

用于无线能量传输的高效率半导体激光器设计

李娟^{1,2}, 俞浩^{1,2}, 虞天成^{1,2}, 苟于单^{1,2}, 杨火木¹, 王俊^{1,2}

(1. 四川大学电子信息学院, 四川成都 610065;
2. 苏州长光华芯光电技术股份有限公司, 江苏苏州 215163)

摘要: 激光无线能量传输在无人机、卫星空间站和探月机器人供电等方面具有潜在应用前景, 其系统效率成为了其应用的关键瓶颈。为了提高激光无线能量传输系统发射端激光器的电光转换效率、接收端光斑均匀性和有效窗口收光比, 提出了用于激光无线能量传输发射端的高效率半导体激光器设计方案。基于合束效率较高的空间合束设计了一套高功率高效率半导体激光系统, 接收端光斑不均匀度可优化至 0.207, 有效窗口内收光比大于 94%。搭建了千瓦级激光无线能量传输实验装置, 发射端半导体激光系统直接输出矩形光斑, 与矩形光电池匹配, 提高了电池阵布片率。利用多光束指向性可调节特点, 优化了接收端光斑均匀度, 有利于提高接收端电池的转换效率及简化电源管理。该设计与研究为激光无线能量传输的实际应用提供了借鉴意义。

关键词: 激光无线能量传输; 激光匀化; 半导体激光器; 空间合束

中图分类号: TN249 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210147

Design of high efficiency diode laser module for wireless power transmission

Li Juan^{1,2}, Yu Hao^{1,2}, Yu Tiancheng^{1,2}, Gou Yudan^{1,2}, Yang Huomu¹, Wang Jun^{1,2}

(1. College of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
2. Suzhou Everbright Photonics Co., Ltd., Suzhou 215163, China)

Abstract: Laser wireless power transmission in unmanned aerial vehicle, satellite station and lunar robot power supply has potential application prospect, whose efficiency becomes the key to the application bottleneck. In order to improve the electro-optic conversion efficiency of the transmitter, the spot uniformity and the effective power ratio in window at the receiver, a design scheme of high efficiency diode laser for the transmitter of laser wireless power transmission was proposed. A high power and high efficiency diode laser system was designed, which is based on space combination with high efficiency, what's more, the unevenness of the intensity at the receiving end can be optimized to 0.207, and the power ratio in the effective window is more than 94%. A laser wireless power transmission experimental device was built, whose power is over kilowatt, and the rectangular spot was outputted directly by diode laser system, which is matched with rectangular photovoltaic cell, thus the battery array layout rate was improved. The feature of multi-beam modulation was used to improve uniformity of the intensity, which is beneficial to improve the optic-electro conversion efficiency of battery and simplify the power management at the receiving end. The design and research provide reference for the practical application of laser wireless power transmission.

Key words: laser wireless power transmission; laser homogenization; diode laser; space combination

收稿日期: 2021-03-08; 修订日期: 2021-04-07

作者简介: 李娟, 女, 硕士生, 主要从事激光无线能量传输发射端半导体激光模块设计方面的研究。

导师简介: 王俊, 男, 特聘教授, 博士生导师, 主要从事半导体激光器方面的研究。

0 引言

激光无线能量传输 (LWPT) 指不依赖能源传输线, 将激光束传输到指定位置, 利用光电转换模块将光能转换成电能, 给目标机器供电使其正常运行^[1]。LWPT 的研究重点是提高系统效率, 其中影响效率的主要因素包括激光器的电光转换效率和光束质量、传输效率以及接收电池的光电转换效率等^[2-3]。半导体激光器的电光效率是所有激光器中最高的 (可高达 70% 以上)^[4-5], 波长可依据电池需求进行设计, 同时半导体激光器的亮度每 8 年提升 1 个量级^[6], 以半导体激光器作为 LWPT 发射端的光源具有极大优势。

2013 年美国海军实验室^[7]进行了动态 LWPT 实验, 使用中心波长为 1.07 μm、输出功率为 2 kW 的单模光纤激光器, 接收端光电池输出功率范围为 160~190 W。光纤激光器的电光转换效率低, 输出光束在接收端呈高斯分布, 光斑均匀性差, 导致 LWPT 系统效率低^[8]。实验中光电池阵列为复杂环形设计, 阵列尺寸小于光斑尺寸, 电池阵布片率较低。2017 年山东航天电子技术研究所^[9]使用中心波长为 808 nm 的光纤耦合半导体激光器进行 LWPT 实验, 传输功率为 12.1 W。常规半导体激光器光纤耦合损耗在 5%~20% 之间^[10], 其输出光束在接收端呈超高斯分布, 空间强度分布不均匀。实验中在接收端加入菲涅耳透镜和梯形二次聚光器对光束进行整形, 将圆形光斑转换成方形, 与方形光电池形状完全匹配, 提高了接收端光斑均匀性。在光电池接收功率一致的情况下, 接收端光电池的光电转换效率提升范围为 6%~7%。计入菲涅耳透镜和梯形聚光镜产生的光学损耗后, 接收端光电池的光电转换效率提升范围仅 2%~3%。在接收端额外加入光学元件, 光学损耗较大、价格昂贵且操作复杂。

为了提高 LWPT 系统发射端的电光转换效率、接收端光斑均匀性以及有效窗口收光比, 基于空间合束设计了一款高功率高效率半导体激光系统。利用长焦长柱透镜进行二次准直并直接输出, 无需光纤耦合, 接收端光斑形状与矩形电池相匹配, 提高了电池阵布片率。利用多光束指向性可调节的特点将接收端光斑的不均匀度优化至 0.207。搭建了千瓦级 LWPT 实验装置, 输出功率为 1162 W, 接收端电池有效窗口

内功率占比大于 90%, 不均匀度约为 0.327。该研究为高功率高效率 LWPT 的实际应用提供了借鉴意义。

1 理论基础

LWPT 系统由激光发射模块、接收模块以及其他辅助模块组成。发射端输出光束与接收端电池的匹配优化设计可提高 LWPT 效率, 选用激光器的主要考量因素包括激光器的输出功率、电光效率、中心波长等。激光在大气中传输存在由吸收、散射、折射等引起的损耗, 在大气窗口中 LWPT 的常用波长主要有 808 nm、1064 nm^[11]。不同材料的光伏电池在不同波长的激光照射下的光电转换效率不同^[12], 以 GaAs 材料为体系的新型光电池与中心波长为 808 nm 的激光相匹配, 其光电转换效率远大于传统 Si 材料体系光电池 (1064 nm)。此外, 中心波长为 808 nm、条宽为 350 μm 的半导体激光单管的效率可高达 65%, 功率接近 20 W^[13-14]。半导体激光光源快轴和慢轴方向的光束质量差值大, 需要通过合束来平衡光束质量、提高输出功率。半导体激光的合束方法主要有空间合束、偏振合束和光谱合束。空间合束将多个子光束在空间上进行叠加来提高功率, 其合束效率在三种合束方法中最高。

通过前期研究表明, 优异的接收端光斑均匀度可以有效提升光电池的光电转换效率, 接收端光斑强度分布不均匀将导致光电池转换效率和负载传输效率降低^[11]。通常对于光场的不均匀度以光场各点的标准差和平均值的比值 ΔE 作为其衡量标准^[15]:

$$\Delta E = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^n (\chi_j - \bar{X})^2 / n}}{\bar{X}} \quad (1)$$

式中: n 表示光斑分为 n 个辐照度点; χ_j 为光斑各点的辐照度值; \bar{X} 为光斑 n 个点的辐照度均值。为提高电池阵布片率, 简化电路, 将接收端光电池设计成矩形, 电池尺寸为接收端光斑的有效窗口。以高斯光束为例, 如图 1(a) 所示, 分别对峰值功率 10%、30%、50% 处光束的宽度所对应的矩形窗口内的光束不均匀度进行分析, 其对应功率占比分别为 92%、74%、56%, 光斑不均匀度分别为 0.853、0.458、0.281。文中也通常会采用以上评判方式对指定光束的有效窗口内的不均匀度进行分析。

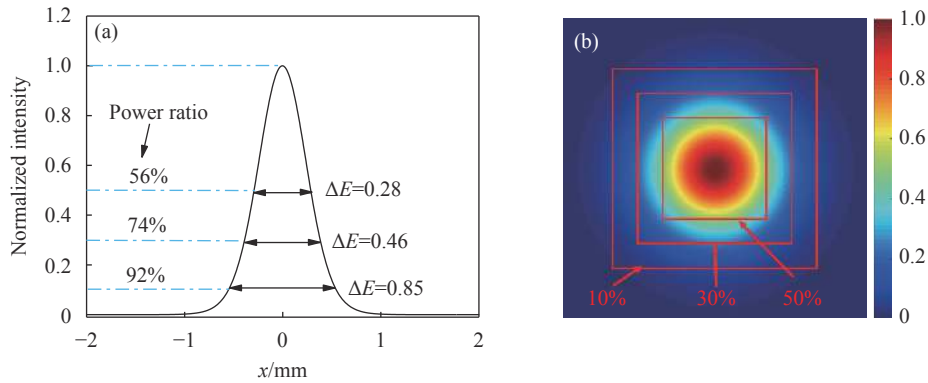


图 1 高斯光束的远场光斑和光强分布曲线。(a) 高斯光束的远场光强分布曲线; (b) 高斯光束的远场光斑

Fig.1 The far-field spots and intensity distribution curve of Gaussian beam. (a) The far-field intensity distribution curve of Gaussian beam; (b) The far-field spots of Gaussian beam

2 用于 LWPT 发射端半导体激光模块的设计

短距离能量传输半导体激光器基于单管半导体激光芯片, 利用空间合束原理进行设计, 其优点是保持一定光束质量的同时获得高功率、高效率输出。为实现高功率高效率 LWPT, 选用中心波长为 808 nm、条宽为 350 μm 的单管, 12 个芯片在快轴方向进行空间合束, 得到单个子模块在快轴方向的光参数积 (BPP_{FA}) 为 6.72 mm·mrad, 慢轴方向的光参数积 (BPP_{SA}) 26.95 mm·mrad。使用 8 个子模块分别在快轴方向和慢轴方向进行空间合束, 8 个子模块的输出光束可根据接收端光斑需求进行一定范围的调节。使用焦距分别为 1.1 m 快轴柱透镜 (FA cylindrical lens) 和 1.6 m 的慢轴柱透镜 (SA cylindrical lens) 分别对快轴和慢轴方向进行二次准直, 激光系统光路如图 2 所示。

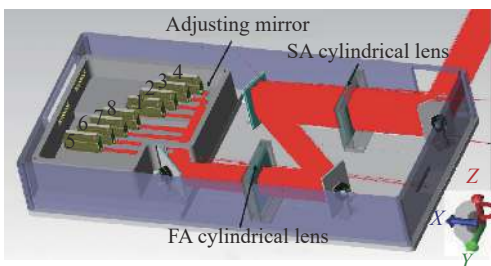


图 2 激光系统光学仿真

Fig.2 Optical simulation of laser system

影响接收端光斑不均匀度的因素有: 光束填充因子、接收端光斑尺寸定义、空间合束反射镜的角度偏转、准直透镜的离焦距离等。空间合束填充因子过小将导致 8 个子模块输出光斑的间距变大, 均匀度降低, 每个模块的输出光束在接收端的光场分布如

图 3(a) 所示。填充因子过大将导致调节反射镜遮挡光束, 降低合束效率。以峰值强度的 10%、30%、50% 尺寸作为评判有效窗口尺寸的标准时, 对应光斑尺寸分别为 0.45 m×0.56 m、0.44 m×0.49 m、0.40 m×0.46 m, 光场分布如图 3(b) 所示。考虑到接收端光电池尺寸、光斑不均匀度和功率需求的平衡, 以峰值强度的 30% 尺寸作为实验的有效窗口尺寸, 有效窗口内功率占比约为 94%。下文仿真中皆以 0.44 m×0.49 m 定义为接收端光斑为有效窗口尺寸。

多个子模块输出光束的调节、准直透镜的离焦以及每个子模块输出功率的控制, 均可对接收端光斑均匀性进行一定程度的优化。反射镜的角度偏转会导致远场相邻光斑重叠或间距变大, 影响光束空间强度分布。

反射镜以图 2 中的 z 轴为中心每偏转 0.01°, 接收端光平面上单个光斑的移动距离为 5 mm。由反射镜的调节精度限制, 每个光束偏转角度范围 -0.02°~0.02°, 间隔 0.01°, 通过调节 8 个子模块输出光束的角度偏转来匀化光斑。8 个子模块输出光束分别以不同偏转角度进行优化组合得到的不均匀度分布排列如图 4(a) 所示, 8 个模块输出光束偏转角度分别为 -0.02°, -0.01°, 0.01°, 0.02°, -0.02°, -0.01°, 0.01°, 0.02° 时, 光斑不均匀度达到最小为 0.212, 8 个子模块输出光束偏转角度分别为 0.02°, -0.02°, 0.02°, -0.02°, 0.02°, -0.02°, 0.02°, -0.02° 时, 光斑不均匀度达到最大为 0.332。光斑不均匀度达到最小时的光场分布如图 4(b) 所示, 边缘光斑往中间聚拢, 8 个光斑间距变小, 空间强度差值最小。光斑不均匀度达到最大时的光场分布如图 4(c) 所示, 相邻光斑两两叠加, 空间强

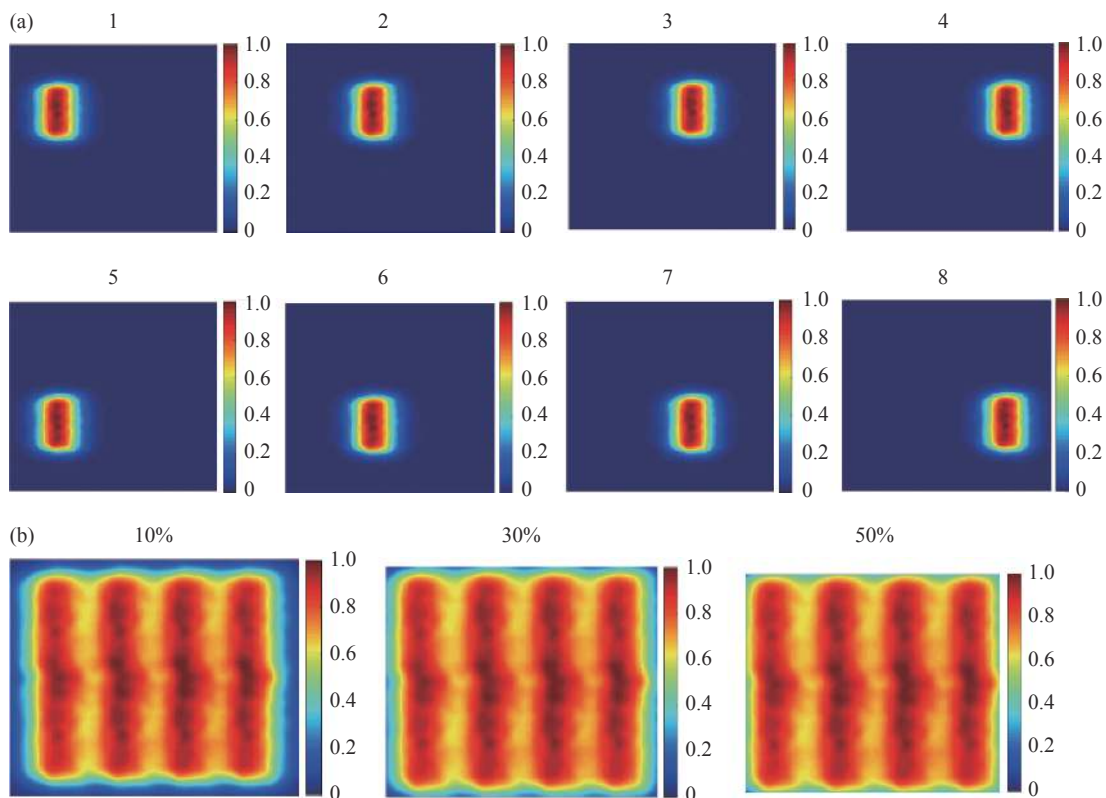


图 3 接收端的光学仿真。(a) 8 个子模块输出光束的光场分布; (b) 激光系统输出光束在不同尺寸内的光场分布

Fig.3 Optical simulation at the receiver. (a) Optical field distribution of output beams from eight modules respectively; (b) Optical field distribution of laser system in different sizes

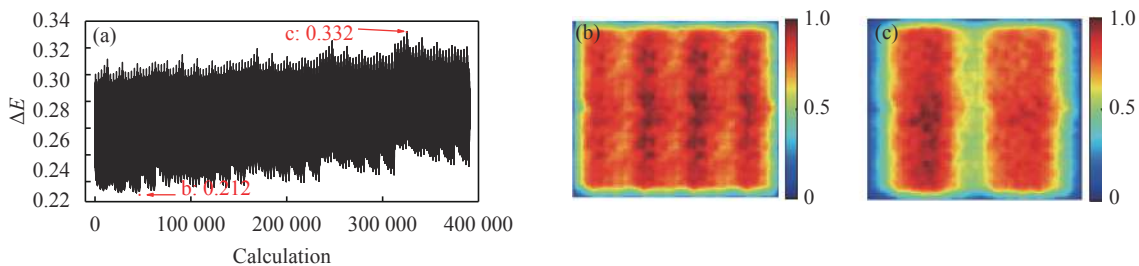


图 4 角度偏转对接收端光场分布的影响。(a) 8 个子光束分别以不同偏转角度进行优化组合得到的不均匀度分布; (b) 光斑不均匀度达到最小值时的光场分布; (c) 光斑不均匀度达到最大值时的光场分布

Fig.4 The effect of angle deflection on the optical field distribution at the receiver. (a) The unevenness distribution was obtained by optimizing the combination of 8 modules with deflection angles respectively; (b) Optical field distribution when the spot unevenness reaches the minimum; (c) Optical field distribution when the spot unevenness reaches the maximum

度差值最大。

接收端光斑空间强度分布受柱透镜的离焦距离影响,以快轴柱透镜为参考面前后移动透镜,沿光束传播方向为正。均匀度随透镜移动变化如图 5(a) 所示,柱透镜从出光口沿着光束传播方向移动,不均匀度先减小后增大,功率占比随着移动距离的增大而增大。当柱透镜在出光口处,8 个光斑往中间聚集,部分光斑重叠,空间强度差值变大,不均匀度为

0.227, 光场分布如图 5(b) 所示。当柱透镜离焦距离为 -0.02 m 时,8 个光斑交叠部分变少,空间强度差值变小,光斑不均匀度达到最小为 0.218,如图 5(c) 所示。当透镜继续往光束传播方向移动,光斑开始分散,相邻光斑间距越大,光斑不均匀度增大,光场分布如图 5(d) 所示。

激光束远场空间强度分布为中间强边缘弱,分别调节每个子模块的输出功率可降低接收端光斑不均

匀度。每个子模块功率变化范围 135~165 W, 间隔 6 W。8 个模块分别以不同输出功率进行优化组合得到的不均匀度分布排列如图 6(a) 所示, 8 个模块输出功率分别为 165 W, 157.5 W, 157.5 W, 165 W, 165 W, 157.5 W, 157.5 W, 165 W 时, 光斑不均匀度达到最小为 0.207。

8 个模块输出功率分别为 135 W, 165 W, 165 W, 135 W, 135 W, 165 W, 165 W, 135 W 时, 光斑不均匀度达到最大为 0.241。光斑不均匀度达到最小时的光场分布如图 6(b) 所示, 中间 4 个子模块输出功率略低于边缘, 空间强度差值最小。光斑不均匀度达到最大时的

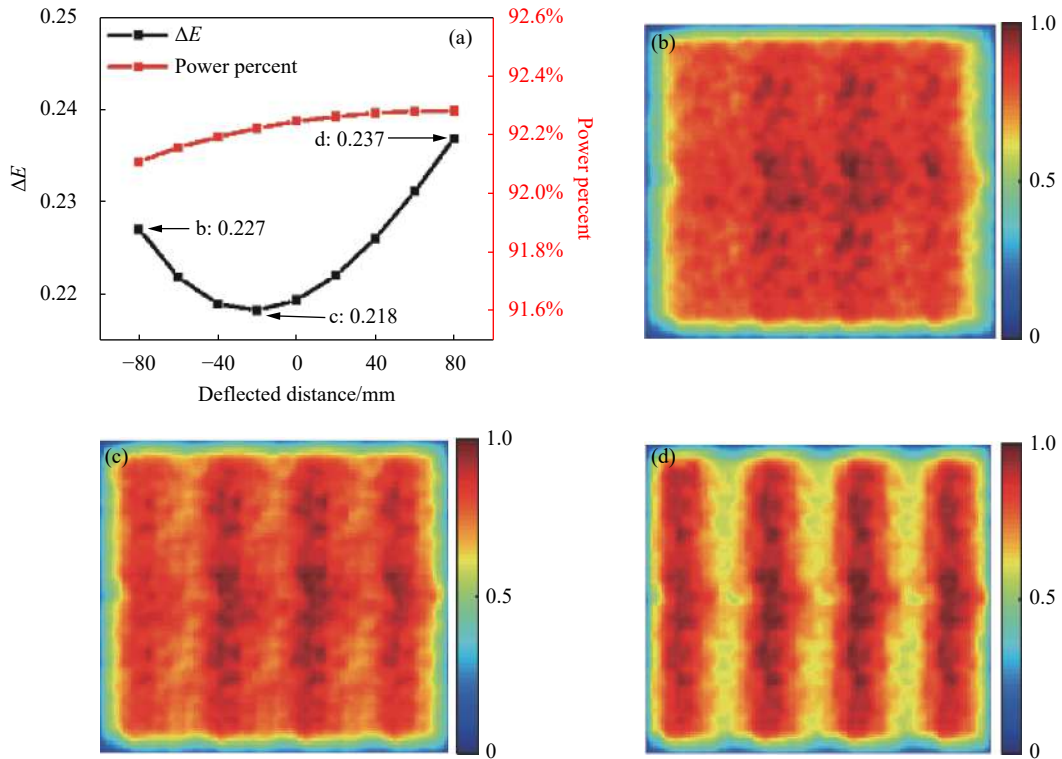


图 5 FA 柱透镜离焦距离对接收端光场分布的影响。(a) 光斑不均匀度和功率占比随透镜移动距离的变化; (b) 透镜沿光束传输相反方向移动至出光口 (-0.08 m) 时的光场分布图, 其不均匀度为 0.227; (c) 光斑不均匀度达到最小值 0.218 时的光场分布; (d) 透镜沿光束传输方向移动距离为 0.08 m 时的光场分布, 不均匀度为 0.237

Fig.5 The effect of defocusing of FA cylindrical lens on optical field distribution at receiver. (a) The relationship between the unevenness and the moving distance of lens; (b) The optical field distribution when the lens moves in the opposite direction of beam propagation to the beam outlet (-0.08 m), and the unevenness is 0.227; (c) The unevenness reaches the minimum which is 0.218; (d) The optical field distribution of the lens with a distance of 0.08 m in the direction of beam transmission, and the unevenness is 0.237

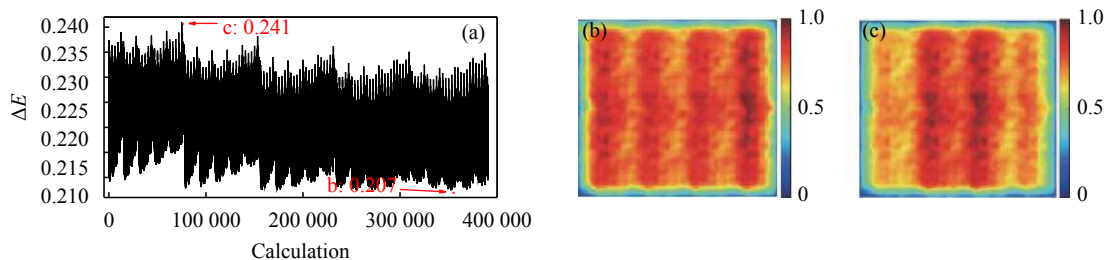


图 6 各个模块功率变化对接收端光场分布的影响。(a) 8 个模块分别以不同输出功率进行优化组合得到的不均匀度分布; (b) 光斑不均匀度达到最小值时的光场分布; (c) 光斑不均匀度达到最大值时的光场分布

Fig.6 The influence of the power variation of each module on the optical field distribution of the receiver. (a) The unevenness distribution was obtained by optimizing the combination of 8 modules with different output power respectively; (b) Optical field distribution when the spot unevenness reaches the minimum; (c) Optical field distribution when the spot unevenness reaches the maximum

光场分布如图 6(c) 所示,边缘模块输出功率低于中间且功率差值达到最大时,空间强度差值最大。

激光系统直接输出矩形光斑,无光纤耦合,光斑形状与光电池完全匹配,提高了电池阵布片率。经过优化后的激光系统直接输出光束的光强分布曲线如

图 7(a) 所示,在峰值功率 10%、30%、50% 尺寸内对应功率占比分别为 98%、94%、90%,光斑不均匀度分别为 0.434、0.207、0.162。激光系统输出光束在接收端的光场分布如图 7(b) 所示,激光系统输出光束在接收端光斑均匀性和有效窗口内的收光比较高。

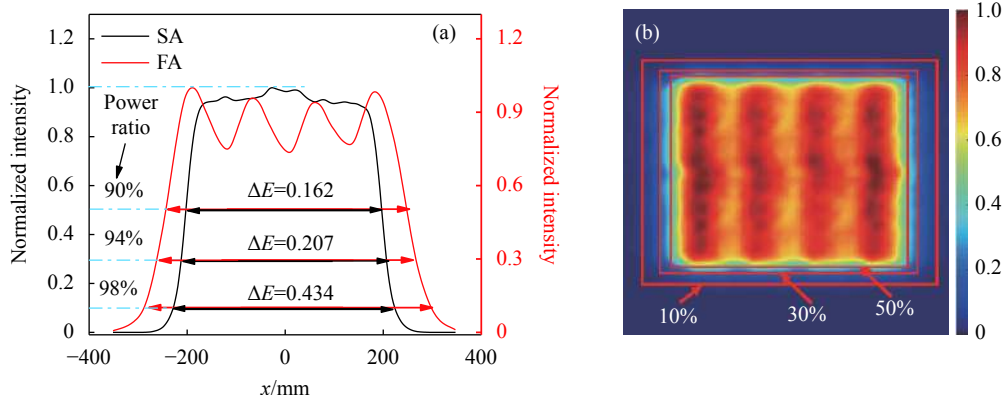


图 7 不同光束的远场光斑和光强分布曲线。(a) 短距离 LWPT 激光系统输出光束在接收端的光强分布曲线; (b) 短距离 LWPT 激光系统输出光束在接收端的光斑

Fig.7 The far-field spots and intensity distribution curve of different beams. (a) The far-field intensity distribution curve of the output beam from diode laser system for short distance LWPT at the receiver; (b) The far-field spots of the output beam from diode laser system for short distance LWPT at the receiver

3 实验与结果分析

为验证 LWPT 设计方案的可行性,搭建了 LWPT 实验装置。单个子模块在工作电流下测量得到 $BPP_{FA}=6.55 \text{ mm mrad}$, $BPP_{SA}=30.1 \text{ mm mrad}$ 。 BPP_{FA} 理论值与测量值误差较小,可视为测量误差。 BPP_{SA} 的理论值与测量值相差较大,分析其原因是在合束时慢轴指向性差,导致慢轴方向光斑变大。当操作电流为 14 A 时,12 个半导体激光芯片的合束效率 97.4% (反射镜遮挡导致 2.6% 的效率损失)。

激光系统输出光束的 LIV 曲线如图 8(a) 所示,当输入电流为 14 A 时,激光系统输出功率为 1162 W。8 个子模块合束效率为 99%,激光系统光学损耗为 3.6%。文中使用的半导体激光芯片的实际电光转换效率为 49%,若使用条宽为 $350 \mu\text{m}$ 、效率为 65% 的半导体激光芯片,激光系统的电光效率预计可提升至 62%。图 8(b) 为激光系统的中心波长和谱宽随电流变化关系,工作电流下输出光束的中心波长为 807.6 nm,谱宽为 2.6 nm。

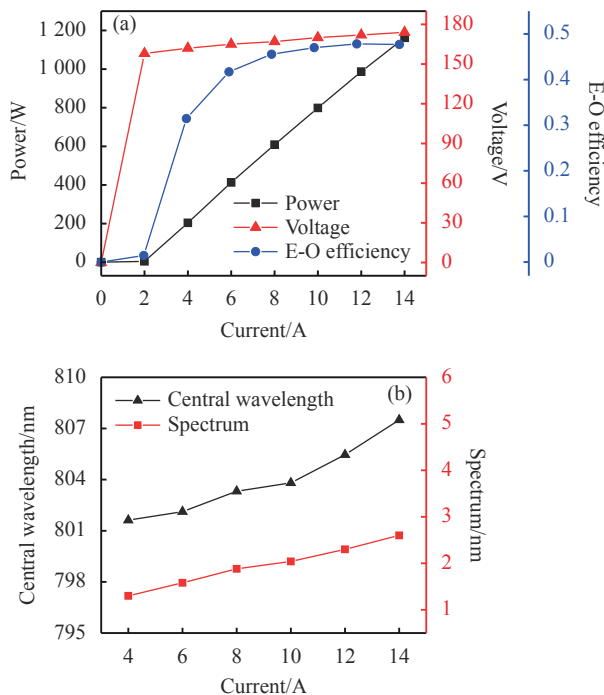


图 8 激光系统输出特性。(a) 激光系统 LIV 曲线; (b) 激光系统光谱特性随电流的变化关系

Fig.8 Laser system output characteristics. (a) LIV curve of laser system; (b) The spectral characteristics of the laser system vs the operating current

14 A 电流下 8 个模块输出光束在接收端的光场分布如图 9(a) 所示, 多个子模块光斑形状不规则。由于首次对条宽为 350 μm 半导体激光芯片进行手动快轴准直的采样系统不标准, 各芯片准直时指向性有差异, 导致光束以光轴为中心出现不同程度的旋转。12 个芯片输出光束的偏转角度不相同, 空间合束光斑叠加后出现不规则光斑。图 9(b) 为工作电流下激光

系统输出光束传输 20 m 后的光斑分布, 光斑不均匀度为 0.327。不均匀度偏大的原因: 单个模块输出光束慢轴方向的光斑尺寸偏大, 导致接收端整体光斑在慢轴方向部分重叠, 空间强度差值变大, 不均匀度增大。单个光斑的形状不规则, 导致整体光斑出现空隙, 不均匀度变大。

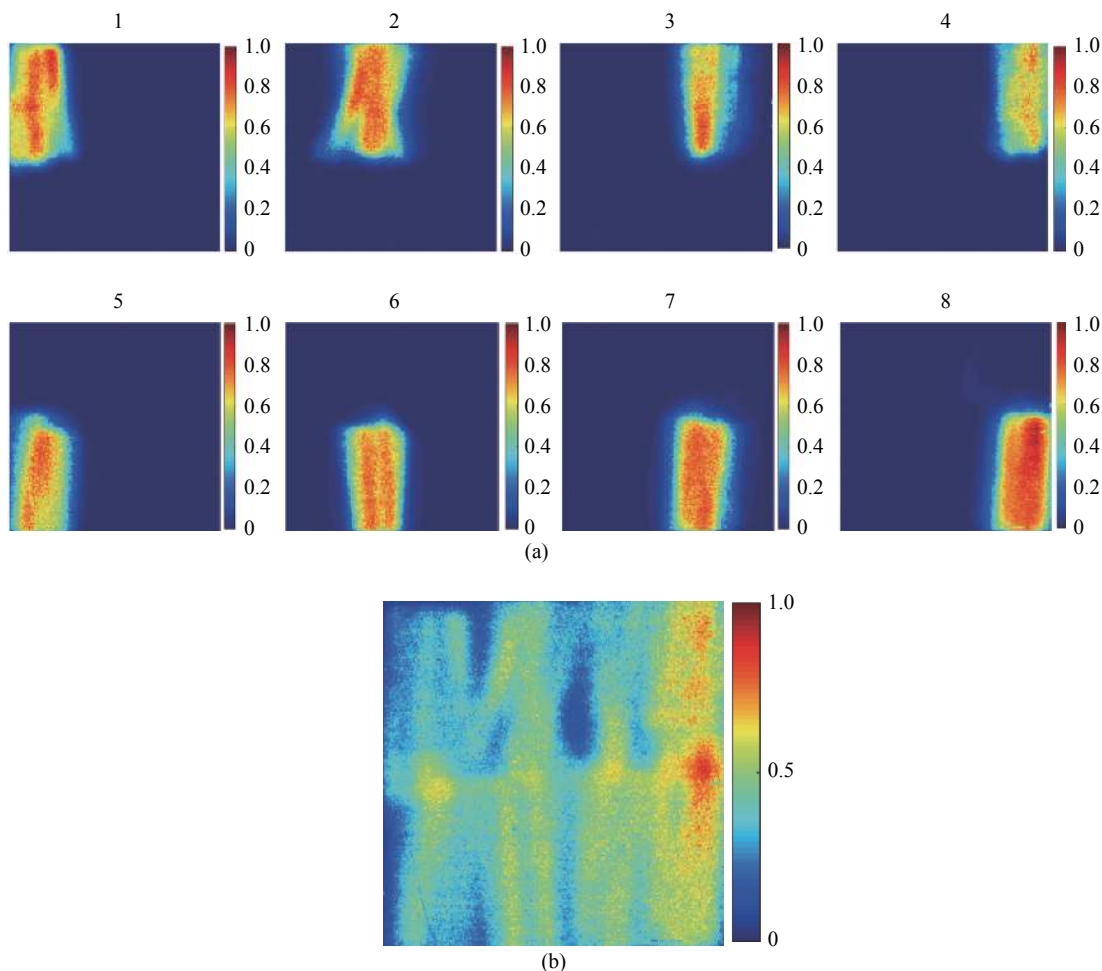


图 9 工作电流下激光系统输出光束传输 20 m 时有效窗口内的光场分布。(a) 8 个子模块输出光束传输 20 m 的光场分布; (b) 激光系统输出光束传输 20 m 的光场分布, 光斑尺寸为 0.44 m \times 0.49 m

Fig.9 Measure of optical field distribution which is transmitted beyond 20 m under working current. (a) Optical field distribution of 20 m transmitted by 8 sub-beams; (b) The optical field distribution of laser system, which is transmitted beyond 20 m, and the spot size is 0.44 m \times 0.49 m

根据以上实验结果, 采用图 9(a) 中均匀度较高的第 8 个光斑作为子模块进行优化仿真设计, 不均匀度有望降至 0.242, 接近图 7(b) 的理论结果。仿真优化得到峰值功率 30% 尺寸时, 有效窗口尺寸为 0.54 m \times 0.46 m, 光斑尺寸可根据准直透镜的移动进行小范围

调节, 其光场分布如图 10 所示。多光束调节对于设备精度要求较高, 未来可在小反射镜上装上高精度智能调节装置, 根据无人机的飞行距离和光斑尺寸需求进行动态调整。

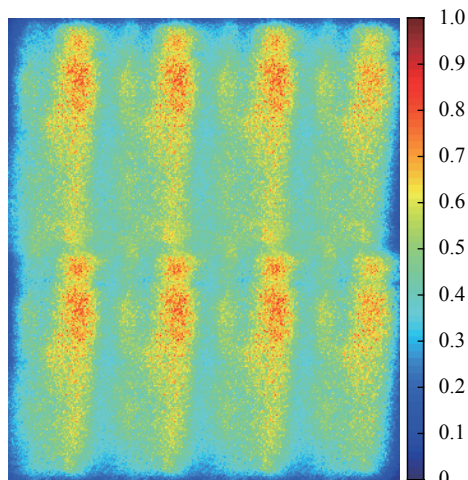


图 10 激光系统优化后在传输距离为 20 m 处的光场分布

Fig.10 The optical field distribution of laser system after optimizing, which is transmitted beyond 20 m

4 结 论

为提高 LWPT 系统发射端的电光效率、接收端光斑均匀性、有效窗口收光比,基于合束效率较高的空间合束设计了一套高功率高效率半导体激光系统。利用长焦长柱透镜进行二次准直并直接输出,无需光纤耦合,接收端光斑与矩形电池形状相匹配,有利于提高接收端电池的转换效率及简化电源管理。利用多光束指向性可调节的特点,通过调节各模块输出光束角度偏转、功率和长焦长柱透镜离焦距离等,可将接收端光斑不均匀度优化至 0.207,有效窗口内功率占比大于 94%。搭建了千瓦级激光无线能量传输实验装置,激光系统输出功率为 1162 W,传输 20 m,接收端电池尺寸为 0.44 m×0.49 m,接收端光斑不均匀度为 0.327,有效窗口内功率占比大于 90%。上述工作对采用高效率半导体激光器作为 LWPT 的发射光源的实际应用提供了指导作用。

参考文献:

[1] Zhao C M, Wang Y S, Guo L, et al. Development of laser wireless power transmission technology [J]. *Laser Technology*, 2020, 44(5): 538-545. (in Chinese)
 [2] Jin K, Zhou W. Wirelaser power transmission: a review of recent progress [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*,

2018, 34(4): 3842-3859.
 [3] Liu K J, Miao X K, Xu C Y. et al. Semi-active laser-guided energy transmission and simulation technology [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(2): 256-264. (in Chinese)
 [4] Wang L J, Peng H Y, Zhang J. Advance on high power diode laser coupling [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(4): 517-534. (in Chinese)
 [5] Lin X C, Zhu H B, Wang B, et al. Development of 5 kW diode laser hardening source with homogenized intensity distribution [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(5): 1178-1184. (in Chinese)
 [6] Kanskar M, Keeney S, Martinsen R. The power of brilliance-the past and future of high-power semiconductor lasers [J]. *Laser Focus World*, 2018, 54(1): 69-74.
 [7] Sprangle P, Hafizi B, Ting A, et al. High-power lasers for directed-energy applications [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(31): F201.
 [8] Wu Z N, Xie J R, Yang Y N. Effect of light intensity uniformity on the photoelectric conversion efficiency of GaAs cells [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(6): 0606001. (in Chinese)
 [9] Meng X X, Shen J S, Shi D L, et al. Secondary concentration of laser wireless power transmission receiving system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(7): 0705001. (in Chinese)
 [10] Liu Y Q, Chao Y H, Li J, et al. 5 kW fiber coupling diode laser for laser processing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(5): 1279-1287. (in Chinese)
 [11] Ramireziniguez R, Idrus S M, Sun Z, et al. Optical Wireless Communications: IR for Wireless Connectivity[M]. Boca Raton,FL: CRC Press, 2007.
 [12] Kansal I, Pachauri R. Mathematical puzzle based PV array configuration for GMP enhancement under non-uniform irradiation [J]. *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*, 2020, 8(32): 165915.
 [13] Bao L, Bai J, Price K, et al. Reliability of high power/brightness diode lasers emitting from 790 to 980 nm[C]//Proceedings of SPIE, 2013, 8605: 2005443.
 [14] Wang J. Smith B. High-efficiency diode lasers at high output power [J]. *Applied Physics Letters*, 1999, 74(11): 1525-1527.
 [15] Liu Y Q, Sheng Z C, Lu Y, et al. Design and performance research of uniform concentrating Fresnel lens [J]. *Optoelectronic Technology*, 2012, 32(4): 263-266, 272. (in Chinese)