MEMS 和 MOEMS 技术专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022120802

高速铌酸锂电光调制器研究进展

陆锦东，匡作鑫，陈　伟，余　华*

（重庆大学 光电工程学院 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室，重庆 400044）

摘　要： 薄膜铌酸锂调制器因其小尺寸、高带宽、低半波电压等优点，成为近年来业内关注的热点。文章梳理了铌酸锂电光调制器的波导结构、电极结构及偏置点控制技术三个方面的相关研究进展，分析了平面掩埋、脊型、光子晶体等三种不同结构波导的调制器性能，讨论了铌酸锂调制器集总和行波两种电极结构的特点及其设计考量因素，对比了电光调制器偏置点控制中功率法和导频法的优缺点及其相关研究成果。在此基础上，进一步分析了为实现更小体积与更高带宽铌酸锂调制器所需的关键技术以及未来的研究方向。

关键词： 铌酸锂；电光调制器；光子晶体波导；行波电极；偏置点控制

中图分类号： O436　**文章编号：** 1001－5868(2022)06－1029－11

Research Progress of High-speed Lithium Niobate Electro-optic Modulator

LU Jindong, KUANG Zuoxin, CHEN Wei, YU Hua

(College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University Key Laboratory of Optoelectronic Technology & System, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, CHN)

Abstract: Thin film $LiNbO_3$ modulator has become a hot spot in the industry in recent years because of its small size, high bandwidth, low half wave voltage and other advantages. In this paper, the research progress on waveguide structure, electrode structure and bias point control technology of $LiNbO_3$ modulator were reviewed. The performance of three different waveguide structures, including planar buried waveguide, ridge waveguide and photonic crystal waveguide, were analyzed. The characteristics and design considerations of the lumped and traveling wave electrode structures of $LiNbO_3$ modulator were discussed. The advantages and disadvantages of the power method and the pilot method in the bias point control of electro-optic modulator were compared, as well as the related research results. Based on this, the key technologies and future research directions for realizing the $LiNbO_3$ modulator with smaller volume and higher bandwidth were further analyzed.

Key words: $LiNbO_3$; electro-optic modulator; photonic crystal waveguide; traveling wave electrode; bias point control

0　引言

光通信系统的每一次升级，都有赖于新技术的引入。当前主流的 100 G 网络系统下，相干光通信技术和波分复用技术已被大量应用，随着流量的继续快速攀升，骨干网向 400 G 系统升级，而光子集成技术的引入，有望实现后续高速度大容量的数据传输。高速通信系统的关键技术之一就是信号的高速电光调制，目前用于电光调制的方法有很多，如载流子等离子体色散的硅基调制器[1]、电吸收调制器[2]，以及电光效应调制器[3]等。其中，电光效应可在极宽的光谱上提供高速的折射率调制，而不引入额外

收稿日期：2022－12－08.

基金项目：国家自然科学基金项目(61874105)；重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(cstc2021jscx-gksbX0045).

* **通信作者：**余　华　**E-mail:** yuhua@cqu.edu.cn

的损耗，因此可制作性能更为优异的调制器。最常见的电光材料是铌酸锂（$LiNbO_3$，LN），其具有高电光系数和高二阶非线性光学系数，已被广泛用于光通信领域[4]。

传统块状铌酸锂制作的电光调制器，在光子集成电路的发展中，存在着一些技术上的局限性：其一体积大，无法满足器件微纳化的发展需求；其二性能难提升，无法适应大容量通信网络的快速发展。近几年，取得突破的绝缘体上的薄膜铌酸锂（Lithium Niobate On Insulator，LNOI）为实现光子集成提供了新平台，其使用硅、石英等材料作为隔离层，相比于块状铌酸锂，LNOI 具备高折射率对比度，能将光限制在 LN 薄膜中，实现低损耗高速电光调制；其次，薄膜材料更易刻蚀脊波导、光子晶体等结构，使得调制器整体性能参数都能得到提升，可促进未来光子集成电路和光子互连的发展。本文针对铌酸锂电光调制器的波导结构、电极结构及偏置点控制技术三个方面，综述了近年来一些研究团队在提高铌酸锂电光调制器性能方面的研究进展。

1 铌酸锂调制器基本原理

铌酸锂调制器主要分为相位调制器和强度调制器，相位调制器由简单的一条直波导及其两侧电极构成，强度调制器主要结构有马赫-曾德尔（MZ）型和定向耦合型。在高速通信系统中，高速率、低半波电压和高带宽的 MZ 型调制器使用最为广泛，如图 1 为典型的铌酸锂相位调制器结构示意图。

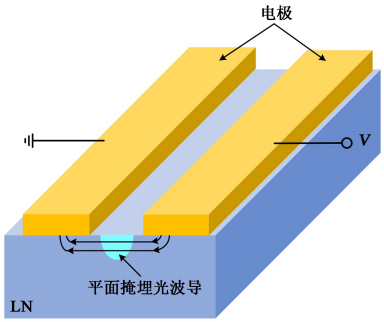


图 1 铌酸锂相位调制器

当施加外部电压 V，通过铌酸锂波导的光，因其折射率变化导致出射光束相对于入射光束会产生一个相移，可表示为

$$\varphi = \varphi_0 - \pi \frac{V}{V_\pi} \tag{1}$$

式中，

$$V_\pi = \frac{d}{L} \cdot \frac{\lambda_0}{rn^3} \tag{2}$$

V_π 称作半波电压，它是相位移为 π 时的外加电压，它取决于材料的性质（折射率 n 和电光系数 r）和波长 λ_0，以及电极距离 d 与波导长度 L 的比值。半波电压 V_π 及调制效率 $V_\pi L$ 都是衡量调制器性能的重要参量，此外，根据应用场景的不同还应衡量 3 dB 调制带宽、插入损耗等参数。

MZ 型强度调制器是由两个相位调制器相干实现的，其典型结构如图 2 所示，包括分束器、合波器、两个平行调制臂和三个驱动电极。输入光经过分束器成为光强相等的两路，分别在上下两臂中进行传输，在电场作用下两臂产生大小相等、方向相反的相位变化，最后经过输出端的合波器相干耦合实现强度调制。

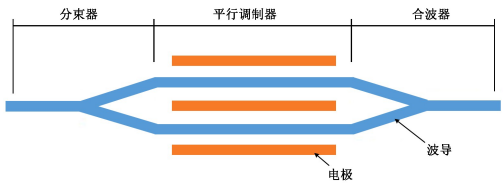


图 2 MZ 型强度调制器

2 铌酸锂调制器波导结构的研究现状

2.1 平面掩埋型光波导铌酸锂调制器

从 1990 年铌酸锂调制器开始商业化，到目前成熟商用的铌酸锂电光调制器均为传统的铌酸锂晶片，通过在铌酸锂晶体上钛扩散或质子交换改变材料折射率，形成近似高斯分布的光波导，波导结构在材料平面以下，称为掩埋型光波导。此类波导和铌酸锂材料的折射率差较小，波导对光的约束性较弱，因此为避免其金属吸收，会增大调制器的电极间隔，这导致传统块状铌酸锂调制器存在调制效率偏低、器件尺寸过大等问题。目前商用块状铌酸锂调制器长度约为 5～10 cm、调制效率约为 10 V·cm、调制带宽约为 20～40 GHz，因此国内外公司都在不断研究与创新，以实现铌酸锂调制器性能的突破。

2.2 脊型光波导铌酸锂调制器

相较于平面掩埋型光波导，脊型光波导折射率差更大，对光的约束性更强，在制作过程中能更精准地控制波导尺寸，是更为优异的光波导结构。近年随着 NANOLN 公司实现了高质量 LNOI 晶圆片的量产，促进了国内外各团队在光子学领域开展脊波导铌酸锂调制器的基础研究和应用。

2018 年，哈佛大学的 Wang 等人采用先进的纳米制造工艺，在 LNOI 平台上集成了跑道型调制器、环型调制器、MZ 调制器等器件[5]，如图 3 所示。调制器长度可缩短至 2 mm，实现了 1.8 V·cm 的调制效率，可由低电压 CMOS 芯片直接驱动。同年，该课题组通过优化侧壁刻蚀粗糙度和行波电极结构[3]，将调制带宽扩展到 100 GHz，同时具有小于 0.5 dB 的超低片上光学损耗。这项工作证实了 LNOI 平台的一些优势与先进性，带动了对 LNOI 调制器的研究热潮。

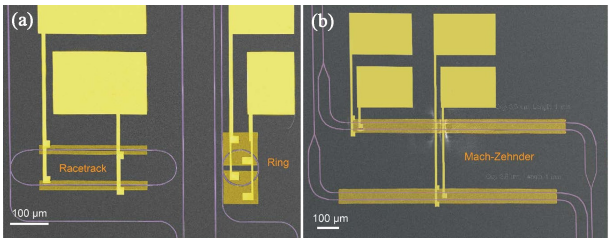


图 3　LMOI 平台上制造的器件电镜图。(a)跑道型、环形调制器；(b)MZ 调制器

为了进一步将硅基材料成本低、延展性好的优点与铌酸锂材料良好的调制性能相结合，2020 年，中山大学蔡鑫伦团队通过在硅基芯片上集成铌酸锂薄膜材料[6]，设计了一种混合型铌酸锂波导，如图 4 所示。该器件使用上层铌酸锂波导完成相位调制，实现了大于 70 GHz 的调制带宽和约为 2.2 V·cm 的调制效率；下层硅波导完成光的输入输出，波导间采用垂直绝热耦合器进行光功率的高效传输，实现了低于 2.5 dB 插入损耗，并具有高线性度、高集成度等优异特性，成功实现了高达 100 Gbit/s 的开关键控调制和 112 Gbit/s 的幅度调制。

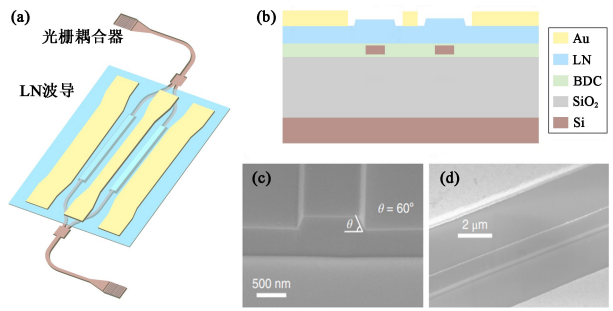


图 4　LN-Si 混合波导调制器。(a)整体结构示意图；(b)混合波导管横截面示意图；(c)LN 波导横截面的 SEM 图像；(d)金属电极和光波导的 SEM 图像

2021 年，清华大学罗毅团队提出了一种二氧化硅-铌酸锂混合波导结构[7]，实现了只有 3 μm 电极间距的薄膜铌酸锂调制器，如图 5 所示。该器件采用石英衬底代替硅衬底实现速度匹配，制备了 5 mm 长调制区域的调制器，在 3.4 V 半波电压下，达到了 67 GHz 带宽。同年，Zhang 等人在氮化硅加载的 LNOI 平台上设计了一种 MZ 干涉仪型调制器[8]，如图 6 所示，该调制器既充分利用了铌酸锂优异的电光效应，又避免了对 LNOI 的直接刻蚀。该器件的调制效率为 2.24 V·cm，消光比为～20 dB，实验测试结果显示，其 3 dB 调制带宽为 30 GHz，开关键控调制速率可达 80 Gb/s。

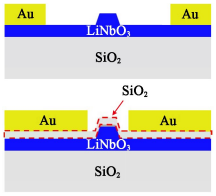


图 5　宽电极间距的 LN 波导与窄电极间距的 SiO_2-LN 混合波导

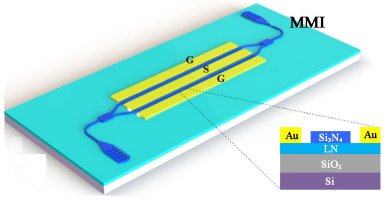


图 6　Si_3N_4-LN 混合波导 MZ 调制器

为了进一步增强光电耦合作用，提高调制效率，中科院半导体研究所的 Huang 等人利用布拉格光栅波导作为移相器引入了慢光结构[9]，如图 7 所示。该混合光栅型 MZ 调制器，利用慢光效应提高了调制效率，其数值达到了 0.67 V·cm。新加坡国立大学的 Chen 等人尝试不同切向的铌酸锂材料设计了一种基于垂直电场结构的 Z 切铌酸锂薄膜 MZ 调制器[10]，如图 8 所示。该器件通过将金属电极放置在波导的顶部和底部，实现了电场和光场的完全重叠，降低了 X/Y 切 LN 器件对电极排列的临界要求，证明了 Z 切铌酸锂薄膜调制器的可行性，拓展了集成铌酸锂薄膜光学的发展方向。2021 年 10 月，日本 Fujitsu 公司宣布实现超 70 GHz 的 LNOI 调制器的商业化，进一步证实了薄膜铌酸锂调制器芯片的可靠性和小型化。

2022 年，浙江大学刘柳团队在 LNOI 平台上实现了 532 nm 的集成可见光调制器[11]，该器件具有 3.3 mm 的调制长度、15.9 dB 的插入损耗、约 3.3 V 的半波电压和超过 25 GHz 的 3 dB 调制带宽。该研究证明了薄膜铌酸锂用于可见光调制器的可行性，

进一步拓展了 LNOI 的应用范围，为未来在可见光波长下实现高速、低功耗和小尺寸集成奠定了基础。

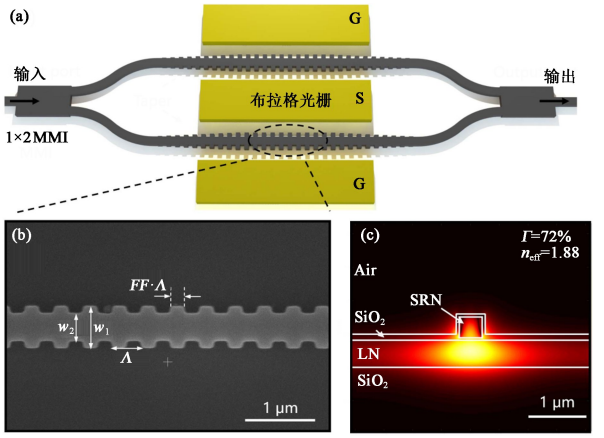


图 7 基于光栅波导的慢光 MZ 调制器。(a)整体结构示意图；(b)布拉格光栅的电镜图；(c)混合波导模拟 TE 光模场分布

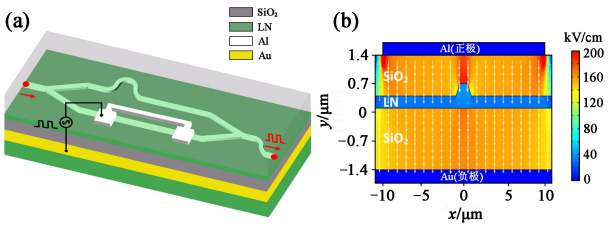


图 8 基于垂直电极结构的 MZ 调制器。(a)整体结构示意图；(b)模拟电场分布

2.3 光子晶体铌酸锂调制器

随着纳米级器件加工技术的快速发展，有望实现大规模的光子集成电路，目前光子链路中的激光器、探测器芯片尺寸已达到微米级，铌酸锂调制器需与其尺寸匹配，学者们为此已经探索了多种结构，如等离子体结构[12-13]、狭缝介质波导[14]、光子晶体线缺陷波导[15-16]、光子微纳米谐振腔[17-18]等。其中，光子晶体可在亚波长范围内控光，且在光电相互作用方面具有较大优势，近十年，光子晶体电光器件已经在硅、Ⅲ-Ⅴ族化合物半导体(磷化铟，GaAs 等)、聚合物等材料平台上得到发展，主要是因为这些材料的波导制备技术较成熟。如今，随着光子晶体制备技术的发展，将 LNOI 平台与微米量级的光子晶体波导结合起来制作出具有高性能的调制器，成为铌酸锂调制器新的探索方向。

2006 年，在 SPIE 会议上 Courjal 等人提出基于光子晶体的 LN 调制器[19]，首次对其光子带隙进行了表征。近年来随着铌酸锂材料的发展，铌酸锂光子晶体调制器逐渐受到国内外学者的关注，利用光子晶体的光子局域特性，在缺陷模频率内的场被完全局域在缺陷内，可形成高 Q 值的微谐振腔。

2012 年，Lu 等人利用铌酸锂光子晶体腔结构实现了电光调制[20]，采用块状铌酸锂材料质子交换方式设计了一个 6 μm 长的二维光子晶体腔。该结构可调谐性为 0.6 nm/V，驱动功率 10 dBm，为低驱动功率的微纳尺度可调谐光子器件开辟了一条道路。2020 年，Li 等人在 LNOI 上采用一维光子晶体纳米光束谐振腔结构制作高速电光调制器[21]，如图 9 所示，器件的调谐效率高达 1.98 GHz/V，调制带宽为 17.5 GHz，电光模式体积仅为 0.58 μm^3，在薄膜铌酸锂平台成功实现了波长尺度级的微型器件。2022 年，Zhang 等人提出无刻蚀 LNOI 上的光子晶体纳米束腔[22]，如图 10 所示，基于连续介质中的光子束缚态原理研制了易于加工的器件，其 Q 值超过 10 000，器件长度约为 100 μm。该方案无需刻蚀铌酸锂，加工难度大大降低。

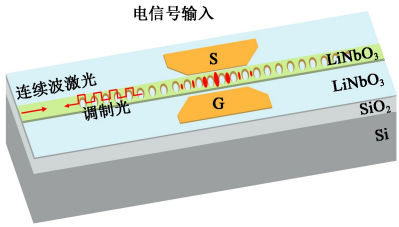
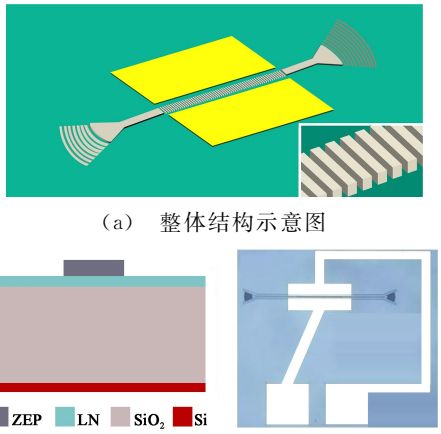


图 9 基于 LNOI 平台的光子晶体谐振腔调制器



(a) 整体结构示意图 (b) 横截面示意图 (c) 调制器显微镜图像

图 10 无刻蚀 LNOI 上的光子晶体调制器

MZ 型光子晶体调制器因其需要使用光子晶体构造出 Y 型分束器、合波器、60°弯曲波导等结构，相比于谐振腔型更加复杂。2013 年，Zhang 等人研究了基于 LNOI 全光子晶体的 MZ 电光调制器[23]，器件长度为 91.59 μm，调制带宽高达 100 GHz，驱动电压低至 0.66 V。但该结构仅进行了仿真设计，

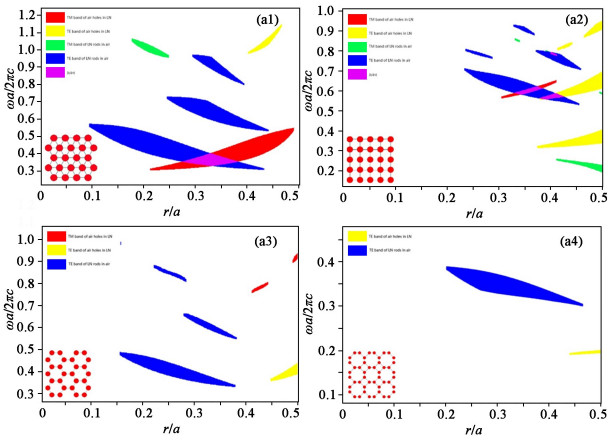
并没有考虑铌酸锂刻蚀工艺实现的可能性，其中光子晶体空气孔间隙过小，容易导致结构坍塌，所以实际很难完成加工。

此外，利用光子晶体的微纳空气孔结构，可以缩小电极间距，实现高带宽的调制器。2020 年，Liu 等人提出了一种新型填充金属的光子晶体的铌酸锂薄膜调制器[24]，增大了电光重叠积分，仿真设计的 500 μm 长的器件可以实现 2 V 的半波电压和 200 GHz 以上的带宽。

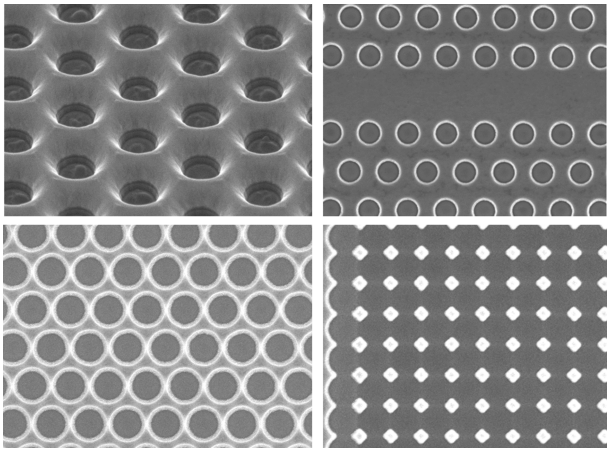
针对光子晶体铌酸锂调制器这一方向，本课题组也做了一些相关的实验研究，利用平面波展开法对四种铌酸锂阿基米德晶格进行了结构建模和带隙分析[25]，如图 11(a)所示，提出了一种基于铌酸锂二维光子晶体的高传输效率的光波导结构，通过调整和优化线缺陷结构，将弯曲波导的传输效率提升到 90%以上。针对铌酸锂材料难以刻蚀的特点，课题组前期已对铌酸锂光子晶体的不同晶格类型和晶胞大小进行刻蚀实验，图 11(b)为部分结构的电镜图。

显而易见，光子晶体 MZ 型调制器仿真实验的性能比谐振腔型更优异，但因其制备工艺更加复杂，目前还没有相关文章报道实际测试数据。近年来由于电子束曝光(EBL)、聚焦离子束(FIB)等设备的出现，为光子晶体 MZ 调制器制备提供了可能性。

总之，如表 1 所示，近年来薄膜铌酸锂调制器的性能不断提高，尺寸不断缩小，以满足未来集成化、小型化高速光通信系统的需求。



(a)　不同光子晶体结构带隙扫描图



(b)　铌酸锂光子晶体电镜图

图 11　铌酸锂二维光子晶体

表 1　薄膜铌酸锂调制器的性能对比

参考文献	材料	结构	调制区长度	半波电压 V_π/V	调制效率 $V_\pi L$/(V·cm)	调制带宽/GHz
[5]	薄膜 LN	脊波导	2 mm	9	1.8	15
[6]	Si-薄膜 LN	脊波导	3 mm	7.4	2.2	＞70
[7]	SiO_2-薄膜 LN	脊波导	5 mm	3.4	1.7	67
[8]	Si_3N_4-薄膜 LN	脊波导	7.8 mm	2.8	2.18	～30
[9]	薄膜 LN	脊波导＋光栅	0.82 mm	8.2	0.67	24.9
[21]	薄膜 LN	PCW	[a]0.58 μm^3	\	\	17.5
[b][23]	薄膜 LN	PCW	＜91.59 μm	2.64	＜0.03	100
[b][24]	薄膜 LN	PCW	500 μm	2	0.1	200

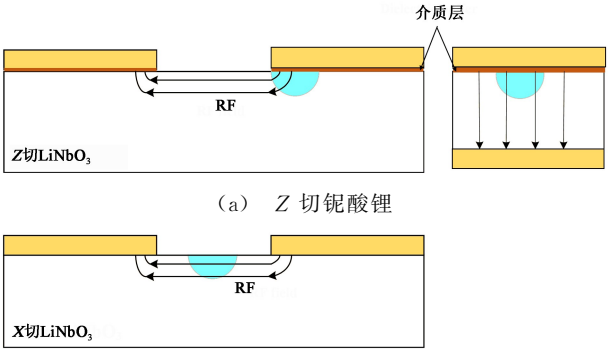
注：a. 该值为电光模式体积；b. 论文数据为仿真实验结果

3　铌酸锂调制器电极结构研究现状

根据需求的不同，铌酸锂调制器电极放置分为两种：一是电极置于波导的上方，须在电极与波导之间增加缓冲层，以避免较大的光损耗。如图 12(a)所示，电场垂直光波导调制 TM 单模光，需使用 *Z* 切的 LN 晶体，可配共面波导(电极都在晶体表面)[26]或微带(一个表面电极和底部接地电极)[10]的电极结构；二是电极置于波导的两侧，如图 12(b)所示，电场平行光波导调制 TE 单模光，需使用 *X* 切或 *Y* 切的 LN 晶体[6,21]，只能配共面波导的电极结构。此外，MZ 结构和共面波导型传输线相结合可以形成差分电极，实现推挽机制来提高调制器的性能。由此可见，共面波导(Coplanar Waveguide，CPW)结构在铌酸锂 MZ 调制器中较为常用。

铌酸锂 MZ 调制器通常有两种类型的电极结

构，一种是集总电极，另一种是行波电极。



（a） Z 切铌酸锂

（b） X 切铌酸锂

图 12 铌酸锂调制器电极放置示意图

3.1 集总电极

共面集总电极 MZ 调制器的结构如图 13 所示，其微波信号的传输方向与光波信号的传输方向垂直。集总电极的电学特性可等效为一个电容为 C 的集总电容，可表示为

$$C = n_{\mathrm{m}}^2 C_0 L \tag{3}$$

其中，n_{m} 为微波有效折射率，C_0 为自由空间中单位长度的静态电容，L 为电极长度。其调制带宽由局部电阻和电容决定：

$$\Delta f = \frac{1}{\pi RC} = \frac{1}{\pi R n_{\mathrm{m}}^2 C_0 L} \tag{4}$$

可以看出，受 RC 时间常数的限制，一般集总电极的调制带宽小于 10 GHz[27]。因此，集总型电极结构无法满足高带宽调制器的性能要求。

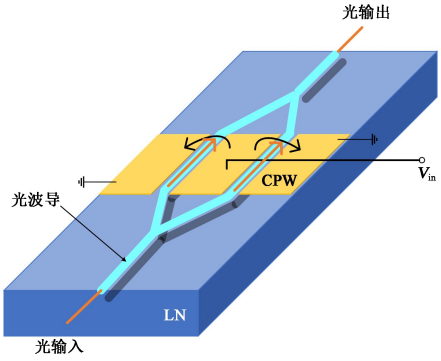


图 13 LN 衬底上的共面集总 MZ 调制器

3.2 行波电极

为了实现高带宽电光调制器，研究人员提出了共面行波电极结构。共面行波电极是由一条中心信号线和两条平行地线组成的，如图 14 所示，射频(RF)驱动信号被施加到电极的一侧并从另一侧输出，输出端由匹配电阻终止，RF 结构作为传输线而不是作为集总电容器工作。沿行波电极传输的 RF 信号与沿波导传输的光信号平行，当光的速度等于 RF 信号的速度时，效率最高，其不受电极的 RC 时间常数的限制，因此可以在低驱动电压下实现高带宽调制。

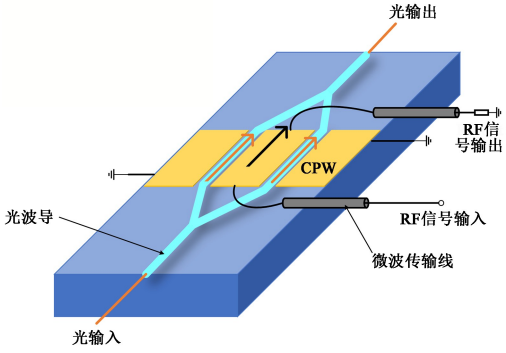


图 14 LN 衬底上的共面行波 MZ 调制器

高带宽的行波 MZ 调制器的设计，需要重点考虑三点：行波电极与驱动设备之间的阻抗匹配、RF 信号与光信号之间的速度匹配，以及足够低的微波衰减。

3.2.1 阻抗匹配

根据微波理论，行波电极与匹配电阻组成微波的传输链路，若行波电极的特征阻抗与匹配电阻的阻抗匹配，匹配电阻会吸收全部微波功率；反之，一定量的微波功率将沿着线路反射回来，减弱行波电极的传输信号，影响调制性能。

特征阻抗 Z_0 可以等效为分布参数电路模型：

$$Z_0 = \frac{U_{\mathrm{i}}(z)}{I_{\mathrm{i}}(z)} = \sqrt{\frac{R + \mathrm{j}\omega L}{G + \mathrm{j}\omega C}} \tag{5}$$

式中，$U_{\mathrm{i}}(z)$ 是入射波的电压，$I_{\mathrm{i}}(z)$ 是入射波的电流，R，L，G 和 C 分别是 z 处的分布电阻、分布电感、分布电导和分布电容，可以通过准静态方法和全波分析求解 Z_0 值。对于 CPW 结构，特征阻抗与电极的材料、尺寸和基底结构有关，薄膜 LN 调制器可以通过改变电极宽度、电极间隙以及电极层厚度等结构参数来调整传输线的特征阻抗[28-29]。

匹配电阻 Z_{L} 有片上匹配和片外匹配两种方案。片外匹配常用高速探针外接标准 50 Ω 电阻进行阻抗匹配[6]，这是源发生器和大多数现成的微波负载电阻的阻抗，片外匹配能够保证阻值的准确性，可拆卸重复使用，适用于实验测试阶段。片上匹配使用硅基材料或高阻金属材料在 LN 平台表面制作电阻器[30-31]，工艺难度固然增加，但对于 IQ 调制器和调制器阵列等复杂结构，很难使用片外匹配终止

许多端口，片上匹配在集成度和实验方便性上有了极大的提高，利于器件实用化。

微波阻抗匹配可由调制器反射系数 Γ 定义：

$$\Gamma=\frac{z_0-z_L}{z_0+z_L} \tag{6}$$

一般调制器设计 Γ 值应低于$\sqrt{0.1}$。实际如果匹配电阻略低于特征阻抗，调制器带宽会略微增加[32]。

3.2.2　速度匹配

铌酸锂调制器中的光波与微波速度匹配，可以实现更高的调制带宽和更低的驱动电压，然而块状铌酸锂的微波折射率 n_m 高于 1 550 nm 时约为 2.2 的光波折射率 n_o[33]，因此必须优化射频电极结构，以减小两者之差来达到速度匹配。通常，刻蚀脊型 CPW 结构、在共面电极和衬底之间插入低介电常数的薄缓冲层（例如 SiO_2）和增加电极厚度等方法组合可将体材料中的 RF 能量转移出来，从而降低 n_m，实现传统块状铌酸锂 CPW 电极的速度匹配。然而，随着调制带宽的增加，RF 波长降低到衬底支持的 RF 模式点时，能量会泄露到衬底并对 CPW 中的微波传输产生影响。衬底支持的模式与其厚度直接相关，研究人员将块状铌酸锂减薄至 65 μm，RF 模式在 180 GHz 开始耦合到衬底，而对于 500 μm 厚的衬底，约为 70 GHz[34]。因此，针对高带宽的铌酸锂调制器设计，LN 层必须减薄。

LN 层小于 1 μm 的 LNOI 平台完美地解决了这个问题，薄膜 LN 调制器的 CPW 结构实现速度匹配的设计思路与体材料相反，因微波折射率低至 1.97 的低介电常数硅基材料构成了薄膜器件的大部分，导致 n_m 比 n_o 更低。行之有效的解决方法是在调制器的相互作用区域添加覆盖层，调整覆盖层的厚度，以实现折射率匹配。2018 年，MERCANTE 等人将调制器的相互作用区包覆在 UV15 聚合物中实现微波和光波的速度匹配[35]，但其特征阻抗仅为 30 Ω，导致了微波反射并限制调制带宽。2021 年，Cai 等人为 Si/LN 混合电光调制器设计了 CPW 电极结构[36]，使用 SiO_2 覆盖 LN 波导，以保持低光学损耗为前提，逐步优化 RF 结构各参数，达到阻抗和折射率的匹配，以获得最佳的 3 dB 带宽，但 $V_\pi L$ 乘积不一定是最小的。

综上所述，在传统脊型 CPW 结构的设计中，需要在不影响调制带宽或调制效率的情况下，满足阻抗匹配对 n_m 值进行提高是非常困难的。研究者们对 CPW 结构提出更加复杂的设计方案，2021 年，Huang 等人提出了薄膜 LN 平台的开槽慢波电极结构[37]，如图 15(a)所示，开槽电极的 n_m 可以在大范围(2.3～3.0)实现速度匹配，同时保持高调制效率和阻抗匹配。同年，Kharel 等人在石英衬底上使用分段行波电极结构达到速度匹配[38]，如图 15(b)所示，实现 1.3 V 低半波电压的同时显著减少微波损耗，在 50 GHz 下衰减 1.8 dB。2022 年，Wang 等人为 Si/LN 混合电光调制器设计了周期性电容加载行波电极结构[39]，如图 15(c)所示，对硅衬底进行底切刻蚀来实现折射率匹配，实现 1.7 V 的低半波电压和大于 70 GHz 的调制带宽，超过 100 Gbit/s 的各种调制格式的数据传输。

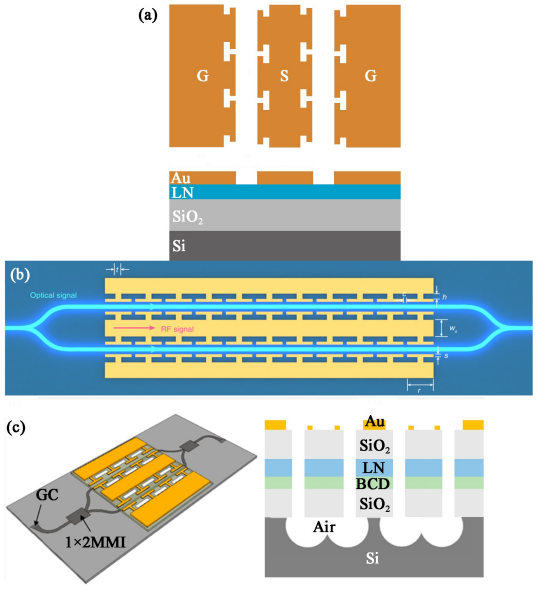
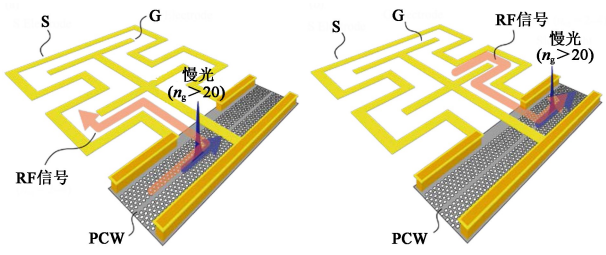


图 15　脊波导实现速度匹配的电极微结构。(a)开槽慢波电极的俯视图和横截面图；(b)分段电极结构俯视图；(c)混合 Si/LN 调制器电极结构示意图及调制部分横截面图

光子晶体波导因其慢光效应的增强，光波与微波的折射率差（$|n_o-n_m|$）增大，导致速度匹配更加困难。2021 年，Hinakura 等人设计了硅基光子晶体慢光MZ调制器[16]，其慢光波导$n_o>20$，通过在



(a)　移相器的前半部分　　(b)　后半部分中慢光和微波共传播

图 16　曲折线电极结构

移相器中引入曲折线电极，如图 16 所示，其可以延迟 RF 信号以补偿电光相位失配，研制的器件 $f_{3\,dB}>30$ GHz，实现了低至 0.44 V·cm 的 $V_\pi L$。目前关于铌酸锂光子晶体电极设计的研究较少，未来将研究改进脊波导的电极微结构的性能，从而实现光子晶体波导的速度匹配。

3.2.3 微波损耗

尽可能低的微波损耗是高带宽调制器的关键指标，也是其主要限制因素。CPW 行波电极的微波损耗 α_m 主要包括导体损耗、介质损耗和辐射损耗，所有损耗都与频率相关。导体损耗主要取决于 CPW 几何形状和材料，与频率的平方根成正比；介质损耗主要来源于 LN 薄膜、SiO_2 缓冲层和 Si 衬底，其随频率线性增大；辐射损耗与金属电极的粗糙度有关，若频率低于 200 GHz 可忽略不计[40]。因此当前研究的高带宽调制器的微波损耗可表示为

$$\alpha_m(f)=\alpha_c\cdot L\cdot\sqrt{f}+\alpha_d\cdot L\cdot f \tag{7}$$

其中，L 为电极长度，f 为频率，α_c 为导体损耗系数，α_d 为介质损耗系数。由此可知，降低微波损耗主要通过两种方式：其一，通过增加电极层厚度来减弱趋肤效应，适当降低导体损耗[36]；其二，选择低损耗衬底来减小介质损耗，如使用高电阻率硅[41]。

综上所述，高速 MZ 调制器行波电极的设计，对比表 2 可得，LNOI 调制器通过结构设计，能将微波损耗控制在 10 dB 以内，并保持良好的阻抗匹配，结合新型的慢波电极结构达到速度匹配，以实现高调制效率的同时提高带宽，为高速光子晶体调制器的电极设计提供了思路。

表 2 铌酸锂调制器的电极结构对比

参考文献	材料	结构	阻抗匹配 Z_0/Ω	光波折射率 n_o	微波折射率 n_m	* 微波损耗 α_m
[6]	Si-薄膜 LN	脊波导	50	2.21	2.19	~5 dB/cm(60 GHz)
[30]	薄膜 LN	脊波导+片上匹配	38	2.24	2.24	6.4 dB(160 GHz)
[34]	块状 LN	脊波导	47	2.19	2.19	0.29 dB/cm(1 GHz)
[35]	薄膜 LN	脊波导	30	2.24	2.26	~10 dB(50 GHz)
[37]	薄膜 LN	脊波导+慢波电极	50	2.35	2.3~3	~6.4 dB(80 GHz)
[16]	Si	PCW	\	20~40	\	\
[38]	薄膜 LN	脊波导+分段电极	50	2.25	2.23	1.8 dB(50 GHz)
[41]	Si-薄膜 LN	脊波导	53.4~55.1	2.2	2.25	~7.7 dB/cm(110 GHz)

注：* 微波损耗与频率有关，部分数据为论文插图估算结果

4 铌酸锂调制器偏置点控制技术

铌酸锂调制器易受外界环境变化、器件老化等因素的影响，从而引起调制器工作点的漂移，进而导致调制器输出光信号的失真，致使其无法正常工作，因此铌酸锂调制器需要设计高精度且性能稳定的偏置点控制系统。目前调制器偏置点控制方法大致分为两类：一类是光功率控制法，另一类是扰动信号控制法。

4.1 光功率控制法

基于光功率的反馈控制方法较早是通过监测调制器输入输出两端光功率，通过两者比值大小判断偏移情况。此方法测量变量多，误差较大，因此基于输出光功率的方法逐渐被提出，只监测输出光功率这一个变量，根据其变化来判断调制器偏置点是否偏移，实时调整偏置电压的大小，以实现对偏置点的稳定控制。

光功率法的控制方案简单，因此设计电路也相对容易。2017 年，延世大学的 Kim 等人采用 28 nm CMOS 技术实现了 MZ 调制器基于输出光功率偏置控制的集成电路制作[42]，集成化的控制芯片可以大大降低器件面积及功耗，适用于未来铌酸锂调制器的光电集成。但是基于输出光功率的方案易受器件的插入损耗和光源稳定性的影响，并不能达到很好的控制效果且在长期控制中会有累计误差。2019 年，北京邮电大学的 Yuan 等人采用平均输出光功率及其偏差作为反馈变量[43]，其不会受到输入光功率以及器件插入损耗的影响，使光功率法的控制效果更加稳定。但是该方案依然会受到射频信号的影响，因此在射频信号功率不稳定的情况下，光功率控制法依然有待改进。

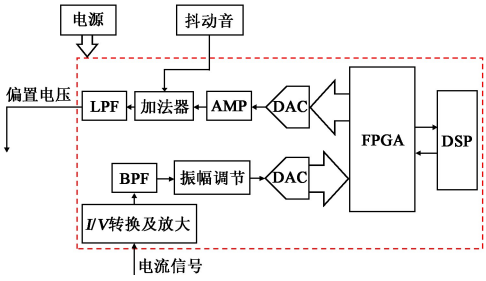
4.2 扰动信号控制法

基于扰动信号的反馈控制方法是将一个低频低幅值的扰动信号叠加到调制器的直流偏置端，从输出调制信号中提取出扰动信号的一次和二次谐波分量，分析其谐波成分确定偏置点位置，从而实现对偏置点的稳定控制。该方法控制效果更稳定且精度更高，是目前工程和实验中普遍采用的方案，相关的深入研究也较多。

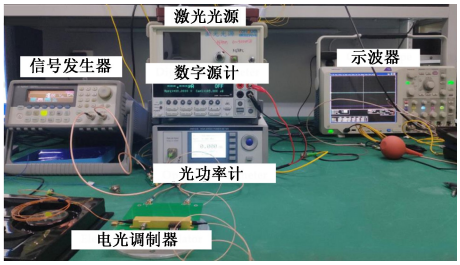
2020 年，南京航空航天大学的 Jin 等人通过优

化扰动信号产生电路[44]，使得扰动信号产生方式更加灵活且更加准确。同年，天津大学的 Ji 等人提出了可变步长的偏置电压调整方法[45]，在保证精确控制的同时加快了偏置电压调整速度。2021 年，南京航空航天大学的 Pan 等人采用线性调频的扰动信号[46]，可将调制器锁定在任意偏置点，实验结果表明该技术大大减小了 MZ 调制器的误码率。

本课题组对调制器的偏置控制电路也做了相关研究。采用扰动信号控制法，设计了一种基于 FPGA 和 DSP 的 MZ 调制器偏置点控制系统[47]，如图 17 所示，通过在调制器的偏置端增加 KHz 级的抖动信号并计算一次谐波和二次谐波分量的比率，获得相应的调制器控制电压，实验结果表明可将调制器偏置点稳定在正交点。近期课题组将光功率法和扰动信号法相结合，优化了基于 DSP 的控制系统，该控制系统噪声低、抗干扰性强，解决了输出光信号中小幅值扰动信号难采集的问题。基于线性插值算法提出了一种新的信号重建算法，解决了采集信号在傅里叶变换时出现频谱泄漏的问题，实现了精确、高效的信号处理，加快了偏置点控制的速率。



（a）　控制系统



（b）　测试平台

图 17　基于 FPGA 和 DSP 的 MZ 调制器偏置点控制系统

综上所述，对比表 3 可得，光功率控制技术容易受外界条件的影响从而导致控制精度不佳。因此目前大部分研究选择扰动信号控制技术，但此方案所需的硬件条件较高且设计较复杂，同时引入扰动信号对控制算法的要求将会更高，进一步研究精确且稳定的小幅度扰动信号的控制技术很有必要。

随着光子晶体铌酸锂调制器的发展，电光调制器正从大尺寸器件级逐步向小尺寸单芯片集成化方向发展，这也对偏置点控制电路的体积提出了更高要求。未来调制器达到芯片级尺寸，配套的控制电路要求在保证控制精度和稳定性的提前下实现芯片级设计，从而极大地减小整体尺寸。电光调制器阵列化的发展需求，也对调制器稳定控制提出了相应的难题，当处理信号变多，信号之间的相互干扰以及偏置控制的及时性等问题，是面临的新挑战。

表 3　偏置点控制技术对比

参考文献	控制技术	偏置点	电路框架	控制效果	谐波抑制
[42]	光功率	±Q 点	单片 ASIC	BER:＜±2 dB	强
[43]	光功率	±Q 点,NULL,PEAK	单板级电路	BER:＜±1 dB	强
[44]	扰动信号	±Q 点,NULL,PEAK	单板级电路	±Q 点 20 s 锁定	一般
[45]	扰动信号	±Q 点,NULL,PEAK	单板级电路	BER:＜±0.5 dB	一般
[46]	扰动信号	任意点	单板级电路	BER:±0.2 dB	一般

5　结束语

铌酸锂电光调制器已广泛应用于光纤通信系统中，随着光纤通信系统和网络复杂性的不断增长，新型铌酸锂调制器必然朝着小尺寸、高带宽和低调制电压的方向继续发展。高质量 LNOI 具备的高速电光调控、低损耗、可异质集成等优势，为新型铌酸锂调制器的发展提供了平台，同时通过光子晶体结构可实现调制器的微纳级尺寸，为低功耗、高性能的光子集成芯片提供可能。未来可以将光子晶体结构的光源、调制器、转换器[48]、探测器[49]等光子器件都集成于 LNOI 平台，为高速通信网络、微波光子集成等领域提供新的解决方案。

参考文献：

[1] Deng H, Bogaerts W. Pure phase modulation based on a silicon plasma dispersion modulator[J]. Opt. Express, 2019, 27(19): 27191-27201.

[2] Cheng Z, Zhu X, Galili M, et al. Double-layer graphene on photonic crystal waveguide electro-absorption modulator with 12 GHz bandwidth[J]. Nanophotonics, 2019, 9(8): 2377-2385.

[3] Wang C, Zhang M, Chen X, et al. Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible

voltages[J]. Nature, 2018, 562(7725): 101-104.

[4] Smith R W. High-speed lithium niobate modulators for WDM applications[J]. Proc. of SPIE, 2001, 4532: 1-3.

[5] Wang C, Zhang M, Stern B, et al. Nanophotonic lithium niobate electro-optic modulators[J]. Opt. Express, 2018, 26(2): 1547-1555.

[6] He M, Xu M, Ren Y, et al. High-performance hybrid silicon and lithium niobate Mach-Zehnder modulators for 100 Gbit·s^{-1} and beyond[J]. Nature Photonics, 2019, 13(5): 359-364.

[7] Liu X, Xiong B, Sun C, et al. Wideband thin-film lithium niobate modulator with low half-wave-voltage length product [J]. Chinese Opt. Lett., 2021, 19(6): 85-90.

[8] Zhang P, Huang H, Jiang Y, et al. High-speed electro-optic modulator based on silicon nitride loaded lithium niobate on an insulator platform[J]. Opt. Lett., 2021, 46(23): 5986-5989.

[9] Huang X, Liu Y, Guan H, et al. High-efficiency, slow-light modulator on hybrid thin-film lithium niobate platform[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2021, 33(19): 1093-1096.

[10] Chen G, Lin H L, NG J D, et al. Integrated electro-optic modulator in *Z*-cut lithium niobate thin film with vertical structure[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2021, 33(23): 1285-1288.

[11] Li C, Chen B, Ruan Z, et al. High modulation efficiency and large bandwidth thin-film lithium niobate modulator for visible light[J]. Opt. Express, 2022, 30(20): 36394-36402.

[12] Ali J, Eknoyan O, Soc I P. Electro-absorption plasmonic modulator in lithium niobate[C]// IEEE Photon. Conf., 2017: 89-90.

[13] Lu H, Xiong H, Huang Z, et al. Electron-plasmon interaction on lithium niobate with gold nanolayer and its field distribution dependent modulation[J]. Opt. Express, 2019, 27(14): 19852-19863.

[14] Enami Y, Nakamura H, Luo J, et al. Analysis of efficiently poled electro-optic polymer/TiO_2 vertical slot waveguide modulators[J]. Opt. Communications, 2016, 362: 77-80.

[15] Li J S. Novel optical modulator using silicon photonic crystals[J]. Opt. & Laser Technol., 2008, 40(6): 790-794.

[16] Hinakura Y, Akiyama D, Ito H, et al. Silicon photonic crystal modulators for high-speed transmission and wavelength division multiplexing[J]. IEEE J. of Sel. Topics in Quantum Electron., 2021, 27(3): 1-8.

[17] Hoghooghi N, Ozdur I, Akbulut M, et al. Resonant cavity linear interferometric intensity modulator[J]. Opt. Lett., 2010, 35(8): 1218-1220.

[18] Witzigmann B, Arakawa Y, Osinski M, et al. Optical modulator based on silicon nanowires racetrack resonator[J]. Proc. of SPIE, 2018: 1052622.1-1052622.6.

[19] Courjaal N, Bernal M P, Hauden J, et al. Some new trends on lithium niobate modulators[J]. Proc. of SPIE, 2006, 61230C.1-61230C.15.

[20] Lu H, Sadani B, Ulliac G, et al. 6-micron interaction length electro-optic modulation based on lithium niobate photonic crystal cavity[J]. Opt. Express, 2012, 20(19): 20884-20893.

[21] Li M, Ling J, He Y, et al. Lithium niobate photonic-crystal electro-optic modulator[J]. Nature Commun., 2020, 11(1): 4123.

[22] Zhang J, Pan B, Liu W, et al. Ultra-compact electro-optic modulator based on etchless lithium niobate photonic crystal nanobeam cavity[J]. Opt. Express, 2022, 30(12): 20839-20846.

[23] Zhang Y, Tian H, Yang D, et al. Ultra-compact low-voltage and slow-light MZI electro-optic modulator based on monolithically integrated photonic crystal [J]. Opt. Communications, 2014, 315: 138-146.

[24] Liu X C, Xiong B, Sun C Z, et al. Ultra-compact thin film lithium niobate electro-optic modulator with metal-filled photonic crystal waveguide[C]// ACP/IPOC. NewYork: IEEE, 2020: 1-3.

[25] Shi C, Yuan J, Luo X, et al. Transmission characteristics of multi-structure bandgap for lithium niobate integrated photonic crystal and waveguide[J]. Opt. Communications, 2020, 461.

[26] Oikawa S, Yamamoto F, Ichikawa J, et al. Zero-chirp broadband *Z*-cut Ti : $LiNbO_3$ optical modulator using polarization reversal and branch electrode [J]. J. of Lightwave Technol., 2005, 23(9): 2756-2760.

[27] Herbert V, Norbert G. Fibre Optic Communication[M]. 2ed. Switzerland: Springer Cham, 2017.

[28] Weigel P O, Valdez F, Zhao J, et al. Design of high-bandwidth, low-voltage and low-loss hybrid lithium niobate electro-optic modulators[J]. J. of Phys.: Photonics, 2021, 012001.

[29] Wang D, Liu Y, Xu B, et al. Traveling wave electrode simulation for integrated lithium niobite electro-optic modulators[J]. Proc. of SPIE, 2021: 11763.

[30] Liu X, Xiong B, Sun C, et al. Capacitively-loaded thin-film lithium niobate modulator with ultra-flat frequency response [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2022, 34(16): 854-857.

[31] Sun S, He M, Xu M, et al. High-speed modulator with integrated termination resistor based on hybrid silicon and lithium niobate platform[J]. J. of Lightwave Technol., 2021, 39(4): 1108-1115.

[32] Giovanni G. Semiconductor Devices for High-Speed Optoelectronics [M]. NewYork: Cambridge University, 2009.

[33] Lee M. Dielectric constant and loss tangent in $LiNbO_3$ crystals from 90 to 147 GHz[J]. Appl. Phys. Lett., 2001,

79(9)：1342-1344.

[34] Mercante A J，Shi S Y，Yao P，et al. Full spectrum millimeter-wave modulation in thin-film $LiNbO_3$[C]// 2018 IEEE RAPID，2018：107-110.

[35] Mercante A J，Shi S，Yao P，et al. Thin film lithium niobate electro-optic modulator with terahertz operating bandwidth [J]. Opt. Express，2018，26(11)：14810-14816.

[36] Cai J，Guo C，Lu C，et al. Design optimization of silicon and lithium niobate hybrid integrated traveling-wave Mach-Zehnder modulator[J]. IEEE Photon. J.，2021，13(4)：1-6.

[37] Huang X，Liu Y，Li Z，et al. Advanced electrode design for low-voltage high-speed thin-film lithium niobate modulators [J]. IEEE Photonics J.，2021，13(2)：1-9.

[38] Kharel P，Reimer C，Luke K，et al. Breaking voltage-bandwidth limits in integrated lithium niobate modulators using micro-structured electrodes[J]. Appl. Phys.，2021，8(3)：1-7.

[39] Wang Z，Chen G，Ruan Z，et al. Silicon-lithium niobate hybrid intensity and coherent modulators using a periodic capacitively loaded traveling-wave electrode [J]. ACS Photonics，2022，9(8)：2668-2675.

[40] Frankel M Y，Gupta S，Valdmanis J A，et al. Terahertz attenuation and dispersion characteristics of coplanar transmission-lines[J]. IEEE Trans. Microw Theory Tech.，1991，39(6)：910-916.

[41] Weigel P O，Zhao J，Fang K，et al. Bonded thin film lithium niobate modulator on a silicon photonics platform exceeding 100 GHz 3 dB electrical modulation bandwidth[J]. Opt. Express，2018，26(18)：23728-23739.

[42] Kim M H，Yu B M，Choi W Y. A Mach-Zehnder modulator bias controller based on OMA and average power monitoring [J]. IEEE Photon. Technol. Lett.，2017，29(23)：2043-2046.

[43] Yuan X，Zhang Y A，Zhang J，et al. Any point bias control technique for MZ modulator[J]. Optik，2019，178：918-922.

[44] Jin Y，Shi X，Zang C，et al. A novel design of Mach-Zehnder modulator bias controller based on pilot tone method[J]. Phys. Rev. C，2020，1486(7)：072070.

[45] Ji Y，Wu B，Hou Y，et al. A MZ modulator bias control system based on variable step P&O algorithm[J]. IEEE Photon. Technol. Lett.，2020，32(23)：1473-1476.

[46] Pan Z，Liu S，Zhu N，et al. Arbitrary bias point control for Mach-Zehnder modulator using a linear-frequency modulated signal[J]. IEEE Photon. Technol. Lett.，2021，33(11)：577-580.

[47] Shi S，Yuan J，Huang Q，et al. Bias controller of Mach-Zehnder modulator for electro-optic analog-to-digital converter[J]. Micromachines (Basel)，2019，10(12)：800.

[48] Chen B，Ruan Z，Hu J，et al. Two-dimensional grating coupler on an *X*-cut lithium niobate thin-film[J]. Opt. Express，2021，29(2)：1289-1295.

[49] Song J，Yuan S，Cui C，et al. High-efficiency and high-speed germanium photodetector enabled by multiresonant photonic crystal[J]. Nanophotonics，2021，10(3)：1081-1087.

作者简介：

陆锦东(1997－)，女，四川省成都市人，博士研究生，主要从事铌酸锂调制器、光子晶体器件及芯片等方面的研究；

余　华(1973－)，男，博士，教授，博士生导师，国家重大科研项目首席科学家，主要从事 MEMS 微纳传感器、光电子芯片等方面的研究。