

步进扫描时间分辨光谱及其在太阳 电池光电导上的应用*

朱建敏 沈文忠†

(上海交通大学物理系凝聚态光谱与光电子物理实验室, 上海 200030)

(2003 年 11 月 3 日收到 2004 年 3 月 25 日收到修改稿)

建立傅里叶变换步进扫描时间分辨光电导光谱, 并研究太阳能电池中与转换效率密切相关的少数载流子寿命. 实验选取三种典型的硅太阳能电池(单晶硅样品 1、多晶硅样品 2 和多晶硅样品 3), 发现其瞬态光电导的上升和衰退曲线可以分别用两个简单的指数函数描述. 由于有复合中心的参与, 复合过程中少数载流子的寿命比产生过程中的寿命短. 为验证实验结果的可靠性, 采用了提取样品少数载流子的体寿命和计算其有效扩散长度两种方法. 通过与太阳能电池暗伏安特性和负载特性研究相结合, 进一步分析和讨论了少数载流子寿命与短路电流、开路电压和转换效率的关系. 同时探讨了步进扫描时间分辨光谱实验的其他用途.

关键词: 步进扫描, 时间分辨, 硅太阳能电池, 瞬态光电导

PACC: 3580B, 7847, 7280C, 7220J

1. 引 言

近年来, 步进扫描(step-scan)干涉测量技术的实现, 极大地促进了傅里叶变换红外光谱学的发展. 步进扫描干涉测量技术以其引入时间记录动态光谱并且时间分辨率与光谱分辨率各自独立等优点^[1], 克服了传统的线性或连续扫描干涉测量技术的局限性, 从而使得与时间相关量及周期性调制与样品响应相位滞后的测量变得轻而易举. 因而已经被当作一种有力的工具来研究物质的光物理和光化学性质. 目前, 步进扫描时间分辨光谱(step-scan time-resolved spectroscopy)广泛地应用于液晶^[2]、聚合物^[3]、蛋白质^[4]、多孔硅^[5]、金属电极^[6], 以及其他化学物质^[7]或生物分子在激光^[3-5]、电脉冲^[2]触发下产生的动态过程研究. 为解决材料科学、生命科学、化学和物理学中各类基础性研究和工业问题提供了新的途径.

然而, 从整体上来看, 步进扫描技术更多的是应用在材料科学、生物学和光化学领域, 物理学中的应用较少. 本文尝试利用步进扫描技术, 测量太阳能电池少数载流子寿命的时间分辨光电导光谱. 为此, 自行

设计了实验装置. 这种实验装置不仅适用于对电脉冲、激光脉冲作用下的半导体(例如 Si, GaAs, InAs, ZnO, GaN, ZnTe 等, 不论是薄膜还是体材料)的光电导进行测试. 稍作变换后的实验装置还可以用于对电脉冲、激光脉冲、温度跳变及形变条件下半导体的瞬态吸收或反射光谱的测量. 已经有人用步进扫描技术来测量电场激发下掺杂 GaAs/AlGaAs 超晶格中热电子能量损失的红外吸收谱^[8]. 瞬态吸收或反射光谱对于研究外界扰动下半导体内能带结构和其他相关性质有重要意义^[9].

考虑到太阳能电池的结构不同于一般的体材料或者薄膜, 直接测量太阳能电池内部少数载流子比只测量基区材料少数载流子的寿命更有研究价值. 用步进扫描技术得到太阳能电池光电导的时间分辨光谱实际上是样品的瞬态光电导信号, 由此可以很容易地求出样品内少数载流子的寿命. 由于少数载流子寿命测得的是光生或者电生载流子通过各种辐射和非辐射渠道损失的效率, 所以少数载流子的寿命特别是室温下的载流子寿命会对太阳能电池的转换效率有重要影响. 进一步结合太阳能电池负载特性的测量可期望发现少数载流子复合寿命与短路电流及开路电压的关系.

* 国家杰出青年基金(批准号: 10125416)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: wzshen@sjtu.edu.cn

2. 实验方法

根据测量对象和待测物理量的不同,步进扫描技术的实验装置采取不同的设计方案.测量光脉冲或者电脉冲作用下半导体光电导的实验原理图如图 1 所示.在利用步进扫描测量瞬态光谱时,傅里叶变换红外光谱仪(美国 Nicolet Nexus 870)的触发信号端产生一电压为 5V、脉宽为 4ms 的方波电脉冲信号.该信号同时触发 DM74LS123 和内部探测器,以保证步进扫描和内部探测器收集数据的同步性.信号

引入到图示的 DM74LS123 芯片后,DM74LS123 芯片会输出一电压为 3.8V、脉宽可调的方波电脉冲,再经分压器分压至 1.0V 左右,目的是使输入到电光调制器(采用激光二极管内调制方式)里的电信号不致超过调制器的最大输入电压.激光器在电光调制器调制下产生与输入信号脉宽相同、光功率在 2mW 的激光脉冲,此激光脉冲作为外部光源输入到傅里叶变换红外光谱仪,并经过其内部光路照射在样品上面.样品串接在一闭合回路中,将电阻 R_1 两端的电压放大并输入到光谱仪的探测器,接光谱仪数据端插口的计算机将探测到的信号转换成数据文件.

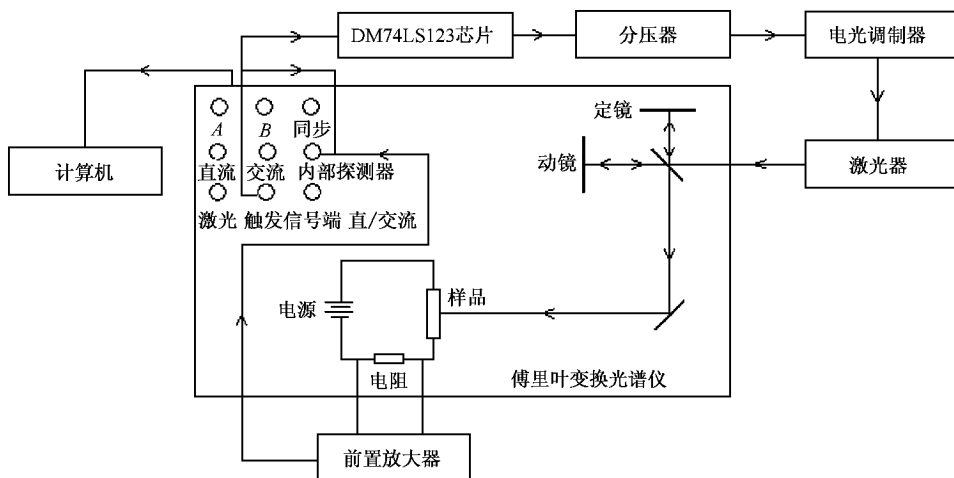


图 1 步进扫描时间分辨光电导实验原理示意图

图 2 给出 DM74LS123 芯片的连接方式,信号输入端 A 与地端相连,信号输入端 B 接光谱仪的触发信号端, V_{cc} 接 5V 直流稳压电源,改变 R 和 C 可以使该芯片输出脉宽值覆盖 ns 到 s 的宽广范围.步进扫描的工作原理如图 3 所示,傅里叶变换红外光谱仪的动镜移动到下一个位置,待光谱仪的动镜经过一段时间稳定(settle time)后,触发信号上升沿到来时,步进扫描开始进行,从而动态地对实验信号进行取样.触发信号下降沿到来时还没有外界的激发信号加在样品上面,光谱仪实行静态取样,以实现动态光谱与静态光谱的比较.光谱仪在其内部的准直激光信号每过一次零点(可调节)时,便收集一次数据,至此,一个特定光程差时扫描结束,光谱仪进入下一个光程差扫描.整个实验结束时,计算机会对所有不同时刻的动态或静态数据进行分组处理,得到不同时刻的光谱图.

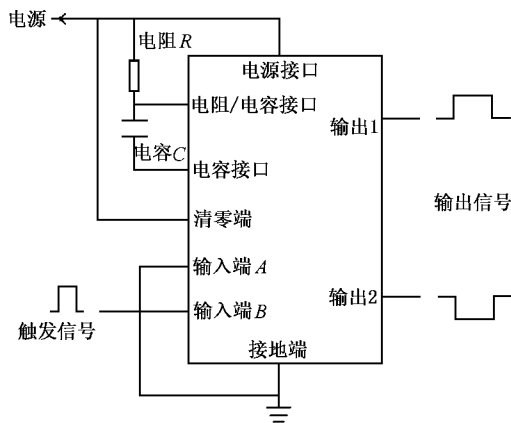


图 2 DM74LS123 芯片电路连接示意图

硅和北京多晶硅.制作工艺是:首先用酸(HF/HNO_3)腐蚀和组织硅片表面,然后通过热扩散从三氯氧磷溶液中向其扩散一定浓度的磷制成典型的 n^+ / p 型结构,再采用丝网印刷技术将前后表面分别制作银

实验所用太阳电池样品为 p 型硅经过相同工艺制作而成.基底材料分别为德国单晶硅、德国多晶

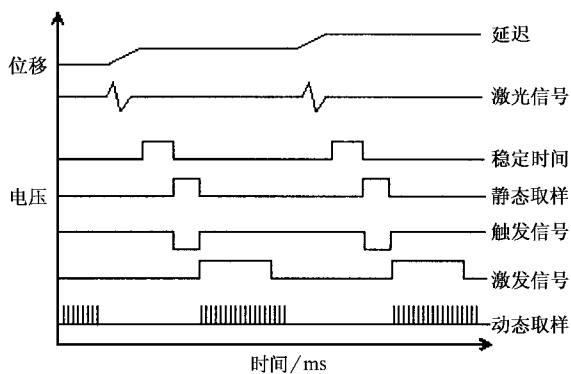


图 3 步进扫描工作原理图

和银(铝)电极后进行退火处理.最后用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)法将防反膜 SiN_x 沉积到太阳电池表面,该防反膜对 600nm 波长光的反射率可以低到 1%. 三块太阳电池发射区的厚度约为 $0.5\mu\text{m}$, 基区的厚度分别为 250, 280 和 $300\mu\text{m}$, 太阳电池的面积为 $5\text{cm} \times 5\text{cm}$. 霍尔实验测得的三块硅材料的载流子浓度分别为 1.4×10^{16} , 2.34×10^{16} 和 $2.00 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$. 负载特性给出三块样品的开路电压分别为 0.618, 0.572 和 0.53V, 短路电流分别为 0.917, 0.844 和 0.628A, 转换效率分别为 12.50%, 9.80% 和 6.28%. 暗伏安特性通过 Keithley 2400 电流源表测量获得. 光电导实验时, 样品被放置在傅里叶变换红外光谱仪屏蔽良好的样品室中, 所用激光的波长为 660.5nm, 激光脉宽可变, 以备观察在低光照时太阳电池载流子的平均寿命是否会随外加激光方脉宽的变化而变化. 光谱仪的光谱分辨率、峰值前扫描的数据点和恢复时间分别为 4.0cm^{-1} , 2046 和 0.12ms, 光谱仪的时间分辨率为 $10\mu\text{s}$, 仅与光谱仪内部探测器的探测速度有关, 与激光脉宽无关. 每次实验所需时间为 26min 左右, 在室温下进行.

3. 实验结果与讨论

图 4 为激光脉宽在 $460\mu\text{s}$ 时三块硅太阳电池光电导信号的三维曲线图. 光谱仪同时记录了波数、时间和相对强度. 样品 2 和 3 上的噪声光电导信号由被调制的激光单色性不是很好引起. 三种太阳电池的光电导曲线都很相似, 激光照射到样品上时, 光电导信号从某一稳态值(由太阳电池的暗电导产生)逐渐增强, 直至另一稳定值, 当激光脉冲撤掉时, 光电导信号经过一定时间基本又恢复到原先的稳态值.

实验表明样品 1 的光电导信号最强, 样品 2 次之, 样品 3 的光电导信号最小. 把三块样品的光电导信号和时间取出, 便可以很清晰地看到其光电导信号随时间的变化规律(如图 5 所示).

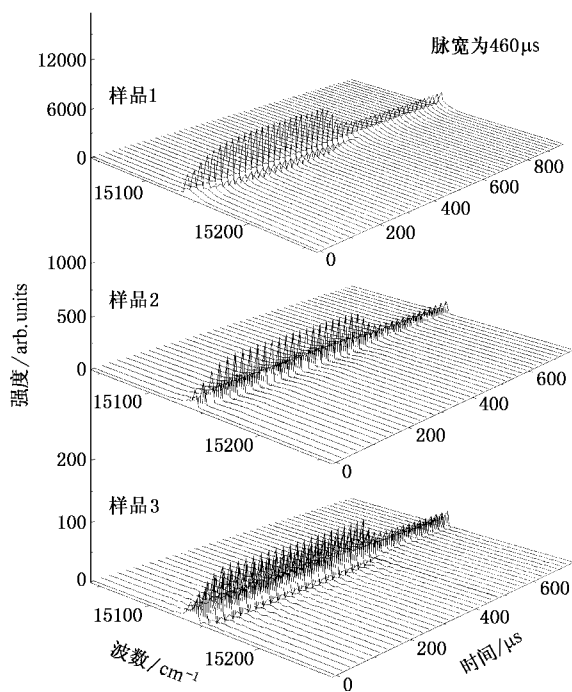


图 4 三种典型硅太阳电池的时间分辨三维瀑布光电导谱

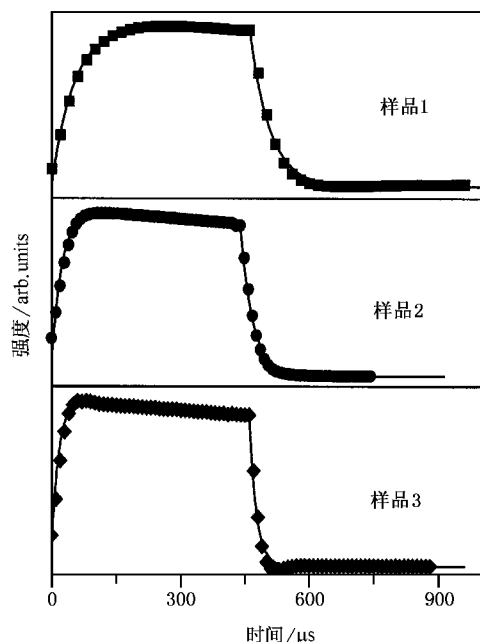


图 5 硅太阳电池的瞬态光电导(■●◆)与理论拟合曲线(—)

对于光电导的上升曲线, 由于触发激光的光功

率为 2mW 对应弱光照产生小注入的情形. 此时, 不论是带间直接复合, 还是通过杂质能级间接复合, 由光照引起的非平衡载流子浓度随时间的变化为^[10]

$$\Delta n = \Delta n_s [1 - \exp(-t/\tau_g)], \quad (1)$$

其中 $\Delta n_s = f\tau_g$ 为稳态时的非平衡载流子浓度, f 为光子载流子速率. 将上式归一化用来拟合光电导的上升曲线, 可以得到三块样品在光电导上升过程中载流子的寿命分别为 52.66 , 34.18 和 $19.77\mu\text{s}$.

光电导信号的中间平台表示在激光照射一段时间后, 硅太阳电池的光电导信号趋于饱和. 这时载流子的产生和复合达到动态平衡. 平台向下倾斜的趋势由激光脉冲强度不太稳定恰好处于下降状态引起. 激光撤去后引起非平衡载流子浓度随时间的变化为

$$\Delta n = \Delta n_s \exp(-t/\tau_r), \quad (2)$$

τ_r 为复合过程中的载流子寿命, 由太阳电池光电导的衰减曲线, 可以得到其在复合过程中载流子的寿命分别为 38.75 , 33.33 和 $17.69\mu\text{s}$. 上述简单理论与实验曲线符合得相当好, 表明小注入情况下用于体材料或薄膜的光电导公式对于太阳电池照常使用. 与其他方法测得的同类太阳电池的少数载流子寿命比较^[11], 实验测得的少数载流子寿命均在微秒量级, 从而说明了实验结果的可靠性. 少数载流子的复合寿命比产生寿命短说明在复合过程中由于有复合中心的参与而加速了复合, 而在产生过程中陷阱则限制了载流子的产生. Schroder 曾在 1997 年对硅半导体内载流子的寿命做过细致而又清晰的描述, 并严格区分了载流子的产生和复合寿命^[12]. 本实验中, 载流子的产生和复合寿命可同时测量, 这对于研究载流子的产生和复合机理有非常重要的作用.

为了研究太阳电池内部载流子的复合寿命是否会随激光脉宽而发生变化, 本文研究了不同脉宽的激光对复合寿命的影响, 实验结果如图 6 所示. 结果表明所研究的硅太阳电池的载流子复合寿命不随外加激光脉宽的变化而变化, 这与其他报道的长时间置于光照条件下会造成掺硼非晶硅的光电导增强^[13]有很大不同. 可认为短时间弱光照不会激活其内部受主离子, 当撤掉激光后, 通过复合, 样品还会回到原来状态.

以上所得到的载流子寿命结果的正确性可通过以下两个方面来说明. 一是少数载流子体寿命 τ_b . 由于被测试的是 pn 结太阳电池, 其内部的少数载流子既包括基区的电子, 又包括发射区的空穴,

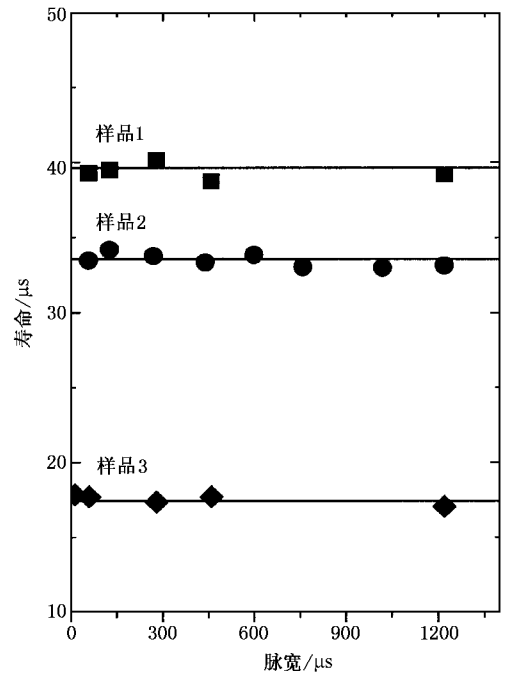


图 6 载流子复合寿命与激光脉宽的关系

因而实验测得的实际上是太阳电池少数载流子的有效寿命 τ_{eff} . 为简单起见, 取 τ_{eff} 表达式为^[14]

$$\frac{1}{\tau_{\text{eff}}} = \frac{1}{\tau_b} + \left(\frac{d}{2S} + \frac{d^2}{\pi^2 D} \right)^{-1}, \quad (3)$$

其中 d , S , D 分别为基区材料的厚度、表面复合速度和少数载流子的扩散系数. 取典型值 $S = 1000\text{ cm/s}$, $D = 20\text{ cm}^2/\text{s}$, 可求得这三块样品的体寿命 τ_b 分别为 42.50 , 36.06 和 $18.43\mu\text{s}$. 与文献报道的同等硼掺杂硅中的少数载流子体寿命几十个微秒相近^[15].

二是为能在数值上进一步验证已经得到的少数载流子有效寿命和体寿命的准确性, 我们考虑了载流子寿命与有效扩散长度的关系. 单晶硅有效扩散长度 $L_{\text{eff}}^{\text{mono}}$ 、多晶硅有效扩散长度 $L_{\text{eff}}^{\text{poly}}$ 可分别写为^[16]

$$L_{\text{eff}}^{\text{mono}} = L_n \frac{\cosh\left(\frac{W}{L_n}\right) + \sigma \sinh\left(\frac{W}{L_n}\right)}{\sinh\left(\frac{W}{L_n}\right) + \sigma \cosh\left(\frac{W}{L_n}\right)}, \quad (4)$$

$$L_{\text{eff}}^{\text{poly}} = \frac{L_{\text{eff}}^{\text{mono}}}{\sqrt{1 + \frac{2S_{\text{GB}}(L_{\text{eff}}^{\text{mono}})^2}{D_n g}}}, \quad (5)$$

其中 L_n 为少数载流子扩散长度, W 为基区材料厚度, $\sigma = S_b L_n / D_n$ (S_b 为背表面接触复合速度), D_n 为少数载流子扩散常数, S_{GB} 为晶界间复合速度, g 为多晶硅晶粒大小. 取 $D_n = 20.0\text{ cm}^2/\text{s}$, $S_b = 10^5\text{ cm/s}$,

将已经得到的样品 1 的体寿命代入 $L_n = \sqrt{D_n \tau_b}$, 并代入(4)式, 可得到样品 1 的有效扩散长度为 $204 \mu\text{m}$. 对于样品 2 和 3, 与文献 [16] 中给出的相似太阳能电池作对照, 取 S_{CB} 片分别为 10^5 和 $10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$, g 均为 $500 \mu\text{m}$, 仍取 $D_n = 20.0 \text{ cm}^2/\text{s}$, $S_b = 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$, 联合(4)和(5)式, 可求得样品 2 和 3 的有效扩散长度分别为 22.2 和 $7.07 \mu\text{m}$. 与文献 [16] 中给出的多晶硅有效扩散长度与其晶粒大小之间的关系非常符合, 因而说明了上述假定参数的有效性. 通过太阳能电池的开路电压、短路电流和基区载流子浓度^[16]计算得到的三块样品的有效扩散长度分别为 151 , 16.8 和 $5.75 \mu\text{m}$. 考虑到 Taretto 等人计算多晶硅样品有效扩散长度方法的误差为 35% ^[16], 可认为 Taretto 等人方法给出的三块样品有效扩散长度与由载流子寿命及(4)和(5)式给出的有效扩散长度数值上比较接近, 由此阐明了通过(3)式确定载流子体寿命的可行性, 并反过来证实了本文载流子寿命实验结果的可靠性.

下面讨论少数载流子复合寿命与太阳能电池中短路电流、开路电压和转换效率的关系. 首先给出这三块样品的暗伏安特性, 如图 7 所示. 在双二极管模型中, 考虑串联、并联电阻的影响, I - V 关系可表示为

$$I = J_{01} A \left(\exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{kT}\right) - 1 \right) + J_{02} A \left(\exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{2kT}\right) - 1 \right) + (V - IR_s) R_{\text{sh}}, \quad (6)$$

其中 J_{01} , J_{02} 为饱和电流密度, A , q , k , T , R_s , R_{sh} 分别为太阳能电池面积、单位电荷电量、玻尔兹曼常数、绝对温度、串联和并联电阻. J_{01} 表示小注入条件下太阳能电池中性区的复合, J_{02} 则表示空间电荷区的复合、通过带隙中缺陷能级的复合以及大注入条件引起的复合等. 三块样品的 R_s 和 R_{sh} 可通过对其暗伏安特性的单二极管模型拟合获得^[17]. 拟合得到三块样品的串联、并联电阻分别为 0.56 , 0.56 , 0.58 和 24.14 , 9.55 , 3.53Ω , 将它们代入(6)式, 对样品的实验结果进行拟合, 可得到三块样品的 J_{01} 分别为 1.86×10^{-12} , 6.88×10^{-12} 和 $9.64 \times 10^{-12} \text{ A/cm}^2$; J_{02} 分别为 1.09×10^{-7} , 2.97×10^{-7} 和 $7.89 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$. 可见, 三块样品的饱和电流密度 J_{01} , J_{02} 有同样的规律, 即样品 1 最小, 样品 2 次之, 样品 3 最大.

图 8 给出短路电流 $I_{\text{sc}}(\text{A})$ 、开路电压 $V_{\text{oc}}(\text{V})$ 、太阳能电池转换效率 $\eta(\%)$ 与少数载流子复合寿命

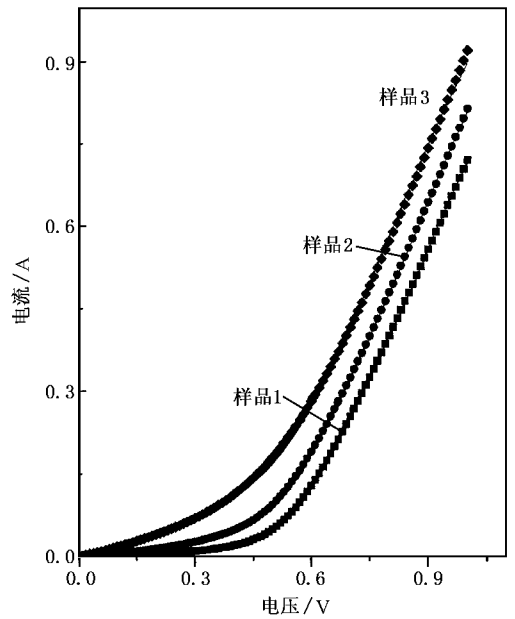


图 7 三块样品的暗伏安特性(■●◆)与理论拟合曲线(—)

$\tau(\mu\text{s})$ 的关系. 结果表明太阳能电池的短路电流、开路电压和转换效率都随少数载流子复合寿命的增加而增加(当少数载流子的复合寿命由 17.69 增至 $38.75 \mu\text{s}$ 时, 短路电流由 0.628 增至 0.917 A , 开路电压由 0.53 增至 0.618 V , 转换效率由 6.28% 增至 12.50%). 文献中也有与此类似的室温下少数载流子复合寿命与太阳能电池转换效率关系的报道^[18]. 对于以上规律, 我们认为: 短路电流反映了 pn 结的收集效率, 假定不考虑反射和接触损失, 可以认为太阳能电池的吸收效率为 100% . 考虑到实验所用激光波长处硅的吸收系数约为 $5 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$, 对应穿透深度为 $2.0 \mu\text{m}$, 故吸收区集中在发射区的 $0.5 \mu\text{m}$ 和基区的 $1.5 \mu\text{m}$ 范围内. 所用样品为扩散法制得, 空间电荷区的宽度很小, 所以可认为空间电荷区全部在该区域中, 该时空间电荷区的复合不可忽略. 光生载流子需要经过许多复合(包括基区各种机理的复合、空间电荷区的复合、通过缺陷能级的复合, 以及表面复合中心的非辐射复合等), 损失才能越过空间电荷区的强电场, 因而三块样品(样品 1—3)的复合损失由小变大时(样品饱和电流密度的规律已由图 7 暗伏安特性给出, 饱和电流密度的大小反映了复合损失的大小), 它们的短路电流便会由小变大. 开路电压则与太阳能电池等效电路中二极管的暗饱和电流有关, 当然开路电压还与扩散长度及入射光的波长有关. 在扩散长度和入射光波长一定时, 一般地, 大的

开路电压对应小的暗饱和电流.暗电流的大小与复合电流、隧穿电流和多数载流子穿越势垒引起的扩散电流有关,这些效应在体寿命减小或者表面复合速率增大时表现得特别明显,所以载流子寿命减小时,上述电流对暗电流的影响增强,从而使得开路电压和转换效率随载流子复合寿命的减小而变小,与实验结果十分符合.因为所有样品在相同的工艺下制得,所以上述讨论的关系具有可比性,并由此表明太阳电池的效率对其内部少数载流子的复合寿命有强烈的依赖性.

事实上,少数载流子复合寿命是太阳电池光伏技术中一个极为重要的参数,它可以间接地反映太阳电池基区内部缺陷的密度.对应于样品 3 和样品 2 内少数载流子寿命为 17.69 和 33.33 μs ,我们通过透射谱的带尾态分析(或者拉曼谱拟合)得到的样品 3 和样品 2 基区材料的缺陷密度分别为 $2.53 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ($3.61 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) 和 $2.47 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ($2.67 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$)^[19].因而很容易看到,样品 3 比样品 2 的寿命短,其基区的缺陷要比后者严重.该结论与他人得到的结果一致^[12,20].如何最大限度地减少太阳电池的内部缺陷,从而提高载流子复合寿命,并最大可能地降低成本,成了当今提高太阳电池转换效率的一个关键^[21].某些情况下,杂质光伏效应(impurity photovoltaic effect)可以提高太阳电池的转换效率.这种效应表明太阳电池的深能级杂质在光生俘获载流子从深缺陷能级跳到允带的过程中充当了跳板的角色,从而增强了光电导,所以当太阳光波长大于带隙对应波长时,可以用来提高太阳电池的效率.关于杂质光伏效应对于太阳电池效率提高的理论很多,对于不同材料做成的太阳电池其影响也不尽相同.

最后值得指出的是,本文所提出的这种步进扫描时间分辨实验装置还有其他用途和特点.(1)探测半导体内的杂质光电导.将一束能量大于半导体带隙的光照射在半导体样品上,使本征光电导达到饱和时施加能量低于带隙的光脉冲于样品,来观察其杂质光电导,已经被作为研究非本征光电导的一种常见手段.多束调制的激光照射到样品上,在时间分辨光谱里面可得到不同波长的光束对样品光电导信号的影响,并能以瀑布图的形式呈现出来.所以应用步进扫描时间分辨光谱可以非常容易地用来测量样品的杂质光电导.正因为如此,该实验方法在瞬态光电导的测量中体现出其他测试瞬态光电导方法(例如共振-耦合光电导衰减法^[21]、时间跳跃法^[22]、

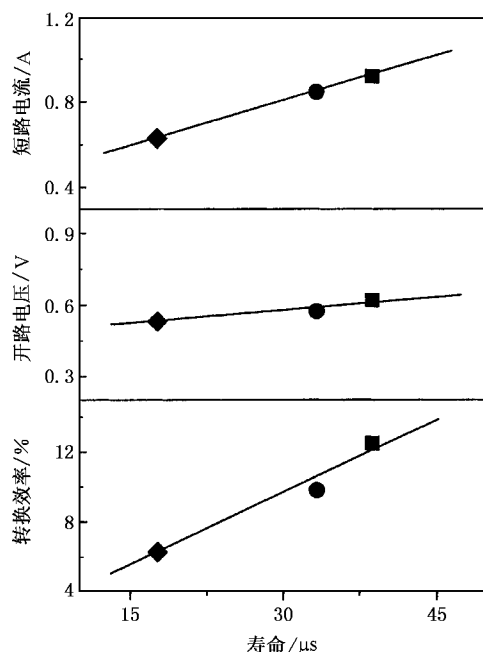


图 8 少数载流子复合寿命 τ 与太阳电池短路电流 I_{SC} 、开路电压 V_{OC} 及转换效率 η 的关系 ■ 为样品 1, ● 为样品 2, ◆ 为样品 3

时间分辨微波光电导法^[23]、射频光电导衰减法^[24]等)所不具备的优点.当然也可以用短脉冲激光^[25]或者经调制后呈其他波形的激光作为激发源来研究样品的瞬态光电导.此外,多种激发源的共同参与也是提高信噪比的一种方法^[1].(2)电注入引起的光电导.将实验平台中的触发信号接入一可触发的脉冲电源,作为样品的触发电源.已经有报道采取电光同时注入,并将光电导信号维持在一恒定值来探测光电导^[26].(3)测试载流子寿命在纳秒量级半导体材料中的光电导.该时需要采用速度足够快(分辨率为 2ns)的外部 HgCdTe 探测器.高时间分辨率步进扫描技术下瞬态光电导谱可以将载流子复合过程中每一个阶段占主导地位的机理清楚地揭示出来,目前步进扫描技术能实现的时间分辨光谱的最小分辨率为 1ns^[27].当然如果采用抽运-探测技术与光谱仪联用,可以观察某些材料在激光激发下的超快现象,这种方法的时间分辨率可以达到皮秒甚至飞秒量级^[27].(4)测试连续光照下半导体材料对不同波长的光响应及瞬态光电导.(5)测试材料低温或者不同温度下的瞬态光电导用于寻找瞬态光电导随温度的变化关系.(6)测量外界激励下材料的透射谱等.总之,利用步进扫描技术实现时间分辨光谱实验装置优点很多,功能也较强大,对于材料的动态研究有一定意义.

4. 结 论

实现了步进扫描时间分辨光电导光谱,并对三种典型的硅太阳电池的瞬态光电导作了测试,从光电导的上升和衰减曲线中得到了其中少数载流子在产生和复合过程中的寿命.载流子在复合过程中的寿命普遍比在产生过程中短,说明载流子在复合过程中有复合中心的参与,加快了光电导的衰减,从而减少了少数载流子的复合寿命.通过提取出的三块样品少数载流子体寿命与其他文献的比较,以及有效扩散长度与 Tareno 等人方法得到的有效扩散长度相比较,两种方法验证了实验结果的可靠性.通过负

载特性测量并结合测得的少数载流子寿命,发现三块样品的短路电流、开路电压和转换效率随少数载流子寿命增大而增加,并借助于暗伏安特性对短路电流和转换效率的关系作了合理解释.室温下少数载流子寿命对太阳电池的转换效率有很大影响,成为反映转换效率的重要标志.同时指出,少数载流子寿命还间接反映了太阳电池基区材料的缺陷密度.

感谢现在就读于美国麻省理工学院的肖洒同学参与了该实验装置的搭建工作.感谢上海交通大学物理系光子研究所沈启舜教授提供的电光调制器.感谢上海交通大学太阳能研究所徐林老师和刘梅苍硕士在太阳能负载特性测量中的帮助.

- [1] Picqué N and Guelachvili G 1999 *Appl. Opt.* **39** 3984
- [2] Shilov S V, Skupin H, Kremer F, Wittig T and Zentel R 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 1686
- [3] Wang J P, Li Y, Hong X Y and El-Sayed M A 2001 *Phys. Rev. B* **64** 235413
- [4] Palmer P A, Plunkett S E, Chen P Y, Chao J L and Tague T J 1997 *Mikrochim. Acta* **14** S603
- [5] Wang J P, Song L, Zou B S and El-Sayed M A 1999 *Phys. Rev. B* **59** 5026
- [6] Ataka K, Hara Y and Osawa M 1999 *J. Electroanal. Chem.* **473** 34
- [7] Hirabayashi S and Hirahara Y 2002 *Chem. Phys. Lett.* **361** 265
- [8] Hilber W and Helm M 1996 *Appl. Phys. Lett.* **69** 2528
- [9] Shen X C 2002 *Semiconductor Spectroscopy and Optical Properties* (Beijing Science Press [in Chinese] 沈学础 2002 半导体光谱和光学性质(北京 科学出版社))
- [10] Ying G Y 1990 *Photoconductivity Physics and Applications* (Beijing: Electronic Industry Press [in Chinese] 应根裕 1990 光电导物理及其应用(电子工业出版社))
- [11] Chen F X *et al* 2003 *Acta Energae Solaris Sin.* **124** 340 (in Chinese [陈凤翔等 2003 太阳能学报 **124** 340])
- [12] Schrodr D K 1997 *IEEE Trans. Electron. Devices* **44** 160
- [13] Zhang S B *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 111 (in Chinese [张世斌等 2002 物理学报 **51** 111])
- [14] Wang T H and Cizsek T F 1997 *Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of 26th IEEE* p55
- [15] Glunz S W, Rein S, Lee J Y and Warta W 2001 *J. Appl. Phys.* **90** 2397
- [16] Taretto K, Rau U and Werner J H 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 5447
- [17] Li M *et al* 1999 *J. Beijing Normal Univ. (Natur. Sci.)* **35** 215 (in Chinese [黎明等 1999 北京师范大学学报(自然科学版) **35** 215])
- [18] Ohnesorge B, Weigand R, Bacher G and Forchel A 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 1224
- [19] Sun J H, Shen W Z and Meng F Y 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 9615
- [20] Karazhanov S Z 2001 *J. Appl. Phys.* **89** 4030
- [21] Ahrenkiel R K 2003 *Solar Energy Mater. Solar Cells* **76** 243
- [22] Nagase T, Kishimoto K H and Naito H 1999 *J. Appl. Phys.* **86** 5026
- [23] Neitzert H C, Hirsch W and Kunst M 1993 *J. Appl. Phys.* **73** 7446
- [24] Bose D N, Ahrenkiel R K and Bhunia S 1999 *J. Appl. Phys.* **86** 6599
- [25] Chen Z Z, Shen B, Zhang X Y, Zhang R, Chen P, Zhou Y G, Zang L, Jiang R L, Huang Z C, Zheng Y D, Wu Z S, Sun X T and Chen F 1998 *Appl. Phys. A* **67** 567
- [26] Moses D, Okumoto H, Lee C H and Heeger A J 1996 *Phys. Rev. B* **54** 4748
- [27] Palmer R A, Smith G D and Chen P Y 1999 *Vibrat. Spectros.* **19** 131

Step scan time resolved spectroscopy and its application to photoconductivity of Si solar cells^{*}

Zhu Jian-Min Shen Wen-Zhong[†]

(*Laboratory of Condensed Matter Spectroscopy and Opto-Electronic Physics ,Department of Physics ,Shanghai Jiaotong University ,Shanghai 200030 ,China*)

(Received 3 November 2003 ; revised manuscript received 25 March 2004)

Abstract

We report on the establishment of Fourier transform step-scan time-resolved photoconductivity spectroscopy to study the solar cell's minority carrier lifetime, which has close relationship with its conversion efficiency. Three typical Si solar cells are selected in our experiments, including both the monocrystalline and polycrystalline silicon samples. We find that the rise and decay curves of the transient photoconductivity can be well described by two simple exponential functions. Due to the participation of recombination centers, the recombination minority carrier lifetimes are generally smaller than those of generation. In order to prove the reliability of our experimental results, we extract the bulk lifetime and the effective diffusion length of the three samples. Furthermore, we analyze the correlation of the minority lifetime with the short-circuit current, open voltage and conversion efficiency, by the aid of the investigation of solar cells' dark $I-V$ characteristics and load characteristics. In addition, we also discuss in detail other applications of the established step-scan time-resolved spectroscopy.

Keywords : step scan , time resolved , Si solar cells , transient photoconductivity

PACC : 3580B , 7847 , 7280C , 7220J

^{*} Project supported by the Funds for Outstanding Young Researchers from the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 10125416).

[†] Corresponding author. E-mail : wzshen@sjtu.edu.cn