

# 调制自由载流子吸收测量半导体载流子 运输参数的三维理论\*

张希仁<sup>1)†</sup> 李斌成<sup>1)‡</sup> 刘显明<sup>1)‡</sup>

1) 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

2) 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2007 年 10 月 23 日收到, 2008 年 5 月 26 日收到修改稿)

推导出用于测量半导体载流子运输特性(载流子寿命、载流子扩散系数和前表面复合速度)的调制自由载流子吸收(modulated free carrier absorption, MFCA)检测技术的三维理论模型,给出了调制自由载流子吸收检测信号与调制频率和抽运-探测光相对距离的关系.定性分析了在不同调制频率时各个载流子运输参数对径向位置扫描曲线(信号与两束光相对距离的关系)的影响.结果表明调制自由载流子吸收检测信号对各个参数的灵敏度随抽运-探测光相对距离的增加而增加.仿真和实验结果表明,通过拟合不同调制频率时调制自由载流子吸收信号的径向位置扫描曲线能精确确定半导体材料的载流子运输特性.

关键词: 调制自由载流子吸收, 载流子运输特性, 径向位置扫描

PACC: 7850G, 8170C, 8170G

## 1. 引 言

半导体的载流子运输特性(载流子寿命  $\tau$ 、载流子扩散系数  $D$  和前表面复合速度  $s_1$ )是评价半导体品质的重要参数.如何准确测量这些参数一直是半导体制造业中一个十分重要的课题.

调制自由载流子吸收作为一种抽运-探测方法,是测量半导体载流子运输参数的重要方法,具有非接触、非破坏性等特点. Sani 于 1988 年提出 MFCA 并推导出自由载流子吸收信号与调制频率的关系<sup>[1]</sup>.随后,调制自由载流子吸收的频率响应特性被用于测量半导体的载流子寿命及表面复合速度<sup>[2-4]</sup>; Schönecker 对调制自由载流子吸收技术的灵敏度和精度进行了详细分析<sup>[5]</sup>;其他一些学者将调制自由载流子吸收技术与其他测量方法进行了对比<sup>[6,7]</sup>.近年来,调制自由载流子吸收技术主要用于半导体载流子寿命成像<sup>[8]</sup>以及与其他方法结合以提高测量精度<sup>[9]</sup>.

但是,到目前为止, MFCA 方法还仅停留在研究

一维的载流子分布,这显然不能准确描述载流子的空间分布;以前的 MFCA 检测方法都事先假定扩散系数已知或者前后表面复合速度相等,再研究如何从检测的相位信息中提取样品的各种参数,这些假设降低了获取的参数可信度.并且, Schönecker 也指出仅由相位确定的各个参数值的精度有限<sup>[5]</sup>.在国内, MFCA 检测方法的研究目前还未见报道.

为了突破传统的 MFCA 的测量限制、提高半导体载流子运输参数的测量精度,在本文将推导出 MFCA 的三维理论模型并分析载流子运输参数对 MFCA 信号的影响.与传统的频率曲线分析方法不同的是,本文主要分析径向位置扫描曲线对载流子运输参数的依赖关系.最后通过多参数拟合方式来获取半导体的载流子运输参数.

## 2. 调制自由载流子吸收理论

在这里仅考虑各向同性的半导体,在低注入情况下,样品的载流子寿命、载流子扩散系数以及表面复合速度都是常量.

\* 国家自然科学基金(批准号: 60676058),四川省青年科技基金资助的课题.

† E-mail: xiren3208@163.com

‡ 通讯联系人, E-mail: bcli@ioe.ac.cn

## 2.1. 调制自由载流子的产生及空间分布

当抽运光束(光子能量大于样品的禁带宽度)照射到样品表面时,大量的光子被吸收,在样品表面附近产生大量的过剩载流子,当抽运光束在样品表面的光斑半径很小时,载流子通过扩散及复合,在半导体中形成三维分布.建立如图 1 所示的柱坐标系,载流子分布由连续性方程描述:

$$D \nabla^2 \Delta n(r, z; t) - \frac{\Delta n(r, z; t)}{\tau} - \frac{\partial \Delta n(r, z; t)}{\partial t} = -g(r, z; t). \quad (1)$$

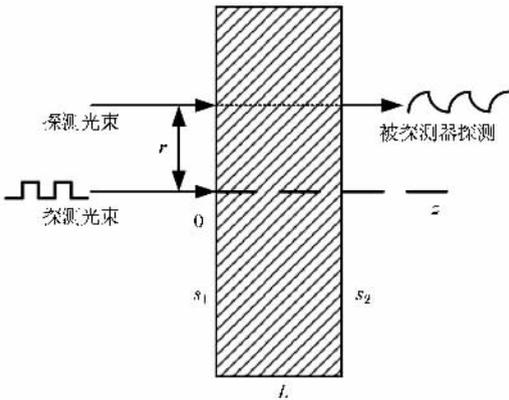


图 1 调制自由吸收测量技术的原理

若激励光呈高斯分布,光强被正弦调制,并且考虑半导体对光的吸收随深度的变化,则(1)式中自由载流子产生率为

$$g(r, z; t) = \frac{1}{2} \frac{\alpha P_0 \eta_0 (1-R)}{h\nu \pi W^2} \times \exp\left(-\frac{r^2}{W^2} - \alpha z\right) \cdot e^{j\omega t} + \text{c. c.} \quad (2)$$

其中  $\eta_0$  是量子转换效率,  $P_0$  是抽运光入射功率,  $h\nu$  是光子能量,  $\alpha$  和  $R$  是样品对抽运光的吸收系数和反射率,  $\omega = 2\pi f$  为角频率,  $f$  为调制频率;在抽运-探测方法中,  $W$  为有效光斑半径<sup>[10]</sup>.

在光强被正弦调制的抽运光的激励下,半导体中过剩载流子浓度也是时间  $t$  的正弦函数,即

$$\Delta n(r, z; t) = \frac{1}{2} \Delta N(r, z; i\omega) \cdot e^{j\omega t} + \text{c. c.} \quad (3)$$

将(2)和(3)式代入到载流子浓度满足的连续性方程(1)中,则(1)式中每项都包含时间项  $e^{j\omega t}$ .将(1)式化简约去时间项后得到

$$\nabla^2 \Delta N(r, z; i\omega) - \sigma_n^2 \Delta N(r, z; i\omega) = -\frac{\alpha P_0 \eta_0 (1-R)}{h\nu \pi W^2 D} \exp\left(-\frac{r^2}{W^2} - \alpha z\right), \quad (4)$$

$$\text{其中 } \sigma_n^2 = \frac{1 + j\omega\tau}{D\tau}.$$

相应的边界条件为

$$D \frac{\partial}{\partial z} \Delta N(r, z; i\omega) \Big|_{z=0} = s_1 \Delta N(r, 0; i\omega), \quad (5)$$

$$D \frac{\partial}{\partial z} \Delta N(r, z; i\omega) \Big|_{z=L} = -s_2 \Delta N(r, L; i\omega). \quad (6)$$

通过零阶 Hankel 变换及其相关性质<sup>[11]</sup>求得方程(4)的解<sup>[12]</sup>:

$$\begin{aligned} \Delta N(k, z; i\omega) &= E \left[ \left( \frac{G_2 g_1 - g_2 G_1 e^{-(bn+\alpha)L}}{G_2 - G_1 e^{-2b_n L}} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{g_1 e^{-b_n L} - g_2 e^{-\alpha L}}{G_2 - G_1 e^{-2b_n L}} \right) e^{-b_n z} - e^{\alpha z} \right], \quad (7) \end{aligned}$$

式中

$$b_n^2 = k^2 + \sigma_n^2,$$

$$E = \frac{\alpha P_0 \eta_0 (1-R)}{2h\nu \pi W^2 D} \frac{e^{-k^2 W^2/4}}{(\alpha^2 - b_n^2)},'$$

$$g_1 = \frac{D\alpha + s_1}{Db_n + s_1},'$$

$$g_2 = \frac{D\alpha + s_2}{Db_n - s_2},'$$

$$G_1 = \frac{Db_n - s_1}{Db_n + s_1},'$$

$$G_2 = \frac{Db_n + s_2}{Db_n - s_2}.$$

然后将(7)式进行零阶 Hankel 反变换就得到半导体内过剩载流子浓度的三维分布:

$$\Delta N(r, z; i\omega) = \int_0^\infty k \Delta N(k, z; i\omega) J_0(rk) dk. \quad (8)$$

由(7)和(8)式可知,自由载流子浓度除了受半导体载流子输运参数影响之外,还受到有效光斑半径、两光束相对距离、吸收系数等因素的影响.

## 2.2. 调制自由载流子吸收检测技术理论

当半导体中周期性产生自由载流子后,再将一束探测光束(光子能量小于半导体禁带宽度)照射到样品表面上,由于浓度周期性变化的自由载流子对探测光有微弱吸收(即自由载流子吸收),使得透射的探测光光强呈周期性变化.这时,探测光的透射强度为

$$\begin{aligned} \mathcal{I}(t; r) &= I_0 \exp(-\alpha_1 L - \int_0^L \Delta \alpha_1(t; r, z) dz) \\ &= I_1 \exp\left(-\int_0^L \Delta \alpha_1(t; r, z) dz\right), \quad (9) \end{aligned}$$

$I_1$  是无激励光照射时探测光的透射强度,  $r$  是抽运探测光的相对距离, 如图 1 所示.  $\alpha_1$  是半导体对探测光的吸收系数,  $\Delta\alpha_1$  为自由载流子吸收系数.

令  $\Delta I = I - I_1$  因  $\Delta I \ll I_1$  则有

$$\frac{\Delta I}{I_1} \approx \ln\left(\frac{\Delta I}{I_1} + 1\right) = -\int_0^L \Delta\alpha_1(t; r, z) dz. \quad (10)$$

因自由载流子吸收系数与载流子浓度成正比<sup>[13]</sup>:

$$\Delta\alpha_1(t; r, z) = \sigma_{fc} \Delta n(t; r, z), \quad (11)$$

则(10)式改写为

$$\begin{aligned} \Delta K(t; r) &= -\sigma_{fc} I_1 \int_0^L \Delta n(t; r, z) dz \\ &= -\sigma_{fc} I_1 \Delta n(t; r), \end{aligned} \quad (12)$$

$\Delta K(t; r)$  是检测量,  $\sigma_{fc}$  是载流子对光子的俘获截面,  $\Delta n(t; r, z)$  是载流子浓度, 由扩散方程导出.

若激励光光强是正弦调制的, 则透射的探测光也呈周期性变化, 约简时间因子项, 有

$$\Delta K(\omega; r) = -\sigma_{fc} I_1 \int_0^L \Delta N(\omega; r, z) dz. \quad (13)$$

将(8)式代入上式即得到自由载流子吸收信号的三维表达式.

在调制自由载流子吸收测量理论中, 载流子浓度的许多特性由载流子有效扩散长度控制, 其定义为

$$L_{app}(\omega) = \sqrt{D\tau(1 + j\omega\tau)}. \quad (14)$$

在实际测量中, 采用锁相放大器分别测量  $\Delta K(\omega, r)$  的振幅和相位.

从(8)和(13)式清楚地看到, 调制自由载流子吸收信号与少数载流子寿命  $\tau$ 、载流子扩散系数  $D$  以及前后表面复合速度  $s_1$  和  $s_2$  的关系非常复杂, 从其中分离出信号与每个参数的简单表达式非常困难, 因此必须进行模拟仿真分析.

### 3. 仿 真

从(13)式可知, 调制自由载流子吸收信号是调制频率  $f$  和两束光相对距离  $r$  的函数, 因此存在两种测量方式: 频率扫描和径向位置扫描. 频率扫描是固定抽运光和探测光的相对距离(通常是在抽运光和探测光完全重合时), 测量自由载流子吸收信号与调制频率的关系; 基于调制自由载流子吸收, 我们曾提出径向位置扫描方式测量半导体输运参数, 即固定调制频率, 测量自由载流子吸收信号与抽运-探测光相对距离的关系<sup>[14]</sup>. 在本节进一步分析载流子输运参数对径向位置扫描曲线的影响. 在下面的仿真中, 除了特别说明, 所有参数都设定为载流子寿命  $\tau = 10 \mu\text{s}$ , 载流子扩散系数  $D = 20 \text{ cm}^2/\text{s}$ , 前表面复合速度  $s_1 = 10^4 \text{ cm/s}$ , 后表面复合速度  $s_2 = 10^4 \text{ cm/s}$ , 光斑半径  $W = 50 \mu\text{m}$ , 样品厚度  $L = 450 \mu\text{m}$ , 样品对激励光的吸收系数  $\alpha = 1 \times 10^5 \text{ m}^{-1}$ .

#### 3.1. 载流子寿命对调制自由载流子吸收信号的影响

图 2 和图 3 分别给出了调制频率分别为 1 kHz, 20 kHz 和 400 kHz 时, 载流子寿命从  $1 \mu\text{s}$  变化到  $200 \mu\text{s}$  时振幅和相位的径向位置扫描曲线. 从图中看出, 当抽运-探测光相对距离远大于有效光斑半径时, 随着相对距离的增加, 振幅几乎呈指数衰减, 而相位与相对距离呈线性关系.

从图 2 和图 3 可知, MFCA 振幅和相位滞后都随寿命的减小而减小, 且寿命对振幅以及相位的影响随两束光相对距离的增加而增加. 这主要由两个原因引起: 寿命减小使激发区内的载流子浓度减小, 导致扩散到探测区的载流子数目减少; 同时, 寿命减小也使探测区内载流子浓度降低.

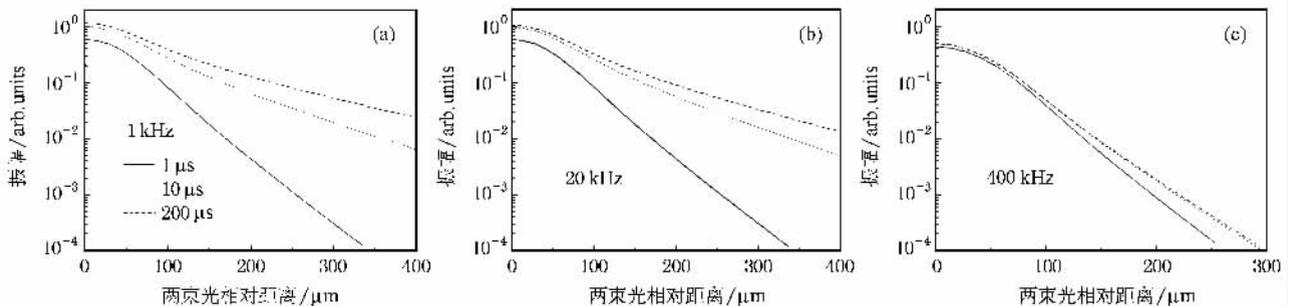


图 2 载流子寿命对振幅径向位置扫描曲线的影响

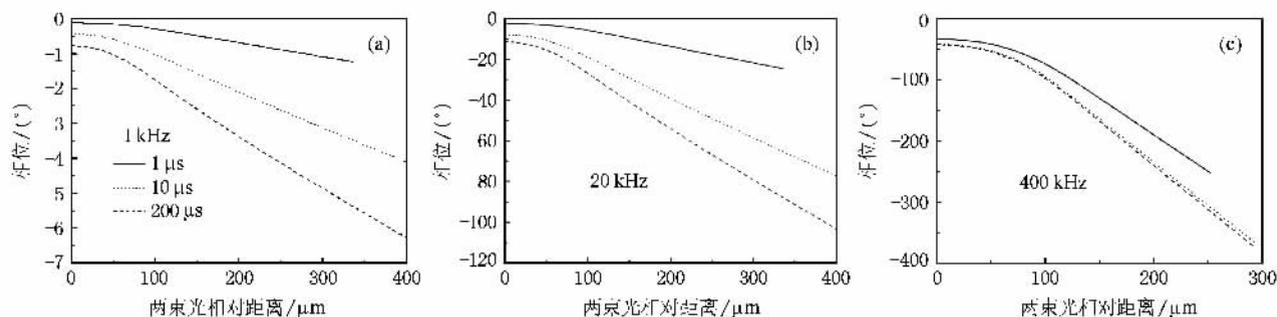


图3 载流子寿命对相位径向位置扫描曲线的影响

仔细分析图2和图3发现:在调制频率为400 kHz时,尽管寿命为 $10\ \mu\text{s}$ 和 $200\ \mu\text{s}$ 的相位曲线仍存在一定差异(图3(c)),但是从图2(c)看出两条振幅曲线几乎重合,这表明在大于400 kHz的频率范围内MFCA振幅对大于 $10\ \mu\text{s}$ 的寿命的灵敏度大大降低,但是在低频(图2(a)和(b)以及图3(a)和(b)),径向位置扫描曲线对值为 $200\ \mu\text{s}$ 的寿命仍有较大的灵敏度.这是因为在高频区( $\omega\tau > 1$ ),载流子的有效扩散长度 $L_{\text{app}}$ 对寿命的依赖程度随频率的增加而降低,特别是当 $\omega\tau \gg 1$ 时,有效扩散长度 $L_{\text{app}} = (D/\omega)^{1/2}$ 几乎与载流子寿命无关,这时载流子寿命的变化几乎不影响MFCA信号.在低频区,尽管寿命对振幅的影响几乎不随频率的改变而变化(图2(a)和

(b)),但是,寿命对相位的影响随频率的增加而增加,也随相对距离的增加而增加.因此,在多参数拟合径向位置扫描曲线获取载流子运输参数时,径向位置扫描曲线必须覆盖恰当的频率范围,使MFCA在此频率范围对寿命有较大的灵敏度.从图2和图3也看出,MFCA径向位置扫描曲线对寿命的灵敏度随寿命的增大而降低.

### 3.2. 载流子扩散系数对调制自由载流子吸收信号的影响

图4和图5给出在频率为1 kHz、20 kHz和400 kHz时,扩散系数从 $10\ \text{cm}^2/\text{s}$ 变化到 $35\ \text{cm}^2/\text{s}$ 时的径向位置扫描曲线.显然,在整个频率范围径向位置扫描曲线对所有扩散系数都有较好的灵敏度.

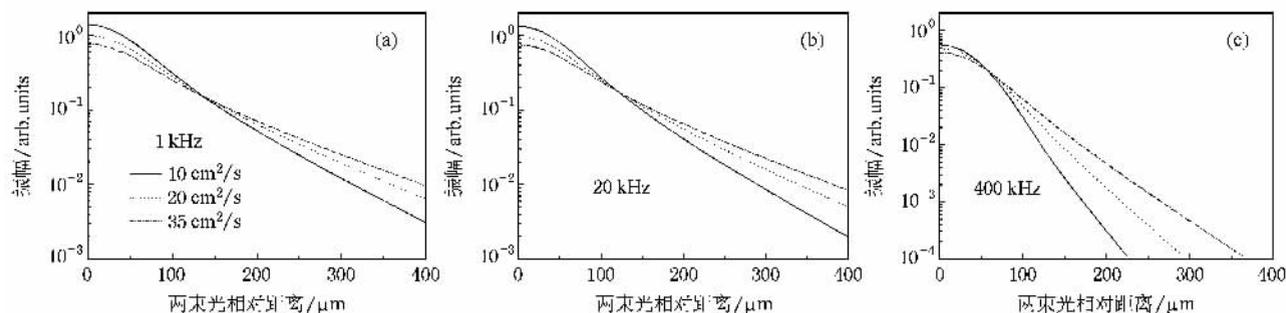


图4 载流子扩散系数对振幅径向位置扫描曲线的影响

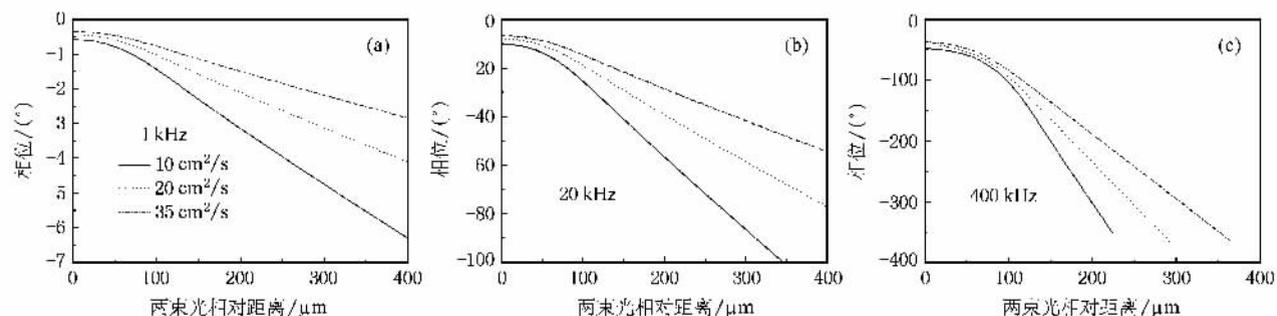
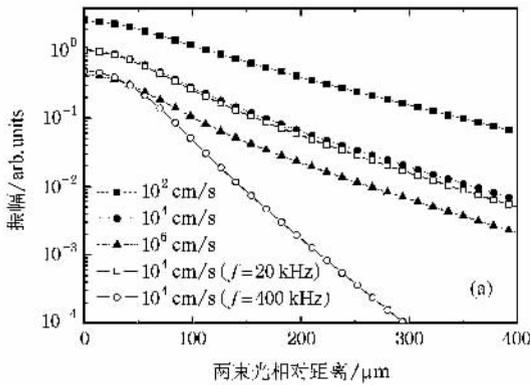


图5 载流子扩散系数对相位径向位置扫描曲线的影响

从图 4 看出,扩散系数对 MFCA 信号的影响非常显著:当两束光相对距离小于扩散长度时,扩散系数的增加必然使探测区载流子向外扩散的速度增加,导致 MFCA 振幅随之减小;当相对距离大于扩散长度时,探测区内载流子主要是从激发区扩散过来的,因此扩散系数越大,探测区内的载流子浓度越高,信号也就越强.显然,扩散系数对振幅的这种影响存在一个临界位置(主要由扩散系数、光斑半径和有效扩散长度  $L_{app}$  决定).在这个临界位置处,振幅几乎不随扩散系数的变化而变化,即扩散系数对振幅不产生影响.这个临界点位置随频率的增加向相对距离减小的方向移动.扩散系数对相位径向位置扫描曲线的影响都是一致的,如图 5 所示.相位延迟都随扩散系数的减小而增加.从图 4 和图 5 知,在相



对距离远大于载流子有效扩散长度时,扩散系数对振幅和相位的影响随相对距离的增加而增加.

### 3.3. 前表面复合速度(FSRV)对调制自由载流子吸收信号的影响

图 6 中实符号(■, ●, ▲)标出的曲线显示了调制频率为 1 kHz, FSRV 从  $10^2$  cm/s 变化到  $10^6$  cm/s 时的径向位置扫描曲线.图 6(b)中插图是放大的对应的相位径向位置扫描曲线.从图中看出,随 FSRV 的增加, MFCA 振幅(图 6(a)) and 相位延迟(图 6(b))中插图都随之减小,并且 FSRV 对振幅和相位的影响随两束光相对距离的增加而有一定增加.在其他频率点, FSRV 对径向位置扫描曲线也有类似的影响,这里不再详细阐述.

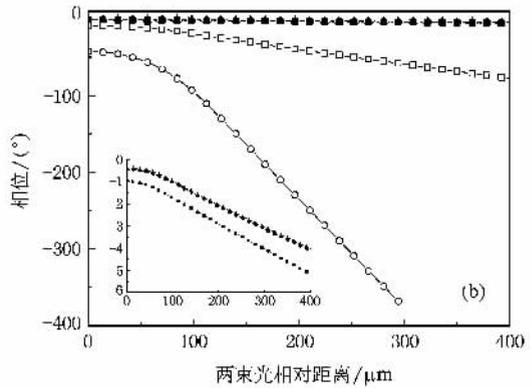


图 6 FSRV 对相位径向位置扫描曲线的影响

仿真结果表明相位径向位置扫描曲线仅对  $500$  cm/s— $10^4$  cm/s 范围内的 FSRV 有较好的灵敏度,而对于小于  $500$  cm/s 和大于  $10^4$  cm/s 的 FSRV 的灵敏度都较差;振幅径向位置扫描曲线对  $500$  cm/s— $10^6$  cm/s 范围内的 FSRV 都有较好的灵敏度,其测量范围比相位大两个数量级.因此在拟合中包含振幅信息能有效改善 MFCA 对 FSRV 的测量范围、提高测量精度.

图 6 也给出 FSRV 为  $10^4$  cm/s, 调制频率分别为  $20$  kHz 和  $400$  kHz 的位置扫描曲线(符号 □, ○ 给出的曲线).从图中可以看出,随频率的增加,振幅减小、相位延迟增加,且振幅衰减程度和相位延迟程度随相对距离的增加而增加.

从以上分析来看,各个输运参数对径向位置扫描曲线的影响存在显著的差异:寿命仅对低频至中频的位置扫描曲线有显著影响,振幅和相位延迟随寿命的增加而增加,且寿命对振幅和相位的影响随

着相对距离的增加而增加,但是 MFCA 信号对寿命的灵敏度随寿命的增加而逐渐降低;扩散系数在整个频率范围内都对扫描曲线有显著影响,当抽运-探测光相对距离远大于有效扩散长度时,随扩散系数的增加,振幅随之增加、相位延迟随之减小;在整个频率范围内,振幅和相位延迟随 FSRV 的增加而减小.

综合上面分析,不同输运参数对 MFCA 信号产生不同影响,这使我们可以通过实验测量样品在不同调制频率时的径向位置扫描曲线,然后再通过多参数拟合获取半导体的输运参数值.事实上, MFCA 信号对三个输运参数的灵敏度随两束光相对距离的增加而增加,因此相对于频率响应曲线拟合,通过拟合多个不同频率时的径向位置扫描实验曲线能有效提高同时测量三个参数的准确性.

### 4. 实 验

实验框图如图 7 所示. 一束光子能量大于半导体禁带宽度、光强被周期性调制的抽运光( 785 nm )照射到半导体硅片表面, 在半导体表面附近激发出自由载流子, 采用另一束光子能量小于半导体禁带宽度的探测光( 1310 nm )监测自由载流子浓度的周期变化. 透射的探测光经 InGaAs 探测器接收后, 送到锁相放大器进行检测得到 MFCA 信号, 两束光的相对距离  $r$  由精密电动平移台控制. 所使用的样品为晶向为( 111 )的 p 型单晶 Si, 单面抛光, 样品厚度  $450 \mu\text{m}$ , 电阻率  $8\text{--}13 \Omega\text{cm}$ .

为了从实验中获取载流子寿命、载流子扩散系数和 FSRV, 我们将实验结果拟合到前面建立的三维模型, 通过优化算法求取均方差<sup>[15]</sup>的极小值, 其详细过程参考文献 [14] 和 [15]. 由于本测量方法对后表面( 没被抽运光照射的一面 )不敏感, 拟合过程中后表面设定为  $10^4 \text{cm/s}$ , 这是典型的半导体 Si 未抛光面的复合速度值<sup>[16]</sup>, 而仅对三个运输参数(  $\tau, D, s_1$  )通过多参数拟合确定.

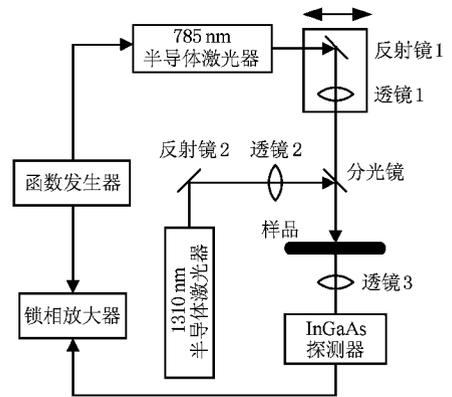


图 7 实验框图

图 8 给出了实验结果( 点 )及其理论拟合结果( 实线 ). 从图中可以看出, 实验和拟合结果符合较好. 最佳拟合结果为  $D = 19.2 \text{cm}^2/\text{s}$ ,  $\tau = 11 \mu\text{s}$ ,  $s_1 \approx 0 \text{cm/s}$ , 均方差为  $2.14 \times 10^{-3}$ . 扩散系数和载流子寿命的估计误差分别是  $\sim \pm 5\%$  和  $\leq \pm 10\%$ . 由于 MFCA 对较小的 FSRV(  $< 500 \text{cm/s}$  )有较小的敏感性, 因此在 FSRV 的拟合误差较大, 但是若 FSRV 在  $500 \text{cm/s} \sim 10^6 \text{cm/s}$  内, 则拟合精度将会得到很大改善<sup>[15]</sup>.

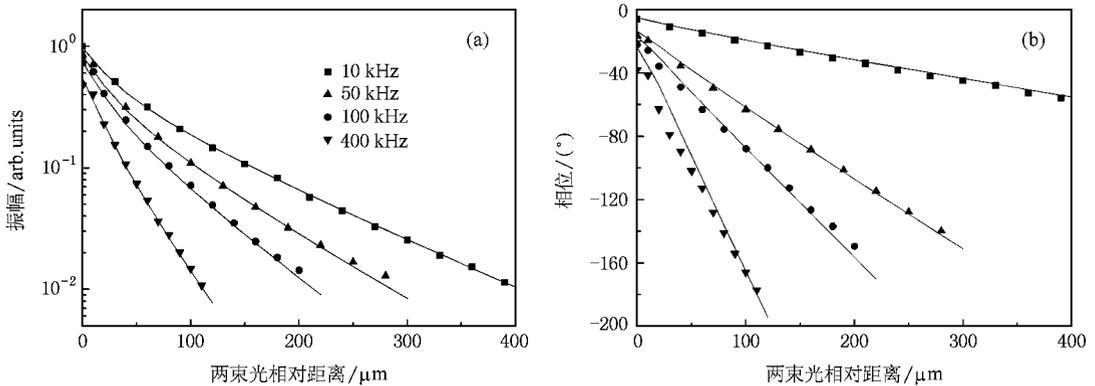


图 8 实验及拟合结果

### 5. 结 论

调制自由载流子吸收检测技术具有高分辨率、非接触、非破坏性等优点, 是检测半导体载流子运输

特性的一种可行方法. 由于 MFCA 信号对载流子运输参数的灵敏度随抽运 - 探测光相对距离的增加而增加, 因此相对传统的频率扫描曲线拟合, 采用径向位置扫描曲线拟合将使 MFCA 技术测量半导体载流子运输特性参数的准确度得到较大改善.

[ 1 ] Sami F, Schwartz R J, Pierret R F, Au W M 1988 *Proceedings of the 20th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* p575

[ 2 ] Sami F, Giles F P, Schwartz R J, Gray J L 1992 *Solid-State Electronics* 35 311

- [ 3 ] Glunz S W , Warta W 1995 *J. Appl. Phys.* **77** 3243
- [ 4 ] Glunz S W , Sproul A B , Warta W , Wettling W 1994 *J. Appl. Phys.* **75** 1611
- [ 5 ] Schönecker A , Eikelboom J A , Burgers A R , Löfgen P , Leguijt C , Sinke W C 1996 *J. Appl. Phys.* **79** 1497
- [ 6 ] Radford W A , Shanley J F , Doyle O L 1983 *J. Vac. Sci. Technol. A* **1** 1700
- [ 7 ] Schmidt J 1999 *IEEE Transactions . on Electron Devices* **46** 2018
- [ 8 ] Isenberg J , Riepe S , Glunz S W , Warta W 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 4268
- [ 9 ] Dietzel D , Gibkes J , Chotikaprakhan S , Bein B K , Pelz J 2003 *Int. J. Thermophys.* **24** 741
- [ 10 ] Velinov T , Burov G , Bransalov K , Roger J P , Mansanares A 1994 *Journal de Physique IV* **4** C7
- [ 11 ] Shen Y H , Liang Z Z , Xu L H , Cai Q Q 1992 *Handbook of Applied Mathematics* ( Beijing Science Press ) p636 ( in Chinese ) [ 沈永欢、梁在中、许履瑚、蔡倩倩 1992 应用数学手册(北京 科学出版社)第 636 页 ]
- [ 12 ] Shaughnessy D , Mandelis A 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 5236
- [ 13 ] Smith R A 1966 *Semiconductor* ( Beijing Science Press ) p224 ( in Chinese ) [ R. A. 史密斯著、高鼎三、张月清、刘文明、田人和译 1966 半导体(北京 科学出版社)第 224 页 ]
- [ 14 ] Zhang X , Li B , Gao C 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 112120
- [ 15 ] Zhang X , Li B , Gao C 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 033709
- [ 16 ] Istratov A A , Hieslmaier H , Weber E R 2000 *Appl. Phys. A* **70** 489

## Measurement of electronic transport property of semiconductors by three-dimensional modulated free carrier absorption technique \*

Zhang Xi-Ren<sup>1,2)†</sup> Li Bin-Cheng<sup>1)‡</sup> Liu Xian-Ming<sup>1)‡</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Optics and Electronics , Chinese Academy of Sciences , Chengdu 610209 , China*

<sup>2</sup> *Graduate School of the Chinese Academy of Science , Beijing 100049 , China*

( Received 23 October 2007 ; revised manuscript received 26 May 2008 )

### Abstract

A three-dimensional model for the modulated free carrier absorption ( MFCA ) is developed to measure the electronic transport properties ( the carrier lifetime , the carrier diffusivity , and the front surface recombination velocity ) of semiconductor wafers. The dependence of MFCA amplitude and phase on the electronic transport properties at different pump-probe-beam separation and different modulation frequencies is investigated. It is found that the sensitivities of MFCA signal to individual transport parameters increase with increasing two-beam separation. An experiment with a silicon wafer is performed and the carrier lifetime , carrier diffusivity , and front surface recombination velocity are determined simultaneously and unambiguously by fitting the observed values of the MFCA amplitude and phase as functions of the separation between the pump and probe laser spots , measured at several modulation frequencies covering an appropriate range.

**Keywords** : modulated free carrier absorption , electronic transport properties , radial scan

**PACC** : 7850G , 8170C , 8170G

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 60676058 ) , and the Science and Technology Foundation of Sichuan Province for Young Scientists.

† E-mail : xiren3208@163.com

‡ Corresponding author. E-mail : bcli@ioe.ac.cn