

调制激光致载流子辐射中信号的频域特性

秦 雷, 刘俊岩, 龚金龙, 宋 鹏, 王 扬

(哈尔滨工业大学 航空宇航制造工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 基于载流子辐射(PCR)检测太阳能电池的理论模型,对调制激光致载流子辐射检测中电路状态对频域信号的影响进行了数值仿真分析,得到不同外部电阻下的频域响应幅值曲线;使用所建立的检测实验系统对 Si 基太阳能电池片进行了检测,对不同电路状态下的幅值图与相位图进行了对比分析,对比不同电路状态下的辐射强度幅值,依据实验所得到的频域响应曲线,拟合并计算了载流子的寿命参数。结果表明:PCR 技术检测太阳能电池,电路状态为开路时辐射幅值最大,随着外部负载电阻的减小,辐射幅值逐渐较小,相位的变化并不明显,短路时的辐射幅值最小;各电路状态下的拟合寿命相近,载流子辐射检测太阳能电池技术中可以用开路状态的频域检测结果预测其他电路状态的频域响应结果和载流子参数拟合计算方法。

关键词: 太阳能电池检测; 载流子辐射; 电路状态影响; 拟合寿命

中图分类号: TN24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)10-2642-04

Frequency characteristics of modulated laser-induced infrared photocarrier radiometry

Qin Lei, Liu Junyan, Gong Jinlong, Song Peng, Wang Yang

(Aeronautics and Astronautics Manufacturing Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Based on the theoretical model of photocarrier radiometry (PCR) testing solar cells, numerical simulation analysis was proceeded to study the influence of different circuit states in frequency domain response signal, and amplitude response curves were achieved with different external load resistors. Experiments were carried out with built set-up for photocarrier radiometry diagnostic approach for Si solar cells. The feature of amplitude diagram and phase diagram were stated. The effect of different circuit states on test results was discussed. At last the fitting life time was compared in different circuit states to study whether circuit states affect the carrier parameter measurement. The results shows that open circuit state gives the highest amplitude in amplitude diagram, and the smaller the load resistance is, the lower amplitude becomes. However, phase didn't change clearly. The fitting life time is nearly consistent, not changed with circuit states, which shows the results of PCR testing solar cells in open circuit states can forecast frequency domain response results and carrier parameters fitting calculation in other circuit states.

Key words: detection of solar cells; photocarrier radiometry; influence of circuit states; fitting carrier life time

收稿日期: 2013-02-07; 修订日期: 2013-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(51173034, 51074208)

作者简介: 秦雷(1984-), 男, 博士生, 主要从事半导体光电检测和红外检测技术研究。Email: qinleihit@163.com

导师简介: 王扬(1960-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事激光加工、红外检测、切削技术和纳米技术等方面的研究。

Email: wyyh@hit.edu.cn

0 引 言

太阳能电池制作流程复杂,生产过程中多个步骤需要在线和离线检测,发展准确、快速、无接触的太阳能电池检测方法具有重要的实际意义^[1]。在半导体行业半导体材料的载流子输运参数(包括载流子寿命,前表面复合率,后表面复合率,扩散系数)的准确测量也是业界一直探索急需解决的问题^[2]。针对测量问题出现了许多检测太阳能电池缺陷和半导体材料载流子输运参数的技术,包括调制光电压(MPV),调制光热法(PTR),荧光法(PL)等,激光致载流子辐射(PCR)成像是近年来出现的一种快速红外检测技术,其原理是:受到调制激光激发的半导体材料内部光生载流子在复合、扩散、迁移过程中会在半导体材料内部形成载流子的三维分布,并释放短波红外辐射,通过 InGaAs 红外探测元即可检测到红外辐射的强度,从而计算出半导体的输运参数和电池片的内部缺陷状态^[3-5]。以目前报道的结果来看利用载流子辐射成像技术可以有效地克服 PL 检测方法探测深度固定,或者 MPV 需要安装电极等瓶颈,得到信号纯净的检测信号和准确、快速的输运参数检测结果。由于该技术是基于半导体材料的禁带特性工作的,也有望应用于其他宽禁带半导体、碳纳米管、红外探测器等材料的检测,可广泛应用于航天、制药、检测等现代工业^[6-7]。

而作为一种检测复杂光伏结构的检测技术,必须确定其最佳的测试环境,由于太阳能电池不同电路状态下的外部输出电流和电压不同,也就是载流子的迁移和扩散的比例发生变化,而载流子辐射检测技术是基于载流子浓度变化的,因此必须研究宏观的电路状态对检测信号和后续参数计算的影响。

文中对激光致载流子辐射检测技术中的物理机制进行了介绍,基于载流子辐射检测模型,对载流子辐射检测技术中电路状态对检测结果频域响应特性的影响进行了仿真分析,并使用所建立的检测试验系统对太阳能电池进行了扫频检测试验,最后对不同电路状态下检测结果的拟合参数进行了对比分析。

1 PCR 技术电学理论模型与仿真

激光致载流子辐射成像技术是依靠载流子跃迁

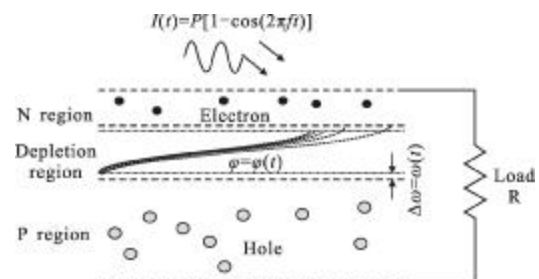
辐射近红外光的原理进行检测的。通常定义过剩载流子寿命 τ 为:

$$\Delta n / \tau = (n_0 + \Delta n) / \tau_n - n_0 / \tau_n \tag{1}$$

式中: n_0 为平衡态载流子浓度; τ_n 为平衡载流子寿命; Δn 为过剩载流子浓度; τ_n 为载流子复合寿命。

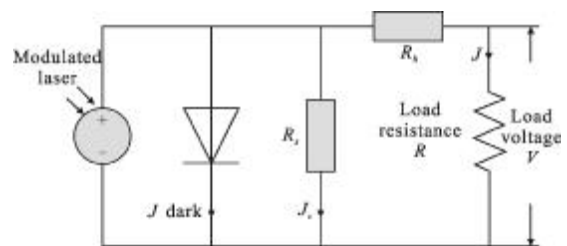
如果使用低强度调制激光作为激励光源,则内部载流子在跃迁、扩散、迁移、复合等过程综合作用下,会形成三维准稳态分布的载流子波,红外探测元检测准稳态的红外辐射即可得到内部的载流子分布信息。当材料中有缺陷存在时,缺陷起到了复合中心的作用,改变了载流子寿命 τ ,从而改变了此处的辐射强度。

受正弦调制的激光入射到太阳能电池表面时,太阳能电池的中性区和耗尽区会产生光生载流子,其耗尽区的宽度 ω 会随着电势改变,而电势也会随着外加电压而改变,原理如图 1(a)所示,当光入射强度较小时,变动量 $\Delta\omega$ 可忽略,可将太阳能电池电路等效为如图 1(b)所示的电路。



(a) 调制光源激发下的太阳能电池工作原理图

(a) Solar cell work principle with modulated excitation



(b) 太阳能电池等效电路图

(b) Equivalent circuit of solar cells

图 1 PCR 检测电路状态下太阳能电池的原理图

Fig.1 Schematic diagram of PCR testing solar cells in resistance circuits

等效电路图中, R_s 支路为太阳能电池内部破损、外部污渍引起的漏电损失, R_n 为太阳能电池外接导线等引起的接触串联电阻,则在负载电阻为 R 时,求解此等效电路,可以得到输出电流为:

$$J(V) = J_{sc} - J_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + AJ(V)R_h)}{k_B T_a} \right] - 1 \right\} - \frac{V + AJ(V)R_h}{AR_s} \quad (2)$$

Andreas Mandelis 等类比方程(2), 推导出光伏电流与调制频率、光电压的关系为^[8]:

$$J(\hbar\omega) = J_{sc}(\hbar\omega) - J_0(\hbar\omega) \left[\exp \left(\frac{qV_{ph}}{kT} \right) - 1 \right] - J_{NR} \quad (3)$$

对不同外部负载下电路的频域信号进行仿真分析, 参数设置如表 1 所示, 其他参数采用 Si 电池的通用参数^[9-10]。

表 1 仿真参数设置

Tab.1 Setting of simulation parameters

| Cell | Front emissivity | Series resistor | Shunt resistance |
|------|------------------|-----------------|------------------|
| Si | 5% | 0.15 Ω | 2 000 Ω |

分别得到了不同电路状态下的幅值图如图 2 所示。可以看到, 开路状态下的频率响应的幅值最大, 更容易区分缺陷和非缺陷位置。

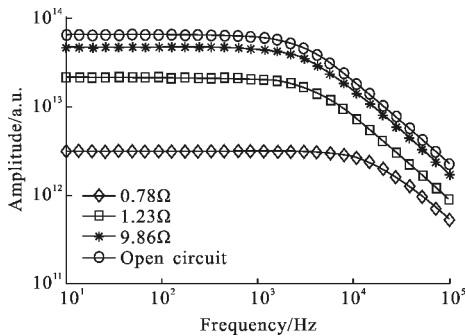


图 2 载流子辐射信号频域数值仿真图

Fig.2 Photocurrent signal frequency domain simulation diagram

2 实验装置

实验装置如图 3 所示, 调制激光为 808 nm 激光, 通过电流调节控制输出功率, 照射到工件表面, 探测器使用 Thorlabs 公司的 InGaAs 探测器 (型号 PDA10CS), 连接到斯坦福锁相放大器进行锁相运算, 电路状态由并联的两路开关控制, 即图中的虚线电路部分; 整套实验装置放置于气动隔振平台上, 以减小振动, 实验平台放置于暗室防止光照下出现的非激光致载流子的产生。实验电池片背面被人为刻划了缺陷, 缺陷处标志为 A, 并通过检测确定了无缺陷对比点, 记为 B。

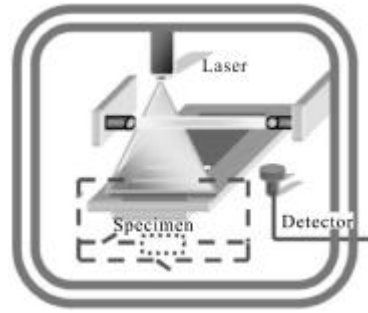
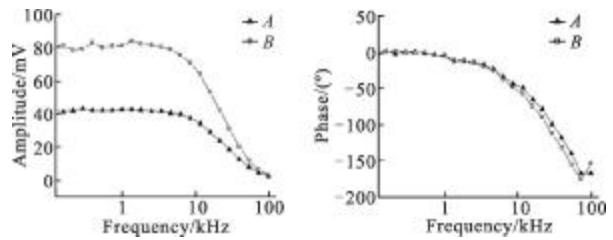


图 3 实验装置原理图

Fig.3 Schematic diagram of experimental set-up

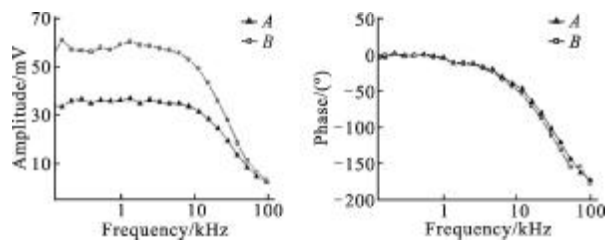
3 实验结果和讨论

图 4 为 PCR 技术在开路连接、电阻连接电路、短路连接时的幅值图与相位图, 可以看到所得到的幅值图与前文中数值仿真的结果图 2 的趋势是一致的。



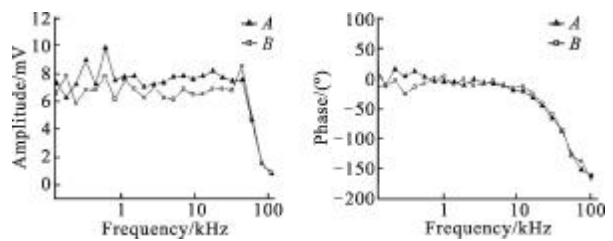
(a) 开路状态下幅值与相位图

(a) Amplitude and phase at open circuit



(b) 电阻电路下的幅值与相位图

(b) Amplitude and phase at resistance circuit



(c) 短路状态下的幅值与相位图

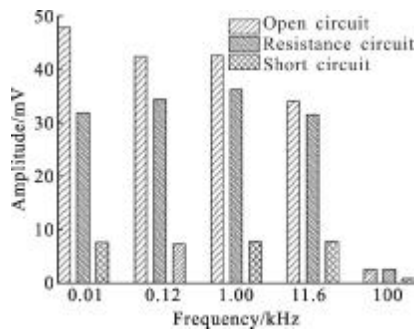
(c) Amplitude and phase at short circuit

图 4 PCR 技术不同电路状态下的幅值与相位图

Fig.4 Amplitude and phase diagram in different circuit states

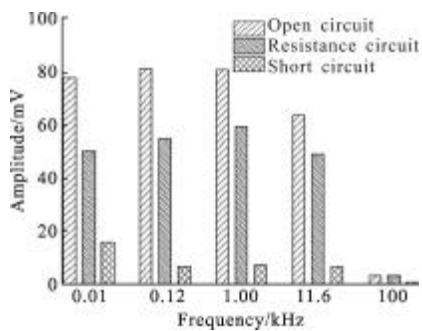
的。而且从图中可以看出,缺陷区域与非缺陷区域的相对关系是稳定的,即在幅值图中,非缺陷位置的幅值大于缺陷位置的幅值;相位图中非缺陷位置的相位落后缺陷位置的相位,而两者均落后于调制频率的相位,这也说明缺陷位置与非缺陷位置的载流子呈现了不同的载流子参数表征。而且可以看出,扫描率大于 10 kHz 时各电路状态下的幅值的差距逐渐变小,相位逐渐出现差别,因此 10 kHz 是一个重要的调制频率点。

如图 5 所示 PCR 技术在三种电路状态下的对比图,从图中可以看出,呈现出开路状态时的红外辐射幅值大于电阻电路红外辐射幅值,大于短路红外辐射幅值的特点,此规律与前文仿真中的结果是一致的。



(a) A 点幅值

(a) Amplitude of A



(b) B 点幅值

(b) Amplitude of B

图 5 A 点和 B 点不同电路状态下的幅值对比图

Fig.5 Amplitude comparison diagram in different circuits for A and B

各电路状态下的拟合寿命如表 2 所示。

由表中可以发现,虽然不同电路状态下缺陷位置与非缺陷位置的幅值存在差别,但是由于响应特性没有改变,因此 PCR 检测中电路状态对少数载流子的拟合寿命几乎没有影响,可以使用开路状态来进行 PCR 检测和参数测量。

表 2 各电路状态下的拟合寿命

Tab.2 Fitting life in different circuit states

| | Electron lifetime/ μs | Hole lifetime/ μs |
|--------------------|----------------------------------|------------------------------|
| Open circuit | 33.7 | 9.9 |
| Short circuit | 28.6 | 8.3 |
| Resistance circuit | 31.5 | 9.2 |

4 结 论

文中对调制激光致载流子辐射检测技术不同电路状态下检测结果的频域响应特性进行了研究,基于载流子辐射(PCR)检测太阳能电池的理论模型,对调制激光致载流子辐射的频域信号与外电路状态的关系进行了仿真分析,并进行了开路、电阻、短路电路状态下的扫频实验。对比实验与仿真结果可以发现,基于载流子辐射的技术检测在检测太阳能电池时,开路和较大电阻电路下缺陷位置的幅值大于缺陷位置的幅值,但在短路状态下缺陷位置与非缺陷位置的幅值差别不大。在相位图中缺陷位置与非缺陷位置的差别减小,在 80 kHz 附近开路状态下和较大电阻电路状态下都有较好的区分度,而在短路时不能够区分。并且电路状态不影响载流子的拟合寿命的计算,开路状态是 PCR 检测的最佳电路状态,可以通过研究电池片在其他电路状态下的参数测量类比其他电路状态下的响应特性。

参考文献:

- [1] Würfel P, Würfel U. Physics of Solar Cells: From Basic Principles to Advanced Concepts [M]. New York: Wiley Com, 2009.
- [2] Fanrenbruch L, Bube R H. Fundamentals of Solar Cells[M]. New York: Academic, 1983.
- [3] Li Bincheng, Shaughnessy D, Mandelis A, et al. Accuracy of photocarrier radiometric measurement of electronic transport properties of ion-implanted silicon wafers [J]. Journal of Applied Physics, 2004, 96(1): 186.
- [4] Mandelis A. Diffusion Wave Fields[M]. New York: Springer, 2001: 588-593.
- [5] Derrick Shaughnessy, Bincheng Li, Andreas Mandelis, et al. Ion implant dose dependence of photocarrier radiometry at multiple excitation wavelengths[J]. Appl Phys Lett, 2004, 84

(下转第 2650 页)

- [5] Cao Yinhua, Liu Youqiang, Qin Wenbin, et al. Kilowatt diode laser with beam quality better than all-solid-state laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(9): 2282-2285. (in Chinese)
曹银花, 刘友强, 秦文斌, 等. 光束质量超过全固态激光器的千瓦直接半导体激光器[J]. *中国激光*, 2009, 36(9): 2282-2285.
- [6] Zhao Pengfei, Liu Bo, Li Qiang, et al. Improvement on spectrum of high power diode laser array [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19: 1051-1053. (in Chinese)
赵鹏飞, 刘波, 李强, 等. 高功率二极管激光阵列输出光谱特性的改善[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19: 1051-1053.
- [7] Cook C C, Fan T Y, Fejermm, et al. Spectral beam combining of Yb-doped fiber lasers in an external cavity [J]. *OSA Trends in Optics and Photonics*, 1999, 26: 163-166.
- [8] Yi Hengyu, Su Yi, Huang Shan, et al. Modeling and experimental validating on array combination of rectangle laser beams[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(3): 472-475. (in Chinese)
易亨瑜, 苏毅, 黄珊, 等. 矩形光束合成的建模与实验验证[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(3): 472-475.
- [9] Sun Ling, Zhao Hong, Yang Wenshi, et al. Study on coherent combination theory of multi-beam laser[J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(2): 111-113. (in Chinese)
孙玲, 赵鸿, 杨文是, 等. 多光束激光相干合成技术研究[J]. *激光与红外*, 2007, 37(2): 111-113.
- [10] Xiong Lingling, Lv Baida. Theoretical models describing far-field intensity distributions of laser diode [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(2): 201-206. (in Chinese)
熊玲玲, 吕百达. 描述激光二极管远场光强分布的理论模型[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(2): 201-206.
- [11] Yan Bing. Analysis of pulsed laser diode driver circuit [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2008, 6(4): 1-3. (in Chinese)
严兵. 脉冲半导体激光器电源电路分析[J]. *光学与光电技术*, 2008, 6(4): 1-3.

.....

(上接第 2645 页)

- (25): 5219.
- [6] Andreas Mandelis, Jerias Batista, Jurgen Gibkes, et al. Noncontacting laser photocarrier radiometric depth profilometry of harmonically modulated band bending in the space-charge layer at doped SiO₂/Si interfaces[J]. *J Appl Phys*, 2005, 97(8): 083507.
- [7] Jerias Batista, Andreas Mandelis, Derrick Shaughnessy, et al. Deep subsurface electronic defect image contrast and resolution amplification in Si wafers using infrared photocarrier radiometry[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(10): 1713.
- [8] Andreas Mandelis, Yu Zhang, Alexander Melnikov. Statistical theory and applications of lock-in carrierographic image pixel Brightness dependence on multi-crystalline Si solar cell efficiency and photovoltage [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 112: 054505-3.
- [9] Qiu Dongdong, Wang Rui, Cheng Xiang'ai, et al. Damage effect of monocrystalline silicon solar cells under ultrashort pulse laser irradiations [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 112-115. (in Chinese)
- [10] Pan Yongqiang, Bai Tao, Hang Lingxia. Study on AM1.5 filter in solar simulator for photovoltaic module solar simulator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2484-2488. (in Chinese)