

文章编号 1004-924X(2016)增-0316-07

激光电池技术进展

朱启海^{1,2}, 赵长明^{1*}, 张逸辰³, 徐 鹏¹

(1. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081;

2. 西北核技术研究所, 西安 710024;

3. 中航工业北京航空制造工程研究所, 北京 100024)

摘要:介绍了空间、地面激光无线能量传输的研究现状,从激光电池材料和激光器选择、电池结构、表面电极分布、不均匀光照与照射位置对电池转换效率的影响,以及高斯光束对电池的影响和电池工作参数等方面,阐述了激光电池的研究进展。激光电池可利用较小的设备面积实现较大的电功率输出,在高效电能供给、快速充电及激光无线能量传输等领域有着重要的应用和广阔的前景。激光电池技术研究将为空间科学研究、遥感和环境监测等航空航天领域提供技术支持。

关键词:激光无线能量传输;激光电池;发展趋势

中图分类号:TN2 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20162413.0316

Development of laser cell technology

ZHU Qi-hai^{1,2}, ZHAO Chang-ming^{1*}, ZHANG Yi-chen³, XU Peng¹

(1. School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;

3. AVIC Beijing Aeronautical Manufacturing Technology
Research Institute, Beijing 100024, China)

* Corresponding author, E-mail: zhaochangming@bit.edu.cn

Abstract: The development of space and ground laser wireless energy transmission was overviewed from different aspects, including the selection of laser cell materials and laser devices, the cell structure, the surface electrode distribution, the impact of the uneven illumination and illumination position on the conversion efficiency of cells, the impact of Gaussian beam on cells and working parameters of cells etc. Laser cells can realize a large power output by using a small equipment area, which have important applications and a promising further in the fields of high-efficiency electric power supply, quick charge, laser wireless energy transmission and so on. In addition, the review of the laser cell can provide technique support technology in the aerospace fields involving spatial sciences, remote sensing and environment monitoring etc.

Key words: laser wireless power transmission; laser cell; development trend

收稿日期:2016-05-28;修订日期:2016-06-12.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61378020)

1 引言

激光无线能量传输是指通过激光实现非接触式的电力传输,根据传输空间通常分为空间激光无线能量传输和地面激光无线能量传输。该技术不用能源输送线也能为特定工作环境下的目标设备提供能源支持,其优势在于光源与负载间的电隔离,抗电磁脉冲和电磁干扰及避免射频效应^[1]。系统由激光组件、光学元件及接收系统等组成,主要包括激光耦合模块、激光发射模块及激光接收模块,最终将激光转化为电能。传输系统末端实现光能到电能的转化是其关键技术之一。该关键技术通常采用激光光伏电池(以下称为激光电池),其光电转换效率是重要指标。国内外众多机构对光伏电池效率的提高进行了大量研究。然而,这些研究通常基于均匀激光入射,电池相关参量通常要进行一维处理,较少研究以高斯分布的激光为光源的光伏电池系统的光电转换效率。本文研究了空间、地面激光无线能量传输的现状,分析了影响高斯分布激光电池光电转换效率的参数,回顾了激光电池的研究进展

2 空间激光无线能量传输

1968年,美国 Peter E. Glaser 博士最早提出空间太阳能电站的构思^[2]。在地球同步轨道或近地轨道上建立空间太阳能电站,收集空间无损且稳定的高强度太阳辐射,将它转换为微波或者激光的形式传输到地面;然后在地面建立对应的能量接收系统,将接收的微波或激光能量转换为电能或其它形式的能量进行存储及后续利用。该构思得到多国科学家的积极响应,各国纷纷展开空间太阳能电站(见图 1)及地面激光电池接收站的研究。

2004年,在欧洲光可持续发展战略计划中,理论研究了在地球同步轨道上的太阳能卫星(SPS)携带 110.7 km² 光伏电池组件及同样大小的会聚器件,可收集 275 GW 的太阳光直射能量,产生 53 GW 的能量。通过激光光束将能量传输到面积为 68.9 km² 的地面接收系统,最终输出 7.9 GW 的电功率^[3]。

2004年,日本空间机构 JAXA^[4] 提出了新的



图 1 空间太阳能电站构思图

Fig. 1 Design of space solar power plant

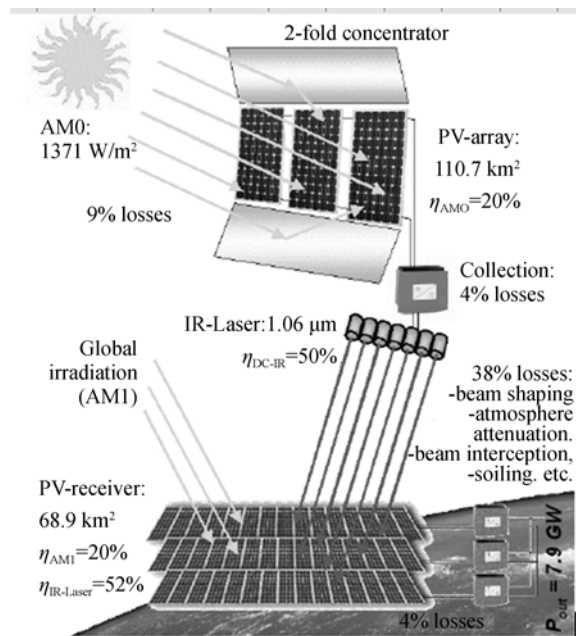


图 2 欧洲光可持续发展战略激光无线能量传输方案

Fig. 2 Laser wireless energy transmission scheme in European sustainable development strategy

激光系统,利用地球同步轨道上的太阳光直接泵浦 Nd:YAG 晶体产生激光,每个单元可产生 10 MW 的激光能量,10 个单元共产生激光能量 1 GW;通过空-地激光无线能量传输,在海上设置激光电池实现光电转换,转换效率理论可达 70%。该电能用于分解海水产生 H₂。

2009年,美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory)开展空-地太阳能传输项目。在地球低空轨道上设置直径为 70 m 可充气结构的太阳能反射镜,该系统每 90 min 绕地球一圈,地球上设置多个接收

站,每个接收站都能相继接收将近 9 min 的兆瓦级能量。假定设置 10 个接收站,则只需要单个空间太阳能系统即可充分利用能量^[5]。

3 地面激光无线能量传输

日本 kinki 大学在 2006 年利用激光能量传输给机器人供能,同时做了风筝、直升机激光供能实验。风筝实验中,激光器系统为两个光纤输出半导体激光器,光纤芯径为 400 μm ,数值孔径 $\text{NA}=0.22$,耦合产生 200 W 激光,波长为 808 nm。风筝下面装配有直径为 30 cm 的太阳能电池板,包括 30 块 GaAs 太阳能电池(4 cm \times 7 cm)。太阳能电池在 200 W 激光照射时产生 42 W 的电。在太阳能电池板中心装有角反射器,用来反射一部分激光光束起到追踪风筝的作用^[6]。

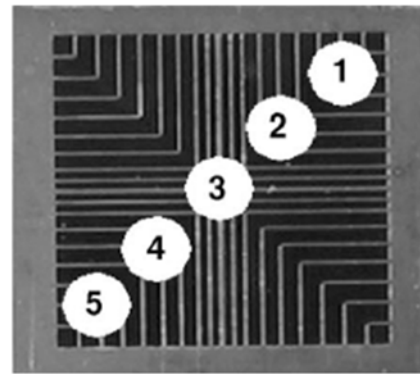
2010 年,NASA 利用望远镜系统传输 8 kW 激光,驱动粘附有硅基光伏电池的太空电梯。激光波长为 1 030 nm,单个硅基光伏电池的转换效率为 35%^[7]。

2013 年,北京理工大学设计了 10 m 激光能量传输系统,分别以 793 nm 和 808 nm 光纤耦合半导体激光器作为发射端,激光最大输出功率为 2.2 W,采用 GaAs 光伏电池实现光电转换,转换效率为 48.0%^[8]。2014 年,他们实现了高功率激光入射下,GaAs 光伏电池 40.4% 的高效激光光电转换,电池温度为 25 $^{\circ}\text{C}$,入射功率为 24 W^[9]。

4 激光电池研究进展

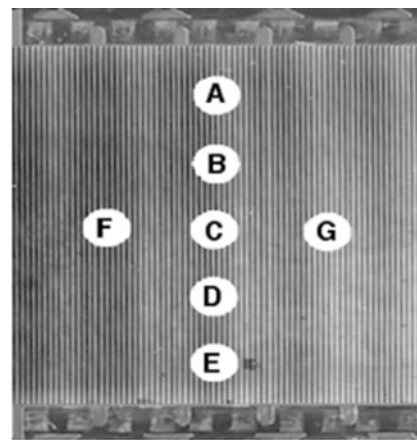
2006 年,Eugene A^[10] 等人对激光电池进行了表面局部照射实验,实验表明,表面电极的分布方式是影响激光电池工作性能的重要因素。电极的不合理设计(如电极间隔过宽)对于电极不规则分布的激光电池有致命危害。电极均匀分布的激光电池,其固有损耗具有空间均匀性,前表面的电极接触对串联电阻的影响亦可忽略不计。而电极分布不规则的激光电池具有空间分布的串联电阻,对激光功率的承受阈值明显下降,且电池边缘的光电性能远不如电池中心的性能。

2009 年,J. Schubert 等人对单块串联激光电池与多结激光电池进行了实验比较^[11]。两种激



(a)表面电极非均匀分布

(a)Non uniform distribution of surface electrodes



(b)表面电极均匀分布

(b)Uniform distribution of surface electrodes

图 3 激光电池局部照射实验

Fig. 3 Laser cell local irradiation experiment

光电池均可实现电池输出电压的提高。但单块串联激光电池中,串联的激光电池单片间存在绝缘沟槽,从而减小了激光电池的光敏面面积,造成激光入射的光损耗,同时不对准损耗将进一步降低激光电池的光电转换效率;而对于多结激光电池而言,由于各结沿激光入射方向的纵向分布,各结接受的激光能量并不相同,造成各结间的输出电流不同,影响电池性能。

2013 年,四川大学杨伟等人分别采用红、绿、蓝紫 3 种波长的半导体激光器作为光源,照射多晶 Si 激光电池进行光电转换^[12]。他们将 3 种波长激光混合,同时照射在多晶 Si 光伏电池上,光斑完全重合,光电转换效率为 4.65%。

2014 年,南京航空航天大学乔良等人研究了单结 GaAs 激光电池的光谱响应,分别用 532, 671, 808 和 980 nm 的激光照射激光电池,得到激

光电池转换效率随激光波长、激光功率的变化曲线,得到 GaAs 激光电池对 808 nm 激光有较高的响应^[13]。

2015 年,军械工程学院赵春雨等人对单晶 Si 激光电池进行了温度性能测试,在 940 nm 激光照射下,对激光电池的短路电流、开路电压和光-电转换效率进行测量,得到了激光电池特性参数随激光功率与电池工作温度的关系曲线^[14]。

4.1 激光电池材料

激光电池针对单一波长,其材料选择只需考虑对特定波长的光电转换效率。III-V 族直接带隙半导体对高功率激光有较好的光电特性,并且在较宽的温度范围内有较高的稳定性。GaAs 室温下的禁带宽度 E_g 为 1.428 eV,相对于其他 III-V 化合物和 Si 电池有高的转换效率和输出电压,能够匹配很多高功率激光光源,是用作激光电池的理想选择^[15]。

4.2 激光器选择

为匹配激光电池,激光器的选择必不可少。目前,常用的激光器有固体激光器、半导体激光器和光纤耦合半导体激光器等。

LD 泵浦固体激光器是全固化器件,稳定性高,比灯泵固体激光器高一个数量级,寿命长达 1 Mh,其光束质量基本接近光束质量极限^[16]。

半导体激光器具有电光转换效率高、寿命长、体积小、功率密度高等优点,所以在航空航天领域有重要应用。但它具有固有的缺陷,出射光束质量差,在垂直于 pn 结的方向(快轴)上存在很大的发散角,而且在垂直和平行 pn 结(慢轴)的两个方向上的光束尺寸极不对称,对环境温度变化敏感,对驱动电源要求高等^[17]。

光纤耦合半导体激光器通过微光学系统对激光光束进行准直、整形、变换,耦合进光纤,输出具有圆对称特性的激光光斑。光纤柔软易弯曲,能够实现柔性传输,激光可以方便地进入狭小空间。增加使用的灵活性。而且光纤耦合可以从根本上改善半导体激光器输出的光束质量^[11]。多模光纤的出射光束功率分布趋于均匀,基模光纤的出射光束接近于基模高斯光,可用来模拟基模激光光斑。2009 年,IPG 成功研制出 1 070 nm, 10 kW 的单模光纤激光器。

4.3 电池结构

激光电池主要由 p-n 结构成。在激光照射

下,由于光生伏特效应,激光电池吸收激光光子产生光生电子-空穴对,电子和空穴在 p-n 结内建电场的作用下向相反的方向扩散,在电池两端建立光生电动势;在有外接负载的情况下,生成流经负载的光电流,为外电路提供电能。

与太阳光不同,激光能量密度高,在大功率密度激光入射下,激光电池内部自由载流子密度过高,有限的电极分布不足以及及时将载流子导出,引起较高的串联电阻。为减小串联电阻,通常采用改变内部结构和改变外部结构两种方法。

4.3.1 改变内部结构

对于单结 GaAs 激光电池,增加发射层的厚度可以减小电池串联电阻^[18]。在激光电池窗口层上方添加重掺杂的对激光透明的侧面传导层^[19],可提高电池在大功率密度激光照射下的光电转换效率,这是由于侧面传导层改善了发射层传导率低的问题,有效保证了发射层的低厚度,从而减小了激光电池的串联电阻。E. Oliva^[20]等实现了带有侧面传导层的 GaAs 激光电池在 36.5 W/cm², 810 nm 的近红外激光照射下 54.9% 的高效光电转换。

4.3.2 改变外部结构

为减小激光电池内部的电流密度,采用多块串联^[21]的方式,使得照射在每一块激光电池上的光功率为总激光功率的 $1/n$, (n 为串联电池的数目),激光电池的光生电流也相应地减少为相等面积单块电池的 $1/n$ 。该方式不仅会降低因高功率密度激光照射引起的电池串联电阻,而且可提高电池的输出电压,直接驱动所加负载,代替了提高单块激光电池输出电压的直流电压放大电路;尤其是圆形多块串联激光电池,可与从光纤出射的光斑进行良好的匹配,并具有良好的热管理。但该方法必须通过绝缘沟槽^[22]来保证电池各部分间的分立性,从而造成激光电池有效吸收面积的减小;要求各分离部分具有统一的性能,来保证电池的高效性运转;引入了更多的接触和金属电阻;此外,该方法还存在激光光斑与电池的位置失配^[19]问题,这些会造成激光电池光电转换效率的降低。

2012 年,中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所研究了光纤传能系统,制成六瓣圆形激光电池,在 830 nm 可调功率光纤激光器下测试,得到入射功率为 700 mW 下开路电压达 6.7 V、

最高效率达 39.3%，200~850 mW 的平均效率为 38%^[10]。

4.4 表面电极分布

表面电极分布是影响激光电池工作性能的重要因素。实验表明,电极的不合理设计会(如电极间隔过宽)严重地危害电极不规则分布的激光电池的性能。电极分布均匀的激光电池,其固有损耗具有空间均匀性,且其前表面的电极接触对串联电阻的影响亦可忽略不计。然而,电极不规则分布的激光电池,因电池的不均匀金属化而具有空间分布的串联电阻。Eugene A^[23]等人进行的激光电池表面局部照射实验表明,与电极均匀分布的激光电池相比,非均匀电极分布的激光电池对激光功率的承受阈值有明显的下降,且电池边缘的性能相比电池中心有显著的降低。

4.5 不均匀光照与照射位置对电池转换效率的影响

激光电池的输出参量与激光光斑的尺寸和照射位置等因素密不可分。对单片电池而言,局部照射会引起串联电阻的不均匀分布、 P_m 阈值的降低及激光电池光电转换效率的下降。

激光电池在与圆对称激光光束匹配上,存在光溢出和失配损耗。当激光光斑尺寸大于电池尺寸时,存在光溢出;当激光光斑小于电池尺寸时,光斑与电池存在的对准误差会造成电池的不均匀光照损耗及失配损耗,限制电池的工作性能。不均匀光照损耗及失配损耗对于多片串联激光电池的影响尤其显著,电池输出电流受制于接收激光功率最少的子块,不均匀的光照会引起串联电阻微弱的升高,未照射到电池表面的激光造成了光功率的损耗。权衡利弊后,Rafael Peña 等^[24]建议:对于单片激光电池,激光光斑略小于电池尺寸;而对于多片串联的激光电池,则光斑略大于电池尺寸,以减小不均匀光照损耗及失配损耗。他们还理论计算了 $n=1,2,3,6$ 时,多片串联激光电池的转换效率。其中,最高效率为 60.2%(在 20 W/cm², $n=1$ 时); $n=2,3,6$ 时,转换效率分别为 58.9%、58.5%、57.5%(在 10~20 W/cm² 时);当光斑与电池有 5%的失配时, $n=2,3,6$ 对应的转换效率分别为 55.0%、53.6%、50.1%。

4.6 高斯光束对电池的影响

对于高斯光束照射的激光电池而言,较低的串联电阻对于减小高斯不均匀分布对电池的影响

尤为关键。Alan L. Fahrenbruch^[25]等通过实验测量,证明对于普通激光电池,相对于同波长同功率的均匀入射光,高斯光束入射激光的光电转换效率将降低 10%以上。通过增加激光电池发射层厚度,减小电池的串联电阻和提高电池电流密度,最终抵御高斯光束的不均匀性对电池转换效率的影响^[16]。

4.7 电池工作参数

实际的激光电池存在阻性接触、边缘电流泄露等问题,直接影响激光电池的光电转换效率^[26]。尤其在高功率密度激光照射下,热效应将导致电池串联电阻的增加^[27]。因此,实际激光电池的串并联电阻是衡量激光电池性能的重要参数,以串联电阻尤甚。计算激光电池的串并联电阻和降低串联电阻阻值是激光电池领域的重要研究课题。

M. Chegaar^[28]等提出基于测量 I-V 数据和设备电导的激光电池参数计算方法。Dezso Serrá^[29]等基于激光电池制造商提供的数据表,结合激光电池单二极管五参数模型,提取了包括串联电阻和并联电阻在内的激光电池全参数,给出了参数计算流程图,为衡量激光电池的质量性能提供了有力的数学依据。

LarsDrud Nielsen^[30]给出太阳能电池在有、无光照的条件下,其分布串联电阻的计算方法。对于聚光太阳能电池,在 1~2 000 suns 的聚光条件下,3D 模型对实际太阳能电池可达到良好的模拟效果^[31]。

5 结 论

目前,降低串联电阻的方法仅对高斯光照下电池性能的恶化进行补偿,并没有直接针对高斯光斑的功率分布特性,提出匹配高斯分布的电池参数分布。激光电池照射光源通常采用光纤耦合激光器。基于多模光纤出射的激光具有较均匀的功率分布,而对于高斯分布的基模激光光束照射的激光电池,还有待于进一步的研究。

激光无线能量传输可为小型飞机、小型车辆、模块航天器等特定工作目标,提供持续高效的电能补给,并为难以架设电力输送线的偏远地区或受灾地区进行能源供给及物资输送,这些都具有重要意义。尤其是基于激光无线能量传输的空间

太阳能电站,可将能源从太空源源不断地输送到地球,这一设想具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] SCHUBERT J, OLIVA E, DIMROTH F, *et al.*. High-voltage GaAs photovoltaic laser power converters[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2009,2(56): 170-175.
- [2] 李国欣,徐传继. 国际空间太阳能电站的发展现状[J]. 电源技术, 1998,22(3): 128-132.
LI G X, XU CH J. On the development status of space power system in the world[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 1998, 22(3): 128-132. (in Chinese)
- [3] HENDRIKS C, GEURDER N, VIEBAHN P, *et al.*. Solar power from space: European strategy in the light of sustainable development[R]. ECO-FYS. 2004,11.
- [4] MORI M, KAGAWA H, NAGAYAMA H, *et al.*. Current status of study on hydrogen production with space solar power systems(SSPS)[J]. *ESASP*. 2004,567:3.
- [5] RUBENCHIK A M, PARKER J M, BEACH R J, *et al.*. Solar power beaming: from space to earth[J]. *Lawrence Livermore National Laboratory*, 2009,4: 2-10.
- [6] KAWASHIMA N, TAKEDA K. *Laser Energy Transmission for a Wireless Energy Supply to Robots*[M]. Robotics and Automation in construction. Carlos Balaguer, Mohamed Abderrahim, ed. Intech, 2008.
- [7] BECKER D E, CHIANG R, KEYS C C, *et al.*. Photovoltaic-concentrator based power beaming for space elevator application[C]. *AIP Conference Proceedings*, 2010, 1230: 271-281.
- [8] 何滔,杨苏辉,张海洋,等. 高效激光无线能量传输及转换实验[J]. 中国激光, 2013,40(3):252-257.
HE T, YANG S H, ZHANG H Y, *et al.*. Experiment of space laser energy transmission and conversion with high efficiency[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013,40(3):252-257. (in Chinese)
- [9] HE T, YANG S H. High-power high-efficiency laser power transmission at 100 m using optimized multi-Cell GaAs converter [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2014, 31(10): 104203.
- [10] KATZ E A, GORDON J M, TASSEW W, *et al.*. Photovoltaic characterization of concentrator solar cells by localized irradiation[J]. *J. Appl. Phys.* 2006, 100(4), 044514.
- [11] SCHUBERT J, OLIVEA E, DIMROTH F, *et al.*. High-voltage GaAs photovoltaic laser power converters[J]. *IEEE*, 2009,56(2):170-175.
- [12] 杨伟,刘长军,吴昕,等. 低功率激光无线能量传输的初步研究[J]. 现代物理, 2013(3): 49-53.
YANG W, LIU CH J, WU X, *et al.*. Preliminary research on low-power laser wireless energy transmission[J]. *Modern Physics*, 2013(3): 49-53. (in Chinese)
- [13] 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): 591-594.
QIAO L, YANG Y N. Experimental research of laser wireless power transmission[J]. *Laser Technology*, 2014,38(5): 591-594. (in Chinese)
- [14] 刘晓光,华文深,刘恂. 激光辐照单晶硅光伏电池输出特性的实验研究[J]. 中国激光, 2015,42(8): 74-79.
LIU X G, HUA W SH, LIU X. Experimental investigations of laser intensity and temperature dependence of single crystal silicon photovoltaic cell parameters[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(8):74-79. (in Chinese)
- [15] 赵春雨,董建荣,赵勇明,等. 高性能 GaAs 激光光伏电池的研制[C]. 第十三届全国固体薄膜学术会议,山东烟台,2012, 8: 154-157.
ZHAO CH Y, DONG J R, ZHAO Y M, *et al.*. Design and fabrication of high performance GaAs photovoltaic power converter[C]. *NCTSF Yantai*, 2012, 8: 154-157. (in Chinese)
- [16] 谢国强. 激光二极管泵浦的固体激光器研究[D]. 上海: 复旦大学, 2007: 1-6.
XIE G Q. *Laser Diode Pumped Solid State Laser* [D]. Shanghai: Fudan University, 2007: 1-6. (in Chinese)
- [17] 张春阳,王玲. 半导体激光器光纤耦合技术进展[J]. 红外与激光工程, 2010,39(增刊): 64-67.
ZHANG CH Y, WANG L. Development of semiconductor lasers fiber coupling technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010,39(Suppl.): 64-67. (in Chinese)
- [18] ANDREEV V, KHVOSTIKOV V, KALI-

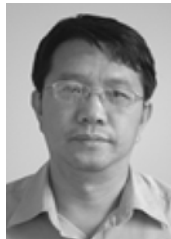
- NOVSKY V, *et al.*. High current density GaAs and GaSb photovoltaic cells for laser power beaming[C]. *Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Osaka, Japan, 2003: 761-763.
- [19] VAN RIESEN S, SCHUBERT U, BETT A W. GaAs photovoltaic cells for laser power beaming at high power densities[C]. *Proceedings of the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Munich, Germany, 2001: 182-185.
- [20] OLIVA E, DIMROTH F, BETT A W. GaAs converters for high power densities of laser illumination[J]. *Prog. Photovolt. Res.*, 2008, 16(4): 289-295.
- [21] PEIN R, ALGORA C, ANTON L. GaAs multiple photovoltaic converters with an efficiency of 45% for monochromatic illumination [C]. *3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Osoh, Japan, 2003:228-231.
- [22] YASUI T, OHWAKI J, MINO M. A stable 2-W supply optical-powering system[J]. *IEEE*, 2000: 0-7803-5772-8.
- [23] KATZ E A, GORDON J M, TASSEW W, *et al.*. Photovoltaic characterization of concentrator solar cells by localized irradiation[J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, 100(4): 044514.
- [24] RENA R, ALGORA C. Evaluation of mismatch and non-uniform illumination losses in monolithically series-connected gaAs photovoltaic converters [J]. *Prog. Photovolt., Res.*, 2002, 11(2):139-150.
- [25] FAHRENBRUCH A L, LOPEZ-OTERO A. GaAs-and InAlGaAs-based concentrator-type cells for conversion of power transmitted by optical fibers [C]. *Proceedings of the 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Washington, D. C., USA, 1996: 117-120.
- [26] NELSOW J. *The Physics of Solar Cells* [M]. London: Imperial College Press, 2003:13-16.
- [27] GERARD J B, PETER M, ERIK J H, *et al.*. In-GaP/GaAs inverted dual junction solar cells for CPV applications using metal-backed epitaxial lift-off [C]. *In Proceedings of 6th International AIP Conference on Concentrating Photovoltaic Systems: CPV-6*, Freiburg, Germany, 2010: 16-19.
- [28] CHEGAAR M, OUENNOUGHI Z, HOFFMANN A. A new method for evaluating illuminated solar cell parameters[J]. *Solid-state Electronics*, 2001, 45(2): 293-296.
- [29] SERA D, TEODORESCU R, RODRIGUEZ P. PV panel model based on datasheet values [J]. *IEEE*, 2007: 2392-2396.
- [30] NIELSEN L D. Distributed series resistance effects in solar cells[J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1982, ED-29(5): 821-827.
- [31] GALIANA B, ALGORA C, REY-SOLLE I, *et al.*. A 3-D model for concentrator solar cells based on distributed circuit units [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2005, 52(12): 2552-2557.

作者简介:



朱启海(1976—),男,湖北恩施人,博士研究生,高级工程师,1998年于浙江大学获得学士学位,2006年于北京理工大学获得硕士学位,主要从事光电系统研究、光电跟踪测量、光电信息获取与处理等工作。E-mail: sxgwqs@bit.edu.cn

导师简介:



赵长明(1960—),男,天津人,教授,博士生导师,1983年于中国科技大学获得学士学位,1993年于天津大学获得博士学位,主要从事新型激光器件与技术、光电子信息技术与系统方面的研究工作。E-mail: zhaochangming@bit.edu.cn