

## 激光传能协同信号传输下的太阳能电池性能测试

孙志宇, 陆 健, 张宏超, 李广济, 谢知健

(南京理工大学理学院, 江苏南京 210094)

**摘 要:** 激光无线能量传输在为远距离设备供电方面有着潜在的应用前景, 在激光无线传能的同时进行激光无线通讯, 具有重要的应用价值。针对砷化镓太阳能电池, 对激光传能系统在无线能量传输时激光无线通讯性能进行了测试。实验采用波长 808 nm 激光实现砷化镓太阳能电池的能量传输, 采用波长 650 nm 激光作为信号的传输, 分别对单能量传输、单信号传输以及能量和信号同步传输三种情况下的砷化镓太阳能电池的输出特性进行了测试。结果表明: 当单能量传输时, 太阳能电池的性能与激光功率密度的大小密切相关, 激光功率密度在 54.9~90 mW/cm<sup>2</sup> 范围内光电转换效率最大值为 46.6%; 当单信号传输时, 通过测量系统的频率响应得到砷化镓太阳能电池的 3 dB 带宽约为 3.7 kHz, 并通过设计放大电路提高系统的通信性能, 优化输出波形, 使得系统的通信速率从 10 kbps 提升至 240 kbps, 输出电压峰值达到 7.2 V。最后实验测量了不同激光强度下可实现的通信速率, 当激光功率密度为 59.5 mW/cm<sup>2</sup> 时可实现 140 kbps 的通信速率, 使得激光充电系统在无线能量传输下可以进行信号的传输。

**关键词:** 太阳能电池; 能量传输; 信号传输; 频率响应

**中图分类号:** TN929.12      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20210888

## Performance test of solar cell under laser energy transmission and signal transmission

Sun Zhiyu, Lu Jian, Zhang Hongchao, Li Guangji, Xie Zhijian

(School of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Laser wireless energy transmission has potential applications prospects in supplying energy for long-distance equipment. And laser wireless communication with energy transmission has important application value. For GaAs solar cell, the laser wireless communication performance of the laser energy transmission system was tested during wireless energy transmission. A wavelength of 808 nm laser to achieve the energy transmission of the GaAs solar cell was used in the experiment, and a wavelength of 650 nm laser was used as the signal transmission. The output characteristics of GaAs solar cell under three conditions of single energy transmission, single signal transmission and energy and signal simultaneous transmission were tested respectively. The results show that when the single energy is transmitted, the performance of the solar cell is closely related to the laser power density. In the range of 54.9-90 mW/cm<sup>2</sup> of the laser power density, the maximum energy conversion efficiency is 46.6%; when the single signal is transmitted, by measuring the frequency response of the system, the 3 dB bandwidth of the GaAs solar cell is about 3.7 kHz. And by designing the amplifier circuit, the communication performance of the system is improved and the output waveform is optimized, so that the

收稿日期:2021-11-24; 修订日期:2022-01-10

基金项目:国家自然科学基金面上项目(11774176)

作者简介:孙志宇,女,硕士生,主要从事激光充电与通信技术方面的研究。

导师简介:陆健,男,教授,博士生导师,从事激光与材料相互作用机理和光电测试技术方面的研究。

transmission rate of the system is increased from 10 kbps to 240 kbps, and the output voltage peak-to-peak reaches 7.2 V. Finally, the achievable signal transmission rates under different laser intensities were measured experimentally. When the laser power density is 59.5 mW/cm<sup>2</sup>, the signal transmission rate of 140 kbps is achieved, so that the laser charging system can perform signal transmission under wireless energy transmission.

**Key words:** solar cell; energy transmission; signal transmission; frequency response

## 0 引言

近年来,随着无线充电与通信技术的发展,激光无线信号与能量同步传输技术成为新的研究方向。在激光通信系统中,光电二极管 (PD) 通常是接收端的首要选择,但是光电二极管需要外部电源才可以运行,且需要特殊的封装技术<sup>[1-3]</sup>。为克服这些困难,可选用太阳能电池板代替 PD 用作接收器。太阳能电池不仅是很好的供能器件,还可以在无外接电源的情况下将光信号直接转换为电信号<sup>[4-7]</sup>。2013 年, Kim S M 等人采用白光 LED 作为通信光源,通过太阳能电池同时接收太阳辐射和光信号,当接收功率密度为 16 W/m<sup>2</sup> 时,太阳能电池能量转换效率约为 20%,在传输距离为 40 cm 的情况下,数据传输速率为 3 kb/s<sup>[8]</sup>。2014 年, Wang Z 等人采用太阳能电池作为接收端光电探测器进行了无线能量和信号传输实验,首先实验测得太阳能电池 3 dB 调制带宽为 350 kHz,当太阳能电池表面辐照度为 0.35 mW/cm<sup>2</sup> 时,采用开关键控 (OOK) 调制法,数据传输速率为 1 Mbit/s;采用正交频分复用 (OFDM) 调制法时信号传输速率为 7.01 Mbit/s<sup>[9]</sup>。2015 年, Wang Z 等人进一步提出了用于能量和信号同传的太阳能电池等效电路模型并设计了接收端电路,选用 LED 光源,采用 OFDM 调制法实现了 11.84 Mbps 的通信速率<sup>[10]</sup>。同年, Zhang S 等人使用一种材料为 PTB7 : PC<sub>71</sub>BM 的有机太阳能电池作为能量和信号的接收器件,建立了数据速率为 34.2 Mbps、误码率为 1.08×10<sup>-4</sup> 的通信链路<sup>[11]</sup>。2018 年,浙江大学的孔美巍在水下光通信系统中采用太阳能电池进行信号探测和能量采集,水下信道距离为 7 m,运用 OFDM 调制法实现了 22.56 Mbit/s 的传输速率,由于太阳能电池接收面积大、在接收端无需透镜聚光的优势,解决了水下链路对准的问题<sup>[12]</sup>。2019 年, Xiong M 等人介绍了一种回波干扰消除方法,并提出了一种无干扰谐振波束通信 (RBCom) 系统的设计,该系统能够滤除调制光束中的基带分量,同时保留载波以保持谐

振,具有自对准、远距离以及高信噪比等优势,可应用于谐振光束充电或通信中<sup>[13]</sup>。2021 年, Sheng Q 等人设计了一种使用猫眼后向反射器的连续波长分布腔激光器并通过实验验证了可行性,研究发现球差对系统输出功率有显著影响,最终实现了 16.6 W 的入射泵浦下可发射距离 5 m、功率 5.91 W 的连续激光,可实现远距离和高鲁棒性传输,在激光能量与信号传输方面具有潜在的应用前景<sup>[14]</sup>。

目前国内外对于太阳能电池的研究通常用于能量或信号的单独传输,文中选用了两种激光器作为发射端,采用砷化镓 (GaAs) 太阳能电池作为接收端,分别研究了单能量传输、单信号传输以及信号和能量同传下太阳能电池的输出特性,测量了 GaAs 太阳能电池的系统频响特性,并通过设计外接电路优化输出波形,实现了基于太阳能电池的激光无线能量和信号的同时传输。

## 1 太阳能电池等效电路模型

太阳能电池等效电路模型如图 1 所示,包含一个电流源  $I_{ph}$ 、一个二极管、两个电阻即串联电阻  $R_s$  和并联电阻  $R_{sh}$ <sup>[15]</sup>。

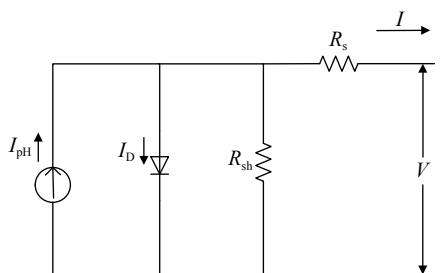


图 1 太阳能电池等效电路模型

Fig.1 Equivalent circuit model of solar cell

太阳能电池的  $I-V$  特性定义如下:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中:  $I$  为经过外接负载的电流;  $I_0$  为对应的反向饱和电流;  $n$  为太阳能电池的理想因子;  $V$  为光生电压;  $q$  为

电子电荷;  $k$  为玻耳兹曼常数;  $T$  为温度。

用于同步传能和通信的太阳能电池板模型如图 2 所示, 左侧为太阳能电池板内部等效模型,  $r$  为小信号等效电阻器,  $C_0$  和  $L_0$  分别为电池内部电容和电感; 右侧为外接电路<sup>[1]</sup>。负载  $R_C$  和电容  $C$  串联形成通信分支, 与通信分支并行的是由电感  $L$  和电阻  $R_L$  组成的能量收集分支, 光电流由直流分量  $I_{PH}$  和交流分量  $i(\omega)_{PH}$  组成。

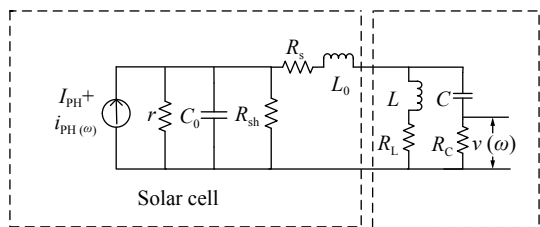


图 2 用于传能和通信的太阳能电池等效电路模型

Fig.2 Equivalent circuit model of solar cell for energy transfer and communication

依据图 2, 该模型频率响应为:

$$\left| \frac{v(\omega)}{i_{PH}(\omega)} \right|^2 = \left| \frac{\frac{R_{LC}}{R_s + j\omega L + R_{LC}} \frac{R_C}{\frac{1}{j\omega C_0} + R_C}}{\frac{1}{r} + \frac{1}{\frac{1}{j\omega C}} + \frac{1}{R_{sh}} + \frac{1}{R_s + j\omega L + R_{LC}}} \right|^2 \quad (2)$$

其中,  $R_{LC}$  为:

$$R_{LC} = \frac{1}{\frac{1}{j\omega L + R_L} + \frac{1}{\frac{1}{j\omega C}} + R_C} \quad (3)$$

## 2 实验

### 2.1 实验原理图

系统实验原理如图 3 所示。实验系统包括发射端的激光器、准直扩束系统、合束镜、信号发生器以及接收端的太阳能电池及其外接电路、示波器、源表等实验装置。对于系统发射端选用的波长为 808 nm 的激光器, 用于研究太阳能电池的传能特性; 选用波长为 650 nm 的半导体激光器用于信号的传输。合束镜将两束不同波长的光合为一束, 准直扩束系统选用 GCO-2505 扩束镜, 通过调节镜头上的调焦和变倍手轮可调整扩束比和光束的发散角。选用 DG4000 系列任意波形发生器对 LD 进行内调制, 接收端为 GaAs 太阳能电池, 尺寸为 1 cm×1 cm。用数字示波器采集输出信号, KEITHLEY 2450 型号数字源表进行太阳能电池  $I-V$  特性的探测, 激光功率采用美国 THORLABS 公司的 PM16-121 数字功率计进行测量, 其最大测量功率值为 500 mW。

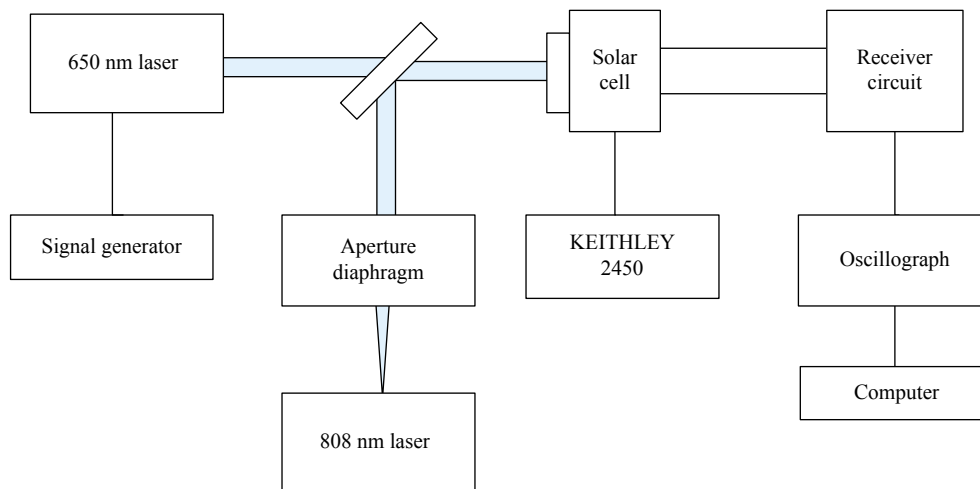


图 3 系统实验原理图

Fig.3 Principle diagram of system experiment

### 2.2 能量传输实验

当单独能量传输时, 仅采用 808 nm 激光器经过扩束系统后辐照在 GaAs 太阳能电池表面, 用源表测

量不同功率密度激光辐照太阳能电池的  $I-V$  特性曲线和  $P-V$  特性曲线, 如图 4 所示。

GaAs 太阳能电池短路电流  $I_{sc}$ 、开路电压  $V_{oc}$  和光

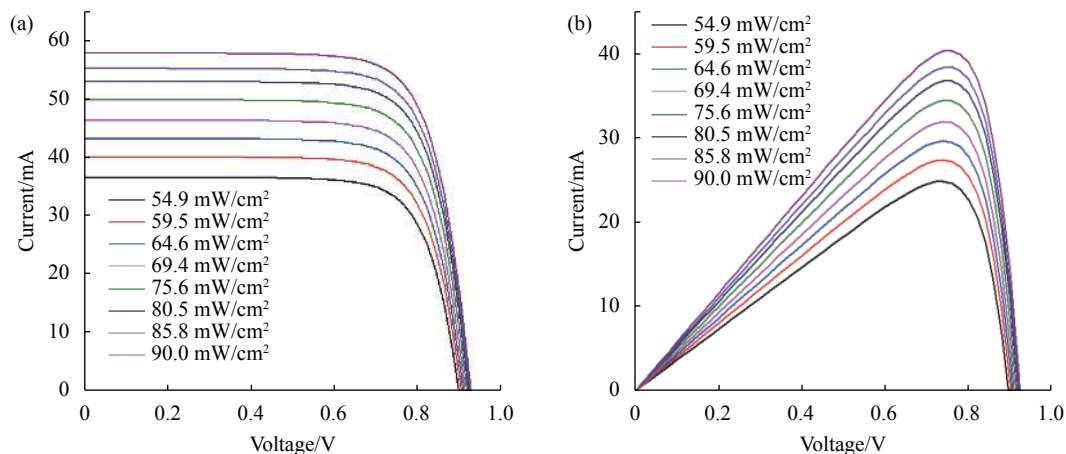


图 4 太阳能电池响应特性曲线。(a)  $I-V$  曲线; (b)  $P-V$  曲线

Fig.4 Response characteristic curves of solar cell. (a)  $I-V$  curve; (b)  $P-V$  curve

电转换效率 $\eta$ 随激光功率密度的变化关系如图 5 所示。在测量范围内,短路电流 $I_{sc}$ 随入射激光功率密度增大而增大且呈线性关系;开路电压 $V_{oc}$ 随入射激光功率密度的增大而增加,最后变化较小趋于饱和;光电转

换效率 $\eta$ 随入射激光功率密度的增大而减小,当激光功率密度大小为  $54.9 \text{ mW/cm}^2$  时,光电转换效率可达 46.6%。由此可以看出,激光功率密度是影响太阳能电池传能特性的重要因素。

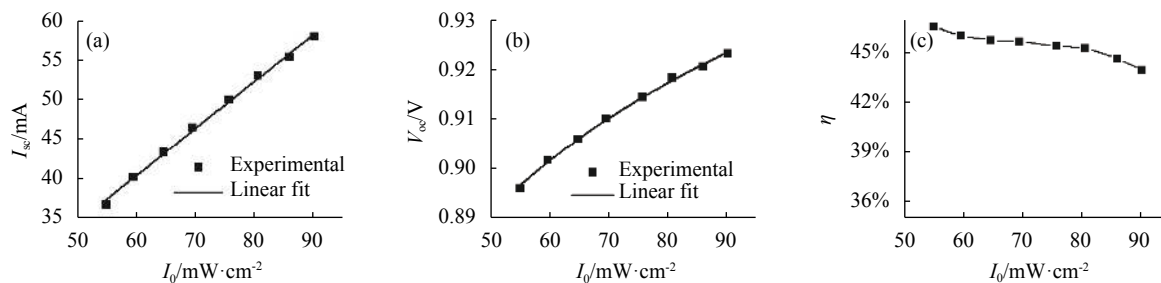


图 5 GaAs 太阳能电池输出特性随激光功率密度的变化关系。(a) 短路电流; (b) 开路电压; (c) 光电转换效率

Fig.5 Relationship between the output characteristics of GaAs solar cell and laser power density. (a) Short circuit current; (b) Open circuit voltage; (c) Photoelectric conversion efficiency

### 2.3 信号传输实验

对太阳能电池频响特性的测试采用波长  $650 \text{ nm}$  的小功率 LD 作为入射光源,最大光功率为  $5 \text{ mW}$ 。频率响应可由所接收到的交流信号电压 $u(t)$ 的归一化功率增益 $|H(f)|^2$ 定义,其中 $f$ 为频率, $t$ 为时间, $|H(f)|^2 = |v_{pp}(f)/\max(v_{pp}(f))|^2$ , $v_{pp}(f)$ 为电压 $u(t)$ 的峰峰值<sup>[15]</sup>。发射端、光电探测器、外接电路和整个系统的归一化频响特性分别用 $H_1(f)$ 、 $H_2(f)$ 、 $H_3(f)$ 和 $H_{\text{system}}(f)$ ,有:

$$H_{\text{system}}(f) = |H_1(f)| \times |H_2(f)| \times |H_3(f)| \quad (4)$$

首先借助 PDA100 A2 硅光电探测器间接测量,探测器带宽为  $11 \text{ MHz}$ ,用示波器测量其系统归一化频率响应,如图 6 所示,可以看出在测量范围内该系

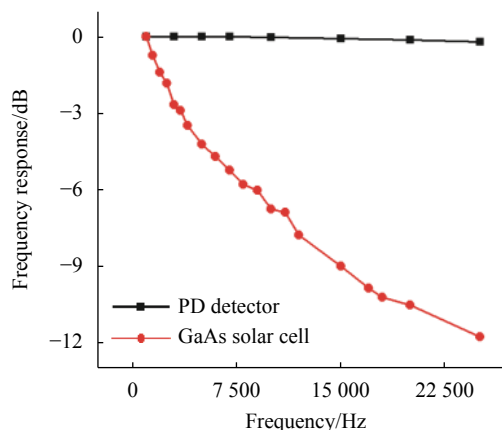


图 6 接收端为 PD 探测器和 GaAs 太阳能电池时系统频响特性曲线  
Fig.6 Frequency response of the system when the receiver is PD detector and GaAs solar cell

统各个部分的频率响应近似于平坦,接收端更换为 GaAs 太阳能电池后,测量系统频响带宽为 3.7 kHz,系统中除太阳能电池板外的其他部件均具有较大的带宽,可得 GaAs 光电池的 3 dB 带宽约为 3.7 kHz。

在接收端接入外接支路,固定能量接收支路的参数为  $R_L=5\text{ k}\Omega$ ,  $L=1\text{ mH}$ ,研究信号传输支路参数对响应特性的影响。使用信号发生器产生一个电压峰峰值  $V_{pp}=500\text{ mV}$  的正弦波信号,添加直流偏置电压  $V_{ac}=3\text{ V}$  用于驱动 LD,LD 距太阳能电池 10 cm。采用控制变

量法分别调整  $R_C$  和  $C$  的大小进行系统频响特性的测量,由图 7 (a)、(b) 可以看出,随着电阻  $R_C$  的增加,系统带宽随之减小;随着电容值  $C$  的增加,系统带宽随之减小,电容值从  $10\text{ }\mu\text{F}$  继续调大,带宽不再发生变化,因此可以通过调整外接电路进而改变系统的频率响应。

用信号发生器输出 OOK 调制信号,信号峰峰值设置为  $500\text{ mV}$ ,偏置电压  $3\text{ V}$ ,驱动激光器辐照 GaAs 太阳能电池,测量输出响应波形如图 8 (a)、(b) 所示,可实现  $10\text{ kbps}$  的通信速率。为提高通信速率,改善

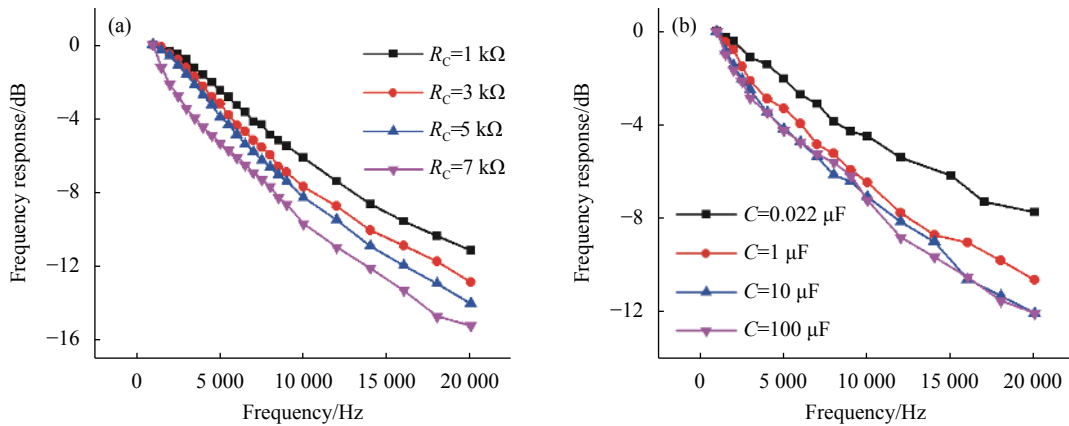


图 7 接收端为 GaAs 太阳能电池时系统频率响应变化曲线。(a) 随  $R_C$  变化; (b) 随  $C$  变化

Fig.7 System frequency response change curves when the receiver is GaAs solar cell. (a) Change with  $R_C$ ; (b) Change with  $C$

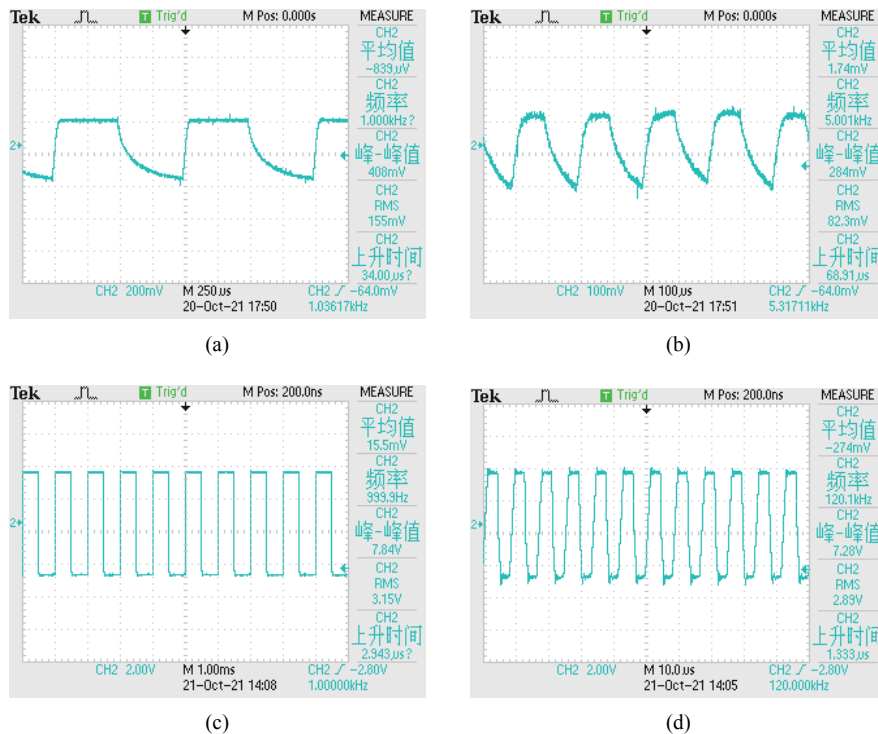


图 8 接入电路前后输出波形。(a) 接入前 2 kbps; (b) 接入前 10 kbps; (c) 接入后 2 kbps; (d) 接入后 240 kbps

Fig.8 Output waveform before and after connecting circuit. (a) Before 2 kbps; (b) Before 10 kbps; (c) After 2 kbps; (d) After 240 kbps

系统的响应性能,设计放大电路如图 9 所示,放大电路可以通过增益或衰减的调节使得可检测信号的范围大大扩展,便于信号的采集。

接入放大电路后的测量结果如图 8 (c)、(d) 所示,实

现了 240 kbps 的通信速率,输出电压峰峰值从 408 mV 提高到 7.2 V。根据接入电路前后的测量结果对比,可得接入电路能够在较大的范围内有效提高通信带宽,改善输出信号,满足能量传输和信号探测的要求。

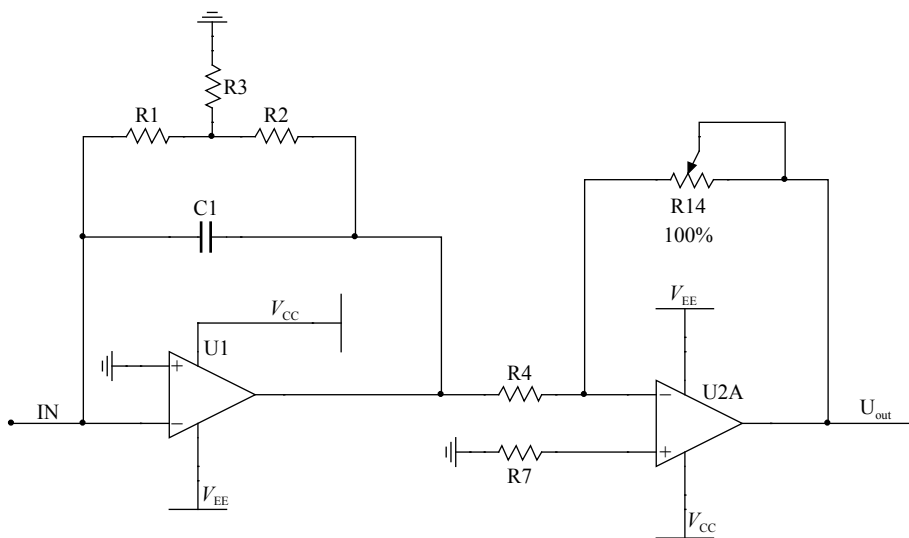


图 9 放大电路原理图

Fig.9 Principle diagram of amplification circuit

### 2.4 能量和信号同步传输实验

根据图 3 搭建实验装置进行能量和信号的同时传输实验,传输距离为 50 cm,由于用于能量传输的光路会对信号的传输产生干扰,在太阳能电池接收端接入放大电路,并施加反向偏压 3 V,使得输出信号波形改善。由图 10 (a)、(b) 可以看出,在接入电路前,当通信速率为 2 kbps、传能激光功率密度为 69.4 mW/cm<sup>2</sup> 时,由于连续激光的干扰,使得输出波形携带较大噪声,接入电路后,输出信号得以恢复,改善通信性能。

通过调节用于传能的激光器所发射激光功率密

度,如图 11 所示,图 11(a)、(b) 为接收信号波形,图 11(c)、(d) 为调制信号波形,当功率密度分别为 59.5、69.4、80.5、90 mW/cm<sup>2</sup> 时,可实现信号的通信速率依次为 140、100、40、30 kbps。可以看出,当传能激光功率密度较高时,会在一定程度上干扰信号的传输,由于当传能激光功率密度越高时,太阳能电池内部产生的电子-空穴对密度越高,产生越多的光生电流,对所接收到的脉冲光信号要达到动态载流子平衡,数量越多的电子-空穴对响应时间越长,通信速率降低。

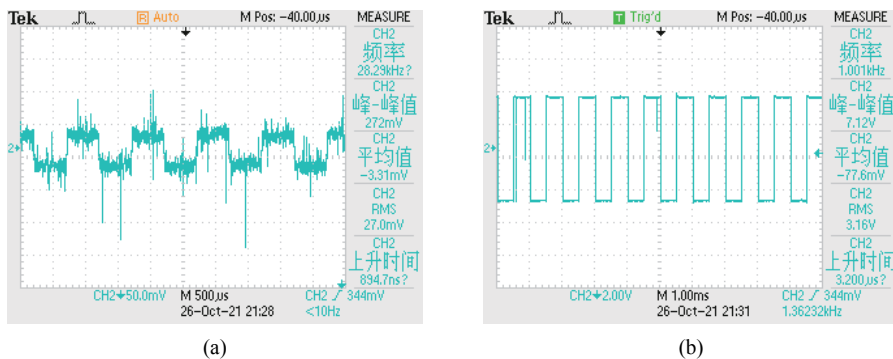


图 10 激光无线能量和信号同步传输时输出波形。(a) 接入电路前;(b) 接入电路后

Fig.10 Waveform received when the laser wireless energy and signal are transmitted synchronously. (a) Before circuit access; (b) After circuit access

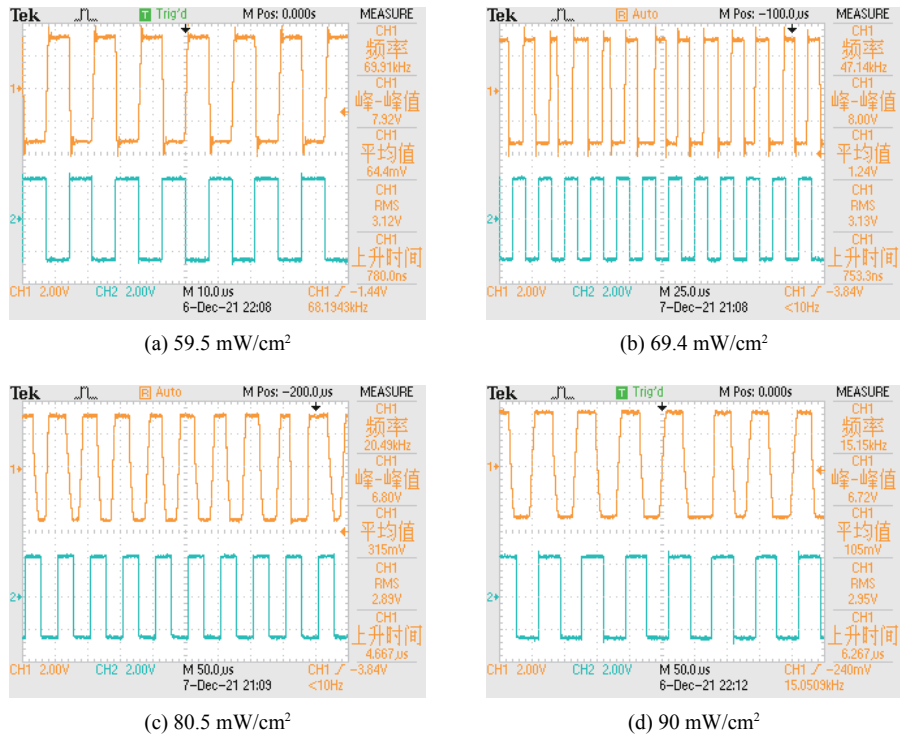


图 11 不同传能激光功率密度下的信号输出波形

Fig.11 Signal output waveform under different laser power densities

### 3 结 论

文中对激光传能协同信号传输下的太阳能电池的响应性能进行了研究,通过实验分别测试了单传能、单通信以及信号和能量同步传输三种情况下太阳能电池的输出特性,选用波长为 808 nm 的激光器用于能量传输,选用波长为 650 nm 的半导体激光器用于信号传输, GaAs 太阳能电池作为接收端。通过实验可得,太阳能电池的能量传输特性与激光功率密度的大小有关,光电转换效率随入射激光功率密度的增大而减小,当激光功率密度为  $54.9 \text{ mW}/\text{cm}^2$  时,能量转换效率可达 46.6%。测量得到 GaAs 太阳能电池的 3 dB 带宽约为 3.7 kHz,通过设计信号放大电路来进行系统通信性能的改进,优化输出波形,使得通信速率从 10 kbps 增大到 240 kbps,输出电压峰峰值达 7.2 V。最终通过实验验证了太阳能电池用作激光无线能量和信号的同步传输的可行性,当激光功率密度为  $59.5 \text{ mW}/\text{cm}^2$  时可实现 140 kbps 的通信速率,且当传能激光功率密度较高时,会在一定程度上干扰信号的传输,为激光充电和通信的进一步研究提供了新的方向。

### 参考文献:

- [1] Gui Yonglei, Sun Likai, Cui Hongliang, et al. Large area balanced photodetector with low phase noise [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(2): 284-292. (in Chinese)
- [2] Dong Bing, Tong Shoufeng, Zhang Peng, et al. Prototype design of 20 m underwater wireless blue light LED communication system [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(6): 1451-1458. (in Chinese)
- [3] Boussaada Mohamed, Abdelati Riadh, Yahia Hedi. Emulating and amplifying an I-V panel based on an electrical model of a PV cell [C]//International Renewable Energy Congress, IEEE, 2019: 1-6.
- [4] Chang Hao, Chen Yifu, Zhou Weijing, et al. Damage characteristics of solar cells irradiated by laser and its effect on photoelectric conversion [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(S1): 20200262. (in Chinese)
- [5] Li Juan, Yu Hao, Yu Tiancheng, et al. Design of high efficiency semiconductor laser for wireless energy transmission [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(5): 20210147. (in Chinese)
- [6] Tian Huijun, Liu Qiaoli, Yue Heng, et al. High specific detection rate and high speed photodetector with graphene/n-GaAs

- composite structure [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(1): 206-212. (in Chinese)
- [7] Meng Lixin, Zhao Dingxuan, Zhang Lizhong, et al. Influence of aerooptics on airborne laser communication and its compensation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(12): 3231-3238. (in Chinese)
- [8] Kim Sung-Man, Won Ji-San. Simultaneous reception of visible light communication and optical energy using a solar cell receiver [C]//International Conference on ICT Convergence, IEEE, 2013: 896-897.
- [9] Wang Zixiong, Tsonev Dobroslav, Videv Stefan, et al. Towards self-powered solar panel receiver for optical wireless communication [C]//IEEE International Conference on Communications, IEEE, 2014: 3348-3353.
- [10] Wang Zixiong, Tsonev Dobroslav, Videv Stefan, et al. On the design of a solar-panel receiver for optical wireless communications with simultaneous energy harvesting [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, 33(8): 1612-1623.
- [11] Zhang Shuyu, Tsonev Dobroslav, Videv Stefan, et al. Organic solar cells as high-speed data detectors for visible light communication[J]. *Optica*, 2015, 2(7): 607-610.
- [12] Kong Meiwei. Design and experimental study of underwater wireless optical communication system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese)
- [13] Xiong Mingliang, Liu Qingwen, Wang Gang, et al. Resonant beam communications: Principles and designs [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2019, 57(10): 34-39.
- [14] Sheng Quan, Wang Meng, Ma Hanchao, et al. Continuous-wave long-distributed-cavity laser using cat-eye retroreflectors [J]. *Opt Express*, 2021, 29(21): 34269-34277.
- [15] Fakidis John, Videv Stefan, Haas Harald, et al. 0.5-Gb/s OFDM-based laser data and power transfer using a GaAs photovoltaic cell [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(9): 841-844.