

# 用微波光电导谱仪测量 p-n 结 少子扩散长度<sup>†</sup>

褚幼令\* 王宗欣\*\* 吴天福\*\*

复旦大学 物理系\* 电子工程系\*\*, 上海 200433  
(1992 年 3 月 23 日收到; 1992 年 6 月 2 日收到修改稿)

用微波光电导谱仪测量了一些 pn 结样品的微波光电导谱(MPCS), 对于每一块样品光分别从 p 面和 n 面入射, 因而可以测得不同的谱; 讨论了从 pn 结的 MPCS 中计算 p 区、n 区少子扩散长度的方法, 并用计算机拟合得到这些样品的 p 区、n 区少子扩散长度和表面复合速度等参数; 由于是无接触测试, 因此本方法可作为某些 pn 结器件制造工艺过程中寻找最佳工艺条件的一种监测手段。

EEACC: 0590, 2560J, 7320E

## 一、引 言

在制作半导体器件的过程中, 材料中的少子寿命由于受各种工艺的影响而不断变化, 例如经过氧化、氮化或扩散等热处理过程后少子寿命会有很大变化, 又如在工艺过程中引入的有害杂质(它使 pn 结器件的漏电流增大), 会使材料的少子寿命下降。

少子寿命(或少子扩散长度)与器件的性能密切相关, 因为少子寿命与 pn 结器件的电特性(电流、电压容量)、频率特性有关, 例如在制造可控硅时, 为要提高基区的耐压, 常常需要增加基区的宽度, 但这又会使器件的正向压降增加, 因而使器件易发热变坏, 解决的办法是在增加基区宽度的同时提高注入到基区的少子寿命, 不过增加基区的少子寿命又会使器件的频率特性退化, 所以对可控硅器件而言, 它的基区的少子寿命应有一个最佳的范围。又如半导体太阳能电池的换能效率、半导体探测器的探测率以及发光二极管的发光效率都和它们的少子寿命有关。因此通过测量工艺过程中器件的少子寿命, 由此选择最佳工艺条件, 对于提高器件性能是一项很重要的工作, 文[1]报道了多年来他们在这一工作上得到了许多收获。

微波无接触测试工艺过程中材料的少子寿命变化是一种无损伤、非破坏性的测试方法, 尤其是测量 Si、GaAs 材料的微波光电导谱后<sup>[2]</sup>, 可以从中迅速算出它们的少子扩散长度等材料参数; 本工作利用自己研制的微波光电导谱仪无接触测试了 pn 结样品的微波光电导谱(MPCS), 然后用拟合法算得它们在 p 区和 n 区的少子扩散长度等参数, 其结果和用其它方法所测得的结果是较为一致的。

† 国家自然科学基金资助项目。

## 二、用 MPCS 确定 pn 结器件中的少子扩散长度

设 pn 突变结的 p 区和 n 区都是均匀掺杂,在耗尽区外的电场为 0.如图 1 所示,当有单色光自 n 区入射时,在 n 区和 p 区,光产生非平衡载流子的分布为  $\Delta Q_p(x), \Delta Q_n(x)$ <sup>[3]</sup>

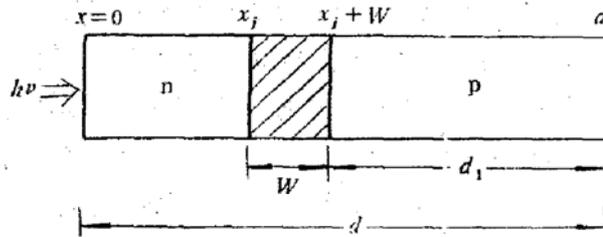


图 1 pn 结示意图

$$\Delta Q_p(x) = \frac{\alpha \tau_p A}{1 - \alpha^2 L_p^2} \left\{ e^{-\alpha x} \frac{\left( \frac{S_p L_p}{D_p} + \alpha L_p \right) \sinh\left(\frac{x_j - x}{L_p}\right) + e^{-\alpha x_j} \left[ \frac{S_p L_p}{D_p} \sinh\left(\frac{x}{L_p}\right) + \cosh\left(\frac{x}{L_p}\right) \right]}{\frac{S_p L_p}{D_p} \sinh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) + \cosh\left(\frac{x_j}{L_p}\right)} \right\}, \quad (1)$$

$$\Delta Q_n(x) = \frac{\alpha \tau_n A e^{-\alpha(x_j+W)}}{1 - \alpha^2 L_n^2} \left\{ e^{-\alpha(x-x_j-W)} - \cosh\left(\frac{x-x_j-W}{L_n}\right) + \frac{\frac{S_n L_n}{D_n} \left[ \cosh\left(\frac{d_1}{L_n}\right) - e^{-\alpha d_1} \right] + \sinh\left(\frac{d_1}{L_n}\right) + \alpha L_n e^{-\alpha d_1}}{\frac{S_n L_n}{D_n} \sinh\left(\frac{d_1}{L_n}\right) + \cosh\left(\frac{d_1}{L_n}\right)} \sinh\left(\frac{x-x_j-W}{L_n}\right) \right\}, \quad (2)$$

其中  $A = I_0 \eta (1 - r)$ ,  $I_0$  是入射光强,  $\eta$  是量子效率,  $r$  是样品表面对单色光的反射系数,  $\alpha$  是样品的光吸收系数,  $D_p, D_n$  是少子扩散系数,  $\tau_p, \tau_n$  是少子体寿命,  $\Delta Q_p(x), \Delta Q_n(x)$  是少数载流子浓度. 由于在适当的光波长范围内,  $\eta, r$  的数值随入射光波长的变化不大, 所以当光强  $I_0$  保持不变时,  $A$  可以当作一个常数. 在微波光电导谱仪中, 同时还有微波透过被测样品, 而由光照产生的非平衡载流子又会使透过 pn 结样品的微波传输系数变化  $\Delta T$ , 并且在小注入时,  $\Delta T$  正比于由光照产生的非平衡载流子总数  $\Delta Q_\Sigma$ <sup>[4]</sup>

$$\Delta Q_\Sigma = \Delta Q_{p\Sigma} + \Delta Q_{n\Sigma} = \int_0^{x_j} \Delta Q_p(x) dx + \int_{x_j+W}^d \Delta Q_n(x) dx, \quad (3)$$

$$\Delta T = B \Delta Q_\Sigma, \quad (4)$$

其中  $B$  为常数.

$$\Delta Q_{p\Sigma} = \frac{\alpha A L_p^2}{D_p (1 - \alpha^2 L_p^2)} \left\{ \frac{1 - e^{-\alpha x_j}}{\alpha} + \frac{L_p^2 \left[ 1 - \cosh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) \right] (S_p + \alpha D_p + S_p e^{-\alpha x_j}) - D_p L_p e^{-\alpha x_j} \sinh\left(\frac{x_j}{L_p}\right)}{S_p L_p \sinh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) - D_p \cosh\left(\frac{x_j}{L_p}\right)} \right\}, \quad (5)$$

$$\Delta Q_{ps} = \frac{\alpha AL_n^2}{D_n(1 - \alpha^2 L_n^2)} \left\{ \frac{1 - e^{-\alpha d_1}}{\alpha} - L_n \sinh\left(\frac{d_1}{L_n}\right) + \frac{S_n L_n^2 \left[ \cosh\left(\frac{d_1}{L_n}\right) - e^{-\alpha d_1} \right] + D_n L_n \sinh\left(\frac{d_1}{L_n}\right) + \alpha D_n L_n^2 e^{-\alpha d_1}}{S_n L_n \sinh\left(\frac{d_1}{L_n}\right) + D_n \cosh\left(\frac{d_1}{L_n}\right)} \left[ \cosh\left(\frac{d_1}{L_n}\right) - 1 \right] \right\} \quad (6)$$

(4)–(6)式表明, pn 结样品受单色光照时引起的微波传输系数的变化  $\Delta T$  与  $L_p$ 、 $L_n$  有关;保持光强不变、仅改变入射光的波长时,由于样品的光吸收系数随之变化,于是  $\Delta T$  也跟着变化.因此当光波长连续变化时,测量微波通过该样品的传输系数,就可得到它的 MPCs. 对于单层样品(p 或 n),MPCS 中的峰值位置与该样品的少数扩散长度有关<sup>[2]</sup>,对于由异质材料组成的双层样品,如 GaAs/GaSb 或 GaAs/Si,它们的 MPCs 中将有二个峰,如图 2 中二个峰分别对应于 GaAs、GaSb;当图 1 中我们讨论的是同质 pn 结时,则可以从它的 MPCs 中由拟合法算得它的 p 区和 n 区的少数扩散长度  $L_n$ 、 $L_p$  及表面复合速度  $S_p$ 、 $S_n$ ,并且由于光从 p 区入射时所得的 MPCs 不同于光从 n 区入射时所得的 MPCs,因此同时对这二个 MPCs 进行拟合,有利于得到较为准确的拟合结果,特别是当所取的光波长较短时(此时光的透入深度也较浅),每个 MPCs 中分别对  $L_p$ (或  $L_n$ )比较灵敏,这样有利于初值的选取和提高拟合的准确性.图 3 为  $L_n=140\mu\text{m}$ 、 $S=24600\text{cm/s}$ 、 $L_p$  分别为 (①230、②270、③310 及④350) $\mu\text{m}$  时  $\Delta T$  随入射光波长变化的理论值(光自 n 面入射).

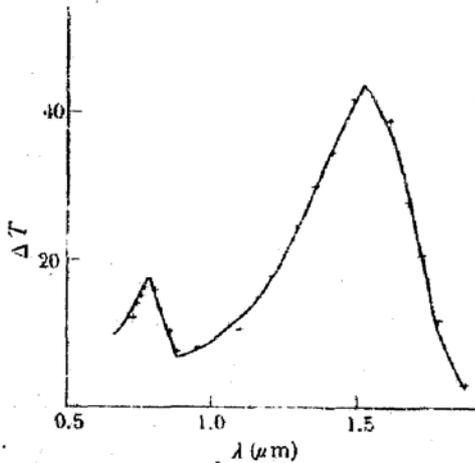


图 2 GaAs/GaAs 的 MPCs

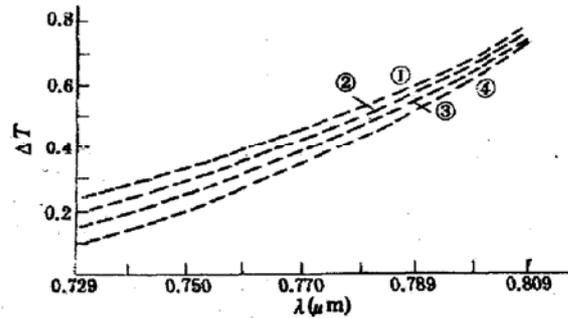


图 3 pn 结的 MPCs 理论计算值

当所取的光波长较短时,(5)、(6)式可以化简,例如若  $W=20\mu\text{m}$ 、 $d=510\mu\text{m}$ 、 $d_1=365\mu\text{m}$ 、 $x_j=125\mu\text{m}$  时,则 Si 而言在所取的光波长范围内  $\alpha^{-1}<10\mu\text{m}$ ,因此  $e^{-\alpha d_1}\ll 1$ 、 $e^{-\alpha x_j}\ll 1$ 、 $\alpha L_p>1$ ,于是

$$\Delta Q_{ps} = \frac{\alpha AL_p^2}{D_p(1 - \alpha^2 L_p^2)} \left[ \frac{1}{\alpha} - E(S_p + \alpha D_p) \right], \quad (7)$$

其中  $E$  与  $\alpha$  无关,

$$E = \frac{L_p^2 \left[ \cosh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) - 1 \right]}{S_p L_p \sinh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) + D_p \cosh\left(\frac{x_j}{L_p}\right)}, \quad (8)$$

$$\Delta Q_{n\Sigma} = \frac{\alpha AL_n^2 e^{-(x_j+w)\alpha}}{D_n(1-\alpha^2 L_n^2)} \left( \frac{1}{\alpha} - F \right), \quad (9)$$

$F$  也与  $\alpha$  无关,

$$F = L_n \sinh\left(\frac{d_1}{L_n}\right) - \frac{S_n L_n^2 \cosh\left(\frac{d_1}{L_n}\right) + D_n L_n \sinh\left(\frac{d_1}{L_n}\right)}{S_n L_n \sinh\left(\frac{d_1}{L_n}\right) + D_n \cosh\left(\frac{d_1}{L_n}\right)} \left[ \cosh\left(\frac{d_1}{L_n}\right) - 1 \right]. \quad (10)$$

由于(9)式中有  $e^{-\alpha(x_j+w)}$  项,所以此时  $\Delta Q_{n\Sigma} \ll \Delta Q_{p\Sigma}$ ,对于某二个光波长的  $\alpha_1, \alpha_2$  及其对应的

$$\Delta T_1, \Delta T_2, \text{ 我们可以得到 } \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} = \frac{\frac{\alpha_1}{1-\alpha_1^2 L_p^2} \left[ \frac{1}{\alpha_1} - E(S_p + \alpha_1 D_p) \right]}{\frac{\alpha_2}{1-\alpha_2^2 L_p^2} \left[ \frac{1}{\alpha_2} - E(S_p + \alpha_2 D_p) \right]}. \quad (11)$$

同样,若  $\alpha_2, \alpha_3$  对应于  $\Delta T_2, \Delta T_3$ , 我们还可以有

$$\frac{\Delta T_2}{\Delta T_3} = \frac{\frac{\alpha_2}{1-\alpha_2^2 L_p^2} \left[ \frac{1}{\alpha_2} - E(S_p + \alpha_2 D_p) \right]}{\frac{\alpha_3}{1-\alpha_3^2 L_p^2} \left[ \frac{1}{\alpha_3} - E(S_p + \alpha_3 D_p) \right]}. \quad (12)$$

若  $L_p \gg \alpha_1^{-1}, L_p \gg \alpha_2^{-1}$  及  $L_p \gg \alpha_3^{-1}$  ( $\alpha_1^{-1}, \alpha_2^{-1}, \alpha_3^{-1} < 10 \mu\text{m}$ ) 则

$$\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} = \frac{\frac{1}{\alpha_1^2} - \frac{ES_p}{\alpha_1} - ED_p}{\frac{1}{\alpha_2^2} - \frac{ES_p}{\alpha_2} - ED_p}, \quad (13)$$

$$\frac{\Delta T_2}{\Delta T_3} = \frac{\frac{1}{\alpha_2^2} - \frac{ES_p}{\alpha_2} - ED_p}{\frac{1}{\alpha_3^2} - \frac{ES_p}{\alpha_3} - ED_p}. \quad (14)$$

所以可以从测量得到的  $\Delta T_1, \Delta T_2, \Delta T_3$  由(13)、(14)式可以解得  $ES_p$  和  $ED_p$ , 然后代入(8)式,并由(8)式解得  $L_p$ . 进一步,我们可以用上述方法解得的  $L_p$ , 作为用拟合法从 MPCs 中解  $L_p, S_p$  的初值(此时  $\alpha^{-1} < 10 \mu\text{m}$  的光波长是其中的一部份), 这样可以得到更为准确的  $L_p, S_p$  值以及  $L_n, S_n$ .

### 三、实验及数据处理结果

测量半导体样品的微波光电导谱的实验装置见文[1], 用这个装置测试了一些由上海电子器材厂提供的可控硅器件的  $p^+n$  结样品, 其原始片为  $n$  型硅单晶(浓度为  $10^{15}/\text{cm}^3$ ), 经扩散工艺后  $p^+$  的浓度为  $10^{17}/\text{cm}^3$ , 结深约  $100 \mu\text{m}$  左右, 由于少子寿命对可控硅的电特性有重要影响, 因此是工艺过程中需要控制的关键参数. 测试时光分别从  $p^+, n$  面入射, 因而可得两个不同的微波光电导谱, 测试结果见表 1, 其中不同的“鼓轮读数”相应于单色仪上入射到样品的不同的光波长, 在这里当鼓轮读数范围为  $16.00-16.45 \text{mm}$  时, 光波长范围为  $0.83-0.73 \mu\text{m}$ , 相应的光在硅样品中的透入深度( $\alpha_i^{-1}$ )为  $14.75-6.45 \mu\text{m}$ ; 表 1 中的  $\Delta T$  表示测量得到的微波传输系数的变化, 即不同的光波长所对应的锁相放大器的

读数. 表 2 为这些样品的结构参数. 相应的数据处理结果见表 3, 由表中可见, No. 1、No. 2 样品在 p 区的少子扩散长度约为  $80\mu\text{m}$ ,  $\tau_n \approx 1.8\mu\text{s}$ , 在 n 区的少子扩散长度  $L_p \approx 120\mu\text{m}$ ,  $\tau_p \approx 11\mu\text{s}$ , 同样的样品由上海电子器件厂用反向恢复时间法测得  $\tau_n \approx 1\mu\text{s}$ ,  $\tau_p \approx 10\mu\text{s}$ , 可见用本方法测量及计算的结果与反向恢复时间法的结果是较为一致的. 图 4、图 5 是样品 3 的 MPCs 的测量值和拟合曲线.

表 1 实验测试结果

序号	光照面	测 试 结 果									
		F	16.00	16.05	16.10	16.15	16.20	16.25	16.30	16.35	16.40
1	p <sup>+</sup>	$\Delta T$	7.0	6.4	6.0	5.5	4.9	4.4	4.0	3.4	3.0
	n	$\Delta T$	8.55	7.05	6.0	4.95	4.05	3.0	2.4	1.65	1.2
2	p <sup>+</sup>	F	16.05	16.10	16.15	16.20	16.25	16.30	16.35	16.40	16.45
	n	$\Delta T$	4.0	3.45	3.1	2.8	2.5	2.3	2.1	1.95	1.8
3	p	F	15.85	15.90	15.95	16.00	16.05	16.10	16.15	16.20	16.25
	n	$\Delta T$	26.0	21.0	18.0	17.5	12.0	10.5	9.0	7.5	6.5
			37.5	32.0	27.5	25.0	22.0	20.5	20.0	19.0	18.0

F 为单色仪鼓轮读数;  $\Delta T$  为微波传输系数的变化值

表 2 样品结构参数

参数 序号	$d(\mu\text{m})$	$x_j(\mu\text{m})$	$W(\mu\text{m})$
1	365	125	10
2	435	125	10
3	400	90	10

表 3 计算机拟合结果

序号	光照面	$L_p(\mu\text{m})$	$\tau_p(\mu\text{s})$	$L_n(\mu\text{m})$	$\tau_n(\mu\text{s})$	$S(\text{cm/s})$
1	p <sup>+</sup>	120	11.5	72	1.5	$3.3 \times 10^4$
	n	116	10.9	79	1.8	$2.9 \times 10^4$
2	p <sup>+</sup>	115	10.6	79	1.8	$2.5 \times 10^4$
	n	122	12.0	80	1.8	$2.3 \times 10^4$
3	p	275	60.5	106	3.3	$1.9 \times 10^4$
	n	250	50.0	113	3.7	$1.6 \times 10^4$

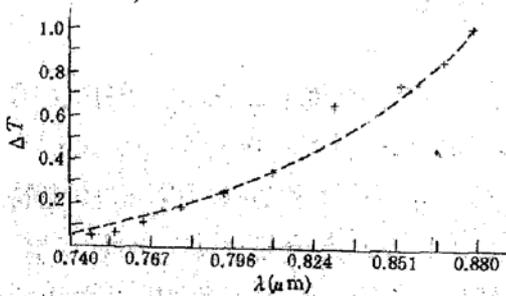


图 4 光从 n 面照射时 3# 样品的 MPCs 测量值和拟合值 (++++ 为测量值, ..... 为拟合值)

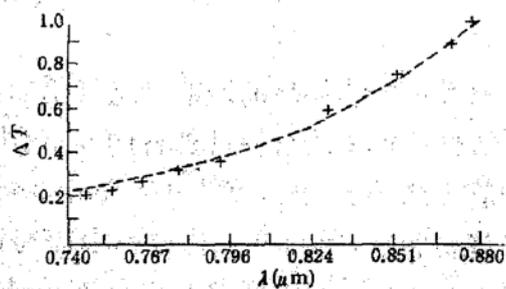


图 5 光从 p 面照射时 3# 样品的 MPCs 测量和拟合值 (++++ 为测量值, ..... 为拟合值)

## 四、结 论

用微波光电导谱仪可以无接触、非破坏性地测试 pn 结的 MPCs, 从这个 MPCs 中可以算得它的 p 区、n 区的少数载流子扩散长度及少数载流子寿命、表面复合速度等材料参数, 这是一种快速而又简便的测量方法, 其测试、计算结果与常规的反向恢复时间法相一致, 因此可用作 pn 结器件制造过程中选择最佳工艺条件的一种测试方法。

致谢: 冯星伟同学也曾参加过本文的一部份工作, 作者感谢上海电子器材厂费庭祥、袁淑珍两位工程师为本工作提供了测试样品及这些样品的反向恢复时间法测试结果。

## 参 考 文 献

- [1] E. Yatlonovitch and T. J. Gmitter, *Solid-State Electronics*, 35, 261 (1992).
- [2] 褚幼令、王宗欣、刘瑞林、左文德, *半导体学报*, 11, 751 (1990).
- [3] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, 802, New York, Wiley (1981).
- [4] 王宗欣、包宗明, *复旦大学学报(自然科学版)*, 21, 462 (1982).

## Measuring p-n Junction Minority Carrier Diffusion Length by Microwave Photoconductivity Spectrum Instrument

Chu Youling\* Wang Zongxir\*\* and Wu Tianfu\*\*

\*Physics Department and \*\*Electronic Engineering Department Fudan University, Shanghai 200433

(Received 23 March 1992; revised manuscript received 2 June 1992)

### Abstract

We have measured microwave photoconductivity spectrum (MPCS) of some silicon p-n junction samples by microwave photoconductivity spectrum instrument. These MPCs are quite different when the sample was illuminated by light from p-region or n-region separately. This paper presents a method of calculating the minority carrier diffusion length of the p-region and n-region from their MPCs. Meanwhile the parameters of these samples, such as surface recombination velocity etc., are given by nonlinear fitting method. Because it is a contactless measurement, we can use this method as a monitor in the process of manufacturing p-n junction devices.

EEACC: 0590, 2560J, 7320Z