

# 低驱动、高调制 X-Cut 铌酸锂电光调制器的优化设计

梁凤超<sup>1,2</sup>, 李敏<sup>2</sup>, 吴东岷<sup>2</sup>

<sup>1</sup>山东理工大学物理与光电工程学院, 山东 淄博 255000

<sup>2</sup>中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所国际实验室, 江苏 苏州 215123

**摘要** 利用定向耦合器代替 Y 形分支结构, 在 X-cut 铌酸锂(LN)基底上设计了一款具有低驱动电压、高调制参数的马赫-曾德尔(M-Z)型电光调制器。采用有限元法对定向耦合器的原理及影响因素进行了详细分析和精确计算, 并对电光调制器的关键结构参数进行了优化。结果表明: 光波沿着定向耦合器传播时, 能量在两波导中来回交替, 呈正弦和余弦函数分布, 并且耦合长度随着其间距的增大而快速增大。在调制臂长为 3 cm, 光波长为 1550 nm 的情况下, 单臂调制所获得的半波电压  $V_\pi$  为 2.22 V, 调制参数  $S_{21}$  为 -51.13 dB。通过对调制臂进行截面分析, 给出了电场  $E_x$  分量、电位移矢量  $D_x$  分量和光模分布, 并求得重叠积分因子为 0.486。同时还表明脊形波导结构有利于提高电光作用效率。当脊高为 1  $\mu\text{m}$  时, 重叠积分因子为 0.714, 相较于平板波导, 其电光重叠积分因子提高了 46.91%。

**关键词** 集成光学; 有限元法; 光波导; 定向耦合器; 电光调制器

中图分类号 TN256

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0713001

## Optimized Design of Low Driving and High Modulation X-Cut LiNbO<sub>3</sub> Electro-Optical Modulator

Liang Fengchao<sup>1,2</sup>, Li Min<sup>2</sup>, Wu Dongmin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Physics and Optoelectronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255000, China;

<sup>2</sup> International Laboratory, Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215123, China

**Abstract** A Mach-Zehnder (M-Z) electro-optical modulator with low driving voltage and high modulation parameters is designed on the X-cut Lithium Niobate (LN) substrate by using a directional coupler instead of traditional Y-shaped branch structure. The working principle and major factors of directional coupler are analyzed and calculated precisely by the finite element method. The major structural parameters of the electro-optic modulator are optimized. The results show that when the light wave propagates along the directional coupler, the energy is alternated back and forth in the two waveguides with a distribution of sine and cosine functions. At the same position, the coupling length increases rapidly with the increase of the gap. When the electro-optical modulation arm length is 3 cm and the optical wavelength is 1550 nm, the half-wave voltage  $V_\pi$  obtained by the single-arm modulation is 2.22 V and the modulation parameter  $S_{21}$  is -51.13 dB. With the section analysis of modulation arms, the electric field  $E_x$  component, the electric displacement vector  $D_x$  component and the optical mode distribution are given, and the integral overlap factor is 0.486. It also shows that the ridge waveguide structure can effectively improve the electro-optic efficiency. When the ridge height is 1  $\mu\text{m}$ , the overlap integral factor is 0.714, and the electro-optical overlap integral factor of it is 46.91% higher than the slab waveguide.

**Key words** integrated optics; finite element method; optical waveguide; directional coupler; electro-optic modulator

收稿日期: 2018-01-11; 收到修改稿日期: 2018-02-01

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61505241)

作者简介: 梁凤超(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事光波导与光电器件方面的研究。E-mail: fcliang2016@sinano.ac.cn

导师简介: 李敏(1981-), 女, 博士, 副研究员, 主要从事微纳光学元件及微光学系统集成等方面的研究。

E-mail: mli2011@sinano.ac.cn(通信联系人)

## 1 引 言

随着光纤通信技术的发展,光电器件不断朝着宽频带、低成本、小型化集成器件的方向发展。电光调制器不但在现代光纤通信领域得到了广泛应用与发展,而且还在高速偏振荧光显微系统<sup>[1]</sup>等需要高速数据获取的领域得到了进一步发展。相对于其他类型调制器而言,铌酸锂(LN)电光调制器具有频带宽、稳定性好、信噪比高、传输损耗小、工艺成熟等优点,因此成为当前电光调制器市场的主流产品。

现在振幅型铌酸锂电光调制器大多是马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪结构。利用M-Z干涉仪可以更好地对电光作用区域进行优化设计,例如采用行波电极结构<sup>[2-5]</sup>,脊形波导结构<sup>[6-10]</sup>,以及合理的优化电极间距与形状可以有效地提高电光作用效率,降低驱动电压,提供较好的阻抗匹配等,因此M-Z型电光调制器被广泛应用。一般情况下,与M-Z干涉仪相连接的是两个Y形分束器。但是Y形分支结构在加工过程中会导致两个分支中的光强分布不均,同时Y分支倾角过大会增大散射损耗,过小会使得尖角处的横向断裂加剧,从而无法获得较高的消光比,而对定向耦合器进行合理的优化和添加偏置电压,可以很好地解决这一问题。这种由定向耦合器与M-Z干涉仪组成的调制器,也叫做平衡桥式M-Z电光调制器<sup>[11-13]</sup>。虽然电光调制器已被广泛应用,但是在实际制造过程中仍存在一些不足,比如:分束器采用直线波导连接而不是曲线波导连接;还有定向耦合器的数学模型比较复杂,仿真分析不够精确;最重要的是实际制造的电光调制器消光比较低,一般只有20 dB,一方面是工艺误差造成的,另一方面是因为优化设计精度需要进一步提高。

利用有限元法<sup>[14-15]</sup>对入射光波进行边界模式分析和频域分析,进而对电光调制器关键结构参数进行优化,得到低驱动、高调制电光调制器的最佳结构参数,其中 $S_{21}$ 最小值为-51.13 dB,单驱动半波电压为2.22 V。同时,还对电光调制器进行截面分析,模拟出电场 $E_x$ 分量、电位移矢量 $D_x$ 分量和光模的分布,从而求出电光模场的积分重叠因子<sup>[16-17]</sup> $\Gamma$ 的大小,并且证明了脊形波导有利于提高电光重叠积分因子,从而提高电光作用效率。

## 2 波导耦合原理

光波导耦合是指能量在两个波导间进行转换或

者在同一波导中由一种模式的功率完全转移到另一种模式中。当两个介质光波导靠的很近的时候,消逝波场的存在会引起两个光波导间的能量交换,定向耦合器就是根据这一现象制作的。下面以两条平行相邻,各种参数相同,而且传播能量无损耗,传播方向相同的两束光波为例,进行推导。

假设光波沿着 $x$ 轴传播,两个波导的有效折射率不随 $x$ 轴变化,振幅 $A$ 为 $x$ 的函数。设波导1中的光波振幅为 $A_1$ ,传播常数为 $\beta_1$ ,波导2中的光波振幅为 $A_2$ ,传播常数为 $\beta_2$ ,这两束光波可以表示为:

$$\begin{cases} a_1 = A_1 \exp(-j\beta_1 x) \\ a_2 = A_2 \exp(-j\beta_2 x) \end{cases}, \quad (1)$$

对 $x$ 求导得:

$$\begin{cases} \frac{da_1}{dx} = -i\beta_1 a_1 + \exp(-i\beta_1 x) \frac{dA_1}{dx} \\ \frac{da_2}{dx} = -i\beta_2 a_2 + \exp(-i\beta_2 x) \frac{dA_2}{dx} \end{cases}, \quad (2)$$

式中第一项为不考虑波导之间的扰动,第二项为考虑波导之间扰动。

假设两个波导间的相互耦合系数分别为 $k_1$ 和 $k_2$ ,则(2)式可变为:

$$\begin{cases} \frac{da_1}{dx} = -i\beta_1 a_1 + ik_1 a_2 \\ \frac{da_2}{dx} = -i\beta_2 a_2 + ik_2 a_1 \end{cases}, \quad (3)$$

联立(1)~(3)式,得:

$$\begin{cases} \frac{dA_1}{dx} = ik_1 A_2 \exp[i(\beta_1 - \beta_2)x] \\ \frac{dA_2}{dx} = ik_2 A_1 \exp[-i(\beta_1 - \beta_2)x] \end{cases}. \quad (4)$$

当两束光波同向传播时,有 $k_1 = k_2^*$ 。进一步,如果两根波导结构及介质参数都一样,则 $k_1, k_2$ 是相等的实常数。

根据能量守恒定理,在无损耗波导中,两波导平均传输功率之和不随距离变化,即在任意一点 $x$ 处,两波导内的能量之和恒为常数:

$$\frac{d}{dx}(|A_1|^2 + |A_2|^2) = 0, \quad (5)$$

设初始条件是波导2端口输入,波导1无输入,即 $A_1(0) = 0$ ,并且令:

$$2\delta = \beta_2 - \beta_1, \quad (6)$$

利用以上条件,得到耦合波方程的解:

$$\begin{cases} A_1(x) = A_2(0) \frac{k}{(k^2 + \delta^2)^{1/2}} \sin[(k^2 + \delta^2)^{1/2} x] \exp(-i\delta x) \\ A_2(x) = A_2(0) \left\{ \cos[(k^2 + \delta^2)^{1/2} x] - i \frac{\delta}{(k^2 + \delta^2)^{1/2}} \sin[(k^2 + \delta^2)^{1/2} x] \right\} \exp(-i\delta x) \end{cases}, \quad (7)$$

当光场匹配时,即  $\delta = \beta_2 - \beta_1 = 0$  时:

$$\begin{cases} A_1(x) = A_2(0) \sin(kx) \\ A_2(x) = A_2(0) \cos(kx) \end{cases}, \quad (8)$$

光波导中能量总功率:

$$P = |A_1(x)|^2 + |A_2(x)|^2 = |A_2(0)|^2. \quad (9)$$

因此,两条平行相邻,各种参数相同,而且无损耗的耦合波导中,若相位匹配,则光波能量随着两波导的长度来回交换,并且在相同传播位置  $x$  处,两波导传输光强变化相位相差  $\pi/2$ 。其最小耦合长度为:

$$L = \frac{\pi}{2k}. \quad (10)$$

图 1 为定向耦合器光强分布的仿真结果,从中可以看出光波在定向耦合器中传播时,其能量在两波导间来回交替,呈三角函数形式分布。因此通过合理控制定向耦合器的长度,就可以间接地影响两波导间的光强分布,从而使输出端的光波能量按任意比例分配。

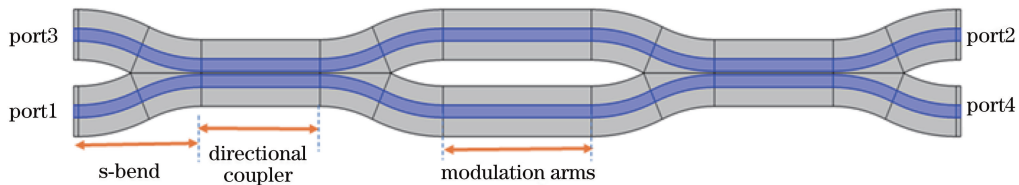


图 2 电光调制器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the electro-optical modulator

该调制器是由 s 形弯曲,定向耦合器以及 M-Z 干涉仪组成。蓝色区域部分是由高温钛扩散或退火质子交换工艺制作的光波导,称为芯层,芯层周围灰色区域为包层。s 形弯曲起到改变光路的作用,同时也是散射损耗最大的结构;定向耦合器与 Y 分支一样,都起到分光与消光的作用。当光波从端口 1 入射,经由 s 形弯曲,到达定向耦合器;然后被平均分成两束光传到 M-Z 干涉仪,经过电光调制,最后从端口 2 输出。Y 分支合束器的消光原理是光的干涉作用,光波由相长到相消的过程;而定向耦合器的消光原理是耦合作用,能量完全由端口 2 输出逐渐转移到完全由端口 4 输出的过程。因此,该调制器仿真的重点环节就是:s 形弯曲、定向耦合器及调制臂。

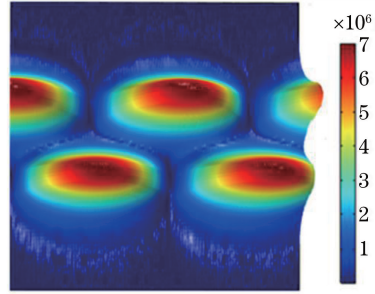


图 1 定向耦合器光强分布的仿真结果

Fig. 1 Simulation result of light intensity distribution in directional coupler

### 3 器件结构与原理

利用定向耦合器设计的 M-Z 型电光调制器,拥有 4 个端口,包括两个输入端和两个输出端。当它的两个输入端和两个输出端同时接入光纤时,可以当作光开关;而只接入一个输入端(端口 1)和一个输出端(端口 2)时,可以当作振幅型电光调制器,其结构如图 2 所示。

在参数优化过程中,计算结构参数为:衬底是 X-cut 铌酸锂,波导是由高温钛扩散<sup>[18-19]</sup>形成的,芯层与包层折射率分别为 2.144 与 2.138,光纤芯径与波导芯径都是  $10.5 \mu\text{m}$ ,输入光波长 1550 nm,光功率为单位功率 1 W,电极镀金,电光调制臂长 3 cm。

### 4 数值仿真结果与讨论

#### 4.1 s 形弯曲

s 形弯曲是由两个完全相同的同心圆环中心对称分布组成的,接口处相切。这种 s 形连接与直线波导连接相比,可以更好地降低散射损耗,类似结构还有正弦余弦连接。

通过对曲率半径  $r$  进行参数扫描,得到一组能量透射率随曲率半径  $r$  的变化折线图,如图 3(a)所

示。从图 3(a)中可以看出,随着半径  $r$  的不断增大,能量透射率也不断增加;当半径  $r$  增加到 18 mm 时,能量透射率基本超过 98%,且不再随着半径的增大而增加。图 3(b)显示的是光波在未经优化的 s 形弯曲中传播的效果图,从图中可以看出,由于半径过小,波导芯层与包层的折射率之差,无法对光波进行有效地约束,因此大部分光波以透射和散射的形式损耗掉,而输出端监测到的能量,其实是散射光;随着半径  $r$  不断增大,透射损耗和散射损耗不断减少,输出端的能量透射率不断增大;当半径  $r$  增大到一定程度( $>18$  mm)时,透射损耗和散射损耗都非常小,基本稳定不变,从而输出端能量透射率较大,如图 3(c)所示。

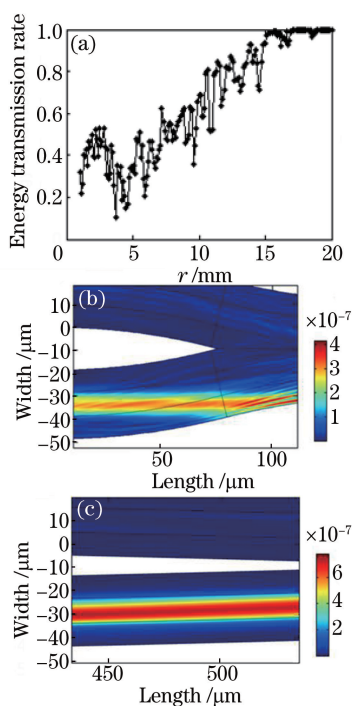


图 3 (a)能量透射率随曲率半径变化图;(b)半径未优化效果图;(c)半径优化后效果图

Fig. 3 (a) Diagram of energy transmissivity varies with radius; (b) effect map of non-optimized radius; (c) effect map after radius optimization

#### 4.2 定向耦合器

定向耦合器是由两条相互靠近的直线波导构成的。光沿着波导传播时,大部分能量都集中在波导芯层,包层处的电场随着与波导芯层的距离呈指数衰减。如果把两个波导相互靠近,那么它们的场模将会相互扰动,传播模式也将会发生改变,使得能量从一个波导转到另一个波导,两个波导中的光强按正弦和余弦函数分布,相差  $\pi/2$ 。通过控制两个波导的长度,可以决定两个波导中的光强分布。

通过对定向耦合器的长度进行参数扫描,并在 M-Z 干涉仪末端监测分配到两波导的光强,从而得到一组关于定向耦合器长度对光强分布影响的数据,如图 4(a)所示。图 4(a)是定向耦合器间距为  $1 \mu\text{m}$  时的扫描结果,从中可以看出,随着定向耦合器长度的变化,进入 M-Z 干涉仪上下两臂的能量,按照正弦和余弦函数分布,并且两条曲线的交点就是能量均分点,定向耦合器在此点的长度使得波导上下两臂能量均分,能量均分效果见图 4(c)。图 4(b)显示的是定向耦合器的间距对其所需要的最小耦合长度的影响,从中可以看出,最小耦合长度随着其间距的增大而快速增大,所以在实际制造过程中,必须考虑工艺误差对定向耦合器间距的影响。通过进一步做容差性分析,定向耦合器间距为  $3 \mu\text{m}$  时,误差设置为  $\pm 0.5 \mu\text{m}$ ,其调制参数  $S_{21}$  均小于  $-45$  dB,仍然具有较高的调制效果。因此,该设计的容差性能还是非常良好的。

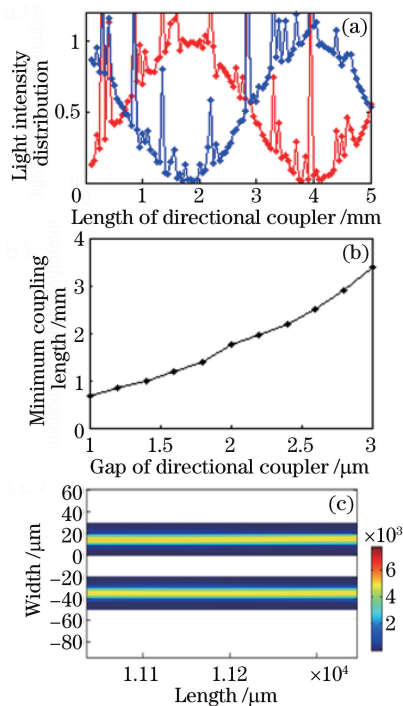


图 4 (a)波导上下两臂光强分布随定向耦合器长度变化;(b)最小耦合长度随其间距变化;(c)定向耦合器分光效果  
Fig. 4 (a) Light intensity distribution of the upper and lower arms of the waveguides varies with the length of directional coupler; (b) minimum coupling length varies with its gap; (c) light splitting effect of directional coupler

#### 4.3 调制臂

M-Z 干涉仪的作用主要是进行电光调制,通过施加的电信号,对光波进行调制,从而达到消光的目的。主要涉及电极的设计,提高光场与电场的重叠

积分因子。为此,需要对调制臂进行截面分析。如图 5(a)所示,蓝色部位代表空气,绿色部位代表铌酸锂,黄色部位代表镀金电极,红色部位代表钛扩散制作的波导,中间一层灰色区域代表二氧化硅缓冲层。因为增加电极厚度可以减小微波信号的有效折射率,从而实现更好地速度匹配。电极厚度设置为  $20\ \mu\text{m}$ ,间距  $10.5\ \mu\text{m}$ ,缓冲层  $1\ \mu\text{m}$ 。通过合理设置边界条件,对其进行边界模式分析和频域分析,得到图 5(b)、(c)、(d)三幅图。图 5(b)是在未施加电场时的光模分布图,从中可以看出光波能量集中分布在波导中,形成一个大的单模光斑,效果较好。图 5(c)、(d)两图是静电场  $E_x$  分量和电位移矢量  $D_x$  分量的分布图,通过观察可以发现,电极间距内的电场强度明显高于其他区域内的场强,并且离电极越远,场强越弱。因此,把波导做成脊形结构,确实可以增加波导区域内电场强度,从而提高电光作用效率。

已知波导区域内的电场  $E_x$  分布如图 5(c)所示和沿  $x$  轴方向偏振的光场  $E_{\text{op}}$  如图 5(b)所示,因此波导区域内 A 的电光重叠积分因子  $\Gamma$  为:

$$\Gamma = \frac{g}{V} \frac{\iint |E_{\text{op}}|^2 E_x dA}{\iint |E_{\text{op}}|^2 dA}, \quad (11)$$

式中电极间距  $g = 10.5\ \mu\text{m}$ ,电压  $V = 2\ \text{V}$ ,求得积分重叠因子  $\Gamma = 0.486$ 。为了验证脊形波导可以有效提高电光作用,分别设置脊高为  $0.5\ \mu\text{m}$  和  $1\ \mu\text{m}$ ,并求出重叠积分因子,如表 1 所示。由表 1 可见,脊形波导确实可以有效提高电光重叠积分因子的大小。

表 1 脊高对电光积分重叠因子的影响

Table 1 Effect of ridge height on the electro-optic overlap integral factor

Ridge height / $\mu\text{m}$	Electro-optic overlap integral factor	Increase rate
0	0.486	0
0.5	0.555	14.20%
1.0	0.714	46.91%

经过前面对 s 形弯曲半径和定向耦合器的优化,现在只需要施加电信号对光波进行调制,即可获得散射参数  $S_{21}$ 。在单臂调制情况下,获得调制参数随电压变化的曲线,如图 6 所示。从图 6 中可以看出,随着驱动电压的不断增大, $S_{21}$  参数先加速下降,当电压达到  $2.22\ \text{V}$  时, $S_{21}$  取最小值  $-51.13\ \text{dB}$ ;之后随着驱动电压的增大而减速上升,后者是前者的一个逆过程。这说明在未施加电压时,光波能量

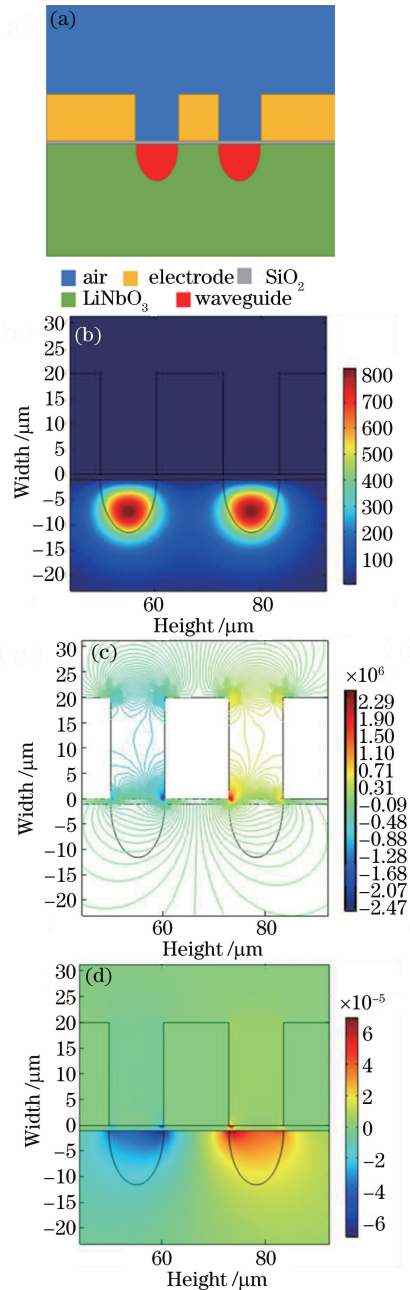


图 5 (a)截面示意图; (b)光模; (c)电场  $E_x$  分量; (d)电位移  $D_x$  分量

Fig. 5 (a) Diagram of cross-section; (b) optical modes; (c)  $E_x$  component of electric field; (d)  $D_x$  component of electric displacement

完全从端口 2 透射,相当于逻辑电路的 1;当电压不断增加,受到电光效应的作用,从端口 2 流出的能量不断耦合到端口 4 流出;当电压达到  $2.22\ \text{V}$  时,能量完全由端口 4 流出,此时的端口 2 相当于逻辑电路的 0;而后者是能量从端口 4 流出逐渐耦合到从端口 2 流出。因此,该电光调制器的半波电压  $V_\pi$  为  $2.22\ \text{V}$ , $S_{21}$  最小值为  $-51.13\ \text{dB}$ 。

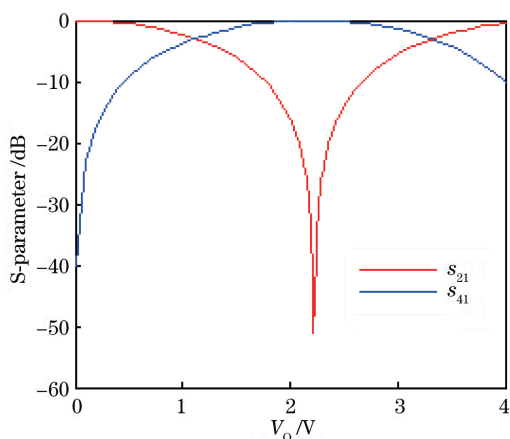


图 6 调制参数随电压的变化

Fig. 6 Modulation parameters varies with the voltage

## 5 结 论

利用定向耦合器代替 Y 分支 3 dB 分束器作为分光和消光的关键结构,设计了一款 M-Z 型电光调制器。通过有限元法,结合 COMSOL Multiphysics 软件对电光调制器建立物理模型,并对入射光波进行边界模式分析和频域分析,实现了对其关键结构的参数优化,最后在施加电场的情况下进行静电稳态分析,获得了一款拥有较高调制参数的电光调制器。当调制臂长为 3 cm,输入光波长 1550 nm 时,其  $S_{21}$  最小值为 -51.13 dB,且单臂调制半波电压为 2.22 V;并且通过容差性分析,误差为  $\pm 0.5 \mu\text{m}$  时,其  $S_{21}$  参数均小于 -45 dB,仍然具有很高的调制效果。完成了器件的理论分析,给出了器件的工作原理和参数优化结果,同时还对电光作用主要区域进行截面分析,模拟出电场和光场的分布情况,并求得电光重叠积分因子为 0.486;同时还在理论上验证了脊形波导可以更好地提高电光重叠积分因子,当脊高为  $1 \mu\text{m}$  时,重叠积分因子是 0.714,相较于平板波导,其电光重叠积分因子提高了 46.91%。在以后的工作中,将尝试器件的制作和性能测试,并与设计结果比较,以验证理论分析的准确性。利用定向耦合器设计的 M-Z 型电光调制器具有较高的调制参数,对于制造低驱动、高消光比的电光调制器具有较大的应用潜力。

## 参 考 文 献

[1] Wang X, Zhao Y, Yang F, *et al.* Fluorescence microscopy system with high speed polarization based on electro optical modulator[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(11): 1118001.  
王潇, 赵远, 杨凤, 等. 基于电光调制器的高速偏振

荧光显微系统[J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1118001.

[2] Bao Z W, Zhou H J, Li J S. Finite element method analysis of a novel traveling-wave optical modulator based on LiNbO<sub>3</sub> fibers [J]. Journal of Tianjin University, 2005, 38(8): 730-734.  
鲍振武, 周洪娟, 李九生. LiNbO<sub>3</sub> 光纤型行波光调制器的有限元分析[J]. 天津大学学报, 2005, 38(8): 730-734.

[3] Yi J C, Kim S H, Sang S C. Finite-element method for the impedance analysis of traveling-wave modulators [J]. Journal of Lightwave Technology, 1990, 8(6): 817-822.

[4] Gopalakrishnan G K, Burns W K, McElhanon R W, *et al.* Performance and modeling of broadband LiNbO<sub>3</sub> traveling wave optical intensity modulators [J]. Journal of Lightwave Technology, 1994, 12(10): 1807-1819.

[5] Zhang X, Miyoshi T. Optimum design of coplanar waveguide for LiNbO<sub>3</sub> optical modulator [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 1995, 43(3): 523-528.

[6] Mitomi O, Noguchi K, Miyazawa H. Design of ultra-broad-band LiNbO<sub>3</sub> optical modulators with ridge structure[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 1995, 43(9): 2203-2207.

[7] Noguchi K, Mitomi O, Miyazawa H, *et al.* A broadband Ti:LiNbO<sub>3</sub> optical modulator with a ridge structure [J]. Journal of Lightwave Technology, 1995, 13(6): 1164-1168.

[8] Abe N M, Franco M A R, Passaro A. Analysis of an x-cut Ti:LiNbO<sub>3</sub> electro-optic modulator with a ridge structure [C]. IEEE International Microwave & Optoelectronics Conference, 1999, 1: 144-148.

[9] Rabiei P, Steier W H. Lithium niobate ridge waveguides and modulators fabricated using smart guide[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(16): 161115.

[10] Li J Y, Yao Y Q, Wu J J, *et al.* Theoretical analysis and preliminary fabrication of Ti-diffused LiNbO<sub>3</sub> ridge waveguides [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0223001.  
李金洋, 要彦清, 吴建杰, 等. 钛扩散铌酸锂脊形波导理论分析与初步制备 [J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0223001.

[11] Ramaswamy V, Divino M D, Standley R D. Balanced bridge modulator switch using Ti-diffused LiNbO<sub>3</sub> strip waveguides[J]. Applied Physics Letters, 1978, 32(10): 644-646.

[12] Hunter D B. Incoherent bipolar tap microwave photonic filter based on balanced bridge electro-optic

- modulator[J]. Electronics Letters, 2004, 40(14): 856-858.
- [13] Jung H. Integrated-Optic electric-field sensor utilizing a Ti:LiNbO<sub>3</sub> Y-fed balanced-bridge Mach-Zehnder interferometric modulator with a segmented dipole antenna[J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2014, 18(6): 739-745.
- [14] Franco M A R, Passaro A, Abe N M, *et al.* A design study of a Ti:LiNbO<sub>3</sub> traveling-wave electro-optic modulator by the finite element method[C]. IEEE Microwave and Optoelectronics Conference, 1999, 1: 158-162.
- [15] Kawano K, Noguchi K, Kitoh T, *et al.* A finite element method (FEM) analysis of a shielded velocity-matched Ti:LiNbO<sub>3</sub> optical modulator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1991, 3(10): 919-921.
- [16] Li J Y, Lu D F, Qi Z M. Analyses of wavelength dependence of the electro-optic overlap integral factor for LiNbO<sub>3</sub> channel waveguides [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(7): 077801.
- 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.
- [17] Wu Y K, Wang W S. Design and fabrication of sidewalls-extended electrode configuration for ridged lithium niobate electro-optical modulator[J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(2): 286-290.
- [18] Burns W K, Klein P H, West E J, *et al.* Ti diffusion in Ti:LiNbO<sub>3</sub> planar and channel optical waveguides [J]. Journal of Applied Physics, 1979, 50(10): 6175-6182.
- [19] Fukuma M, Noda J. Optical properties of titanium-diffused LiNbO<sub>3</sub> strip waveguides and their coupling-to-a-fiber characteristics[J]. Applied Optics, 1980, 19(4): 591-597.