

引用格式: SHEN Jian, FENG Chenglong, ZHANG Xun, et al. Research Progress in Optoelectronics Integration Technology Based on Piezoelectric Effect (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(11):1113001

沈健,冯成龙,张洵,等.基于压电效应的光电子集成技术研究进展(特邀)[J].光子学报,2023,52(11):1113001

※封面论文※

# 基于压电效应的光电子集成技术研究进展 (特邀)

沈健,冯成龙,张洵,张磊,舒畅,张永,苏翼凯

(上海交通大学 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室 电子工程系,上海 200240)

**摘要:**压电效应是一种实现电能与机械能之间相互转换的重要物理现象。随着集成光电子技术和压电薄膜材料制备技术的日益成熟,压电效应在光电子集成芯片领域引起广泛的研究。在压电效应的作用下,外部电场可以操控薄膜材料的形变,从而改变折射率,实现光电调谐和声光调制。本文首先介绍常见压电薄膜材料及其研究进展,随后回顾和探讨基于压电效应的光电子集成器件的研究进展。最后,对压电调谐器件和声光调制器的应用进行介绍和展望,分析其大规模应用面临的挑战和问题。

**关键词:**硅基光电子学;压电效应;可调谐器件;声光调制器;光电子集成芯片

中图分类号:TN256

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20235211.1113001

## 0 引言

光通信光互连技术利用光子替代电子作为信息载体,可以实现超大容量、超高速率的信息传输。硅基光电子器件凭借其小尺寸、高集成度、低功耗、与微电子互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)工艺相兼容等优势,有望推动“后摩尔时代”光电子与微电子芯片取得突破性进展<sup>[1,2]</sup>。到目前为止,基于绝缘体上硅平台的光电子集成芯片在相干光通信等产业中已经获得巨大的成功。然而以硅为代表的中心对称结构晶体,缺乏线性和高次非线性效应,在低功耗调谐器件、高速调制器件及非线性器件的设计与制备上面临着天然的劣势<sup>[3]</sup>。面向下一代光电子集成芯片的低功耗、高效率及大规模集成需求,需要挖掘新效应、新薄膜材料用于集成光电子器件研发。

压电效应是当施加外部机械力或者压力时,一些晶体材料会产生正负电荷,从而形成电场,外力撤去,晶体恢复到原始状态。当对这些晶体材料施加外部电场时,晶体材料会发生形变,产生折射率的变化。得益于原子层沉积(Atomic Layer Deposition, ALD)<sup>[4]</sup>、分子束外延(Molecular Beam Epitaxy, MBE)<sup>[5]</sup>等薄膜生长沉积技术的进步与成熟,许多低损耗、高压电系数的薄膜被制备实现,例如氮化铝(Aluminum Nitride, AlN)<sup>[6]</sup>、铅钛酸铅(Lead Zirconate Titanate, PZT)<sup>[7]</sup>、二氧化铪(Hafnium dioxide, HfO<sub>2</sub>)<sup>[8]</sup>、铈酸锂(Lithium Niobate, LN)<sup>[9]</sup>等等,基于压电效应的集成光子技术获得蓬勃发展。压电效应引起的光调谐是电场作用的结果,与硅材料中热光驱动相比,压电驱动的功耗可以降低3~5个数量级<sup>[10]</sup>,这对在kHz到GHz响应频率的应用场景下实现低功耗驱动、大规模光电集成芯片具有重大意义。研究人员已经通过异质集成、干法刻蚀、旋涂极化等技术路线,制备出一系列的光电集成器件,表现出超低功耗、高效率、快速响应等优异的性能,在硅基光电集成器件中具有独特的优势。其中部分材料已与CMOS工艺相兼容,得到快速发展,相关应用也已经报道,表现出出色的应用潜力。

本文将对近年来压电薄膜材料的性质和生长制备以及光电集成器件的研究进展进行介绍,探讨基于压

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 62335014, 61975115, 61835008)

第一作者:沈健, jian\_shen@sjtu.edu.cn

通讯作者:张永, yongzhang@sjtu.edu.cn; 苏翼凯, yikaisu@sjtu.edu.cn

收稿日期:2023-10-01; 录用日期:2023-11-06

<http://www.photon.ac.cn>

电效应的光电集成器件的大规模集成应用及其发展趋势。

## 1 压电薄膜材料研究进展

在集成光电子器件的研究中,常见的压电薄膜材料包括氮化铝(Aluminum Nitride, AlN)、锆钛酸铅(Lead Zirconate Titanate, PZT)、铌酸锂(Lithium Niobate, LN)、二氧化铪(Hafnium dioxide, HfO<sub>2</sub>)等,表1展示了这些薄膜材料的特性。

表1 不同压电薄膜材料的物理性质  
Table 1 Physical properties in different piezoelectric photonic platforms

Material	AlN	PZT	LN	HfO <sub>2</sub>
Point group	6 mm	/	3 m	Monoclinic (25 °C)
Optical bandgap $E_g/eV$	6.2	/	4.0	5.3~5.7
Refractive index	2.04 (o)	2.3	2.21(o)	1.8
	2.08 (e)		2.14(e)	
Thermo-optics $dn/dT/K^{-1}$	$2.3 \times 10^{-5}$ (o)	/	$0.2 \times 10^{-5}$ (o)	/
			$3.3 \times 10^{-5}$ (e)	
Thermal conduction $\kappa/(Wm^{-1} \cdot KW \cdot m)$	320	/	3.5	/
Pockels coefficient $r/(pm \cdot V^{-1})$	$r_{33} \approx 1.0$	67	$r_{33} \approx 30.9$	/
	$r_{31} \approx 0.1$		$r_{51} \approx 32.0$	
Piezoelectricity $d/(pC \cdot N^{-1})$	$d_{33} \approx 5.5$	$d_{33} \approx 150$	$d_{15} \approx 68$	11.5
	$d_{15} \approx 4.1$		$d_{22} \approx 21$	
	$d_{31} \approx -2.6$		$d_{33} \approx 6.2$	
			$d_{31} \approx -1$	

### 1.1 AlN 薄膜材料研究进展

作为第三代半导体之一,AlN由于其出色的物理、热、机械和光学特性而备受关注。从结构上看,纤锌矿结构的AlN呈四面体配位,面内晶格常数为 $a = 0.311$  nm,垂直晶格常数为 $c = 0.498$  nm。这种晶体结构赋予了AlN单轴各向异性。AlN在不同的波导偏振模式下表现出光学双折射现象。此外,相较于普通衬底如SiO<sub>2</sub>( $n \approx 1.45$ , 1 550 nm)和蓝宝石( $n \approx 1.75$ , 1 550 nm),AlN的折射率( $n \approx 2.1$ , 1 550 nm)更高,具有较强的光约束能力。AlN的非中心对称结构(六方晶型, 6 mm)也赋予了其独特的Pockels电光、压电和 $\chi^{(2)}$ 非线性性质<sup>[11]</sup>,这是常规硅基材料所缺乏的。为了满足高性能集成光学和声学特性的要求,AlN薄膜沉积技术得到了迅速的发展。目前主要的AlN沉积技术包括物理气相沉积(Physical Vapor Deposition, PVD)<sup>[12]</sup>、化学气相沉积(Cheical Vapor Deposition, CVD)<sup>[13]</sup>和脉冲激光沉积(Pulsed Laser Deposition, PLD)<sup>[14]</sup>。在本小节中,将重点讨论用于集成光子应用的c平面(0001)AlN的制备及其压电特性。

2012年,美国TANG H X课题组通过制备多晶AlN薄膜在集成光子领域做出了开创性的工作<sup>[15]</sup>,这种薄膜材料是通过反应磁控溅射制备的,AlN在基体上由纯铝(99.999%)在氩气和氮气混合物中形成,这种多晶AlN呈现出沿c轴和面内畴边界的柱状团簇结构,如图1所示。这一点由X射线衍射(X-Ray Diffraction, XRD)证实,[002]峰值在半高全宽(Full Width at Half Maxima, FWHM)处超过1°。原子力显微镜(Atomic Force Microscope, AFM)分析表明,粗晶粒的表面粗糙度在1 nm以上。多晶AlN会受到边界散射和缺陷吸收引起的光学损耗,尤其是在紫外区。为了证实这一点,2014年<sup>[16]</sup>,德国PERNICE W H P课题组通过实验表征观察到当工作波长低于400 nm时,波导衰减为650 dB cm<sup>-1</sup>。另一方面,多晶AlN的溅射特性使得它几乎可以生长在任何衬底上,这有利于与其他光子材料(如氮化硅和金刚石)的混合集成,以提供所需的压电特性和非线性<sup>[17, 18]</sup>。此外,溅射过程的低工作温度(如300 K)是CMOS兼容的<sup>[19]</sup>,这意味着在流片代工厂开发AlN光子集成回路的可能性。

近年来,为减小AlN薄膜在紫外-可见光区域的损耗,纳米晶体AlN和单晶AlN模板在蓝宝石衬底上的生长已经成为一种备受瞩目的低损耗集成光子平台,特别是在紫外-可见光区域。纳米晶体AlN属于多晶

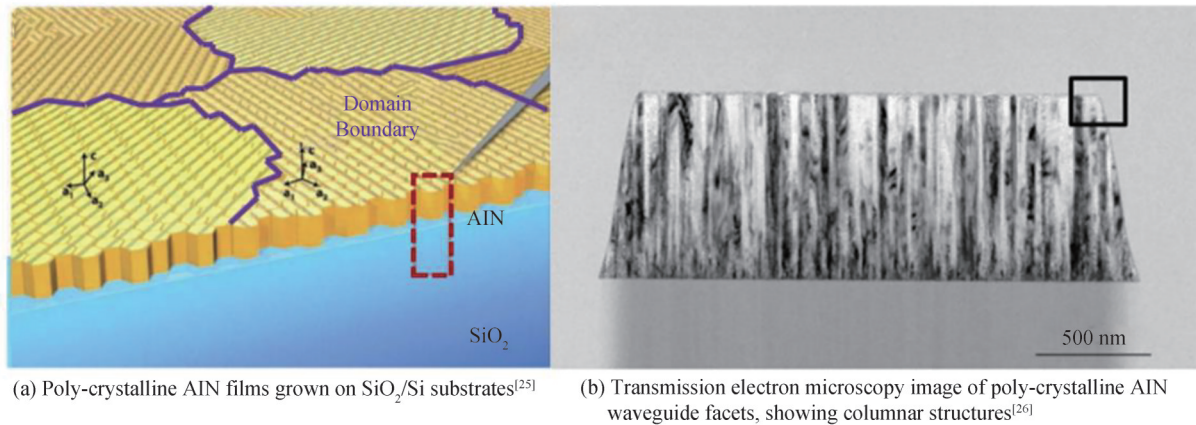


图1 多晶AlN薄膜的截面结构<sup>[25-26]</sup>  
Fig. 1 Cross section of the poly-crystalline AlN films<sup>[25-26]</sup>

亚群,其c轴方向具有超细的晶粒尺寸,可以得到尖锐的[002]峰(FWHM为 $0.1^\circ$ )和光滑的薄膜表面(RMS粗糙度为 $0.7\text{ nm}$ )<sup>[20]</sup>。现在,它已经可以规模提供商业晶圆,并通过等离子体气相沉积纳米柱(PVDNC)工艺提供高均匀性和可重复性。这些优点也使纳米晶体AlN成为工业中生长高温氮化物层的低成本缓冲层。这种低成本地商业晶圆应用,促进了AlN薄膜在紫外-可见光区域的研究和应用。2018年,美国LU TJ课题组等人展示了第一个在 $369.5\text{ nm}$ 处具有 $60\text{ dB cm}^{-1}$ 低传播损耗的纳米晶体AlN微环<sup>[20]</sup>,它有望在片上将光传递给捕获的离子(如 $171\text{Yb}^+$ ),用于高保真量子操纵<sup>[21]</sup>。

与PVD AlN不同,单晶AlN是通过CVD工艺(如金属有机CVD<sup>[22]</sup>)制备的,在这种工艺中,化学反应在气相中发生,使用三甲基铝和氨作为前驱体,产生的AlN以高度有序的方式在基片上生长。单晶AlN在结晶度上具有很高的改善,可以通过XRD峰中窄的FWHM为 $0.02^\circ$ [002]和小于 $0.1\text{ nm}$ 的RMS表面粗糙度来验证<sup>[23]</sup>。然而,该工艺的主要缺点是生长温度通常高于 $1200^\circ\text{C}$ ,而且晶体膜只能在晶格匹配的衬底上制备,如蓝宝石( $13\%$ 的晶格失配)和6-H SiC( $1\%$ 的晶格失配)<sup>[24]</sup>。单晶AlN薄膜在集成光子学中的优势最早由中国SUN Changzheng课题组在2017年揭示<sup>[23]</sup>,并在 $1550\text{ nm}$ 处实现了品质因子超过 $2.5\times 10^6$ 的微环。此外,芯片级非线性频率转换:宽频Kerr梳和拉曼激光器也已实现。近年来,受单晶AlN薄膜低光学损耗的启发,片上UV-VIS区域的非线性过程也已逐步实现。

除了薄膜的生长,人们还试图通过高温退火( $1700^\circ\text{C}$ 以上)来改善沉积氮化铝的结晶度。其基本机制是通过热处理使AlN与其晶格不匹配的基材(如蓝宝石)之间的界面上的位错密度降低,从而实现再结晶过程。值得注意的是,高温退火需要材料具有高熔点(例如,AlN和蓝宝石的熔点在 $2000^\circ\text{C}$ 以上),而且处理后的AlN的光学损耗仍然需要进一步研究。

与PZT等压电材料相比,AlN的压电性能较弱(其纵向测得的最大压电系数仅为 $d_{33}\ 5.5\text{ pC/N}$ )。近年来研究人员通过掺杂不同的半导体或金属材料来改善AlN的压电性能,例如镁(Mg)、钛(Ti)、铬(Cr)、钪(Sc)等。2014年,日本YOKOYAMA T课题组将低成本的Mg和Ti掺杂到AlN中,实现了压电响应( $d_{33}$ )的改善<sup>[27]</sup>:当仅进行Mg掺杂时,压电响应增强了 $7\%$ ;而仅加入Ti时,其压电响应较低。此外,他们通过同时掺杂这两种元素将压电响应提高了 $30\%$ 。掺杂钪(Sc)的AlN压电性能也较为突出。德国BARTH S课题组在2016年<sup>[28]</sup>使用反应式磁控溅射技术,以Al和Sc作为靶材形成AlN薄膜。通过改变靶材功率比,可以很容易地在很宽的范围内改变Al-Sc比率,从纯AlN到 $\text{Al}_{(1-x)}\text{Sc}_x\text{N}$ ,其中 $x=0.4$ 。当 $x$ 的值从0增加到0.40, $d_{33}$ 系数增大,杨氏模量减小。表2比较了AlN、 $20\%$  Sc掺杂AlN和 $40\%$  AlN的压电特性。为进一步增强AlN基材料体系的压电特性,2020年,美国OLSSON III R H课题组研究了钪(Sc)取代铝(Al)掺杂形成铝氮化钪( $\text{AlScN}$ )<sup>[29]</sup>。除此之外,爱尔兰NOOR-A-ALAM M课题组和NOLAN M课题组还研究了AlN/ScN超晶格的铁电和压电特性,该超晶格由ScN和AlN扣合的单层组成,沿结晶c方向交替排列<sup>[30]</sup>。同样在2020年,他们还利用Li和X( $X=\text{V}$ -钒、 $\text{Nb}$ -铌、 $\text{Ta}$ -钽)在 $\text{Li}:X=1:1$ 比例下共掺杂取代Sc<sup>[31]</sup>,这拓宽了掺杂元素与AlN的组成自由,使其压电性显著增强。为了验证这一点,日本NGUYEN H H课题组共掺杂Mg和Hf AlN

表2 AlN, AlSc<sub>(0.2)</sub>N, AlSc<sub>(0.4)</sub>N的压电性能比较<sup>[29]</sup>  
 Table 2 Comparison of piezoelectric properties of AlN, AlSc<sub>(0.2)</sub>N, AlSc<sub>(0.4)</sub>N<sup>[29]</sup>

Piezoelectric properties	AlN	AlSc <sub>(0.2)</sub> N	AlSc <sub>(0.4)</sub> N
Piezoelectric Constant/(C·m <sup>-2</sup> )	$E_{31} = -0.38$ $E_{33} = 1.55$	$E_{31} = -0.62$ $E_{33} = 1.67$	$E_{33} = 3.19$
Piezoelectric Coefficient/(pC·N <sup>-1</sup> )	$d_{33} = 5.5$ $d_{31} = -2.6$	$d_{33} = 20$	$d_{33} = 20\sim 25$

((MgHf)<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>N)开发了压电薄膜<sup>[32]</sup>,所制备的器件性能得到了显著改善。为了从原理上解释压电效应增强的原因,日本HIRATA K课题组用AlN掺杂Yb,并利用第一性原理计算得到的 $d_{33}$ 最大值超过100 pC/N,是他们在以前的文章中报道的AlN的20倍<sup>[31]</sup>。

从上述进展中可以了解到,无论是单元素掺杂还是多元素掺杂,AlN的压电性能和系数都得到了显著增强,这将有助于集成光电子领域中基于AlN薄膜的高效率压电器件研究和发展。除了AlN压电薄膜材料,还有一种常见的压电薄膜材料PZT,它的压电系数要比AlN薄膜高很多。

## 1.2 PZT压电材料研究进展

PZT具有优良的铁电、介电、压电、热释电和光电性能,被广泛应用在多个领域。PZT的压电系数很高,其压电系数可达150 pm/V<sup>[33]</sup>,是AlN的数十倍以上。本节将重点讨论PZT薄膜的沉积方法及其压电特性。

用于生长PZT薄膜的方法有许多,包括溶胶凝胶法<sup>[34]</sup>,射频溅射法<sup>[35]</sup>,金属有机化学气相沉积法<sup>[7]</sup>和脉冲激光沉积法<sup>[36]</sup>。PZT薄膜的压电特性取决于多种因素,包括加工条件(如沉积类型和温度)、化学成分、厚度和晶体取向等,其中比较热门的两个研究方向为准同型相界(Morphotropic Phase Boundary, MPB)和掺杂改性。如图2所示,PZT在富锆区是菱方相,而在富钛区是四方相,在这两种相界之间有一个相界线,被称为准同型相界,对应成分为锆:钛=52:48,在MPB区域能提供最大的压电系数,多年来,学者们对锆钛酸铅的MPB区域展开了深入的研究。首先在原理上,美国DU Xiaohong课题组<sup>[37]</sup>从Landa-Ginzburg-Devonshire理论推导出单晶PZT薄膜在MPB区域110取向时能最大化薄膜的压电性能。随后法国KOVACOVA V课题组<sup>[38]</sup>深入研究发现,对于多晶100取向的PZT薄膜,为了在电场作用下容易过渡到菱方相,最好在四方相中使用PZT。他们认为通过微调PZT成分可以使PZT在0 V时显示100%的四方相,从而在过渡到100%菱方相时能产生高达250 pm/V的 $d_{33}$ 。此外,为研究多晶和外延PZT薄膜的压电特性,日本KANNO I课题组<sup>[39]</sup>通过原位XRD(in-situ XRD)比较测试了多晶PZT薄膜和外延PZT薄膜的压电特性。对于外延PZT薄膜,提取的 $d_{33}$ 系数为80 pm/V;而对于多晶PZT薄膜,其压电系数 $d_{33}$ 与外加电场强度高度相关,结果为30~340 pm/V,他们将结果归因为巨大的外在效应,如场致相变(field-induced phase transition)和增量畴密度(incremental domain densities)。结果不但表明多晶PZT薄膜的压电特性要优于外

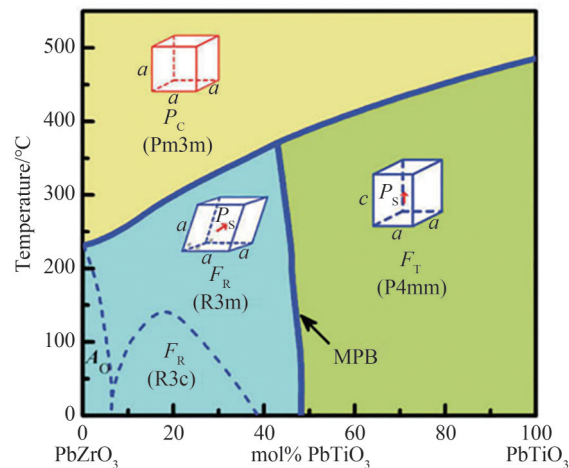


图2 PZT中的MPB区域<sup>[41]</sup>

Fig. 2 Morphotropic phase boundary in a ferroelectric PZT system (PbZrO<sub>3</sub>-PbTiO<sub>3</sub>)<sup>[41]</sup>

延PZT薄膜,还表明多晶PZT薄膜在MPB区域极化方向的旋转对提高压电性能有重要作用。

除了对MPB区域的研究,学者们还发现在PZT中进行微量元素的掺杂能获得截然不同的性质<sup>[40]</sup>。PZT的掺杂主要分硬掺杂和软掺杂。软掺杂主要通过掺杂钡、镧、铈等元素提高PZT的压电系数,而硬掺杂主要利用铁、锰等元素替换PZT中的钛或锆元素,从而降低PZT薄膜中的介电损耗。关于掺杂机理的解释目前大多数都是从畴壁运动角度,硬性掺杂可以使PZT的电畴结构更加稳定,在外场作用下不容易被改变,导致压电效应和畴壁运动相关的损耗同时降低;软性掺杂导致PZT的电畴活动能力增强,更容易被外场扰动,展现出更优的压电性能。然而对PZT掺杂机理的理论研究还有待进一步探索。PZT压电薄膜除了压电特性好的优势外,仍存在与CMOS工艺不兼容,稳定可靠性等问题,研究人员从微电子领域寻找到一个与CMOS工艺兼容的压电薄膜材料HfO<sub>2</sub>。

### 1.3 HfO<sub>2</sub>薄膜材料研究进展

HfO<sub>2</sub>作为一种新型的宽带隙、高介电常数材料,已经广泛应用于微电子领域,与CMOS制备工艺兼容,备受关注,有望替代集成电路中金属氧化物半导体场效应管的栅极绝缘层二氧化硅,解决电芯片中硅和氧化硅结构发展的尺寸极限问题。传统HfO<sub>2</sub>材料并不表现出铁电和压电特性,研究发现通过掺杂能在HfO<sub>2</sub>薄膜中获得铁电压电特性。本节将重点讨论HfO<sub>2</sub>薄膜的掺杂元素及其掺杂后的压电特性和表征。

2011年,德国BÖSCKE T S课题组首次在掺杂硅元素的HfO<sub>2</sub>薄膜上发现铁电性质和压电响应<sup>[42]</sup>。随后掺杂锆(Zr)<sup>[43]</sup>、铝(Al)<sup>[44]</sup>、钇(Y)<sup>[45]</sup>、镨(Lu)<sup>[46]</sup>等元素的HfO<sub>2</sub>薄膜中铁电性质被陆续发现报道。为研究硅掺杂HfO<sub>2</sub>薄膜的压电系数,德国MART C课题组利用衬底在快速温度循环时的热膨胀测试了20 nm厚的硅掺杂HfO<sub>2</sub>薄膜的压电响应,所提取的压电系数 $d_{31}$ 为-11.5 pm/V,比AlN的压电系数高五倍多<sup>[47]</sup>。为了研究HfO<sub>2</sub>薄膜的厚度对其压电特性的影响,德国MITTMANN T课题组从陶瓷靶上溅射并退火制造出未掺杂的HfO<sub>2</sub>薄膜,其10 nm到50 nm之间都显示出铁电和压电特性<sup>[48]</sup>。一般地,薄膜厚度比较小时,表面能增大,这有利于薄膜的正交晶相的形成。除了硅元素掺杂HfO<sub>2</sub>薄膜展现出优秀的压电特性外,美国SALAHUDDIN S课题组在硅衬底上使用ALD方法沉积了1~2 nm厚的掺杂锆HfO<sub>2</sub>薄膜,并且验证了该薄膜材料的铁电和压电特性<sup>[49]</sup>。为从原理和底层出发探索掺杂元素的HfO<sub>2</sub>薄膜铁电和压电特性的起源,研究人员分别发现了薄膜材料中的铁电正交相<sup>[42]</sup>、铁电菱形相<sup>[50]</sup>及氧空位作用<sup>[51]</sup>。第一种铁电正交相,主要利用先进的薄膜表征测试手段,验证了掺杂元素的HfO<sub>2</sub>薄膜中的铁电及压电特性是由于存在非中心对称结构,即Pca2<sub>1</sub>空间群的正交晶相结构,如图3所示,通过元素掺杂等方式,使中心对称的四方晶相转化为非中

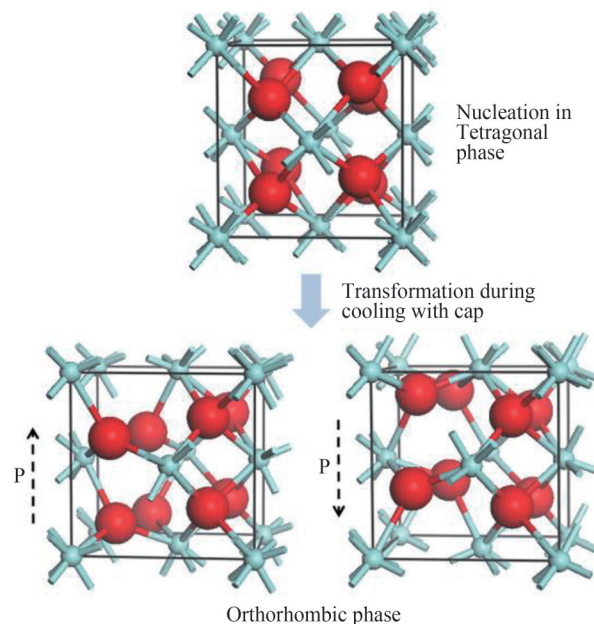


图3 氧化铪薄膜中的正交铁电相表征<sup>[42]</sup>

Fig. 3 Characterization of orthorhombic ferroelectric phases in thin-film HfO<sub>2</sub><sup>[42]</sup>

心对称结构的正交晶相。第二种菱形相,2018年,荷兰 NOHEDA B 课题组使用脉冲激光沉积(Pulsed Laser Deposition, PLD)方法生长出了高质量掺铌  $\text{HfO}_2$  薄膜,通过 X 射线衍射(X-Ray Diffraction, XRD)、选区电子衍射(Selected-Area Electron Diffraction, SAED)以及截面高角度环形暗场扫描透射电子显微镜(High-Angle Annular Dark-Field Scanning Transmission Electron Microscopy, HAADF-STEM)等先进薄膜表征设备观测到非中心对称的菱形晶相<sup>[50]</sup>。第三种氧空位作用,2020年,美国 KALININ S V 课题组提出了另外一种理论解释:铁电和压电特性来源于氧空位产生的弹性电偶极子作用<sup>[51]</sup>。

总体来说,关于  $\text{HfO}_2$  薄膜铁电性和压电特性的研究已经从原理,实验等多种手段进行确定和验证,薄膜的铁电特性和压电响应受到薄膜厚度、掺杂元素种类和浓度、退火时间和温度,沉积生长方法、衬底种类等多种因素的影响。上述三种压电薄膜晶圆由于未实现商业化,在实际应用中仍存在问题,LN 薄膜材料由于优秀的电光效应被人所熟知,并且已经实现晶圆商业化,但对其压电特性的研究比较少。

#### 1.4 LN 薄膜材料研究进展

LN 材料属于 3 m 点群,特点是三次旋转对称和镜像平面对称,锂原子和铌原子可在外场作用下移动,形成极化(如图 4)。LN 的居里温度很高(约 1 210 °C),铁电畴比较稳定。在光学性质方面,LN 具有宽的透明窗口和高折射率。人们研究了各种实现薄膜 LN 的工艺方法,包括化学气相沉积法<sup>[52]</sup>、射频溅射法<sup>[53]</sup>、脉冲激光沉积法<sup>[54]</sup>、溶胶凝胶法<sup>[55]</sup>和分子束外延法<sup>[56]</sup>等,随着技术的不断发展,目前绝缘体上 LN 晶圆已经实现商用化<sup>[57]</sup>。本节将重点讨论 LN 薄膜的压电特性。

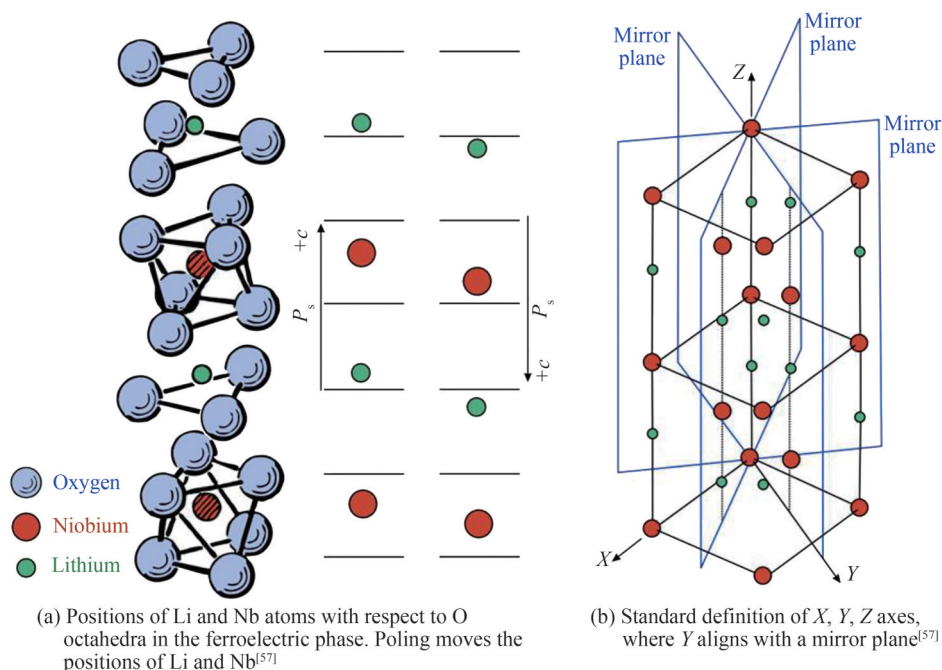


图 4 铌酸锂晶体结构示意图<sup>[57]</sup>

Fig. 4 Schematic diagram of lithium niobate crystal structure<sup>[57]</sup>

首先从工艺条件出发,法国 EDON V 课题组<sup>[58]</sup>研究了不同工艺条件对 LN 光学和压电特性的影响。他们通过溅射法在纳米晶金刚石/硅上沉积了 300 nm 的 LN 薄膜,然后对薄膜的结构和光学性质进行了分析。他们通过测量不同频率电压下的幅度值得到有效纵向压电系数  $d_{33}$ ,提取的  $d_{33}$  值约为 7.1 pm/V。研究表明较低的沉积温度和压力是实现 LN 相关电学和压电性能的关键参数。随后,为研究温度对薄膜压电特性的影响,中国 YU Fapeng 课题组<sup>[59]</sup>研究了 LN 压电系数和温度的相关性,发现在室温下  $d_{15}$  的压电系数最大,为 67.7 pC/N。增大温度到 500 °C,该系数增加到 79 pC/N,变化率为 16.7%。压电系数  $d_{21}$  在测试温度范围内呈现稳定趋势,变化率小于 12.5%。压电系数  $d_{33}$  有较大的增加,变化幅度大于 80%。

在研究 LN 薄膜材料压电特性变化的原因时,研究人员发现 LN 的物理和结构性质高度依赖于锂的非化学计量性,由于锂是一种轻元素,在薄膜生长后,LN 化合物中缺乏锂原子会导致寄生的非压电相

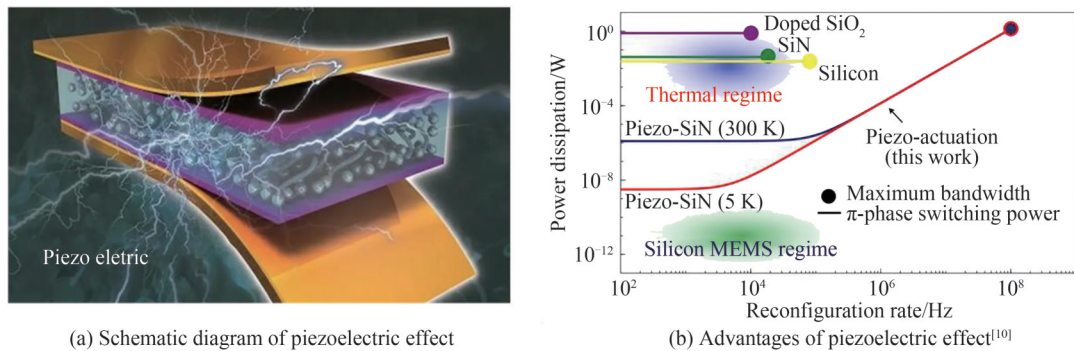
(如  $\text{LiNb}_3\text{O}_8$ ) 的出现。为了防止这一过程,研究人员采取了许多措施,如加热衬底或使用化学计量靶。俄罗斯 ZHUKOV R N 课题组<sup>[60]</sup>通过改变退火参数(加热和保持时间),用磁控溅射法尝试提高在未加热的硅衬底上生长的 LN 薄膜的压电性能。发现在加热至  $700\text{ }^\circ\text{C}$  的 12 min 和 5 min 的样品中,存在少量不同取向的畴(体现压电相的存在)。而作为对比,在硅衬底的缓冲层(如铂)上生长的 LN 薄膜则会含有较多的压电相,表现出较好的压电效应。结果显示在硅衬底上直接获得 LN 薄膜是非常有挑战性的。对 LN 薄膜压电效应的机理研究是有必要的,与 PZT 相同, LN 中同样存在准同型相界。韩国 CHOI W S 课题组<sup>[61]</sup>报道了在有序-无序型 LN 薄膜中观察到铁电极化的连续旋转,发现通过控制六方晶格框架内的锂空位浓度,可以使薄膜的自发极化从面外方向向面内方向倾斜。由于极化旋转必须发生在准同型相界,即具有不同极化方向的两个相之间的边界,这一结果对理解 LN 薄膜中准同型相界附近的压电效应提供了重要的参考。总的来说, LN 薄膜的压电特性受到不同工艺条件、温度、化学成分、晶体取向等要素的影响。

综上所述的四种薄膜材料,研究人员基本从原理机理、薄膜表征,实验测试等多方面的手段对压电效应进行了验证,这也为后续器件及应用的实验奠定了基础。

## 2 基于压电效应的光电子集成器件研究进展

### 2.1 低功耗压电调谐集成器件研究进展

理论上,当对压电薄膜材料施加外部电场时,因压电效应在薄膜材料中会产生应力和形变,一方面,在应力作用下,弹光效应导致薄膜材料的折射率会发生变化,另一方面,光波导边界在形变作用下发生位移,光程发生改变,引起有效折射率变化,最终导致波导中光信号的相位变化,实现光调谐。压电效应是电场驱动,仅存在漏电流,基于压电效应的光电子集成器件可以较小的功耗获得可调谐功能。图 5 总结了热光、微机电系统(Micro Electromechanical System, MEMS)、压电效应的光调谐器件的响应频率和功耗<sup>[10]</sup>,可以发现压电调谐与最常用的硅热光调谐方案相比,功耗下降 3~5 个数量级,响应时间提升 3 个数量级。引入压电薄膜材料有望实现超低功耗的光电子集成芯片。本节将重点讨论低功耗压电可调谐的原理及其研究进展。



(a) Schematic diagram of piezoelectric effect

(b) Advantages of piezoelectric effect<sup>[10]</sup>

图 5 压电效应的示意图和优势<sup>[10]</sup>

Fig. 5 Schematic diagram and advantages of the piezoelectric effect<sup>[10]</sup>

可调谐集成器件一般采用基于谐振腔式和马赫-曾德尔干涉式两种结构为基础单元。为了验证利用压电薄膜实现低功耗可调谐集成器件的可行性,通常采用占地面积小,结构简单的谐振腔结构。其波长共振的条件为

$$n_{\text{eff}} \cdot L = m \cdot \lambda \quad (1)$$

式中,  $L$  为光程,  $n_{\text{eff}}$  为传输模式的有效折射率,  $\lambda$  为谐振波长,  $m$  表示纵模数。压电效应的应变引起谐振波长的变化可表示为<sup>[8]</sup>

$$\Delta\lambda = \Delta n_{\text{eff}} \cdot L + n_{\text{eff}} \cdot \Delta L \quad (2)$$

式中,  $\Delta n_{\text{eff}}$  表示应变引起的有效折射率变化,  $\Delta L$  表示应变引起的长度变化。压电效应主要来源于弹光效应引起的折射率变化( $\Delta n_{\text{eff},s}$ )和边界移动效应( $\Delta n_{\text{eff},b}$ ),可表示为

$$\Delta n_{\text{eff}} = \Delta n_{\text{eff},s} + n_{\text{eff},b} \quad (3)$$

由于在波导的光传输方向,边界移动效应引起的长度变化比波导总长度足够小,边界移动效应引起的长度变化可以忽略不计。弹光效应在  $x$  和  $y$  两个方向上引起折射率变化可表示为<sup>[62]</sup>

$$\Delta n_x = -C_1 \sigma_x - C_2 (\sigma_y + \sigma_z) \quad (4)$$

$$\Delta n_y = -C_1 \sigma_y - C_2 (\sigma_z + \sigma_x) \quad (5)$$

式中,  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  为沿着  $x, y, z$  方向的应力张量分量,  $\Delta n_x$  和  $\Delta n_y$  表示分别在  $x, y$  方向上应力引起的折射变化。弹光系数  $C_1$  和  $C_2$  则与无应力下的材料折射率  $n_0$ , 杨氏模量  $E$ , 泊松比  $\nu$  和光弹性张量  $\rho_{11}, \rho_{12}$  相关, 可表示为

$$C_1 = \frac{n_0^3}{2E} (\rho_{11} - 2\nu\rho_{12}) \quad (6)$$

$$C_2 = \frac{n_0^3}{2E} [-\nu\rho_{11} + (1-\nu)\rho_{12}] \quad (7)$$

当已知某种压电薄膜材料中的表征参数时,可采用有限元仿真计算方法,使用薄膜材料的压电系数等参数估算产生的应力大小后,使用式(1)~(7)对压电效应的应变引起谐振波长的变化和调谐效率进行估算,为实验提供理论指导和参考。

表3列举了一些常见的压电驱动低功耗可调谐单元器件性能参数,压电效应在调谐及其功耗等方面的优势明显,但压电薄膜材料方兴未艾,直接图案化压电薄膜存在困难及工艺兼容性问题。近些年,基于压电效应的低功耗调谐器件前沿研究都采用压电薄膜材料与常见的CMOS兼容材料进行异质集成的技术路线,充分发挥压电薄膜材料的优势同时,引入硅、氮化硅等制备工艺成熟的薄膜材料,避免直接刻蚀压电薄膜材料,降低加工成本,增加性能可靠性。通过压电薄膜材料与硅或氮化硅异质集成的方式实现超低功耗、快速响应、CMOS兼容、能大规模低成本制造的光子集成芯片。

表3 压电驱动的低功耗可调谐单元器件结构及性能  
Table 3 Structure and performance of ultralow-power piezo-optomechanically tuning

References	Structures and materials	Tuning efficiency/(pm·V <sup>-1</sup> )	Power efficiency/(nW·pm <sup>-1</sup> )	CMOS compatibility	Years
[62]	PZT on silicon ring	19	/	No	2012
[63]	PZT on silicon nitride ring	25	1 200	No	2018
[64]	PZT on silicon nitride ring	1.3	20	No	2022
[65]	Silicon nitride ring on AlN	0.8	0.012 5	Yes	2019
[66]	AlN on silicon nitride ring	0.125~0.2	5	Yes	2020
[8]	Silicon ring on HfO2 ring	8.4	0.12	Yes	2022

首先介绍PZT与硅和氮化硅异质集成方案,如图6所示,2012年,以色列LEVY U课题组利用硅和PZT异质集成的方法,制备出可调谐的微环谐振腔器件。在覆盖氧化硅的硅波导上,以溶胶凝胶法旋涂了一层500 nm厚的PZT层,以电场驱动PZT薄膜材料中的压电响应,实验演示了压电驱动的双稳态现象,获得了19 pm/V的调谐效率<sup>[62]</sup>。为进一步获得调制效率、响应时间及功耗等器件性能参数,2018年,荷兰EVERHARDT A S课题组将PZT与氮化硅波导相结合制备出混合集成波导,获得了低损耗的PZT压电驱动的压光调制器,半波电压长度积为16 V·cm,压电响应时间为4.25 μs,功耗低于1 μW,比传统的氮化硅热光方案的功耗低5个数量级<sup>[67]</sup>。为进一步提升器件性能,2018年,美国JIN W课题组使用氮化硅、硅和PZT异质集成的方法,通过衬底底切悬空的改进,获得了25 pm/V的调谐效率,其半波电压长度积为3.6 V·cm,压电混合波导的传输损耗为0.3 dB/cm,并且测得的调谐功耗为1.2 μW/pm<sup>[63]</sup>。此后,2022年,他们将调谐功耗降低到20 nW,压电混合波导的传输损耗降低到0.03 dB/cm,但调制效率被牺牲,仅为1.3 pm/V,半波电压长度积增大到43 V·cm<sup>[64]</sup>。尽管利用PZT薄膜材料获得了较高的调谐效率和较低的调谐功耗,但PZT薄膜材料与CMOS工艺的兼容性较差,制备成本较高,在大规模集成芯片的制备方面存在挑战。

AlN作为一种与CMOS工艺兼容的薄膜材料,易于实现规模集成,同时存在压电响应,透明窗口覆盖200 nm到13.6 μm,受到了广泛的关注。如图7所示,2019年,美国EICHENFIELD M课题组在氮化硅光子集成回路中,使用基于AlN致动器的压光机械耦合方法<sup>[65]</sup>。得益于AlN薄膜材料的宽带隙,在可见光波段



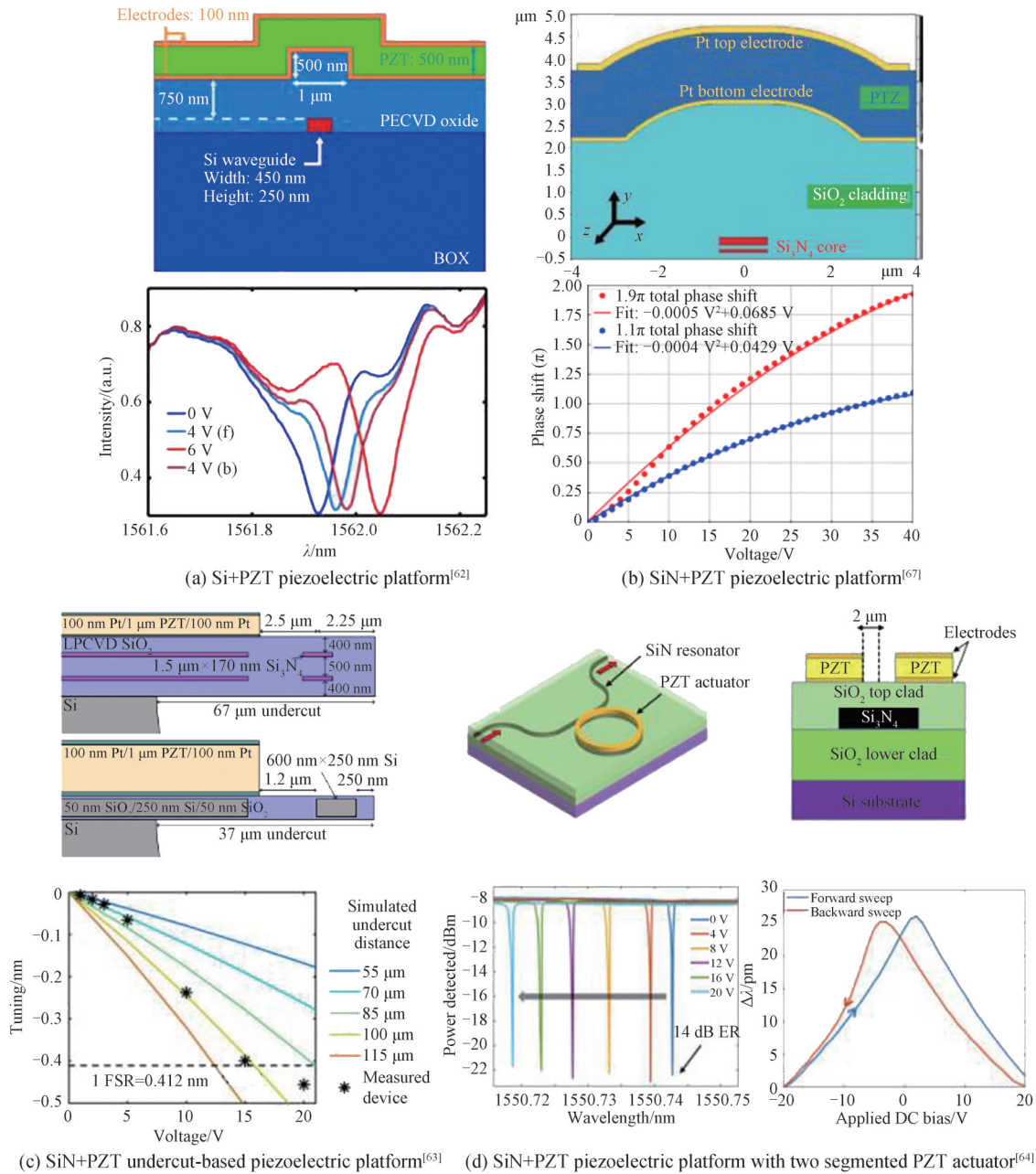


图6 PZT压电驱动的低功耗可调谐器件<sup>[62-64, 67]</sup>

Fig. 6 Low-power piezo-optomechanically tuning device based on PZT<sup>[62-64, 67]</sup>

实现 0.8 pm/V 的调谐效率和 0.0125 nW/pm 的调谐功耗,调谐响应时间仅为 4 ns。为了研究在 C 波段的调谐效率和功耗,2020 年,瑞士 KIPPENBERG T J 课题组和美国 BHAVE S A 课题组通过氮化硅和 AlN 异质集成的方法,利用 1 μm 厚 AlN 薄膜中的压电效应,获得了 TE 和 TM 两个模式下 0.125~0.2 pm/V 的调谐效率,调谐功耗仅为 5 nW/pm,并应用于集成芯片应用中<sup>[66]</sup>。同年,为获得更高的调谐效率和更低的传输损耗,瑞士 KIPPENBERG T J 课题组和美国 BHAVE S A 课题组通过在超低损耗氮化硅集成光子电路上集成氮化铝压电驱动器,实现了 15.7 MHz/V 的双向调谐效率,所需功率仅为 300 nW<sup>[68]</sup>。随后为进一步提升调制效率、响应时间、功耗等器件性能参数,2022 年,美国 DONG M 和 EICHENFIELD M 课题组基于氮化铝-氮化硅混合波导结构,制备了光子晶体压光调制器<sup>[69]</sup>和压电驱动悬臂梁结构的调制器<sup>[70]</sup>,半波电压长度积为 6 V·cm,在可见光波段实现超快的调谐响应(~250 ns)和超低功耗(<30 nW),在通信 C 波段的调谐效率

为 0.09 GHz/V。利用 AlN 薄膜材料中的压电效应,可以制备低功耗可调谐的单元器件,并实现规模集成芯片,但由于 AlN 薄膜材料压电系数小,存在器件尺寸大,调谐效率低,所需驱动电压高的问题。

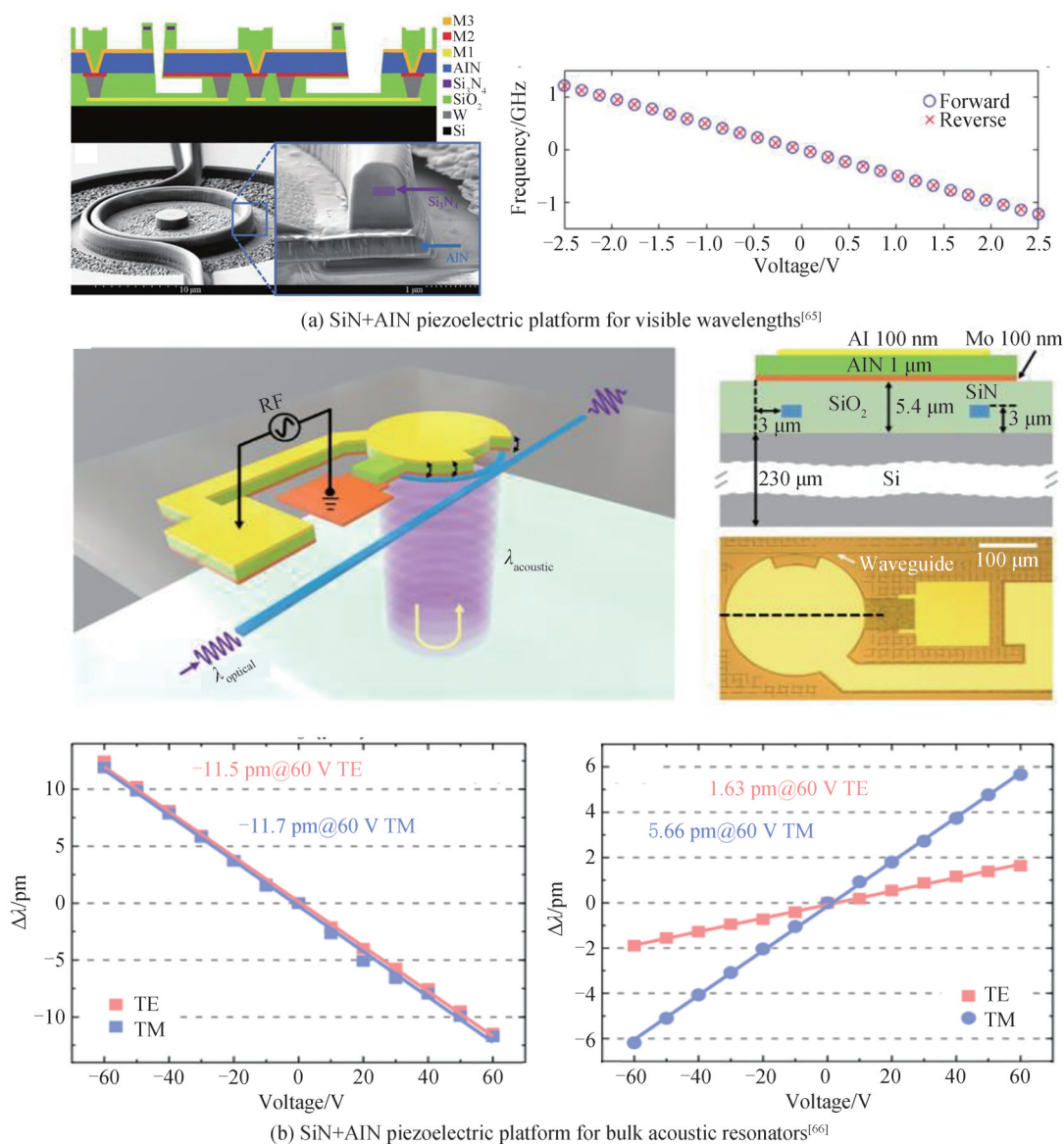
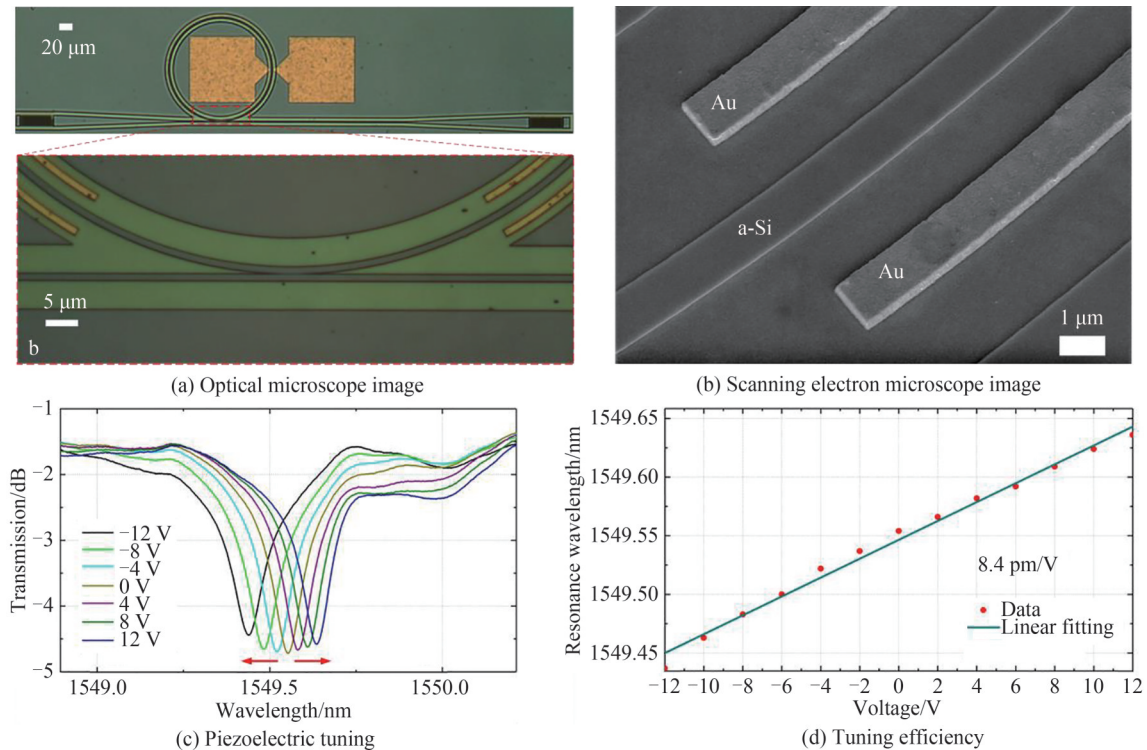


图7 AlN压电驱动的低功耗可调谐器件<sup>[65, 66]</sup>

Fig. 7 Low-power piezo-optomechanically tuning device based on AlN<sup>[65, 66]</sup>

为了解决 AlN 薄膜中驱动电压高,调制效率低的问题,2022年,中国 SU Yikai 和 ZHANG Yong 课题组等人引入掺锆 HfO<sub>2</sub> 薄膜作为导光层和压电层,开发了 CMOS 工艺兼容的 Si-HfO<sub>2</sub> 异质集成光子平台,设计并实验演示了基于 Si-HfO<sub>2</sub> 混合波导的压电可调谐微环谐振腔,利用 HfO<sub>2</sub> 的高压电系数,实现了 8.4 pm/V 的线性双向波长调谐,调谐功耗比传统硅热光调谐方案低三个数量级,仅为 0.12 nW/pm,如图 8 所示。HfO<sub>2</sub> 薄膜材料与 CMOS 工艺相兼容,有望实现规模集成光子芯片<sup>[8]</sup>。

综上所述,利用外部施加电场驱动薄膜材料中的压电响应,以实现低功耗可调谐的单元集成器件已被实验证实是可行的方案。随着压电驱动的单元器件逐步成熟,其发展趋势是借助压电驱动的优势,以单元集成器件为基础,实现低功耗大规模集成的芯片与应用。压电薄膜材料除了可以实现电光调制外,声光调制的实现也是其优势之一,借助声光在薄膜材料中的强相互作用,可以提升声光调制器件的性能,众多研究也围绕此展开。

图8 掺锆HfO<sub>2</sub>压电驱动的低功耗可调谐器件<sup>[8]</sup>Fig. 8 Low-power piezo-optomechanically tuning device based on Zr-doped HfO<sub>2</sub><sup>[8]</sup>

## 2.2 集成声光调制器研究进展

声光相互作用本质上是一种多物理场耦合过程。传统的体声波(Bulk Acoustic Wave, BAW)声光调制器中的声学波由尺寸为几厘米晶体的压电效应产生,并与晶体传播的光相互作用。这种调控方式对光子和声子能量束缚能力都较弱,导致介质中声光相互作用强度较低。与体材料相比,光子集成回路可以将声表面波(Surface Acoustic Wave, SAW)和光波很好地限制在薄膜内,有助于在波长尺度范围内实现高的声光重叠效果,声场和光场之间的耦合作用会显著增强,只需要很小的驱动功率就能起到非常好的声光作用效果,进而获得小型化、高性能、低成本的集成声光调制器件。一般来讲,声表面波是由放置在薄膜压电材料上的换能器(IDT)产生,通过给换能器施加特定频率的射频信号后,会激发出在晶面传播的同一频率的超声波,从而与光波发生相互作用。本节将重点讨论基于AlN薄膜和LN薄膜的声光调制器的研究进展。

随着薄膜压电材料制造技术的发展,集成声光调制器已经在多个压电材料平台得到实现,如AlN, LN等。为了进一步获得高效率的片上声光调制器,器件结构也有所不同,例如:微环谐振腔、一维纳米谐振腔、二维光子晶体谐振器、悬浮波导、螺旋波导以及马赫-曾德尔干涉仪等结构。如图9所示,2014年,美国LI Mo课题组<sup>[71]</sup>在AlN-SiO<sub>2</sub>平台上制备了跑道型微环谐振器和微波频率下的声表面波换能器。微环谐振器的品质因子为 $4 \times 10^4$ ,器件的声光调制频率为10.6 GHz。为减小器件的占地面积,2015年,美国LI Mo课题组<sup>[72]</sup>通过引入纳米谐振腔的结构,谐振腔的品质因子为 $5 \times 10^4$ ,通过多个光子纳米腔和表面波的耦合作用,实现了12 GHz的声光调制频率。除了不同的器件结构,高效率的IDT也是实现片上高性能声光调制器的追求目标之一,2019年,美国BAHL G课题组<sup>[73]</sup>在AlN薄膜压电材料平台上,制备了跑道型微环谐振器结构的声光调制器。通过刻蚀掉AlN薄膜下面的Si层,使AlN薄膜为悬浮结构,形成了相对独立的声光作用平台,增强了从射频信号到光波的转换,并通过设计了一种新型的叉指压电换能器(CFIDT),在两个正交方向上具有周期性,通过射频输入响应的相位变化改变声学波的激励方向,提高了换能器的效率,器件的声光调制效率达到了3.9%,声光调制频率为4.82 GHz。为了进一步增强AlN薄膜材料的压电性能,2022年,中国SUN Junqiang课题组<sup>[74]</sup>利用AlScN材料优异的压电性能,在AlScN平台上制备了由声表面波驱动的螺旋波导结构的声光调制器。在具有8个相互作用段的紧凑螺旋波导中,声光耦合性能得到了进一步改善,器件的声光调制频率达到3.373 GHz,调制效率达到8.84%。

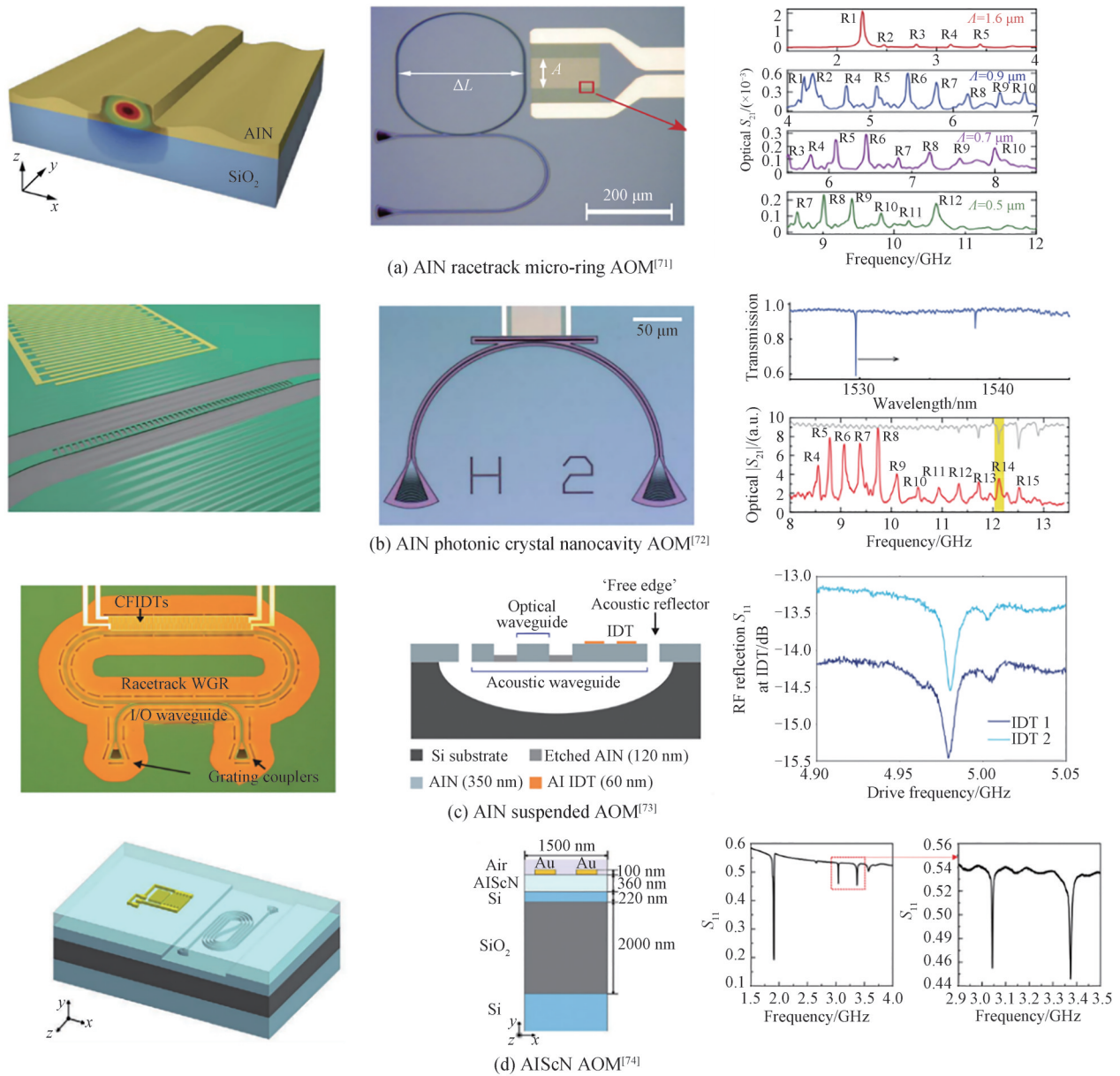


图9 AIN 声光调制器<sup>[71-74]</sup>  
Fig.9 AIN acoustic-optic modulator<sup>[71-74]</sup>

随着薄膜 LN 优异的光电性能被广泛研究,由于薄膜 LN 在压电转换和电光转换上的优势以及晶圆的成熟制备,薄膜 LN 成为了制备高调制效率、低损耗的声光调制器的理想平台,如图 10 所示。2019 年,中国 CAI Lutong 课题组<sup>[75]</sup>第一次制备了基于薄膜 LN 的声光调制器,采用不同的结构来构成不同类型的声光调制器。MZI 型声光调制器的  $V_{\pi}L$  为  $5 \text{ V}\cdot\text{cm}$ ,微环调制器型声光调制器品质因子为  $3 \times 10^5$ ,调制效率达到了 42%。为了实现更高声光转换效率的 LN 声光调制器,通过刻蚀掉薄膜 LN 下面的氧化层,使器件成为悬浮式结构的器件能够有效增强声光耦合作用,2019 年,中国 SHAO Linbo 课题组<sup>[76]</sup>制备了悬浮式的薄膜 LN 声光调制器,声光调制器结构分别为非等臂的 MZI 型和跑道微环型,其中 MZI 型的器件调制频率为 3.33 GHz,调制效率达到了 64%, $V_{\pi}L$  为  $0.046 \text{ V}\cdot\text{cm}$ ;跑道微环型的器件品质因子为  $2 \times 10^6$ ,半波电压为 0.77 V。同样是悬浮式的结构,2021 年,美国 HASSANIEN A E 课题组<sup>[77]</sup>制备了 MZI 型带有光子晶体波导的薄膜铌酸锂声光调制器。器件的调制频率为 1.16 GHz,调制效率达到了 19.3%, $V_{\pi}L$  为  $0.019 \text{ V}\cdot\text{cm}$ 。

为了进一步提高薄膜 LN 上声光调制器的性能,研究人员开始将 LN 材料与其它材料集成起来,如图 10 所示。2020 年,美国 SARABALIS C J 课题组<sup>[78]</sup>通过将衬底材料换成声光性能更好的蓝宝石材料,第一次在

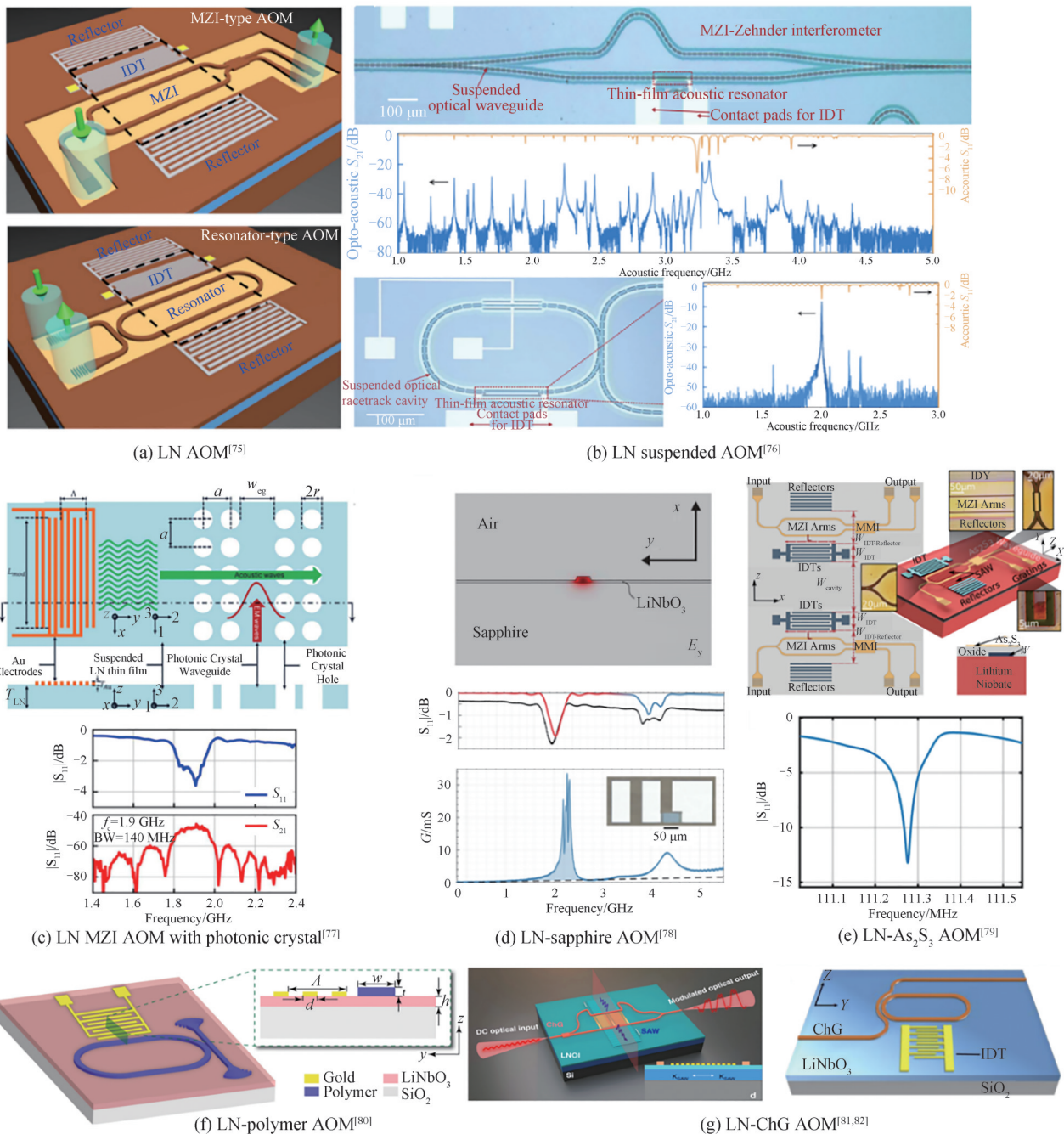


图10 LN声光调制器<sup>[75-82]</sup>

Fig. 10 LN Acoustic-Optic Modulator (AOM)<sup>[75-82]</sup>

基于蓝宝石上的薄膜LN实现了声光调制器,器件的声光调制频率为2 GHz,调制效率达到了10%。同年,美国KHAN M S I课题组等<sup>[79]</sup>报道了由三硫化砷(As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>)和LN异质集成的声光调制器,利用As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>波导的高折射率对比度得到更高的光约束作用并增强了声光相互作用,使用As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>波导在LN材料上制备等臂MZI型的声光调制器,器件的声光调制频率为0.11 GHz,调制效率达到了95%, $V_{\pi}L$ 为0.94 V·cm。由于悬浮式结构需要刻蚀掉底部的氧化层,对器件制备工艺提出了很高要求,追求无刻蚀的薄膜LN声光调制器仍然是研究人员的重点方向。2020年,中国香港SUN Xiankai课题组<sup>[80]</sup>考虑了薄膜LN无刻蚀平台,实现了基于薄膜LN的无刻蚀声光调制器,SAW可以在未刻蚀的薄膜LN中有效地激发并传播,而不会受到刻蚀结构不可避免带来的反射或散射损失。器件的调制频率可超过4 GHz,品质因子为 $5 \times 10^6$ 。2022年,同样是无刻蚀的薄膜LN平台,中国WAN Lei课题组<sup>[81, 82]</sup>提出了一种由LN和硫系玻璃(ChG)异质集成的方案,大大提高了声

光调制器的调制效率, MZI型声光调制器的  $V_{\pi}L$  为  $0.03 \text{ V}\cdot\text{cm}$ , 调制效率达到了  $98.5\%$ ; 微环调制器型声光调制器的  $V_{\pi}L$  为  $0.02 \text{ V}\cdot\text{cm}$ , 品质因子为  $5 \times 10^5$ 。表4概括了这些不同材料的声光调制器的结构和性能。

表4 集成声光调制器的结构及性能  
Table 4 Structure and performance of acoustic-optic modulator

References	Material	Structure	$V_{\pi}L/(\text{V}\cdot\text{cm})$	Efficiency/%	Qualify factor	Frequency/GHz	Years
[71]	AlN	MRR	\	\	$4 \times 10^4$	10.6	2014
[72]	AlN	Acoustic cavity	\	\	$5 \times 10^4$	12	2015
[73]	AlN	Suspended MRR	\	3.9	\	4.82	2019
[74]	AlScN	Spiral waveguide	\	8.84	\	3.373	2022
[75]	LN	MZI	2.5	42	\	0.11	2019
[76]	LN	Suspended MZI	0.046	64	\	3.33	2019
[77]	LN	Suspended MZI	0.019	19.3	\	1.16	2021
[78]	LN-sapphire	Ridge waveguide	\	10	\	4.3	2020
[79]	LN-As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	MZI	0.94	95	\	0.11	2020
[80]	LN	MRR	\	\	$5 \times 10^6$	4	2020
[81]	LN-ChG	MZI	0.03	98.5	\	0.84	2022
[82]	LN-ChG	MRR	0.02	\	$5 \times 10^5$	0.84	2022

对于AlN压电薄膜材料的声光调制器而言,如表4所示,基于AlN压电薄膜的声光调制表现出的激发频率可以达到十几GHz,但仍需综合考虑效率、损耗等其他器件性能,这与薄膜材料、器件结构设计等方面密切相关。由于AlN自身压电系数较小,器件在调制效率方面的性能有待进一步提高。高消光比、高调制效率、低损耗一直都是声光调制器所追求的指标参数。通过薄膜LN的高压电系数和低光学、声学传播损耗,将有助于显著提高声光调制器的效率,为光子集成电路提供更大的可扩展性。

### 3 基于压电效应的光电集成器件应用研究进展

#### 3.1 集成压电可调谐器件的应用研究

在上述压电驱动的集成光子器件单元的基础上,已有团队开展压电驱动的规模集成芯片及其应用研究。本节将重点讨论基于压电效应的集成光子器件应用的研究进展。

由于压电薄膜和压电驱动的单元器件都已被研究验证,条件已成熟,通过级联压电驱动的单元器件实现更多复杂功能的芯片系统成为关注的重点,如图11所示,2020年,美国DONG M、GILBERT G、DIRK ENGLUND D和EICHENDIELD M课题组利用CMOS工艺在200 nm氮化硅晶圆上成功研制了4通道的马赫-曾德尔干涉仪级联压电驱动光子集成芯片。基于氮化硅和AlN压电调谐的西矩阵芯片能实现超低功耗的光信号高速切换与下载,在可见光到近红外波长下宽带工作,相位调制带宽大于100 MHz。该可编程压电驱动光子集成芯片有望应用于光计算应用中,扩展到对N个输入/输出光学模式进行通用的线性光学变换。该压电芯片还存在一些问题,比如受限于AlN的低压电系数,实现该方案的规模计算需要较大的驱动电压<sup>[10]</sup>,系统性能仍需进一步改善。同年,瑞士KIPPENBERG T J课题组和美国BHAVE S A课题组提出利用压电驱动单元器件实现高速孤子微梳驱动的方案,通过在超低损耗氮化硅光子集电路上集成AlN压电驱动器,实现了MHz带宽的电压控制孤子启动、调谐和双稳态,具有双向调谐、高线性、低滞后度的特点,并进一步证明了基于AlN薄膜压电驱动的孤子光频梳芯片可以应用于大规模并行调频连续波激光雷达中<sup>[68]</sup>。基于压电效应的光子集成芯片在光计算、光频梳生成及激光雷达等应用中扮演着重要的角色,提供了一种低功耗的可行方案。

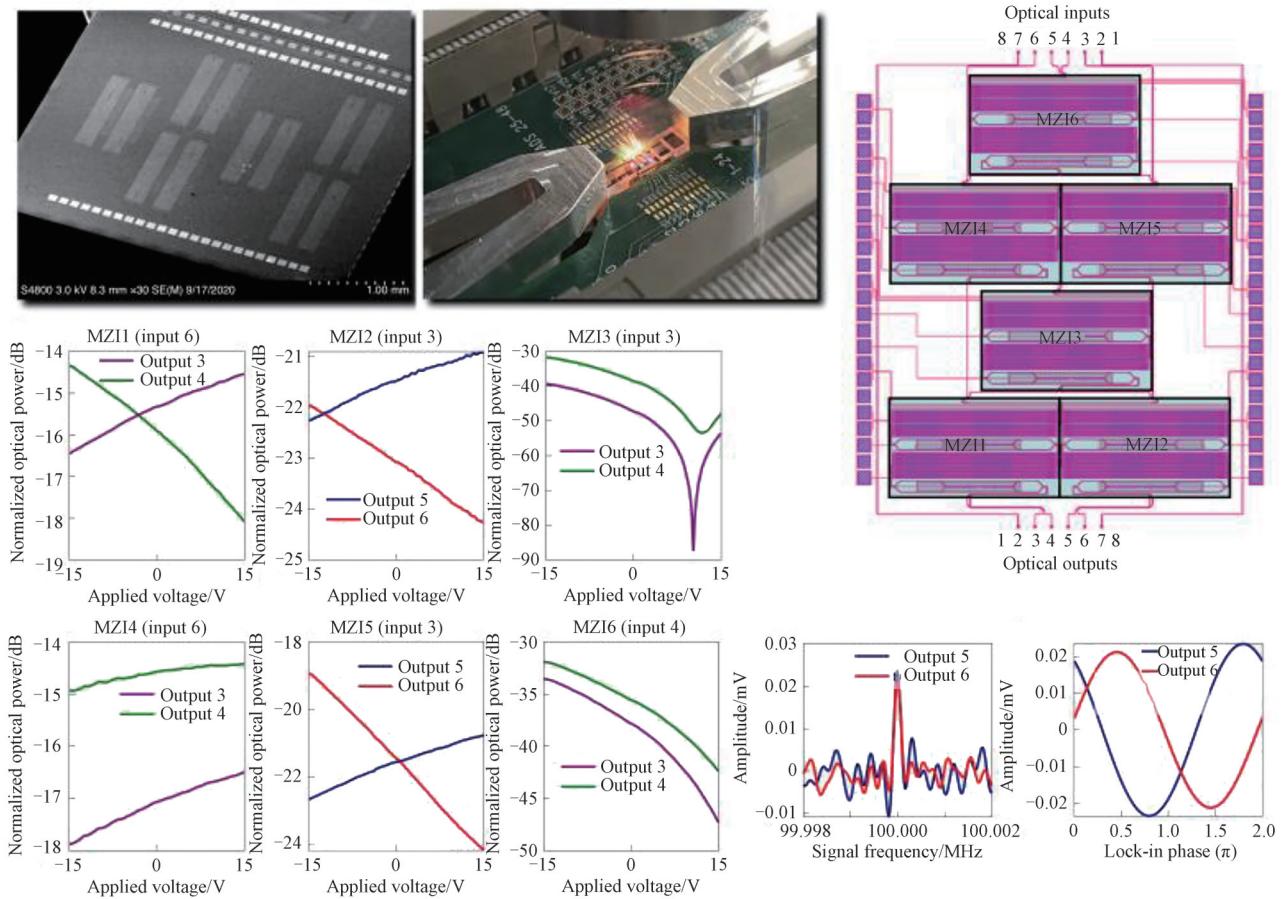


图 11 AIN 压电驱动芯片及其光计算应用<sup>[10]</sup>

Fig. 11 AIN piezo-optomechanical actuator chip and its computing applications<sup>[10]</sup>

除了片上压电驱动光计算、光频梳生成、激光雷达等应用外,如图 12 所示,2020 年,瑞士 KIPPENBERG T J 课题组和 BHAVE S A 课题组基于氮化铝压电驱动的氮化硅集成微环,通过压电驱动激励高泛音体声波共振模式,通过时空调制实现完全集成的电驱动微环隔离器,该隔离器应用显示了亚纳秒级的驱动能力,在 1 GHz 的带宽下实现了 17 dB 的隔离消光比<sup>[66]</sup>。针对不同的光传输模式,2021 年,瑞士 KIPPENBERG T J 课题组和美国 BHAVE S A 课题组展示了基于 AIN 压电调制器单片集成的无磁光隔离器,以三个旋转相位驱动 AIN 体声波,对微环进行时空调制,通过光开关控制传播方向形成不同的偏振模式,打破光传输的互易性,实现消光比为 10 dB,插入损耗为 0.1 dB,隔离带宽为 700 MHz 的无磁光隔离器<sup>[83]</sup>。

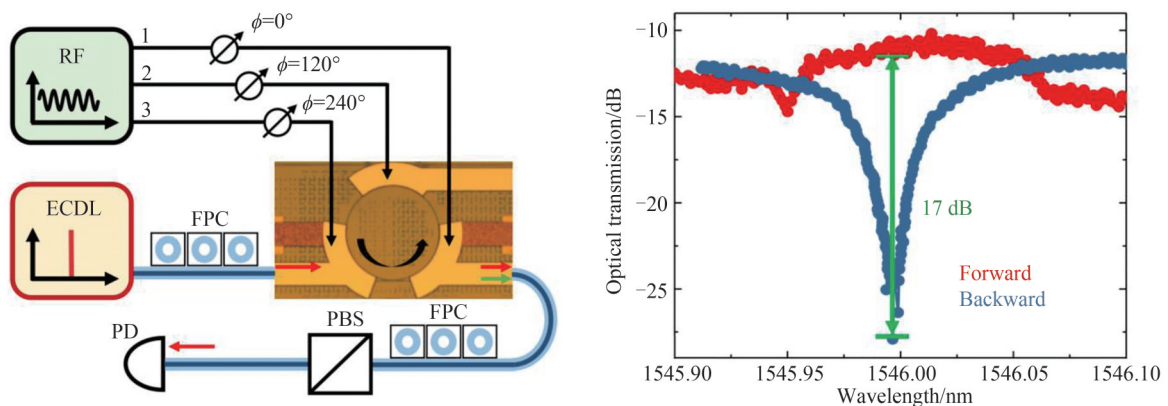


图 12 AIN 压电驱动芯片及其光隔离器应用<sup>[66]</sup>

Fig. 12 AIN piezo-optomechanical actuator chip and its optical isolator application<sup>[66]</sup>

综上所述,基于压电效应的集成光子器件在众多应用中展现出了独特的优势,成为了一种稳定可靠,高性能的方案。另外,基于高效率声光调制器的应用也受到了广泛关注。

### 3.2 集成声光调制器的应用研究

集成声光调制器有诸多潜在应用场景,比如光隔离、光计算、非互易调制和传输等,如图 13 所示。在没有磁光材料的情况下,如何通过打破时间反转对称的刺激实现非互易光传输,仍然是集成纳米光子器件的主要挑战。本节将重点讨论基于集成声光调制器的计算应用研究进展。

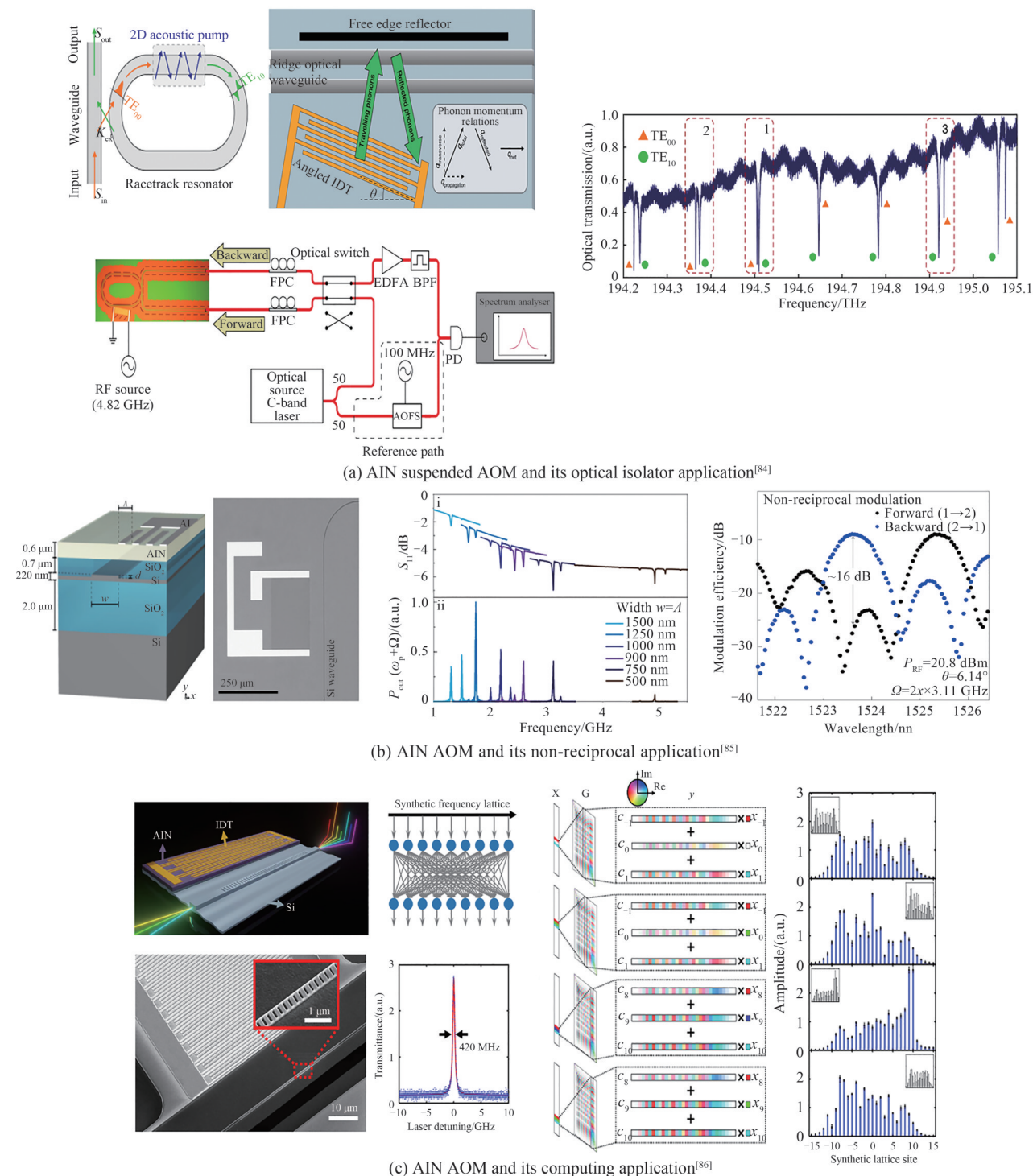


图 13 声光调制器应用<sup>[84-86]</sup>  
Fig. 13 Acoustic-optic modulator application<sup>[84-86]</sup>



2018年,美国BAHL G课题组<sup>[84]</sup>通过二维声学泵的方法制备了非互易型的AlN声光调制器来打破时间反转对称性,解决了使用光泵浦带来的带宽问题。声学泵为光声相互作用提供非零的重叠积分,增强了声场和光场的相互作用,同时满足了必要的相位匹配。在其中一个方向传播的光会经历固定的频率偏移,而在相反方向传播的光会被吸收,作为频移光隔离器的应用,该器件具有15 dB的对比度和17%的模式转换效率。分布式声光调制是在集成光子电路中实现低损耗、非磁性隔离器和循环器的有效手段。2021年,美国KITTLAUS E A课题组<sup>[85]</sup>在AlN-SiO<sub>2</sub>平台实现了宽带、集成的非互易分布式声光调制器,不需要光泵浦或者悬浮式结构,在标准硅波导内通过SAW产生线性声光调制,在1~5 GHz的频率范围内实现了光相位调制和单边带幅度调制。使用蛇形波导结构,在0.8 nm(100 GHz)光带宽上实现大于10%的增强调制效率和电驱动的非互易调制和光模式转换。集成光子学的光计算带来了数据密集型计算技术的关键转变,面对空间分布方案中片上架构集成密度的限制,2022年,美国LI Mo和ZHAN Han课题组<sup>[86]</sup>通过在Si-AlN平台上制备了一个纳米光子谐振腔声光调制器,展示了在合成频率晶格上大规模的可伸缩复值矩阵向量乘法,通过共振增强的强电光机械耦合,构成了一个完全连接的线性计算层,对编码为光谱相干光场的复值矢量输入进行线性变化,以大规模的数据处理和小的器件步长为频域集成光计算系统的实验实现开辟了道路。

## 4 总结与展望

随着集成光电子技术和压电薄膜材料制备技术的日益成熟,基于压电效应的光子集成芯片基本实现了低功耗可调谐,高效率声光调制以及不同场景的应用。然而发展至今,这项技术也面临一些挑战和问题。

压电效应来源于压电薄膜,高质量的压电薄膜制备是器件乃至系统的核心问题。压电薄膜质量受到沉积方法、缺陷抑制方法、材料组分调控、沉积基底等多方面的影响。如何获得一个高压电系数、稳定可靠、易于表征、厚度均匀平整、粗糙度小的压电薄膜是基于压电效应的光子集成芯片面临的挑战。硅或氮化硅是CMOS兼容的薄膜材料,在当前光子集成芯片中占据主导地位,但这两种材料都不具备压电效应。而现有的压电薄膜材料与CMOS工艺的兼容性存在一定的问题,目前众多的选择是制备压电薄膜与硅或者氮化硅异质集成的混合波导,如何通过波导的设计与加工减小光的传输损耗以实现大规模的应用是基于压电效应的光子集成芯片在实际应用中亟需解决的关键问题。良好的封装对于保护集成芯片并确保稳定性非常重要,但也需要解决封装与性能之间的折衷问题,提高芯片系统的性能和稳定性。总的来说,基于压电效应的光子集成芯片是一个非常具有前景的领域,这一领域的发展将有助于满足通信、传感、计算等领域对光学信号处理和不断增长的需求。

得益于加工制备技术的进步,新型压电薄膜材料的制备与表征逐渐成熟,基于压电效应的光子集成器件展现出超低功耗、快速响应、线性调谐等优势特点,基于压电薄膜材料的光子集成芯片已在酉矩阵计算、矩阵乘法运算、孤子频梳驱动生成等应用中体现出巨大的潜力价值。除了低功耗可调谐的集成光子器件及其应用外,利用压电薄膜中光场与声场的高效耦合,基于压电薄膜材料的高效声光调制器也得到了长足的进步,已在低损耗光隔离器、光计算等应用中得到充分利用,展现出有希望的应用前景。尽管目前的研究仍围绕着比较成熟的氮化铝和铌酸锂薄膜材料展开,但通过压电薄膜沉积制备工艺的改善,优化器件设计,其他压电薄膜材料的应用潜力有望被进一步发掘。

### 参考文献

- [1] SOREF R. Silicon photonics: a review of recent literature [J]. *Silicon*, 2010, 2(1): 1-6.
- [2] SU Yikai, HE Yu, GUO Xuhan, et al. Scalability of large-scale photonic integrated circuits [J]. *ACS Photonics*, 2023, 10(7): 2020-2030.
- [3] ZHANG Yong, HE Yu, ZHU Qingming, et al. Single-resonance silicon nanobeam filter with an ultra-high thermo-optic tuning efficiency over a wide continuous tuning range [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(18): 4518-4521.
- [4] TU Luqi, CAO Rongrong, WANG Xudong, et al. Ultrasensitive negative capacitance phototransistors [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 101.
- [5] ABEL S, STOFERLE T, MARCHIORI C, et al. A hybrid barium titanate-silicon photonics platform for ultraefficient electro-optic tuning [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(18): 1688-1693.
- [6] JUNG H, TANG H X. Aluminum nitride as nonlinear optical material for on-chip frequency comb generation and frequency conversion [J]. *Nanophotonics*, 2016, 5(2): 263-271.
- [7] ALEXANDER K, GEORGE J P, VERBIST J, et al. Nanophotonic Pockels modulators on a silicon nitride platform [J].

- Nature Communications, 2018, 9: 3444.
- [8] SHEN Jian, FAN Yuyan, XU Zihan, et al. Ultralow-power piezo-optomechanically tuning on CMOS-compatible integrated silicon-hafnium-oxide platform [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 17(2): 202200248.
- [9] SOHN D B, ÖRSEL O E, BAHL G. Electrically driven optical isolation through phonon-mediated photonic Autler-Townes splitting [J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(11): 822-827.
- [10] DONG M, CLARK G, LEENHEER A J, et al. High-speed programmable photonic circuits in a cryogenically compatible, visible-near-infrared 200 nm CMOS architecture [J]. *Nature Photonics*, 2021, 16: 59-65.
- [11] ADAM T, KOŁODZEY J, SWANN C, et al. The electrical properties of MIS capacitors with AlN gate dielectrics [J]. *The 10th International Conference on Solid Films and Surfaces*, 2001, 175: 428-435.
- [12] MOKHOV E, AVDEEV O, BARASH I, et al. Sublimation growth of AlN bulk crystals in Ta crucibles [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2005, 281(1): 93-100.
- [13] MORITA M, UESUGI N, ISOGAI S, et al. Epitaxial growth of aluminum nitride on sapphire using metalorganic chemical vapor deposition [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1981, 20(1): 17.
- [14] HE Maoqi, CHENG Naiqun, ZHOU Peizhen, et al. Preparation of nearly oxygen-free AlN thin films by pulsed laser deposition [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 1998, 16: 2372-2375.
- [15] XIONG Chi, PERNICE W H, SUN Xiankai, et al. Aluminum nitride as a new material for chip-scale optomechanics and nonlinear optics [J]. *New Journal of Physics*, 2012, 14: 095014.
- [16] STEGMAIER M, EBERT J, MECKBACH J, et al. Aluminum nitride nanophotonic circuits operating at ultraviolet wavelengths [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104: 091108.
- [17] SURYA J B, GUO Xiang, ZOU Changlin, et al. Efficient third-harmonic generation in composite aluminum nitride/silicon nitride microrings [J]. *Optica*, 2018, 5(2): 103-108.
- [18] TERRASANTA G, MÜLLER M, SOMMER T, et al. Growth of aluminum nitride on a silicon nitride substrate for hybrid photonic circuits [J]. *Materials for Quantum Technology*, 2021, 1(2): 021002.
- [19] IRIARTE G, REYES D, GONZÁLEZ D, et al. Influence of substrate crystallography on the room temperature synthesis of AlN thin films by reactive sputtering [J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257(22): 9306-9313.
- [20] LU T J, FANTO M, CHOI H, et al. Aluminum nitride integrated photonics platform for the ultraviolet to visible spectrum [J]. *Optics Express*, 2018, 26(9): 11147-11160.
- [21] BRUZEWICZ C D, CHIAVERINI J, MCCONNELL R, et al. Trapped-ion quantum computing: progress and challenges [J]. *Applied Physics Reviews*, 2019, 6: 021314.
- [22] CHEN Yiren, SONG Hang, LI Dabing, et al. Influence of the growth temperature of AlN nucleation layer on AlN template grown by high-temperature MOCVD [J]. *Materials Letters*, 2014, 114: 26-28.
- [23] LIU Xianwen, SUN Changzheng, XIONG Bing, et al. Aluminum nitride-on-sapphire platform for integrated high-Q microresonators [J]. *Optics Express*, 2017, 25(2): 587-594.
- [24] YIN Junhua, CHEN Daihua, YANG Hang, et al. Comparative spectroscopic studies of MOCVD grown AlN films on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and 6H-SiC [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 857: 157487.
- [25] XIONG Chi, PERNICE W H, TANG H X. Low-loss, silicon integrated, aluminum nitride photonic circuits and their use for electro-optic signal processing [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(7): 3562-3568.
- [26] JUNG H, TANG H X. Aluminum nitride as nonlinear optical material for on-chip frequency comb generation and frequency conversion [J]. *Nanophotonics*, 2016, 5(2): 263-271.
- [27] YOKOYAMA T, IWAZAKI Y, ONDA Y, et al. Highly piezoelectric co-doped AlN thin films for wideband FBAR applications [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2015, 62(2): 1007-1015.
- [28] BARTH S, BARTZSCH H, GLÖß D, et al. Magnetron sputtering of piezoelectric AlN and AlScN thin films and their use in energy harvesting applications [J]. *Microsystem Technologies*, 2016, 22: 1613-1617.
- [29] HAIDER S T, SHAH M A, LEE D G, et al. A review of the recent applications of aluminum nitride-based piezoelectric devices [J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 58779-58795.
- [30] NOOR-A-ALAM M, OLSZEWSKI O Z, NOLAN M. Ferroelectricity and large piezoelectric response of AlN/ScN superlattice [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(12): 20482-20490.
- [31] THOMAS E, RANJITH R. Effect of doping in aluminium nitride (AlN) nanomaterials: a review [J]. *ECS Transactions*, 2022, 107(1): 15229.
- [32] NGUYEN H H, MINH L V, OGUCHI H. Development of highly efficient micro energy harvesters with MgHf-codoped AlN piezoelectric films [C]. *2018 IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*: IEEE, 2018: 222-225.
- [33] SONG Longfei, GLINSEK S, DEFAY E. Toward low-temperature processing of lead zirconate titanate thin films: Advances, strategies, and applications [J]. *Applied Physics Reviews*, 2021, 8: 041315.
- [34] WINZER P J. Making spatial multiplexing a reality [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8: 345-348.
- [35] FRUNZA R, RICINSCHI D, GHEORGHIU F, et al. Preparation and characterisation of PZT films by RF-magnetron

- sputtering [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, 509(21): 6242–6246.
- [36] WINN J N, RUSIN D, KOCHANNEK C S. The central image of a gravitationally lensed quasar [J]. *Nature*, 2004, 427: 613–615.
- [37] DU Xiaohong, ZHENG Jiehui, BELEGUNDU U, et al. Crystal orientation dependence of piezoelectric properties of lead zirconate titanate near the morphotropic phase boundary [J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 72: 2421–2423.
- [38] KOVACOVA V, VAXELAIRE N, LE RHUN G, et al. Correlation between electric-field-induced phase transition and piezoelectricity in lead zirconate titanate films [J]. *Physical Review B*, 2014, 90: 140101.
- [39] TAN G, MARUYAMA K, KANAMITSU Y, et al. Crystallographic contributions to piezoelectric properties in PZT thin films [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 7309.
- [40] QI Yifan, LI Yang. Integrated lithium niobate photonics [J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(6): 1287–1320.
- [41] YANG Sen, BAO Huixin, ZHOU Chao, et al. Large magnetostriction from morphotropic phase boundary in ferromagnets [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(19): 197201.
- [42] BÖSCKE T S, MÜLLER J, BRÄUHAUS D, et al. Ferroelectricity in hafnium oxide thin films [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(10): 102903.
- [43] MÜLLER J, BÖSCKE T S, SCHRODER U, et al. Ferroelectricity in simple binary  $ZrO_2$  and  $HfO_2$  [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(8): 4318–4323.
- [44] MÜLLER S, MÜLLER J, SINGH A, et al. Incipient ferroelectricity in Al-doped  $HfO_2$  thin films [J]. *Advanced Functional Materials*, 2012, 22(11): 2412–2417.
- [45] ZHANG Yu, XU Jun, ZHOU Dayu, et al. Effects of Hf buffer layer at the Y-doped  $HfO_2/Si$  interface on ferroelectric characteristics of Y-doped  $HfO_2$  films formed by reactive sputtering [J]. *Ceramics International*, 2018, 44(11): 12841–12846.
- [46] TROMM T C U, ZHANG J, SCHIBERT J, et al. Ferroelectricity in Lu doped  $HfO_2$  layers [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111: 142904.
- [47] KIM T, LIM J W, YUN S J, et al. Multi-level long-term memory resembling human memory based on photosensitive field-effect transistors with stable interfacial deep traps [J]. *Advanced Electronic Materials*, 2020, 6(4): 1901044.
- [48] MITTMANN T, MATERANO M, LOMENZO P D, et al. Origin of ferroelectric phase in undoped  $HfO_2$  films deposited by sputtering [J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2019, 6(11): 1900042.
- [49] CHEEMA S S, KWON D, SHANKER N, et al. Enhanced ferroelectricity in ultrathin films grown directly on silicon [J]. *Nature*, 2020, 580: 478–482.
- [50] WEI Yingfen, NUKALA P, SALVERDA M, et al. A rhombohedral ferroelectric phase in epitaxially strained  $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$  thin films [J]. *Nature Materials*. 2018, 17(12): 1095–1100.
- [51] GLINCHUK M D, MOROZOVSKA A N, LUKOWIAK A, et al. Possible electrochemical origin of ferroelectricity in  $HfO_2$  thin films [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 830: 153628.
- [52] SAKASHITA Y, SEGAWA H. Preparation and characterization of  $LiNbO_3$  thin films produced by chemical-vapor deposition [J]. *Journal of Applied Physics*, 1995, 77(11): 5995–5999.
- [53] LI Mingxiao, LING Jingwei, HE Yang, et al. Lithium niobate photonic-crystal electro-optic modulator [J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 4123.
- [54] NAKATA Y, GUNJI S, OKADA T, et al. Fabrication of  $LiNbO_3$  thin films by pulsed laser deposition and investigation of nonlinear properties [J]. *Applied Physics A*, 2004, 79: 1279–1282.
- [55] YOON J G, KIM K. Growth of highly textured  $LiNbO_3$  thin film on Si with MgO buffer layer through the sol-gel process [J]. *Applied Physics Letters*, 1996, 68(18): 2523–2525.
- [56] HUANG Xingrui, LIU Yang, GUAN Huan, et al. High-efficiency, slow-light modulator on hybrid thin-film lithium niobate platform [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(19): 1093–1096.
- [57] 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.
- [58] EDON V, RÈMIENS D, SAADA S. Structural, electrical and piezoelectric properties of  $LiNbO_3$  thin films for surface acoustic wave resonators applications [J]. *Applied Surface Science*, 2009, 256(5): 1455–1460.
- [59] CHEN Feifei, KONG Lingfeng, SONG Wei, et al. The electromechanical features of  $LiNbO_3$  crystal for potential high temperature piezoelectric applications [J]. *Journal of Materiomics*, 2019, 5(1): 73–80.
- [60] ZHUKOV R N, KUSHNEREV K S, KISELEV D A, et al. Enhancement of piezoelectric properties of lithium niobate thin films by different annealing parameters [J]. *Modern Electronic Materials*, 2020, 6(2): 47–52.
- [61] YOO T S, LEE S A, ROH C, et al. Ferroelectric polarization rotation in order-disorder-type  $LiNbO_3$  thin films [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(48): 41471–41478.
- [62] SEBBAG Y, GOYKHMAN I, DESIATOV B, et al. Bistability in silicon microring resonator based on strain induced by a piezoelectric lead zirconate titanate thin film [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(14): 141107.

- [63] JIN W, POLCAWICHOL R G, MORTON P A, et al. Phase tuning by length contraction [J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 3174-3187.
- [64] WANG Jiawei, LIU Kaikai, HARRINGTON M W, et al. Silicon nitride stress-optic microresonator modulator for optical control applications [J]. *Optics Express*, 2022, 30(18): 31816-31827.
- [65] STANFIELD P R, LEENHEER A J, MICHAEL C P, et al. CMOS-compatible, piezo-optomechanically tunable photonics for visible wavelengths and cryogenic temperatures [J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 28588-28605.
- [66] TIAN Hao, LIU Junqiu, DONG Bin, et al. Hybrid integrated photonics using bulk acoustic resonators [J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 3073.
- [67] EVERHARDTA, TRAN TLA, MITSOLIDOU C, et al. Ultra-low power stress-based phase actuation in TriPleX photonic circuits [J]. *Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XXVI*, 2022, 12004: 15-21.
- [68] LIU Junqiu, TIAN Hao, LUCAS E, et al. Monolithic piezoelectric control of soliton microcombs [J]. *Nature*, 2020, 583: 385-390.
- [69] JEAN P, GERVAIS A, LAROCHELLE S, et al. Slow light in subwavelength grating waveguides [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 26(2): 1-8.
- [70] DONG M, HEIM D, WITTE A, et al. Piezo-optomechanical cantilever modulators for VLSI visible photonics [J]. *APL Photonics*, 2022, 7(5): 051304.
- [71] TADESSE S A, LI Mo. Sub-optical wavelength acoustic wave modulation of integrated photonic resonators at microwave frequencies [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 5402.
- [72] LI Huan, TADESSE S A, LIU Qiyu, et al. Nanophotonic cavity optomechanics with propagating acoustic waves at frequencies up to 12 GHz [J]. *Optica*, 2015, 2(9): 826-831.
- [73] SOHN D B, BAHL G. Direction reconfigurable nonreciprocal acousto-optic modulator on chip [J]. *APL Photonics*, 2019, 4(12): 126103.
- [74] 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.
- [75] CAI Lutong, MAHMOUD A, KHAN M, et al. Acousto-optical modulation of thin film lithium niobate waveguide devices [J]. *Photonics Research*, 2019, 7(9): 1003-1013.
- [76] 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.
- [77] HASSANIEN A E, LINK S, YANG Yansong, et al. Efficient and wideband acousto-optic modulation on thin-film lithium niobate for microwave-to-photon conversion [J]. *Photonics Research*, 2021, 9(7): 1182-1190.
- [78] 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.
- [79] KHAN M S I, MAHMOUD A, CAI Lutong, et al. Extraction of elasto-optic coefficient of thin-film arsenic trisulfide using a Mach-Zehnder acousto-optic modulator on lithium niobate [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(7): 2053-2059.
- [80] YU Zejie, SUN Xiankai. Acousto-optic modulation of photonic bound state in the continuum [J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 1.
- [81] 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 & Applications*, 2022, 11: 145.
- [82] 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.
- [83] TIAN Hao, LIU Junqiu, SIDDHARTH A, et al. Magnetic-free silicon nitride integrated optical isolator [J]. *Nature Photonics*, 2021, 15: 828-836.
- [84] SOHN D B, KIM S, BAHL G. Time-reversal symmetry breaking with acoustic pumping of nanophotonic circuits [J]. *Nature Photonics*, 2018, 12: 91-97.
- [85] 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.
- [86] ZHAN Han, LI Bingzhao, LI Huan, et al. Enabling scalable optical computing in synthetic frequency dimension using integrated cavity acousto-optics [J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 5426.

## Research Progress in Optoelectronics Integration Technology Based on Piezoelectric Effect (Invited)

SHEN Jian, FENG Chenglong, ZHANG Xun, ZHANG Lei, SHU Chang,  
ZHANG Yong, SU Yikai

*(Department of Electronic Engineering, State Key Lab of Advanced Optical Communication Systems and Networks,  
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)*

**Abstract:** Optical communication and interconnection technology utilize photons instead of electrons as information carrier, enabling large-capacity and high-speed information transmission. Silicon-based photonics integrated circuits are expected to promote the breakthroughs for the optoelectronics chips in the “post-Moore era” due to its advantages of small size, high integration, low power consumption, and compatibility with the Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) process. So far, optoelectronic integrated chips based on silicon platforms have achieved tremendous success in industries such as coherent optical communication. However, central symmetric structures represented by silicon lack linear and high-order nonlinear effects, posing a natural disadvantage in the design and fabrication of low-power tuning devices, high-speed modulation devices, and nonlinear devices. In order to meet the low-power-consumption, high-efficiency, and large-scale integration requirements for the next generation of optoelectronic integrated chips, it is necessary to explore new effects and new thin-film materials for the development of integrated optoelectronic devices.

Piezoelectric effect is an important physical phenomenon that realizes the conversion between electrical energy and mechanical energy. Some specific crystalline materials generate positive and negative charges when external mechanical force or pressure is applied, creating an electric field. When an external electric field is applied to these crystalline materials, they undergo deformation, resulting in a change in refractive index. Thanks to the progress and maturity of thin film growth and deposition techniques such as Atomic Layer Deposition (ALD) and Molecular Beam Epitaxy (MBE), many low-loss, high-piezoelectric-coefficient thin films have been prepared and realized, such as aluminum nitride (AlN), lead zirconate titanate (PZT), hafnium dioxide (HfO<sub>2</sub>), lithium niobate (LN), etc. Optical tuning based on the piezoelectric effect is a consequence of the electric field influence. Compared to thermos-optic modulation in silicon materials, piezoelectric-driven power consumption can be reduced by three to five orders of magnitude, which is of great significance for achieving low-power-consumption and large-scale optoelectronic integrated chips in applications with response frequencies ranging from KHz to GHz. Researchers have successfully developed a series of optoelectronic integrated devices through heterogeneous integration, dry etching, spin-coating polarization, and other technical approaches. These devices exhibit outstanding characteristics, including ultra-low power consumption, high efficiency, and rapid response, providing unique advantages in silicon-based optoelectronic integrated devices. Some of these materials are already compatible with CMOS processes and have shown rapid development, with promising applications demonstrating their excellent potential.

An external electric field can manipulate the deformation of the thin film material by the piezoelectric effect, thereby changing the refractive index and achieving electro-optic tuning and acousto-optic modulation. This paper starts by providing an overview of the ongoing research efforts in common piezoelectric thin-film materials, including AlN, PZT, HfO<sub>2</sub>, and LN. We focus on the preparation methods and crystal orientations of the reported piezoelectric thin films. The effects of elemental doping and process conditions on the piezoelectric properties of various types of films are summarized. Subsequently, it delves into a comprehensive review and discussion of integrated photonic devices founded on piezo-optomechanical actuators, consisting of low-power-consumption piezo-optomechanically tuning devices and acousto-optic modulators. We analyze the principles of low-power-consumption piezoelectric tunable devices and summarize the performance of tunable devices (e. g., tuning efficiency, tuning power consumption, footprint, propagation loss, and response time) on different piezoelectric thin-film platforms, such as hybrid PZT-Si waveguide, PZT-SiN waveguide, AlN-SiN waveguide, and HfO<sub>2</sub>-Si waveguide. Since surface acoustic waves and light waves are confined well in the photonic integrated circuits, the coupling between the acoustic and optical fields will be significantly enhanced. We summarize

the design structure, modulation efficiency, conversion efficiency, and excitation frequency of these acousto-optic modulators. Finally, the paper introduces and looks forward to the application of piezoelectric tuning devices and acousto-optic modulators, and analyzes the challenges and problems in their large-scale application. Photonic integrated chips based on the piezoelectric thin films play an important role in the applications such as optical computing, optical frequency comb generation, and LIDAR, providing a valuable solution with low power consumption. With the increasing maturity of integrated photonics technology and fabrication technology for the piezoelectric thin film, the optoelectronic integration technology based on piezoelectric effect shows good application prospects.

**Key words:** Silicon photonics; Piezoelectric effect; Tunable devices; Acousto-optic modulators; Integrated optoelectronic chips

**OCIS Codes:** 130.0250; 220.4880; 310.6845