DOI:10.19789/j.1004-9398.2017.05.005

分色聚焦衍射光学元件的色散特性*

徐文琪[1] 林冬风[2] 叶佳声[1]** 张 岩[1] 杨国桢[2]

(1. 首都师范大学物理系,北京 100048; 2. 中国科学院物理研究所,北京 100190)

摘 要

分色聚焦衍射光学元件是横向太阳能电池系统中的关键性器件. 在本文中,模拟计算了修正色散对提升衍射光学元件聚焦效率的影响; 同时,相位方程成功解释了模拟计算结果.

关键词: 分色聚焦衍射光学元件,色散特性,光学分色聚焦效率,相位方程.

中图分类号: O436

0 引 言

衡量太阳能电池性能的两个重要指标是其光电转化效率和加工成本. 太阳能光伏电池的原理是: 利用半导体材料吸收光子产生电荷载流子,从而形成电流. 由于太阳光谱是介于 0.30 ~ 2.5 μm 的宽波段光谱,考虑到单一半导体材料只能对特定窄波段的光进行高效吸收,因此,单结太阳能电池的效率普遍不高. 为了进一步提高太阳能电池的效率,横向多结太阳能电池的研究受到了广泛的关注[1-4]. 横向多结太阳能电池系统的原理示意图如图 1 所示. 利用分色聚焦衍射光学元件,将入射的太阳光谱分为不同波段并进行聚焦,在聚焦位置处放置相应带隙的太阳能子电池,不仅可以实现对太阳光的高效吸收,而且极大地减小了电池使用面积,降低了成本,受到了大家的普遍青睐,成为太阳能电池的一个重要的研究方案.

在之前的研究工作中,我们提出通过设计单个衍射光学元件,可对入射的太阳光同时实现分色和聚焦功能[5],并利用微光刻技术制作了衍射光学元件,实验测量结果证实了所加工的衍射光学元件具有高效率的分色聚焦性能[6]. 最近,在原有研究工作的基础上,我们提出了分色聚焦衍射光学元件优化设计的一种新方法[7],进一步提高了元件的分色聚焦效率. 模拟结果表明,在忽略材料色散的情况下,衍射光学元件具有很高的光学分色聚焦效率. 但是,由于衍射光学元件具有较宽的工作波段范围,不同波长的太阳光具有不同的折射率,而且,光学元件的厚度较大,折射率的差异会积累比较大的相位偏差,从而影响衍射光学元件的效率. 为此,在本文中,通过改变光学元件的最大厚度、材料、工作波段范围,研究了其色散特性. 一方面,在设计中认为在整个波段材料具有恒定的折射率,在性能分析中认为材料的折射率随波长的改变而变化,模拟计算了衍射光学元件的效率; 另一方面,在设计中考虑材料的色散特性,获得优化设计的衍射光学元件,在性能分析中亦考虑材料的色散特性,再次模拟计算衍射光学元件的效率. 通过比较两次模拟计算的结果,得出光学元件的最大厚度、材料的选择及工作波段范围对光学分色聚焦效率的影响规律. 最后,根据几何光学中的相位方程,给出定量的分析.

1 分色聚焦衍射光学元件的设计原理和色散误差来源

1.1 分色聚焦衍射光学元件的设计原理

分色聚焦衍射光学元件,其主要原理是基于闪耀光栅和菲涅耳透镜的结合. 对于一个特定的波长,衍射光学元件的厚度是闪耀光栅和菲涅耳透镜的厚度之和[7],光栅的倾角 θ 决定了入射光在输出面上的聚焦位置. 在多波长的太阳能电池系统中,利用厚度优化算法[5],可以将多波长对应的多个衍射光学

收稿日期: 2017-01-03

* 国家自然科学基金(91233202)资助.

**通讯作者: jsye@mail.cnu.edu.cn

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

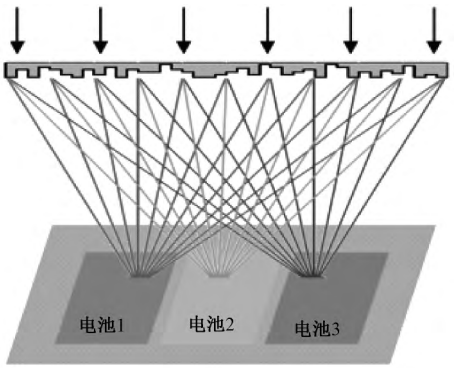


图1 分色聚焦衍射光学元件与横向多结太阳能电池系统的示意图

元件厚度综合成最终设计的衍射光学元件的唯一厚度 $h(x_1)$,其中 x_1 为输入面上的位置坐标. 衍射光学元件的设计原理及设计过程,在文献[7]中已详细叙述,在这里就不再赘述. 一旦完成衍射光学元件的设计,也就是确定其厚度分布 $h(x_1)$ 的数值,入射的太阳光在透过衍射光学元件后,在输入面上的光场分布为:

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

其中 λ_i 为入射光波的波长,$n(\lambda_i)$ 为该波长情况下材料的折射率. 根据输入平面上的光场分布,利用菲涅耳衍射积分方法,可得到输出平面上的光场分布[8]. 衍射光学元件的光学分色聚焦效率定义为输出平面上聚焦区域内的能量与输入平面上入射能量的百分比,详细计算公式可参考文献[5].

1.2 分色聚焦衍射光学元件的色散误差来源

在文献[7]中,忽略了材料的色散效应,对所有设计波长,材料的折射率都选为定值 n_0. 实际上,材料的折射率随波长的改变而变化,因此,在性能分析中,对不同的入射波长常选用真实的折射率 $n(\lambda_i)$,计算光学元件的光学分色聚焦效率 η_0. 由于设计中未考虑材料的色散误差,这会导致衍射光学元件效率的降低. 所以,在本文中,考虑色散带来的影响,将折射率设为一个与波长 λ_i 相关的函数,重新设计衍射光学元件,而且,在性能分析中也考虑材料的色散效应,此时光学元件的效率为 η_1. 因此,色散效率差可定义为 $\Delta\eta = \eta_1 - \eta_0$.

根据公式(1)可知,色散效率差来源于三个方面: $h(x_1)$,$n(\lambda_i)$ 和 λ_i,也就是元件的厚度、材料的折射率和工作波段范围. 本文将针对这三种情况进行分析模拟. 首先,通过改变元件的厚度,计算其对色散效率差的影响规律. 其次,选用不同的光学元件材料,由于不同材料具有不同的色散曲线,研究其对色散效率差的影响规律. 最后,通过拓宽工作波段范围,研究其对色散效率差的影响规律.

2 分色聚焦衍射光学元件的色散特性

2.1 色散效率差与分色聚焦衍射光学元件的厚度之间的关系

以熔融石英为材料设计衍射光学元件,根据光学手册[9],熔融石英的色散关系可以表示为:

$$n_{\text{fused si}}(\lambda) = \sqrt{1+\frac{0.696\,166\,3\lambda^2}{\lambda^2-(0.068\,404\,3)^2}+\frac{0.407\,942\,6\lambda^2}{\lambda^2-(0.116\,241\,4)^2}+\frac{0.897\,479\,4\lambda^2}{\lambda^2-(9.896\,161)^2}}, \quad (2)$$

元件的设计参数如下: 三个设计波长依次为 $\lambda_1 = 0.50\ \mu\text{m}$,$\lambda_2 = 0.60\ \mu\text{m}$,$\lambda_3 = 0.70\ \mu\text{m}$; 对应折射率为 $n_{\text{fused si}}(\lambda_1) = 1.462\,33$,$n_{\text{fused si}}(\lambda_2) = 1.458\,04$,$n_{\text{fused si}}(\lambda_3) = 1.455\,29$; 光栅角度分别为 $\theta_{\text{fused si}}(\lambda_1) = -\frac{\pi}{720}$,$\theta_{\text{fused si}}(\lambda_2) = 0$,$\theta_{\text{fused si}}(\lambda_3) = \frac{\pi}{720}$; 中心波长为 $\lambda_0 = 0.60\ \mu\text{m}$,平均折射率为 $n_0^{\text{fused si}} = 1.458\,55$,焦距为 $f = 600\ \text{mm}$,定义单元长度为 $l_0 = \sqrt{\lambda_0 \times f} = 0.6\ \text{mm}$,输入平面与输出平面的尺寸均为 $50 \times l_0 = 30\ \text{mm}$,且均分为 6 000 个采样点,每个采样间隔为 $30\ \text{mm} \div 6\,000 = 5\ \mu\text{m}$. 在输出平面上,聚焦区域的积分宽度为 $d = 2 \times l_0 = 1.2\ \text{mm}$. 根据几何光学,当不考虑色散时,折射率取平均折射率 n_0,元件的相位与其厚度的关系为:

$$\varphi_0(\lambda_i) = 2\pi \times h(x_1) \times (n_0 - 1)/\lambda_i. \quad (3)$$

当考虑材料的色散时,折射率随波长的变化而变化,元件的实际相位为:

$$\varphi(\lambda_i) = 2\pi \times h(x_1) \times [n(\lambda_i) - 1]/\lambda_i. \quad (4)$$

因此,色散带来的相位变化为:

$$\begin{aligned}\Delta\varphi(\lambda_i) &= \varphi(\lambda_i) - \varphi_0(\lambda_i)\\ &= 2\pi \times h(x_1) \times \Delta n(\lambda_i)/\lambda_i, \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\Delta n(\lambda_i) = n(\lambda_i) - n_0$.

当中心波长最大相位在 $0 \sim 100\pi$ 的厚度范围内时,模拟计算了旧元件和新元件的光学分色聚焦效率,并将色散效率差随中心波长最大相位的变化关系描绘如图 2,其中数据标记点为三角形、正方形

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

和十字形的三条虚线分别代表波长为 0.50 μm、0.60 μm 和 0.70 μm 入射光的色散效率差,实线代表平均色散效率差. 中心波长最大相位与元件厚度之间的关系为: $\psi = 2\pi \times h \times (n_0 - 1)/\lambda_0$. 因此,中心波长最大相位增加 2π 时,元件的厚度增加 $\Delta h = \frac{\lambda_0}{n_0 - 1} = 1.31$ μm. 从图 2 可以看出,波长为 0.60 μm 的光具有最小的色散效率差,而对于 0.50 μm 和 0.70 μm 的入射光来说,由于材料的折射率与平均折射率的偏离较大,随着元件厚度的增加,较大的相位误差导致了色散效率差的增大. 更详细地说,由于 0.50 μm 入射光的相位变化 $\Delta\varphi_1(\lambda_1 = 0.50\ \mu m)$ 大于 0.70 μm 入射光的相位变化 $\Delta\varphi_3(\lambda_3 = 0.70\ \mu m)$,因此,0.50 μm 的入射光具有最大的色散效率差.

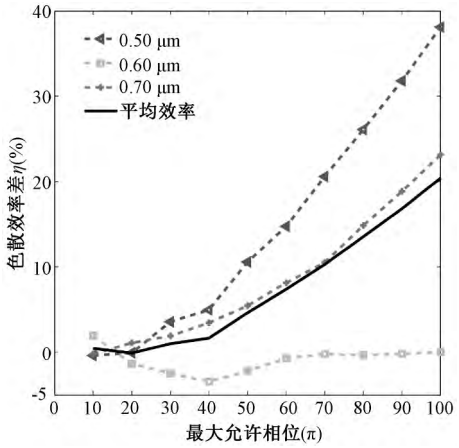


图 2　选用材料为熔融石英时,色散效率差随中心波长最大相位的变化关系图. 数据标记点为三角形、正方形和十字形的三条虚线分别代表了 0.50 μm、0.60 μm 和 0.70 μm 三个波长的色散效率差. 实线表示平均色散效率差.

2.2　色散效率差与强色散光学材料之间的关系

为了探究材料的选择对色散效率差的影响规律,选择了折射率随波长变化较大的 ZnSe 作为光学元件材料. 根据光学手册[9],ZnSe 的色散关系如下:

$$n_{ZnSe}(\lambda) = \sqrt{1 + \frac{4.298\,014\,9\lambda^2}{\lambda^2 - (0.192\,063\,0)^2} + \frac{0.627\,765\,57\lambda^2}{\lambda^2 - (0.378\,782\,60)^2} + \frac{2.895\,563\,3\lambda^2}{\lambda^2 - (46.994\,595)^2}}, \quad (6)$$

参数选择如下: 设计波长为 $\lambda_1 = 0.50$ μm, $\lambda_2 = 0.60$ μm, $\lambda_3 = 0.70$ μm; 对应的折射率分别为 $n_{ZnSe}(\lambda_1) = 2.741\ 34$, $n_{ZnSe}(\lambda_2) = 2.613\ 80$, $n_{ZnSe}(\lambda_3) = 2.556\ 36$; 光栅角度分别为 $\theta_{ZnSe}(\lambda_1) = -\frac{\pi}{2\,570}$, $\theta_{ZnSe}(\lambda_2) = 0$, $\theta_{ZnSe}(\lambda_3) = \frac{\pi}{2\,570}$; 中心波长为 $\lambda_0 = 0.60$ μm, 平均折射率为 $n_0^{ZnSe} = 2.637\ 17$, 元件的其他参数都保持不变. 色散效率差随中心波长最大相位之间的变化关系如图 3 所示,其中数据标记点为三角形、正方形和十字形的三条虚线分别代表波长为 0.50 μm、0.60 μm 和 0.70 μm 入射光的色散效率差,实线表示平均色散效率差. 从图 3 可以看出,四条曲线的变化规律类似于图 2; 图 3 与图 2 的一个根本区别在于: 在图 2 中,对熔融石英材料,当中心波长的最大相位为 100π 时,最大的色散效率差约为 40%; 对 ZnSe 材料,当中心波长的最大相位仅为 20π 时,最大的色散效率差就达到了约 40%,这是因为在同一波段范围内 ZnSe 的折射率变化远远大于熔融石英的折射率变化. 也就是说,当中心波长的相位相同时,材料本身的折射率变化越明显,元件的色散效率差越大. 因此,所选择的衍射光学元件材料,在 0.35 ~ 2.5 μm 范围内应具有较弱色散.

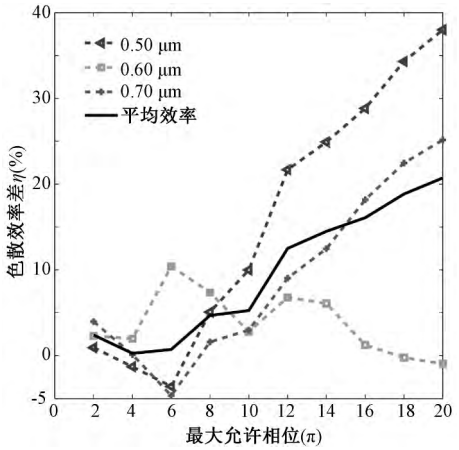


图 3　选用 ZnSe 为元件材料时,色散效率差随中心波长最大相位的变化关系图. 数据标记点为三角形、正方形和十字形的三条虚线分别代表了 0.50 μm、0.60 μm 和 0.70 μm 三个波长的色散效率差. 实线表示平均效率差.

2.3　色散效率差与工作波段范围之间的关系

在实际应用中,元件的工作波段范围是太阳光谱范围,旧元件设计的波段范围是 0.50 ~ 0.70 μm,为了简单说明拓宽设计光谱范围对色散效率差的影响,新元件的工作波段范围选为 0.45 ~ 0.75 μm. 为此,选择了四个设计波长,分别为 $\lambda_1 = 0.45$ μm, $\lambda_2 = 0.55$ μm, $\lambda_3 = 0.65$ μm, $\lambda_4 = 0.75$ μm; 光栅角

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

度分别为 $\theta_{\text{fused si}}(\lambda_1) = -\frac{\pi}{960}$, $\theta_{\text{fused si}}(\lambda_2) = -\frac{\pi}{2\,883}$, $\theta_{\text{fused si}}(\lambda_3) = \frac{\pi}{2\,883}$, $\theta_{\text{fused si}}(\lambda_4) = \frac{\pi}{960}$; 中心波长为 $\lambda_0 = 0.60$ μm, 平均折射率为 $n_0^{\text{fused si}} = 1.459\,062$, 元件的其他参数都保持不变. 图 4 为宽波段情况下元件的色散效率差随中心波长最大相位的变化关系图. 从图 4 中不难发现, 与平均折射率差值较小的 0.55 μm 和 0.65 μm 两个波长的光, 其色散效率差随中心波长最大相位的变化不大. 而对于 0.45 μm 和 0.75 μm 的入射光来说, 由于材料的折射率与平均折射率的差值较大, 所以, 色散效率差较大.

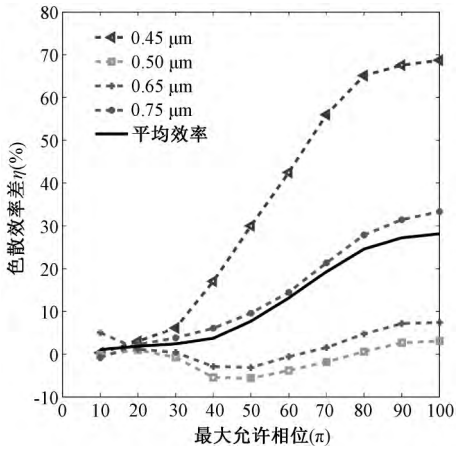


图 4 选用材料为熔融石英时, 宽光谱衍射光学元件的色散效率差随中心波长最大相位的变化关系图. 数据标记点为三角形、正方形、十字形和实心圆形的四条虚线分别为了 0.45 μm、0.55 μm、0.65 μm 和 0.75 μm 四个波长的色散效率差随中心波长最大相位的变化关系曲线. 实线表示四个波长的平均色散效率差.

3 结 论

本文分析了分色聚焦衍射光学元件的色散效率差的来源, 理论模拟了色散效率差随不同参量变化的规律. 主要结论如下:

1. 对熔融石英光学元件, 当设计中考虑材料的色散时, 元件的光学分色聚焦效率得到了很大的提升, 且随着中心波长最大相位(或元件的厚度)的增加, 光学分色聚焦效率提升越明显;

2. 当选用折射率变化较大的 ZnSe 作为元件材料时, 在设计中考虑材料的色散变得更为重要;

3. 当工作波段范围增大时, 材料的色散对元件效率的影响也变大, 也就是说, 在设计中必须考虑材料的色散.

综上, 如果在设计中考虑材料的色散, 对提升衍射光学元件光学分色聚焦效率具有很明显的效果.

参 考 文 献

[1] Stefancich M, Zayan A, Chiesa M, et al. Single element spectral splitting solar concentrator for multiple cells CPV system [J]. Opt Express, 2012, 20(8): 9004 – 9018.

[2] Michel C, Loicq J, Thibert T, et al. Optical study of a spectrum splitting solar concentrator based on a combination of a diffraction grating and a Fresnel lens [J]. AIP Conf Proc, 2015, 1679(1): 070002.

[3] Wang P, Dominguez-Caballero J A, Friedman D J, et al. A new class of multi-bandgap high-efficiency photovoltaics enabled by broadband diffractive optics [J]. Prog Photovolt: Res Appl, 2015, 23(9): 1073 – 1079.

[4] Patrick Xiao T, Cifci O S, Bhargava S, et al. Diffractive spectral-splitting optical element designed by adjoint-based electromagnetic optimization and fabricated by femtosecond 3D direct laser writing [J]. ACS Photon, 2016, 3(5): 886 – 894.

[5] 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.

[6] Huang Q L, Wang J Z, Quan B G, et al. Design and fabrication of a diffractive optical element as a spectrum-splitting solar concentrator for lateral multijunction solar cells [J]. Appl Optics, 2013, 52(11), 2312 – 2319.

[7] Xu W Q, Lin D F, Xu X, et al. Simple and universal method in designs of high-efficiency diffractive optical elements for spectrum separation and beam concentration [J]. Chin Phys B, 2017, 26(7): 074202.

[8] Goodman J W. Introduction to Fourier optics [M]. San Francisco: McGraw-Hill Press, 1968.

[9] Bass M, Van Stryland E W, Williams D R, et al. Handbook of optics(Vol 2): devices, measurements, and properties(2nd Edition) [M]. San Francisco: McGraw-Hill Press, 1995.

(下转第 55 页)

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

Reform and Practice of the Course "Biocatalysis and Biotransformation" in the Context of Engineering Professional Authentication

Zhang Yuanyuan

(College of Chemical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao Shandong 266042)

Abstract

The course "Biocatalysis and Biotransformation" is an important specialized class for pharmaceutical engineering major, with the feature of comprehensiveness and forefront. It plays a important role in the talent training program. Taking Qingdao University of Science & Technology as an example, the reform and practice of the course "Biocatalysis and Biotransformation" are explored in the context of engineering professional authentication. It could serve as reference for the cultivation of high quality pharmaceutical engineering talents with equal emphasis on knowledge and ability.

Key words: biocatalysis and biotransformation, teaching content, reform in education, engineering professional authentication.

作者简介　张媛媛(1980 –),女,山东淄博人,工学博士,副教授,主要从事生物催化、生物分离方面的科研与教学. E-mail: zyy800928@qust.edu.cn.

(上接第 22 页)

Dispersion Characteristics of Spectrum-Splitting and Beam-Concentration Diffractive Optical Element

Xu Wenqi[1]　Lin Dongfeng[2]　Ye Jiasheng[1]　Zhang Yan[1]　Yang Guozhen[2]

(1. Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048;
2. Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract

The spectrum-splitting and beam-concentration diffractive optical element (DOE) is a key component in a parallel solar cell system. In this paper, we simulate the DOE efficiency improvement through dispersion compensation. In the meanwhile, simulation results are verified by the geometrical phase equations.

Key words: spectrum-splitting and beam-concentration diffractive optical element, dispersion characteristics, optical spectrum-splitting and focusing efficiency, phase equations.

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