

含有谐衍射元件的红外双波段减热差系统设计

孙强^{①②} 王肇圻^① 李凤有^{①②} 刘宏利^① 卢振武^② 陈波^② 母国光^①

(^①南开大学现代光学研究所, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071; ^②中国科学院长春光机与物理研究所应用光学国家重点实验室, 长春 130022. E-mail: sunqiang.nankai@eyou.com)

摘要 首次将谐衍射透镜成功地引入红外双波段系统的减热差设计中, 系统只使用硅和锗两种材料, 三片透镜, 此系统不仅能在较大视场内得到接近衍射极限的成像质量, 而且在 -70°C 到 100°C 温度范围内, 使系统在两个波段内同时较好地完成了校正系统的轴向像差, 波前差均小于 $1/4$ 波长, 光学传递函数接近衍射极限. 设计结果表明, 谐衍射透镜的光谱特性介于折射透镜与衍射透镜之间, 恰当的选择谐衍射透镜的厚度和中心波长, 能够设计出简单实用的双波段减热差系统. 同传统的折射系统相比, 降低了对工艺水平的要求, 成本大大降低, 使设计结构紧凑, 片数少, 透射比高, 具有良好的消像差和减热差特性. 为红外光学设计提供了一种全新的器件.

关键词 谐衍射 减热差 红外双波段 光学系统

红外辐射主要有近红外($0.75\sim 2.5\ \mu\text{m}$), 中红外($3.2\sim 4.5\ \mu\text{m}$)和热红外($8\sim 14\ \mu\text{m}$)3个大气窗口. 现在的红外光学系统绝大多数为其中某个单波段系统, 由于在获取信息方面的局限性, 因而在国外, 为了提高自身的生存能力和发现敌方目标提出了双波段成像系统的研究^[1]. 使红外光学系统在信息丰富、识别真伪、反隐身、多目标跟踪及全天候性能方面具有无法比拟的优势^[2]. 作为透射式红外系统所使用的光学材料同普通的透可见光材料相比, 绝大部分具有很高的光热膨胀系数, 随着温度的变化, 红外光学材料的折射率和光学元件的尺寸和面形都会发生变化, 使光学系统产生离焦和其他像差, 导致成像质量变差, 所以国内外一些科研机构都在研究具有稳定性的高质量减热差红外光学系统^[3]. 红外光学系统的减热差设计一般是通过机械主动式、机械被动式、光学被动式等结构使红外系统在一个很大的温度范围内保持成像质量的稳定. 其中 Kanagawa, Wakabayashi 和 Tajime 等人提出的光学被动式减热差系统具有重量轻、结构简单特点, 更适合红外光学系统的需求, 因此得到广泛的关注, 但这种折射光学系统只能通过改变曲面的曲率或使用不同的材料来校正像差, 至少需要3种以上的材料, 使得透镜数量增加, 需要昂贵的红外稀有材料, 使系统效率比下降, 系统结构复杂, 特别在温度偏高时, 双波段系统的像差品质严重下降, 导致系统不能使用^[4~6].

二元光学元件与传统的折射元件组成的折/衍混合光学系统, 利用了光在传播中的折射和衍射两种

特性, 增加了光学设计过程中的自由度. 同时由于衍射光学元件具有负色散, 负的衍射热常数, 正光焦度的特点, 使得温度变化时透镜光热膨胀常数导致的离焦正好和镜筒材料热膨胀系数导致的像面移动相一致, 达到了很好的校色差和减热差效果^[7~9]. 但是大色散是普通衍射成像器件的最大缺陷. 1995年, Sweeney, Sommargren, Faklis 和 Morris 分别提出了“谐衍射透镜”的概念^[10,11], 它可以在一系列分离波长处获得相同的光焦度, 在一定程度上克服了衍射元件存在大色差的缺点.

本文首次讨论了含有谐衍射光学元件的混合红外双波段减热差光学系统的设计, 给出了在 $3.7\sim 4.3\ \mu\text{m}$ 波段和 $8.7\sim 11\ \mu\text{m}$ 热红外波段具有较大视场, 只用硅和锗两种材料, 成像质量接近衍射极限, 在 -70°C 到 100°C 温度范围内适应双波段红外减热差系统应用要求的混合光学系统.

1 谐衍射/折射双波段红外减热差光学系统理论

1.1 谐衍射理论

对于谐衍射透镜, 环带间光程差为 $p\lambda_0$ (p 是 ≥ 2 的整数), 相当于设计波长为 $p\lambda_0$, 焦距为 f_0 的普通衍射透镜, 如图1所示.

若对使用波长为 λ 的 m 衍射级次成像, 则其焦距 $f_{m,\lambda}$ 为 $p\lambda_0/m\lambda$. 要求 $f_{m,\lambda}$ 与设计焦距 f_0 重合, 即应满足: $\lambda m = p\lambda_0$, 所以参数 p 提供了设计参数, 在一定光谱区范围内控制哪几种的波长会聚到一个焦平面.

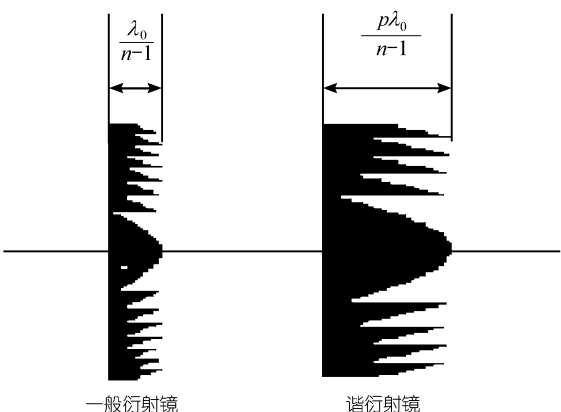


图 1 谐衍射透镜示意图

假设谐衍射面处在中红外波段和热红外波段的光焦度分别为 $k p \lambda_1 / m_1$ 和 $k p \lambda_2 / m_2$ ，其中 k 是和衍射面的半径、环带数、周期数有关的常数，那么谐衍射面处于中红外波段和热红外波段的色散因子分别表示为

$$V_1 = \frac{\lambda_{(1)\text{mid}}}{\lambda_{(1)\text{short}} - \lambda_{(1)\text{long}}}, \tag{1}$$

$$V_2 = \frac{\lambda_{(2)\text{mid}}}{\lambda_{(2)\text{short}} - \lambda_{(2)\text{long}}}. \tag{2}$$

根据谐衍射透镜的光焦度分配和色散因子，我们就能够在确定系统的初始结构之后，在 ZEMAX 优化完成后，确定谐衍射面的光焦度、厚度、半径、环带数、周期数等有关的面型结构。

1.2 谐衍射/折射双波段红外减热差光学系统理论

对于折射透镜，光学系统像差是其焦距的高阶小量，虽然温度对像差的影响较为复杂，但主要还是表现为系统的离焦，例如单薄透镜的光焦度是透镜的两表面的曲率之和与内外介质的折射率差的乘积，通过对它进行温度偏导就能求出温度变化引起的离焦变化。所以无论是单透镜还是透镜组的离焦变化和系统所选用的材料的折射率和材料的热膨胀系数有关，而和元件的面型曲率无关。我们将温度为 T 、半径为 r 时，元件相位分布表示为

$$\Phi r(r) = \sum_{i=1}^N A_i(T) r^{2i}. \tag{3}$$

则谐衍射元件的相位多项式系数同温度的关系可以用下式(取前两个系数，后面更高级的系数相对系统影响非常小，故省略)表示：

$$\frac{dA_1}{dT} = -2(\alpha_g A_1), \tag{4}$$

$$\frac{dA_2}{dT} = -4(\alpha_g A_2). \tag{5}$$

由(4)，(5)式可以看出谐衍射元件的相位多项式系数与温度的关系很简单，只和材料的热膨胀系数有关而和材料的折射率无关。这是因为材料的折射率的变化只影响元件表面沟槽的等效深度，也就是影响元件的衍射效率。但实际上由于折射率变化很小，所以可以忽略。 A_1 表示谐衍射元件的光焦度， A_2 表示它的球差，并且对于红外宽波段的系统， A_2 远远小于 A_1 的量值。温度变化主要影响谐衍射元件的离焦变化，而对于高级球差和其他高级像差影响很小。系统中的折射元件和谐衍射元件在温度变化中都将产生离焦，对于 ZnSe、Si 和 Ge 材料制成的折射元件的热常数为正，将产生一定的正光焦度贡献，而谐衍射元件的热常数为负，将产生一定的负的光焦度贡献，尽管谐衍射元件的热常数小于折射元件的热常数，但我们通过控制谐衍射元件的环带特征尺寸大小及数目来控制光焦度的贡献，从而达到控制谐衍射元件离焦的目的。这样就可以控制系统在中红外波段和热红外波段的离焦分别同镜筒材料热膨胀导致的像面移动相一致。

作为双波段的减热差系统应该满足不同波段的光线的像面在一个像平面上，数值孔径基本保持不变，成像质量合乎要求。对于本文设计的只有硅锗材料，带有谐衍射面的三片镜的光学系统在中红外波段和热红外波段应分别满足总光焦度分配，消轴向色差方程和减热差方程。所以可根据这 3 个方程分别求出系统在两个波段的基本参数。

2 具体的设计方案

谐衍射透镜可以在一系列分离波长处获得相同的光焦度，相对应的衍射级次存在衍射效率的带宽不同，首先根据谐衍射的理论，取 $P = 2$ ， $\lambda_0 = 10 \mu\text{m}$ 为中心波长，则谐振波长分别为 10, 6.7, 5 和 4 μm ，并分别对应衍射级次 $m = 2 \sim 5$ 。根据(6)式的衍射效率表达式

$$\eta_m = \left[\frac{\sin \left\langle \pi \left\{ \frac{\lambda_0}{\lambda} \left[\frac{n(\lambda) - 1}{n(\lambda_0) - 1} \right] p - m \right\} \right\rangle}{\pi \left\{ \frac{\lambda_0}{\lambda} \left[\frac{n(\lambda) - 1}{n(\lambda_0) - 1} \right] p - m \right\}} \right]^2. \tag{6}$$

经过数学软件 matlab 计算了各个谐振波长处的衍射效率，如图 2 所示。从图中看到谐振波长为 6.7, 5 μm 中心波长恰好不在红外窗口区，所以我们可不考虑这两个谐振中心波长，而 10, 4 μm 中心波长恰好分

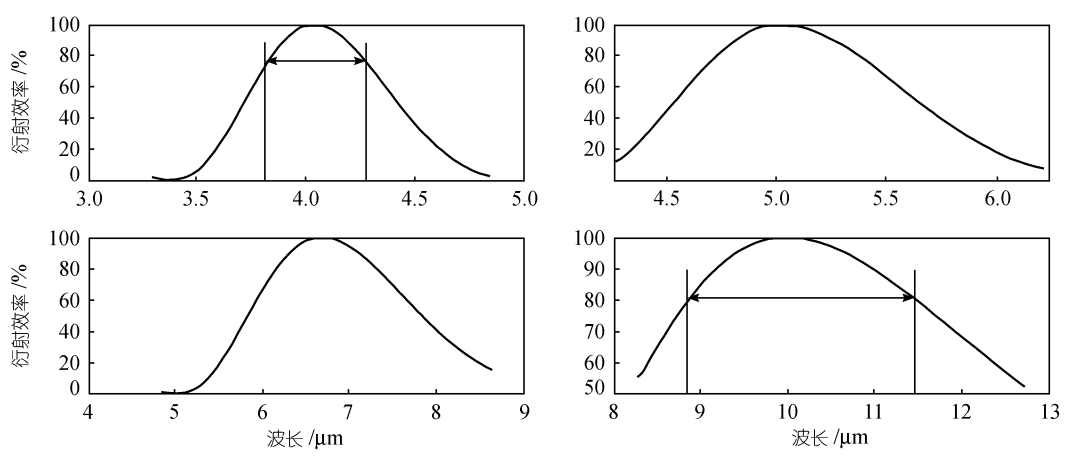


图 2 $p = 2$ 时谐衍射透镜的不同级次的衍射效率
对应的谐振波长分别为 4, 5, 6.7 和 10 μm , “ $\longleftrightarrow$ ”示衍射效率达 80%的频谱宽度

别位于热红外和中红外频谱区。所以利用 $m = 2, m = 5$ 谐振级次覆盖的衍射效率达 80% 的频谱区作为我们设计的红外系统的波长范围, 并考虑到衍射效率对成像系统的影响, 以及材料透过率情况及实际使用温度范围的限制。我们设计的系统取 3.7~4.3 μm , 8.7~11.7 μm 为工作波段, 口径为 30 mm、视场角为 3°、系统焦距为 71mm 的红外系统, 外壳采用铝材料。由于一般情况下衍射面的光焦度很小, 并且将衍射面放于最后的面上。所以我们先假定衍射面的光焦度为“零”然后计算出三片元件的光焦度, 并计算出光学系统的初始结构。对于所选择的材料, 要求在双波段内同时成像, 同时校像差。因为光学系统的光焦度、面形结构、厚度等尺寸已经确定, 所以选定的每种红外材料在中波红外和热红外每个波长处折射率值, 同这点波长的比值的值所形成的假想曲线的相对应波长处的斜率值应相近, 图 3 为理想材料的选择示意图。

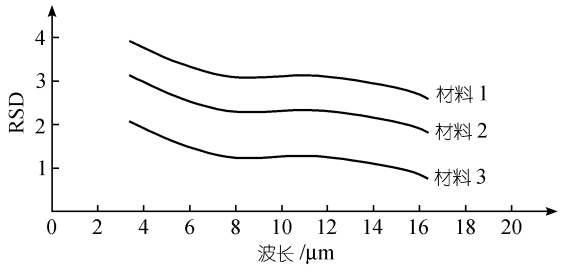


图 3 理想材料选择示意图
RSD 示材料的折射率值同相对应波长值的比

这样才能在各个波段内很好的协调消像差。再加上谐衍射面独特的校色差效果。并参考文献[12, 13], 我们选定 Si, Ge 两种材料。当材料选定之后, 在 ZMEAX 软件下进行数据处理, 并将谐衍射面加入系

统中, 利用软件的计算能力再重新微调各个镜片和衍射面的光焦度分配。利用 ZEMAX 软件具有的“温度变化对系统影响”的功能, 使用优化函数对谐衍射元件面型结构进行精心优化和计算, 最后确定整个系统的结构。结构图如图 4 所示, 其中第 4 面和第 5 面为高次非球面, 加上高次非球面的目的是更有利于消除球差和彗差等像差。第 6 面为谐衍射面。

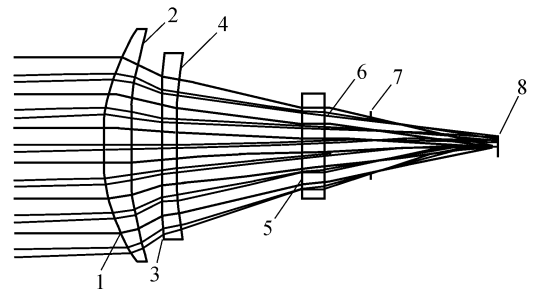


图 4 红外双波段减热差系统结构图
1~6 示透镜面型序列数, 第 6 面为谐衍射面, 7 示光阑, 8 示像平面

图 5 和 6 分别是图 4 的光学系统在中红外波段 -70℃ 时的光学传递函数(50 线对时接近衍射极限)和轴向像差曲线(最大值为 0.065 mm); 图 7 和 8 分别是光学系统在中红外波段 100℃ 时的光学传递函数(50 线对时接近衍射极限)和轴向像差曲线(最大值为 0.07 mm); 图 9 和 10 分别是图 4 的光学系统在热红外波段 -70℃ 时的光学传递函数(50 线对时接近衍射极限)和轴向像差曲线(最大值为 0.11 mm); 图 11 和 12 分别是光学系统在热红外波段 100℃ 时的光学传递函数(50 线对时达到衍射极限)和轴向像差曲线(最大值为 0.09 mm)。我们也同时给出了系统在两个波段的波前和温度的关系, 如图 13 所示。能够看到两个波

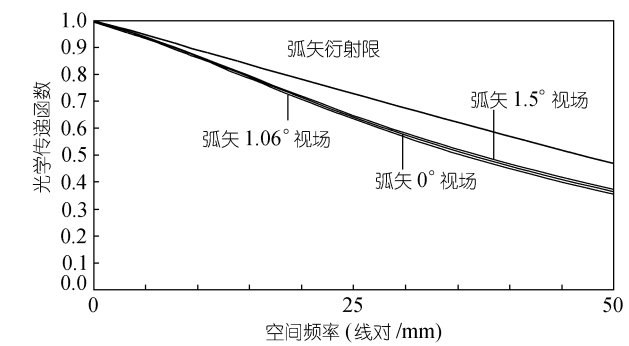


图 5 -70℃时的波段 1 的光学传递函数

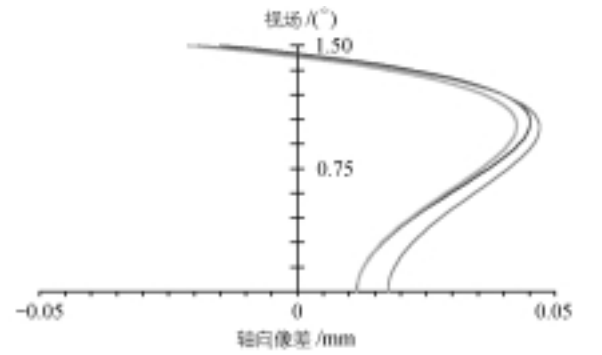


图 6 -70℃的波段 1 的轴向像差曲线

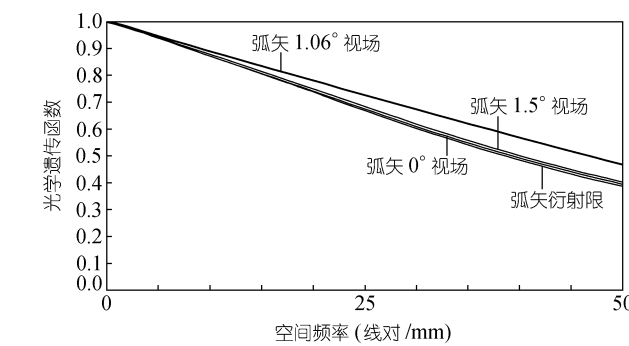


图 7 100℃的波段 1 的轴向像差曲线

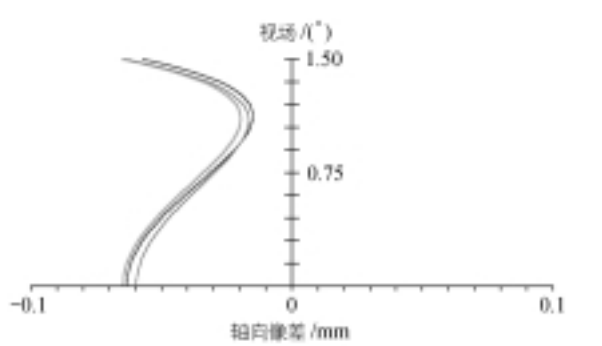


图 8 100℃时的波段 1 的光学传递函数

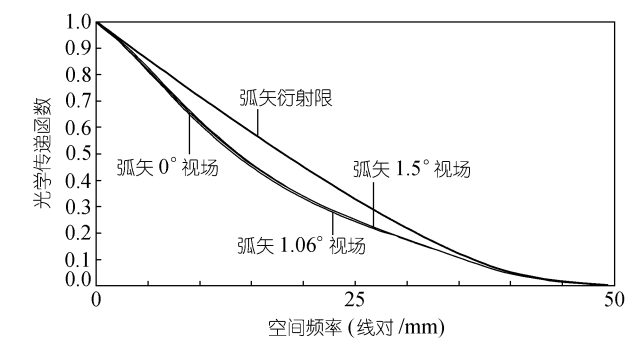


图 9 -70℃时的波段 2 的光学传递函数

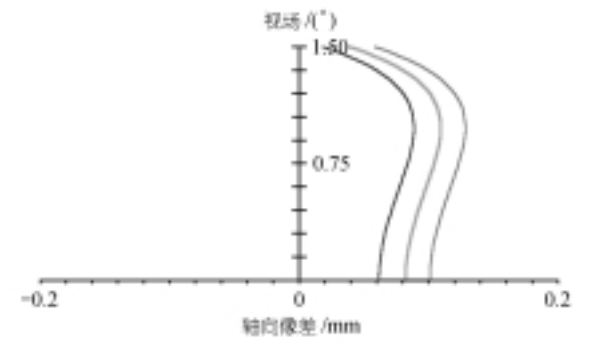


图 10 -70℃时的波段 2 的轴向像差曲线

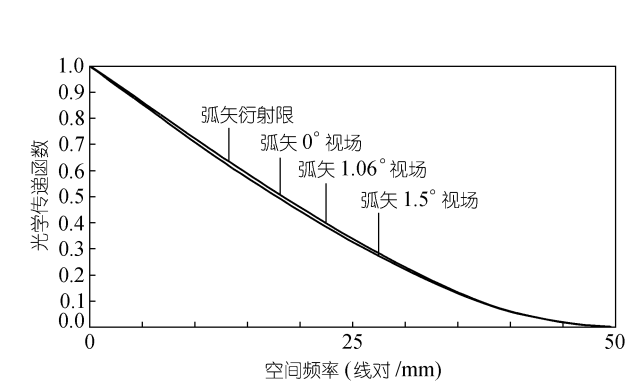


图 11 100℃时的波段 2 的光学传递函数

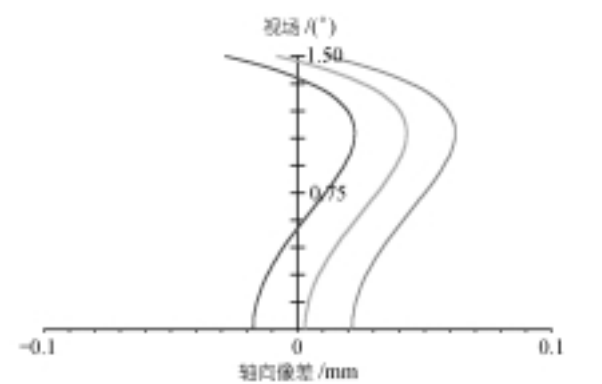


图 12 100℃时的波段 2 的轴向像差曲线

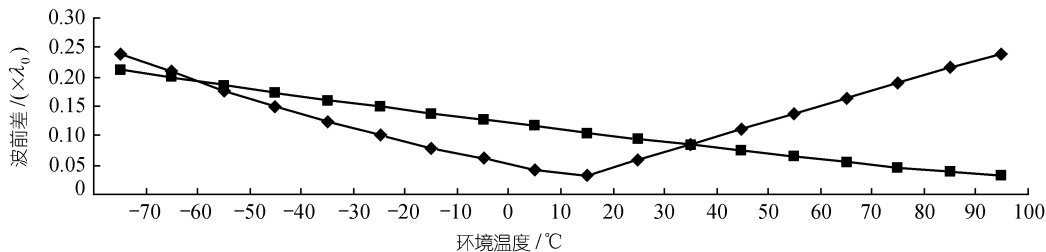


图 13 两个波段的波前和温度的关系
◆示波段 1 的曲线, ■示波段 2 的曲线

段的波前差在-70℃到 100℃之间都小于 $1/4 \lambda_0$, 表明在这个温度范围内的系统的离焦小于系统的焦深. 小于像质评价“瑞利判据”的标准, 即当实际波面与理想波面的最大差别不超过 $\lambda_0/4$ 时, 此波面可看作无缺陷的. 并且光学传递函数接近衍射极限, 所以此系统可实际使用. 但也能看出系统在热红外波段的校像差更好, 这是因为我们设计的中心波长为 $10 \mu\text{m}$, 而其他的波都是谐振波, 并且随着衍射级数 m 的增加导致给定有效衍射效率覆盖的带宽变窄, 使衍射效率下降; 另外也是由于选定这两种红外材料在中波红外和热红外每个波长处折射率值, 同这点波长的比值的值所形成的假想曲线的相对应波长处的斜率值在热红外能够接近, 而在中波红外不能如此, 所以导致系统品质下降.

3 结果和讨论

本文讨论了含有谐衍射特征的光学元件和使用两种最简单的红外材料锗和硅就能设计出实用简单的红外双波段减热差系统. 根据谐衍射透镜特点, 即可以在一系列分离波长处获得相同的光焦度. 当设计参数 p 增大时, 谐衍射透镜厚度缓慢增加, 外形逐渐趋于折射透镜, 色散大小介于折射透镜和衍射透镜之间, 在一定程度上克服了衍射器件存在的大色散缺点. 根据红外波段的窗口特性, 恰当的选择参数“ p ”和所设计的系统的中心波长“ λ_0 ”, 就能将谐衍射透镜成功的引入红外双波段减热差系统的设计中, 并根据衍射元件的光热膨胀系数和大多数红外材料的光热膨胀系数符号相反, 同材料的折射率温度系数无关的光热膨胀系数的特点. 所以采用含有谐衍射的双波段减热差系统, 不仅能在两个波段内同时满足系统的成像和校像差以及减热差要求, 使设计结构紧凑、片数少、透射比高, 而且系统结构简单, 体积小、重量轻. 具有很宽的工作温度范围, 并且衍射面为平面, 特征尺寸大, 易于加工制作, 具有良好的

消像差特性, 在较大视场内得到接近衍射极限的成像质量. 为光学设计提供了基于谐衍射透镜的一种全新的器件, 降低了对工艺水平的要求. 可用在双波段, 多波段, 宽视场及大数值孔径的光学成像系统中, 因此谐衍射元件在红外光学系统的减热差设计, 校色差方面以及探讨变焦距和多波段系统的减热差设计有很大的应用价值, 实现了高质量成像, 对军事领域和民用技术发展均有重大的意义.

致谢 本工作为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室和南开大学、天津大学联合研究院资助课题以及国家自然科学基金(批准号: 60277021)资助项目.

参 考 文 献

1 吴宗凡, 柳美琳, 张绍举, 等. 红外与微光技术. 北京: 国防工业出版社, 1998. 286~300

2 Thomas H. Jamieson ultrawide waveband optics. Opt Eng, 1984, 23(2): 111~116

3 郭永红, 沈忙作, 陆祖康. 折射/衍射红外光学系统的消热差设计. 光学学报, 2000, 10: 2392~2395

4 Kanagawa Y, Wakabayashi S, Tiajime T, et al. Expansion of an athermal chart into a multilens system with thick lenses spaced apart. Opt Engng, 1996, 35(10): 3001~3006

5 Jamieson T H. Thermal effects in optical systems. J Opt Soc Am, 1948, 38: 542~546

6 Kanagawa Y, Wakabayashi S, Tiajime T, et al. Multilens system design with an athermal chart. Appl Opt, 1994, 33(34): 8009~8013

7 Wood A P. Design of infrared hybrid refractive-diffractive lenses. Appl Opt, 1992, 31(13): 2253~2258

8 Stone T, George N. Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats. Appl Opt, 1988, 27(12): 2960~2971

9 Tamagawa Y, Tajime T. Dual-band optical systems with a projective athermal chart: design. Appl Opt, 1997, 36(1): 297~301

10 Sweeney D W, Sommargren G E. Harmonic diffractive lenses. Appl Opt, 1995, 34(14): 2469~2475

11 Faklis D, Morris G M. Spectral properties of multiorde diffractive lenses. Appl Opt, 1995, 34(14): 2462~2468

12 李士贤, 李林. 光学设计手册. 北京: 北京理工大学出版社, 1995, 69~116

13 袁旭沧. 光学设计. 北京: 北京理工大学出版社, 1988, 96~143

(2002-09-04 收稿, 2002-12-25 收修改稿)