

基于新型硫系玻璃的红外成像光学系统 (特邀)

陈津津^{1,2}, 周港杰^{1,2}, 谭 燕^{1,2}, 戴世勋^{1,2}, 林常规^{1,2*}

(1. 宁波大学 红外材料及器件实验室, 浙江 宁波 315211;
2. 先进红外光电材料与器件浙江省工程研究中心, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为了丰富当前可用红外材料的种类, 满足新一代红外成像光学系统的轻薄化设计需求, 充分利用硫系玻璃组分可调和色散参数可选两大特殊优势, 开发了新型硫系玻璃材料, 并且在同一系统指标要求下, 分别对基于传统红外材料和基于新型硫系玻璃设计的红外光学系统进行了性能对比。基于高折射率硫系玻璃的中波双视场红外光学系统, 有效实现了去锸化设计, 与基于传统红外材料的红外光学系统相比较, 光学系统质量减轻了 35%, 长度减少了 15%, 透过率提高了 10%。基于叠层梯度折射率 (gradient refractive index, GRIN) 硫系玻璃的共光路、共焦面双波段红外光学系统, 在非制冷型中/短波红外成像光学系统中首次实现了胶合透镜的设计, 与基于传统红外材料的双波段红外光学系统相比较, 光学系统质量减轻了 40%, 长度减少了 30%, 透过率提高了 15%; 在制冷型中/长波红外光学系统中, 具有不同折射率差值 Δn 的 GRIN 硫系玻璃展现出卓越的色差校正能力, 与基于传统红外材料的双波段红外光学系统相比较, 光学系统质量减轻了 20%, 长度减少了 20%, 透过率提高了 18%。设计结果表明, 新型硫系玻璃的出现, 是对现有红外材料的有益补充, 为新一代红外成像光学系统提供了更为丰富的材料选择和更多的设计自由度, 是实现轻薄化透射式红外光学系统的重要技术途径。

关键词: 高折射率; 梯度折射率 (GRIN); 双波段; 硫系玻璃; 共口径; 红外光学系统

中图分类号: TH744 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230102

0 引言

红外热成像技术在当前国防军事领域具有不可替代的应用价值, 它是红外警戒、搜索跟踪、精确制导等现代战争全天候作战的关键。为了满足各类高性能光电武器平台的兼容需求, 红外光学系统的轻量化、小型化、低成本成为新一代红外成像系统综合性评估的重要指标参数。实现新一代轻薄化红外光学系统的制造, 迫切需要发展新型可制造的红外光学材料, 为红外光学系统的设计提供更为丰富的材料选择和更多的设计自由度。

硫系玻璃与传统的红外晶体材料相比, 其透射波段更宽 (覆盖短波、中波和长波红外), 并且折射率温度系数较低, 折射率/色散参数选择丰富, 化学稳定

性较好, 制备成本较低, 近年来已经作为一种优良的红外光学透镜材料, 被广泛应用于军用和民用领域的各类红外光学系统中, 例如红外瞄准、体温测量、汽车夜视、安防监控等^[1-8]。但硫系玻璃现有的应用主要是基于它的 dn/dt 系数较低这一特性, 仅作为温度自适应红外光学系统中的消热差透镜被广泛认可, 而硫系玻璃组分可调、色散参数选择较为丰富这两大核心优势并未得到进一步的充分开发和应用。与此同时, 鉴于现有硫系玻璃与常用的硅单晶 (Si)、锗单晶 (Ge) 材料相比较, 其折射率较低, 像差校正的效果不如上述 Si、Ge 两种材料, 使得现有的硫系玻璃应用受限。

早在 2008 年, 美国 DARPA 战略科技局就启动

收稿日期: 2023-02-28; 修订日期: 2023-04-08

基金项目: 国家自然科学基金 (62122039)

作者简介: 陈津津, 女, 研究员, 博士, 主要从事红外光学系统设计及性能仿真方面的研究。

通讯作者: 林常规, 男, 研究员, 博士, 主要从事硫系玻璃材料及器件方面的研究。

了 M-GRIN 计划 (目前仍在进行中), 以开发低成本、可定制化的新型硫系玻璃应用于各种军事系统, 但仅限本国军用^[9-10]。此外, 日本也制备了可商用的高折射率硫系玻璃, 但是价格昂贵, 且供货周期较长。

文中针对新一代红外成像系统高性能、小型化、低成本的高度需求, 通过研制系列化新型硫系玻璃, 挖掘硫系玻璃组分可调这一优势, 提高硫系玻璃折射率, 进一步发挥其在红外光学系统中的像差校正能力; 利用硫系玻璃丰富的色散特性, 研制新型梯度折射率 (gradient refractive index, GRIN) 硫系玻璃, 以充分发挥其在多/宽波段中的像差校正作用, 满足我国新一代高性能光学系统的轻薄化设计需求。上述新型硫系玻璃的出现可以实现红外镜头的去锗化设计, 大幅降低红外镜头的制造成本, 具有广阔的商业前景。

1 新型硫系玻璃材料

目前所使用的传统红外材料, 根据材料形式主要分为晶体材料和玻璃材料两大类, 硫系玻璃由于具有良好的红外透射率和光学均匀性, 目前成为红外玻璃材料的典型代表。常用的红外材料的透射波段和折射率如表 1 所示。

表 1 常用红外材料折射率和透射波段

Tab.1 Refractive index and transmission range of general IR material

Material	Transmission range/ μm	Refractive index @10 μm & 20 $^{\circ}\text{C}$
Si	1.2-10	3.433 0
Ge	2.0-20	4.003 0
ZnSe	0.5-15	2.404 4
ZnS	0.4-12	2.197 8
BaF ₂	0.8-10	1.474 0
IG2	1-14	2.498 2
IG3	1.2-14	2.784 7
IG4	1-14	2.609 9
IG5	1-14	2.604 6
IG6	1-14	2.779 3

在透射式红外光学系统中, 透镜材料的折射率越高, 光学系统的光程越短, 像差校正越容易, 更易实现小型化的红外系统设计, 这也是 Si 材料和 Ge 材料成为红外透镜中最常选用材料的主要原因。高折射率硫系玻璃可以在兼顾像差校正和镜头轻薄化设计的同时降低制造成本, 是目前最值得开发的新型红外材料之一。

1.1 高折射率硫系玻璃

目前商用的硫系玻璃 (IG 系列) 主要是由 As-Se、Ge-As-Se 或 Ge-Sb-Se 等硒基硫系玻璃组成, 它们在波长 10 μm 处的折射率处于 2.4~2.8 之间。从表 1 中可以看出, 硫系玻璃与常用的单晶 Si、单晶 Ge 相比较, 其折射率较低, 不利于光学像差校正, 使其应用受限。为了开发更高折射率的硫系玻璃, 笔者在硫系玻璃的组分中引入具有更高极化率的重元素碲 (Te), 获得了折射率达到 3.18 (@10 μm) 的新型高折射率硫系玻璃, 其为实现低成本、轻薄型红外光学系统提供了全新的材料选择。

宁波大学红外材料与器件团队 (NBL) 最新研发的可制造、大尺寸的新型高折射率硫系玻璃 NBL-TQIR-1, 其组分为 Ge-Se-Te。NBL-TQIR-1 玻璃的透过光谱及样品照片如图 1 所示, 该硫系玻璃在 1.5-18 μm 的超宽光谱范围内透明, 并且可实现大口径 ($\Phi \leq 100 \text{ mm}$) 规模化制备, 具体的材料性能参数详见表 2。

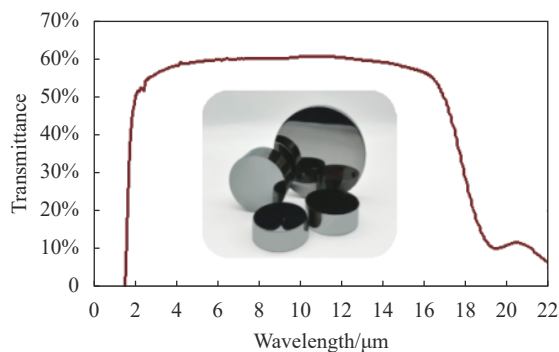


图 1 高折射率 NBL-TQIR-1 硫系玻璃透过光谱 (厚度: 2.5 mm), 插图 为 $\Phi 50\sim 100 \text{ mm}$ NBL-TQIR-1 硫系玻璃的样品照片

Fig.1 Transmission spectra of high-index chalcogenide glass NBL-TQIR-1 (sample thickness of 2.5 mm). The photo of NBL-TQIR-1 chalcogenide glass sample with the diameter of $\Phi 50\sim 100 \text{ mm}$

表 2 高折射率硫系玻璃的物理特性

Tab.2 Physical properties of high-index chalcogenide glass

Physical properties	
Density/g·cm ⁻³	5.31
Glass transition temperature/°C	178
Young's modulus/GPa	25.53
Elastic modulus/GPa	9.80
Poisson's ratio	0.30
Refractive index @ 20 °C	
Wavelength/μm	<i>n</i>
2	3.26488
2.5	3.23436
3.7	3.20648
4.2	3.20124
4.8	3.19681
8	3.18531
10	3.18088
12	3.17620

1.2 GRIN 硫系玻璃

双/多波段共焦面红外探测器的出现使新一代成像系统的性能指标不再受限于探测器的灵敏度,而是受限于与之适配的光学成像系统的像差限制。反射式光学设计提供虽然解决了双/多波段成像光学系统的色差校正问题,但这类型光学系统带来的装配困难及环境适应性限制了其在复杂的军事环境中的应用,因此该类系统仍然寄希望于透射式红外光学系统。

现有的双/多波段透射式红外光学系统由于波段变宽,急剧提升了该类光学系统的色差校正难度,基于现有的红外材料要满足系统的性能要求,仍然需要多种材料组合才能完成像差校正,无法同时兼顾多/双波段共焦面成像与系统轻薄化的应用需求。

NBL 团队开发的 Te 基系列化新型硫系玻璃,如表 3 所示,基于该系列化玻璃具有相似的玻璃转化温度 (T_g) 这一前提,并充分发挥硫系玻璃色散参数可选

这一核心优势,可根据双/多波段红外成像系统的色差校正需求来选择双层、三层或多层 Te 基硫系玻璃,在真空或者惰性气体条件下,于 T_g 以上某一温度(玻璃软化温度 T_s 附近)处,对其进行加热保温后再进行加压,获得叠层式 GRIN 硫系透镜。

表 3 中列出了经过 NBL 团队研发、目前可制备的 6 种新型 Te 基硫系玻璃,根据光学系统的设计需求,采用其中任意两种或多种硫系玻璃进行组合,实现具有不同折射率差值 Δn 的 GRIN 硫系玻璃,以获得能够在双/宽波段成像系统中具有较强色差校正能力的 GRIN 硫系玻璃透镜。

表 3 Te-基系列化新型硫系玻璃物理特性

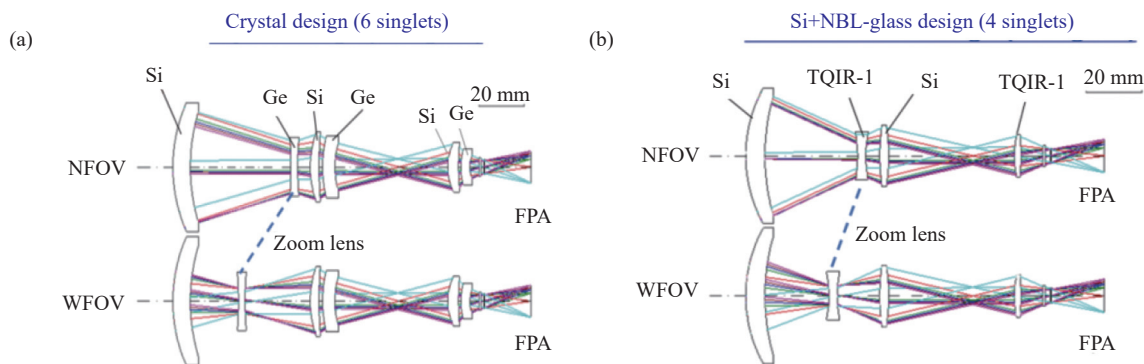
Tab.3 Physical properties of Te-based serial new chalcogenide glasses

Material	λ -range/μm	Refractive index @ 20 °C	T_g /°C
NBL-Te-2	1.5-14	2.4065	110
NBL-Te-7	1.5-14	2.4594	117
NBL-Te-12	1.5-14	2.5692	121
NBL-Te-17	1.5-14	2.5887	120
NBL-Te-22	1.5-14	2.6789	123
NBL-Te-27	1.5-14	2.8157	123

2 基于新型硫系玻璃的红外光学系统设计

2.1 轻薄型中波双视场光学系统

为了评估 NBL 开发的新型高折射率硫系玻璃透镜的潜在效益,针对最常用的中波制冷型 640×512 ($F\#4$, @15 μm) 红外探测器,在同一性能指标下,分别开展了基于传统晶体材料的中波双视场红外光学系统与基于 NBL-TQIR-1 硫系玻璃的中波双视场红外光学系统的方案设计,两种光学方案的设计结果如图 2 所示,性能对比结果如表 4 所示。



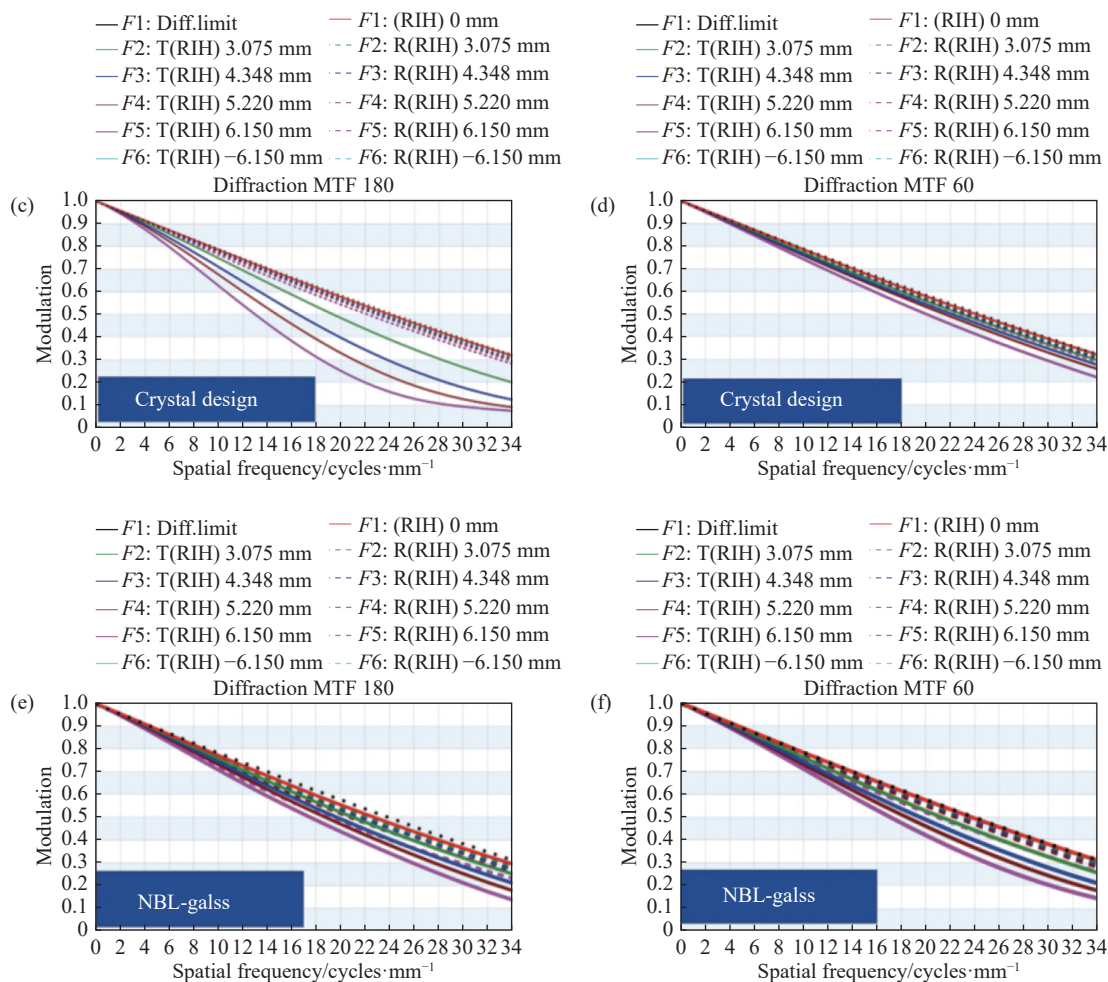


图 2 (a) 传统晶体材料中波双视场红外光学系统的设计方案, 焦距为 60 mm, $F\#3$; (b) 基于 NBL-TQIR-1 轻薄型中波双视场光学系统设计方案, 焦距为 60 mm, $F\#3$; (c) 传统晶体材料光学系统窄视场 MTF; (d) 传统晶体材料光学系统宽视场 MTF; (e) NBL-TQIR-1 光学系统窄视场 MTF; (f) NBL-TQIR-1 光学系统宽视场 MTF

Fig.2 (a) Design scheme of dual-field MWIR optical system of traditional crystal materials, focal length of 60 mm, $F\#3$; (b) Design scheme of lightweight medium wave dual-field optical system based on NBL-TQIR-1, focal length of 60 mm, $F\#3$; MTF of traditional crystal materials optical system is calculated for (c) narrow field and (d) wide field; MTF of optical NBL-TQIR-1 system is calculated for (e) narrow field and (f) wide field

表 4 中波双视场光学系统性能指标对比

Tab.4 Comparison of performance indexes for medium wave dual-field optical systems

Characteristics	Crystal design	NBL glass design
Spectrum/ μm		3.7-4.8
FPA		640×512@15 μm
$F\#$		4
Focal/mm		180/60
Length/mm	150	130
Lens count	6	4
Aspheres	3	2
Mass-optical/g	70	45
Materials	Si, Ge	Si, NBL-TQIR-1
MTF (nominal)	20%@NFOV/ 20%@WFOV	10%@ NFOV/ 20%@ WFOV

设计结果表明, 在相同的性能指标下, 两种光学系统的设计方案在特征频率 (@33 lp/mm) 处, 两个视场下的光学传递函数 MTF 均贴近系统衍射限。由于新型高折射率硫系玻璃 NBL-TQIR-1 的折射率值达到了 3.18(@10 μm 波长处), 对光学系统的像差校正起到关键作用, 最终系统仅采用了 2 片单晶 Si 透镜与 2 片 NBL-TQIR-1 硫系玻璃透镜组合获得了性能优于采用传统晶体材料的光学系统的设计结果。与此同时, 由于采用 NBL-TQIR-1 硫系玻璃替代了单晶 Ge, 使得新型光学系统比传统晶体材料光学系统透镜减少了 2 片, 非球面减少 1 个, 光学系统的质量减轻了

35%, 长度减少了 15%, 透过率提高了 10%, 有效实现了中波红外光学系统的轻薄化和低成本设计。

2.2 灵巧型共光路、共焦面双波段红外光学系统

为了评估 NBL 开发的叠层 GRIN 硫系透镜在双波段红外光学系统中卓越的色差校正能力, 分别针对非制冷型中/短波、制冷型中/长波共焦面双色探测器进行了光学系统设计。

2.2.1 中/短波红外光学系统

针对非制冷型中/短波共焦面 $640 \times 512 (F\#4, @12 \mu\text{m})$ 红外探测器, 在同一性能指标下, 分别开展了基于传统材料的中/短波红外光学系统与基于 NBL-GRIN 硫系玻璃的中/短波红外光学系统的方案设计, 两种方案的设计结果如图 3 所示, 性能对比结果如表 5 所示。这里需要说明的是, 晶体设计中选用 BaF_2 的原

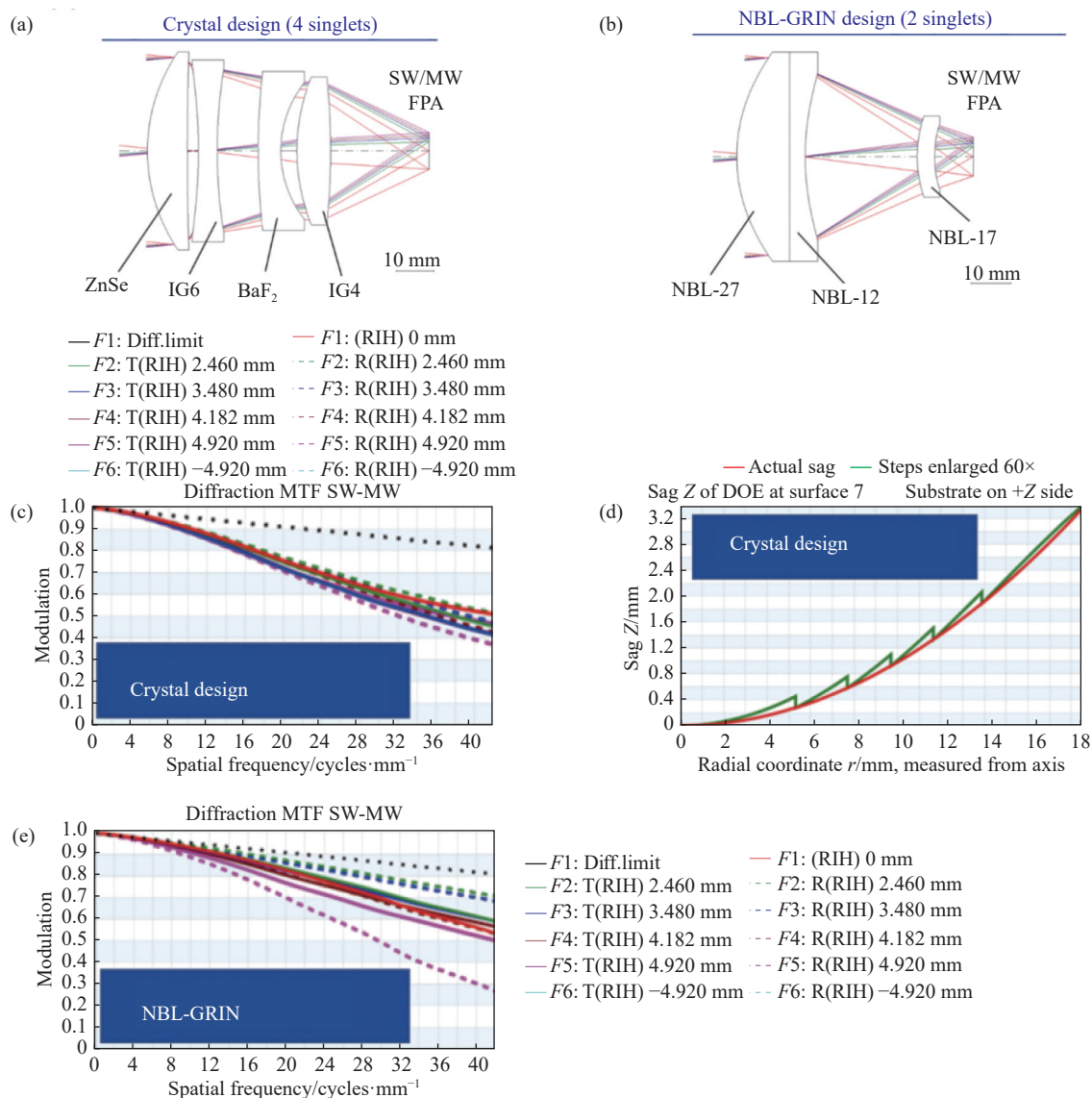


图 3 (a) 传统材料中/短波非制冷型共焦面光学系统设计, 焦距为 50 mm, $F\#1$, 从前到后 4 片透镜的组成依次为 ZnSe, IG6, BaF_2 , 和 IG4; (b) 基于 NBL-GRIN 硫系玻璃中/短波制冷型共焦面的光学系统设计, 焦距为 50 mm, $F\#1$, 从前到后 2 片透镜的组成依次为 GRIN-NBL-27/NBL-12, NBL-17; (c) 传统材料中/短波光学系统的传递函数 MTF; (d) 透镜 4 第一面衍射面矢高图; (e) NBL-GRIN 中/短波光学系统的传递函数 MTF

Fig.3 (a) Design of traditional material medium/short wave uncooled confocal optical system, focal length of 50 mm, $F\#1$, from front to rear, ZnSe, IG6, BaF_2 , and IG4; (b) Design of medium/short wave cooled confocal surface optical system based on NBL-GRIN chalcogenide glass, 50 mm, $F\#1$ lens, from front to rear, the two lenses are GRIN-NBL-27/NBL-12 and NBL-17, respectively; (c) MTF of traditional material medium/short wave optical system; (d) Sag Z diagram of the first diffractive surface of lens 4; (e) MTF of medium/short wave optical system

表 5 共光路、共焦面中/短波红外光学系统双波段光学系统性能对比

Tab.5 Comparison of common light path confocal surface SWIR-MWIR dual-band optical systems

Characteristics	Crystal design	NBL-GRIN design
Spectrum/ μm		1.5-5
FPA		640×512@12 μm
$F\#$		1
Focal/mm		50
Length/mm	75	50
Lens count	4	2
Aspheres	3	2
DOE	1	0
Mass-optical/g	245	150
Materials	ZnSe, IG6, BaF ₂	GRIN-NBL-27/12, NBL-17
MTF (nominal)	40%	50%

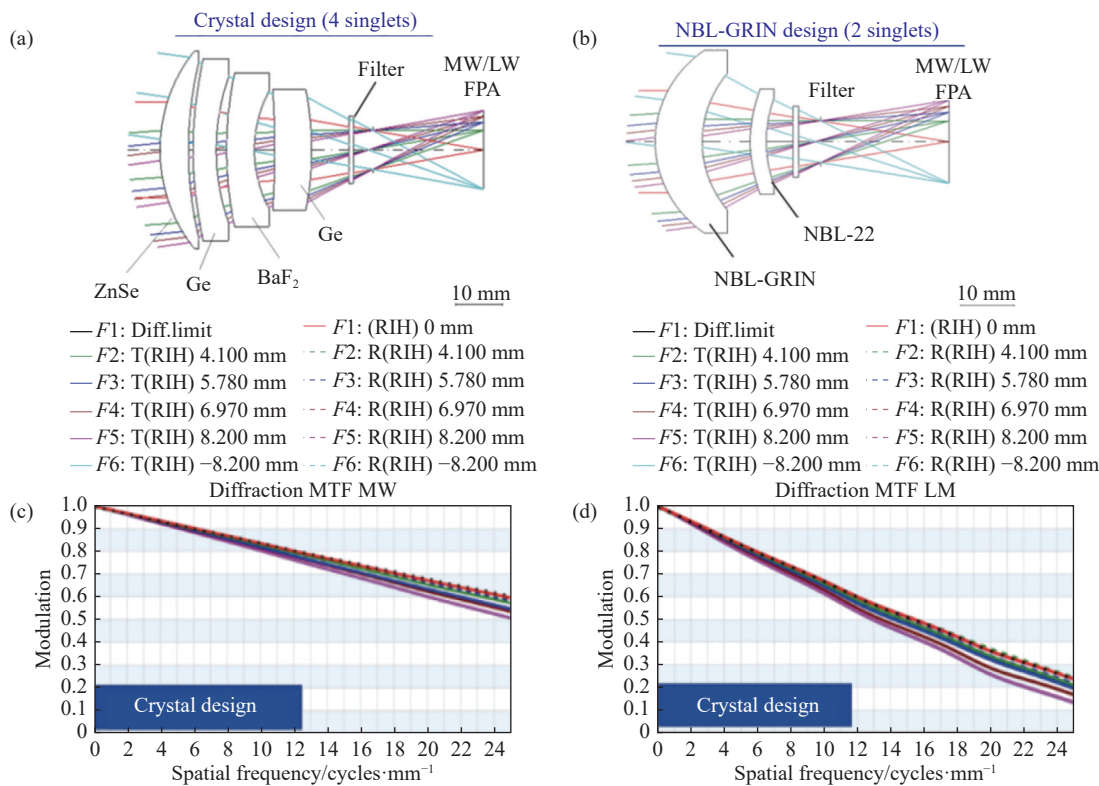
因其相比于 ZnS 等具有更大的阿贝数, 因此拥有更强的色差校正能力。

采用 NBL 开发的 Te 基新型硫系玻璃, 在非制冷

型中/短红外成像光学系统中首次实现了胶合透镜的设计, 由于叠层 GRIN 硫系玻璃折射率差值 Δn 达到了 0.25, 充分发挥了 GRIN 硫系透镜在双波段光学系统中的色差校正作用, 使得基于 NBL-GRIN 硫系玻璃的新型双波段光学系统仅采用 2 片新型硫系玻璃就完成了设计, 比基于传统材料的光学系统透镜减少了 2 片, 同时非球面减少 1 个, 并去除了衍射面。在相同的性能指标要求下, 新型光学系统质量减轻了 40%, 系统长度减少了 30%, 透过率提高了 15%, 前者光学传递函数 MTF(@特征频率 42 lp/mm) 比后者提高 10%, 有效实现了共光路、共焦面双波段光学系统的紧凑型设计。

2.2.2 中/长波红外光学系统

针对制冷型中/长波共焦面红外探测器 640×512 ($F\#4$, @20 μm) 红外探测器, 在同一性能指标下, 开展了基于传统材料的中/长波红外成像光学系统与基于 NBL-GRIN 硫系玻璃的中/长波红外成像光学系统的设计, 两种光学方案的设计结果如图 4 所示, 性能对比结果如表 6 所示。



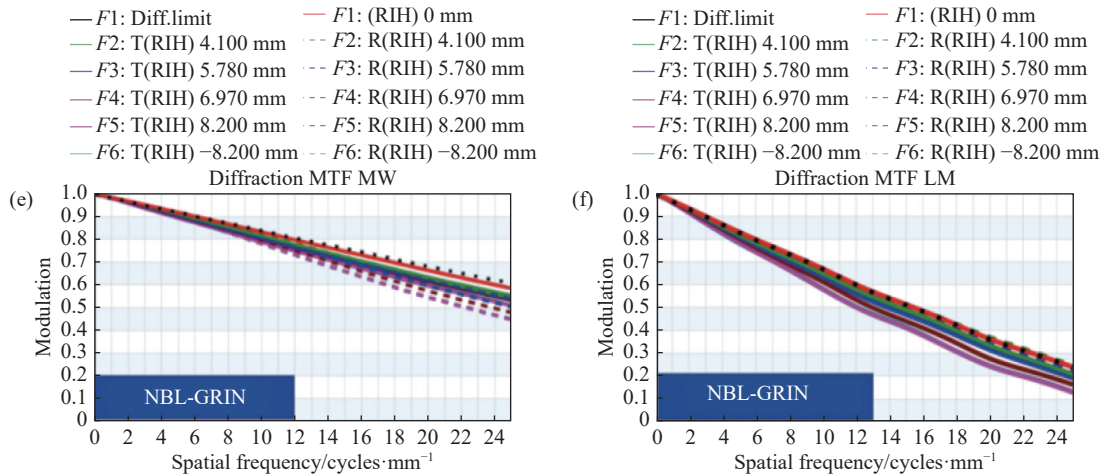


图 4 (a) 传统材料中/长波制冷型共焦面光学系统设计, 焦距为 60 mm, $F\#3$, 从前到后 4 片透镜的组成依次为 ZnSe、Ge、BaF₂、and Ge; (b) 基于 NBL-GRIN 的新型硫系玻璃中/长波制冷型共焦面光学系统设计, 焦距为 60 mm, $F\#3$, 从前到后 2 片透镜的组成依次为 NBL-GRIN、NBL-22; (c) 传统材料中波红外光学传递函数 MTF; (d) 传统材料长波红外光学传递函数 MTF; (e) NBL-GRIN 中波红外调制传递函数 MTF; (f) NBL-GRIN 长波红外调制传递函数 MTF

Fig.4 (a) Design of traditional material medium/long wave cooled confocal optical system, focal length of 60 mm, $F\#3$, four lenses from front to rear, ZnSe, Ge, BaF₂, and Ge; (b) Design of medium/long wave cooled confocal optical system based on NBL-GRIN chalcogenide glasses, focal length of 60 mm, $F\#3$, the two lenses from front to rear are NBL-GRIN and NBL-22, respectively; MTF of traditional material is calculated for (c) MWIR and (d) LWIR wavebands; MTF based on NBL-GRIN is calculated for (e) MWIR and (f) LWIR

表 6 共光路共焦面中/长波红外双波段光学系统性能对比

Tab.6 Comparison of common light path confocal surface MWIR/LWIR dual-band optical systems

Characteristics	Crystal design	NBL-GRIN design
Spectrum/ μm		3.7-4.8 & 7.7-9.5
FPA		640×512 @ 20 μm
$F\#$		3
Focal/mm		60
Length	70	55
Lens count	4	2
Aspheres	3	2
Mass-optical/g	110	87
Materials	ZnSe, Ge, BaF ₂	GRIN-NBL-27/12, NBL-22
MTF (nominal)	45%@MWIR/ 15%@LWIR	45%@MWIR/ 15%@LWIR

该系统设计中, 基于 NBL 开发的 Te 基新型硫系玻璃制备的 GRIN 硫系透镜, 其折射率差值 Δn 达到了 0.3, 在从中波到长波的较宽波段上充分发挥了 GRIN 透镜的色差校正作用。设计结果表明, NBL-GRIN 硫系玻璃中/长波光学系统仅采用 2 片透镜就

获得了性能与传统材料设计的光学系统性能相当的设计结果, 但是 NBL-GRIN 光学系统在系统总长上比传统材料光学系统减少了 20%, 质量减轻了 25%, 透过率提升了 18%。由于 GRIN 硫系玻璃双波段光学系统的透镜减少了 2 片, 非球面减少 2 个, 使得新系统的加工及装配成本都大幅下降。

3 结 论

新型硫系玻璃的出现是对现有红外材料的有益补充, 为新一代透射式红外成像系统提供了更为丰富的材料选择和更多的设计自由度。

针对当前可用红外材料种类有限, 现有硫系玻璃折射率相比晶体材料折射率较低的技术缺陷, 利用硫系玻璃组分可调和色散参数可选两大特殊优势, 开发了两类新型硫系玻璃材料。新型的高折射率硫系玻璃 NBL-TQIR-1 有效实现了中波红外成像系统的去镀膜设计, 在实现光学系统轻薄化设计的同时有效降低了红外光学系统的成本。新型叠层式 GRIN 硫系玻璃, 在红外成像光学系统中首次实现了胶合透镜的设计, 具有不同折射率差值 Δn 的 GRIN 硫系玻璃在宽

波段成像系统中具有卓越的色差校正能力,为新一代共焦面宽波段红外成像系统的小型化设计提供了丰富的色散选择机会,是实现灵巧型双波段红外光学系统的重要技术途径。

为了满足新一代成像系统的工程化应用,基于新型硫系玻璃材料的制备工艺、透镜加工、表面处理及相关镀膜技术都将成为新一代红外成像光学系统不可或缺的技术支持。

参考文献:

- [1] Bayya S S, Gibson D J, Nguyen V Q, et al. Multispectral imaging system comprising new multispectral optics: US, 9658105 [P]. 2017-05-23.
- [2] Jun Ho Lee, Hyun Kim, Yong Gyu Choi. Compositional optimization of chalcogenide glasses for use as imaging lenses in the long-wavelength infrared range [J]. *Ceramist*, 2020, 23(3): 286-301.
- [3] Fu Qiang, Zhang Xin. Athermalization of the medium-wave infrared optical system based on chalcogenide glasses [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1467-1471. (in Chinese)
- [4] Jiang Bo, Wu Yuehao, Dai Shixun, et al. Application of chalcogenide glasses in designing vehicle-mounted infrared imaging lens for civilian applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1739-1745. (in Chinese)
- [5] Yang Jiaqiang, Pen Qingqing, Liu Lin, et al. Design of refractive/diffractive hybrid optical athermalization lens based on chalcogenide glass [J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(2): 225-229. (in Chinese)
- [6] Wu Haiqing. Athermalized design of infrared optical system with large field-of-view based on chalcogenide glass [J]. *Infrared*, 2021, 42(7): 1-8. (in Chinese)
- [7] Dai Shixun, Chen Huiguang, Li Maozhong, et al. Chalcogenide glasses and their infrared optical applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 847-852. (in Chinese)
- [8] Dai Shixun. Novel special optical glasses [R]. Light Talks, 2021.
- [9] Teichman J, Holzer J, Balko B, et al. Gradient index optics at DARPA[R]. Alexandria VA: Institute for Defense Analyses, 2013.
- [10] Gibson D, Bayya S, Nguyen V, et al. Multispectral IR optics and GRIN[C]//Advanced Optics for Imaging Applications: UV through LWIR IV. SPIE, 2019, 10998: 31-40.

Infrared imaging optical systems based on novel chalcogenide glasses (*invited*)

Chen Jinjin^{1,2}, Zhou Gangjie^{1,2}, Tan Yan^{1,2}, Dai Shixun^{1,2}, Lin Changgui^{1,2*}

(1. Laboratory of Infrared Materials and Devices, The Research Institute of Advanced Technologies,

Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Engineering Research Center for Advanced Infrared Photoelectric Materials and Devices of Zhejiang Province, Ningbo 315211, China)

Abstract:

Objective Infrared thermal imaging technology has irreplaceable application value in the current national defense and military field. It is the key component of infrared warning, search and tracking, precision guidance and other modern all-weather war applications. In order to meet the compatibility requirements of various high-performance photoelectric weapon platforms, the lightweight, miniaturization and low-cost of infrared optical systems have become important indicators for the comprehensive performance evaluation of new-generation infrared imaging systems. To realize the fabrication of a new generation of thin and light infrared optical system, it is urgent to develop a new type of manufacturable infrared optical materials, striving to provide more material choices and more freedom of design for the design of infrared optical system. For this purpose, the new generation of infrared imaging optical system based on novel chalcogenide glasses is designed here.

Methods Three new typical optical systems based on novel chalcogenide glass materials are developed in this

paper. We have exploited novel chalcogenide glass materials by taking full advantage of the special characteristics of modifiable glass components and tunable dispersion parameters. Using the high refractive index chalcogenide glass NBL-TQIR-1, whose refractive index is 3.18, the small-sized germanium-free design of the mid-wave infrared (MWIR) imaging optical system can be effectively realized (Fig.2). To match the uncooled mid/short-wave infrared (MW/SWIR) confocal plane infrared detector, the lightweight common path optical system is designed utilizing the novel stacked gradient refractive index (GRIN) sulfide glass lens with different refractive index difference $\Delta n=0.25$ (Fig.3). To match the cooled medium/long-wave infrared (MW/LWIR) confocal plane infrared detector, the compact common path optical system is designed utilizing the novel GRIN sulfide glass lens with different refractive index difference $\Delta n=0.3$ (Fig.4). Under the requirements of the same system index, the performance of infrared optical systems based on traditional infrared materials and novel chalcogenide glass is compared respectively (Tab.4-Tab.6).

Results and Discussions Based on the novel high refractive index chalcogenide glass NBL-TQIR-1 lens, the small-sized non-germanium MWIR double-fields optical imaging system is designed. The results of CODEV simulated analysis show that the performance of this NBL-TQIR-1 optical system is better than that of the traditional infrared materials. At the same time, the new optical system has two fewer lenses and one less aspheric surface than the traditional crystal optical system, the weight of the optical system is reduced by 35%, the length of the optical system is reduced by 15%, and the transmittance is increased by 10%. Based on the novel $\Delta n=0.25$ GRIN sulfide glass lens, the lightweight common path MW/SWIR confocal optical system is designed. The results of CODEV simulated analysis show that the novel dual-band NBL-GRIN MW/SWIR optical system is designed using only two new sulfide lenses, two fewer lenses and one fewer aspheric surface than the traditional materials optical system, and the removal of diffraction surfaces. Under the same performance requirements, the weight of the new optical system is reduced by 40%, the length of the system is reduced by 30%, and the transmittance is increased by 15%. The optical transfer function MTF (@ characteristic frequency 42 lp/mm) of the former is 10% higher than that of the latter. Based on the novel $\Delta n=0.3$ GRIN sulfide glass lens, the compact common path MW/LWIR confocal optical system is designed. The results of CODEV simulated analysis show that the novel dual-band optical system is designed by using only two lenses, the performance of the NBL-GRIN MW/LWIR optical system is comparable to that of the conventional optical system. However, the total length of the system is reduced by 20%, the weight is reduced by 25%, and the transmittance is increased by 18%. As the NBL-GRIN chalcogenide glass dual-band optical system has two fewer lenses and two fewer aspheres, the fabrication and assembly costs of the new system have been greatly reduced.

Conclusions In this study, the novel chalcogenide glasses with high refractive index and gradient refractive index are exploited. High refractive index chalcogenide glass NBL-TQIR-1 can replace germanium lens in MWIR optical system so as to realize the small-sized and low cost design. The GRIN chalcogenide glass with different refractive index difference Δn has excellent chromatic aberration correction ability in the dual-band imaging system, providing rich dispersion options for the miniaturization design of a new generation of confocal dual-band infrared imaging systems. The appearance of novel chalcogenide glass is a beneficial supplement to the existing infrared materials, and provides more material choices and more freedom of design for the new generation of transmissive infrared imaging system.

Key words: high refractive index; gradient refractive index (GRIN); chalcogenide glass; dual-band; common path; infrared optical system

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (62122039)