

用于激光无线能量传输的 MPPT 集成仿真系统

杨擎东¹, 杨火木^{1*}, 王 俊^{1,2}, 苟于单¹, 汪 莎¹, 周寿桓¹

(1. 四川大学电子信息学院, 四川 成都 610000;
2. 苏州长光华芯光电技术股份有限公司, 江苏 苏州 215000)

摘要: 在激光无线能量传输(LWPT)中, 传能激光波长、光功率和光电池温度对光电池的输出特性有显著影响, 最大功率跟踪(MPPT)技术可解决上述等因素造成的功率失配问题, 提升系统的 DC-DC 效率。构建了针对 LWPT 的 MPPT 集成仿真系统, 耦合了波长、光功率和温度对 GaAs 光电池输出特性的综合影响, 可以同时分析光电池在功率匹配、功率失配和 MPPT 调制等多种条件下的输出特性。基于该仿真系统, 研究了光电池在不同波长、光功率和温度条件下的物理规律。波长增大时, 在 850 nm 左右转换效率 η_{\max} 达到最大值为 50%, 波长继续增大, 光子能量小于 GaAs 禁带宽度导致 η_{\max} 迅速下降。功率增大时, η_{\max} 基本不变, 最大功率匹配电阻 $R_{L\max}$ 减小。温度升高时, η_{\max} 和 $R_{L\max}$ 均持续下降。此外, 研究了光电池在功率失配时的输出特性, 此时光电池的转换效率对比功率匹配时均有不同程度的下降。根据光电池的输出特性在仿真系统设计了 MPPT 电路, 利用时间扰动算法进行最大功率跟踪。光电池在 MPPT 系统调制后均可工作在功率匹配时的最大功率点, 且光电池能源利用率达到 99.93%。研究结果对用于激光输能有重要指导意义。

关键词: 激光无线能量传输; 最大功率跟踪系统; GaAs 光电池; 光电池特性; 功率匹配; 集成仿真系统

中图分类号: TN249 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210522

MPPT integrated simulation system for laser wireless power transmission

Yang Qingdong¹, Yang Huomu^{1*}, Wang Jun^{1,2}, Gou Yudan¹, Wang Sha¹, Zhou Shouhuan¹

(1. College of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu 610000, China;
2. Suzhou Everbright Photonics Co., Ltd., Suzhou 215000, China)

Abstract: In the laser wireless power transmission(LWPT), the wavelength, laser power and temperature of the power transfer laser have a significant influence on the output characteristics of the photocell. The maximum power point tracking(MPPT) can solve the power mismatch problem under the influence of the above factors and improve the DC-DC efficiency of the system. In this paper, an integrated simulation system of MPPT was built for LWPT. The comprehensive influence of wavelength, laser power and temperature on the output characteristics of GaAs photocell was coupled. The output characteristics of photocell under various conditions such as power

收稿日期:2021-07-29; 修订日期:2021-09-01

基金项目:国家自然科学基金(61975137)

作者简介:杨擎东,男,硕士生,主要从事激光无线能量传输方面的研究。

导师简介:周寿桓,男,教授,主要从事固体激光及应用方面的研究。

通讯作者:杨火木,男,副教授,博士,主要从事固体激光及应用方面的研究。

matching, power mismatch and MPPT modulation could be analyzed at the same time. Firstly, the physical laws of photocell under different wavelength, laser power and temperature were studied. When the wavelength increased, the conversion efficiency η_{\max} reached the maximum value of 50% at about 850 nm, and then η_{\max} decreased rapidly because the photon energy was less than the GaAs band gap. Power increased, η_{\max} was basically unchanged, and the maximum power matching resistance $R_{L_{\max}}$ decreased. The temperature rised, η_{\max} and $R_{L_{\max}}$ decreased continuously. In addition, the output characteristics of the photocell in the case of power mismatch were studied. The conversion efficiency of the photocell decreased to different degrees compared with the power matching. According to the output characteristics of the photocell, the MPPT circuit was designed in the simulation system, and the maximum power tracking was carried out by using the perturb and observation algorithm. After modulation in MPPT system, the photocell can work at the maximum power point of power matching, and the energy utilization rate of photocell can reach 99.93%. The research results have important guiding significance for the practical application of laser energy transmission.

Key words: laser wireless power transmission; maximum power tracking system; GaAs photocell; characteristics of photocell; power matching; integrated simulation system

0 引言

激光是进行无线输能的一种方式,具有方向性好、传输距离远、能量密度高等优点,在应急抢险输电、空间能源网络和能源互联网等领域有广泛的应用前景,近年来发展迅速^[1-5]。光电池具有非线性的输出特性,而激光无线能量传输(Laser Wireless Power Transmission, LWPT)系统中光电池的光强和温度极易变化,造成光电池不能稳定工作在功率匹配状态,这往往会导致整个系统的能源大量损失^[6-7],因此开发针对 LWPT 的最大功率跟踪系统(Maximum Power Point Tracking, MPPT)非常重要。

MPPT 在太阳能领域广泛应用^[8],但太阳能电池的 MPPT 系统不能直接用于 LWPT。主要是因为太阳能 MPPT 系统对算法收敛速度要求不高,但由于大气湍流和跟瞄系统误差的原因, LWPT 系统的光强和温度通常快速变化,对 MPPT 的算法收敛速度提出了很高的要求。因此研发针对激光输能领域的最大功率跟踪系统是目前急需解决的实际问题。

目前在 LWPT 领域的 MPPT 研究一般使用太阳能电池模型进行仿真,无法体现激光照射的实际情况,例如无法设置特定的激光波长,这是 LWPT 与太阳能的最大区别^[9]。在硬件开发上,一般也使用太阳能 MPPT 控制芯片,不利于开发针对 LWPT 的算法和电路^[10]。所以根据实际情况建立参数更灵活、分析能力更强大、输出结果更丰富的仿真系统,对 LWPT 系

统的开发和应用有重要意义。

笔者研究设计和构建了一种针对激光无线能量传输的 MPPT 集成仿真系统,基于对光电池的建模,可以计算六结 GaAs 光电池在不同波长、光功率和温度条件下的输出特性。将光电池与 MPPT 系统模块耦合,可以实现功率匹配、功率失配以及 MPPT 调制后的多种输出参数。基于此仿真系统,对六结 GaAs 光电池在不同波长、光功率和温度条件下的物理规律进行研究,并研究了不同条件下功率失配时光电池的工作情况。基于光电池特性的研究结果,利用仿真系统设计 MPPT 电路,选用时间扰动算法实现 MPPT 仿真。整个仿真系统可以用于研究光电池的在不同条件下的输出特性和开发 MPPT 系统的电路及算法,对于激光无线能量传输的相关研究和应用有重要作用。

1 集成化 MPPT 仿真系统

利用 MATLAB/Simulink 搭建的 MPPT 集成仿真系统如图 1 所示。该模型分为四部分,包括:光电池模型、MPPT 系统、升压(Boost)主电路和数据处理显示模块。光电池选用六结 GaAs 光电池,根据数值计算理论建立光电池模型。MPPT 系统相当于主控芯片,采集光电池模型和 Boost 电路中负载电阻的输出特性,再根据 MPPT 算法,输出占空比变化的 PWM 信号,调制 Boost 电路工作状态。Boost 主电路对光电池进行脉宽调制(PWM),实现功率匹配和最大功率输出。数据处理显示模块处理并显示 MPPT 系统设计

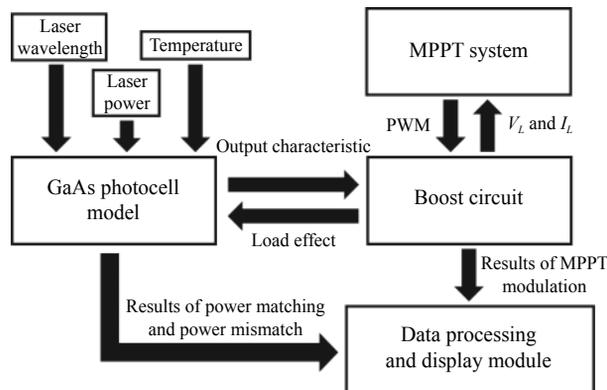


图 1 MPPT 集成仿真系统

Fig.1 MPPT integrated system simulation system

中关注的电路运行参数,系统中的各个模块将在后文详细论述。

1.1 光电电池模型

如果采用软件自带的 PV 模型,无法体现不同激光波长和不同光电电池材料之间的关系,模型还需要体现激光输能中快速变化的光功率和温度条件。

模型引入负载电阻对光电电池输出的影响,可以得到光电电池在功率失配下的输出特性。经过 MPPT 系统调制过后,光电电池由功率失配重新变为功率匹配状态。所以,在光电电池模型内部再建立一个 MPPT 系统对光电电池输出特性影响的模块,可以得到光电电池在经过 MPPT 算法调制后的输出参数,再与功率匹配和失配的输出参数进行实时对比,用于判断算法和电路的正确性。

文中选用光敏面面积为 16 cm² 的六结 GaAs 光电电池进行建模。如图 2 所示,六结光电电池等效于六块单结光电电池串联,因此首先需要对单结的光电电池进行建模,再利用串并联关系得到六结 GaAs 光电电池模型^[11]。

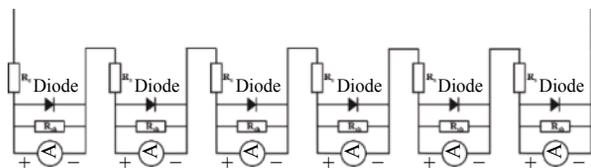


图 2 六结 GaAs 光电电池等效电路图

Fig.2 Equivalent circuit diagram of six-junction gallium arsenide photovoltaic cell

光电电池存在公式 (1) 这样的伏安特性关系:

$$I = I_{sc} \left[1 - \frac{\exp(eV/kT) - 1}{\exp(eV_{oc}/kT) - 1} \right] \quad (1)$$

式中: I 为光电电池输出电流; I_{sc} 为短路电流; e 为单位电荷; V 为光电电池输出电压; V_{oc} 为截止电压; k 为玻耳兹曼常数; T 为光电电池温度^[12]。

因此要想求解公式 (1), 就需要得到不同波长、光功率和温度下的 I_{sc} 和 V_{oc} 。短路电流与内量子效率 IQE 有关^[7]:

$$I_{sc} = IQE(1 - R)P_{laser}S \left(\frac{\lambda}{1204} \right) \quad (2)$$

式中: R 为反射率; P_{laser} 为入射光功率密度; S 为光照面积; λ 为入射波长。当不同激光波长照射光电电池时,由于禁带宽度对不同波长光子吸收的能力不同,内量子效率会发生变化。简化后不同波长下的内量子效率近似值如公式 (3) 所示^[13]:

$$IQE_{(\lambda)} = \frac{\alpha_{\lambda} \cdot L_b}{\alpha_{\lambda} \cdot L_b + 1} \quad (3)$$

式中: α_{λ} 为 GaAs 在波长 λ 时的吸收系数; L_b 为载流子扩散长度。由此可以计算得到不同波长下的内量子效率,实现不同波长时光电电池输出特性的仿真。但内量子效率同样受温度的影响^[12]:

$$IQE_{(T)} = IQE_{(\lambda)} [1 + \sigma_T (T - T_0)] \quad (4)$$

式中: $IQE_{(T)}$ 为不同温度下的内量子效率; $IQE_{(\lambda)}$ 为 $T=300$ K 时,波长为 λ 时的内量子效率; σ_T 为温度修正因子; T_0 为初始温度,此时能够耦合温度对内量子效率的影响。由公式 (2)~(4) 可以得到不同波长、功率和温度下的短路电流。

截止电压满足下列关系式^[12, 14]:

$$\begin{cases} V_{oc(T_0)} = \frac{kT_0}{e} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_s} + 1 \right) \\ V_{oc} = V_{oc(T_0)} - v_{\Delta T} (T - T_0) \end{cases} \quad (5)$$

式中: I_s 为反向饱和电流; $V_{oc(T_0)}$ 为温度为 300 K 时的截止电压; $v_{\Delta T}$ 为截止电压温度系数。不同温度下的反向饱和电流可以表示为^[12]:

$$I_s = I_r \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{n}} \exp \left[\frac{eE_g (T - T_0)}{2kT_0 T} \right] \quad (6)$$

式中: I_r 为常温下反向饱和电流; n 为 GaAs 光电电池的理想二极管因子; E_g 为禁带宽度,其随温度变化表示为^[12]:

$$E_{gT} = E_g - \left(\frac{a \times T^2}{T + b} \right) \quad (7)$$

式中: E_{gT} 为不同温度下的禁带宽度; E_g 为 $T=0$ K 时的

禁带宽度; 式中温度取值范围满足 $0 < T < 10^3$, a 和 b 都是常数。由此可以建立耦合了波长、光功率和温度影响的 GaAs 光电池模型。上述所有参数由表 1 所示。

表 1 光电池模型参数

Tab.1 Photocell model parameters

Parameter	Value	Unit
e	1.602×10^{-19}	C
k	1.38065×10^{-23}	J/K
L_b	10	μm
E_g	1.519	eV
I_r	4.25×10^{-18}	A
$v_{\Delta T}$	1.6×10^{-3}	V/K
σ_T	8×10^{-4}	1/K
a	5.405×10^{-4}	-
b	204	-
n	1	-

上述为单结 GaAs 光电池模型, 再由串并联电路原理建立光敏面面积为 16 cm^2 的六结 GaAs 光电池模型。图 3 为该光电池在温度为 300 K 时, 以波长为 808 nm, 光功率 4 W 激光照射下的仿真和实验测得的 $I-V$ 曲线和 $P-V$ 曲线。光电池的输出电流和电压受掺杂元素种类、掺杂浓度以及厚度等因素的影响, 存在一定的误差。且实际的光电池内部会存在寄生电阻, 与光电池的结构和生产工艺有关, 所以输出电压会存在一定误差。该模型基本能正确表示实际条件

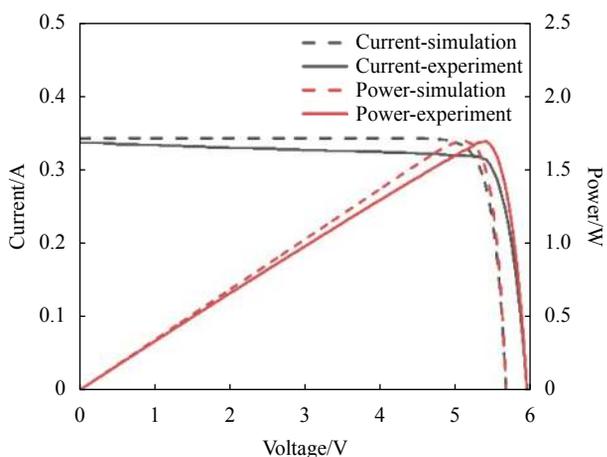


图 3 GaAs 光电池的仿真模型和实验测试的 $I-V$ 曲线和 $P-V$ 曲线
Fig.3 Simulation model of GaAs photocell and $I-V$ curve and $P-V$ curve of test

下光电池的输出特性。 $P-V$ 曲线的最大值为功率匹配时的最大输出功率, 对应的电阻为最大功率匹配电阻 R_{Lmax} 。

光电池模型可以同时得出三组输出结果: 功率匹配下的输出特性、功率失配下的输出特性以及 MPPT 调制后的输出特性。再结合 Boost 电路中的负载电阻输出特性, 一共得到四组输出结果。该系统可以对激光无线能量传输系统中, MPPT 算法和电路设计的正确性进行实时判断, 满足开发用于激光输能的快速响应 MPPT 系统的需求。

1.2 MPPT 控制系统

MPPT 系统主要实现运行最大功率跟踪的算法和输出 PWM 信号的功能, 系统需要采集负载输出的电压 V_L 和电流 I_L 。此模型可以灵活地更改 MPPT 算法, 且由于文中使用单块六结光电池, 不存在串联导致的多峰效应, 所以选择时间扰动算法 (Perturband Observation, P&O)。P&O 算法通过判断光电池输出的电压和功率在 $P-V$ 曲线上的位置, 计算 PWM 信号占空比是增大还是减小, 从而实现 MPPT 控制, 时间扰动法算法调制判断方法。算法进行判断的依据由下列公式确定^[15]:

$$\begin{cases} P(k) = I(k) \times V(k) \\ \Delta P(k) = P(k) - P(k-1) \\ \Delta V(k) = V(k) - V(k-1) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $I(k)$ 、 $V(k)$ 和 $P(k)$ 分别表示第 k 次采集光电池的输出电流、电压和功率; $\Delta V(k)$ 和 $\Delta P(k)$ 分别表示第 k 次和第 $k-1$ 次的差值。对上述结果进行比较判断, 得出算法下一步 $V(k+1)$ 的调制方向^[15]:

- (1) $\Delta P(k) > 0, \Delta V(k) > 0$ 时, $V(k+1) = V(k) + dV$;
- (2) $\Delta P(k) > 0, \Delta V(k) < 0$ 时, $V(k+1) = V(k) - dV$;
- (3) $\Delta P(k) < 0, \Delta V(k) > 0$ 时, $V(k+1) = V(k) - dV$;
- (4) $\Delta P(k) < 0, \Delta V(k) < 0$ 时, $V(k+1) = V(k) + dV$ 。

式中: dV 表示每次调制时电压 V 的变化量。

1.3 Boost 电路

如图 4 所示是 Boost 电路拓扑结构, Boost 电路是一种 DC-DC 升压电路, 主要包含升压电感、升压电容、MOSFET 和二极管。将 PWM 信号接入 MOSFET 的栅极, 控制其导通和截止, 从而实现 Boost 电路的两种工作状态^[16]。在 PWM 调制时, 电路中的升压电感 L 实现充电和放电, 相当于在光电池和负载之间串

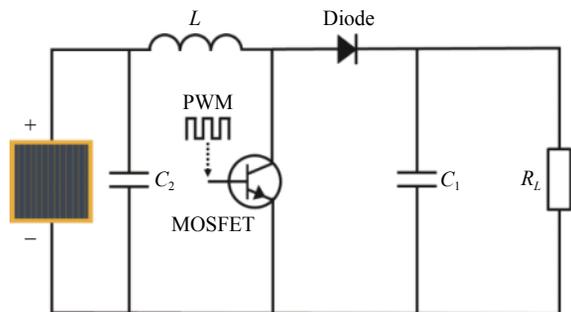


图 4 Boost 电路拓扑结构

Fig.4 Structure of Boost circuit topology

联一个正向电流源,实现升压。电容 C_1 和光电池并联,在 MOSFET 导通时,给负载提供电压。电容 C_2 是滤波电容。

Boost 电路的调制能力和效果主要由 L 和 C_1 决定,二者分别满足下式^[15]:

$$L = \frac{U_{in}(1-D)D}{f_s \Delta I_0} \quad (9)$$

$$C_1 = \frac{U_{in}(1-D)D}{8Lf_s^2 \Delta U_0} \quad (10)$$

式中: U_{in} 为光电池输入电压; D 表示 PWM 信号的占空比; f_s 为开关管工作频率,同时也是 PWM 信号的频率; ΔI_0 为纹波电流,通常取 20%~40%; ΔU_0 为纹波电压。这样根据具体的芯片参数和输出特性要求可以得出电路元器件的参数。同时电路中光电池输出电压和负载电压满足公式(11)^[15]:

$$U_{in} = (1-D)U_{out} \quad (11)$$

该模型可以灵活更改 L 和 C_1 的参数,对于 MPPT 系统设计有重要的参考价值。

1.4 数据处理及显示

对于文中的激光无线能量传输的 MPPT 集成仿真系统,同时有四组信号输出:功率匹配和功率失配时光电池输出特性、MPPT 调制后光电池和负载输出特性。四组信号再分为电流、电压、输出功率和转换效率,实现各种工作状态的对比。经过后处理,将所有结果进行显示,判断 MPPT 系统的工作效果。

2 仿真结果和讨论

2.1 光电池输出特性

为了研究激光输能系统中,六结 GaAs 光电池在

不同条件下的工作状态,以及为了确定 MPPT 系统的设计标准,先对不同的波长、光功率以及温度条件下光电池的输出特性进行仿真。

假设标准工作条件为:入射波长 $\lambda=808$ nm,入射光功率密度 $P_{laser}=250$ mW/cm²,照射面积 $S=16$ cm²,总的入射光功率为 $P_{in}=4$ W,温度 $T_0=300$ K。为了研究光电池在不同条件下的输出特性,以及最大功率匹配点的变化规律,分别将光电池接收的激光波长、光功率以及温度在 2.2 s 的时间内快速变化。仿真时只改变单个条件,其余均为假设的标准工作条件。2.2 s 内波长变化范围为 700~900 nm,间隔为 20 nm;光功率变化范围为 3~5 W,间隔为 0.2 W;温度变化范围为 280~380 K,间隔为 10 K。后续将对不同条件下的输出特性进行分析。

如图 5 为只改变光功率的仿真结果,集成仿真系统同时输出了四组结果:功率匹配时光电池的输出特性、功率失配时光电池的输出特性、MPPT 调制后光电池的输出特性和 MPPT 调制后负载电阻的输出特性。对光电池在不同条件下电压、电流、电阻以及转换效率进行分析,研究其物理规律和 MPPT 工作效果。

首先对功率匹配的情况进行分析。如图 6(a)所示,2.2 s 内波长从 700~900 nm,光电池转换效率逐渐增大至 50% 左右的最大值,然后开始迅速下降,同时,波长接近 900 nm 时,最佳匹配电阻也迅速增大。因为 GaAs 光电池对波长大于 850 nm 的激光吸收率急剧下降,并在 900 nm 左右截止,所以波长对转换效率的影响主要是体现在由于光子能量的变化,从而导致光电池产生的载流子数量变化,最终体现为输出电流的上升和下降。由图 6(b)所示,2.2 s 内光功率从 3~5 W,光电池转换效率基本恒定在 45%。 V_{max} 略微上升, I_{max} 与光功率呈线性增大的关系, R_{max} 逐渐从 18 Ω 减小至 11 Ω ,所以光功率增大主要是增大输出电流和减小最大功率匹配电阻。如图 6(c)所示,2.2 s 内温度从 280~380 K,转换效率呈下降趋势,从 50%~39% 左右。分析可知,主要是由于温度上升,GaAs 光电池的禁带宽度降低,导致 V_{max} 下降,但同时可以激发更多的光生载流子。总体而言,电压下降占主导,使得整个转换效率降低。同时随着温度的增大, R_{max}

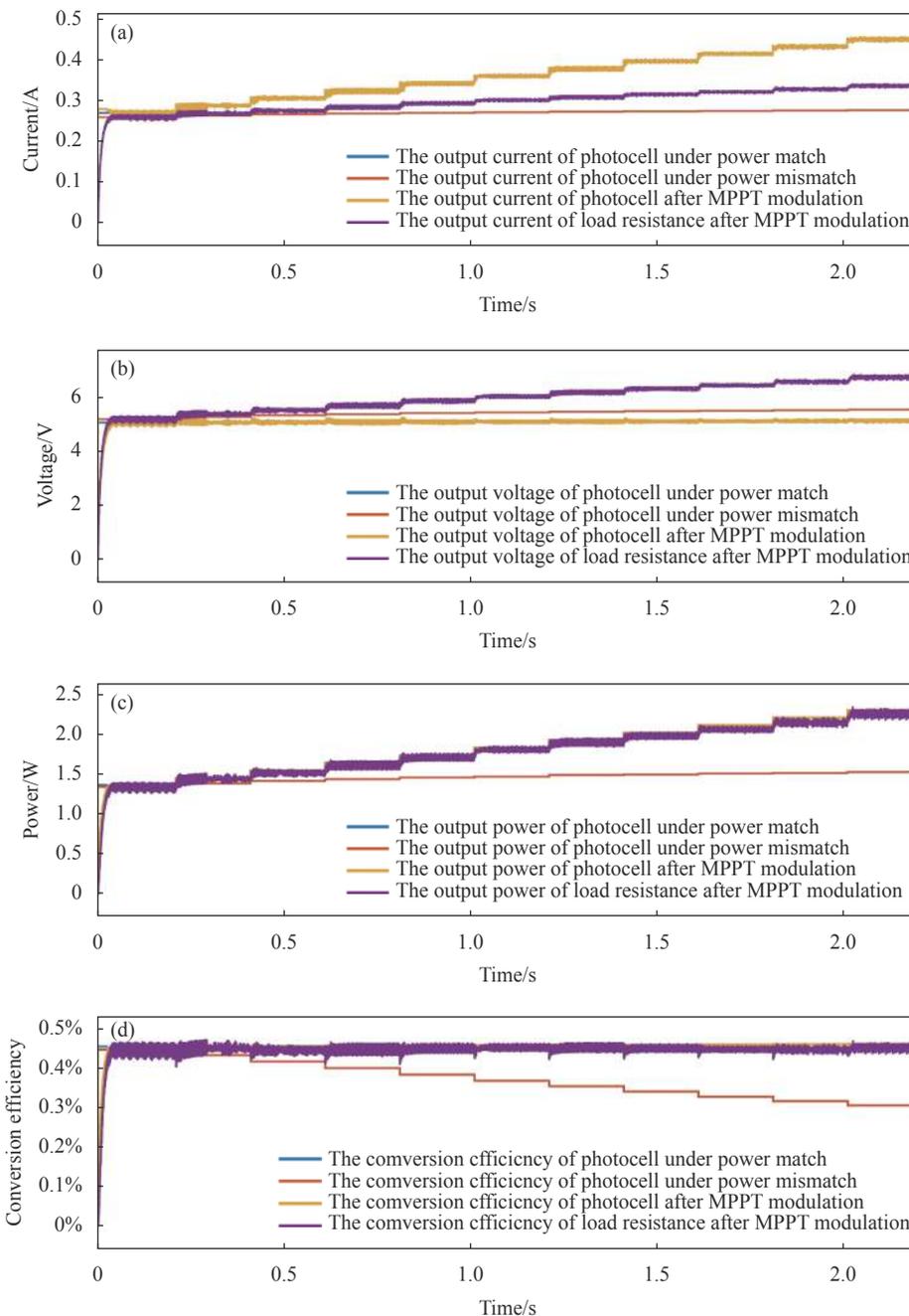


图 5 激光功率变化时 MPPT 集成仿真系统的结果。(a) 输出电压; (b) 输出电流; (c) 输出功率; (d) 转换效率

Fig.5 Results of MPPT integrated simulation system under only changing the laser power. (a) Output voltage; (b) Output current; (c) Output power; (d) Conversion efficiency

从 15 Ω 减小至 11 Ω。

由上述结果分析可知, 光电池的最大功率匹配电阻是随波长、光功率以及温度变化的, 所以需要研究不同情况下功率失配时的输出特性。上文的结果中, 除了波长接近 900 nm 的情况下时功率匹配电阻突然增大, 其余电阻均在 20 Ω 以内。由 Boost 电路设计原

理可知, 负载电阻 R_L 要略大于光电池的最佳匹配电阻, 才可以实现升压。因此假设 $R_L=20 \Omega$ 且恒定不变, 研究功率失配时光电池输出特性。

如图 7(a) 所示, 对比图 6 的相同条件下功率匹配时的仿真结果。由于负载电阻大于最大功率匹配电阻, 转换效率从 40% 以上下降至 35% 左右。

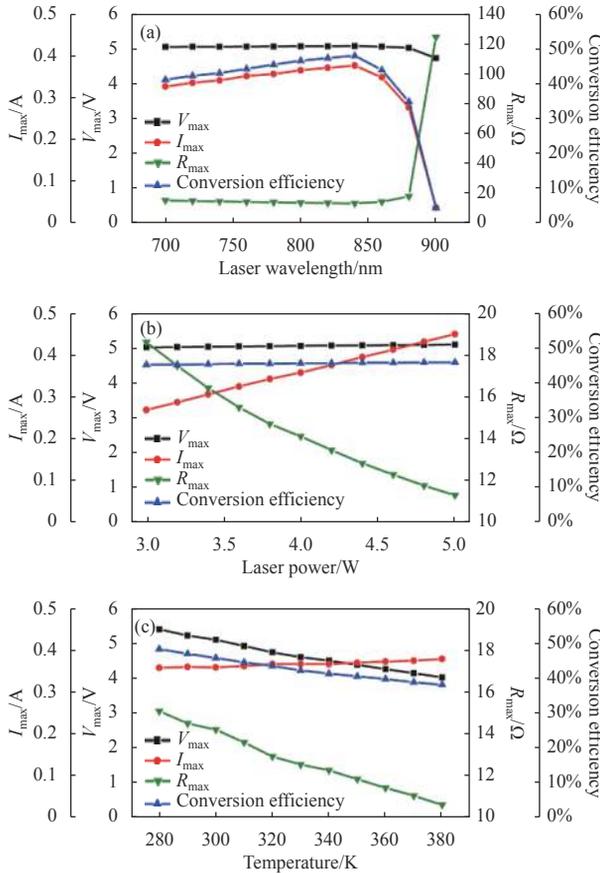


图 6 功率匹配时光电池输出特性。(a) 只改变波长, 范围 700~900 nm; (b) 只改变光功率, 范围 3~5 W; (c) 只改变温度, 范围 280~380 K

Fig.6 Output characteristics of photocell with power matching. (a) Only changing the wavelength in the range of 700-900 nm; (b) Only changing the laser power in the range of 3-5 W; (c) Only changing the temperature in the range of 280-380 K

主要原因是负载电阻和光电电池的伏安特性曲线的交点在最大功率点的右侧, 电流急剧降低, 输出功率减小。同样如图 7(b) 和图 (c), 由于功率失配的原因, 转换效率下降到 30% 左右甚至更低, 所以在 LWPT 的实际应用中, 由于工作条件的变化, 如果不使用

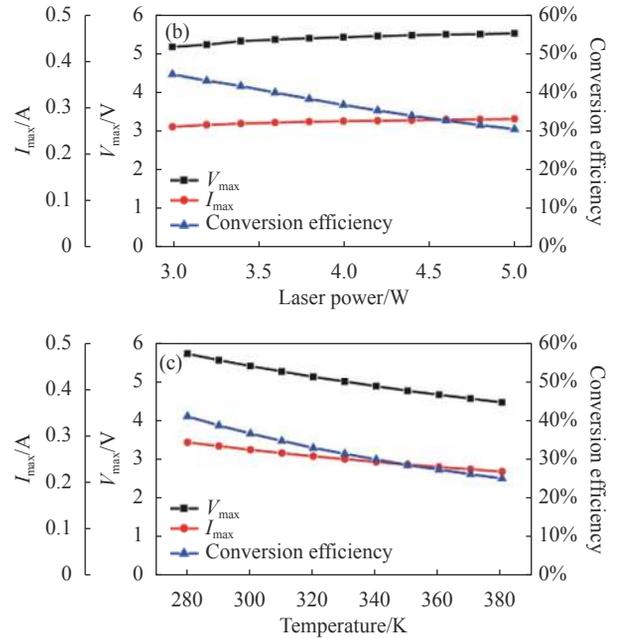
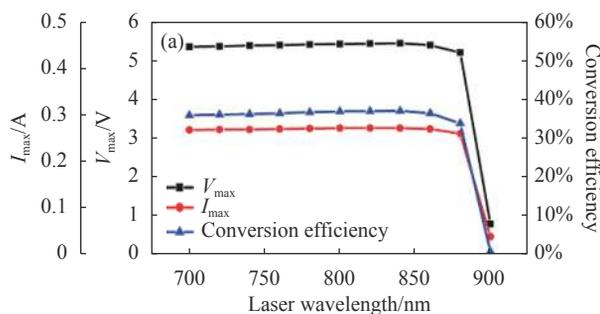


图 7 功率失配时光电池输出特性。(a) 只改变波长; (b) 只改变光功率; (c) 只改变温度

Fig.7 Output characteristics of photocell with power mismatching. (a) Only changing the wavelength; (b) Only changing the laser power; (c) Only changing the temperature

MPPT 系统, 光电池产生的能量被大量浪费, 将会对整个系统的转换效率产生严重的影响。

2.2 MPPT 系统仿真结果与分析

根据光电池在不同条件下的输出特性, 由公式 (9) 和 (10), 设计 Boost 电路的各项参数如表 2 所示。

表 2 Boost 主电路参数

Tab.2 Boost main circuit parameters

Parameter	Value	Unit
L	350	μF
C_1	30	μH
C_2	100	μH
R_L	20	Ω

如图 6 所示, 激光波长、光功率和温度同样在 2.2 s 的时间内变化, 得出如图 8 所示 MPPT 系统调制后光电的输出特性。除了图 8(a) 中, 由于波长将近 900 nm 时, 最大功率匹配电阻迅速增大至 120 Ω , 导致 MPPT 电路调制失效, 其余的条件下的 V_{max} 、 I_{max} 以及转换效率均和功率匹配的结果基本相同。

所以, 经过 MPPT 调制后, 光电池工作参数和功

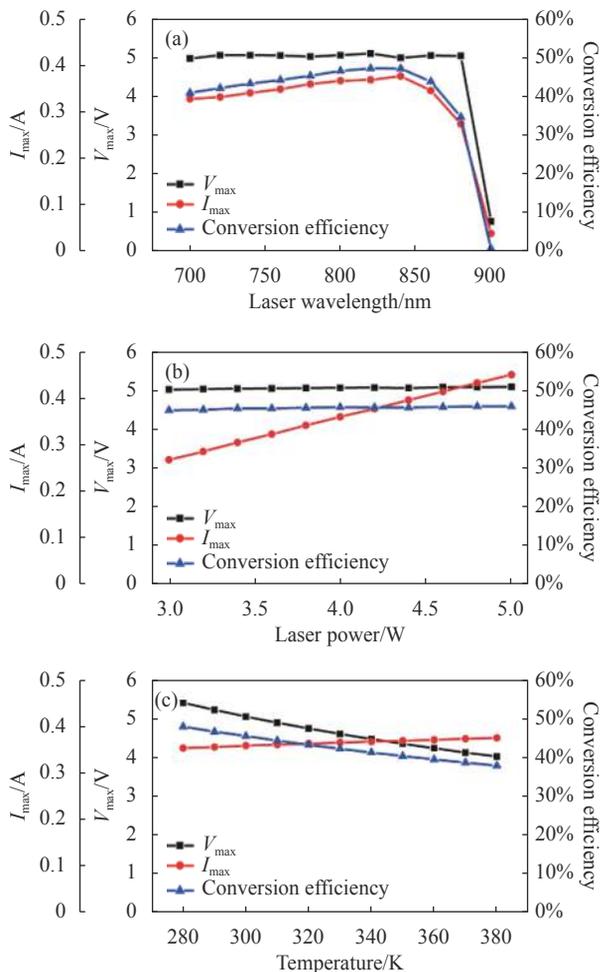


图 8 MPPT 调制后光电输出特性。(a) 只改变波长; (b) 只改变光功率; (c) 只改变温度

Fig.8 Output characteristics of MPPT modulated photocell. (a) Only changing the wavelength; (b) Only changing the optical power; (c) Only changing the temperature

率匹配时保持一致。对于负载电阻,由于升压电路的作用,负载电阻电压升高,电流降低,最终负载电阻的输出功率也达到光电的最大输出功率,成功实现 MPPT 调制。采用上述算法和电路设计得到功率匹配时光电的输出功率 P_{match} 以及 MPPT 调制后的输出功率 P_{MPPT} 。将上述结果进行比较:

$$\eta_{eff} = \frac{P_{match}}{P_{MPPT}} \quad (12)$$

可以得出光电的能量利用率 η_{eff} 可达 99.93%。

3 结 论

基于六结 GaAs 光电,文中开发了针对 LWPT 的 MPPT 集成仿真系统。利用该系统研究了不同激

光波长、光功率和温度对六结 GaAs 光电输出特性的影响。光电在波长 850 nm 时达到最大转换效率 50%,随着波长的增大,对激光的吸收率下降,转换效率迅速降低。光功率对转换效率影响很小,但最大功率匹配电阻 R_{Lmax} 从 18 Ω 下降到 11 Ω 。温度升高,转换效率从 48% 下降至 38%, R_{Lmax} 从 15 Ω 下降至 10 Ω ,所以波长、光功率和温度均对功率匹配有重大的影响。然后研究了光电在波长、光功率和温度变化时,功率失配条件下的输出特性。根据 Boost 电路原理,设置负载电阻为 20 Ω ,由于负载电阻不变,光电时刻处于功率失配的工作状态,转换效率都下降 15% 以上,严重影响 LWPT 系统的应用。最后基于对六结 GaAs 光电特性的研究,设计 MPPT 系统电路参数,使用时间扰动算法,进行 MPPT 调制,使不同条件下的光电均工作在最大功率点。在 MPPT 系统的调制范围内,光电的能量利用率达到功率匹配时的 99.93%,证明了该仿真系统的可行性。

相较国内外其他针对激光无线能量传输的最大功率跟踪的仿真系统,该模型更能体现激光实际照射条件下的光电输出特性,并且可以同时实现光电在功率匹配、功率失配和 MPPT 调制后的输出特性对比。对上述结果的分析利于 MPPT 系统的算法和电路的设计、改进和优化,对于激光无线能量传输的应用提供有力参考价值。

参 考 文 献:

- [1] Hui S, Zhong W, Lee C. A critical review of recent progress in mid-range wireless power transfer [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(9): 4500-4511.
- [2] Sprangle P, Hafizi B, Ting A, et al. High-power lasers for directed-energy applications [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(31): F201-F209.
- [3] Behringer M, Eberhard F, Herrmann G, et al. High power diode lasers: technology and application in Europe[C]//Proceedings of SPIE, 2003, 4831: 4-13.
- [4] Li J, Yu H, Yu T, et al. Design of high efficiency diode laser module for wireless power transmission [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(5): 20210147. (in Chinese)
- [5] Huo H, Gou Y, Yang Q, et al. Design of beam homogenizing device at receiving end for laserwireless power transmission[J/OL]. *Infrared and Laser Engineering*. (2021-04-

- 02)[2021-08-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1261.TN.20210402.1347.004.html>. (in Chinese)
- [6] Mukherjee J, Wulfken W, Hartje H, et al. Demonstration of eye-safe (1550 nm) terrestrial laser power beaming at 30 m and subsequent conversion into electrical power using dedicated photovoltaics [C]//IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2013: 1074-1076.
- [7] Li B, Li X. Numerical simulation of photovoltaic cell temperature field of laser power beaming [J]. *Laser Technology*, 2017, 41(4): 537-544. (in Chinese)
- [8] Ali A, Almutairi K, Malik M Z, et al. Review of online and soft computing maximum power point tracking techniques under non-uniform solar irradiation conditions [J]. *Energies*, 2020, 13(3256): 1-37.
- [9] Guo Ludeng, Zhao Changming, Wang Yunshi. Research on closed-loop control of high-efficiency laser wireless power transmission system [J]. *Laser Technology*, 2021, 45(5): 576-584. (in Chinese)
- [10] Tao C, Zhang D, Zhou Y, et al. Experimental research on the application of laser wireless energy transmission storage energy [J]. *Laser Journal*, 2021, 42(7): 18-22. (in Chinese)
- [11] Sharma P, Wilkins M, Schriemer H, et al. Modeling nonuniform irradiance and chromatic aberration effects in a four junction solar cell using SPICE [C]//2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2014: 3293-3297.
- [12] Nelson J. The Physics of Solar Cells [M]. London: Imperial College Press, 2003.
- [13] Yang W, Ma Zh, Tang H, et al. Internal quantum efficiencies of flat-band solar cells [J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science)*, 2008, 14(1): 74-79.
- [14] Jiang Houman, Cheng Xiang'ai, Li Wenyu. Response of silicon p-n junction solar cell to DF laser irradiation [J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2003, 15(1): 21-24. (in Chinese)
- [15] Wang Ch. Research on Tracking algorithm of maximum power point of PV array under partial shading condition [D]. Ji'nan: Shandong University, 2020. (in Chinese)
- [16] Mahmood M H, Ali I I, Ahmed O A. Design and implementation of intelligent MPPT based on FPGA for PV system[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 881(1): 01213.