

一维 $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 太阳能电池的激光辐照模拟李广济^{1**}, 陆健^{1***}, 王程民^{1,2}, 张宏超^{1*}, 周大勇³¹南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094;²淮安信息职业技术学院机械工程学院, 江苏 淮安 223003;³上海空间电源研究所高效能量转换技术研究室, 上海 200245

摘要 采用有限元数值模拟方法,对一维 $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 太阳能电池在 1070 nm 连续激光辐照下的输出特性进行了研究。通过计算零偏压下太阳能电池内部的载流子复合速率分布,验证了模型的有效性。基于该模型研究了偏压对载流子复合速率分布的影响及太阳能电池结构对光电转换性能的影响。计算得到了在 $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 激光功率密度下太阳能电池的电流密度-电压曲线。研究结果表明,随着正向偏压的增大,空间电荷区的复合速率迅速增大,因此正向偏压是影响激光电转换效率的主要因素;电池的短路电流随着 pn 结深的增大呈指数衰减,而开路电压随着基区厚度的增大先增大后趋于饱和。这些研究为太阳能电池的设计提供了参考。

关键词 材料; 能量传输; 太阳能电池; 激光无线充电; 数值仿真

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.101601

Simulation of Laser Irradiation of One-Dimensional $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ Solar CellsLi Guangji^{1**}, Lu Jian^{1***}, Wang Chengmin^{1,2}, Zhang Hongchao^{1*}, Zhou Dayong³¹ School of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China;² College of Mechanical Engineering, Huai'an Vocational College of Information Technology, Huai'an, Jiangsu 223003, China;³ Laboratory of High-Efficiency Power Conversion, Shanghai Institute of Space Power-Sources, Shanghai 200245, China

Abstract The output characteristics of the one-dimensional $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ solar cells irradiated by a continuous wave (CW) laser with a wavelength of 1070 nm are studied by the finite element numerical simulation method. The validity of the model is verified by the calculation of the distribution of the recombination rate of the internal carrier in solar cells under a zero-bias. The effect of the bias voltage on the carrier recombination rate distribution and the influence of the structure of the solar cell on the photoelectric conversion performance are studied, and the current density-voltage curve of the solar cell is obtained under a laser power density of $100 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$. The research results show that, with the increase of the forward bias, the recombination rate in the space charge region increases rapidly, so the forward bias is the main factor which influences the conversion efficiency. The short-circuit current of the cell decreases exponentially with the increase of the depth of the pn junction, however the open circuit voltage increases first and then tends to saturation with the increase of the thickness of the base area. These results provide a reference for the design of solar cells.

Key words materials; energy transfer; solar cell; laser wireless charging; numerical simulation

OCIS codes 160.6000; 260.2160; 000.4430

1 引言

近年来,激光无线能量传输成为研究热点之一,在军用领域和日常生活中都有广阔的应用前景,其主要优点是能实现高能量密度、远距离和动态传输。

除了高功率激光外^[1],接收端的太阳能电池也起着至关重要的作用。在太阳能电池的研制中,太阳能电池模型发挥着重要的指导作用。Sutherland^[2]计算了异质结及渐变材料太阳能电池的性能参数,给出了详细的推导过程。Durbin 等^[3]计算了光子回

收稿日期: 2018-03-16; 修回日期: 2018-04-05; 录用日期: 2018-05-09

基金项目: 国防基础科研计划(JCKY2016606C002)、上海航天科技创新基金(SAST20161113)

* E-mail: hongchao@njjust.edu.cn; ** E-mail: ligj@njjust.edu.cn; *** E-mail: lujian@mail.njust.edu.cn

收对复合电流的抑制作用及对开路电压的影响。Li等^[4-6]在 COMSOL Multiphysics 环境下完善了模型,建立了从一维到三维的太阳能电池模型。在太阳能电池的结构设计方面,谢波实等^[7]利用计算机辅助工艺设计(TCAD)仿真工具,设计了两种不同背场的太阳能电池结构,分析了温度对短路电流和开路电压的影响;石鑫等^[8-9]从增大光子吸收的角度,设计了增大透射的减反膜结构、增大反射的衍射光栅背面反射器结构等。

以上研究基于太阳光辐照下的太阳能电池模型,但对于激光辐照下太阳能电池的光电特性的研究鲜有报道。激光为单一波长,可实现高能量密度的传输,电池的转换效率和针对激光波长的结构设计等都有待研究。波长为 1070 nm 的光位于大气窗口,远距离传输的能耗较小,针对该波长选用禁带宽度为 1.01 eV 的 $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 太阳能电池材料。本文利用 COMSOL Multiphysics 软件^[10],建立了用于计算激光辐照下 $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 太阳能电池光电转换特性的一维结构模型。该模型可用于研究载流子复合速率分布、结深和基区厚度对太阳能电池输出性能的影响,该研究为应用于激光无线能量传输的太阳能电池的设计和后续激光能量转换太阳能电池模型的完善提供了参考。

2 太阳能电池模型

一束光照射在太阳能电池表面,一部分被反射,另一部分进入太阳能电池内部,光子能量 $E > E_g$ (E_g 为材料的禁带宽度)的光子被吸收,产生电子空穴对,电子空穴对在运输到 pn 结前会以一定的概率发生复合。到达 pn 结处的电子空穴对在 pn 结内建电场的作用下发生分离,电子向 n 区移动,空穴向 p 区移动,在 pn 结两端形成电势差。计算过程中用到的理论模型及相关的材料参数介绍如下。

2.1 载流子的产生

根据朗伯-比尔定律,材料对光的吸收使光的辐照度和光子通量随深度的增加呈指数衰减。假设所有被吸收的光子都产生载流子,载流子的光谱产生率 g ^[11]可表示为

$$g(E, x) = [1 - R(E)] b_s(E, T_s) \alpha(E, x) \cdot \exp\left[-\int_0^x \alpha(E, x') dx'\right], \quad (1)$$

式中 $E = hc/\lambda$, 其中 h 为普朗克常量, c 为光速, λ 为波长; R 为入射面的反射率; b_s 为入射面处的光子通量; T_s 为环境温度; α 为吸收系数; x 为入射深度, x'

为积分变量。实验中使用的激光波长为 1070 nm, 当激光功率为 P 时,对应的初始光子通量为

$$b_s = \frac{P}{S} \cdot \frac{\lambda}{hc}, \quad (2)$$

式中 S 为太阳能电池接受光照的面积。

2.2 载流子复合

在光照条件下,太阳能电池中载流子的产生和复合是同时存在的,复合率^[4,11]可表示为

$$U = U_{\text{SRH}} + U_{\text{rad}} + U_{\text{Aug}}, \quad (3)$$

式中 U_{SRH} 为陷阱复合率,又称肖克莱-里德-霍尔(SRH)复合率; U_{rad} 为辐射复合率; U_{Aug} 为俄歇复合率,其表达式分别为

$$U_{\text{SRH}} = \frac{np - n_i^2}{\tau_{\text{trap}}^n (p + p_t) + \tau_{\text{trap}}^p (n + n_t)}, \quad (4)$$

$$U_{\text{rad}} = B_{\text{rad}} (np - n_i^2), \quad (5)$$

$$U_{\text{Aug}} = (C_n n + C_p p) (np - n_i^2), \quad (6)$$

式中 n 、 p 分别为电子和空穴的浓度; n_i 为本征载流子浓度; τ_{trap}^n 、 τ_{trap}^p 分别为电子和空穴的陷阱寿命; n_t 、 p_t 分别为电子和空穴的陷阱态密度; B_{rad} 为辐射复合系数; C_n 、 C_p 分别为电子和空穴的俄歇复合系数。辐射复合和俄歇复合由能带结构引起,在本征半导体和缺陷半导体中都存在,是不可避免的。缺陷复合发生在缺陷半导体和掺杂半导体中,表面缺陷和异质结的晶界也会发生缺陷复合^[11]。

2.3 一维载流子的传输方程

半导体的输运方程组包括关于载流子浓度的连续性方程和关于电势的泊松方程,其一维形式^[11]为

$$D_n \frac{d^2 n}{dx^2} + \mu_n F \frac{dn}{dx} + \mu_n n \frac{dF}{dx} - U_n + G = 0, \quad (7)$$

$$D_p \frac{d^2 p}{dx^2} - \mu_p F \frac{dp}{dx} - \mu_p p \frac{dF}{dx} - U_p + G = 0, \quad (8)$$

$$\frac{d^2 \phi}{dx^2} = \frac{q}{\epsilon_s} [-\rho_{\text{fixed}}(x) + n - p], \quad (9)$$

式中 D_n 、 D_p 分别为电子和空穴的扩散系数; U_n 、 U_p 为电子和空穴的复合率; μ_n 、 μ_p 分别为电子和空穴的迁移率; G 光子产生率; q 为电子的电荷量; F 为静电场; ϕ 为电势; ϵ_s 为材料的介电常数; ρ_{fixed} 为掺杂浓度, $\rho_{\text{fixed}}(x) = -N_a(x) + N_d(x)$, 其中 N_a 、 N_d 分别为受主和施主离子浓度。半导体输运方程组描述了载流子的产生和复合对载流子浓度 n 、 p 及电势 ϕ 的影响。

2.4 $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 太阳能电池结构模型及材料参数

$\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 太阳能电池为单结 np 型结构,激光从 n 区入射。其一维模型结构的示意图如图 1 所示。

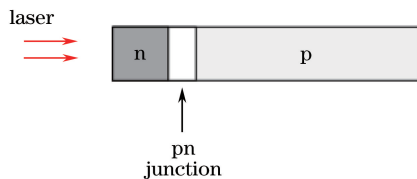


图1 太阳能电池模型的结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of solar cell model

表1 $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 太阳能电池的材料参数Table 1 Material parameters of $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ solar cell

Parameter	Content	Parameter	Value
Material	$\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$	Diffusion coefficient of n region / ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	188.7
Relative permittivity	13.42	Diffusion coefficient of p region / ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	7
Band gap / eV	1.01	Electron mobility / ($10^3 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	7.62
Electron affinity / eV	4.32	Hole mobility / ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	300
Effective mass of n region	$0.050m_0$	Electron lifetime / ns	4
Effective mass of p region	$0.48m_0$	Hole lifetime / ns	10
Refractive index at 1070 nm	3.6	Auger coefficient / ($10^{-29} \text{ cm}^6 \cdot \text{s}^{-1}$)	7
Absorption index at 1070 nm	0.2	Radiative recombination / ($10^{-11} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	9.6

太阳能电池两端电极接触为理想欧姆接触,计算过程中不考虑表面复合,两电极间加正向偏压,以电压扫描的方式计算太阳能电池的输出特性。

3 仿真结果与讨论

计算了零偏压下太阳能电池内部的载流子复合速率分布,仿真结果如图2所示。

由图2(a)可知,在零偏压下,陷阱复合主要发生在p型掺杂的基区,n型掺杂发射区的复合速率较小,在空间电荷区也有载流子复合发生。由

根据上海空间电源研究所提供的太阳能电池参数^[12],模型设置为:发射区为n型掺杂,掺杂浓度(粒子数浓度,全文同)为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$;基区为p型掺杂,掺杂浓度为 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。所选激光为连续激光,波长为1070 nm,作用功率密度为 100 mW/cm^2 。 $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 太阳能电池材料的其他参数^[13]见表1,其中 m_0 为电子的静止质量。

图2(b)可知,辐射复合主要发生在发射区,尤其是在距离表面较近的位置,复合速率在空间电荷区附近几乎为零,基区也有少量复合存在。由图2(c)可知,俄歇复合主要发生在发射区,距离表面较近,与辐射复合相似但其复合速率略小于辐射复合的,而在空间电荷区和整个基区的复合速率几乎为零。该结果和文献[4]的报道结果相符合,所不同的是该模型未考虑表面复合,因此在两端面处略有差异。利用该模型进行简单的计算具有合理性。

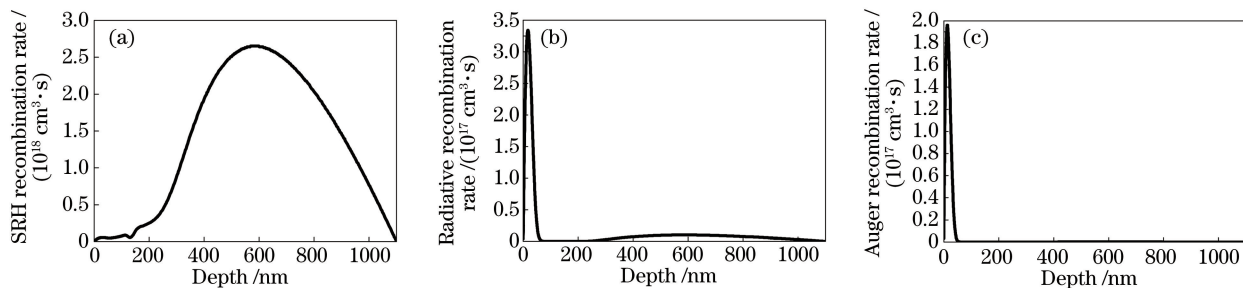


图2 零偏压下太阳能电池内部的载流子复合速率分布。(a)陷阱复合;(b)辐射复合;(c)俄歇复合

Fig. 2 Distribution of recombination rate of carrier in solar cell under zero bias.

(a) SRH recombination; (b) radiative recombination; (c) Auger recombination

在计算正向偏压对载流子复合的影响时,将发射极电压保持在0 V,基极以0.1 V为步长进行扫描,计算电池内部载流子的总复合速率分布,结果如图3所示。图3(a)~(e)所示分别对应0,0.1,0.2,0.3,0.4 V的基极电压。

如图3(a)所示,零偏压下载流子的复合速率分

布为图2中三种复合机制的叠加,可以看出,陷阱复合速率远大于辐射复合与俄歇复合速率之和。随着正向偏压的增大,如图3(b)~(e)所示,发射区与基区的复合速率几乎保持不变,空间电荷区的复合速率迅速增大,并占据主导地位。这是因为随着偏压的增大,pn结区的内建电势差降低,空间电荷区的载

流子注入增多^[14],在这一区域内缺陷的复合速率迅速增大,而电子的注入效率大于空穴的,故复合速率峰值偏向 p 区。当正向偏压为 0.4 V 时,空间电荷区

的载流子复合速率已经超过 $1.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}$ 。太阳能电池的最佳工作电压为 0.48 V,因此空间电荷区载流子的复合是影响太阳能电池输出性能的主要因素。

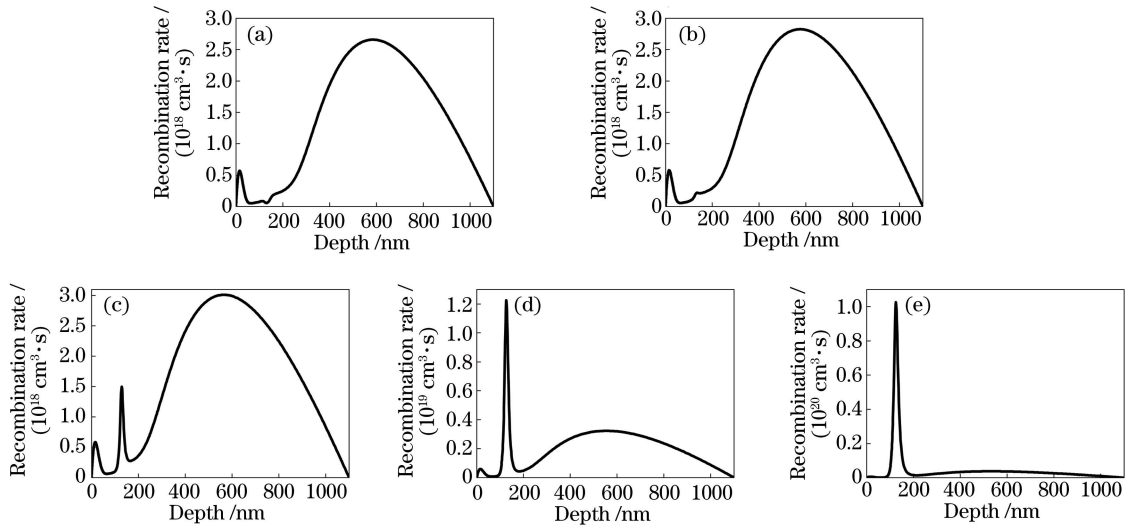


图 3 不同偏压下太阳能电池内部的载流子复合速率分布。(a) 0 V;(b) 0.1 V;(c) 0.2 V;(d) 0.3 V;(e) 0.4 V

Fig. 3 Distribution of recombination rate of carrier in solar cell under different biases.

(a) 0 V; (b) 0.1 V; (c) 0.2 V; (d) 0.3 V; (e) 0.4 V

为了研究结深(即发射区的厚度)和基区的厚度对太阳能电池激光电转换性能的影响,分别模拟了结深对短路电流的影响及基区厚度对开路电压的影响,结果如图 4 所示,其中图 4(a)所示为固定基区

厚度为 1000 nm 时改变发射区厚度计算得到的太阳能电池短路电流;图 4(b)所示为固定发射区厚度为 100 nm 时改变基区厚度计算得到的太阳能电池的开路电压。

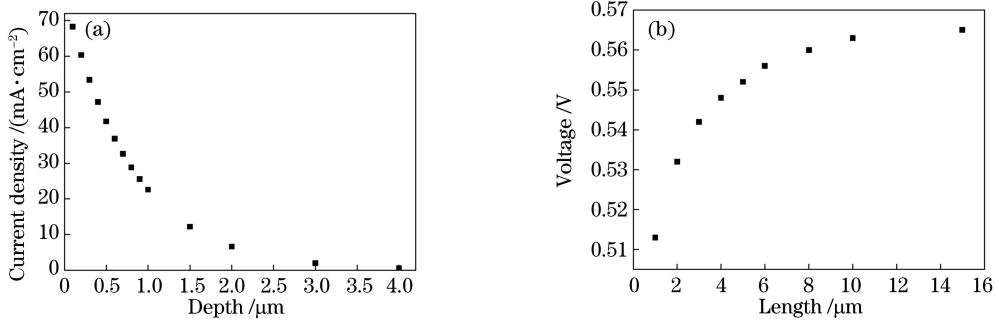


图 4 结深与基区厚度对太阳能电池性能的影响。(a)结深与短路电流密度间的关系;(b)基区厚度与开路电压间的关系

Fig. 4 Effects of junction depth and base area thickness on performance of solar cells.

(a) Junction depth versus short circuit current density; (b) base area thickness versus open circuit voltage

由朗伯-比尔定律可知,激光能量随着入射深度的增大呈指数衰减,光生载流子的分布也为指数分布。扩散长度描述了热平衡状态的少数载流子在复合前扩散的平均距离,而载流子只有在复合前运输到 pn 结空间电场的附近才会发生有效分离,产生光生电流。随着 pn 结深的增大,靠近表面的高浓度过剩载流子需要运动更长的距离才能到达 pn 结处,因此复合几率增大,光生电流减小。由图 4(a)可知,光生电流也呈类似指数衰减。

载流子被 pn 结有效分离后输运到接触电极,若外电路开路就得到开路电压,因此开路电压与有效分离的载流子数量正相关。随着基区厚度的增大,太阳能电池对激光的吸收率增大,光生载流子增多,开路电压增大;而载流子密度随着深度的增大呈指数衰减,因此随着基区厚度的增大,光生载流子数量趋于稳定;当基区厚度大到能完全吸收激光时,光生载流子不再增多,开路电压趋于饱和,如图 4(b)所示。

在实际的太阳能电池中,由于表面复合的存在及发射区掺杂浓度的需要,发射极的厚度不可能无限小;随着基区厚度的增大,太阳能电池的串联电阻增大,因此基区厚度也有一定的限制。在计算太阳能电池在激光辐照下的电流密度-电压(J-V)曲线时,发射区和基区厚度采用上海空间电源研究所提供的样品参数,即发射区厚度为 100 nm,基区厚度为 3000 nm。正向偏压的扫描步长为 0.01 V,结果如图 5 所示。

由 J-V 曲线可以提取激光辐照下太阳能电池的性能参数,包括开路电压、短路电流、最大工作电压、

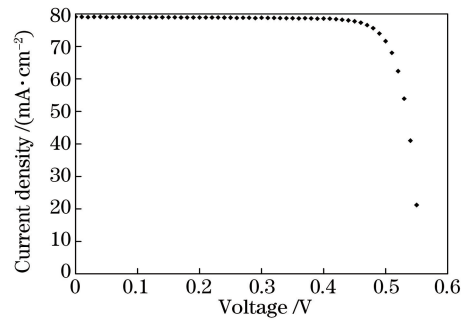


图 5 太阳能电池 J-V 曲线的模拟结果

Fig. 5 Simulation result of J-V curve of solar cell
最大工作电压、填充因子和转换效率,结果见表 2。

表 2 从模拟的 J-V 曲线中提取的参数

Table 2 Parameters extracted from simulated J-V curve

Parameters	Open-circuit voltage /V	Short-circuit current / $(\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2})$	Maximum voltage /V	Maximum current / $(\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2})$	Fill factor /%	Conversion efficiency /%
Value	0.56	79.12	0.48	75.64	81.9	36.3

$\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 太阳能电池的禁带宽度为 1.01 eV,因此开路电压略小,仅有 0.56 V;在 $100\text{ mW}/\text{cm}^2$ 的激光功率密度下,短路电流高达 $79.12\text{ mA}/\text{cm}^2$,转换效率为 36.3%,这是其他电池很难达到的。载流子复合对填充因子和转换效率也有影响。在实际的太阳能电池中,载流子寿命大于模拟数值,缺陷复合速率低于模拟值,在结构设计中考虑表面透射和背表面反射可有效增大光子的吸收效率^[8-9, 15-16]。因此实际生产中, $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 太阳能电池的激光电转换效率可能高于模拟结果。

4 结 论

通过对一维 $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 太阳能电池模型的计算发现,随着正向偏压的增大,空间电荷区附近的载流子复合速率迅速增大,峰值偏向 p 型区域。随着 pn 结深度的增大,短路电流呈指数形式衰减,最终趋于零;随着基区厚度的增大,开路电压先增大后趋于饱和。计算得到了 $100\text{ mW}/\text{cm}^2$ 激光功率密度辐照下太阳能电池的 J-V 曲线,发现短路电流高达 $79.12\text{ mA}/\text{cm}^2$,转换效率为 36.3%,输出性能优于单结太阳能电池的^[11,17]。

参 考 文 献

[1] Feng Y, Jiang H W, Zhang L. Advances in high power Raman fiber laser technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0201005.
冯衍, 姜华卫, 张磊. 高功率拉曼光纤激光器技术研究进展[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0201005.

[2] Sutherland J E, Hauser J R. A computer analysis of heterojunction and graded composition solar cells[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1977, 24(4): 363-372.
[3] Durbin S M, Gray J L. Numerical modeling of photon recycling in solar cells[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1994, 41(2): 239-245.
[4] Li X F, Hylton N P, Giannini V, et al. Multi-dimensional modeling of solar cells with electromagnetic and carrier transport calculations[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2012, 21(1): 109-120.
[5] Shang A, Li X F. Photovoltaic devices: Opto-electro-thermal physics and modeling[J]. Advanced Materials, 2016, 29(8): 1603492.
[6] Li X F, Hylton N P, Giannini V, et al. Bridging electromagnetic and carrier transport calculations for three-dimensional modelling of plasmonic solar cells[J]. Optics Express, 2011, 19(54): A888-A896.
[7] Xie B S, Dai P, Luo X D, et al. IV characteristics and analysis for GaAs based single junction solar cells with different back surface fields[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0223002.
谢波实, 代盼, 罗向东, 等. 不同背场的 GaAs 基单结太阳能电池伏安特性及分析[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0223002.
[8] Shi X, Sun C, Wang X Q. One-dimensional diffraction grating structure for rear reflection surface of thin film silicon solar cells[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(1): 010501.
石鑫, 孙诚, 王晓秋. 适用于薄膜硅太阳能电池背反

- 射面的一维衍射光栅结构[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 010501.
- [9] Lu H D, Tie S N, Liu J. Absorption enhancement of crystalline silicon thin film solar cell using nano binary silver grating[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(8): 080401.
卢辉东, 铁生年, 刘杰. 银纳米光栅增加晶体硅薄膜太阳能电池光吸收的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 080401.
- [10] Matt P. Study of LED luminous efficiency by multi physical field simulation [EB/OL]. (2014-12-03) [2018-01-05]. <http://cn.comsol.com/blogs/investigating-led-efficiency-via-multiphysics-simulation/>.
- [11] Nelson J. The physics of solar cells[M]. Gao Y, Transl. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2011.
Nelson J. 太阳能电池物理[M]. 高扬, 译. 上海: 上海交通大学出版社, 2011.
- [12] Li G X, Sun L J, Chen M J, *et al.* Physics power technology[M]. Beijing: Science Press, 2015.
李国欣, 孙利杰, 陈萌炯, 等. 物理电源技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [13] Bhattacharya P, Yang L Y. Semiconductor optoelectronic devices[M]. Englewood: Prentice Hall, 1996.
- [14] Liu E K, Zhu B S, Luo J S. The physics of semiconductors[M]. 7th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016.
刘恩科, 朱秉升, 罗晋生. 半导体物理学[M]. 第7版. 北京: 电子工业出版社, 2016.
- [15] Deng Q W, Huang Y G, Zhu H L. Newest achievement of more than 25% conversion efficiency with crystalline silicon-base solar cell[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(11): 110002.
邓庆维, 黄永光, 朱洪亮. 25%效率晶体硅基太阳能电池的最新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 110002.
- [16] Wang Y, Wang X, Li L W. Properties of light trapping of thin film solar cell based on surface plasmon polaritons [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(9): 092401.
王玥, 王暄, 李龙威. 基于表面等离激元薄膜太阳能电池陷光特性的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(9): 092401.
- [17] Araújo G L, Martí A. Absolute limiting efficiencies for photovoltaic energy conversion[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1994, 33(2): 213-240.