

文章编号:0253-2328(2025)02-0161-09

基于亚波长声学波导的集成声光调制器的研究进展

任嘉欣¹, 黄宏溢², 万磊^{1*}, 黄继莹², 陈会鹏¹, 刘会龙¹

(1.宁夏大学 物理学院, 宁夏 银川 750021; 2.暨南大学 信息科学技术学院, 广东 广州 510632)

摘要:近年来,基于亚波长声学波导的集成声光调制器在光通信、量子信息处理和光计算等领域取得了显著进展。通过将声波和光波限制在亚波长尺度,声光相互作用的强度显著增强,从而实现了高调制效率和低功耗。在材料选择方面,铌酸锂(LiNbO₃)、蓝宝石(Al₂O₃)等因其优异的光学、声学性能以及与光波导的良好兼容性,被广泛应用于亚波长声学波导的设计中。铌酸锂凭借其高电光效应,成为集成声光调制器的理想材料;而蓝宝石则因其极高的热导率和机械强度,在高功率应用中表现出色。此外,非悬浮波导设计的提出成为该领域的一个重大突破。该设计能够有效降低波导的损耗,并提供更高的集成度。文中首先介绍了基于亚波长声学波导的集成声光调制器的基本原理,然后回顾了该领域近期的关键研究成果。最后,探讨了其在微波—光波转换和隔离器等方面的应用潜力,并对未来的研究趋势进行了展望。

关键词:亚波长声学波导;声光调制;光机耦合;微波—光波转换

分类号:(中图)TN256

文献标志码:A

随着信息技术的指数级发展,光通信与光计算领域对高性能声光调制器(acousto-optic modulator, AOM)的需求已从传统的“信号调控”跃升至“量子极限操控”。AOM的核心物理机制——声光效应,可追溯至20世纪初布里渊的开创性工作:他首次揭示了声波(声子)与光波(光子)相互作用的本质,即布里渊散射现象^[1]。这一发现不仅奠定了经典声光理论的基础,还启发了多物理场耦合调控的新范式。在射频驱动下,压电介质内激发的声波通过光弹效应诱导折射率的周期性调谐,进而实现对光波相位、强度及频率的动态操控。该物理过程在量子光学和光子学领域有广泛的应用前景,如相干量子传导^[2]、非互易光传输^[3-4]、调制^[5]、频移^[6]、信号处理^[7-8]、激光束偏转^[9]和滤波^[10]等。

AOM已被广泛应用于多个领域,如稳定输出功率、减小线宽和塑造激光束的空间轮廓^[11-13]等,还可以实现主动光镊和超短脉冲拾取^[14-15]。除了

在上述经典技术中的应用外,AOM在量子技术中也发挥着不可或缺的作用。基于不同薄膜压电材料(如铌酸锂(LiNbO₃)^[16-22]、氮化铝(AlN)^[4-5,23]、钽酸锂(LiTaO₃)^[24-26]、铝钪氮(AlScN)^[27]、氮化镓(GaN)^[28-29])的片上集成声光调制器已成为当前研究的重点(见图1)。然而,传统片上声光调制器受限于声光材料的尺寸和物理特性^[30],多数器件在兆赫频率范围内工作,并且需要较大的相互作用长度以实现充分耦合。由于声学波长远大于光学波长,器件对声子能量的约束存在局限性,导致声波泄漏严重^[26,30-31],从而显著降低了声光相互作用的强度^[32]。

近年来,随着微纳声光学的快速发展,亚波长声学波导技术的引入为片上集成声光调制器的性能提升提供了新的思路。亚波长声学波导是一种能够在亚波长尺度内操控声波传播的波导结构。通过将声波束缚在接近波长的尺度内,亚波长声学波导显著增强了声光相互作用强度,从而提高了调

收稿日期:2025-04-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62175095, 62335014);宁夏自然科学基金杰出青年科研基金资助项目(2024AAC04003);区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室开放课题(2024GZKF002);宁夏重点研发计划引才项目(2024BEH04093)

作者简介:任嘉欣(2000—),女,硕士研究生,主要从事片上集成声光调控器件的研究,(电子信箱)1748931294@qq.com。

*通信联系人:万磊(1988—),男,教授,博士,主要从事片上集成声光调控器件及信号处理应用研究,(电子信箱)wanlei@nxu.edu.cn。

引用格式:任嘉欣,黄宏溢,万磊,等.基于亚波长声学波导的集成声光调制器的研究进展[J].宁夏大学学报(自然科学版中英文),2025,46(2):161-169.

制效率和转换效率。有效的声光调制需要在亚波长结构中同时约束光场和声场^[18]。虽然光学约束可以通过使用具有高折射率对比度的薄膜材料来实现,但兼容声学约束仍面临挑战^[33],导致光声场之间的耦合强度较小。尽管悬浮波导结构可以实现光场和声场的同时约束,但器件的稳定性和功率处理能力受到限制。因此,对于片上非悬浮集成声光器件而言,实现高调制或转换效率仍然是亟待解决的问题^[34]。

本文总结了基于亚波长声学波导的集成声光调制器的研究进展。首先,介绍了集成声光调制器的基本原理;其次,回顾了其发展历程;最后,对当前研究中的技术挑战和未来发展方向进行了展望。这为高性能片上集成声光调制器的深入研究提供了参考,也为相关领域的研究人员提供了全面的技术背景和研究思路。期望基于亚波长声学波导的集成声光调制器能够在光通信、量子信息处理等领域逐步得到应用。

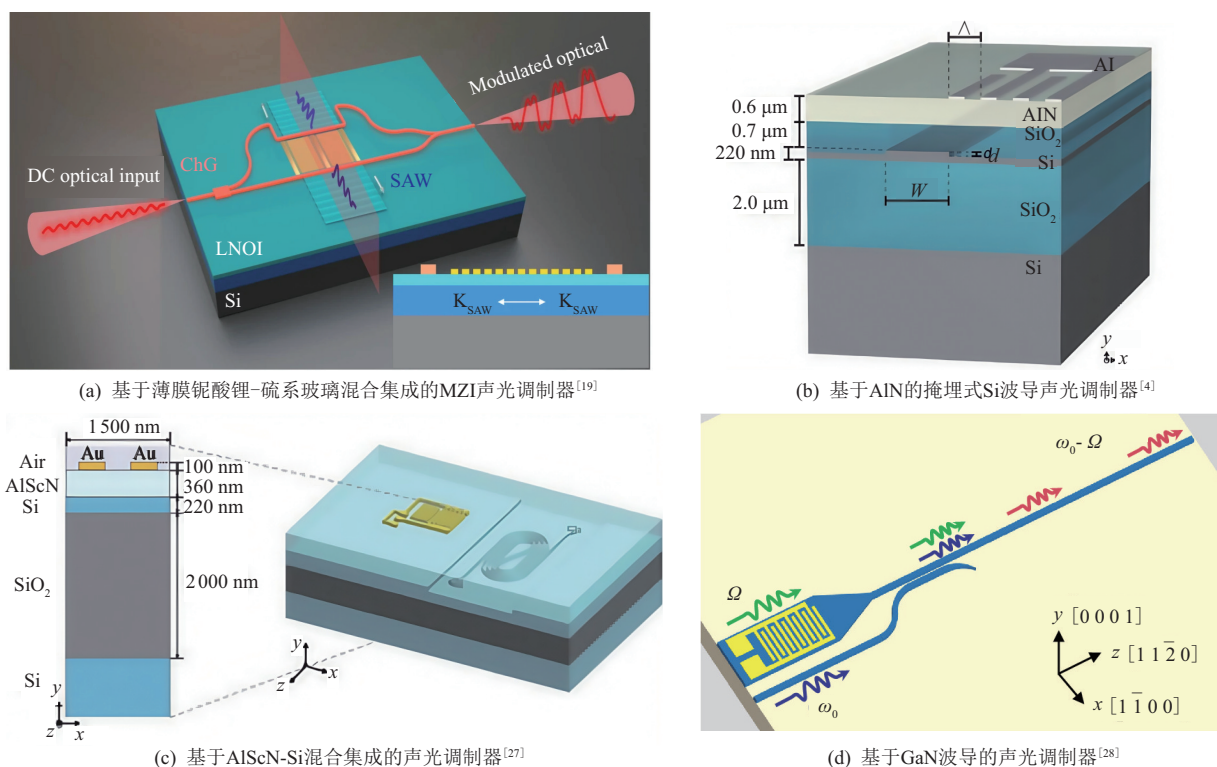


图 1 基于不同压电材料的声光调制器

1 集成声光调制器基本原理

1.1 声学模式及光学模式

在集成声光调制器中,声波的产生基于压电薄膜的压电效应,这一效应可以分为正压电效应和逆压电效应^[35]。当压电晶体材料在某一方向上受到外力作用时,其内部会发生极化现象,并在其两个相对表面上产生正负相反的电荷,这种由外力诱导的电荷产生现象被称为正压电效应。相反,当在压电晶体上施加电场时,材料会发生机械形变,即产生位移,这一现象被称为逆压电效应^[36]。在声光调制器的实际应用中,逆压电效应尤为重要,因为它可以通过电场控制声波的产生和传播,从而实现对光信号的高效调制,具体过程见图 2(a)。基于悬浮亚波长声学波导,通过特定的电极配置和结构设计,能够激发多种声学模式,如基础兰姆波(funda-

mental Lamb, A0)、一阶兰姆波(first-order Lamb, A1)、基础水平剪切波(fundamental horizontal shear, SH0)和基础纵波(fundamental longitudinal, L0)。图 2(b)展示了这些模式的振动方向和位移大小,其中黑色标记表示振动方向,颜色深浅表示位移大小:红色表示振动沿着坐标的正方向,蓝色表示振动沿着坐标的反方向。而非悬浮声学波导可以支持类表面波,如类勒夫声波模式和类瑞利声波模式,具体见图 2(c)。

在集成声光调制器的设计过程中,光学模式的选择是实现高效声光耦合的必要环节。在单模波导中,光学模式主要分为横电基模(TE₀₀)和横磁基模(TM₀₀),如图 2(d)所示。结合声光耦合效果的仿真分析,研究人员可以根据具体需求选择不同的光学模式参与声光相互作用,从而为多模态高性能声光调制提供可能。

1.2 光机耦合效应

声光相互作用通常可分为体积效应和表面效应(见图2(e))。对于体积声光效应,频率为 Ω 的弹性波在体介质中传播时,会通过光弹效应改变材料

的介电常数张量,从而影响光波的传播。表面声光效应是指弹性波通过两种不同介质的界面传播时,形成机械运动,通过移动边界和光弹效应等物理机制,影响光波导的几何结构与介电常数张量。

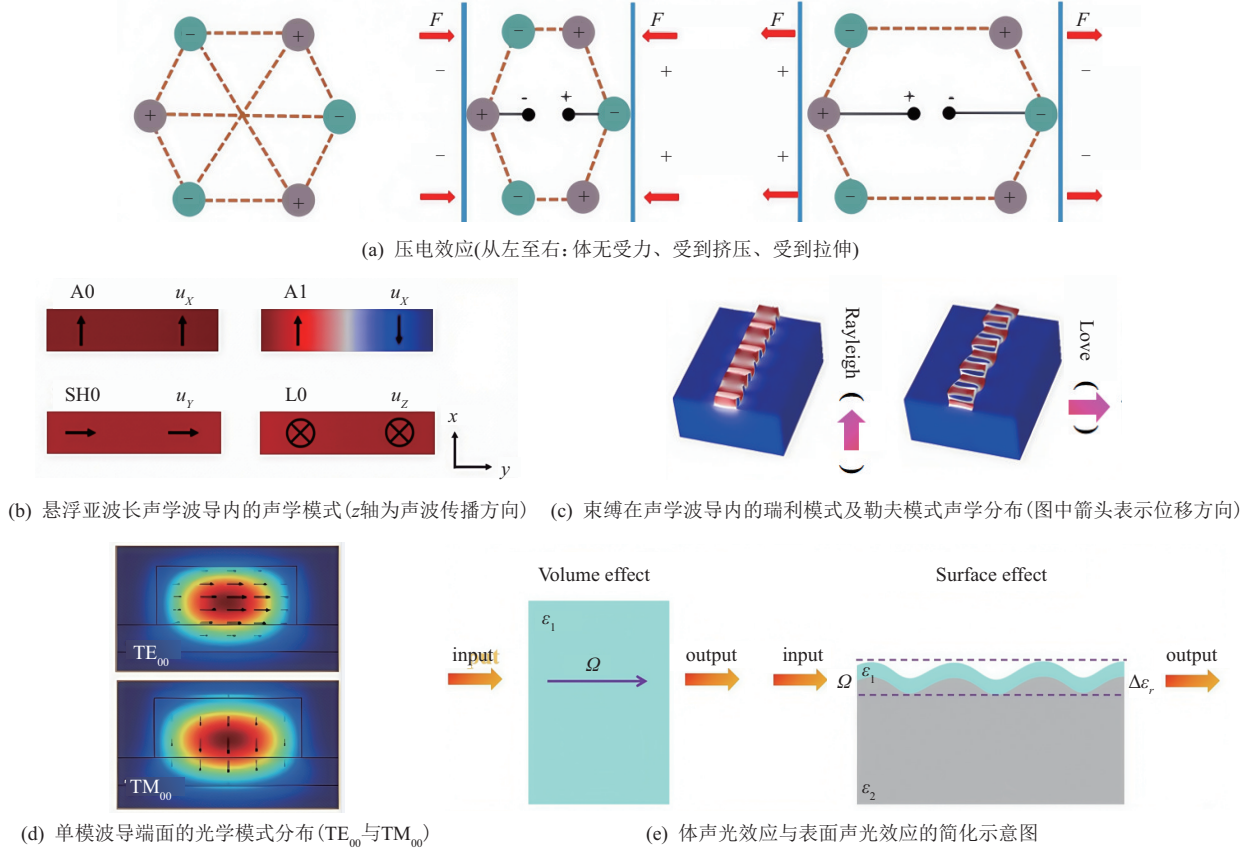


图 2 声光调制器基本原理

光波与声波间的相互作用强度可以通过零点光机耦合速率(g_0)来反映,它被定义为单个声子产生的位移场零点运动所引起的光学共振模式的频移量,表达式^[34]为

$$g_0 = \frac{df_0}{d\alpha} \chi_{zpf} = \frac{df_0}{d\alpha} \sqrt{\frac{h}{2m_{\text{eff}}\omega_m}} \quad (1)$$

其中: f_0 为光学谐振模式的频率; α 为机械运动振幅; χ_{zpf} 为机械振子的零点运动振幅; h 为普朗克常数; m_{eff} 为机械振子的等效质量; ω_m 为机械谐振频率。

在光波(光子)与声波(声子)的相互作用中,占主导地位的是光弹效应(PE)和移动边界效应(MB)^[37]。因此,总的光机耦合速率可以表示为

$$g = g_{\text{MB}} + g_{\text{PE}} = \left(\frac{d\omega_o}{d\alpha} \Big|_{\text{MB}} + \frac{d\omega_o}{d\alpha} \Big|_{\text{PE}} \right) \chi_{zpf} \quad (2)$$

其中: g_{MB} 和 g_{PE} 分别表示移动边界效应及光弹效应对声光耦合相互作用强度的贡献; ω_o 为光学共振角频率。

1.2.1 移动边界效应 移动边界效应是声光调制器中声光耦合过程涉及的主要物理机制之一。其本

质在于晶体声学模式的位移场对波导边界轮廓的动态影响,进而导致光波模式等效折射率发生改变。具体而言,当声学模式激发时,其位移场会引起光学波导边界的周期性变形,从而改变不同材料界面处的介电常数分布^[38]。这种介电常数的动态变化可通过介电常数矩阵的扰动来描述,其与位移场之间的关联为声光耦合系数的计算提供了理论依据。

利用麦克斯韦方程组的微扰理论,可以推出基于移动边界效应的声光耦合系数的具体表达式^[39]为

$$\frac{d\omega_o}{d\alpha} \Big|_{\text{MB}} = -\frac{\omega_o}{2} \frac{\oint (Q \cdot \hat{n}) (\Delta\epsilon |E_{\parallel}|^2 - \Delta\epsilon^{-1} |D_{\perp}|^2) dS}{\int dV \epsilon |E|^2} \quad (3)$$

其中: Q 是归一化位移场($\max\{|Q|\} = 1$); \hat{n} 为界面(电介质域边界)的外法向单位向量; E_{\parallel} 为平行于界面的电场分量; D_{\perp} 为垂直于界面的电位移分量, ϵ 为介质的介电常数; $\Delta\epsilon$ 为介质与空气介电常数之差,即 $\Delta\epsilon = \epsilon_1 - \epsilon_{\text{air}}$; $\Delta\epsilon^{-1}$ 为介质与空气介电常数的倒数之差,即 $\Delta\epsilon^{-1} = \epsilon_1^{-1} - \epsilon_{\text{air}}^{-1}$ 。

1.2.2 光弹效应 与移动边界效应不同,光弹效应主要关注波导内部的应变分布及其对光波模式等效折射率的调制作用,属于介质材料固有的物理特性。其物理机制在于声学模式的位移场会改变波导内部的应力或应变分布,从而引起波导内光波的介电常数与等效折射率的动态变化^[40]。与移动边界效应类似,光弹效应对声光耦合系数的贡献可以通过一阶微扰理论来描述,其具体形式^[41]为

$$\left. \frac{d\omega_0}{d\alpha} \right|_{PE} = -\frac{\omega_0 \epsilon_0 n^4}{2} \times \frac{\int (E_x^* E_y^* E_z^*) \begin{pmatrix} dB_1 & dB_6 & dB_5 \\ dB_6 & dB_2 & dB_4 \\ dB_5 & dB_4 & dB_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} dV}{\int E \cdot D dV} \quad (4)$$

其中: ϵ_0 表示真空介电常数; $E_i^*(i=x,y,z)$ 为电子场复共轭分量; $E_i(i=x,y,z)$ 为电场大小。对于各项同性材料,弹性系数 $dB_k(k=1,\dots,6)$ 与应变 $S_k(k=1,\dots,6)$ 的矩阵关系^[42]为

$$\begin{pmatrix} dB_1 \\ dB_2 \\ dB_3 \\ dB_4 \\ dB_5 \\ dB_6 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{12} & 0 & 0 & 0 \\ P_{12} & P_{11} & P_{12} & 0 & 0 & 0 \\ P_{12} & P_{12} & P_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{44} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} S_{xx} \\ S_{yy} \\ S_{zz} \\ S_{yz} \\ S_{zx} \\ S_{xy} \end{pmatrix} \quad (5)$$

在实际应用中,需要对各向异性的压电材料进行旋转和切割以适配所需性能,通常情况下,压电材料的各项异性是通过切割面和传播方向表示的。在分析和计算光波导中光弹效应对声光耦合系数的贡献时,需要将矩阵 P_{ij} 替换为实际波导切向对应的光弹系数,即 P_{ij} 为具体材料的光弹系数张量。例如,X切Z传铌酸锂材料所对应的光弹系数矩阵为

$$\begin{bmatrix} P_{33} & P_{31} & P_{31} & 0 & 0 & 0 \\ P_{13} & P_{11} & P_{12} & 0 & 0 & P_{14} \\ P_{13} & P_{12} & P_{11} & 0 & 0 & -P_{14} \\ 0 & 0 & 0 & P_{66} & -P_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -P_{41} & P_{44} & 0 \\ 0 & P_{41} & -P_{41} & 0 & 0 & P_{44} \end{bmatrix} \quad (6)$$

2 基于亚波长声学波导的集成声光调制器研究进展

近年来,基于亚波长声学波导的集成声光调制器研究已成为纳米声光子学领域的重要研究方向。这类器件利用亚波长声学波导的传输特性,在微纳米尺度上实现了声波与光波的高效耦合,展现出高性能和低功耗的优势,为集成光子学的发展开辟了新的路径。

2.1 同质集成声光调制器

针对同质集成结构,其核心特征在于采用单一薄膜材料同时作为压电层和光波导介质。通过选择合适的波导介质,这种结构设计为早期集成声光调制器的微型化提供了可行的技术路径。

2019年,哈佛大学 Loncar 教授课题组的 Shao 等^[43]提出利用悬空的铌酸锂薄膜制备声波谐振器,显著增强了声光相互作用,如图 3(a)所示。为了更好地限制声波,研究人员在悬浮状铌酸锂波导两侧刻蚀沟槽,形成声波反射器。得益于悬浮声学谐振腔的优势,器件的声学品质因子高达 3 600,光学品质因子高达 2.2×10^6 。实验结果表明,在 2 GHz 兰姆声波驱动下,成功观测到 -7.5 dB 的声光 S_{21} 。当声光相互作用长度为 100 μm 时,器件的半波电压仅为 0.77 V。

为实现高效的声光调制,2020年,斯坦福大学 Safavi 教授课题组的 Jiang 等^[44]在悬浮 X 切薄膜铌酸锂波导平台上设计了一种基于一维光子晶体纳米梁的声光调制器,如图 3(b)所示。研究团队将叉指换能器集成在亚波长悬浮铌酸锂声学波导的顶部,成功激发了束缚态的二阶水平剪切模式。该模式通过悬浮的铌酸锂锥形波导区域后,被散射转换为一阶纵波模式,并最终在一维光子晶体纳米梁中激发出呼吸模式。光波通过侧边耦合进入光子晶体纳米梁中参与调制。得益于束缚态声波传输与局域声波谐振的协同作用,该声光调制器实现了低至 0.02 V 的半波电压 V_π 和高达 80 kHz 的声光耦合系数 (g_0),成为国际上声光调制效率领先的器件原型。

2021年,斯坦福大学的 Sarabalis 等^[18]基于光学模间散射的基本原理,提出了一种基于亚波长悬浮铌酸锂直波导结构的高效声光调制器。在满足相位匹配的条件下,该器件展示了在非互易传输和片上电驱动隔离器应用中的潜力。

在集成声光调制器的衬底材料选择方面,除了广泛应用的铌酸锂和硅衬底外,蓝宝石衬底因其较高的声速和热稳定性,也逐渐成为重要的候选材料之一。2024年,美国德克萨斯大学 Zhang 等^[28]在蓝宝石衬底上研制了一种氮化镓声光调制器。通过增大射频驱动功率,他们在 TE_0 与 TE_1 模式间观察到了光功率的正弦振荡。当驱动功率 $P=560$ mW 时, TE_0 模式的功率接近于 0,而 TE_1 模式的功率达到最大值,实现了光学模式间的完全转换。测试结果表明,该器件声光耦合系数为 $255 \text{ mm}^{-1} \cdot \text{W}^{-1/2}$ 。与没有声光同时束缚的同类型器件相比,该参数提高了两个以上数量级,充分展现了亚波长声学波导在提高声光相互作用强度方面的显著优势。

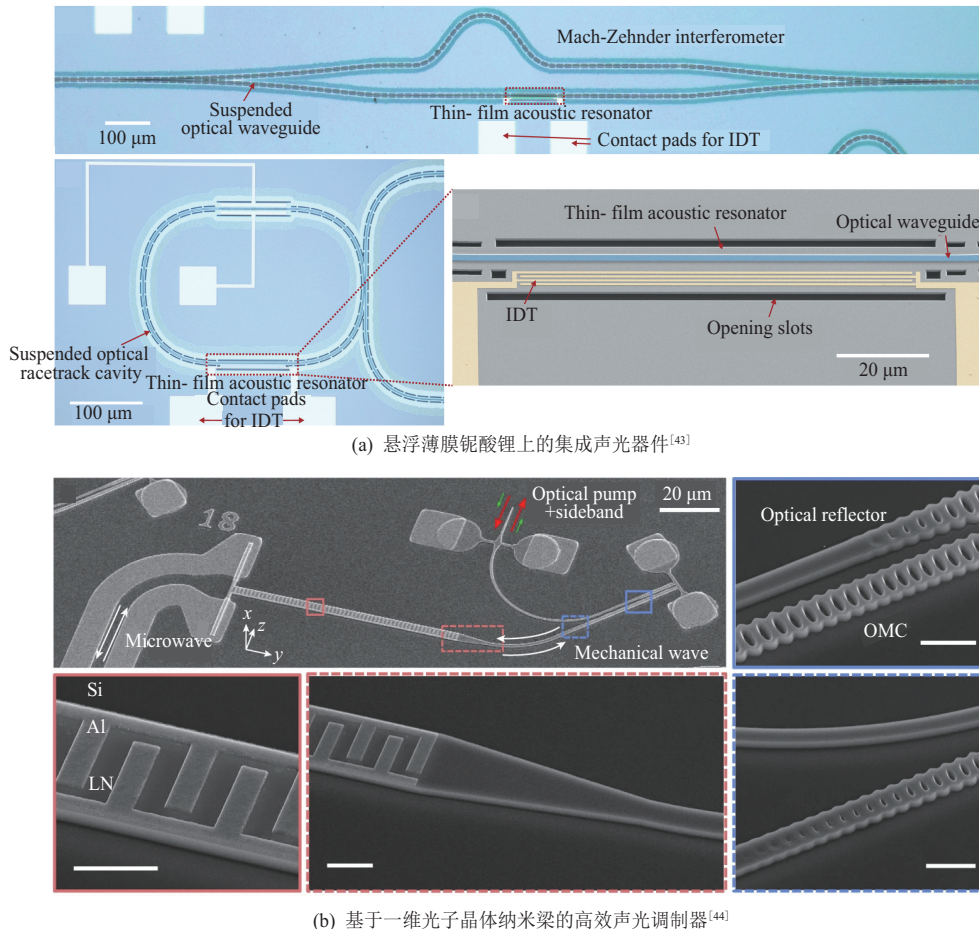


图 3 基于亚波长声学波导的同质集成声光调制器

2.2 混集成声光调制器

混合集成片上声光调制器是一种采用多种薄膜材料混合集成的声光器件方案。其核心特征在于压电薄膜不再单独承担波导功能,而是与至少一种其他功能薄膜共同构成完整的波导结构。这种设计突破了单一材料的性能限制,通过材料间的优势互补,为高性能集成声光调制提供了新的技术路径。

研究人员开发了基于铌酸锂(LN)平台的混集成声光调制器。硫族化合物玻璃因其优异的光弹性能而备受关注,其光弹系数可达铌酸锂的两倍左右,通过将硫族化合物玻璃与铌酸锂等材料进行异质集成,可以充分发挥各自材料的特性优势。2023年,Wan等^[45]提出了一种由薄膜铌酸锂(TFLN)板和硫系玻璃(ChG)混合集成的一维光子晶体。在亚波长声学波导的辅助下,硫族化合物玻璃构建了新型悬浮光机晶体腔(OMC),如图4(a)所示。研究发现,在1.1197 GHz下,该混合OMC的光-机耦合速率达340 kHz。结合声子能带分析和声学模式分解,数值计算表明,有17.38%的射频功率在铌酸锂窄机械波导处转换为占主导的基础水平剪切波(SH₀)。基于这一比例,3.51%的功率

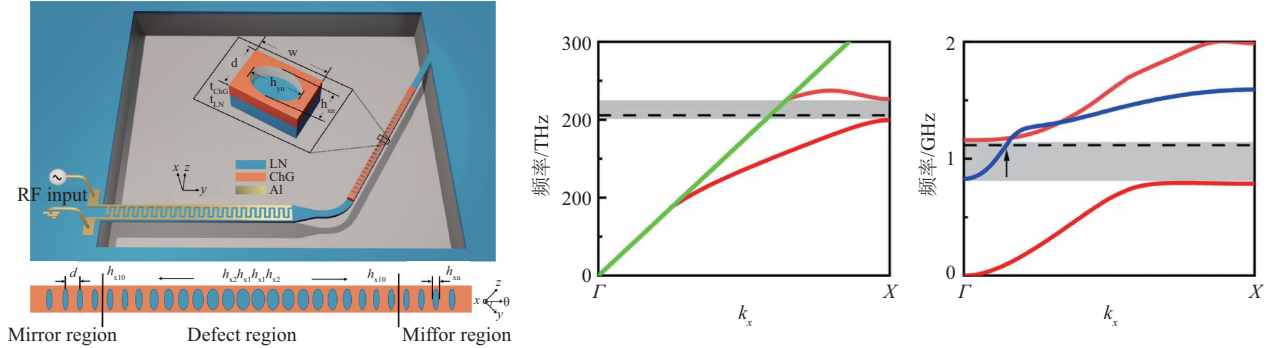
在TFLN-ChG混合波导的起始端被转换为纵波基模(L₀)。最终,在L₀模式的驱动下,成功激发了混合光机晶体腔中的声学呼吸模式,证实了亚波长声学波导辅助的混合光机晶体腔在实现高效光子-声子相互作用方面具有巨大潜力。

铌酸锂不仅可以与硫系玻璃进行异质集成,还能与聚合物材料实现异质集成。2025年,Yao等^[22]提出一种基于铌酸锂(LN)集成平台开发的腔增强声光调制器。与传统方法不同,该方案并未直接蚀刻铌酸锂,而是设计了波导和光学腔结构,并通过将聚合物介电体加载到平面LN-on-insulator(LNOI)衬底上,有效限制了光模式。研究结果表明,在集成铌酸锂平台上制备的基于光子晶体纳米梁腔的AO调制器,其信噪比显著提升至38 dB,工作阈值射频(RF)功率低于-50 dBm,相较于基于微环谐振器的器件,降低了两个数量级。该设计不仅提升了集成度,还优化了调制器的性能,为未来的光电集成平台开辟了新的方向。

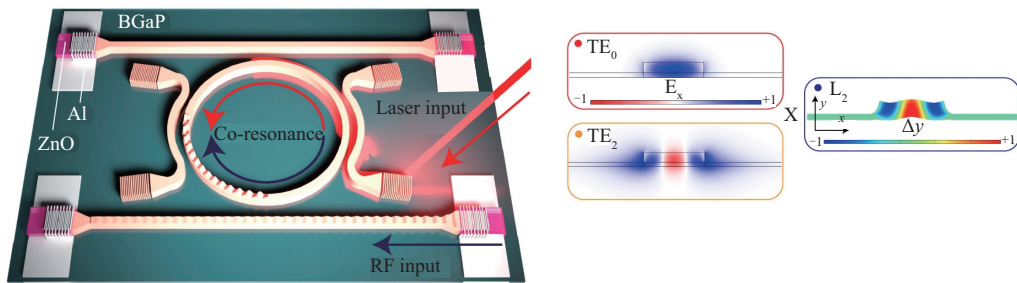
除了铌酸锂平台,混合集成技术还可拓展至其他材料体系。例如,2023年,美国华盛顿大学的Chen等^[46]在混合波导平台上展示了一种光机械环

形谐振器(OMR),该平台采用非压电材料磷化镓(GaP)作为光波和声波的引导层,并与压电材料氧化锌(ZnO)结合,形成了一种光机共振的集成声光调制器,如图4(b)所示。测试结果表明,该 OMR 的

光学品质因子和声学品质因子分别为 1×10^5 和 3.2×10^3 。此外,该研究还首次演示了光机共振微环结构下的非互易传输,从而证实了该平台优异的光机耦合特性。



(a) 机械波导耦合TFLN-ChG非均质OMC腔的压电光机械换能器原理图^[45]



(b) 光机械集成电路(OMIC)器件的原理图及TE₀, TE₂和L₂模态的横截面模态分布^[46]

图 4 基于亚波长声学波导的混合集成声光调制器

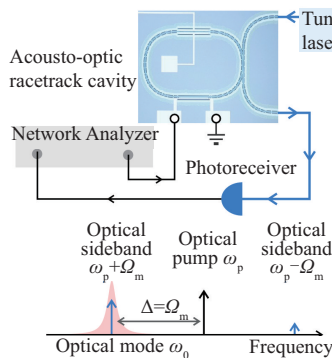
3 集成声光调制器的应用

3.1 微波到光波的转换

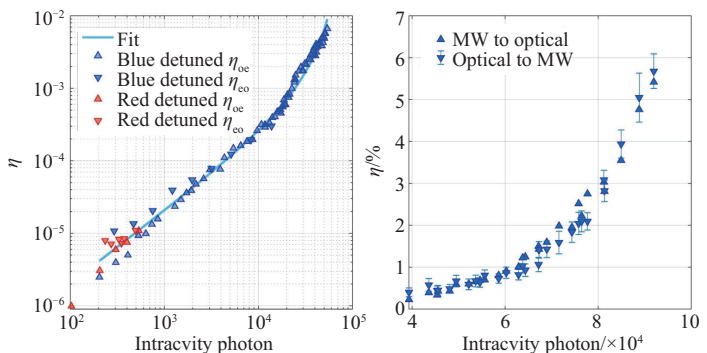
基于亚波长声学波导的集成声光调制器可以实现微波到光波的转换,本节将对其转换效率进行简要分析。例如,Loncar教授课题组^[43]提出了一种悬浮结构的集成声光调制器。该调制器利用跑道微环谐振器进一步提高了微波到光波的转换效率。利用声光腔进行微波—光波转换的简化实验原理如图5(a)所示。当输入光功率为1 mW时,微波—

蓝移光波的转换效率 η 为 0.0017% (双向微波—光转换效率与腔内光子数的关系见图5(b))。2020年,斯坦福大学Safavi教授课题组的Jiang等^[44]基于悬浮TFLN一维光子晶体腔集成声光调制器,实现了微波—蓝移光波转换效率 $\eta_{\text{blue}} = 5.5\%$,这一显著提升主要得益于较高的声光耦合系数 g_0 ,此时输入的泵浦光功率仅为 $323 \mu\text{W}$ 。

微波到光波的转换效率主要受以下因素影响:集成声光调制器的声学外部耦合率、光学外部耦合率以及叉指换能器激发的声子数量。因此,提升转



(a) 利用声光腔进行单边带微波光转换的简化实验原理图和说明^[43]



(b) 双向微波—光转换效率与腔内光子数的关系图^[44]

图 5 基于亚波长声学波导实现微波到光波转换的声光调制器

换效率的关键在于优化声学以及光学模式的有效耦合。同时,低温环境能够有效减小声波传播损耗,提升光机耦合强度,从而进一步提高微波到光波的转换效率。结合低温技术与高效的耦合设计,未来有望实现更高效率的微波-光波转换器件。

3.2 非互易传输与隔离

隔离器作为光学系统中的核心组件,主要用于控制光信号的传输方向,在光纤通信领域具有不可替代的作用。传统的光隔离器主要依赖磁光效应实现功能,但由于其体积庞大且难与光子集成电路(PIC)兼容,其集成化进程受到了限制。近年来,电

驱动集成光学隔离器的研究取得了重要突破。研究人员通过创新应用电光效应或声光效应,成功开发出高性能、小型化的集成光学隔离器,为光子集成电路的进一步发展奠定了坚实的基础。例如,2021年斯坦福大学 Sarabalis 等^[18]提出了一种基于 X 切悬浮 TFLN 直波导的集成声光调制器,其 3 dB 光学带宽可达 40 nm(见图 6(a))。在满足相位匹配条件下,按照图 6(b)所示的路径,可以实现 TE₁ 到 TE₀ 模式的双向移频(见图 6(c))。当反射信号满足背散射条件时,自然可以形成非互易的传输特性,从而实现图 6(d)所示的光学隔离器功能。

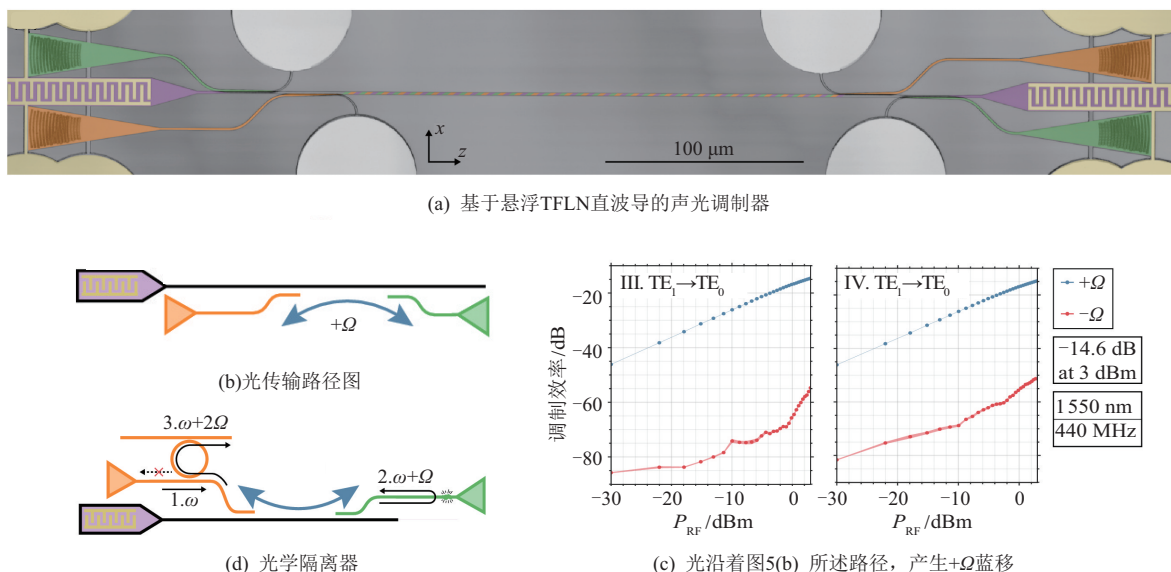


图 6 基于亚波长声学波导调制器的光隔离器^[18]

4 结语

综上所述,基于亚波长声学波导的集成声光调制器在光通信、量子信息处理和光计算等领域取得了显著的研究进展。通过将声波和光波束缚在亚波长尺度的波导内,实现了声光相互作用的显著增强。新型压电材料(如铌酸锂(LiNbO₃)、氮化镓(GaN))的应用,以及亚波长声学波导耦合的声光子晶体腔的设计等,为高性能声光调制器的发展提供了新的技术路径。然而,该领域仍需在材料与结构创新、工艺优化、多物理场协同设计等方面持续突破。未来的研究方向包括新型压电材料的开发、CMOS兼容微纳加工技术的完善,以及声-光-电多场调控机制的深入研究。这些突破将推动集成声光调制器向更高性能、更低功耗的方向发展。随着量子信息、高速光通信等领域的快速发展,亚波长声学波导技术有望在集成光子芯片中发挥更重要的作用,为新一代光电器件的发展提供关键技术支撑。

参考文献:

- [1] BALRAM K C, DAVANÇO M I, SONG Jindong, et al. Coherent coupling between radiofrequency, optical and acoustic waves in piezo-optomechanical circuits[J]. Nature Photonics, 2016, 10: 346-352.
- [2] SCHÜTZ M J A. Universal quantum transducers based on surface acoustic waves [M]//Quantum Dots for Quantum Information Processing: Controlling and Exploiting the Quantum Dot Environment. Cham: Springer International Publishing, 2016: 143-196.
- [3] KITTLAUS E A, OTTERSTROM N T, KHAREL P, et al. Non-reciprocal interband Brillouin modulation [J]. Nature Photonics, 2018, 12: 613-619.
- [4] KITTLAUS E A, JONES W M, RAKICH P T, et al. Electrically driven acousto-optics and broadband non-reciprocity in silicon photonics[J]. Nature Photonics, 2021, 15: 43-52.
- [5] TADESSE S A, LI Mo. Sub-optical wavelength acoustic wave modulation of integrated photonic resonators at microwave frequencies[J]. Nature Communica-

- tions, 2014, 5: 5402.
- [6] FAN Linran, ZOU Changling, POOT M, et al. Integrated optomechanical single-photon frequency shifter [J]. *Nature Photonics*, 2016, 10: 766-770.
- [7] DONG Chunhua, SHEN Zhen, ZOU Changling, et al. Brillouin-scattering-induced transparency and non-reciprocal light storage [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6193.
- [8] KIM J H, KUZYK M C, HAN Kewen, et al. Non-reciprocal Brillouin scattering induced transparency [J]. *Nature Physics*, 2015, 11: 275-280.
- [9] KORPEL A. Acousto-optics: A review of fundamentals [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1981, 69(1): 48-53.
- [10] TSAI C S. Guided-wave acousto-optics: Interactions, devices, and applications [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2013.
- [11] TRICOT F, PHUNG D H, LOURS M, et al. Power stabilization of a diode laser with an acousto-optic modulator [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(11): 113112.
- [12] DONG Jing, HU Yongqi, HUANG Junchao, et al. Subhertz linewidth laser by locking to a fiber delay line [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(5): 1152-1156.
- [13] SONG Enmao, DAI Tianrui, ZHU Gjuangzhi, et al. Adjustable and stable beam profile generation in a Yb: YAG thin-disk laser [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(23): 6550-6553.
- [14] BOLA R, TREPTOW D, MARZOA A, et al. Acousto-holographic optical tweezers [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(10): 2938-2941.
- [15] DE VRIES O, SAULE T, PLÖTNER M, et al. Acousto-optic pulse picking scheme with carrier-frequency-to-pulse-repetition-rate synchronization [J]. *Optics Express*, 2015, 23(15): 19586-19595.
- [16] SHAO Linbo, SINCLAIR N, LEATHAM J, et al. Integrated microwave acousto-optic frequency shifter on thin-film lithium niobate [J]. *Optics Express*, 2020, 28(16): 23728-23738.
- [17] SARABALIS C J, MCKENNA T P, PATEL R N, et al. Acousto-optic modulation in lithium niobate on sapphire [J]. *Apl Photonics*, 2020, 5(8): 086104.
- [18] SARABALIS C J, VAN LAER R, PATEL R N, et al. Acousto-optic modulation of a wavelength-scale waveguide [J]. *Optica*, 2021, 8(4): 477-483.
- [19] WAN Lei, YANG Zhiqiang, ZHOU Wenfeng, et al. Highly efficient acousto-optic modulation using nonsuspended thin-film lithium niobate-chalcogenide hybrid waveguides [J]. *Light, Science and Applications*, 2022, 11(1): 145.
- [20] YANG Zhiqiang, WEN Meixun, WAN Lei, et al. Efficient acousto-optic modulation using a microring resonator on a thin-film lithium niobate-chalcogenide hybrid platform [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(15): 3808-3811.
- [21] WAN Lei, HUANG Jiyong, WEN Meixun, et al. Hybrid thin-film lithium niobate micro-ring acousto-optic modulator for microwave-to-optical conversion [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2025, 19(6): 1. DOI:10.1002/lpor.202401832.
- [22] JIANG Zhi, YAO Danyang, GAO Yu, et al. Cavity-enhanced acousto-optic modulators on polymer-loaded lithium niobate integrated platform [J]. *ACS Photonics*, 2025, 12(4): 1891-1899.
- [23] LIU Qiyu, LI Huan, LI Mo. Electromechanical Brillouin scattering in integrated optomechanical waveguides [J]. *Optica*, 2019, 6(6): 778-785.
- [24] TAKAI T, IWAMOTO H, TAKAMINE Y, et al. I. H. P. SAW technology and its application to micro-acoustic components (Invited) [C]//IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). Washington, DC, USA: IEEE, 2017: 1-8.
- [25] XUE Miao, YAN Xiongshuo, WU Jiangwei, et al. On-chip ultraviolet second-harmonic generation in lithium-tantalate thin film microdisk [J]. *Chinese Optics Letters*, 2023, 21(6): 061902.
- [26] YAN Xiongshuo, LIU Yi'an, GE Licheng, et al. High optical damage threshold on-chip lithium tantalate microdisk resonator [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(15): 4100-4103.
- [27] HUANG Chukun, SHI Haotian, YU Linfeng, et al. Acousto-optic modulation in silicon waveguides based on piezoelectric aluminum scandium nitride film [J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(6): 2102334.
- [28] ZHANG Liang, CUI Chaohan, CHEN Paokang, et al. Integrated-waveguide-based acousto-optic modulation with complete optical conversion [J]. *Optica*, 2024, 11(2): 184-189.
- [29] ZHANG Liang, CUI Chaohan, XUE Yongzhou, et al. Scalable photonic-phononic integrated circuitry for reconfigurable signal processing [J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 2718.
- [30] 宋景翠, 杨志强, 尚海燕, 等. 硫系异质集成光子器件(特邀) [J]. *光学学报*, 2024, 44(15): 1513005.
- [31] ZHU Di, SHAO Linbo, YU Mengjie, et al. Integrated photonics on thin-film lithium niobate [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2021, 13(2): 242-352.
- [32] SAVAGE N. Acousto-optic devices [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(10): 728-729.
- [33] FU Wei, SHEN Zhen, XU Yuntao, et al. Phononic integrated circuitry and spin-orbit interaction of phonons [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 2743.

- [34] 马天雪. 声光子晶体结构中的波传播及声光耦合作用研究[D]. 北京:北京交通大学,2017.
- [35] 黄继莹,万磊,陈承渝,等. 薄膜铌酸锂声光调制器的研究进展(特邀)[J]. 激光与光电子学进展,2024, 61(11): 1116008.
- [36] 罗庆辉,郑涛,周跃亭. 准晶及压电材料黏附接触力学研究进展[J]. 宁夏大学学报(自然科学版),2024, 45(3):238-249.
- [37] SINGH V, BOSMAN S J, SCHNEIDER B H, et al. Optomechanical coupling between a multilayer graphene mechanical resonator and a superconducting microwave cavity[J]. Nature Nanotechnology, 2014, 9(10): 820-824.
- [38] ANDONEGUI I, GARCIA-ADEVA A J. The finite element method applied to the study of two-dimensional photonic crystals and resonant cavities [J]. Optics Express, 2013, 21(4): 4072-4092.
- [39] SAFAVI-NAEINI A H, PAINTER O. Design of optomechanical cavities and waveguides on a simultaneous bandgap phononic-photonic crystal slab [J]. Optics Express, 2010, 18(14): 14926-14943.
- [40] SLATER J C. Interaction of waves in crystals [J]. Reviews of Modern Physics, 1958, 30(1): 197-222.
- [41] CHAN J, SAFAVI-NAEINI A H, HILL J T, et al. Optimized optomechanical crystal cavity with acoustic radiation shield [J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(8): 081115.
- [42] MA Tianxue, ZOU Kui, WANG Yuesheng, et al. Acousto-optical interaction of surface acoustic and optical waves in a two-dimensional photonic crystal heterostructure cavity [J]. Optics Express, 2014, 22(23): 28443-28451.
- [43] SHAO Linbo, YU Mengjie, MAITY S, et al. Microwave-to-optical conversion using lithium niobate thin-film acoustic resonators[J]. Optica, 2019, 6(12): 1498-1505.
- [44] JIANG Wentao, SARABALIS C J, DAHMANI Y D, et al. Efficient bidirectional piezo-optomechanical transduction between microwave and optical frequency [J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 1166.
- [45] LUO Yang, HUANG Hongyi, WAN Lei, et al. Heterogeneous optomechanical crystal cavity coupled by a wavelength-scale mechanical waveguide [J]. Photonics Research, 2023, 11(9): 1509-1516.
- [46] CHEN I T, LI Bingzhao, LEE S, et al. Optomechanical ring resonator for efficient microwave-optical frequency conversion [J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 7594.

Research Progress on Integrated Acousto-Optic Modulators Based on Subwavelength Acoustic Waveguides

REN Jiaxin¹, HUANG Hongyi², WAN Lei^{1*}, HUANG Jiyi², CHEN Huipeng¹, LIU Huilong¹

(1. School of Physics, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. School of Information Science and Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: In recent years, integrated acousto-optic modulators based on sub-wavelength acoustic waveguides have made significant progress in the fields of optical communications, quantum information processing, and optical computing. By restricting acoustic and optical waves to the sub-wavelength scale, the acousto-optic interaction strength has been significantly enhanced, achieving high modulation efficiency and low power consumption. Materials such as lithium niobate (LiNbO_3) and sapphire (Al_2O_3) are widely used in the design of sub-wavelength acoustic waveguides due to their excellent optical and acoustic properties and good compatibility with optical waveguides. The high electro-optical effect of lithium niobate makes it an ideal material for integrated acousto-optic modulators, while sapphire excels in high power applications due to its extremely high thermal conductivity and mechanical strength. Meanwhile, the proposal of non-suspended waveguide design has become a major breakthrough in this field, effectively reducing waveguide loss and providing higher integration. In this paper, we first introduced the basic principles of integrated acousto-optic modulators based on sub-wavelength acoustic waveguides, and then reviewed recent key research results in this field. Finally, we explored its potential applications in microwave-optical wave conversion and isolators, and outlined future research trends.

Key words: subwavelength acoustic waveguides; acousto-optic modulation; optomechanical coupling; microwave-to-optical conversion

(责任编辑 张 娣)