

## 一种电光可调的铌酸锂/钠基表面等离子体定向耦合器

马涛 马家赫 刘恒 田永生 刘少晖 王芳

## Electro-optic tunable directional coupler based on a $\text{LiNbO}_3/\text{Na}$ surface plasmonic waveguide

Ma Tao Ma Jia-He Liu Heng Tian Yong-Sheng Liu Shao-Hui Wang Fang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 054205 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211217

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211217>

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

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ -CoFeB自旋波定向耦合器中的自旋波

Spin waves in  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ -CoFeB spin-wave directional coupler

物理学报. 2021, 70(18): 187501 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210507>

#### 飞秒激光直写光量子逻辑门

Femtosecond laser direct writing of optical quantum logic gates

物理学报. 2019, 68(10): 104205 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190024>

#### 一种低损耗的对称双楔形太赫兹混合表面等离子体波导

A symmetrical wedge-to-wedge THz hybrid SPPs waveguide with low propagation loss

物理学报. 2020, 69(7): 074205 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191666>

#### 基于夹层结构的偏振无关 $1 \times 2$ 定向耦合型解复用器的设计

Design of polarization-insensitive  $1 \times 2$  directional coupler demultiplexer based on sandwiched structure

物理学报. 2021, 70(1): 014202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20200721>

#### 非对称银膜多孔硅-氟化钙等离子体波导及其波导灵敏度特性

Porous silicon - calcium fluoride plasma waveguide with asymmetric Ag film and its sensitivity characteristics

物理学报. 2021, 70(22): 224201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210704>

#### 基于表面等离子体诱导透明的半封闭T形波导侧耦合圆盘腔的波导滤波器

Semi-closed T-shaped-disk waveguide filter based on surface-plasmon-induced transparency

物理学报. 2019, 68(23): 237301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191068>

# 一种电光可调的铌酸锂/钠基表面等离子体定向耦合器\*

马涛<sup>1)</sup> 马家赫<sup>1)</sup> 刘恒<sup>1)2)†</sup> 田永生<sup>1)</sup> 刘少晖<sup>1)</sup> 王芳<sup>1)</sup>

1) (河南师范大学电子与电气工程学院, 河南省光电传感集成应用重点实验室, 新乡 453007)

2) (河南省电磁波工程院士工作站, 新乡 453007)

(2021 年 6 月 30 日收到; 2021 年 11 月 29 日收到修改稿)

为了满足日益增加的集成光子器件设计的需求, 本文研究了一种铌酸锂/钠表面等离子体波导 (LiNbO<sub>3</sub>/Na surface plasmonic waveguide, LNSPW), 并利用 LNSPW 构成电光可调的定向耦合器 (directional coupling, DC). 利用有限元方法 (finite element method, FEM) 对波导的模式特性和耦合器的耦合特性进行了分析. 结果表明, 随着波导尺寸的增大, 传播长度可达约 200  $\mu\text{m}$ , 归一化有效模场面积小于 0.4. 通过调节耦合间距 ( $W_{\text{gap}}$ )、耦合长度 ( $L_C$ ) 和工作波长 ( $\lambda$ ) 等参数, 铌酸锂钠表面等离子体波导构建的定向耦合结构可实现 3 dB 耦合. 当  $W_{\text{gap}} = 100 \text{ nm}$  和  $L_C = 17 \text{ }\mu\text{m}$  时, DC 在  $V_0 = 53 \text{ V}$  时可实现 3 dB 耦合, 且具有较好的方向性和隔离度. LNSPW 的研究为实现可调的 DC 提供了一种可行的方案, 在集成电光可调器件研究领域有潜在的应用前景. 除此之外, LNSPW 还可广泛应用于非线性光学、光信号处理及光全息存储等领域.

**关键词:** 铌酸锂波导, 电光调制器件, 表面等离子体, 定向耦合器

**PACS:** 42.79.Gn, 78.20.Jq, 42.82.-m

**DOI:** 10.7498/aps.71.20211217

## 1 引言

铌酸锂 (LiNbO<sub>3</sub>, LN) 作为一种人工合成的优良多功能晶体材料, 具有压电、铁电、光折变、声光、电光、非线性等性能. 同时, 研究发现铌酸锂单晶薄膜 (lithium niobate on insulator, LNOI) 具有高单晶性、超低损耗、高速电光调控等优势, 并且拥有良好的非线性光学特性. 随着 LNOI 集成光子器件的制备和生产工艺水平不断提高, LNOI 已成为集成光子学领域的热点之一.

定向耦合器 (directional coupling, DC) 由位置足够近的两根平行传输线组成, 功率会在两根传输线上互相耦合, 是集成光学中的重要器件之一<sup>[1]</sup>. 另外, 定向耦合器也是构建电光调制马赫-曾德干

涉结构 (Mach-Zehnder interferometer, MZI) 的核心部分. MZI 在非线性光学、通信、声学、量子光学、微波光子学等领域均有着非凡意义<sup>[2]</sup>. LN 电光调制器在频带、稳定性、信噪比、传输损耗等方面均具有显著优势, 是现代电信网络和微波光子系统中的关键部件<sup>[3]</sup>, 还有望对量子光子学<sup>[4]</sup>的长足发展提供助力.

尽管研究人员已经发现 LN 器件可以提供更好的调制器性能<sup>[5]</sup>, 但是 LN 本身难以蚀刻, 而且 LN 的强电光效应导致其折射率在飞秒时间尺度上对施加电压的响应发生线性变化, 因此大多数商用 LN 调制器仍然基于钛扩散或质子交换实现<sup>[3]</sup>. 近年来, LNOI 的制备工艺也受到研究者的关注, 高品质 LNOI 的制备工艺逐渐成熟, 如离子切片工艺<sup>[6,7]</sup>和晶体键合技术<sup>[8]</sup>. 另外, 高性能 LNOI 光子

\* 国家自然科学基金 (批准号: 62075057) 和河南师范大学博士启动课题 (批准号: gd17167, 5101239170010) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [hengmaggie@163.com](mailto:hengmaggie@163.com)

器件的制备和加工工艺也取得了重大的进步. 比如, 与电子束曝光结合的离子刻蚀技术<sup>[9,10]</sup>、与飞秒激光直写结合的聚焦离子束刻蚀技术<sup>[11]</sup>和飞秒激光光刻辅助的化学机械抛光技术<sup>[12,13]</sup>; 这样就可以制备出超低损耗的 LNOI 光波导<sup>[10,14]</sup>. 2019 年, 北京大学李焱团队<sup>[1]</sup>采用飞秒激光加工技术在 LN 晶体内部刻写凹陷包层波导并制作了  $2 \times 2$  定向耦合器, 为基于 LN 晶体的可重构三维 (2D) 晶体器件的高效制备开辟了新的途径. 2019 年, 程亚等<sup>[15]</sup>利用飞秒激光微加工技术制备了品质因数 ( $Q$ ) 高达  $9.6 \times 10^6$  的 LNOI 微盘腔, 并提出了低损耗可大规模集成的 LNOI 光子集成器件的实现方案, 在光计算、光通信、微波光子学和光互联等领域具有广阔的应用前景<sup>[16]</sup>. LNOI 光子器件可满足未来的光子系统对调制器的要求, 具有与 CMOS 兼容的驱动电压、大带宽、低光插入损耗、高消光比、良好的信号质量等性能, 并且可以大规模制造<sup>[3]</sup>.

表面等离子体 (surface plasmonic, SP) 是一种在介质和金属交界面上, 由光子和自由电子耦合振荡产生的表面模<sup>[17]</sup>. SP 具有突破衍射极限、增强场局域效应、易于集成和制备的优点, 因此, 基于 SP 波导的光学器件被广泛研究. 目前研究最多的 SP 金属材料为贵金属 (金或银), 尽管金和银具有相对低的光学损耗, 但是它们的损耗仍然未达到商用要求. 因此各种低损耗材料受到研究者的关注, 如晶体金属、金属间化合物复合材料、金属合金、氮化物和氧化物等低损耗材料等<sup>[18–20]</sup>. 这些材料中, 碱金属钠 (Na) 由于较小的带间跃迁损耗而具有更低的光学损耗<sup>[18–21]</sup>. 然而, 金属钠活泼的化学性质使得 Na 金属膜的制备成为钠基表面等离子体器件研究和应用的关键, 2020 年南京大学的研究团队结合液态金属旋涂方法和可控冷却技术, 解决了高质量 Na 金属膜的制备难题<sup>[22]</sup>, 为钠基表面等离子体器件的研究奠定了基础.

本文提出一种结合铌酸锂材料和钠基表面等离子体的铌酸锂/钠基表面等离子体波导 (LiNbO<sub>3</sub>/Na surface plasmonic waveguide, LNSPW), 并利用两根 LNSPW 构建了一种电光可调的 DC. 有限元方法 (finite element method, FEM) 被用于研究 LNSPW 的模式特性和 DC 的耦合特性. 利用参数化扫描方法分析了波导几何尺寸参数对波导性能 (有效模式折射率、传播长度和有效模场面积) 的影响, 以及偏置电压对定向耦合器的耦合特性 (分束比、插入损耗等) 的调制作用; 并研究了定向

耦合器耦合区域的间隔和长度对耦合特性的影响.

## 2 建模与分析方法

利用 FEM 建立 LNSPW 横截面 ( $x$ - $y$  平面) 的二维 (2D) 模型, 如图 1(a) 所示, Na 金属层的厚度  $h_3$  设置为 100 nm, 这一厚度满足表面等离子体振荡在金属层内的衰减要求<sup>[23]</sup>. 考虑制备过程的实际情况, 设定铌酸锂脊形波导上层波导为一等腰梯形, 上底宽度  $w_1$ , 高为  $h_1$ , 两腰的倾斜角为  $\theta$  (取为  $60^\circ$ )<sup>[24]</sup>; 脊形波导下层厚度为  $h_2$ . Na 层除了做表面等离子体材料外, 还可以作为偏置电压下电极的扩展层, 上下电极之间加静电电压  $V_0$ . 由于铌酸锂的电光效应, 可利用电压改变波导中的模式特性和传输特性. 当上下电极之间加 100 V 的静电电压时, 波导截面的电势分布如图 1(b) 所示.

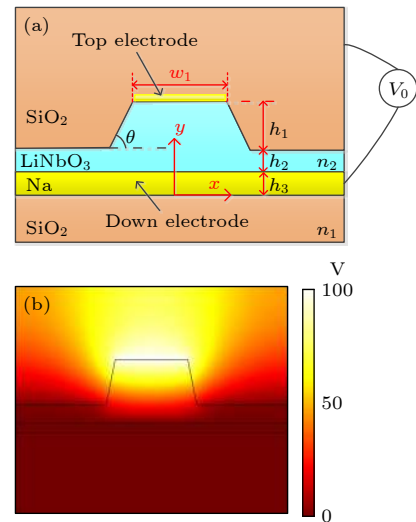


图 1 (a)  $x$ - $y$  平面内的 LNSPW 截面图; (b) 电势分布图,  $V_0 = 100$  V

Fig. 1. (a) Cross section of the LNSPW in the  $x$ - $y$  plane; (b) potential distribution as  $V_0 = 100$  V.

二氧化硅 (SiO<sub>2</sub>) 的折射率为 1.45, LiNbO<sub>3</sub> 的折射率为 2.2, Na 的折射率实部  $\text{Re}(n_{\text{Na}})$  和虚部  $\text{Im}(n_{\text{Na}})$  随入射光的工作波长  $\lambda$  的变化如图 2(a) 所示. 设定  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ , 计算 LNSPW 中存在的模式, 波导中的 4 个最低阶模式的电场分布如图 2(b)–(e) 所示. 图 2(b)–(d) 所示的模式属于表面等离子体模式, 分别为基模 (fundamental mode, FM)、二阶模 (second-order mode, SM) 和三阶模 (three-order mode, TM), 图 2(d) 的模式与传导模式类似, 称为类传导模 (guided mode-like, GM). 以 FM

为例直观描述 LNSPW 中表面等离子体模式的表面等离子体效应, FM 沿  $y$  轴的模场分布如图 Fig.2(f) 所示. 在  $\text{LiNbO}_3$  介质和 Na 金属层交界面上, 由于光子和金属内部自由电子的耦合振荡作用, 模式能量主要集中在  $\text{LiNbO}_3$  介质内靠近 Na 金属层的交界面附近, 且沿着  $y$  轴呈现指数衰减趋势; 而在 Na 金属层内部则迅速减弱, 在 100 nm 深度时几乎减小为零, 这是由于金属的欧姆损耗引起的. 对于 SM 和 TM 而言, 模式能量沿着  $y$  轴也有类似的分布.

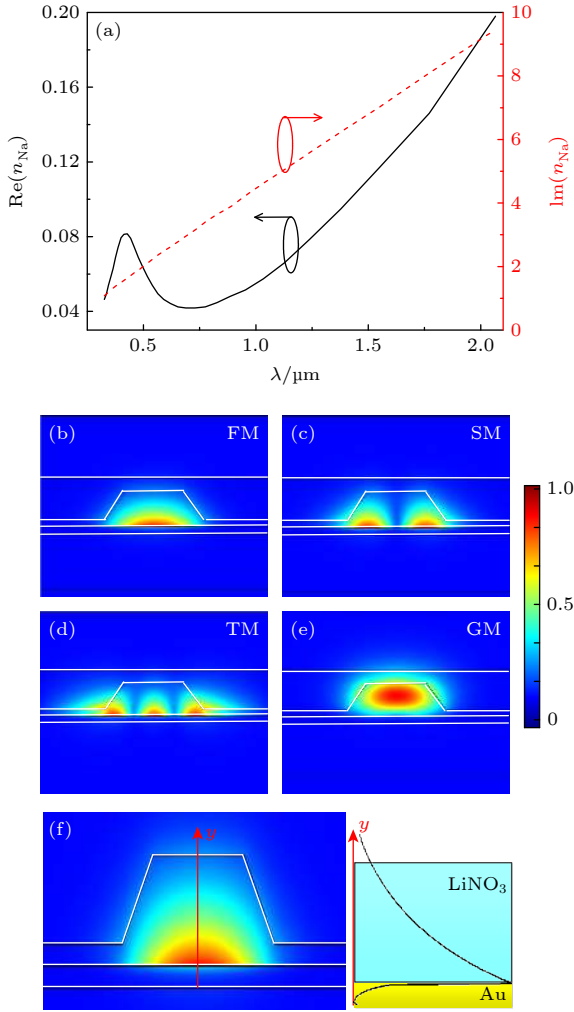


图2 (a) 不同  $\lambda$  时, Na 的折射率实部  $\text{Re}(n_{\text{Na}})$  和虚部  $\text{Im}(n_{\text{Na}})$ . 模场分布图 (b) 基模 (FM); (c) 二阶模 (SM); (d) 三阶模 (TM); (e) 类传导模 (GM). (f) FM 沿  $y$  轴的模场分布

Fig. 2. (a)  $\text{Re}(n_{\text{Na}})$  and  $\text{Im}(n_{\text{Na}})$  of Na with different  $\lambda$ . Mode field distributions of the (b) FM, (c) SM, (d) TM and (e) GM; (f) mode field distribution of the FM along  $y$  axis.

### 3 波导性能优化

为了衡量和优化波导的性能, 对波导的尺寸进行了参数化扫描, 分析了 FM, SM, TM 和 GM 4 个

模式的有效折射率  $n_{\text{eff}}$ 、传播长度  $L_p$  和归一化有效模场面积  $A_{\text{eff}}/A_0$ ,  $A_0 = \lambda^2/4$  表示自由空间中的衍射限制面积.  $L_p$  定义为

$$L_p = \frac{\lambda}{4\pi \text{Im}(n_{\text{eff}})}, \quad (1)$$

其中  $\text{Im}(n_{\text{eff}})$  为  $n_{\text{eff}}$  的虚部.  $A_{\text{eff}}$  反映了波导对模式的束缚能力, 其定义式为

$$A_{\text{eff}} = \frac{1}{\max\{W(x, y)\}} \iint W(x, y) dx dy, \quad (2)$$

其中,  $W(x, y)$  是模式的能量密度.

模式的有效折射率实部  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  随着  $w_1$  和  $h_1$  的变化规律如图 3 所示. 随着  $w_1$  的增加,  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  先增加, 然后基本保持不变; 当  $h_1$  相同时,  $w_1$  越大, 波导中能够容纳的模式数也越多. 从图 3(a)–(d) 可知,  $h_1$  越大, 波导容纳相同数量的模式所需要的  $w_1$  越小.

传播长度  $L_p$  随  $w_1$  和  $h_1$  的变化如图 4 所示. 当  $h_1 = 100, 200$  nm 时, FM 具有较大的  $L_p$ ; 而当  $h_1 = 300, 400$  nm 时, SM 和 TM 可获得较大的  $L_p$ . 这是由于  $w_1$  的增加有利于模式被限制在波导芯层, 减少了辐射损耗, 致使模式的传播长度  $L_p$  增大. FM 主要集中在芯层中心, 波导尺寸的增大对模场的限制能力的影响不大, 而 SM 和 TM 的模式相对 FM 来说比较分散, 波导尺寸的增大会增强对模式的限制.

归一化有效模场面积  $A_{\text{eff}}/A_0$  随  $w_1$  和  $h_1$  的变化如图 5 所示. 由于尺寸增加, 模式的有效模场面积也随之增加, FM 具有较小的模场面积, 可用于非线性器件领域; 而 TM 的模场面积最大, 可用于光信息处理领域.

### 4 电光可调 DC 的耦合特性分析

建立基于 LNSPW 的 DC 的 3D 模型, 如图 6(a) 所示, 入射光从输入端口 (Input) 输入, 端口 2 (Port 2) 为透射端口, 端口 3 (Port 3) 为耦合端口. 利用参数化扫描方法分析 DC 在不同耦合长度 ( $L_c$ )、耦合间距 ( $W_{\text{gap}}$ )、入射光波长 ( $\lambda$ ) 和  $V_0$  时的耦合特性. 图 6(b) 和图 6(c) 为  $V_0 = 100$  V 时 DC 的  $x$ - $y$  截面和  $x$ - $z$  截面的电势分布图.

考虑单模传输, 波导尺寸选择  $w_1 = 300$  nm 和  $h_1 = 200$  nm. 当  $\lambda = 1.55$   $\mu\text{m}$  且  $W_{\text{gap}} = 100$  nm 时, 端口 2 和端口 3 的归一化输出功率 ( $P_{\text{norm}}$ ) 随着  $L_c$  和  $V_0$  的变化规律如图 7 所示. 由图 7(a) 可知,

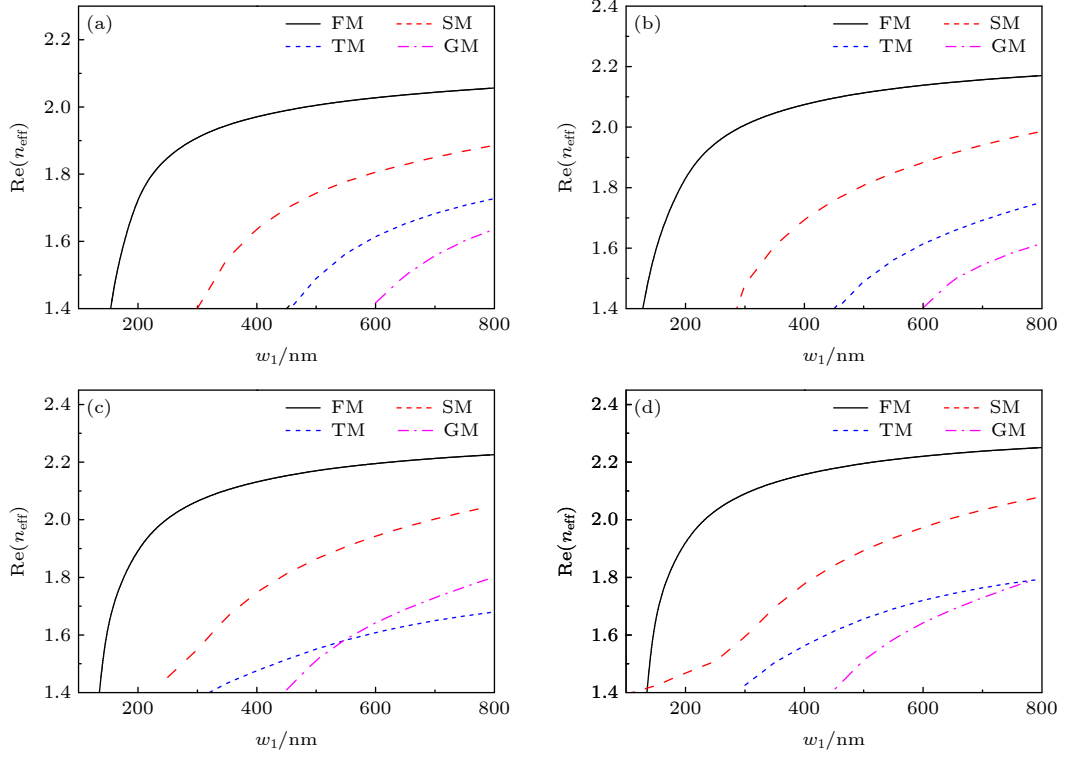


图 3  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  随不同  $w_1$  和  $h_1$  的变化规律 (a)  $h_1 = 100$  nm; (b)  $h_1 = 200$  nm; (c)  $h_1 = 300$  nm; (d)  $h_1 = 400$  nm.  
Fig. 3.  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  as functions of  $w_1$  and  $h_1$ : (a)  $h_1 = 100$  nm; (b)  $h_1 = 200$  nm; (c)  $h_1 = 300$  nm; (d)  $h_1 = 400$  nm.

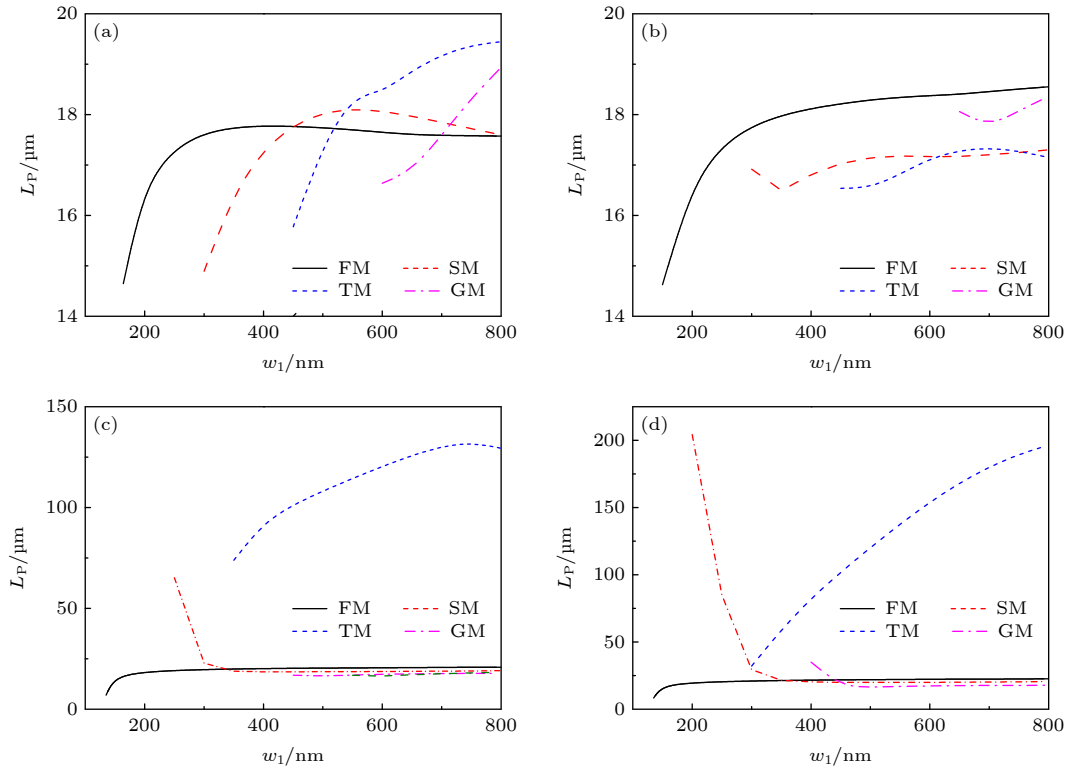


图 4  $L_P$  随  $w_1$  和  $h_1$  的变化规律 (a)  $h_1 = 100$  nm; (b)  $h_1 = 200$  nm; (c)  $h_1 = 300$  nm; (d)  $h_1 = 400$  nm.  
Fig. 4.  $L_P$  with different  $w_1$  and  $h_1$ : (a)  $h_1 = 100$  nm; (b)  $h_1 = 200$  nm; (c)  $h_1 = 300$  nm; (d)  $h_1 = 400$  nm.



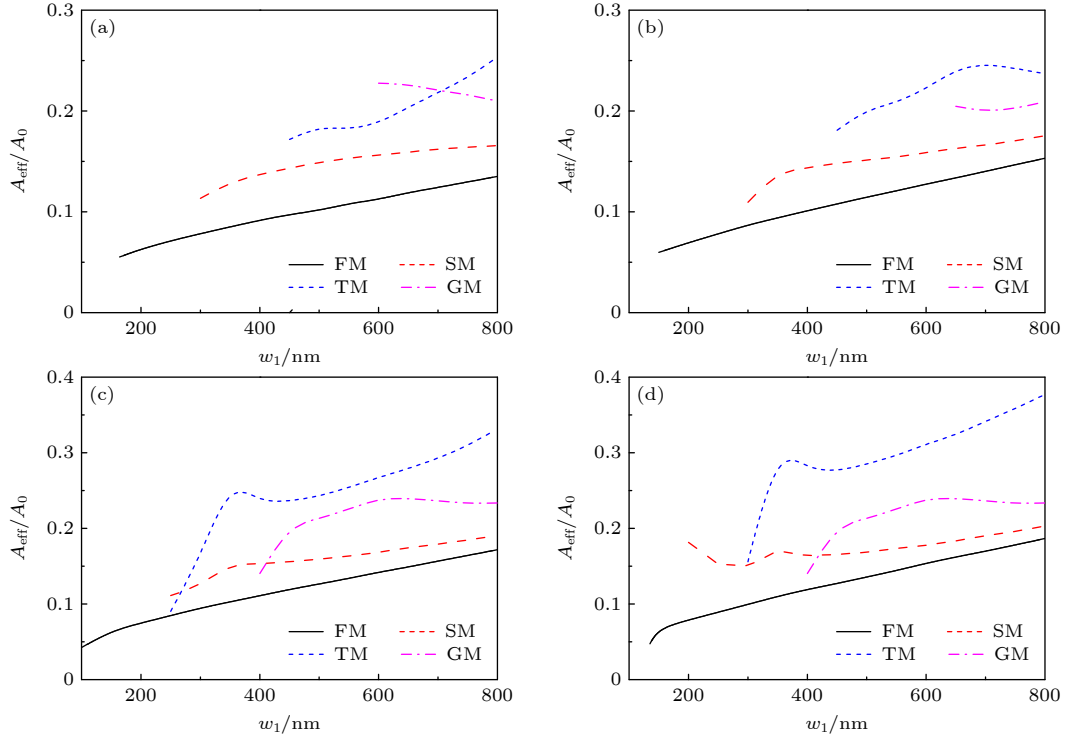


图 5  $A_{\text{eff}}/A_0$  随  $w_1$  和  $h_1$  的变化规律 (a)  $h_1 = 100$  nm; (b)  $h_1 = 200$  nm; (c)  $h_1 = 300$  nm; (d)  $h_1 = 400$  nm  
Fig. 5. Influences of  $w_1$  and  $h_1$  on  $A_{\text{eff}}/A_0$ : (a)  $h_1 = 100$  nm; (b)  $h_1 = 200$  nm; (c)  $h_1 = 300$  nm; (d)  $h_1 = 400$  nm.

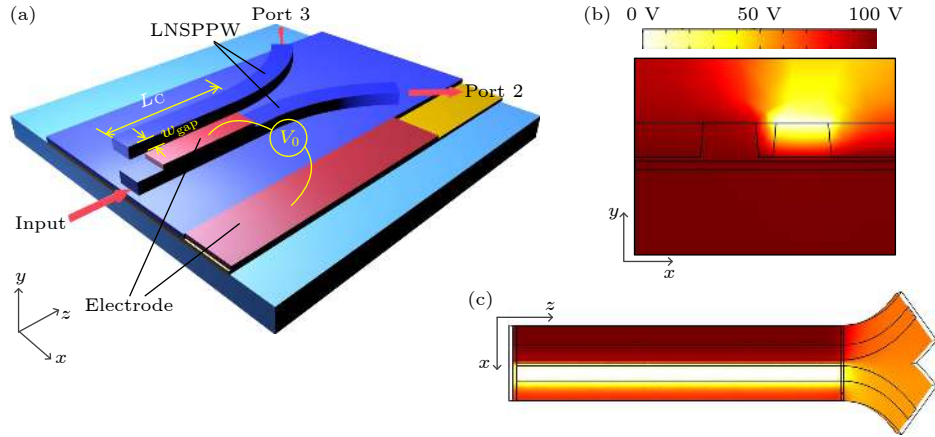


图 6 (a) LNPPW 构成的光电可调 DC 示意图; (b) DC  $x$ - $y$  截面; (c) DC  $x$ - $z$  截面

Fig. 6. (a) Schematic of the electro-optic tunable DC based on the LNPPW; (b) DC cross section in  $x$ - $y$  plane; (c) DC cross section in  $x$ - $z$  plane.

相同  $V_0$  下, 端口 2 和端口 3 的  $P_{\text{norm}}$  随着  $L_C$  的变化而变化, 而且在某些值处两个端口的  $P_{\text{norm}}$  相等, 可实现 3 dB 耦合. 当  $L_C < 10 \mu\text{m}$  时,  $V_0$  对两个端口的  $P_{\text{norm}}$  影响不明显; 而当  $L_C$  继续增大时,  $V_0$  的影响明显增强. 当  $W_{\text{gap}} = 100$  nm 和  $L_C = 17 \mu\text{m}$  时, 通过调节  $V_0$  可改变端口 2 和端口 3 的  $P_{\text{norm}}$  的大小关系, 如图 7(b) 所示. 当  $V_0 = 53$  V 时, 端口 2 和端口 3 的  $P_{\text{norm}}$  相同;  $V_0 < 53$  V 时, 端

口 2 的  $P_{\text{norm}}$  高于端口 3;  $V_0 > 53$  V 时则相反. 由此可见, 通过调节  $V_0$  可以改变耦合器的耦合特性. 当  $V_0 = 0, 53$  和  $90$  V 时, DC 中的电场分布如图 8(a)—(c) 所示.

定向耦合器 DC 的  $L_C$  和  $W_{\text{gap}}$  对耦合特性具有重要的影响, 因此, 利用参数化扫描方法分析了  $L_C$  和  $W_{\text{gap}}$  的变化对端口 2 和端口 3 的  $P_{\text{norm}}$  的影响, 如图 9(a)—(c) 所示. 当  $V_0$  不变时, 两个端

口的  $P_{\text{norm}}$  的大小受  $L_C$  和  $W_{\text{gap}}$  的影响较大; 然而当  $L_C$  和  $W_{\text{gap}}$  不变时, 只有在  $L_C$  和  $W_{\text{gap}}$  较大时  $V_0$  的变化才会明显地改变两个端口的  $P_{\text{norm}}$  的大小. 由图 9(a) 可知, 当  $L_C = 5.3 \mu\text{m}$  和  $W_{\text{gap}} \approx 100 \text{ nm}$  时, 定向耦合器可实现 3 dB 耦合, 此时端口 2 和端口 3 的  $P_{\text{norm}}$  基本相等. 由图 9(b) 和图 9(c) 可知, 当  $L_C$  增大到 12 和  $17 \mu\text{m}$  时, 出现 3 dB 耦合的  $W_{\text{gap}}$  增多. 要想实现定向耦合的可调特性, 需要设置较长的  $L_C$  和较宽的  $W_{\text{gap}}$ .

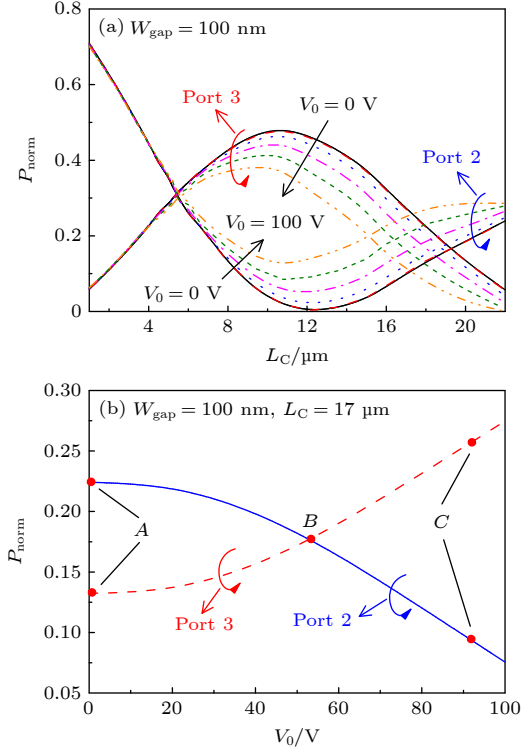


图 7 (a) LNSPW 构成的 DC 端口 2 和端口 3 的  $P_{\text{norm}}$  随  $L_C$  和  $V_0$  的变化图; (b)  $L_C = 17 \mu\text{m}$  时, 端口 2 和端口 3 的  $P_{\text{norm}}$

Fig. 7.  $P_{\text{norm}}$  of the Port 2 and Port 3 in the DC based on the LNSPW (a) with different  $L_C$  and  $V_0$ , and (b) with different  $V_0$  as  $L_C = 17 \mu\text{m}$ .

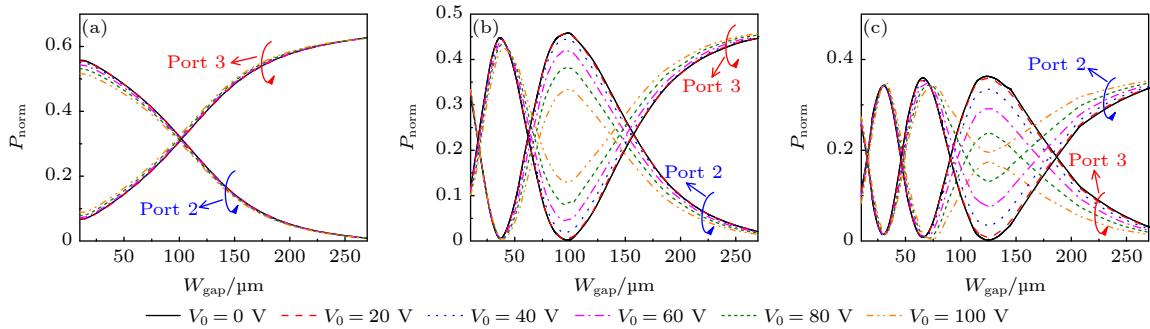


图 9 不同  $L_C$  和  $V_0$  时,  $W_{\text{gap}}$  对  $P_{\text{norm}}$  的影响 (a)  $L_C = 5.3 \mu\text{m}$ ; (b)  $L_C = 12 \mu\text{m}$ ; (c)  $L_C = 17 \mu\text{m}$

Fig. 9.  $P_{\text{norm}}$  as a function of  $W_{\text{gap}}$  with different  $L_C$  and  $V_0$ : (a)  $L_C = 5.3 \mu\text{m}$ ; (b)  $L_C = 12 \mu\text{m}$ ; (c)  $L_C = 17 \mu\text{m}$ .

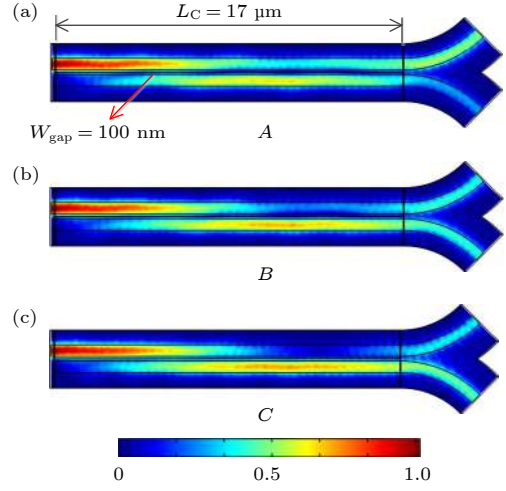


图 8 LNSPW 构成的 DC 的电场分布图 (a)  $V_0 = 0 \text{ V}$ ; (b)  $V_0 = 53 \text{ V}$ ; (c)  $V_0 = 90 \text{ V}$

Fig. 8. Mode field distributions of the DC based on the LNSPW: (a)  $V_0 = 0 \text{ V}$ ; (b)  $V_0 = 53 \text{ V}$ ; (c)  $V_0 = 90 \text{ V}$ .

图 10(a) 和图 10(b) 为不同  $\lambda$  时, 端口 2 和端口 3 的  $P_{\text{norm}}$  随  $L_C$  和  $W_{\text{gap}}$  的变化规律. 由图 10(a) 可知, 随着  $\lambda$  从  $1.39 \mu\text{m}$  增大到  $1.79 \mu\text{m}$ , DC 发生全耦合和 3 dB 耦合所需  $L_C$  逐渐变短, 而且端口 3 的  $P_{\text{norm}}$  也有所提升; 相反, DC 发生全耦合和 3 dB 耦合所需  $W_{\text{gap}}$  变宽, 如图 10(b) 所示. 因此,  $L_C$  和  $W_{\text{gap}}$  的合理设置可以实现不同波长的分束功能. 另外, 由于  $V_0$  对  $P_{\text{norm}}$  的调控功能, 基于 LNSPW 的 DC 可实现耦合特性的调节以满足不同的需求.

定向耦合器性能的衡量指标主要有分束比 (splitting ratio, SR)、插入损耗 (insertion loss, IL)、通过损耗 (through put loss,  $L_{\text{THP}}$ )、搭线 (耦合) 损耗 (trop loss,  $L_{\text{TP}}$ )、方向性 (directionality,  $L_{\text{DI}}$ )、隔离度 (isolation,  $L_{\text{IS}}$ ), 这些指标的定义式为

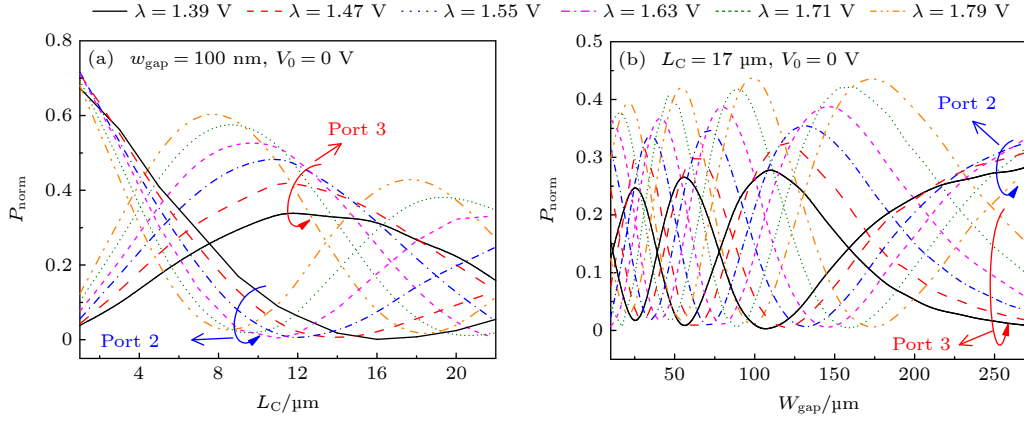

 图 10 不同  $\lambda$  时,  $P_{\text{norm}}$  随 (a)  $L_C$  和 (b)  $W_{\text{gap}}$  的变化

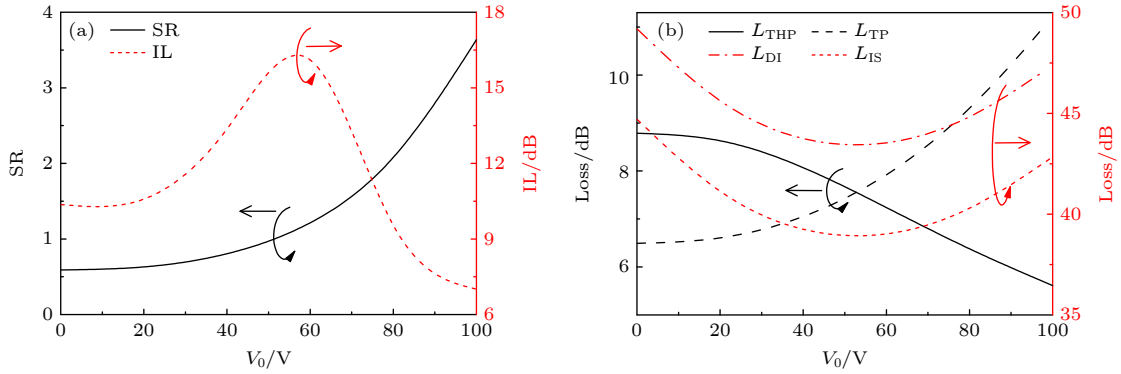
 Fig. 10.  $P_{\text{norm}}$  as functions of (a)  $L_C$  and (b)  $W_{\text{gap}}$  with different  $\lambda$ .

 图 11  $V_0$  定向耦合的性能指标的影响 (a) SR 和 IL; (b)  $L_{\text{THP}}$ ,  $L_{\text{TP}}$ ,  $L_{\text{DI}}$  和  $L_{\text{IS}}$ 

 Fig. 11. Influences of  $V_0$  on the performances of the DC based on the LNSPW: (a) SR and IL; (b)  $L_{\text{THP}}$ ,  $L_{\text{TP}}$ ,  $L_{\text{DI}}$ , and  $L_{\text{IS}}$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{SR} = \frac{P_2}{P_3}, \\ \text{IL} = -10\log_2 \frac{P_2 - P_3}{P_1} (\text{dB}), \\ L_{\text{THP}} = -10\log_2 \frac{P_2}{P_1} (\text{dB}), \\ L_{\text{TP}} = -10\log_2 \frac{P_3}{P_1} (\text{dB}), \\ L_{\text{DI}} = -10\log_2 \frac{P_4}{P_1} (\text{dB}), \\ L_{\text{IS}} = -10\log_2 \frac{P_4}{P_2 + P_3} (\text{dB}). \end{array} \right. \quad (3)$$

选定  $L_C = 17 \mu\text{m}$  和  $W_{\text{gap}} = 100 \text{ nm}$ , 定向耦合器的性能指标随  $V_0$  的变化如图 11(a) 和图 11(b) 所示. 图 11(a) 显示, 当  $V_0 = 53 \text{ V}$  时,  $\text{SR} = 1$ , 可实现 3 dB 耦合, 由于端口 2 和端口 3 光功率平分, 引起的 IL 较大. 由图 11(b) 可知, DC 具有较好的方向性和隔离度.

## 5 结 论

本文通过建立 LNSPW 的 2D 和 3D 有限元模型, 研究了波导的模式特性和传输特性, 并通过参数化扫描方法优化了波导的性能. 结果表明: 当  $h_1 < 200 \text{ nm}$  时, FM 具有较大的  $L_P$ ; 而当  $h_1 > 300 \text{ nm}$  时, SM 和 TM 可获得较大的  $L_P$ . FM 具有较小的模场面积; 而 TM 的模场面积最大. 通过研究 LNSPW 构成的 DC 的电光调制特性表明: 当  $L_C$  和  $W_{\text{gap}}$  不变时, 在  $L_C$  和  $W_{\text{gap}}$  较大时  $V_0$  的变化对端口 2 和端口 3  $P_{\text{norm}}$  的大小关系影响比较大. 当  $W_{\text{gap}} = 100 \text{ nm}$  和  $L_C = 17 \mu\text{m}$  时,  $V_0$  调节到 53 V 时, 端口 2 和端口 3 的输出功率相同, 可实现 3 dB 耦合, 而且 LNSPW 构成的 DC 具有较好的方向性和隔离度. 由于 LNSPW 的电光可调特性, 除了可用于可调耦合器的设计外, 还在非线性光学、光信号处理及光全息存储等领域有广阔的应用前景.



## 参考文献

- [1] Zhang Q, Li M, Xu J, Lin Z J, Yu H F, Wang M, Fang Z W, Cheng Y, Gong Q H, Li Y 2019 *Photonics Res.* **7** 503
- [2] Liu S J, Zheng Y L, Chen X F 2021 *Acta Opt. Sin.* **41** 0823013 (in Chinese) [刘时杰, 郑远林, 陈险峰 2021 *光学学报* **41** 0823013]
- [3] Wang C, Zhang M, Chen X, Bertrand M, Shams-Ansari A, Chandrasekhar S, Winzer P, Lončar M 2018 *Nature* **562** 101
- [4] Kues M, Reimer C, Roztocki P, Cortés L R, Sciara S, Wetzel B, Zhang Y B, Cino A, Chu S T, Little B E, Moss D J, Caspani L, Azaña J, Morandotti R 2017 *Nature* **546** 622
- [5] Janner D, Tulli D, García-Granda M, Belmonte M, Pruneri V 2009 *Laser Photonics Rev.* **3** 301
- [6] Li G L, Jia Y C, Chen F 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 157801 (in Chinese) [李庚霖, 贾曰辰, 陈峰 2020 *物理学报* **69** 157801]
- [7] Poberaj G, Hu H, Sohler W, Günter P 2012 *Laser Photonics Rev.* **6** 488
- [8] Levy M, Osgood R M, Liu R, Cross L E, Cargill G S, Kumar A, Bakhru H 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 2293
- [9] Wang C, Burek M J, Lin Z, Atikian H A, Venkataraman V, Huang I C, Stark P, Lončar M 2014 *Opt. Express* **22** 30924
- [10] Zhang M, Wang C, Cheng R, Shams-Ansari A, Lončar M 2017 *Optica* **4** 1536
- [11] Lin J T, Xu Y X, Fang Z W, Wang M, Wang N W, Qiao L L, Fang W, Cheng Y 2015 *Sci. China-Phys. Mech. Astron.* **58** 114209
- [12] Wu R B, Zhang J H, Yao N, Fang W, Qiao L L, Chai Z F, Lin J T, Cheng Y 2018 *Opt. Lett.* **43** 4116
- [13] Qiao L L, Wang M, Wu R B, Fang Z W, Lin J T, Chu W, Cheng Y 2021 *Acta Opt. Sin.* **41** 0823012 (in Chinese) [乔玲玲, 汪旻, 伍荣波, 方致伟, 林锦添, 储蔚, 程亚 2021 *光学学报* **41** 0823012]
- [14] Wu R B, Wang M, Xu J, Qi J, Chu W, Fang Z W, Zhang J H, Zhou J X, Qiao L L, Chai Z F, Lin J T, Cheng Y 2018 *Nanomaterials* **8** 910
- [15] Lin J T, Yao N, Hao Z Z, Zhang J H, Mao W B, Wang M, Chu W, Wu R B, Fang Z W, Qiao L L, Fang W, Bo F, Cheng Y 2019 *Phys. Rev. Lett.* **122** 173903
- [16] Jia Y C, Wang L, Chen F 2021 *Appl. Phys. Rev.* **8** 011307
- [17] Yang L K, Li P, Wang H C, Li Z P 2018 *Chin. Phys. B* **27** 094216
- [18] Boltasseva A, Atwater H A 2011 *Science* **331** 290
- [19] Khurgin J B 2015 *Nat. Nanotechnol.* **10** 2
- [20] Naik G V, Shalae V M, Boltasseva A 2013 *Adv. Mater.* **25** 3264
- [21] Prucha E J, Palik E D 1998 *Handbook of Optical Constants of Solids II* (London: Academic Press) p354
- [22] Wang Y, Yu J Y, Mao Y F, Chen J, Wang S, Chen H Z, Zhang Y, Wang S Y, Chen X J, Li T, Zhou L, Ma R M, Zhu S N, Cai W S, Zhu J 2020 *Nature* **581** 401
- [23] Tsilipakos O, Yioultsis T V, Kriezis E E 2009 *J. Hazard Mater.* **106** 93109
- [24] Jiang A Q, Geng W P, Lv P, Hong J W, Jiang J, Wang C, Chai X J, Lian J W, Zhang Y, Huang R, Zhang D W, Scott J F, Hwang C S 2020 *Nat. Mater.* **19** 1188

# Electro-optic tunable directional coupler based on a LiNbO<sub>3</sub>/Na surface plasmonic waveguide\*

Ma Tao<sup>1)</sup>   Ma Jia-He<sup>1)</sup>   Liu Heng<sup>1)2)†</sup>   Tian Yong-Sheng<sup>1)</sup>  
Liu Shao-Hui<sup>1)</sup>   Wang Fang<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> (*Henan Key Laboratory of Optoelectronic Sensing Integrated Application, College of Electronic and Electrical Engineering, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China*)

<sup>2)</sup> (*Academician Workstation of Electromagnetic Wave Engineering of Henan Province, Xinxiang 453007, China*)

( Received 30 June 2021; revised manuscript received 29 November 2021 )

## Abstract

To meet the increasing demand of integrated photonic device design, a LiNbO<sub>3</sub>/Na surface plasmonic waveguide (LNSPW) is demonstrated, and a directional coupler (DC) based on the LNSPW is also studied. The mode characteristics of the LNSPW and the coupling performances of the DC are simulated by the finite element method (FEM). There are four modes in the LNSPW when its width ( $w_1$ ) and the thickness ( $h_1$ ) are less than 600 nm and 400 nm, respectively. The number of the modes in the LNSPW increases with waveguide size increasing. To achieve the single-mode propagation,  $w_1$  and  $h_1$  are chosen to be 300 nm and 200 nm, respectively. The effective refractive index ( $n_{\text{eff}}$ ), propagation length ( $L_p$ ), and normalized effective mode area ( $A_{\text{eff}}/A_0$ ) are analyzed with different dimensional parameters of the LNSPW. The value of  $L_p$  is  $\sim 200$   $\mu\text{m}$ , and  $A_{\text{eff}}/A_0$  is less than 0.4. In order to demonstrate the electro-optic tunable performance, the normalized output power ( $P_{\text{norm}}$ ) values of the DC are calculated based on the LNSPWs with different values of coupling interval ( $W_{\text{gap}}$ ), coupling length ( $L_C$ ), and operating wavelength ( $\lambda$ ). The  $P_{\text{norm}}$  values of the output ports (port 2 and port 3) vary with  $W_{\text{gap}}$  and  $L_C$ . Owing to the electro-optic effect of LiNbO<sub>3</sub> (LN),  $P_{\text{norm}}$  of the DC can be adjusted by changing the applied electrostatic voltage ( $V_0$ ). The influence of  $V_0$  on  $P_{\text{norm}}$  increases when  $W_{\text{gap}}$  is larger than 100 nm and  $L_C$  is greater than 12  $\mu\text{m}$ . The larger the value of  $L_C$  and  $W_{\text{gap}}$ , the stronger the effect of  $V_0$  on  $P_{\text{norm}}$  is, but  $P_{\text{norm}}$  values from two output ports decrease with  $W_{\text{gap}}$  and  $L_C$  increasing. A 3 dB coupler can be achieved by changing  $V_0$  to 53 V when  $W_{\text{gap}} = \sim 100$  nm,  $L_C = \sim 17$   $\mu\text{m}$ , and  $\lambda = 1.55$   $\mu\text{m}$ , and has good directivity and isolation. The LNSPW provides a feasible scheme to realize the tunable DC, and has potential applications in integratable electro-optic tunable devices, nonlinear optics, optical signal processing, and optical holographic storage.

**Keywords:** LiNbO<sub>3</sub> waveguide, electro-optical device, surface plasmonic, directional coupler

**PACS:** 42.79.Gn, 78.20.Jq, 42.82.-m

**DOI:** 10.7498/aps.71.20211217

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62075057) and the Doctoral Program of Henan Normal University, China (Grant Nos. gd17167, 5101239170010).

† Corresponding author. E-mail: [hengmaggie@163.com](mailto:hengmaggie@163.com)