

文章编号: 0253-2239(2010)10-2988-06

新型红外氧氟玻璃及其雷达隐身技术

车 宏^{1,2} 范有余³ 羊 毅^{1,3} 袁新强³ 唐 彬³ 李家成³ 姜雄伟³ 张 龙^{3*}

¹中国航空工业总公司洛阳光电设备研究所, 河南 洛阳 417009

²西北工业大学电子信息学院, 陕西 西安 710072

³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 红外玻璃是很多重要军用系统的关键窗口材料之一, 红外玻璃的高性能、大尺寸化制备面临重要挑战, 同时红外技术和光电对抗技术的发展对红外窗口的雷达隐身性能也提出了很高的要求。阐述了新型红外玻璃的设计思想, 基于此发展了一种新型的中红外光学玻璃—氟镓酸盐(FGa)玻璃, 并以FGa玻璃为基质, 成功研制出新型具有雷达隐身功能的中红外光功能材料。

关键词 材料; 中红外材料; 雷达隐身; 电磁屏蔽; 氟镓酸盐玻璃

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103010.2988

New Mid-Infrared Oxyfluoride Glass and Technique Utilizing Radar Latent Functionality

Che Hong^{1,2} Fan Youyu³ Yang Yi^{1,3} Yuan Xinqiang³
Tang Bin³ Li Jiacheng³ Jiang Xiongwei³ Zhang Long³

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

²School of Electronics and Information, Northwest Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China

³Key Laboratory of Materials for High-Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract Infrared-transparent glass is one of the key window materials for some important military applications. It's still a great challenge to fabricate the infrared-transparent glass with high-properties and large size. With the great development of infrared technology and electro-optical countermining technique, the infrared windows with the capacity of radar latent and electro-magnetic shielding (EMS) are essentially required. In this paper, our philosophy is demonstrated to face the challenge in making infrared glass with high-properties and large size, and a new mid-infrared gallium oxyfluoride (FGa) glass is developed. Based on FGa glass, some new EMS techniques are developed to make the infrared-windows radar latent.

Key words materials; mid-Infrared material; radar latent; electromagnetic shielding; gallium oxyfluoride glass

1 引 言

红外光电子技术是当今世界发展最快的高新技术之一, 它们的发展始终与红外材料的发展密切相关。中-远红外材料, 特别是在 $2\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段高透的中红外光学材料, 在民用和军用领域有十分重要

的应用^[1~9], 比如红外对抗(IRCM)、化学物遥感、红外制导、红外侦查、高能激光武器、热像仪、夜视仪、火焰气体探测器、环境监测、空间通信等多个领域。新一代以精确制导为主要特征的光电系统, 如导弹、光雷达、机-舰载红外搜索与跟踪系统(IRST)、分布

收稿日期: 2010-02-08; 收到修改稿日期: 2010-04-12

作者简介: 车 宏(1969—), 男, 研究员, 主要从事机载火控和光电探测研究、隐身技术等方面的研究。

E-mail: chehong@sina.vip.com

* 通信联系人。E-mail: lzhang@siom.ac.cn

式孔径系统(DAS)等,已逐步向多波段复合、宽视角、远距离和高分辨率方向发展。这些光电系统通常是在十分苛刻的条件下工作,对其窗口材料提出了更高的要求,不仅希望其在可见-红外波段具有优良的透射率、光学均匀性、热-机-化特性等,更是对窗口的尺寸($>\phi 400$ mm)及复杂形状制备有更高的要求^[8,9]。目前,能满足这些要求的红外材料尚不多见,晶体材料(如尖晶石、蓝宝石等)难以做到大尺寸及复杂形状且制造加工成本昂贵,玻璃材料尽管在大尺寸制备方面具有一定优势,但通常的中波红外玻璃^[9~11](如铝钙玻璃、锆酸盐玻璃等)在红外性能方面已不能满足新一代制导的要求,大尺寸高性能红外窗口材料的缺乏已成为制约光电系统发展的重要影响因素。在日益复杂的作战环境下,实现重要军用红外系统(特别是暴露在外部的光学窗口)的抗电磁干扰或者雷达波隐身已经逐渐成为一个迫切的问题^[8],这也要求这些红外系统(如红外制导系统)的光学窗口在保持高红外透射率的同时,要具有足够好的雷达波屏蔽功效(或抗电磁干扰)等。本文介绍了课题组在发展新型高性能红外玻璃方面的研究进展,以及基于这些玻璃开展的抗电磁干扰/雷达隐身技术的前期研究结果。

2 新型红外玻璃体系设计思想

新一代军用红外系统苛刻的性能要求,对红外窗口玻璃材料制备提出很高的挑战,主要要求低红外吸收、大尺寸和高光学均匀性,这些性能要求与玻璃强度存在必然的内在矛盾。玻璃的红外截止吸收取决于玻璃网络中的声子能量, $\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\kappa}{\mu}}$,这与网络的价键强度 μ 以及折合质量 τ 相关。因此好的红外性能通常要求玻璃网络具有弱共价键和大折合质量,弱共价键通常导致玻璃熔体键合度低、难以形成玻璃网络、易析晶、低光学均匀性和低强度。

为了很好平衡这些内在矛盾,研制出综合性能优良的红外玻璃,开展了系统深入的红外玻璃组成-结构-性能研究,发展了性能优良的镓酸盐氧氟玻璃(FGa)体系 $\text{YF}_3\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{AlF}_3\text{-La}_2\text{O}_3\text{-MO-Ga}_2\text{O}_3$ ($\text{M}=\text{Ba, Ca, Sr}$)。其基本设计思想是:1)玻璃组成体系中没有传统意义的网络形成体(如 Si, B, P, Ge 等),其成份由多种传统玻璃中间体(如 Al, Ga, Y 等)组成。相比网络形成体,这些传统意义上的中间体(Al, Ga, Y 等)共价键性要更弱,可以降低玻璃网络的声子能量,提升红外性能。2)通过中间体的多

样性(Al, Ga, Y 等)来补偿无形成体组成玻璃的易析晶问题,在没有形成体组成的玻璃体系中,容易析晶的问题可以较好地被中间体的多样性(Al, Ga, Y 等)补偿,各种中间体可能都有各自的析晶趋向,然而多种中间体各自不同的析晶趋向相互影响,反而可能降低玻璃熔体的析晶趋势,使得玻璃具有较好的抗析晶特性。3)体系中阳离子多为重金属,增加了折合质量,以进一步降低了玻璃体系的声子能量。4)引入氟化物取代氧化物,共价键更弱的氟化物又进一步降低了玻璃的声子能量,同时氟化物对红外玻璃的除水也起到了非常关键的作用(红外玻璃中的-OH含量是关键核心指标之一)。5)玻璃体系中的 Al(以及 Y, La)可以起到较好补偿在弱键玻璃体系(如 Ge 基、Ga 基玻璃)中普遍存在的化学稳定性较差的问题。

3 氟化物在镓酸盐玻璃体系中的作用

如前所述,在设计玻璃组分时,引入了一定量的氟化物到镓酸盐玻璃中,以期进一步降低玻璃声子能量,增加红外透光性能。更重要的是,希望利用氟化物的高温水化反应, $\text{MF}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MO} + 2\text{HF} \uparrow$,对玻璃进行有效的化学除水。红外玻璃的除水技术是大尺寸红外玻璃制备的关键技术之一。由于玻璃原料及熔制气氛中都含有少量 H_2O ,在红外玻璃熔制过程中,通常会有一定量-OH残存在最终的玻璃中,导致在 $2.7 \sim 3.6 \mu\text{m}$ 附近有较强的光吸收。-OH基在 $2.7 \sim 3.6 \mu\text{m}$ 的光吸收对很多强激光红外系统往往是致命的,对强激光的少量吸收也足以导致窗口畸变,影响光束质量,很多情况下甚至会将窗口击碎。

图1是不同氟化物含量的镓酸盐玻璃红外透光曲线,可以看出随着玻璃中氟化物含量的增加,玻璃在 $3 \mu\text{m}$ (约 3300 cm^{-1})附近的-OH吸收峰明显减弱,表明引入到镓酸盐玻璃中的氟化物起到了很好的脱羟作用。镓酸盐玻璃在不同熔制阶段的镓酸盐玻璃样品的¹⁹F金属氧化物半导体(MAS)核磁共振(NMR)结果进一步证实,引入到镓酸盐玻璃中的氟化物同时起到了脱羟和降低声子能量的双重作用。图2是含摩尔浓度为10%的 AlF_3 的镓酸盐玻璃在不同熔制阶段样品的¹⁹F MAS NMR谱,这3次实验的样品量相同(8 mg),且NMR实验条件完全相同。对比熔制时间为了20 min和6 h的样品,可以看出,¹⁹F NMR信号强度明显降低,表明玻璃在熔制过程中氟含量的减少(挥发),部分减少的氟化物

必然会起到有一定程度的脱羟反应, $\text{MF}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MO} + 2\text{HF} \uparrow$, 起到除水作用; 在熔制了 20 h 的最终玻璃样品中, 依旧较强的 ^{19}F NMR 信号表明部分氟进入了最终的玻璃网络, 起到了改善红外性能的作用, 从图 1 中也可以看出, 相比不含无氟化物的玻璃, AlF_3 的引入使玻璃的红外截止波长向长波移动; 对比熔制了时间为 6 h 和 20 h 的样品, 可以看出, ^{19}F NMR 信号强度没有明显变化, 说明引入氟化物的除水反应主要在熔制 6 h 以前。

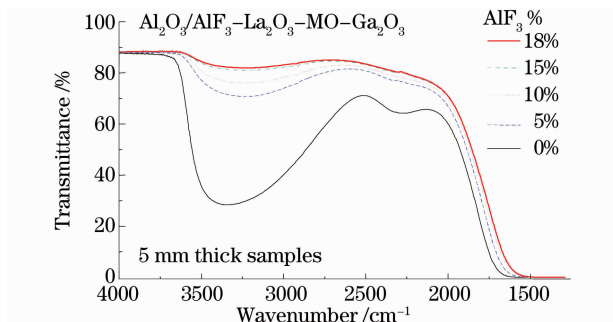


图 1 不同氟化物含量的镓酸盐玻璃红外透光曲线

Fig. 1 Infrared-transmission spectra of gallium glass with different content of fluoride

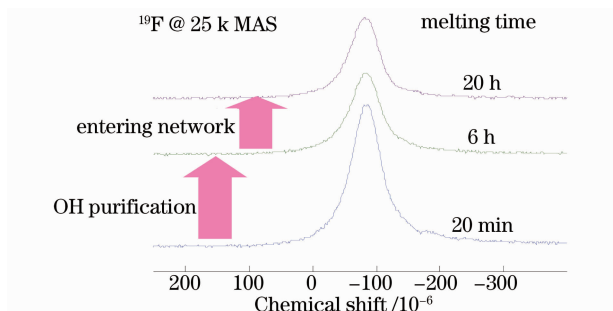


图 2 不同熔制阶段样品的 ^{19}F MAS NMR 谱

Fig. 2 ^{19}F MAS NMR spectra at different melting stage

对氟镓酸盐(FGa)玻璃的 ^{27}Al MAS NMR^[12] 测试表明: 在 FGa 玻璃中, 无论是高 Al 含量(如摩尔浓度为 20%)还是低 Al 含量(如摩尔浓度为 2%)的玻璃, 玻璃中的 Al 全为四配位- Al(4), 起到了网络形成体的作用; 在 FGa 玻璃中, 没有发现六配位 Al 存在。这与传统的铝玻璃(如铝硅酸盐玻璃、铝硼酸盐玻璃、铝磷酸盐玻璃)有很大差异: 当 Al 含量不高时, Al 在这些玻璃中以六配位为主^[13~16], 起到网络中间体的作用; 只有当 Al 含量较高时, 才出现四配位 Al(4)。 ^{27}Al { ^{19}F } 旋转回波双振 (REDOR) NMR 测试结果进一步表明, 玻璃中的氟没有与 Al(4)键合, 这与多个氟铝体系的氟铝玻璃的研究结果是一致的^[17,18]。

显然, 深入的 NMR 结构研究可以为红外玻璃的组成成份、熔制工艺、以及除水工艺等的等设计提供重要参考。

4 氧氟玻璃的核心性能

传统的镓酸盐玻璃相对锆酸盐、铝钙玻璃有更宽的红外透过性能, 但容易潮解且成玻璃能力差。研制的 FGa 玻璃在各方面性能得到了明显的改善, 是面向实际应用的新型红外氧氟玻璃, 表 1 给出了 FGa 玻璃相关的性能参数。

表 1 FGa 玻璃的相关性能参数

Table 1 Properties of FGa glass

Transmitting range	0.4~6.5 μm
Refraction index (@1.06 μm)	1.7012
Optical homogeneity	
Δn (@ Φ 120 mm)	8.7×10^{-6}
$T_g / ^\circ\text{C}$	660
Knoop hardness / (kg/mm ²)	680
Yield strength / MPa	114
Young's Modulus / GPa	95.3
Thermal Expansion / 10^{-6}K^{-1}	10.2
Thermal conductivity (@300 $^\circ\text{C}$) / [W/(m·K)]	0.74
Chemical durability	Grade A (for water), Grade 3 (for acid)
Size can be fabricated / mm	> Φ 600 (flat); > Φ 250 (dome)

红外玻璃的很多重要应用, 主要关键技术有红外透过、大尺寸制备、光学均匀性以及脱羟除铂技术 [玻璃中-OH 含量, 以及铂 (Pt) 微颗粒消除]。研制的红外玻璃主要性能指标方面都达到(部分超过)国际同等先进水平。

图 3 比较了国际著名机构研制的红外玻璃和本文研制的 FGa 红外玻璃的可见-红外透光特性(扣除表面反射)^[6~11], 可以看出 FGa 玻璃的红外透光性能明显好于蓝宝石和氮氧化铝(ALON)等, 也明显好于绝大多数国内外著名机构研制的红外玻璃, 甚至优于由美国海军研究实验室(NRL)近年研制的被广泛认为是最优秀的中波红外玻璃-BGG 红外玻璃。

FGa 玻璃具有非常优良的大尺寸制备特性, 目前已制备出口径大于 600 mm 的高光学质量 FGa 玻璃, 玻璃在 $\phi 200$ mm 通光口径内的折射率最大差值 $\Delta n < 10^{-5}$, 如图 4 所示。目前, 国际上只有 NRL 等少数研究机构能制备出此大尺寸、高光学质量红外玻璃。同时, 由于引入玻璃的氟化物起到很好的化学除水作

用,结合特定的物理除水技术,本文研制的 FGa 玻璃相比大多数红外玻璃在 $3.0\ \mu\text{m}$ 处的-OH吸收大大降低(图 1 和图 3)。目前,FGa 玻璃中的-OH 含量可降至 $3\sim 5\times 10^{-6}$,从而有效保证了玻璃在其中红外波段的低吸收和高透过,这对很多中红外领域(中红外高能激光器、中红外制导等)的应用非常重要。

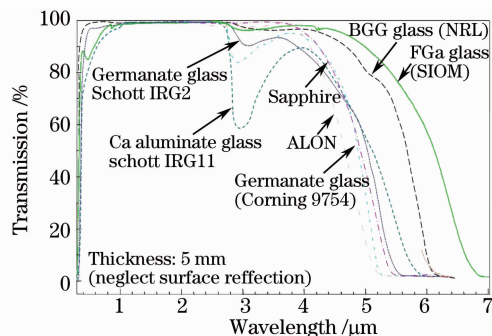


图 3 FGa 玻璃与其它若干红外材料的可见红外透过光谱比较

Fig. 3 Comparison of infrared-transmitting spectra between FGa glass and other infrared materials

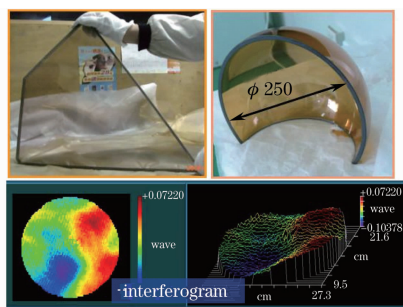


图 4 大尺寸高光学质量 FGa 玻璃(红外玻璃的光学均匀性 $\Delta n=8.7\times 10^{-6}$ (@632 nm))

Fig. 4 Large size and high optical quality FGa glass, showing $\Delta n=8.7\times 10^{-6}$ (@632 nm)

由于 FGa 玻璃具有优良的红外性能、大尺寸制备和成型特性、良好的光学质量、适用的热-机-化性能、以及较低的成本,非常适合作为各种红外光学系统的红外光学组件,及红外侦察舱光窗和导弹整流罩等。

5 氧氟玻璃红外光窗的雷达隐身技术

新一代战机和导弹必须适应隐身化、精确化和快速反应的要求,这就要求红外窗口材料必须适应新一代战机和导弹对超远视距和大视场精确寻找的要求,即红外高透过、大口径和高光学均匀性等,更要满足雷达隐身/抗电磁干扰功能要求。雷达波隐身的红外窗口研制已成为重要系统隐身技术的瓶颈。

红外窗口雷达隐身及抗电磁干扰的解决方案主要是在窗口表面或内部制作有周期阵列的导电金属网栅。红外窗口雷达隐身及抗电磁干扰的解决方案主要是在窗口表面或内部制作有周期阵列的导电金属网栅。目前国内外研究者大多通过光刻技术(感光镀膜-刻蚀)在红外光窗的表面制作具有周期阵列的导电金属网栅(FSS)。但是,在大面积或球面基底上镀制以感光-刻蚀技术制作细线条的金属网栅还存在很大的困难;同时金属网栅与红外基材料的热导系数相差很大,镀制在红外基材料上膜厚为亚微米级的金属网栅膜在的牢固度、耐热冲击、抗激光损伤等军用实际相关方面依旧是很大挑战。为此,美国 Aviation and Missile Command 研发工程中心、U. S. Navy Air Systems Command、NRL 联合提出了一种三明治结构方式的雷达隐身和抗电磁干扰技术方案^[8],并取得了较好进展,近年来引起国外研究者的较大关注。该技术方案是利用内层红外玻璃的高温粘接特性,在两层红外材料的中间夹有特定周期结构的金属网栅,起到电磁屏蔽作用;同时通过调整内层红外玻璃的折射率和膨胀系数与外层红外材料的一致,消除光学界面和热效应的影响。最近,我们在性能优良的 FGa 红外玻璃基础上,开展了类似的工作,取得了较好结果。图 5 为中间夹有金属网格的在 FGa 玻璃的中间夹有金属网格的红外玻璃复合材料,两块 FGa 玻璃通过热键合的方式结合在一起,中间的金属网格周期为 $400\ \mu\text{m}$,线宽为 $20\ \mu\text{m}$,对 $8\sim 12\ \text{GHz}$ 雷达波段屏蔽效果约为 $-10\ \text{dB}$ (图 6),显示了很好的电磁屏蔽效果,达到了很多重要红外军用系统的要求。

相比前面提到的感光-刻蚀技术,三明治结构隐



图 5 夹有金属网格的 FGa 红外复合材料

Fig. 5 Infrared composite materials with EMS metal grid

身方案由于电感性金属网栅在材料的内部,提高了耐热冲击、耐磨性、抗激光损伤,且优化抗电磁干扰功能。但是由于被用于复合网栅的复杂形状难以制

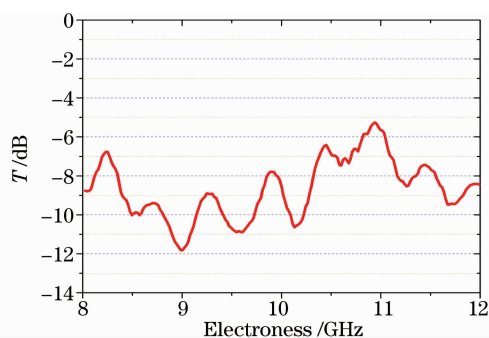


图 6 微波吸收效率曲线

Fig. 6 Microwave absorptivity curve

作,难以实现选择性屏蔽屏,而且工艺复杂性高、成本高。当前隐身技术,无论是表面的感光-刻蚀技术还是内部的三明治技术都存在严重的应用问题;各强国都在积极寻求适用于在大尺寸和复杂形状(如球面等)红外光窗上,简单且易操控地实现雷达隐身及抗电磁干扰功能的技术思想。

强场超快激光加工具有传统激光加工不可比拟的优势,主要表现为加工的非热熔性、加工的精确性、加工尺寸的亚微米特性、加工材料的广泛性和加工能量的低耗性。通过强场激光可将预先掺入玻璃内部的重金属离子还原为其相应的原子。利用这种技术在经事先处理的 FGa 玻璃内部实现了金属粒子的析出,在特定后生长条件下,可初步形成联通的导电金属网栅,如图 7 所示。相比感光-刻蚀方式,强场激光诱导方案,具有以下突出优点:1)制作工序简单;2)易于大尺寸和复杂形状制作;3)可以有效避免镀膜-刻蚀技术普遍存在的膜层牢固度、耐热冲击、抗激光损伤等(与苛刻军用环境相关的)应用问题。可以预见,强场超快激光实现的隐身技术将对未来红外光窗材料隐身化的发展将发挥重要作用。

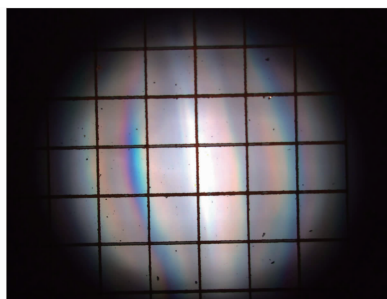


图 7 强激光诱导金属网栅的显微照片

Fig. 7 Micrograph of metal grid induced by ultrafast laser

6 结 论

结合下一代重要红外系统对红外窗口材料的特

殊性能要求,提出了新型红外氧氟玻璃的组成设计思想,研制出性能优良的镓酸盐氧氟(FGa)玻璃。FGa 玻璃无论是红外性能、制备尺度、光学均匀性,还是羟基含量以及除铂技术都达到国际同等先进水平,为 FGa 玻璃在我国重要红外系统中的广泛应用奠定了很好的技术基础。

基于性能优良的 FGa 红外玻璃,研制出具有三明治结构的 FGa 玻璃复合光窗,显示了很好的雷达波屏蔽效果;结合超强激光与材料相互作用的最新技术,开展了利用强场激光诱导实现红外光窗雷达隐身功能的新技术研究,初步形成了联通的导电金属网栅,取得了较好的前期结果。

参 考 文 献

- 1 D. C. Harris. Materials for Infrared Windows and Domes: Properties and Performance[M]. Bellingham, Washington, USA: SPIE Optical Engineering Press, 1999. 1~60
- 2 D. C. Harris. Durable 3~5 μm transmitting infrared window materials[J]. *Infrared Phys. Technol.*, 1998, **39**(4): 185~201
- 3 J. W. Locher, H. E. Bates, C. D. Jones *et al.*. Large EFG sapphire sheet for VIS-IR (500~5000 nm) window applications [C]. *SPIE*, 2005, **5786**: 147~153
- 4 T. J. Mroz, T. M. Hartnett, J. M. Wahl *et al.*. Recent advances in spinel optical ceramic[C]. *SPIE*, 2005, **5786**: 64~70
- 5 P. Tabary, C. Servant. Crystalline and microstructure study of the AlN-Al₂O₃ section in the Al-NO system. II. α' - and δ -AlON spinel phases[J]. *J. Appl. Crystallgr.*, 1999, **32**: 241~252
- 6 S. S. Bayya, J. S. Sanghera, I. D. Aggarwal *et al.*. Infrared transparent germanate glass-ceramics[J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2002, **85**(12): 3114~3116
- 7 S. S. Bayya, G. D. Chin, J. S. Sanghera *et al.*. Vis-IR transmitting BGG glass windows[C]. *SPIE*, 2003, **5078**: 208~215
- 8 S. S. Bayya, G. D. Chin, J. S. Sanghera *et al.*. Germanate glass as a window for high energy laser systems [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(24): 11687~11693
- 9 J. A. Tangeman, B. L. Phillips, P. C. Nordine *et al.*. Thermodynamics and structure of single- and Two-Phase Yttria-alumina glasses [J]. *J. Phys. Chem. B*, 2004, **108** (30): 10663~10671
- 10 D. F. de Souza, L. F. C. Zonetti, M. J. V. Bell *et al.*. On the observation of 2.8 μm emission from diode-pumped Er³⁺- and Yb³⁺-doped low silica calcium aluminate glasses [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**: 908
- 11 S. L. Oliveira, S. M. Lima, T. Catunda, L. A. O. Nunes *et al.*. High fluorescence quantum efficiency of 1.8 μm emission in Tm³⁺-doped low silica calcium aluminate glass determined by thermal lens spectrometry[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**: 359
- 12 X. Yuan, Y. Fan, L. Zhang *et al.*. Structural investigation of gallium oxyfluoride IR-glass[J]. to be submitted
- 13 L. Zhang, J. C. C. Chan, H. Eckert *et al.*. Novel sol-gel synthesis of sodium aluminophosphate glass based on aluminum lactate[J]. *Chem. Mater.*, 2003, **15**(4): 2702~2710
- 14 L. Zhang, C. de Araujo, H. Eckert. Aqueous sol-gel preparation of Na₂O-Al₂O₃-B₂O₃ glasses: structural characterisation by liquid and solid state NMR spectroscopy[J]. *Phys. Chem. Glasses*, 2005, **47**(1): 7~15

- 15 L. Zhang, H. Eckert. Synthesis and structural evolution of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5$ gels and glasses[J]. *J. Mater. Chem.*, 2005, **15**(6): 1640~1653
- 16 L. Zhang, H. Eckert. Short- and medium-range order in sodium aluminophosphate glasses: New insights from high-resolution dipolar solid-state NMR spectroscopy[J]. *J. Phys. Chem. B*, 2006, **110**(18): 8946~8958
- 17 L. Zhang, C. C. de Araujo, H. Eckert. A new sol-gel route to aluminum fluoride phosphate glasses; Mechanistic investigations by NMR spectroscopy[J]. *Chem. Mater.*, 2005, **17**(2): 3101~3107
- 18 L. Zhang, C. C. de Araujo, H. Eckert. Structural role of fluoride in aluminophosphate sol-gel glasses: High-resolution double-resonance NMR studies[J]. *J. Phys. Chem. B*, 2007, **111**(35): 10402~10412

纳米光子学 (Nanophotonics)

著 者: [美] 帕拉斯·N·普拉萨德(Paras N. Prasad)

译 者: 张镇西 等

书 号: 978-7-5605-3287-5

出版时间: 2010-08

成品尺寸: 169×239(mm)/ B5

页 码: 400 页

定 价: 58.00 元

原出版社: John Wiley & Sons

出 版 社: 西安交通大学出版社

内容简介

纳米光子学是一门结合纳米科学与光子学的新型交叉学科。本书从纳米光子学的基础理论讲起,并将内容扩展到纳米材料、技术应用等方面。其内容涉及量子点纳米探针、流式细胞、双光子成像、纳米医学、靶向运输等生物医学及纳米生物技术领域研究中的热点问题,也介绍了生物成像领域研究中较为活跃的几种新成像手段。每章末有本章重点内容总结,适合生物医学、光电、材料等相关专业参考,也适合作为教材使用。

简要目录

- | | |
|------------------|------------------------|
| 1 绪论 | 8 纳米结构的分子架构 |
| 2 纳米光子学基础 | 9 光子晶体 |
| 3 近场相互作用和近场光学显微术 | 10 纳米复合材料 |
| 4 量子限制材料 | 11 纳米光刻技术 |
| 5 等离子体光学 | 12 生物材料和纳米光子学 |
| 6 激发动力学过程的纳米控制 | 13 纳米光子学在生物技术和纳米医学中的应用 |
| 7 纳米材料的生长和表征 | 14 纳米光子学应用及其市场前景 |

作者简介

帕拉斯·N·普拉萨德(Paras N. Prasad)是 Samuel P. Capen 讲席教授,化学、物理、电气工程和医学领域的杰出科学家,纽约州立大学布法罗分校激光、光子学和生物光子学研究所的执行理事,目前已发表超过 450 篇的相关科学论文。

适用对象

生物医学工程、物理学、光子学、材料科学等专业的研究生、教师以及希望对纳米光子学领域做深入了解的专业技术人员。

