

基于嵌入填充层的薄膜铌酸锂-氮化硅电光调制器

沈祥国¹, 徐银^{1,2}, 董越^{1,2}, 张博^{1,2}, 倪屹^{1,2*}¹江南大学物联网工程学院, 江苏 无锡 214122;²江南大学先进技术研究院, 江苏 无锡 214122

摘要 提出一种异质集成型薄膜铌酸锂电光调制器,由底部氮化硅波导、中间BCB黏合层、顶部铌酸锂薄膜构成调制区波导结构,调制电极位于铌酸锂薄膜的上部且二者之间填充了低折射率的SiO₂,以利于实现折射率匹配并降低光损耗、微波损耗。进一步利用马赫-曾德尔干涉仪结构,设计了相应的电光调制器,并提出一种倒台阶型薄膜结构,该结构可实现输入、输出波导与调制区波导的高效耦合。对该电光调制器进行行波高速匹配设计,所得器件的半波电压长度积为1.77 V·cm,3 dB调制带宽为140 GHz,且调制区长度仅为5 mm。所提器件结构有望在大带宽薄膜铌酸锂电光调制器设计中发挥优势,助力薄膜铌酸锂光子集成器件的快速发展。

关键词 集成光学; 集成光器件; 调制器; 铌酸锂; 集成光学材料

中图分类号 TN252

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS222175

1 引言

电光调制器(EOM)是一种将电信号加载到光载波上进行信号传输的关键器件,对光交换、波束整形、数据通信、测距及射频光子学等领域的发展至关重要^[1-3]。基于硅光子平台的集成电光调制器因具备较好的CMOS工艺兼容性 & 较高的器件集成度,成为调制器研究及应用的重要平台^[4-6]。然而,由于硅材料缺乏线性电光效应,无法直接实现电光调制,往往采用掺杂的方式来利用载流子色散效应实现电光调制,但是这种方式存在调制速率慢、损耗高、非线性调制等问题^[7-8]。相比之下,铌酸锂(LN)晶体因透明窗口宽(从400 nm至5 μm)、电光系数高、压电与弹光性能优异,以及物理化学性能稳定的特性,被认为是研制电光调制器的理想材料,也是目前商业化应用最广泛的调制器材料^[9-11]。但是,具有较大体积的铌酸锂调制器很难与其他器件集成,从而阻碍了集成电光调制器的发展。近来,单晶铌酸锂薄膜被成功制备并商用,其在继承铌酸锂优异特性的基础上,借助较高的材料折射率差可将光场限制在微米级薄膜铌酸锂光波导中,实现高速、宽带、低功耗电光调制器的单片集成^[12-14]。目前基于薄膜铌酸锂(TFLN)晶圆的调制器主要采用刻蚀脊波导和无刻蚀薄膜两种方案,前者对TFLN晶圆的刻蚀工艺提出要求^[15-17],后者则不需要对TFLN晶圆进行刻蚀,而是通过在铌酸锂薄膜的上方或下方沉积其他

波导材料(如Si^[18-19]、SiN_x^[20-22]、Ta₂O₅^[23])来构建光波导,进而实现电光调制。目前,上述基于TFLN晶圆的电光调制器关键性能如下:半波电压长度积($V_{\pi}L$)约为2 V·cm,3 dB调制带宽>30 GHz。

本文提出一种异质集成型薄膜铌酸锂电光调制器。调制波导采用氮化硅波导,通过键合的方式将铌酸锂薄膜贴至氮化硅波导的上方,两者之间用BCB黏合剂进行贴合;同时调制电极采用G-S-G(ground-signal-ground)的方式进行设计,在调制电极与铌酸锂薄膜之间加入二氧化硅层,以利于高速行波调制时所需的模式有效折射率匹配并降低微波损耗。另外,在调制区波导与输入输出氮化硅波导之间进行耦合时,设计了一种倒台阶型薄膜结构,以有效降低耦合损耗。根据上述方案,本文进行了详细的行波调制匹配设计,获得了如下调制性能:半波电压长度积($V_{\pi}L$)为1.76 V·cm,3 dB调制带宽为140 GHz,调制区长度为5 mm。所提器件方案可为薄膜铌酸锂高速行波调制器的设计提供新的匹配设计思路,也将推动薄膜铌酸锂光子集成回路的发展。

2 器件结构与工作原理

2.1 器件结构

图1为所提出的一种异质集成型薄膜铌酸锂电光调制器示意图,整体调制波导结构采用典型的马赫-曾德尔干涉仪(MZI)型波导,调制电极采用G-S-G的配

收稿日期: 2022-12-29; 修回日期: 2023-02-22; 录用日期: 2023-03-21; 网络首发日期: 2023-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(62205129)、江苏省自然科学基金(BK20200592)、中央高校基本科研基金(JUSRP12024)

通信作者: *8073110160@jiangnan.edu.cn

置结构,使得器件工作于推挽方式,以降低 $V_{\pi}L$ ^[24]。MZI型光波导采用氮化硅材料(SiN_x ,材料的组分可由制备过程中通入的 NH_3 气体流量调控^[25]),材料折射率为2.11(通信波段),波导厚度为 $h_{\text{SiN}_x} = 200 \text{ nm}$,波导宽度为 W_{SiN_x} ;铌酸锂薄膜厚度为300 nm。与已报道的铌酸锂薄膜电光调制器相比,所述调制器的光波导位于铌酸锂薄膜的下方且二者之间填充厚度为 H 的

BCB层,调制电极加载在铌酸锂薄膜的顶部,其间填充厚度为 h 的 SiO_2 层,信号极宽度为 W_s ,接地极宽度为 W_g ,电极间距为 G ,电极厚度为 h_{Au} ,如图1(b)所示。为了实现上述调制波导与输入输出氮化硅波导之间的高效耦合,设计了一种倒台阶型薄膜耦合结构,如图1(c)所示,采用三层倒台阶结构,每层铌酸锂薄膜的厚度为100 nm,每级台阶的长度为 $5 \mu\text{m}$,调制区总长度为5 mm。

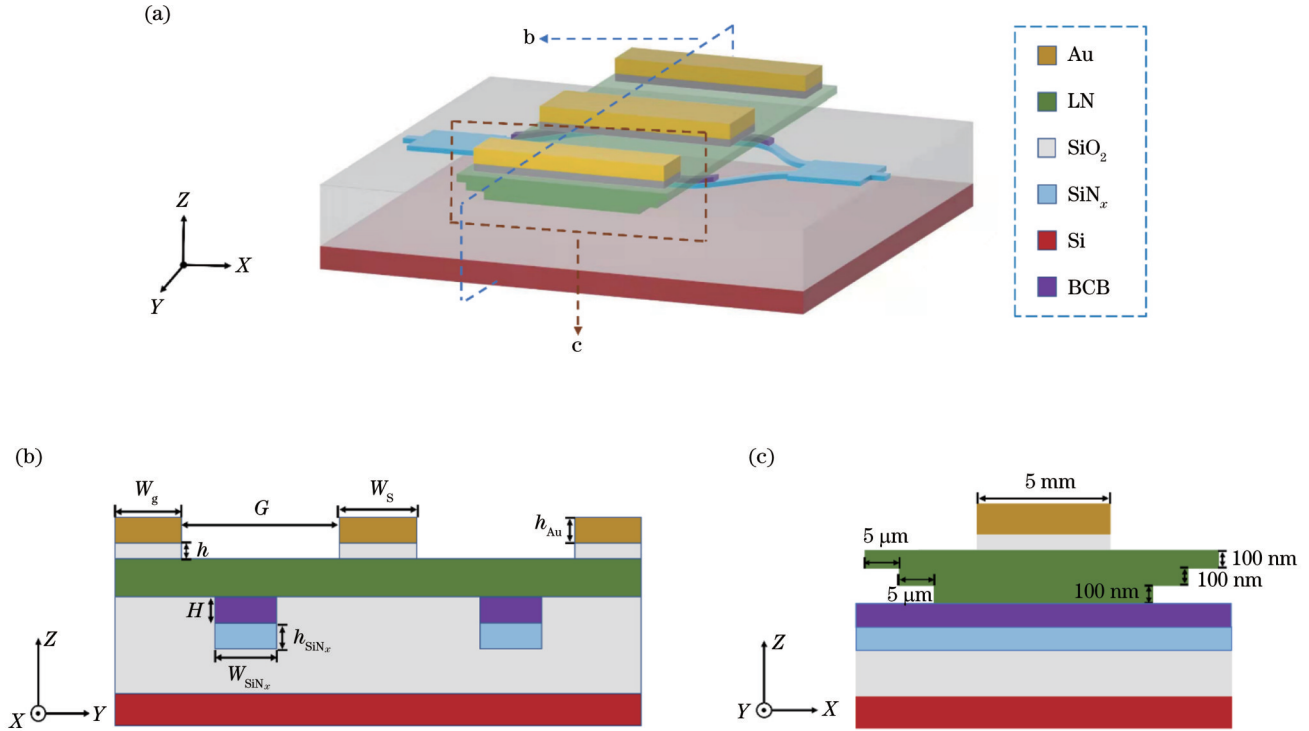


图1 异质集成型薄膜铌酸锂电光调制器示意图。(a)器件整体结构;(b)器件调制区横截面图;(c)侧视图

Fig. 1 Schematic of heterogeneously-integrated EOM based on thin film lithium niobate. (a) Overall device structure; (b) cross-sectional view of modulation region; (c) side view of proposed EOM

2.2 工作原理

所述薄膜铌酸锂电光调制器的工作原理是基于MZI调制器的调制机理。首先,输入氮化硅波导的TE模通过功率分配器分为功率均等的两个TE模,并进入两个调制臂^[26-27];其次,两个调制臂的TE模通过设计的倒台阶型薄膜耦合结构转换为调制区所支持的TE模;再次,因调制电极采用G-S-G的配置方式,两个调制臂的电场方向相反,进而产生相反的材料折射率变化,通过光传输在两个调制臂上累积相位差,其中相位差的大小受调制电压的作用;然后,通过调制区之后,两个调制臂中的TE模再次借助倒台阶型薄膜耦合结构转换为氮化硅波导的TE模;最后,通过合束器将两个调制臂的光能量合成至输出波导输出,两个调制臂在调制区域累积的相位差将直接影响器件的输出光谱特性,实现电光调制的功能。

$V_{\pi}L$ 和3 dB调制带宽是评价所述器件调制性能的

重要指标。 $V_{\pi}L$ 的定义^[20,28]为

$$V_{\pi}L = \frac{n_{\text{eff}}\lambda_0 G}{2n_e^2 r_{33} \Gamma_{\text{mo}}}, \quad (1)$$

式中: n_{eff} 为模式有效折射率; λ_0 为入射光波长($\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$); G 为电极间距; n_e 为铌酸锂的异常光折射率(1550 nm波长处 $n_e = 2.14$); r_{33} 为铌酸锂的电光系数($r_{33} \approx 30.8 \text{ pm/V}$); Γ_{mo} 为归一化的电光重叠积分;分母中2源于器件的推挽工作方式可使调制器的驱动电压降低一半。在式(1)中, Γ_{mo} 的定义^[20,28]为

$$\Gamma_{\text{mo}} = \frac{G}{V_A} \frac{\iint_{\text{LN}} |E_o|^2 E_m dA}{\iint_{\infty} |E_o|^2 dA}, \quad (2)$$

式中: V_A 为外加驱动电压; E_o 为光模式的电场分布; E_m 为微波场;积分区域为调制波导的截面区域。3 dB调制带宽的计算依赖于调制器的频率响应。电光调制器的频率响应^[11] $m(\omega)$ 表示为

$$m(\omega) = \left| \frac{2Z_{in}}{Z_{in} + Z_L} \frac{(Z_L + Z_0)F_+ + (Z_L - Z_0)F_-}{(Z_L + Z_0)\exp(\gamma_m L) + (Z_L - Z_0)\exp(-\gamma_m L)} \right|^2, \quad (3)$$

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + Z_0 \tanh(\gamma_m L)}{Z_0 + Z_L \tanh(\gamma_m L)}, \quad (4)$$

$$F(u_{\pm}) = 1 - \exp(u_{\pm})/u_{\pm}, \quad (5)$$

$$u_{\pm} = \pm \alpha_m L + j \frac{\omega}{c_0} (\pm n_m - n_g) L, \quad (6)$$

$$\gamma_m = \alpha_m + j\omega n_{RF}/c_0, \quad (7)$$

式中： Z_{in} 为器件的输入阻抗； Z_L 为负载阻抗； Z_0 为器件的特征阻抗； L 为器件调制区长度； α_m 为微波传播损耗； ω 为角频率； c_0 为真空光速； n_{RF} 为微波模式有效折射率； n_g 为光群折射率。在计算中，输入阻抗和负载阻抗均假设为 50Ω ，使得器件的频率响应取决于微波损耗、微波模式有效折射率和光群折射率。为此，以获得低 $V_{\pi}L$ 、大 3 dB 调制带宽为目标，重点分析所述器件的调制波导结构、电极结构、输入输出耦合结构等。

3 分析与讨论

基于上述器件的工作原理，采用有限元分析软件 COMSOL Multiphysics 对器件结构进行设计、分析及优化^[29]。接下来将从调制区波导结构设计、调制电极设计、调制区，以及输入、输出波导之间的耦合设计等

方面对所述器件进行详细分析，以获得 $V_{\pi}L$ 更低、3 dB 调制带宽更大、损耗更低、器件尺寸更小的薄膜铌酸锂调制器。

3.1 调制区波导结构设计

波导结构的设计目标是获得较低的 $V_{\pi}L$ 以及较低的光损耗 α_{op} ，并同时便于后续开展行波调制的匹配设计。在器件底部氮化硅波导与铌酸锂薄膜之间填充了厚度为 H 的 BCB 层^[30]，为此本节仔细分析了不同厚度的 BCB 层与常用 SiO_2 层对器件 $V_{\pi}L$ 及 α_{op} 的影响，结果如图 2 所示，其中电极间距 G 与氮化硅波导宽度 W_{SiN} 分别设为 $6 \mu\text{m}$ 与 $1.6 \mu\text{m}$ 。由图 2 可知：当采用 SiO_2 作为填充材料时，在图示计算范围内，所对应的 $V_{\pi}L$ 均大于 $2.75 \text{ V}\cdot\text{cm}$ ；当采用 BCB 作为填充材料时， $V_{\pi}L$ 明显减小，且产生的光损耗 α_{op} 也低于 SiO_2 作为填充材料的情况。因此，首选 BCB 作为底部填充材料。另外， $V_{\pi}L$ 随填充层厚度的增加而减小， α_{op} 却随填充层厚度的增加而增大。因此，在选择填充层厚度时，需要权衡 $V_{\pi}L$ 与 α_{op} 。图 2 也展示了不同 BCB 层厚度情况下的 TE 光模场，随着填充层厚度的增加，模场尺寸增大，对应的光损耗 α_{op} 也增大。

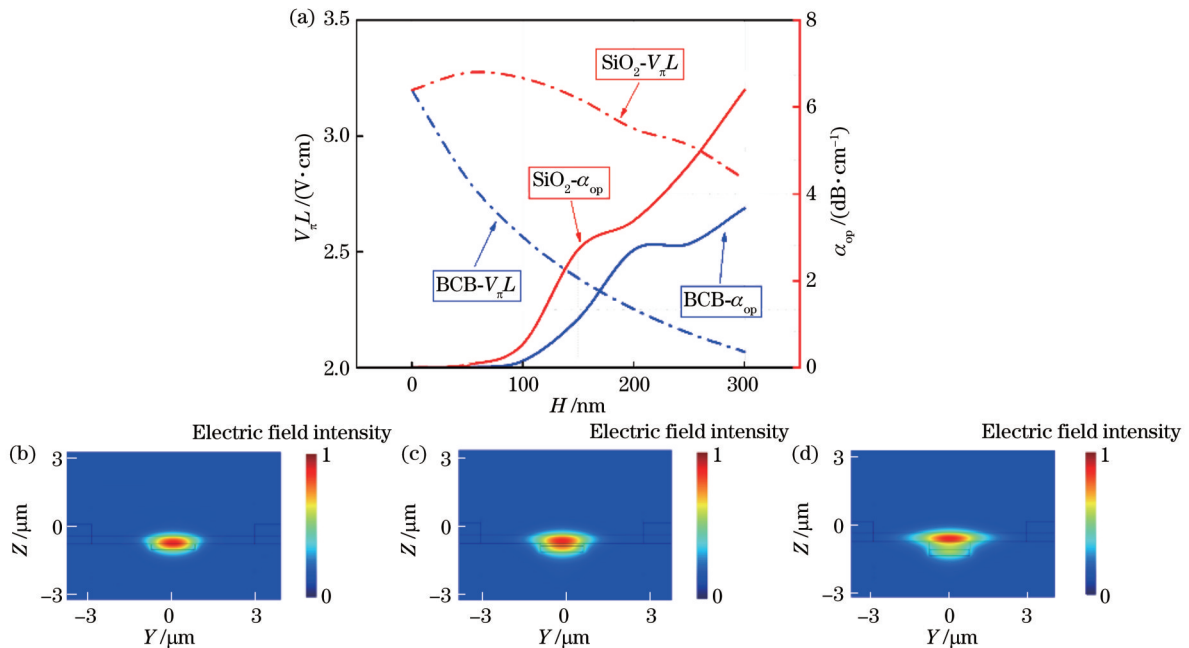


图 2 不同填充层厚度对 $V_{\pi}L$ 和 α_{op} 的影响。(a) 当填充材料为 BCB、 SiO_2 时，不同填充层厚度对调制器参数 $V_{\pi}L$ 与光损耗 α_{op} 的影响。

当 BCB 填充层厚度分别为 (b) $H=0 \text{ nm}$ 、(c) $H=100 \text{ nm}$ 、(d) $H=300 \text{ nm}$ 时，调制波导 TE 光模式的电场分布

Fig. 2 Effect of different filling layer thicknesses on $V_{\pi}L$ and α_{op} . (a) Parameters of $V_{\pi}L$ and α_{op} versus filling layer thicknesses H for the materials of BCB and SiO_2 ; electric field patterns of TE modes under the conditions of (b) $H=0 \text{ nm}$, (c) $H=100 \text{ nm}$, and (d) $H=300 \text{ nm}$, where the filling material is BCB

此外，在调制电极与铌酸锂薄膜之间加入填充层，以降低光损耗、微波损耗，并利于开展匹配设计。填充

层材料选择为低折射率的 SiO_2 ，从而利用折射率差进一步约束光模场。图 3 所示为不同 SiO_2 层填充厚度

下,光损耗 α_{op} 与调制参数 $V_{\pi}L$ 随底部填充厚度变化的关系。从结果来看,随着 SiO_2 层填充厚度 h 的增加,光损耗 α_{op} 明显减小,特别是当 $h=200\text{ nm}$ 时,光损耗已降低至 0.2 dB/cm ,可满足电光调制器对传输光损耗的要求。主要原因是金材料的折射率虚部比较大,其对光模式的吸收损耗较高, SiO_2 填充层的加入会增加折

射率对比度,将光模式更好地限制在两个电极之间,减少电极对光模式的吸收损耗。另外,当 SiO_2 层填充厚度 h 增加时, $V_{\pi}L$ 的增幅很小。因此,综合考虑调制参数 $V_{\pi}L$ 与传输光损耗 α_{op} ,底部与上部填充层的厚度分别设置为 $H=100\text{ nm}$ 与 $h=200\text{ nm}$ 。

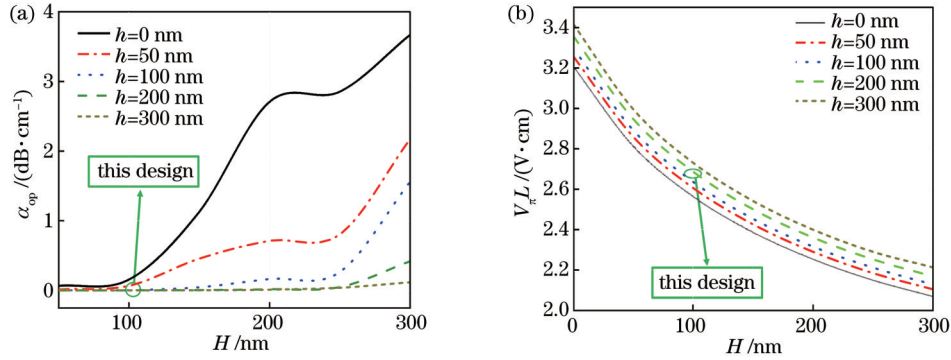


图 3 调制电极与铌酸锂薄膜之间的 SiO_2 填充层厚度 h 对光损耗 α_{op} 及调制参数 $V_{\pi}L$ 的影响。(a) 光损耗 α_{op} 的变化曲线;(b) 调制参数 $V_{\pi}L$ 的变化曲线

Fig. 3 SiO_2 filling layer thickness h between modulation electrode and thin film lithium niobate affecting on optical loss α_{op} and modulation parameter $V_{\pi}L$. (a) Change curves of optical loss α_{op} ; (b) change curves of modulation parameter $V_{\pi}L$

在确定填充层厚度后,进一步优化电极间距 G ,以此获得更低的 $V_{\pi}L$ 。图 4 所示为调制电极间距 G 对器

件调制参数 $V_{\pi}L$ 与光损耗 α_{op} 的影响。可以看到,随着电极间距的减小, $V_{\pi}L$ 快速减小,但是光损耗 α_{op} 却逐渐增加。为了保证器件的传输损耗足够低并支持更长的片上传输距离,光损耗的阈值标准设置为 $\alpha_{op} < 0.2\text{ dB/cm}$ 。基于该标准,当电极间距选为 $G=3.7\text{ }\mu\text{m}$ 时,对应的 $V_{\pi}L$ 仅为 $1.77\text{ V}\cdot\text{cm}$,此时光损耗为 0.17 dB/cm 。通过上述分析,获得了底部 BCB、上部 SiO_2 填充层厚度,以及电极间距对所述器件的调制参数 $V_{\pi}L$ 及光损耗 α_{op} 的影响,在此基础上将开展高速行波调制的匹配设计。

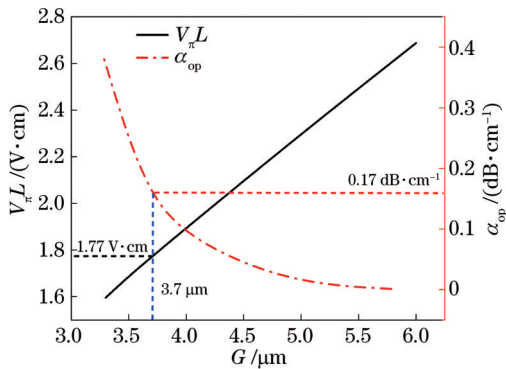


图 4 电极间距 G 对调制参数 $V_{\pi}L$ 及光损耗 α_{op} 的影响

Fig. 4 Electrode gap width G of the proposed device affecting on modulation parameter $V_{\pi}L$ and optical loss α_{op}

3.2 调制电极设计

行波调制电极的优化设计对高速电光调制器至关重要。首先,对行波调制电极的微波损耗进行分析。图 5(a) 所示为不同电极厚度 h_{Au} 对微波损耗 α_m 的影响,其中考虑了不同的 SiO_2 填充层厚度。可以看到:当电

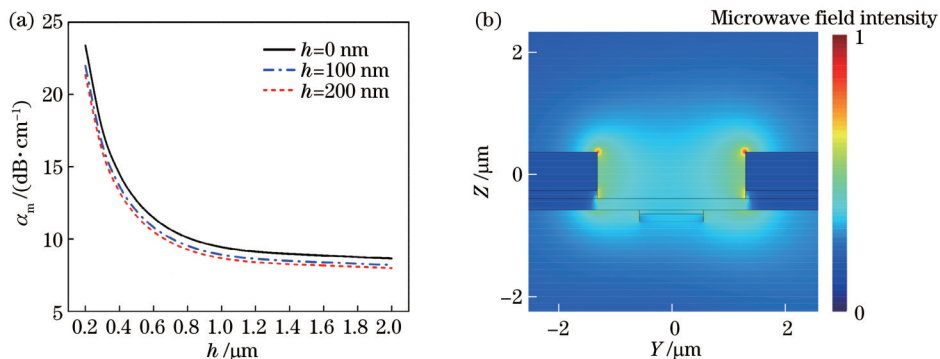


图 5 微波损耗与电极厚度的关系。(a) 器件的调制电极厚度 h_{Au} 对微波损耗 α_m 的影响;(b) 电极厚度为 $1.0\text{ }\mu\text{m}$ 时的微波场分布

Fig. 5 Microwave loss versus electrode thickness. (a) Electrode thickness h_{Au} of the proposed device affecting on the microwave loss α_m ; (b) microwave field distribution of the modulation waveguide as electrode thickness h_{Au} is $1.0\text{ }\mu\text{m}$

极厚度 h_{Au} 小于 $0.9 \mu\text{m}$ 时,微波损耗 α_m 随着电极厚度的增加快速降低;当电极厚度 h_{Au} 大于 $0.9 \mu\text{m}$ 时,微波损耗 α_m 降低的趋势逐渐放缓并趋于稳定。与此同时, SiO_2 填充层的厚度越大,微波损耗越低。图 5(b) 所示为电极厚度 $h_{Au}=1.0 \mu\text{m}$ 时的微波场分布情况,在后续分析中,将电极厚度 h_{Au} 设置为 $1.0 \mu\text{m}$ 。虽然更大的电极厚度可以进一步降低微波损耗,但是其降幅已经很小且超过 $1.0 \mu\text{m}$ 的电极厚度将给器件制造带来挑战。

对于阻抗匹配的设计,本器件中主要通过优化信号电极宽度 W_s 与电极间距 G 的设计来达到 50Ω 的阻抗匹配要求。图 6 所示为在满足阻抗匹配的条件下,信号电极宽度 W_s 与电极间距 G 的变化关系,其中考虑了不同的 SiO_2 填充层厚度 h 。从计算结果可知,较大的电极间距需要较宽的信号电极宽度来实现阻抗匹配,并且当电极间距 $G > 4.0 \mu\text{m}$ 时, SiO_2 填充层厚度的变化对阻抗匹配的影响较大,导致需要更宽的电极宽度来实现阻抗匹配。因此,当电极间距 $G=3.7 \mu\text{m}$ 时,在满足阻抗匹配的情况下,对应的信号电极宽度 W_s 为 $16.5 \mu\text{m}$ 。

对于折射率匹配的设计,由于微波的模式有效折射率往往高于光波导的模式群折射率,因此本实验通过优化结构设计来降低微波的模式有效折射率,实现二者的完美匹配。图 7 所示为微波模式有效折射率 n_{RF} 随电极间距 G 及 SiO_2 填充层厚度 h 的变化关系。可以看到,得益于本器件中 SiO_2 填充层的引入,微波模式有效折射率明显降低,进而促使微波模式有效折射率 n_{RF} 与光波导的模式群折射率 n_g 相等。折射率匹配点 ($n_{RF}=n_g=2.101$) 出现在 $G=3.9 \mu\text{m}$ 、 $h=200 \text{ nm}$ 或 $G=3.7 \mu\text{m}$ 、 $h=185 \text{ nm}$ 处。为了减小对 $V_{\pi}L$ 与 α_{op} 的影响,且在满足折射率匹配的情况下,最终电极间距 G 选为 $3.7 \mu\text{m}$, SiO_2 填充层厚度 h 为 185 nm 。此时所对应的 $V_{\pi}L$ 为 $1.76 \text{ V}\cdot\text{cm}$, 光损耗 α_{op} 为

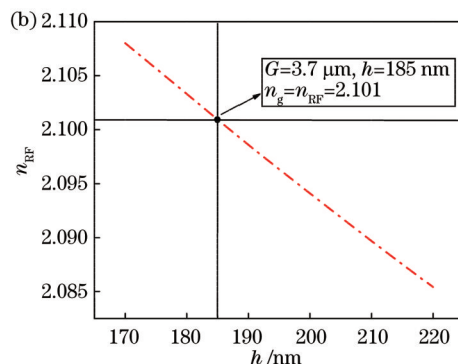
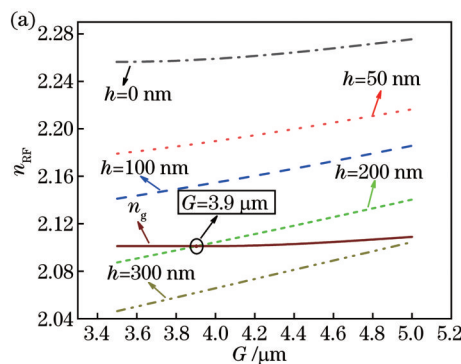


图 7 微波模式有效折射率随电极间距 G 及 SiO_2 填充层厚度 h 的变化关系。(a) 有效折射率随 G 的变化关系;(b) 有效折射率随 h 的变化关系

Fig. 7 Mode effective index n_{RF} of the microwave as a function of electrode gap width G and SiO_2 filling layer thickness h . (a) n_{RF} changed with G ; (b) n_{RF} changed with h

3.3 调制区与输入、输出波导之间的耦合设计

对于上述调制器,除了关键调制区的结构设计,输

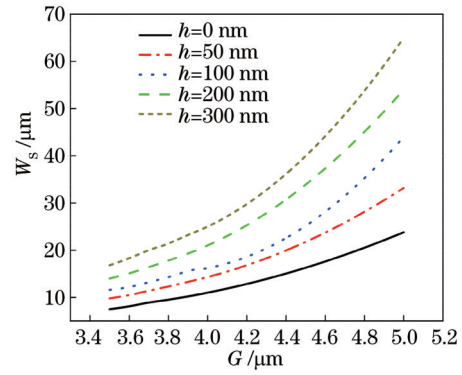


图 6 在满足阻抗匹配要求的情况下,不同 SiO_2 填充层厚度 h 所对应的信号电极宽度 W_s 与电极间距 G 的变化关系

Fig. 6 Relation between signal electrode width W_s and electrode gap G for different SiO_2 filling layer thicknesses when the impedance matching condition is satisfied

0.195 dB/cm 。

在完成阻抗匹配与折射率匹配设计的情况下,进一步研究了所述电光调制器的频率响应特性,如图 8 所示。随着调制频率的增加,电光频率响应逐渐降低,对应的 3 dB 调制带宽高达 140 GHz 。当电极间距 G 从 $3.7 \mu\text{m}$ 增大至 $4.7 \mu\text{m}$ 时: 3 dB 调制带宽将增加至 147 GHz ,主要原因是在基于铌酸锂制造的电光调制器中,微波损耗主要是由金属电极的欧姆损耗引起的,电极间距较小时,电流主要分布在电极间隙附近,这会减小电极的有效面积^[31],增加微波损耗,减小 3 dB 调制带宽; $V_{\pi}L$ 从 $1.76 \text{ V}\cdot\text{cm}$ 增加到 $2.17 \text{ V}\cdot\text{cm}$,主要原因是更大的电极间隙需要更大的驱动电压。因此,在设计铌酸锂电光调制器时,要做好 $V_{\pi}L$ 与调制带宽之间的权衡。所述电光调制器在 $V_{\pi}L$ 仅为 $1.76 \text{ V}\cdot\text{cm}$ 的情况下,获得了高达 140 GHz 的 3 dB 调制带宽,可以较好地满足片上高速、低功耗电光调制的需求。

入、输出波导与调制区的高效耦合设计也是重点。耦合损耗是耦合区域的关键性能指标,其定义为

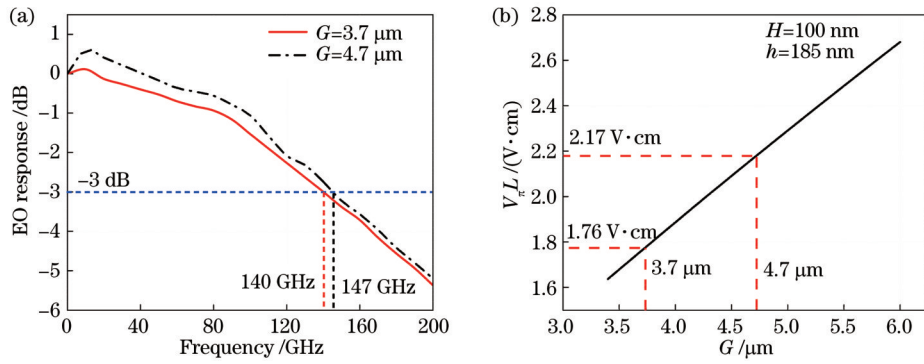


图 8 电极间隙 G 对电光频率响应及调制参数 $V_{\pi}L$ 的影响。(a) 电光频率响应的变化; (b) 调制参数 $V_{\pi}L$ 的变化
 Fig. 8 Electrode gap width G of proposed device affecting on EO response and modulation parameter $V_{\pi}L$. (a) Change of EO response; (b) change of modulation parameter $V_{\pi}L$

$$L_{\text{oss}} = -10\lg(P_{\text{out}}/P_{\text{in}}), \quad (8)$$

式中: P_{in} 表示 TE 模的输入功率; P_{out} 表示耦合结构输出的实际功率。

在所述器件中, 调制区波导结构为氮化硅波导位于底部, 铌酸锂薄膜位于波导上方且二者之间通过 BCB 层进行黏合; 输入、输出波导为普通的氮化硅波导。为了提高耦合效率, 提出一种倒台阶型薄膜耦合结构, 即采用三层倒台阶, 每层铌酸锂薄膜的厚度为

100 nm, 每级台阶的长度为 $5 \mu\text{m}$, 图 9 所示为所设计耦合结构的光传输效果及耦合损耗, 该结果是在 FDTD Solution 商业仿真软件中获得的。从图 9 可以看到, 所设计的三层耦合结构明显优于直接耦合结构, 可将耦合损耗从 1.23 dB 降低至 0.73 dB (氮化硅波导的宽度为 $1.6 \mu\text{m}$), 这是因为三层倒台阶型耦合结构可以缓慢地改变氮化硅-铌酸锂混合区域光学模式的有效模式折射率, 减小氮化硅波导区域与氮化硅-铌酸锂混合

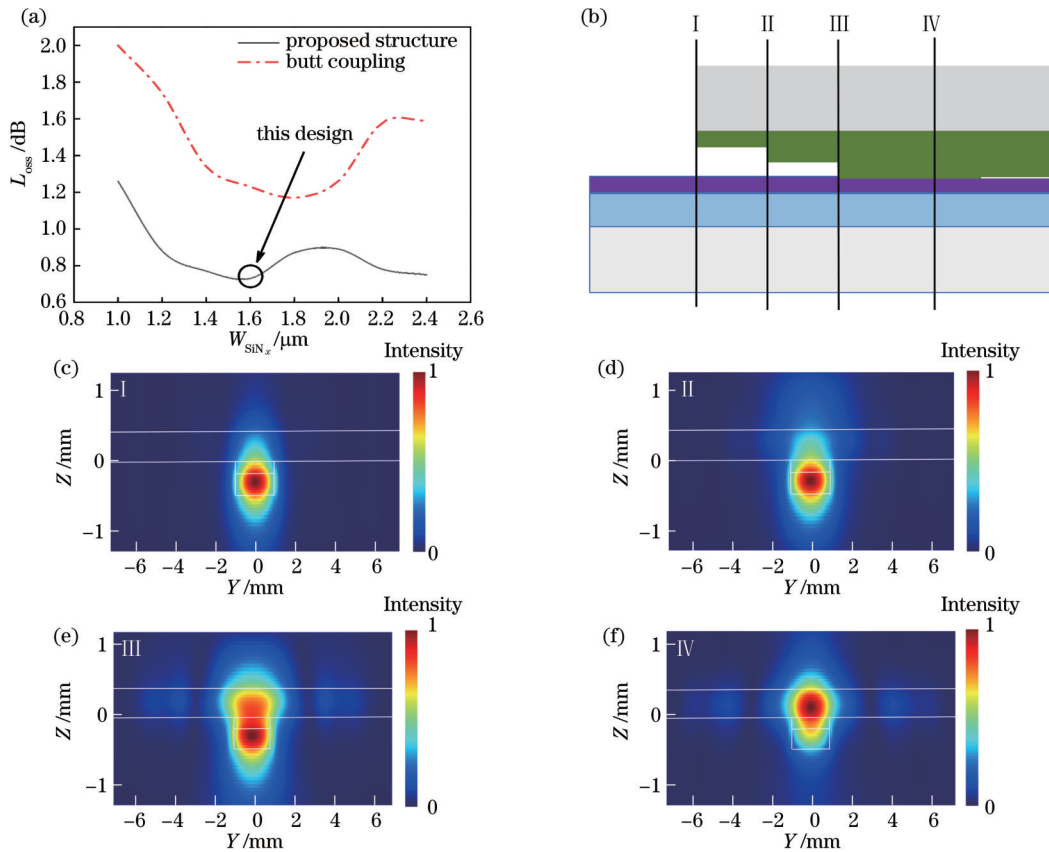


图 9 不同波导宽度对光损耗的影响以及不同位置处波导截面的 TE 模场。(a) 所述耦合结构与直接耦合结构所产生的耦合损耗对比; (b) 耦合结构示意图; (c)~(f) 不同位置处波导截面的 TE 模场

Fig. 9 Influence of different waveguide widths on optical loss and TE mode field of waveguide cross-sections at different positions. (a) Comparison of coupling loss between proposed structure and butt coupling structure; (b) schematic of proposed coupling structure; (c)~(f) TE mode distributions of the waveguide cross-section at four key positions along the propagation direction

区域光学模式的有效折射率失配,减弱反射,降低耦合损耗。图 9(c)~(f)所示为实际光传输过程中的模场分布,通过 15 μm 的耦合长度即可将氮化硅波导的模式高效地转变为调制区波导结构的模式。另外,调制区波导的光模式能量主要集中在铌酸锂薄膜层,进一步借助铌酸锂较高的电光系数,实现了高效的电光调制。

倒台阶型 LN 薄膜结构的加工流程如图 10 所示:首先,选用厚度为 300 nm 的 X 切 LN 薄膜晶圆,在该 LN 薄膜的顶部溅射一层厚度为 120 nm 的铬(Cr)作为硬掩模层;其次,利用电子束曝光技术对旋涂的光刻胶进行图案化处理,采用干法刻蚀技术将光刻胶上的图案进一步转移至硬掩模层,使用刻蚀法对 LN 薄膜进行

刻蚀,待刻蚀完毕后,用湿法去除残余的光刻胶及 Cr 硬掩模层,从而制备出台阶型 LN 薄膜的顶层结构;然后,继续在 LN 薄膜晶圆顶层旋涂厚度为 120 nm 的 Cr 硬掩模层,利用电子束曝光技术将倒台阶型 LN 薄膜第二层和第三层结构的图案转移至光刻胶上,并采用干法刻蚀技术将光刻胶上的图案转移到硬掩模层上;最后,使用刻蚀法刻蚀出台阶型 LN 薄膜的第二层和第三层结构,在刻蚀完成之后,使用湿法去除残留的光刻胶及硬掩模层。在将台阶型 LN 薄膜倒置键合到氮化硅波导晶圆时,由于台阶型 LN 薄膜下方存在空缺,且不平整,这会影 响键合结果,可以使用 PECVD 生长的 SiO_2 层来填充台阶型 LN 薄膜下方的空缺。

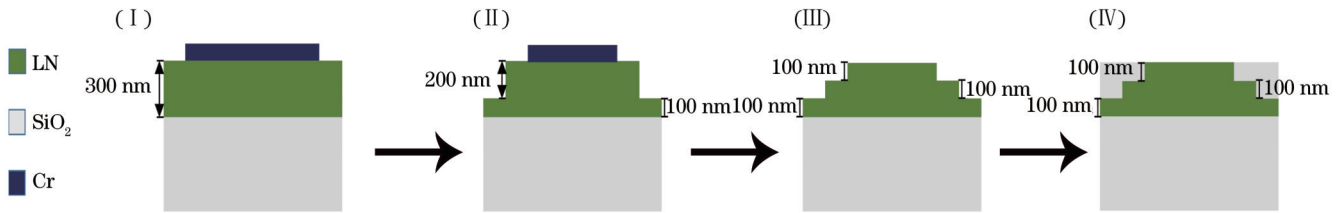


图 10 倒台阶型 LN 薄膜制造过程:(I)在厚度为 300 nm 的 X 切 LN 薄膜晶圆上旋涂一层厚度为 120 nm 的 Cr 作为硬掩模层,并将光刻胶上的图案转移到硬掩模层上;(II)使用刻蚀法刻蚀出倒台阶型 LN 薄膜的顶层结构并将光刻胶上的第二层结构转移到硬掩模层上;(III)使用刻蚀法刻蚀出倒台阶型 LN 薄膜的第二层和第三层结构;(IV)用 PECVD 法生长的 SiO_2 层填充倒台阶型 LN 薄膜空缺的部分

Fig. 10 Fabrication process of the inverted stepped thin-film LN: (I) a 120 nm chromium layer is sputtered on X-cut LN thin film with the thickness of 300 nm as a hard mask, then transfer the pattern on the photoresist to the hard mask layer; (II) the pattern is transferred to LN thin film using etching, then transfer the second layer structure on the photoresist to the hard mask layer; (III) the second and third layers of inverted stepped thin film structure are etched by using etching; (IV) filling the vacancy of inverted stepped thin film structure with SiO_2 layer grown by PECVD method

在以往报道的异质集成铌酸锂电光调制器结构中,大多数采用锥型波导结构进行绝热耦合来降低耦合损耗。倒台阶型 LN 薄膜结构与传统的锥型波导结构相比,需要对 LN 进行刻蚀加工,加工工艺相对比较复杂和繁琐,而且想要制备出高质量的倒台阶型 LN 薄膜相对比较困难,但是所提结构在键合的过程中不需要精准对齐,且耦合区域相对较小。相信铌酸锂的加工工艺会越来越成熟,制备出高质量的倒台阶型 LN 薄膜的难度也会越来越小。

将先前报道的典型薄膜铌酸锂电光调制器与所述器件的性能进行比较,主要从器件结构、 $V_{\pi}L$ 、3 dB 调制带宽方面进行对比,结果如表 1 所示。通过对比可知,所提波导结构及调制器具备低 $V_{\pi}L$ 与大 3 dB 调制带宽,明显优于目前已报道的部分器件^[18,20,22]。在所述器件中加入填充层,可实现更好的行波高速匹配并有助于降低光学损耗、微波损耗,同时耦合结构的引入可有效降低器件的耦合损耗,获得 $V_{\pi}L=1.76 \text{ V}\cdot\text{cm}$ 、3 dB 调制带宽高达 140 GHz 的调制性能,调制区长度为 5 mm。基于上述器件的性能及尺寸优势,该器件结构将为薄膜铌酸锂高速行波调制器的设计提供新的思

路,也将推动片上光子集成回路的快速发展。

4 结 论

针对集成电光调制器对高调制效率、低功耗、大调制带宽的需求,所述器件的调制区为 300 nm 厚的 X 切 LN 薄膜,该区域无需对 LN 薄膜进行刻蚀,而输入、输出耦合区采用刻蚀法形成台阶型耦合结构;利用键合的方式将铌酸锂薄膜集成至氮化硅波导的上方,且二者通过 BCB 粘合;将调制电极放在铌酸锂薄膜的上方且二者之间区域用 SiO_2 进行填充,以更好地实现折射率匹配,并且有助于降低光损耗、微波损耗;将前述结构组成的关键调制区扩展为 MZI 型电光调制器,输入、输出波导与调制区之间采用设计的倒台阶型薄膜结构进行光耦合。对上述电光调制器进行高速匹配设计与优化,所获器件的 $V_{\pi}L$ 为 1.76 $\text{V}\cdot\text{cm}$, 3 dB 调制带宽为 140 GHz。另外,器件关键调制区的长度仅为 5 mm,单端耦合损耗从 1.23 dB 降低至 0.73 dB。可见,所述器件结构的引入带来了电光调制器 $V_{\pi}L$ 的降低、调制带宽的提升,该器件结构将有助于提升薄膜铌酸锂调制器的性能,推动薄膜铌酸锂光子集成器件及

表 1 所述器件与已报道典型薄膜铌酸锂电光调制器的性能比较

Table 1 Comparison of the proposed EOM with some previously reported TFLN-based EOMs

Waveguide structure	Structure supplement	$V_{\pi}L / (V \cdot \text{cm})$	3 dB bandwidth /GHz	Ref.
LN ridge	Etched LN [E] ^{a)}	2.2	100	[15]
LN ridge	Etched LN[E]	2.37	110	[32]
LN-Si	Bonded LN on Si [E]	6.7	>106	[33]
LN-Si	Bonded LN on Si [S] ^{b)}	2.4	~25	[18]
LN-Si	Bonded LN on Si [S]	3	>100	[19]
SiN-LN	Deposited SiN on LN [S]	3.7	>5	[21]
SiN-LN	Deposited SiN on LN [S]	3.1	33	[22]
LN-SiN	Bonded LN on SiN [E]	6.7	30.6	[20]
LN-SiN	Bonded LN on Si [S]	1.76	140	This work

Notes: ^{a)} E stands for the experiment; ^{b)} S stands for the simulation.

回路的发展。

参 考 文 献

- [1] Sinatkas G, Christopoulos T, Tsilipakos O, et al. Electro-optic modulation in integrated photonics[J]. *Journal of Applied Physics*, 2021, 130(1): 010901.
- [2] Williamson R, Esmann R D. RF photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(9): 1145-1153.
- [3] Pan B C, Cao H Y, Huang Y S, et al. Compact electro-optic modulator on lithium niobate[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(3): 697-702.
- [4] Streshinsky M, Ding R, Liu Y, et al. Low power 50 Gb/s silicon traveling wave Mach-Zehnder modulator near 1300 nm [J]. *Optics Express*, 2013, 21(25): 30350-30357.
- [5] Azadeh S S, Merget F, Romero-García S, et al. Low $V(\pi)$ silicon photonics modulators with highly linear epitaxially grown phase shifters[J]. *Optics Express*, 2015, 23(18): 23526-23550.
- [6] Lentine A L, DeRose C T, Davids P S, et al. Silicon photonics platform for national security applications[C]//2015 IEEE Aerospace Conference, March 7-14, 2015, Big Sky, MT, USA. New York: IEEE Press, 2015.
- [7] Gardes F Y, Reed G T, Emerson N G, et al. A sub-micron depletion-type photonic modulator in silicon on insulator[J]. *Optics Express*, 2005, 13(22): 8845-8854.
- [8] Yin L H, Agrawal G P. Impact of two-photon absorption on self-phase modulation in silicon waveguides[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(14): 2031-2033.
- [9] Liu L S, Liu N, Zhang J F, et al. High performance electro-optic modulator based on thin-film lithium niobate[J]. *Optoelectronics Letters*, 2022, 18(10): 583-587.
- [10] Chen G Y, Li N X, Da Ng J, et al. Advances in lithium niobate photonics: development status and perspectives[J]. *Advanced Photonics*, 2022, 4(3): 034003.
- [11] Zhu D, Shao L B, Yu M J, et al. Integrated photonics on thin-film lithium niobate[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2021, 13(2): 242-352.
- [12] Qi Y F, Li Y. Integrated lithium niobate photonics[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(6): 1287-1320.
- [13] Sun D H, Zhang Y W, Wang D Z, et al. Microstructure and domain engineering of lithium niobate crystal films for integrated photonic applications[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9(1): 1-18.
- [14] Lin J T, Bo F, Cheng Y, et al. Advances in on-chip photonic devices based on lithium niobate on insulator[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(12): 1910-1936.
- [15] 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.
- [16] Mercante A J, Shi S Y, Yao P, et al. Thin film lithium niobate electro-optic modulator with terahertz operating bandwidth[J]. *Optics Express*, 2018, 26(11): 14810-14816.
- [17] Mercante A J, Yao P, Shi S Y, et al. 110 GHz CMOS compatible thin film LiNbO₃ modulator on silicon[J]. *Optics Express*, 2016, 24(14): 15590-15595.
- [18] Safian R, Teng M, Zhuang L M, et al. Foundry-compatible thin film lithium niobate modulator with RF electrodes buried inside the silicon oxide layer of the SOI wafer[J]. *Optics Express*, 2020, 28(18): 25843-25857.
- [19] 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]. *Journal of Physics: Photonics*, 2021, 3(1): 012001.
- [20] Boynton N, Cai H, Gehl M, et al. A heterogeneously integrated silicon photonic/lithium niobate travelling wave electro-optic modulator[J]. *Optics Express*, 2020, 28(2): 1868-1884.
- [21] Honardoost A, Juneghani F A, Safian R, et al. Towards subterahertz bandwidth ultracompact lithium niobate electrooptic modulators[J]. *Optics Express*, 2019, 27(5): 6495-6501.
- [22] Rao A, Patil A, Rabiei P, et al. High-performance and linear thin-film lithium niobate Mach-Zehnder modulators on silicon up to 50 GHz[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(24): 5700-5703.
- [23] Rabiei P, Ma J C, Khan S, et al. Heterogeneous lithium niobate photonics on silicon substrates[J]. *Optics Express*, 2013, 21(21): 25573-25581.
- [24] He M B, Xu M Y, Ren Y X, 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.
- [25] Krücker C J, Fülöp A, Ye Z C, et al. Optical bandgap engineering in nonlinear silicon nitride waveguides[J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 15370-15380.
- [26] Nair D P, Ménard M. A compact low-loss broadband polarization independent silicon 50/50 splitter[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(4): 6600207.
- [27] Zhang A X, Xia L P, Li T, et al. Ultra-compact polarization-independent 3 dB power splitter in silicon[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(19): 5000-5003.
- [28] Weigel P O. High-speed hybrid silicon-lithium niobate electro-optic modulators & related technologies[M]. San Diego: University of California, 2018.
- [29] Zimmerman W B. Introduction to COMSOL multiphysics[M]// *Multiphysics Modeling with Finite Element Methods*. New Jersey: World Scientific Publishing, 2006: 1-26.
- [30] Ahmed A N R, Mercante A, Shi S Y, et al. Vertical mode transition in hybrid lithium niobate and silicon nitride-based

- photonic integrated circuit structures[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(17): 4140-4143.
- [31] Kharel P, Reimer C, Luke K, et al. Breaking voltage-bandwidth limits in integrated lithium niobate modulators using micro-structured electrodes[J]. *Optica*, 2021, 8(3): 357-363.
- [32] Yang F, Fang X S, Chen X Y, et al. Monolithic thin film lithium niobate electro-optic modulator with over 110 GHz bandwidth[J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(2): 022502.
- [33] 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]. *Optics Express*, 2018, 26(18): 23728-23739.

Thin-Film Lithium Niobate-Silicon Nitride Electro-Optic Modulator Based on Embedded Filling Layer

Shen Xiangguo¹, Xu Yin^{1,2}, Dong Yue^{1,2}, Zhang Bo^{1,2}, Ni Yi^{1,2*}

¹*School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China;*

²*Institute of Advanced Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China*

Abstract

Objective With the progress of optical communication technology, optoelectronic devices are developing toward low power consumption, large data bandwidth, and high integration. The electro-optic modulator (EOM), a key optoelectronic device, plays a vital role in connecting the electric and optical fields, where the on-chip integration, high efficiency, low power consumption, and large bandwidth are always the crucial development directions of EOMs. Up to now, lithium niobate (LN) is still one of the most ideal materials for electro-optic modulation due to its excellent properties of wide transparent windows, strong Pockels effect, as well as stable physical and chemical features. However, the currently used EOMs are based on the bulk LN material, and the key modulation waveguides are formed by titanium diffusion or proton exchange on the bulk LN. Therefore, the formed waveguides have a low refractive index contrast ($\Delta n \approx 0.02$), which leads to a large waveguide size required to well confine the optical mode, and the EOM footprint is also relatively large inevitably. Recently, the thin-film lithium niobate (TFLN) wafer has been fabricated by the smart cutting process and made available by several commercial companies. The TFLN wafer not only inherits some excellent material properties of LN but also has a high refractive index contrast ($\Delta n \approx 0.8$), a feature considerably beneficial for shrinking the device footprint and making the on-chip compact integration available. In general, the TFLN-based EOMs can be divided into two types. One performs etching on the TFLN wafer to form the required waveguide, and the other deposits other high refractive index materials atop or below the TFLN wafer to form the waveguide, where the TFLN wafer does not need to be etched. By comparison, the etching-free TFLN scheme can reduce the fabrication difficulty. Therefore, we focus on the etching-free TFLN structure and propose a heterogeneously integrated EOM using embedded filling layers.

Methods The structure of the proposed device is divided into three parts: the structural design of the modulation waveguide, the electrode structure, as well as the coupling structure between the modulation region and the input/output waveguides. The silicon nitride (SiN_x) modulation waveguide is under the TFLN, and a layer of BCB is filled between them to reduce the half-wave-voltage length product ($V_\pi L$) and optical loss. On this basis, we employ such structure as the interference arms in a Mach-Zehnder interferometer (MZI) waveguide structure, where the modulation electrodes are arranged as a ground-signal-ground (G-S-G) configuration. The modulation electrodes are deposited on the TFLN, and a SiO_2 layer is sandwiched in between as an isolating layer to further reduce the optical loss, microwave loss, and the refractive index of the effective mode. Additionally, we propose an inverted stepped TFLN structure to achieve efficient coupling between input/output waveguide and modulation waveguide. Finally, we simulate and analyze the proposed structure using tools of COMSOL Multiphysics and FDTD Solutions to demonstrate its high-speed modulation performance.

Results and Discussions The BCB layer is filled between bottom SiN_x modulation waveguide and TFLN. We simulate the influence of different thicknesses of the BCB layer and the SiO_2 layer on $V_\pi L$ and the optical loss of the device. Results show that the proposed structure can effectively reduce $V_\pi L$ and optical loss (Fig. 2). At the same time, we optimize the electrode gap, and the optimum $V_\pi L$ of the device is $1.77 \text{ V}\cdot\text{cm}$ (Fig. 4). Further, we fill the SiO_2 layer between modulation electrode and TFLN layer. The filled SiO_2 layer can not only further reduce the optical loss (Fig. 3) and microwave loss (Fig. 5) of the device but also contribute to the index matching (Fig. 7). The high-speed analysis shows that the 3 dB modulation bandwidth of our proposed modulator is 140 GHz (Fig. 8). Finally, we design an inverted

stepped thin-film structure, which can reduce the refractive index mismatch of the effective mode between SiN_x waveguide region and SiN_x -LN hybrid region. The simulation results show that the single-ended coupling loss of this structure is 0.73 dB (Fig. 9).

Conclusions In this paper, we propose a heterogeneously integrated EOM based on TFLN. The modulation waveguide is formed by the bottom SiN_x and top TFLN that are sandwiched by a BCB layer. The modulation electrodes are deposited on the TFLN, and a SiO_2 layer is sandwiched in between as an isolating layer, which contributes to the index matching and the reduction in optical loss and microwave loss. Further, we construct an MZI-based EOM, where an inverted stepped thin-film structure is proposed to achieve the efficient coupling between input/output waveguide and modulation waveguide. After the high-speed matching design and optimization of the proposed electro-optic modulator, we obtain a $V_\pi L$ of 1.76 V·cm and a 3 dB bandwidth of 140 GHz in a modulation length of only 5 mm, and the single-ended coupling loss is reduced from 1.23 dB to 0.73 dB. Given these characteristics, we believe the proposed device structure could be applied in the large-bandwidth design of the TFLN-based EOM and would boost the development of TFLN-based photonic integrated devices.

Key words integrated optics; integrated optics devices; modulators; lithium niobate; integrated optics materials