

用于多结太阳能电池的均匀聚光菲涅耳透镜的设计与分析

付蕊¹ 陈诺夫¹ 刘虎^{1,2} 白一鸣¹ 马大燕¹ 陶泉丽¹ 陈吉堃³

¹华北电力大学可再生能源学院, 北京 102206

²石家庄铁道大学数理系, 河北 石家庄 050041

³北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083

摘要 设计了一种适用于 GaInP/GaInAs/Ge 多结太阳能电池, 可在 300~1800 nm 宽光谱范围内实现均匀聚光的菲涅耳透镜。通过实际测试, 得到 GaInP/GaInAs/Ge 多结太阳能电池的量子效率图谱和透镜主体材料硅胶的折射率色散曲线, 在此基础上采用多焦点与多设计波长相结合的方法, 对菲涅耳透镜进行优化设计。基于该方法建立了几何聚光比为 625 倍, 环距为 0.3 mm 的透镜模型以及聚光效率、均匀性等聚光性能参数的计算模型, 并利用蒙特卡罗光线追迹及实验测试的方法对其聚光性能进行分析。研究结果表明, 所设计的透镜在 300~1800 nm 宽光谱范围内以及三个子电池的光谱响应波段内都能较好地实现均匀会聚, 同时具有较高的聚光效率, 聚光分布均匀度高于 75%, 聚光效率超过 80%。

关键词 光学设计; 菲涅耳透镜; 多波长和多焦点设计; 多结太阳能电池; 均匀性

中图分类号 O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1222004

Design and Analysis of Fresnel Lens with Uniformity Irradiance for Multi-Junction Solar Cells

Fu Rui¹ Chen Nuofu¹ Liu Hu^{1,2} Bai Yiming¹ Ma Dayan¹ Tao Quanli¹ Chen Jikun³

¹School of Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

²Department of Mathematics and Physics, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050041, China

³School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083, China

Abstract This paper presents the design of a new Fresnel lens for GaInP/GaInAs/Ge multi-junction solar cells, with which uniformity irradiance distribution can be realized within the broadband solar spectrum from 300 nm to 1800 nm. By actual tests, the quantum efficiency spectrum of GaInP/GaInAs/Ge multi-junction solar cells and refractive index dispersion curve of silicone, the body material of the lens are obtained. On this basis, the new Fresnel lens is optimized by combining the multi-wavelength and multi-focus method. Based on this optimization method, the lens model is set up with geometrical concentrator ratio $625\times$ and ring width 0.3 mm, and calculation models for concentrating performance parameters including optical efficiency and uniformity are established. The concentrating performance of the new Fresnel lens is analyzed by Monte-Carlo ray-tracing simulation approach and experimental testing. Results indicate that in the broadband solar spectrum from 300 nm to 1800 nm and within the spectral response band of three subcells, uniformity is well achieved with high optical efficiency. The uniformity is higher than 75%, and the optical efficiency is more than 80%.

Key words optical design; Fresnel lens; multi-wavelength and multi-focal design; multi-junction solar cell; uniformity

OCIS codes 220.3630; 080.3620

收稿日期: 2016-07-07; **收到修改稿日期:** 2016-08-18

基金项目: 国家自然科学基金(61006050, 61076051)、国家 863 计划(2011AA050507)、中央高校基本科研业务费专项资金(13ZD05)、北京市自然科学基金(2151004)

作者简介: 付蕊(1986—), 女, 博士研究生, 主要从事高效太阳能电池技术方面的研究。E-mail: fuying815@126.com

导师简介: 陈诺夫(1959—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事太阳能电池与光伏发电系统等方面的研究。

E-mail: nfchen@ncepu.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

聚光光伏系统通过菲涅耳透镜等光学元件将太阳辐射会聚到小面积的高效多结太阳电池上并转换为电能,其主要由三部分构成:高效多结太阳电池,聚光光学系统和太阳跟踪运动系统。目前 GaInP/GaInAs/Ge 聚光多结太阳电池的产业化光电转换效率已达到 40% 以上,然而聚光光伏模组的光电转换效率却只有 25% 左右,其主要的能量损失在于聚光元件的光学损失。此外,由于聚光光伏电站多采用基于单波长设计的点聚焦式菲涅耳透镜,普遍存在聚焦光斑空间和光谱不均匀等技术问题,在电池表面容易形成热斑,一方面会降低电池的转换效率,另一方面会损伤电池,缩短其使用寿命。因此,设计具有较高聚光效率同时又能实现均匀聚光的菲涅耳透镜已成为聚光光伏产业的重要研究方向之一。

目前,实现菲涅耳透镜均匀聚光有两种方法:1) 在聚光系统中增加二次聚光元件,通过二次聚光获得较为均匀的光强分布;2) 对菲涅耳透镜进行优化设计,获得新型透镜结构,例如多焦点设计、复合型设计等。西班牙康普顿斯大学 Vázquez-Moliní D 等^[1]设计了一种多焦点的复合菲涅耳透镜,从中心向外沿径向划分为三个区域,分别基于近轴公式、折射原理和全反射原理设计,三个区域聚焦在焦平面上不同的位置,从而改善辐照度分布均匀性。荆雷等^[2]根据科勒照明原理和反射定律,设计了一种均匀化结构紧凑的太阳聚光镜,由一个投射面和两个反射面组成。西班牙 Cvetkovic A 等^[3]设计了一种菲涅耳-科勒聚光系统,采用菲涅耳透镜作为主聚光元件,科勒积分器作为二次聚光元件,获得了十分均匀的辐照度分布,同时具有较高的聚光效率和跟踪误差容忍度。增加二次聚光元件可获得均匀性良好的辐照度分布,但增加了线路损失、系统成本和系统装调的难度。复合型设计的菲涅耳透镜,由于全反射区的存在,齿深较大,容易变形,实际加工困难且稳定性较差。于春岩等^[4]设计了一种透射式双面菲涅耳透镜,在 380~760 nm 波段内提高了聚光效率。Pan J W 等^[5]同样设计了一种多焦点菲涅耳透镜,所有环带聚焦在不同位置,在不使用二次聚光元件的情况下获得了高倍聚光比和均匀辐照度分布。但是在光学设计过程中,只关注于焦斑的空间均匀性分布,没有考虑光谱分布的均匀性。本文针对 GaInP/GaInAs/Ge 三结聚光电池,综合考虑其每个子电池的光谱响应特性及透镜材料的折射率色散曲线,采用多焦点与多设计波长相结合的方法,对菲涅耳透镜进行优化设计。在 300~1800 nm 宽光谱范围内,实现了聚焦光斑空间及光谱的均匀性分布,同时具有较高的聚光效率。

2 菲涅耳透镜聚光性能参数的计算模型

2.1 光学损失机制及聚光效率

如图 1 和图 2 所示,菲涅耳透镜的光学损失大致可分为:1) 入射界面和出射界面的反射损失;2) 体材料的吸收损失;3) 工艺性损失,工艺性损失是由于透镜成型对理想透镜轮廓进行修改而导致部分光线发散引起的光学损失,例如脱模角、圆角等;4) 结构损失,结构损失是由于采用棱镜元组成的不连续曲面取代一般透镜的连续球面而导致部分光线发散引起的光学损失,例如全反射、遮挡等;5) 截断损失,宽光谱的太阳光在透镜出射界面处发生色散现象,太阳电池实际接收到的只有 $\lambda_{sm} \sim \lambda_{ln}$ 波段内的太阳辐射能量,太阳电池未接收到的那部分太阳辐射能量称为截断损失。

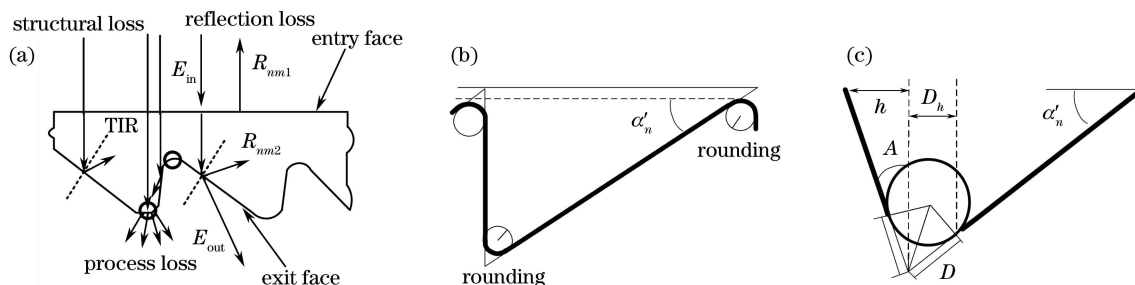


图 1 光学损失机制示意图。(a) 反射损失、结构损失和工艺性损失;(b) 圆角;(c) 圆角和脱模角导致的面积损失

Fig. 1 Scheme of optical loss. (a) Reflection loss, structural loss and process loss; (b) corners rounding;

(c) surface loss due to corners rounding and draft angle

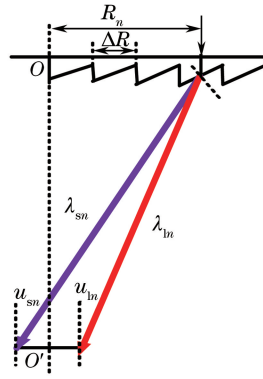


图 2 截断损失示意图

Fig. 2 Diagrammatic representation of truncation loss

入射界面和出射界面上的反射损失是最主要的光学损失。透镜材料的折射率和吸收系数随波长而变化,将第 m 波段的光在透镜第 n 环小棱镜入射界面和出射界面上的反射率分别表示为 R_{nm1} 和 R_{nm2} 。根据菲涅耳反射公式^[6],其反射率为

$$R_{nm1} = \frac{1}{2} \times \left[\frac{\sin^2(\alpha_n - \beta_n)}{\sin^2(\alpha_n + \beta_n)} + \frac{\tan^2(\alpha_n - \beta_n)}{\tan^2(\alpha_n + \beta_n)} \right], \quad (1)$$

$$R_{nm2} = \frac{1}{2} \times \left[\frac{\sin^2(\alpha'_n - \beta'_n)}{\sin^2(\alpha'_n + \beta'_n)} + \frac{\tan^2(\alpha'_n - \beta'_n)}{\tan^2(\alpha'_n + \beta'_n)} \right], \quad (2)$$

式中, α_n 和 β_n 分别表示第 n 环小棱镜入射界面的入射角和折射角, α'_n 和 β'_n 分别表示出射界面上的入射角和折射角。综合考虑透镜的吸收损失、结构和工艺性损失,第 m 波段的光在透镜 n 环小棱镜的透射率 T_{nm} 为

$$T_{nm} = (1 - R_{nm1}) \times (1 - R_{nm2}) \times T_b - T_s - R_{sl}, \quad (3)$$

$$T_s = \frac{(h + D_b)}{\Delta R}, \quad (4)$$

式中, T_b 为透镜体材料的透射因子, T_s 为圆角和脱模角导致的发散损失, R_{sl} 为结构损失, ΔR 为环距。

考虑截断损失后,菲涅耳透镜总的聚光效率 η 表示为各棱镜元不同波长太阳光透射到太阳电池上的辐射光功率总和与入射到透镜表面辐射光功率之比:

$$\eta = \frac{p_t}{p_{in}} = \frac{\sum_{n=1}^I \sum_{\lambda=\lambda_s}^{\lambda_t} E_{in}(\lambda) \times T_n(\lambda) \times S_n}{\sum_{n=1}^I \sum_{\lambda=300}^{1800} E_{in}(\lambda) \times S_n}, \quad (5)$$

式中, p_{in} 和 p_t 分别表示透镜入射面和焦平面的辐射光功率, λ_s 和 λ_t 分别为太阳电池对太阳光截断光谱的上下限, E_{in} 为太阳光入射辐照度, S_n 为第 n 环小棱镜的面积。

2.2 环面聚焦光斑宽度及分布均匀性的计算模型

太阳光经菲涅耳透镜入射后存在色散现象,尤其是入射角度较大的透镜边缘区域,每环小棱镜的焦斑宽度都不同,如图 3 所示^[7]。环内侧考虑最短波长光的折射,环内圈最大焦斑宽度为 S'_{1n} ;环外侧考虑最长波长光的折射,环外圈最大焦斑宽度为 S'_{2n} ;通过下式计算就可得到每环小棱镜的最大焦斑宽度 S'_n :

$$\sin \beta'_{1n} = N_1 \times \sin \alpha'_n, \quad (6)$$

$$\sin \beta'_{2n} = N_2 \times \sin \alpha'_n, \quad (7)$$

$$S'_{1n} = (f - k_n) \times \tan(\beta'_{1n} - \alpha'_n) - \left(L_n - \frac{1}{2} \Delta R \right), \quad (8)$$

$$S'_{2n} = \left(L_n + \frac{1}{2} \Delta R \right) - f \times \tan(\beta'_{2n} - \alpha'_n), \quad (9)$$

$$S'_n = S'_{1n} + S'_{2n}, \quad (10)$$

式中, N_1 和 N_2 分别表示最短波长 λ_{1n} 和最长波长 λ_{2n} 下的材料折射率, β'_{1n} 和 β'_{2n} 分别表示最短和最长波长的

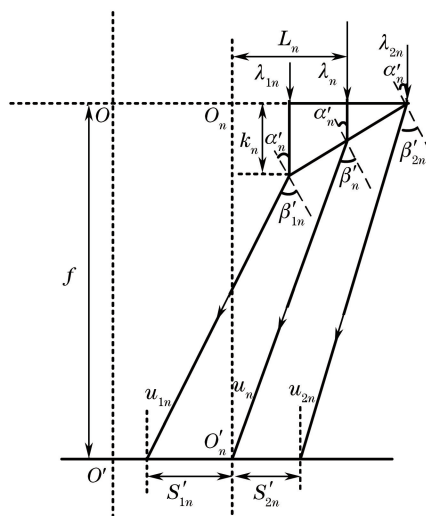


图 3 每环焦斑的宽度

Fig. 3 Width of every focal spot

折射角, f 为焦距, k_n 为棱高, L_n 表示第 n 环小棱镜的入射光线与其光轴的距离。

将焦平面分成若干个相等的区域, 第 j 个区域内的光照强度为 E_j , 光照强度的最大值和平均值分别用 E_{\max} 和 E_{mean} 表示, 把 E_{\max} 和 E_{mean} 代入

$$E_{\text{mean}} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J E_j, \quad (11)$$

$$\Delta E = \left(1 - \frac{E_{\max} - E_{\text{mean}}}{E_{\max} + E_{\text{mean}}} \right) \times 100\%, \quad (12)$$

便可计算出焦平面的聚光分布均匀度。

3 新型菲涅耳透镜的优化设计

3.1 优化设计考虑的因素

新型菲涅耳透镜优化设计的原则是综合考虑 AM1.5D 太阳光谱特性、GaInP/GaInAs/Ge 多结太阳能电池的光谱响应特性以及透镜主体材料硅胶的折射率色散特性, 使三结子电池都能获得均匀的辐照度分布, 同时获得较大的有效辐射能量。实际测得常温下硅胶的折射率色散曲线和 GaInP/GaInAs/Ge 多结太阳能电池的量子效率(EQE)图谱, 如图 4 和图 5 所示。从图 5 可以看出, 顶电池 GaInP、中电池 GaInAs 以及底电池 Ge 的主要光谱响应波段分别为 350~670 nm、650~915 nm 和 860~1750 nm。

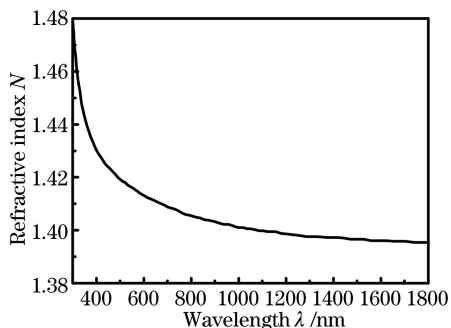


图 4 常温下硅胶折射率随波长色散曲线

Fig. 4 Dispersion curve of refractive index Versus wavelength for silicone at normal temperature

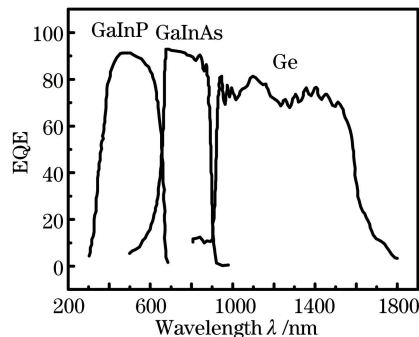


图 5 GaInP/GaInAs/Ge 三结电池量子效率图谱

Fig. 5 EQE of GaInP/GaInAs/Ge triple-junction solar cell

传统环面焦斑菲涅耳透镜的每环小棱镜均采用同一波长设计,一般为 550 nm。以入射面积 125 mm×125 mm、环距 0.3 mm 的透镜为例,利用蒙特卡罗光线追迹方法对其进行仿真,分析其 5 mm×5 mm 焦平面上的辐照度分布情况,具体见表 1 和图 6。当 550 nm 波长的光正入射的时候,焦平面辐照分布比较均匀。考虑到太阳光具有一定的发散角,且不是单色光,对光源进行重新设置,以模拟太阳的发散角和光谱。用 300~1800 nm 之间等距离的 70 个波长来近似模拟 AM1.5D 太阳光谱,建立了发散半角为 0.27 mrad 的离散光源模型。当 300~1800 nm 宽光谱太阳光入射的时候,色散严重,长波部分的截断损失较大,中电池和底电池响应波段的聚光效率较低,顶电池焦平面辐照度分布不均匀。根据 2.2 节所述的焦斑宽度计算模型,将中电池和底电池光谱响应短波限 650 nm 和 860 nm 对应的折射率分别代入(7)式,然后通过(9)式计算得出:650 nm 的光经透镜第 190 环小棱镜折射后刚好落在焦平面的右边界,190 环之后的均被截断;860 nm 的光经透镜第 135 环小棱镜折射后刚好落在焦平面的右边界,135 环之后的均被截断;这就意味着 190 环之外的透镜面积对中电池,135 环之外的透镜面积对底电池,是没有任何贡献的。

表 1 单波长设计环面焦斑菲涅耳透镜不同波段下的聚光效率和均匀度
Table 1 Optical efficiency and uniformity of ring-shaped-focus Fresnel lens with different spectral bands for single wavelength design

Spectrum /nm	Irradiation intensity /($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	Input optical power /W	Output optical power /W	Optical efficiency /%	Uniformity /%
550	879.69	13.74	10.91	79.4	80
300~1800 (AM1.5D)	879.69	13.74	9.64	70.16	52.52
350~670 (top cell)	384.93	6.01	5.52	91.85	40.66
650~915 (middle cell)	262.71	4.1	2.88	70.28	79.13
860~1750 (bottom cell)	284.88	4.45	1.97	44.16	81.52

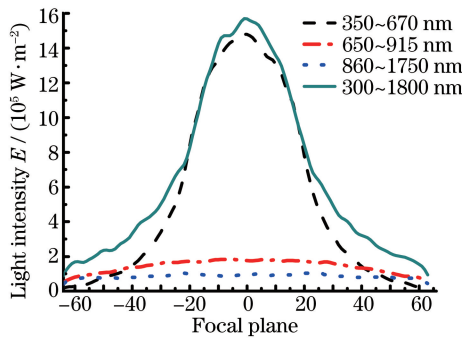


图 6 不同波段在焦平面的辐照度分布曲线(横坐标表示焦平面沿径向被划分的 128 个格点)
Fig. 6 Irradiance distribution curves on focal plane with different spectral bands (focal plane is divided into 128 grids along radius in abscissa)

3.2 新型菲涅耳透镜的设计方法及结构模型

基于单波长设计环面焦斑菲涅耳透镜所存在的不足,提出新型菲涅耳透镜结构,具体如图 7 所示。所设计的菲涅耳透镜由 I 环小棱镜组成,每环小棱镜聚焦在焦平面的不同位置形成一个环面焦斑。该透镜从中心向外沿径向划分为三个区域(I_1 、 I_2 、 I_3),其中 I_1 环小棱镜的设计波长为 λ_1 ,聚焦在焦平面上的 D_1 区域,相邻小棱镜的聚焦间隔为 d_1 ; I_2 环小棱镜的设计波长为 λ_2 ,聚焦在 D_2 区域,相邻小棱镜的聚焦间隔为 d_2 ; I_3 环小棱镜的设计波长为 λ_3 ,聚焦在 D_3 区域,相邻小棱镜的聚焦间隔为 d_3 。其设计要点在于以下两个方面:1) 多波长设计, λ_1 、 λ_2 和 λ_3 分别取自各子电池光谱响应的中心波段 400~615 nm、670~880 nm 和 930~1500 nm,可有效减小透镜外环长波色散导致的截断损失,提高中电池和底电池响应波段的聚光效率,有利于提高焦平面的光谱均匀性;2) 分区域优化的环面焦斑设计,透镜的三个区域分别聚焦在焦平面的三个区域,对每个区域分别进行优化,可更有效地提高焦平面光强空间分布的均匀性。新型菲涅耳透镜优化设计的目标为:透镜在 300~1800 nm 及各子电池光谱响应波段下的聚光效率均大于 80%,均匀度大于 75%,聚光比大于 500 倍。

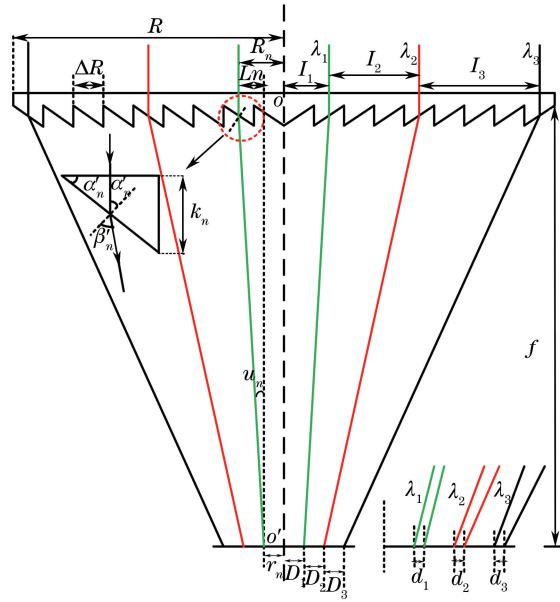


图 7 新型菲涅耳透镜结构示意图

Fig. 7 Diagrammatic representation of new Fresnel lens

根据图 7 有

$$N_\lambda \sin \alpha'_n = \sin \beta'_n, \quad (13)$$

$$\beta'_n = \alpha'_n + u_n, \quad (14)$$

$$\tan u_n = \frac{L_n}{f}, \quad (15)$$

$$\tan \alpha'_n = \frac{L_n}{N_\lambda \sqrt{L_n^2 + f^2} - f}, \quad (16)$$

$$L_n = R_n - r_n, \quad (17)$$

$$R_1 = \frac{1}{2} \Delta R, \quad (18)$$

$$R_n = R_1 + (n - 1) \times \Delta R, \quad (19)$$

$$r_n = \begin{cases} n \times d_1; & 0 < n \leq I_1 \\ D_1 + (n - I_1) \times d_2; & I_1 < n \leq I_2 \\ D_1 + D_2 + (n - I_1 - I_2) \times d_3; & I_2 < n \leq I_3 \end{cases}, \quad (20)$$

$$k_n = \Delta R \times \tan \alpha'_n, \quad (21)$$

式中, N_λ 为透镜材料的折射率, u_n 表示第 n 环小棱镜的折射光线与其光轴的偏向角, R_n 表示第 n 环小棱镜的入射光线和透镜中心轴之间的距离, r_n 为第 n 环小棱镜光轴与透镜中心轴的距离。根据(13)~(21)式, 可计算出透镜每环小棱镜的高度角 α'_n 和棱高 k_n 。

4 新型菲涅耳透镜的设计实例及性能分析

4.1 设计实例及光学仿真

为证实上述设计方法, 设计了一个材质为钢化玻璃键合硅胶 (SOG) 的方形菲涅耳透镜。该透镜采用等齿宽设计, 环距为 0.3 mm, 具体设计参数如表 2 所示。

表 2 新型菲涅耳透镜设计参数

Table 2 Design parameters of new Fresnel lens

Side Length /mm	Focal length /mm	λ_1 /nm	λ_2 /nm	λ_3 /nm	D_1 /mm	D_2 /mm	D_3 /mm	d_1 /mm	d_2 /mm	d_3 /mm
125	200	550	750	1250	1.2	0.5	0.65	0.03	0.005	0.004

利用蒙特卡罗光线追迹方法,在 300~1800 nm、350~670 nm、650~915 nm 和 860~1750 nm 的光入射条件下,对所设计的菲涅耳透镜进行仿真,分析其在 5 mm×5 mm 焦平面上的辐照度分布情况。如图 8 所示,该透镜在全光谱和各子电池光谱响应波段内都能较好地实现均匀会聚,通过计算,其焦斑均匀度都大于 75%,聚光效率都在 80%之上,几何聚光比为 625 倍,完全符合设定的优化目标,具体结果见表 3。

表 3 新型菲涅耳透镜不同波段下的聚光效率和均匀度

Table 3 Optical efficiency and uniformity of new Fresnel concentrator with different spectral bands

Spectrum /nm	Irradiation intensity /($W \cdot m^{-2}$)	Input optical power /W	Output optical power /W	Optical efficiency /%	Uniformity /%
300~1800 (AM1.5D)	879.69	13.74	11.44	83.22	75.06
350~670 (top cell)	384.93	6.01	4.9	81.53	75.52
650~915 (middle cell)	262.71	4.1	3.53	86.1	81.22
860~1750 (bottom cell)	284.88	4.45	3.75	84.27	80.6

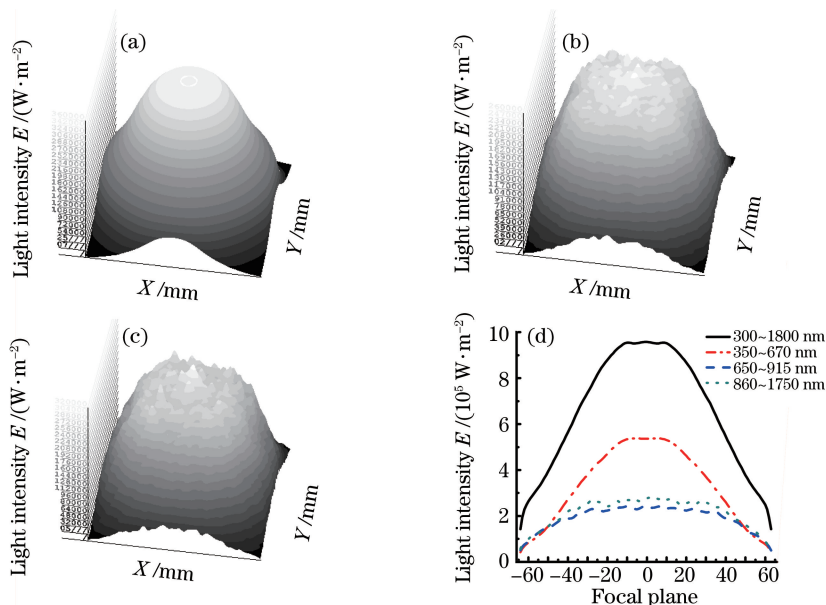


图 8 新型菲涅耳透镜不同波段下的聚光分布情况。(a) 350~670 nm;(b) 650~915 nm;
(c) 860~1750 nm;(d)不同波段在焦平面的辐照度分布曲线

Fig. 8 Irradiance distribution of new Fresnel lens on focal plane with different spectral bands. (a) 350~670 nm;
(b) 650~915 nm; (c)860~1750 nm; (d) irradiance distribution curves on focal plane with different spectral bands

4.2 实验测试

委托厂家对所设计的新型菲涅耳透镜进行加工,在户外自然光下对其进行了测试。从下图 9 可看出,太阳光经透镜折射后在焦平面上形成一均匀的方形光斑。使用太阳直接辐射表测得太阳直接辐照度 G ,光功率计测得 5 mm×5 mm 焦平面上的光功率值 P_f ,代入

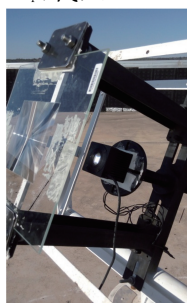


图 9 太阳光下对所设计的菲涅耳透镜进行测试

Fig. 9 Test of designed Fresnel lenses under sunlight

$$\eta = \frac{p_f}{p_{in}} = \frac{p_f}{G \times S}, \quad (22)$$

计算求得透镜的聚光效率为 80.1%，略低于仿真结果，考虑到实际加工不可避免存在一定的误差。根据下式求得透镜的平均聚光比 C_a 为 502 倍：

$$C_a = \frac{p_f}{G \times S_f}. \quad (23)$$

5 结 论

设计了一种适用于 GaInP/GaInAs/Ge 多结太阳能电池的新型菲涅耳透镜，并利用蒙特卡罗光线追迹及实验测试的方法对其聚光性能进行了研究。不同于传统环面焦斑菲涅耳透镜的单波长设计，该透镜在充分考虑 AM1.5D 太阳光谱和 GaInP/GaInAs/Ge 多结太阳能电池光谱响应特性的基础上，采用多波长设计，有效降低了透镜外环长波色散导致的截断损失，提高了中电池和底电池响应波段的聚光效率，有效提高了焦平面的光谱均匀性。此外，在传统环面焦斑菲涅耳透镜的基础上，进行分区域优化设计，更有效地提高了焦平面光强空间分布的均匀性。仿真和实验结果表明，所设计的透镜在 300~1800 nm 宽光谱范围内以及三个子电池的光谱响应波段内都能较好地实现均匀会聚，同时具有较高的聚光效率，聚光分布均匀度高于 75%，聚光效率超过 80%，平均聚光比为 502 倍。

该新型透镜结构较为简单，在不使用二次聚光元件的情况下获得了较高的聚光效率和均匀辐照度分布，可有效提高太阳能电池的光电转换效率，减小光学损失，进而提高聚光光伏模组的光电转换效率。

参 考 文 献

- 1 Vázquez-Moliní D, Fernández-Balbuena A Á, Bernabeu E, *et al.* New concentrator multifocal Fresnel lens for improved uniformity: design and characterization[C]. SPIE, 2009, 7407: 740701.
- 2 Jing Lei, Wang Yao, Zhao Huifu, *et al.* Design of uniform-irradiance concentrator for concentration photovoltaics system [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 34(2): 0208001.
荆 雷, 王 尧, 赵会富, 等. 实现均匀照度光伏聚光镜设计[J]. 光学学报, 2013, 34(2): 0208001.
- 3 Cvetkovic A, Mohedano del Pozo R, Zamora Herranz P, *et al.* Characterization of Fresnel-Köhler concentrator [C]. European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC), 2010: 176-181.
- 4 Yu Chunyan, Cui Qingfeng, Zhu Hao, *et al.* Optical design of double-side Fresnel lens for concentrator [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0122008.
于春岩, 崔庆丰, 朱 浩, 等. 双面菲涅耳聚光镜设计[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0122008.
- 5 Pan J W, Huang J Y, Wang C M, *et al.* High concentration and homogenized Fresnel lens without secondary optics element [J]. Opt Commun, 2011, 284(19): 4283-4288.
- 6 Li Peng, Wu Heli, Yang Peihuan, *et al.* General design method and optical efficiency of the solar concentrator by Fresnel lens [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(6): 62-66.
李 鹏, 吴贺利, 杨培环, 等. 菲涅耳聚光透镜的一般设计方法及效率分析 [J]. 武汉大学学报, 2010, 32(6): 62-66.
- 7 Zhang Li, Chen Zhiming, Dong Qiammin, *et al.* Design and analysis of ring-shaped-focus design and analysis of ring-shaped-focus Fresnel concentrator [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(9): 092201.
张 丽, 陈志明, 董前民, 等. 一种环面焦斑菲涅耳聚光器的设计与分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(9): 092201.