doi:10.11887/j.issn.1001-2486.25040006 http://journal.nudt.edu.cn

低功耗高性能的新型硫系玻璃光纤声光调制器

王莹莹[1,3,4],李长佑[1,3,4],姜玲玲[2],吴中超[2],林常规[1,3,4],戴世勋[1,3,4]*

(1. 宁波大学 红外材料及器件实验室,浙江 宁波 315211;2. 中国电子科技集团有限公司第二十六研究所,重庆 400060;
3. 宁波大学 全省先进光功能材料及器件重点实验室,浙江 宁波 315211;
4. 宁波大学 先进红外光电材料及器件浙江省工程研究中心,浙江 宁波 315211)

摘 要:硫系玻璃因其宽红外透过范围、高声光品质因数等特点,成了低功耗高性能声光调制器的理想工作介质,有望突破传统介质声光调制器在效率与功耗方面的局限。以宽红外透过范围、高折射率的$Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$硫系玻璃为研究对象,系统分析了其热学、物理、光学及声学性能,并基于此成功研制出高性能光纤声光调制器。实验结果表明,在0.52 W射频驱动功率下,该调制器衍射效率达84%,上升时间为41 ns,消光比高达61 dB,展现出低功耗、高效率的优异性能。该声光调制器的研制为新型声光器件的设计与开发提供了重要技术支撑,对推动高速光通信、光纤传感等领域的应用具有重要意义。

关键词:硫系玻璃;声光调制器;功耗;衍射效率

中图分类号:TN65 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2025)05-062-08

论文拓展

Low-power high-performance fiber-coupled acousto-optic modulator based on novel chalcogenide glass

WANG Yingying[1,3,4], *LI Changyou*[1,3,4], *JIANG Lingling*[2], *WU Zhongchao*[2], *LIN Changgui*[1,3,4], *DAI Shixun*[1,3,4]*

(1. Laboratory of Infrared Material and Devices, Ningbo University, Ningbo 315211, China;
2. The 26th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China;
3. Zhejiang Key Laboratory of Advanced Optical Functional Materials and Devices, Ningbo University, Ningbo 315211, China;
4. Engineering Research Center for Advanced Infrared Photoelectric Materials and Devices of Zhejiang Province, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Chalcogenide glasses, with their broad infrared transmission window and high acousto-optic figure of merit, represent an ideal medium for low-power high-performance acousto-optic modulators, potentially overcoming the diffraction efficiency and power consumption limitations of acousto-optic modulators based on conventional materials. $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ chalcogenide glass, characterized by its wide infrared transparency and high refractive index, was systematically investigated for its thermal, physical, optical, and acoustic properties. Using this glass as acousto-optic medium, a high-performance fiber-coupled acousto-optic modulator was successfully fabricated. Experimental results show that under a radio frequency driving power of 0.52 W, the modulator achieves a diffraction efficiency of 84%, a rise time of 41 ns, and an extinction ratio as high as 61 dB, exhibiting excellent low-power consumption and high-efficiency characteristics. This study provides crucial technical support for the design and development of novel acousto-optic devices, contributing to advancements in high-speed optical communication and fiber sensing applications.

Keywords: chalcogenide glass; acousto-optic modulator; power consumption; diffraction-efficiency

声光调制器作为一种基于声光效应的关键光学器件,利用超声波对光信号的频率、幅度以及方向进行调制,可实现快速的电、声、光信息传递和转换,具有低插损、高消光比以及高集成性等特点,在光通信、光纤传感和多普勒激光雷达等众多领域具有广泛应用[1-4]。近年来,随着5G通信、物联网和人工智能等新一代信息技术的飞速发展,光学系统对调制器件的性能要求日益提高,不

收稿日期:2025-04-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U23A20370);宁波市科技创新2025重大专项资助项目(2022Z208)

第一作者:王莹莹(1992—),女,山东枣庄人,助理研究员,博士,E-mail:wangyingying@nbu.edu.cn

*通信作者:戴世勋(1974—),男,湖北宜城人,研究员,博士,博士生导师,E-mail:daishixun@nbu.edu.cn

引用格式:王莹莹,李长佑,姜玲玲,等. 低功耗高性能的新型硫系玻璃光纤声光调制器[J]. 国防科技大学学报,2025,47(5):62-69.

Citation: WANG Y Y, LI C Y, JIANG L L, et al. Low-power high-performance fiber-coupled acousto-optic modulator based on novel chalcogenide glass[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2025, 47(5): 62-69.

仅需要更宽的调制带宽以适应高速数据传输,还需要更高的调制效率来降低系统功耗,同时要求优异的温度稳定性和长期可靠性。声光调制器作为光通信和信号处理系统中的核心组件之一,其性能直接影响信号调制的效率、带宽和稳定性,进而决定了整个系统的信息处理能力[5-7]。传统体块式声光调制器由于存在耦合损耗大、集成度低等问题,已难以满足现代光学系统的发展需求。相比之下,光纤声光调制器凭借其与光纤系统的天然兼容性、低插入损耗和紧凑的结构优势[1],成了高速光通信和精密光学测量的理想选择。

声光介质是声光调制器的核心元件之一,其材料性能极大地影响声光调制器的调制效率、调制速度、功耗以及稳定性。传统的声光介质以二氧化碲(TeO_2)、钼酸铅($PbMoO_4$)和石英(SiO_2)等晶体材料为主,其中 TeO_2 晶体是目前使用最为广泛的声光介质。TeO_2 和 $PbMoO_4$ 晶体均具有宽透过范围(TeO_2 晶体 0.4 ~ 5 μm;$PbMoO_4$ 晶体 0.42 ~5.5 μm)、低声衰减(<1 dB/cm@ 100 MHz)和高稳定性等优点。但是高纯度晶体生长难度大、成本高[8-10]。SiO_2 晶体则具有极低的声衰减(0.12 dB/cm@ 100 MHz)和高光学均匀性,适合高频声光器件,但是透过范围相对较窄(0.2 ~ 2.5 μm)[11]。近年来,山东大学晶体材料国家重点实验室研发了 $BaO—TeO_2—MoO_3$ 和 $BaO—TeO_2—WO_3$ 玻璃[12-15],这两款玻璃不仅具有较宽的透过范围(0.5 ~5.3 μm),而且在声衰减特性(约为 TeO_2 晶体的 1/2)上展现出优异特性。将基于这两款玻璃的声光调制器应用于激光调 Q 系统中,实现了窄脉宽、高效的脉冲激光输出。然而,以上材料的声光品质因数整体较低(普遍小于 100×10^{-18} s^3/g),导致需要较大的驱动功率(在 C 波段 >2 W)才能实现较高的衍射效率,难以满足应用系统对低功耗和高性能调制的需求。

硫系玻璃具有超宽的红外透过范围、较高的线性折射率和声光品质因数,组分调控灵活,且制备工艺相对简单,成型加工性能优良,已成为一种极具潜力的红外声光介质材料[16-21]。宁波大学红外材料及器件实验室研究了 Ge – As – Se、Ge – Sb – Se、Ga – Sb – S 以及 Ge-As-S 等多个体系硫系玻璃的声光特性[17-21],结果表明,硫系玻璃的声速较低(<3000 m/s)、声光品质因数较高(>100×10^{-18} s^3/g),有望在低驱动功率下实现较高的声光衍射效率。其中 Ge-Sb-S 硫系玻璃具有宽红外透过、高化学稳定性以及无砷环保等特性[22-23],在中红外激光传输、环境检测传感器以及军用红外光学系统等领域展现出独特优势。

本工作以该体系硫系玻璃作为声光介质,研究了 $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ 玻璃的基本性能,包括热学、物理、光学和声学等特性,并在此基础上成功研制出光纤声光调制器,并对其调制特性进行了研究和对比分析。

1　实验

1.1　硫系玻璃制备

采用熔融萃冷法制备 $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ 玻璃[24],具体流程如图 1 所示。对石英管进行清洗和烘干处理,以去除表面杂质,防止其在高温熔制过程中被引入玻璃液中。根据玻璃组成计算 Ge、Sb、S 三种元素的质量,使用高精度电子天平进行称重,称取总质量为 70 g。将原料装入预处理完成的石英管中。对装有原料的 20 mm 口径石英管进行密封抽真空,以尽可能去除石英管内的气体和水分。当石英管中的真空度低至一定水平后,使用乙炔 – 氧气火焰在合适的位置进行熔融封接,随后放入熔制炉中。按照预设的温度曲线进行升温,在高温熔制过程中开启摇摆以使原料在石英管中充分混合形成均匀的玻璃熔体。待熔制炉温度降至出炉温度时,取出石英管并通过风冷方式对其进行萃冷,使熔制好的玻璃脱离石英管壁。为了消除其在萃冷过程中产生的内部应力,将装有 $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ 玻璃的石英管置于马弗炉中进行退火处理。待退火完成,从石英管中取出玻璃进行切片和磨抛,用于后续的玻璃性能表征和光纤声光调制器制作。

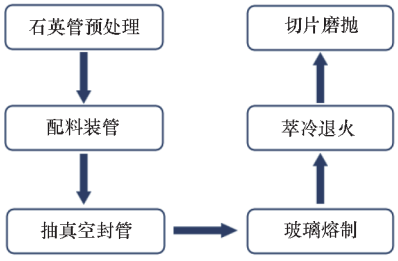


图 1　$Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ 玻璃制备流程

Fig. 1　Preparation process of $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ glass

1.2　硫系玻璃性能测试

1.2.1　热学特性

声光介质能够承受的上限温度限制了其在工作过程中可以施加的最大超声功率,因此需要确定其特征温度。利用差示扫描量热仪(differential scanning calorimetry, DSC)分析 $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ 玻璃的特征温度(转变温度 T_g 及析晶温度 T_x),T_x 和

T_g 之间的差值用 ΔT 表示。将坩埚密压出的 5 mg 玻璃粉末放入 DSC 中，设置温度范围为 300 ~ 500 ℃，并以 10 ℃/min 的速率进行升温。为防止 $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ 玻璃粉末在升温过程中被氧化，整个测试过程在氮气保护下进行。

1.2.2 物理特性

采用阿基米德排水法测量 $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ 玻璃样品密度 ρ。为了提高测量数据准确度，同一块玻璃样品密度重复测量 6 次并取平均值，该测试精度可达 ±0.001 g/cm^3。

1.2.3 光学特性

在工作波长下，声光介质应具有优良的透过特性。采用分光光度计和傅里叶红外光谱仪分别测试 $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ 玻璃样品在可见光到近红外波段和中远红外范围的透过光谱。待测玻璃样品双面磨抛，厚度为 2 mm。

折射率 n 是反映介质光学性能的重要参数之一。在声光介质中，该参数极大程度上决定了声光品质因数的大小[25]。采用红外可变角光谱椭偏仪测量 $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ 玻璃样品在 1.45 ~ 10 μm 波长范围内的折射率，测试分辨率为 16 cm^{-1}，变角范围为 60° ~ 90°。待测玻璃样品单面抛光，厚度为 2 mm，测量结果误差为 ± 0.001 mm。利用 Sellmeier 公式拟合得到玻璃样品折射率曲线。此外，当激光穿过玻璃内部时会产生热积累，从而引起折射率变化并带来不良的非线性效应，导致光束质量劣化[26]。因此，需要对玻璃折射率随温度的变化进行测量评估。将待测玻璃样品放置在温控平台上，从室温下开始，每隔 10 ℃测试其折射率。为了减少实验误差，每改变 1 次温度需预热 10 min 再进行测量，每次测量重复 3 次。对不同温度下的折射率曲线进行线性拟合，斜率即为折射率随温度的变化率，也就是热光系数（dn/dT）。

光弹系数 P_{12} 反映了材料的光弹性效应，当对材料施加一定压力时，其折射率在沿外加应力方向和垂直于它的方向上产生差异，即应力引起的光学各向异性。基于马赫 - 曾德尔干涉仪和应力光学系数理论的光学玻璃 P_{12} 测量方法，搭建如图 2所示装置测量 $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ 玻璃 P_{12}，具体测量方法见文献[27]。

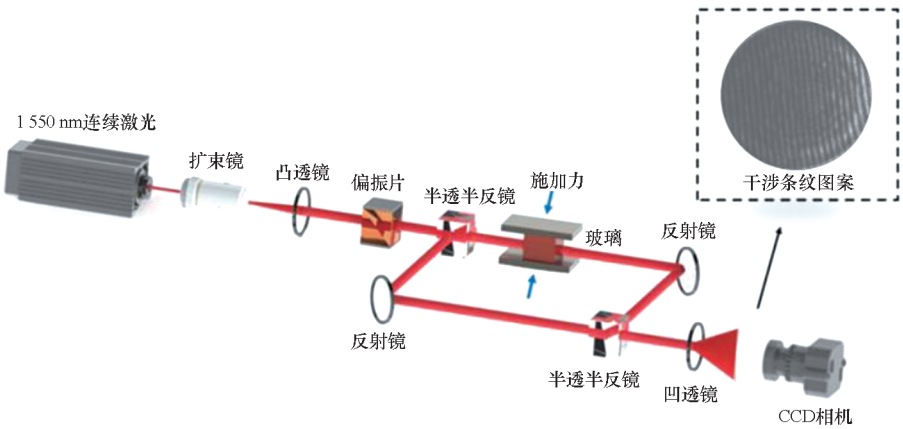


图 2 $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ 玻璃光弹系数 P_{12} 测量装置

Fig. 2 Measurement setup for photoelasticity P_{12} of $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ glass

1.2.4 声学特性

声速 v 决定了声光介质中声场穿过光束的渡越时间，渡越时间越短，声光调制器的调制速度越快[28]。声衰减系数 α 则反映了声光介质的声吸收特性，损失的声能将在声光器件中以热的形式消散，过高的工作温度会造成光学输出失真[29]。基于脉冲回波法[30]，搭建如图 3 所示实验装置测试 $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ 玻璃样品的声速和超声衰减。脉冲发生器产生振幅为 h_1 的超声纵波并通过耦合剂（水溶性高分子胶体）进入厚度为 d 的玻璃样品，在经历超声能量衰减后在玻璃样品的另一个表面发生全反射，再次经历超声能量衰减后传回至接收传感器，高精度数显示波器用来记录和显示反

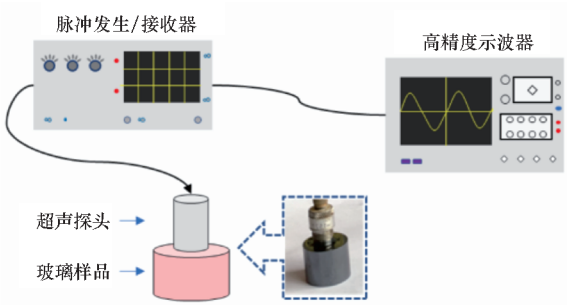


图 3 $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ 玻璃声速 v 和声衰减系数 α 测量装置

Fig. 3 Measurement setup for acoustic velocity v and attenuation coefficient α of $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ glass

射波形。利用回波信号的传输时间 t 和经历两次超声能量衰减后接收的信号振幅 h_2，计算得到玻璃样品的声速和声衰减系数分别为：

$$v = \frac{2d}{t} \tag{1}$$

$$\alpha = 20\lg \frac{h_1}{h_2}/(2d) \tag{2}$$

2　硫系玻璃相关性能

$Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ 玻璃的 DSC 特性曲线如图 4 所示，其 T_g 为 303 ℃，表明该玻璃能够承受较高的工作温度而不会发生软化或结构变化。T_x 为 498 ℃，ΔT 达到 195 ℃。这一结果表明 $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ 玻璃可以在较大的温度范围内保持无定形结构，具有优良的热稳定性。

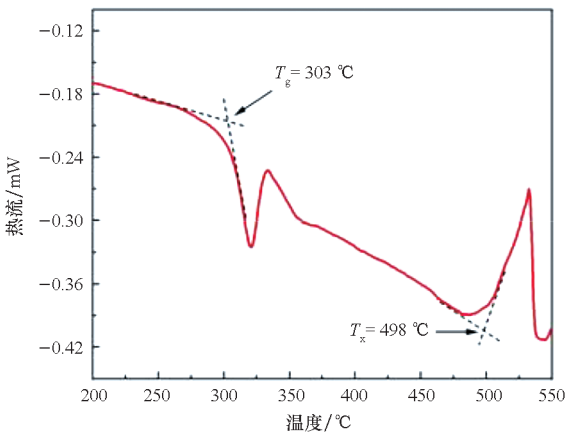


图 4　$Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ 玻璃 DSC 特性曲线

Fig. 4　DSC curve of $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ glass

$Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ 玻璃在 0.8 ~ 10 μm 波长范围的透过光谱如图 5 所示，工作波长为 1 550 nm 时的透过率约为 73%，同时在近红外和中远红外波段也具有较高的透过率，展现出作为宽波段声光介质的应用潜力。在 2.9 μm、4 μm 和 9.1 μm 处观察到的强吸收峰归因于 O—H、S—H 和 Sb—O 键振动，在 6.6 μm 和 7.5 μm 处的杂质吸收峰则分别对应于 CS_2 和 SO_2 分子，在制备流程中对原料进行提纯可有效降低玻璃所含的上述杂质吸收。

图 6(a) 为 $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ 玻璃折射率随波长的变化曲线，可以看出，$Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ 玻璃在 1.5 ~ 10 μm 波长范围内表现出较高的折射率(>2.28)，测量误差小于 1.6×10^{-6} ℃$^{-1}$，其中在 1.55 μm 处的折射率为 2.363，超过了常用的其他声光介质。在 30 ~ 90 ℃温度范围内，$Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ 玻璃的折射率随温度的变化情况如图 6(b) 所示。实验结果显示折射率与温度呈正相关，其 dn/dT 系数

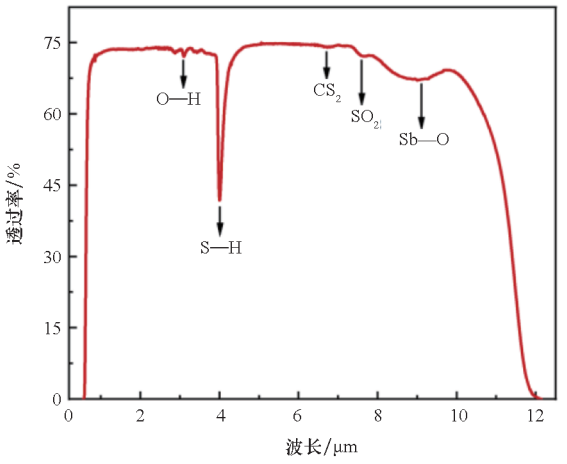
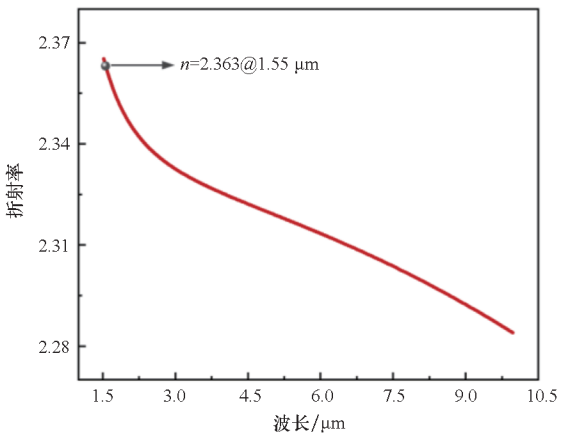


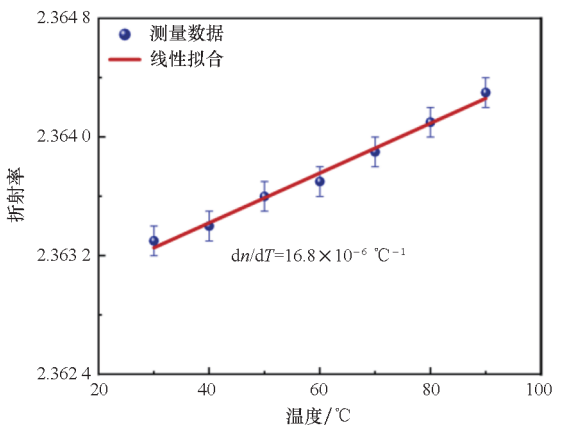
图 5　$Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ 玻璃透过光谱

Fig. 5　Transmission spectrum of $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ glass



(a) $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ 玻璃折射率随波长变化曲线

(a) Refractive index curve as a function of wave length of $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ glass



(b) $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ 玻璃折射率随温度变化曲线

(b) Refractive index curve as a function of temperature of $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ glass

图 6　$Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ 玻璃折射率随波长和温度变化曲线

Fig. 6　Curve of the refractive index of $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ glass varying with wavelength and temperature

为 16.8×10^{-6} ℃$^{-1}$，低于目前商用的 $Ge_{33}As_{12}Se_{55}$ 声光硫系玻璃（$dn/dT=76.53\times10^{-6}$ ℃$^{-1}$）[31]。低 dn/dT 值能够显著降低高功率激光输入或高工作温度下的热透镜、自聚焦以及激光诱导损伤等效应。

声光品质因数 M_2 是衡量介质中声光相互作用效率的参数，其计算公式[25]为：

$$M_2=\frac{n^6P_{12}^2}{\rho v^3} \tag{3}$$

将测量得到的 $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ 玻璃密度 $\rho=3.4$ g/cm^3、光弹系数 $P_{12}=0.273$、声速 $v=2\,673$ m/s代入式(3)，得到 $M_2=200\times10^{-18}$ s^3/g。表1汇总了 $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ 和商用 $Ge_{33}As_{12}Se_{55}$ 声光硫系玻璃以及 TeO_2、SiO_2 和 $PbMoO_4$ 等常用声光晶体的相关性能。可以看出，硫系玻璃的杨氏模量和剪切模量较低，说明其材料结构柔韧性好，易于加工，但机械强度较弱。与硫系玻璃相比，TeO_2 和 SiO_2 晶体的声速较高，则声场穿过光束的渡越时间较短，调制带宽更大，同时其声衰减较小，对高频超声波的衰减较弱，适合用于制备高速声光调制器。但硫系玻璃的低声速和高折射率特性则使其具有极高的声光品质因数，能够极大地提升声光相互作用效率并且有效降低声光器件所需驱动功率。因此在对声光调制器功耗要求较为苛刻的场景中，硫系玻璃是优良的声光介质选择。

表1 典型声光介质基本性能参数

Tab. 1 Performance parameters of typical acousto-optic media

声光介质	密度/(g/cm^3)	维氏硬度/(kg/mm^2)	杨氏模量/GPa	剪切模量/GPa	折射率	热光系数/℃$^{-1}$	光弹系数	声速/(m/s)	声衰减系数/(dB/cm)	声光品质因数(s^3/g)
TeO_2晶体	6.0	241.8	68.67	25.37	2.2 @1 064 nm	24.9×10^{-6}	0.187	4 200	0.15 @100 MHz	34.5×10^{-18}
SiO_2 晶体	2.2	600.0	32.78	76.70	1.45 @1 064 nm	8.75×10^{-6}	0.270	5 960	0.12 @100 MHz	2.38×10^{-18}
$PbMoO_4$晶体	6.8	208.0	74.36	27.87	2.29 @1 064 nm	-75×10^{-6}	0.253	3 830	0.8 @100 MHz	24×10^{-18}
$Ge_{33}As_{12}Se_{55}$玻璃	4.4	252.4	20.70	8.20	2.7 @1 064 nm	76.53×10^{-6}	0.270	2 520	7.1 @500 MHz	248×10^{-18}
$Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$玻璃	3.4	173.4	20.50	8.20	2.363 @1 550 nm	16.8×10^{-6}	0.273	2 673	4.05 @100 MHz	200×10^{-18}

3 硫系玻璃声光调制器性能

与声光晶体相比，声光玻璃各向同性特性使其更便于研制声光调制器。基于 $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ 玻璃，由本工作合作单位，即中国电子科技集团公司第二十六研究所研制出的光纤声光调制器主要组成部分包括：声光介质、金属键合层、压电换能器和射频驱动器[32-33]，其基本结构和工作原理如图7所示。压电换能器在厚度驱动模式工作，将射频信号转换为特定频率的超声波并使其在声光介质中传播，声场从压电换能器到声光介质的耦合效率由压电换能器损耗来表征，它取决于各声学材料的声阻抗、相移和器件的工作频率，与各声学材料声速、密度和厚度相关。通过对各声学材料合厚度进行合理设计，超声波能够高效地耦合入声光介质，从而引起介质的折射率发生周期性变化，形成折射率光栅。当输入光束以正确的角度进入声光介质并通过此折射率光栅时会发生衍射现象，从而改变光束的强度、频率或方向。声光调制器设计的关键是合理地设计超声柱的尺寸，声光互作用长度 L 可由布拉格判据来确定：

$$L\geqslant2L_0\approx\frac{2\Lambda^2}{\lambda} \tag{4}$$

式中，L_0为特征长度，Λ 为调制器工作频率处的声波长，λ 为激光波长。由衍射效率公式

$$\eta=\sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda}\sqrt{\frac{M_2\cdot P\cdot L}{2H}}\right) \tag{5}$$

可知，在一定的驱动功率 P 下，L/H（H 为电极宽

度)的比值越大,衍射效率越高。因此,L 可以根据声光介质的实际情况尽可能取大一些,H 则尽量小,一般与激光光斑直径相等或稍大一些。在本项工作中,设计器件的工作频率为80 MHz,工作波长为 1 550 nm。所使用的$Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$玻璃尺寸为 15 mm × 12 mm × 3 mm,电极尺寸为 4 mm × 0.2 mm,测试激光光斑直径为 200 μm,研制的光纤声光调制器两端的尾纤为 SMF 28e 光纤。

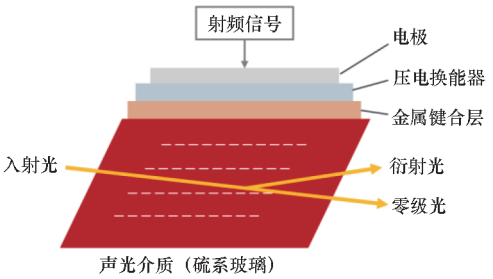
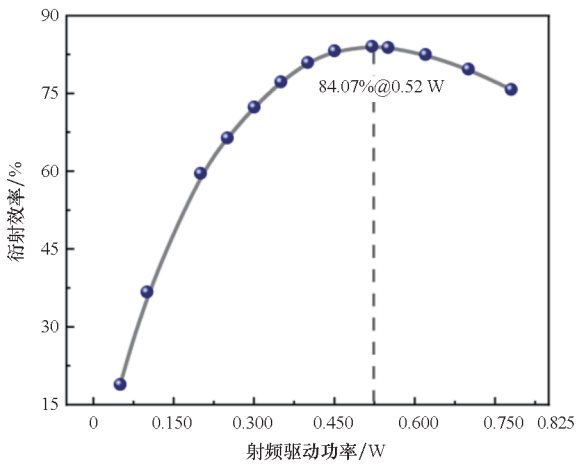


图 7　基于 $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ 玻璃的光纤声光调制器基本结构和工作原理图

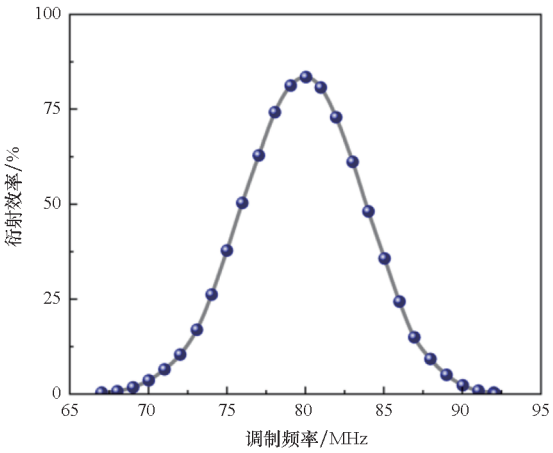
Fig. 7　Basic structure and operation principle diagram of an acousto-optic modulator based on $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ glass

图 8(a)展示了 $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ 玻璃声光调制器的衍射效率与射频驱动功率之间的变化关系。随着射频驱动功率增大,衍射效率快速上升,在 0.52 W 时达到峰值 84.07%,随后衍射效率逐渐下降。衍射效率随调制频率的变化情况如图 8(b)所示,可以看出,所研制的声光调制器的中心工作频率为 80 MHz,3 dB 带宽为 9.25 MHz。声光调制器的调制速度由上升时间决定。$Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ 玻璃声光调制器的上升和下降时间如图 8(c)所示,其上升时间为 41 ns,下降时间为 48 ns。



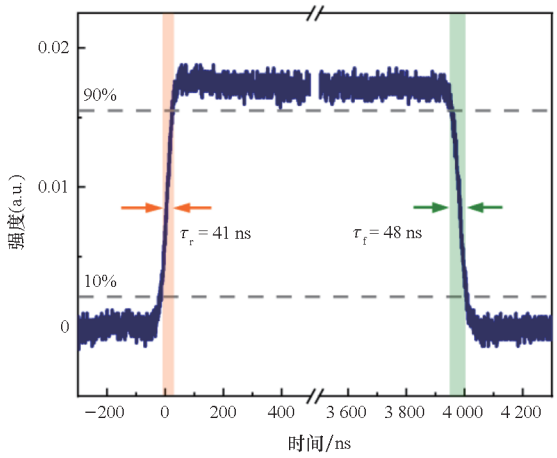
(a) 基于 $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ 玻璃的光纤声光调制器的衍射效率随射频驱动功率的变化

(a) Diffraction efficiency with RF driving power of the fiber-coupled acousto-optic modulator based on $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ glass



(b) 基于 $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ 玻璃的光纤声光调制器的衍射效率随调制频率的变化

(b) Diffraction efficiency with RF modulation frequency of the fiber-coupled acousto-optic modulator based on $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ glass



(c) 基于 $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ 玻璃的光纤声光调制器的上升和下降时间

(c) Rise time and fall time of the fiber-coupled acousto-optic modulator based on $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ glass

图 8　基于 $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ 玻璃的光纤声光调制器的衍射效率和脉冲调制特性

Fig. 8　Diffraction efficiency and pulse modulation characteristics of the fiber-coupled acousto-optic modulator based on $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ glass

表 2 总结了多种介质声光调制器的基本性能参数。对比分析表明,$Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ 玻璃具有相对较宽的透过窗口。此外,$Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ 玻璃声光调制器在低射频驱动功率(< 0.52 W)下即可实现高衍射效率(84%)。虽然其射频驱动功率略高于 $Ge_{20}Sb_{15}Se_{65}$ 玻璃声光器件(0.25 W),但衍射效率较后者提升约 11%。另外,上升时间、插入损耗和消光比也是声光调制器的关键性能指标。

表2 多种介质声光调制器的基本性能参数

Tab. 2 Performance parameters of acousto-optic modulators based on various media

声光介质	传输带宽/μm	射频驱动功率/W	衍射效率/%
TeO_2晶体	0.4 ~ 5	1.26	85 @1 064 nm
β-BTM 晶体	0.5 ~ 5	1.80	78 @1 064 nm
$Ge_{20}Sb_{15}Se_{65}$玻璃	0.8 ~ 10	0.25	73 @1 550 nm
$Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$玻璃	0.8 ~ 10	0.52	84 @1 550 nm

表3展示了$Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$玻璃声光调制器与2款商用声光调制器产品的性能对比。在相同波长下,$Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$玻璃声光调制器的上升时间为41 ns,插入损耗为2.2 dB,与商用产品相当。其消光比达到了61 dB,优于商用产品。这些实验结果充分证明了$Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$玻璃声光调制器的优越性能。

另外,我们对$Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$玻璃声光调制器在不同温度下工作的可靠性进行了实验。将所研制的调制器放于试验箱内,测试温度依次设置为25 ℃、-40 ℃、-20 ℃、55 ℃、70 ℃和25 ℃。为保证结果的准确性,在每一温度下至少保持0.5 h后再进行插入损耗和消光比的测试,测试结果如表4所示。可以看出,在常温—低温—高温—常温的变化过程中,所研制的声光调制器的插入损耗保持在(2.3 ± 0.19)dB、消光比保持在(61.2 ± 0.55)dB。该结果表明,由$Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$玻璃制成的光纤声光调制器在-40 ~ 70 ℃温度范围内没有失效,仍可正常工作,展现出优异的稳定性和可靠性。

表3 $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$玻璃声光调制器和商用声光调制器性能参数

Tab. 3 Performance parameters of $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ glass acousto-optic modulator and commercial acousto-optic modulators

声光介质	声光调制器型号	上升时间/ns	插入损耗/dB	消光比/dB	射频驱动功率/W
TeO_2晶体	T - M080 - 0.4C2J - 3 - F2S(G&H)	35	2	>50	3
$Ge_{33}As_{12}Se_{55}$玻璃	T - M080 - 0.5C8J - 3 - F2S(G&H)	70	2.5	>50	0.30
$Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$玻璃	本工作	41	2.2	61	0.52

表4 在不同工作温度下$Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$玻璃光纤声光调制器的插入损耗和消光比

Tab. 4 Insertion loss and extinction ratio of $Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$ glass fiber-coupled acousto-optic modulator under different operating temperatures

温度	插入损耗/dB	消光比/dB
25 ℃	2.20	61.00
-40 ℃	2.35	60.83
-20 ℃	2.12	61.71
55 ℃	2.20	61.74
70 ℃	2.49	60.65
25 ℃	2.18	61.47

4 结论

本工作以具有宽红外透过范围和高折射率的$Ge_{21}Sb_{18}S_{61}$硫系玻璃为研究对象,系统研究了其热学、物理、光学及声学性能,并基于此成功研制出高性能光纤声光调制器。实验结果表明,该调制器在0.52 W射频驱动功率下可实现84%的衍射效率、41 ns的上升时间及61 dB的高消光比,展现出低功耗、高效率的优异性能。相较于传统声光介质,该硫系玻璃声光调制器在声光品质因数、驱动功率和衍射效率等方面均具有显著优势,为高性能声光器件的开发提供了新的材料选择,也为低功耗高速光通信、光纤传感等系统的性能优化提供了新的技术方案。

参考文献(References)

[1] CHEN X C, WANG N, HE C J, et al. Development of all-fiber nanosecond oscillator using actively Q-switched technologies and modulators[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 157: 108709.

[2] PFISTER T, BÜTTNER L, SHIRAI K, et al. Monochromatic heterodyne fiber-optic profile sensor for spatially resolved velocity measurements with frequency division multiplexing[J]. Applied Optics, 2005, 44(13): 2501 - 2510.

[3] 周健, 魏国, 龙兴武. 激光多普勒测速仪方向辨别及低速测量的研究[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3): 632 - 638.
ZHOU J, WEI G, LONG X W. Research on direction discrimination and low-speed measurement for laser Doppler velocimeter[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(3): 632 - 638. (in Chinese)

[4] 周艳宗, 王冲, 刘燕平, 等. 相干测风激光雷达研究进展和应用[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(2): 020001.
ZHOU Y Z, WANG C, LIU Y P, et al. Research progress and application of coherent wind lidar [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(2): 020001. (in Chinese)

[5] BIAN K W, LI Z Y, LIU Y S, et al. Demonstration of acousto-optical modulation based on a thin-film AlScN photonic platform[J]. Photonics Research, 2024, 12(6): 1138.

[6] SCHRÖDEL Y, HARTMANN C, ZHENG J A, et al. Acousto-optic modulation of gigawatt-scale laser pulses in ambient air[J]. Nature Photonics, 2024, 18: 54 – 59.

[7] ATALAR O, ARBABIAN A. Polarization-insensitive wide-angle resonant acousto-optic phase modulator [J]. Optics Letters, 2024, 49(8): 2141 – 2144.

[8] BONNER W A, SINGH S, VAN UITERT L G, et al. High quality tellurium dioxide for acousto-optic and non-linear applications [J]. Journal of Electronic Materials, 1972, 1(1): 154 – 164.

[9] MIYAZAWA S, KONDO S. Preparation of paratellurite TeO_2[J]. Materials Research Bulletin, 1973, 8 (10): 1215 – 1221.

[10] PINNOW D A, VAN UITERT L G, WARNER A W, et al. Lead molybdate: a melt-grown crystal with a high figure of merit for acousto-optic device applications [J]. Applied Physics Letters, 1969, 15(3): 83 – 86.

[11] UCHIDA N, NIIZEK N. 声光偏转材料和技术[J]. 红光, 译. 激光与红外, 1975(增刊3): 1 – 24.
UCHIDA N, NIIZEK N. Acousto-optic deflection materials and technology [J]. Translated by HONG G. Laser & Infrared, 1975(Suppl 3): 1 – 24. (in Chinese)

[12] HU F A, GUO F F, WANG Z, et al. BaO—TeO_2—MoO_3 glass: excellent candidate for acousto-optic modulators with high diffraction efficiency, fast response, and stable operation [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2023, 11(44): 15750 – 15758.

[13] GUO F F, HU F A, CHEN L J, et al. High-quality acousto-optic modulators with high diffraction efficiency, polarization extinction ratio, and small insertion loss based on a novel BaO—TeO_2—WO_3 glass [J]. Advanced Materials, 2024, 36(8): 2308079.

[14] ZHANG K, GUO F F, JIN Y C, et al. A novel α-$BaTeMo_2O_9$ acousto-optic switch for generating stable 639 nm pulsed laser[J]. Photonics, 2023, 10(3): 334.

[15] LI T R, HUANG L, GUO F F, et al. Ultrafast visible fiber laser mode-locked by frequency-shifted feedback of an α-$BaTeMo_2O_9$ crystal acousto-optic modulator [J]. Optics Letters, 2024, 49(22): 6357 – 6360.

[16] 宋景翠, 杨志强, 尚海燕, 等. 硫系异质集成光子器件[J]. 光学学报, 2024, 44(15): 1513005.
SONG J C, YANG Z Q, SHANG H Y, et al. Heterogeneous chalcogenide integrated photonic devices [J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(15): 1513005. (in Chinese)

[17] QIU Z X, DAI S X, LIU C C, et al. Novel Ge-As-Se chalcogenide glass for potential high Brillouin gain coefficient of fiber [J]. Ceramics International, 2023, 49 (10): 16433 – 16439.

[18] DING S J, DAI S X, WU Z C, et al. High-performance acousto-optic modulator based on environmentally favorable $Ge_{20}Sb_{15}Se_{65}$ chalcogenide glass[J]. Ceramics International, 2021, 47(21): 30343 – 30348.

[19] XU Z H, DAI S X, LIU C C, et al. Investigation of the Ga-Sb-S chalcogenide glass with low thermo-optic coefficient as an acousto-optic material [J]. Ceramics International, 2022, 48(15): 21663 – 21670.

[20] WU M, DAI S X, QIU Z X, et al. Evaluation and selection of chalcogenide glasses as an acousto-optic medium material under multiple criteria [J]. Optical Materials, 2025, 159: 116556.

[21] CUI A, WANG Y Y, WU M, et al. Ge-As-S chalcogenide glasses with high laser-induced damage threshold at 1.55 μm for acousto-optic applications [J]. Ceramics International, 2025, 51(7): 8816 – 8823.

[22] HU Y S, TIAN K Z, LI T T, et al. Mid-infrared nonlinear optical performances of Ge-Sb-S chalcogenide glasses [J]. Optical Materials Express, 2021, 11(3): 695 – 706.

[23] CAO Z F, DAI S X, DING S J, et al. Correlation between acousto-optic and structural properties of Ge-Sb-S chalcogenide glasses [J]. Ceramics International, 2020, 46(8): 10385 – 10391.

[24] 丁胜杰. Ge-As-S 和 Ge-Te-AgI 硫系玻璃的声光性能研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2021.
DING S J. Acousto-optic properties of Ge-As-S and Ge-Te-AgI chalcogenide glasses[D]. Ningbo: Ningbo University, 2021. (in Chinese)

[25] 赵啟大, 苗银萍. 声光信号处理: 理论和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2022.
ZHAO Q D, MIAO Y P. Acousto-optic signal processing theory and application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2022. (in Chinese)

[26] FANG Y, FURNISS D, JAYASURIYA D, et al. Methods for determining the refractive indices and thermo-optic coefficients of chalcogenide glasses at MIR wavelengths [J]. Optical Materials: X, 2019, 2: 100030.

[27] SHEN H T, CAO Z F, DING S J, et al. Photoelastic coefficient measurement method of optical glasses based on Mach-Zehnder interferometer [J]. Optical Engineering, 2022, 61: 034111.

[28] 王大贵, 吴中超, 王晓新, 等. 一种高速光纤声光调制器[J]. 压电与声光, 2018, 40(2): 155 – 156, 161.
WANG D G, WU Z C, WANG X X, et al. A high-rate optical fiber acousto-optic modulator [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2018, 40(2): 155 – 156, 161. (in Chinese)

[29] POMERANTZ M. Ultrasonic attenuation by phonons in insulators[C]//Proceedings of the Ultrasonics Symposium, 1972.

[30] EL-MALLAWANY R, SIDKEY M, KHAFAGY A, et al. Ultrasonic attenuation of tellurite glasses [J]. Materials Chemistry and Physics, 1994, 37(2): 197 – 200.

[31] DAVIS M J, JAMES W, Ⅲ, WEBER G, et al. IRG 27: a "new" glass type for multi-band IR optics[C]// Proceedings of Optical Components and Materials XIV, 2017.

[32] 陈华志, 周建国, 吴中超, 等. 超高速光纤耦合声光调制器的设计及其应用[J]. 应用声学, 2019, 38(2): 166 – 172.
CHEN H Z, ZHOU J G, WU Z C, et al. Design and application of ultra high-speed fiber coupled acousto-optic modulator[J]. Journal of Applied Acoustics, 2019, 38(2): 166 – 172. (in Chinese)

[33] 曹家强, 刘保见, 杨涛, 等. Cu—Cu 键合工艺及其在高功率声光器件中的应用[J]. 压电与声光, 2019, 41(5): 654 – 656.
CAO J Q, LIU B J, YANG T, et al. Cu—Cu bonding technique and applications to high power acousto-optic devices[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2019, 41(5): 654 – 656. (in Chinese)