

宽带近红外表面等离子激元逻辑与门器件的设计

朱梦均¹, 张大伟^{1,3,4}, 陈建农²

- (1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093; 2. 鲁东大学, 山东 烟台 264025;
3. 教育部光学仪器与系统工程研究中心, 上海 200093;
4. 上海现代光学系统重点实验室, 上海 200093)

摘要: 提出了一种宽带近红外表面等离子激元逻辑与门纳米结构。两个输入端由相互平行的狭缝天线构成的近红外宽带定向表面等离子激元耦合器构成。这种放置在圆弧上的耦合器阵列纳米结构在径向偏振光照射下表面等离子激元具有聚焦特性。两个相同的这种圆弧形纳米结构产生的表面等离子激元聚焦光斑分别由两个槽型波导传输到输出端叠加干涉。在发生线性干涉时, 两个振幅相同, 偏振方向一致, 相位差为零的表面等离子激元干涉强度为单个圆弧形纳米结构产生的表面等离子激元强度的 4 倍。理论分析了结构和器件原理, 并用时域有限差分法软件模拟了输入输出逻辑关系以及宽带特性。

关键词: 表面等离子激元; 逻辑与门; 径向偏振光; 定向耦合器; 干涉

中图分类号: O53 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0320003

Design of broadband near infrared surface plasmonic polaritons logic AND gates device

Zhu Mengjun¹, Zhang Dawei^{1,3,4}, Chen Jiannong²

- (1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Ludong University, Yantai 264025, China;
3. Engineering Research Center of Optical Instrument and System, Ministry of Education, Shanghai 200093, China;
4. Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, Shanghai 200093, China)

Abstract: A nanostructure of broadband surface plasmons logic AND gate was presented. The two input ports were composed of broadband infrared directional couplers which were a pair of two parallel slot nano-antennas milled into gold film. An array of couplers arranged on an arc-shaped circle was capable of focusing the surface plasmons to the circular center when it was illuminated with radially polarized beam. The same two focused surface plasmons spots were coupled into two groove-shaped waveguides, respectively, and then interfered each other at the cross point. The intensity was four times that of intensity produced by a single arc-shaped nanostructure when two arc-shaped nanostructures produced the surface plasmons in the center with the same amplitude, polarization direction and zero phase difference. The nanostructure and device principle were theoretically analyzed. The relation between input ports and

收稿日期: 2015-07-05; 修订日期: 2015-08-20

作者简介: 朱梦均(1991-), 女, 硕士生, 主要从事表面等离子体超分辨率成像方面的研究。Email: 597305447@qq.com

导师简介: 张大伟(1977-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事微纳光学方面的研究。Email: dwzhang@usst.edu.cn

output port along with broadband property were simulated with the finite difference in time domain method.

Key words: surface plasmon polaritons; logic AND gate; radially polarized beam; directional coupler; interference

0 引言

表面等离子激元由于局域在金属表面的近场范围以及波长较短的特性,为光子学器件的集成化和小型化提供了非常有效的途径。表面等离子激元的调控及其器件的研究成为当前的纳米光子学热点。如表面等离子激元透镜^[1],表面等离子激元分束器^[2-3],表面等离子激元定向耦合器^[4],表面等离子激元波导^[5-6],表面等离子激元波分复用器^[7]以及表面等离子激元数字逻辑器件^[8-10]。参考文献[4]报道的近红外表面等离子激元定向耦合器单元由两个刻蚀在金膜上的平行狭缝天线对组成。每个狭缝的宽度,深度和长度以及两个狭缝之间的距离都是确定的。在垂直于狭缝方向的线偏振外场激发下,每个狭缝天线沿金属表面向两侧发射表面等离子激元。当狭缝天线参数满足一定条件时,可以使沿一个方向的表面等离子激元实现相消干涉,沿另一个方向的表面等离子激元实现增强干涉,从而实现表面等离子激元的定向发射。该定向表面等离子激元耦合器在中心波长 830 nm 附近带宽 157 nm 的范围内,可以实现至少消光比 16 的定向性能。这种定向耦合单元在器件的小型化和集成化时,不会在附近的纳米结构引起有害的耦合和噪音。参考文献[6]报道了一种刻蚀在金膜表面的槽型波导。表面等离子激元模式紧密地压缩在金膜和空气的分界面上。这种结构的波导展示出几十微米的超长传播长度以及光场压缩在亚波长尺寸波导里的优良特性,并且可以用波长 830 nm 附近一定带宽范围内的连续激光激发。输出表面等离子激元信号与输入表面等离子激元信号比较衰减较小。目前,表面等离子激元逻辑门器件输入端多由刻蚀在金属表面的光栅结构耦合^[8,10]。而由纳米线构成的表面等离子激元逻辑门器件则直接由入射光照明纳米线一端进行耦合,由纳米线本身传输信号^[9]。参考文献中也未见有关于近红外波段的表

面等离子激元逻辑门器件。

文中提出了一种利用上述近红外定向表面等离子激元耦合器和槽型波导结构组成一个近红外双输入端表面等离子激元逻辑与门器件。利用偏振相同,相位差固定的两束表面等离子激元线性干涉获得逻辑与门真值输出。理论分析了设计原理,并用时域有限差分法软件 FDTD solutions 模拟了输入输出与门逻辑关系。

1 逻辑门结构与原理

刻蚀在金属膜上的纳米狭缝可以当作偶极子纳米天线,在激发光作用下可以沿金属表面向外辐射表面等离子激元^[11]。当两个狭缝天线平行放置时(如图 1 所示),可构成一个定向单元耦合器。图 1 的结构和参数是引用了参考文献[4]中狭缝天线对的结构和参数。整个耦合器是在二氧化硅基底上镀一层厚度为 H 的金膜,并用聚焦离子束刻蚀一对宽为 W ,长度分别为 L_1 和 L_2 ,相距为 D 的狭缝。这样的结构被称作非对称光学狭缝天线对。每个狭缝都有不同的共振性质。他们都可以将从二氧化硅基底一边垂直入射的,沿 X 轴偏振的自由空间传播的激发光束耦合成沿金膜和空气交界面传播的表面等离子激元。其初始位相设为 φ_1 和 φ_2 。当狭缝尺寸远小于表面等离子激元波长 λ_{SPP} 时,则两个狭缝光学天线在远场都可以认为是点光源。每个点光源发出的电场在 X 轴方向的分量可以写成偶极子的电场形式:

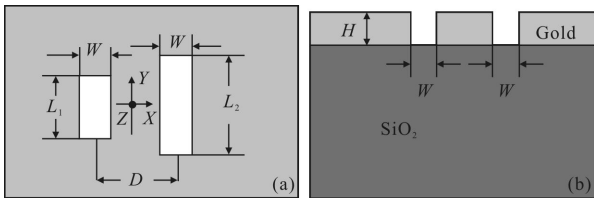
$$E_x(r, \theta) = E_0 \cos^2 \theta \exp(-r/\delta) \cos(\omega t - 2\pi r/\lambda_{SPP}) / (\sqrt{r}) \quad (1)$$

式中: δ 为 SPPs 的传播长度。两个 SPPs 点光源发出的光场沿正负 X 轴方向传播并相互干涉。在忽略相邻天线散射的情况下,假定 SPPs 传播长度和沿 X 轴考察点距离远大于两个狭缝天线之间距离 D 时,则沿 X 轴正向和沿 X 轴负向干涉强度分布 I_{+SPP} 和 I_{-SPP} 可以表示为^[14]:

$$I_{+SPP} \approx \left| CA_1 \frac{\exp(-x/\delta)}{\sqrt{x}} \exp\left\{i\left[k_{SPP}\left(x + \frac{D}{2}\right) + \varphi_1\right]\right\} + CA_2 \frac{\exp(-x/\delta)}{\sqrt{x}} \exp\left\{i\left[k_{SPP}\left(x - \frac{D}{2}\right) + \varphi_2\right]\right\} \right|^2 \quad (2)$$

$$I_{-SPP} \approx \left| -CA_1 \frac{\exp(-x/\delta)}{\sqrt{-x}} \exp\left\{i\left[-k_{SPP}\left(x+\frac{D}{2}\right)+\varphi_1\right]\right\} - CA_2 \frac{\exp(-x/\delta)}{\sqrt{-x}} \exp\left\{i\left[-k_{SPP}\left(x-\frac{D}{2}\right)+\varphi_2\right]\right\} \right|^2 \quad (3)$$

式中:初始相位 φ_1 和 φ_2 决定于天线参数和入射激发波长; C 为常数。 A_1 和 A_2 是狭缝中心位置的振幅; $k_{SPP}=2\pi/\lambda_{SPP}$ 。由公式(3)可以看出:当 $A_1=A_2$, $(\varphi_2-\varphi_1)+k_{SPP}D=\pi$ 同时满足时, $I_{-SPP}=0$ 。由此实现 X 轴正向的 SPP 单向传播。而当 $(\varphi_2-\varphi_1)=\pi/2$ 和 $k_{SPP}D=\pi/2$ 时, I_{+SPP} 又可以达到最大, 从而实现最大的消光比 I_{+SPP}/I_{-SPP} 。但是 $A_1=A_2$ 和 $(\varphi_2-\varphi_1)=\pi/2$ 不可能在一个很宽的波段里同时实现。因此, 宽波段和最大的消光比不可能同时实现。通过改变狭缝长度和波长的一系列模拟结果表明: 狭缝长度的变化可以改变两个狭缝耦合的 SPPs 的相位差 $\Delta\varphi=(\varphi_2-\varphi_1)$, 并能在较宽的波段内实现 $A_1=A_2$ 。利用时域有限差分法模拟软件 FDTD solutions 计算结果表明: 当 $L_1=225\text{ nm}$, $L_2=260\text{ nm}$, $W=80\text{ nm}$, 金膜厚度 $H=200\text{ nm}$ 时, 在 $773\sim 930\text{ nm}$ 波段范围内, $A_1=A_2$ 基本满足。在 830 nm 处, $\Delta\varphi=(\varphi_2-\varphi_1)=38^\circ$, 因此, 为了满足 $(\varphi_2-\varphi_1)+k_{SPP}D=\pi$, 可以选择确定 $D=320\text{ nm}$ 。如果定义消光比 $\eta=I_{+SPP}/I_{-SPP}$, 计算表明在此波长范围内, $\eta>15$ 。 $\lambda=810\text{ nm}$ 时, 消光比达到最大 $\eta_{\max}=44$ 。因此, 如果定义 $\eta>15$ 的波长范围为带宽, 则该耦合器带宽大于 157 nm 。



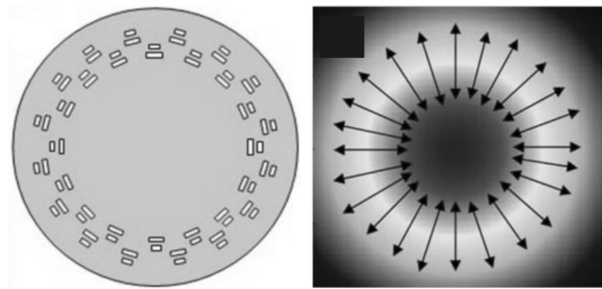
(a) 俯视图 (b) 侧视图
(a) Top view (b) Side view

图 1 具有表面等离子激元定向耦合功能的平行狭缝天线对结构示意图

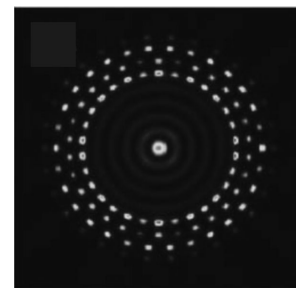
Fig.1 Structure schematic of the two parallel slot antennas which have the function for SPPs directional coupling

如图 2 所示, 将上述定向耦合单元等间距安排在两个内半径为 $1\ 500\text{ nm}$, 外半径为 $2\ 200\text{ nm}$ 的圆周上。内环上的耦合器单元和外环上的耦合器单元分别相互错开。两个这样的圆形结构分别用径向偏振光照明, 则对圆周上每一个耦合器单元来说, 均为线偏振照明激发。因此, 每一个单元都是一个近红外定向表面等离子激元耦合器。激发的表面等离子激元均

向圆心传播, 那么在中心将形成一个压缩的纳米尺度光斑。如果进一步采用参考文献[6,10]中提出的近红外槽型波导(如图 3 所示), 将此光斑耦合到波导进行传播, 则此光斑成为波导一端的输入信号源。将两个完全一样的环形结构和波导结构组合在一起, 并使两个波导在输出端叠加, 即可以构成如图 4 所示的表面等离子激元逻辑门。



(a) 由近红外定向表面等离子激元耦合单元构成的圆形纳米结构 (b) 径向偏振光源
(a) Circular nanostructures composed of near-infrared directional SPPs coupling unit (b) Radial polarized light source



(c) 时域有限差分法模拟的聚焦结果

(c) Simulated focusing nanospot with the finite difference in time domain

图 2 径向偏振光激发圆形纳米结构的强度分布

Fig.2 Intensity of circular nanostructure excited by radial polarized light

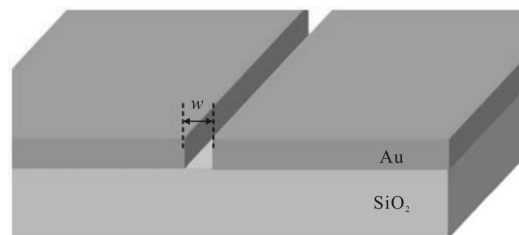


图 3 在金膜上刻蚀的槽型波导

Fig.3 Groove waveguide etched on the gold film

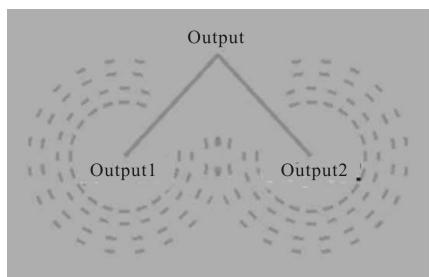


图 4 逻辑与门结构原理图

Fig.4 Structure of logic AND gates

2 逻辑门输入和输出关系模拟

在图 4 中, 当左侧和右侧圆形纳米结构从基底二氧化硅底部分别用径向偏振光照明时, 在输入端 1 和输入端 2 位置分别形成两个光斑, 并分别耦合到槽型波导, 这时输出端信号为两个波导传播过来的表面等离子激元叠加干涉。偏振分量方向一致, 相位差为零时, 干涉增强。在制作这个器件时可以用聚焦离子束刻蚀, 因此可以精确控制波导长度, 使得光程差远小于半个波长。可以定义这时的输出端信号为“1”。当只有一个圆形纳米结构被照明时, 则只有一个输入端有表面等离子激元耦合到波导。输出端表面等离子激元信号强度远小于两个输入端同时有信号时而产生的增强干涉强度。可以定义这时的输出端信号为“0”。同理, 当两个圆形纳米结构均不被照明时, 输出端信号强度则更小, 同样可以定义这时的输出端信号为“0”。因此, 上述分析表明, 这个纳米结构构成近红外双输入端表面等离子激元逻辑与门器件。

为了进一步验证这个器件的可行性, 采用了时域有限差分法软件 FDTD solutions 8.6 设计了这个结构, 并模拟了逻辑门的输入输出真值关系。这个结构定向耦合器单元参数为 $L_1=225\text{ nm}$, $L_2=260\text{ nm}$, $W=80\text{ nm}$, $H=200\text{ nm}$ 。槽型波导宽度和深度均为 100 nm , 波导长度为 $3\ 390\text{ nm}$ 。入射激光波长范围为 $570\sim 950\text{ nm}$ 。在输出端以及离开输出端 10 nm 和 20 nm 的位置放置 3 个垂直于波导和金膜表面的监视器, 如图 5 所示。图 6 为监视器上强度模拟结果。其中图 6(a)、(b)和(c)为一个输入端有表面等离子激元输入时输出端的强度分布; 图 6(d)、(e)和(f)为两个输入端均有表面等离子激元输入时输出端的强度分布。从强度标尺可以看到, 仅有一个输入端有输入信号和两个输入端均有输入信号时, 输出端信号强度相差 4 倍以

上。这是由于两个输入端均有输入信号时, 输出端可以产生增强干涉的结果。理论上, 当振幅、位相、偏振满足增强干涉时, 干涉结果输出端对应点之间应该是单个输入时的 4 倍, 但模拟结果强度最大值超过 4 倍。将这个结果归因于输出端微结构的尖端增强效应以及在模拟时微结构位置参数的设计误差。如果将仅有一个输入端有输入信号时, 输出信号强度 $I_{\text{output}}(1, 0) = I \approx 0$, 而两个输入端均有输入信号时, 输出信号强度 $I_{\text{output}}(1, 1) \geq 4I \approx 1$ 。根据前面的分析, 这个结构器件可以实现双输入端表面等离子激元逻辑与门的功能。

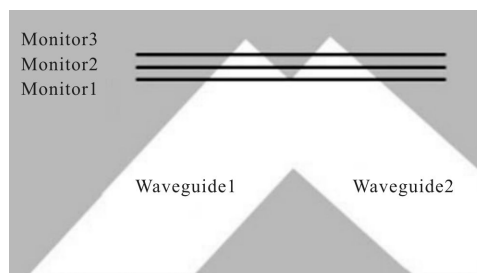


图 5 输出端 3 个监视器位置示意图

Fig.5 Schematic diagram of three monitors at output port

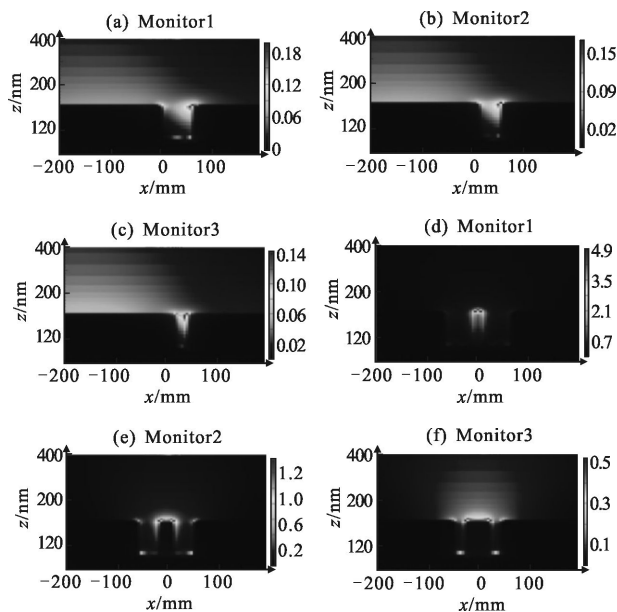


图 6 3 个监视器上的表面等离子激元强度模拟结果

Fig.6 Simulation results of SPPs intensity on the three monitors

图 7 为同一监视器上表面等离子激元强度分布的光谱特性。其中实线表示只有一个输入端有输入信号时的输出信号强度光谱特性, 而虚线表示两个输入端均有输入信号时的输出信号强度光谱特性。该图表明: 第一, 该逻辑门是在近红外有一定带宽的逻

辑门器件;第二,无论是单个输入端有信号,还是两个输入端都有信号,不同波段的输出强度有显著差异,因此作为逻辑门真值对应输出强度判断标准应该依据波长而定。

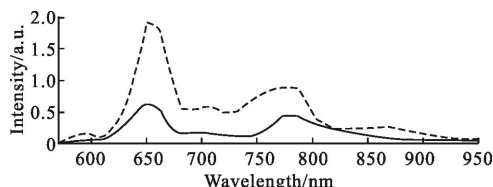


图 7 监视器 3 表面等离激元强度分布的光谱特性

Fig.7 Spectral characteristics of SPPs intensity distribution

3 结论

文中提出了一种基于近红外定向表面等离激元耦合单元和近红外槽型波导而构成的近红外表面等离激元逻辑与门器件的结构和原理。对其中的定向耦合单元进行了较详细的理论分析,并对由定向耦合单元构造的表面等离激元逻辑与门器件输入端信号压缩方式进行了原理描述。最后,利用时域有限差分法软件模拟了该逻辑与门器件的输入输出逻辑真值关系。结果表明:该器件设计原理和方法是可行的,而且是一个近红外有一定带宽的表面等离激元逻辑与门器件。

参考文献:

[1] Chen Jiannong, Zhu Linwei, Wang Feifei, et al. An integrated multistage nanofocusing system [J]. *Plasmonics*, 2013, 8: 1559-1565.

[2] Lin Jiao, Mueller J P Balthasar, Wang Qian, et al. Polarization-controlled tunable directional coupling of surface plasmon polaritons[J]. *Science*, 2013, 340: 331-334.

[3] Lee Seung-Yeol, Yun Hansik, Lee Yohan, et al. Switchable surface plasmon dichroic splitter modulated by optical polarization[J]. *Laser Photonics Rev*, 2014, 8(5): 777-784.

[4] Yang Jing, Xiao Xiao, Hu Chuang, et al. Broadband surface plasmon polariton directional coupling via asymmetric optical slot nanoantenna pair[J]. *Nano Lett*, 2014, 14: 704-709.

[5] Wang Zhuoxian, Wei Hong, Pan Deng, et al. Controlling the radiation direction of propagating surface plasmons on silver nanowires[J]. *Laser Photonics Rev*, 2014, 10: 1-6.

[6] Dionne J A, Sweatlock L A, Atwater H A, et al. Plasmon slot waveguides: towards chip-scale propagation with subwavelength-scale localization[J]. *Phys Rev B*, 2006, 73:035407.

[7] Li Lin, Li Tao, Wang Shuming, et al. Broad band focusing and demultiplexing of in-plane propagating surface plasmons [J]. *Nano Lett*, 2011, 11: 4357-4361.

[8] Wang Yulin, Li Tao, Wang Lei, et al. Plasmonic switch based on composite interference in metallic strip waveguides [J]. *Laser Photonics Rev*, 2014, 8(4): 47-51.

[9] Wei Hong, Wang Zhuoxian, Tian Xiaorui, et al. Cascaded logic gates in nanophotonic plasmon networks [J]. *Nature Communications*, 2011, 10: 1038.

[10] Fu Yulan, Hu Xiaoyong, Lu Cuicui, et al. All-optical logic gates based on nanoscale plasmonic slot waveguides [J]. *Nano Lett*, 2012, 12: 5784-5790.

[11] Takuo Tanemura, Balram Krishna C, Dany-Sebastien Ly-Gagnon, et al. Multiple-wavelength focusing of surface plasmons with a nonperiodic nanoslit coupler [J]. *Nano Lett*, 2011, 11: 2693-2698.