

激光与光电子学进展

声光晶体和玻璃材料及其调制器的研究进展

许增华^{1,3,4}, 戴世勋^{1,3,4*}, 林常规^{1,3,4}, 吴中超²

¹宁波大学高等技术研究院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浙江省光电探测材料及器件重点实验室, 浙江 宁波 315211;

⁴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 声光调制器在激光技术、网络通信和雷达波谱分析仪等领域已得到广泛应用。作为声光器件的核心元件, 各类声光材料得到广泛关注。首先, 简要概述声光衍射的基本概念和声光材料的重要性能参数, 包括衍射效率、品质因数及超声衰减; 其次, 回顾常见的声光晶体和玻璃材料的研究历程, 及其在声光调制器领域的应用; 最后, 综述近年来新型声光材料的研究现状, 指出晶体和玻璃分别作为商用化声光材料存在的优势与不足, 为进一步提高声光器件的性能, 拓展应用领域提供了参考和借鉴。

关键词 材料; 声光材料; 声光效应; 声光调制器; 品质因数

中图分类号 TN204; TB57

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1516007

Research Progress of Acousto-Optic Crystals, Glass Materials and Modulators

Xu Zenghua^{1,3,4}, Dai Shixun^{1,3,4*}, Lin Changgui^{1,3,4}, Wu Zhongchao²

¹Laboratory of Infrared Materials and Devices, The Research Institute of Advanced Technologies, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China;

²The 26th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China;

³Key Laboratory of Photoelectric Materials and Devices of Zhejiang Province, Ningbo, Zhejiang 315211, China;

⁴Engineering Research Center for Advanced Infrared Photoelectric Materials and Devices of Zhejiang Province, Ningbo, Zhejiang 315211, China

Abstract Acousto-optic modulators have been widely used in many fields such as laser technology, network communication, and radar spectrum analyzer. As the key component of acousto-optic devices, various types of acousto-optic materials have been extensively studied. First, the basic theory of acousto-optic diffraction and the important performance parameters of acousto-optic materials, including diffraction efficiency, quality factor, and ultrasonic attenuation, are briefly summarized; second, the research progress of acousto-optic crystals and glass materials and their applications in the field of acousto-optic modulators are reviewed; finally, the research status of new acousto-optic materials in recent years is summarized and stated, pointing out the advantages and disadvantages of crystal and glass as commercial acousto-optic materials respectively, which provides reference for further improving the performance of acousto-optic devices and expanding their application fields.

Key words materials; acousto-optic material; acousto-optic effect; acousto-optic modulator; figure of merit

OCIS codes 160.1050; 230.1040; 230.4110

收稿日期: 2021-05-21; 修回日期: 2021-06-16; 录用日期: 2021-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(61875094)、宁波大学王宽诚幸福基金

通信作者: *daishixun@nbu.edu.cn

1 引言

声光效应是声光学中研究光和声相互作用的一种重要物理效应,具体描述为当超声波在介质中传播时会引起介质的折射率发生周期性变化,光波通过该介质时会发生衍射现象。光被声场衍射这一概念最早可追溯到 20 世纪 20 年代,法国巴黎大学 Brillouin^[1]首次从理论上讨论了光被声波散射的问题。1932 年,美国麻省理工学院 Debye 等^[2]首次通过实验验证了该现象,此后声光效应理论和应用研究得到迅速发展。基于声光效应的器件主要包括声光调制器^[3]、声光偏转器^[3]和声光可调谐滤波器^[4]等。其中,声光调制器利用 Bragg 衍射原理,对激光光束的强度、方向和频率进行调制。与机械调制器和电光调制器相比,声光调制器具有体积小、衍射效率高、温度稳定性高及消光比大等优点^[5],已广泛地应用到激光技术、网络通信和雷达波谱分析仪等领域^[6-10]。

作为声光器件的核心元件,声光材料的选择至关重要。1930 年, Gross^[11]首次报道了以液体(水、酒精和甲苯等)作为声光介质从而成功观察到声光衍射的现象。然而液体声光材料普遍存在光学稳定性低和超声衰减大等缺点,在新型声光材料问世前,研究者们将超声衰减较小的水作为常用的声光介质。直到 1960 年, Maiman^[12]制成世界上第一台红宝石激光器,促进了新型声光材料研究的发展。此后,各类声光晶体和玻璃材料的相关报道不断涌现,也推动了声光调制器在激光技术领域的应用。20 世纪 60 年代,美国联合飞机公司和 Bell 实验室等机构开展了声光调制器对激光的重复频率、脉冲持续时间和平均功率等调制研究。1963 年, DeMaria 等^[13]首次将熔融石英制成的声光调制器用于红宝石激光器的激光调制,产生了持续时间为

75 ns 的激光脉冲。到 20 世纪 70 年代中期,声光调制器已经在激光打印、激光显示、激光的调 Q 和锁模等应用方面得到了全面快速的发展^[10]。

新型声光材料不断涌现不仅提升了声光器件的性能,还拓展了声光器件的应用场景。本文简要概述了声光效应基础理论和声光材料的重要性能参数,分类综述了声光晶体和玻璃的研究历程及其在声光调制器方面的商用情况,并详细介绍了新型声光材料的研究现状,最后对其发展前景进行了展望。

2 声光衍射基本概念

当超声波在介质中传播时,引起介质的折射率发生周期性改变,介质可充当一个相位(体)光栅并将入射光波衍射出多级光束。在早期的理论发展中,研究者分别通过波动图和粒子图来详细说明声光相互作用的基本关系^[14]。20 世纪 70 年代中期, Chang^[15]首次提出声波和光波在介质中的耦合波方程,并利用动量匹配和失配分析声光相互作用的规律。通过 Klein-Cook 参数 Q 来判定声光相互作用的类型,即当 $Q \gg 1$ 和 $Q \ll 1$ 时,分别对应 Raman-Nath 衍射和 Bragg 衍射。

Raman-Nath 衍射和 Bragg 衍射是声光相互作用的两种基本类型。当声光相互作用区较短、超声波频率较低时,光波垂直于声波矢进行入射,可产生多级衍射光,并且高级衍射光对称分布在 0 级衍射光的两侧,即发生了 Raman-Nath 衍射,此时该介质可作为相位光栅,如图 1(a)所示。当声光相互作用区较长、超声波频率较高时,光束以一定的 Bragg 角射入,可以观察到只有 0 级和 +1 级(或 -1 级)衍射光,并且 +1 级(或 -1 级)衍射光束以相同的分离角(即 Bragg 角)射出,该衍射类型为 Bragg 衍射,此时该介质可作为一个体光栅,如图 1(b)所示。与 Raman-Nath 衍射相比, Bragg 衍射在理想条件下的

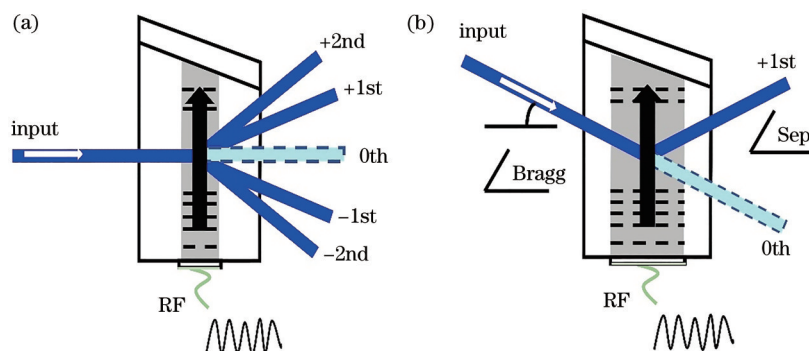


图 1 声光效应示意图。(a) Raman-Nath 衍射; (b) Bragg 衍射

Fig. 1 Schematic of acousto-optic effect. (a) Raman-Nath diffraction; (b) Bragg diffraction

一级衍射效率可达 100%。目前,实际应用的声光器件的工作方式均为 Bragg 衍射。

3 声光材料的重要性能参数

衡量声光材料性能的相关指标参数主要包括衍射效率 η 、声光品质因数 M_2 和超声衰减 α 。

3.1 衍射效率

衍射效率 η 是声光调制器最为基本的性能指标^[16],一般用来表征器件对光束性质调制能力的大小,间接地反映了声光材料性能的优劣。其定义式^[17]为

$$\eta = \frac{I_1}{I_2} = \frac{\pi^2 P_0 L M_2}{2\lambda^2 H}, \quad (1)$$

式中: I_1 为一级衍射光强; I_2 为入射光强; λ 为入射波长; L 为声光相互作用长度; H 为声束高度; P_0 为声光单元中的超声功率。根据(1)式可知,在一定的超声功率范围内,衍射效率随着超声功率的增加而增加,但在实际应用中还需考虑材料的热稳定性,因此,提高 η 值的最有效途径是寻找 M_2 值高的声光材料。

3.2 声光品质因数

声光品质因数 M_2 是衡量声光材料性能的重要指标之一。根据(1)式可知, η 值相同时, M_2 值越高,衍射光所需的超声功率就越低,从而最大程度地降低了热效应。Dixon^[18]将 M_2 用于表征声光材料的固有衍射效率,定义式为

$$M_2 = \frac{n^6 p^2}{\rho \nu^3}, \quad (2)$$

式中: n 为材料折射率; p 为材料的光弹系数; ρ 为材料的密度; ν 为声速。研究者希望新型声光材料具有较高的 M_2 值,为此可以选择具有高折射率、大光弹系数、低密度及低声速的材料作为声光介质。然而,根据 Pinnow^[19]研究的理论,较高的折射率通常

和较低的密度不可能同时获得,且随着光波长的增加,特定声光材料的 M_2 值趋于降低,因此在实际应用中应折衷选择。

3.3 超声衰减

声光器件的性能还取决于相互作用介质的声学特性。通常,超声衰减的主要原因是声吸收,即热声子分布向平衡方向弛豫导致的 Akhieser 损耗^[20]。Woodruff 等^[21]给出了超声衰减 α 的表达式

$$\alpha = \frac{\gamma^2 \omega^2 \kappa T}{\rho \nu^5}, \quad (3)$$

式中: γ 为 Grüneisen 常数; ω 为频率; κ 为热导率; T 为温度。根据(3)式可知,超声衰减 α 与声频率 ω 的平方成正比,损失的声能将以热的形式消散,易造成器件在工作时温度过高导致声光元件的光学输出失真的不良后果。因此,采用高声速和低 α 值的声光材料更加合适,特别是在较高声频率工作的状态下。如熔融石英,虽然其 M_2 值 ($1.51 \times 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}@633 \text{ nm}$) 相比其他材料偏小,但较低的超声衰减 ($12 \text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{GHz}^{-2}$) 使其成为商用声光器件常用的材料之一。

4 声光晶体材料

声光器件性能提升依赖于声光材料性能的提升和更优良的新型声光材料的出现。虽然声光材料种类繁多,但基本可分为晶体和玻璃两大类。

4.1 常见的声光晶体材料

晶体材料普遍具有卓越的声光性能,如较高的 M_2 值 ($>10^{-13} \text{ s}^3/\text{kg}$) 和较低的超声衰减 α 值 ($<15 \text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{GHz}^{-2}$)。按照工作波长划分,常见的声光晶体可分为 2 类:可见光波段的二氧化碲 (TeO_2)、石英 (SiO_2) 和钼酸铅 (PbMoO_4) 等;红外光波段的砷化镓 (GaAs)、锗 (Ge) 和氯化亚汞 (Hg_2Cl_2) 等。部分晶体实物如图 2 所示。

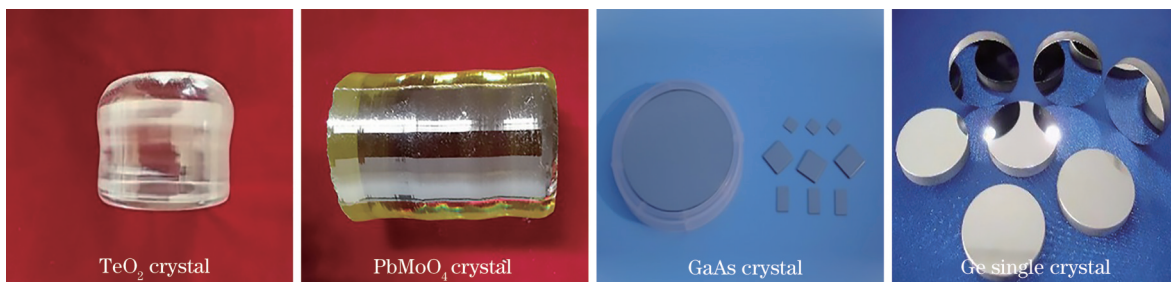


图 2 几种常见的声光晶体材料

Fig. 2 Several common acousto-optic crystal materials

TeO_2 是目前应用最为广泛的声光晶体材料之一。1969 年日本 NTT 公司 Uchida 等^[22]首次报道了

TeO_2 晶体在 $\langle 110 \rangle$ 方向的 M_2 值为 $793 \times 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$, 随后其实用化进程快速发展。20 世纪 70 年代以来,

美国 Bell 实验室和 CTI 公司、日本 NTT 公司、国内中国科学院上海硅酸盐研究所等众多研究机构对高光学质量和大尺寸的 TeO_2 晶体生长进行了深入研究^[23-25]。其中,中国科学院上海硅酸盐研究所储耀卿等^[25]利用改进的坩埚下降法生长出尺寸大于 $55\text{ mm} \times 55\text{ mm} \times 120\text{ mm}$ 的高纯 TeO_2 晶体,满足了高性能声光器件的要求。

石英晶体具有良好的导热性、高的光学均匀性及较低的超声衰减。1941 年,Atanasoff 等^[26]对石英晶体的弹性进行了详细的研究。随后研究者测量出 M_2 值为 $2.38 \times 10^{-15}\text{ s}^3/\text{kg}$,声速为 $5.72 \times 10^5\text{ cm/s}$,其中尤其是 $3\text{ dB} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{GHz}^{-2}$ 的低超声衰减使得石英晶体在声光器件中得以广泛应用,它在可见光波段的 η 值高达 85% 以上^[27]。

PbMoO_4 晶体具有不溶于水、光损耗低及易于生长等特性。1969 年美国 Bell 实验室 Pinnow 等^[28]细致地研究了 PbMoO_4 晶体的弹性、光学和热学性质。研究发现, PbMoO_4 晶体在 488 nm 波长下的 M_2 值为 $56.47 \times 10^{-15}\text{ s}^3/\text{kg}$,同时具有较低的 α 值 ($15\text{ dB} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{GHz}^{-2}$)。用该材料制作的声光偏转器具有 80 MHz 的带宽,在 1 W 的电驱动功率下,其 η 值为 50%。

随着民用空间通信、激光加工及军用激光雷达等应用的发展^[29],声光技术的应用从可见光逐步拓展到红外波段,与之相应的红外声光晶体材料也得到发展。 GaAs 是一种常用的近红外声光晶体材料,特点是在声学上具有各向异性,在声波纵向上 M_2 值高达 $104 \times 10^{-15}\text{ s}^3/\text{kg}$ ^[5]。1967 年,Dixon^[18]报道了 GaAs 晶体在 200 MHz、425 MHz 超声频率下的 α 值分别为 $9.9\text{ dB} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{GHz}^{-2}$ 、 $137.5\text{ dB} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{GHz}^{-2}$ 。但由于其超声衰减在高频时陡增,该材料仅适合于频率小于 500 MHz 的声光调制。 Ge 单晶具有超宽的红外透光范围 ($2 \sim 20\text{ }\mu\text{m}$) 和优良的机械性能。1970 年,Abrams 等^[30]报道的 Ge 单晶的 M_2 值高达 $540 \times 10^{-15}\text{ s}^3/\text{kg}$,因此 Ge 单晶被视为红外波段优良

的声光晶体材料。此外它还具有较慢的声速 ($5.5 \times 10^5\text{ cm/s}$) 和较小的超声衰减 ($9\text{ dB} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{GHz}^{-2}$),在红外调制和偏转应用方面具有较大的优势。红外 Hg_2Cl_2 晶体在透过窗口 ($0.38 \sim 20\text{ }\mu\text{m}$) 内具有大的双折射、较慢的声速和较高的 M_2 值。1992 年,美国西屋电气公司 Gottlieb 等^[31]通过改进生长技术,获得了尺寸为 $\varnothing 5.5\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 的高质量 Hg_2Cl_2 晶体 (\varnothing 为直径), α 值由原先的 $375\text{ dB} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{GHz}^{-2}$ 降至 $230.5\text{ dB} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{GHz}^{-2}$, M_2 值为 $640 \times 10^{-15}\text{ s}^3/\text{kg}$ 。但 Hg_2Cl_2 晶体属于重金属卤化物,化学稳定性较差且具有毒性,制备过程和后续器件加工存在安全隐患和环保问题。表 1 为几种常见晶体材料的声光参数^[27]。

表 1 常见晶体材料的声光特性参数^[27]

Table 1 Acousto-optic characteristic parameters of commonly used crystal materials^[27]

Types of acousto-optic crystal materials	n	$M_2 / (10^{-15}\text{ s}^3/\text{kg})$	$\alpha / (\text{dB} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{GHz}^{-2})$
Quartz crystal	1.55	2.38	3
TeO_2	2.26	793	15
PbMoO_4	2.39	56.47	15
GaAs	3.37	104	9.9
Ge	4.00	540	9
GaP	3.31	44.6	6

4.2 基于常见声光晶体材料的声光调制器

目前,商用声光调制器使用的介质多以石英、 TeO_2 和 Ge 单晶为主。国内外声光器件研发生产商业公司较多,其中以英国 Gooch&Housego (G&H)、法国 AA OPTO-Electronic (AA)、美国 Brimrose 和 Isomet、中国电子科技集团重庆声光电有限公司 (CETC) 5 家制造商为代表,这些公司为科学研究和工业应用提供了系列的声光调制器产品,部分产品实物如图 3 所示。表 2 列出了 5 家商业公司几种不同介质声光调制器产品的工作波长、调制带宽、中心频率、上升时间及衍射效率。

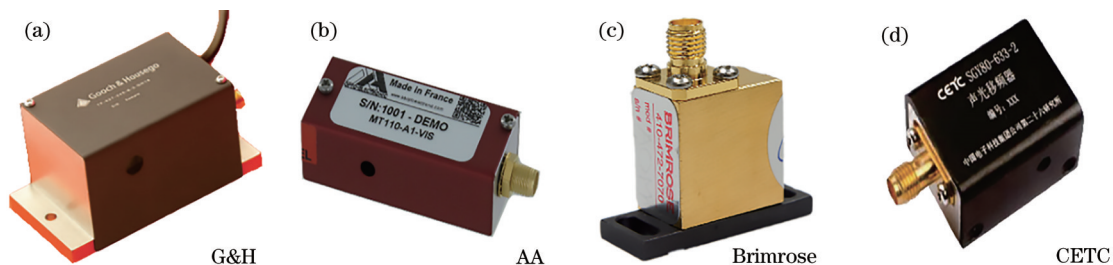


图 3 四家制造商生产的声光调制器

Fig. 3 Acousto-optic modulators produced by four manufacturers

表 2 基于晶体材料的声光调制器的产品型号和相关参数

Table 2 Product model and related parameters of acousto-optic modulator based on crystal materials

Manufacturer	Crystal	Wavelength /nm	Modulation bandwidth /MHz	Centre frequency /MHz	Rise time/ns	η /%
G&H ^[32]	TeO ₂	400	6	80	65	90
	Quartz	257		200	10	75
	Ge	9400		40/60	120	>90
AA ^[33]	TeO ₂	450-700	80	250	6	85
	Quartz	488-633	8	110	50	85
	Ge	9300	4	40	120	75
Isomet ^[34]	TeO ₂	442-633		350	7	>80
	Quartz	532	20	80	114	>85
	PbMoO ₄	488-633	30	80	36	>85
	Ge	10600	10	40	470	>60
Brimrose ^[35]		380-1600	100		5.5	50
		600-1600	400		1.4	>25
		1000-2500	8		68	>80
CETC ^[36]		532	>30	150	160	>80
		633		40	150	>75
		10600		40		>80

由表 2 可知,这些商用声光调制器的工作波长覆盖紫外到可见及近红外波段,基于 Ge 单晶的声光调制器可用于 10.6 μm 附近的远红外波段,调制带宽范围从 4 MHz 到 400 MHz,中心频率大多分布在 40~100 MHz 之间,上升时间为 1.4 ns 到 470 ns 不等, η 的平均值为 75%。其中 G&H 公司利用单晶 Ge 制作的调制器实现了 90% 以上的 η 值。上升时间是声光调制器的关键参数,它决定着器件调制速度的快慢。英国 G&H 公司选择石英晶体研发的 AOMO 3200-1220 型调制器的上升时间最低为 10 ns。美国 Isomet 公司的 M1260-T350L-0.2 型调制器将上升时间缩短至 7 ns。法国 AA 公司基于 TeO₂ 晶体研发的 MT250-A0.5-VIS 型调制器成功实现了 6 ns 的最低上升时间。另外,Brimsrose 公司研发的 GPM-1600-400 型调制器的上升时间低至 1.4 ns,实现了最快的调制速度。国内中国电子科技集团公司第二十六研究所(简称 26 所)的声光调制器与国外 4 家商业公司的产品相比,除上升时间较高外,其他各参数均差异较小。另外,26 所还整合了射频驱动器和器件,具有体积小、频率稳定性高等特点。在设计声光调制器时,不仅要考虑器件的衍射效率,还要考虑工作波长、上升时间、调制带宽以及中心频率等重要参数,以确定最佳的声光调制器和射频驱动程序工作方案。随着技术的提升,更高频率(>120 MHz)的声光调制器是国内外光纤

激光器制造商的主流选择,如英国 G&H 公司的 120 MHz、150 MHz 声光调制器,体积更小、调制效率更高,获得市场的广泛认可。

4.3 新型声光晶体研究进展

近年来,国内外众多科研机构开展了新型声光晶体材料的研究,主要围绕 3 个方面。

1) 新型铁电声光晶体。铁电材料在强激光作用下易产生较强的声光效应,目前 LiNbO₃、LiTaO₃ 以及 KH₂PO₄ 等常见铁电晶体已经应用于激光器调 Q 开关。为了拓宽声光铁电材料的工作波段范围和应用领域,研究者开展了新型的铁电晶体材料研究工作。

Sn₂P₂S₆ 晶体属于半导体铁电材料,已广泛地应用于激光频率的转换和光限幅等领域。2006 年乌克兰物理光学研究所 Mys 等^[37]制备了尺寸为 5.43 mm × 5.08 mm × 4.13 mm 的 Sn₂P₂S₆ 晶体,估计了该晶体材料在 632.8 nm 波长下的 M_2 值约为 $2000 \times 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$ 。随后,Martynyuk-Lototska 等^[38]首次实验测得 Sn₂P₂S₆ 晶体在 632.8 nm 的 M_2 值高达 $1700 \times 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$,与 Mys 等估计的数值具有相同数量级。当超声功率为 $1.5 \times 10^{-3} \text{ W}$ 时,Sn₂P₂S₆ 晶体的 η 值为 19.2%,而在相同条件下 TeO₂ 晶体的 η 值仅为 14%。此外,变化组成比例,可有效调控 Sn_{2y}Pb_{2(1-y)}P₂S_{6x}Se_{6(1-x)} 系列晶体的折射率和带隙能量等参数,使其成为在可见光范围内极有前景的晶

体材料之一。TlMX₂(M=In; X=S, Se)是层状铁电晶体材料,具有高度各向异性。最重要的是,TlInS₂晶体相变时的弹性失稳、声子的软化和弹性刚度系数的反常行为导致声速较低,而较低声速度往往意味着较高的 M_2 值。2009年Alekperov等^[39-40]制备出TlInS₂和TlInSe₂晶体,尺寸分别为3.88 mm×4.26 mm×

2.05 mm和15 mm×15 mm×30 mm,如图4(a)、(b)所示。随后,乌克兰物理光学研究所Martynyuk-Lototska等^[41]测得TlInS₂晶体在632.8 nm波长处的 M_2 值约为 $2200 \times 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$,最低声速为 $0.72 \times 10^5 \text{ cm/s}$,TlInSe₂晶体的 M_2 值为 $156 \times 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$ ^[42]。这类晶体可为声光器件提供一种高效的备选声光介质。



图4 三种新型声光晶体材料。(a) TlInS₂; (b) TlInSe₂; (c) InI

Fig. 4 Three new acousto-optic crystal materials. (a) TlInS₂; (b) TlInSe₂; (c) InI

2) 高 M_2 中远红外声光晶体。近年来,声光器件已开始应用于红外波段内光束的分析和调制。因非环保因素,限制了Tl₃AsSe₃、Tl₃AsS₄、Hg₂Cl₂和Cs₂HgCl₄等红外晶体的实际应用。由于AgGaGe₃Se₈晶体具有较宽的透过窗口(0.60~16 μm),2015年乌克兰物理光学研究所Martynyuk-Lototska等^[43]报道了AgGaGe₃Se₈晶体的最小声速为 $0.853 \times 10^5 \text{ cm/s}$,在600 nm波长下的 M_2 值为 $280 \times 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$ 。随后研究了高折射率(2.43)和高激光损伤阈值(250 MW/cm²)的AgGaGeS₄晶体,并估计出在7.56 μm波长处的 M_2 值为 $500 \times 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$ ^[44]。2020年,四川大学Wu等^[45]改进了AgGaGeS₄晶体生长技术,沿[001]方向生长出∅40 mm×60 mm的AgGaGeS₄晶体。

远红外波段量子级联激光器近年来得到了快速发展^[46]。由于衍射效率和波长的平方成反比,要设计工作波长在20 μm以上的声光器件,声光材料需具备较高的远红外透过率和 M_2 值。常用的Ge、GaAs、Hg₂Cl₂和TeO₂等红外晶体在20 μm以上均不透光,与此同时,卤化物晶体因较低的折射率, M_2 值较低,卤化汞晶体虽然满足宽光谱和高 M_2 值,但声衰减大且制备困难。因此,寻找高性能声光材料就成为一个棘手问题。

TlBr-TlI晶体是一种具有立方晶体结构、宽透光范围(0.53~50 μm)的典型晶体材料。2019年,俄罗斯国立大学Voloshinov等^[47]报道了用于远红外波段的TlBr-TlI晶体,其在波长为1150 nm处的折射率为2.42,当超声频率为220 MHz时, M_2 值为 $210 \times 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$ 。但TlBr-TlI晶体的化学性质不稳

定且有毒,应用受限。2016年,俄罗斯科学院Fedorov等^[48]制备出高光学质量和尺寸为∅14 mm×70 mm的InI晶体,如图4(c)所示。2017年莫斯科国立大学Porokhovnichenko等^[49]首次报道了单晶InI在1150 nm波长下的 M_2 值高达 $1100 \times 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$ 。2020年,该课题组通过对InI晶体的 M_2 值、光学各向异性及透过窗口等进行综合分析,指出InI晶体是适用于远红外声光器件极具潜力的声光晶体材料之一^[50]。

3) 用于高功率激光声光调制器的声光晶体材料。Q开关是工作在激光谐振腔内的声光调制器,通过主动控制腔的Q因子(损耗)来产生高强度的脉冲光。目前,石英晶体或熔融石英是常用于高功率激光器调Q开关的声光材料,但这些材料的 M_2 值较低,为使其实现高 η 值,需要百瓦量级的超声功率,高功率带来的散热问题尚未得到较好的解决。为了寻找适合高功率激光声光调制器的声光晶体材料,2012—2015年,俄罗斯科学院研究了一系列具有抗辐射性的KRe(WO₄)₂晶体(其中Re为Gd, Yb, Lu 稀土元素),其 M_2 值为 $0.1 \times 10^{-15} \sim 19 \times 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$ ^[51-53]。2020年,俄罗斯物理技术和无线电技术测量科学研究所报道了基于KGd(WO₄)₂晶体的声光调制器在Cr:Er:YSGG激光器中用作调Q开关时,实现了最大输出能量为32 mJ的1.064 μm Nd:YAG激光,脉冲持续时间为60 ns,并且可以稳定输出兆瓦级功率激光^[54]。

此外,常用的声光晶体材料一般只有一个光轴,因此材料叫作单轴晶体,如PbMoO₄和HgCl₂等。虽然双轴(两个光轴方向)晶体中的光传播要比单

轴晶体的复杂,但双轴晶体具有更优异的声光性能。山东大学晶体材料国家重点实验室 Wu 等^[55-56]在 2017 年和 2020 年相继报道了 β -BaTeMo₂O₉ (β -BTM) 和 α -BaTeMo₂O₉ (α -BTM) 双轴晶体的声光特性。研究发现在 1064 nm 处, β -BTM 声光调制器的衍射角和衍射效率分别为 1.420° 和 78.1%。将 β -BTM 声光调制器用于 Nd:YVO₄ 调 Q 激光输出时,在泵浦功率为 3.5 W 的条件下,可实现 5 kHz 重复频率的脉冲输出,调制脉冲宽度的最小值可达

6 ns,如图 5 所示。与 β -BTM 相比, α -BTM 具有更大的折射率(2.192@1064 nm)、更高的对称性和更宽的透过窗口(0.4~5.5 μ m),其 M_2 值为 $10.18 \times 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$,且基于该晶体的调制器在 1064 nm 处的衍射角和衍射效率分别为 1.432° 和 82.1%。将 α -BTM 声光调制器与拉曼激光输出相结合,在 13.5 W 的泵浦功率下获得了重复频率和最窄宽度分别为 5 kHz 和 15 ns 的脉冲输出,输出功率为 10.93 W。

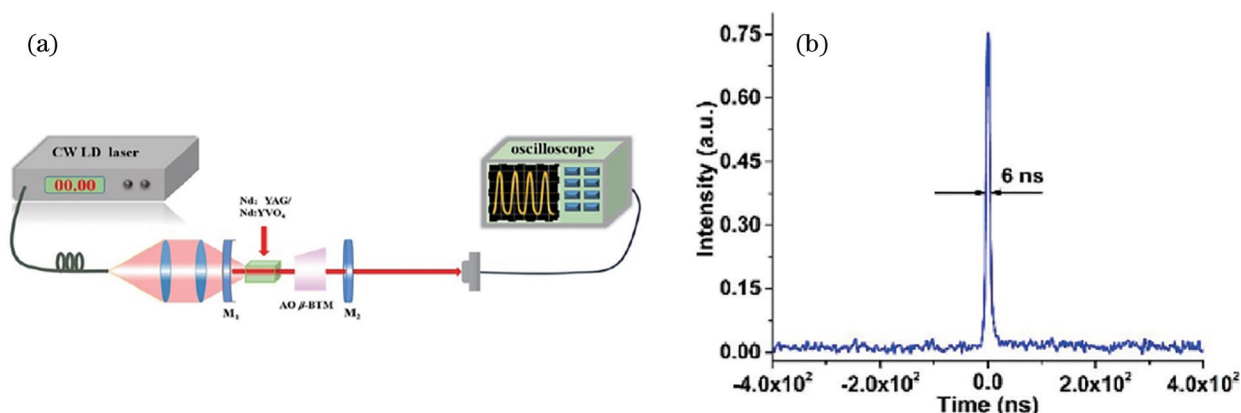


图 5 β -BTM 声光调制器用于 Nd:YVO₄ 调 Q 激光输出^[55-56]。(a) 声光调 Q 的 Nd:YAG/Nd:YVO₄ 激光器的实验装置; (b) 利用声光调制器获得窄脉冲输出

Fig. 5 β -BTM acousto-optic modulator is used for Nd:YVO₄ Q-switched laser output^[55-56]. (a) Experimental device of acousto-optic Q-switched Nd:YAG/Nd:YVO₄ laser; (b) narrow pulse output obtained by acousto-optic modulator

表 3 列出近年来报道的部分典型的新型声光晶体和性能参数,同时汇总了改进后的 GaP、CaWO₄ 及 Tl₃AsS₄ 等晶体材料的最新数据。新型声光晶体具

有覆盖紫外、可见光和红外波段的宽透过窗口、较慢的声速(约 $2 \times 10^5 \text{ cm/s}$)、几十个 $\text{dB} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{GHz}^{-2}$ 的超声衰减、非常高的 M_2 值($\geq 10^{-13} \text{ s}^3/\text{kg}$)等特点。值

表 3 新型声光晶体的性能参数

Table 3 Performance parameters of new acousto-optic crystals

Material	Refractive index	Transparent window / μm	Acoustic velocity / ($10^5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	$M_2 / (10^{-18} \text{ s}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	Wavelength / nm	Acoustic attenuation / ($\text{dB} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{GHz}^{-2}$)	Reference
Sn ₂ P ₂ S ₆	3.09	0.53–8.0	1.56	1700	632.8		[38]
AgGaGeS ₄	2.41	0.50–11.5	1.57	500	600		[44]
TlBr-TII	2.42	0.53–50		210	2000	10	[47]
InI	2.55	0.62–51	2.23	1100	1150		[49]
KY(WO ₄) ₂	2.08	0.40–5	4.56	13.5	633		[51]
KLu(WO ₄) ₂	2.11	0.36–5.1	2.73	10.7	633		[53]
KGd(WO ₄) ₂	2.04	0.35–3.5	4.30	16.6	1060		[54]
α -BaTeMo ₂ O ₉	2.19	0.40–5.5	4.37	10.18	1064	1.14	[56]
GaP	3.31	0.60–10	6.52	98	632.8	6	[57]
CaWO ₄	1.92	0.27–10	1.88	14.0	633		[58]
Tl ₃ AsS ₄	2.77	0.60–12	0.63	1990	632.8	29	[59]
			2.07	945	632.8		

得注意的是,晶体具有各向异性,不同作用方向上获得的 M_2 值可能会相差一个数量级以上。另外,这些新型声光晶体在生长技术工艺稳定性、大尺寸制备方面还有待提升。

5 声光玻璃材料

5.1 常见的声光玻璃

与声光晶体相比,玻璃材料具有光学均匀性好、制造成本低、易于批量化生产等优点。此外,还可以通过组成优化进一步改善玻璃光学、物理和化

学等性质。常见的声光玻璃按成分可分为氧化物玻璃和非氧化物玻璃两大类,其中氧化物玻璃以硅酸盐玻璃、碲酸盐玻璃、重金属玻璃为主;非氧化物玻璃以硫系玻璃为主。部分声光玻璃实物如图 6 所示。

石英玻璃作为最早被研究的声光玻璃材料,其 α 值仅为 $12 \text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{GHz}^{-2}$, M_2 值仅为 $1.51\times 10^{-18} \text{ s}^3/\text{g}^{[14]}$ 。鉴于石英玻璃易于制造且光学质量好,从 Dixon 等^[60]开始,研究者将其作为测量声光材料 M_2 值的标准介质。

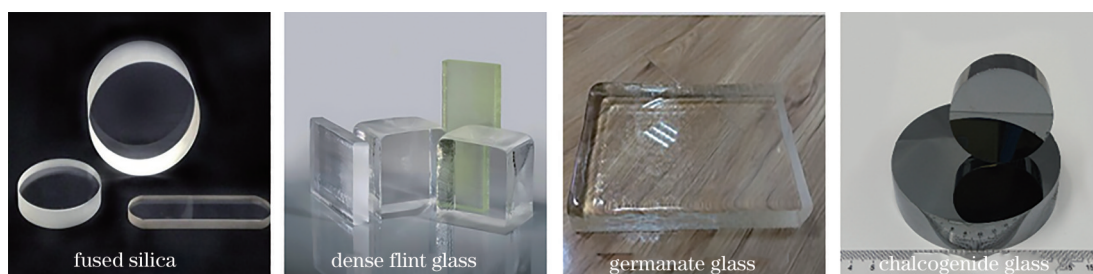


图 6 几种常见的声光玻璃

Fig. 6 Several common acousto-optic glasses

20 世纪 70 年代,以 SiO_2 、 K_2O 和 PbO 等原料熔炼而成的重火石玻璃成为当时性质最佳的声光玻璃材料。1975 年,德国西门子公司 Eschler 等^[61]报道了系列重火石玻璃的声光特性,其中 SF-59 牌号玻璃在波长为 632.8 nm 的 M_2 值为 $21.3\times 10^{-18} \text{ s}^3/\text{g}$,非常适于不需要低超声衰减的声光调制器。为了寻找高品质因数的新型声光玻璃材料,日本松下公司 Yano 等^[62]报道了 TeFD5 牌号的碲酸盐玻璃在 632.8 nm 波长下的 M_2 值为 $23.9\times 10^{-18} \text{ s}^3/\text{g}$,略高于重火石玻璃。在当时,碲酸盐玻璃是可见光范围内 M_2 值最高的声光玻璃。1994 年,中国科学院长春光学精密机械研究所研制出了一种软化温度高($554 \text{ }^\circ\text{C}$)和热膨胀系数小($65.3\times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)的锗酸盐玻璃,其在 633 nm 波长处的 M_2 值为 $14.8\times 10^{-18} \text{ s}^3/\text{g}$,高于 SF-4 牌号重火石玻璃($4.51\times 10^{-18} \text{ s}^3/\text{g}$),且锗酸盐玻璃在热稳定性上优于碲酸盐玻璃^[63]。

在氧化物玻璃中加入 CdO 、 PbO 和 Bi_2O_3 等重金属化合物,可以提升玻璃的声光性能。1993 年,俄罗斯化学工业大学 Rabukhin 等^[64]报道了 $\text{CdO-Bi}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 和 $\text{PbO-Bi}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 两种玻璃体系中重金属氧化物的浓度和 M_2 值大小的关系。研究表明:随着 CdO 和 Ga_2O_3 低极化阳离子浓度增加时,玻璃的 M_2 值降低;随着 PbO 和 Bi_2O_3 高极化阳离子浓度增加时,玻璃的 M_2 值增加。其中, $61.78\text{PbO-14.64Bi}_2\text{O}_3\text{-22.94Ga}_2\text{O}_3\text{-0.64Al}_2\text{O}_3$ 这一组分玻璃的

M_2 值最高,为 $50.9\times 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$ 。然而,重金属氧化物玻璃大尺寸样品批量制备困难,且制备过程存在污染环境和伤害人体等环保问题。

然而,上述几种声光玻璃的 M_2 值较低,研究者们开始寻找具有高折射率和大光弹系数的新型声光玻璃。硫系玻璃因具有极高线性折射率、超宽红外透过范围等优点,开始受到研究者的关注^[65-67]。早期常用的声光硫系玻璃主要有 As_2S_3 、 As_2Se_3 、 $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ 以及 As-Te-Ge 体系玻璃等。 As_2S_3 玻璃一直是优良的声光玻璃材料,虽然它含有有毒成分 As ,但 M_2 值高达 $645\times 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}^{[18]}$,是石英玻璃的 400 多倍。1993 年,英国南安普顿大学 Abdulhalim 等^[68]报道了环保型 $70\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-30La}_2\text{S}_3$ 玻璃,但较低的折射率($2.4@633 \text{ nm}$)和较快的声速($4375 \text{ m/s}@633 \text{ nm}$)导致其 M_2 值仅为 $19\times 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$ 。此外, As_2Se_3 、 AsSe_4 和 $\text{As}_{20}\text{Ge}_{30}\text{Se}_{50}$ 等硒化物玻璃在近红外光谱范围内是具有透过性的,1980 年,日本京都大学 Fukuda 等^[69]报道了 As_2Se_3 玻璃在 $1.15 \mu\text{m}$ 处的 M_2 值为 $779\times 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$,且该玻璃的转变温度(T_g)很高,为 $178 \text{ }^\circ\text{C}^{[70]}$ 。随后,有研究发现将 $\text{As}_{20}\text{Se}_{80}$ 中 30% 的 Se 替换为 Ge ,玻璃的 M_2 值由 $1200\times 10^{-18} \text{ s}^3/\text{kg}$ 降至 $330\times 10^{-18} \text{ s}^3/\text{kg}$,但 T_g 值提高到了 $474 \text{ }^\circ\text{C}^{[71-72]}$ 。1997 年,英国诺丁汉大学 Seddon 等^[72]在 As-Te-Ge 玻璃中添加摩尔百分比为 5% 的 Ge 和摩尔百分比为 5% 的 Pb 后, M_2 值为 $1306\times 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$ 。

表 4 汇总了几种常见声光玻璃及其主要性能参数。可以看出, As_2S_3 和 As_2Se_3 玻璃均具有较高的折射率, 因此它们的 M_2 值也较高, 与 M_2 值相对较低的 SF-4 重火石玻璃和熔融石英相比, 其 α 值要高出 1~2 个数量级。另外, $Ge_{33}As_{12}Se_{55}$ 和 $Ge_{30}As_{20}Se_{50}$ 玻璃能够同时满足高 M_2 值和低 α 值的要求, 具有良好的声光特性。

5.2 基于声光玻璃材料的声光调制器性能

G&H、AA 和 Isomet 三家制造商生产的几种基于声光玻璃材料的声光调制器性能参数如表 5 所示。可以看出, 以石英玻璃、重火石玻璃及 Ge-As-Se 硫系玻璃作为声光介质制成的声光调制器的调制带宽为 6~30 MHz, 中心频率为 40~200 MHz。相比于晶体材料作为声光介质的声光调制器, 它们的 η 值相近, 最高可达到 90%, 然而上升时间较长 (>25 ns), 将会限制器件的调制速

表 4 几种常见声光玻璃材料的主要参数^[14]

Table 4 Main parameters of several common acousto-optic glass materials^[14]

Types of acousto-optic glass materials	n	$M_2 / (10^{-15} s^3 \cdot kg^{-1})$	$\alpha / (dB \cdot cm^{-1} \cdot GHz^{-2})$
Fused silica	1.46	1.5	12
SF-4	1.61	4.51	
$Ge_{33}As_{12}Se_{55}$	2.70	248	28.4
$Ge_{30}As_{20}Se_{50}$	2.64	330	9.9
As_2S_3	2.61	433	170
As_2Se_3	2.89	779	250

度。另外, 它们的工作波长主要集中在紫外和近红外波段, 使得中远红外波段缺乏可选用的声光器件。因此, 想要进一步拓展声光调制器的应用范围和场景, 除了依靠高 M_2 值和低 α 值之外, 还需要继续开发新的声光玻璃来弥补中远红外波段声光材料的不足。

表 5 三家商业公司声光调制器产品相关参数

Table 5 Relevant parameters of acousto-optic modulator products of three commercial companies

Manufacturer	Material	Wavelength /nm	Modulation bandwidth /MHz	Centre frequency /MHz	Rise time /ns	$\eta / \%$
G&H ^[32]	Fused silica	400	6	80	65	90
	$Ge_{30}As_{20}Se_{50}$	1550		40	260	80
		1900-2100		40	260	75
AA ^[33]	Fused silica	244	8	200	33	85
			10	40	50	85
	$Ge_{33}As_{12}Se_{55}$	1300-1600	10	80	50	85
			20	110	25	85
			30	80	31	>85
Isomet ^[34]	Fused silica	515-640	30	80	31	>85
	SF57	780	20	50		>80

5.3 新型声光硫系玻璃

1) 高 M_2 值的中远红外声光硫系玻璃。面对中远红外声光器件的亟需, 研究者开始关注 Te 基硫系玻璃的声光特性。2006 年, 俄罗斯科学院物理技术研究所 Kulakova 等^[73]报道中远红外 $Ge_{19}Se_9Te_{72}$ 玻璃在 3.39 μm 波长下的 M_2 值高达 $4914 \times 10^{-18} s^3/g$ 。2020 年, 俄罗斯国立大学 Khorkin 等^[74]报道新型 $Ge_{25}Se_{15}Te_{60}$ 玻璃的 M_2 值为 $1330 \times 10^{-18} s^3/g$ 。宁波大学 Cao 等^[75]报道了 $Ge_{10}As_{20}Te_{70}$ 和 $Ge_{10}As_{20}Te_{50}Se_{20}$ 两种玻璃在 10.6 μm 波长下的 M_2 值分别为 $2279 \times 10^{-18} s^3/g$ 和 $1263 \times 10^{-18} s^3/g$, 两种材料可用于在低频中远红外波段的声光器件。

2) 高 n 值的硫卤玻璃。硫卤玻璃兼具硫系和卤化物玻璃的优点, 如高的折射率、短波透过截止波长蓝移等。近年来, 英国谢菲尔德大学、南安普

顿大学、乌克兰物理机械研究所等相继开展了硫卤玻璃声光特性研究。2018 年, Mytsyk 等^[76]报道了 $65GeS_2-25Ga_2S_3-10CsCl$ 玻璃的 M_2 值为 $55.6 \times 10^{-15} s^3/kg$, 与石英、 $LiNbO_3$ 、 $CaWO_4$ 、 $PbMoO_4$ 、 $\beta-BaB_2O_4$ 等声光晶体材料相比, 其在可见光和近红外范围内的光弹特性更具应用前景优势。此外为了有效提高玻璃的折射率, 宁波大学 Ding 等^[77]将 AgI 引入 Ge-Te 玻璃中, 随着 AgI 含量的增加, n 和 M_2 值明显提升, 其中 $70GeTe_{4.3}-30AgI$ 玻璃的 n 和 M_2 值分别为 3.729 和 $3671 \times 10^{-18} s^3/g$ 。硫卤玻璃为中红外声光器件提供了一种具有高衍射效率潜力的声光材料。

另外, 同一体系的硫系玻璃可通过组成优化获得更佳的声光性能。宁波大学深入研究 Ge-As-S、Ge-Sb-S 等体系玻璃的声光特性与组成结构基团之间的

变化关系^[78-79]。在 Ge-As-S 体系中,在 25 MHz 超声频率下,该体系玻璃的 α 值为 $2384 \text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{GHz}^{-2}$,并估算了 $\text{Ge}_{30}\text{As}_{15}\text{S}_{55}$ 玻璃在 633 nm 波长下的 M_2 值为 $209.78 \times 10^{-18} \text{ s}^3/\text{g}$,约为熔融石英的 130 倍。图 7 为不含 As 元素的 $(100-x)\text{GeS}_{2-x}\text{Sb}_2\text{S}_3$ 和 $\text{Ge}_{12}\text{Sb}_y\text{S}_{88-y}$ 两种系列玻璃体系的拉曼光谱。从图 7(a)可以看出, 300 cm^{-1} 处的 SbS_3 三角锥单元逐渐取代 340 cm^{-1} 处的 GeS_4 四面体单元,且随 Sb_2S_3 含量的增加,测得的 α

值呈上升趋势;从图 7(b)可以看出,随着 Sb 含量的增加, 300 cm^{-1} 处的 SbS_3 三角锥单元被更稳定的 GeS_4 四面体单元取代,由于四面体单元比三角锥单元的振动频率低,超声波能量损耗小,因此测得玻璃的 α 值呈降低趋势。此外, M_2 值的大小则取决于 Sb 的含量,在 1550 nm 波长处,组分为 $\text{Ge}_{12}\text{Sb}_{32}\text{S}_{56}$ 玻璃的 M_2 值最大 ($252 \times 10^{-18} \text{ s}^3/\text{g}$),其 α 值为 $3120 \text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{GHz}^{-2}$ 。

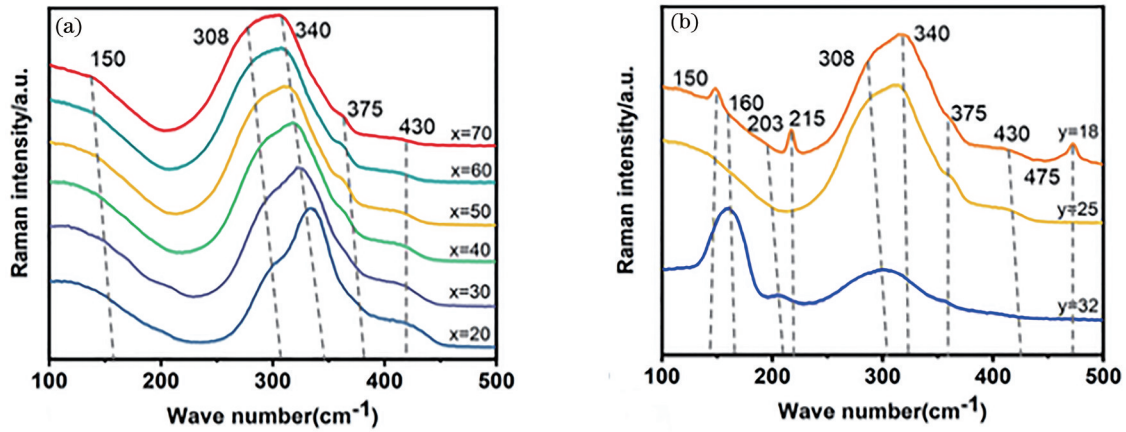


图 7 两种玻璃体系的拉曼光谱^[78-79]。(a) $(100-x)\text{GeS}_{2-x}\text{Sb}_2\text{S}_3$; (b) $\text{Ge}_{12}\text{Sb}_y\text{S}_{88-y}$
 Fig. 7 Raman spectra of two glass systems^[78-79]. (a) $(100-x)\text{GeS}_{2-x}\text{Sb}_2\text{S}_3$; (b) $\text{Ge}_{12}\text{Sb}_y\text{S}_{88-y}$

近期,宁波大学与中电 26 所合作开发了基于 $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ 玻璃的声光调制器,该玻璃具有较宽的透过窗口 ($0.85\sim 13 \mu\text{m}$) 和较高的 T_g ($279 \text{ }^\circ\text{C}$),在 1550 nm 处的 M_2 值为 $407 \times 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$,该器件的 η 值与射频功率的关系如图 8 所示,在 0.25 W 的低功率驱动下 η 值为 73.4%。

声光性能参数。相对于表 3 列举的声光晶体,这些硫系玻璃的折射率普遍较高,声速整体较低,有利于获得较高的 M_2 值,且可以通过优化玻璃组成进一步提升声光性能参数。总体而言,声光玻璃的超声衰减在几千个 $\text{dB}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{GHz}^{-2}$ 以上,普遍比晶体材料的大,适合在 $< 100 \text{ MHz}$ 频率下使用。鉴于玻璃本身具有各向同性的特点,不能像晶体一样研究不

表 6 列举了近年来报道的部分新型硫系玻璃的

表 6 新型声光玻璃的性能参数

Table 6 Performance parameters of new acousto-optic glasses

Material	Refractive index	Transparent window / μm	Acoustic velocity / ($10^3 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	$M_2 / (10^{-18} \text{ s}^3\cdot\text{g}^{-1})$	Wavelength / nm	Acoustic attenuation / ($\text{dB}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{GHz}^{-2}$)	Reference
$\text{Ge}_{30}\text{Se}_{30}\text{Te}_{40}$	2.80	1.3-16.0	2.20	278	3390	9400	[74]
$\text{Ge}_{10}\text{As}_{20}\text{Te}_{70}$	3.59	2.0-17.5	2.15	2279	10600	9400	[75]
$\text{Ge}_{10}\text{As}_{20}\text{Te}_{50}\text{Se}_{20}$	3.21	2.0-15.0	2.17	1263	10600	7433	[75]
$65\text{GeS}_2-25\text{Ga}_2\text{S}_3-10\text{CsCl}$	2.08	0.5-11.0	2.89	55.6	632.8		[76]
$(\text{GeTe}_{4.3})_{70}(\text{AgI})_{30}$	3.72	2.0-20.0	2.03	3761	10600	7822	[77]
$\text{Ge}_{30}\text{As}_{15}\text{S}_{55}$	2.48	0.5-11.0	2.84	138.9	633	2688	[78]
$\text{Ge}_{12}\text{Sb}_{32}\text{S}_{56}$	2.66	0.6-8.0	2.67	252	1550	3120	[79]
$\text{Si}_{20}\text{Te}_{80}$	3.20	1.5-20.0	2.05	3500	10600	800	[80]
$\text{Ge}_{30}\text{S}_{70}$	2.14	0.4-11.0	2.53	114	633	215	[81]

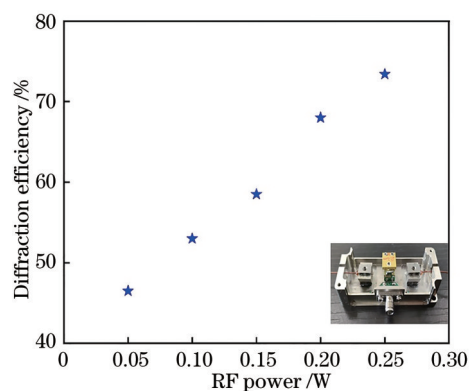


图 8 衍射效率随射频功率的变化

Fig. 8 Variation of the diffraction efficiency with the RF power
同作用方向来改善自身的声光特性,因此开发超声衰减的新型声光玻璃就显得非常必要。

6 展 望

随着声光材料制备、器件设计、器件可靠性技术的不断改善以及成本的不断降低,声光器件在信号处理、光检测技术、雷达预警、频谱分析等军事领域的应用日益增大。高性能声光器件,例如高频率(>100 MHz)、高激光损伤阈值声光调制器的应用和市场需求对声光材料性能也提出了更高的要求。对于一些具有良好应用前景的声光晶体材料,如 $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ 、 TlInSe_2 和 InI 等,需要进一步通过技术改进和自主创新,提高原料纯度,优化晶体生长工艺,消除或减少晶体缺陷,提高大尺寸晶体光学质量和降低超声衰减系数^[82]。声光玻璃材料因生产工艺成熟、光学质量均匀以及成本低廉等而备受研究者的关注,但在声光器件的性能研究和应用方面,亟需全面细致的验证。

参 考 文 献

- [1] Brillouin L. Diffusion de la lumière et des rayons X par un corps transparent homogène: influence de l'agitation thermique[J]. Annales De Physique, 1922, 9(17): 88-122.
- [2] Debye P, Sears F W. On the scattering of light by supersonic waves[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1932, 18(6): 409-414.
- [3] Gordon E I. A review of acousto-optical deflection and modulation devices[J]. Applied Optics, 1966, 5(10): 1629-1639.
- [4] Harris S E, Wallace R W. Acousto-optic tunable filter[J]. Journal of the Optical Society of America, 1969, 59(6): 744-747.
- [5] Gao J. The research of driver source and communication system of AOM[D]. Taiyuan: North University of China, 2013: 4.
高晶. 声光调制器驱动源及其通信系统研究[D]. 太原: 中北大学, 2013: 4.
- [6] Coquin G A, Pinnow D A, Warner A W. Physical properties of lead molybdate relevant to acousto-optic device applications[J]. Journal of Applied Physics, 1971, 42(6): 2162-2168.
- [7] Tsai C S. Guided-wave acousto-optics: interactions, devices, and applications[M]. Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2013.
- [8] Wang P C, Zhang Z H. Double-filtering method based on two acousto-optic tunable filters for hyperspectral imaging application[J]. Optics Express, 2016, 24(9): 9888-9895.
- [9] Savage N. Acousto-optic devices[J]. Nature Photonics, 2010, 4(10): 728-729.
- [10] Yu K X, Ding X H, Pang Z G. Principles of acousto-optic and acousto-optic devices[M]. Beijing: Science Press, 2011: 194-379.
俞宽新, 丁晓红, 庞兆广. 声光原理与声光器件[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 194-379.
- [11] Gross E. Change of wave-length of light due to elastic heat waves at scattering in liquids[J]. Nature, 1930, 126(3171): 201-202.
- [12] Maiman T H. Stimulated optical radiation in ruby[J]. Nature, 1960, 187(4736): 493-494.
- [13] DeMaria A J, Gagosz R, Barnard G. Ultrasonic-refraction shutter for optical maser oscillators[J]. Journal of Applied Physics, 1963, 34(3): 453-456.
- [14] Dong X Y, Gao X C. Lectures on acousto-optics and its applications lecture 1 physical basis of acousto-optic interaction[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 1989, 11(1): 69-79.
董孝义, 高希才. 声光学及其应用讲座 第一讲 声光相互作用物理基础[J]. 压电与声光, 1989, 11(1): 69-79.
- [15] Chang I C. Analysis of the noncollinear acousto-optic filter[J]. Electronics Letters, 1975, 11(25/26): 617-618.
- [16] Bi R, Chen L R, Li J P, et al. Acousto-optic diffraction efficiency enhancement system for polarization maintaining of arbitrarily polarized light [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(1): 0123002.
毕然, 陈力荣, 李晋鹏, 等. 任意偏振光保偏的声光

- 衍射效率增强系统的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(1): 0123002.
- [17] de Cusatis C, das Pankaj K. Acousto-optic signal processing: fundamentals & applications[M]. London: Artech House, 1991.
- [18] Dixon R W. Photoelastic properties of selected materials and their relevance for applications to acoustic light modulators and scanners[J]. Journal of Applied Physics, 1967, 38(13): 5149-5153.
- [19] Pinnow D. Guide lines for the selection of acoustooptic materials[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1970, 6(4): 223-238.
- [20] Pomerantz M. Ultrasonic attenuation by phonons in insulators[C]//1972 Ultrasonics Symposium, October 4-7, 1972, Boston, MA, USA. New York: IEEE Press, 1972: 479-485.
- [21] Woodruff T O, Ehrenreich H. Absorption of sound in insulators[J]. Physical Review, 1961, 123(5): 1553.
- [22] Uchida N, Ohmachi Y. Elastic and photoelastic properties of TeO₂ single crystal[J]. Journal of Applied Physics, 1969, 40(12): 4692-4695.
- [23] Bonner W A, Singh S, 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.
- [24] Miyazawa S, Kondo S. Preparation of paratellurite TeO₂[J]. Materials Research Bulletin, 1973, 8(10): 1215-1221.
- [25] Chu Y Q, Ge Z W, Wu G Q, et al. Growth of large-size and high-quality acousto-optic crystal TeO₂[C]//2003 Eleven Provinces (Cities) Optical Conference, January 1, 2003, Shennongjia, Hubei, China. Beijing: The Chinese Ceramic Society, 2003: 426.
储耀卿, 葛增伟, 吴国庆, 等. 大尺寸优质声光晶体 TeO₂ 的生长[C]//中国硅酸盐学会 2003 年学术年会, 1月1日, 2003, 神农架, 湖北. 北京: 中国硅酸盐学会, 2003: 426.
- [26] Atanasoff J V, Hart P J. Dynamical determination of the elastic constants and their temperature coefficients for quartz[J]. Physical Review, 1941, 59(1): 85-96.
- [27] Hong G. Acoustooptic deflection materials and techniques[J]. Laser & Infrared, 1975, 5(S3): 1-24.
红光. 声光偏转材料和技术[J]. 激光与红外, 1975, 5(S3): 1-24.
- [28] 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.
- [29] Ning Y Q, Chen Y Y, Zhang J, et al. Brief review of development and techniques for high power semiconductor lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0114001.
宁永强, 陈泳屹, 张俊, 等. 大功率半导体激光器发展及相关技术概述[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0114001.
- [30] Abrams R L, Pinnow D A. Acousto-optic properties of crystalline germanium[J]. Journal of Applied Physics, 1970, 41(7): 2765-2768.
- [31] Gottlieb M S, Goutzoulis A P, Singh N B. High-performance acousto-optic materials: Hg₂Cl₂ and PbBr₂[J]. Optical Engineering, 1992, 31(10): 2110-2117.
- [32] G&H. [EB/OL]. [2021-05-15]. <http://www.goochandhousego.com>.
- [33] OPTO-ELECTRONIC. [EB/OL]. [2021-05-15]. <http://www.aaoptoelectronic.com>.
- [34] ISOMET. [EB/OL]. [2021-05-15]. <http://www.isomet.com>.
- [35] Brimrose. [EB/OL]. [2021-05-15]. <http://www.brimrose.com>.
- [36] CETC. [EB/OL]. [2021-05-15]. <http://cetccq.cetc.com.cn>.
- [37] Mys O, Martynyuk-Lototska I, Grabar A, et al. Piezo-optic coefficients and acoustic wave velocities in Sn₂P₂S₆ crystals[J]. Ukrainian Journal of Physical Optics, 2006, 7(3): 124.
- [38] Martynyuk-Lototska I Y, Mys O G, Grabar A A, et al. Highly efficient acousto-optic diffraction in Sn₂P₂S₆ crystals[J]. Applied Optics, 2008, 47(1): 52-55.
- [39] Alekperov O Z, Ibragimov G B, Axundov I A, et al. Growth of orthorhombic and tetragonal modifications of TlInS₂ from its monoclinic phase[J]. Physica Status Solidi (c), 2009, 6(5): 981-984.
- [40] Godzhaev E M, Dzhaferova S R, Gyl'mamedov K D, et al. Synthesis and growth of TlInSe₂ and TlGaSe₂ single crystals[J]. Inorganic Materials, 2009, 45(7): 728-730.
- [41] Martynyuk-Lototska I, Trach I, Kokhan O, et al. Efficient acousto-optic crystal, TlInS₂: acoustic and elastic anisotropy[J]. Applied Optics, 2017, 56(11): 3179-3184.
- [42] Martynyuk-Lototska I, Mys O, Say A, et al. Anisotropy of acoustic and thermal expansion properties of TlInSe₂ crystals[J]. Phase Transitions,

- 2019, 92(1): 23-35.
- [43] Martynyuk-Lototska I, Myronchuk G, Kushnirevych M, et al. Acoustic anisotropy of $\text{AgGaGe}_3\text{Se}_8$ crystals and their acoustooptic applications[J]. Ukrainian Journal of Physical Optics, 2015, 16(2): 77-84.
- [44] Martynyuk-Lototska I, Parasyuk O, Vlokh R. Acoustic and elastic anisotropies of acoustooptic AgGaGeS_4 crystals[J]. Ukrainian Journal of Physical Optics, 2016, 17(4): 141-147.
- [45] Wu J, Huang W, Liu H G, et al. Investigation of the thermal properties and crystal growth of the nonlinear optical crystals AgGaS_2 and AgGaGeS_4 [J]. Crystal Growth & Design, 2020, 20(5): 3140-3153.
- [46] Wan W J, Li H, Cao J C. Research progress on terahertz quantum cascade lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0701009.
万文坚, 黎华, 曹俊诚. 太赫兹量子级联激光器研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0701009.
- [47] Voloshinov V B, Khorkin V S, Kuznetsov M S, et al. Anisotropic acousto-optic interaction in KRS-5 cubic crystal possessing induced optical anisotropy[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11210: 112100E.
- [48] Fedorov P P, Kuznetsov S V, Chuvilina E L, et al. Single-crystalline InI: material for infrared optics[J]. Doklady Physics, 2016, 61(6): 261-265.
- [49] Porokhovnichenko D L, Dyakonov E A, Voloshinov V B, et al. Acousto-optic interaction in an InI single crystal[J]. Doklady Physics, 2017, 62(9): 407-410.
- [50] Porokhovnichenko D L, Dyakonov E A, Kuznetsov S V, et al. Indium iodide single crystal: breakthrough material for infrared acousto-optics[J]. Optics Letters, 2020, 45(13): 3435-3438.
- [51] Mazur M M, Kuznetsov F A, Mazur L I, et al. Elastic and photoelastic properties of $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ single crystals[J]. Inorganic Materials, 2012, 48(1): 67-73.
- [52] Mazur M M, Velikovskiy D Y, Mazur L I, et al. Elastic and photo-elastic characteristics of laser crystals potassium rare-earth tungstates $\text{KRE}(\text{WO}_4)_2$, where $\text{RE}=\text{Y, Yb, Gd}$ and Lu [J]. Ultrasonics, 2014, 54(5): 1311-1317.
- [53] Velikovskii D Y, Mazur M M, Pavlyuk A A, et al. Investigation of the $\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$ crystal as an acousto-optic material[J]. Physics of Wave Phenomena, 2015, 23(1): 58-62.
- [54] Mazur M M, Mazur L I, Sirotkin A A, et al. Acousto-optic modulators of high-power laser radiation on the basis of KGW and KYW crystals[J]. Quantum Electronics, 2020, 50(10): 957-961.
- [55] Wu Q, Gao Z L, Tian X X, et al. Biaxial crystal $\beta\text{-BaTeMo}_2\text{O}_9$: theoretical analysis and the feasibility as high-efficiency acousto-optic Q-switch[J]. Optics Express, 2017, 25(21): 24893-24900.
- [56] Wu Q, Gao Z L, Yan B Z, et al. A novel multifunctional crystal: self-acousto-optic Q-switch Raman laser based on $\alpha\text{-BaTeMo}_2\text{O}_9$ crystal[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(20): 1299-1302.
- [57] Buryy O, Andrushchak N, Demyanyshyn N, et al. Determination of acousto-optical effect maxima for optically isotropic crystalline material on the example of GaP cubic crystal[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2019, 36(8): 2023-2029.
- [58] Andrushchak A S, Buryy O A, Demyanyshyn N M, et al. Global maxima of the acousto-optic effect in CaWO_4 crystals[J]. Acta Physica Polonica A, 2018, 133(4): 928-932.
- [59] Mytsyk B, Kryvyy T, Demyanyshyn N, et al. Piezo-, elasto- and acousto-optic properties of Ti_3AsS_4 crystals [J]. Applied Optics, 2018, 57(14): 3796-3801.
- [60] Dixon R, Cohen M. A new technique for measuring magnitudes of photoelastic tensors and its application to lithium niobate[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1966, 2(4): 128-129.
- [61] Eschler H, Weidinger F. Acousto-optic properties of dense flint glasses[J]. Journal of Applied Physics, 1975, 46(1): 65-70.
- [62] Yano T, Fukumoto A, Watanabe A. Tellurite glass: a new acousto-optic material[J]. Journal of Applied Physics, 1971, 42(10): 3674-3676.
- [63] Li X Q, Lu J W, Yang L X. Study of acousto-optical properties of germanite glass[J]. Proceedings of SPIE, 1994, 2321: 89-91.
- [64] Rabukhin A I, Belousova G V. Acousto-optic efficiency of bismuth-containing gallate glasses[J]. Glass and Ceramics, 1993, 50(5): 204-209.
- [65] Seddon A B. Chalcogenide glasses: a review of their preparation, properties and applications[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1995, 184: 44-50.
- [66] Zakery A, Elliott S R. Optical properties and applications of chalcogenide glasses: a review[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2003, 330(1/2/3): 1-12.
- [67] Dai S X, Chen H G, Li M Z, et al. Chalcogenide glasses and their infrared optical applications[J].

- Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(4): 847-852.
- 戴世勋, 陈惠广, 李茂忠, 等. 硫系玻璃及其在红外光学系统中的应用[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 847-852.
- [68] Abdulhalim I, Pannell C N, Deol R S, et al. High performance acousto-optic chalcogenide glass based on $\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-La}_2\text{S}_3$ systems[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1993, 164/165/166: 1251-1254.
- [69] Fukuda S, Shiosaki T, Kawabata A. Acoustic and acousto-optic properties of amorphous Se[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1980, 19(11): 2075-2083.
- [70] Ohmachi Y, Uchida N. Vitreous As_2Se_3 ; investigation of acousto-optical properties and application to infrared modulator[J]. Journal of Applied Physics, 1972, 43(4): 1709-1712.
- [71] Krause J T, Kurkjian C R, Pinnow D A, et al. Low acoustic loss chalcogenide glasses: a new category of materials for acoustic and acousto-optic applications [J]. Applied Physics Letters, 1970, 17(9): 367-368.
- [72] Seddon A B, Laine M J. A review of amorphous chalcogenides as materials for infrared bulk acousto-optic devices[M]//Andriesh A, Bertolotti M. Physics and applications of non-crystalline semiconductors in optoelectronics. NATO ASI series. Dordrecht: Springer, 1997, 36: 327-336.
- [73] Kulakova L A, Kudoyarova V K, Melekh B T, et al. Si (Ge) -Se-Te glasses: electrical and acoustic properties[J]. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 2006, 8(2): 800-804.
- [74] Khorkin V S, Voloshinov V B, Efimova A I, et al. Acousto-optic properties of germanium-, selenium-, silicon-, and tellurium-based alloys[J]. Optics and Spectroscopy, 2020, 128(2): 244-249.
- [75] Cao Z F, Dai S X, Liu Z J, et al. Investigation of the acousto-optical properties of Ge-As-Te-(Se) chalcogenide glasses at 10.6 μm wavelength[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2021, 104(7): 3224-3234.
- [76] Mytsyk B, Shpotyuk O, Demyanyshyn N, et al. Photoelastic and acousto-optic effects in $65\text{GeS}_2\text{-}25\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-}10\text{CsCl}$ glass[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2018, 481: 160-163.
- [77] Ding S J, Liu Z J, Dai S X, et al. Novel acousto-optic material based on Ge-Te-AgI chalcogenide glasses[J]. Ceramics International, 2021, 47(9): 12072-12077.
- [78] Ding S J, Dai S X, Cao Z F, et al. Composition dependence of the physical and acousto-optic properties of transparent Ge-As-S chalcogenide glasses[J]. Optical Materials, 2020, 108: 110175.
- [79] 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.
- [80] Kulakova L A, Melekh B T, Yakhkind E Z, et al. Influence of heat treatment on the structure and physical properties of $\text{Si}_{20}\text{Te}_{80}$ glasses[J]. Glass Physics and Chemistry, 2001, 27(3): 233-240.
- [81] Bletskan D I, Vakulchak V V, Fedelezh V I. Acousto-optic properties of $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ glasses and acousto-optic modulator on their basis[J]. Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2014 (5/6): 24-31.
- [82] Chen H T, He C J, Li Z Q, et al. Acousto-optic effect of tetragonal lead magnesium niobate-lead titanate single crystal[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2020, 49(4): 587-591, 612.
- 陈慧挺, 赫崇君, 李自强, 等. 四方相铌镁酸铅-钛酸铅单晶的声光特性研究[J]. 人工晶体学报, 2020, 49(4): 587-591, 612.