文章编号:1001-5078(2016)04-0406-06

·激光应用技术 ·

# 激光辐照下光电电池的极限能量转化效率研究

# 崔晓阳,洪延姬,金 星 (装备学院激光推进及其应用国家重点实验室,北京 101416)

**摘** 要:采用激光输能技术解决临近空间飞行器的能源供给问题的研究正在广泛开展。为研 究激光辐照下的光电电池的极限性能,基于细致平衡理论,分析了激光辐照条件下光电材料禁 带宽度与最佳激光波长的关系,得到了光电电池各类输出性能参数的计算方法。通过计算,得 到了激光波长、激光功率密度和电池温度对能量转化效率等参数的影响规律。结果表明对于 特定材料的光电电池存在最佳的激光波长使其获得极限能量转化效率;激光功率密度的增加 可以提高光电电池的能量转化效率,但达到一定数值后提高不再明显;对于电池温度的影响, 不同的输出性能参数具有不同的温度系数。

关键词:激光输能;光电电池;能量转化效率;细致平衡理论;临近空间飞行器 中图分类号:V279<sup>+</sup>;TN249 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2016.04.005

# Study on the energy conversion limit for laser-radiated photoelectric cells

CUI Xiao-yang, HONG Yan-ji, JIN Xing

(State Key Laboratory of Laser Propulsion & Application, Equipment Academy, Beijing 101416, China)

Abstract: The researches of feeding the electrical power of near-space vehicles by the laser energy transmission technology have been explored extensively. To study the performance limit of the laser-radiated photoelectric cells, the relationship of energy gap and laser wavelength was analyzed, the calculation methods of the output parameters were proposed based on the detailed balance theory, and the analytical expressions were derived. The influence rules of the laser wavelengths, power densities, and the cell temperatures on the output performance parameters were achieved by theory calculations. The results show that there exists an optimum laser wavelength to maximize the energy efficiency, but not remarkably after it reaches a certain value. Different output feature parameters have different related temperature coefficients for the influences of the cell temperature.

Key words: laser energy transmission; photovoltaic cell; energy efficiency; detailed balance theory; near-space vehicle

## 1 引 言

激光输能技术是利用定向能可以远距离传输这 一特点,实现远距离输能。它将地面能量以激光的 形式传输到临近空间飞行器,从而解决临近空间飞 行器能源供给问题。同时这项技术还可以用于解决 孤岛、荒漠、废墟等恶劣环境下的能量传输,在军事 和民用方面都具有广泛的应用前景。 典型的激光输能系统包括激光器、发射镜和激 光接收装置。其中,激光接收装置的核心是光电电 池,它利用光电材料的"光生伏特效应(Photovoltaic Effect)"将光能转换为电能,具有较高的能量转化效 率。激光输能技术在空间目标输能<sup>[1-5]</sup>、无人机等 空中目标输能<sup>[6-12]</sup>等方面的研究已在国外广泛开 展,同时国内外的研究者都通过理论或实验的方法

作者简介:崔晓阳(1987-),女,博士生,研究方向为激光输能技术。E-mail: maplecui@163.com

**通讯作者:**洪延姬(1963 -),女,研究员,博士,研究方向为先进推进技术。E-mail: hongyanji@ vip. sina. com 收稿日期:2015-09-14

验证了光电电池在激光辐照条件下可以获得更高的 能量转化效率。Pena<sup>[13]</sup>用 800 nm 左右激光辐照 GaAs 材料的光电电池,测得的能量转化效率最高达 到了 45%。Jain<sup>[14]</sup>估算了 InP 光电电池在波长 750~925 nm、功率密度 10 kW/m<sup>2</sup> 的激光照射下的 能量转化效率,可以达到 50% 左右。Olsen<sup>[15]</sup>运用 光电子模拟软件 PC - 1D 模拟了用波长 800~ 840 nm 激光辐照 GaAs 电池的输出特性,电池在波 长806 nm、功率密度 1 kW/m<sup>2</sup> 激光照射下,能量转 化效率最高为 52.1%。国内的杨鹏<sup>[16]</sup>研究了单晶 硅电池在激光辐照下的特性,最高效率达 27.7%。

国内外大量的研究中实验和理论方法往往只针 对了某一类光电材料和激光,没有充分说明光电材 料自身物理特性与最佳激光波长之间的关系。同 时,没有得到各类输出性能参数随激光参数的变化 规律,而这对于激光输能系统的工程设计具有重要 意义。本文在细致平衡理论基础上,分析了光电材 料禁带宽度与最佳激光波长的关系,以及各类输出 性能参数的计算方式,计算得到了激光波长、功率密 度和电池温度对输出性能参数的影响规律。

#### 2 基本物理模型

细致平衡理论是描述光电电池在理想条件下工 作过程的物理模型<sup>[17]</sup>,在这一过程中光电材料在温 度 *T* 下工作时,其禁带宽度用 *E<sub>g</sub>* 来描述,并假定了 以下的约束条件<sup>[18-19]</sup>:

到达电池上表面且包含的能量大于光电材料禁带宽度的光子都能被材料吸收。也就是说,当入射光的波长低于截止波长λ<sub>c</sub> = hc/E<sub>g</sub>时,材料的外量子效率(具有一定能量的光子激发并输运一个电子进入外电路的几率)等于1,否则等于零。

2)只有辐射再结合产生损失。也就是说,只有 在释放一个光子时才损失一个电子空穴对。

3)忽略串联电阻对光电电池输出的影响,即不 存在焦耳损失。

基于细致平衡理论的模型,波长为 $\lambda$ 的激光, 功率密度为 $P_{in}$ ,辐照到光电电池表面时,光电电池 产生的光生电流 $J_L(\lambda)$ 可表示为:

$$J_{L}(\lambda) = \begin{cases} \frac{q}{hc} \cdot \lambda \cdot P_{in} & \lambda \leq \lambda_{c} \\ 0 & \lambda > \lambda_{c} \end{cases}$$
(1)

其中,q是电子电荷;c是光在真空中的速度;h是普 朗克常数。从式中可以看出,当波长小于截止波长  $\lambda_c$ 时 $J_L$ 随 $\lambda$ 线性增加。因此,光电材料响应的最佳 波长 $\lambda_{opt}$ 是材料禁带宽度对应的波长:

$$\Lambda_{opt} = \frac{hc}{E_g} = \lambda_c \tag{2}$$

对于波长小于 $\lambda_c$ 的激光而言有:

$$J_{L}(\lambda) = J_{L}(\lambda_{c}) \frac{\lambda}{\lambda_{c}}$$
(3)

光电电池在宽光谱辐照下,获得的输出性能要 远低于在单色光下的性能。从式(3)可以看出相对 于截止波长 λ<sub>e</sub>,光谱中波长小于 λ<sub>e</sub> 的光对应的光生 电流要低很多。因此,激光为代表的单色光源可以使 光电电池获得更高输出性能。

光生电流  $J_L$  用光电电池的禁带宽度  $E_g$  可表示为:

$$J_L(E_g) = q \frac{P_{in}}{E_g} \tag{4}$$

光电电池的暗电流  $J_D$  可表示为:

$$J_D = q \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\theta} \sin\theta \cos\theta \int_{E_g}^{\infty} b(E,T) dE$$
 (5)

其中:

$$b(E,T) = \frac{2E^2}{h^3 c^2 (\exp \frac{E - q\phi}{kT} - 1)}$$
(6)

式中, $\theta$  是光子发射角; $q\phi$  是准费米能级差; E 是光 子蕴含的能量,假设  $q\phi = V$ ,由于  $kT \ll E_g$ , $J_D$  可表 示为:

$$J_{D} \approx \frac{2\pi q kT}{h^{3} c^{2}} \sin^{2} \theta \cdot E_{g}^{2} \exp(\frac{qV}{kT} - \frac{E_{g}}{kT})$$
(7)

那么输出电流 J 可表示为:

$$J = J_L - J_D = q \frac{P_{in}}{E_g} - \frac{2\pi q k T}{h^3 c^2} \sin^2 \theta \cdot E_g^2 \cdot$$

$$\exp\left(\frac{qV}{kT} - \frac{E_g}{kT}\right) \tag{8}$$

当外电路短路时获得的电流为短路电流,此时的外电路电压为0,那么短路电流 *I*<sub>sc</sub> 可表示为:

$$I_{sc} = q \frac{P_{in}}{E_g} - \frac{2\pi q k T}{h^3 c^2} \sin^2 \theta \cdot E_g^2 \exp(-\frac{E_g}{kT}) \quad (9)$$
  
当由流等于零时可得开路电压 V ·

当电流等于零时可得开路电压 V<sub>oc</sub>:

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{qP_{in}h^3c^2}{2\pi qkTE_g^3}\right) + \frac{E_g}{q}$$
(10)

输出功率 P 可表示为:

$$P = JV = qV \frac{P_{in}}{E_g} - V \frac{2\pi qkT}{h^3 c^2} \sin^2 \theta \cdot E_g^2 \cdot \exp\left(\frac{qV}{kT} - \frac{E_g}{kT}\right)$$
(11)  
$$\Leftrightarrow a = qP_{in}/E_g, b = 2\pi qkT/h^3 c^2 \sin^2 \theta E_g, \# \&$$
  
$$P = aV - bV \exp\left(\frac{qV}{kT} - \frac{E_g}{kT}\right)$$

$$P_{\max} = a \frac{kT}{q} \left\{ -1 + \text{Lambert} W \left[ \frac{a}{b} \exp\left(\frac{kT + E_g}{kT}\right) \right] \right\} - b \frac{kT}{q} \left\{ -1 + \text{Lambert} W \left[ \frac{a}{b} \exp\left(\frac{kT + E_g}{kT}\right) \right] \right\} \cdot \exp \left\{ -1 + \text{Lambert} W \left[ \frac{a}{b} \exp\left(\frac{kT + E_g}{kT}\right) \right] \right\}$$
(12)

那么极限能量转化效率  $\eta_{max}$  为:

$$\eta_{\max} = \frac{P_{\max}}{P_{in}} \tag{13}$$

对于给定的 $E_g$ 值,令 $\theta = \pi/2$ (光子发射角度无限制),V的值从0变化到 $E_g/q$ ,求解式(9),可得在该 $E_g$ (即 $\lambda$ )的 $\eta_{max}$ 。

## 3 激光波长对输出性能的影响

从以上理论分析可见,对于每个波长都存在 一个最佳禁带宽度  $E_g = hc/\lambda$ ,且该波长的激光是 可获得的。为分析激光波长对输出性能的影响, 设定激光功率密度为 10 W/m<sup>2</sup>,光电电池温度取 298 K。计算了在不同波长激光辐照下的光电电 池的输出参数。

图1 所示为开路电压  $V_{sc}$ 、短路电流  $I_{sc}$ 随激光波 长  $\lambda$  的变化。从图中可用看出随着波长的增大,开 路电压呈减小趋势,在波长小于 750 nm 时迅速减 小,随着波长的增加,减小趋势明显变缓。短路电流 随着波长的增加,呈线性增大趋势。对于常见的几 种光电材料,砷化镓(GaAs)和硅(Si)的禁带宽度  $E_g$ 分别为 1.41 eV 和 1.1 eV,对应的最佳波长分别为 881.13 nm 和 1129 nm,开路电压分别为 1.07 V 和 0.77 V,短路电流分别为 7.01 A/m<sup>2</sup> 和 9.02 A/m<sup>2</sup>。 铟镓砷(InGaAs)和锑化镓(GaSb)的禁带宽度  $E_g$  均 为 0.7 eV,最佳波长为 1774.8 nm,开路电压和短路 电流分别为 0.41 V 和 14.01 A/m<sup>2</sup>。

图 2 所示为光生电流  $J_L$  和暗电流  $J_D$  随波长  $\lambda$ 的变化。随着波长的增加,光生电流线性增加。这 是因为在基本物理模型中光生电流与禁带宽度成反 比、与波长成正比关系,如式(1)所示。暗电流的变 化明显分为两个阶段,在波长小于 2000 nm 时,几乎 不变;在波长大于 2000 nm 后迅速上升,总的来说, 暗电流的值很小,在 0~10<sup>-2</sup> A/m<sup>2</sup> 之间。

图 3 为极限能量转化效率  $\eta_{max}$  随激光波长  $\lambda$  的 变化。随着波长的增大  $\eta_{max}$  逐渐变小。砷化镓 (GaAs) 和硅(Si) 对应的最佳激光波长分别为 881.13 nm 和 1129 nm,极限能量转化效率分别为 74% 和 69%。铟镓砷和锑化镓的最佳激光波长为 1774.8 nm,极限能量转化效率为 59%。











#### 4 激光功率密度对输出性能的影响

激光波长设置为砷化镓(GaAs)的最佳波长  $\lambda = 881.13 \text{ nm}$ ,取光电电池温度为 298 K,计算在 不同激光功率密度  $P_{in}$  下的光电电池的输出性能 参数。光生电流  $J_L$  随激光功率密度的变化如图 4 所示,随着  $P_{in}$  增加  $J_L$  呈线性增大趋势、斜率为  $q/E_{go}$ 





开路电压和短路电流随激光功率密度的变化如 图 5 所示。从式(10)可以看出开路电压与激光功 率密度成对数关系,随着激光功率密度的增加,开路 电压增大,激光功率密度在 200 W/m<sup>2</sup> 以内增加迅 速,之后增加趋势变缓。从式(9)可以看出短路电 流随激光功率密度呈线性增加趋势,斜率为 q/E<sub>g</sub>, 由于暗电流数值很小,因此短路电流和光生电流近 似相等。





最大输出功率 $P_{max}$ 和极限能量转化效率 $\eta_{max}$ 随 激光功率密度 $P_{in}$ 的变化如图6所示。随着激光功率 密度的增加 $P_{max}$ 呈线性增大趋势。 $\eta_{max}$ 逐渐增大,在 激光功率密度较低时(小于200 W/m<sup>2</sup>)增加迅速, 之后趋势逐渐变缓并渐趋于饱和,接近74%。





#### 5 光电电池温度对输出性能影响

光电材料的禁带宽度随温度的增加呈减小趋势,因此最佳激光波长随温度的增加而增加,禁带宽度随温度有如下变化规律<sup>[20]</sup>:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}$$
(14)

其中, $E_g(0)$ 表示在温度0K时的禁带宽度, $\alpha$ , $\beta$ 表示系数。对于砷化镓材料而言 $E_g(0) = 1.519$  eV,  $\alpha = 5.405 \times 10^{-4}$  eV/K, $\beta = 204$  K。

计算了在激光功率密度为 10 W/m<sup>2</sup>、最佳激光 波长辐照条件下,光电电池温度对砷化镓材料输出 性能的影响,开路电压和短路电流随电池温度 T 的 变化如图 7 所示。可见,开路电压随温度呈线性减 小趋势,温度系数约为 – 1.32 × 10<sup>-3</sup> V/K。短路电 流随温度呈线性增大趋势,但增大幅度非常小,温度 系数约为 1.5769 × 10<sup>-6</sup> A · m<sup>2</sup>/K。这说明开路电 压对电池温度的变化敏感而短路电流相比之下并不 敏感。



如图 8 所示。 $J_L$  随 T 的增大而增加的趋势非常微弱,温度从 300 K 增大到 400 K 时, $J_L$  仅增加约 0.02‰。随着 T 的增加, $J_D$  在温度大于 360 K 后增大显著,而在温度低于 360 K 时增加比较缓慢。可见在本文的理论模型中,暗电流本身较小,因此其对输出的影响并不明显。





最大输出功率  $P_{max}$  和极限能量转化效率  $\eta_{max}$ 随温度 T 的变化如图 9 所示。 $P_{max}$  和  $\eta_{max}$ 随 T 的增 大均 呈线 性减 小 趋势, 两者的温度系数均为 -0.0138(W·m<sup>2</sup>/K 或%/K)。



图 9 最大输出功率和极限能量转化效率随电池温度的变化 Fig. 9 Maximum output power and limit energy conversion efficiency change with battery temperature

6 结 论

本文基于细致平衡理论,通过分析激光辐照条 件下光生电流,得到了光电材料的禁带宽度与最佳 激光波长的关系,以及电流、电压、最大输出功率和 极限能量转化效率的计算方式,计算了激光波长、激 光功率密度、电池温度对电池输出的影响。主要结 论有:

(1)极限能量转化效率随激光波长的增大而减小,而开路电压和短路电流分随激光的增大而分别减小和增大;

(2)随着激光功率密度的增加,各类输出性能 参数会逐渐增大,而极限能量转化效率则呈现出趋 于饱和的趋势;

(3)光电电池温度对短路电流的影响微弱,开 路电压、最大输出功率和极限能量转化效率均随温 度的升高而降低,并得到了相关温度系统。

此外,比较不同的光电材料的输出性能。所得 结论能为激光输能系统中的激光器波长、半导体材 料、激光功率密度、温度条件等参数的选择提供 参考。

#### 参考文献:

- [1] Monroe D K. Laser Power Beaming to Extend Lives of GSO NiCd Satellites [C]. SPIE, Laser Power Beaming Proceedings, 1994, 2121:256 - 263.
- [2] Schaefer C A, Gray D. Transmission media appropriate laser-microwave solar power satellite system [J]. Acta Astronautica, 2012, 79(10):140 - 156.
- [3] Rodenback C T, Chang K. A limitation on the small scale demonstration of retrodirective microwave power transmission from the solar power satellite [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2005, 47(4):67-71.
- [4] Grant B, Richard F, Patrick R. An advanced optical system for laser ablation propulsion in space[J]. Acta Astronautica, 2014, 96:97 – 105.
- [5] Tang Y, Li H, Wang Y, et al. Research of narrow pulse width, high repetition, high output power fiber lasers for deep space exploration [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8906;1-8.
- [6] Tuzcu M P, Cestino E, et al. Stability and control of a high altitude long endurance UAV [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2007, 30(3):713-721.
- [7] Howell J T, O' Neill M J, Fork R L. Advanced receiver/ converter experiments for laser wireless power transmission [C]. Granada: Solar Power from Space (SPS04) and 5th Wireless Power Transmission (WPT5) Conference, 2004:1-8.
- [8] Washington: National Aeronautics and Space Administration. Power beaming challenge [DB/OL]. http://www. nasa. Gov/offices/oct/early\_stage\_innovation/centennial\_ challenges/beaming\_tether/index. html, 2014.
- [9] Nugent T. Video of laser-powered quadrocopter endurance flight. Laser Motive [DB/OL]. http://lasermotive.com/ 2010/11/12/video of-laser powered quadrocopter endurance flight, 2014.
- [10] Kawashima N, Takeda K, Yabe K. Application of the laser energy transmission technology to drive a small airplane

[J]. Chinese Optics Letters, 2007, (5):109-110.

- [11] Kara J T, Mitlitsky F, Weisberg A. Preliminary demonstration of power beaming with non-coherent laser diode arrays[R]. Lawrence Livermore National Lab., 1996.
- [12] Steinsiek F, Weber K H, Foth W P, et al. Wireless power transmissions experiment using an airship as relay system and a moveable rover as ground target for later planetary exploration mission [C]. 8th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation, 2004: 1-8.
- [13] Pena R, Algora C. GaAs multiple photovoltaic converters with efficiency of 45% for monochromatic illumination
   [C]. 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Japan, 2003:228 – 231.
- [14] Jain R K. Calculated performance of indium phosphide solar cells under monochromatic illumination [J]. IEEE Transaction on electronic devices, 1993, 40 (10): 1893 - 1865.
- [15] Olsen L C, Glen D, Huber D A, et al. GaAs solar cells for laser power beaming[C]. 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Japan, 2003:761-764.

- [16] YANG Peng, YANG Yannan. Laser irradiation of monocrystalline silicon cell conversion efficiency study [J]. Laser technology 2012,36(5):696-699. (in Chinese) 杨鹏,杨雁南. 激光辐照单晶硅电池转换效率的研究[J]. 激光技术,2012,36(5):696-699.
- [17] Shockley W, Queisser H J. Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells [J]. Journal of Applied Physics, 1961, 32(3):510-519.
- [18] Arauijo G L, Marti A. Absolute limiting efficiencies for photovoltaic energy conversion[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 1994, 33:213 - 240.
- [19] Arauijo G L, Marti A. Limiting efficiencies for GaAs solar cells[J]. IEEE Transactions on Electronic Devices, 1990, 37(5):1402 1405.
- [20] ZHAO Fengyan, ZHANG Ji, WANG Chao. Continuous laser irradiation temperature field of semiconductor materials[J]. Journal of changchun university of science and technology, 2011, 21(12):73-76. (in Chinese)
  赵凤艳,张季,汪超.连续激光辐照半导体材料的温度场[J].长春理工大学学报, 2011, 21(12):73-76.