

## 脉冲激光辐照太阳能电池响应及光电转化影响

陈一夫,常浩\*,周伟静,于程浩

(航天工程大学 宇航科学与技术系 激光推进及应用国家重点实验室,北京 101416)

**摘要:** 基于建立的单结 GaAs 太阳能电池激光辐照热传导模型和光电转换物理模型,对单结 GaAs 太阳能电池的脉冲激光辐照温度及光电转化影响进行了仿真模拟研究,分别研究了 532 nm 和 808 nm 两种不同波长的脉冲激光在不同辐照能量及入射角度下,太阳能电池温度、伏安特性、光电转换效率等性能变化,仿真结果表明,入射激光与太阳能电池法向之间夹角越小,太阳能电池输出电功率越大,在相同的激光辐照强度下,532 nm 和 808 nm 波长激光对 GaAs 电池辐照导致的温度影响差别不大,808 nm 波长激光比 532 nm 波长激光对于 GaAs 材料来说具有更大的吸收系数,太阳能电池能够吸收更多的能量,从而具有更高的响应,808 nm 波长激光辐照单结 GaAs 电池能够输出更大的电功率以及带来更大的光电转换效率。

**关键词:** 激光辐照; 光电转化; 温度; 伏安特性

中图分类号: TN249 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20200262

## Response of pulse laser irradiation solar cell and effect of photoelectric conversion

Chen Yifu, Chang Hao\*, Zhou Weijing, Yu Chenghao

(State Key Laboratory of Laser Propulsion & Application, Department of Aerospace Science and Technology, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

**Abstract:** Based on the established laser thermal conduction model and photoelectric conversion physical model of single-junction GaAs solar cells, the effects of pulse laser irradiation temperature and photoelectric conversion on single-junction GaAs solar cells were simulated and studied. Two different types, 532 nm and 808 nm, were studied. Under different irradiation energy and incident angle, the solar cell temperature, voltage-current characteristics, photoelectric conversion efficiency and other properties were changed by the pulsed laser with different wavelengths. The simulation results show that the smaller the angle between the incident laser and the normal direction of the solar cell, the greater the electric power of the solar cell output under the same laser irradiation intensity, 532 nm and 808 nm wavelength lasers have little difference in temperature caused by GaAs battery irradiation. 808 nm wavelength laser has a larger absorption coefficient for GaAs materials than 532 nm wavelength laser. Solar cells can absorb more energy and have a higher response. Single-junction GaAs cells irradiated with 808 nm wavelength laser can output more electrical power and bring greater photoelectric conversion efficiency.

**Key words:** laser irradiation; photoelectric conversion; temperature; voltage-current characteristics

收稿日期:2020-05-01; 修订日期:2020-06-14

基金项目:国家重点实验室基础研究项目;校级创新基金

作者简介:陈一夫(1994-),男,硕士生,主要从事激光与太阳能电池相互作用方面的研究。Email:hhhchen948@163.com

通讯作者:常浩(1987-),男,助理研究员,博士,主要从事激光航天应用技术方面的研究。Email:changhao5976911@163.com

## 0 引言

太阳能电池在在航天事业中被广泛使用,随着航天技术进一步的发展,激光与太阳能电池相互作用研究得到了越来越多的关注。其原因在于在很多方面有独特的应用,如激光损伤<sup>[1]</sup>、激光输能<sup>[2]</sup>、激光制备太阳能电池材料<sup>[3]</sup>等。1974年日本的 Matsuoka 等人使用脉宽 1.2 ms 的激光器辐照硅太阳能电池发现,在能量为 20 kW/cm<sup>2</sup> 的条件下,太阳能电池表面无明显损伤,但由于热量累积导致温度升高电池的性能仍然产生了下降<sup>[4]</sup>。2005年 Richard 采用连续激光为运行中的无人机进行无线充能研究,光电转换效率达到 50%<sup>[5]</sup>。2011年 Meiss 等人发现采用脉冲激光刻蚀太阳能电池表面可以有效降低太阳能电池表面的反射性,从而提高电池的转换效率<sup>[6]</sup>。2012年张超等人采用 355 nm 纳秒脉冲激光刻蚀太阳能电池薄膜时发现紫外激光可以有效减少生产过程中的热效应损伤,提高电池性能<sup>[7]</sup>。2014年国防科大的朱荣臻采用 1 064 nm 纳秒脉冲激光对单晶 Si、单结 GaAs 电池进行了辐照损伤研究,研究发现,由于材料熔点的不同,相比于单结 GaAs 电池,单晶 Si 电池具有更好的抗损伤能力<sup>[8]</sup>。2014年国内的山东航天电子技术研究所进行了空中飞艇激光无线传输能量研究<sup>[9]</sup>。2014年田秀芹研究了飞秒激光辐照太阳能电池损伤阈值,研究发现相比于连续激光,飞秒脉冲激光传输能量散热效果更好,具有更高的损伤阈值<sup>[10]</sup>。2017年孙浩等人对连续激光辐照砷化镓太阳能电池过程中等效电阻抗反射膜等因素对太阳能电池输出影响进行了仿真研究<sup>[11]</sup>。2017年窦鹏程等人研究了连续激光辐照下三结砷化镓太阳能电池的损伤效应规律,研究发现激光辐照的热量累积会导致电池并联电阻下降从而降低电池光电输出能力<sup>[12]</sup>。

激光与太阳能电池相作用,首先引起的是太阳能电池温度的升高,温度的升高会导致太阳能电池内部材料参数产生变化,进而对太阳能电池的光电转换输出性能产生影响。国内外的研究已经表明温度对太阳能电池输出存在影响,当激光作用在太阳能电池上时,由于热量的累积会导致太阳能电池光电转换性能暂时的下降,当温度进一步上升超过太阳能电池温度损伤阈值后还会出现太阳能电池形貌损伤以及不可逆的光电转换性能损伤。激光辐照下,当太阳能电池

温度处于温度损伤阈值以下时,温度对于太阳能电池光电转换特性影响是一个值得研究的问题。

为了研究激光辐照导致单结 GaAs 电池温度变化带来电池光电转换性能变化,文中对单结 GaAs 太阳能电池热物理模型和单结 GaAs 太阳能电池光电转换模型进行脉冲激光辐照下的单结 GaAs 电性能输出影响研究。以 532 nm 和 808 nm 波长激光、不同入射激光能量和入射角度为条件对单结 GaAs 太阳能电池的输出特性进行了相关研究,并对研究数值结果进行数据分析,得到太阳能电池输出功率与激光波长、激光能量以及激光入射角度之间的线性以及非线性关系。

## 1 仿真模型

### 1.1 脉冲激光辐照电池温升模型

持续的脉冲激光辐照太阳能电池会导致电池温度升高,热传导、热对流、热辐射三种因素综合影响来决定电池的温度变化,通过建立激光辐照单结 GaAs 电池二维轴对称模型<sup>[13]</sup>,求解热传导方程计算高斯脉冲激光辐照过程中的温度变化,单结 GaAs 电池结构参数如图 1 所示,*O* 为电池中心,激光辐照的入射中心,*z* 轴和 *r* 轴分别为太阳能电池的纵向和径向,热传导方程由方程(1)给出,方程(2)为激光辐照下的热源,方程(3)为激光空间高斯分布模型,方程(4)为脉冲激光的时间分布模型。

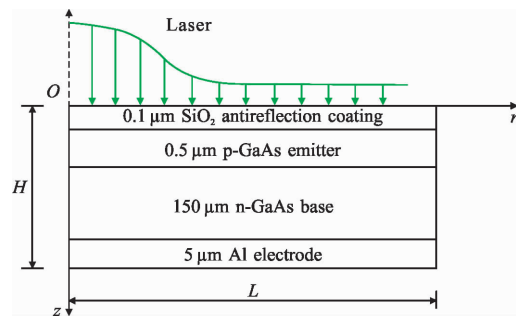


图 1 脉冲激光辐照单结 GaAs 电池模型

Fig.1 Model of single junction GaAs battery irradiated by pulsed laser

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q \quad (1)$$

$$q = I a n(t) \cos \theta \quad (2)$$

$$I = (1-R) I_0 \exp(-r^2/a^2) \exp(-\alpha z) \quad (3)$$

$$a n(t) = \begin{cases} 1 & (n-1)\Gamma < t < (n-1)\Gamma + \tau \\ 0 & (n-1)\Gamma + \tau < t < n\Gamma \end{cases} \quad n=1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

式中: $\rho$  为 GaAs 材料密度; $c$  为 GaAs 材料比热容;

$k$  为热扩散率;  $q$  为热源;  $\theta$  为入射激光与电池表面法相夹角;  $\alpha$  为 GaAs 对不同波长激光的吸收系数;  $R$  为电池表面反射率;  $a$  为激光光斑半径;  $an(t)$  为脉冲激光时间分布;  $\tau$  为脉冲时间宽度。

初始和边界条件:

$$T|_{t=0}=T_0=293 \text{ K} \quad (5)$$

$$q_0=h(T_0-T) \quad (6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r}|_{r=L}=0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z}|_{z=0}=0 \quad (8)$$

$$K \frac{\partial T}{\partial z}|_{z=0}=h(T_0-T'(r, 0, t))+\varepsilon\sigma(T_0^4-T_0^4(r, 0, t)) \quad (9)$$

式中:  $T_0$  为初始环境温度;  $h$  为传热系数;  $\sigma$  为斯潘特常量;  $\varepsilon$  为材料表面发射率。公式(9)为上下表面空气自由对流导致的边界热辐射。表 1 为单结 GaAs 电池物理模型中各材料的热物理参数, 仿真中脉冲激光波长分别为 532 nm 和 808 nm, 脉冲宽度 20 ns, 重复频率 1 000 Hz, 激光光斑半径 10 mm, 电池表面积 3.14 cm<sup>2</sup>。热物理参数表 1 所示<sup>[14-15]</sup>。

表 1 物理参数

Tab.1 Physical parameter

Parameter	Value
GaAs thermal conductivity $K/(\text{W}\cdot\text{cm}\cdot\text{K}^{-1})$	0.425(300/T) <sup>1.1</sup>
GaAs density $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	5 316
GaAs heat capacity $C/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	303+5×10 <sup>-2</sup> T
Energy gap $E_g/\text{eV}$	1.575-0.15×T/300
Coefficient of heat transfer $h/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}$	10
Stefan constant $\sigma/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$	5.6×10 <sup>-8</sup>
Absorption coefficient $\alpha_{532}/\text{cm}^{-1}$	79 389×exp(3.17× (1.43+1.58-E <sub>g</sub> -1.55))
Absorption coefficient $\alpha_{808}/\text{cm}^{-1}$	13 057×exp(3.22× (1.53+1.425-E <sub>g</sub> -1.17))
Thermal radiation rate $\varepsilon$	0.1
Laser radius $a/\text{cm}$	1
Reflectivity $R_{532}$	0.036
Reflectivity $R_{808}$	0.035
Al thermal conductivity $K/(\text{W}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	1.7(400/T) <sup>1.5</sup>
Al density $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 702
Al heat capacity $C/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	632+2×10 <sup>-2</sup> T
SiO <sub>2</sub> thermal conductivity $K/(\text{W}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	0.132(220/T) <sup>1.2</sup>
SiO <sub>2</sub> density $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 660
SiO <sub>2</sub> heat capacity $C/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	700+2×10 <sup>-2</sup> T
Battery area $S/\text{cm}^2$	3.14

## 1.2 激光辐照下的光电转换模型

自太阳能电池诞生以来一直是研究应用的热点, 目前已经由第一代的硅太阳能电池发展到第三代半导体太阳能电池砷化镓太阳能电池, GaAs 电池具有光电转换效率高, 抗辐射和耐高温等特点, 广泛应用在目前的航天设备上, 尽管各种太阳电池材料不同, 但太阳能电池作为半导体器件, 其输出光电转换数学模型都可通过太阳能电池等效电路确定<sup>[11]</sup>。其等效电路图如图 2 所示。

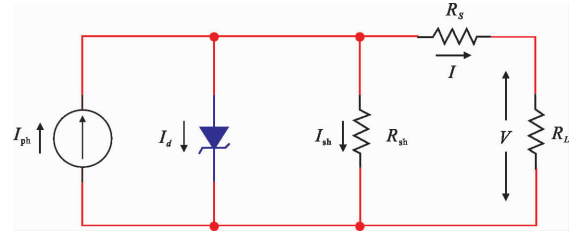


图 2 太阳能电池等效电路图

Fig.2 Solar cell equivalent circuit diagram

通过基尔霍夫电流定律推出各电流关系, 然后结合材料特点推导出太阳能电池输出电流与电压间关系。

$$I=I_{ph}-I_d-I_{sh} \quad (10)$$

$$I_{sh}=\frac{IR_s+V}{R_{sh}} \quad (11)$$

$$I_d=D\exp\left[-\frac{e}{k'T}\left(E_g(0)-\frac{\beta T^2}{T+\gamma}\right)\right]\times\left(\exp\frac{eV_j}{nk'T}-1\right) \quad (12)$$

$$I_{ph}=\frac{\phi_{laser}(\cos\theta)S(1-R)QE(T_0)}{1240/\lambda}\left(\frac{1+R_s}{R_{sh}}\right)\times(1+k_T(T-T_0)) \quad (13)$$

$$I=\frac{\phi_{best}(\cos\theta)S(1-R)QE(T_0)(1+k_T(T-T_0))}{1240/\lambda}\times\left(\frac{1+R_s}{R_{sh}}\right)-\frac{V+IR_s}{R_{sh}}-D\exp\left[-\frac{e}{k'T}\left(E_g(0)-\frac{\beta T^2}{T+\gamma}\right)\right]\times\left[\exp\frac{e(V+IR_s)}{nk'T}-1\right] \quad (14)$$

式中:  $I$  为太阳能电池输出电流;  $I_{ph}$ 、 $I_d$ 、 $I_{sh}$ 、 $I_{os}$  分别为光生电流、结电流、漏电流、PN 结反向饱和电流;  $e$  为单位电荷;  $V_j$  为并联电阻两端电压;  $k$  为玻耳兹曼常数;  $n$  为二极管品质因子;  $T$  为太阳能电池温度;  $\phi_{laser}$  为入射激光能量;  $\theta$  为入射激光与电池表面法相夹角;  $S$  为太阳能电池表面积;  $R$  为太阳能电池表面反射率;  $QE$  为量子效率衡量吸收总光子数对光生电流起作用的数目, 主要受到温度影响;  $\lambda$  为入射激光波长;  $K_T$  为内量子效率的温度系数;  $D$  为反向

饱和系数;  $E_g(T)$  表示半导体在绝对零度时的禁带宽度;  $\beta$  和  $\gamma$  为两个常数, 取值通常为  $7.021 \times 10^{-4} \text{ eV}$  和  $1105 \text{ K}$ 。结合上式分析, 在一定的条件下, 太阳能电池的光电转换输出特性主要受到温度影响。参数如表 2 所示。

表 2 光电转换模型参数表

Tab.2 Photoelectric conversion model parameter table

Parameter	Value of expression
Diode quality factor $n$	1.5
Unit charge $e/C \cdot K^{-1}$	$1.6022 \times 10^{-23}$
Boltzmann constant $k'/J \cdot K^{-1}$	$1.3806505 \times 10^{-23}$
Energy gap $E_g/eV$	1.43
Series resistance $R_s/\Omega$	0.1
Parallel resistance $R_{sh}/\Omega$	100000
Quantum efficiency $QE$	0.9
Reverse saturation current $D/mA \cdot cm^{-2}$	$1.5 \times 10^8$
Reference temperature $T_0/K$	290
Battery area $S/cm^2$	3.14
Laser wavelength $\lambda/nm$	532, 808
Internal quantum efficiency coefficient $K_T$	0.02
Reflectivity $R_{532}$	0.036
Reflectivity $R_{808}$	0.035

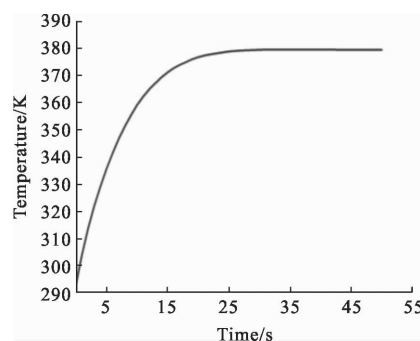
## 2 仿真分析

以单结 GaAs 电池热物理材料模型为基础, 仿真计算多脉冲激光辐照下单结 GaAs 电池的温度场变化, 比较不同波长、不同功率和不同入射角度的条件下对最终电池温度变化的影响, 脉冲激光分别为波长 532 nm 和 808 nm, 激光能量范围在  $0.064 \sim 1.344 \text{ mJ/cm}^2$  之间, 重复频率 1000 Hz, 入射角度范围为  $0^\circ \sim 90^\circ$ 。经过单结 GaAs 电池热物理模型仿真计算后将温度结果带入到单结 GaAs 电池光电转换模型中进行光电转换性能计算, 分析不同激光波长、激光能量密度和激光入射角度对单结 GaAs 电池光电转换性能影响。

## 2.1 激光辐照对太阳能电池温度的影响

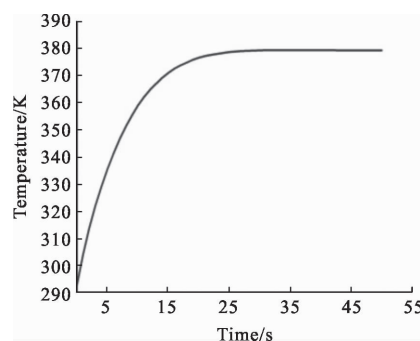
### 2.1.1 激光波长影响

当材料受到激光辐照时, 对于不同的波长激光, 材料的吸收系数不同, 常温下 GaAs 材料对 532 nm 波长激光的吸收系数为  $79389 \text{ cm}^{-1}$ , 对 808 nm 波长激光的吸收系数为  $13057 \text{ cm}^{-1}$ , 相比于 808 nm 波长, GaAs 材料更容易吸收 532 nm 波长激光, 但两种吸收系数仍然在一个数量级。分别采用 532 nm 和 808 nm 波长激光辐照进行热效应仿真数值分析计算, 激光脉宽 20 ns, 重复频率 1000 Hz 模式的条件下, 脉冲能量为  $0.32 \text{ mJ/cm}^2$ , 结果如图 3 所示。



(a) 波长 532 nm 下温度变化

(a) Temperature change at wavelength 532 nm



(b) 波长 808 nm 下温度变化

(b) Temperature change at wavelength 808 nm

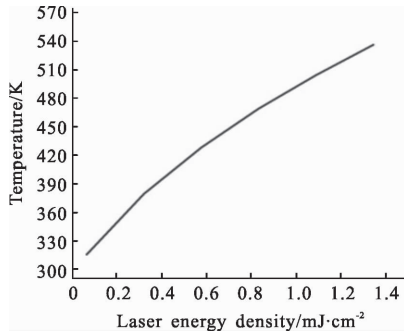
图 3  $0.32 \text{ mJ/cm}^2$  能量密度条件下 532 nm 和 808 nm 波长脉冲激光辐照电池温度变化

Fig.3 Temperature change of 532 nm and 808 nm wavelength pulsed laser irradiation cells under  $0.32 \text{ mJ/cm}^2$  energy density

在相同的条件下, 532 nm 和 808 nm 脉冲激光的辐照导致的单结 GaAs 太阳能电池温度变化结果几乎完全相同, 从开始辐照引起温度上升直到满足热平衡条件需要 20 s 的时间。

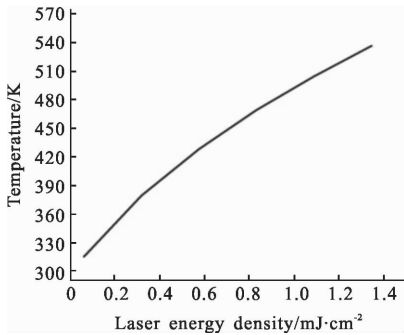
2.1.2 激光能量密度影响

单结 GaAs 太阳能电池温度的变化主要受到激光能量密度大小影响, 提高脉冲激光能量直到 1.344 mJ/cm<sup>2</sup>, 在入射角激光垂直入射的条件下 532 nm 和 808 nm 激光对于温度的变化影响几乎完全相同, 结果如图 4 所示。随着脉冲激光能量的增加, 单结 GaAs 太阳能电池的温度变化与激光能量密度之间几乎成线性关系, 能量密度越高, 单结 GaAs 太阳能电池温度越高。



(a) 波长 532 nm 下温度变化

(a) Temperature change at wavelength 532 nm



(b) 波长 808 nm 下温度变化

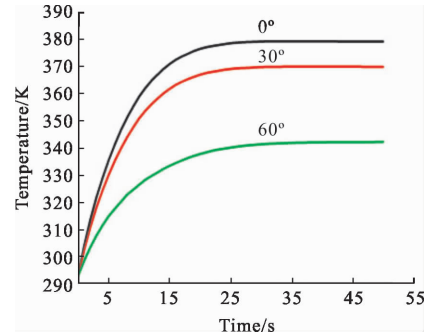
(b) Temperature change at wavelength 808 nm

图 4 能量范围 0.064~1.344 mJ/cm<sup>2</sup> 条件下 532 nm 和 808 nm 波长脉冲激光辐照电池温度变化  
Fig.4 Temperature range of 532 nm and 808 nm pulsed laser irradiation cells under the energy range of 0.064~1.344 mJ/cm<sup>2</sup>

2.1.3 激光入射角度影响

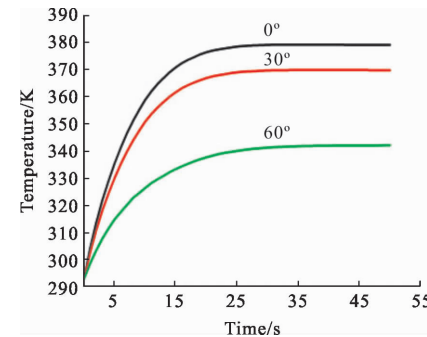
激光的入射角度不同会影响太阳能电池对激光能量的吸收, 激光斜入射到太阳能电池表面时, 入射激光可分解为垂直于电池表面垂直分量和平行于电池表面的平行分量两束激光, 实际产生光生电流的

激光为垂直入射分量。为了研究激光辐照过程中激光入射角度对太阳能电池温度的影响, 令激光入射方向与电池表面法向线之间的夹角  $\theta$ , 结果如图 5 所示, 在激光能量密度一定的条件下, 单结 GaAs 太阳能的温度会随着入射夹角的增加而下降。比较图 5(a)和图 5(b)可知, 532 nm 和 808 nm 脉冲激光的辐照导致的温度变化相同。



(a) 波长 532 nm 下温度变化

(a) Temperature change at wavelength 532 nm



(b) 波长 808 nm 下温度变化

(b) Temperature change at wavelength 808 nm

图 5 0.32 mJ/cm<sup>2</sup> 能量密度、不同入射角度条件下 532 nm 和 808 nm 波长脉冲激光辐照电池温度变化

Fig.5 0.32 mJ/cm<sup>2</sup> energy density, 532 nm and 808 nm wavelength pulse laser irradiation battery temperature changes under different incident angles

以上的结果说明, 当 532 nm 和 808 nm 两种不同波长的激光辐照 GaAs 材料时, 相同的激光强度耦合下, 对于材料的热影响结果几乎相同, 原因是尽管 GaAs 材料对于不同的波长光的吸收系数不同, 但吸收系数仍在一个数量级, 求解不同波长激光辐照对温度的影响时吸收系数的影响很小。其结果与参考文献[16]中实验结果相符合。

## 2.2 激光辐照对太阳能电池光电转化性能影响

### 2.2.1 激光波长影响

通过单结 GaAs 太阳能电池热物理模型仿真计算得到不同条件下太阳能电池温度变化, 带入到单结 GaAs 太阳能电池光电转换模型中进行光电转换影响仿真计算分析, 计算结果发现, 相比于 532 nm 波长激光, GaAs 电池对于 808 nm 波长激光具有更高的光电转换效率。结果如图 6 所示, 当激光垂直入射、脉冲激光能量为 0.32 mJ/cm<sup>2</sup> 时, 532 nm 波长脉冲

光辐照下的电池开路电压相同, 808 nm 波长激光辐照下的太阳能电池具有更高的短路电流, 从而导致 808 nm 波长辐照下的 GaAs 电池具有更高的输出功率, 当脉冲激光能量达到 1.344 mJ/cm<sup>2</sup> 时, 808 nm 波长激光辐照下的最大电池输出功率能够达到 0.5 W, 而同等条件的下 532 nm 激光辐照最大电池输出功率仅为 0.3 W。相比于 532 nm 辐照太阳能电池, 808 nm 辐照下的太阳能电池具有更高的最大输出功率。分析原因是因为 808 nm 波长激光比 532 nm 波长激光对于 GaAs 材料来说具有更大的吸收系数, 太阳能电池能够吸收更多的能量, 从而具有更高的响应, 产生更多的光生电流导致输出功率的提高。

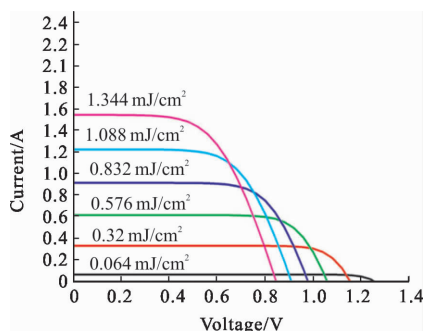
随着脉冲激光能量的升高, 太阳能电池能够产生更多的光生电流, 从而导致电池的最大输出功率也得到了提高, 但升高的脉冲激光能量会导致电池最终平衡温度的升高。由太阳能电池的光电转换数学模型可知, 太阳能电池的光电转换效率与太阳能电池温度息息相关, 在能量大小为 0.32 mJ/cm<sup>2</sup>, 重复频率 1 000 Hz 和激光垂直入射的条件下通过对 532 nm 和 808 nm 波长脉冲激光辐照下的电池的温度变化以及相对应的光电转换效率进行数值计算研究。研究发现, 随着温度的升高, 两种波长激光辐照都会导致光电转换效率的下降。

同时, 在相同的激光能量条件下, 相比于 532 nm 波长激光辐照太阳能电池, 808 nm 波长脉冲激光辐照太阳能电池具有更高的转换效率, 采用波长 808 nm 激光辐照可提高 50% 左右的转换效率。分析转换效率随温度上升而下降的原因是因为在光电转换过程中随着温度的升高会导致太阳能电池量子效率、禁带宽度等参数会随着温度的升高而下降, 从而导致最终光电转换效率的下降。而 808 nm 波长激光辐照下电池能够吸收更多光子能量导致光电转换效率比 532 nm 波长激光辐照下的更高。由图 7 可以看出两种波长下光电转换效率与温度之间的关系为线性关系: 光电转换效率会随着温度的升高成线性下降, 通过对数据的分析得到 532 nm 和 808 nm 波长下的转换效率随温度变化公式为:

$$\eta_{532} = -9.039 \times 10^{-4} \times T + 0.5651 \quad (15)$$

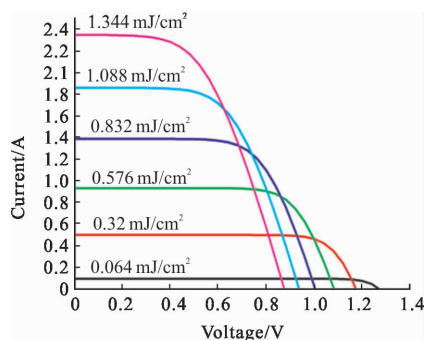
$$\eta_{808} = -1.1119 \times 10^{-4} \times T + 0.8692 \quad (16)$$

公式中转换效率与温度之间成线性负相关, 温



(a) 波长 532 nm 下  $I-V$  曲线变化

(a) Change of  $I-V$  curve at 532 nm wavelength



(b) 波长 808 nm 下  $I-V$  曲线变化变化

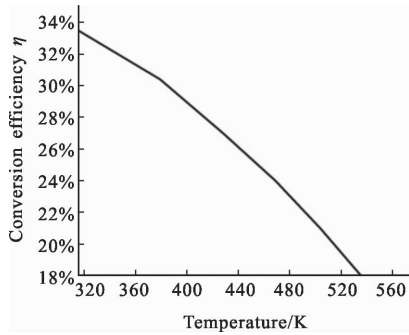
(b) Change of  $I-V$  curve at 808 nm wavelength

图 6 能量范围 0.064~1.344 mJ/cm<sup>2</sup> 条件下 532 nm 和 808 nm 波长脉冲激光辐照电池  $I-V$  曲线变化

Fig.6  $I-V$  curves of 532 nm and 808 nm pulsed laser irradiation cells under the energy range of 0.064~1.344 mJ/cm<sup>2</sup>

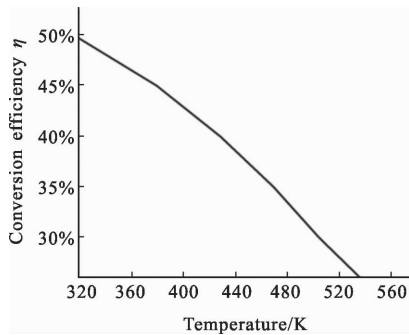
激光辐照下, GaAs 电池开路电压 1.12 V, 短路电流 33 mA, 最大功率为 0.06 W。808 nm 波长脉冲激光辐照下, GaAs 电池开路电压 1.12 V, 短路电流 50 mA, 最大功率为 0.09 W。随着脉冲激光能量的增加, 不同波长脉冲激光辐照下的电池最大输出功率开始增加, 其中在相同的脉冲激光能量条件下, 两种波长激

度系数为负值,原因是电池温度升高会导致 GaAs 量子效率,禁带宽度降低,最终转化为电能的光子能量减少从而导致光电转换效率随着温度的增加而减少。相比于 532 nm 波长激光辐照太阳能电池,808 nm 波长激光辐照太阳能电池具有更大的温度相关系数绝对值,光电转换效率更容易受到温度影响。



(a) 波长 532 nm 下温度与转换效率

(a) Temperature and conversion efficiency at 532 nm wavelength



(b) 波长 808 nm 下温度与转换效率

(b) Temperature and conversion efficiency at 808 nm wavelength

图 7 0.32 mJ/cm<sup>2</sup> 能量密度下不同波长辐照下电池温度变化

Fig.7 Change of battery temperature under irradiation of different wavelengths at 0.32 mJ/cm<sup>2</sup> energy density

### 2.2.2 激光能量密度影响

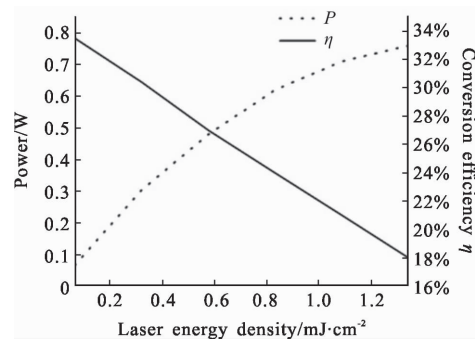
由于光子能量的不同,相同脉冲能量密度下 532 nm 和 808 nm 波长激光辐照 GaAs 电池产生的光生电流不同,从而导致最终电池输出功率的不同,在 808 nm 波长脉冲激光的辐照下,GaAs 电池能够吸收更多的能量从而输出更大的电功率,图 8 中分别为脉冲激光量范围在 0.064~1.344 mJ/cm<sup>2</sup> 之间 532 nm 波长和 808 nm 波长激光辐照下的 GaAs 电池的最大输出功率和光电转换效率,同时光电转换效率会随着输出功率的升高而降低,原因是随着入射激光强度升高导致电池输出功率升高,但会导致电池温度

的升高,从而导致电池光电转换效率的降低。在同样强度的激光辐照下,相比 532 nm 波长激光,808 nm 波长激光辐照能够输出更大的电功率,同样功率激光辐照下电池最大输出功率可提高 50%左右,相应地也就有更大的光电转换效率,且脉冲激光能量与最大输出功率和转换效率之间基本成线性关系,通过数据分析得到 532 nm 和 808 nm 波长脉冲激光辐照下激光能量与最大输出电功率间关系如下:

$$P_{532}=0.5383 \times I_{532}+0.1112 \quad (17)$$

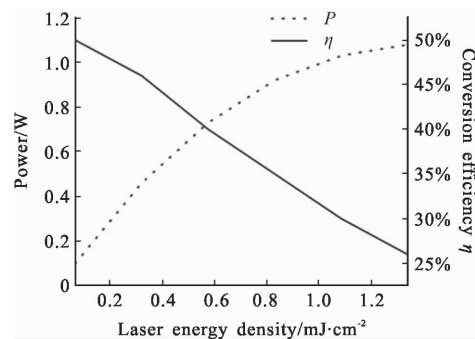
$$P_{808}=0.7589 \times I_{808}+0.1857 \quad (18)$$

公式中最大输出功率与脉冲激光能量之间关系成正相关,脉冲激光能量越大,电池输出功率越大,相比于 532 nm 波长辐照,808 nm 波长辐照光电转换公式斜率更大,能够产生更多的电功率。



(a) 532 nm 波长下 P 和 η 随激光能量变化

(a) Variation of P and η with laser energy at 532 nm wavelength



(b) 808 nm 波长下 P 和 η 随激光能量变化

(b) Variation of P and η with laser energy at 808 nm wavelength

图 8 不同波长下激光能量与电池输出功率和转换效率间关系  
Fig.8 Relationship between laser energy and battery output power and conversion efficiency at different wavelengths

### 2.2.3 激光入射角度影响

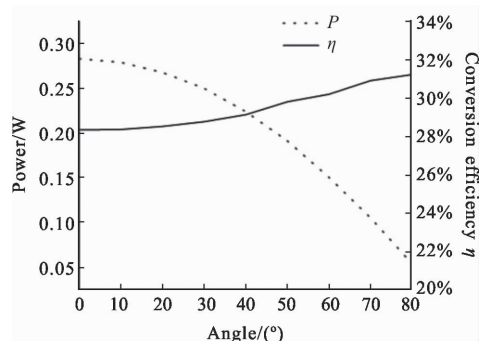
激光的入射角度不同会影响太阳能电池对激光

能量的吸收,从而导致最终电池温度的不同。为了研究激光辐照过程中激光入射角度对太阳能电池输出性能的影响,令激光入射方向与电池表面法向线之间的夹角  $\theta$ ,固定激光能量为  $0.32 \text{ mJ/cm}^2$ ,入射角度范围在  $0^\circ\sim 90^\circ$ 之间研究在不同波长下角度对电池输出的影响,结果如图 9 所示,电池的最大输出功率与角度大小成反比,角度越大电池输出最大功率越小,原因是角度越大,入射到电池的能量越少,相应的电池温度越低,从而导致电池的转换效率越大。对结果数据进行分析,可得到入射角度与最大输出功率之间的关系式:

$$P_{532}=0.2819 \times \sin(0.01794 \times \theta + 1.506) \quad (19)$$

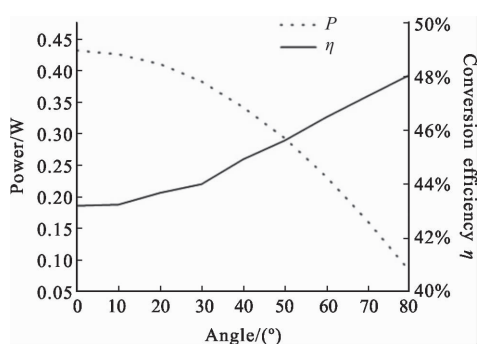
$$P_{808}=0.4303 \times \sin(0.01797 \times \theta + 1.502) \quad (20)$$

由角度系数可知,相比于  $532 \text{ nm}$  波长激光辐照太阳能电池, $808 \text{ nm}$  波长激光辐照太阳能电池的光电转换更容易受到激光入射角度的影响。



(a) 532 nm 波长下  $P$  和  $\eta$  随激光角度变化

(a) Variation of  $P$  and  $\eta$  with laser angle at 532 nm wavelength



(b) 808 nm 波长下  $P$  和  $\eta$  随激光角度变化

(b) Variation of  $P$  and  $\eta$  with laser angle at 808 nm wavelength

图 9 不同波长下入射角度与电池输出功率和转换效率间关系

Fig.9 Relationship between the incident angle and the battery output power and conversion efficiency at different wavelengths

### 3 结论

以相同激光强度辐照条件下  $532 \text{ nm}$  和  $808 \text{ nm}$  脉冲激光辐照单结 GaAs 电池为前提,通过单结 GaAs 太阳电池热物理模型和单结 GaAs 太阳电池光电转换模型进行脉冲激光辐照下的单结 GaAs 电性能输出影响研究。在能量范围在  $0.064\sim 1.344 \text{ mJ/cm}^2$  的条件下以不同激光波长和入射角度对单结 GaAs 太阳能电池的输出特性进行了相关研究,相比于  $532 \text{ nm}$  波长, $808 \text{ nm}$  波长激光辐照 GaAs 电池能够输出更大的电功率以及带来更大的光电转换效率。入射激光与太阳能电池法向之间夹角越小,太阳能电池输出电功率越大。同时,对数值解数据进行分析得到太阳能电池输出功率与激光波长、激光能量以及激光入射角度之间的线性以及非线性关系。研究结果可为优化太阳能电池输能研究提供一定的理论依据。

### 参考文献:

- [1] Qiu Dongdon, 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)  
邱冬冬, 王睿, 程湘爱, 等. 超短脉冲激光对单晶硅太阳能电池的损伤效应[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 112-115.
- [2] Hu Chuanxin, Hu Jiahui, Huang Jiqiang, et al. Nanosecond laser and mechanism primary analysis of Sicell optoelectric conversion efficiency [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3226-3229. (in Chinese)  
胡传焯, 胡家晖, 黄继强, 等. 纳秒激光与硅电池片光电转换效率变化及机理初步分析 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3226-3229.
- [3] Zhang Chao, Zhang Qingmao, Guo Liang, et al. Texturing process with 355 nm laser for amorphous silicon film solar cell [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(7): 0707004. (in Chinese)  
张超, 张庆茂, 郭亮, 等. 非晶硅薄膜太阳能电池的紫外激光制绒工艺[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0707004.
- [4] Matsuoka Y. Normal laser damage of silicon solar cells without phase change [J]. *Applied Physics Letters*, 1974, 25 (10): 574.
- [5] Richard Mason. Feasibility of laser power transmission to a high-altitude unmanned aerial vehicle [R]. Santa Monica:



- RAND Project Air Force, 2011.
- [6] Meiss J, Holzmueller F, Gresser R, et al. Near-infrared absorbing semitransparent organic solar cells [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(19): 252.
- [7] Zhang Chao, Zhang Qingmao, Guo Liang, et al. Ablating process with 355 nm laser for amorphous silicon thin-film solar cell [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(11): 2751–2756. (in Chinese)  
张超, 张庆茂, 郭亮, 等. 非晶硅薄膜太阳能电池的紫外激光刻蚀工艺[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(11): 2751–2756.
- [8] Zhu Rongzhen, Wang Rui, Jiang Tian, et al. Research of laser irradiation effect on monocrystalline silicon solar cells and single junction GaAs solar cells [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2015, 34(4): 97–103. (in Chinese)  
朱荣臻, 王睿, 江天, 等. 单晶 Si、单结 GaAs 太阳能电池的激光损伤特性对比研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2015, 34(4): 97–103.
- [9] Li Xiangyang, Wu Shichen, Li Zhongxiao. Laser wireless power transmission technology and its development trend [J]. *Spacecraft Engineering*, 2015, 24(1): 1–7. (in Chinese)  
李向阳, 吴世臣, 李钟晓. 激光无线能量传输技术应用及其发展趋势[J]. *航天器工程*, 2015, 24(1): 1–7.
- [10] Tian Xiuqin, Xiao Si, Tao Shaohua, et al. Damage threshold research of monocrystalline silicon solar cells under femtosecond laser illumination [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 676–680. (in Chinese)  
田秀芹, 肖思, 陶少华, 等. 飞秒超短脉冲激光对硅太阳能电池的损伤阈值研究 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(3): 676–680.
- [11] Sun Hao, Zhou Dayong, Zhang Hongchao, et al. Simulation of single-junction GaAs photovoltaic cell output characteristics by continuous wave laser irradiation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(10): 1003006. (in Chinese)  
孙浩, 周大勇, 张宏超, 等. 连续激光供能单结 GaAs 光电输出特性仿真[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(10): 1003006.
- [12] Dou Pengcheng, Feng Guobin, Zhang Jianmin, et al. Mechanism of laser induced short circuit current increasing in triple-junction GaAs solar cell [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(S1): S106069. (in Chinese)  
窦鹏程, 冯国斌, 张检民, 等. 激光诱导三结砷化镓太阳能电池短路电流增大现象与机理 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(S1): S106069.
- [13] Haijiao Zhou, Wenjun Sun, Zhong Meng, et al. Numerical analysis of pulse laser deformation on GaAs [C]//International Conference on Optoelectronics & Micro-electronics, IEEE, 2013.
- [14] Luis V Rodríguez-de Marcos, Larruquert J I, José A Méndez, et al. Self-consistent optical constants of SiO<sub>2</sub> and Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> films [J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(11): 3622–3637.
- [15] Chen Zeshao, Ge Xinshi, Gu Yuqin. Technique and Determination of Thermo-Physical Properties [M]. Hefei: China University of Science and Technology Press, 1990. (in Chinese)  
陈则韶, 葛新石, 顾毓沁. 量热技术和热物性测定 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1990.
- [16] Li Yunpeng, Zhang Jianmin, Dou Pengcheng, et al. Thermal damage mechanism of single junction GaAs solar cells irradiated by continuous wave laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(5): 0506001. (in Chinese)  
李云鹏, 张检民, 窦鹏程, 等. 单结 GaAs 太阳能电池连续激光辐照热损伤机理[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(5): 0506001.