

# 用 RDLTS 方法研究 P 型硅中 Yb 的 空穴发射率与电场的关系

鲁永令 傅春寅 曾树荣

(北京大学物理系)

1984年6月15日

用 RDLTS 方法测量了 P 型硅中 Yb 的空穴热发射率与电场的关系, 结果表明当电场强度大于  $3 \times 10^4$  伏/厘米时发射率显著增大。此外, 同样方法测量了硅中 Au 的深施主能级的空穴发射率, 并与 Yb 的结果作了比较。

## 一、引言

Yb 和其它稀土元素一样, 在硅中的行为至今很少见诸报道。我们已经用几种不同方法将 Yb 掺入硅中, 对其在硅中的行为正不断深入和广泛进行研究<sup>[1]</sup>。最近我们用 RDLTS 方法测量了 P 型硅中 Yb 的空穴热发射率与电场的关系, 为了比较, 还对 P 型硅中 Au 的施主能级做了同样测量。

在研究热发射率与电场的关系时, 为了较好地接近真实情形, 应当在 P-N 结空间电荷区的局部区域进行, 本研究工作采用 RDLTS 方法, 实验设备与通常的 DLTS 方法<sup>[2]</sup>完全相同, 但叠加在反向直流偏压上的是反向脉冲, 电容瞬态信号由脉冲过后的俘获过程产生。

我们对 Li 等人提出的 RDLTS 方法<sup>[2]</sup>作了下述变更和简化: i) 原文中脉冲宽度  $t_p$  为毫秒量级 ( $t_p \sim \tau_e$ ,  $\tau_e$  是热发射时间常数), 本研究中  $t_p$  在微秒量级 ( $t_p \ll \tau_e$ ); ii) 分析电容瞬态时, 原文计及整个空间电荷区内深中心的俘获作用, 但物理分析和数值计算表明, 它主要来自深中心能级  $E_T$  与费米能级  $E_F$  的交点附近(原文也指出了这一点), 故本研究集中分析交点附近深中心处空穴浓度随时间的变化。基于上述考虑, 我们得到了电容瞬态的表达式。

## 二、原 理

考虑一个 N<sup>+</sup>P 结, 设 P 区浅杂质浓度为  $N_A$ , 深中心能级  $E_T$  的浓度为  $N_T$ 。在结上加反向直流偏压  $V_R$ , 能带图如图 1(a) 所示, 其中  $W_0$  为耗尽层宽度,

$$W_0 = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(V_b + V_R)}{qN_A}}. \quad (1)$$

$x_0$  为从  $N^+P$  界面算起的  $E_T$  与  $E_F$  交点的位置,

$$x_0 = W_0 - \sqrt{\frac{2 \left( E_T - E_V - KT \ln \frac{N_V}{N_A} \right) \epsilon_s \epsilon_0}{q^2 N_A}}. \quad (2)$$

在上面二式中,  $\epsilon_s \epsilon_0$  为硅的介电常数,  $V_b$  为内建势,  $N_V$  为价带顶态密度。由于空间电荷区势垒的作用, 价带中的空穴浓度随位置  $x$  有一分布, 近似为

$$p(x) = N_A e^{-(W_0-x)^2/2L_D^2}. \quad (3)$$

其中  $L_D = \sqrt{\epsilon_s \epsilon_0 K T / q^2 N_A}$  是德拜长度。 $x_0$  右侧区域内的深能级基本上全被空穴填充,  $x_0$  左侧区域内的深能级则基本上全空。当宽度为  $t_p$ 、高度为  $V_p$  的反向脉冲叠加在  $V_R$  上时, 能带图如图 1(b) 所示。脉冲期间空穴从深能级进一步发射。脉冲过后结上偏置回到  $V_R$ , 能带图如图 1(c) 所示。脉冲期间被腾空的能级这时要俘获空穴, 根据文献 [2] 中 (2) 式, 考虑  $x_0$  附近一个小区域  $\Delta x$ , 并利用  $t_p/\tau_c(\epsilon(x)) \ll 1$  的条件, 就能得到束缚在深能级上的空穴浓度的改变所引起的电容瞬态,

$$\frac{\Delta C(t)}{C(V_R)} \simeq t_p c_p(\epsilon(x_0)) \Delta \frac{x N_T x_0}{N_A W_0^2} e^{-t/\tau_c(x_0)}, \quad (4)$$

式中  $c_p(\epsilon) = [\tau_c(\epsilon)]^{-1}$ ,  $\tau_c(\epsilon)$  是深能级发射空穴的时间常数,  $\epsilon$  是电场强度, 它是位置  $x$  的函数;  $\tau_c(x)$  是深能级俘获空穴的时间常数。

对于一定样品的某一具体深能级, 以及一定的偏置条件, (4) 式中的  $N_A$ 、 $N_T$ 、 $W_0$ 、 $C(V_R)$  及  $t_p$ 、 $\tau_c(x_0)$  均为常数, 若选定率窗 ( $t_1$ ,  $t_2$ ), 则空穴热发射率  $c_p(\epsilon)$  与 RDLTS 峰高成正比,

$$c_p(\epsilon) \propto [\Delta C(t_1, \epsilon) - \Delta C(t_2, \epsilon)]_{\max}. \quad (5)$$

由此得到  $c_p(\epsilon)/c_p(\epsilon_0) \sim \epsilon$  曲线, 其中  $c_p(\epsilon_0)$  为低电场下的空穴热发射率。

### 三、实验结果与讨论

实验样品: 掺 Au 硅  $N^+P$  二极管用  $C-V$  法测得 P 区的浅杂质浓度  $N_A$  为  $2.6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , 掺 Yb 硅  $N^+P$  二极管的  $N_A$  为  $1.9 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。Yb 是以  $\text{Yb}_2\text{Cl}_3$  与  $\text{SiO}_2$  乳胶混合物涂敷在硅片上为源, 在  $1050^\circ\text{C}$  下经过 1 小时扩入的。用 RDLTS 和 DLTS 两种方法对上述样品测得的深能级相对价带顶的位置列于表 1。Yb 在 Si 中的能级位置与文献 [1]

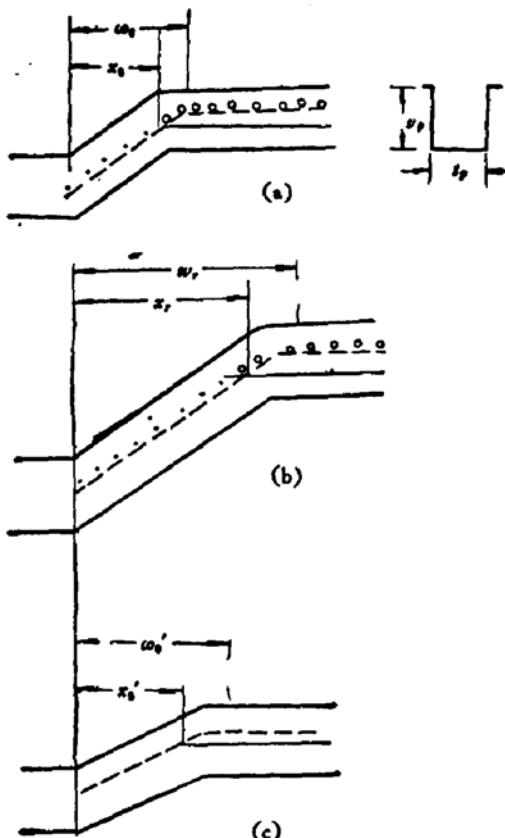


图 1  $N^+P$  结的能带图

(a) 稳态偏置的情形 (b) 脉冲期间的情形  
(c) 移去脉冲后的情形

表 1 P-Si 中 Au 和 Yb 的深能级位置  $E_T - E_V$ (单位 eV)

	Au	Yb	
		$E_1$	$E_2$
DLTS	0.36	0.37	0.48
RDLTS	0.36	0.36	0.47

一致。用 DLTS 方法测得 Au 的浓度  $N_T = 1.8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ , Yb 的浓度  $N_T = 1.2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ , 后者比文献[1]得到的浓度大, 可能是  $\text{Yb}_2\text{Cl}_3$  作源使 Yb 在 Si 中的电激活浓度大。

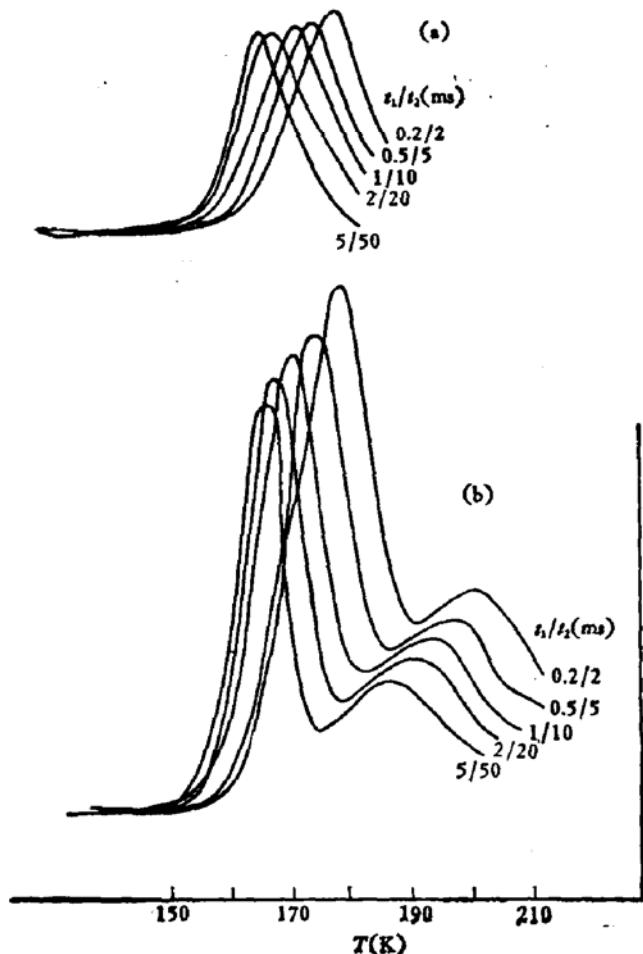


图 2 不同率窗下的 RDLTS

- (a) P-Si 中 Au 的施主能级的五个不同率窗  
 $t_p = 2.5 \mu\text{s}$ ,  $V_R = -1\text{V}$ ,  $V_p = -18\text{V}$   
(b) P-Si 中 Yb 的两个能级的五个不同率窗  
 $t_p = 2.5 \mu\text{s}$ ,  $V_R = -1\text{V}$ ,  $V_p = -16\text{V}$

贡献, 下面估计一下这种近似的正确程度。对本实验使用的样品及偏置  $V_R$ , 同时考虑到被研究的能级对象的 RDLTS 峰所在的温度区域, 取  $T = 180\text{K}$ , 这样  $W_0 \approx 1.08 \text{ 微米}$ ,  $L_D \approx 0.07 \text{ 微米}$ ,  $x_0$  (从  $\text{N}^+\text{P}$  界面算起)  $\approx 0.70 \text{ 微米}$ 。为了分析耗尽层中  $x > x_0$  的区域内深能级的作用 ( $x < x_0$  区域因深能级的占据状况在脉冲前后基本不变, 不具体讨论), 考虑  $x_0$  及另一点  $x' = x_0 + \frac{1}{2}L_D$  的情况。由(3)式估算出  $P(x_0) \approx 5.6 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ ,  $P(x') \approx 5.2 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ , 由  $\tau_c(x) = [p(x)\sigma_p(V_p)]^{-1}$ , 其中  $\sigma_p$  是深能级对空穴的俘获截

图 2 表示不同率窗下上述两种样品的 RDLTS, 测试条件已在图上注明。图 2(a) 对应掺 Au P-Si 中的深施主能级; 图 2(b) 对应掺 Yb P-Si 中的两个深能级。

为了求得发射率与电场的关系, 应当固定率窗  $\tau_d$  与脉冲宽度  $t_p$ , 改变脉冲高度  $V_p$ 。图 3 给出了对应不同  $V_p$ , 在峰温附近的 RDLTS, 图 3(a) 是对硅中 Au 施主能级的测量结果, 图 3(b) 对应掺 Yb P-Si 中的  $E_1$  能级。

图 4 是根据图 3 得到的热发射率与电场的关系。由图可见, 对 P-Si 中的 Yb 和 Au, 即使能级相当, 空穴热发射率与电场的关系也有着很大的不同, 对 Yb 的  $E_1$  能级, 电场强度  $\epsilon > 3 \times 10^4 \text{ 伏/厘米}$  时, 空穴热发射率随电场的增加显著增大; 而对 Au 的施主能级, 只是当  $\epsilon > 8 \times 10^4 \text{ 伏/厘米}$  时空穴热发射率才显著增大。

在分析电容瞬态时, 本文只考虑了  $E_T$  及  $E_F$  交点附近深能级对空穴的俘获作用, 忽略了耗尽区其余部分的

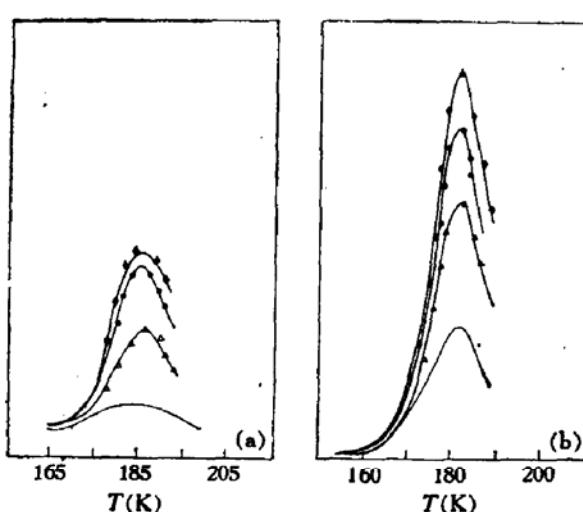


图3 不同脉冲高度  $V_p$  下的 RDLTS 峰高  
(a) P-Si 中 Au 的施主能级 ( $E_V + 0.36\text{eV}$ )  
 $t_1/t_2 = 1/10$ ,  $t_2 = 2\text{ms}$ ,  $t_3 = 2.5\mu\text{s}$   
 $V_p$ :  $\blacklozenge 18\text{V}$ ,  $\blacklozenge 15\text{V}$ ,  $\blacksquare 12\text{V}$ ,  $-10\text{V}$   
(b) P-Si 中 Yb 的  $E_1$  能级 ( $E_V + 0.37\text{eV}$ )  
 $t_1/t_2 = 1/10$ ,  $t_2 = 2\text{ms}$ ,  $t_3 = 2.5\mu\text{s}$   
 $V_p$ :  $\blacklozenge 16\text{V}$ ,  $\blacklozenge 14\text{V}$ ,  $\blacksquare 12\text{V}$ ,  $-10\text{V}$

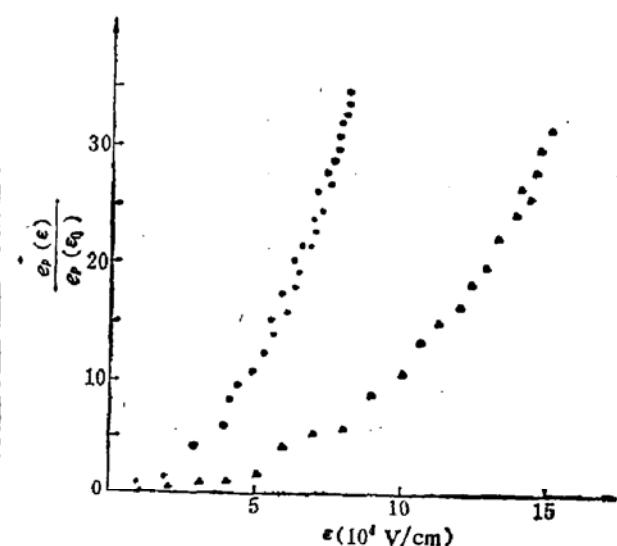


图4 180K 时  $\frac{e_p(\varepsilon)}{e_p(\varepsilon_0)}$  与  $\varepsilon$  的关系曲线  
▲ P-Si 中的 Au  
● Yb

面,  $\langle V_p \rangle$  是空穴的平均热运动速度, 可知, 就深能级对空穴的俘获时间常数而言, 离开  $x_0$  半个德拜长度就小了一个数量级, 因此俘获过程开始一段较短的时间以后, 电容瞬态的贡献只来自  $x_0$  附近半个德拜长度以内的深能级, 其余区域产生的瞬态信号已经衰减到可以忽略; 而在  $x_0$  附近  $\frac{1}{2}L_D$  的区域里电场强度仅变化十分之一, 由此测得的空穴热发射率与电场的关系是比较真实的。

本工作是在中国科学院科学基金资助下进行的, 本校化学系庄守端同志提供了 Yb 的氯化物源, 工作中得到了本教研室许多同志的支持和帮助, 在此一并致谢。

## 参 考 文 献

- [1] 傅春寅、鲁永令, 半导体学报, 5, 671 (1984).
- [2] G. P. Li and K. L. Wang, Solid-State Electronics, 26, 825 (1983).
- [3] D. V. Lang, J. Appl. Phys., 45, 3014 (1974).

## A Study on the Field Dependence of the Thermal Emission Rate in Yb-Doped P Type Silicon by RDLTS

Lu Yongling, Fu Chunyin and Zeng Shurong

(Department of Physics, Peking University)

### Abstract

The field dependence on the thermal emission rate of holes trapped at Yb center in P-Si has been measured by RDLTS. The results obtained show that the thermal emission is considerably enhanced when the strength is above  $3 \times 10^4 \text{ V/cm}$ . Similar measurements have been performed on gold center in silicon, and the results in both cases compared.