

激光与光电子学进展

衍射光学技术发展历程及应用

霍家琦*, 胡源, 程彬鹏

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 衍射光学元件已广泛应用于光学传感、光通信、计算成像、激光光束整形、生物医学、光学数据存储等领域。首先, 总结归纳了基于标量衍射理论衍射光学元件在各个阶段的发展脉络, 衍射光学元件的发展可分为菲涅耳波带片、全息图及相息图、二元光学元件及衍射光学元件四个阶段, 针对各阶段衍射元件分别分析其设计原理、结构特点、加工难度、衍射效率及在现实中应用可能性。其次, 对基于矢量衍射理论衍射光学元件进行概述。最后, 对当前衍射光学元件在传统和新型成像系统及非成像系统中的应用进行总结, 整理出当前衍射光学元件发展中存在问题并根据对应问题给出未来发展趋势的预测, 能够对今后衍射光学元件的研究有一定指导意义。

关键词 衍射; 光学元件; 菲涅耳波带片; 全息图及相息图; 二元光学元件

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP213408

History and Application of Diffractive Optics Technology

Huo Jiaqi*, Hu Yuan, Cheng Binpeng

School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun 130022, Jilin, China

Abstract Diffractive optical components were widely used in many fields such as optical sensing, optical communication, computational optics, laser beam shaping, biomedicine, and optical data storage. This paper first summarizes the development of diffractive optical elements based on scalar diffraction theory in various stages. The development of diffractive optical elements can be divided into four stages: Fresnel zone plate, hologram and kinoform, binary optical element, and diffractive optical element. The design principles, structural characteristics, processing difficulties, diffraction efficiency, and application possibilities in reality are analyzed for each stage of diffraction elements followed by an overview of diffractive optical elements based on vector diffraction theory. Finally, a summary of current applications of diffractive optical elements in conventional and new imaging and non-imaging systems is presented. The current problems in the development of diffractive optical elements are sorted out and the future development trend is predicted according to the corresponding problems, which will be a guide for the future research of diffractive optical elements.

Key words diffraction; optical elements; Fresnel band piece; holograms and kinoform; binary optical elements

1 引 言

衍射光学元件在光学传感、光通信、计算成像、激光光束整形、生物医学、光学数据存储等多领域得到广泛应用。它具有以下 5 个特性: 1) 衍射光学元件的色散与玻璃材料无关, 仅与波长有关, 另外阿贝数为负值, 与传统玻璃的阿贝数符号相反, 因此具有区别于传统光学元件的负色散特性; 2) 衍射光学元件具有对光束的任意位相调制的特性; 3) 在热膨胀系数方面, 衍射光学元件仅与材料本身的热膨胀系数有关, 刚好与传

统玻璃材料相反, 因此其具有对温度的热稳定性; 4) 衍射光学元件具有平像场特性, 它的引入不会在光学系统中带入场曲; 5) 衍射光学元件的刻蚀深度, 即表面浮雕结构为微米量级, 元件重量就是基底重量, 因此其具有重量轻、体积小特点。

本文主要针对以菲涅耳波带片为源头, 具有一定光焦度或可以在光学系统中进行像差补偿的衍射元件进行综述。图 1 详细说明了该类型衍射元件的起源和发展历程: 首先对基于标量衍射理论衍射元件每个不同发展阶段所对应的设计原理、衍射效率及其在使用

收稿日期: 2021-12-31; 修回日期: 2022-01-28; 录用日期: 2022-02-21; 网络首发日期: 2022-03-10

基金项目: 中央引导地方科技发展资金 (202002037JC)

通信作者: *15526662132@163.com

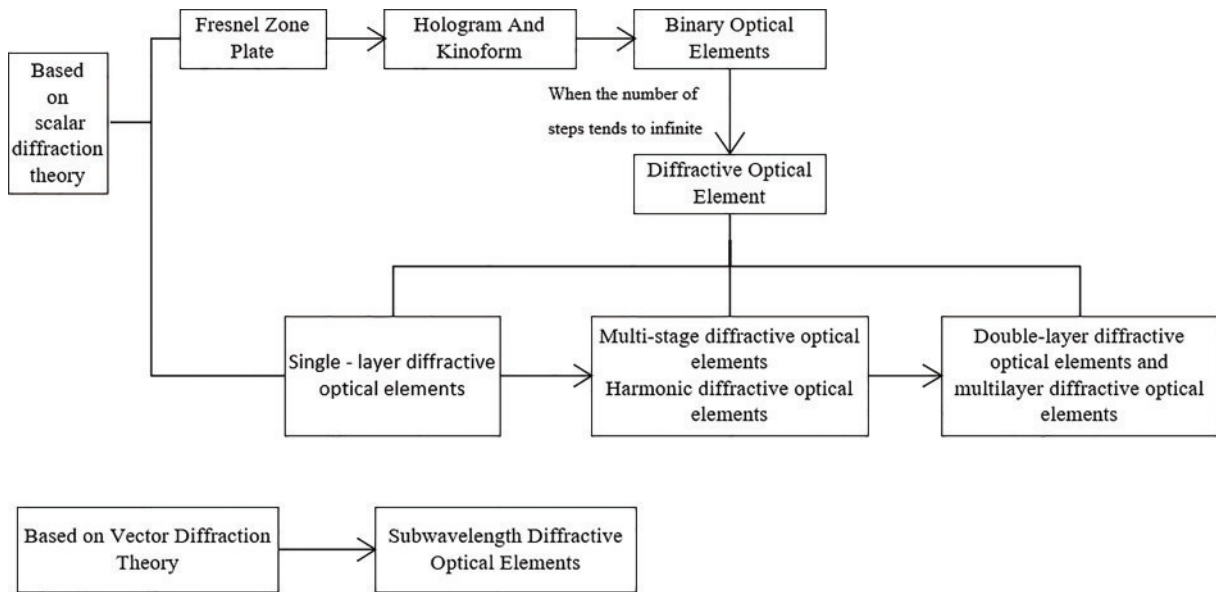


图 1 衍射光学元件的发展历程图

Fig. 1 Development history of diffractive optical elements

和加工过程中的优缺点进行系列讨论;其次对基于矢量衍射理论衍射光学元件进行概述;最后对当前衍射光学元件在传统和新型成像领域及非成像领域的应用现状进行总结,针对当前衍射光学元件发展存在问题,逐条给出未来衍射光学元件研究方向展望,便于初学者迅速掌握衍射光学元件相关基础知识,对今后衍射光学元件的研究方向提供一定程度的指导。

2 菲涅耳波带片

世界范围内公认的首个用于成像的衍射光学元件是由 Rayleigh 于 1871 年所研发出来的振幅型菲涅耳波带板^[1],该波带板是由如图 2^[2]所示,从圆心沿径向交替延伸的光线透过率为 0 和 100% 的同心圆形环带构成,相邻两环带的边缘位置到焦点的光程差为 $\lambda/2$ 。振幅型菲涅耳波带板衍射效率很低,只有 10% 左右,

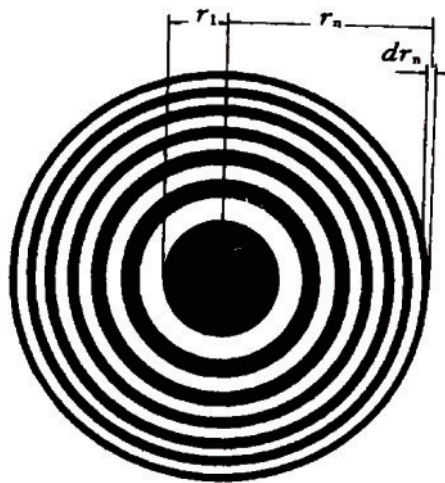


图 2 振幅型菲涅耳波带板示意图^[2]

Fig. 2 Schematic diagram of amplitude Fresnel zone plate^[2]

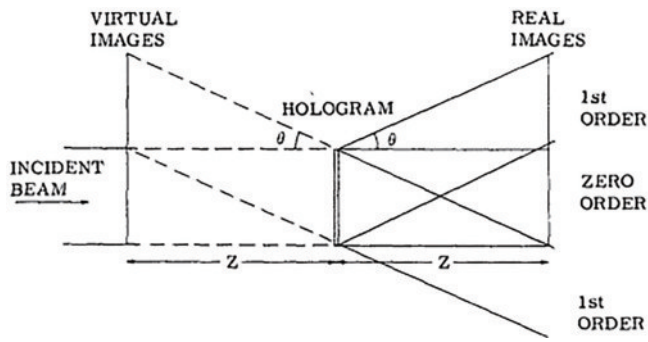
并且有部分光没有发生衍射直接入射到像面从而在像面形成很强的成像背景,使其很难用于实际的成像光学系统中。

与振幅型菲涅耳波带板不同,完全透光的位相型菲涅耳波带板于 1898 年由 Wood^[3]研究出来,它采用具有一定厚度的透过率为 100% 的材料来代替振幅型波带板上的光线透过率为 0 区域^[4-5]。其中透光材料厚度存在的意义在于:使光线入射时相邻圆形环带间出射光的位相差为 π 。与振幅型波带板相比,虽然位相型菲涅耳波带板衍射效率可达到 40%,但是因其仍具有很强的背景光,所以和振幅型波带板一样,也很少被采用。

3 全息图及相息图

1948 年, Gabor^[6-7]首先提出了全息术,这种技术分为两部分,基于干涉原理的波前记录和基于衍射原理的波前再现^[8]。但由于 Gabor 所研制的,是因波前再现所产生的原始像和共轭像为共轴排列而无法分开的初代全息图,加之在当时并没有相干性良好的光源,从而导致在此之后一段时间全息术发展缓慢。1950 年, Rogers^[9]提出了全息图可以作为透镜使用来完成波前再现过程并分析了其与菲涅耳衍射之间的关联,即全息图本质上是物体在发散光下的菲涅耳衍射图案的正片再现,通过二阶菲涅耳衍射可以重建出原始物体图像。1960 年激光的出现以其高相干性的特点为全息术波前记录过程提供了相干性能良好的光源,自此之后全息技术飞速发展。

Leith 和 Upatnieks^[10-11]于 1962 年率先使用激光作为照明光源完成了离轴全息。离轴全息技术中波前重建原理如图 3 所示,采用非共轴参考光照射离轴参考

图 3 全息技术中波前重建原理示意图^[11]Fig. 3 Schematic of wavefront reconstruction principle in holographic technology^[11]

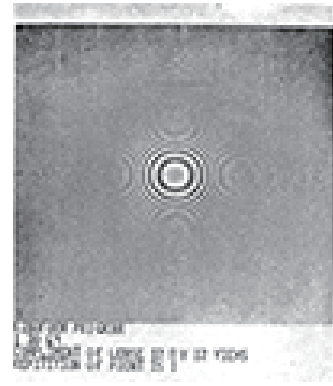
光与物光共同进行波前记录所形成的全息图,使全息图重建出三个在不同空间位置上的衍射分量,以此来完成原始像和共轭像的分离。

全息图的波前重建特性提供了一个波前变换元件,即功能上类似于传统透镜,而不是一个图像存储设备。全息元件成像特性(光功率、图像位置和像差)由记录材料表面的条纹间距决定,衍射效率由条纹的特定槽形状或体积分布决定。由于波前再现结果是否产生像差取决于照明参考光束的位置是否改变。因此,后续有很多文章对带有像差的点源全息图及其对应补偿技术进行了研究^[12-13],讨论了基于全息元件玻璃透镜色差和球差的校正问题。然而,计算机生成的衍射全息图被认为效率太低,光学全息图太难制作,全息胶片或明胶介质太不稳定,无法进行高精度的工作。

在 1969 年,Lesem 等^[14]研究者提出了相息图技术,又称为 Kinoform 光学元件^[15]。它是一种新的、计算机生成的波前重建设备,这种装置只对入射波的相位进行操作,并通过波前重建形成图像。与全息图一样,它也提供三维图像的显示,然而,相比之下,被照射

的 Kinoform 只产生单个衍射级,而不同于全息图在被照射时产生多个衍射级次,理想情况下,所有入射光都用于重建这个图像,其衍射效率可以达到 100%。在使用空间频率势能和重建能量方面,Kinoform 也更有效,并且与合成数字全息图相比,计算机可以用更少的时间合成 Kinoform。

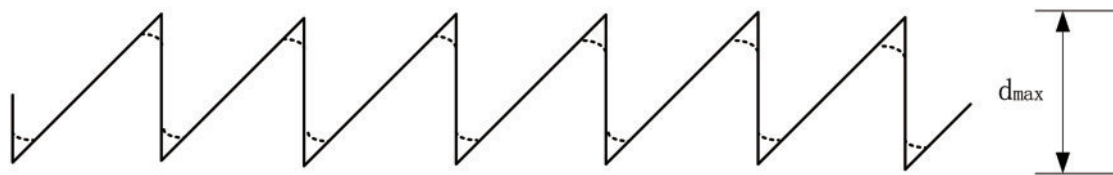
Jordan 等^[16]研究者于 1970 年研制出了 Kinoform 透镜。图 4 为 Kinoform 透镜的相位延迟图,该图可以进行光还原,并将光还原漂白以形成透镜。

图 4 Kinoform 透镜的相位延迟图^[16]Fig. 4 Phase delay diagram of Kinoform lens^[16]

Kinoform 透镜的相位延迟横截面如图 5 所示。浮雕与相位差 $\Delta\phi = \theta - \phi \pmod{2\pi}$ 成正比($\theta = 0$),浮雕的最大深度 d_{\max} 是将相位延迟 $2\pi\text{rad}$ 所需的深度。浮雕结构公式表示为

$$d = (d_{\max}/2\pi)(\Delta\phi \pmod{2\pi}), \quad (1)$$

式中: $d_{\max} = \lambda/(n-1)$, n 是固体的折射率,因此相位延迟也可以通过改变折射率来实现。Kinoform 透镜和菲涅耳波带板之间有密切的相似之处,Kinoform 透镜可以被认为是一个精确计算的相位型菲涅耳波带片。

图 5 Kinoform 透镜上的浮雕横截面^[14]Fig. 5 Relief cross section on Kinoform lens^[14]

同菲涅耳波带板一样,Kinoform 透镜具有很强的色散性,焦距 f 为

$$f = R^2/2N\lambda, \quad (2)$$

式中: R 是 Kinoform 的半径; λ 为入射光波长; N 是波带数。

Kinoform 透镜的色差主要是由焦距随波长的变化引起的,Kinoform 透镜的色差与浮雕结构起伏的深度、区域的大小和间距有关。只有 $d_{\max} = \lambda/(n-1)$ 成立时,对于所有波长 Kinoform 透镜才会产生单个焦

点。因此单个 Kinoform 透镜只能在较窄波段内进行消色差。一个简单的玻璃或石英透镜与 Kinoform 透镜一起使用,可以形成消色差双重透镜来消除传统光学系统中二级光谱色差^[17-19]。

4 二元光学元件

1989 年,麻省理工学院 LincoIn 实验室发布了一篇关于二元光学技术的报告^[20],报告从表面浮雕相位光栅出发推及任意相位轮廓衍射结构的相位函数,发

现任意相位衍射结构的衍射效率随波长和深度的变化规律与线性相位光栅相同。但是这些衍射结构的表面起伏深度在每 2π 相位间隔内连续变化,这种具有连续深度的相位剖面,用任何现有技术都不容易制作。因此必须在可达到的衍射效率和易于制造之间做出妥协。

该研究小组提出在保证相对较高的衍射效率的同时选择易于制造的多层台阶相位结构这一折中方法来替代连续深度的相位剖面。图 6 为连续相位光栅与相位光栅 2、4 和 8 层离散台阶相位结构的对比图。从图 6 可以明显看出,离散相位台阶级数越大,对连续相位轮廓的逼近程度越好。

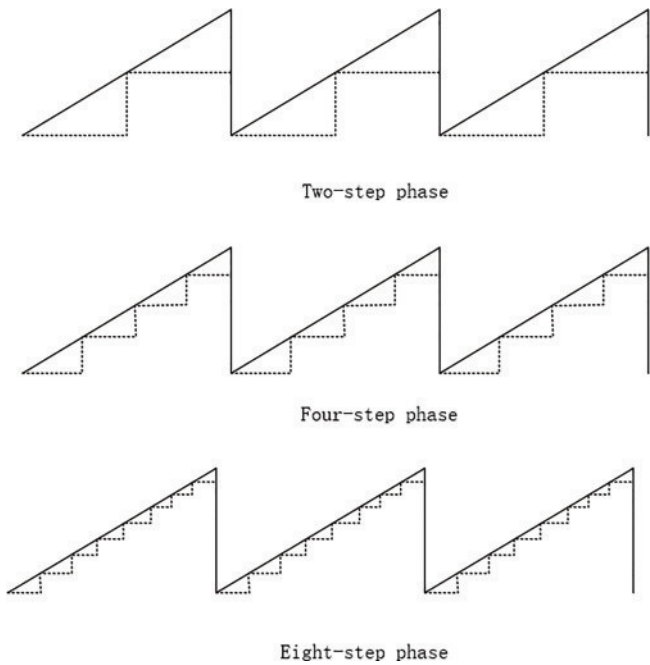


图 6 连续相位光栅的 2、4、8 阶台阶相位结构^[20]

Fig. 6 Step phase structure of continuous phase grating with order 2, 4, and 8^[20]

多层台阶结构的衍射效率为

$$\eta_m^N = \frac{\left| \frac{\sin \left\{ \pi \left[\frac{(n-1)d}{\lambda} - m \right] \right\}}{\pi \left[\frac{(n-1)d}{\lambda} - m \right]} \right|^2}{\left| \frac{\sin \left\{ \pi \left[\frac{(n-1)d}{\lambda N} \right] \right\}}{\pi \left[\frac{(n-1)d}{\lambda N} \right]} \right|^2}, \quad (3)$$

式中: n 为基底材料折射率; d 为微结构高度; m 为衍射级次; N 为台阶级数。

作为相位能级的数量如何影响衍射效率的一个例子,考虑一个连续的相位结构,其设计目的是在设计波长处的一级衍射效率达到 100%。式(3)可简化为

$$\eta_1^N = \left[\frac{\sin(\pi/N)}{\pi/N} \right]^2. \quad (4)$$

表 1 给出台阶级数 N 和一级衍射效率的关系。可以看出,随着离散相位台阶级数越大,对连续相位轮廓的逼近程度越好,一级衍射效率越接近 100%。

表 1 台阶级数 N 和一级衍射效率的关系

Table 1 Relationship between step number N and first-order diffraction efficiency

Step number	First-order diffraction efficiency
2	0.41
3	0.68
4	0.81
5	0.87
6	0.91
8	0.95
12	0.98
16	0.99

图 6 中的所需光栅轮廓的最粗略近似是二元相位轮廓。使用具有所需周期和 50% 占空比(即 50% 的光通过)的二元振幅光栅图案可以很容易地制作平版印刷掩模。图 7 说明了从二元振幅光刻掩模开始制造二元表面浮雕光栅的过程。在材料的基板上涂有一薄层光刻胶,然后将光刻掩模放置在与衬底密切接触的地方,并用紫外线照射灯从上面照射,曝光光刻胶,冲洗掉曝光的光刻胶,并在剩余的光刻胶中留下二元光栅图案。

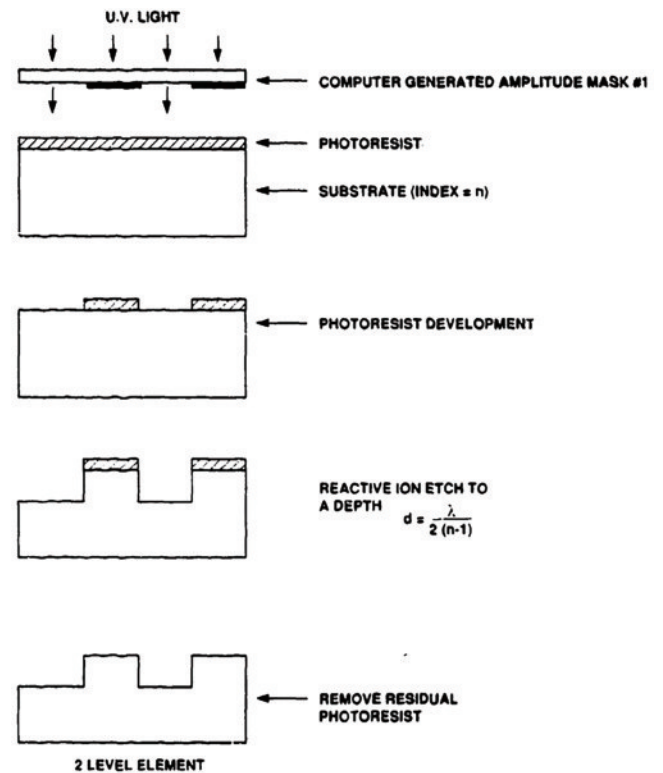


Figure 4-1. Illustration of the fabrication of a binary surface relief grating.

图 7 二元表面浮雕光栅制造过程^[20]

Fig. 7 Manufacturing process of binary surface relief grating^[20]

由于典型的二元光学元件需要的刻蚀周期不超过 4 次,二元光学元件以其极为容易的制造工艺及低成本、可批量复制的特点在此后一段时间得到了飞速发展^[21]。

5 衍射光学元件

衍射光学元件是指当二元光学元件所具有的多层台阶结构台阶数趋于无穷时,微结构由台阶型变为连续的位相表面类型从而产生的元件。随着进入 20 世纪 90 年代,使用金刚石的单点车削加工方式逐渐走向成熟,具有一定周期连续表面位相微结构衍射光学元件的加工成本得以控制,衍射光学元件逐渐走入研究者视野。衍射光学元件的基础理论可以按照其微结构尺寸与波长量级间大小关系分为微结构尺寸大于波长量级的标量衍射理论和微结构尺寸等于或小于波长量级(为亚波长量级)的矢量衍射理论^[22]。其中标量衍射理论应用范围较广,前面所述的菲涅耳波带片、全息图及相息图、二元光学元件及单层、多级、谐衍射、双层及多层衍射光学元件均基于此理论。矢量衍射理论则是随着大规模集成电路工艺以及激光束和电子束直写技术发展而产生的新型亚波长衍射元件的理论基础。

5.1 衍射光学元件的设计方法

基于标量衍射理论的设计方法可以根据优化时的搜索方式分为局部优化算法和全局优化算法两类。局部优化算法主要由 Gerchberg 和 Saxton 算法^[23-24](1971 年 Gerchberg 和 Saxton 首次提出)和杨-顾算法^[25](1981 年由中国科学院物理研究所杨国桢和顾本源最先提出)组成。全局优化算法是 Kirkpatrick 等^[26]提出,并于 1983 年被应用于衍射光学元件设计中的模拟退火算法,以及 1975 年由 Holland^[27]提出,并于 1991 年由 Mahlab 等^[28]最早用于衍射光学元件设计中的遗传算法组成。

局部优化算法只有在最初几次迭代时收敛速度较快,随着迭代次数增加收敛速度将迅速减慢,其计算速度及结果精度较高,但优化过程往往在局部区域极值点附近往复徘徊,获得结果可靠性不高。全局优化算法搜索区域虽为全部解空间,但搜索方式为逐个试探性搜索,难以在短时间内寻找出最优结果^[29]。由于最速下降法、爬山法及共轭梯度法等算法也可用于衍射光学元件设计,因此将其与上述算法结合形成混合算法,在收敛速度及寻优精度方面获得较为满意结果^[30]。

基于矢量衍射理论的设计方法可以分为积分法^[31]和微分法^[32]两类;积分法又可以分为适用于连续位相表面微结构衍射光学元件的有限元法^[33]和边界元法^[34]两种;微分法可以分为适用于具有周期性离散位相表面微结构衍射光学元件的严格耦合波法^[35]和模态法^[36]及适用于有限孔径非周期结构衍射光学元件的时域有限差分法^[37]。

积分法虽然具有良好的收敛速度及精确的求解结

果,但因其难于理解且需要非常庞大的数值计算,在衍射光学元件的矢量分析中较少被采用。微分法中具有相同理论的严格耦合波法和模态法虽易于理解,但仍无法避免进行大量繁杂的数值计算也较少被采用。时域有限差分法以其相较于前面四种方法更易于理解的理论方法,更简短的计算过程和时间得到较为广泛使用^[29]。

5.2 单层衍射光学元件

单层衍射光学元件衍射效率为

$$\eta_m = \text{sinc}^2 \left[m - \frac{n(\lambda) - 1}{n(\lambda_0) - 1} \cdot \frac{\lambda_0}{\lambda} \right], \quad (5)$$

式中: $n(\lambda)$ 为基底材料折射率; λ_0 为设计波长。

图 8 为 8~12 μm 波长范围,基底材料为 ZnS,单层衍射光学元件一级衍射效率与波长关系曲线,单层衍射光学元件的衍射效率只能在设计波长 10 μm 处达到 100%,衍射效率在偏离设计波长的两端会迅速下降,这使得单层衍射光学元件在光学系统中的使用被限制在一个很窄的波段范围。光学系统成像的目的在于获取目标信息,扩展成像波段是增大信息获取量的重要手段,因此引入衍射光学元件的光学系统需要具备在宽光谱范围的使用能力,同时保证很高的衍射效率并具备消色差能力,单层衍射光学元件不再满足这些要求。

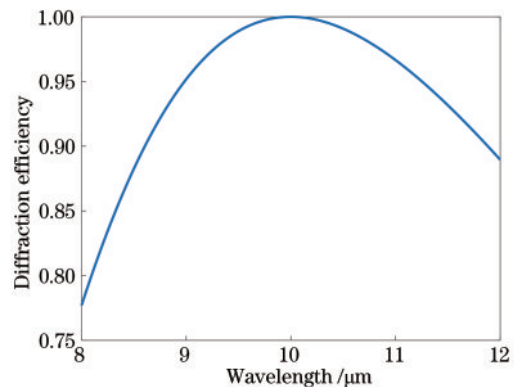


图 8 单层衍射光学元件衍射效率与波长关系

Fig. 8 Relationship between diffraction efficiency and wavelength of single-layer diffractive optical elements

5.3 多级衍射光学元件和谐衍射光学元件

为解决单层衍射光学元件在宽波段衍射效率下降这一问题,在 1995 年, Faklis 等^[38]和 Sweeney 等^[39]分别提出多级衍射透镜和谐衍射透镜的概念。图 9^[40]和图 10^[40]分别为标准衍射透镜和谐衍射透镜。这两种衍射光学元件的设计理论相同,谐衍射透镜与标准衍射透镜的不同之处在于,谐衍射光学元件相邻周期的位相延迟是波长的 P 倍,相应地,其最大浮雕微结构高度是普通衍射光学元件的 P 倍, $P \geq 1$ 。

用谐衍射的微结构设计时,其焦距为

$$f(\lambda) = \frac{P\lambda_0}{m\lambda} f_0, \quad (6)$$

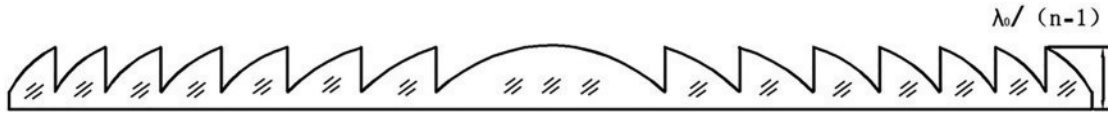


图 9 标准衍射透镜^[40]

Fig. 9 Standard diffraction lens^[40]

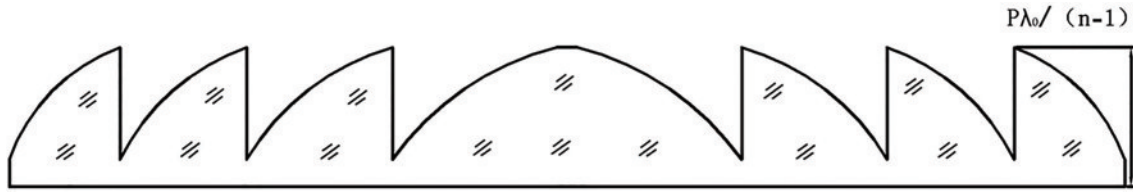


图 10 谐衍射透镜^[40]

Fig. 10 Harmonic diffraction lens^[40]

式中： f_0 为设计波长处焦距。

当 $\frac{P\lambda_0}{m\lambda} = 1$ 时, $f(\lambda) = f(\lambda_0)$, 即只要在给定波段

中满足 $\lambda = \frac{P\lambda_0}{m}$ 的波长均与设计波长处焦距 f_0 在轴向会聚在同一点。谐衍射光学元件这种性质使得光学设计工作者通过选择合适的 P 值来设计衍射单透镜进行消色差或复消色差, 这对于彩色投影显示和高光谱成像等应用非常有用。

谐衍射光学元件衍射效率为

$$\eta(\lambda) = \text{sinc}^2 \left[m - P \cdot \frac{\lambda_0}{\lambda} \cdot \frac{n(\lambda) - 1}{n(\lambda_0) - 1} \right], \quad (7)$$

式中： P 为谐衍射高度因子。

图 11 为忽略材料色散系数情况下, $P=10$ 的谐衍射光学元件在不同衍射级数 m 范围内波长与衍射效率的关系。

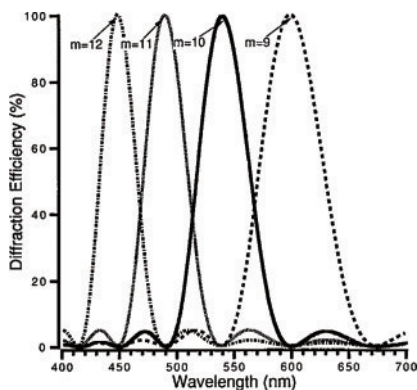


图 11 $P=10$ 时, 一定波长范围谐衍射光学元件 m 阶衍射级数的衍射效率曲线^[38]

Fig. 11 Diffraction efficiency curve of m -order diffraction steps of harmonic diffractive optics for a certain wavelength range at $P=10$ ^[38]

从图 11 可以看出, 谐衍射光学元件衍射效率只有在各个谐波长处达到 100%, 在其余波长处衍射效率较低。这使得谐衍射光学元件与单层衍射光学元件一

样, 均被限制在较窄波段使用。

5.4 双层衍射光学元件及多层衍射光学元件

1998 年, Arieli 等^[41] 研究者率先提出采用双层衍射光学元件消除宽光谱色差。这种方法是几何光学经典像差校正的延伸, 两个由不同色散材料制成的衍射光学元件如图 12 所示排列, 使用一个衍射光学元件补偿另一个衍射光学元件的像差。双层衍射光学元件的基底材料选择不受限制, 并且设计完成的双层衍射光学元件可以在宽光谱范围内消色差的同时确保具有很高的衍射效率。

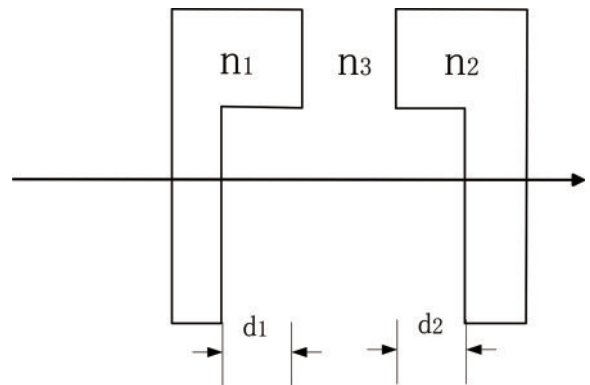


图 12 双层衍射光学元件排布示意图^[41]

Fig. 12 Double-layer diffraction optical element layout diagram^[41]

正入射时, 双层衍射光学元件衍射效率为

$$\eta_m = \text{sinc}^2 \left\{ m - \frac{d_1[1 - n_1(\lambda)] + d_2[n_2(\lambda) - 1]}{\lambda} \right\}, \quad (8)$$

式中： $n_1(\lambda)$ 和 $n_2(\lambda)$ 分别为两片层基底材料折射率； d_1 和 d_2 分别为两片层微结构高度。

在 8~12 μm 波长范围内, 双层衍射光学元件(基底材料为 ZnS 和 Ge) 的波长与一级衍射效率关系曲线如图 13 所示。

从图 13 可以看出, 双层衍射光学元件衍射效率相较于单层衍射光学元件和谐衍射光学元件在整个波段内保持在一个很高水平, 但是长波长处衍射效率和短

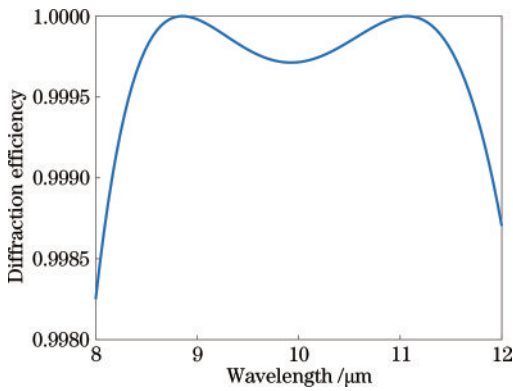


图 13 双层衍射光学元件衍射效率与波长关系

Fig. 13 Relationship between diffraction efficiency and wavelength of double-layer diffractive optical element

波长处衍射效率有一定差异,衍射效率在整个波段内分布不均匀。

2006年,浙江大学的马韬^[22,42]提出可以通过合理地选取多层衍射光学元件的表面浮雕结构高度,继而实现短波长处和长波长处衍射效率相同的方法,最终实现多层衍射光学元件在宽工作波段下的高衍射效率。2017年,中国科学院西安光学精密机械研究所的马泽斌^[43]通过这种方法的逆向应用,令长波长处衍射效率等于短波长处衍射效率,进而通过在衍射效率下选择合适的微结构高度,使得优化后双层衍射光学元件衍射效率在整个波段内处于很高水平且分布更均匀。

为提高衍射光学元件在宽波段的使用能力,衍射光学元件呈现出由双层向多层的发展趋势。2010年至今,长春理工大学崔庆丰教授团队分别就多层衍射光学元件的设计理论以及基底材料表面粗糙度、温度、装配误差和加工误差等因素对衍射效率影响进行深入研究,为多层衍射光学元件的应用提供了坚实的理论指导^[44-57]。

5.5 基于矢量衍射理论的衍射光学元件

基于矢量衍射理论的第一个亚波长衍射光学元件是由Kipfer等^[58]在1994年制作出来,该衍射透镜以二氧化硅为基底,周期宽度为 $7.5\ \mu\text{m}$,刻蚀深度为 $7\ \mu\text{m}$,应用于红外波段。在其后数年,应用于可见光波段、拥有更小特征尺寸的亚波长衍射透镜被陆续制作出来^[59-63],其中包含在柔性薄膜材料与衍射光学技术相结合的薄膜衍射光学元件^[62]、哈佛大学Capasso课题组实现的超表面透镜^[63]等。

2019年至今,电子科技大学、南京大学、中国科学院光电技术研究所的研究人员陆续在矢量衍射理论中开展了时域有限差分法优化设计、光场调控特性等各种新型亚波长衍射光学元件设计方法等研究^[64-67]。

6 衍射光学元件的应用

在衍射光学元件出现之前,许多不同种类的衍射

光学的设计概念已经存在几十年,在这些器件中有菲涅耳波带片、全息图、Kinoform。尽管菲涅耳波带片制作简单,但由于只有不到一半的光线通过这些狭缝,它们的衍射效率很低,无法在实际光学系统中应用。全息图因为计算机合成效率太低,离轴再现,光学全息图难于制作,并且全息胶片或明胶介质不稳定,无法进行高精度的工作。Kinoform虽为同轴再现,且计算机合成效率高于全息图,但由于连续相位深度工艺问题长期未能解决,因此进展缓慢,应用范围受限。这些衍射元件由于种种原因而没有得到广泛的应用。

表2分别从可见、红外、紫外三个具有代表性波段论述当前引入衍射光学元件的折/衍混合光学系统研究现状。

衍射光学元件不仅应用于传统折射式光学系统,还应用于新型成像光学系统及其他领域的研究中。在反射式光学系统中,国内首个反/衍混合望远镜由中国科学院光电技术研究所于1998年设计完成^[89],研究人员将施密特校正板用衍射光学元件来代替完成像差校正,设计完成后反射镜均为球面且会降低系统重量。在2008年到2012年之间,国防科技大学^[90]、海军工程大学^[91]、南昌航空大学^[92]、中国科学院西安光学精密机械研究所^[93]的研究人员陆续对反/衍混合望远镜进行研究。2017年,一种紧凑结构的卡塞格林衍射望远镜由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的研究者提出^[94],与透射式系统相比,地面CGD望远镜拥有更高的分辨率和性能良好的对比度。

在复眼光学系统中:2010年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的岳中英^[95]设计并加工了一套口径为 $50\ \text{mm}$ 的折/衍混合透镜和21个口径为 $8\ \text{mm}$ 的子目镜组成的复眼衍射望远镜,在2012年,其再次对衍射复眼光学系统进行分析^[96];哈尔滨工业大学的研究人员在2017年设计出了以聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)为基底的折/衍混合叠加复眼光学系统^[97],与传统复眼光学系统相比成像质量得到明显改善;2020年北京理工大学研究人员将衍射光学元件引入复眼光学系统完成仿昆虫复眼的大视场单目3D头戴显示系统设计^[98]。

在非球面检测中:国内第一台利用非平面衍射光学元件进行凸面非球面检测的干涉仪由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所于2005年制成^[99];2015年中国科学院西安光学精密机械研究所的谢念^[100]利用计算全息图完成对非球面检测技术研究;中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的研究人员于2019年利用计算机再现全息和照明透镜技术混合补偿,完成对 $800\ \text{mm}$ 超大口径凸形非球面面形的高精度检测^[101];2021年,中国科学院国家天文台研究人员采用反/衍混合补偿检测光路设计完成对大型红外望远镜拼接非球面子镜的检测工作^[102]。

在光束整形领域:Minguez-Vega等^[103]于2008年

表 2 衍射光学元件在各波段光学系统中应用

Table 2 Application of diffractive optical elements in optical systems of various bands

	Visible	Infrared	Ultraviolet
Diffractive optical element	Mainly used in visual optical system ^[68-74]	Design of dual - band and heat dissipation optical system ^[75-83]	Mainly used in solar blind ultraviolet warning system ^[84-88] , and are single-layer diffractive optical elements
Single-layer diffractive optical elements	In 1994, Cox <i>et al.</i> pioneered the introduction of single-layer diffractive optical elements into head-mounted display (HMD) optical systems, reducing the use of three lenses compared with refractive optical systems under the same design specifications ^[68]	In 1992, Wood introduced a single-layer diffractive optical element into the infrared optical system for the first time to complete the design of chromatic aberration in the band of 3–5 μm ^[77]	In 2018, Changchun University of Science and Technology completed the design of field of view and large relative aperture folded / diffractive hybrid UV warning system with a relative aperture of 1:3 and a field of view of 60° in the working band of 240–280 nm ^[88]
Multistage/harmonic diffractive optical elements	Zhejiang University completed the design of micro-optical glasses using single-chip harmonic diffractive optical elements in 2008 ^[71]	In 2003, the research team of Nankai University completed the design of heat dissipation optical system in the operating band of 3.7–4.3 μm and 8.7–11.7 μm , –70–100 °C by introducing single layer harmonic diffraction optical element into the optical system, which is the first time in China ^[75]	
Double-layer and multi-layer diffractive optical elements	In 2013, Zhejiang Normal University introduced a filled three-layer diffractive optical element (as shown below) into the HMD optical system to complete the design of the refractive / diffractive hybrid HMD optical system ^[72]	In 2014, Changchun Institute of Optics and Machinery introduced double-layer harmonic diffraction optical elements in 3–5 μm and 8–14 μm working bands, and used four lenses to complete the design of infrared dual-band optical system with only ZnS and ZnSe materials ^[81]	

将衍射元件应用于飞秒激光器光束整形；2012年，山东大学的孙玉宝^[104-105]使用衍射光学元件进行光源拓展，设计了两款基于衍射光学元件的侧入式激光背光模组；2017年，Bouzid等^[106]讨论了二元光学元件实现激光束整形的原理；合肥工业大学一课题组于2019年设计了一款基于衍射光学元件的直下式激光背光模组理论模型^[107]，增大了衍射光学元件的扩束角度，并且该课题组在之后数年对衍射光学元件应用于直下式激光背光均有研究。

在计算成像领域：通过使用轻薄折衍混合光学元件实现计算成像的方法在2015年由Peng等^[108]提出，该团队成员设计了轻型折/衍光学系统和后续处理算法，以便在可见光波段进行成像，并经过进一步研究于2016年提出在可见光全光谱范围内消色差衍射光学元件^[109]；2019年，中国科学院光电技术研究所的杨静静^[110-112]，将自适应维纳滤波算法用于衍射光学望远镜系统并进行宽带成像和去卷积实验，结果表明，该方法可以改善成像质量和对比度；基于同心环分解的学习型旋转对称衍射消色差透镜设计方法于2020年由同济大学的Dun等^[113]提出，该方法结合神经网络复原可以实现8 mm全孔径可见光谱(429~699 nm)成像；

2021年，长春理工大学的胡洋^[114]提出了衍射计算成像红外双波段光学系统的设计方法，该设计方法可减少由于低衍射效率造成的成像模糊，扩展了单层衍射光学元件的可应用波段范围。

由于光学加工技术近几年才在微纳领域广泛应用，亚波长衍射光学元件与传统标量衍射理论光学元件相比应用较少。氮化镓(GaN)纳米柱阵列的超透镜由苏州大学的金鑫等^[115]于2018年设计完成并应用于微型成像系统；2020年，张琬皎等^[116]将超透镜应用于超分辨聚焦系统；仇宫润等^[117]于2021年设计了可用于红外成像制导镜头的超透镜。

7 结束语

随着光学加工水平的不断提升，衍射光学元件从最初的菲涅耳波带板到现在双层、多层衍射光学元件乃至超透镜，设计理论也从原来的标量衍射理论向矢量衍射理论发展，下面是对当前衍射光学元件的发展总结及展望：

1) 在基础理论方面，无论基于标量还是矢量衍射理论的设计方法需要面对的都是如何基于现有方法提高设计结果的数值稳定性与收敛速度问题。未来发展

可能为对现有优化算法进行内部组合或与其余类型算法组合,组合后的混合算法包含两种甚至三种算法,综合各优化设计方法优点来实现提高设计结果的数值稳定性与收敛速度的目的。

2) 在衍射光学元件与传统成像领域应用方面,当前宽光谱范围仍以使用双层乃至多层衍射光学元件为主,双层衍射光学元件的使用都集中在可见和红外波段,鲜少可见在紫外宽波段中双层衍射光学元件的使用。随着近年来材料加工工艺的不断优化^[115],未来双层乃至多层衍射光学元件的应用波段范围将被进一步拓宽。

3) 在衍射光学元件与新型成像领域应用方面,随着衍射光学元件与计算成像技术的进一步应用,以及超透镜、薄膜透镜等新型亚波长衍射元件制作工艺的成熟,它将突破传统光学在体积、空间上的局限,产生更多创新型的光学系统。

衍射光学元件从菲涅尔波带片理论的提出至今已余百年,已经产生多种多样的元件类型,为光学系统的超轻质量、极小型化,可变面型、超低成本等提供了丰富的技术路线,随着其工程化水平的不断提高,未来必将在光学领域大放异彩。

参 考 文 献

- [1] Rayleigh L. Laboratory notebook[M]//Wood R W. Physical optics. 3rd ed. Cambridge: Macmillan Co., 1934: 37-38.
- [2] 徐向东,洪义麟,付绍军,等. X射线波带片的制作及其应用[J]. 光学技术, 1999, 25(2): 22-25.
Xu X D, Hong Y L, Fu S J, et al. X ray zone plates fabrication and its application[J]. Optical Technology, 1999, 25(2): 22-25.
- [3] Wood R W. Phase-reversal zone-plates, and diffraction-telescopes[J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1898, 45 (277): 511-522.
- [4] 杨亮亮. 多层衍射光学元件衍射效率的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2013.
Yang L L. Studies on diffraction efficiency of multilayer diffractive optical elements[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013.
- [5] 安鸿昌. 深刻蚀亚波长菲涅尔波带片聚焦特性研究[D]. 温州: 温州大学, 2015.
An H C. The focusing properties of deep etching subwavelength Fresnel zone plate[D]. Wenzhou: Wenzhou University, 2015.
- [6] Gabor D. A new microscopic principle[J]. Nature, 1948, 161(4098): 777-778.
- [7] Gabor D. Microscopy by reconstructed wave fronts: II[J]. Proceedings of the Physical Society Section B, 1951, 64 (6): 449-469.
- [8] 王贤锋. 全息术的历史与发展[J]. 现代商贸工业, 2007, 19(5): 180-182.
Wang X F. History and development of holography[J]. Modern Business Trade Industry, 2007, 19(5): 180-182.
- [9] Rogers G L. Gabor diffraction microscopy: the hologram as a generalized zone-plate[J]. Nature, 1950, 166(4214): 237.
- [10] Leith E N, Upatnieks J. Reconstructed wavefronts and communication theory[J]. Journal of the Optical Society of America, 1962, 52(10): 1123-1130.
- [11] Leith E N, Upatnieks J. Wavefront reconstruction with continuous-tone objects[J]. Journal of the Optical Society of America, 1963, 53(12): 1377-1381.
- [12] Close D H. Holographic optical elements[J]. Optical Engineering, 1975, 14(5): 145408.
- [13] Latta J N. Computer-based analysis of holography using ray tracing[J]. Applied Optics, 1971, 10(12): 2698-2710.
- [14] Lesem L B, Hirsch P M, Jordan J A. The kinoform: a new wavefront reconstruction device[J]. IBM Journal of Research and Development, 1969, 13(2): 150-155.
- [15] 陈岩松, 王玉堂, 李秀英, 等. 一种相位型再现元件—相息图[J]. 激光, 1979, 6(10): 28-33.
Chen Y S, Wang Y T, Li X Y, et al. A wavefront reconstructing device-kinoform[J]. Laser Journal, 1979, 6 (10): 28-33.
- [16] Jordan J A, Jr, Hirsch P M, Lesem L B, et al. Kinoform lenses[J]. Applied Optics, 1970, 9(8): 1883-1887.
- [17] D'Auria L, Huignard J P, Roy A M, et al. Photolithographic fabrication of thin film lenses[J]. Optics Communications, 1972, 5(4): 232-235.
- [18] Sales T R, Morris G M. Diffractive-refractive behavior of kinoform lenses[J]. Applied Optics, 1997, 36(1): 253-257.
- [19] Buralli D A, Morris G M, Rogers J R. Optical performance of holographic kinoforms[J]. Applied Optics, 1989, 28(5): 976-983.
- [20] Swanson G J. Binary optics technology: the theory and design of multi-level diffractive optical elements[R]. Massachusetts Inst of Tech Lexington Lincoln Lab, 1989.
- [21] Swanson G J, Veldkamp W B. Binary lenses for use at 10.6 micrometers[J]. Optical Engineering, 1985, 24(5): 245791.
- [22] 马韬. 多层衍射光学元件设计理论及其在混合光学系统中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
Ma T. Design theory of multilayer diffractive optical element and its application in hybrid optical system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [23] Gerchberg R W, Saxton W. Phase determination for image and diffraction plane pictures in the electron microscope[J]. Optik, 1971, 34: 275-284.
- [24] Gerchberg R. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. Optik, 1972, 35: 237-246.
- [25] 杨国桢, 顾本源. 光学系统中振幅和相位的恢复问题[J]. 物理学报, 1981, 30(3): 410-413.
Yang G Z, Gu B Y. On the amplitude-phase retrieval problem in optical systems[J]. Acta Physica Sinica, 1981, 30(3): 410-413.
- [26] Kirkpatrick S, Gelatt C D, Jr, Vecchi M P. Optimization by simulated annealing[J]. Science, 1983,

- 220(4598): 671-680.
- [27] Holland J H. Adaptation in natural and artificial systems [M]. Cambridge: The MIT Press, 1975.
- [28] Mahlab U, Shamir J, Caulfield H J. Genetic algorithm for optical pattern recognition[J]. Optics Letters, 1991, 16(9): 648-650.
- [29] 颜树华. 衍射微光学设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
Yan S H. Design of diffractive micro-optics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.
- [30] 金国藩. 衍射光学元件的理论模型和优化设计[C]//中俄衍射光学技术高端研讨会. 北京: 中国宇航学会, 2007.
Jin G F. Theoretical model and optimization design of diffractive optical elements[C]//Sino-Russian High-End Seminar on Diffractive Optical Technology. Beijing: China Astronautical Society, 2007.
- [31] Zaki K A E H. Numerical methods for the analysis of scattering from nonplanar periodic structures[M]. Berkeley: University of California, 1969.
- [32] Neviere M, Petit R, Cadilhac M. About the theory of optical grating coupler-waveguide systems[J]. Optics Communications, 1973, 8(2): 113-117.
- [33] Lichtenberg B, Gallagher N C, Jr. Finite element approach for the numerical analysis and modeling of diffractive and scattering objects[J]. Proceedings of SPIE, 1994, 2152: 2-13.
- [34] Bendickson J M, Glytsis E N, Gaylord T K, et al. Modeling considerations for rigorous boundary element method analysis of diffractive optical elements[J]. Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision, 2001, 18(7): 1495-1506.
- [35] Moharam M G, Gaylord T K. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction[J]. Journal of the Optical Society of America, 1981, 71(7): 811-818.
- [36] Jiang M M, Tamir T, Zhang S Z. Modal theory of diffraction by multilayered gratings containing dielectric and metallic components[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2001, 18(4): 807-820.
- [37] Yee K E. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1966, 14(3): 302-307.
- [38] Faklis D, Morris G M. Spectral properties of multiorder diffractive lenses[J]. Applied Optics, 1995, 34(14): 2462-2468.
- [39] Sweeney D W, Sommargren G E. Harmonic diffractive lenses[J]. Applied Optics, 1995, 34(14): 2469-2475.
- [40] 赵丽东. 多层衍射光学设计理论和应用研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2019.
Zhao L D. Studies on design theory and application of multi-layer diffractive optics[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019.
- [41] Arieli Y, Ozeri S, Eisenberg N, et al. Design of a diffractive optical element for wide spectral bandwidth[J]. Optics Letters, 1998, 23(11): 823-824.
- [42] 马韬, 沈亦兵, 杨国光. 利用多层表面微结构提高 DOE 宽波段衍射效率[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1): 119-123.
Ma T, Shen Y B, Yang G G. Improving diffraction efficiency of DOE in wide waveband application by multilayer micro-structure[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(1): 119-123.
- [43] 马泽斌. 基于双层二元光学元件的光学镜头设计[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2017.
Ma Z B. The optical design based on double-layer binary optical elements[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [44] Xue C X, Cui Q F, Liu T, et al. Optimal design of a multilayer diffractive optical element for dual wavebands [J]. Optics Letters, 2010, 35(24): 4157-4159.
- [45] 薛常喜, 崔庆丰, 潘春艳, 等. 基于带宽积分平均衍射效率的多层衍射光学元件设计[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 3016-3020.
Xue C X, Cui Q F, Pan C Y, et al. Design of multi-layer diffractive optical element with bandwidth integral average diffraction efficiency[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 3016-3020.
- [46] 薛常喜, 崔庆丰, 杨亮亮, 等. 基于柯西色散公式的多层衍射光学元件的设计和分析[J]. 光学学报, 2011, 31(6): 0623002.
Xue C X, Cui Q F, Yang L L, et al. Design and analysis of multi-layer diffractive optical elements with cauchy dispersion formula[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0623002.
- [47] Piao M, Cui Q, Zhang B, et al. Optimization method of multilayer diffractive optical elements with consideration of ambient temperature[J]. Applied Optics, 2018, 57(30): 8861-8869.
- [48] Piao M X, Cui Q F, Zhao C Z, et al. Substrate material selection method for multilayer diffractive optics in a wide environmental temperature range[J]. Applied Optics, 2017, 56(10): 2826-2833.
- [49] Piao M X, Cui Q F, Zhu H, et al. Diffraction efficiency change of multilayer diffractive optics with environmental temperature[J]. Journal of Optics, 2014, 16(3): 035707.
- [50] Hu Y, Cui Q F, Zhao L D, et al. PSF model for diffractive optical elements with improved imaging performance in dual-waveband infrared systems[J]. Optics Express, 2018, 26(21): 26845-26857.
- [51] 张博, 崔庆丰, 朴明旭, 等. 双波段多层衍射光学元件的基底材料选择方法研究及其在变焦系统中的应用[J]. 光学学报, 2020, 40(6): 0605001.
Zhang B, Cui Q F, Piao M X, et al. Substrate material selection method for dual-band multilayer diffractive optical elements and its application in the zoom system[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(6): 0605001.
- [52] Zhang B, Cui Q F, Piao M X. Effect of substrate material selection on polychromatic integral diffraction efficiency for multilayer diffractive optics in oblique incident situation[J]. Optics Communications, 2018, 415: 156-163.
- [53] 毛珊, 崔庆丰. 双层衍射元件加工误差对带宽积分平均

- 衍射效率的影响[J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0105001.
- Mao S, Cui Q F. Effect on polychromatic integral diffraction efficiency for two-layer diffractive optics[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(1): 0105001.
- [54] 杨亮亮. 双层衍射光学元件微结构高度的优化设计[J]. 红外, 2019, 40(1): 11-15.
- Yang L L. Optimal design of the microstructure height for double-layer diffractive optical elements[J]. Infrared, 2019, 40(1): 11-15.
- [55] 高龙, 薛常喜, 杨红芳, 等. 偏心误差对长波红外波段多层衍射光学元件衍射效率的影响[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0623004.
- Gao L, Xue C X, Yang H F, et al. Effect of decenter errors on diffraction efficiency of multilayer diffractive optical elements in long infrared waveband[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0623004.
- [56] 杨亮亮, 刘成林, 陆法林, 等. 基于复合带宽积分平均衍射效率的倾斜误差研究[J]. 光学学报, 2020, 40(8): 0805001.
- Yang L L, Liu C L, Lu F L, et al. Tilt error based on comprehensive bandwidth integral average diffraction efficiency[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(8): 0805001.
- [57] Mao S, Zhao L D, Zhao J L. Integral diffraction efficiency model for multilayer diffractive optical elements with wide angles of incidence in case of polychromatic light[J]. Optics Express, 2019, 27(15): 21497-21507.
- [58] Kipfer P, Collischon M, Haidner H, et al. Infrared optical components based on a microrelief structure[J]. Optical Engineering, 1994, 33(1): 79-84.
- [59] Chen F T, Craighead H G. Diffractive lens fabricated with mostly zeroth-order gratings[J]. Optics Letters, 1996, 21(3): 177-179.
- [60] Lalanne P, Astilean S, Chavel P, et al. Design and fabrication of blazed binary diffractive elements with sampling periods smaller than the structural cutoff[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1999, 16(5): 1143-1156.
- [61] Mait J N, Scherer A, Dial O, et al. Diffractive lens fabricated with binary features less than 60 nm[J]. Optics Letters, 2000, 25(6): 381-383.
- [62] Yu N F, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. Science, 2011, 334(6054): 333-337.
- [63] Khorasaninejad M, Chen W T, Devlin R C, et al. Metalenses at visible wavelengths: diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging[J]. Science, 2016, 352(6290): 1190-1194.
- [64] 张培峰. 中红外平面超透镜光场调控特性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- Zhang P F. Study on mid-infrared planar superlens and its optical manipulation characteristics[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [65] 黄振宇. 大视场宽波段成像超透镜的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- Huang Z Y. Research on imaging metalens with wide bandwidth and large viewing field[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [66] 程强. 红外超透镜设计与性能研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- Cheng Q. Design and performance analysis of infrared metalens[D]. Xi'an: Xidian University, 2020.
- [67] 沙晨晨. 基于微纳结构相位调控原理的中红外宽带消色差超透镜设计[D]. 南京: 南京大学, 2020.
- Sha C C. Design of broadband achromatic metalens in the mid-infrared region based on the principle of phase manipulation with nanostructures[D]. Nanjing: Nanjing University, 2020.
- [68] Cox J A, Fritz T A, Werner T R. Application and demonstration of diffractive optics for head-mounted displays[J]. Proceedings of SPIE, 1994, 2218: 32-40.
- [69] 卢海平, 刘伟奇, 康玉思, 等. 全景三维立体头盔显示光学系统设计[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0522002.
- Lu H P, Liu W Q, Kang Y S, et al. Design of compact optical system in panoramic three-dimensional head mounted display[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0522002.
- [70] 赵顺龙, 王肇圻. 超轻小型投影式头盔显示系统折-衍混合物镜设计[J]. 光学学报, 2006, 26(2): 249-253.
- Zhao S L, Wang Z Q. Design of an ultralight and compact hybrid refractive-diffractive projection lens of head-mounted projective displays[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(2): 249-253.
- [71] 娄迪. 谐衍射光学设计理论和应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- Lou D. Research on the design theory and application of harmonic diffraction optics[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [72] 赵亚辉, 范长江, 应朝福, 等. 含三层衍射元件的60°视场折/衍混合头盔目镜[J]. 光子学报, 2013, 42(3): 266-270.
- Zhao Y H, Fan C J, Ying C F, et al. Hybrid diffractive-refractive 60° field of view eyepiece with three-layer diffractive optical element[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(3): 266-270.
- [73] Yang X J, Wang Z Q, Fu R L. Hybrid diffractive-refractive 67°-diagonal field of view optical see-through head-mounted display[J]. Optik, 2005, 116(7): 351-355.
- [74] 包秋亚. 全息头盔显示光学系统设计研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2008.
- Bao Q Y. Research on design of optical system of holographic helmet-mounted display[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2008.
- [75] 孙强, 王肇圻, 李凤有, 等. 含有谐衍射元件的红外双波段减热差系统设计[J]. 科学通报, 2003, 48(6): 557-561.
- Sun Q, Wang Z Y, Li F Y, et al. Design of infrared dual-band thermal differential reduction system with harmonic diffraction elements[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(6): 557-561.
- [76] 胥允欣. 新型成像导引头光学系统的消热差设计与评价[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S2): 560-564.
- Xu Y X. Infrared optical system with refractive diffractive hybrid athermalization design and evaluate[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(S2): 560-564.

- [77] Wood A P. Design of infrared hybrid refractive-diffractive lenses[J]. Applied Optics, 1992, 31(13): 2253-2258.
- [78] Behrmann G P, Bowen J P. Influence of temperature on diffractive lens performance[J]. Applied Optics, 1993, 32(14): 2483-2489.
- [79] 范长江, 王肇圻, 吴环宝, 等. 红外双波段双层谐衍射光学系统设计[J]. 光学学报, 2007, 27(7): 1266-1270.
Fan C J, Wang Z Q, Wu H B, et al. The design of infrared dual-band double-layer harmonic diffractive optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(7): 1266-1270.
- [80] 张欣婷, 安志勇. 双层谐衍射双波段红外消热差光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 282-286.
Zhang X T, An Z Y. Design of infrared athermal optical system for dual-band with double-layer harmonic diffraction element[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 282-286.
- [81] 毛文峰, 张新, 曲贺盟, 等. 红外双色宽波段高衍射效率衍射光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1022002.
Mao W F, Zhang X, Qu H M, et al. Broad dual-band kinoform infrared double-layer diffractive optical system design[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1022002.
- [82] 赵翔, 郭岩, 张鹏, 等. 基于双层衍射元件的红外双波段光学系统设计[J]. 电光与控制, 2017, 24(10): 85-89.
Zhao X, Guo Y, Zhang P, et al. Design of infrared dual-band optical system with double-layer diffraction optical element[J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(10): 85-89.
- [83] 杨亮亮, 赵勇兵, 陈凤, 等. 含有双层衍射光学元件的中波/长波消热差光学系统的设计[J]. 应用光学, 2019, 40(5): 756-762.
Yang L L, Zhao Y B, Chen F, et al. Design of athermal MWIR/LWIR optical system with double-layer diffractive optical elements[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(5): 756-762.
- [84] 于远航. 日盲紫外导弹告警光学系统设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
Yu Y H. Design of solar blind ultraviolet missile warning optical system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012.
- [85] 于远航, 王文生. 折衍混合紫外告警光学系统设计[J]. 激光技术, 2012, 36(3): 421-423, 427.
Yu Y H, Wang W S. Optical design of diffractive refractive hybrid ultraviolet warning systems[J]. Laser Technology, 2012, 36(3): 421-423, 427.
- [86] 宋珊珊, 林丽娜, 王文生. 日盲紫外告警光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(10): 102203.
Song S S, Lin L N, Wang W S. Design of solar blind ultraviolet warning optical system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(10): 102203.
- [87] 孙毅. 日盲紫外告警光学系统设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2016.
Sun Y. Design of solar blind ultraviolet warning optical system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016.
- [88] 范雯雯. 大视场日盲紫外告警光学系统设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2018.
Fan W W. Design of a large field solar-blind ultraviolet warning optical system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018.
- [89] 周崇喜, 林大键, 杜春雷, 郭晴. 二元光学反/衍混合 Schmidt 望远系统光学设计[J]. 光学学报, 1998, 18(5): 627-630.
Zhou C X, Lin D J, Du C L, et al. Optical design of hybrid reflective/diffractive binary optics Schmidt telescope [J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(5): 627-630.
- [90] 徐琰, 颜树华, 周春雷, 等. 宽波段超大孔径反衍望远系统设计[J]. 半导体光电, 2007, 28(4): 579-582.
Xu Y, Yan S H, Zhou C L, et al. Design of hybrid reflective-diffractive telescope with very large aperture and broad bandwidth[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2007, 28(4): 579-582.
- [91] 朱威, 徐琰, 颜树华. 宽光谱超大孔径反衍望远系统设计[J]. 应用光学, 2008, 29(1): 40-44.
Zhu W, Xu Y, Yan S H. Design of broad bandwidth reflective-diffractive hybrid telescope with super large aperture[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(1): 40-44.
- [92] 李芸. 折衍/反衍天文望远镜系统设计[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2012.
Li Y. Design of refractive/diffractive and reflective/diffractive astronomical telescopes[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2012.
- [93] 刘峰, 赛建刚, 赵建科, 等. 8~12 μm 波段折/反/衍混合坦克扫描物镜消热差设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2459-2462.
Liu F, Sai J G, Zhao J K, et al. Athermalization design of 8-12 μm infrared hybrid refractive/reflective/diffractive lenses for tank scan[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(9): 2459-2462.
- [94] Zhang H L, Liu H, Lizana A, et al. Methods for the performance enhancement and the error characterization of large diameter ground-based diffractive telescopes[J]. Optics Express, 2017, 25(22): 26662-26677.
- [95] 岳巾英. 复眼衍射望远镜系统的性能检测[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2010.
Yue J Y. Performance test of compound eye diffraction telescope system[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [96] 岳巾英, 鞠曙光, 岳明, 等. 衍射复眼望远镜系统光学特性分析[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2012, 35(2): 40-44.
Yue J Y, Ju S G, Yue M, et al. Optical characteristic analysis of the diffractive compound telescope[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 35(2): 40-44.
- [97] Zhang S Q, Zhou L Y, Xue C X, et al. Design and simulation of a superposition compound eye system based on hybrid diffractive-refractive lenses[J]. Applied Optics, 2017, 56(26): 7442-7449.
- [98] 刘娟, 张智齐. 仿昆虫复眼的大视场单目 3D 头戴显示系统和显示方法: CN106383406A[P]. 2017-02-08.
Liu J, Zhang Z Q. Insect-compound-eye-simulated big view filed monocular 3D head-wearing display system

- and display method: CN106383406A[P]. 2017-02-08.
- [99] 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所. 衍射光学元件的应用技术研究[EB/OL]. (2009-03-20)[2021-12-30]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=SNAD&dbname=SNAD&filename=SNAD000001293583&uniplatform=NZKPT&v=TjRX_ofSS4vbk6kApBRQp5UKjybRgmTQK4VWQXNKpQEDW2Odu1sFipXx8uoEbaXbkmo9ppFGM_8%3d.
Changchun Institute of Optics, Precision Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences Research on application technology of diffractive optical elements[EB/OL]. (2009-03-20)[2021-12-30]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=SNAD&dbname=SNAD&filename=SNAD000001293583&uniplatform=NZKPT&v=TjRX_ofSS4vbk6kApBRQp5UKjybRgmTQK4VWQXNKpQEDW2Odu1sFipXx8uoEbaXbkmo9ppFGM_8%3d.
- [100] 谢念. 基于计算全息光学元件的非球面检测技术应用研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2015.
Xie N. Research on aspheric surface testing technology based on computer generated hologram(CGH)[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [101] 张海东, 王孝坤, 薛栋林, 等. 一种针对超大口径凸非球面的面形检测方法[J]. 中国光学, 2019, 12(5): 1147-1154.
Zhang H D, Wang X K, Xue D L, et al. Surface testing method for ultra-large convex aspheric surfaces[J]. Chinese Optics, 2019, 12(5): 1147-1154.
- [102] 王丰璞, 李新南, 徐晨, 等. 大型光学红外望远镜拼接非球面子镜反衍补偿检测光路设计[J]. 中国光学, 2021, 14(5): 1184-1193.
Wang F P, Li X N, Xu C, et al. Optical testing path design for LOT aspheric segmented mirrors with reflective-diffractive compensation[J]. Chinese Optics, 2021, 14(5): 1184-1193.
- [103] Minguez-Vega G, Mendoza-Yero O, Lancis J, et al. Diffractive optics for quasi-direct space-to-time pulse shaping[J]. Optics Express, 2008, 16(21): 16993-16998.
- [104] 孙玉宝. 液晶平板显示激光背光模组的设计与实验研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
Sun Y B. The design and experimental research on laser backlight used for LCD flat panel display[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [105] 刘欣. 应用于直下式激光背光的衍射光学元件研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
Liu X. Research on diffractive optical element applied to direct laser backlight[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.
- [106] Bouzid O, Haddadi S, Fromager M, et al. Focusing anomalies with binary diffractive optical elements[J]. Applied Optics, 2017, 56(35): 9735-9741.
- [107] 刘子学. 直下式激光背光模组设计[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
Liu Z X. Design of direct-lit laser backlight unit[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.
- [108] Peng Y F, Fu Q, Amata H, et al. Computational imaging using lightweight diffractive-refractive optics[J]. Optics Express, 2015, 23(24): 31393-31407.
- [109] Peng Y F, Fu Q, Heide F, et al. The diffractive achromat full spectrum computational imaging with diffractive optics[J]. ACM Transactions on Graphics, 2016, 35(4): 31.
- [110] 杨静静. 衍射望远镜成像中的图像复原研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2020.
Yang J J. Research on image restoration in diffraction telescope imaging[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [111] Yang J J, Wang S, Wen L H, et al. Experimental study on imaging and image deconvolution of a diffractive telescope system[J]. Applied Optics, 2019, 58(33): 9059-9068.
- [112] 杨静静, 王帅, 文良华, 等. 基于图像复原的衍射望远镜暗弱目标成像[J]. 光学学报, 2020, 40(14): 1411005.
Yang J J, Wang S, Wen L H, et al. Faint-object imaging of diffractive telescopes based on image restoration[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(14): 1411005.
- [113] Dun X, Ikoma H, Wetzstein G, et al. Learned rotationally symmetric diffractive achromat for full-spectrum computational imaging[J]. Optica, 2020, 7(8): 913-922.
- [114] 胡洋. 衍射计算成像宽波段光学系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2021.
Hu Y. Research on wide waveband optical system for diffractive computational imaging system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2021.
- [115] 金鑫, 王淼, 周桃飞, 等. 应用于微型成像的氮化镓超透镜设计[J]. 光学精密工程, 2018, 26(12): 2917-2922.
Jin X, Wang M, Zhou T F, et al. GaN based metalens for micro imaging[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(12): 2917-2922.
- [116] 张琬皎, 郭小青. 一种应用超透镜实现超分辨率聚焦系统: CN213399089U[P]. 2021-06-08.
Zhang W J, Guo X Q. A super-resolution focusing system using metalens: CN213399089U[P]. 2021-06-08.
- [117] 仇宫润, 王琨, 赵峰. 轻量化红外成像制导镜头设计与仿真[J]. 飞控与探测, 2021, 4(6): 33-37.
Qiu G R, Wang K, Zhao F. Design and simulation of lightweight infrared imaging guidance lens[J]. Flight Control & Detection, 2021, 4(6): 33-37.
- [118] 高翔, 李闯, 坎金艳, 等. CaF₂衍射光学元件的金刚石车削工艺优化[J]. 光学学报, 2021, 41(22): 2205001.
Gao X, Li C, Kan J Y, et al. Optimization of diamond turning process for CaF₂ diffractive optical elements[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(22): 2205001.