

连续激光供能单结 GaAs 光电池输出特性仿真

孙 浩¹, 周大勇², 张宏超¹, 陆 健¹

(1. 南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094; 2. 上海空间电源研究所, 上海 200245)

摘要: 为了研究 808 nm 连续激光供能对单结 GaAs 光电池输出性能的影响, 利用 COMSOL 和 MATLAB 软件构建了相应物理模型, 通过数值仿真研究了激光功率密度、等效串并联电阻和减反膜对热稳态时光电池伏安特性、开路电压、短路电流、光电转换效率、填充因子和稳态工作温度的影响。结果表明: 随着激光功率密度增大, 开路电压和短路电流不断增大, 且转换效率和填充因子都具有最大值; 减小等效串联电阻和增大等效并联电阻是提高光电池输出性能的有效方法; 减反膜结构对提高光电池转换效率非常重要, 但也使光电池热稳态工作温度较高。当入射功率密度为 62.4 mW/cm² 时, 光电池热稳态输出效率达到最高为 50.13%。该数值模拟结果与相关实验结果基本相符, 对连续激光供能光电池输出特性研究提供一定的理论依据。

关键词: 连续激光; 数值模拟; 输出特性

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1003006

Simulation of single-junction GaAs photovoltaic cell output characteristics by continuous wave laser irradiation

Sun Hao¹, Zhou Dayong², Zhang Hongchao¹, Lu Jian¹

(1. College of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. Shanghai Institute of Space Power-Sources, Shanghai 200245, China)

Abstract: In order to study the effects of single-junction GaAs photovoltaic cell irradiated by 808 nm continuous wave laser, a physical model was established by software COMSOL and MATLAB. The voltage-current characteristics, open circuit voltage, short circuit current, photoelectric conversion efficiency, fill factor and heat steady temperature of cell were simulated, and the influence of the power densities, equivalent series, parallel resistance and antireflection coating were also discussed. The results shows that open circuit voltage and short circuit current increases with the increase of laser power density, while conversion efficiency and fill factor have maximum value. Reducing equivalent series resistance and increasing equivalent parallel resistance are an effective method to improve the output performance of cell. It was significant to improve the efficiency of cell with adding antireflection coating, however making the cell temperature higher at heat steady. The conversion efficiency of cell reaches to maximum value of 50.13% under 62.4 mW/cm² at heat steady. The simulation result is basically

收稿日期: 2017-08-10; 修订日期: 2017-09-20

基金项目: 上海航天科技创新基金(SAST20161113)

作者简介: 孙浩(1993-), 男, 硕士生, 主要从事激光与物质相互作用方面的研究。Email: 13813822937@163.com

导师简介: 陆健(1965-), 男, 教授, 博士, 主要从事激光与物质相互作用方面的研究。Email: lujian@njjust.edu.cn

consistent with relevant experiments, which can provide theoretical reference for output characteristics study of photovoltaic cell by continuous wave laser irradiation at some extent.

Key words: continuous wave laser; numerical simulation; output characteristics

0 引言

随着工业技术的发展和新能源技术的迫切需求,激光供能成为一种潜在的新型能量传输方式。相比于传统的电缆电力和太阳能供能系统,激光供能具有能量密度大、转换效率高、不受高电压强磁场和天气影响、质量小等优点,在通信电力、军事国防、工业生产、医疗科技、能源转型等方面都有广阔的潜在价值和应用前景^[1-5]。因此仿真计算出连续激光供能下,单结 GaAs 光电池输出特性极具科学意义,为激光无线传输和光电池结构优化提供理论依据。近些年国内外学者对于连续激光供能光电池研究极其关注,国外研究方向主要为激光无线传输:2002 年,德国 F.Steinsiek^[6]等人通过 532 nm 激光成功驱动了装备 GaInP 激光电池板的小车,实现了地面激光无线能量实验。2005 年,美国马歇尔空间飞行中心^[7]利用 500 W 强激光输能 15 m 以外微型飞行器表面 GaInP₂ 光伏电池,成功让飞行器飞行。而国内侧重于光电池性能测试:2014 年,乔良^[8]等人实验测量了单结 GaAs 光电池转换效率随激光波长、激光功率的变化曲线。2015 年,刘晓光^[9]等人实验获得了单晶 Si 光电池特性参数随激光功率与电池工作温度的关系曲线。2016 年,华文深^[10]等人采用 808 nm 连续激光辐照 GaAs 光电池,实验测试了光电池输出性能随激光功率和温度变化趋势,得到了当激光平均功率密度为 67.5 mW/cm² 时,光电池达到最大效率为 49.7%。国内外学者对于连续激光供能 GaAs 光电池大多是进行相关实验,而且未考虑光电池温度演变过程对光电池输出性能的影响。但 GaAs 材料热物性参数和光电池光电转换效率随温度变化较大,因此同时构建光电转换模型和光热转换模型来求解连续激光供能 GaAs 输出特性具有重要意义。对于连续激光供能 GaAs 光电池过程中,大多实验假定控制温度不变来讨论某一因素对光电池输出性能的影响,未考虑光电池温度演变过程对光电池输出性能的影响。理论研究难点在于该物理过程中温

度、材料热物性参数、光电转换效率三者相互影响,及如何在考虑温度对光电池输出性能的影响下,同时建立光电转换模型和光热转换模型求解出连续激光供能光电池温度演变和输出性能参数。

文中利用 COMSOL 和 MATLAB 软件构建了 808 nm 连续激光供能单结 GaAs 光电池的物理模型,通过有限元法求解了其热传导方程,得到了与相关实验结果基本相符的数值结果,并分析了入射激光功率密度、等效串并联电阻和减反膜对光电池热稳态性能参数的影响。

1 数值模拟模型

连续激光供能单结 GaAs 光电池物理模型和各层尺寸如图 1 所示。

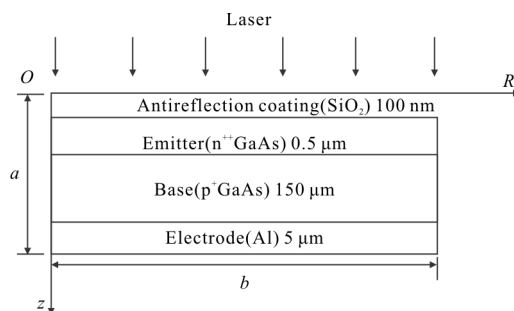


图 1 808 nm 连续激光供能 GaAs 光电池二维轴对称模型

Fig.1 Two dimensional axisymmetric model of GaAs photovoltaic cell at 808 nm continuous wave laser irradiation

图中 O 为坐标原点, R 方向为光电池径向方向, Z 方向为光电池轴向方向, a 为光电池厚度, b 为光电池半径。激光辐照到光电池时,经电池表面反射,透射进电池内部的激光能量一部分通过内建场作用在结之间产生光生伏打电动势,剩余部分传递给晶格转换为热能。因此通过求解光电转换模型中光电池转换效率,其剩余激光能量全部转换为热量作为光热转换模型中电池热源项。

数值模拟步骤为:(1) 选定入射激光功率密度为 67.5 mW/cm² 供能下,通过 MATLAB 基于 W 函数计算出不同温度下光电池 $I-V$ 曲线,进一步得到光

电转换效率与温度的关系;(2) 根据上述激光作用光电池物理过程,利用 COMSOL 构建光热转换模型求解热传导方程,得到光电池温度演变规律;(3) 由于热传导热对流的存在使得光电池最终趋于热平衡,将电池热稳态工作温度带入步骤(1)得到热稳态时 67.5 mW/cm² 供能下光电池输出特性参数。

1.1 光电转换模型

J.H.Lambert 于 1758 年定义方程:

$$W(x)\exp[W(x)]=x \quad (1)$$

其解为 W 函数^[11],基于 Lambert's W 函数,光电池输出性能模型中各显式性能参数^[12]为:

$$I = \frac{A}{B} - \frac{1}{C} W \left[\frac{C}{B} \exp \left(\frac{AC}{B} \right) \right] \quad (2)$$

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{I_m V_m}{P_{in}} \quad (3)$$

$$F_F = (I_m V_m) / (I_{sc} V_{oc}) \quad (4)$$

其中: $A = \frac{(I_L + I_S)R_p - V}{I_S R_p} \exp \left(-\frac{qV}{nk_B T} \right) \quad (5)$

$$B = \frac{(R_S + R_p)}{I_S R_p} \exp \left(-\frac{qV}{nk_B T} \right) \quad (6)$$

$$C = (qR_S) / (nk_B T) \quad (7)$$

式中: I 和 V 分别为光电池输出电流和电压; P_m 为最大输出功率; P_{in} 为入射激光功率; I_m 和 V_m 分别为最大输出功率时的电流和电压; η 为光电转换效率; F_F 为填充因子; I_L 为光生电流, I_S 为反向饱和电流; n 为理想因子; k_B 为玻尔兹曼常数; q 为电子电量; R_S 和 R_p 分别为等效串联电阻和等效并联电阻。

反向饱和电流^[13]和光生电流^[14]为:

$$I_S \approx Sq [D_n n_i^2 / (L_n N_A) + D_p n_i^2 / (L_p N_D)] \quad (8)$$

$$D_n = kT\mu_n / q, D_p = kT\mu_p / q \quad (9)$$

$$I_L = (1 - R_0) P_{in} Q_E \frac{\lambda}{1240} \left(1 + \frac{R_S}{R_p} \right) \quad (10)$$

式中: S 为光斑面积; D_n 和 D_p 分别为电子和空穴扩散系数; L_n 和 L_p 分别为电子和空穴扩散长度; n_i 为 GaAs 本征载流子浓度; N_A 和 N_D 分别为结两侧受主掺杂浓度和施主掺杂浓度; μ_n 和 μ_p 分别为电子和空穴迁移率; λ 为入射激光波长; R_0 为电池表面反射率; Q_E 为内量子效率。表 1 为光电转换模型中各种参数^[15]。

表 1 光电转换模型参数

Tab.1 Model parameters of photoelectric conversion

Parameter	Value
Boltzmann constant $k_B/J \cdot K^{-1}$	1.381×10^{-23}
Unit charge q/C	1.6×10^{-19}
Diode ideal factory A	1.2
Intrinsic carrier concentration n_i/cm^{-3}	$3.46 \times 10^{-19} (T/300)^{1.5} \times \exp[-30.4/(T/300)]$
Internal quantum efficiency at Q_E	0.9
Reflectivity R_0	0.1
Laser wavelength λ/nm	808
Cell radius b/cm	1
Series resistance R_S/Ω	0.3
Parallel resistance R_p/Ω	1 000
Electron mobility $\mu_n/cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$	$8 000 \times (T/300)^{-2.3}$
Hole mobility $\mu_p/cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$	$400 \times (T/300)^{-2.5}$
Electron diffusion length $L_n/\mu m$	1.5
Hole diffusion length $L_p/\mu m$	3
Acceptor doping concentration N_A/cm^{-3}	1×10^{17}
Donor doping concentration N_D/cm^{-3}	1×10^{18}

1.2 光热转换模型

由于减反膜对波长 808 nm 激光吸收系数非常小,可认为不吸收激光能量。由表 2 中 GaAs 对 808 nm 波长激光吸收系数可知其穿透深度约为几个微米,则柱坐标系下热传导方程和光电池吸收热源为:

$$\rho c \frac{\partial T(r,z,t)}{\partial t} =$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[rk \frac{\partial T(r,z,t)}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k \frac{\partial T(r,z,t)}{\partial z} \right] + Q(T,r,z,t) \quad (11)$$

$$Q(T,r,z,t) = I_0 (1 - R_0 - \eta) \alpha(T) f(r) g(t) \times \exp[-\alpha(T)z] \quad (12)$$

$$0 < z \leq 4.5 \mu m \quad (12)$$

$$f(r) = 1, 0 < r \leq a_0, g(t) = 1, 0 < t \leq \infty \quad (13)$$

式中: $T(r,z,t)$ 为时刻光电池温度场; ρ, c 和 k 分别为 GaAs 密度、比热容和热传导率; $Q(T,r,z,t)$ 为光电池中激光功率体密度; I_0 为激光功率密度; $f(r)$ 和 $g(t)$ 分别是入射激光能量空间分布和时间分布; a_0 为入射激光光斑半径; $\alpha(T)$ 为 GaAs 对入射激光吸收系数。

初始条件和边界条件为:

$$(T,r,z,t)|_{t=0} = T_0 = 298 K \quad (14)$$

$$-k \frac{\partial T(r,z,t)|_{t=0}}{\partial z} \Big|_{z=a} = -k \frac{\partial T(r,z,t)|_{t=0}}{\partial r} \Big|_{r=b} = 0 \quad (15)$$

$$-k \frac{\partial T(r,z,t)|_{t=0}}{\partial z} \Big|_{z=0} = -h[T(r,z,t) - T_0] - \sigma \varepsilon [T^4(r,z,t) - T_0^4] \quad (16)$$

式中： T_0 为环境温度； σ 为斯特藩常量； h 为热对流系数； ε 为电池上表面发射率。表 2 为 GaAs 热物性参数^[15]。

表 2 GaAs 热物性参数

Tab.2 Thermal parameters of GaAs

Parameter	Value
Density $\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	5 325.6
Thermal conductivity $k/\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$0.425 \times (T/300)^{-1.1}$
Heat capacity $c/\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$303 + 5 \times 10^{-2} T$
Energy gap E_0/eV	$1.575 - 5 \times 10^{-4} T$
Coefficient of heat transfer $h/\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}$	10
Stefan constant $\sigma/\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$	5.64×10^{-8}
Thermal radiation rate ε	0.1
Laser radius a_0/cm	1
Absorption coefficient α/cm^{-1}	$2.91 \times 10^4 \exp[3.22 \times (1.53 + 1.425 - E_0 - 1.17)]$

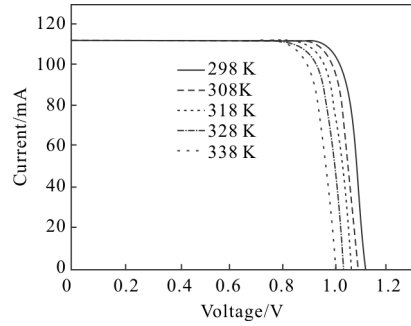
2 数值模拟结果

基于单结 GaAs 光电池所建物理模型，利用 COMSOL 和 MATLAB 数值计算出 67.5 mW/cm^2 激光功率密度供能下，808 nm 连续激光供能单结 GaAs 光电池的输出特性，且与实验值^[10]进行对比。

图 2 表示 67.5 mW/cm^2 功率密度供能下，电池输出特性随温度的变化和温度演变。从图 2(a)可见不同温度下短路电流 I_{SC} 保持不变，其值约为 111.92 mA ，即 I_{SC} 不依赖于温度变化。而 V_{OC} 对温度较为敏感，会随着温度的升高而不断减小。图 2(b)展示出 V_{OC} 和温度的关系，可以看出光电池 V_{OC} 随着温度上升而线性下降，即 GaAs 光电池 V_{OC} 随温度变化公式为：

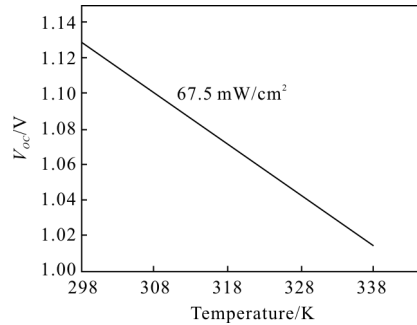
$$V_{OC} = -2.87 \times 10^{-3} T + 1.985 \quad (17)$$

直线斜率为 GaAs 光电池 V_{OC} 温度系数。其温度系数为负数的主要原因是 GaAs 禁带宽度会随温度增大而缩小，引起 pn 结势垒高度降低，进而导致 V_{OC} 降低。



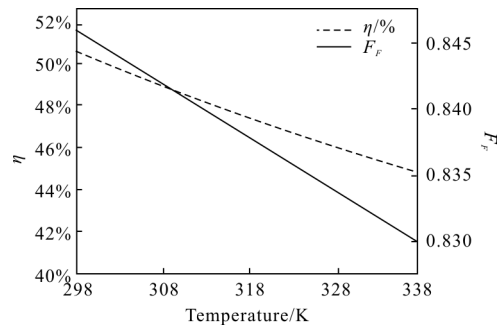
(a) $I-V$ 曲线随温度的变化

(a) $I-V$ curve versus temperature



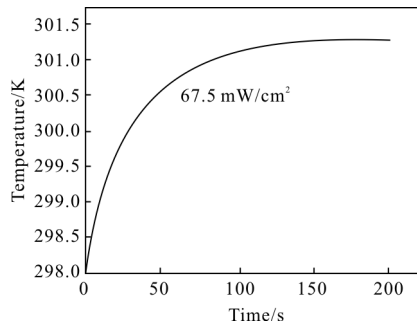
(b) 开路电压随温度的变化

(b) Open circuit voltage versus temperature



(c) η 和 F_F 随温度的变化

(c) η and F_F versus temperature



(d) 温度演变

(d) Temperature change

图 2 67.5 mW/cm^2 功率密度供能下，电池输出特性随温度的变化和温度演变

Fig.2 Output characteristics versus temperature and temperature change of cell at 67.5 mW/cm^2

从图 2(c)可见 η 和 F_F 会随温度增加而线性减少,且 η 对温度的依赖性大于 F_F 。值得注意的是当温度为 298 K 时,光电池输出效率为 50.46%,参考文献[10]中相同入射功率密度供能下,光电池输出效率为 49.7%,证明该模型具有合理性。则光电池 η 和 F_F 与温度的关系可表示为:

$$\eta = -1.47 \times 10^{-3} T + 0.944362 \quad (18)$$

$$F_F = -4 \times 10^{-3} T + 0.9652 \quad (19)$$

由图 2 (d) 可见电池温度随着时间延长不断上升,但曲线斜率逐渐减小,当斜率为零时,电池达到热平衡状态,稳态温度为 301.28 K。其原因是整个温升到热平衡分为两个过程:第一过程为激光辐照引起的温升比热辐射和热对流引起的温降的影响大,因此电池温度逐渐上升。第二过程为随着电池温度的升高,由公式(16)可见,电池对外辐射能力越来越强,当温度到达一定程度,热辐射和热对流引起的温降和激光辐照引起的温升占据同等地位时,电池温度将稳定,即达到热平衡点。由参考文献[14]可知连续激光辐照光电池轴向温度差很小,可假设该模型中电池各点温度相同,根据图 2,得到 67.5 mW/cm² 功率密度供能下,光电池热稳态时 $I-V$ 曲线,如图 3 所示,图 3 中 T_s 为光电池热稳态温度值。

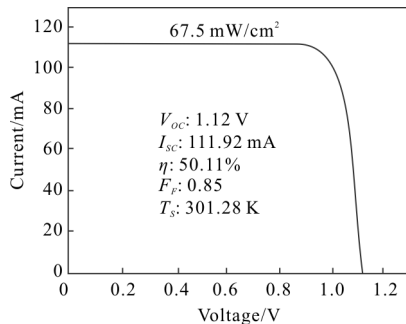


图 3 67.5 mW/cm² 功率密度供能下,电池热稳态时 $I-V$ 曲线

Fig.3 $I-V$ curve of cell under power density of 67.5 mW/cm² at heat steady

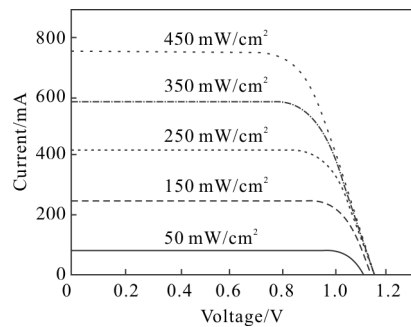
3 激光参数与光电池结构对光电池热稳态输出性能的影响

3.1 激光功率密度对光电池热稳态输出性能的影响

重复上述数值模拟步骤,改变供能激光功率密度,得到电池热稳态输出特性随入射功率密度 I_0 的

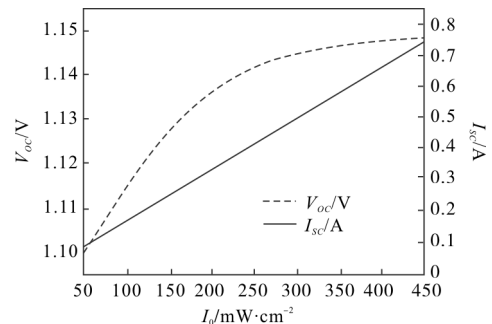
变化如图 4 所示。从图 4(a)可见光电池 V_{oc} 和 I_{sc} 都会随 I_0 的增加而增加,但 I_{sc} 增幅比 V_{oc} 增幅大。由图 4(b)可看出一方面 I_{sc} 与 I_0 成线性关系,意味着光电池对激光的收集效率是一个常数。而另一方面随着 I_0 增大, V_{oc} 增幅减小,其主要物理原因有两个:一是光电池在高功率密度入射下,会发生高注入效应,导致 V_{oc} 曲线在高功率密度处的斜率发生下降;二是随着 I_0 的增加,光电池热稳态工作温度也不断升高,也将降低其 V_{oc} 。

由图 4(c)可得 η 和 F_F 变化趋势大致相同,都是随着 I_0 的增大先增大,当到达一定入射功率密度时再减小,即两者都具有单峰值。当为 62.4 mW/cm² 时, η 达到最大值为 50.13%,而当 I_0 为 30.2 mW/cm² 时, F_F 达到最大值为 0.865。由图 4(d)可见一方面光电池热稳态温度随着 I_0 增大而增大,另一方面随着 I_0 逐渐增加,光电池达到热平衡状态所需时间也变长。其原因是光电池吸收能量随着 I_0 增加而增加,温度会不断上升,而又因为温升过程中 GaAs 吸收系数不断增大和热导率不断减小,进一步加剧了温升,导致光电池通过热辐射热对流达到热平衡状态的时间越长。



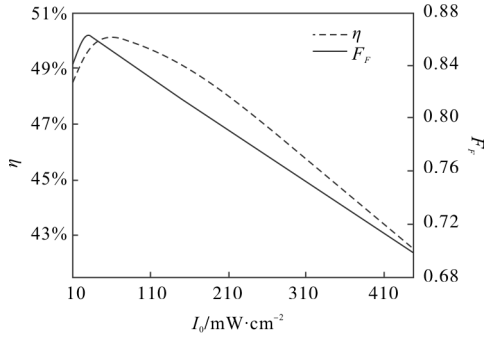
(a) $I-V$ 曲线随 I_0 的变化

(a) $I-V$ versus I_0



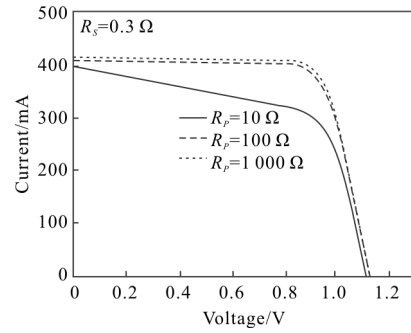
(b) V_{oc} 和 I_{sc} 随 I_0 的变化

(b) V_{oc} and I_{sc} versus I_0



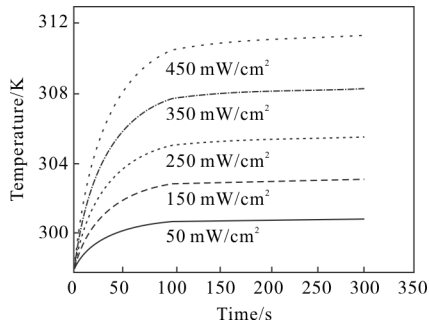
(c) η 和 F_F 随 I_0 的变化

(c) η and F_F versus I_0



(b) η 和 F_F 随 R_s 的变化

(b) η and F_F versus R_s



(d) 温度随 I_0 的变化

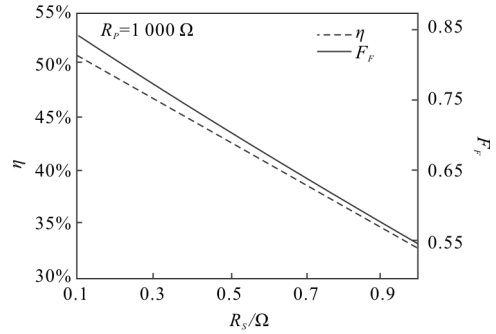
(d) Temperature versus I_0

图 4 电池热稳态输出特性和温度随 I_0 的变化

Fig.4 Output characteristics and temperature of cell versus I_0 at heat steady

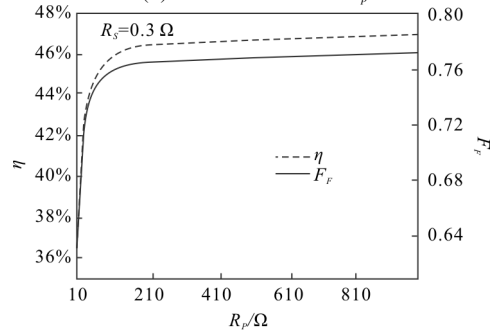
3.2 等效串并联电阻对光电池热稳态输出性能的影响

由于各类寄生电阻的存在, 导致光电池内部等效串并联电阻对输出特性影响较大。图 5 为 250 mW/cm² 功率密度供能下, 电池热稳态时输出特性随等效串并联电阻的变化, 由图 5(a) 看出光电池 V_{OC} 和 I_{SC} 不依赖 R_s 变化, 即其值不变。 R_s 的变化对光电池最大输出功率点附近 $I-V$ 曲线弯曲度影响较大, 即 R_s 越小曲线弯曲度越大。而由图 5(b)



(c) $I-V$ 曲线随 R_p 的变化

(c) $I-V$ curve versus R_p

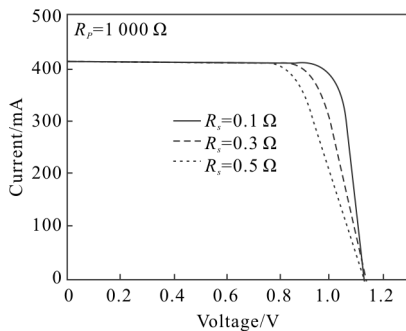


(d) η 和 F_F 随 R_p 的变化

(d) η and F_F versus R_p

图 5 250 mW/cm² 功率密度供能下, 电池热稳态输出特性随等效串并联电阻的变化

Fig.5 Output characteristics of cell versus R_s and R_p under power density of 250 mW/cm² at heat steady



(a) $I-V$ 曲线随 R_s 的变化

(a) $I-V$ curve versus R_s

可得随着 R_p 增加, 光电池 V_{OC} 和 I_{SC} 小幅增加, 且对光电池短路点附近曲线斜率影响较大, 即 R_p 越大短路点附近曲线越平缓, $I-V$ 曲线越接近理想情况。其主要原因是光电池内部漏电流随着 R_p 变大而变小, 减少了内部损耗, 使得输出性能提升。

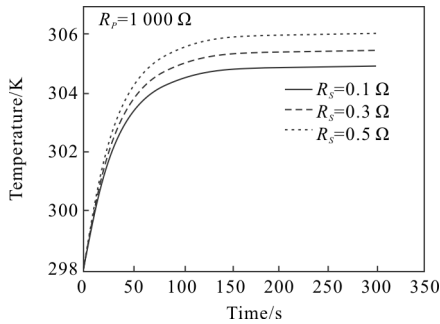
由图 5 (c) 可见 η 和 F_F 都随 R_s 变大呈线性下降, 即光电池 η 和 F_F 与 R_s 的关系可表示为:

$$\eta = -0.21R_s + 0.533 \quad (20)$$

$$F_F = -0.33R_S + 0.874 \quad (21)$$

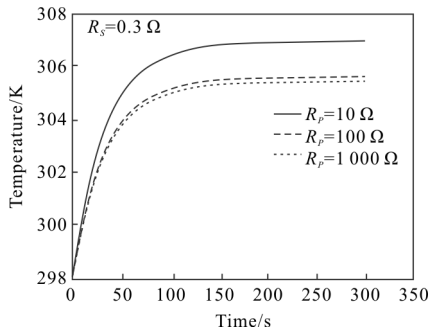
而由图 5 (d) 可知当 R_p 逐渐变大到 60Ω 时, η 和 F_F 都大幅增加, 但随着 R_p 进一步变大, η 和 F_F 变化趋于平缓, 即光电池输出性能接近饱和。

图 6 为 250 mW/cm^2 功率密度供能下, 电池温度演变随等效串并联电阻的变化。由图 6 可见: 当光电池 R_S 增大和 R_p 减小时, 热稳态工作温度不断增大, 这是因为光电池 η 会随 R_S 增大和 R_p 减小而不断减小, 即电池将更多的激光能量转换为热能积累在内部, 进而加剧了稳态工作温度, 降低光电池输出性能。由上述分析可知减小 R_S 和增大 R_p 是提高光电池输出性能和降低稳态工作温度的有效方法。



(a) 电池温度演变随 R_S 的变化

(a) Temperature change of cell versus R_S



(b) 电池温度演变随 R_p 的变化

(b) Temperature change of cell versus R_p

图 6 250 mW/cm^2 功率密度供能下, 电池温度演变随 R_S 和 R_p 的变化

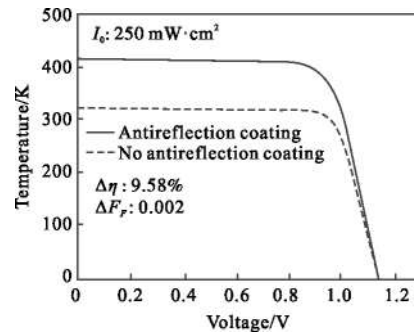
Fig.6 Temperature change of cell versus R_S and R_p under power density of 250 mW/cm^2

3.3 减反膜对光电池热稳态输出性能的影响

当激光入射到光电池表面时会产生反射, 减少了光电池对激光能量的吸收。因此在电池表面镀上一层减反射膜来提高激光能量利用率。该减反射膜可使光电池对 808 nm 激光的表面反射率 R_0

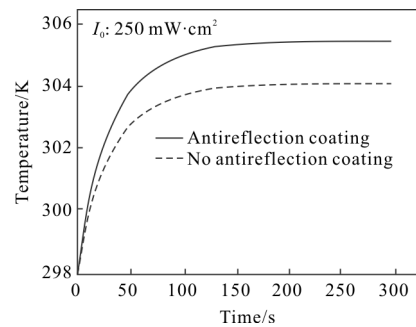
由 0.3 减小到 0.1 。

图 7 为有无减反射膜时, 250 mW/cm^2 功率密度供能下电池热稳态 $I-V$ 曲线和温度演变曲线。从图 7(a) 可看出一方面无减反膜时反射率的增大导致 I_{SC} 有明显降低, 而 V_{OC} 下降幅值较小; 另一方面 F_F 减少也不明显。由公式(3)、(4)可知, η 的降低主要是 V_{OC} 和 I_{SC} 体现的共同减小。而图 7(b) 可以得到: 有无减反膜时连续激光供能光电池引起温度变化趋势大致相同, 但有减反膜时电池温度略高于无减反膜时, 其主要原因为无减反膜使光电池 η 降低和 R_0 增加, 一方面 η 的降低导致电池将激光能量更多转换为热量, 而另一方面 R_0 的增加却是导致相反的结果, 由公式 (12) 可看出 R_0 的增加引起激光能量损失占据主导作用。因此在光电池表面镀上减反膜虽对光电转换效率的提升极其重要, 但同时会使得光电池热稳态时工作温度较高。



(a) $I-V$ 曲线随减反射膜的变化

(a) $I-V$ curve versus antireflection coating



(b) 温度演变曲线随减反射膜的变化

(b) Temperature change curve versus antireflection coating

图 7 有无减反射膜时, 250 mW/cm^2 功率密度供能下 电池热稳态 $I-V$ 曲线和温度演变曲线

Fig.7 $I-V$ curve and temperature change curve of cell versus antireflection coating under power density of 250 mW/cm^2 at heat steady

4 结 论

利用 COMSOL 和 MATLAB 软件通过有限元法构建 808 nm 连续激光供能单结 GaAs 光电池的物理模型,计算出 67.5 mW/cm^2 入射激光功率密度供能下电池输出性能参数及温度对其影响,并将光电转换效率数值解和实验值进行对比。此外讨论了入射激光功率密度、等效串并联电阻和减反膜对光电池热稳态输出特性的影响;随着激光功率密度增大,开路电压和短路电流不断增大,而转换效率和填充因子都具有最大值;减小等效串联电阻和增大等效并联电阻可有效提高光电池输出性能;减反膜对提高光电池转换效率极其关键,但也会让光电池热稳态工作温度较高。当入射功率密度为 67.5 mW/cm^2 时,光电池热稳定输出效率达到最高为 50.13%。该数值解与实验值基本相符,可为连续激光供能光电池输出特性研究提供一定的理论依据。

参考文献:

- [1] Landis G A. Space power by ground-based laser illumination [J]. *IEEE AES Systems Magazine*, 1991, 6(11): 3-7.
- [2] Yugami H, Kanamori Y, Arashi H, et al. Field experiment of laser energy transmission and laser to electric conversion [C]//Energy Conversion Engineering Conference, Proceedings of the Intersociety, IEEE, 1997, 1: 625-630.
- [3] Chen Dong, Li Xiaojiang. Research on model and deployment scheme of laser energy transportation of satellites [J]. *Journal of System Simulation*, 2010, 22(2): 333-336. (in Chinese)
陈冬, 李小将. 卫星激光输能模型与布站方案研究 [J]. 系统仿真学报, 2010, 22(2): 333-336.
- [4] Li Zhenyu, Zhang Jiande, Huang Xiujun. Laser wireless power transmission technology for solar power satellite [J]. *Spacecraft Engineering*, 2015, 24(1): 31-37. (in Chinese)
李振宇, 张建德, 黄秀军. 空间太阳能电站的激光无线能量传输技术研究 [J]. 航天器工程, 2015, 24(1): 31-37.
- [5] Shanghai Institute of Space Power-Sources. Physical Power Technology [M]. Beijing: Science Press, 2015: 64-65. (in Chinese)
上海空间电源研究所. 物理电源技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 64-65.
- [6] Steinsiek F, Weber K H, Foth W P, et al. Wireless power transmission experiment as an early contribution to planetary exploration missions [C]//International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation. Bremen, Germany: International Academy of Astronautics, and International Institute of Space Law, 2003: 169-176.
- [7] Blackwell T. Recent demonstration of laser power beaming at DFRC and MSFC [C]//AIP Conference Proceeding Beamed Energy Propulsion. New York, USA: American Institute of Physics, 2005: 73-85.
- [8] Qiao Liang, Yang Yannan. Experimental research of laser wireless power transmission efficiency [J]. *Laser Technology*, 2014, 38(5): 590-594. (in Chinese)
乔良, 杨雁南. 激光无线能量传输效率的实验研究 [J]. 激光技术, 2014, 38(5): 590-594.
- [9] Liu Xiaoguang, Hua Wenshen, Liu Xun. Experimental investigations of laser intensity and temperature dependence of single crystal silicon photovoltaic cell parameters [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(8): 0802001. (in Chinese)
- [10] Hua Wenshen, Liu Xiaoguang, Zhang Daming. Output characteristics of single-junction GaAs photovoltaic cell irradiated by laser [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(12): 1463-1466. (in Chinese)
华文深, 刘晓光, 张大铭. 激光辐照单结砷化镓光伏电池的输出特性 [J]. 激光与红外, 2016, 46(12): 1463-1466.
- [11] Ding Jinlei. Principle study and technique application of explicit solution for solar cell I-V equation [D]. Changsha: University of Science and Technology of China, 2007: 16-18. (in Chinese)
丁金磊. 太阳能电池 I-V 方程显式求解原理研究及应用 [D]. 长沙: 中国科学技术大学, 2007: 16-18.
- [12] Zhang Yichen. Theoretical and experimental research on efficiency improvements of laser cells [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016: 13-16. (in Chinese)
张逸辰. 提高激光电池效率的理论及实验研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016: 13-16.
- [13] Shi Jiqun, Ou Haiyan, Ma Zhiyao, et al. A study of saturated current density of solar cells with pn junction [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2001, 29(4): 24-26. (in Chinese)
史济群, 欧海燕, 马稚尧, 等. pn 结太阳能电池饱和电流密度的理论研究 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2001, 29(4): 24-26.
- [14] Li Beibei, Li Xiaojiang. Numerical simulation of photovoltaic cell temperature field of laser power beaming [J]. *Laser Technology*, 2017, 41(4): 537-544. (in Chinese)
李贝贝, 李小将. 激光输能光电池温度场数值模拟 [J]. 激光技术, 2017, 41(4): 537-544.
- [15] Meyer J R, Kruer M R, Bartoli F J. Optical heating in semiconductors: laser damage in Ge, Si, InSb, and GaAs [J]. *Journal of Applied Physics*, 1980, 51(10): 5513-5522.