

双波长自由载流子吸收技术测量半导体载流子体寿命和表面复合速率

王谦 刘卫国 巩蕾 王利国 李亚清

Determination of carrier bulk lifetime and surface recombination velocity in semiconductor from double-wavelength free carrier absorption

Wang Qian Liu Wei-Guo Gong Lei Wang Li-Guo Li Ya-Qing

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 67, 217201 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20181509

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181509>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I21>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[一种基于3D打印技术的结构型宽频吸波超材料](#)

Structural broadband absorbing metamaterial based on three-dimensional printing technology
物理学报.2018, 67(8): 084202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172262>

[基于格林函数法的奇型Mathieu-Gaussian光束](#)

Odd version Mathieu-Gaussian beam based on Green function
物理学报.2017, 66(20): 204201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.204201>

[光抽运太赫兹探测技术研究ZnSe的光致载流子动力学特性](#)

Photocarrier dynamics in zinc selenide studied with optical-pump terahertz-probe spectroscopy
物理学报.2016, 65(24): 247201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.247201>

[掺铁铌酸锂晶体的光电导衰减特性研究](#)

Photo-conductivity decay properties of Fe-doped congruent lithium niobate crystals
物理学报.2013, 62(3): 037201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.037201>

[聚合物材料空间电荷陷阱模型及参数](#)

A space charge trapping model and its parameters in polymeric material
物理学报.2012, 61(1): 017201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.017201>

双波长自由载流子吸收技术测量半导体载流子体寿命和表面复合速率*

王谦[†] 刘卫国 巩蕾 王利国 李亚清

(西安工业大学光电工程学院, 西安 710021)

(2018年8月10日收到; 2018年8月30日收到修改稿)

提出了采用双波长自由载流子吸收技术同时测量半导体材料载流子体寿命和前表面复合速率的方法. 通过数值模拟, 定性分析了不同载流子体寿命和前表面复合速率对信号的影响, 同时对测量参数的可接受范围和不确定度进行计算并与传统频率扫描自由载流子吸收方法测量结果进行比较. 结果表明: 提出的双波长自由载流子吸收方法可明显减小载流子体寿命和前表面复合速率的测量不确定度, 提高参数测量精度; 表面杂质和缺陷越多的样品, 其前表面复合速率测量不确定度越小. 进一步分析表明, 此现象与不同波长激光抽运产生的过剩载流子浓度分布不同有关.

关键词: 自由载流子吸收, 载流子体寿命, 表面复合速率, 不确定度

PACS: 72.20.Jv, 42.25.Bs, 78.20.nb

DOI: 10.7498/aps.67.20181509

1 引言

载流子体寿命(τ)、扩散系数(D)和表面复合速度(S)等参数是表征半导体材料特性的重要参数, 这些参数的精确测量能够为半导体工艺优化和后续器件的制作提供有用信息^[1]. 用于测量上述参数的光学非接触无损伤检测方法多种多样, 包括光电导衰减(photoconductance decay)^[2]、光致发光(photoluminescence)^[3,4]、光热辐射(photothermal radiometry)^[5]、光载流子辐射(photocarrier radiometry)^[6-8]和自由载流子吸收(free carrier absorption)^[9-22]等.

调制自由载流子吸收(modulated free carrier absorption, MFCA)是自由载流子吸收技术的一种. MFCA技术最初的测量通常通过调节抽运光或探测光波长和功率的方式测量半导体材料的能级结构^[13]、载流子寿命^[14]和表面复合速率^[15]等参数. Sanii等^[16]率先提出频率扫描方式自由载流

子吸收技术, 在一维载流子分布模型基础上分析了自由载流子吸收信号和抽运光调制频率之间的关系, 对MFCA技术理论进行了完善. 由于忽略了抽运光和探测光光斑尺寸对信号的影响, 加上采用多参数拟合方式同时确定多个参数值, 拟合结果的惟一性和精度不高. 随后, 张希仁等^[17-19]对三维载流子分布进行了推导, 考虑了抽运光束大小对载流子分布的影响. 同时, 采用在多个频率处做抽运-探测光相对位置的径向扫描曲线和多参数拟合, 一定程度上提高了参数的测量精度, 但实验测量对光束扫描的机械对准精度要求较高, 实验重复性和稳定性有待提高.

本文提出了一种双波长自由载流子吸收方法, 与传统MFCA技术相比, 该技术无需多参数拟合即可得到载流子体寿命和表面复合速率, 载流子输运参数的测量精度明显提高. 对于前表面复合速率越大的样品, 更多的载流子通过表面杂质和缺陷复合消失, 表面复合速率的测量精度明显提高.

* 国家自然科学基金青年科学基金(批准号: 61704132)和西安工业大学校长基金自选项目(批准号: XAGDXJJ16007)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: qian_wang521@163.com

2 理论模型

如图 1 所示, 当一束波长为 λ 的抽运光束照射到厚度为 L 的均匀半导体样品表面时, 如果抽运光束的光子能量高于被测半导体材料的禁带宽度, 样品将吸收光子能量而形成过剩载流子, 即过剩电子和空穴. 光激发过剩载流子由于浓度不均匀而向样品表面和体内扩散, 在扩散的过程中载流子通过多种复合机制进行复合, 如声子协助非辐射复合和发射光子的辐射复合. 而当另一束光子能量小于半导体禁带宽度的探测光束照射到样品表面相同位置时, 由于浓度周期性变化的载流子对探测光存在微弱吸收, 即自由载流子吸收, 使得透射的探测光光强呈周期性变化. 该周期性变化的信号即为 MFCA 信号, 可表示为 [19,22]

$$S(\omega, \lambda) = \text{const} \cdot \int_0^\infty \Delta \tilde{N}(\xi, \omega, \lambda) J_0(\xi r_0) \times e^{-\xi^2 a^2 / 4 \xi} \cdot d\xi, \quad (1)$$

式中, const 为常数; $\omega = 2\pi f$ 为角频率; f 为抽运光束的调制频率; $J_0(\xi)$ 为第一类零阶 Bessel 函数; r_0 为抽运光-探测光间距; $a = \sqrt{a_1^2 + a_2^2}$ 为有效光束尺寸, a_1 为抽运光束尺寸, a_2 为探测光束尺寸. $\Delta \tilde{N}(\xi, \omega, \lambda)$ 通过在 Hankle 空间求解三维载流子输运方程, 结合边界条件得到

$$\begin{aligned} & \Delta \tilde{N}(\xi, \omega, \lambda) \\ &= \frac{\alpha P \eta \lambda (1 - R)}{2hc\pi D(\alpha^2 - k^2)} \left[\left(\frac{b_1 e^{-2kL} - b_2 e^{-(\alpha+k)L}}{B_2 - B_1 e^{-2kL}} \right) e^{kL} \right. \\ & \quad + \left. \frac{B_2 b_1 - B_1 b_2 e^{-(\alpha+k)L}}{B_2 - B_1 e^{-2kL}} \right) \frac{1 - e^{-kL}}{k} \\ & \quad \left. - \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} \right], \quad (2) \end{aligned}$$

式中, α 为样品对抽运光束的吸收系数; η 为量子转换效率; P 为入射光功率; h 为普朗克常数; c 为真空中的光速; R 为样品表面对抽运光的反射率; D 为扩散系数; $k^2 = \xi^2 + \sigma^2$, $\sigma = \sqrt{\frac{1 + i\omega\tau}{D\tau}}$ 为载流子密度波波数, τ 为载流子体寿命;

$$\begin{aligned} B_1 &= \frac{Dk - S_1}{Dk + S_1}, & B_2 &= \frac{Dk + S_2}{Dk - S_2}, \\ b_1 &= \frac{D\alpha + S_1}{Dk + S_1}, & b_2 &= \frac{D\alpha - S_2}{Dk - S_2}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中, S_1 和 S_2 分别为前后表面复合速率.

实验测量中, 常采用锁相放大器测量 MFCA 信号的振幅

$$A(\omega, \lambda) = \text{abs}(S(\omega, \lambda)) \quad (4)$$

和相位

$$\phi(\omega, \lambda) = \text{arg}(S(\omega, \lambda)). \quad (5)$$

从上述公式可以看出 MFCA 信号与抽运光调制频率、抽运光-探测光间距和波长均有关, 因此通过改变抽运光的调制频率或抽运光-探测光间距记录相应的振幅和相位信号, 采用多参数拟合方式就可以同时得到多个载流子输运参数值, 包括载流子体寿命、扩散系数和前后表面复合速率等, 这就是传统 MFCA 技术常用的测量方式. 由于拟合参数较多, 各参数的测量精度并不高, 尤其对于表面复合速率 [18,19]. 本文通过测量两个不同抽运光波长时的自由载流子吸收信号, 将其振幅相除, 相位相减, 得到两个不同抽运光波长时相应的 MFCA 信号的振幅比和相位差:

$$\text{Amp}_{\text{ratio}} = \frac{A(\omega, \lambda_1)}{A(\omega, \lambda_2)}, \quad (6)$$

$$\text{Pha}_{\text{diff}} = \phi(\omega, \lambda_1) - \phi(\omega, \lambda_2). \quad (7)$$

此处 $\text{Amp}_{\text{ratio}}$ 和 Pha_{diff} 分别代表在波长 λ_1 和 λ_2 下 MFCA 信号振幅的比值和相位的差值, 且均和调制频率有关. 通过将实验得到的 $\text{Amp}_{\text{ratio}}$ 和 Pha_{diff} 与理论数据进行比较得到相应的载流子体寿命和前表面复合速率.

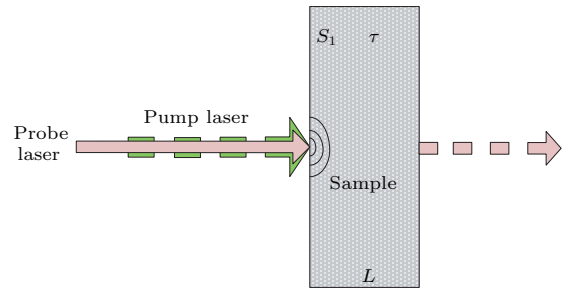


图 1 MFCA 技术原理示意图

Fig. 1. Schematic diagram of MFCA technique.

3 仿真结果与分析

由于载流子扩散系数可通过其他测量方法精确得到 [5], 仿真中载流子扩散系数设置为 $20 \text{ cm}^2/\text{s}$. 同时后表面复合速率对信号影响较小, 仿真中将其设置为 100 m/s . 其他参数设置如下:

样品厚度 525 μm , 有效光束尺寸设置为 50 μm , 抽运光功率 50 mW, 抽运光调制频率 2 kHz.

仿真中两个抽运光波长分别设置为 830 nm 和 405 nm, 对应的单晶硅吸收系数分别为 $6.6 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$ 和 $1.02 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$, 对应的单晶硅表面反射率分别设置为 0.31 和 0.48 [7], 其他参数保持不变. 图 2 给出了相应的振幅比信号和相位差信号随载流子寿命和前表面复合速率变化的三维结果. 横纵坐标分别取载流子寿命和前表面复合速率的对数值. 可以看出, 随着寿命的增加, 振幅比逐渐减小但并不明显, 相位差逐渐增大, 当前表面复合速率较大时尤为明显; 随着前表面复合速率的增加, 振幅比逐渐下降, 相位差逐渐增加, 当载流子寿命较大时尤为明显.

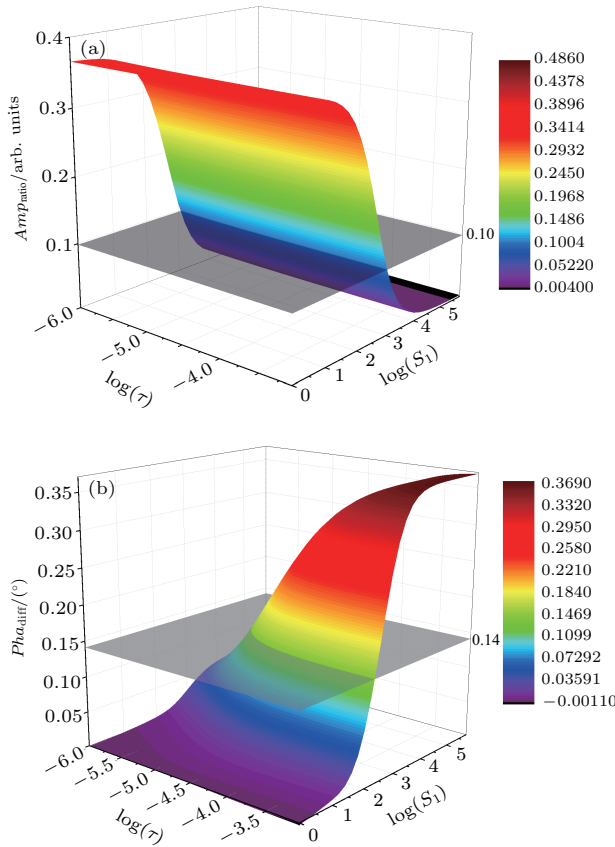


图2 不同 τ 和 S_1 下振幅比和相位差信号仿真结果 (a) 振幅比; (b) 相位差
Fig. 2. Simulated results over typical ranges for τ and S_1 : (a) Amp_{ratio} ; (b) Pha_{diff} .

为了分离载流子体寿命和前表面复合速率, 需要将实验测量得到的振幅比和相位差与仿真数据进行对比. 此处, 假设实验测量得到的 Amp_{ratio} 和 Pha_{diff} 分别为 0.10 和 0.14° , 如图 2 所示. 可以看到, 实验得到的 Amp_{ratio} 和 Pha_{diff} 平面与仿真的

三维曲面存在交叉, 从而得到如图 3 所示的振幅比和相位差相关的体寿命-前表面复合速率曲线. 二者的交叉点对应的横纵坐标值即为所求的载流子体寿命和前表面复合速率的对数值. 从图 3 可以看出, 相应的交叉点的载流子体寿命和前表面复合速率分别为 10 μs 和 10^3 m/s .

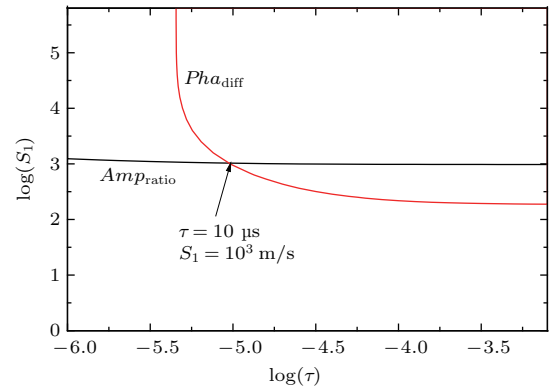


图3 载流子体寿命和表面复合速率的分离
Fig. 3. Separation of the carrier bulk lifetime and surface recombination velocity.

由于实验过程中不可避免地存在各种各样的误差, 如抽运激光波长、功率、光束尺寸等误差以及随机噪声和系统响应的影响 [20,21] 等. 此处, 假设各类误差导致的振幅比和相位差总的相对误差为 2%. 此时, 前表面复合速率-寿命曲线如图 4 所示, 虚线对应最大相对误差 2% 时的值. 很明显, 在此仿真数据附近, 误差对振幅比的影响较小, 而对相位差的影响较为明显, 与图 2 中的仿真结果相一致. 因此可以从图 4 得到存在此误差时的载流子体寿命和前表面复合速率的可接受范围以及相应不确定度的大小.

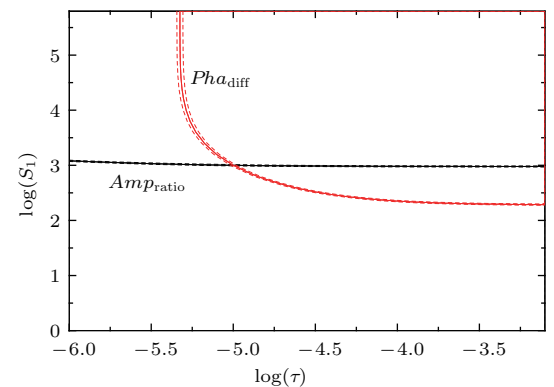


图4 提取载流子运输参数的不确定度分析
Fig. 4. Uncertainty analysis of the extracted carrier transport parameters.

表 1 列出了不同载流子寿命-前表面复合速率组合时提取的参数值的可接受范围及相应不确定度的大小. 可以看出, 当前表面复合速率一定时, 提取的体寿命不确定度随体寿命的增大而增大, 而前表面复合速率的不确定值变化不大. 例如, 对于 $\tau = 10 \mu\text{s}$, $S_1 = 10^3 \text{ m/s}$ 的样品, 提取的体寿命和前表面复合速率的不确定度分别为 $\pm 5.55\%$ 和 $\pm 2.83\%$, 而当寿命增大到 $\tau = 100 \mu\text{s}$ 时, 相应的不确定度分别为 $\pm 25.70\%$ 和 $\pm 2.77\%$. 同时, 无论低寿命样品还是高寿命样品, 随着前表面复合速率的增加, 体寿命和前表面复合速率的不确定度均明显减小. 当表面复合速率大于 10^3 m/s 后, 不确定度的变化较小. 因此, 该技术对于表面质量较差或表面缺陷和杂质较多的样品的表面复合速率具有较高的测量精度.

为了与传统频率扫描 MFCA 技术计算的载流子输运参数进行对比分析, 通过多参数拟合方式分别计算了波长为 830 和 405 nm 激光抽运时载流

子寿命和前表面复合速率的可接受取值范围和相应的不确定度结果, 如表 2 所列. 其他参数与上述设定值保持一致. 考虑到传统测量中仅采用单一波长抽运光进行激发, 仿真中假设各类误差导致的振幅和相位信号总的相对误差为 1%. 首先比较表 2 所列不同波长激光抽运时的计算结果, 可以看出, 随着抽运光波长的减小, 载流子体寿命的测量不确定度没有明显变化, 而前表面复合速率的测量不确定度变化较大. 当抽运光波长减小时, 无论对于低寿命样品 ($\tau = 10 \mu\text{s}$) 还是高寿命样品 ($\tau = 100 \mu\text{s}$), 前表面复合速率的测量不确定度均有所减小. 例如对于 $\tau = 10 \mu\text{s}$, $S_1 = 10^3 \text{ m/s}$ 的样品, 体寿命和前表面复合速率的不确定度分别从 830 nm 波长时的 $\pm 17.70\%$ 和超过 $\pm 100\%$ 变化为 405 nm 波长时的 $\pm 18.50\%$ 和 $\pm 31.46\%$. 因此, 在传统频率扫描 MFCA 技术中采用较短波长激光抽运可以减小前表面复合速率的测量不确定度, 提高其测量精度.

表 1 提出的 MFCA 计算的硅片载流子输运参数结果

Table 1. Extracted carrier transport parameters of silicon wafers by the proposed MFCA.

$\tau/\mu\text{s}$	$S_1/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	Extracted $\tau/\mu\text{s}$ (uncertainty)	Extracted $S_1/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (uncertainty)
10	10^2	8.44—12.15 ($\pm 18.55\%$)	87.06—110.53 ($\pm 11.74\%$)
10	10^3	9.46—10.57 ($\pm 5.55\%$)	975.67—1032.28 ($\pm 2.83\%$)
10	10^4	9.50—10.50 ($\pm 5.00\%$)	9854.62—10473.93 ($\pm 3.10\%$)
100	10^2	— (over $\pm 100\%$)	87.66—110.23 ($\pm 11.29\%$)
100	10^3	80.51—131.91 ($\pm 25.70\%$)	976.15—1031.55 ($\pm 2.77\%$)
100	10^4	82.28—126.40 ($\pm 22.06\%$)	9786.33—10351.75 ($\pm 2.83\%$)

表 2 传统 MFCA 计算的硅片载流子输运参数结果

Table 2. Extracted carrier transport parameters of silicon wafers by the conventional MFCA.

λ/nm	$\tau/\mu\text{s}$	$S_1/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	Extracted $\tau/\mu\text{s}$ (uncertainty)	Extracted $S_1/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (uncertainty)
830	10	10^2	8.26—12.35 ($\pm 20.45\%$)	85.70—117.21 ($\pm 15.76\%$)
	10	10^3	8.39—11.93 ($\pm 17.70\%$)	— (over $\pm 100\%$)
	10	10^4	8.41—11.55 ($\pm 15.70\%$)	— (over $\pm 100\%$)
	100	10^2	— (over $\pm 100\%$)	87.91—114.24 ($\pm 13.17\%$)
	100	10^3	— (over $\pm 100\%$)	— (over $\pm 100\%$)
	100	10^4	— (over $\pm 100\%$)	— (over $\pm 100\%$)
405	10	10^2	8.29—12.26 ($\pm 19.85\%$)	90.47—110.23 ($\pm 9.88\%$)
	10	10^3	8.40—12.10 ($\pm 18.50\%$)	766.45—1395.68 ($\pm 31.46\%$)
	10	10^4	8.42—11.89 ($\pm 17.35\%$)	— (over $\pm 100\%$)
	100	10^2	— (over $\pm 100\%$)	92.06—108.70 ($\pm 8.32\%$)
	100	10^3	— (over $\pm 100\%$)	786.59—1352.73 ($\pm 28.31\%$)
	100	10^4	— (over $\pm 100\%$)	— (over $\pm 100\%$)

比较表 2 和表 1 计算结果可以看出, 对于具有较低前表面复合速率的样品 ($S_1 = 10^2$ m/s), 载流子体寿命和前表面复合速率的测量不确定度结果与提出的双波长 MFCA 技术结果基本一致. 而对于较高的前表面复合速率的样品 ($S_1 = 10^3$ m/s), 载流子体寿命和前表面复合速率的测量不确定度值远大于提出的双波长 MFCA 技术的不确定度值. 例如, 对于低寿命样品 ($\tau = 10$ μ s, $S_1 = 10^3$ m/s), 波长为 830 nm (405 nm) 激光抽运时传统频率扫描方式提取的体寿命和前表面复合速率的不确定度分别为 $\pm 17.70\%$ ($\pm 18.50\%$) 和超过 $\pm 100\%$ ($\pm 31.46\%$), 均远大于表 1 中相应样品的 $\pm 5.55\%$ 和 $\pm 2.83\%$; 对于高寿命样品 ($\tau = 100$ μ s, $S_1 = 10^3$ m/s), 波长为 830 nm 激光抽运时传统频率扫描方式测量的两参数不确定度均超过 $\pm 100\%$, 波长为 405 nm 激光抽运时传统频率扫描方式提取的体寿命的不确定度超过 $\pm 100\%$, 前表面复合速率的不确定度为 $\pm 28.31\%$, 也均远大于表 1 中相应样品的 $\pm 25.70\%$ 和 $\pm 2.77\%$. 对比分析结果表明, 双波长 MFCA 技术可以有效提高载流子体寿命和前表面复合速率的测量精度, 尤其对于前表面复合速率.

为了分析提出的双波长 MFCA 技术对前表面复合速率测量精度提高的原因, 图 5 给出了不同波长激光抽运时样品内过剩载流子的分布情况. 单晶硅在 830 nm 和 405 nm 波长处的吸收系数不同, 二者在单晶硅中的穿透深度也不相同, 分别为 15 μ m 和 0.098 μ m, 因此光激发过剩载流子在样品中的分布情况也有所差别. 从图 5 也可以明显看出, 随着抽运光波长的减小, 更多的过剩载流子产生在样品近表面附近, 通过表面杂质和缺陷非辐射复合消失, 表面复合对信号的影响更加明显, 因此采用双波长抽运可以有效提高前表面复合速率的测量精度. 同时可以看出, 采用短波长光抽运时, 过剩载流子的浓度明显减小, 从 830 nm 时的峰值浓度 3.5×10^{22} m^{-3} 减小到 405 nm 时的 6×10^{20} m^{-3} .

传统 MFCA 技术采用频率扫描或位置扫描和多参数拟合测量载流子输运参数, 可以同时测量多个参数值, 采用锁相方式使得信号具有较高的信噪比, 但也存在一些问题. 例如, 测量结果受测量系统本身的频率响应的影响较为严重, 该问题可以通过 Huang 和 Li [21] 提出的变间距方式得以消除, 与位置扫描方式类似, 该消除方式对抽运光-探测光

间距的控制要求较高. 另外, 传统 MFCA 技术普遍采用单一抽运波长, 限制了参数测量精度的提高, 该问题可以通过增加抽运光波长数量进行改善, 如本文提出的双波长方式. 通过上述仿真分析, 本文提出的双波长 MFCA 技术可以大幅度提高载流子体寿命和前表面复合速率的测量精度, 但也存在一些问题. 例如, 抽运光波长变换时光路变化引入的误差, 短波长抽运时信噪比的减小等. 前者可以通过优化实验光路如将不同波长的抽运激光器搭建在同一实验装置中进行改善, 后者可以通过采用灵敏度更高的探测器如光电倍增管提高信号的信噪比. 需要指出的是, 由于测量系统的频率响应主要来自于探测器和锁相放大器等测量仪器, 如果忽略激光器响应对测量结果的影响, 本文提出的双波长 MFCA 测量结果则不受系统响应的影响, 避免了由于系统响应测量不准确而引入的误差.

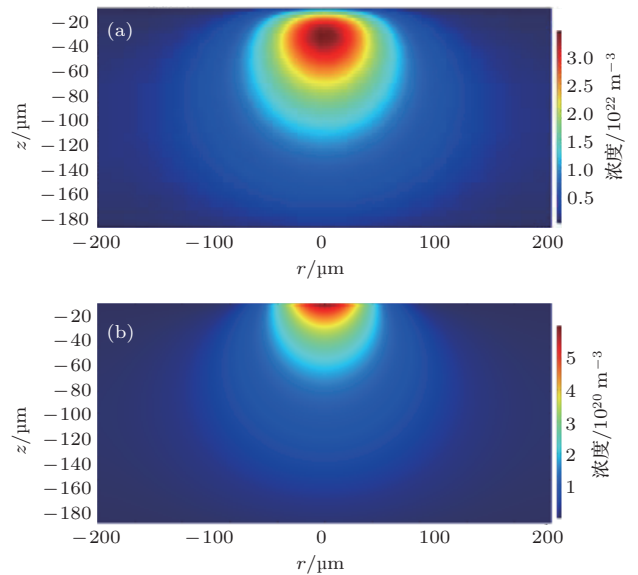


图 5 不同抽运光波长下过剩载流子的空间分布 (a) 830 nm; (b) 405 nm

Fig. 5. Spatial profiles of the excess carrier with different pump wavelengths: (a) 830 nm; (b) 405 nm.

4 结 论

MFCA 检测技术具有高分辨率、非接触无损伤等优点, 是半导体材料电子输运特性的一种非常具有应用前景的检测技术. 本文提出了双波长自由载流子吸收测量方法, 仿真结果表明该方法能够测量载流子体寿命和前表面复合速率, 同时大幅度提高了参数的测量精度, 尤其对于表面杂质和缺陷较多的样品, 前表面复合速率的测量精度提高更加明

显. 通过优化实验条件, 如选择合适的抽运光调制频率和抽运光波长等, 有望进一步提高载流子输运参数的测量精度.

参考文献

- [1] Schroder D K 2006 *Semiconductor Material and Device Characterization Third Edition* (New York: Wiley) pp389–390
- [2] Drummond P J, Bhatia D, Kshirsagar A, Ramani S, Ruzyllo J 2011 *Thin Solid Films* **519** 7621
- [3] Guidotti D, Batchelder J S, Finkel A, Gerber P D 1989 *J. Appl. Phys.* **66** 2542
- [4] Wang K, Kampwerth H 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 173103
- [5] Rodriguez M E, Mandelis A, Pan G, Nicolaides L, Garcia J A, Riopel Y 2000 *J. Electrochem. Soc.* **147** 687
- [6] Mandelis A, Batista J, Shaughnessy D 2003 *Phys. Rev. B* **67** 205208
- [7] Huang Q P, Li B C 2012 *J. Appl. Phys.* **111** 093729
- [8] Wang Q, Liu W 2017 *J. Appl. Phys.* **122** 165702
- [9] Luke K L, Cheng L J 1987 *J. Appl. Phys.* **61** 2282
- [10] Ren S, Li B, Huang Q 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 243702
- [11] Bychto L, Patryn A 2015 *Phys. Status Solidi B* **252** 1311
- [12] Zhang X R, Gao C M 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 137801 (in Chinese) [张希仁, 高春明 2014 物理学报 **63** 137801]
- [13] Conway E J 1970 *J. Appl. Phys.* **41** 1689
- [14] Chen F Y 1985 *Appl. Phys. Lett.* **47** 858
- [15] Polla D L 1983 *IEEE Electron Dev. Lett.* **4** 185
- [16] Sani F, Schwartz R J, Pierret R F 1988 *Proceedings of the 20th IEEE Photovoltaic Specialists Conference Las Vegas, USA, September 26–30, 1988* p575
- [17] Zhang X R, Li B C, Liu X M 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7310 (in Chinese) [张希仁, 李斌成, 刘显明 2008 物理学报 **57** 7310]
- [18] Zhang X R, Li B C, Gao C 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 112120
- [19] Zhang X R, Li B C, Liu X M 2008 *J. Appl. Phys.* **104** 103705
- [20] Huang Q P, Li B C, Liu X M 2010 *J. Phys. : Conf. Ser.* **214** 012084
- [21] Huang Q P, Li B C 2011 *Rev. Sci. Instrum.* **82** 043104
- [22] Huang Q P, Li B C 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 023708

Determination of carrier bulk lifetime and surface recombination velocity in semiconductor from double-wavelength free carrier absorption*

Wang Qian[†] Liu Wei-Guo Gong Lei Wang Li-Guo Li Ya-Qing

(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

(Received 10 August 2018; revised manuscript received 30 August 2018)

Abstract

In microelectronic and photovoltaic industry, semiconductors are the basic materials in which impurities or defects have a serious influence on the properties of semiconductor-based devices. The determination of the electronic transport properties, i.e., the carrier bulk lifetime (τ) and the front surface recombination velocity (S_1), is important for evaluating the semiconductor material. In this paper, a method of simultaneously measuring the bulk lifetime and the front surface recombination rate of semiconductor material by using double-wavelength free carrier absorption technique is presented. The effect of the carrier bulk lifetime and the front surface recombination rate on the modulated free carrier absorption signal (Amp_{ratio} and Pha_{diff}) are qualitatively analyzed. The process of extracting the bulk lifetime and the front surface recombination rate by the proposed double-wavelength free carrier absorption method are also given. At the same time, the uncertainties of the parameters extracted by this method are calculated and compared with those obtained by the traditional frequency-scan free carrier absorption technique. The results show that the proposed method can significantly reduce the uncertainties of the measurement parameters, especially for the samples with higher surface recombination rate. For the sample with a lower front surface recombination rate ($S_1 = 10^2$ m/s), the uncertainty of the carrier bulk lifetime and the front surface recombination velocity obtained by the proposed method are almost in agreement with those obtained by the conventional frequency-scan method. On the contrary, for the samples with higher front surface recombination rate ($S_1 \geq 10^3$ m/s), the uncertainties of the carrier transport parameters are much smaller than those from the conventional frequency-scan method. For example, the estimated uncertainty of the carrier bulk lifetime and the front surface recombination velocity for the sample with $\tau = 10$ μ s and $S_1 = 10^3$ m/s are approximately $\pm 5.55\%$ and $\pm 2.83\%$ by the proposed method, which are more improved than $\pm 18.50\%$ and $\pm 31.46\%$ by the conventional frequency-scan method with a wavelength of 405 nm. Finally, we explain the above phenomenon by analyzing the distribution of excess carrier concentration at different pump wavelengths. As the pump wavelength decreases, the more excess carriers are excited near the surface of the sample due to the greater absorption coefficient, and the influence of the surface recombination by the impurities and defects on the signal is more obvious. Therefore, the measurement accuracy of the front surface recombination rate can be improved effectively by using double wavelength pumping.

Keywords: free carrier absorption, carrier bulk lifetime, surface recombination velocity, uncertainty

PACS: 72.20.Jv, 42.25.Bs, 78.20.nb

DOI: 10.7498/aps.67.20181509

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61704132) and the Principal Fund from Xi'an Technological University, China (Grant No. XAGDXJJ16007).

[†] Corresponding author. E-mail: qian_wang521@163.com