

基于 InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As 材料体系的 1 550 nm 激光能量转换器

张宗坤^{1,2}, 孙艳¹, 郝加明^{1,3*}, 戴宁^{1*}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 红外物理国家重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 复旦大学光电研究院 光伏科学与技术全国重点实验室, 上海 200433)

摘要: 本文报道了基于 InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As 材料体系的 1 550 nm 波长激光能量转换器。通过优化吸收层厚度及采用双层减反射结构(SiO₂和SiN), 器件光吸收率高达 96%, 并具有良好的角度变化不敏感性和波长变化鲁棒性。实验结果与理论结果相一致, 器件外量子效率(External Quantum Efficiency, EQE)达 92%。在 47 mW/cm² 的激光功率密度下, 电池的光电转换效率达到了 23%, 理论分析揭示该实验结果之所以低于理论预测值, 主要原因是样品器件具有较高的串联电阻和较低的并联电阻, 为提高激光光伏电池效率, 还需进一步优化器件工艺, 以降低器件相关电阻阻值。此外, 本文还深入探讨了器件区面积对器件光伏性能的影响, 为激光光伏电池的微型化提供了优化方向。

关键词: 激光光伏电池; InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As; 双层减反射结构; 无线能量传输

中图分类号: TN304

文献标识码: A

1 550 nm InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As laser power converters

ZHANG Zong-Kun^{1,2}, SUN Yan¹, HAO Jia-Ming^{1,3*}, DAI Ning^{1*}

(1. State Key Laboratory of Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. National Key Laboratory of Photovoltaic Science and Technology, Institute of Optoelectronics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: We present the design, simulation, and experimental validation of an InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As laser power converter for the wavelength of 1 550 nm. By optimizing the thickness of the absorption layer and adopting a dual-layer anti-reflective structure (SiO₂ and SiN), the device achieved an absorbance of 96% under 1 550 nm laser irradiation, demonstrating insensitivity to angle variation and robust to wavelength shifts. The experimental results are in good agreement with the theoretical calculation results. The external quantum efficiency (EQE) reaches 92%. Under a laser power density of 47 mW/cm², the cell's conversion efficiency reached 23%. Further refinement of device processing is needed to reduce series and shunt resistances, thereby enhancing the overall efficiency of the laser photovoltaic cell. In addition, this study delves into the impact of cell area on the photovoltaic performance, providing optimization directions for the miniaturization of laser photovoltaic cells.

Key words: laser power converters, InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As, anti-reflective structure, wireless energy transmission

引言

激光能量传输系统是一种新兴的能量传递技术, 主要由激光源、传输介质和激光能量转换器三

部分组成^[1]。该系统利用激光进行能量传递, 替代传统的电力传输模式, 与通过金属导线的常规方式相比, 具有电气隔离、抗电磁干扰、降低火灾和爆炸

收稿日期: 2024-11-03, 修回日期: 2024-12-18

Received date: 2024-11-03, Revised date: 2024-12-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFA1404701, 2017YFA0205800), 国家自然科学基金项目(62075231), 上海市科委项目(20JC1414603)

Foundation items: Supported by the National Key R&D Program of China (2022YFA1404701, 2017YFA0205800), National Natural Science Foundation of China (62075231), Shanghai Science and Technology Committee (20JC1414603)

作者简介(Biography): 张宗坤(1992—), 男, 河南信阳人, 博士, 主要研究方向为红外激光光伏电池的设计与制备. Email: 1527770931@qq.com

*通讯作者(Corresponding authors): E-mail: jmhao@fudan.edu.cn; ndai@mail.sitp.ac.cn

风险等优势^[2]。因此,在学术界和工业界引起了广泛关注。激光能量传输系统在无线能量传输和光纤能量传输等领域应用广泛,特别是在无人驾驶飞行器、传感器及监控设备的供能中显示出巨大的应用潜力^[3-9]。

激光能量传输系统的传输效率主要受传输介质的损耗和激光能量转换器(通常也被称为激光光伏电池)光电转换效率的影响。激光光伏电池的工作原理要求激光波长的光子能量应略高于其吸收层材料的禁带宽度,以确保材料具有足够的吸收系数并减少量子损耗^[10, 11]。在该条件下,吸收区材料的禁带宽度决定了光伏电池的开路电压上限。通常,工作波长较短的激光光伏电池因禁带宽度较大,具有较低的短路电流、较高的开路电压和填充因子,从而实现更高的转换效率。常用的激光能量传输波段有~808 nm、~980 nm、~1310 nm和~1 550 nm。Henning Helmer等人基于GaAs材料制备的激光光伏电池在858 nm波长及11.4 W/cm²功率密度的激光照射下,实现了68.9%的转换效率,这是迄今为止已知的最高转换效率^[12]。目前,得益于成熟的激光源技术及基于GaAs材料的成熟器件工艺^[13-15],~808 nm波长区间的激光光伏电池得到了广泛应用。对于长距离传输,~1 310 nm和~1 550 nm波长区间因其在光纤中具有较低的传输损耗,尤其适用于长距离激光供能^[10, 16, 17]。其中,~1 550 nm波长最为关键,因其在光纤传输中的损耗最小(每公里衰减约5%),同时还可兼顾数据通信应用^[1, 18]。同时,在商用无线能量传输领域,传输介质通常为空气,为确保人员及其他生物安全,激光波长需大于1.4 μm同时功率密度不得超过100 mW/cm²。在满足此条件下,大气传输存在窗口,1 550 nm区间为激光传输时损耗最小的工作波长之一^[10]。因此,设计研发光通信1 550 nm波长区间激光光伏电池至关重要。

激光光伏电池包括单结和多结两种,单结电池工艺相对简单,且对光源的不均匀性和温度的敏感性较低,能够在特定波长下实现高效的能量转化,一直是激光光伏领域的重要研究方向^[10]。然而,单结电池的输出电压较低,通常需要结合转换电路来满足更高功率的需求。由于工作电流较大,随着激光功率的增加,器件的转换效率会迅速饱和,从而限制了其性能的进一步提升。与单结电池相比,多结电池具有更高的输出能力。多结电池包括平面串联型和叠层外延型两种结构。平面串联电池工

艺复杂且沟道会占据一部分的有源区面积,其电流匹配度对光照的不均匀性较为敏感,因此效率通常不高^[18]。尽管如此,与单结电池相比,平面串联电池工作电流较低,能够在较高激光功率下工作,输出电压和输出功率也更高。叠层外延技术则通过使用隧穿结代替导线进行子电池串联,从而克服了平面串联电池的局限性。An-cheng Wang等人基于In_{0.53}Ga_{0.47}As材料制备了工作波长为1 520 nm的叠层电池,并系统研究了温度对多结电池电流匹配度的影响^[16, 19]。叠层电池具备平面串联电池的优点且对光照的不均匀性敏感度较低,能够提供更高的转换效率,但由于子电池吸收区厚度分布跨度大,电流匹配难度较高,受温度的影响也更为明显。

单结电池以其成本可控、结构简单及可塑性高的特点,依然在激光光伏领域占据重要地位,特别是在小型化、便携化设备中的应用尤为广泛。针对单结电池的优化研究不仅具有学术价值,也对相关应用领域的技术进步至关重要。本研究基于InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As材料体系,设计并制备了工作波长为1 550 nm的激光光伏电池。通过仿真优化器件的结构和性能,制备了不同尺寸的光伏器件,并探讨了其光电特性,为器件结构和参数优化提供了设计依据。此外,本研究还深入探讨了器件区面积对器件光伏性能的影响,为激光光伏电池的微型化提供了优化方向。

1 电池效率测试方法

激光光伏电池的电学性能测试需要对器件进行封装,将器件的电极引出。引线使用超声点焊机(Westbond),将器件电极通过Si/Al丝连接到PCB板的金电极上。PCB板通过焊锡与针脚相连,之后接入测试电路。封装前后的器件如图1(a)所示,激光光伏电池的测试系统如图1(b)所示。器件测试系统基于位移平台,激光器和光伏电池的相对位置可通过位移平台调节。光源为1 550 nm激光器,出光口激光光斑直径为60 μm,经准直器调节后激光光斑直径为3 mm,近平行光。遮光板有匹配器件尺寸的正方形孔洞,用来调节照射在光伏电池上的激光光斑大小,有0.2×0.2 mm²、0.5×0.5 mm²、1×1 mm²、2×2 mm²四种规格。4×4 mm²规格的光伏电池器件区面积大于激光准直后的光斑面积,测试时不需要加遮光板,也是与仿真结果对照所用的标准器件。各种光斑尺寸的激光功率通过1 550 nm的功率计(Thorlabs)标定,标定时保证功率计的探测器部分与

光伏电池在同一位置。封装后的光伏电池通过同轴电缆(Thorlabs)连接到源表,通过源表给器件加电压并测量电流,即可获得器件的电流电压关系(I - V)。

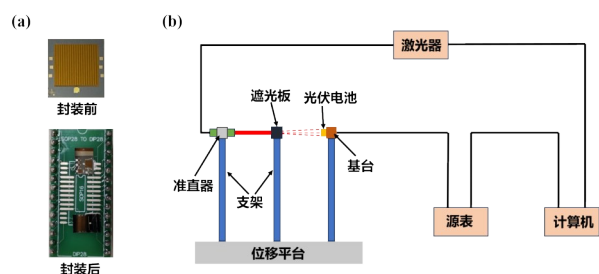


图1 器件封装与测试:(a)封装前后的器件;(b)激光光伏电池的测试系统示意图

Fig. 1 Device packaging and testing: (a) the cells before and after packaging; (b) schematic diagram of the testing system for laser photovoltaic cell

光伏电池的开路电压、短路电流、填充因子均可通过 I - V 曲线提取,光电转换效率的计算公式为:

$$E_{\text{ff}} = \frac{V_{\text{oc}} \times I_{\text{sc}} \times FF}{P_{\text{in}}} \quad (1)$$

其中 E_{ff} 为器件的光电转换效率; V_{oc} 为开路电压,是电流为 0 时负载上的电压值; I_{sc} 为短路电流,是外加偏压为 0 时的电流值; FF 为填充因子,是电流电压之积的最大值(电池的输出功率)与 $V_{\text{oc}} \times I_{\text{sc}}$ 的比值; P_{in} 为入射激光的功率。光电转换效率计算时使用的是器件的电流和激光的功率,不涉及电极面积,电流密度和激光功率密度是根据器件区面积统一换算的。

2 实验结果与分析

图 2(a) 展示了激光光伏电池的结构示意图(左上角为样品器件的实物图)。该器件主要由四个部分组成,从上到下依次为:前场区(Front Surface

Field (FSF), 重掺杂 N 型 InP , 100 nm)、发射区(Emitter, 重掺杂 N 型 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, 50 nm)、基区(Base, 轻掺杂 P 型 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$) 和后场区(Back Surface Field (BSF), 重掺杂 P 型 InP , 100 nm)。如图 2(b) 所示,截面图中详细列出了各层的掺杂参数和厚度参数。器件的衬底采用(100)晶向的本征 InP , 各层的 InP 和 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 外延层均通过 MOCVD 法生长。发射区和基区构成了器件的 PN 结区域,这是器件光电转换的核心,在光学仿真计算中将这两部分合并为吸收区,厚度标记为 t_{InGaAs} 。前场区的主要作用是阻挡空穴向前表面扩散,同时起到发射区表面钝化的作用。此外,1.34 eV 禁带宽度的 InP 材料可有效防止前场区对入射光的寄生吸收。前场区之上是与栅状前电极形状相同的电极接触层,其 300 nm 厚度能够有效阻挡金属电极在退火过程中向吸收区的渗透。背场区的面积大于吸收区面积,除了钝化和阻挡电子向背面扩散外,还作为共面背电极的电极接触层。为确保仿真结果的准确性,外延 InP 、 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 薄膜的光学参数(折射率 n 和消光系数 k) 随波长的变化关系由椭圆偏振法测量所得,结果如图 3(a) 所示。在 1 550 nm 工作波长下, $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 的 n 和 k 分别为 3.591 和 0.098, InP 的 n 和 k 分别为 3.158 和 0.000 3。减反射层的材料选择基于公式 $n_2^2 = n_1 \times n_3$, 其中 n_2 为减反层材料的折射率, n_1 和 n_3 分别为减反层两侧介质的折射率。当减反层两侧分别为空气和 $\text{InP}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, 并且入射波长为 1 550 nm 时,理想的折射率应接近 1.78, 以达到最低的反射率。但在实际应用中,难以找到与之完全匹配的折射率材料。为实现这一目标,本文引入了 SiO_2 和 SiN 双层薄膜减反射结构,通过调节每层的厚度来优化降低光的反射。 SiO_2 和 SiN 材料光学参数随波长的变化如图 3(b) 所示。

光吸收是影响激光光伏电池光电转换效率的

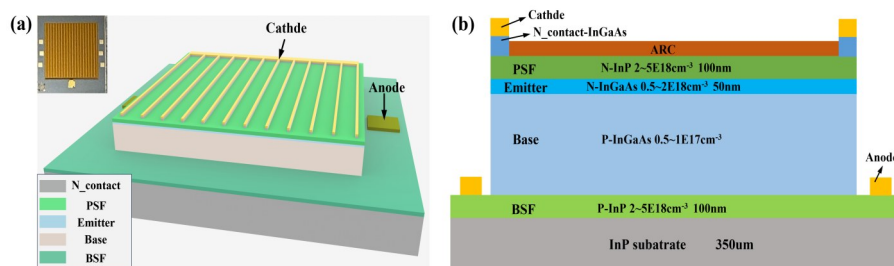


图2 激光光伏电池的结构:(a)示意图,左上角为样品器件实物图;(b)截面图

Fig. 2 Structure of laser photovoltaic cell: (a) schematic diagram, the inset shows an optical image of the fabricated device; (b) cross-sectional view

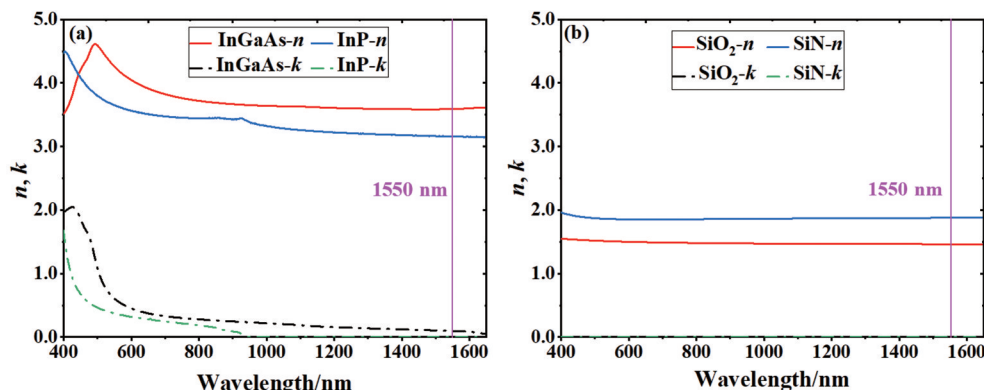


图3 材料光学参数测试:(a)外延InP、 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 薄膜的光学参数(折射率 n 和消光系数 k)随波长的变化关系图;(b)减反层 SiO_2 和SiN薄膜的光学参数随波长的变化关系图

Fig. 3 Refractive index testing of materials: (a) refractive index n and extinction coefficient k of epitaxial InP and $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ thin films; (b) refractive index n and extinction coefficient k of SiO_2 and SiN thin films

关键因素之一,它直接决定了光伏电池外量子效率的上限。图4(a)展示的是无减反层器件的吸收率(A)、反射率(R)和透射率(T)随吸收层厚度的变化情况。从图中可以看到,当吸收区厚度低于工作波长(1 550 nm)时,器件表现出明显的谐振腔效应($\text{InP}/\text{InGaAs}/\text{InP}$)^[20]。当厚度超过3 000 nm时,反射率趋于稳定,基本保持在23%附近;而当吸收区厚度超过4 000 nm时,吸收接近饱和,透射率降至4%以下。考虑到继续增加吸收区厚度对光吸收的提升有限且会影响器件的电学性能,最终将吸收区的厚度设定为4 050 nm(发射区50 nm,基区4 000 nm)。发射区为高掺杂且少数载流子为空穴,迁移率低,扩散长度短,不宜吸收较多的入射光,厚度应尽量薄。图4(b)展示了在吸收区厚度固定为4 050 nm,工作波长为1 550 nm的情况下,器件的反射率随减反层 SiO_2 (厚度标记为 t_{SiO_2})和SiN(厚度标记为 t_{SiN})厚度的变化情况,蓝色代表低反射区域。图中圈出了反射率低于1%的区域,结果表明,双层反射设计中140 nm的 SiO_2 和60 nm的SiN作为器件的减反射层,其理论计算的反射率降低至0.15%。

图4(c)对有、无减反层器件反射谱的计算结果与实验结果进行了对比,S1表示沉积了 SiO_2/SiN 减反射层的器件样品,S2为未沉积减反射层的样品。实验结果显示,经过减反射处理后,器件的反射率从23%降至约1%,减反射效果十分显著,计算结果与实验结果相吻合。该结果表明,光学仿真在光伏器件设计和优化过程中具有重要的指导意义。在实际测试和应用中,激光波长和入射角度的变化也会影响器件的效率。图4(d)展示了器件吸收率随

激光波长和入射角度(Incident angle)变化的谱图。正入射情况下,1.55 μm 器件的光吸收率达到了96%;当入射角度不超过60度时,器件吸收率依然能保持在90%以上。这表明,具有双层减反射设计的器件对入射光角度变化不敏感。在波长变化范围为 $1\,550 \pm 10$ nm(激光波长的常见发散范围内),器件的吸收率基本保持稳定,说明双层减反射设计使得器件具备了良好的波长变化鲁棒性。

光电转换是光电器件中最为重要且复杂的过程。本文采用开源软件SCAPS对激光光伏电池器件的电学性能进行模拟仿真计算^[21]。假设激光垂直入射到器件表面,且所有入射光子在半导体吸收层内都能够产生电子-空穴对(内量子效率为100%)。器件中的复合机制主要包括辐射复合、SRH复合和俄歇复合,且器件与电极的接触为欧姆接触。电学仿真所使用的主要参数列于表1中。激光光伏电池的外量子效率(External Quantum Efficiency, EQE)表示的是光伏电池所收集的光生载流子数量与照射在其表面光子的比值,反映了不同能量的光子对光生电流的贡献。实验上,外量子效率通过对器件的光谱响应测试来确定。图5(a)展示了激光光伏电池的外量子效率谱的计算结果与实验结果,可以看到,计算结果与实验结果基本吻合,但在长波波段两者存在一定偏差。本文设计的激光光伏电池工作波长为1 550 nm,对应的理论外量子效率为96%,而实验测得的外量子效率为92%。这是因为低能光子通常在距离表面空间电荷区较远的基区被吸收,而光生载流子在扩散至空间电荷区的过程中会产生损耗,导致实验测得的效率低于

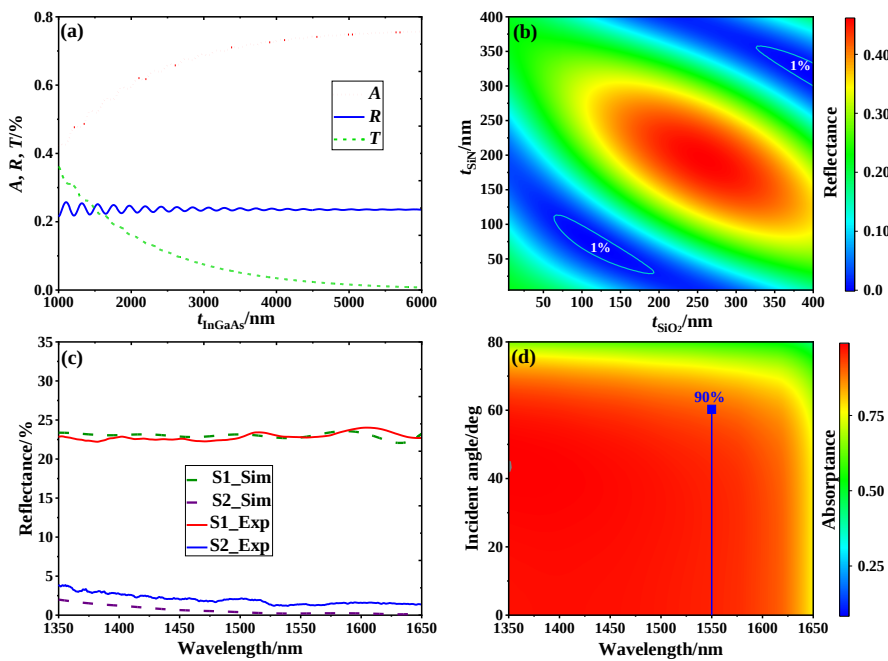


图4 光学仿真结果和实验结果:(a) $\lambda=1\,550\,\text{nm}$ 时,无减反层器件吸收率(A)、反射率(R)、透射率(T)随吸收层厚度 t_{InGaAs} 的变化关系图;(b) $t_{\text{InGaAs}}=4\,050\,\text{nm}$, $\lambda=1\,550\,\text{nm}$ 时,器件的反射率随减反层 SiO_2 和 SiN 厚度的变化关系图;(c)器件反射谱的计算与实验结果对比图,S1为沉积了 SiO_2/SiN 减反层的样品,S2为未沉积减反层的样品;(d) $t_{\text{InGaAs}}=4\,050\,\text{nm}$, $t_{\text{SiO}_2}=140\,\text{nm}$, $t_{\text{SiN}}=60\,\text{nm}$ 时,器件吸收率随激光波长和入射角度变化图

Fig. 4 Optical simulation results and experimental results: (a) absorptance (A), reflectance (R), and transmittance (T) of the proposed device without an anti-reflective layer versus the thickness of the absorber (t_{InGaAs}) at 1 550 nm; (b) reflectance versus the thicknesses of anti-reflective layer (t_{SiO_2} , t_{SiN}) with $t_{\text{InGaAs}}=4\,050\,\text{nm}$ at 1 550 nm; (c) results of the calculated and experimental reflection spectra, S1 and S2 represent the sample with and without anti-reflective layers, respectively; (d) absorptance of the proposed device as a function of laser wavelength and incident angle

表1 温度为300 K时激光光伏电池的电气参数
Table 1 Electrical parameters of the laser photovoltaic cells at $T=300\,\text{K}$

参数	单位	In _{0.53} Ga _{0.47} As		InP	
		电子	空穴	电子	空穴
电子亲和势	eV	4.5		4.38	
相对介电常数		13.9		12.5	
禁带宽度	eV	0.74		1.34	
导带有效状态密度	1/cm ³	2.1E17		5.7E17	
价带有效状态密度	1/cm ³	7.7E18		1.1E19	
迁移率	cm ² /V/s	12 000	300	5 400	200
辐射复合系数	cm ³ /s	0.96E-	0.96E-	1.2E-	1.2E-
		10	10	10	10
俄歇复合系数	cm ⁶ /s	7E-29	7E-29	9E-31	9E-31

理论值。而在短波波段,高能光子主要在靠近表面的空间电荷区被吸收,因此计算结果与实验结果吻合度较高。图5(b)展示了在1 550 nm波长、功率密

度为47 mW/cm²的激光辐照下,器件的电流密度-电压(J - V)曲线。蓝色实线表示实验结果,红色虚线为仿真结果,从图中可以看出,实验测得的短路电流密度与理论计算的结果非常接近,这与外量子效率谱的结果一致。然而,实验所得的开路电压和填充因子明显低于理论值。经过分析,主要原因可能是器件中存在不可忽视的串联电阻和并联电阻。为此,对实验结果进行了进一步的理论分析拟合,拟合过程使用了非理想光伏电池的电流-电压方程^[22]:

$$I = I_L - I_s \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{nkT} \times q \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}, \quad (2)$$

式中: I 为输出电流, V 为输出电压, I_L 为光电流, I_s 为反向饱和电流, q 为电荷量, k 为玻尔兹曼常数, T 为温度, n 为二极管理想因子(通常为1~2), R_s 为串联电阻, R_{sh} 为并联电阻。修正拟合结果如图5(b)中黑色虚线所示,与实验结果几乎完全一致。拟合过程中,器件的串联电阻和并联电阻分别为4.42 Ω 和

652 Ω (器件P型欧姆接触的比接触电阻率为 $3.2 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$, N型欧姆接触的比接触电阻率为 $2.4 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$), 而理想的光伏电池的串联电阻值通常约为 1 Ω , 并联电阻值约为 1 000 Ω 。由此可见, 较高的串联电阻和较低的并联电阻是导致器件性能低于理论计算的主要原因。串联电阻高会导致器件的短路电流降低, 并联电阻低会导致器件的开路电压降低, 且两者都会导致器件的填充因子降低, 最终导致器件光电转换效率降低。由此, 实验所得的光电转换效率为 23%, 相较于理论计算值 36% 低了 13%。要进一步提高激光光伏电池的效率, 需要通过优化器件的制备工艺来降低串联电阻和提高并联电阻。譬如对顶电极和背电极的材料和合金化工艺进行优化, 使用重掺杂的 InP 做衬底并在衬底背面制作电极, 降低器件的接触电阻和电极自身的电阻, 以降低器件的串联电阻; 选择更加合适的材料对器件边缘进行钝化, 减小边界处的表面复合, 以提高器件的并联电阻。

激光光伏电池的能量转换效率与所使用的激光功率密度密切相关。图 6(a)–(d) 展示了制备的激光光伏电池的短路电流密度 (J_{sc})、开路电压 (V_{oc})、转换效率 (E_{ff}) 以及输出功率密度 (P_m) 随入射激光功率密度的变化趋势。在激光功率密度较低时, 器件的光生载流子浓度相较于吸收区中的多子浓度可以忽略不计, 器件处于小注入状态。此时, 器件的短路电流密度随入射光功率密度线性增加, 考虑到理想光伏电池开路电压和光电流之间的关系^[23]:

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \left(1 + \frac{I_L}{I_s} \right), \quad (3)$$

开路电压会随着激光功率密度的增加而缓慢变大, 这种现象表现为图中激光功率密度低于 100 mW/cm^2 时的情况。随着激光功率密度进一步增加, 光生载流子的浓度开始与吸收区中的多子浓度相当, 此时器件内的辐射复合和俄歇复合速率迅速上升。由于载流子浓度的增加, 短路电流密度的增长速度逐渐减慢, 最终趋于饱和 (见图 6(a))。同时, 较高的电流密度会导致器件的焦耳热迅速增加, 使器件的温度上升, 从而导致开路电压的增长减缓并最终饱和, 结果如图 6(b) 所示。随着激光功率的增加, 器件会表现出一个转换效率的峰值, 随后由于过高的功率密度导致效率迅速下降。实验结果显示, 在激光功率为 47 mW/cm^2 时, 激光光伏电池的最高转换效率达到了 23%, 这一数值也是前文仿真计算的实验条件 (见图 6(c))。输出功率密度是指当输出电压与输出电流密度的乘积达到最大值时的功率密度值, 它是光伏电池作为能量源的关键性能指标之一, 反映了光伏电池的能量输出能力。图 6(d) 中结果表明, 器件的输出功率密度总体上随着入射光功率密度的增加而增加, 在功率密度低于 100 mW/cm^2 时增长较快, 但随着转换效率的下降, 增长速度明显变慢。

激光光伏电池的器件区面积也会影响器件的光电性能, 五种不同面积光伏器件的开路电压和光电转换效率的表征结果如图 7 所示。不同面积的光

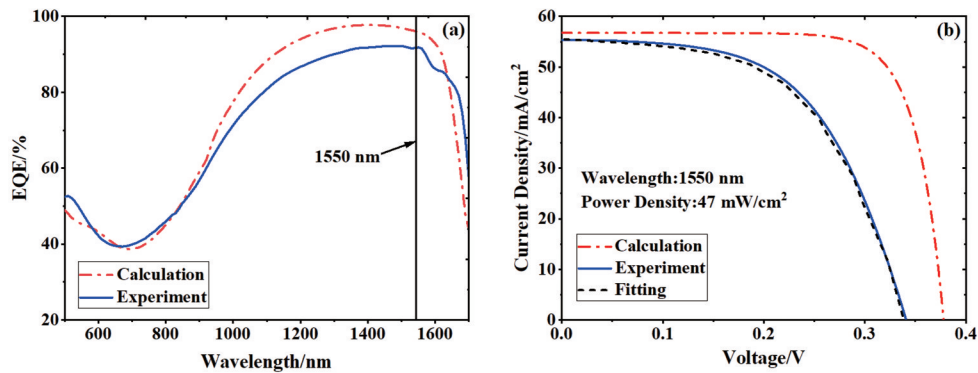


图5 电学仿真结果与实验测试结果:(a)激光光伏电池外量子效率谱,红色曲线为理论仿真计算结果,蓝色实线为实验测试结果;(b) $\lambda=1550 \text{ nm}$, $P=47 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 时,激光光伏电池的电流密度-电压 (J - V) 曲线,蓝色实线为实验结果,红色虚线为计算结果,黑色虚线为拟合结果

Fig. 5 Electrical simulation results and experimental test results: (a) external quantum efficiency (EQE) spectrum of the laser photovoltaic cell, red curve represents the theoretical calculation result, blue solid line shows the experimental measurement; (b) current density-voltage (J - V) curve of the laser photovoltaic cell at 1550 nm and a power density of $P=47 \text{ mW}/\text{cm}^2$, blue solid line is the experimental result, red dash-dotted line represents the calculated result, black dashed line shows the fitted result

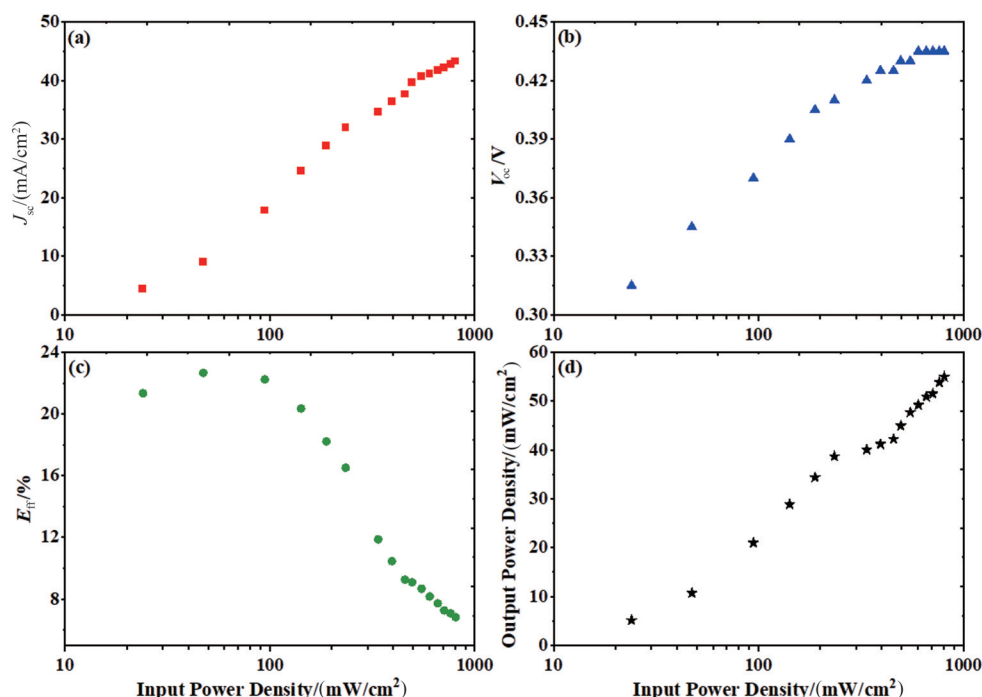


图6 激光光伏电池的性能参数随入射激光功率密度的变化:(a)短路电流密度;(b)开路电压;(c)转换效率;(d)输出功率密度

Fig. 6 Relationship between the performance parameters of laser photovoltaic cells and input power density: (a) short-circuit current density; (b) open-circuit voltage; (c) conversion efficiency; (d) output power density

伏电池开路电压的变化趋势基本相同,随功率密度先增加后饱和。器件面积越小,饱和的临界点(对应的功率密度)越高。相同功率密度下器件的开路电压会随着器件面积的增加而升高,但非线性变化,面积较小时增幅较大,超过 1 mm^2 后增加不明显。为了探究原因,测试了这些器件在不加光状态下的电流电压关系,并通过公式(2)(取 I_L 为 0)对曲线进行拟合,得到器件反向饱和电流与面积的关系,结果展示在图 8 中。可以看到,器件的反向饱和电流随着面积的增加而增加,但并不是和面积线性相关,去除面积因子可以得到反向饱和电流密度(J_s)。 J_s 随器件面积的增加迅速降低,超过 1 mm^2 后开始饱和,与开路电压的表现一致。这一关联性符合公式(1),表明反向饱和电流密度的变化是器件性能随器件区面积变化的主要原因。结合器件的具体工艺,同一批次的器件,面积的变化主要影响边缘区(台阶型器件具有一定的厚度)的占比,边缘区是化学刻蚀出的边界,和 PN 结表面界面一样存在一定的表面复合,会给反向饱和电流密度贡献一定的复合分量。由于器件的厚度固定,器件面积越小边缘区占比越大,边缘复合对器件开路电压的影响就越大。

不同器件区面积的器件,其光电转换效率均会在某一功率密度时出现峰值,与标准器件的趋势一致,这个点可标记为 $(\eta_{\max}, P_{\max})$,分别表示峰值处的光电转换效率和入射光功率密度,两者之积为器件的输出功率密度。表 2 列出了不同光敏区面积的器件在峰值点的性能参数。随着器件面积的降低, $P_{\max}$ 迅速增加,器件的输出功率密度也随之增加(不同面积器件的 $\eta_{\max}$ 相差不大),负载能力变得更强大。入射激光功率密度的增加会导致器件工作温度上升,进而影响器件的光电性能,小面积的器件有更好的散热特性,因而可以在更高的激光功率密度下工作。器件小型化是单结激光光伏电池的可能发展方向,但小面积的激光光伏电池面临边缘区占比过高导致的开路电压较低的问题,进而影响器件的光电转换效率,如图 7 所示。通常的解决方案为对边缘区进行更好地钝化,但这无法从根本上解决问题,更好的方法是通过减小吸收区的厚度来降低边缘区的占比。减小吸收区厚度还可以提高空间电荷区的占比,而空间电荷区的强场可以有效抑制边缘复合,因而设计制备超薄激光光伏电池是大幅提高单结激光光伏电池(尤其是小面积的光伏电池)性能的可行性方案。

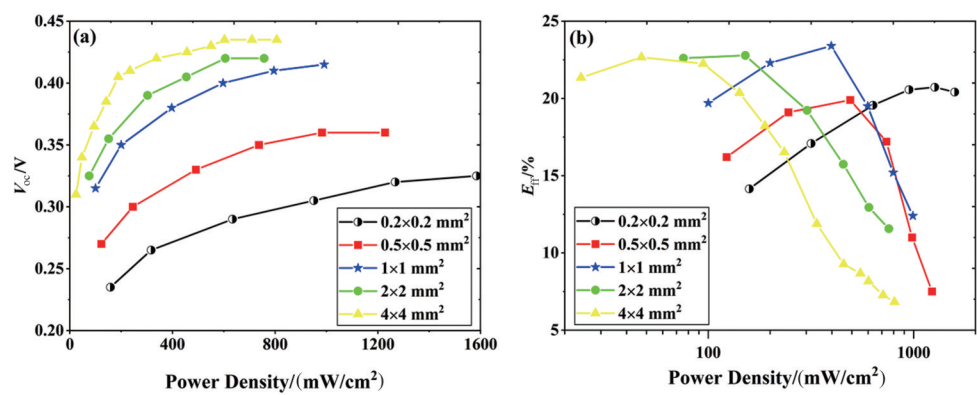


图7 不同器件区面积的激光光伏电池的性能参数随入射光功率密度的变化:(a)开路电压;(b)转换效率
Fig. 7 Performance parameters of laser photovoltaic cells with different cell areas versus the incident power density: (a) open-circuit voltage; (b) conversion efficiency

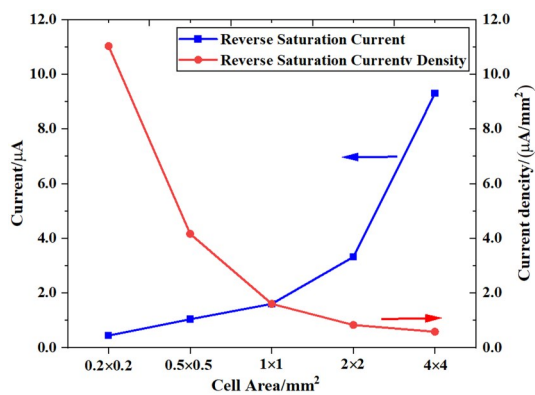


图8 反向饱和电流和反向饱和电流密度随器件面积的变化
Fig. 8 Reverse saturation current and reverse saturation current density versus the cell area

表2 不同光敏区面积的激光光伏电池在峰值点的性能参数
Table 2 Performance parameters of laser photovoltaic cells with different cell area at the peak point

Cell Area(mm^2)	0.2×0.2	0.5×0.5	1×1	2×2	4×4
V_{oc} (mV)	320	330	380	355	340
J_{sc} (mA/cm^2)	1 458	565	457	174	56
FF (%)	56.3	52.4	53.5	55.8	56.0
η_{max} (%)	20.7	19.9	23.4	22.8	22.7
P_{max} (mW/cm^2)	1268	491	397	151	47

3 结论

本研究成功设计并制备了基于 $\text{InP}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 材料体系的 1 550 nm 激光光伏电池。通过合理的结构设计和仿真优化,器件表现出良好的光吸收和光电转换性能。通过优化吸收层厚度及采用双层减反射结构(SiO_2 和 SiN),器件在 1 550 nm 波长的激光直射下达到了 96% 的吸收率,并表现出良好的角度变化不敏感性和波长变化鲁棒性。实验结果显

示,经过减反射处理后,器件的反射率从 23% 降至约 1%,减反射效果十分显著。电学仿真与实验结果相吻合,实验测得的外量子效率在 1 550 nm 波长下为 92%,接近理论值的 96%。实验还研究了激光功率密度对转换效率的影响,结果显示在 47 mW/cm^2 功率密度下,光电转换效率最高达到 23%,相比理论值低了 13%,这主要归因于器件较高的串联电阻和较低的并联电阻。文章提出了进一步降低串联电阻和并联电阻的改进方向,以提升激光光伏电池的整体性能,并深入分析了器件区面积对器件性能的影响,为器件微型化发展提供方向。

References

[1] Algora C, García I, Delgado M, et al. Beaming power: Photovoltaic laser power converters for power-by-light [J]. Joule, 2022, 6(2): 340–368.
[2] Panchak A N, Pokrovskiy P V, Malevskiy D A, et al. High-Efficiency Conversion of High-Power-Density Laser Radiation [J]. Technical Physics Letters, 2019, 45 (1) : 24–26.
[3] Spillman Jr W, Crowne D, Woodward D. Optically powered and interrogated rotary position sensor for aircraft engine control applications[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1992, 16(2–3): 105–118.
[4] Pena R, Algora C, Matías I R, et al. Fiber-based 205-mW (27% efficiency) power-delivery system for an all-fiber network with optoelectronic sensor units [J]. Applied Optics, 1999, 38(12): 2463–2466.
[5] De Nazare F V B, Werneck M M. Hybrid optoelectronic sensor for current and temperature monitoring in overhead transmission lines [J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 12 (5): 1193–1194.
[6] Algora C, Peña R. Recharging the battery of implantable biomedical devices by light[J]. Artificial Organs, 2009, 33 (10): 855–860.
[7] Landis G A. Photovoltaic receivers for laser beamed power in space [J]. Journal of Propulsion and Power, 1993, 9

- (1): 105–112.
- [8] Landis G A. Satellite eclipse power by laser illumination [J]. *Acta Astronautica*, 1991, 25(4): 229–233.
- [9] Fakidis J, Helmers H, Haas H. Free space optical link for simultaneous power and 1 Gb/s data transmission[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(15): 789–792.
- [10] Mukherjee J, Jarvis S, Perren M, et al. Efficiency limits of laser power converters for optical power transfer applications [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2013, 46(26): 264006.
- [11] Jomen R, Tanaka F, Akiba T, et al. Conversion efficiencies of single-junction III – V solar cells based on InGaP, GaAs, InGaAsP, and InGaAs for laser wireless power transmission [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2018, 57(8S3): 08RD12.
- [12] Helmers H, Lopez E, Höhn O, et al. 68.9% Efficient GaAs-Based Photonic Power Conversion Enabled by Photon Recycling and Optical Resonance [J]. *physica status solidi (RRL) – Rapid Research Letters*, 2021, 15(7): 2100113.
- [13] Schubert J, Oliva E, Dimroth F, et al. High-Voltage GaAs Photovoltaic Laser Power Converters [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2009, 56 (2) : 170–175.
- [14] Zhao Y, Sun Y, He Y, et al. Design and fabrication of six-volt vertically-stacked GaAs photovoltaic power converter[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 38044.
- [15] Sun Y-R, Dong J-R, He Y, et al. A six-junction GaAs laser power converter with different sizes of active aperture [J]. *Optoelectronics Letters*, 2017, 13(1): 21–24.
- [16] Wang A-C, Sun Y-R, Yu S-Z, et al. Characteristics of 1520 nm InGaAs multijunction laser power converters [J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 119(24): 243504.
- [17] Nouri N, Valdivia C E, Beattie M N, et al. Light management in ultra-thin photonic power converters for 1310 nm laser illumination [J]. *Opt Express*, 2022, 30 (13) : 23417–23427.
- [18] Zhuang Yong-Feng, Hua Lei, Guo Bao. Research and Design of Laser Energy Converter for Laser Power Transmission System [J]. *Infrared*, (庄永峰, 华磊, 郭豹. 激光传能系统用激光能量转换器的研究与设计 [J]. *红外*), 2014, 35(12): 35–40.
- [19] Wang A-C, Sun Y-R, Yu S-Z, et al. A method to analyze current mismatch in a multijunction laser power converter based on I – V measurements [J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 118(23): 233504.
- [20] Zhang Z, Zhou D, Tan C, et al. Ultra-thin optical power converters based on Gires – Tournois resonator configuration operating in high-order modes [J]. *Applied Physics Express*, 2024, 17(7): 072002.
- [21] Burgelman M, Decock K, Khelifi S, et al. Advanced electrical simulation of thin film solar cells [J]. *Thin Solid Films*, 2013, 535: 296–301.
- [22] Yin J, Sun Y, Yu S, et al. 1064 nm InGaAsP multi-junction laser power converters [J]. *Journal of Semiconductors*, 2020, 41(6): 062303.
- [23] Beattie M N, Helmers H, Forcade G P, et al. InP- and GaAs-Based Photonic Power Converters Under O-Band Laser Illumination: Performance Analysis and Comparison [J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2023, 13 (1) : 113–121.