

文章编号: 1672-8785(2014)12-0035-06

激光传能系统用激光能量转换器的研究与设计

庄永峰 华 磊 郭 豹

(中国电子科技集团公司第二十七研究所, 河南 郑州 450047)

摘 要: 针对远距离激光传能及光电转换问题, 通过对传输过程中光纤损耗、波长选择、光电转换材料匹配等影响系统传输效率的各环节因素进行分析, 采用在半绝缘 InP 衬底上外延生长 InGaAs PIN 的方式设计了光电转换芯片, 并对芯片结构及互联工艺进行了优化, 最终成功研制出了高效激光能量转换器。试验结果表明, 在 1550 nm 激光照射的条件下, 该激光能量转换器的光电转换效率能够达到 28%。

关键词: 激光传能; 光纤传输; 激光-电转换

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.12.007

Research and Design of Laser Energy Converter for Laser Power Transmission System

ZHUANG Yong-feng, HUA Lei, GUO Bao

(The 27th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou 450047, China)

Abstract: To achieve long distance fiber energy transmission and laser conversion, various factors which have influence on the transmission efficiency of a system in the process of energy transmission, such as fiber loss, wavelength selection, matching of photoelectric materials, are analyzed. A photovoltaic conversion chip is designed by growing a InGaAs PIN structure on a semi-insulating InP substrate epitaxially. The structure and interconnect technology of the chip are optimized. Finally, a highly efficient laser energy converter is developed successfully. The test result shows that the laser energy converter has its photoelectric energy conversion efficiency of 28% under the laser illumination at 1550 nm wavelength.

Key words: laser energy transmission; fiber transmission; laser to electric conversion

0 引言

远距离激光传能是指利用激光的单向性等特点, 通过光电能量转换将激光能量转换为电能。该技术可广泛应用于海底、山区、太空等不便进行电能输送的场合, 以实现地-海、地-空、空-空之间的远距离能量传输。激光传能系统由激光器、光纤和激光能量接收端三部分组成。作为激光能量接收端的核心部件, 激光能量转换器利用光电转换芯片, 在特定波长激光的照射

下产生光生电动势, 经过闭合电路后以一定的电功率形式输出, 最终实现从光能到电能的转换以及远距离传输^[1]。

在国际上, 激光能量转换器目前已被广泛应用于多种模块, 以实现光能转换功能。国内对光学供电的需求已经开始出现, 预计未来的市场需求将会越来越大。美国 JDSU 公司等已有能力来大量生产这种光能转换器, 并开始进军中国市场。而此前国内相关器件研究较少, 尚未出现有竞争力的器件产品。国内外已报道的激光

收稿日期: 2014-11-15

作者简介: 庄永峰(1982-), 男, 江苏泗阳人, 工程师, 主要从事光电对抗研究。E-mail: 29863086@qq.com

<http://journal.sitp.ac.cn/hw>

INFRARED (MONTHLY)/VOL.35, No.12, DEC 2014

能量转换器的光电转换效率为 20%~50%^[2-6], 在实验室条件下, 针对 1550 nm 波长的器件转换效率已达到了 33%, 但适于远距离传能的工程化器件尚未见诸报道。本项目的研制工作将是国内光能转换器领域的开拓性工作, 并将为激光能量转换器的国产化奠定基础。

1 激光能量转换器设计

1.1 材料与波长选择

在光电转换过程中, 光能量损失包括光纤传输损失和光电转换效率损失。前者主要包括吸收损耗和散射损耗。当光与电子相互作用或者与介质组分的振动态发生作用时, 材料会吸收光子, 产生电子不同能级之间的跃迁或分子不同振动状态之间的跃迁; 所有介质材料在紫外波段都有很强的电子吸收带, 而在红外波段则存在振动吸收带; 散射损耗归因于物质内部散射使传输功率减小; 瑞利散射是散射损耗的主要部分; 光电转换效率极限同样与材料特性有关。由于窄带隙材料的开路电压有限, 因此材料的禁带宽度越小, 其转换效率上限越低。

表 1 列出了用不同材料制成的激光能量转换器在光纤传输及光电转换效率上的统计情况。可以看出, 禁带宽度大的材料的转换效率上限高, 但在光纤中的损失更大; 两种损失机制对半导体材料禁带宽度的选择是相互矛盾的。

因此, 为了兼顾光纤传输和光电转换效率, 选择窄带隙材料进行光电转换芯片设计。适合的材料包括 GaSb 和 InGaAs 系材料。相比之下, 由于 GaSb 缺乏半绝缘衬底, 无法进行片上串并联, 因此选用 InGaAs 材料, 同时选用晶格匹配的 InP 半绝缘衬底进行外延设计。通过在半绝缘

衬底上实现单元串联, 可以提高器件的输出电压。在波长选择方面, 考虑到市场上波长为 1550 nm 的大功率激光器发展迅速, 最终选择 1550 nm 激光作为能量载体。

1.2 功率密度与器件大小选择

图 1 和图 2 所示为激光功率密度与光电转换芯片的开路电压及光电转换效率之间的关系。

可以看出, 随着入射光的功率密度在一定范围内不断提高, 光电转换芯片的开路电压、电流密度和转换效率逐渐增大, 并在 50~100 W/cm² 附近达到饱和。随着光功率密度的进一步增加, 芯片发热量增大, 效率减小; 开路电压、短路电流密度和转换效率在高功率密度情况下会出现饱和甚至下降。

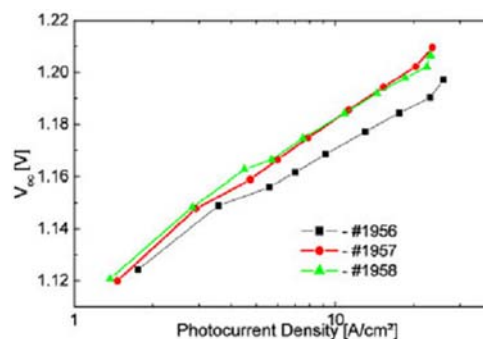


图 1 入射光功率与器件开路电压的关系

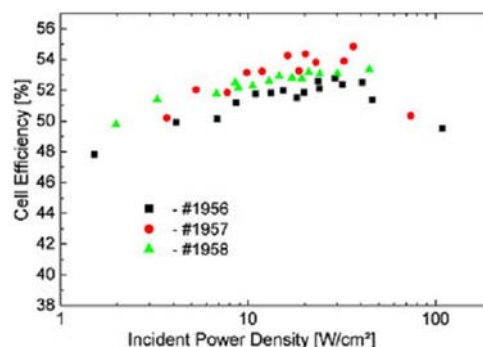


图 2 入射光功率密度与器件转换效率的关系

表 1 材料带隙及截止波长与传输损耗的关系

材料	E _g (eV)	截止波长 (nm)	单结转换效率上限 η	在标准光纤中的损耗 A	光强度衰减至 10%
GaAs	1.42	873	约 60%	2.5 dB/km	约 4 km
In _{0.35} Ga _{0.65} As	0.95	1310	约 45%	0.5 dB/km	约 20 km
In _{0.47} Ga _{0.53} As	0.74	1550	约 35%	0.2 dB/km	约 50 km
In _{0.7} Ga _{0.3} As	0.55	2200	约 22%	2.2 dB/km	约 5 km

以基于 830 nm GaAs 材料的光电转换芯片为例, 不同光功率密度与最佳面积的关系见表 2。可以看出, 为保证转换效率, 入射功率密度越高, 芯片面积越小, 因为芯片的发热量会随面积的增大而增加, 使光能量损失越加严重。因此, 小面积芯片适合高功率密度光照下的应用。在功率密度为 $30 \sim 50 \text{ W/cm}^2$ 的激光辐照下, 器件的受光面积以 $1 \sim 2 \text{ mm}^2$ 为宜。

表 2 不同光功率密度下 (830 nm), GaAs 光电转换芯片的最佳面积

功率密度 (W/cm^2)	0.1	1	10	100
面积 (mm^2)	约 100	约 15	约 2	约 0.2

1.3 光电转换芯片的转换效率分析

在高密度激光的辐照下, 光电转换芯片的转换效率可以归结为以下几个方面:

(1) 内外量子效率的局限。包括材料吸收光子后产生电子空穴对的效率以及电子空穴对被电极收集的效率。

(2) 由芯片电阻引起的效率损失。填充因子 F 会随芯片串联电阻 R_s 的增加而减小。

(3) 由结温升高引起的效率损失。结温会随功率密度的增加而增大, 引起转换效率下降。

(4) 由光反射与光敏面填充率带来的损失。光敏面的减反射膜会降低光电转换芯片表面的光反射量, 但仍有部分光线会被反射而无法进入芯片内部。

在不考虑光表面反射的情况下, 光电转换芯片的转换效率为

$$E = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{I_m * V_m}{P_{in}} = \frac{I_{sc} * V_{oc} * F}{I_{sc} / R_{\lambda}} = R_{\lambda} V_{oc} F \quad (1)$$

式中, P_{out} 为芯片的最大输出功率; P_{in} 为入射光功率; I_m 和 V_m 分别为最大输出功率所对应的电流和电压; I_{sc} 和 V_{oc} 分别为器件的短路电流和开路电压; F 为填充因子; R 为器件的光响应度。

从式 1 中可以看出, R 和 F 是影响芯片转换效率的主要因素。其中, R 主要受内外量子效率的影响, 它与材料质量及芯片结构相关; F 主

要受单元芯片中串并联电阻的影响。

1.4 光电转换芯片的结构设计

通过在半绝缘 InP 衬底上外延生长 InGaAs PIN 结构来设计光电转换芯片。该结构包括窗口层、吸收层和传导层。将设计好的光刻版图对齐, 然后对其台面结构进行刻蚀与隔离, 并通过蒸发金属电极进行片上串并联, 以获得一定的输出电压和光电流。

1.4.1 饱和光功率密度

在光电转换芯片中所涉及的饱和光功率密度主要是指转换效率最大时的光功率密度, 它与芯片的单元面积及串联电阻有关。单元面积越小, 串联电阻越小, 饱和光功率密度越大, 芯片的转换效率也越高。

研究表明, 光电转换芯片在高功率密度光照下的转换效率会达到饱和甚至下降。多篇文献发现, 当光电流密度在 30 A/cm^2 以上时, GaAs 器件的效率趋于饱和^[5]; 在达到饱和功率密度之前, 器件的转换效率会随着入射光功率的增加而增大; 在入射光功率密度达到饱和之后, 电极电阻和薄层电阻会造成大量热损失, 同时高温也会影响电极的物理性质; 热损失逐渐成为光电转换效率的主要损失因素。

图 3 所示为在 820 nm 激光的照射下, GaAs 材料的光生电流密度与转换效率的关系。可以看出, 由于光生电流密度取决于入射光功率密度的大小, 当入射光功率不大时, 转换效率会随光生电流密度的升高而增大; 当入射光功率过大时, 转换效率不升反降。

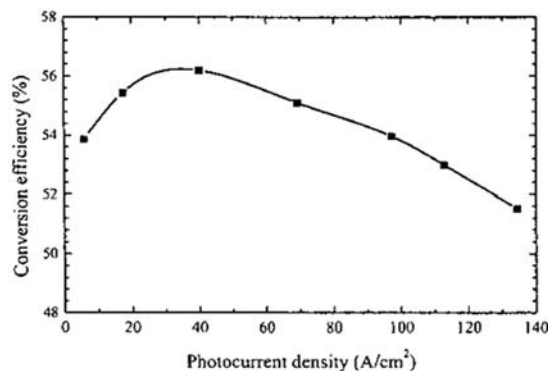


图 3 GaAs 光电池的光生电流密度与转换效率的关系

1.4.2 光敏面大小及电极图形设计

InGaAs 二极管的最大光生电压仅为 0.5 V 左右, 因此为提高器件的输出电压, 需要对多个电池芯片进行串联。由于光纤出光为圆形光斑, 采用圆形光敏面进行匹配。光敏面平均分为若干个扇形, 每个扇形代表一个光电二极管, P 极与 N 级置于外环以便进行串联。串联之后的光生电流等于每个单元的光生电流, 光生电压为各单元光生电压之和。

芯片面积可根据入射光功率和芯片饱和接收功率来计算。图 4 和图 5 所示为采用方形单元矩阵和扇形辐射图形设计的光敏面。

激光能量转换器的受光面积大小与芯片单元个数的选择将会影响器件的饱和光功率和开路电压的大小。在版图设计过程中, 需要减小芯片面积, 以提高饱和接收功率密度。

若采用扇形串联方式, 则芯片单元数为 8~16 个, 光敏面的直径约为 2.3 mm, 沟道间距为 50 μm 。若采用矩形串联方式, 芯片的长和宽均为 2.5 mm。芯片单元光敏面的面积为 $0.4 \times 0.4 \text{ mm}^2$, 可串联 15~20 个单元, 沟道间距为 50 μm 。

图 6 分别为串联了 2 个、4 个和 6 个芯片单元的 GaAs 光能转换器的光照面示意图。

由于采用半绝缘衬底, 需要通过多次光刻来设计同侧电极。在芯片单元之间, 用湿法腐蚀法腐蚀至半绝缘衬底形成沟道并实现分离为止, 然后再将单元电池的一部分腐蚀至 N^+ 层, 以便制作欧姆接触。

经研究和测试发现, 功率密度低、均匀性好的光束会使器件的转换效率变得更高。因此必须对光斑进行扩大和整形。通过将自聚焦微透镜与光纤相结合, 可以获得均匀光斑。

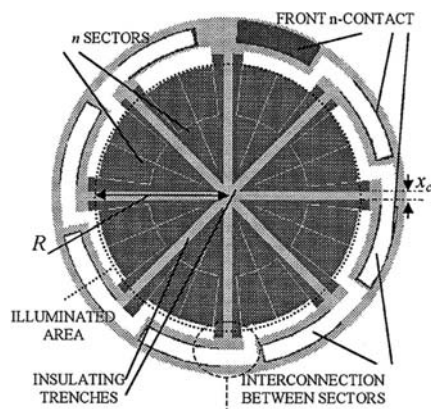


图 4 扇形串联方式

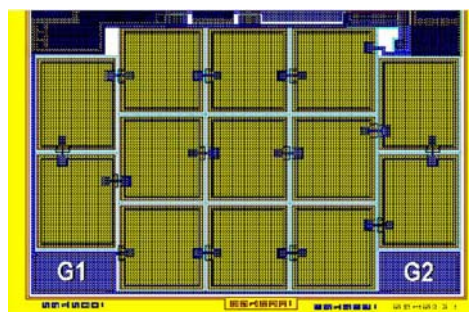


图 5 矩形串联方式

1.4.3 器件封装形式与光学结构设计

由于芯片采用背照式结构设计, 需要进行倒焊封装。通过在陶瓷片上制作串联连接线与金球, 将芯片背面朝上、电极朝下与陶瓷片互联, 使其作为一个整体被封装在管座上; 以陶瓷片四周的金球作为支撑, 用于保证芯片的可靠性。

在光学设计中, 为提高转换效率, 选用自聚焦透镜或光纤准直器, 使激光均匀扩散, 并保证光斑的均匀性; 保证芯片各处的饱和光功率一致, 以避免出现局部光饱和现象。

1.5 光纤输入耦合设计

1.5.1 准直透镜的初始参数计算

传能光纤的输出尾纤芯径为 62.5 μm , 数值

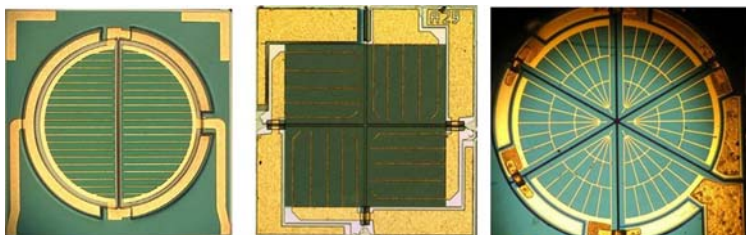


图 6 光照面示意图

孔径 $NA=0.27$ 。设计准直输出空间光的光斑为直径为 1 mm 的圆形光斑。根据 $NA=0.27$ 计算, 准直光斑的直径为 1 mm, 则可算得准直透镜的焦距为 1.78 mm, 有效通光孔径要求大于 1 mm。

由于准直透镜焦距很小, 考虑使用经模压制作的非球面透镜; 非球面透镜的成像质量优异, 其像质可以达到衍射极限。若不考虑像差的影响, 则激光束经耦合光学系统变换之后, 其拉氏不变量保持不变。

1.5.2 耦合透镜仿真设计

图 7 所示为耦合光学系统的仿真结果。光学系统元件从左到右依次为多模光纤、非球面光束准直器和光电接收器件。图 8 为准直光输出的整体点列图。

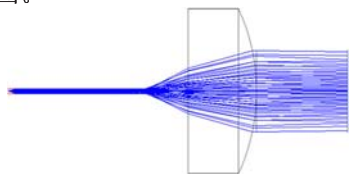


图 7 耦合光学系统的结构示意图

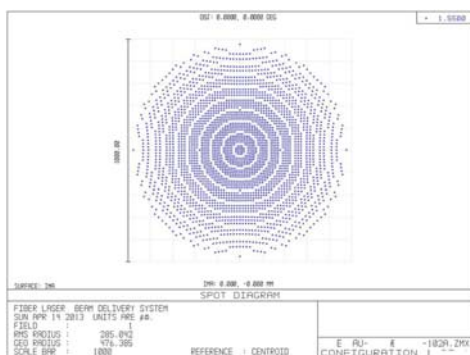


图 8 非球面耦合透镜的系统点列图(焦距为 20 mm)

1.5.3 耦合光学系统各表面的激光功率密度分析

使用 Lighttools 软件仿真耦合光学系统, 以计算准直系统各表面的光功率密度。结果表明, 光纤激光器的准直光束具有较大口径, 其功率密度相对较小。

根据仿真结果, 按照 1 W 光功率的激光输出, 准直透镜表面的最大光功率密度达到 0.9636 W/mm^2 , 平均光功率密度达到 0.4420 W/mm^2 。通过对比可以看出, 准直光斑输出光束的功率能量密度分布比较均匀, 有利于后端光电探测器进行光电转换。

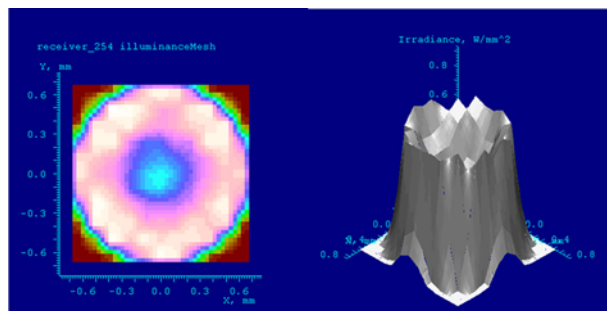


图 9 Lighttools 光纤耦合系统的示意图

2 试验验证

样品研制完成后, 其整体情况见图 10。使用 KEITHLEY 2635A 数字源表和 8163B 光波万用表对样品进行测试。表 3 列出了测试数据。

通过测试可知, 激光能量转换器的最高转换效率为 28.5%, 最佳工作电压为 4.25 V, 满足系统指标要求。



图 10 光电转化器的样品图

表 3 不同光功率密度下 (1550 nm) InGaAs 激光能量转换器的最佳工作电压和转换效率

入射功率 (mW)	最大输出 功率 (mW)	最佳工作 电压 (V)	开路电压 (V)	转换效率 (%)
10	2.725	3.93	4.99	27.25
20	5.66	4.18	5.2	28.3
30	8.55	4.2	5.29	28.5
40	11.4	4.25	5.34	28.5
50	14.15	4.25	5.37	28.3
60	16.92	4.18	5.38	28.2
70	19.46	4.15	5.38	27.8
80	22.0	4.15	5.39	27.5
90	24.3	4.13	5.38	27
100	26.7	4.01	5.38	26.7

3 结束语

通过对激光能量传输过程中光纤损耗、波长选择、光电转换材料匹配等影响系统传输效率的各环节因素进行分析后发现,在远距离激光能量传输系统中,光纤损耗起着根本性作用,决定了传能激光器所能选用的波长;但是激光波长越长,所需光电转换材料的禁带宽度越小,其转换效率上限越低。经综合衡量后,通过采用在半绝缘 InP 衬底上外延生长 InGaAs PIN 的方式设计了光电转换芯片,并对芯片结构及互联工艺进行了优化,最终成功研制出了高效激光能量转换器。试验结果表明,在 1550 nm 激光照射的条件下,该激光能量转换器的光电转换效率能够达到 28.5%。本项目的研制工作不仅可以为国内光能转换器产品的工程化提供指导,而且还可以为激光能量转换器的国产化奠定基础。

(上接第 18 页)

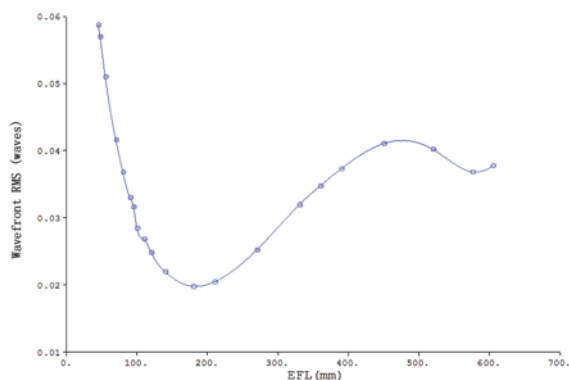


图 9 系统成像质量与焦距之间的理论关系

点,利用整机调制传递函数对各特征焦距下的最优像面位置和理论位置的关系进行了标定和修正。该方法可操作性强,具有良好的测试效果,为此类系统调焦补偿机构的设计与验证提供了一种有效方法。由于条件所限,仅在实验室恒温条件下进行了测试,更复杂的成像条件有待进一步分析。

参考文献

- [1] 马冬梅,胡明鹏,孙军月.凝视型红外光电成像系统主要参数的实验室测评分析[J].**红外技**

参考文献

- [1] Jiang S, Dong L, Zhang R K, et al. Processing Parameters Optimization of Cl₂/H₂ICP Etching and Its Used for the Fabrication of 1.55 μ m DFB Laser [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2009, **20**(5): 583–586.
- [2] Gale R P. High-Efficiency GaAs/CuInSe₂ and Al-GaAs/CuInSe₂ Thin-Film Tandem Solar Cells [C]. Florida: the 21st IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1990.
- [3] 梁存宝. 激光供能微型 GaAs 电池 [J]. **电源技术**, 2012, **14**(7): 1015–1016.
- [4] 何滔,杨苏辉. 高效激光无线能量传输及转换实验 [J]. **中国激光**, 2013, **40**(3): 0317001.
- [5] Yugami H, Kanamori Y, Arashi H, et al. Field Experiment of Laser Energy Transmission and Laser to Electric Conversion [C]. Honolulu: Proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1997.
- [6] 王文博,李明. 菲涅尔聚光系统下砷化镓电池输出特性研究 [J]. **光学学报**, 2012, **38**(3): 0302005.
- [7] 术,2007,**29**(8):483–487.
- [2] 拜晓锋. 像增强器 MTF 测量理想像面选择方法研究 [J]. **应用光学**, 2009, **30**(2): 300–303.
- [3] 李铁成,陶小平,冯华君,等. 基于倾斜刃边法的调制传递函数计算及图像复原 [J]. **光学学报**, 2010, **30**(10): 2891–2897.
- [4] 郝群,沙定国,郑乃梅. 光学传递函数测量仪刀口和狭缝两种扫描方法比较分析 [J]. **光学技术**, 2001, **27**(1): 41–47.
- [5] 张建奇. **光电成像系统建模及性能评估理论** [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2010.
- [6] Fang H B, Yin B Q, PI D F. The Study of Testing Technique of MTF of Staring Thermal Imaging System Using Canted Slit [J]. *Journal of Applied Optics*, 1997, **18**(4): 44–47.
- [7] Andrew D A, Albert M. Conditioning Data for Calculation of the Modulation Transfer Function [J]. *Med. Phys.*, 2003, **30**(2): 248–253.
- [8] Choi T. IKONOS Satellite on Orbit Modulation Transfer Function (MTF) Measurement Using Edge and Pulse Method [D]. Brookings: South Dakota State University, 2002.
- [9] Primot J, Girard M, Chambon M. Modulation Transfer Function Assessment for Sampled Imaging System: a Generalization of the Line Spread Function [J]. *Journal of Modern Optics*, 1994, **41**(7): 1301–1306.