

用微波光电导谱研究半导体薄片的 少子扩散长度和表面复合速度

褚幼令 王宗欣 刘瑞林* 左文德**

(复旦大学, 上海)

1989年10月30日收到

当半导体薄片同时受到微波和光照射时,通过样品的微波传输系数与光的波长有关,当光的波长连续地变化时,微波传输系数也连续地变化。本文分析了在半导体薄片中的少子扩散长度、少子寿命及表面复合速度与上述微波传输系数的变化 ΔT 之间的关系,并通过测量半导体薄片的微波光电导谱计算这些参数。研究表明,可以从微波光电导谱中的 ΔT 的峰值位置直接算出少子扩散长度。这是一种无接触、无损伤的快速测试方法,测试区域是直径为 3mm 的一个圆斑,样品可以在测试台上自由移动。本方法的测试结果与其它方法所得的结果是较为一致的。

主题词 微波,光电导谱,扩散长度,复合速度,无接触

一、引言

半导体薄片材料中的少子扩散长度、少子寿命及表面复合速度是表征半导体材料性能的一些重要参数,在器件制造过程中还可以通过测试这些参数作为器件工艺监控的一种手段。但常用的光电导法测量薄片少子寿命时,测量得到的少子表观寿命 τ_{eff} 与少子体寿命 τ_b 之间的差别是很大的。用表面光电压法测量少子扩散长度时^[1],要受一些条件约束^[2],否则便需用文^[3]的方法进行修正。

本文利用半导体薄片中的微波光电导谱同时测定少子扩散长度、表面复合速度及少子体寿命,这是一种无接触、无损伤的快速测试方法,样品不必经过任何处理,放在测试平台上后即可进行逐点测量,测试区域是一个直径为 3mm 的圆斑,测试数据输入微机后经过处理可以迅速得到所需的参数,其结果和其它方法是较为一致的。此外,由于微波光电导谱中的峰值位置只与样品中的少子扩散长度及样品厚度有关(当表面复合速度较大时),因此也可以从峰值位置利用本文提供的图表直接算得少子扩散长度。

* 八九届半导体专业本科毕业生。

** 八八届半导体专业本科毕业生。

二、工作原理

如图 1 所示,当一束单色光和微波同时照射在半导体薄片上时,在薄片的表面和内部

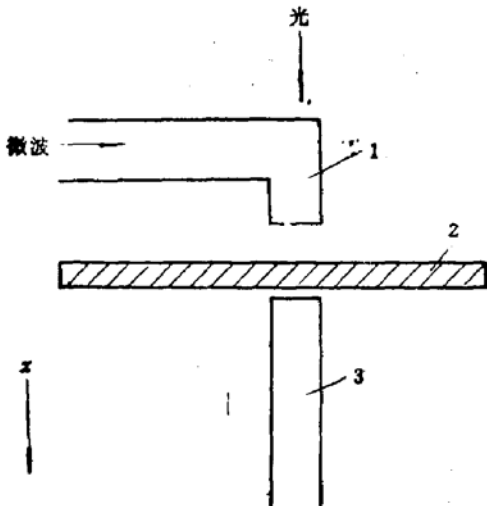


图 1 1——介质波导 2——半导体样品
3——介质波导

由于吸收了光子能量而产生本征激发,生成了大量的新的电子-空穴对,在达到动态平衡时,在样品内部沿 X 方向将会出现一个非平衡少数载流子的浓度分布 $\Delta p(x)$, 它和注入的单色光的波长、光的强度、硅片的表面复合速度以及少数载流子的扩散系数、扩散长度等参数有关,若保持入射光强不变,改变入射光的波长时,少数载流子的分布及少数载流子的总数也会发生变化,由于同时又有微波照射,因此可以通过测量微波传输系数的变化来反映少数载流子的变化;而从这个微波光电导谱中,可以同时计算出样品中的少子扩散长度 L_p (或 L_n)、表面复合速度 S 以及少子体寿命 τ_b 。

设样品是一个 n 型硅单晶薄片,则它的非平

衡少数载流子的一维稳态扩散方程可表示为

$$D_p \frac{d^2 \Delta p(x)}{dx^2} - \frac{\Delta p(x)}{\tau_b} = -\alpha \eta (1-r) I_0 e^{-\alpha x} \quad (1)$$

其中 $\Delta p(x)$ 为非平衡少数载流子的分布函数, I_0 是入射光强, η 是量子效率, r 是硅的光反射系数, D_p 是少数载流子的扩散系数, α 是相应波长的单色光在硅中的吸收系数, τ_b 是少数载流子的体寿命。

若薄片的表面复合速度为 S ,则当扩散长度 L_p 与薄片厚度 W 可以比拟时,边界条件可写为

$$\begin{aligned} D_p \left. \frac{d\Delta p(x)}{dx} \right|_{x=0} &= S \Delta p(0) \\ D_p \left. \frac{d\Delta p(x)}{dx} \right|_{x=W} &= -S \Delta p(W) \end{aligned} \quad (2)$$

于是微分方程(1)的解可以写为

$$\Delta p(x) = C_1 e^{\frac{x}{L_p}} + C_2 e^{-\frac{x}{L_p}} - \frac{\alpha A}{D_p \alpha^2 - \frac{1}{\tau_b}} e^{-\alpha x} \quad (3)$$

由于在适当的波长范围内, $\eta \cdot (1-r)$ 与波长无关,当光强 I_0 不变时, $A = \eta I_0 (1-r)$ 可以认为是一个常数。(3)式代入(2)式,即可得常数 C_1 和 C_2 。

$$C_1 = \frac{\alpha \tau_b A}{1 - \alpha^2 L_p^2} \left[\frac{(\alpha D_p - S) \left(\frac{D_p}{L_p} - S \right) e^{-\alpha W} - (S + \alpha D_p) \left(\frac{D_p}{L_p} + S \right) e^{\frac{W}{L_p}}}{\left(\frac{D_p}{L_p} + S \right)^2 e^{\frac{W}{L_p}} - \left(\frac{D_p}{L_p} - S \right)^2 e^{-\frac{W}{L_p}}} \right]$$

$$\left[\frac{\frac{D_p}{L_p} + S}{\frac{D_p}{L_p} - S} + \frac{S + \alpha D_p}{\frac{D_p}{L_p} - S} \right] \quad (4)$$

$$C_2 = \frac{\alpha \tau_b A}{1 - \alpha^2 L_p^2} \cdot \frac{(\alpha D_p - S) \left(\frac{D_p}{L_p} - S \right) e^{-\alpha y} - (S + \alpha D_p) \left(\frac{D_p}{L_p} + S \right) e^{-\frac{y}{L_p}}}{\left(\frac{D_p}{L_p} + S \right)^2 e^{-\frac{y}{L_p}} - \left(\frac{D_p}{L_p} - S \right)^2 e^{-\frac{y}{L_p}}} \quad (5)$$

当样品较厚时(相对于扩散长度而言),即 $e^{-\frac{y}{L_p}} \ll 1$; 并且在长波长时, $e^{-\alpha y} \ll 1$, 则(4)、(5)式可写为

$$C_2 = - \frac{\alpha \tau_b A}{1 - \alpha^2 L_p^2} \cdot \frac{S + \alpha D_p}{\frac{D_p}{L_p} + S} \quad (6)$$

$$C_1 = 0 \quad (7)$$

于是(3)式可以写为

$$\Delta p(x) = \frac{\alpha A \tau_b}{1 - \alpha^2 L_p^2} e^{-\alpha x} - \frac{\alpha A \tau_b}{1 - \alpha^2 L_p^2} \frac{S + \alpha D_p}{\frac{D_p}{L_p} + S} e^{-\frac{x}{L_p}} \quad (8)$$

此即文^[4]中一维稳态扩散方程的解。

由于光照时产生的非平衡少数载流子会引起透过样品的微波传输系数的变化, 可以证明^[5]此时传输系数的变化 ΔT 正比于由于光照所产生的非平衡少数载流子的总数 ΔP_z , 即

$$\begin{aligned} \Delta T \propto \Delta P_z &= \int_0^w \Delta p(x) dx \\ \Delta P_z &= \int_0^w \left(C_1 e^{\frac{x}{L_p}} + C_2 e^{-\frac{x}{L_p}} + \frac{\alpha A \tau_b}{1 - \alpha^2 L_p^2} e^{-\alpha x} \right) dx \\ &= C_1 L_p (e^{\frac{w}{L_p}} - 1) - C_2 L_p (e^{-\frac{w}{L_p}} - 1) - \frac{A \tau_b}{1 - \alpha^2 L_p^2} (e^{-\alpha w} - 1) \end{aligned} \quad (9)$$

于是

$$\Delta T = B \left[C_1' L_p (e^{\frac{w}{L_p}} - 1) - C_2' L_p (e^{-\frac{w}{L_p}} - 1) - \frac{\tau_b}{1 - \alpha^2 L_p^2} (e^{-\alpha w} - 1) \right] \quad (10)$$

其中 $C_1' = \frac{C_1}{A}$, $C_2' = \frac{C_2}{A}$; B 是与光波长无关的常数。由于 α 与光波长有关, 所以(10)式可以写成

$$\Delta T_i = f(\lambda_i, L_p, S, \tau_b) \quad (11)$$

所以当连续地改变入射光波长时, 可以从测量得到的微波传输系数的变化 ΔT_i , 算得 L_p , S 和 τ_b 。

作为近似, 在(5)式的分母中可以有

$$\left(\frac{D_p}{L_p} + S\right)^2 e^{\frac{W}{L_p}} \gg \left(\frac{D_p}{L_p} - S\right)^2 e^{-\frac{W}{L_p}}$$

并且当所取的光波长在较长波长范围时, $e^{-\alpha w} \ll 1$, 所以此时可以将(6)、(7)两式代入到(10)式中, 于是 ΔT 近似为

$$\begin{aligned} \Delta T \approx & B \left[\frac{\alpha \tau_b L_p}{1 - \alpha^2 L_p^2} \frac{\alpha D_p + S}{\frac{D_p}{L_p} + S} (e^{-\frac{W}{L_p}} - 1) + \frac{\tau_b}{1 - \alpha^2 L_p^2} \right] \\ & - B \tau_b \left[\frac{1 - \alpha(\alpha D_p + S)u}{1 - \alpha^2 L_p^2} \right] \end{aligned} \quad (12)$$

其中

$$u = \frac{L_p (1 - e^{-\frac{W}{L_p}})}{\frac{D_p}{L_p} + S} \quad (13)$$

由(12)式可知, 对应于 α , ΔT 存在一个极值, 由 $\frac{\partial \Delta T}{\partial \alpha} = 0$, 可解得 ΔT 为极大值时的 α 值, 如下式所示

$$\alpha = \frac{(L_p^2 - D_p u) + \sqrt{(L_p^2 - D_p u)^2 - L_p^2 S^2 u^2}}{L_p^2 S u} \quad (14)$$

由于 α 与入射光波长有单值关系, 因此可以从(14)式算得 α , 并由此得知当 ΔT 取极值时所对应的人射光波长。由于 $D_p \cdot u \ll L_p^2$, 当满足 $L_p \cdot S \gg D_p$ 时, (14)式可化简为

$$\alpha = \frac{1 + \sqrt{2e^{-\frac{W}{L_p}} - e^{-\frac{W}{L_p}}}}{L_p (1 - e^{-\frac{W}{L_p}})} \quad (15)$$

由(15)式可知, 此时 ΔT 取极值时所对应的 α 值(亦即 ΔT 取极值时所对应的光波长), 完全是由样品中的少数扩散长度及样品的厚度决定的。对于 p 型样品, 同样有 $D_n \cdot u \ll L_p^2$, 则只要满足 $L_n S \gg D_n$, 将 L_p 改为 L_n , 仍可使用(15)式。

图2是当 $\tau_b = 200 \mu s$, $W = 600 \mu m$ 时, 对应于不同的表面复合速度 S , 由(10)式算得 ΔT 随入射光波长变化而改变(保持光强不变)的一组曲线, 其中 S 自 1000 cm/s 变化到 5000 cm/s , 由图中可见, 在各种表面复合速度时, ΔT 都是在 $1.02 \mu m$ 附近达到了最大值; 如用 $\tau_b = 200 \mu s$, $D_p = 12.5 \text{ cm}^2/\text{s}$, $W = 600 \mu m$ 代入到(15)式中, 得 $\alpha = 49.0 \text{ cm}^{-1}$, 由 α 与 λ 的对应关系^[6]

$$\alpha = (0.526367 - 1.14425\lambda^{-1} + 0.585368\lambda^{-2} + 0.039958\lambda^{-3}) \mu m^{-1} \quad (16)$$

可知, $\alpha = 49.0 \text{ cm}^{-1}$ 时对应的 λ 正在 $1.02 \mu m$ 附近。

为便于应用, 对于给定样品厚度 w 、各种不同的扩散长度 L_p (或 L_n), 利用(15)及(16)式算得对应的 ΔT 取极值时的人射光波长 λ , 如图3所示; 在实验时, 只要连续地改变入射光波长(保持光强不变), 由测得的 ΔT 变化, 得到 ΔT 为极大值时所对应的光波长, 然后由图3直接可查得此样品中的少数扩散长度。

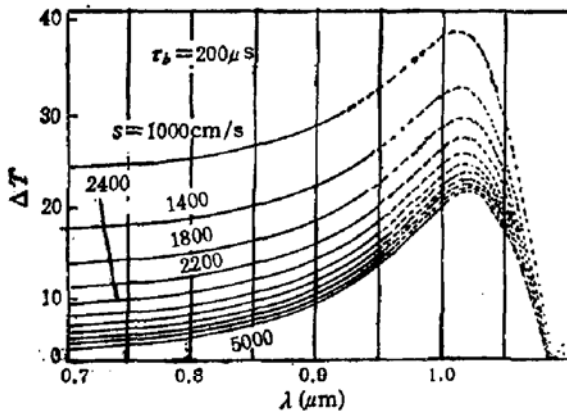


图2 $W = 600\mu\text{m}$ 时,微波传输系数的变化 ΔT 与入射光波长 $\lambda(\mu\text{m})$ 之间的关系

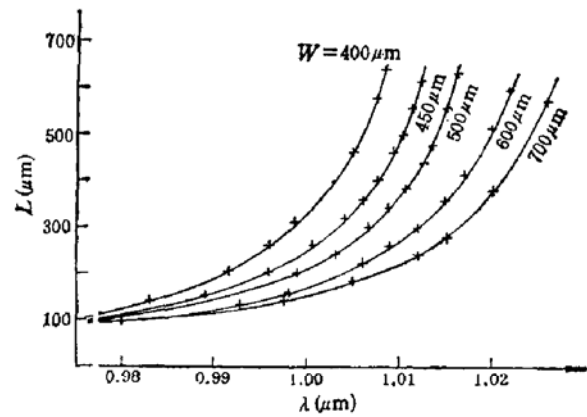


图3 由 ΔT 的峰值位置决定少子扩散长度

三、实验装置

整个实验装置由光路、微波及信号检测三部份组成,光路部份由光源、光斩波器、透镜及单色仪等光学元件组成,微波部份由微波振荡器、隔离器、可变衰减器、定向耦合器、介质波导及检波器等组成,信号检测部份则由高灵敏度低噪声锁相放大器、X-Y 记录仪等组成。光源的功率可以调节,以保证从单色仪入射到样品上的光在各种波长时保持光强不变;微波源的工作频率及输出功率在整个测试过程中应保持稳定,因此用定向耦合器输出接了一个功率监视装置。图 4 是实验装置的工作框图,光与微波同时通过介质波导加到被测样品上,其中各种波长的光功率已

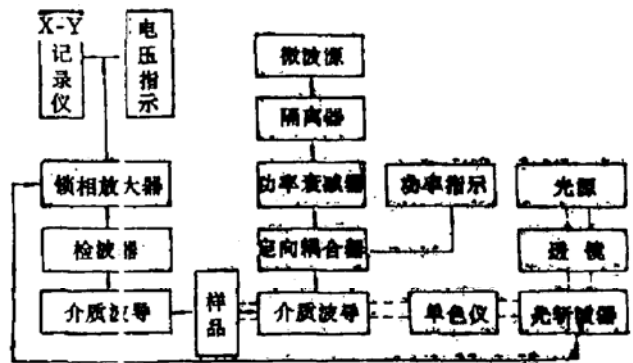


图4 实验装置框图

事先进行定标,微波经过样品后由另一介质波导接收(见图 1),再通过微波检波器输出,为提高测试的灵敏度,光信号是经由斩波器调制的,所以微波检波器输出的也是一个与斩波器频率相同的方波,方波的幅度正比于光注入在薄片上所产生的少数载流子总数,它经过高灵敏度、低噪声的锁相放大器放大后由放大器上的表头显示读数,并可同时送 X-Y 记录仪记录。

实验中测试区域为一个直径是 3mm 的圆斑,样品放在测试台上后不与介质波导接触,并可以自由在测试台上移动,以利于逐点测试比较。

四、实验结果及数据处理

由(16)式的计算表明,在红外区域 ΔT 随光波长的变化比较灵敏,但当 $\lambda > 1.03 \mu\text{m}$ 后, ΔT 又迅速下降,对于硅片,用本方法测试时,选择光波长范围为 $0.89\mu\text{m} - 1.03$

μm 比较合适。

实验测量了两种 n 型硅片,厚度分别为 $507\mu\text{m}$ 和 $623\mu\text{m}$,它们从不同的硅锭上切下来后,经过相同的表面处理;每片硅片测试十组 $\lambda_i \sim \Delta T_i$ 数据,由于单色仪已事先定标好,光源的波长与光强的关系也经过定标,所以在测量时只要控制光源功率以保证各种波长时有相同的光强,然后直接从锁相放大器的输出表头(或数字电压表)上读出 ΔT_i 值,同时也可以利用 X-Y 记录仪进行读数,如果 λ_i 是选定的十点,则光源功率也只要调在相应的固定值上就可以了,所以整个测量过程是极快的。

图5、图6分别是上述两块样品的测量和拟合结果,由图中可见, ΔT_i 随 λ_i 的分布基本上与按(10)式计算的图2相似,由图中的 ΔT 的极大值对应的 λ ,可利用(15)式或图3直接算得样品中的少数扩散长度 L_p 。如不满足条件 $L_p \cdot S \gg D_p$,则可以对十组 $\Delta T_i \sim \lambda_i$ 利用(10)、(16)式进行数据处理,为此编制了相应的阻尼最小二乘法 and 复合形法的非线性拟合程序,并可用由(15)式算得的结果(或用图3)作为初值,通过微机直接解出 L_p, S 和 τ_b ,如表1所示。从图5、图6中可看出,拟合曲线和测量值的偏差是很小的。因此,实际的数据处理过程中,可以先利用图3由 ΔT 峰值对应的 λ 查出样品中的少数扩散长度,这是一个近似值,其准确程度与样品的表面复合速度 S 有关, S 愈大愈准确,而准确的 L_p (或 L_n) 值则应由拟合程序得到。如表1中 1# 样品,由图5峰值对应的 $\lambda = 1.01\mu\text{m}$,由于 $W = 507\mu\text{m}$,所以由图3得 $L_p = 370\mu\text{m}$;但拟合结果为 $L_p = 314\mu\text{m}$,这是由于拟合得到的 $S \cdot L_p = 45.7\text{cm}^2/\text{s}$,不满足 $S \cdot L_p \gg D_p$ 的条件,所以由图3得到的 L_p 是近似值,以拟合结果为准,但作为初步结果,式(15)或图3还是可以利用的。又如 2# 样品,由图6得到 ΔT 峰值对应的 $\lambda = 1.02\mu\text{m}$,由于 $W = 623\mu\text{m}$,所以从图3查得 $L_p \approx 500\mu\text{m}$,而拟合结果为 $L_p = 485\mu\text{m}$,两者比较接近,这是由于拟合结果中 $S \cdot L_p = 80\text{cm}^2/\text{s}$,较 1# 样品满足 $L_p \cdot S \gg D_p$ 的条件的缘故。

为验证上述计算及测量结果,可与常用的光电导法进行比较。文^[7]中表明,用光电导法测得的半导体薄片材料的少数表观寿命 τ_{eff} 和少数体寿命 τ_b 的关系如下:

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_b} + K_i D \quad (17)$$

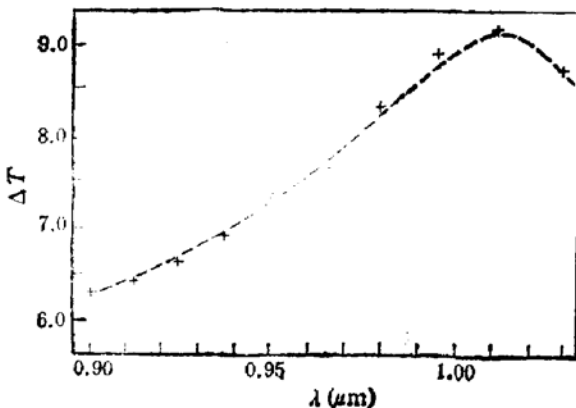


图5 1# 样品的测量值和计算机拟合曲线
+ 为测量值, ... 为拟合曲线

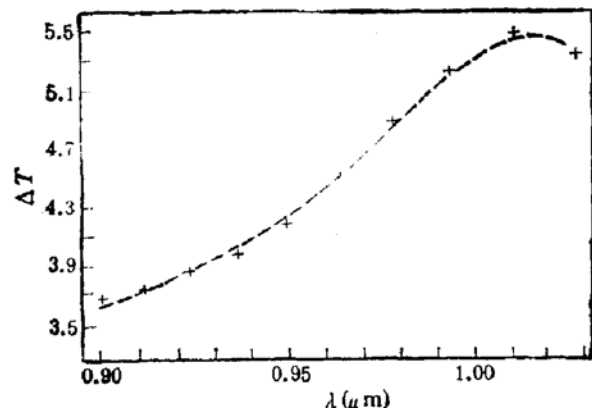


图6 2# 样品的测量值和计算机拟合曲线
+ 为测量值, ... 为拟合曲线

其中

$$K_1^2 = \frac{2 \frac{S}{D} + \left(\frac{S}{D}\right)^2 \frac{W}{2}}{W + 4 \frac{S}{D} \left(\frac{W}{\pi}\right)^2 + \frac{W}{2} \left(\frac{S}{D}\right)^2 \left(\frac{W}{\pi}\right)^2} \quad (18)$$

将本方法测得的、并用拟合曲线算得的 L_p 、 S 及 τ_b 值代入(17)、(18)式,算得该样品的少子表观寿命 $\tau_{eff}^{(1)}$,与由光电导法直接测得的少子表观寿命 $\tau_{eff}^{(2)}$ 进行比较,结果表明两者是比较接近的,见表 1.

表 1

参 数	符 号	1# 样 品	2# 样 品
厚 度	$W(\text{cm})$	5.07×10^{-2}	6.23×10^{-2}
少子体寿命	$\tau_b(\mu\text{s})$	79	188
表面复合速度	$S(\text{cm/s})$	1.46×10^3	1.61×10^3
少子扩散长度	$L_p(\text{cm})$	3.14×10^{-2}	4.85×10^{-2}
少子有效寿命 (拟合结果)	$\tau_{eff}^{(1)}(\mu\text{s})$	24.8	36.5
少子有效寿命 (光电导法测量)	$\tau_{eff}^{(2)}(\mu\text{s})$	20	34

五、结 论

利用半导体薄片的微波光电导谱能同时算出少子扩散长度、表面复合速度和少子体寿命,特别是可以直接从微波光电导谱中的峰值位置算出少子扩散长度。这是一种新的无接触、非破坏性测试方法,其测试结果是可信的。

参 考 文 献

- [1] 陈朝、沈颖华,厦门大学学报自然科学版,22,20(1983).
- [2] Moss, T.S., *J. Electron. Control.*, 1,126(1955).
- [3] 杨恒青、美国庆、陈玉金、包宗明,半导体学报,5,48(1984).
- [4] R. A. Smith, *Semiconductors (Second Edition)*, 352(1978).
- [5] 王宗欣、包宗明,复旦学报(自然科学版),21,462(1982).
- [6] 1982 Annual Book of ASTM Standards, Electronics. Part 43, F391—78.
- [7] 王宗欣、褚幼令,半导体学报,7,33(1986).

Study on Surface Recombination Velocity and Diffusion Length in Semiconductors by Microwave Photoconductivity Spectrum

Chu Youling, Wang Zongxin, Liu Ruilin and Zuo Wende
(Fudan University, Shanghai)

Abstract

When semiconductor wafer is illuminated by microwave and light, the microwave transmission coefficient (MTC) is related to the wavelength of light. We have theoretically analysed the relationship among the MTC, the diffusion length, the lifetime of minority carrier and the surface recombination velocity. It is possible to obtain all these parameters through the microwave photoconductivity spectrum (MPCS). We have measured the MTC at different light wavelength using contactless method. The measuring area is a circular spot of about 7mm^2 .

Key words Microwave, Photoconductivity spectrum, Diffusion length, Recombination velocity, Contactless