

高超音速中波红外窗口材料思考

潘枝峰¹ 毛小建^{2*} 张红刚^{1,2} 李晓凯² 冯明辉² 张 龙²

¹中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471009

²中国科学院上海光学精密机械研究所强激光材料重点实验室, 上海 201800

摘要 针对未来高超音速飞行器的发展趋势, 阐述了红外窗口材料所面临的技术挑战。从高温透过范围、红外辐射系数、高温力学性能以及抗热冲击等角度分析比较了几种常见的中波红外材料, 基于此认为Y₂O₃陶瓷是未来高超音速中波红外窗口/整流罩的最佳候选材料, 该材料能够适应多色、多模复合, 超视距、宽视角, 以及隐身化和抗电磁干扰等需求。

关键词 材料; 红外窗口; 透明陶瓷; 辐射系数; 氧化钇

中图分类号 TQ174.75 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.091601

Investigation on Middle-Wave Infrared Window Materials for Hypersonic Application

Pan Zhifeng¹ Mao Xiaojian² Zhang Honggang^{1,2} Li Xiaokai²
Feng Minghui² Zhang Long²

¹*Luoyang Institute of Electro-Optical Devices, Aviation Industry Corporation of China,
Luoyang, Henan 471009, China*

²*Key Laboratory of Material for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*

Abstract The challenges for infrared window materials are investigated in consideration of future hypersonic application. Some durable middle-wave infrared materials are compared in terms of high-temperature transmission range, infrared emittance, high-temperature mechanical properties, and thermal shock resistance. Yttria ceramics is considered as the best candidate for hypersonic application, and is possible to satisfy extending request such as multi-color or multi-mode integration, beyond visual range and wide viewing angle, and radar latent or anti electromagnetic disturbance.

Key words materials; infrared window; transparent ceramics; emittance; yttria ceramics

OCIS codes 160.4670; 130.3060; 110.3080; 060.4510

1 引言

红外信息及光电对抗技术在现代战争中发挥着越来越重要的作用, 红外导航、红外制导及红外干扰等技术大量应用于第四代超音速战机、防空拦截导弹及空对空格斗导弹^[1-2]。更快的攻击速度和更高的打击精度是现代战争夺取制空权, 取得战争胜利最有效的杀手锏。世界各军事强国陆续提出了发展现代高超音速打击手段的计划, 美国五角大楼“全球快速打击(PGS)系统”甚至提出“一小时精确打击全球”的设想^[3]。可以预见, 高超音速精确打击飞行器必然对光电信息系统提出新的要求。

红外窗口是红外光电系统的一个重要部件, 起着保护内部精密光电元件及传递目标信号的作用^[4]。由于飞行速度不断提高, 飞行器与大气摩擦产生的气动压力与气动热量也急剧增加, 造成红外光电窗口透过率减小、红外辐射增强等问题。探讨适用于高超音速飞行条件的红外窗口候选材料是发展高超音速飞行器

收稿日期: 2014-03-15; 收到修改稿日期: 2014-05-02; 网络出版日期: 2014-08-01

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51302284)

作者简介: 潘枝峰(1980—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事光学设计与光电成像技术方面的研究。

E-mail: panzhifengem@sohu.com

* 通信联系人。E-mail: xmao@siom.ac.cn

红外光电系统的必然要求。

2 高超音速红外窗口面临的挑战及材料筛选

现代红外探测器主要选择3~5 μm 中波红外以及8~14 μm 长波红外这两个大气窗口。3~5 μm 中波红外探测器因为分辨精度高而获得更为广泛的应用。常见中波红外窗口材料主要有 MgF_2 、蓝宝石、尖晶石以及具有发展前景的 ALON 和 Y_2O_3 等,这些材料在红外制导导弹、战斗机光电视窗等光电系统中发挥着至关重要的作用。然而,随着飞行器的速度向高超音速发展,人们清楚地认识到目前还没有一种红外窗口材料能够完全满足高超音速飞行条件的综合要求,只能根据不同材料的各自优缺点进行妥协选择,也就是说在满足最主要的性能要求的前提下,适当降低其他性能指标要求。因此,必须准确地分析高超音速飞行条件给红外窗口材料带来的技术挑战,从而筛选出合适的高超音速中波红外窗口材料。

2.1 高温红外透过性能下降

中波红外材料的本征透过范围由晶格振动以及多声子吸收决定其红外截止边。根据 Thomas 的多声子吸收模型^[6],吸收系数 β 是声子能量(波数)和温度的函数,多声子吸收决定了材料的本征红外截止边,并且随着温度升高吸收增强。图1是常见中波红外材料的红外透过率^[6],由图可见红外截止边的顺序依次为 MgF_2 、 Y_2O_3 、尖晶石和蓝宝石,这与其声子能量变化规律相吻合,如表1所示^[6,7]。图2是蓝宝石透过率随温度的变化曲线^[8]。由图2可知,蓝宝石的红外截止边随温度升高向短波方向移动,但在远离红外截止边的透过波段(小于4 μm),透过率不受温度影响^[9],与 Thomas 的多声子吸收模型一致。因此,在气动加热条件下,常见红外材料面临的一个挑战就是红外截止边蓝移导致的透过范围减小。因此,在选择高温中波红外窗口材料时,可从具有低声子能量及宽波段透过的材料中选择,如 MgF_2 、 Y_2O_3 等^[10]。

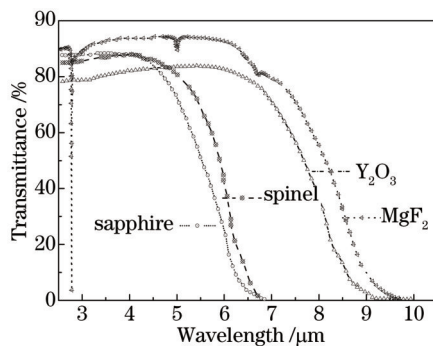


图1 常见中波红外材料的红外透过率

Fig.1 Transmission spectra of middle-wave infrared materials

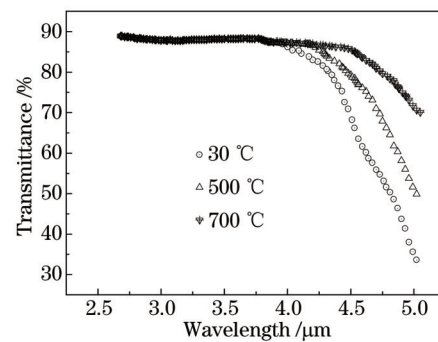


图2 蓝宝石的红外透过率与温度的关系

Fig.2 Temperature dependence of transmission of sapphire

表1 常见红外材料的声子能量

Table 1 Phonon energy of infrared materials

	ALON	Sapphire	Spinel	Yttria	La-doped yttria	MgF_2
Phonon energy / cm^{-1}	969	914	869	620	612	399

2.2 红外窗口自身红外辐射增强

高速飞行中的气动加热使得红外光窗的温度迅速上升,产生热辐射。由于红外窗口和探测器的距离非常小,窗口材料自身的红外辐射将强烈干扰外界进入的红外信号,甚至引起探测器饱和。因此,随着气动加热温度升高,首先限制红外窗口材料性能的不是透过率或者机械强度,更主要的是红外热辐射^[11]。透明半球的等效辐射系数可以表示为^[12]

$$\varepsilon = \frac{(1-R)[1-\exp(-\beta b)]}{1-\text{Re}\exp(-\beta b)} \approx \beta b \text{ (if } \beta b \leq 0.1),$$

式中 R 为表面反射率, β 为吸收系数, b 为样品厚度。对于高透窗口材料,当吸收系数很小时,辐射系数可以近似等于 βb 。因此,红外窗口材料的辐射系数由吸收系数决定,当温度确定时通过考察红外窗口材料的高温透过率就可以初步推断该材料的高温辐射系数。图3是由吸收系数计算出的常见中波红外材料在500 K

时的红外辐射系数^[11]。图4是实验测得的各种材料的辐射系数^[13]。由于材料的吸收除了声子振动的本征因素以外,还受到晶格缺陷、杂质离子等外在因素的影响,因此不同工艺获得的红外材料的辐射系数与计算值存在较大的差异^[14-15]。图5给出了2 mm厚 Y_2O_3 陶瓷在1000 °C时红外辐射系数的理论计算值和实际测试数据^[11],可以清楚地看到 Y_2O_3 陶瓷红外辐射系数的实际测量结果大于理论计算值,尤其是热压多晶 MgF_2 微观结构为四方晶系,晶粒之间存在双折射的问题,其辐射系数与声子模型偏差更大。以上分析可以看出 Y_2O_3 陶瓷在上述几种常见的中波红外材料中具有最低的高温红外辐射系数,是最可能胜任的高超音速红外窗口候选材料。

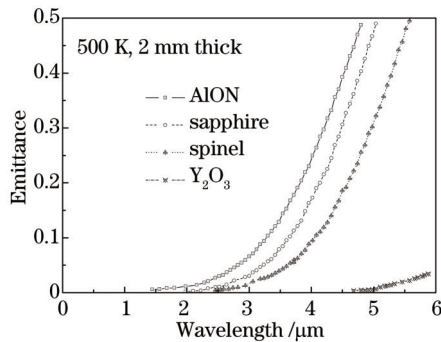


图3 500 K时中波红外材料的理论辐射系数

Fig.3 Calculated emittance of infrared materials at 500 K

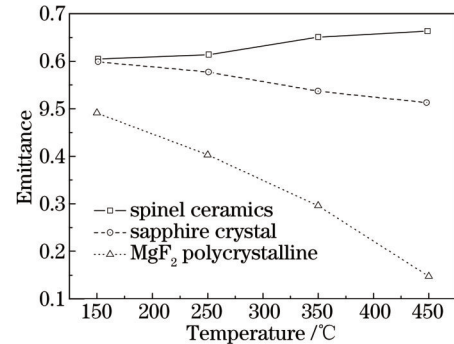


图4 红外辐射系数与温度的关系

Fig.4 Temperature dependence of observed emittance

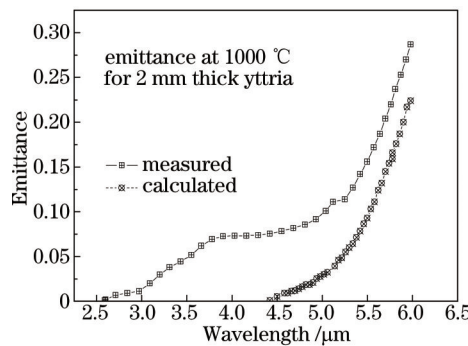


图5 100 °C时 Y_2O_3 陶瓷红外辐射系数测量值和理论值比较

Fig.5 Comparison of measured and calculated emittances of yttria at 1000 °C

2.3 气动热冲击剧烈

大多数红外窗口材料均为脆性材料,容易受到热冲击应力的破坏,所以在选择高超音速红外窗口材料时,必须考虑窗口在飞行弹道上瞬态加热所产生的热冲击的承受能力。对于薄壁大热流量条件可以用Hasselman品质因子^[16]

$$R' = \sigma^{5/3} (1 - \nu) K / (\alpha E)$$

来表示,式中 σ 为抗弯强度, ν 为泊松比, K 为导热系数, α 为线膨胀系数, E 为弹性模量。但是 R' 是人为定义的概念,并且没有考虑窗口/球罩的外形尺寸对窗口抗热冲击的影响。美国雷神公司Klein^[17]提出耐热冲击温度(TST)的概念,即冲击开始后产生的高于壁温的允许恢复温度。该参数考虑到气动压力对头罩厚度的要求,进而将头罩半径和厚度作为考虑因子之一。但是对于常用中波红外材料,上述两种不同的考察模型得出相似的抗热冲击性能变化规律:即抗热冲击性能电强到弱分别为蓝宝石AlON, Y_2O_3 ,尖晶石和 MgF_2 ^[17]。

2.4 高温力学性能改变

红外窗口尤其是头罩既要具有透波功能,同时还作为结构件承受一定的机械应力。这就要求红外窗口能在气动加热的高温环境下保持一定的机械强度。图6是常见的中波红外材料的高温抗弯强度(包括蓝宝石的抗压强度)^[6,13,18-19]。从图中可以看出,蓝宝石在200 °C以下表现出突出的抗弯、抗压强度;但是随着温度升高蓝宝石 c 轴方向的抗弯、抗压强度急剧下降,到800 °C时抗压强度仅为20 MPa。由于热冲击产生的应力同时包含张应力和压应力,可以初步判断在500 °C以上的环境中,蓝宝石难以作为红外窗口材料使用。图6

中除蓝宝石以外,其余均为陶瓷材料,它们的强度随着温度升高没有表现出明显的下降,因此更适合作为高超音速红外窗口材料。其中 MgF_2 在温度升高后强度有所下降,但是 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 之后强度又有所恢复,达到 190 MPa ,这可能与 MgF_2 高温下的塑性变形有关。在尖晶石、 Y_2O_3 以及掺La的 Y_2O_3 这3种材料中,室温下 Y_2O_3 的抗弯强度不如尖晶石,但是在 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 以上, Y_2O_3 的强度与尖晶石相当,甚至超过尖晶石;通过引入少量的 La_2O_3 作为助剂可以显著改善 Y_2O_3 陶瓷的抗弯强度,获得优于尖晶石的抗弯强度。图6显示掺La的 Y_2O_3 陶瓷的抗弯强度在 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 以下随着温度升高略有下降,但能够保持 120 MPa 以上;在 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 以上其抗弯强度优于室温时的强度,可以满足高超音速红外窗口对高温强度的要求。

从高超音速红外窗口面临的技术挑战出发,对常见中波红外窗口材料的性能进行比较可以看出, Y_2O_3 陶瓷除了具有紫外-可见-红外宽波段高透的特性以外,还具有极低的高温辐射系数,掺La的 Y_2O_3 陶瓷高温下力学性能及抗热冲击性能均由于尖晶石,表现出最佳的高温综合性能,是最佳的高速气动加热条件下中波红外窗口候选材料。

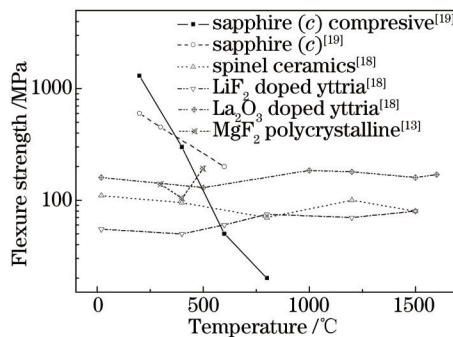


图6 常见红外材料的抗弯强度与温度的关系

Fig.6 Temperature dependence of flexure strength of infrared materials

3 红外窗口多样化发展趋势

现代战场及其他外部环境错综复杂、变化多端,要求光电系统能够适应工作环境的变化,因此各种尖端红外光电技术层出不穷。红外信息及光电对抗出现的各种新技术、新装备,相应地对红外窗口的性能也提出了新的要求,未来高速红外窗口将集成多种复合模式,主要发展趋势表现在以下3个方面。

3.1 多色、多模复合

红外信号在大气传输中容易受到气候条件(雨、雾)的影响,加上红外干扰技术层出不穷,使得单纯的红外导航、识别以及制导等应用都受到极大影响^[20],甚至无法正常工作。因此,现代光电信息及对抗系统的一个发展趋势是采用多色红外或者多模的工作方式^[21-23],例如飞弩FB-10导引头紫外/红外双色制导^[24],丹麦RAM导弹雷达制导/红外末制导,红外成像/激光制导以及多功能集成吊舱等。这就要求红外窗口同时具有宽波段高透的性能。这一点上, Y_2O_3 陶瓷具有紫外-可见-红外透过的宽波段工作范围,不足之处在于其雷达波段介电常数为12并且随温度升高而增加^[25],高于一般雷达整流罩材料要求的临界值(10)。如何改善 Y_2O_3 陶瓷的介电常数,获得兼具优良雷达波透过性能的 Y_2O_3 陶瓷红外窗口是一个值得研究的课题。

3.2 超视距、宽视角

更快的飞行速度和更高的机动性是现代战斗机的特征及发展趋势,因此攻防双方也要求光电信息系统能满足超视距的工作距离以及大角度侦察范围^[26-29]。对于超视距、宽视角红外光电系统而言,对于红外窗口的要求主要体现在高光学质量以及大通光口径。在上述常见红外窗口材料中,蓝宝石是单晶材料,随着LED照明行业的发展其生长工艺得到飞跃式提升。生长 300 mm 口径的蓝宝石平板和球罩的技术已经逐渐成熟。但是对于更大口径的需求,仍然有很大难度^[30]。 MgF_2 通常采用热压烧结的方法制造,容易制作平片^[31]。对于球罩而言,由于各个部位压缩比例不一样,很难保证各个部位压力均匀。尖晶石、 AlON 及 Y_2O_3 采用高温烧结的方式,其中尖晶石、 AlON 目前主要采用热等静压烧结^[32-33],国内大尺寸设备紧缺,生产消耗气体成本昂贵;而 Y_2O_3 可以采用真空烧结的方法制备,设备投入少,生产成本低,容易制备大尺寸产品。

3.3 雷达隐身和抗电磁干扰

现代战争中信息技术极大地影响着战争的进程和双方的胜负^[34]。一方面,进攻方在不断地提高战斗机及其他攻击武器的隐身性能;另一方面,防守方通过电磁干扰技术破坏敌方的信息系统,从而达到保护自己的目的。对于红外窗口而言,其主要功能通过红外信号实现,隐身效果及抗电磁干扰性能相对薄弱,成为雷达反射的最显著暴露源及干扰电磁波的传输通道。为了提高红外窗口的雷达隐身功能和抗电磁干扰性能,可在窗口的表面或者内部制作有周期阵列的导电金属网栅,包括采用表面刻蚀技术或者夹层三明治结构。中国科学院上海光学精密机械研究所利用强场激光技术,以激光刻蚀/诱导生长方式制作出具有特定周期结构的深表面嵌入式金属网栅,克服了传统感光刻蚀技术制作的金属网栅存在的牢固度差、不耐热冲击等实际应用问题,发展出具有技术特色的金属网栅研制工艺,如图7所示^[35]。该技术有望成功应用于 Y_2O_3 陶瓷红外窗口。

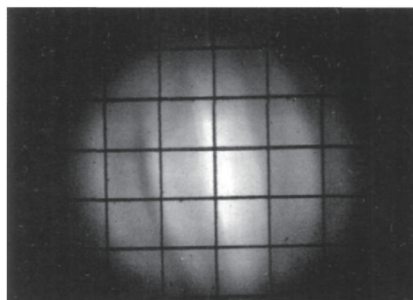


图7 强激光诱导金属网栅的显微照片

Fig.7 Micrograph of metal grid induced by ultrafast laser

4 结 论

现有红外窗口材料(如蓝宝石、尖晶石、 MgF_2 等)在高温状态下具有强烈的红外辐射,已经难以满足高超音速飞行条件对红外窗口的要求。而 Y_2O_3 陶瓷除了具有紫外-可见-红外宽波段高透的特性以外,还具有极低的高温辐射系数,并且高温下保持适中的力学性能及优良的抗热冲击性能,是未来高超音速中波红外窗口/整流罩的最佳候选材料。 Y_2O_3 陶瓷通过粉末烧结的方式制备,容易制备大口径产品,满足超视距、宽视角的发展趋势;并可以利用强场激光诱导,实现雷达隐身和抗电磁干扰。

参 考 文 献

- 1 Han Chao. Development trends and analysis of the infrared countermeasure technology[J]. Ship Electronic Engineering, 2009, 29(6): 43-46.
韩 超. 红外对抗技术的发展动向与分析[J]. 舰船电子工程, 2009, 29(6): 43-46.
- 2 Zhang Wenpan, Wu Junhui, Hu Xin, *et al.*. A test method to real laser seekers based on electro-optic countermeasure [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(3): 637-642.
张文攀, 吴军辉, 胡 欣, 等. 基于激光导引头对抗数据的光电对抗效果实验方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 637-642.
- 3 Woolf A F. Conventional prompt global strike and long-range ballistic missiles: Background and issues, specialist in nuclear weapons policy[J]. CRS Report for Congress, 2014, R41464.
- 4 Yang Peizhi, Liu Liming, Zhang Xiaowen, *et al.*. Research progress of long-wavelength infrared optical materials[J]. Journal of Inorganic Materials, 2008, 23(4): 641-646.
杨培志, 刘黎明, 张小文, 等. 长波红外光学材料的研究进展[J]. 无机材料学报, 2008, 23(4): 641-646.
- 5 Thomas M E, Joseph R I, Tropf W J. Infrared transmission properties of sapphire, spinel, yttria, and AlON as a function of temperature and frequency[J]. Applied Optics, 1988, 27(2): 239-245.
- 6 Harris D C. Materials for Infrared Windows and Domes: Properties and Performance[EB/OL]. SPIE Optical Engineering Press, 1999. <http://ebooks.spiedigitallibrary.org/book.aspx?bookid=189>.
- 7 Zhang Bing, Zhu Jikang. DV- Xa studies on the energy levels and vibrational structure of $MgF_2:V^{2+}$ crystal[J]. Acta Optica Sinica, 1993, 13(2): 139-144.

- 张冰, 祝继康. MgF₂:V²⁺ 晶体能级和振动结构的 DV-X_a 研究[J]. 光学学报, 1993, 13(2): 139-144.
- 8 Freeland C M. High temperature transmission measurements of IR window materials[C]. SPIE, 1988. 0929: 79-86.
- 9 Feng Liping, Liu Zhengtang, Li Qiang. Improvement of the infrared transmission of sapphire by SiO₂ films[J]. Journal of Inorganic Materials, 2007, 22(3): 529-533.
- 冯丽萍, 刘正堂, 李强. SiO₂ 薄膜对蓝宝石红外透过性能的改善[J]. 无机材料学报, 2007, 22(3): 529-533.
- 10 Lingling Jin, Xiaojian Mao, Shiwei Wang, *et al.*. Optimization of the rheological properties of yttria suspensions[J]. Ceramics International, 2009, 35(2): 925-927.
- 11 Harris D C. Durable 3-5 μm transmitting infrared window materials[J]. Infrared Physics & Technology, 1998, 39(4): 185-201.
- 12 Gardon R. The emissivity of transparent materials[J]. J Am Ceram Soc, 1956, 39(8): 278-285.
- 13 Zhou Guanguan, Yu Haiou, Zheng Lihe, *et al.*. Optical, mechanical and thermal properties of mid-IR materials under high temperature[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(3): 554-558.
- 周关关, 于海鸥, 郑丽和, 等. 中红外光学材料的高温性能研究[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3): 554-558.
- 14 Jiang Benxue, Zhao Zhiwei, Pan Shoukui, *et al.*. Interaction between femtosecond laser and matters of crystal and glass [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2005, 22(2): 135-141.
- 姜本学, 赵志伟, 潘守夔, 等. 飞秒激光与晶体和玻璃的相互作用[J]. 量子电子学报, 2005, 22(2): 135-141.
- 15 Li Fahui, Lin Hong, Li Junfeng, *et al.*. Influence of LiF on the infrared transmissivity of magnesia alumina spinel transparent ceramics[J]. Journal of Inorganic Materials, 2012, 27(4): 417-421.
- 李法荟, 林红, 李俊峰, 等. LiF 对镁铝尖晶石透明陶瓷红外透过率的影响[J]. 无机材料学报, 2012, 27(4): 417-421.
- 16 Hasselman D. Thermal stress resistance parameters for brittle refractory ceramics: A compendium[J]. Ceramic Bulletin, 1970, 49(12): 1033-1037.
- 17 Klein C A. Infrared missile domes: Is there a figure of merit for thermal shock[C]. SPIE, 1992, 1760: 338-356.
- 18 Boniecki M, Librant Z, Wajler A, *et al.*. Fracture toughness, strength and creep of transparent ceramics at high temperature[J]. Ceramics International, 2012, 38(6): 4517-4524.
- 19 Harris D C. High-temperature strength of sapphire[C]. SPIE, 2000, 4102: 25-36.
- 20 Zhang Long, Lin Fengying, Qi Changhong, *et al.*. High erbium doped glasses for waveguide amplifiers at 1.5 μm [J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(12): 1688-1693.
- 张龙, 林凤英, 祁长鸿, 等. 用于 1.5 μm 光波导放大器的高浓度 Er³⁺ 掺杂玻璃[J]. 光学学报, 2000, 20(12): 1688-1693.
- 21 Tang Shanjun. Fusion of visible imaging and infrared imaging for multi-mode composite guidance[J]. Infrared, 2012, 32(2): 22-27.
- 唐善军. 多模复合制导用可见光成像与红外成像融合技术研究[J]. 红外, 2012, 32(2): 22-27.
- 22 Yang Zukuai, Liu Dingchen, Li Hongjun. Study of the application technology of multi-model composite homing[J]. Missiles and Space Vehicles, 2003, (3): 13-18.
- 杨祖快, 刘鼎臣, 李红军. 多模复合制导应用技术研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2003, (3): 13-18.
- 23 Shen Yuanxiang, Huang Xiaoxia, Wang Yonghui. The foreign multimode compound guidance technology[J]. Journal of Sichuan Armaments Factories, 2013, 34(10): 29-31.
- 沈远香, 黄晓霞, 王永惠. 国外多模复合制导技术[J]. 武器装备理论与技术, 2013, 34(10): 29-31.
- 24 Wang Weijian, Huang Xiongze, Huang Jianxin, *et al.*. Study on ultra-violet/infrared sub-imaging dual-wave-band seeker[J]. Aerospace Shanghai, 2003, (1): 1-5.
- 王伟建, 黄雄哲, 黄健新, 等. 紫外/红外准成像双色导引头技术研究[J]. 上海航天, 2003, (1): 1-5.
- 25 Chen J, Gao Z P, Wang J M, *et al.*. Dielectric properties of yttria ceramics at high temperature[J]. Journal of Electronic Science and Technology of China, 2007, 5(4): 320-324.
- 26 Gao Yong, Li Benwei. Investigation on beyond visual range air combat effectiveness assessment model[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2012, 27(1): 66-70.
- 高永, 李本威. 超视距空战效能评估模型[J]. 海军航空工程学院学报, 2012, 27(1): 66-70.
- 27 Wang Peng, Chen Wanchun, Yin Xingliang. Large angle attitude thrust vector control for an air-to-air missile[J]. Journal of Astronautics, 2004, 25(3): 295-299.
- 王鹏, 陈万春, 殷兴良. 空空导弹大角度姿态推力矢量控制研究[J]. 宇航学报, 2004, 25(3): 295-299.

- 28 Jiang Xiongwei, Qiu Jianrong, Zhu Congshan, *et al.*. Femtosecond laser induced optical memory in silicate glass[J]. Chinese J Lasers B, 2001, 10(6): 422-426.
- 29 Guo Huichao, Sun Huayan, Fan Youchen. Development status of range-gated laser active imaging technology under atmospheric condition[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(10): 100004.
郭惠超, 孙华燕, 范有臣. 大气条件下距离选通激光主动成像技术发展现状[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(10): 100004.
- 30 Chen C, Chen H J, Yan W B, *et al.*. Effect of crucible shape on heat transport and melt-crystal interface during the Kyropoulos sapphire crystal growth[J]. Journal of Crystal Growth, 2014, 388: 29-34.
- 31 Nofar M, Madaah H R, Shivaee H A. The dependency of optical properties on density for hot pressed MgF₂[J]. Infrared Physics & Technology, 2008, 51(6): 546-549.
- 32 Warner C T, Hartnett T M, Fisher D, *et al.*. Characterization of ALON optical ceramic[C]. SPIE, 2005, 5786: 95-111.
- 33 Dericioglu A F, Kagawa Y. Effect of grain boundary microcracking on the light transmittance of sintered transparent MgAl₂O₄[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2003, 23(6): 951-959.
- 34 Li Fudong, Wang Zhe, Zhou Feng, *et al.*. Key technique of photoelectric reconnaissance system for stratospheric airship [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(2): 020003.
李福东, 王 哲, 周 峰, 等. 平流层飞艇平台光电侦察系统关键技术[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(2): 020003.
- 35 Che Hong, Fan Youyu, Yang Yi, *et al.*. New mid-infrared oxyfluoride glass and technique utilizing radar latent functionality[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 2988-2993.
车 宏, 范有余, 羊 毅, 等. 新型红外氧氟玻璃及其雷达隐身技术[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 2988-2993.