

低半波电压铌酸锂薄膜电光调制器仿真与分析

王生水¹, 魏朝阳², 姜晨¹, 高睿¹, 万欣¹

(1. 上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093; 2. 中国科学院 上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 针对铌酸锂薄膜 Mach-Zehnder 电光调制器存在半波电压较大的问题, 采用有限元法对方向耦合器耦合模理论进行分析, 并对电光调制器的关键结构参数进行优化设计。结果表明: 两干涉臂光功率差与波导耦合长度呈正弦函数分布, 最小波导耦合长度随耦合间距的增大而增大。在调制臂长度为 2 cm, 光波长为 1550 nm 时, 仿真计算的半波电压值 V_π 为 0.9 V, 半波电压长度积为 1.8 V·cm, 消光比达到 26 dB。通过调制臂截面分析, 得到静电场分量 E_x , 电位移矢量 D_x , 以及光模分布, 并计算出电光重叠积分因子 Γ 为 0.586。基于上述仿真结果, 与以往现有的电光调制器的半波电压 (1.4~10.2 V) 相比, 经优化后的电光调制器的半波电压更低, 进而使器件的功耗更低, 有利于大规模光电集成。

关键词: 半波电压; 铌酸锂薄膜; 电光调制器; 有限元法; 方向耦合器; 光波导
中图分类号: TN 256 **文献标志码:** A

Simulation and analysis of low half-wave voltage lithium niobate thin film electro-optical modulator

WANG Shengshui¹, WEI Chaoyang², JIANG Chen¹, GAO Rui¹, WAN Xin¹

(1. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: In view of the large half-wave voltage of the lithium niobate thin film Mach-Zehnder electro-optical modulator, the finite element method was used to analyze the coupled mode theory of the directional coupler in detail, and the key structural parameters of the electro-optical modulator were optimized. The results show that the optical power difference between the two interference arms and the coupling length of the waveguide present a sine function distribution, and the minimum coupling length of the waveguide increases as the coupling distance increases. When the modulation arm length is 2 cm and the light wavelength is 1550 nm, the half-wave voltage V_π calculated by the simulation is 0.9 V. The half-wave voltage length product is 1.8 V·cm, and the extinction ratio reaches 26 dB. Through the cross-section analysis of the modulation arm, the electrostatic field component E_x , the electric displacement vector D_x , and the optical mode distribution are obtained, and the electro-optical overlap integral factor Γ is calculated to be 0.586. Based on the above simulation results, compared with the half-wave voltage (1.4 ~ 10.2 V) of the existing electro-optical modulator, the optimized electro-optical modulator

has a lower half-wave voltage. This in turn makes the device power consumption lower, conducive to large-scale optoelectronic integration.

Keywords: half-wave voltage; lithium niobate thin film; electro-optical modulator; finite element method; directional coupler; optical waveguide

随着 5G 网络和微波光子技术的迅速发展，电光调制器成为数据中心光互连和微波光子相控阵雷达核心器件之一。电光调制器的作用是将微波电信号转换为光波光信号，这就对器件重要性能提出了更高的要求，同时为降低系统功耗，便于实现与系统其他部分集成，则需要器件具有更低的半波电压。由于铌酸锂晶体具有铁电、压电、热电、声光、电光、透光范围宽、非线性光学效应等特性，与其他材料制备的电光调制器相比，铌酸锂晶体制备的电光调制器具有损耗低、带宽大、稳定性好等优点。但是，由铌酸锂晶体制作的电光调制器体积和尺寸相对较大、折射率对比波导较低，且对光模限制较弱。近年来，绝缘层上铌酸锂制作的电光调制器的体积和尺寸大大缩小，具有较大的折射率对比波导、较好的光模限制，与传统铌酸锂体材料制作的电光调制器相比，其半波电压相对较低^[1-2]，但是，在实际制备中仍存在一些不足之处。实际制作的电光调制器由于工艺误差造成较低的消光比，通常只有 18 dB，并且半波电压较大，造成的器件功耗较大，不利于大规模光电集成。

Lin 等^[3]利用飞秒激光辅助化学机械抛光加工级联铌酸锂薄膜 MZI 型电光调制器，测得半波电压为 6.7 V，半波电压长度积为 6.7 V·cm；Wu 等^[4]利用飞秒激光辅助化学机械抛光制备出多功能级联铌酸锂薄膜 MZI 型电光调制器，测得半波电压为 9.7 V，消光比为 28 dB，半波电压长度积为 9.7 V·cm；Han 等^[5]基于全矢量有限差分法对 X-切铌酸锂薄膜质子交换 MZI 电光调制器进行了模拟与分析，研究了质子交换波导的单模条件，分析了 Y 型分支结构的弯曲损耗，测得半波电压为 10.2 V，调制有源区长度为 1 cm 时，半波电压长度积为 10.2 V·cm；Han 等^[6]对铌酸锂薄膜 MZI 电光调制器进行了仿真分析，研究了铌酸锂薄膜波导单模传输条件，分析了 Y 型分支结构的弯曲损耗，测得半波电压为 2.2 V，调制有源区长度为 1 cm 时，半波电压长

度积为 2.2 V·cm。Wang 等^[7]利用纳米刻蚀方法制备了铌酸锂薄膜 MZI 电光调制器，测得半波电压为 9 V，调制有源区长度为 2 mm 时，半波电压长度积为 1.8 V·cm；Desiatov 等^[8]在可见光波段实现低损耗铌酸锂薄膜 MZI 电光调制器，测的半波电压为 8 V，调制有源区长度为 2 mm 时，半波电压长度积为 1.6 V·cm；Wang 等^[9]用纳米刻蚀方法制备了集成铌酸锂薄膜 MZI 电光调制器，测得半波电压为 1.4 V，调制有源区长度为 2 cm 时，半波电压长度积为 2.8 V·cm。纵观国内外研究结果来看，电光调制器的半波电压范围为 1.4~10.2 V，半波电压长度积范围为 1.6~10.2 V·cm，器件的最低半波电压为 1.4 V，对于单个器件的功耗相差不是很大，但是，对于大规模光电集成带来的系统功耗非常大。同理，器件的半波电压长度积太大时带来的系统调制效率就非常低，因此，仍需对电光调制器的关键结构参数进一步优化，在保证较小半波电压长度积(较高调制效率)下使器件半波电压更低，以有利于大规模光电集成。

本研究采用有限元法^[10-11]，结合 COMSOL Multiphysics 仿真软件对入射光波的模态和频域进行仿真分析，并对 Mach-Zehnder 干涉仪波导关键结构参数进行优化以及调制臂截面静电场和电位移矢量分析，得到铌酸锂薄膜电光调制器最佳结构参数，计算出调制器半波电压 $V_{\pi}=0.9$ V，半波电压长度积为 1.8 V·cm，消光比为 26 dB。模拟出静电场 E_x 分量等值线分布图，电位移矢量 D_x 分量分布图以及光模分布，并计算出电光重叠积分因子^[12] $\Gamma=0.586$ ，有效地提高了电光作用效率。

1 方向耦合器波导耦合模理论

方向耦合器光波导耦合原理是指在同一波导内其中一种导模的模式功率全部转移至另一种导模模式功率中，或者 2 个波导靠的相当近，由于

波导内导模的倏逝波重叠产生的同步相干耦合以至于能够进行能量交换。

假设 2 个波导传播方向一致，各个参数不变，计算方向耦合器中 2 个平行相邻波导光波。当光波从 z 轴方向传播，且 2 个平行波导有效折射率恒定，光波复振幅 A 是关于 z 的函数。若其中一波导光波复振幅为 A_0 ，传播常数为 β_0 ，另一波导光波复振幅为 A_1 ，传播常数为 β_1 ，那么，这 2 束光波可以表示为

$$\begin{cases} \gamma_0 = A_0 \exp(-i\beta_0 z) \\ \gamma_1 = A_1 \exp(-i\beta_1 z) \end{cases} \quad (1)$$

将式(1)对 z 求导并整理，可得

$$\begin{cases} \frac{d\gamma_0}{dz} = -i\beta_0\gamma_0 + ik_0\gamma_1 \\ \frac{d\gamma_1}{dz} = -i\beta_1\gamma_1 + ik_1\gamma_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中， k_0, k_1 分别为导模之间的耦合系数。

整理式(2)可得

$$\begin{cases} \frac{d\gamma_0}{dz} = -i\beta_0\gamma_0 - ik\gamma_1 \\ \frac{d\gamma_1}{dz} = -i\beta_1\gamma_1 - ik\gamma_0 \end{cases} \quad (3)$$

假设光波是在 $z=0$ 处耦合进入波导 0 的， δ 为光损耗系数，那么，此问题的边界条件为 $\gamma_0(0)=1$ 和 $\gamma_1(0)=0$ ，这 2 个波导内的功率

$$\begin{cases} P_0(z) = \gamma_0(z)\gamma_0^*(z) = \cos^2(kz)e^{-\delta z} \\ P_1(z) = \gamma_1(z)\gamma_1^*(z) = \sin^2(kz)e^{-\delta z} \end{cases} \quad (4)$$

若要其中一波导功率全部转移到另一波导功率中，方向耦合器最小耦合长度 L 需满足：

$$L = \frac{\pi}{2k} + \frac{m\pi}{k}, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

方向耦合器中耦合系数

$$k = \frac{2\beta_y^2 m e^{-md}}{\beta_e w (m^2 + d^2)} \quad (6)$$

式中： β_y 为 y 方向的传播常数； β_e 为 z 方向的传播常数； m 为 y 方向的消光系数； w 为平行波导宽度； d 为 2 个平行波导之间的间距。

2 电光调制器关键结构优化

采用方向耦合器作为光分束设计的 Mach-Zehnder 干涉仪波导结构型的铌酸锂薄膜电光调制器，其有 4 个端口，分别是 2 个输入端口，2 个输出端口。作为电光强度调制器，端口 1 作为输入端口，端口 2 作为输出端口，Mach-Zehnder 干涉仪波导结构铌酸锂薄膜电光调制器结构示意图如图 1 所示。

从图 1 可以看出，铌酸锂薄膜电光调制器由 3 部分组成，分别是 S 形弯曲余弦波导、2 个平行波导组成的方向耦合器、Mach-Zehnder 干涉仪。蓝色部分是光波导，光波导是通过飞秒激光辅助化学机械抛光方法^[13-15]在 X-切铌酸锂薄膜材料上形成的。S 形弯曲余弦半径太小时，S 形余弦区域波导散射损耗很严重，通过合理地优化 S 形弯曲余弦半径可以大大改善。方向耦合器起到消光和分光作用，方向耦合器的消光原理是根据耦合原理，刚开始能量从端口 2 输出，慢慢地转移到全部由端口 4 输出。相比于 Y 形分束器，其分光更均匀，很大程度上提高了电光调制器的消光比。由于电光调制器的半波电压主要由电光重叠积分因子^[12] Γ 来决定，电光重叠积分因子越大，对应的半波电压越小，而通过调制器截面分析，优化电极结构，可以提高电光重叠积分因子。因此，Mach-Zehnder 型铌酸锂薄膜电光调制器仿真的关键结构部分包括 S 弯余弦波导、方向耦合器、调制臂截面。根据设计经验和工艺条件^[5-7,9]，本研究中电光调制器仿真设计数值如表 1 所示。

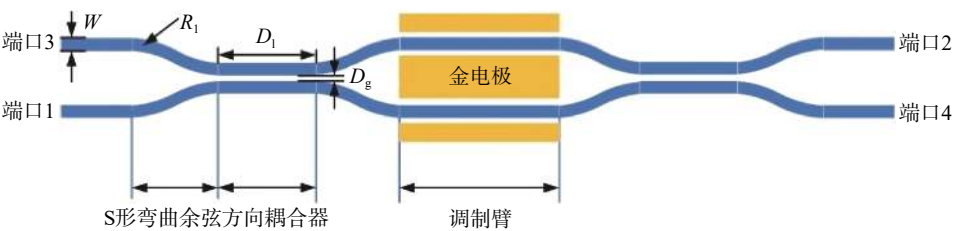


图 1 铌酸锂薄膜电光调制器结构示意图

Fig.1 Structure diagram of LiNbO₃ thin film electro-optical modulator

表 1 铌酸锂薄膜电光调制器设计参数

Tab.1 Design value of LiNbO₃ thin film electro-optical modulator

名 称	数值
波长 λ	1 550 nm
波导宽度 W	2 μm
S弯余弦半径 R_1	1.8 mm
方向耦合器波导耦合长度 D_1	380 μm
干涉臂长度 L	2 cm
耦合间距 D_g	1 μm
频率 f_0	1.9341×10^{14} 1/s
包层折射率 n_1	2.2
芯层折射率 n_2	2.22
电光系数 γ_{33}	30.8 pm/V
低频相对介电常数 ϵ	34

3 仿真结果与分析

3.1 S形弯曲余弦

图 2 为 COMSOL Multiphysics 仿真软件中建立的 S 形弯曲余弦波导二维模型。

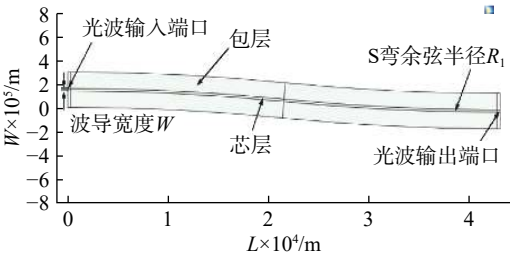


图 2 S 形弯曲余弦波导二维模型

Fig.2 Two-dimensional model of S-bend cosine waveguide

Mach-Zehnder 干涉仪铌酸锂薄膜电光调制器中光分束采用 S 形弯曲余弦线，同以往的折弯直线相比，可以很大程度上改善光传输散射损耗。由于 S 形弯曲余弦是由 2 个一模一样的同心圆环中心对称分布并通过直线相切连接而成的，参数化扫描中半径扫描范围设置为 0.1~2.5 mm，步长设置为 0.04 mm。图 3 为参数化扫描得到的 S 形弯曲余弦能量透射率与半径的关系。

从图 3 可以看出，当 S 形弯曲余弦半径太小时，波导能量透过率很低，那是由于波导包层和芯层折射率差很小，造成光波能量无法很好地限制在波导芯层区域，大部分的光几乎以散射形式损耗了；随着弯曲余弦半径的不断增大，能量透

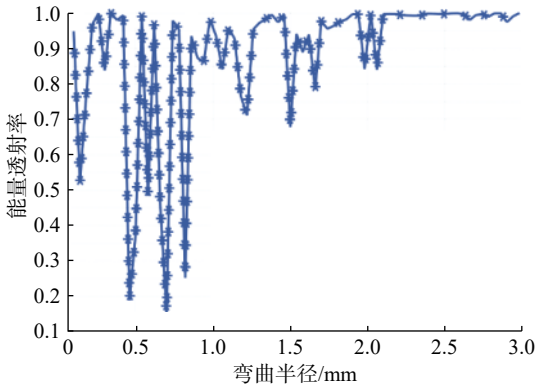


图 3 S 形弯曲余弦能量透射率与半径关系

Fig. 3 Relationship between energy transmission rate and radius of S-bend cosine

射率总体上也不断地增大，当弯曲余弦半径达到 2.5 mm 时，波导光波能量透过率达到 99% 以上，相应的波导传输损耗达到最低，之后随着半径的继续增大，能量透射率趋于稳定不变。由图 3 可见，S 形弯曲余弦半径经过合理的优化后，波导能量透过率很大程度上得到了提高。

3.2 方向耦合器

图 4 为 COMSOL Multiphysics 仿真软件中建立的方向耦合器波导二维模型。

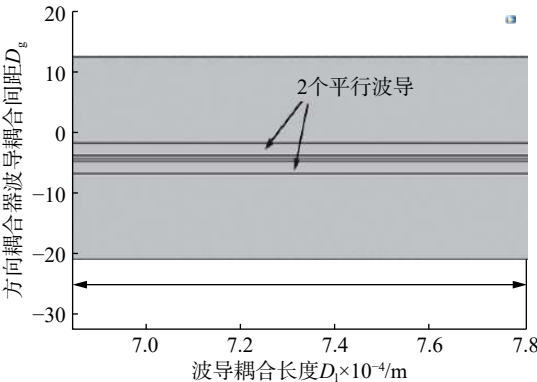


图 4 方向耦合器波导二维模型

Fig.4 Two-dimensional model of directional coupler waveguide

参数化扫描中波导耦合长度扫描范围设置为 160~600 μm ，步长设置为 5 μm 。图 5 为波导耦合长度参数化扫描计算结果得到的 Mach-Zehnder 干涉仪两调制臂功率差与波导耦合长度关系。从图 5 可以看出，电光调制器两调制臂功率差随着耦合长度增加而呈正弦函数分布，这与方向耦合器耦合模理论相吻合。通过合理地优化波导耦合长度，当方向耦合器波导耦合长度为 325 μm 时，两调制臂光功率差为 0.029 689；当方向耦合器波导耦合长度为 500 μm 时，两调制臂光功率差为 0.029 278，

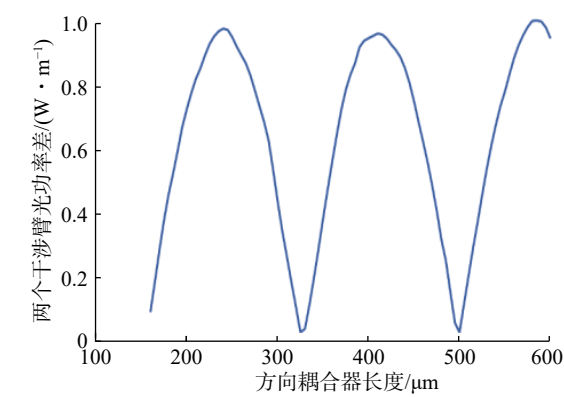


图 5 两调制臂功率差与波导耦合长度关系

Fig.5 Relationship between power difference of two modulation arms and coupling length of waveguide

因此，方向耦合器波导耦合长度为 500 μm 时，两调制臂光功率差更接近于零，此时 Mach-Zehnder 干涉仪两干涉臂光功率相等。

图 6 为方向耦合器波导耦合长度为 500 μm 时，Mach-Zehnder 干涉仪两调制臂光场分布图，从图 6 可以看出，电光调制器两干涉臂光场分布一致。

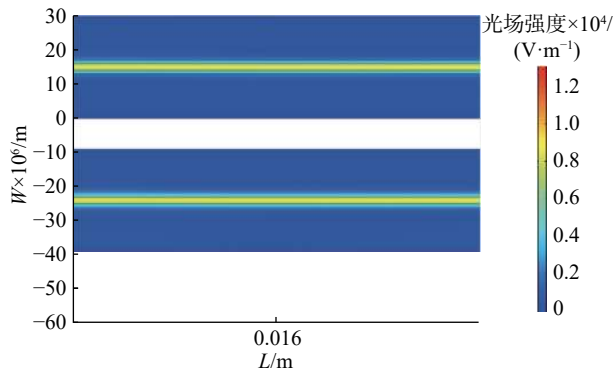


图 6 波导耦合长度为 500 μm 时，两干涉臂光场分布

Fig.6 Light field distribution of two interference arms under the coupling length of waveguide of 500 μm

根据式(5)和式(6)仿真计算得到波导最小耦合长度与波导耦合间距关系，如图 7 所示。从图 7 可以看出，方向耦合器波导最小耦合长度随着波导耦合间距的增加而增大。从图 8(a)可以看出，当方向耦合间距为 1 μm 时，电光调制器消光比达到 26 dB。考虑到方向耦合器在实际加工过程中出现的工艺误差对波导耦合间距造成的影响，所以，要对方向耦合器耦合间距作容差性分析，方向耦合器耦合间距设置为 3 μm，间距误差设置为±0.5 μm，图 8(b)，(c)，(d)分别为方向耦合器耦合间距为 3，3.5，2.5 μm 时对应的不同的电光调制器消光比。

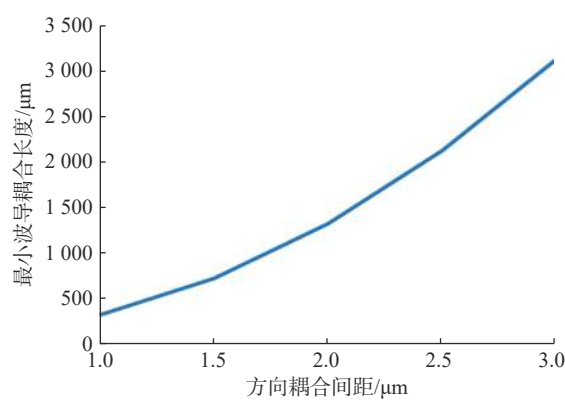


图 7 波导最小耦合长度与耦合间距关系

Fig.7 Relationship between minimum coupling length and coupling distance of waveguide

从图 8(b)可以看出，当方向耦合间距为 3 μm 时，电光调制器消光比达到 25 dB。通过容差性分析，从图 8(c)和 8(d)可以看出，当方向耦合器耦合间距为 3.5 μm 和 2.5 μm 时，电光调制器消光比分别为 45，27 dB，消光比均不小于 25 dB。因此，本文设计的铌酸锂薄膜电光调制器的容差性比较好。

3.3 调制臂截面分析

铌酸锂薄膜电光调制器中 Mach-Zehnder 干涉仪用于电光调制，通过在 2 个干涉臂两侧施加电信号，使光波分别经过 2 个干涉臂时产生相位差，进而调制光波强度。调制臂截面分析主要是电极设计分析，包括设置合理的电极厚度、电极间距，提高电场微波与光场光波相速度匹配效率，进而提高电光重叠积分因子。调制臂截面结构示意图如图 9 所示。

如图 9 所示，衬底层是铌酸锂，缓冲层为二氧化硅，缓冲层作用是降低电极吸收损耗及有利于微波与光波相速度匹配。波导层是通过飞秒激光辅助化学机械抛光方法在铌酸锂薄膜上形成的，铌酸锂薄膜波导之所以形成梯形状，这是由于化学机械抛光的作用。覆盖层为五氧化二钽，由于五氧化二钽折射率与铌酸锂薄膜波导折射率很接近，这样铌酸锂薄膜波导可以保持单模传输。适当地增加电极厚度可以降低电场微波信号有效折射率，进而更好地与光场光波速度相匹配。根据设计经验和工艺条件^[5-7,9]，调制臂截面结构设计数值如表 2 所示。

图 10 为 COMSOL Multiphysics 仿真软件中建立的电光调制器截面二维模型。

通过合理设置边界条件，并对其进行模式分

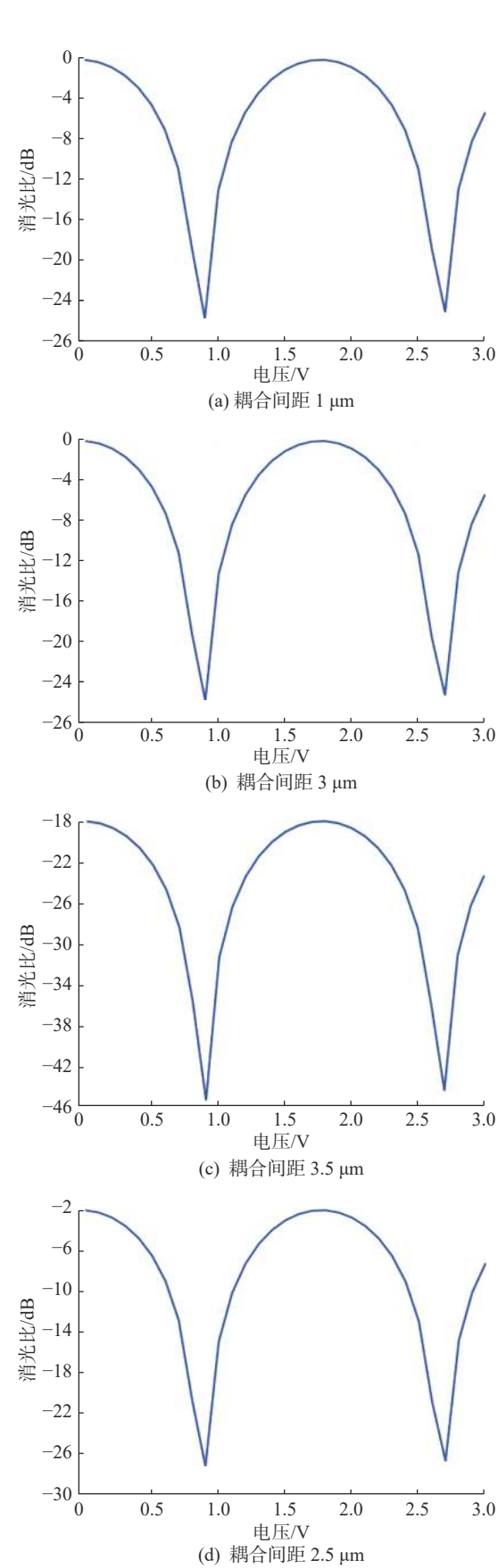


图 8 不同耦合间距所对应的消光比

Fig. 8 Extinction ratio corresponding to coupling distance

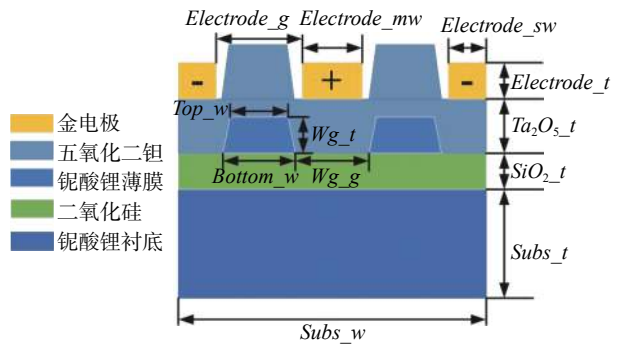


图 9 调制臂截面结构示意图

Fig. 9 Schematic diagram of modulation arm section structure

表 2 调制臂截面结构设计数值

Tab.2 Design value of modulation arm section structure

名称	参数值
铌酸锂衬底宽度Subs_w	100 μm
铌酸锂衬底厚度Subs_t	30 μm
缓冲层二氧化硅厚度SiO ₂ _t	2 μm
铌酸锂薄膜顶部宽度Top_w	1 μm
铌酸锂薄膜底部宽度Bottom_w	2 μm
铌酸锂薄膜波导间隔Wg_g	40 μm
覆盖层五氧化二钽厚度Ta ₂ O ₅ _t	10 μm
中间电极宽度Electrode_mw	34 μm
两侧电极宽度Electrode_sw	20 μm
电极间距Electrode_g	8 μm
电极厚度Electrode_t	15 μm
铌酸锂薄膜厚度Wg_t	0.7 μm
波长 λ	1 550 nm
频率 f_0	1.9341×10^{14} 1/s

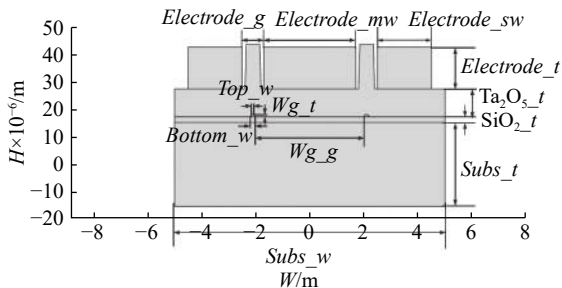


图 10 电光调制器截面二维模型

Fig. 10 Two-dimensional model of electro-optical modulator section

析和稳态分析，计算得到未施加电场时其中一干涉臂的脊形波导光模分布如图 11(a)所示，静电场分量 E_x 等值线分布如图 11(b)所示，电位移矢量

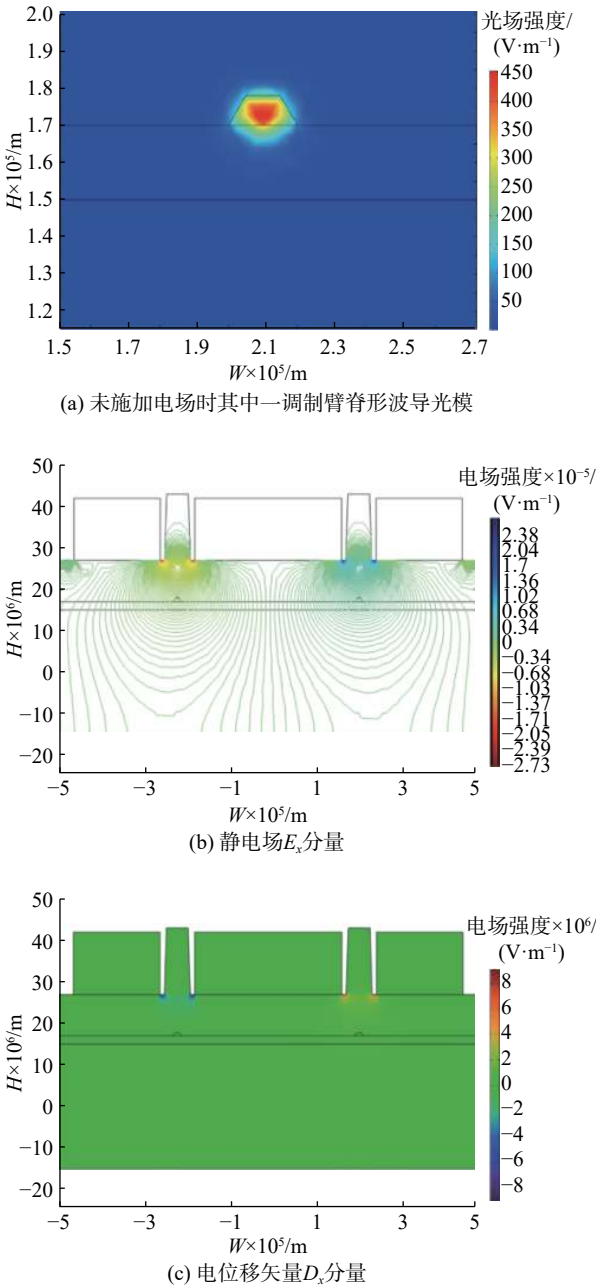


图 11 电光调制臂截面结构

Fig. 11 Cross section structure of electro-optical modulation arm

D_x 分量分布如图 11(c)所示。

从图 11(a)可以看出，光模很好地限制在铌酸锂薄膜波导芯层，说明采用脊形波导能够更好地限制光模。

由图 11(b)和 11(c)可以看出，电极间距内的电场分量 E_x 等值线更加密集，说明电极间距内的电场强度越大，在远离电极间距的电场分量 E_x 等值线相对稀疏，说明电极间距外的电场强度较小。所以，将铌酸锂薄膜波导做成脊形

状，的确可以很大程度上提高电场和光场作用效率。经计算得到电光重叠积分因子 $I=0.586$ 。

通过施加电信号对光波进行调制，参数化扫描中电压扫描范围为 $0 \sim 3 \text{ V}$ ，步长设置为 0.1 V 。参数化扫描计算得到归一化透射率与外加电压关系如图 12 所示。

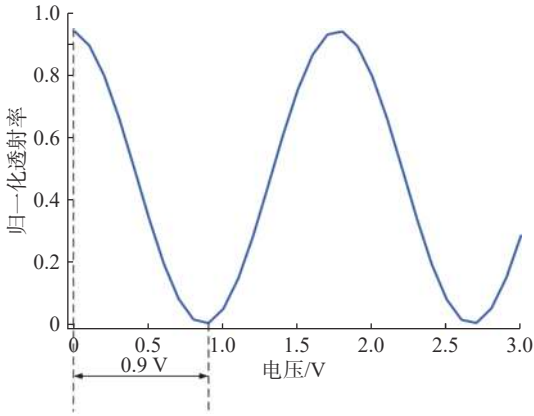


图 12 归一化透射率与外加电压关系

Fig.12 Relationship between normalized transmission and applied voltage

从图 12 可以看出，铌酸锂薄膜电光调制器半波电压值 $V_\pi=0.9 \text{ V}$ ，半波电压值的定义为电光调制器中 Mach-Zehnder 干涉仪两干涉臂相位差相差 180° 时，光波透射率从最大变为最小所施加的电压值。未施加电压时，光波能量全部从端口 2 输出，当施加电压为 0.9 V 时，光波能量全部从端口 4 输出。调制效率 $V_\pi L=1.8 \text{ V} \cdot \text{cm}$ ，说明设计的此款铌酸锂薄膜电光调制器的半波电压相当低，调制效率也很高。

4 结 论

通过有限元法，并结合有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics 对铌酸锂薄膜 Mach-Zehnder 干涉型电光调制器关键结构参数进行优化，设计了一款低半波电压的铌酸锂薄膜 Mach-Zehnder 干涉型电光调制器。

仿真分析表明，S 形弯曲余弦波导半径为 2.5 mm 时，波导光波能量透射率达到 99% 以上，光波传输损耗最低；当方向耦合器耦合长度为 $500 \mu\text{m}$ 时，Mach-Zehnder 干涉仪上下两调制臂光功率一致。经过容差性分析得出，电光调制器的消光比均不小于 25 dB ，说明设计的此款铌酸锂薄膜电光调制器容差性比较好。

脊形波导确实可以增强波导光模限制, 电场和光场作用效率明显提升, 电光重叠积分因子 $\Gamma=0.586$, 证明电光作用效率很高。当电极长度为 2 cm 时, 器件的半波电压为 0.9 V, 半波电压长度为 $1.8 \text{ V}\cdot\text{cm}$, 消光比为 26 dB。基于上述仿真结果, 与以往现有的电光调制器的半波电压 (1.4~10.2 V) 相比, 经过优化后的电光调制器的半波电压更低, 进而使器件功耗更低, 有利于大规模光电集成。因此, 本研究对于制备低半波电压的铌酸锂薄膜 Mach-Zehnder 干涉型电光调制器具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] RAO A, FATHPOUR S. Compact lithium niobate electrooptic modulators[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(4): 3400114.
- [3] LIN J J, ZHOU J X, WU R B, et al. High-precision propagation-loss measurement of single-mode optical waveguides on lithium niobate on insulator[J]. *Micromachines*, 2019, 10(9): 1009–1016.
- [4] WU R B, LIN J J, WANG M, et al. Fabrication of a multifunctional photonic integrated chip on lithium niobate on insulator using femtosecond laser-assisted chemomechanical polish[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(19): 4698–4701.
- [5] HAN H P, XIANG B X, LIN T, et al. Design and optimization of proton exchanged integrated electro-optic modulators in X-Cut lithium niobate thin film[J]. *Crystals*, 2019, 9(11): 549.
- [6] HAN H P, XIANG B X. Integrated electro-optic modulators in X-Cut lithium niobate thin film[J]. *Optik*, 2020, 212: 164691.
- [7] WANG C, ZHANG M, STERN B, et al. Nanophotonic lithium niobate electro-optic modulators[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1547–1555.
- [8] DESIATOV B, SHAMS-ANSARI A, ZHANG M, et al. Ultra-low-loss integrated visible photonics using thin-film lithium niobate[J]. *Optica*, 2019, 6(3): 380–384.
- [9] 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.
- [10] FRANCO M A R, PASSARO A, ABE N M, et al. A design study of a Ti: LiNbO₃ traveling-wave Electrooptic modulator by the finite element method[C]//1999 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference. Rio de Janeiro, Brazil: IEEE, 1999, 1: 158–162.
- [11] KAWANO K, NOGUCHI K, KITOH T, et al. A finite element method (FEM) analysis of a shielded velocity-Matched Ti: LiNbO₃ optical modulator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1991, 3(10): 919–921.
- [12] 李金洋, 逯丹凤, 祁志美. 铌酸锂波导电光重叠积分因子的波长依赖特性分析 [J]. *物理学报*, 2014, 63(7): 077801.
- [13] WU R B, ZHANG J H, YAO N, et al. Lithium niobate micro-disk resonators of quality factors above 10^7 [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(17): 4116–4119.
- [14] WANG M, WU R B, LIN J T, et al. Chemo-mechanical polish lithography: a pathway to low loss large-scale photonic integration on lithium niobate on insulator[J]. *Quantum Engineering*, 2019, 1(1): 1002–1011.
- [15] WU R B, WANG M, XU J, et al. Long low-loss-litium niobate on insulator waveguides with sub-nanometer surface roughness[J]. *Nanomaterials*, 2018, 8(11): 910–917.

(编辑: 石 瑛)