法确定。 $E_A$  峰的这种表现也是大注入的一个反映。

当  $-V_R$  从  $-0.3V$  到  $-1.0V$  变化,也出现上述现象。图 3 给出了  $(\Delta C_f(0)/\Delta C_0(0)-V_f)$  关系。其中  $\Delta C_f$  及  $\Delta C_0$  分别为  $V_f > 0$  及  $V_f = 0$  时的信号。由于  $V_f = 0.3V$  时,无少子注入且信号达到极大,所以选择这时结果来确定  $f_0$ , 而  $f_1$  则选用少子注入俘获效应最明显的  $V_f = 0.5V$  时的结果来确定。这个原则对其他样管也适用。

### 4. 自由少子注入比因子 $J(x)$

$p^+-n$  结非大注入下 SCR 依然存在。它由尖峰超强电场和少子强场区、自由多子耗

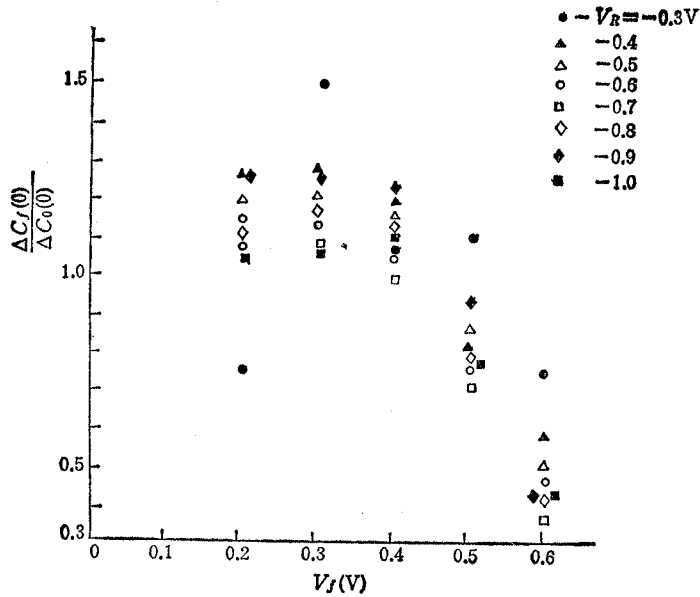


图3  $\Delta C_f(0)/\Delta C_0(0)-V_f$  关系 ( $V_f = 0.6V$  为大注入)

尽区和边界区三部分组成<sup>[4]</sup>。当  $V_f$  增大时，夹在中间的耗尽区收缩，强场区扩展，待到耗尽区消失，强场区与边界区相接时， $p^+-n$  结即进入大注入。理论分析本文样管在  $V_f = 0.6V$  进入大注入，它与实验结果一致。

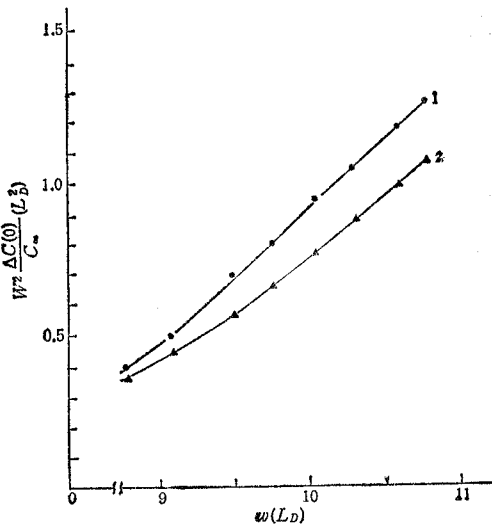


图4  $w^2 \frac{\Delta C(0)}{C_\infty} - w$  曲线 ( $-V_R$  取不同值  $V_P$  做同步改变)

为得到  $J(x_r)$ ，先对不同区域  $J(x)$  有所了解，然后由 (2) 式求得  $x_r$ ，看它在哪个区域内。下面  $J(x)$  加角标以示区分所在区域。由

$$n(x)p(x) = n_i^2 \cdot \exp(9V_f/KT)$$

这一基本关系，在耗尽区内有

$$J_1(x) = \left(\frac{n_i}{N_D}\right)^2 \exp\left[\frac{9V_f}{KT} + 2 + 2\left(\sqrt{u_p - 1} - \frac{x - x_p}{\sqrt{2}L_D}\right)^2\right]$$

在边界区内有

$$J_2(x) = \left(\frac{n_i}{N_D}\right)^2 \exp\left[\frac{9V_f}{KT} + 1.4 + 2\left(\frac{x_n - x}{1.17L_D}\right)^2\right]$$

在少子扩散区(即  $n$  型区的电中性区内)

$$J_3(x) = 2\left(\frac{n_i}{N_D}\right) \exp\left[\frac{9V_f}{KT} - \frac{x - x_n}{L_D}\right]$$

有

其中  $x_p$ 、 $x_n$ 、 $u_p$  为强场区与耗尽区交界点,有效 SCR 边界点及强场区以  $KT$  为单位的电子位能。

**5. Si 掺 Au 的  $p^+-n$  结中 Au 受主  $E_a$  的  $C_p/C_n$  测量**

本文样管基本参数  $N_D = 1-2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $E_C - E_T = 0.55 \text{ eV}$ . 测试条件: 电子发射时常数  $\tau_n = 3.91\text{ms}$ ,  $\tau_p = 1\text{ms}$ , 峰温  $T = 273 \text{ K}$ . 图 4 给出了  $V_f = 0.3 \text{ V}$  和  $V_f = 0.5\text{V}$  时,  $-V_R$  从  $-0.3\text{V}$  到  $-0.6\text{V}$  时的典型结果. 曲线 1 和 2 在  $-V_R = -0.3\text{V}$  时较接近,以后随  $V_R$  增加而分开,但在  $V_R$  取值范围内,都有  $\Delta C_2(0) < \Delta C_1(0)$ , 这表明在  $\Delta C_2(0)$  曲线的情况中有少子注入俘获效应的影响. 表 1 给出了样管非耗尽分析的基本结果. 其中  $w_c = w_D + x_p + \Delta x_n$ ,  $\Delta x_n = 1.48L_D$  为普通常数.

表 1

$V_f$ (V)	$u_p$ (KT)	$x_p(L_D)$	$w_D(L_D)$	$w_o(L_D)$	$x_f(L_D)$
0	27.06	0.57	5.61	7.65	2.45
0.3	14.31	0.97	3.55	5.82	<0.97
0.5	5.81	1.00	1.49	3.97	<1.00
0.6	1.56	1.83	—	<3.32	—

表 2

$V_R$ (V)		0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	
$x_r(L_D)$		3.64	3.96	4.33	4.59	4.89	5.16	5.45	5.55	
$V_f$	0.3V	$J(x_r)$	$1.4 \times 10^{-3}$	$4.5 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.7 \times 10^{-5}$	$1.4 \times 10^{-5}$	$6.5 \times 10^{-6}$	$3.6 \times 10^{-6}$	$2.7 \times 10^{-6}$
		SCR 区划	耗尽区			边界区				
	0.5V	$J(x_r)$	$3.2 \times 10^{-2}$	$1.2 \times 10^{-2}$	$2.2 \times 10^{-3}$					
		SCR 区划	边界区			电中性区				
$\frac{f_2}{f_1} (1 - e^{-C_n n_0^+ p})^{-1}$		4.80	2.30	1.3						
$C_p/C_n$		$1.19 \times 10^2$	$1.08 \times 10^2$	$1.18 \times 10^2$						

表 2 给出了  $V_f = 0.3\text{V}$  和  $V_f = 0.5\text{V}$  时的  $J(x_r)$ 、有关参数和最终结果。

由表 2 可看出,曲线 2 在  $V_R$  为  $0.3-0.5 \text{ V}$  时,  $x_r$  处在正向  $p^+-n$  结的 SCR 中,所以  $J(x_r)$  较大,使少子俘获效应明显. 当  $V_R > 0.6 \text{ V}$  后,  $x_r$  即处在电中性区,由于扩散长度较大 ( $\approx 67L_D$ ) 至使  $J(x_r)$  近于常数 ( $10^{-3}$  量级), 所以看不到少子效应. 这说明只有当  $V_R$  取值足够小时,才能突出尾区的少子注入俘获效应,并在 DLTS 中表现出来. 本文测得在 Si 掺 Au 的  $p^+-n$  结中 Au 受主  $E_a$  的  $C_p/C_n$  为  $1.1 \times 10^2$ , 与文献[5]一致。

## 6. 结论

分析了多子陷阱在正向小注入脉冲下的响应。指出 Si 掺 Au 的  $p^+-n$  结中 Au 受主  $E_A$  在正向小注入下 ( $-V_R$  从  $-0.3$ — $-1.0$ V;  $V_f$  从  $0$ — $0.6$ V) 的 DLTS 随  $V_f$  非单调变化, 它先是上升, 在  $V_f=0.3$  V 时, 达到极大值, 以后又下降, 这下降正是少子注入俘获效应造成的。  $p^+-n$  中多子陷阱响应区中的尾区部分少子注入俘获效应最明显, 因此处注入比  $p(x)/n(x)$  最大。当  $V_R$  足够小, 尾区响应不容忽视时, 在小注入条件下, 少子注入俘获效应就在 DLTS 中表现出来, 利用这种情况可以测量  $C_p/C_n$ 。

本室秦国刚同志参与了热情讨论, 并提出宝贵建议, 在此表示感谢。

## 参 考 文 献

- [1] D. V. Lang, *J. Appl. Phys.*, **45** (1974), 3023.
- [2] A. C. Wang, C. T. Sah, *J. Appl. Phys.*, **57** (1985), 4645.
- [3] 傅春寅, 鲁永令, 曾树荣, *物理学报*, **34** (1985), 1559.
- [4] 傅春寅, 鲁永令, 曾树荣, 吴恩, *半导体学报*, **8** (1987), 130.
- [5] C. T. Sah, *Solid-State Electron*, **13** (1970), 759.

# THE RESPONSE OF MAJORITY CARRIER TRAP UNDER THE FORWARD BIAS LOW-INJECTION PULSE AND THE RATIO OF THE CAPTURE CONSTANTS OF THE TWO KINDS OF CARRIERS

Fu Chunyin Lu Yongling Zeng Shurong

(Beijing University, Beijing)

**Abstract** The response of the majority carrier traps in the semiconductors  $p^+-n$  junction is analysed in detail under the low-injecting conditions. It points out that the effects of the majority carrier injecting and captured by the traps may happen if the forward bias voltage is larger enough but limited within the low-injection range. When the reverse bias voltage is smaller so that the response of the tail region is not neglected than of the whole response region, then the effect of the minority carriers injecting and captured will be observable in the DLTS. It can be used to measure the  $C_p/C_n$ .

**Key words** Semiconductor; p-n junction;