

文章编号:1001-5078(2015)12-1444-06

· 激光应用技术 ·

空间热辐射对激光输能光电池特性影响研究

李小将¹, 杨业伟², 李贝贝², 张东来²

(1. 装备学院研究生管理大队, 北京 101416; 2. 装备学院 激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101416)

摘要:从激光辐照功率密度、光电池温度和光电转换效率的相互关系出发, 基于热辐射平衡原理, 建立了空间热辐射环境下光电池热辐射稳态平衡模型, 根据该模型可以分析激光辐照功率密度、光电转换效率和光电池温度的相互影响。对已有的光电转换效率模型做温度上的修正, 得到温度修正后的转换效率模型, 将上述两个模型结合, 即得到空间热辐射环境下激光辐照功率密度、光电池温度和转换效率的关系。通过 MATLAB 软件对模型进行仿真, 仿真结果表明, 随着激光辐照功率密度增加, 光电池温度不断上升, 光电转换效率和输出功率密度先上升后下降, 但最大光电转换效率对应的激光辐照功率密度远小于最大输出功率密度对应的激光辐照功率密度, 且日照区光电池温度高于地影区, 日照区转换效率低于地影区。

关键词:光电转换效率; 激光输能; 热辐射; 温度

中图分类号: V528 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2015.12.008

Effect of thermal radiation in space on photovoltaic cell

LI Xiao-jiang¹, YANG Ye-wei², LI Bei-bei², ZHANG Dong-lai²

(1. Company of Postgraduate Management, the Academy of Equipment, Beijing 101416, China;

2. State Key Laboratory of Laser Propulsion & Application, the Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: On basis of the thermal radiation equilibrium principle, and considering the relations between laser power density, photovoltaic cell temperature and photoelectric conversion efficiency, the thermal radiation equilibrium model of photovoltaic cell under space thermal radiation is established. By using this model, the effect of laser power density and photoelectric conversion efficiency on the cell temperature can be analyzed. By correcting the original photoelectric conversion efficiency model from the temperature, a new model is obtained. Based on the thermal radiation equilibrium model and modified photoelectric conversion efficiency model, the relations between laser power density, cell temperature and photoelectric efficiency can be analyzed by using MATLAB software. The simulation results show that, with the increase of laser power density, the cell temperature will keep rising, but the photoelectric efficiency and output power density will firstly increase and then decrease. And the cell temperature in daytime is higher than at night, and the photoelectric efficiency in daytime is lower than at night.

Key words: photoelectric conversion efficiency; laser power beaming; thermal radiation; temperature

1 引言

空间太阳能电站 (Solar Power Satellite, SPS) 是

一种解决未来航天器能源问题的构想, 由美国科学家 Peter Glaser 在 1968 年提出, 他设想通过巨大

基金项目: 激光推进及其应用国家重点实验基础研究项目资助。

作者简介: 李小将 (1973 -), 男, 博士生导师, 研究方向武器系统建模与仿真。

通讯作者: 杨业伟 (1990 -), 男, 硕士研究生, 研究方向武器系统建模与仿真。

收稿日期: 2015-03-30; **修订日期:** 2015-04-19

的太阳能接收装置在空间中收集太阳能并将其转换为电能,然后通过无线能量传输技术将电能传输到地面、空间航天器和未来的空间基地^[1]。SPS的构想提出至今,得到了许多国家和机构的关注和研究。

应用SPS的关键技术之一就是空间无线能量传输技术,实现方式包括微波无线输能和激光无线输能,后者在远距离无线能量传输上更受青睐。空间激光输能是指能源站将激光照射到卫星的光电池阵列,通过光电转换技术实现光能到电能的转换,从而实现远距离的激光能量传输^[2]。如文献[3]建立了激光辐照下光电池转换效率与太阳光辐照下光电池转换效率之间的关系模型,并对结果进行了修正,为后来的相关研究奠定了很好的基础;文献[4]专门针对脉冲激光辐照下的光电池响应进行了研究,并且得出了感应式脉冲自由电子激光器辐照下光电转换效率低于连续激光器辐照下光电转换效率的结论;Krupke等^[5]人在2003年测得了光电池转换效率与激光波长的关系,发现对于Si电池和GaAs电池,其最佳匹配波长分别在900 nm左右和850 nm左右。

但是以上研究都是从光电池本身的特性出发研究光电池在激光辐照下的响应,没有引入外界环境对光电池的影响,特别是空间环境对光电池性能的影响。对于空间激光输能,光电池暴露于复杂的空间环境中,在执行输能任务的过程中,其工作特性势必会受到空间环境的影响。空间环境的影响因素复杂多样,包括空间热辐射、宇宙粒子辐射、地球磁场和引力场等,为了明确研究目标,本文重点对空间热辐射环境下激光输能光电池特性进行研究。

2 问题分析

空间热辐射环境对光电池的影响主要体现在对光电池温度的影响上,且激光输能时激光辐照功率密度也会影响光电池温度,而光电池温度又是光电转换效率的重要影响因素,因此研究空间热辐射环境下的激光输能光电转换效率问题,需要明确四个量的关系,一是空间热辐射 \dot{Q} ,二是激光辐照功率密度 ϕ_{laser} ,三是光电池温度 T_{panel} ,四是光电转换效率 η_{laser} ,四者的关系可以用图1表示。

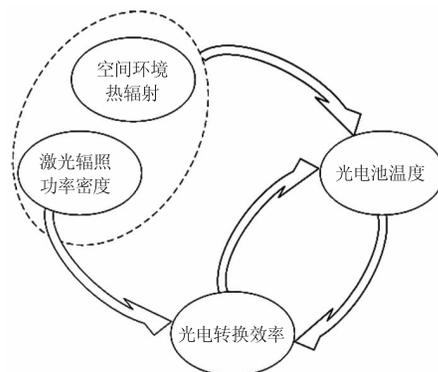


图1 \dot{Q} 、 ϕ_{laser} 、 T_{panel} 和 η_{laser} 四者之间的关系示意图

Fig. 1 Relationship between \dot{Q} , ϕ_{laser} , T_{panel} and η_{laser} schematic

2.1 热辐射与光电池温度的关系

在空间激光输能过程中,光电池受到的热辐射有两大来源,一是激光辐照时的热辐射,二是空间热辐射,其对光电池的影响主要体现在对光电池温度的影响,该影响可以通过能量守恒定律和热辐射平衡原理进行分析。

光电池的工作原理是利用半导体对光子的吸收作用和半导体自身的光伏效应实现光电转换。如图2所示,为一束光从真空垂直照射到光电池表面,由于光电池表面自身的反射作用使一部分光子被反射,另外一部分光子进入光电池内部,这部分进入光电池内部的光子,有一部分会透射过光电池,有一部分则被光电池吸收。

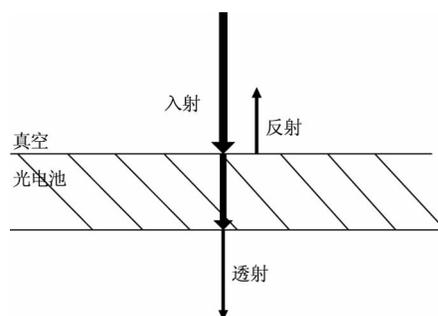


图2 光束辐照光电池示意图

Fig. 2 Laser irradiating photovoltaic cell

设辐照到光电池表面的激光能量为 E_{input} ,被反射的能量为 E_{reflex} ,透射过光电池的能量为 E_{trans} ,进入光电池内部的能量为 E_{inner} ,而 E_{inner} 又包括两部分能量:光电池内能 E_u 和被转换成的电能 E_{output} ,根据能量守恒原理可得:

$$E_{input} = E_{reflex} + E_{trans} + E_u + E_{output} \quad (1)$$

其中, E_u 决定光电池温度,又根据热辐射平衡原理,

一个物体受到外界的热辐射输入与自身向外界发射的热辐射相等时,其内能 E_u 不再变化,温度稳定在一定值,因此当激光所产生的热辐射与空间热辐射总和等于光电池自身发射出的热辐射相等时,光电池温度达到稳定,从而可以求出光电池稳态温度。

2.2 光电池温度与光电转换效率的关系

如图 1 所示,光电池温度与光电转换效率的影响是相互的,根据光电池的温度效应^[6],在其他条件不变的前提下,光电池温度对光电池输出特性的影响如图 3 所示。从图中可以看出,光电池温度升高,光电池短路电流小幅上升,但是光电池开路电压大幅下降,导致光电池输出功率下降,从而降低光电转换效率。

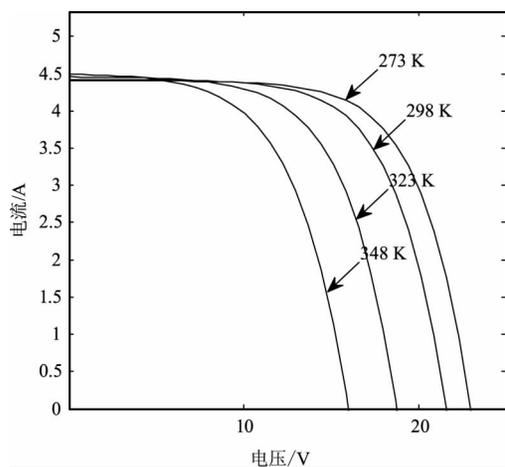


图 3 温度对光电池输出特性的影响

Fig. 3 Influence of temperature on output characteristics

同时,光电池转换效率下降,意味着式(1)中 E_{output} 减小, E_u 增加,因此,光电转换效率反过来会使光电池温度升高。

2.3 辐照功率密度与光电转换效率的关系

如图 1 所示,激光辐照功率密度对光电转换效率的影响有两条途径,一是直接影响光电转换效率,二是与空间热辐射共同通过影响光电池温度间接影响光电转换效率。

若不考虑光电池温度的变化,根据文献[7]的研究结论,激光辐照功率密度并不会影响光电池本身特性,但是随着辐照功率 P_{in} ($\phi_{laser} \times$ 光电池面积)变化,光电池输出功率 P_{out} 也会变化,辐照功率越大,输出功率越大,在辐照功率较小时, $d^2 P_{out}/dP_{in}^2 > 0$,在辐照功率增加到一定值之后, $d^2 P_{out}/dP_{in}^2 < 0$,从而使得光电转换效率 $\eta_{laser} = P_{out}/P_{in}$ 随着 P_{in} 增加呈现出先增加后减小的趋势。

若考虑光电池温度的变化,当激光辐照功率密度变化时,根据 2.1 节的分析,其光电池温度会发生变化,同时根据 2.2 节的分析,光电池温度变化会引起光电转换效率变化,因此激光辐照功率密度还能通过光电池温度间接影响光电转换效率。

通过 2.1~2.3 节的分析可知,空间热辐射环境下,激光辐照功率密度对光电转换效率的影响包括直接影响光电转换效率和通过影响光电池温度间接影响光电转换效率。其中前者可根据已有的光电转换效率模型进行分析,后者需要通过分析光电池所处的空间热辐射环境,并根据热辐射平衡原理进行分析。

3 理论模型

3.1 稳态热辐射平衡模型

本文以 LEO 卫星光电池阵列上的单体光电池为研究对象,通过建立空间激光输能光电池的热辐射平衡模型来确定空间热辐射环境下光电池的温度。对 LEO 上的卫星,其光电池阵列所受的空间热辐射示意图如图 4 所示。

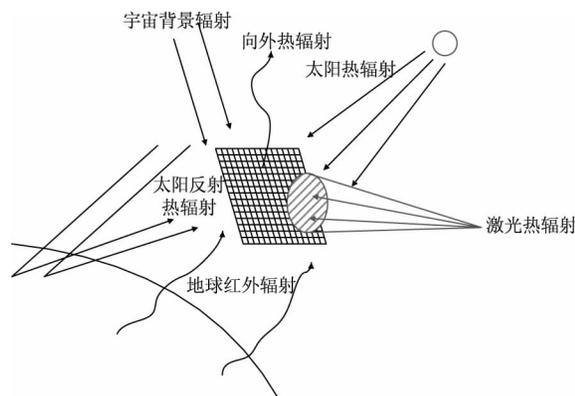


图 4 LEO 卫星光电池阵列的热平衡模型

Fig. 4 Heat balance model of LEO satellite photovoltaic array

通过激光实现远距离能量无线传输的想法最早由 Backus 于 1972 年提出,并在此之后世界各国做了相关技术的大量研究和实验验证。

根据图 4,LEO 卫星光电池阵列受到的热辐射源包括^[8]:太阳直接辐射 \dot{Q}_{sun} 、地球反照太阳辐射 \dot{Q}_{albedo} 、地球红外热辐射 \dot{Q}_{earth} 和温度为 4 K 的宇宙背景辐射 \dot{Q}_{space} ,当执行激光输能任务时,还受到激光热辐射 \dot{Q}_{laser} 。其中,激光热辐射与光电转换效率相关, \dot{Q}_{space} 相比于其他辐射非常微弱,可以忽略不计。

根据热辐射平衡原理,当光电池的热辐射输入总量等于光电池自身向外热辐射的总量时,光电池

即达到热辐射平衡状态,此时光电池内能不变,温度稳定,即可求出光电池温度。

因此可以建立空间热辐射环境下光电池的稳态热辐射平衡方程:

$$\dot{Q}_{sun} + \dot{Q}_{laser} + \dot{Q}_{earth} + \dot{Q}_{albedo} + \dot{Q}_{out} = 0 \quad (2)$$

式中, \dot{Q}_{out} 为光电池向外的热辐射。 \dot{Q}_{earth} 和 \dot{Q}_{out} 可以根据非黑体全漫射的斯蒂芬-波尔兹曼定律求得,表达式为:

$$\dot{Q}_{earth} = \varepsilon_{earth} \sigma T_{earth}^4 \cos \lambda_e \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{out} = -2\varepsilon_{panel} \sigma T_{panel}^4 \quad (4)$$

式中, ε_{earth} 和 ε_{panel} 分别为地球和光电池的红外发射率, $\sigma = 5.6704 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ 为波尔兹曼常数, λ_e 为地心到单体光电池中心的连线与单体光电池法线之间的夹角, T_{earth} 和 T_{panel} 分别为地球和光电池的温度。

\dot{Q}_{sun} 与 \dot{Q}_{laser} 需要考虑到光电池对太阳光和激光的吸收率以及光电转换效率,设光电池因此其表达式分别为:

$$\dot{Q}_{sun} = (1 - \eta_{solar}) \alpha_s \phi_{sun} \cos \theta \quad (5)$$

$$\dot{Q}_{laser} = \alpha_l (1 - \eta_{laser}) \phi_{laser} \quad (6)$$

式中, η_{solar} 与 η_{laser} 分别为同环境下太阳光辐照下和激光辐照下的光电转换效率, α_s 与 α_l 分别为光电池对太阳光和激光的吸收率, ϕ_{sun} 与 ϕ_{laser} 分别为辐照到光电池表面的太阳光和激光功率密度, θ 为太阳入射光与光电池平面法向量之间的夹角,本文假设激光垂直入射到光电池。

文献[8]给出了地球反照对光电池的辐射表达式:

$$\dot{Q}_{albedo} = (1 - \eta_{solar}) \alpha_s Q_{a \rightarrow p}(h, \lambda, \theta_s) \left(\frac{A_b}{0.34} \right) \left(\frac{\phi_{sun}}{1395} \right) \quad (7)$$

式中, $Q_{a \rightarrow p}(h, \lambda, \theta_s)$ 为地球邦德反照率到光电池的能量密度,根据 NANA TN-1842^[9] 关于 $Q_{a \rightarrow p}(h, \lambda, \theta_s)$ 的曲线图可以得到 $Q_{a \rightarrow p}(h, \lambda, \theta_s)$ 的取值。

因此结合式(2)~式(7),可以得到 LEO 轨道某卫星上单体光电池的热辐射平衡模型:

$$(1 - \eta_{solar}) \alpha_s \phi_{sun} \cos \theta + \alpha_l (1 - \eta_{laser}) \phi_{laser} + \varepsilon_{earth} \sigma T_{earth}^4 \cos \lambda_e - 2\varepsilon_{panel} \sigma T_{panel}^4 + (1 - \eta_{solar}) \alpha_s Q_{a \rightarrow p} \left(\frac{A_b \phi_{sun}}{0.34 \times 1395} \right) = 0 \quad (8)$$

通过上式可以发现,影响光电池温度 T_{panel} 的因素中有光电转换效率 η_{laser} 和激光辐照功率密度 ϕ_{laser} ,而根据 2.2 节的分析,光电池温度 T_{panel} 又会反过来影响光电转换效率 η_{laser} ,因此有必要求解出 T_{panel} 对 η_{laser} 的影响关系式。

3.2 进行温度修正的转换效率模型

已知根据太阳光辐照下的光电转换效率 η_{solar} 可以求出 η_{laser} , η_{solar} 与 η_{laser} 之间的关系^[3]为:

$$\eta_{laser} = \frac{\eta_{solar} \phi_{solar} QE \lambda}{J_{sc solar} 1240} \left[1 + \frac{0.025}{V_{oc}} \ln \frac{QE \lambda \phi_{laser}}{1240 J_{sc solar}} \right] \quad (9)$$

式中, QE 为外部量子效率; λ 为激光波长; $J_{sc solar}$ 和 V_{oc} 分别为太阳光辐照下的短路电流密度和开路电压。上式是在考虑激光辐照功率引起短路电流密度变化后对原始转换效率表达式进行修正之后的结果,但是上式仍然存在一个问题就是忽略了激光辐照功率变化引起光电池温度变化从而导致对转换效率产生影响,因此还需要结合光电池的温度效应对转换效率表达式进行修正。

设光电池的温度系数为 K ,光电池在温度为 T_0 时的效率为 $\eta(T_0)$,则光电池在温度为 T 时的效率 $\eta(T)$ 表达式为:

$$\eta(T) = \eta(T_0) + \eta(T_0) \cdot K \cdot (T - T_0) \quad (10)$$

结合式(9)和式(10)可以得到修正后的转换效率模型:

$$\eta_{laser} = \frac{\eta_{solar} \phi_{solar} QE \frac{\lambda}{1240}}{J_{sc solar}} K_1 K_2 \quad (11)$$

其中, $K_1 = 1 + \left(\frac{0.025}{V_{oc}} \right) \ln \left(\frac{QE \lambda \phi_{laser}}{1240 J_{sc solar}} \right)$, $K_2 = 1 + K(T - T_0)$ 。

联合式(8)和式(11)即可得到激光辐照强度与光电转换效率之间的关联性方程:

$$\left. \begin{aligned} A_1 + \alpha_l (1 - \eta_{laser}) \phi_{laser} - A_2 T_{panel}^4 &= 0 \\ \eta_{laser} &= B_1 [1 + B_2 \ln(B_3 \phi_{laser})] (B_4 + K T_{panel}) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中, $A_1 = \varepsilon_{earth} \sigma T_{earth}^4 \cos \lambda_e + (1 - \eta_{solar}) \alpha_s \phi_{sun} \cos \theta + (1 - \eta_{solar}) \alpha_s Q_{a \rightarrow p}(h, \lambda, \theta_s) \left(\frac{A_b}{0.34} \right) \left(\frac{\phi_{sun}}{1395} \right)$, $A_2 = 2\varepsilon_{panel} \sigma$, $B_1 = \frac{\eta_{solar} \phi_{solar} QE \lambda}{1240 J_{sc solar}}$, $B_2 = \frac{0.025}{V_{oc}}$, $B_3 = \frac{B_1}{\eta_{solar} \phi_{solar}}$, $B_4 = 1 - K T_0$ 。

4 仿真分析

从式(12)可以看出,光电池温度会影响激光辐照的光电转换效率,而激光辐照下的光电转换效率又会反过来和空间热辐射一起影响光电池温度,因此 T_{panel} 和 η_{laser} 存在耦合关系,直接对两者关系进行求解会比较困难,可借助 Matlab 仿真软件。

4.1 参数设置

假设执行某次输能任务时,卫星某块 Si 单体光电池受到太阳直接辐射和激光辐射,同时还受到地球红外辐射和地球反照辐射,地心到单体光电池中心的连线与单体光电池法线之间的夹角 $\lambda_e = 80^\circ$, 太阳入射光与光电池平面法向量之间的夹角 $\theta = 30^\circ$, 激光垂直入射到光电池。 η_{solar} 测得为 18% ($T_0 = 300\text{ K}$, AM0), 激光波长 λ 设为 1000 nm, Si 电池对太阳光和 1000 nm 激光的吸收率分别为 0.8 和 0.95, 光电池的温度系数 $K = -0.0025$, 红外发射率 $\varepsilon_{panel} = 0.85$, AM0 下的短路电流密度和开路电压分别为 485 A/m^2 和 0.637 V 。

4.2 仿真结果及分析

设激光辐照功率密度变化范围为 $0 \sim 20\text{ kW/m}^2$, 仿真结果如图 4 ~ 图 6 所示, 图中曲线变化趋势, 以及日照区和地影区曲线的相互关系与文献[3]中得到的结果基本一致。实线为在日照区的曲线图, 虚线为在地影区的曲线图。

图 5 为光电池温度随着激光辐照功率密度变化的曲线图, 反映的是激光辐照功率密度对光电池温度的影响, 仿真结果表明, 无论是在日照区还是在地影区光电池温度都随着激光辐照功率密度增加而不断升高, 这是由于激光辐照功率密度增加, 导致没被转化为电能的激光光能增加, 从而增加光电池内能, 使温度升高, 光电池温度升高使得其发射出的热辐射增加, 当发射的热辐射与吸收的热辐射达到一个新的平衡时, 光电池温度达到稳定值, 因此每一个激光辐照功率密度值都对应一个光电池温度值。

此外, 从图 5 中还可以看出, 在激光辐照功率密度较小甚至为 0 时, 日照区和地影区的光电池温度相差近 $100\text{ }^\circ\text{C}$, 但是随着激光辐照功率密度增加, 这种差距越来越小, 这是由于激光辐照功率密度较低或者没有激光辐照时, 影响光电池温度的主要因素是太阳热辐射, 从而导致光电池温度差别较大, 当激光辐照功率密度较高时, 影响光电池温度的主要因素为激光热辐射, 从而导致日照区和地影区光电池温度差别较小, 因此仿真结果是合理的。

在图 1 所示的构型中, 所有任务模块在同一条轨道上运行, 彼此之间保持固定的相位关系。供能

模块在另一条升交点赤经 Ω 不同、倾斜角 i 相同的不同平面轨道或者轨道高度不同的同一平面轨道运行。供能模块与任务模块相对于地球的运行速度不同, 任务模块顺序进入某一供能模块的输能区域, 供能模块对其输能。该构型要求对供能模块进行布站设计, 并合理设计任务模块飞入供能模块输能区域的时间, 以保证供能模块上有限数量的输能设备能满足对区域内的多个任务模块的同时输能。这种跟飞结构下多供能模块协同输能模式的最大好处在于, 通过合理的设计和布站理论上可以实现对任务模块的 24 h 不间断输能。

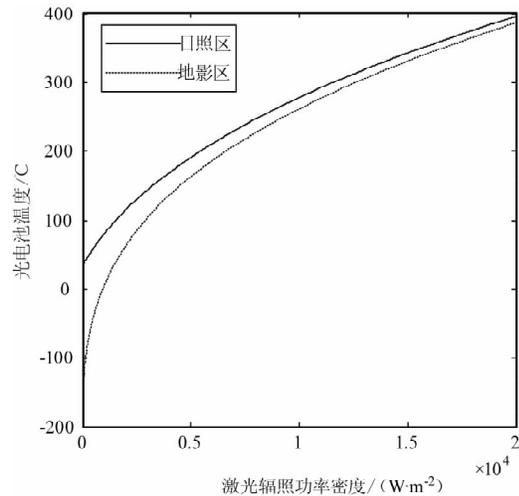


图 5 光电池温度随着激光辐照密度变化曲线图

Fig. 5 Cell temperature versus laser power density

图 6 为光电转换效率随激光辐照功率密度变化的曲线图, 左下角为局部放大图, 从图中可以看出光电转换效率随着激光辐照密度增加呈现出先增加后减小的趋势, 在约 200 W/m^2 处达到最高转换效率, 日照区约为 35%, 地影区约为 47%, 当辐照功率密度 $\geq 200\text{ W/m}^2$ 时, 光电转换效率随着辐照功率密度增加而减小, 这种现象符合 2.3 节的分析, 原因是: 一是光电池温度随着激光辐照功率密度增加而不断上升, 根据光电池温度效应, 光电池温度升高会导致开环电压大幅下降, 导致光电池转换效率降低, 二是光电池输出功率 P_{out} 尽管会随着激光辐照功率密度 P_{in} 增加而增加, 但 P_{out} 与 P_{in} 不是线性关系, 且 $d^2P_{out}/dP_{in}^2 < 0$, 因此 P_{out} 的增加速度低于 P_{in} 的增加速度, 从而导致光电转换效率降低。

图 7 为光电池输出功率密度随激光辐照功率密度变化曲线, 结果显示在地影区光电池输出功率密度大于日照区, 这是由于在地影区不受太阳热辐射和地球反照热辐射的影响, 光电池温度低日照区, 使得转换效率高于日照区, 从而使得输出功率密度也高于日照区。

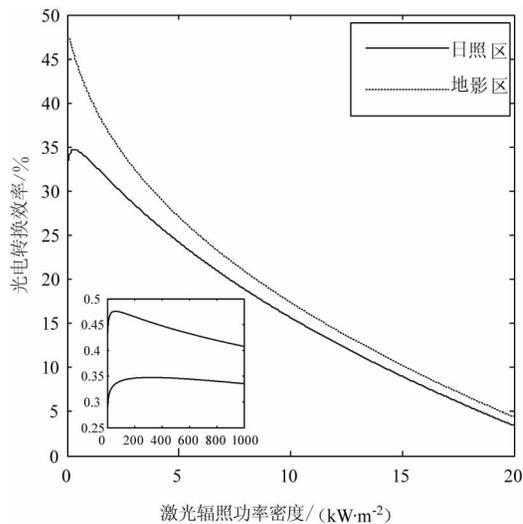


图6 光电转换效率随着激光辐照密度变化曲线图
Fig.6 Photoelectric efficiency versus laser power density

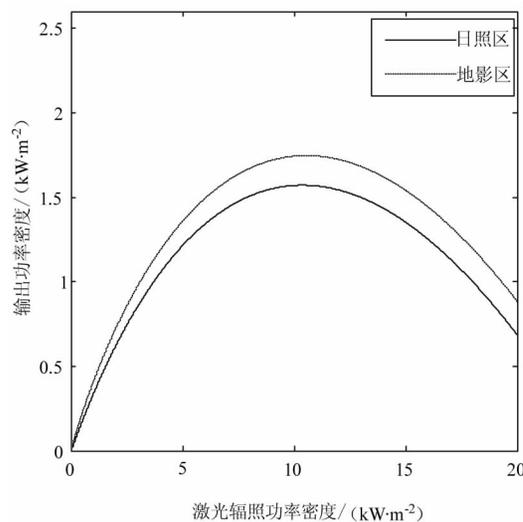


图7 激光辐照功率密度与输出功率密度的关系

Fig.7 Relationship of laser power density and output power density

但是,光电池输出功率密度通常都是随着辐照功率密度增加而增加的,但仿真结果显示输出功率密度在 $\phi_{laser} \approx 10 \text{ kW/m}^2$ 时达到最大值,当 $\phi_{laser} > 10 \text{ kW/m}^2$ 时,光电池的输出功率密度却随着 ϕ_{laser} 增加呈现出不断减小的趋势。这是由于 ϕ_{laser} 超过一定值之后,使得光电池温度上升到一定高度,同时使光电池的转换效率大幅降低,并且随着 ϕ_{laser} 的增加,转换效率仍在快速下降,从而出现尽管输入在增加,但输出却在减小的现象。

5 结论

对于空间激光输能中光电池的转换效率问题,本文从热辐射平衡的角度分析了激光辐照功率密度对光电池转换效率的影响,这种影响主要体现在激光辐照功率密度的增加会打破光电池原有的热辐射

平衡状态,使输入光电池的总热辐射增加,光电池内能不断升高,使得光电池向外的热辐射不断增加,直到向外的热辐射与总的输入热辐射达到新的平衡,光电池内能趋于稳定,从而光电池温度趋于稳定,并升高到一个新的值,直接导致光电池转换效率下降,并且在激光辐照功率密度增加到一定值之后,输出功率密度也出现下降的趋势。

因此,在实际的激光输能任务中,不能盲目增加激光辐照功率密度。对于本文所假设的任务及相关参数,若输能任务是以获得最佳转换效率为目标,则激光辐照功率密度取 200 W/m^2 较为合适,若输能任务是以获得最高输出功率为目标,则激光辐照功率密度取 10 kW/m^2 较为合适。

参考文献:

- [1] P E Glaser. Power from the Sun: its future [J]. Science, 1968(162):867-886.
- [2] M D Williams, E J Conway. Space laser power transmission system studies [R]. NASA: Langley Research Center, 1981.
- [3] Geoffrey A Landis. Photovoltaic receivers for laser beamed power in space [J]. Journal of Propulsion and Power, 1993, 9(1):105-112.
- [4] Roland A Lowe, Geoffrey A Landis, Phillip Jenkins. Response of photovoltaic cells to pulsed laser illumination [J]. Transactions on Electron Devices, 1995, 42(4):744-751.
- [5] W F Krupke, R J Beach, S A Payne, et al. DPAL: a new class of lasers for CW power beaming at ideal photovoltaic cell wavelengths [C]. 2nd International Symposium on Beamed Energy Propulsion, Sendai, 2003.
- [6] A Durgadevi, S Arulselvi, S P Natarajan. Photovoltaic modeling and its characteristics [C]. Proceedings of Ice-tect, 2011:469-475.
- [7] Viacheslav Andreev, Vladimir Khvostikov, Vitali Kalinovsky, et al. High current density GaAs and GaSb photovoltaic cells for laser power beaming [C]. 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, Japan, 2003.
- [8] ZHANG Yulin, CHEN Xiaoqian, YAN Yan. The space environment and its effects on space systems [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2010. (in Chinese) 张育林, 陈小前, 闫颜. 空间环境及其对航天器的影响 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010.
- [9] Cunningham F G. Earth reflected solar radiation incident upon an arbitrarily oriented spinning flat plate [R]. NASA TN-1842, Washington, 1963.