

基于绝缘体上硅的一种改进的 Mach-Zehnder 声光调制器

秦晨 余辉 叶乔波 卫欢 江晓清

An improved Mach-Zehnder acousto-optic modulator on a silicon-on-insulator platform

Qin Chen Yu Hui Ye Qiao-Bo Wei Huan Jiang Xiao-Qing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 014304 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.014304

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014304>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于等效参数反演的敷设声学覆盖层的水下圆柱壳体声散射研究

Investigation of underwater sound scattering on a cylindrical shell coated with anechoic coatings by the finite element method based on an equivalent parameter inversion

物理学报.2016, 65(1): 014305 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014305>

声子晶体中的半狄拉克点研究

Semi-Dirac points in two-dimensional phononic crystals

物理学报.2015, 64(19): 194301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.194301>

稳态损耗因子的衰减法识别研究

Estimation of steady loss factor with decay rate method

物理学报.2015, 64(18): 184301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.184301>

一维亥姆霍兹共振腔声子晶体中缺陷模式的实验研究

Experiments on defect mode of one-dimensional phononic crystal containing Helmholtz resonators

物理学报.2013, 62(9): 094304 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.094304>

晶格中心插入体的对称性及取向对二维声子晶体带隙的影响

The two-dimensional phononic crystal band gaps tuned by the symmetry and orientation of the additional rods in the center of unit cell

物理学报.2012, 61(23): 234302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.234302>

基于绝缘体上硅的一种改进的Mach-Zehnder 声光调制器*

秦晨 余辉[†] 叶乔波 卫欢 江晓清

(浙江大学信息与电子工程学院, 集成光电子实验室, 杭州 310027)

(2015年7月6日收到; 2015年8月24日收到修改稿)

传统的基于绝缘体上硅的Mach-Zehnder (MZ) 声光调制器中, 叉指换能器位于两臂的同一侧. 为实现高的调制效率, 声表面波的波峰和波谷分别调制MZ干涉仪的两臂, 这要求控制MZ干涉仪两臂之间的距离为奇数倍声波半波长. 但实际上由于传播过程中衬底材料的变化, 声波波长会变大, 这会导致两臂的间距难以准确设置. 另一方面, 声波在传播过程中经过MZ干涉仪的一臂后会发生衰减, 降低了对另一臂的调制效果, 影响了整体的调制效率. 本文针对这些问题给出了一种解决方案, 把叉指换能器放在MZ波导两臂之间, 确保MZ干涉仪两臂到叉指电极中心距离相等. 采用有限元法, 首先对新提出的结构进行分析, 然后通过声光相互作用原理得到了材料的折射率变化; 进而研究了波导类型、波导宽度、氧化锌厚度及叉指对数等因素对声光调制效率的影响, 并对声光调制器的结构参数进行了优化以提高其性能. 基于COMSOL Multiphysics的仿真结果表明, 当条波导宽度为6 μm , 氧化锌只覆盖有叉指电极的部分且厚度为2.2 μm , 控制叉指电极数目为50对时, 波导有效折射率变化在驱动电压为1 V时可以达到 4.08×10^{-4} , 比传统结构提高了12%.

关键词: 声光调制器, 绝缘体上硅, 声表面波, COMSOL Multiphysics

PACS: 43.40.+s, 46.40.-f, 46.40.Cd

DOI: 10.7498/aps.65.014304

1 引言

基于绝缘体上硅(SOI)材料的硅基集成光子学是近年来的研究热点^[1-3], 相较于基于其他材料的光电子集成技术, 其优势在于: 首先, Si和SiO₂折射率差大^[4], 对光限制能力强^[5], 有利于减小器件尺寸^[6]; 其次, 基于SOI的硅光子器件制作工艺与互补金属氧化物半导体工艺完全兼容, 因此有利于集成光子芯片的大规模低成本制造以及光路与电路的单片集成. 基于以上原因, 硅基集成光子学在光互连^[7]、光传感、微波光子学^[8]、量子光学等领域得到了广泛的应用. 另一方面, 声光效应被应用于集成光学作为光学调制已经有很长的历史, 尤其是布拉格衍射的应用^[9-11], 声光作用长度长, 声波

频率高, 光束与声波以一定角度斜入射, 此时声光晶体相当于一个“立体光栅”, 这种情况称之为布拉格衍射^[12], 而拉曼-奈斯衍射^[13-15]主要应用于声光作用长度短、声波频率低的器件中, 布拉格型声光调制器具有开关速度快、设计灵活、驱动功率低等优势. 近些年来声光调制器件已经在军事和民用的各个领域得到广泛的应用, 如声光信息的传递. 如果能在SOI材料上制作声光调制器, 就可充分结合声光器件和硅基器件的优势, 解决传统声光器件难以集成的问题^[16]. 但是SOI上的声光调制器一直少有报道, 主要是由于SOI本身没有压电效应, 难以激励出声表面波^[17].

1997年, 东京大学的Christophe等^[18]根据声光效应的原理, 率先提出一种SiON波导上的

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2013CB632105)、国家自然科学基金(批准号: 61177055, 61307074)、浙江省杰出青年科学基金(批准号: LR15F050002)和中央高校基本科研业务费专项资金资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: huiyu@zju.edu.cn

Mach-Zehnder (MZ) 型声光调制器, 用声表面波调制 MZ 干涉仪一个臂, 但这种结构调制效率比较低, 为提高声光调制效率, 2006 年 de Lima Jr 等^[16] 在 AlGaAs/GaAs 上设计并制作了一种声光调制器, 激发声表面波的叉指电极位于 MZ 干涉仪一侧, 控制 MZ 干涉仪两臂之间的间距, 使得声表面波传递到 MZ 干涉仪两臂时相位相反, 两臂同时调整, 从而调制效率达到了 90% 以上. 2009 年, Dühning 等^[19,20] 提出一种基于 SOI 的声光调制器, 通过在 SOI 上溅射具备压电效应的 ZnO 层激励出声表面波, 并对其性能进行了仿真, 优化参数以提高调制效率. 2014 年, Tadesses 和 Li^[21] 在 AlN 材料上实现了 10 GHz 频率的声表面波调制器, 该器件采用跑道环结构, 叉指电极位于跑道环外侧, 用类似文献^[19, 20] 中报道的方式控制跑道环两直波导间距为声表面波半波长的奇数倍. 必须指出, 文献^[19, 20] 中所提出的结构为了增加调制的效率, 必须控制两臂之间的距离为奇数倍的半波长. 但实际器件中声波波长在没有叉指电极覆盖的地方会发生变化, 因此声表面波的准确波长难以确定, 这使得严格控制两臂间距为半波长奇数倍较为困难, 而且声表面波在通过第一个波导时会衰减, 则第二个波导不能得到同样效果的调制.

本文针对这几个问题, 提出一种改进的基于 SOI 材料的 MZ 型声光调制器, 将叉指电极置于 MZ 干涉仪两臂中央, 同时利用在叉指换能器 (IDT) 两侧所激励的声表面波信号, 使 MZ 干涉仪两臂得到反相的调制从而解决了传统结构中 MZ 干涉仪两臂间距难以确定的问题. 本文首先利用 COMSOL 建立了 SOI 材料上 MZ 型声光调制器的理论模型, 利用该模型对器件进行了仿真, 分析了不同因素对调制效率的影响, 为器件设计提供理论依据.

2 MZ 型声光调制器的原理

本文所提出的 MZ 型声光调制器的俯视图和截面图如图 1 所示. 用于制作波导的 SOI 材料的 SiO₂ 层与 Si 层厚度分别为 2 μm 和 0.22 μm. 由于硅没有压电效应, 无法激励声表面波, 因此需要在 SOI 表面生长一层压电薄膜氧化锌, 用于激励声表面波. IDT 位于氧化锌薄膜表面. 光信号通过一

个 1 × 2 的多模干涉 (MMI) 分束器, 传输一段距离后再通过一个 2 × 1 的 MMI 合束器. IDT 居于两臂之间, 在其两侧激励的声表面波传输到 MZ 干涉仪的两臂后分别对其进行折射率调制.

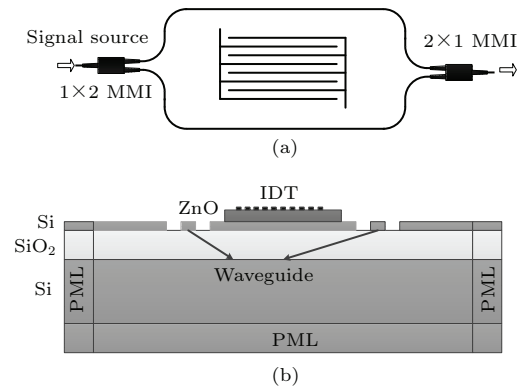


图 1 声光调制器的基本模型 (a) 声光调制器的俯视图; (b) 声光调制器的截面图

Fig. 1. Basic model of acousto-optic modulator: (a) Top view of acousto-optic modulator; (b) sectional view of acousto-optic modulator.

相比于之前提出的 SOI 上的声表面器件^[19,20], 本结构的优点在于: 1) 之前的 MZ 型声光器件, MZ 干涉仪的两臂放于电极的一侧, 就必须控制两臂之间的距离为声波的奇数倍半波长, 这样才能使一条波导处于波峰时, 另一条波导处于波谷, 调制效率达到最大值, 由于声波传播路径上介质层的变化, 声波波长会发生变化, 因而两臂间距很难准确设定, 而图 1 结构不需要考虑两臂间距的问题, 它利用了 IDT 两侧所激励的声表面波相位相反的特性, 只要两臂距离 IDT 长度一致就可以保证两臂分别处于波峰和波谷; 2) 到达两个波导的声波强度是一致的, 所以两个波导有效折射率变化幅度是相同的; 3) 能充分利用声波的能量, 因为叉指电极产生的声波是双向传播的, 光波导设计在两侧, 可以充分利用两侧声表面波的能量.

声表面波是一种弹性波, 其能量主要集中于传播介质的表面大约为一个波长的深度^[22]. 在应用中的声波主要是通过叉指电极激发, 当叉指电极加上电信号时, 电信号通过压电基片的逆压电效应转化为机械能, 以声波的形式在表面传输, 声波产生的应变张量的表达式:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta u_i}{\delta x_j} + \frac{\delta u_j}{\delta x_i} \right) \quad (i, j = 1, 2, 3), \quad (1)$$

其中, u_i 是机械位移, x_i 是坐标.

表1 压光常数参照表 [25]

Table 1. Reference table of stress-optical constants [25].

材料	n_0	$C_{11}, C_{22}, C_{33}/10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$	$C_{12}, C_{13}, C_{23}/10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$	$C_{44}, C_{55}, C_{66}/10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$
Si	3.42	-11.35	3.65	0
SiO ₂	1.46	0.65	4.50	-3.85

声表面波通过介质时, 由于声光效应的存在, 会使光波导的折射率发生微小的周期性变化, 折射率的微小改变 Δn_{ij} 为 [23]

$$\Delta n_{ij} = -\frac{1}{2}n_0^3 p_{ijkl} S_{kl} \quad (i, j, k, l = 1, 2, 3), \quad (2)$$

其中, p_{ijkl} 是弹光系数. 根据压光关系, 折射率 n_{ij} 也可以表示为 [24,25]

$$n_{ij} = n_{ij}^0 - C_{ijkl} T_{kl} \quad (i, j, k, l = 1, 2, 3), \quad (3)$$

其中, n_{ij}^0 是指无声波情况下介质的折射率, C_{ijkl} 是压光关系常数, T_{kl} 是应力张量.

分析计算所用的数据列于表 1.

3 仿真数据分析

3.1 声学模块的仿真

声表面波器件设计中, 当外加电压的频率和 IDT 的声同步频率一致时, 声波的激发强度最大, 声表面波由叉指电极激励产生, 出于实验室工艺精度的考量, IDT 的宽度最小设置为 $2 \mu\text{m}$, 那么声波的波长 $\lambda_{\text{SAW}} = 2 \times 4 = 8 \mu\text{m}$. 图 2(a) COMSOL 中设置 Al 电极的激励电压为 1 V, 叉指电极 10 对, 左右两边设置成完美匹配层 (PML), PML 吸收的比例因子为 0.5, 这样声波可以被缓慢吸收, ZnO 层为压电材料, SOI 为线性弹性材料, 然后求解其频域模型, 用 COMSOL 算出沿着 x 方向的位移 u_2 . 可以看出声表面波在叉指电极处产生并且沿着固体表面向左右传输, 最终被 PML 吸收, 在 PML 中声表面波 (SAW) 逐渐衰减. 声波在传输过程中由于介质材料的变化, 声波的波长会发生改变, 对于 ZnO 仅覆盖在叉指电极周围的器件来说, 声波波长大约会增加 30%, ZnO 完全覆盖器件表面的器件, 声波波长增加幅度很小. 并且从图 2(a) 还发现在距离叉指电极相同的位置, 声波的相位恰好相反, 同样的结果在图 2(b) 中也得到证实, 在 IDT 处声

波振动比较强烈, 没有 IDT 的地方声波振动趋于稳定, 仿真中所用到的基本参数如表 2 和表 3 所列.

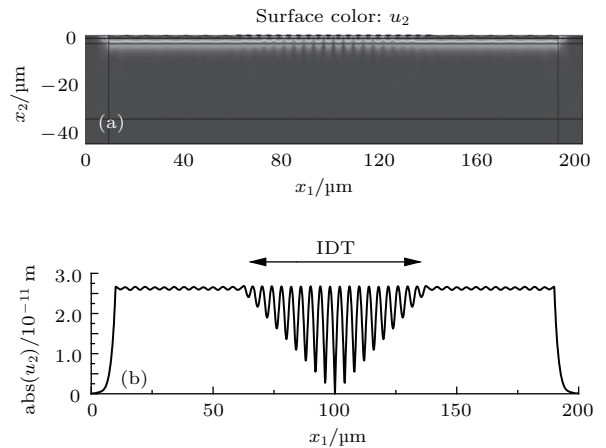


图 2 声表面波在介质中传输造成介质表面位移变化图 (a) 声表面波在叉指电极处产生向两边传输; (b) Si 形变大小

Fig. 2. The displacement of surface because surface acoustic wave propagates in the media: (a) Surface acoustic wave is generated by IDT and propagates in both sides; (b) the deformation of Si.

表 2 材料介电常数 [19]

Table 2. The permittivity constants for the materials used in the piezoelectric model [19].

材料	$\epsilon_{11}^s/10^{-11} \text{ F}\cdot\text{m}$	$\epsilon_{22}^s/10^{-11} \text{ F}\cdot\text{m}$	$\epsilon_{33}^s/10^{-11} \text{ F}\cdot\text{m}$
ZnO	7.38	7.38	7.38
Si	11.5	11.5	11.5
SiO ₂	2.37	2.37	2.37

表 3 ZnO 压电应力常数

Table 3. The piezoelectric stress constants of ZnO.

材料	$e_{15}/\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$	$e_{24}/\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$	$e_{31}/\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$	$e_{32}/\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$	$e_{33}/\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$
ZnO	-0.48	-0.48	-0.573	-0.573	1.321

图 3 是通过频域求解计算出的位移与频率的关系图, 可以看出当声表面波的频率达到 395 MHz 时位移最大, 该频率就是 IDT 的声同步频率. 下文中的光学模块仿真是设立声波为该频率值, 但是压电材料 ZnO 的厚度、硅的厚度、氧化锌的覆盖面积

等因素都会影响声表面波的频率,因此在仿真过程中改变这些参数时相应地需要调整声表面波的频率.

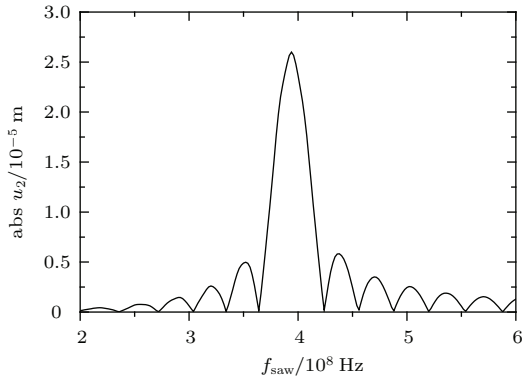


图3 介质表面振动幅度 $\text{abs}(u_2)$ 随声表面波频率的变化
Fig. 3. The relationship of the waveguide deformation and the frequency of surface acoustic wave.

3.2 光学模块的仿真

为了研究声表面波对光波导的调制作用,在图2(a)结构的基础上,添加光学模块,光波导放在

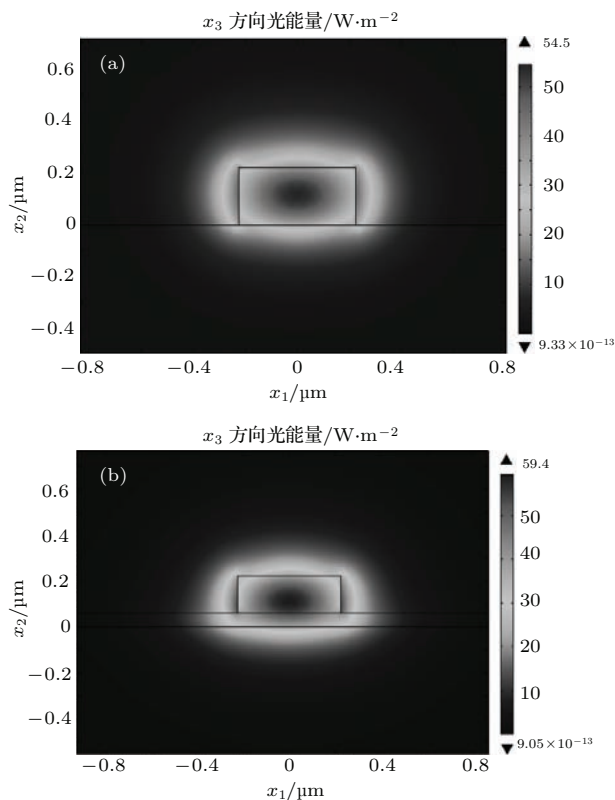


图4 声光调制器中光波导模块 (a) 条波导模场; (b) 脊波导模场
Fig. 4. Optical waveguide module in acousto-optic modulator: (a) The mode field of stripe waveguide; (b) the mode field of ridge waveguide.

叉指电极的两侧距离中心位置相同的位置,并且通过(3)式建立两者之间的联系,对光学模块的仿真将研究提高调制性能的几种因素,以确定器件的合理尺寸.

图4是对光波导部分进行模态分析,光波的能量限制在波导中,计算声波通过MZ干涉仪时波峰和波谷处的有效折射率,自上而下是ZnO, Si, SiO₂, 光波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$, Si和SiO₂的基本参数如表1所列,氧化锌折射率为2.008.因为脊波导和条波导是硅光子中两种最典型的波导,所以针对两种结构脊波导和条波导进行研究.

3.3 波导宽度对有效折射率差值的影响

对于光波导来说,波导的尺寸发生变化时也会影响到有效折射率.下面分别计算研究了条波导和脊波导如图4所示情况下叉指电极加上1 V电压MZ干涉仪两臂有效折射率之差 $(n_{\text{eff},l} - n_{\text{eff},r})/V$ 随波导宽度的变化情况.

图5(a)是研究MZ干涉仪两臂为条波导的情况.电压为1 V、叉指电极10对、声波的频率根据图3设置.可见随着波导宽度的增加,氧化锌部分覆盖(只在叉指电极部分溅射氧化锌)的器件,折射率差在波导宽度为6 μm 时最大, $(n_{\text{eff},l} - n_{\text{eff},r}) = 2.04 \times 10^{-5}$.这是由于当波导宽度大于半波长时,一部分区域被压缩,另一部分被拉伸,两者互相抵消,所以有效折射率会变小.在氧化锌完全覆盖(器件表面完全溅射氧化锌)的情况下,波导宽度为1 μm 时两臂折射率差最大,并且幅度远小于部分氧化锌覆盖的情况.这是因为声波主要能量集中在表层,ZnO部分覆盖时的声表面波能量主要集中在Si中,而完全覆盖的声表面波能量是在ZnO中.如果选用条波导时,应该只保留叉指电极部分的氧化锌层,并且选择波导宽度为6 μm .图5(b)是研究MZ干涉仪两臂为脊波导时两臂有效折射率之差随波导宽度的变化情况.在仿真过程中,脊部分高度为160 nm,ZnO部分覆盖的器件有明显的优势,并且随着波导宽度的加大,左右两臂的有效折射率之差越来越大,直到增加波导宽度为5 μm 时, $(n_{\text{eff},l} - n_{\text{eff},r}) = 1.91 \times 10^{-5}$,达到最大值,对比图5(a)和图5(b),可以选择波导宽度为6 μm 的条波导.

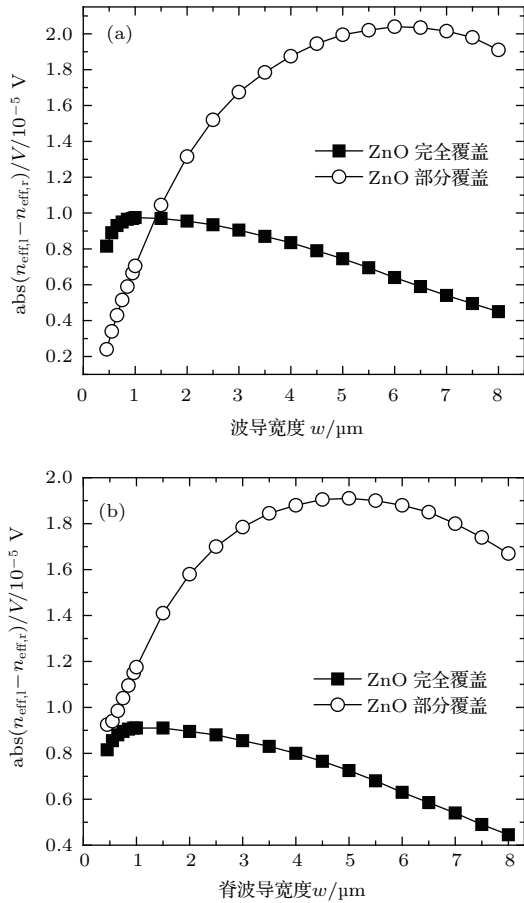


图5 折射率随着波导宽度的变化 (a) MZ波导两臂是条波导的情况下, ZnO完全覆盖和部分覆盖对折射率的影响; (b) 脊波导情况下折射率变化情况

Fig. 5. The relationship of the width of waveguide and refractive index: (a) Under the condition that the arms of the MZ is the stripe waveguide, the difference of refractive index between the surface completely and partial covered by ZnO; (b) under the condition that the arms of the MZ is the ridge waveguide, the difference of refractive index.

3.4 氧化锌厚度对有效折射率差值的影响

声表面波的激发取决于表面的压电材料氧化锌层, 而其厚度也会影响到调制的效率, 想要得到最大的调制效率, 就要研究氧化锌厚度对有效折射率的影响。

图5仿真结果证实了声波对条波导调制效果比较好, 因此图6研究条波导情况下氧化锌厚度对波导折射率变化的影响(TE表示横电模)。如图6所示, 若选取ZnO厚度为2.2 μm时, 调制效果最好, 这是因为声波能量在垂直方向呈指数衰减分布, 氧化锌厚度太厚会使能量主要分布在ZnO部分。上述结果中, 折射率变化值比较小, 是因为在

仿真过程中仅加上1 V电压, 并且为了减小仿真时间, 叉指电极的对数为10对, 在实际设计过程中叉指电极对数要比仿真值大得多, 并且可以加大电压值, 这样可以有效增强波导有效折射率的变化。下面验证折射率变化和叉指对数的关系。

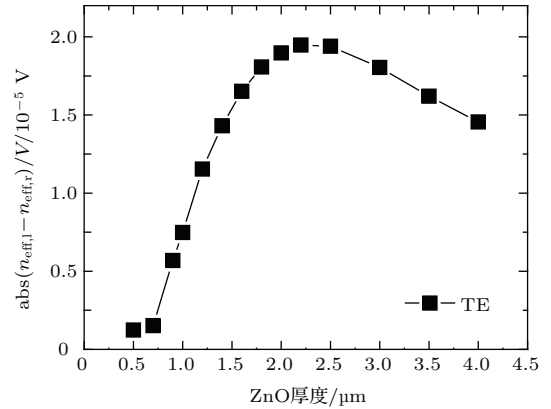


图6 氧化锌厚度对折射率变化的影响

Fig. 6. The relationship of the thickness of ZnO and refractive index.

3.5 叉指电极对数对有效折射率差值的影响

图7仿真了条波导在氧化锌部分覆盖情况下折射率变化与叉指电极数目的关系。结果表明, 折射率变化随叉指电极的数目线性增大, 所以在实际设计中可以控制叉指电极的数目来增强调制效果, 但是过多增加电极的对数难免会增加功耗和器件尺寸。具体对于文中提出的结构来说, 叉指电极的数目过多会使MZ干涉仪两臂间距很大, 器件占据的面积会非常大, 所以选取叉指电极数目为50对。

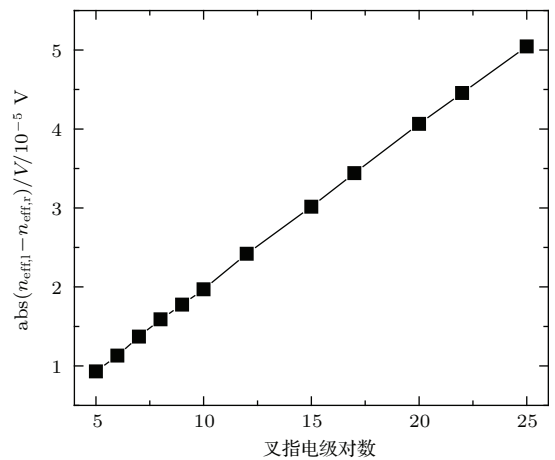


图7 叉指电极数目和折射率变化的关系

Fig. 7. The relationship of the number of IDT and refractive index.

本小节通过仿真分析了波导形状、波导宽度、氧化锌厚度、叉指电极的对数对声光调制效率的影响. 根据以上仿真结果, 氧化锌部分覆盖的条波导, 波导宽度为 $6\ \mu\text{m}$, 氧化锌厚度为 $2.2\ \mu\text{m}$, 叉指电极数目为 50 对, 加电压 1 V 对波导折射率改变可以达到 10^{-4} 量级.

4 器件调制效率的比较

为了验证本文中所提出结构的优点, 图 8 对它与叉指电极位于器件外侧的传统结构进行了比较 (为了缩短仿真时间, 选取叉指对数为 10 对, ZnO 厚度为 $1\ \mu\text{m}$). 对于传统结构, 调制效率对于两臂间距的改变非常敏感, 这为实际器件的间距控制带来了困难. 图 8 显示, 当两臂间距为 $28.5\ \mu\text{m}$ 时, 折射率变化最大, 但即使是该最优间距, 其调制效果也不及本文所提出的 IDT 位于两臂中央的方案. 原因在于传统结构仅利用在叉指电极一侧所激励的声波, 声波在通过 MZ 干涉仪一臂后会发生衰减, 减弱了对另外一臂的调制效果, 而本文的结构同时利用在叉指电极两侧所激励的声波, 提高了对声波能量的利用率, 提高了调制的效率.

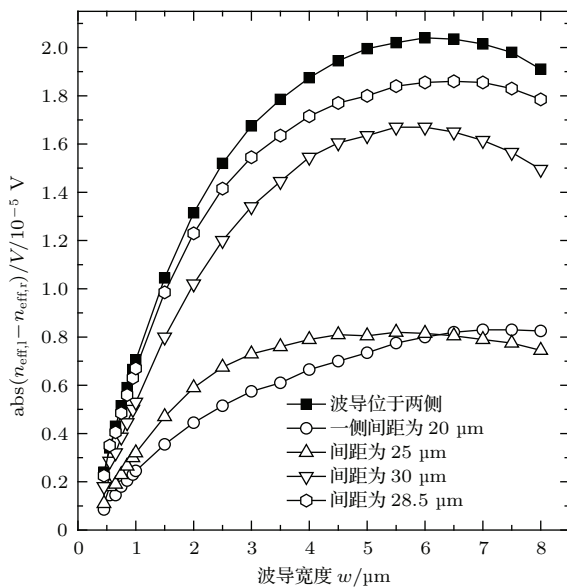


图 8 声光调制器新结构与传统结构的对比

Fig. 8. Comparison of new structure and old structure.

5 结 论

本文提出一种基于 SOI 的改进型 MZ 声光调制器, 无需像传统声光调制器一样控制 MZ 干涉仪

两臂之间距离为奇数倍半波长, 并且可以确保通过两臂的声表面波强度一致. 介绍了声光调制的基本原理, 并且出于提高声光调制效率的要求, 利用有限元方法进行分析, 探究了波导类型、氧化锌覆盖面积、压电薄膜氧化锌厚度及叉指电极的数目等因素对调制效率的影响. 仿真结果显示, 选择宽度为 $6\ \mu\text{m}$ 的条波导, 氧化锌部分覆盖且厚度为 $2.2\ \mu\text{m}$, 并且控制叉指电极数为 50 对, 波导有效折射率的变化可以达到 4.08×10^{-4} , 同时证明了改进的声光调制器结构确实可以有效地提高调制效率.

参考文献

- [1] Soref R 2006 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **12** 1678
- [2] Kimerling L C, Ahn D, Apsel A B, Beals M, Carothers D, Chen Y K, Conway T, Gill D M, Grove M, Hong C Y, Lipson M, Liu J, Michel J, Pan D, Patel S S, Pomerene A T, Rasras M, Sparacin D K, Tu K Y, White A E, Wong C W 2006 *Proc. SPIE* **6125** 612502
- [3] Arakawa Y, Yasuhiko A, Nakamura T, Urino Y, Fujita T 2013 *IEEE Commun. Mag.* **51** 72
- [4] Li Q, Li H O, Tang N, Zhai J H, Song S X 2015 *Chin. Phys. B* **24** 037203
- [5] Barretto E C S, Hvam J M 2010 *Proc. SPIE* **7719** 771920
- [6] Chen X, Yang Y, Cai H L, Zhou C J, Mohammad A M, Ren T L 2014 *Chin. Phys. Lett.* **31** 124302
- [7] Qiu C, Hu T, Wang W J, Yu P, Jiang X Q, Yang J Y 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 094204
- [8] Liao S S, Yang T, Dong J J 2014 *Chin. Phys. B* **23** 073201
- [9] Chatterjee M R, Almechmadi F S 2014 *Opt. Eng.* **53** 036108
- [10] Teklu A, Declercq N F, McPherson M 2014 *J. Acoust. Soc. Am.* **136** 634
- [11] Yan H T, Wang M, Ge Y X, Yu P 2009 *Chin. Phys. B* **18** 02389
- [12] Liu C, Pei L, Li Z X, Ning T G, Gao S, Kang Z X, Sun J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 034208 (in Chinese) [刘超, 裴丽, 李卓轩, 宁提纲, 高嵩, 康泽新, 孙将 2013 物理学报 **62** 034208]
- [13] Weng C C, Zhang X M 2015 *Chin. Phys. B* **24** 014210
- [14] Gu H D, Shao Z X, Zheng C Q, Yang J, Chen R T, Gu Z T 2015 *SPIE Opto.* **9359** 93591J
- [15] Balakshy V I, Voloshin A S, Molchanov V Y 2015 *Ultrasonics* **59** 102
- [16] de Lima Jr M M, Beck M, Hey R, Santos P V 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 121104
- [17] Wang W B, Gu H, He X L, Xuan W P, Chen J K, Wang X Z, Luo J K 2015 *Chin. Phys. B* **24** 057701
- [18] Christophe G, Franck C, Eric B, Hideki K 1997 *Opt. Lett.* **22** 1784

- [19] Dühning M B, Sigmund O 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 083529
- [20] Dühning M B, Sigmund O, Jensen J S 2009 *Ph. D. Dissertation* (Copenhagen: Technical University of Denmark)
- [21] Tadesse S A, Li M 2014 *Nat. Commun.* **5** 5402
- [22] Pan F 2012 *Surface Acoustic Wave Materials and Devices* (Beijing: Science Press) pp1, 2 (in Chinese) [潘峰 2012 声表面波材料与器件 (北京: 科学出版社) 第1, 2页]
- [23] Nishihara H, Haruna M, Suhara T 1985 *Optical Integrated Circuits* (New York: McGraw-Hill) pp108–120
- [24] Syms R R, Cozens J R 1992 *Optical Guided Waves and Devices* (New York: McGraw-Hill) pp66–70
- [25] Huang M 2003 *Int. J. Solids Struct.* **40** 1615

An improved Mach-Zehnder acousto-optic modulator on a silicon-on-insulator platform*

Qin Chen Yu Hui[†] Ye Qiao-Bo Wei Huan Jiang Xiao-Qing

(Integrated Optoelectronics Laboratory, College of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(Received 6 July 2015; revised manuscript received 24 August 2015)

Abstract

The interdigital transducer (IDT) of the traditional Mach-Zehnder (MZ) acousto-optic modulator on a silicon-on-insulator (SOI) platform is located outside its two arms. The crest and trough of the surface acoustic wave (SAW) are used to modulate the two arms of the MZ interferometer so as to achieve a high modulation efficiency. Therefore, the distance between the two arms must be odd multiples of half acoustic wavelength. However, since the substrate is usually not uniform, the wavelength of the SAW changes as it transmits through the surface of the device. As a result, the exact distance between the two arms is difficult to choose. On the other hand, the SAW losses a portion of energy after passing through the first arm of the MZ interferometer, so the modulation of the second arm becomes much weaker. To solve these problems, we propose a new structure where its IDT is situated in the middle of the two arms of the MZ interferometer. With this scheme, the two arms of the MZ interferometer are located exactly at the crest and the trough of the SAW, while they are modulated with equal strength. In this paper, we first use the finite element method to simulate the acoustic frequency and the surface displacement of the excited SAW. Then we deduce the refractive index variations of all layers according to their acousto-optic effects. After that, we analyze the influences of different factors on the acousto-optic modulation efficiency, including the type and size of waveguide, the thickness of zinc oxide (ZnO) layer, and the area it covers, the number of electrodes, etc. These parameters are accordingly optimized to enhance the modulation efficiency. Modeling result based on COMSOL Multiphysics indicates that when the width of the strip waveguide is 6 μm , the ZnO layer covers only the area under the IDT and has a thickness of 2.2 μm , and the number of the electrodes is 50, the effective refractive index variation of the waveguide reaches 4.08×10^{-4} provided that the amplitude of the driving voltage is 1 V. This value is 12% higher than that of the traditional structure.

Keywords: acousto-optic modulator, silicon-on-insulator, surface acoustic wave, COMSOL Multiphysics

PACS: 43.40.+s, 46.40.-f, 46.40.Cd

DOI: 10.7498/aps.65.014304

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2013CB632105), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61177055, 61307074), the Science Fund for Distinguished Young Scholars of Zhejiang, China (Grant No. LR15F050002), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China.

[†] Corresponding author. E-mail: huiyu@zju.edu.cn