光电探测与调制技术专栏

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024042804

基于绝缘体上钛酸钡的 2 μm 波段慢波高速电光调制器

黄　通[1]，马如原[1]，刘瑛璇[1]，许天琦[1]，邱　阳[1]，
赵兴岩[1]，郑少南[1]，钟其泽[1]，董　渊[1,2*]，胡　挺[1]
（1. 上海大学 微电子学院，上海 201800；2. 上海市智能感知芯片技术协同创新中心 上海大学，上海 201800）

摘　要： 电光调制器是光通信链路的重要组成部分。随着近红外波段光通信频谱的不断消耗，2 μm 中红外波段成为拓宽光纤通信频谱的新选择。文章提出了一种 2 μm 波长的基于绝缘体上钛酸钡平台的中红外电光调制器。对钛酸钡脊波导和慢波电极进行了理论分析和结构优化。仿真结果表明，在 2 μm 波长处，当调制长度为 5 mm 时，所设计的电光调制器拥有较高的调制效率并且实现了较大的电光带宽，其半波电压长度积（$V_\pi \cdot L$）为 0.677 V·cm，3 dB 电光带宽为 229.6 GHz。

关键词： 中红外波段；绝缘体上钛酸钡；电光调制器；脊波导；慢波电极
中图分类号： TN929.1　**文章编号：** 1001－5868(2024)05－0693－07

Slow-wave High-speed Electro-optic Modulator Based on Barium Titanate on An Insulator at A Wavelength of 2 μm

HUANG Tong[1], MA Ruyuan[1], LIU Yingxuan[1], XU Tianqi[1], QIU Yang[1],
ZHAO Xingyan[1], ZHENG Shaonan[1], ZHONG Qize[1], DONG Yuan[1,2], HU Ting[1]
(1. School of Microelectronics, Shanghai University, Shanghai 201800, CHN; 2. Shanghai Collaborative Innovation Center of Intelligent Sensing Chip Technology, Shanghai University, Shanghai 201800, CHN)

Abstract: Electro-optic modulators are critical components of optical communication systems. With an increasing demand for the near-infrared spectrum in optical communication, the 2 μm mid-infrared band has emerged as a promising option for expanding the bandwidth of fiber optic communications. This study proposes a mid-infrared electro-optic modulator based on barium titanate on an insulator platform at a wavelength of 2 μm. Theoretical analyses and structural optimizations are performed on the barium titanate ridge waveguide and slow-wave electrode. The simulation results demonstrate that at a wavelength of 2 μm and a modulation length of 5 mm, the designed electro-optic modulator exhibits high modulation efficiency and achieves a large electro-optic bandwidth, with a half-wave voltage-length product ($V_\pi \cdot L$) of 0.677 V·cm and a 3 dB electro-optic bandwidth of 229.6 GHz.

Key words: mid-infrared band; barium titanate on insulator; electro-optic modulator; ridge waveguide; slow-wave electrode

0　引言

随着光通信在世界各地得到广泛应用，人们对数据传输速度和质量的要求日益增长。由于目前光通信大量集中在近红外波段，这将会造成频谱的拥挤从而影响通信质量。2 μm波段作为使用率较低

收稿日期：2024－04－28.
基金项目：国家自然科学基金项目（62204149，62205193，U23A20356）；红外探测国家重点实验室开放课题项目（IRDT-23-08）；上海市智能感知芯片技术协同创新中心、上海市汽车智能网联交互芯片与系统重点实验室揭榜挂帅项目.
* **通信作者：**董　渊

的中红外波长，具有更多的通信资源可供分配，从而有助于避免频谱竞争和干扰问题，有望成为光通信的一个新窗口。高速电光调制器作为光通信系统中的关键部件，成为实现 2 μm 波段光通信的重要突破口。目前，利用硅光子技术开发 2 μm 波段的电光调制器已取得了进展[1-3]。然而，纯硅基调制器由于其相位调制机理是通过改变硅(Si)中的载流子浓度来实现的，这种调制效应本质上是非线性的、可吸收的，这给器件的高性能调制带来了较大挑战。

钛酸钡(BTO)是制作中红外电光调制器的理想材料，原因如下：首先，BTO 是一种非对称结构的晶体材料，会表现出线性泡克尔斯效应[4-6]，因此，它可以为信号提供纯相位调制，而不会在中红外波长下引入较高的插入损耗；其次，与传统电光材料相比，BTO 具有极高的泡克尔斯系数(电光系数)，在近红外波段可展现出较高的调制效率[7-8]，其理论值为 $r_{51}=1\,300$ pm/V[9]，比铌酸锂(LN)($r_{33}=32$ pm/V)的理论值大 30 多倍[10]。在中红外波段，Jin 等[11]的实验结果证实，BTO 的有效电光系数仍比 LN 高出一个数量级以上；最后，BTO 的透明窗口很宽[12]，在 2 μm 波长下吸收损耗很低。

除了从材料入手提升电光调制器的带宽，电极的结构设计对于器件高频性能的提升也起着重要作用。Prashanta 等[13]提出了一种基于 LN 薄膜平台的周期性电容负载行波电极结构(慢波电极)，其基本思想是使用非常宽的信号电极来大幅降低射频损耗，从而获得更大的带宽。然而，这种结构会降低射频信号的相速度(即慢波效应[14-15])。为了保持折射率匹配，通常需要采用低介电常数材料作为基底或者包层。

本文在 2 μm 波长下提出了一种新型的绝缘体上钛酸钡(BTOOI)电光调制器，并通过数值计算模拟对其进行了详细的理论分析。该调制器采用刻蚀 BTO 薄膜形成脊波导，并经过优化刻蚀深度和波导宽度，在实现低损耗单模传输的同时增强电光重叠系数，提升调制效率。另外，通过在脊波导上沉积二氧化硅(SiO_2)上包层并设计优化慢波电极，以降低射频衰减，实现微波速度与光在波导中的群折射率的匹配，进一步提升器件的带宽。最终在 2 μm 波长下获得了 0.677 V·cm 的半波电压长度积($V_\pi \cdot L$)并得到了超过 200 GHz 的 3-dB 电光带宽。

1 绝缘体上钛酸钡中红外慢波高速电光调制器的光学设计

1.1 整体结构及 BTO 电光系数的理论分析

所设计的中红外 BTO 电光调制器 3D 结构示意图如图 1(a)所示，包括用来分光的多模干涉耦合器(MMI)、BTO 脊波导和慢波电极结构。在这项工作中，调制长度 L(定义为有源臂沿 y 轴的长度)固定为 5 mm 以方便后续器件性能的计算优化。

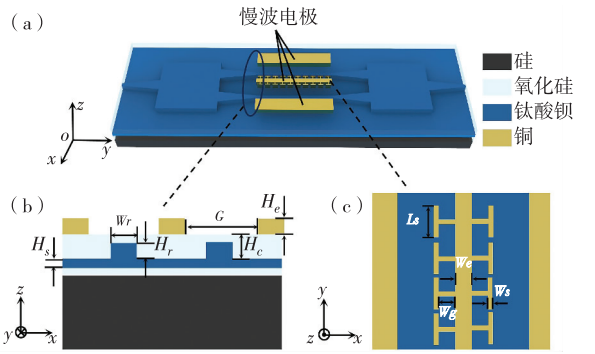


图 1 BTO 薄膜电光调制器的结构示意图。(a)基于 BTOOI 平台中红外电光调制器的三维视图；(b)调制区域的波导截面图；(c)慢波电极的俯视图

另外，调制器的调制区域采用推挽电极的设计，实现了双臂调制，从而使调制效率翻倍。该器件调制区域的横截面如图 1(b)所示，H_r 和 W_r 分别为 BTO 脊波导的厚度和宽度，G 为电极信号端和接地端之间的距离，H_c 为所沉积的上包层 SiO_2 的厚度，H_s 为 BTO 脊波导下层未刻蚀部分的厚度。所设计的调制器采用的是慢波电极，其参数如图 1(c)所示，其中 L_s 为一个电极单元的长度，W_e 和 H_e 分别为电极的宽度和厚度，W_s 和 W_g 分别为慢波电极枝节的宽度和延伸长度。

由于关于 BTO 在中红外波段的电光特性参数(如电光系数)的实验数据未有详细报道，为了进一步探究在室温下 BTO 于中红外波段的电光系数，使用 Sellmeier 色散公式来模拟中红外波段下 BTO 晶体各部分的电光系数。Sellmeier 方程在数学上表示如下：

$$r(\lambda)=\sqrt{1+\sum_{i=1}^{N}\frac{\lambda^2\cdot A_i}{\lambda^2+B_i}} \tag{1}$$

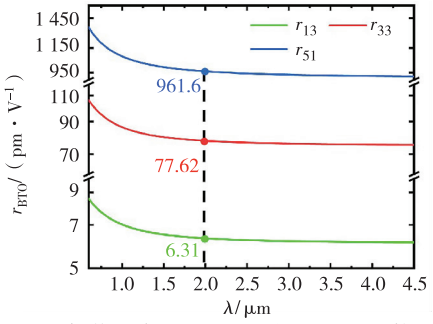
式中，$r(\lambda)$为 BTO 晶体各部分的电光系数的波长色散曲线，λ 为波长，N 为拟合参数的数量，A_i，B_i 为拟合系数。基于参考文献[16]中近红外的数据，使用式(1)的方法将 BTO 的理论电光系数随波长

的变化扩展到中红外光谱范围，如图 2(a)所示，BTO 的电光系数在可见光和近红外范围内急剧下降，并在 $\lambda>2$ μm 时趋于平缓。当 $\lambda=2$ μm 时，BTO 的电光系数 r_{13}，r_{33} 和 r_{51} 分别为 6.31，77.62 和 961.6 pm/V。根据偏振势模型[17]，具有氧八面体结构的 BTO 的折射率与电光系数一样也跟波长相关，同理通过式(1)和 BTO 近红外折射率[18]，提取了其在 2 μm 波长处的寻常折射率 n_o 和非寻常折射率 n_e 分别为 2.287 8 和 2.261 9。

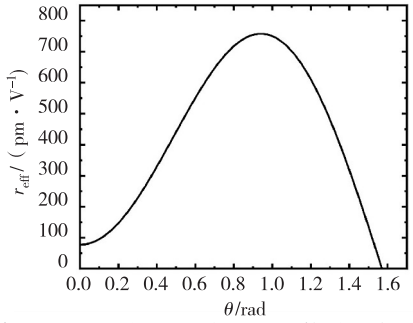
对于在 a 轴 BTO 薄膜以横电场(TE)模式传输的光，当施加水平静电场时，它作用在器件的有效电光系数 r_{eff} 与入射光偏振方向和其极化方向的夹角有关，可以表示为[19]：

$$r_{eff}=r_{33}\cos^3\theta+(r_{13}+2r_{51})\sin^2\theta\cos\theta \quad (2)$$

很显然 r_{eff} 为 r_{13}，r_{33} 和 r_{51} 的线性组合，它的变化趋势如图 2(b)所示。因此，通过在 x-y 平面中将波导旋转一定角度 θ，可以增强 BTO 的有效电光系数，这是提高 BTO 电光调制器调制效率的有效途径。通过计算得到 54°是 TE 传输模式下的最佳旋转角度，其对应的 $r_{eff}=758.07$ pm/V，这也将作为后续仿真计算调制效率的参考值。



(a) 色散拟合后的 BTO 薄膜电光系数



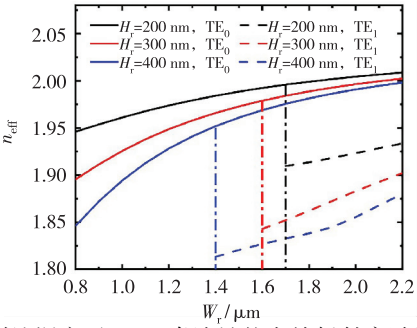
(b) a 轴取向 BTO 薄膜有效电光系数随入射光偏振方向和 BTO 极化方向夹角 θ 的变化

图 2　BTO 薄膜电光系数的理论分析

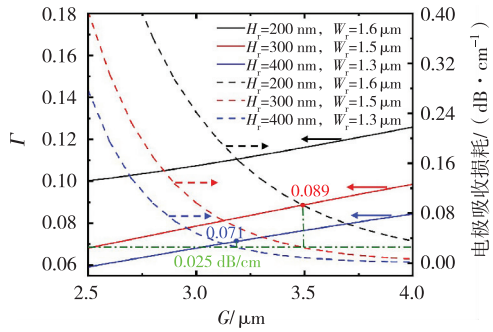
1.2　调制器的脊波导光学设计

使用有限元差分(FDE)仿真软件 Ansys Lumerical 对 BTO 波导进行了设计。相比于普通的平板波导，脊波导的主要优势是可以提供更好的模式约束，降低光的传输损耗。

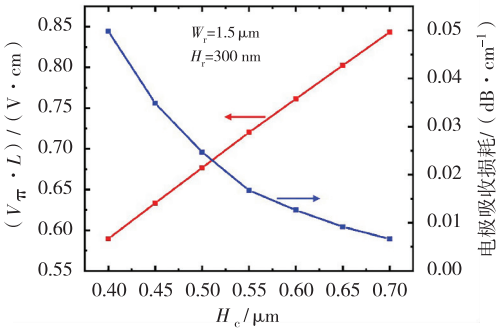
当 2 μm 波长的光在 600 nm 厚的 a 轴取向 BTO 波导中传播时，脊波导不同的刻蚀深度(200，300，400 nm)对应的有效折射率和传输模式如图 3(a)所示。可以看出，当上包层厚度不变($H_c=0.5$ μm)时，刻蚀深度增加，波导整体的有效折射率相应降低，并且随着脊波导宽度的增加和刻蚀深度的增加，出现了更高阶的传输模式，其中 TE_0(实线)为基模，TE_1(虚线)为高次一阶模。为了实现低损耗的传输，须进行单模条件的讨论：当刻蚀深度为 200，300，400 nm(即脊高 H_r 为 200，300，400 nm)



(a) 不同刻蚀深度下 BTO 脊波导的有效折射率随波导宽度的变化



(b) 不同刻蚀深度下，在最佳单模传输模式时，电光重叠系数 Γ 和电极吸收损耗随 G 的变化



(c) 脊高 H_r 为 300 nm 时，调制效率 $V_\pi\cdot L$ 和电极吸收损耗随 H_c 的变化

图 3　电光调制器的光波导仿真计算

时，对应单模条件下的脊波导宽度 W_r 分别要低于 1.7，1.6，1.4 μm。为了保证最低的传输损耗，最终选择 1.6，1.5 和 1.3 μm 作为要讨论的不同刻蚀深度下脊波导的宽度。

电光重叠系数 Γ 是评估电光调制器调制效率的关键参数，它反映了光场和静电场之间的相互作用程度。在电极间距 G 一致的情况下，较大的 Γ 可提高电光调制效率。对于该脊波导来说，其 Γ 的数学表达式可以公式化为：

$$\Gamma=\frac{G}{V}\frac{\iint_{\mathrm{BTO}}E_e(x,z)\cdot|E_o(x,z)|^2\mathrm{d}x\mathrm{d}z}{\iint_{\mathrm{O}}|E_o(x,z)|^2\mathrm{d}x\mathrm{d}z} \tag{3}$$

式中，V 为电极两端施加的电压值，分母的积分区域包含整个光场，分子的积分区域仅包含 BTO 脊波导。其中 $E_o(x,y)$ 为光模场分布，$E_e(x,y)$ 为电场分布。在优化 Γ 的同时，也需要考虑金属电极的吸收损耗，考虑到工艺的兼容性，这里选用铜(Cu)电极作为仿真计算的电极材料。图 3(b)显示了三种刻蚀深度下的 BTO 单模脊波导的电光重叠系数(实线)和金属的吸收损耗(虚线)随 G 的变化。在固定上包层厚度 $H_c=500$ nm 的情况下，可以观察到随着 G 的增长，电光重叠系数 Γ 增大，金属的吸收损耗随之减小。整体来说，当刻蚀深度为 200 nm 时，其 Γ 值相比于其他两种刻蚀深度是最大的，但是在优化过程中，当电极产生的吸收损耗低于 0.025 dB/cm 时对器件的影响很小，是可以忽略不计的。而在 2～4 μm 的 G 下，刻蚀深度为 200 nm 时的整体吸收损耗均大于 0.025 dB/cm，不能作为最佳的脊高选择。当要求金属吸收损耗小于 0.025 dB/cm(见绿色虚线)时，对于 $H_r=300$ nm 和 $H_r=400$ nm 的情况，G 应不小于 3.5 μm 和 3.2 μm，此时所对应的 Γ 值分别为 0.089 和 0.071，所以最终确定刻蚀 300 nm 为优化后的脊波导高度。

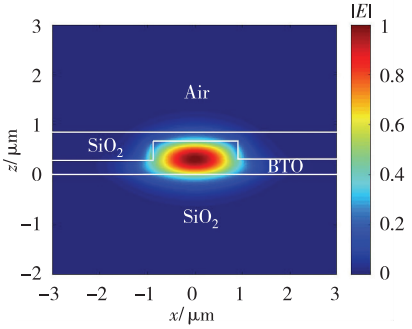
对于电光调制器而言，其调制效率可以通过 $V_\pi\cdot L$ 来衡量。由于所设计的调制器是基于 a 轴 BTO 薄膜平台且采用推挽式电极来调制双臂，其 $V_\pi\cdot L$ 可表示为[19]：

$$V_\pi\cdot L=\frac{\lambda G}{2n_{\mathrm{eff}}^3 r_{\mathrm{eff}}\Gamma} \tag{4}$$

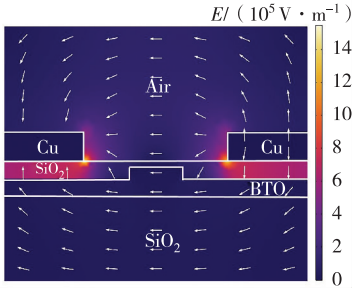
式中，L 为电极所调制区域的长度，n_{eff} 为波导的有效折射率，r_{eff} 为 BTO 薄膜晶体的有效电光系数。

图 3(c)中讨论了电光调制器的调制效率(红色实线)和电极吸收损耗(蓝色实线)随上包层厚度 H_c 的变化，就所设计的电光调制器而言，在波导上方沉积 SiO_2 包层是收益颇多的。一是保护器件表面免受磨损，二是减少光波导表面的散射和吸收，而最重要的则是方便实现电极的速度匹配，进而提升器件带宽。图 3(c)中可以看出，当 H_c 逐渐增加时，该调制器的 $V_\pi\cdot L$ 随之升高，电极的吸收损耗相应降低。由于吸收损耗须不大于 0.025 dB/cm，对应于 H_c 应当不大于 0.5 μm，此时最低的 $V_\pi\cdot L$ 为 0.677 V·cm，即 $H_c=0.5$ μm 时获得最大的调制效率。需要注意的是，如果可以接受更高的损耗(例如 0.05 dB/cm)，则可以通过缩小 G 来进一步降低 $V_\pi\cdot L$，从而得到更高的调制效率。

经过上述优化后的波导参数为：$H_c=0.5$ μm，$H_r=300$ nm，$H_s=300$ nm，$W_r=1.5$ μm。图 4(a)为所设计波导的归一化光模场分布图。可以看出经过优化后，在 TE_0 模式传输下，单模光斑大部分都集中在脊波导中，从而实现了光的低损耗稳定传输。图 4(b)显示了 1 V 直流电压下的平面内电场分布，可以看出光场和电场存在重叠且相互作用。



(a) 在 2 μm 波长下，优化后的 BTO 脊波导的归一化光模场分布



(b) 施加 1 V 电压后的电场分布示意图

图 4 调制器光场、电场分布示意图

2 调制器工艺制造流程

对于所设计的器件，一种可行的工艺制造流程如图 5 所示。首先用 He^+ 离子和 H^+ 离子[20]注入 a 轴取向的 BTO 衬底，形成一定的注入深度的离子

注入层。同时准备一个 Si 上 SiO_2 晶圆，清洗后将其与离子注入后的 BTO 衬底进行直接键合。随后，将 BTO 薄膜与原衬底剥离并进行退火处理以减少离子注入对晶体的损伤，最后抛光得到 BTOOI。在上述工艺的基础上，对表面进行光刻显影得到器件的图案（光刻胶作为掩膜），通过 Ar^+ 离子对表面进行干法刻蚀形成 BTO 脊波导。随后利用化学气相沉积的方法在表面沉积一层的 SiO_2 上包层，对其表面抛光后继续利用光刻显影得到电极的图案。最后使用金属剥离工艺来形成 Cu 的慢波电极，从而得到最终的电光调制器器件。

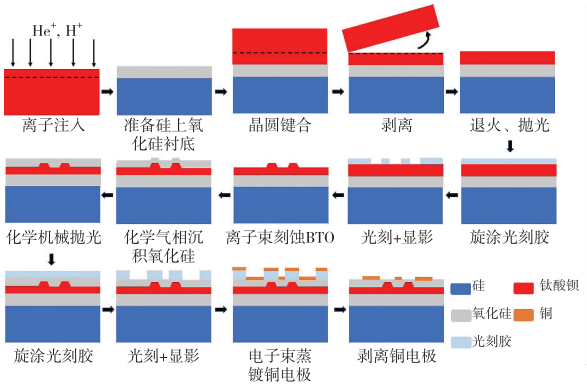


图 5　电光调制器工艺制造流程图

3　绝缘体上钛酸钡中红外慢波高速电光调制器的慢波电极设计

为了将所设计的器件应用于光通信中，需要从电极的设计入手来优化器件的高频性能，尽量实现高速度、低射频损耗的信号高质量传输。本设计采用 Ansys HFSS 中的有限元方法设计了一种慢波电极。材料的介电常数和电导率是计算过程中的关键参数，其中 Si 和 SiO_2 的相对介电常数（ε）分别为 11.9 和 4。对于 BTO 薄膜来说，其 ε 与所施加的电场强相关，根据文献[21]报道，这里提取的室温下的 ε 值为 860 作为近似（在调制长度为 5 mm 的情况下，施加在 BTO 薄膜上的电场大小约为 5.1×10^4 V/m）。同时，Cu 电极的导电率为 5.8×10^7 S/m[22]。

调制器的高频性能可以通过其电光带宽来评估，下式即为调制器电光响应：

$$m(\omega)=\left(\frac{2Z_{in}}{Z_{in}+Z_L}\cdot\frac{(Z_L+Z_0)\cdot F_+ +(Z_L-Z_0)\cdot F_-}{(Z_L+Z_0)\cdot e^{\gamma_m L}+(Z_L-Z_0)\cdot e^{-\gamma_m L}}\right) \tag{5}$$

式中，ω 为射频信号的角频率，Z_{in} 为在电极入口处看到的传输线的输入阻抗，γ_m 为微波传播常数，F_+（F_-）代表正向（反向）传播的微波。这些参数的公式表达如下[23]：

$$Z_{in}=Z_0\cdot\frac{Z_L+Z_0\cdot\tanh(\gamma_m L)}{Z_0+Z_L\cdot\tanh(\gamma_m L)} \tag{6}$$

$$\gamma_m=\alpha_m+j\frac{\omega}{c}N_m \tag{7}$$

$$F_\pm=\frac{1-e^{\pm\gamma_m L-j\frac{\omega}{c}N_g L}}{\pm\gamma_m L-j\frac{\omega}{c}N_g L} \tag{8}$$

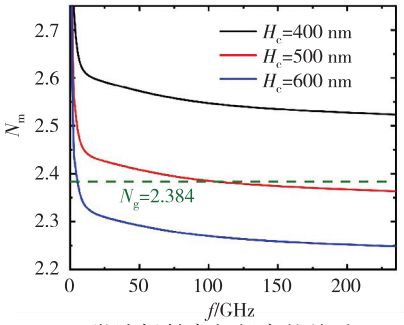
$$EOS_{21}=20\log_{10}[m(\omega)] \tag{9}$$

式中，α_m 为调制器的射频衰减系数，N_m 为调制器的微波折射率，N_g 为光波导群折射率，式（9）为最终的电光带宽。在设计时，考虑到测试的各测试设备电源和端口负载的阻抗皆为 50 Ω，所以设定 $Z_L=50$ Ω。

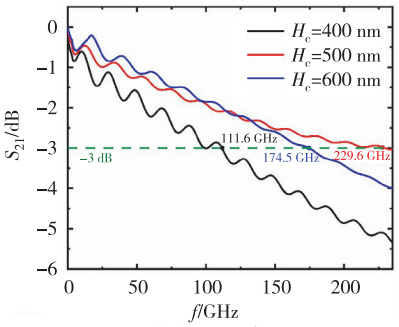
3.1　光波导群折射率和微波折射率的匹配

光波信号与微波信号的传播速度匹配是实现电光调制器具有大带宽的重要条件。由于 BTO 的 ε 很大，会抑制射频信号的传输速度，为了实现速度匹配，所设计的调制器在光波导与电极之间填充了低 ε 的 SiO_2 包层，有效提升了射频信号在电极中传播的速度（即降低了 N_m）。

优化过程中，对 SiO_2 包层的厚度 H_c 进行了参数讨论，如图 6(a)所示，H_c 从 400 nm 增加到 600 nm 时，频率为 100 GHz 处的 N_m 从 2.54 降到 2.26，由此可得，H_c 越大，N_m 越小。所设计的 BTO 脊波导的 $N_g=2.384$，为了实现速度匹配，即要让 N_m 与 N_g 的差值尽可能小，当 $H_c=500$ nm 时（红色实线）可见两折射率相当，实现了较好的速度匹配。在器件的阻抗与 Z_L 相匹配的前提下，由式（9）计算出了不同 H_c 对应的电光带宽（S_{21}），如图 6(b)所示。当速度匹配良好（$H_c=500$ nm）时，计算得到的电光带宽为 229.6 GHz，然而当速度不匹配时，电光带宽大

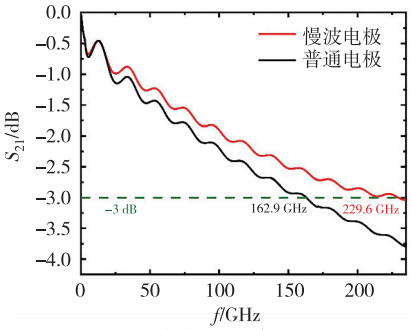


(a) 微波折射率与频率的关系



(b) 电光带宽与频率的关系

图 6 不同上包层厚度下的调制器高频性能



(b) 电光带宽随频率的变化

图 7 不同电极的高频性能对比

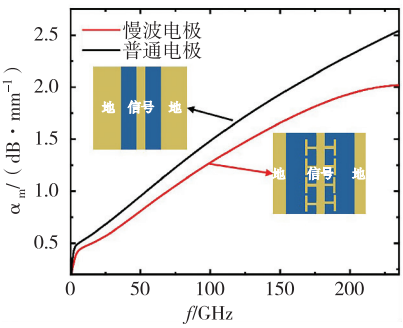
幅度降低，例如当 $H_c=400$ nm 和 $H_c=600$ nm 时对应的电光带宽分别 111.6 和 174.5 GHz。由此确定 $H_c=500$ nm 为最终优化后的上包层厚度设计，为了实现阻抗匹配，优化后的其余电极参数如下：$L_s=6.5\ \mu m$，$W_e=2\ \mu m$，$W_g=0.5\ \mu m$，$W_s=1\ \mu m$，$H_e=3\ \mu m$。

3.2 慢波电极与普通电极的对比

相比于普通的行波电极，慢波电极对提升器件的带宽有显著的作用[24]。为从理论上探究慢波电极的优势，对普通行波电极进行了阻抗匹配和速度匹配的优化，得到优化后的电极宽度为 1 μm，厚度为 1.9 μm。如图 7(a)所示，插图中显示了两种不同电极的结构俯视图，慢波电极是通过引入 T 型的周期性结构来实现的。就射频衰减系数 α_m 而言，慢波电极的损耗得到了降低，该现象可以由下式解释[25]：

$$\alpha_m=\frac{R}{Z_L W}K_r K_i \tag{10}$$

式中，R 为导体表面电阻率，K_r 与表面粗糙度相关，K_i 与趋肤深度相关，W 为电极信号端的宽度。当电极材料确定后，优化后的电极厚度远大于趋肤深度时，R 和 K_r 不变，K_i 变化很小，此时慢波电极的宽度大于优化后的普通行波电极的宽度，从而得到了更小的 α_m。图 7(b)展示了两种电极优化后对应的电光带宽，衰减系数较小的慢波电极实现了 229.6 GHz 的 3-dB 带宽，而普通的行波电极 3-dB 带宽为 162.9 GHz，可以看到使用慢波电极的调制器相比于普通电极带宽提升了 40.9%。



(a) 调制器的射频衰减系数随频率的变化，其中插图为普通行波电极和慢波电极的俯视图

4 结论

本文在 a 轴取向 BTOOI 平台上设计了中红外宽带慢波电光调制器，并从理论上证明了其可实现性。当在 $\lambda=2\ \mu m$，$L=5$ mm 时，对该器件进行了光学部分的波导设计和电学部分的慢波电极优化，优化后的调制器在低损耗 TE_0 模式传输过程中表现出 $V_\pi\cdot L=0.677$ V·cm 的调制效率，并且通过设计慢波电极获得了 229.6 GHz 的 3-dB 电光带宽。总而言之，所设计的中红外电光调制器具有低损耗、高调制效率、大带宽的优势，在中红外高速光纤通信等领域具有广泛的应用前景。

参考文献：

[1] Cao W, Nedeljkovic M, Liu S H, et al. 25 Gbit/S silicon based modulators for the 2 μm wavelength band[C]// 2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2020: 1-3.

[2] Cao W, Hagan D, Thomson D J, et al. High-speed silicon modulators for the 2 μm wavelength band[J]. Optica, 2018, 5(9): 1055-1062.

[3] Hagan D E, Ye M, Wang P, et al. High-speed performance of a TDFA-band micro-ring resonator modulator and detector [J]. Opt. Express, 2020, 28(11): 16845-16856.

[4] Yoshimura T. Design and evaluation of organic nonlinear optical materials with a large Pockels effect[J]. Molecular Crystals and Liquid Crystals, 1990, 182(1): 43-50.

[5] Theofanous N G, Aillerie M, Fontana M D, et al. A frequency doubling electro-optic modulation system for Pockels effect measurements: Application in $LiNbO_3$[J]. Rev. Sci.

Instrum.，1997，68(5)：2138-2143.

[6] Takizawa K，Haraguchi K，Jin L，et al. Analysis of the quadratic retardation induced by the Pockels，Kerr，and inverse piezoelectric effects in an x-cut y-propagation $LiNbO_3$ [J]. Jpn. J. Appl. Phys.，2014，53(5)：052601.

[7] Abel S，Eltes F，Ortmann J E，et al. Large Pockels effect in micro- and nanostructured barium titanate integrated on silicon [J]. Nature Mater.，2018，18(1)：42-47.

[8] Dong Z，Raju A，Posadas A B，et al. Monolithic barium titanate modulators on silicon-on-insulator substrates[J]. ACS Photonics，2023，10(12)：4367-4376.

[9] Zgonik M，Bernasconi P，Duelli M，et al. Dielectric，elastic，piezoelectric，electro-optic，and elasto-optic tensors of $BaTiO_3$ crystals[J]. Phys. Rev. B，1994，50(9)：5941.

[10] Weis R S，Gaylord T K. Lithium niobate：Summary of physical properties and crystal structure[J]. Appl. Phys. A，1985，37：191-203.

[11] Jin T，Lin P T. Efficient mid-infrared electro-optical waveguide modulators using ferroelectric barium titanate[J]. IEEE J. Sel. Top. in Quantum Electron.，2020，26(5)：1-7.

[12] Last J T. Infrared absorption studies on barium titanate and related crystals[D]. Cambridge：Massachusetts Institute of Technology，1956：4-80.

[13] 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.

[14] Jaeger N A F，Lee Z K F. Slow-wave electrode for use in compound semiconductor electrooptic modulators[J]. IEEE J. Quantum Electron.，1992，28(8)：1778-1784.

[15] Ding R，Liu Y，Ma Y，et al. High-speed silicon modulator with slow-wave electrodes and fully independent differential drive[J]. J. Lightwave Technol.，2014，32(12)：2240-2247.

[16] Bernasconi P，Zgonik M，Günter P. Temperature dependence and dispersion of electro-optic and elasto-optic effect in perovskite crystals[J]. J. Appl. Phys.，1995，78(4)：2651-2658.

[17] Wemple S H，Didomenico J M. Electrooptical and nonlinear optical properties of crystals[J]. Appl. Solid State Sci.，1972，(3)：263-383.

[18] Nelson D F. Piezooptic and Electrooptic Constants[M]. Heidelberg：Springer，1996：164-320.

[19] Castera P，Tulli D，Gutierrez A M，et al. Influence of $BaTiO_3$ ferroelectric orientation for electro-optic modulation on silicon[J]. Opt. Express，2015，23(12)：15332-15342.

[20] Park Y B，Ruglovsky J L，Atwater H A. Microstructure and properties of single crystal $BaTiO_3$ thin films synthesized by ion implantation-induced layer transfer[J]. Appl. Phys. Lett.，2004，85(3)：455-457.

[21] Eltes F，Villarreal G E，Caimi D，et al. An integrated optical modulator operating at cryogenic temperatures[J]. Nature Mater.，2020，19(11)：1164-1168.

[22] Subramaniam C，Yamada T，Kobashi K，et al. One hundred fold increase in current carrying capacity in a carbon nanotube-copper composite[J]. Nature Commun.，2013，4：2202.

[23] Zhu D，Shao L，Yu M，et al. Integrated photonics on thin-film lithium niobate[J]. Adv. Opt. Photonics，2021，13(2)：242-352.

[24] Chen G，Chen K，Gan R，et al. High performance thin-film lithium niobate modulator on a silicon substrate using periodic capacitively loaded traveling-wave electrode [J]. APL Photonics，2022，7(2)：026103.

[25] Hammerstad E，Jensen O. Accurate models for microstrip computer-aided design[C]// 1980 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest，1980：407-409.

作者简介：

黄　通(1999—)，男，硕士研究生，主要从事电光调制器等光学器件方面的研究；

董　渊(1990—)，男，博士，教授，研究方向为应用于光通信、光传感、光计算的集成光电子器件设计与制造工艺。