

太阳能电池光载流子辐射复合的 红外特性仿真与试验

刘俊岩¹, 秦雷¹, 龚金龙¹, 王扬¹, A. Mandelis²

(1. 哈尔滨工业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. Center for Advanced Diffusion Wave Technologies (CADIFT), Mechanical and Industrial Engineering,
University of Toronto, Toronto, Ontario M5S 3G8, Canada)

摘要: 激光诱发硅太阳能电池产生载流子, 由于少数载流子的复合而发射红外辐射. 基于一维载流子传输方程, 建立了调制激光诱发PN结少数载流子密度模型, 利用该模型仿真分析了载流子寿命、扩散率、表面复合率及光电压对辐射复合产生红外辐射信号的影响. 利用InGaAs红外探测器(0.9~1.7 μm)记录激光诱发载流子辐射复合的红外辐射信号, 用数字锁相放大器提取了幅值与相位. 通过频率扫描试验获得了多晶硅太阳能电池载流子传输参数.

关键词: 载流子复合; 辐射复合; 红外辐射; 太阳能电池

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A

Infrared radiation induced by photocarrier recombination in solar cells

LIU Jun-Yan¹, QIN Lei¹, GONG Jin-Long¹, WANG Yang¹, A. Mandelis²

(1. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Center for Advanced Diffusion Wave Technologies (CADIFT), Mechanical and Industrial Engineering,
University of Toronto, Toronto, Ontario M5S 3G8, Canada)

Abstract: In silicon solar cells, carriers are generated under illumination of laser, and excess minority carriers emit infrared radiation via a radiative recombination process. A model for minority carrier density in a pn junction induced by modulated laser was developed based on 1D carrier transport equation of semiconductor. The influences of carrier lifetime, diffusion coefficient, surface recombination rate, and photovoltage on radiation recombination, thus on infrared radiation were investigated. The laser-induced photocarrier radiometry signal was monitored using an InGaAs detector (0.9 ~ 1.7 μm). The amplitude and phase of infrared radiation were obtained by a digital lock-in amplifier. Carrier transport parameters of m-Si solar cell were obtained by frequency-scanning experiments.

Key words: carrier recombination, radiative recombination, infrared radiation; solar cell

PACS: 07.68.+m

引言

随着新型半导体材料制备和先进太阳能电池制造技术的发展, 高性能、高转化效率的太阳能电池需求不断增大, 现代太阳能电池工业需求已达到GW量级^[1-2]. 新型太阳能电池的制造和质量控制与评价已成为关键问题和研究热点. 众所周知, 半导体材料

吸收光子产生少数载流子的传输参数(载流子有效寿命、扩散系数(率)及表面复合速率等)直接决定了太阳能电池的性能和效率. 光致发光(Photoluminescence)技术已广泛应用于太阳能电池的制造过程中的质量控制, 成为光伏电池结构性能分析与评价的重要手段^[3-4]. 加拿大学者 A. Mandelis 提出了调制激光诱发半导体材料载流子辐射复合的红外特

性分析与扫描成像检测半导体材料的微缺陷的方法,并建立了调制激光诱发双极性半导体材料载流子密度波与载流子辐射复合释放红外辐射信号之间的关系^[5]. Bincheng LI 等建立了基于掺杂 Si 材料半导体的载流子密度模型,利用该模型分析了调制激光诱发掺杂多晶硅材料载流子的传输特性^[6].

调制激光诱发载流子辐射复合的红外辐射信号特性与载流子密度波密切相关,本文针对太阳能电池结构,建立调制激光激发太阳能电池的载流子密度波模型,并利用该模型仿真分析载流子传输参数(载流子有效寿命、扩散率及表面复合速率等)对载流子辐射复合释放红外光谱的频域响应特性的影响.利用调制激光激发多晶硅太阳能电池载流子辐射复合释放红外光谱频域扫描试验和拟和分析,确定载流子传输参数,为太阳能电池性能分析与评价奠定基础.

1 载流子密度波模型

太阳能电池吸收光子产生载流子辐射,载流子复合辐射的红外光波长由其带隙能决定,在一定入射光强条件下,太阳能电池载流子辐射复合释放的红外辐射信号与过剩少数载流子密度满足如下关系^[5]:

$$P(\hbar\omega_{em}) \approx F(\lambda_1, \lambda_2) \int_0^W \Delta N(\hbar\omega_{in}, z) dz \quad (1)$$

式中 $P(\hbar\omega_{em})$ —载流子辐射复合释放红外光谱能量密度; $F(\lambda_1, \lambda_2)$ —校正系数; λ_1, λ_2 —载流子辐射复合释放红外光谱波长范围; $\Delta N(\hbar\omega_{in}, z)$ —过剩少数载流子密度(电子—空穴密度); W —样品厚度; $\hbar\omega_{in}, \hbar\omega_{em}$ —入射与辐射的光子能量.

由式(1)可知,在一定光强条件下,载流子辐射复合释放的红外光谱特性与载流子密度沿厚度的积分成正比.

以同质 Si 基 PN 结为研究对象,当半导体材料吸收光子后,吸收光子能量的导带电子将与价带空穴复合,一些导带电子与价带空穴直接复合而释放光子,形成辐射复合,另有一些导带电子与价带空穴复合而转换为热辐射,形成非辐射复合,如图 1(a)所示.光照条件下的太阳能电池基体及 PN 内部产生载流子,载流子通过扩散和复合,在 PN 结两端分别聚集了电子和空穴,形成内电场,可进一步阻止少数载流子传输,达到平衡,因此,光照条件下少数载流子密度分布与太阳能电池 PN 结的两端电压有关,如图 1(b)所示.

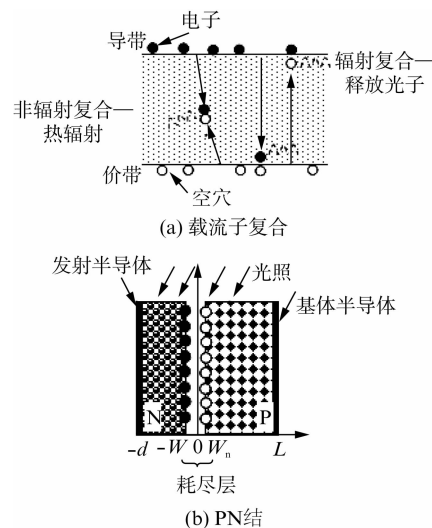


图1 半导体材料载流子复合过程及 PN 结
Fig. 1 Photogenerated carrier recombination and pn junction

当光照射到双极性半导体材料样品表面时,半导体材料吸收光子,在样品内部产生载流子(电子—空穴),光生载流子会进行扩散及复合,同时外加电场存在条件下,载流子也会发生迁移,故可得到载流子的传输模型^[7].

$$\frac{\partial N(r, t)}{\partial t} - D \nabla^2 N(r, t) - \mu \nabla [N(r, t) \cdot E] = G(r, t) - U(r, t) \quad (2)$$

式中 $N(r, t)$ —载流子密度; D, μ —双极性扩散率与迁移率; $G(r, t), U(r, t)$ —载流子产生率及复合率; r, t —空间坐标向量及时间.

载流子复合率 U 可以由下式得:^[7]

$$U(r, t) = \frac{N(r, t) - N_0(r)}{\tau} \quad (3)$$

式中 $N_0(r)$ —平衡状态的载流子密度; τ —载流子寿命.

对于太阳能电池,如图 1(b)所示的结构中,假设 PN 结两边的电介质半导体材料各向同性,则在平衡状态下的平衡载流子密度均匀分布,且平衡电子密度(N 型半导体)与平衡空穴密度(P 型半导体)相同.若扩散系数 D 与迁移率 μ 为常数,一般情况下,过剩载流子密度($\Delta n, \Delta p$)相比平衡状态下载流子密度(n_0, p_0)低很多时,即 $\Delta n \ll n_0, \Delta p \ll p_0$, (n —电子浓度, p —空穴浓度),则过剩载流子寿命满足

$$\frac{\Delta n}{\tau} \equiv \frac{n_0 + \Delta n}{\tau_n} - \frac{n_0}{\tau_{n_0}} = \frac{p_0 + \Delta p}{\tau_p} - \frac{p_0}{\tau_{p_0}} \quad (4)$$

式中 τ_n, τ_p —电子和空穴的寿命;

τ_{n0}, τ_{p0} —平衡状态下电子和空穴的平均复合寿命。

大多数情况下,太阳能电池 PN 结两端构建电场相比载流子扩散对过剩载流子空间分布的影响非常小,故 PN 结两端构建电场影响可忽略^[7]。对图 1 (b)所示同相 PN 结太阳能电池结构,当入射光照到太阳能电池表面,则太阳能表面吸收光子且沿着厚度方向衰减,由式(2)、(3)可得一维过剩少数载流子传输方程。

$$D_n \nabla^2 \Delta n(z, t) - \frac{\partial \Delta n(z, t)}{\partial t} - \frac{\Delta n(z, t)}{\tau_n} + G(z, t) = 0 \quad (-d \leq z \leq -w_p) \quad (5. a),$$

$$D_p \nabla^2 \Delta p(z, t) - \frac{\partial \Delta p(z, t)}{\partial t} - \frac{\Delta p(z, t)}{\tau_p} + G(z, t) = 0 \quad (w_n \leq z \leq L) \quad (5. b),$$

式中 μ_n, μ_p —电子和空穴的迁移率; D_n, D_p —电子和空穴的扩散率; $\Delta n, \Delta p$ —过剩电子密度和过剩空穴密度。

正弦调制激光,其强度按正弦规律变化,强度分布满足 Beer-Lambert 规律,则调制激光照射太阳能电池的载流子产生率可由式(6)得

$$G(z, t) = \frac{I_0}{2\hbar \omega_{in}} \beta(\hbar \omega_{in}) (1 - R) \eta_E \times \exp[-\alpha(\hbar \omega_{in}) \cdot z] [1 + \exp(i\omega t)], \quad (6)$$

式中 $\beta(\hbar \omega_{in})$ —激光吸收系数,为简单起见, $\beta(\hbar \omega_{in}) = \beta$; R —太阳能电池表面反射率; I_0 —激光最大光强; η_E —光子产生载流子的量子效率; ω, f —激光调制角频率与频, $\omega = 2\pi f$;

将式(6)分别代入式(5. a)和(5. b),并对载流子传输方程进行时域 Fourier 变换,可得到时域 Fourier 变换下的载流子传输方程:

$$\nabla^2 \Delta n(z, \omega) - \left(1 + \frac{i\omega\tau_n}{D_n}\right) \Delta n(z, \omega) + \frac{G(z, \omega)}{D_n} = 0, \quad (-d \leq z \leq -w_p) \quad (7. a)$$

$$\nabla^2 \Delta p(z, \omega) - \left(1 + \frac{i\omega\tau_p}{D_p}\right) \Delta p(z, \omega) + \frac{G(z, \omega)}{D_p} = 0, \quad (w_n \leq z \leq L) \quad (7. b)$$

$$G(z, \omega) = \frac{\beta \cdot (1 - R) \cdot \eta \cdot I_0}{2\hbar \omega_{in}} \cdot e^{-\beta \cdot z}, \quad (7. c)$$

式(7)中载流子浓度是稳态平衡条件下的少数载流子浓度,时域下平衡载流子浓度可由 Fourier 逆变换求得,若太阳能电池的材料参数是固定常数,即前述 Fourier 变换满足线性叠加原理。

对于太阳能电池,吸收调制激光产生的载流子

会在表面发生复合,则载流子浓度满足如下表面边界条件。

$$\begin{cases} D_n \frac{\partial \Delta n(z, \omega)}{\partial z} \Big|_{z=-d} = S_n \Delta n(z, \omega) \Big|_{z=-d} \\ D_p \frac{\partial \Delta p(z, \omega)}{\partial z} \Big|_{z=L} = -S_p \Delta p(z, \omega) \Big|_{z=L} \end{cases}, \quad (8)$$

式中 S_n —前表面载流子表面复合速率; S_p —后表面载流子表面复合速率。

在 PN 结的耗尽层边界处,PN 结电场产生的偏置电压会使过剩少数载流子快速消耗掉,当偏置电压 $V=0$,则满足 $z = -w_p, n \rightarrow n_0; z = w_n, p \rightarrow p_0$ 。若对于正向偏置电压,满足则 $n(z, \omega) = n_0 e^{qV/k_B T}, p(z, \omega) = p_0 e^{qV/k_B T}$,故过剩少数载流子浓度在太阳能电池 PN 结两端满足如下连续边界条件^[8-10]:

$$\begin{cases} \Delta n(z, \omega) \Big|_{z=-w_p} = n_0 [e^{qV/k_B T} - 1] \\ \Delta p(z, \omega) \Big|_{z=w_n} = p_0 [e^{qV/k_B T} - 1] \end{cases}, \quad (9)$$

式中 k_B —波尔兹曼常数; V —正向偏置电压; q —基本电荷; T —温度。

直接应用常系数偏微分方程求解式(7. a)和式(7. b)可得到过剩少数载流子(电子和空穴)的密度分布函数。

$$\begin{aligned} \Delta n(z, \omega) = & C_{n1} \cosh[(-z - w_p)/L_{\omega n}] + \\ & C_{n2} \sinh[(-z - w_p)/L_{\omega n}] + a_n \cdot e^{-\beta(z+d)} \\ & (-d \leq z \leq -w_p), \quad (10. a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta p(z, \omega) = & C_{p1} \cosh[(z - w_n)/L_{\omega p}] + \\ & C_{p2} \sinh[(z - w_n)/L_{\omega p}] + a_p \cdot e^{-\beta(z+d)} \\ & (w_n \leq z \leq L), \quad (10. b) \end{aligned}$$

式中 $L_{\omega n}, L_{\omega p}$ —过剩少数电子与空穴密度波扩散长度。

过剩少数电子与空穴密度波扩散长度可由下式计算^[11-12]:

$$L_{\omega n} = \sqrt{D_n \tau_n / (1 + i\omega \tau_n)}, \quad (11. a)$$

$$L_{\omega p} = \sqrt{D_p \tau_p / (1 + i\omega \tau_p)}. \quad (11. b)$$

利用边界条件式(8)和(9),可得到式(10)中的系数。

$$a_n = \frac{\beta(1 - R) I_0 \eta_E L_{\omega n}^2}{D_n \hbar \omega_{in} \cdot (1 - \beta^2 L_{\omega n}^2)}, \quad (12. a)$$

$$a_p = \frac{\beta(1 - R) I_0 \eta_E L_{\omega p}^2}{D_p \hbar \omega_{in} \cdot (1 - \beta^2 L_{\omega p}^2)}, \quad (12. b)$$

$$c_{n1} = n_0 (e^{qV/k_B T} - 1) - a_n e^{-\beta(d-w_p)}, \quad (12. c)$$

$$c_{p1} = p_0 (e^{qV/k_B T} - 1) - a_p e^{-\beta(d+w_n)}, \quad (12. d)$$

$$c_{n2} = \frac{c_{n1} \{ S_n \cosh [(d - w_p) / L_{\omega n}] + D_n / L_{\omega n} \sinh [(d - w_p) / L_{\omega n}] \} - a_n \cdot (S_n + \beta D_n)}{S_n \sinh [(d - w_p) / L_{\omega n}] + D_n / L_{\omega n} \cosh [(d - w_p) / L_{\omega n}]}, \quad (12. e)$$

$$c_{p2} = \frac{-a_p \cdot [(S_p - \beta D_p) e^{-\beta(L+d)}] - c_{p1} \{ S_p \cosh [(L - w_n) / L_{\omega p}] + D_p / L_{\omega p} \sinh [(L - w_n) / L_{\omega p}] \}}{S_p \sinh [(L - w_n) / L_{\omega p}] + D_p / L_{\omega p} \cosh [(L - w_n) / L_{\omega p}]}. \quad (12. f)$$

对于 Si 基太阳能电池, 同质 PN 结宽度相对于太阳能电池厚度可忽略不计, 即 $w_p = w_n = 0$. 由式

$$\int \Delta N(\hbar \omega_{in}, z) dz \approx \int_{-d}^0 \Delta n(z, \omega) dz + \int_0^L \Delta p(z, \omega) dz = L_{\omega n} \left[c_{n1} \sinh \frac{d}{L_{\omega n}} + c_{n2} \left(\cosh \frac{d}{L_{\omega n}} - 1 \right) \right] + L_{\omega p} \left[c_{p1} \sinh \frac{L}{L_{\omega p}} + c_{p2} \left(\cosh \frac{L}{L_{\omega p}} - 1 \right) \right] + \frac{a_n}{\beta} (e^{-\beta d} - 1) + \frac{a_p}{\beta} [e^{-\beta(L+d)} - e^{-\beta d}], \quad (13. a)$$

$$P(\hbar \omega_{em}) \approx F(\lambda_1, \lambda_2) \left[\int_{-d}^0 \Delta n(z, \omega) dz + \int_0^L \Delta p(z, \omega) dz \right], \quad (13. b)$$

式(13)为复数量, 由此可得调制激光诱发太阳能电池过剩少数载流子辐射复合产生红外辐射信号的幅频与相频特性.

$$|H(\hbar \omega_{in}, \omega)| = \sqrt{\operatorname{Re}[P(\hbar \omega_{in})] \Im + \operatorname{Im}[P(\hbar \omega_{in})] \Re}, \quad (14. a)$$

$$\varphi(\hbar \omega_{in}, \omega) = \tan^{-1} \left\{ \frac{\operatorname{Im}[P(\hbar \omega_{in})]}{\operatorname{Re}[P(\hbar \omega_{in})]} \right\}. \quad (14. b)$$

从式(13)和(14)可看出, 调制激光诱发太阳能电池过剩少数载流子辐射复合的红外辐射信号幅频与相频响应特性直接受载流子传输参数的影响, 同时也与太阳能电池结构参数、调制激光激励参数等有关, 因此可直接利用式(13)的载流子密度波模型分析调制激光参数、载流子传输参数及太阳能电池结构参数对过剩少数载流子辐射复合产生红外辐射信号的幅频与相频特性, 同时也可利用式(14)通过拟和确定太阳能电池载流子传输参数.

2 仿真分析

本文采用前述建立的调制激光诱发太阳能电池少数载流子密度波理论模型仿真分析载流子传输参数对载流子辐射复合产生红外辐射信号频域响应特性的影响. 设太阳能电池的基体半导体(Base)为 P 型半导体, 基体厚度 $L = 200 \mu\text{m}$; 发射半导体(Emitter)为 N 型半导体, 其厚度 $d = 0.5 \mu\text{m}$; 平衡状态下电子密度与空穴密度相同, 即 $n_0 = p_0 = 1.0 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$. 表面反射率 $R = 0.05$, 调制光强 $I_0 = 40 \text{mW/cm}^2$, 波长 $\lambda = 808 \text{nm}$, 吸收系数 $\beta = 658.94 \text{cm}^{-1}$, 正向偏置电压 $V = 0.606 \text{V}$. 表 1 给出了仿真分析参数.

(1) 可得调制激光诱发太阳能电池过剩少数载流子辐射复合的红外辐射信号如式(13)所示.

表 1 仿真分析参数

Table 1 Parameters of simulation

Emitter(设为 N 型)			Base(设为 P 型)		
$\tau_n (\mu\text{s})$	$D_n (\text{cm}^2/\text{s})$	$S_n (\text{cm/s})$	$\tau_p (\mu\text{s})$	$D_p (\text{cm}^2/\text{s})$	$S_p (\text{cm/s})$
10, 30, 50	10, 100, 1 000	10, 100, 1 000	10, 30, 50	10, 100, 1 000	10, 100, 1 000

利用式(14)进行调制激光诱发太阳能电池载流子密度波的幅频与相频响应特性的仿真分析. 图 2~4 分别给出了少数载流子传输参数(载流子寿命、扩散率及表面复合率)对少数载流子密度波的幅频与相频响应特性的影响及规律(即对少数载流子辐射复合产生的红外辐射信号的幅频与相频响应特性的影响及规律). 由图 2~4 可知, 在给定频率范围内, 调制激光诱发太阳能电池少数载流子密度波的幅频与相频特性曲线存在一个转折频率 f_c , 由式(11. a)和(11. b)可知, 随着调制频率增大, 少数载流子密度波的扩散长度会减小, 因此, 当调制频率超过一定频率(转折频率 f_c)时, 少数载流子密度波的幅值和相位均随频率的增加而降低, 这个结果与调制激光诱发双极性半导体材料少数载流子密度波的幅频与相频特性相一致^[6], 这也表明, 调制激光诱发太阳能电池少数载流子辐射复合的红外辐射信号的幅频与相频特性也会存在这个相同的转折频率 f_c . 由图 2 可知, 基体半导体少数载流子寿命对少数载流子密度波的幅值和相位影响较大, 且幅频与相频曲线的转折频率也不相同, 基体半导体少数载流子寿命越大, 其对应的转折频率越小. 调制频率满足 $f < f_c$, 在相同调制频率条件下, 随着基体半导体少数载流子寿命增加, 少数载流子密度波的幅值增大, 而相位几乎不变(见图 2(a)), 相反, 调制频率满足 $f > f_c$, 在相同调制频率条件下, 随着基体半导体少数

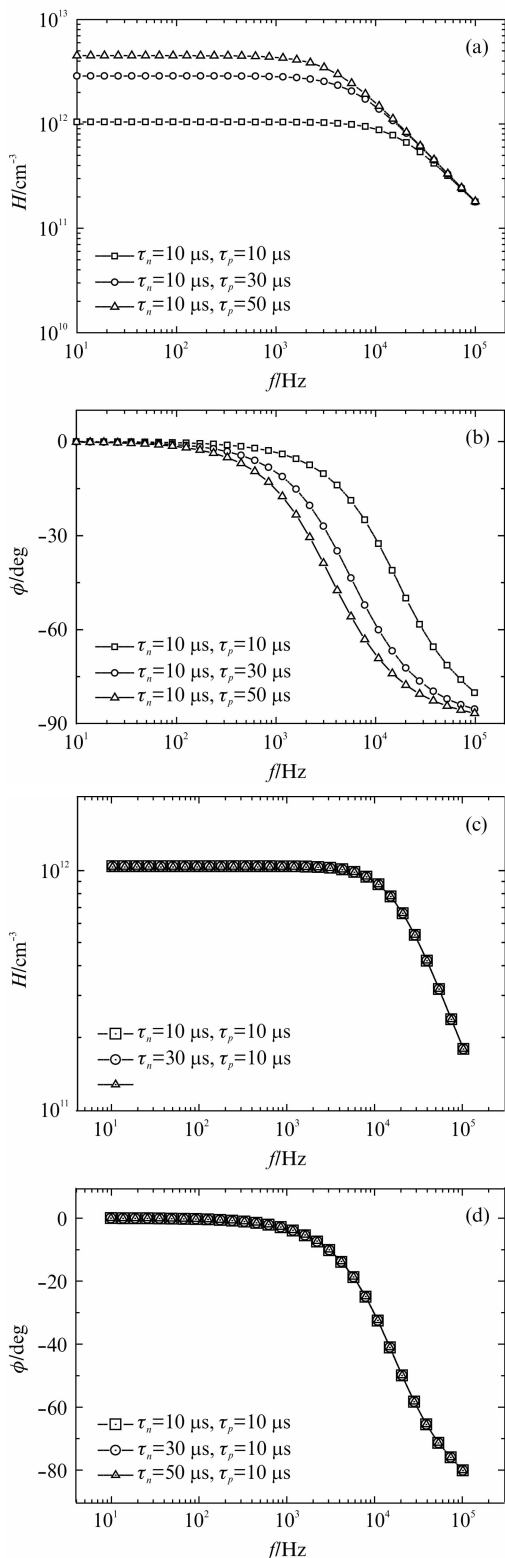


图2 载流子寿命对幅频及相频特性的影响: (a) ~ (b) 基体半导体载流子寿命的影响; (c) ~ (d) 发射半导体载流子寿命的影响 ($D_n = D_p = 10 \text{ cm}^2/\text{s}$, $S_n = S_p = 1\ 000 \text{ cm/s}$)

Fig.2 Carrier lifetime dependence of the response of amplitude and phase in frequency domain: (a) ~ (b) effect in base; (c) ~ (d) effect in emitter

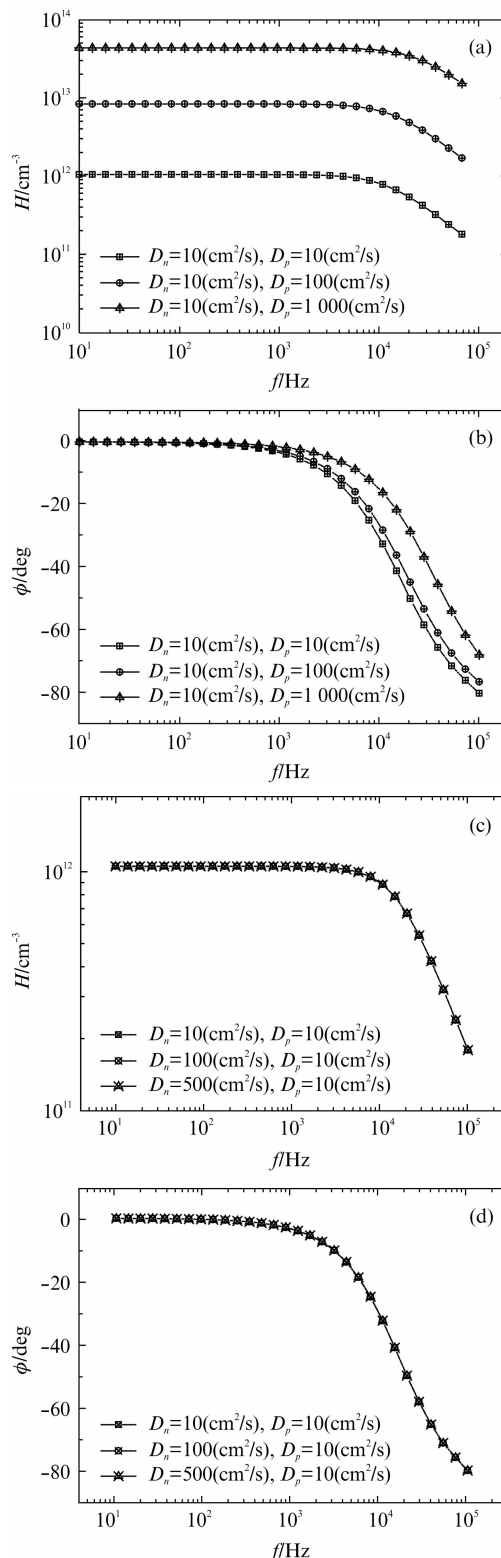


图3 载流子扩散率对幅频及相频特性的影响: (a) ~ (b) 基体半导体载流子扩散率的影响; (c) ~ (d) 发射半导体载流子扩散率的影响 ($\tau_n = \tau_p = 10 \text{ }\mu\text{s}$, $S_n = S_p = 1\ 000 \text{ cm/s}$)

Fig.3 Variation of the response of amplitude and phase in frequency domain with carrier diffusion coefficient: (a) ~ (b) effect in base; (c) ~ (d) effect in emitter

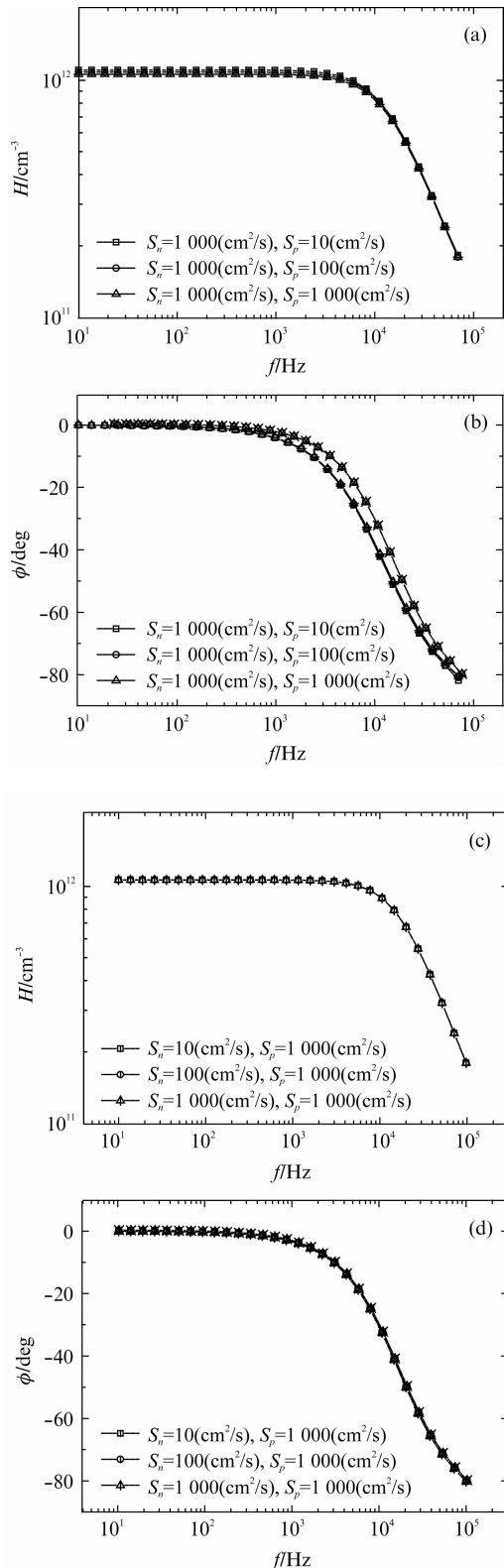


图4 表面复合率对幅频及相频特性的影响: (a) ~ (b) 基极的影响; (c) ~ (d) 发射极的影响 ($\tau_n = \tau_p = 10 \mu s, D_n = D_p = 10 \text{ cm}^2/\text{s}$)

Fig. 4 Effect of the surface recombination rate of carrier on response of amplitude and phase in frequency domain: (a) ~ (b) effect in base; (c) ~ (d) effect in emitter

载流子寿命增加,少数载流子密度波的相位相对超前,而幅值几乎不变(见图2(b)).发射半导体的少数载流子寿命对幅频与相频特性几乎没有影响(见图2(c)和2(d)).由图3(a)和图3(b)可知,基体半导体少数载流子的扩散率直接影响幅频与相频响应,基体半导体少数载流子的扩散率增大,载流子辐射复合产生红外辐射信号的幅值也会相应增大,但其转折频率 f_c 基本一致,而对于相频响应,调制频率满足 $f < f_c$,红外辐射信号的相位保持一致,而调制频率 $f > f_c$,基体半导体少数载流子的扩散率增大,红外辐射信号的相位会相应滞后.发射半导体的少数载流子扩散率对红外辐射信号的幅频与相频响应几乎没有影响(见图3(c)和3(d)).由图4(a)和图4(b)可知,基体半导体的表面复合率会影响载流子辐射复合产生红外辐射信号的幅频与相频响应,红外辐射信号的幅频与相频曲线的转折频率 f_c 基本一致,调制频率满足 $f < f_c$,表面复合率增大,红外辐射信号的幅值增加,而调制频率 $f > f_c$,则红外辐射信号的幅值基本不变.相反,调制频率满足 $f < f_c$,后表面复合率增大,红外辐射信号的相位几乎不变,而调制频率 $f > f_c$,则红外辐射信号的相位相对略微滞后.发射半导体的表面复合率对红外辐射信号的幅频与相频响应也几乎没有影响(见图4(c)和4(d)).

综上仿真分析,太阳能电池的基体半导体的少数载流子传输参数(载流子寿命、扩散率及表面复合率)对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与相频响应的影响较大,而发射半导体的少数载流子传输参数影响较小.少数载流子寿命和扩散率对红外辐射信号的幅频与相频响应影响相对较大,而表面复合率影响相对较小.

3 红外辐射特性频域扫描试验与载流子传输参数计算

试验系统组成原理图如图5所示,光强按正弦规律调制的激光(波长808 nm)照射到太阳能电池片表面,太阳能电池探测位置发出的红外辐射信号经过一个长通滤波器(long pass filter, 1000 nm)后,由InGaAs红外探测器(探测面积 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$,光谱响应带宽: $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$)进行探测,并将探测的红外辐射信号与调制激光参考信号通过数字锁相放大器(SR830)进行锁相运算而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

幅值与相位. 试验用太阳能电池为多晶硅 (m-Si) 电池, 电池尺寸为 $15.6 \text{ cm} \times 15.6 \text{ cm}$.

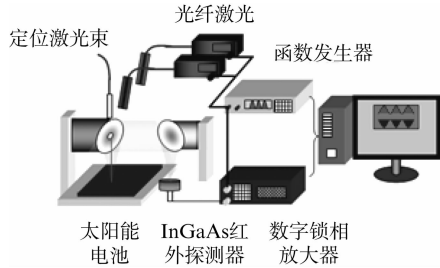


图 5 频率扫描试验系统组成原理图
Fig. 5 Frequency-scanning experimental setup

在进行频率扫描试验之前, 利用 InGaAs 红外相机 (FLIR 公司, 型号: SC2 500 VN, 像素: 320×240 , 光谱响应带宽: $0.4 \sim 1.7 \mu\text{m}$, 带有长通滤波器 long pass filter, 1000 nm) 记录光致发光产生的红外辐射图像 (见图 6).

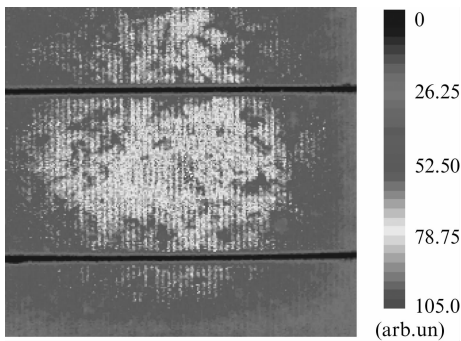


图 6 光致发光红外辐射图像, $I_0 = 40 \text{ mW/cm}^2$
Fig. 6 Photoluminescence of the infrared radiation image, $I_0 = 40 \text{ mW/cm}^2$

由图 6 可看出, 太阳能电池的红外辐射图像存在不均匀性, 表明太阳能电池不同位置的少数载流子传输特性不同.

为了分析偏置电压对太阳能电池少数载流子辐射复合产生红外辐射信号的影响, 在太阳能电池两端外接电阻, 通过改变电阻值而改变偏置电压. 图 7 (a) 给出了太阳能电池表面红外辐射信号幅值平均值 (红外辐射信号幅值图像像素值总和与太阳能电池表面积的比值) 与偏置电压之间的关系, 由图可知, 在光强 $I_0 = 40 \text{ mW/cm}^2$ 条件下, 当偏置电压较小时 (约 $< 0.4 \text{ V}$), 红外辐射信号幅值基本不变, 而超过一定电压值时 (0.4 V), 太阳能电池表面红外辐射信号强度随偏置电压增大而迅速增大. 由于偏

置电压增大, PN 结电场增强, 可进一步阻碍少数载流子的扩散, 使得载流子密度增大, 导致红外辐射信号强度增强. 图 7 (b) 给出了仿真计算结果, 当偏置电压 $> 0.4 \text{ V}$, 载流子密度迅速增加, 与试验结果基本吻合.

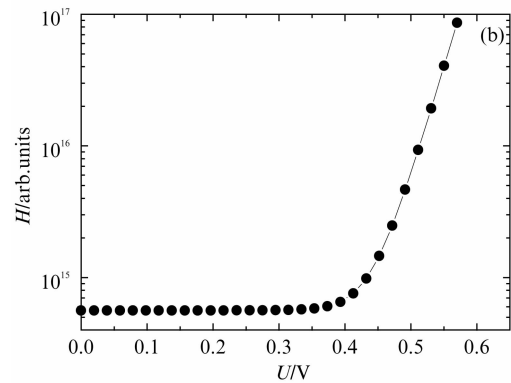
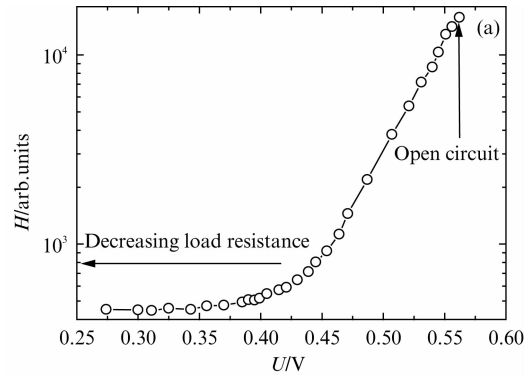


图 7 太阳能电池的正向偏置电压对红外辐射信号幅值的影响 (调制频率 $f = 10 \text{ Hz}$): (a) 试验结果; (b) 仿真结果

Fig. 7 The infrared radiation amplitude of solar cell versus forward bias voltage (modulated frequency $f = 10 \text{ Hz}$): (a) experimental result, and (b) simulation result

选取图 6 中两个不同位置进行频率扫描试验研究, 扫描频率范围为 $f = 10 \text{ Hz} \sim 100 \text{ kHz}$, 图 8 给出了通过频率扫描得到的红外辐射信号频域响应特性和利用式 (14) 得到的拟和曲线.

由图 8 可知, 在给定调制频率范围内, 太阳能电池位置 A 的少数载流子辐射复合产生的红外辐射信号的幅值高于位置 B, 而在调制频率 $f > 10 \text{ kHz}$, 位置 A 处的红外辐射信号的相位超前位置 B. 表 2 列出了利用式 (14) 拟和得到的少数载流子传输参数.

由表 2 可知, 太阳能电池位置 A 处基体半导体的载流子寿命和扩散率均高于位置 B, 而表面复合率则低于位置 B, 由于前述仿真分析可知, 发射半导

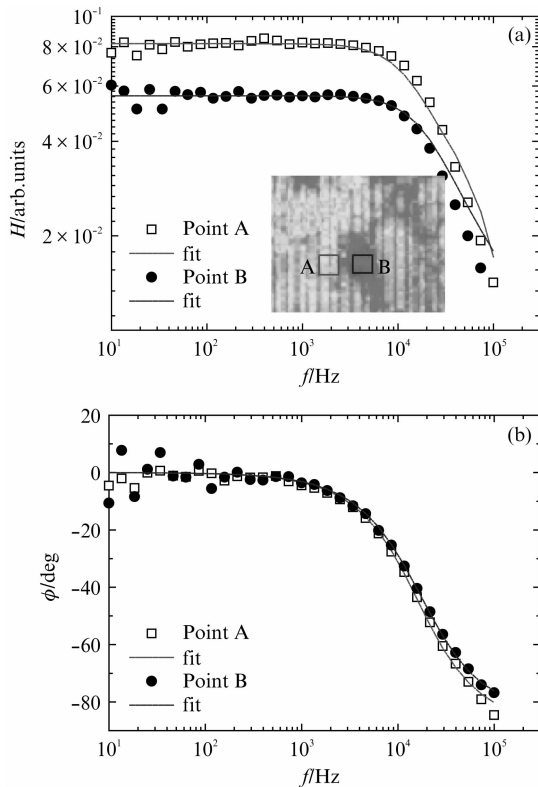


图8 红外辐射信号频域响应特性: (a)幅频响应; (b)相频响应

Fig.8 Frequency domain response of infrared radiation signal: (a) amplitude-frequency responses, and (b) phase-frequency responses

表2 过剩少数载流子传输参数测量结果

Table 2 Measured results of excess minority carrier transport parameters

位置	发射半导体 (Emitter)			基体半导体 (Base)		
	$\tau_E(\mu\text{s})$	$D_E(\text{cm}^2/\text{s})$	$S_E(\text{cm}/\text{s})$	$\tau_B(\mu\text{s})$	$D_B(\text{cm}^2/\text{s})$	$S_B(\text{cm}/\text{s})$
Point A	15.3	86.1×10^3	12.3×10^4	25.4	4.7	49.4
Point B	20.7	10.5	10.6×10^4	8.94	0.26	103.4

体载流子传输参数对红外辐射信号的频域响应影响较小,而基体半导体的载流子传输参数对红外辐射信号的频域响应特性影响较大,因此,A处基体半导体少数载流子传输参数的综合影响使其红外辐射信号的幅值增大,而相应的相位超前。

4 结论

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频域响应特性可用于分析太阳能电池少数载流子传输特性.基于一维载流子传输方程,建立了调制激光诱发PN结少数载流子密度模型,利用该模型仿真分析了载流子寿命、扩散率、

表面复合率及光电压对辐射复合产生红外辐射信号幅频和相频特性的影响.基体半导体载流子传输参数对红外辐射频域响应特性影响较大,而发射半导体载流子传输参数的影响较小.在光强一定条件下,偏置电压超过一定电压值时,太阳能电池表面红外辐射信号强度随偏置电压增大而迅速增大.利用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频域响应特性可直接测得太阳能电池的载流子传输参数.为进一步检测与评价太阳能电池的性能奠定了理论基础。

References

- [1] MANDELIS A, ZHANG Yu, MELNIKOV A. Statistical theory and applications of lock-in carrierographic image pixel brightness dependence on multi-crystalline Si solar cell efficiency and photovoltage [J]. *J. Appl. Phys.*, 2012, **112**: 054505.
- [2] YAN Ting-ting, ZHANG Guang-chun, LI Guo-hua, et al. Application of photoluminescence for the testing of defects in crystalline silicon based solar cells [J]. *Semiconductor Technology*, (严婷婷,张光春,李国华,等.光致发光技术在检测晶体Si太阳能电池缺陷的应用.半导体技术), 2010, **35**(5): 454-455.
- [3] TRUPKE T, Bardos R A, Abbott M D. Suns-photoluminescence: Contactless determination of current-voltage characteristic of silicon wafers [J]. *Appl. Phys. Letter*, 2005, **87**: 093503.
- [4] Schubert MC, PINGEL S, WARTA W. Quantitative carrier lifetime images optically measured on rough silicon wafers [J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **101**: 124907.
- [5] MANDELIS A, BATISTA J, SHAUGHNESSY D. Infrared photocarrier radiometry of semiconductors: Physical principles, quantitative depth profilometry, and scanning imaging of deep subsurface electronic defects [J]. *PHYSICAL REVIEW B*, 2003, **67**: 205208.
- [6] LI Bin-cheng, SHAUGHNESSY D, MANDELIS A, et al. Three-layer photocarrier radiometry model of ion-implanted silicon wafers [J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, **95** (12): 7832.
- [7] Mandelis A. *Diffusion-Wave Fields Mathematical Method and Green Functions* [M]. New York: Springer, 2001, 585-595.
- [8] FANRENBRUCH L, BUBE R H. *Fundamentals of Solar Cells* [M]. New York: Academic, 1983, Chap. 3.
- [9] NELSON J. *The physics of solar cells* [M]. London: Imperial College press, 2003, 105-139.
- [10] WURFEL P, WURFEL U. *Physics of solar cells* [M]. Weinheim: Wiley VCH, 2005.
- [11] GUNDEL P, KWAPIL W, Schubert M C, et al. Approach to the physical origin of breakdown in silicon solar cells by optical spectroscopy [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, **108**(12): 123703-123703-5.
- [12] LIU Xian-ming, LI Bin-cheng, ZHANG Xi-ren. Photocarrier radiometric and ellipsometric characterization of ion-implanted silicon wafers [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, **103**(12): 123706-123706-4.