

调制激光致硅晶圆载流子辐射扫描成像试验研究

刘俊岩 宋鹏 秦雷 王飞 王扬

Experimental study on scan imaging of silicon wafer by laser-induced photocarrier radiometry

Liu Jun-Yan Song Peng Qin Lei Wang Fei Wang Yang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 087804 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.087804

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.087804>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I8>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高性能透射式 GaAs 光电阴极量子效率拟合与结构研究

Research on quantum efficient fitting and structure of high performance transmission-mode GaAs photocathode

物理学报.2011, 60(10): 107802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.107802>

一种测量 p-GaN 载流子浓度的方法

A new method to measure the carrier concentration of p-GaN

物理学报.2011, 60(3): 037804 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.037804>

# 调制激光致硅晶圆载流子辐射扫描成像试验研究

刘俊岩 宋鹏 秦雷 王飞 王扬<sup>†</sup>

(哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨 150001)

(2014年10月29日收到; 2014年12月4日收到修改稿)

建立了调制激光诱发硅晶圆少数载流子密度波一维模型, 仿真分析了少数载流子输运参数对调制激光诱发载流子辐射信号频域响应的影响. 利用调制激光诱发载流子辐射扫描成像系统对含有表面划痕的硅晶圆进行了扫描成像试验研究. 通过少数载流子密度波模型与多参数拟合方法反求得到了扫描区域的输运参数二维分布图. 该方法得到的少数载流子寿命与利用传统光电导方法测量的少数载流子寿命结果相符; 分析了划痕对载流子输运参数造成的影响, 与光电导方法比较, 该方法可以测量不同位置的全部载流子输运参数且分辨率高.

**关键词:** 调制激光诱发载流子辐射, 硅晶圆, 输运参数, 扫描成像

**PACS:** 78.56.Cd, 78.40.Fy, 07.68.+m

**DOI:** 10.7498/aps.64.087804

## 1 引言

硅晶圆是制作芯片和硅基太阳能电池片的主要原料, 随着科技发展, 硅晶圆的需求日益增多. 硅晶圆少数载流子输运参数(载流子寿命 $\tau$ 、扩散系数 $D$ 、前表面复合速率 $S_f$ 和后表面复合速率 $S_r$ )决定硅晶圆的质量进而影响后续元器件的性能, 因此对硅晶圆载流子输运参数检测显得尤为重要.

目前检测硅晶圆载流子输运参数技术较多, 包括光电导衰减技术<sup>[1,2]</sup>、光致发光技术<sup>[3]</sup>、调制自由载流子吸收等<sup>[4]</sup>. 多伦多大学Mandelis等<sup>[5]</sup>提出调制激光诱发载流子辐射技术(photocurrent radiometry, PCR), 其原理是调制激光诱发半导体样品产生非平衡载流子密度波, 载流子经过扩散、复合等过程会产生调制近红外发光信号, 通过短波红外探测器可检测到样品信号, 该信号频域响应与半导体载流子输运参数密切相关. 由于该技术检测输运参数全面、分辨率高、信号纯洁等优点, 近年来受到学者们关注: Li等提出了掺杂硅片三层PCR理论模型用来检测半导体输运参数<sup>[6]</sup>, 测量输运参数的准确性<sup>[7]</sup>; Shaughnessy和Mandelis<sup>[8]</sup>对硅

晶圆的缺陷和污染进行扫描成像; Liu等<sup>[9]</sup>研究了热退火对硅晶圆PCR信号的影响; Sun等<sup>[10]</sup>利用InGaAs相机对硅片进行成像研究; Ren等<sup>[11]</sup>结合扫频和准时域PCR技术对不同掺杂浓度的硅晶圆进行了研究. 利用PCR技术可以得到硅晶圆的输运参数, 因此输运参数的分布以及划痕对输运参数的影响需要进行深入研究, 为后续工艺制造、避免划痕提供一定指导.

本文建立了调制激光激发硅晶圆的过剩载流子密度波模型, 数值仿真分析载流子输运参数对其频域响应的影响, 对单晶硅晶圆进行扫描成像试验研究, 利用幅频与相频特性反求得到载流子输运参数的分布, 并与准稳态光电导测量硅晶圆载流子寿命结果进行对比分析.

## 2 双极性半导体少数载流子密度波模型的建立

### 2.1 理论模型

载流子辐射的红外光子信号强度与少数载流子密度波沿一维积分成正相关关系<sup>[12]</sup>:

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: [wyyh@hit.edu.cn](mailto:wyyh@hit.edu.cn)

$$E(\hbar\nu_{\text{em}}) \approx C(\lambda_1, \lambda_2) \int_0^W \Delta N(\hbar\nu_{\text{in}}, z) dz, \quad (1)$$

式中,  $E(\hbar\nu_{\text{em}})$  为载流子辐射复合释放光子能量密度;  $C(\lambda_1, \lambda_2)$  为比例系数;  $\lambda_1, \lambda_2$  为载流子辐射复合释放光子波长范围;  $\Delta N(\hbar\nu_{\text{in}}, z)$  为过剩少数载流子密度;  $W$  为样件厚度;  $\hbar\nu_{\text{in}}, \hbar\nu_{\text{em}}$  为入射光子和辐射光子能量.

载流子传输方程是描述载流子迁移、扩散、产生和复合的本构方程, 由于激光光斑直径远远小于辐射样件尺寸, 因此可将双极性半导体载流子输运方程进行一维简化<sup>[12]</sup>:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n(z, t)}{\partial t} - D\nabla^2 \Delta n(z, t) - \mu \nabla [n(z, t)E] \\ - G(z, t) + \frac{\Delta n(z, t)}{\tau} = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $n$  为载流子浓度 (电子或空穴浓度),  $D$  为双极性扩散系数,  $\Delta n$  为过剩载流子浓度,  $\mu$  为载流子双极性迁移率,  $E$  为电场强度,  $G$  为载流子产生率.

调制激光激发硅晶圆产生过剩载流子的产生率如下式所示:

$$\begin{aligned} G(z, t) = \frac{\beta(\lambda)(1-R)\eta I_0}{2\hbar\nu_{\text{em}}} e^{-\beta(\lambda)z} \\ \times (1 + e^{i\omega t}), \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $\beta(\lambda)$  为激光吸收系数 (记为  $\beta$ ),  $R$  为反射率,  $\eta$  为量子效率,  $I_0$  为激光峰值光强,  $\omega$  为调制激光角频率 ( $\omega = 2\pi f$ ).

在低水平注入条件下<sup>[12]</sup>, 过剩载流子浓度远高于平衡状态的载流子 (电子、空穴) 浓度 ( $n \approx \Delta n$ ,  $p \approx \Delta p$  和  $\Delta n \gg n_0$ ,  $\Delta p \gg p_0$ ), 在无外加电场情况下, (2) 式可简化为

$$\begin{aligned} D\nabla^2 \Delta n(z, t) - \frac{\partial \Delta n(z, t)}{\partial t} - \frac{\Delta n(z, t)}{\tau_n} \\ + G(z, t) = 0 \quad (0 \leq z \leq W). \end{aligned} \quad (4)$$

(3) 和 (4) 式经 Fourier 变换得到频域方程:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \Delta n(z, \omega) - \left( \frac{1 + i\omega\tau}{D\tau} \right) \Delta n(z, \omega) \\ + \frac{G(z, \omega)}{D} = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

$$G(z, \omega) = \frac{\beta(1-R)\eta I_0}{2\hbar\nu_{\text{em}}} e^{-\beta z}. \quad (6)$$

对于半导体, 调制激光诱发的载流子会在表面发生复合且满足以下边界条件:

$$\begin{cases} D \frac{d\Delta n(z, \omega)}{dz} \Big|_{z=0} = S_f \Delta n(0, \omega), \\ -D \frac{d\Delta n(z, \omega)}{dz} \Big|_{z=W} = S_r \Delta n(W, \omega). \end{cases} \quad (7)$$

内部满足以下连续性条件:

$$\begin{cases} \Delta n(z, \omega) \Big|_{z=z_0^+} = \Delta n(z, \omega) \Big|_{z=z_0^-}, \\ \left. \frac{d\Delta n(z, \omega)}{dz} \right|_{z=z_0^+} - \left. \frac{d\Delta n(z, \omega)}{dz} \right|_{z=z_0^-} = -\frac{1}{D}. \end{cases} \quad (8)$$

经过推导可得到过剩少数载流子密度波为

$$\begin{aligned} N(z, \omega) \\ = \frac{\eta I_0 \beta}{2\hbar\nu_{\text{em}} D^* (\beta^2 - \sigma_\omega^2)} \\ \times \left\{ \left[ \frac{\Gamma_2 \gamma_1 - \Gamma_1 \gamma_2 e^{-(\sigma_\omega + \beta)W}}{\Gamma_2 - \Gamma_1 e^{-2\sigma_\omega W}} \right] e^{-\sigma_\omega z} \right. \\ \left. + \left[ \frac{\gamma_1 - \gamma_2 e^{-(\beta - \sigma_\omega)W}}{\Gamma_2 - \Gamma_1 e^{-2\sigma_\omega W}} \right] e^{-\sigma_\omega(2W-z)} - e^{-\beta z} \right\}, \end{aligned} \quad (9)$$

其中系数见附录 A.

由 (1) 式可以得到调制激光诱发双极性半导体过剩少数载流子辐射信号:

$$\begin{aligned} E(\hbar\nu_{\text{em}}) \\ \approx C(\lambda_1, \lambda_2) \int_0^W \Delta N(z, \omega) dz \\ = \frac{a_0(a_1 - a_2)}{\sigma_\omega} + \frac{a_0}{\sigma_\omega} (a_2 e^{\sigma_\omega W} - a_1 e^{-\sigma_\omega W}) \\ - \frac{a_0(1 - e^{-\beta W})}{\beta}. \end{aligned} \quad (10)$$

利用边界条件可求解得到 (10) 式的系数见附录 A.

(10) 式为复数量, 由此可得到调制激光诱发太阳能电池少数载流子辐射复合产生红外辐射信号的幅频-相频特性.

$$\begin{aligned} |Am(\hbar\nu_{\text{em}}, \omega)| \\ = \sqrt{\text{Re}[P(\hbar\nu_{\text{em}})]^2 + \text{Im}[P(\hbar\nu_{\text{em}})]^2}, \end{aligned} \quad (11a)$$

$$\begin{aligned} Ph(\hbar\nu_{\text{em}}, \omega) \\ = \tan^{-1} \left\{ \frac{\text{Im}[P(\hbar\nu_{\text{em}})]}{\text{Re}[P(\hbar\nu_{\text{em}})]} \right\}. \end{aligned} \quad (11b)$$

从 (11a) 和 (11b) 式可以看出, 调制激光诱发双极性半导体少数载流子辐射复合的红外辐射信号幅频-相频特性直接受载流子输运参数的影响, 同时也与半导体结构参数、调制激光激励参数等有关. 因此可直接利用 (11) 式的载流子密度波模型分析载流子输运参数、调制激光参数及半导体结构参数对过剩载流子辐射复合产生红外辐射信号的幅频-相频特性的影响.

### 2.2 输运参数数值仿真分析

采用建立的调制激光诱发双极性半导体少数载流子密度波模型仿真分析了少数载流子输运参数对辐射复合产生的红外辐射信号的频域响应曲线的影响. 基本参数如表 1 所列.

表 1 仿真基本参数表  
Table 1. Base parameters of the simulation.

参数	$W/\mu\text{m}$	$I_0/\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$	$\eta$	$\beta/\text{cm}^{-1}$	$\lambda/\text{nm}$	$R$
数值	200	10	1	838.7	808	0.05

图 1 给出了少数载流子寿命对载流子信号幅频-相频特性的影响曲线: 随着激光(参考信号)频率增加, 激光的透射深度减少, 导致产生的

载流子数量减少, 所以由图 1(a) 可看出随着频率的增加幅值会减少, 而拐点处频率  $f_k$  大约为  $1/(2\pi\tau)$ ; 从图 1(b) 可以看出随着频率的增加相位减小 ( $f > f_k$ ), 载流子寿命增加导致载流子浓度增加, 载流子密度波更难于同步与参考信号, 因此相位滞后于激光信号.

图 2 给出了扩散系数对载流子信号幅频-相频曲线的影响, 可以看出, 随着扩散系数的增加, 幅值在低频区域降低: 因为随着扩散系数增加, 载流子会更快地转移并被复合, 进而减小了载流子浓度, 如图 2(a) 所示; 随着扩散系数的增加, 相位增加, 这是因为扩散系数增大, 载流子浓度变化快进而与参考信号相位差别更小(滞后减慢), 如图 2(b) 所示.

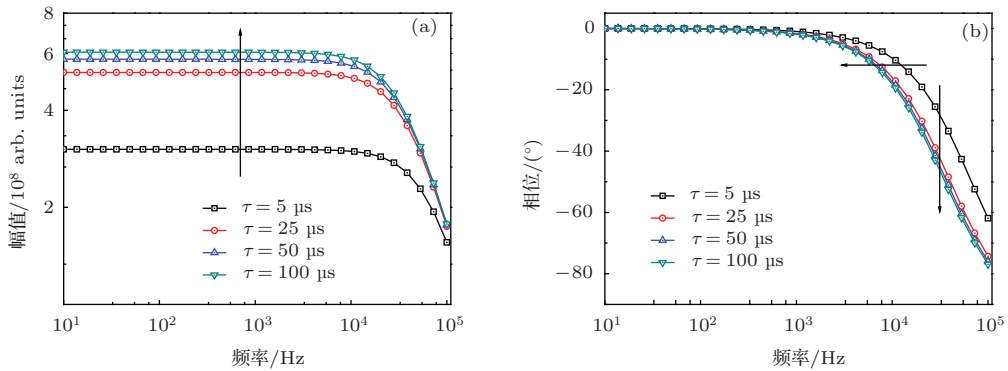


图 1 (网刊彩色) 载流子寿命对幅频-相频曲线的影响 (a) 幅频特性; (b) 相频特性  
Fig. 1. (color online) Influence of carrier lifetime on (a) amplitude and (b) phase.

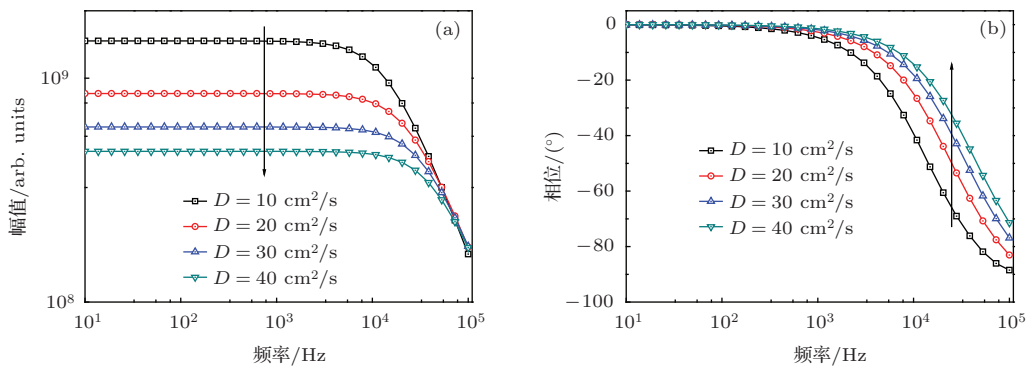


图 2 (网刊彩色) 扩散系数对幅频-相频曲线的影响 (a) 幅频特性; (b) 相频特性  
Fig. 2. (color online) Influence of diffusion coefficient on (a) amplitude and (b) phase.

图 3 给出了前表面复合速率对载流子幅频-相频曲线的影响, 随着前表面复合速率的增加载流子幅值减小, 这是因为前表面复合速率增加, 载流子在表面被表面悬挂键俘获的概率增加, 使得载流子浓度降低, 因而幅值减小, 如图 3(a) 所示; 随着前表面复合速率增加, 载流子浓度变化增加, 使得与

参考信号相位更接近, 相位增加, 如图 3(b) 所示.

图 4 给出了后表面复合速率对少数载流子幅频-相频特性曲线的影响. 由图 4 可知, 随着后表面复合速率的增加, PCR 信号的幅值降低, PCR 信号的相位在高频时与参考信号相位差距减少(更接近于参考信号), 造成这种趋势的原因是随着后表面

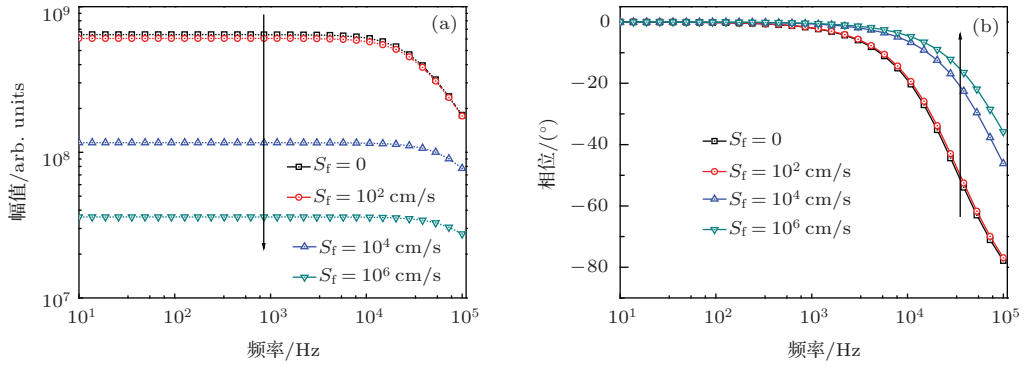


图3 (网刊彩色) 前表面复合速率对幅频-相频曲线的影响 (a) 幅频特性; (b) 相频特性

Fig. 3. (color online) Influence of front surface recombination velocity on (a) amplitude and (b) phase.

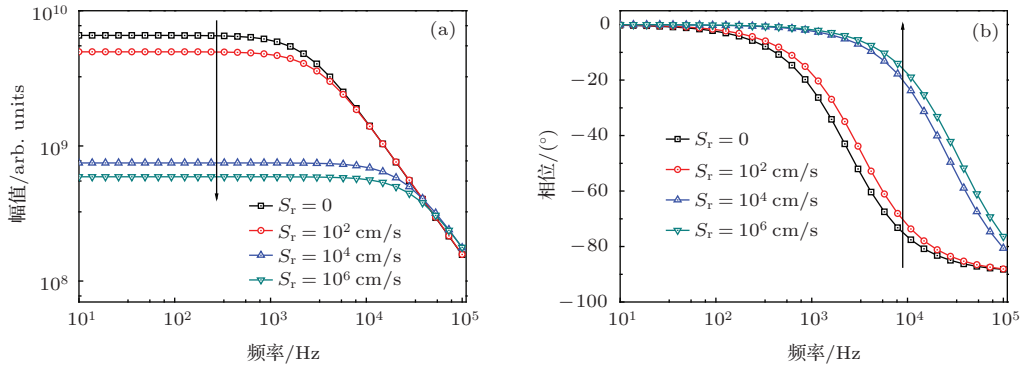


图4 (网刊彩色) 后表面复合速率对幅频-相频曲线的影响 (a) 幅频特性; (b) 相频特性

Fig. 4. (color online) Influence of rear surface recombination velocity on (a) amplitude and (b) phase.

复合速率增加, 到达后表面的载流子复合概率增加, 导致少数载流子浓度降低, 因此幅值随着表后面复合速率的增加而降低, 如图4(a)所示; 后表面复合速率增加导致载流子复合加快, 浓度变化率增加, 使得载流子密度波变化率更接近于参考信号。

以上利用调制激光诱发双极性半导体载流子密度波模型仿真分析了载流子输运参数, 通过仿真发现载流子输运参数直接影响PCR的幅频与相频曲线。

### 3 试验与分析

扫描成像试验系统原理如图5所示。波长为808 nm超带隙激光器发出光强按调制信号调制的激光激励样品产生载流子, 载流子复合辐射出的信号经过离轴抛物镜准直聚焦再经过滤波片(FEL1000 nm)后被InGaAs探测器(光谱响应范围:  $0.8\text{--}1.7\ \mu\text{m}$ ; 带宽17 MHz)采集, 然后利用锁相放大器(SR830)求取该频率以及该位置的载流子幅值和相位, 通过控制移动台移动可以获得不同

位置的幅值和相位信息。

本文采用材料为P型单晶硅晶圆, 其中一表面进行了抛光, 并存在少量划痕, 另外一面未抛光, 如图6所示。扫描区域大小为 $12\ \text{mm} \times 12\ \text{mm}$ , 扫描步长为 $0.3\ \text{mm}$ , 激光功率为 $32\ \text{mW}$ , 光斑半径为 $0.3\ \text{mm}$ , 试验在室温条件下进行。扫描频率为 $0.1, 0.5, 1, 2.5, 5, 7.5, 10, 20, 40\ \text{kHz}$ 。

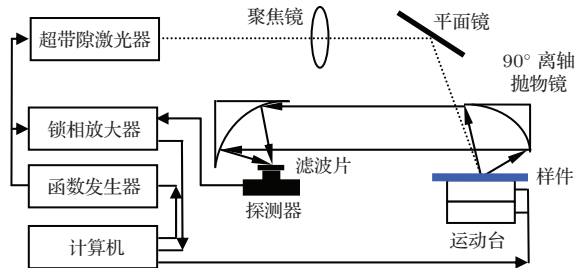


图5 扫描成像系统组成原理图

Fig. 5. Schematic diagram of PCR scan imaging system.

图7给出了2.5 kHz的PCR扫描成像结果。从幅值和相位图可以明显看出, 在划痕位置(幅值低的位置以及相位高的位置), 系统分辨率高。划痕会造成表面复合速率增加, 由图3可知, 同频率下, 随

着表面复合速率的增加,幅值降低,相位增加. 试验与仿真结果相符.

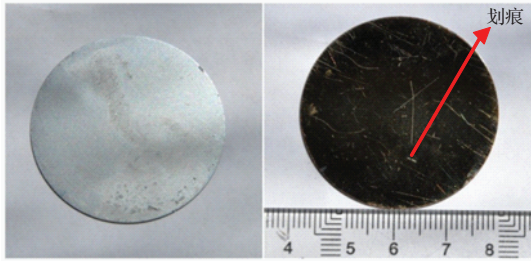


图6 硅晶圆  
Fig. 6. Silicon wafer.

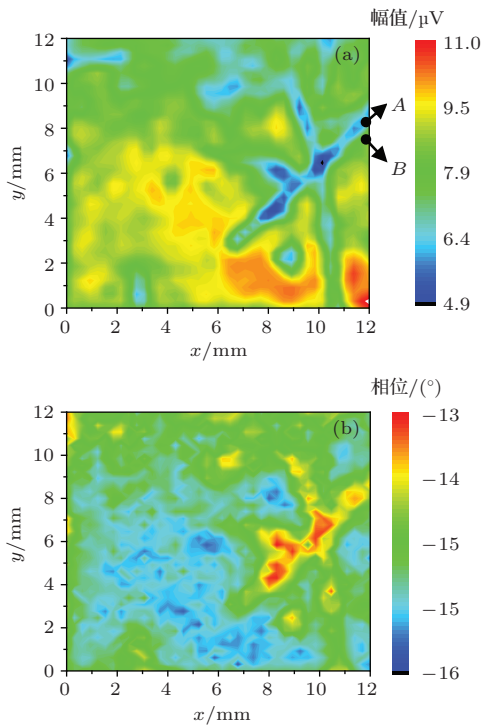


图7 (网刊彩色) 2.5 kHz 扫描成像结果 (a) 幅值图;  
(b) 相位图  
Fig. 7. (color online) Scan imaging results at 2.5 kHz:  
(a) amplitude; (b) phase.

根据不同频率扫描成像幅值与相位试验结果,通过载流子密度波模型利用多参数拟合方法可以获得扫描区域的运输参数分布图,其中多参数拟合的目标函数为

$$F = K_1 \sum_{i=1}^n (Am^T(x_i, f_i) - Am_i^E)^2 + K_2 \sum_{i=1}^n (Ph^T(x_i, f_i) - Ph_i^E)^2, \quad (12)$$

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}(D, \tau, S_f, S_r),$$

式中,  $K_1, K_2$  为比例系数;  $\mathbf{x}$  为待拟合系数(载流子运输参数)向量;  $n$  为采集点数;  $f_i$  为频率;  $Am^T$ ,

$Ph^T$  为计算幅值和相位;  $Am^E, Ph^E$  为测量幅值和相位.

图7中  $A, B$  作为参考点,利用多参数拟合方法使得目标函数(12)式取得最小值,其运输参数拟合数据结果如表2所列,拟合情况如图8所示.

表2  $A, B$  两点运输参数拟合结果

Table 2. Transport parameters fitting results of point  $A$  and  $B$ .

位置	运输参数			
	$\tau/\mu\text{s}$	$D/\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$	$S_f/10^3 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$	$S_r/10^3 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$
$A$ 点	40	3.4	9.9	0.25
$B$ 点	28.5	1.9	1.6	0.12

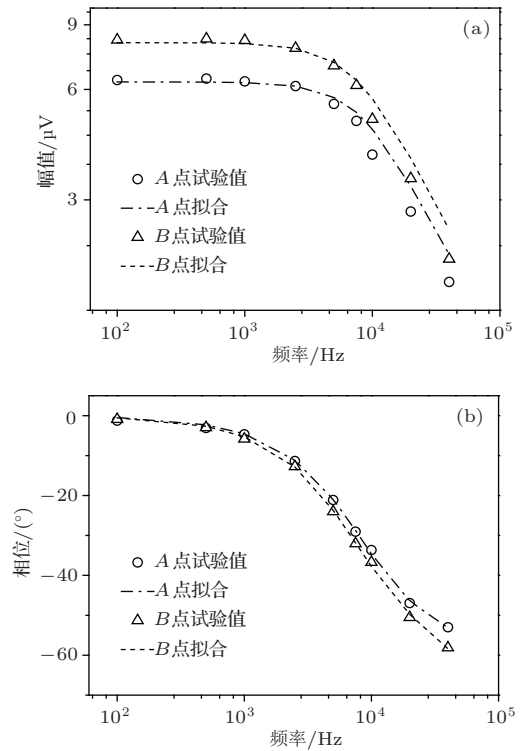


图8  $A, B$  两点试验与拟合结果 (a) 幅频曲线; (b) 相频曲线  
Fig. 8. Experimental dependence of PCR amplitude and phase with theoretical fits of point  $A$  and  $B$ :  
(a) amplitude; (b) phase.

采用同样的多参数拟合方法可以得到扫描区域其他位置运输参数拟合结果,如图9所示.由图9(c)可知,划痕使得前表面复合速率急剧增加.因为前表面是抛光面,后表面未抛光,所以前表面复合速率要大于后表面复合速率,并且划痕造成表面悬挂键增多,进而增加了表面复合速率,在前表面复合速率图中可以很好地体现出来.这说明表面划痕会对材料造成严重影响,增加少子复合,造成载流子密度降低,因此在实际过程中需要严格控制

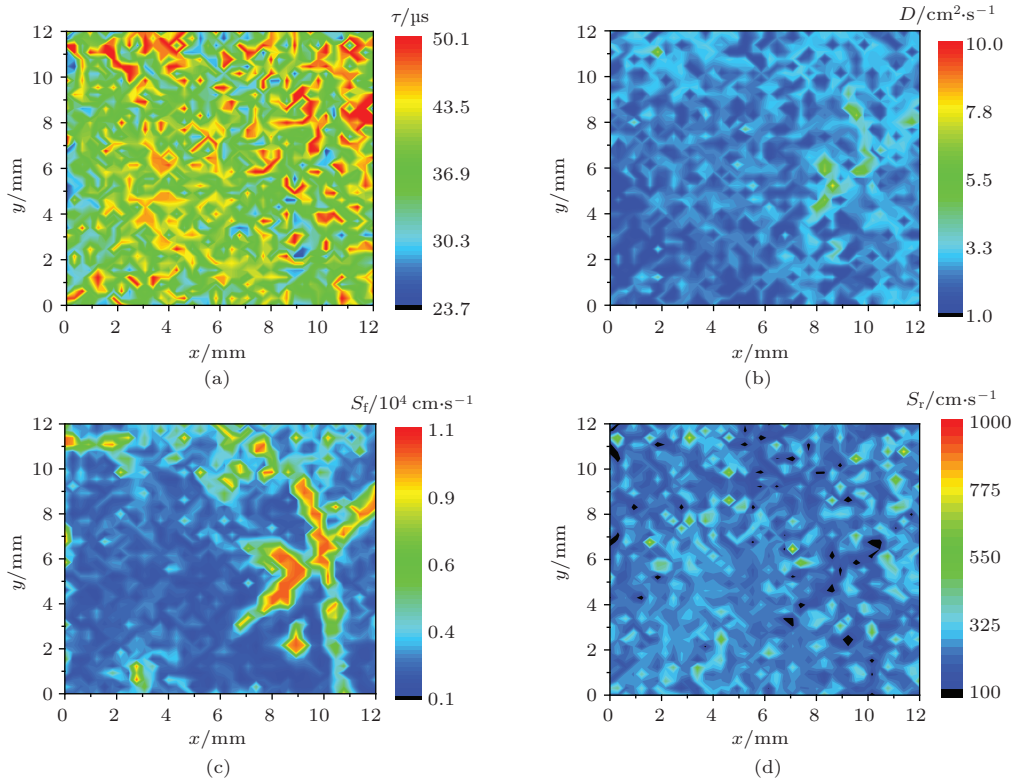


图9 (网刊彩色) 运输参数分布图 (a) 载流子寿命; (b) 扩散系数; (c) 前表面复合速率; (d) 后表面复合速率  
 Fig. 9. (color online) Maps of carrier transport parameters: (a) carrier lifetime; (b) diffusion coefficient; (c) front surface recombination velocity; (d) rear surface recombination velocity.

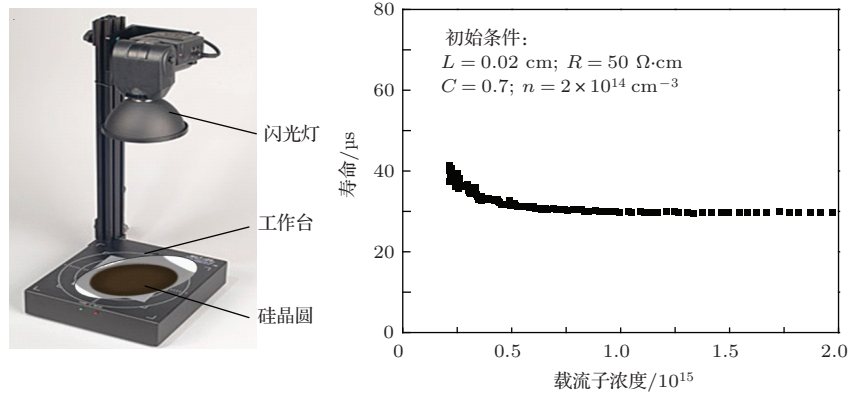


图10 WCT-120装置与少子寿命曲线  
 Fig. 10. Device of WCT-120 and carrier lifetime tested by WCT-120.

表面质量. 而利用PCR方法获得的后表面复合速率也可以很好地反映后表面的表面质量和表面形貌.

为了验证PCR方法的准确性, 本文采用准稳态光电导(QSSPC, WCT-120少数载流子测试仪, 见图10)方法对该硅晶圆少子寿命进行测量, 初始条件如图10所示, 其中 $L$ 为样件厚度,  $R$ 为电阻率,  $C$ 为光学常数,  $n$ 为载流子浓度. 利用该仪器测量硅晶圆的少子寿命为 $33.85 \mu\text{s}$ . 图9(a)中平均少

数载流子寿命为 $38.33 \mu\text{s}$ , 两种方法测量结果相符. 因此PCR方法测量准确, 与QSSPC方法比较, 该方法测量运输参数更全面、分辨率高且能够测量不同位置的载流子运输参数, 为检测局部缺陷提供了可能性.

#### 4 结 论

本文建立了调制激光诱发双极性半导体少数载流子密度波模型, 仿真分析了少数载流子运输参

数对 PCR 信号幅频和相频的影响, 对硅晶圆进行不同频率的扫描成像试验研究, 利用建立的载流子密度波模型和多参数拟合方法获得了扫描区域的输运参数二维分布结果. 分析了表面划痕造成载流子表面复合率增加的原因, 这导致 PCR 信号幅值降低, 相位增加, 与仿真结果相符. 通过传统光电导技术测量该硅晶圆的少子寿命结果与 PCR 技术拟合得到的少子寿命结果相符. 相对于光电导技术, PCR 技术具有测量载流子输运参数全面、分辨率高、成像清晰等优点, 且具有能够检测局部位置缺陷的优势.

附录 A  $N(z, \omega)$  和  $E(\hbar\nu_{em})$  表达式的系数

$$R_i = \frac{D^* \sigma_\omega - S_i}{D^* \sigma_\omega + S_i} \quad (i = f, r), \quad (A1)$$

$$r \equiv \frac{\beta}{\sigma_\omega}, \quad (A2)$$

$$\Gamma_1 \equiv R_f, \quad \Gamma_2 \equiv R_r, \quad (A3)$$

$$\gamma_1 \equiv \frac{D^* \beta + S_f}{D^* \sigma_\omega + S_f},$$

$$\gamma_2 \equiv \frac{D^* \beta - S_r}{D^* \sigma_\omega - S_r}, \quad (A4)$$

$$a_0 = \frac{\beta(1-R)I_0\eta}{4D_n\hbar\nu(\beta^2 - \sigma_\omega^2)},$$

$$a_1 = \frac{\Gamma_2\gamma_1 - \gamma_2\Gamma_1 e^{-(\sigma_\omega + \beta)W}}{\Gamma_2 - \Gamma_1 e^{-2\sigma_\omega W}},$$

$$a_2 = \frac{\gamma_1 - \gamma_2 e^{-(\beta - \sigma_\omega)W}}{\Gamma_2 - \Gamma_1 e^{-2\sigma_\omega W}}. \quad (A5)$$

## 参考文献

- [1] Fujihira C, Morin M, Hashizume H, Friedt J, Nakai Y, Hirose M 1993 *J. Appl. Phys.* **32** 1362
- [2] Sinton R A, Cuevas A 1996 *Appl. Phys. Lett.* **69** 2510
- [3] Trupke T, Bardos R A, Schubert M C, Warta W 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 044107
- [4] Zhang X R, Li B C, Liu X M 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7316 (in Chinese) [张希仁, 李斌成, 刘显明 2008 物理学报 **57** 7316]
- [5] Mandelis A, Batista J, Shaughnessy D 2003 *Phys. Rev. B* **67** 205208
- [6] Li B C, Shaughnessy D, Mandelis A, Batista J 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 7832
- [7] Li B C, Mandelis A, Shaughnessy D, Batista J, Garcia J 2004 *J. Appl. Phys.* **96** 186
- [8] Shaughnessy D, Mandelis A 2006 *J. Electrochem. Soc.* **153** G283
- [9] Liu X M, Li B C, Huang Q P 2010 *Chin. Phys. B* **19** 097201
- [10] Sun Q M, Melnikov A, Mandelis A 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 242107
- [11] Ren S D, Li B C, Gao L F, Wang Q 2013 *Chin. Phys. B* **22** 057202
- [12] Mandelis A 2001 *Diffusion-wave Fields: Mathematical Methods and Green Functions* (New York: Springer) p588



# Experimental study on scan imaging of silicon wafer by laser-induced photocarrier radiometry

Liu Jun-Yan Song Peng Qin Lei Wang Fei Wang Yang<sup>†</sup>

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

( Received 29 October 2014; revised manuscript received 4 December 2014 )

## Abstract

In this paper, the modulated laser-induced excess minority carrier density wave (CDW) of bipolar semiconductor is developed. An analytical expression of CDW in frequency domain is introduced. The numerical simulations are carried out to analyze the effects of minority carrier transport parameters (minority carrier lifetime, diffusion coefficient, and two surfaces recombination velocities) on response of laser-induced photocarrier radiometry (PCR) signal to frequency for semiconductor silicon wafer. The PCR amplitude increases with increasing the minority carrier lifetime, and decreased with increasing the carrier diffusion coefficient and surface recombination velocity. In contrast, the PCR phase lag decreases with increasing the minority carrier lifetime, and increases with increasing the carrier diffusion coefficient and surface recombination velocity. The silicon (Si) wafer with an artificial defect (mechanical scratch) on the surface is experimentally investigated by PCR scanning image system. The distribution maps of the minority carrier transport parameters are obtained by best-fitting method which is based on the carrier density wave analytical expression, and the influences of the artificial defect on carrier transport parameters are discussed in detail. The experimental results indicate that the surface recombination velocity and carrier diffusivity at artificial damaged location are dramatically increased compared with those in the healthy region. The carrier bulk lifetime of whole Si wafer is obtained to be about 38.33  $\mu\text{s}$  by PCR scanning image measurements. Simultaneously, quasi steady-state photoconductance (QSSPC) method is used to measure the carrier effective lifetime of Si wafer, and it is about 33.85  $\mu\text{s}$ . Therefore, the carrier bulk lifetime of Si wafer by PCR scanning image measurement is in good agreement with the QSSPC measurement. However, QSSPC measurement could obtain only the carrier effective lifetime of Si wafer. Furthermore, PCR scanning image measurement can be employed to measure the carrier transport parameters with high resolution in comparison with QSSPC measurement, and to evaluate the localized imperfection.

**Keywords:** modulated laser-induced photocarrier radiometry, silicon wafer, carrier transport properties, scanning image

**PACS:** 78.56.Cd, 78.40.Fy, 07.68.+m

**DOI:** 10.7498/aps.64.087804

---

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [wyyh@hit.edu.cn](mailto:wyyh@hit.edu.cn)