DOI:10.19789/j.1004-9398.2017.02.006

光强均匀的高效分色聚焦衍射光学元件设计

李 佳

(首都师范大学物理系,北京 100048)

摘 要

基于模拟退火算法,通过改变算法过程中判断误差值的定义,包括光强差、光强平整值和线性相关系数,设计出一种输出光强分布均匀并且衍射聚焦效率高的光学元件,使其能够对多频率入射光同时实现分色和聚焦的功能. 利用标量衍射理论,对所设计的衍射光学元件的分色聚焦性能进行定量表征,具体表征内容为聚焦效率以及光强均匀性. 这种分色聚焦衍射光学元件为提高输出面光斑的衍射效率和光强均匀度提供了一种有效的方法,有利于高效太阳能电池系统的实际应用.

关键词: 太阳能电池,分色聚焦,衍射光学元件,模拟退火算法,高效率,均匀光强分布.
中图分类号: O438

0 引 言

在现代社会的生产生活中,太阳能因为其具有广泛分布、资源充足的优点,受到了人们的重点关注[1]. 但是,对太阳能的广泛应用需要突破太阳能电池的两个关键性问题——能量的低转化率和系统的高成本. 在一些文献中,针对提高太阳能电池的转化效率,发展新材料是研究者们关注的一大重点[2,3]. 当然,若要克服转化效率低的问题,另外一个更加具有普遍意义的方法是使太阳光按照波段分色,即不同波长的光能量被对应能量带隙的半导体分别吸收,通过提高太阳能的利用率从而提高太阳能的转化效率[4-6]. 另一方面,通过几何光学的方法,将太阳能聚焦在一个较小尺寸的区域内[7,8],在提高光斑均匀性的同时提高电池材料的利用率,从而降低太阳能电池的总体价格. 为了实现分色与聚焦(color separation and light focusing,简记为 CSLF)功能,人们通过迭代算法已经设计了很多衍射光学元件(diffractive optical elements,简记为 DOEs)[9,10],但是得到的光学衍射元件的实际光学衍射效率仅仅能达到 20%. 我们课题组于 2013 年提出一种厚度优化算法,使光学衍射效率大大提高甚至可以突破 80%[11]. 本文将在此基础上进一步考虑能量的均匀性,设计了光强分布均匀的高效分色聚焦衍射光学元件,为太阳能电池的分色聚光器提供一种设计思路.

收稿日期: 2016-03-15

1 CSLF DOEs 的设计原理

1.1 CSLF DOEs 工作原理

图 1 中显示的是分色聚焦衍射光学元件的工作原理示意图. 由不同高度的柱状结构组成的衍射光学元件在 y 方向是无限延伸的. 不同颜色的入射光垂直入射到衍射光学元件的表面. 通过衍射光学元件对不同波长光的相位调制作用,不同波长的光(λ_1, λ_2, λ_3)预定会聚焦到出射平面的不同位置,在图中不同颜色的光用三种灰色的实线箭头表示. 在本篇论文中,目标光强分布类似于矩形,正如图中的虚线所示的那样,浅灰、中灰、深灰的虚线矩形框对应输出面上不同波长的目标光强分布. 图中 Γ_i ($i=1,2,3$) 表示的是对于某一个波长 λ_i 的聚焦区域,与其所对应的是在示意图输出面上的矩形区域,d 表示预设的焦距.

接下来,我们将简述分色聚焦衍射光学元件的设计原理,也就是模拟退火方法在本设计中的具体应用. 整个设计过程可以分为四个步骤:

(1) 预设一个衍射光学元件的任意初始厚度 h_1,利用菲涅尔衍射积分方法计算出其相对应的输出光强分布 $I^{(1)}$,以及设定相应判断误差值 ε_0,ε_0 =

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

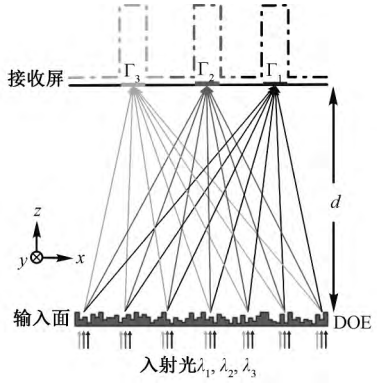


图 1　CSLF DOEs 的工作原理示意图

$F(I^{(1)}, I^0)$，其中 I^0 表示的是输出面上的理想光强分布，也是之前所提到过的目标光强分布. 在本论文中，我们将集中在改变判断误差值 e_0 的定义上，即算法 F，设计分色聚焦衍射光学元件.

(2) 改变衍射光学元件的其中某一单位的厚度，得到一个新的厚度分布 h_2，同样计算其相对应的输出光强 $I^{(2)}$. 此时利用模拟退火算法核心思想的判据判断该新厚度分布是否需要接收. 具体如下: 如果新的判断误差值小于旧的判断误差值，即 $F(I^{(2)}, I^0) < e_0$，那么我们将以百分百的几率接收这个新的输出光强所对应的厚度分布，并且定义新的 e_1，即 $\varepsilon_1 = F(I^{(2)}, I^0)$; 如果新的判断误差值大于旧的判断误差值，即 $F(I^{(2)}, I^0) > \varepsilon_0$，那么我们将以小于百分百的几率接收该输出光强所对应的厚度分布，同样定义新的 ε_1，此时 $\varepsilon_1 = F(I^{(2)} - I^0)$. 所谓的几率即满足公式 $\exp(-(\varepsilon_1 - \varepsilon_0)/T_0) < \mathrm{rand}(0, 1)$，其中 T_0 表示退火温度，第一次循环中为初始退火温度，$\mathrm{rand}(0,1)$ 表示为 0 与 1 之间的任一数. 若接收该厚度分布，则 ε_1 代替 ε_0，等待接下来的步骤. 这样的设定是为了避免最后得出的结果陷入局部最优解而不能得到全局最优解.

(3) 模拟退火的温度 T_0 以一定的速率 k 下降，即 $T = kT_0$，降温结束后，T 代替 T_0，重复步骤(2). 在模拟退火算法中，k ($0 < k < 1$) 命名为降温速率. 理论上讲，只要模拟退火过程中的初始温度足够高，以及降温速率足够慢，那么就可以找到全局最优解.

(4) 当判断误差值(ε_0) 达到要求，也就是说此时得到的输出光强分布在一定程度上与理论预设的光强分布足够吻合，或者模拟退火算法循环次数达到预先设定的最大值时，设计程序结束，得到最终输出光强所对应的厚度分布，就是该过程得到的最终衍射光学元件的厚度分布.

1.2　CSLF DOEs 的理论分析方法

一旦分色聚焦衍射光学元件设计完成后，那么该衍射光学元件的厚度便确定了. 这时，在输入面上的光场分布为

$$U_1(x_1, \lambda_i) = \exp\left[\mathrm{j}\frac{2\pi(n-1)h(x_1)}{\lambda_i}\right], \quad (1)$$

其中，$h(x_1)$ 代表衍射光学元件的厚度分布，x_1 为计算点在输入面上的横向坐标，λ_i ($i = 1, 2, 3$) 为三个不同颜色的入射波波长，n 表示为衍射光学元件的折射率. 当传播距离足够远的时候，我们可以利用菲涅尔衍射积分方法计算输出面场分布为

$$U_2(x_2, \lambda_i) = \int U_1(x_1, \lambda_i)\,\hat{G}(x_2, x_1, \lambda_i)\,\mathrm{d}x_1, \quad (2)$$

其中，x_2 为计算点输出面上的横向坐标，$\hat{G}$ 指的是菲涅尔衍射积分算符，可以写为以下形式

$$\hat{G}(x_2, x_1, \lambda_i) = \frac{1}{\sqrt{\mathrm{j}\lambda_i f}}\exp(\mathrm{j}2\pi d/\lambda_i) \times \exp\left[\mathrm{j}\pi(x_2 - x_1)^2/(\lambda_i d)\right]. \quad (3)$$

为了定量表征所设计的光学衍射元件的性能，评价其性能优劣，我们定义了两个度量标准——衍射聚焦效率 (η) 和光强均匀性 (γ).

衍射聚焦效率的物理意义表示的是在目标区域内的聚焦能量占总入射能量的百分比，是能量利用率方面的一个定量表征，在本论文中定义为

$$\eta = \frac{\sum_{i=1,2,3}\int_{\Gamma_i} I(x_2, \lambda_i)\,\mathrm{d}x_2}{\sum_{i=1,2,3}\int_{\Gamma_i} I^0(x_2, \lambda_i)\,\mathrm{d}x_2}, \quad (4)$$

其中，$I = \| U_2 \|^2$，Σ 表示三个不同波长的入射光对应的强度和.

光强均匀性的物理意义表示的是输出面光强分布的平整程度，是评价所设计的光学衍射元件是否能达到控制聚焦波形的重要标准，以满足在实际应用中面临的各种要求. 在本论文中，光强均匀性定义为

$$\gamma = 1 - \frac{\sum_{i=1,2,3}\sqrt{\left[I_{\Gamma_i}(x_2, \lambda_i) - \bar{I}_{\Gamma_i}(x_2, \lambda_i)\right]^2}}{\sum_{i=1,2,3}\bar{I}_{\Gamma_i}(x_2, \lambda_i)}, \quad (5)$$

其中，$I_{\Gamma_i}(x_2, \lambda_i)$ 表示在输出面上的目标聚焦区域内计算所得输出光强分布; $\bar{I}_{\Gamma_i}(x_2, \lambda_i)$ 表示在输出面上的目标聚焦区域内计算所得输出光强平均值. γ 越趋近于 1，则表示该输出光强轮廓越平整.

在文章中，我们将对模拟退火算法中的判断误差值 ε_0 设定三种不同的单一定义，分别用光强差

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

($\varepsilon_{光强差}$)、光强平整值($\varepsilon_{平整值}$)和线性相关系数($\varepsilon_{线性相关}$). 三种判断误差值的定义分别是

$$\varepsilon_{光强差} = \sum_{i=1,2,3} | I_{\Gamma_i}^{(N)}(x_2,\lambda_i) - I_{\Gamma_i}^{0}(x_2,\lambda_i) |, \quad (6)$$

表示聚焦区域内计算所得光强分布与目标预设光强分布之差的绝对值,其中 N 表示模拟退火算法中当前改变衍射光学元件厚度的次数;

$$\varepsilon_{平整值} = 1 - \frac{\sum_{i=1,2,3} \sqrt{[I_{\Gamma_i}^{(N)}(x_2,\lambda_i) - I_{\Gamma_i}^{0}(x_2,\lambda_i)]^2}}{\sum_{i=1,2,3} I_{\Gamma_i}^{0}(x_2,\lambda_i)}, \quad (7)$$

表示聚焦区域内计算所得光强分布与目标预设光强分布之间的相似度,是之前所提出的光强均匀性 γ 的变体,与光强差 $e_{光强差}$ 的意义类似;

$$\varepsilon_{线性相关} = \frac{\sum_{i=1,2,3} \int [I^{(N)}(x_2,\lambda_i) - I^{0}(x_2,\lambda_i)]\,dx_2}{\sum_{i=1,2,3} \sqrt{\int [I^{(N)}(x_2,\lambda_i) - I^{0}(x_2,\lambda_i)]^2 dx_2}}, \quad (8)$$

表示整个输出面内计算所得光强分布与目标预设光强分布之间线性相关系数,在文章中用于获得较高光强均匀性.

值得一提的是与度量性能标准不同,判断误差值是在设计过程中随着计算的进行不断变化的一个量,是每一步计算所得光强分布与目标光强分布的接近程度.

2 CSLF DOEs 的性能分析

在本节中,将分为三个部分对所设计的分色聚焦衍射光学元件进行性能分析. 在第一个小节中,将说明具体所选参数. 其次,在 2.2 节中我们将依次改变判断误差值的定义,来设计分色聚焦衍射光学元件,并且评估该误差值对元件性能的影响. 接着,为了继续优化设计分色聚焦衍射光学元件,我们将引入一个权重因子,使两个判断误差值结合以得到更加理想的结果.

2.1 CSLF DOEs 所选参数

分色聚焦衍射光学元件的初始参数选择如下. 我们选择了波长为 0.45 mm,0.55 mm 和 0.65 mm 三种颜色的光作为设计分色聚焦衍射光学元件的入射光. 入射面到出射面的焦距长度 d 为 800 mm. 我们定义单位长度 $l_0 = \sqrt{\lambda_0 \times f} \approx 0.66$ mm,这样入射面的线性尺寸为 $32l_0 \approx 21.23$ mm,出射面的线性尺寸为 $8l_0 \approx 5.31$ mm,选择折射率 $n = 1.46$,忽略材料的色散特性. 在接收面上,对应 0.45 mm,0.55 mm,0.65 mm 三种波长的入射光,我们预先设置的聚焦位置中心分别为 1.75 mm,0 mm,−1.75 mm,聚焦区域宽度均为 0.52 mm,所以相对应的三个聚焦区域的范围分别为 [1.49,2.01] mm, [−0.26,0.26] mm 和 [−2.01,1.49] mm,在目标区域范围内理想聚焦振幅大小保持不变. 这样通过所设计的衍射光学元件的光束在传播到输出面时将会得到一个类矩形的光场分布,如图 1 中虚线表示的那样. 在目标聚焦区域范围之外的位置,预设的理想振幅为零. 光束从输入面传输到接收屏的过程当中,保持能量守恒,以此来设定理想聚焦光场分布. 计算中,为了减小个别结果的不准确性,最大相位我们设定为四个,分别是 12π,14π,16π 和 18π. 衍射光学元件的量化级次为32 级. 为了实现量化设计以及量化分析,输入面以及接收屏上的数值计算取样点均为 2 048.

2.2 不同判断误差值设定对 CSLF DOEs 的性能影响

当 $\varepsilon_0 = \varepsilon_{光强差}$ 时,所得 CSLF DOEs 的输出面振幅分布如图 2 所示,最大相位分别为 (a) 12π、(b) 14π、(c) 16π 和 (d) 18π. 在图中,我们可以看到所设计的衍射光学元件已经可以实现分色聚焦的功能. 深灰、中灰、浅灰的实线分别表示波长为 0.45 mm、0.55 mm、0.65 mm 的入射光在输出面上的振幅分布,相对应灰度的虚线表示的是不同波长的入射光在输出面上理想聚焦的振幅分布.

当 $\varepsilon_0 = \varepsilon_{平整值}$ 时,所得 CSLF DOEs 的输出面振幅分布如图 3 所示,最大相位分别为 (a) 12π、(b) 14π、(c) 16π 和 (d) 18π. 从定义上来看,光强差与光强平整值的出发角度是类似的;从结果上来看,光强差与光强平整值分别作为判断误差值有其不同的地方. 与图 2 相比,我们发现图 3 的背景噪音明显地变大,聚焦区域内的光强分布相对来说更加不平整.

当 $\varepsilon_0 = \varepsilon_{线性相关}$ 时,所得 CSLF DOEs 的输出面振幅分布如图 4 所示,最大相位分别为 (a) 12π、(b) 14π、(c) 16π 和 (d) 18π. 图 4 结果明显与图 2、图 3 所不同,振幅值明显变小,光强分布相对来说较均匀,对背景噪音也有一定的压制. 直观来看图 4 的背景噪音甚至比图 2 的还要小甚至更加平整,这是因为定义线性相关系数时区域选择的是整个输出面,所以整个输出面上的光强均匀性都很好. 但是,得到良好的光强均匀性的同时却牺牲

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

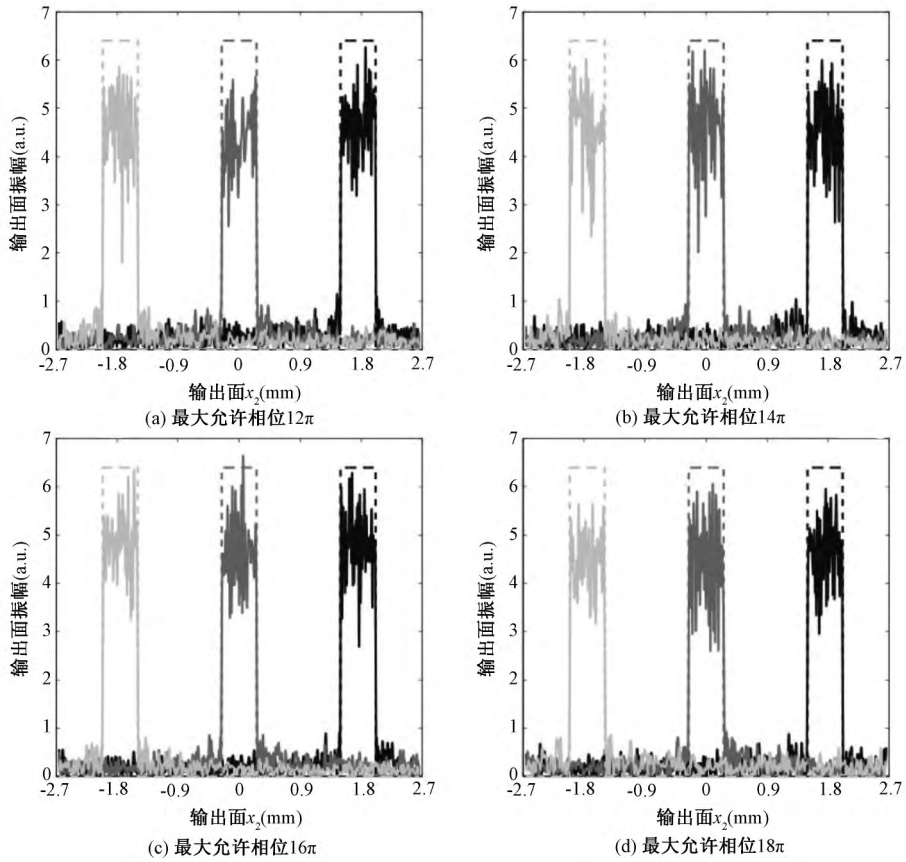


图 2　光强差作为判断误差值,所得 CSLF DOEs 的输出面振幅分布. 最大相位分别为 (a) 12π; (b) 14π; (c) 16π; (d) 18π

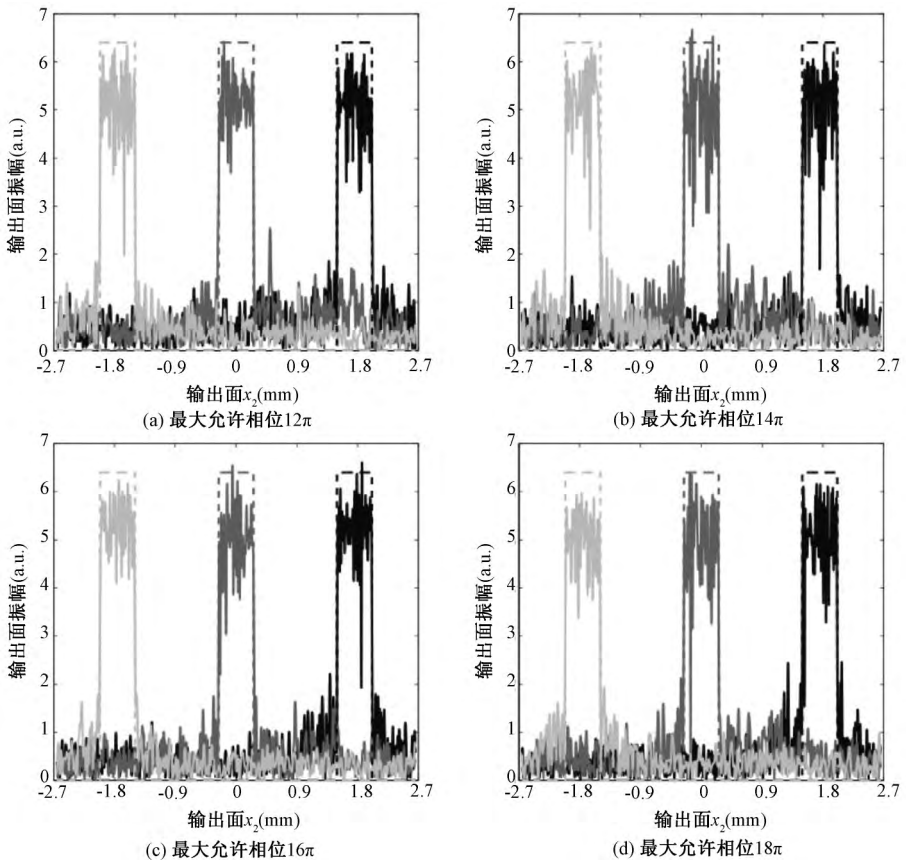


图 3　光强平整值作为判断误差值,所得 CSLF DOEs 的输出面振幅分布. 最大相位分别为 (a) 12π; (b) 14π; (c) 16π; (d) 18π

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

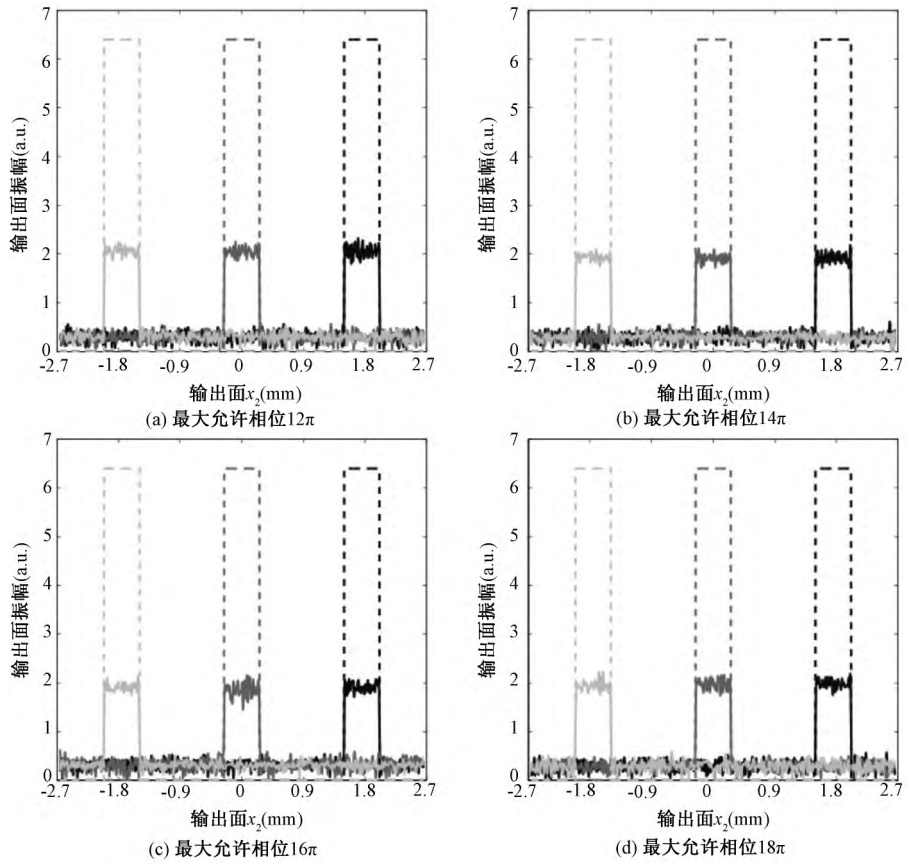


图 4 线性相关系数作为判断误差值,所得 CSLF DOEs 的输出面振幅分布. 最大相位分别为(a) 12π;(b) 14π;(c) 16π;(d) 18π

掉了太多的聚焦效率.

表 1 不同判断误差值所设计的 CSLF DOEs 的表征性能

最大相位		12π	14π	16π	18π
光强差	η(%)	53.08	50.35	55.38	53.51
	γ	0.75	0.65	0.72	0.74
光强平整值	η(%)	64.70	63.75	65.19	61.33
	γ	0.77	0.72	0.78	0.74
线性相关系数	η(%)	10.23	8.94	8.72	9.40
	γ	0.89	0.89	0.88	0.88

表 1 展示的是在设定以上三种不同判断误差值的情况下,所设计的分解劝聚焦衍射光学元件的具体表征数据。这三种判断误差值为光强差、光强平整值以及线性相关系数,其在表 1 中的数据分析分别对应图 2、图 3 和图 4. 从聚焦效率来看,光强平整值作为误差值时,聚焦效率可以达到 60% 以上,而线性相关系数作为误差值时,聚焦效率才只有 10% 上下;与之相对的是,线性相关系数为误差值时,光强均匀性比其他两个误差值的性能都要好,这一点从输出振幅图上也能直观看出. 从表 1 中,我们还可以看到当最大相位为 16π 时,聚焦效率略高于其他三组相位值,光强均匀性没有明显差别.

2.3 优化 CSLF DOEs 的设计

为了进一步优化衍射光学元件,以期望得到一个同时可以对聚焦效率和光强均匀性都有很好调制作用的误差值,通过引入一个权重因子,将两个误差值结合起来. 通过上面的内容,我们发现线性相关系数作为误差值牺牲了过多的聚焦效率,而聚焦效率正是太阳能电池系统中尤为重要的一个性能,所以我们不能单独使用线性相关系数. 但是我们可以将其分别与光强差与光强平整值相结合,会得到一个综合性的结果. 因为最大相位为 16π 时,聚焦效率相对来说较高,所以在之后的计算中,我们取最大相位均为 16π.

根据定义,光强平整值与线性相关系数的量级相当,而与光强差相差 $10^3 \sim 10^4$ 的量级,所以权重因子 σ_1 与 σ_2 的绝对数值并没有可比性,两个权重因子各选择了一个适当的数值进行结果展示. 图 5(a) 中,$\varepsilon_0 = \varepsilon_{光强差} + \sigma_1\varepsilon_{线性相关}$,可以看到相比于图 2、图 3 和图 4,结果有了明显的优化,能量效率为 48.47% 的同时均匀性为 0.83;图 5(b) 中,$\varepsilon_0 = \varepsilon_{光强平整值} + \sigma_2\varepsilon_{线性相关}$,选择 $\sigma_2 = 10$,聚焦效率 29.26%,光强均匀性为 0.87,虽然聚焦效率有所下

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

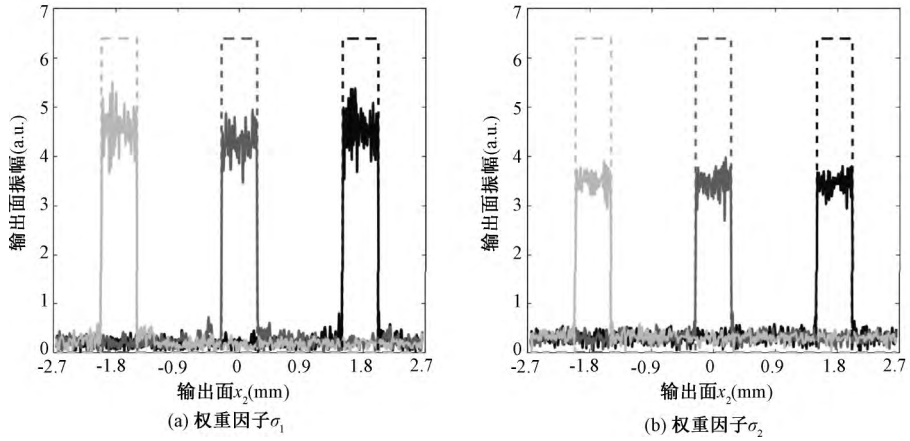


图 5　(a) 光强差与线性相关系数通过权重因子 σ_1 相结合作为判断误差值,所得 CSLF DOEs 的输出面振幅分布,其中 $\sigma_1 = 60\ 000$; (b) 光强平整值与线性相关系数通过权重因子 σ_1 相结合作为判断误差值,所得 CSLF DOEs 的输出面振幅分布,其中 $\sigma_2 = 10$

降但是光强均匀度有所提高.

3　结　论

通过改变模拟退火算法中判断误差值的定义,包括光强差、光强平整值和线性相关系数,我们设计了一系列分色聚焦衍射光学元件,并且通过衍射聚焦效率和光强均匀性两个性能进行定量表征. 最后引入权重因子使得两个判断误差值相结合,进而优化设计,得到光强均匀高效分色聚焦衍射光学元件,其有望在太阳能电池系统中得到实际应用.

参　考　文　献

[1] Mcfarland E W. Solar energy: setting the economic bar from the top-down [J]. Energy Environ Sci, 2014, 7(3): 846 – 854.

[2] Thanh T H, Quang V L, Thanh D H. Determination of the dynamic resistance of the quantum dots solar cells by one $I-V$ curve and electrochemical impedance spectra [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2015, 143: 269 – 274.

[3] Uzu H, Ichikawa M, Hino M, et al. High efficiency solar cells combining a perovskite and a silicon heterojunction solar cells via an optical splitting system [J]. Appl Phys Lett, 2015, 106(1): 013506.

[4] Dorodnyy A, Shklover V, Braginsky L, et al. High-efficiency spectrum splitting for solar photovoltaics [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2015, 136: 120 – 126.

[5] Michel C, Loicq J, Languy F, et al. Optical study of a solar concentrator for space applications based on a diffractive/refractive optical combination [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2014, 120: 183 – 190.

[6] Green M A, Ho-Baillie A. Forty three per cent composite split-spectrum concentrator solar cell efficiency [J]. Progress in Photovoltaics: Research & Applications, 2010, 18(1): 42 – 47.

[7] Caselli D A, Ning C Z. High-performance laterally-arranged multiple-bandgap solar cells using spatially composition-graded $Cd_xPb_{1-x}S$ nanowires on a single substrate: a design study [J]. Optics Express, 2011, 19(S4): A686 – A694.

[8] Ju X, Wang Z F, Flamant G, et al. Numerical analysis and optimization of a spectrum splitting concentration photovoltaic-thermoelectric hybrid system [J]. Solar Energy, 2012, 86(6): 1941 – 1954.

[9] Dong B Z, Zhang G Q, Yang G Z, et al. Design and fabrication of a diffractive phase element for wavelength demultiplexing and spatial focusing simultaneously [J]. Applied Optics, 1996, 35(35): 6859 – 6864.

[10] Dong B Z, Liu R, Yang G Z, et al. Design of diffractive phase elements that generate monochromatic or color point and ring patterns [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1998, 15(2): 480 – 486.

[11] Ye J S, Wang J Z, Huang Q L, et al. A single diffractive optical element implementing spectrum-splitting and beam-concentration functions simultaneously with high diffraction efficiency [J]. Chin Phys B, 2013, 22(3): 034201.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Design of High Efficiency Diffractive Optical Element of Color Separation and Light Focusing with a Flat Intensity Distribution

Li Jia

(Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048)

Abstract

Based on the simulated annealing (SA) method, we have designed a variety of diffractive optical elements (DOEs). In the work, we changed the definitions of the judge error in the process of SA method, including the differences and uniformity of output light intensity, and the linear correlation coefficients. As a result, the DOEs had the abilities to perform high efficiency and flat intensity distribution both in color separation and light focusing (CSLF) simultaneously. We utilized Fresnel diffraction integral method to calculate the distribution of output light field, and analyzed the performances of the designed DOEs by scalar diffraction theory. The analysis result verified the DOEs perform high efficiency in focusing with uniformity light field distribution. In the end, we pointed out it is expected that the designed DOEs should have practical applications in high efficiency solar cell systems.

Key words: solar cell systems, color separation and light focusing, diffractive optical element, simulated annealing method, high efficiency, flat intensity distribution.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net