

基于微纳波导四波混频效应的全光逻辑实现

王鲁俊 闫连山 郭迎辉 温坤华 陈智宇 潘 炜 罗 斌

(西南交通大学信息光子与通信研究中心, 四川 成都 610031)

摘要 研究填充非线性材料的金属-介质-金属(MIM)平面波导中的四波混频(FWM)效应,针对该类基于表面等离子体(SP)局域增强和双折射特性的微纳器件,具体分析了不同偏振态抽运光输入所对应的 FWM 过程。在厚度为 250 nm 的波导中,当入射抽运偏振态相同时 FWM 效应最强,FWM 效率达到 -33 dB;在入射抽运偏振态正交时 FWM 效应最弱,没有闲频波产生。在厚度为 50 nm 的波导中由于 SP TE 模式截止,仅在入射抽运偏振态均为 TM 时 FWM 效率达到 -30 dB,其他偏振态下没有闲频波产生。利用上述特性可以制作基于 FWM 的微纳全光逻辑器件。

关键词 非线性光学;表面等离子体;微纳波导;四波混频;双折射效应

中图分类号 O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0419002

Optical Logic Gate Based on Four-Wave Mixing in Subwavelength Metallic Waveguide

Wang Lujun Yan Lianshan Guo Yinghui Wen Kunhua Chen Zhiyu
Pan Wei Luo Bin

(Center for Information Photonics and Communications, Southwest Jiaotong University,
Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract Four-wave mixing (FWM) effect in metal-insulator-metal (MIM) waveguide filled with a Kerr nonlinear medium is investigated, followed by the study about polarization-dependent FWM in such nanoplasmonic structures due to the local enhancement effect of surface plasmons (SP) and birefringent characteristics. When the pumps with the polarization parallel to each other are launched into the waveguide with 250-nm thickness, the FWM efficiency reaches -33 dB. However, when the pumps are perpendicularly polarized, idler waves can not be obtained. For the waveguide with 50-nm thickness, when the pumps are both TM polarized, the FWM efficiency reaches -30 dB. While under other polarization states of pumps, idler waves can not be observed due to the cut off of TE modes. Such FWM-based mechanisms are utilized to construct all-optical logical gates.

Key words nonlinear optics; surface plasmons; nano-waveguide; four-wave mixing; birefringence effect

OCIS codes 240.6680; 190.4380; 260.1440

1 引 言

随着信息社会的快速发展,人们对通信的需求也呈现爆炸式增长。表面等离子体(SP)以其强局域特性使得器件尺寸得以缩小到纳米量级,并且能够显著地增强材料的非线性效应,从而成为设计高

效、紧凑全光集成器件的理想方案^[1~10]。

近年来,研究人员结合非线性材料与 SP 的特性实现了明显的光束聚焦、开关效应和双稳态效应^[11~13]。同时也利用 SP 实现增强非线性二次谐波激发效率^[14],并设计了在微纳尺度上产生四波混

收稿日期: 2012-12-05; **收到修改稿日期**: 2012-12-28

基金项目: 国家 973 计划(2011CB301800)和国家自然科学基金(61275068)资助课题。

作者简介: 王鲁俊(1989—),男,硕士研究生,主要从事非线性表面等离子体方面的研究。

E-mail: wanglj2007@foxmail.com

导师简介: 闫连山(1971—),男,教授,博士生导师,主要从事光子学与光通信、光纤传感与光检测等方面的研究。

E-mail: lsyan@home.swjtu.edu.cn

频(FWM)的结构^[15]。然而上述研究仅考虑了抽运光强度对非线性过程的影响,忽略了抽运光偏振态在非线性过程中起到的作用。

本文基于非线性金属-介质-金属(MIM),利用非线性材料与SP的特性实现FWM的同时,更注重研究了抽运光偏振态在其中所起到的关键作用及影响,进而利用这些机制实现了微纳尺度的全光逻辑器件设计。由于SP对非线性效应的增强,波导长度仅需要1 μm。同时结合抽运光的偏振态,利用MIM波导中SP的双折射特性实现了对FWM过程的有效控制,观察到明显的FWM效应与抽运光偏

振态的逻辑关系。

2 MIM结构中基于偏振的FWM过程的理论分析

2.1 保偏波导中的FWM机制

在FWM过程中,光波频率分别为 $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$,当三个不同频率的光通过各向同性的非线性波导时将激发FWM效应, $\omega_4 = \omega_1 + \omega_2 - \omega_3$ 。

假设光的传播方向为 z ,则在 x, y 方向上的非线性极化可以表示为^[16]

$$P_x^{NL}(\omega_4) = D \sum_{j=x,y} [\chi_{1122}^{(3)} E_x(\omega_1) E_j(\omega_2) E_j(\omega_3)^* + \chi_{1212}^{(3)} E_j(\omega_1) E_x(\omega_2) E_j(\omega_3)^* + \chi_{1221}^{(3)} E_j(\omega_1) E_j(\omega_2) E_x(\omega_3)^*], \quad (1)$$

$$P_y^{NL}(\omega_4) = D \sum_{j=x,y} [\chi_{1122}^{(3)} E_y(\omega_1) E_j(\omega_2) E_j(\omega_3)^* + \chi_{1212}^{(3)} E_j(\omega_1) E_y(\omega_2) E_j(\omega_3)^* + \chi_{1221}^{(3)} E_j(\omega_1) E_j(\omega_2) E_y(\omega_3)^*], \quad (2)$$

式中 $E_j(\omega_p)$ ($p = 1, 2, 3, 4$, 且 $j = x, y$)表示 j 方向上频率为 ω_p 的光波的电场振幅, $\chi_{1122}^{(3)}, \chi_{1212}^{(3)}$ 与 $\chi_{1221}^{(3)}$ 表示三阶非线性系数张量分量,*表示复共轭, D 表示简并系数。将(1)式和(2)式代入非线性波动方程得到^[17]

$$E_x^{NL}(l) = i \frac{2\pi l}{nc} \exp\left[\left(ik_{4x} - \frac{\alpha}{2}\right)l\right] \cdot D\{\chi_{1122}^{(3)} [E_{2x}(0)E_{3x}(0)^* + E_{2y}(0)E_{3y}(0)^*] E_{1x}(0) + \chi_{1212}^{(3)} [E_{1x}(0)E_{3x}(0)^* + E_{1y}(0)E_{3y}(0)^*] E_{2x}(0) + \chi_{1221}^{(3)} [E_{1x}(0)E_{2x}(0) + E_{1y}(0)E_{2y}(0)] E_{3x}(0)^*\}, \quad (3)$$

$$E_y^{NL}(l) = i \frac{2\pi l}{nc} \exp\left[\left(ik_{4y} - \frac{\alpha}{2}\right)l\right] \cdot D\{\chi_{1122}^{(3)} [E_{2x}(0)E_{3x}(0)^* + E_{2y}(0)E_{3y}(0)^*] E_{1y}(0) + \chi_{1212}^{(3)} [E_{1x}(0)E_{3x}(0)^* + E_{1y}(0)E_{3y}(0)^*] E_{2y}(0) + \chi_{1221}^{(3)} [E_{1x}(0)E_{2x}(0) + E_{1y}(0)E_{2y}(0)] E_{3y}(0)^*\}, \quad (4)$$

式中 $E_{bj}(0)$ 为 $z = 0$ 时的电场强度, $E_j^{NL}(l)$ 表示在 $z = l$ 处电场的非线性项。 n 为折射率, c 为真空中的光速, k_{4j} 为 j 方向上频率为 ω_4 的光波的传播常数, α 为波导的损耗系数, l 为传播距离, $l_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha l)]/\alpha$ 为等效长度。

考虑(3)式和(4)式的简并形式 $\omega_1 = \omega_2$,并将(3)式和(4)式改写为

$$E_x^{NL}(l) = i \frac{2\pi l}{nc} \exp\left[\left(ik_{4x} - \frac{\alpha}{2}\right)l\right] \cdot D\{\chi_{1122}^{(3)} + \chi_{1212}^{(3)} [E_{1x}(0)^2 E_{3x}(0)^* + E_{1x}(0)E_{1y}(0)E_{3y}(0)^*] + \chi_{1221}^{(3)} [E_{1x}(0)^2 E_{3x}(0)^* + E_{1y}(0)^2 E_{3x}(0)^*]\}, \quad (5)$$

$$E_y^{NL}(l) = i \frac{2\pi l}{nc} \exp\left[\left(ik_{4y} - \frac{\alpha}{2}\right)l\right] \cdot D\{\chi_{1122}^{(3)} + \chi_{1212}^{(3)} [E_{1x}(0)E_{1y}(0)E_{3x}(0)^* + E_{1y}(0)^2 E_{3y}(0)^*] + \chi_{1221}^{(3)} [E_{1x}(0)^2 E_{3y}(0)^* + E_{1y}(0)^2 E_{3y}(0)^*]\}. \quad (6)$$

在保偏波导中,不妨设电场 x 方向极化的波为TM波, y 方向极化的波为TE波。 $E^{NL}(e_1, e_3) = E_x^{NL}(e_1, e_3) + E_y^{NL}(e_1, e_3)$ 表示频率为 ω_p 的光波的偏振态为 e_p 时,电场的非线性项。取偏振态为TM与TE,在简并情况下容易得到

$$E_{\text{TM, TM}}^{NL} = i \frac{2\pi l}{nc} \exp\left[\left(ik_{4x} - \frac{\alpha}{2}\right)l\right] \cdot D[\chi_{1122}^{(3)} + \chi_{1212}^{(3)} + \chi_{1221}^{(3)} [E_{1x}(0)^2 E_{3x}(0)^*], \quad (7)$$

$$E_{\text{TE, TE}}^{NL} = i \frac{2\pi l}{nc} \exp\left[\left(ik_{4x} - \frac{\alpha}{2}\right)l\right] \cdot D[\chi_{1122}^{(3)} + \chi_{1212}^{(3)} + \chi_{1221}^{(3)} [E_{1y}(0)^2 E_{3y}(0)^*], \quad (8)$$

$$E_{\text{TM, TE}}^{NL} = i \frac{2\pi l}{nc} \exp\left[\left(ik_{4x} - \frac{\alpha}{2}\right)l\right] \cdot D[\chi_{1221}^{(3)} E_{1x}(0)^2 E_{3y}(0)^*], \quad (9)$$

$$E_{\text{TE, TM}}^{NL} = i \frac{2\pi l}{nc} \exp\left[\left(ik_{4x} - \frac{\alpha}{2}\right)l\right] \cdot D[\chi_{1221}^{(3)} E_{1y}(0)^2 E_{3x}(0)^*]. \quad (10)$$

在各项同性介质中可以将三阶非线性系数表示为^[18]

$$\chi_{1111}^{(3)} = \chi_{1122}^{(3)} + \chi_{1212}^{(3)} + \chi_{1221}^{(3)}, \quad (11)$$

$$\chi_{1122}^{(3)} = \chi_{1212}^{(3)} = \chi_{1221}^{(3)}. \quad (12)$$

在不考虑相位失配的情况下,抽运偏振态正交时有效的三阶非线性系数 $\chi^{(3)}$ 为抽运偏振态相同时的 $1/3$ ^[17]。

考虑相位失配对 FWM 效率的影响。定义相位失配因子为^[19]

$$\Delta k = \Delta k_L + \Delta k_{NL}, \quad (13)$$

$$\Delta k_L = (\bar{n}_3 \omega_3 + \bar{n}_4 \omega_4 - \bar{n}_1 \omega_1 - \bar{n}_2 \omega_2)/c, \quad (14)$$

$$\Delta k_{NL} = -\gamma(P_1 + P_2 - P_3) \frac{1 - \exp(-al_{\text{eff}})}{al_{\text{eff}}}, \quad (15)$$

式中 Δk_L 与 Δk_{NL} 为相位失配因子的线性与非线性项, \bar{n}_p 代表有效折射率, P_p 为光功率,非线性系数 $\gamma = 2\pi n_2/(\lambda A_{\text{eff}})$, n_2 与 A_{eff} 分别为非线性折射率与波导等效面积。

效率因子 η 的表达式为^[19]

$$\eta = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta k^2} \left\{ 1 + \frac{4 \exp(-al) \sin^2(\Delta kl/2)}{[1 - \exp(-al)]^2} \right\}. \quad (16)$$

通过(16)式可以知道效率因子 η 是关于 Δk 与 α 的函数。容易得出 η 随着 Δk 增大而减小。定义相干长度 $l_{\text{coh}} = \pi/\Delta k$,只有在 $l < l_{\text{coh}}$ 时才会产生显著的 FWM 效应^[17]。

2.2 MIM 波导中的 FWM 仿真模型

图 1 为非线性 MIM 波导的示意图。整个结构由非线性材料的波导与金属包层组成,其中 w 为介质厚度, L 为波导长度, S_p 表示频率为 ω_p 的入射抽运光源。选择包层的材料为金属银^[20]。非线性材料折射率的线性部分为 $n_0 = 1.5$, $\chi^{(3)}$ 为非线性光学材料 InGaAsP 的典型值 $\chi^{(3)} = 4 \times 10^{-18} \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-2}$ ^[21]。抽运光的波长为 $\lambda_1 = 587.8 \text{ nm}$, $\lambda_3 = 576.5 \text{ nm}$ 。电

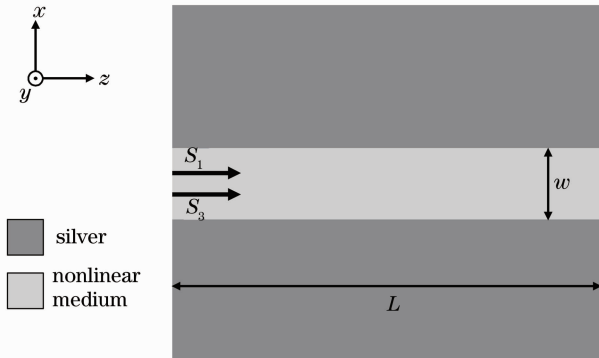


图 1 MIM 波导示意图

Fig. 1 Schematic view of MIM waveguide

场振幅为 $E_1(0) = E_3(0) = 1 \times 10^8 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 。波导的长度 $L = 1 \mu\text{m}$ 。

分析在 MIM 波导中不同偏振态下 SP 的传播特性。在 TM 偏振态与 TE 偏振态下等效折射率 n_{eff} 分别表示为^[22]

$$\epsilon_m \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - \epsilon_d} \tanh(\omega\pi \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - \epsilon_d}/\lambda) + \epsilon_d \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - \epsilon_m} = 0, \quad (17)$$

$$\sqrt{n_{\text{eff}}^2 - \epsilon_d} \tanh(\omega\pi \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - \epsilon_d}/\lambda) + \sqrt{n_{\text{eff}}^2 - \epsilon_m} = 0, \quad (18)$$

式中 ϵ_m 与 ϵ_d 表示金属与电介质的介电常数。

根据(17)式和(18)式分别计算 SP 在 MIM 波导中 TM 与 TE 模式下的波长范围。通过计算得到,在 TM 模式下 SP 在大于其截止波长的波长范围内传输;而 TE 模式下 SP 在小于其截止波长的波长范围内传输。

图 2 表示不同波导介质厚度下模式的截止波长。随着波导介质厚度的增加, TM 模式的截止波长保持为 340 nm, TE 模式的截止波长由 320 nm 增加至 730 nm。当选择较大的厚度时,在一定频率范围内 TM 与 TE 模式均能存在。

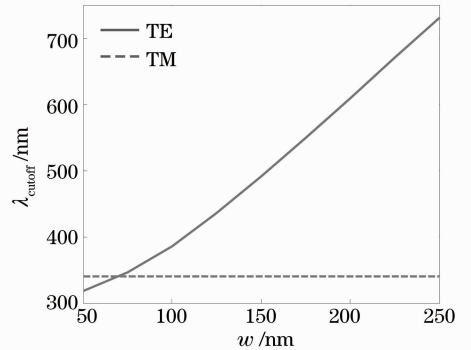


图 2 不同波导介质厚度下 SP 模式的截止波长

Fig. 2 Cutoff wavelength of SP modes under different waveguide thicknesses

根据上述分析选取 $w = 250 \text{ nm}$,在如图 3 所示的频率范围内, TM 偏振态下 $n_{\text{eff}} \approx 1.4$, TE 偏振态下 $n_{\text{eff}} < 0.9$,其等效折射率差值为 Δn_{eff} ,这可以等效为材料的双折射效应。

考虑 MIM 波导的双折射特性对 FWM 效应的影响。在上述结构中由(17)式和(18)式解得 $\alpha \approx 0.00775 \text{ m}^{-1}$,记相等的人射抽运功率 $P_p = P_0$ 。计算(15)式得

$$[1 - \exp(-al_{\text{eff}})]/al_{\text{eff}} \approx 1, \quad (19)$$

$$\Delta k_{NL} = -\gamma P_0 \quad (\text{nondegenerated FWM}), \quad (20)$$

$$\Delta k_{NL} = -2\gamma P_0 \quad (\text{degenerated FWM}), \quad (21)$$

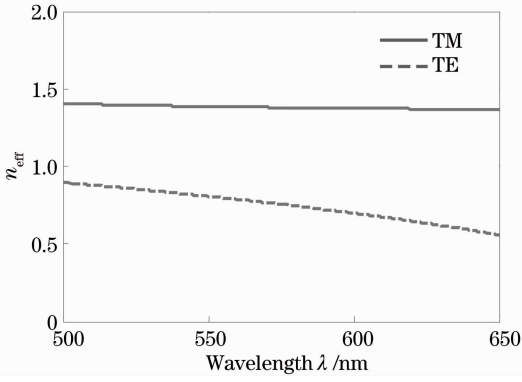


图3 $\omega=250$ nm 时不同偏振态下的等效折射率
Fig. 3 Effective refractive index under different polarized pumps when $\omega=250$ nm

令 $\gamma P_0 = (2\pi/\lambda)g_{NL}$, $g_{NL} = n_2 P_0/A_{eff}$. 计算得 g_{NL} 的数量级为 10^{-2} . 同时将线性失配因子简化为 $\Delta k_L \approx (2\pi/\lambda)g_L$, $g_L = \bar{n}_3 + \bar{n}_4 - \bar{n}_1 - \bar{n}_2$.

在入射抽运偏振态相同的情况下, 计算(17)式和(18)式得到 g_L 的量级为 10^{-5} . 将相干长度改写为 $l_{coh} = \pi/\Delta k \approx \lambda/2g$, $g = g_L - 2g_{NL}$. g 的数量级在 $10^{-1} \sim 10^{-2}$, 从而满足 $l < l_{coh}$, 能够产生明显的 FWM 效应。

在入射抽运偏振态正交的情况下, 由于不同方向上等效折射率的不同导致相位失配因子 $\Delta k_L \approx 2|k_x - k_y|$, $g \approx g_L \approx 1$. 相干长度 $l > l_{coh}$, 不能产生明显的 FWM 效应。

综上所述, 当抽运光偏振态相同时相位失配量没有超过允许的最大值, 能够产生显著的 FWM 效应; 当抽运光偏振态正交时相位失配导致不能产生 FWM 效应。

3 仿真结果与应用

为了验证 2 节的理论分析, 对图 1 所示的结构进行仿真. 并定义 FWM 效率为

$$\eta_{FWM} = P_{FWM}/(P_1 + P_3). \quad (22)$$

3.1 FWM 同或逻辑门

选取厚度 $\omega = 250$ nm, 选择高斯脉冲抽运光源, 利用时域有限差分(FDTD)方法进行仿真, 获得结果如图 4 所示, 在 ω_1 与 ω_3 偏振态正交时产生明显的 FWM 效应, 在波长 599.6 nm 处 FWM 效率达到 -33 dB. 在 ω_1 与 ω_3 偏振态正交时则没有闲频波产生. 这一结果与 2.2 节中的理论分析能够很好地吻合。

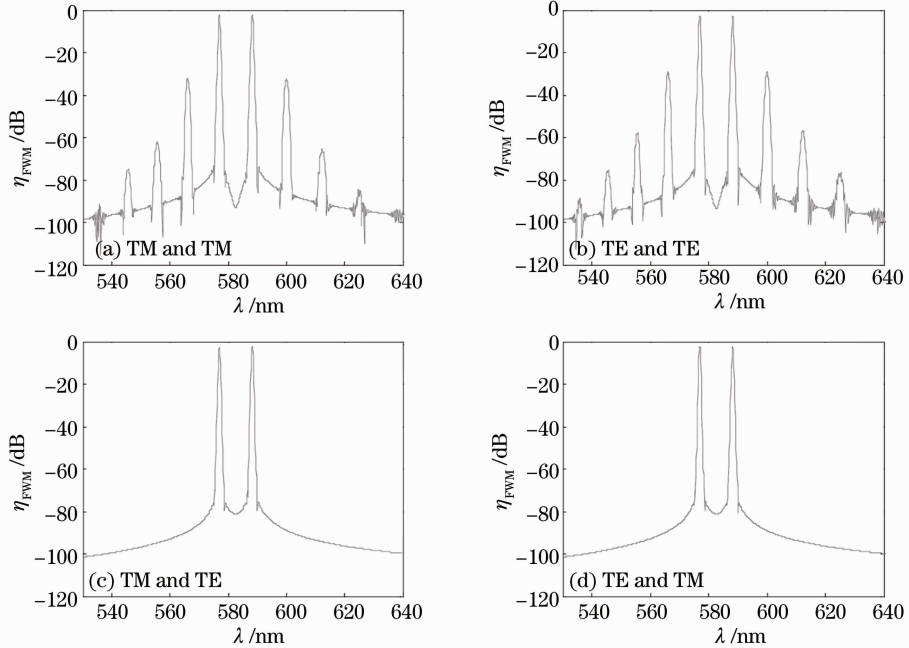


图4 $\omega=250$ nm 时, S_1 与 S_3 不同偏振态下波导的 FWM 效率

Fig. 4 FWM efficiency under different polarized S_1 and S_3 when $\omega=250$ nm

利用非线性 MIM 波导内 FWM 与抽运光偏振态相关的特性可以控制信号的传输. 不妨将 TM 偏振态的入射光设为二进制数码“1”, TE 偏振态的入射光设为二进制数码“0”. 设置判决门限为 -50 dB, 当选

定频谱透射率高于门限时编码为“1”, 反之为“0”. 根据上述描述, 将厚度为 250 nm 的非线性 MIM 波导关于偏振的传输特性归纳如表 1 所示. 在逻辑上可以认为该结构为一个同或(XNOR)门。

表 1 FWM 同或逻辑门
Table 1 FWM XNOR logical gate

Polarization state of ω_1	Polarization state of ω_3	FWM efficiency $\eta_{\text{FWM}}/\text{dB}$	Transmission coding
1	1	-33	1
0	0	-33	1
1	0	No idler waves	0
0	1	No idler waves	0

3.2 FWM 与门

下面考虑厚度为 50 nm 的非线性 MIM 波导结构的 FWM 透射特性。

由(11)式和(12)式分析得到 MIM 波导厚度为 50 nm 时在抽运光波长上 SP 的 TE 模式截止。这意味着仅在偏振态为 TM 时 SP 才能够传播并产生

FWM 效应。如图 5(a)所示在偏振态均为 TM 时 599.6 nm 处 FWM 效率达到 -30 dB,在其他偏振态下没有闲频波产生。将上述结果归纳为表 2,逻辑上可以认为厚度为 50 nm 的非线性 MIM 波导为一个与(AND)门。

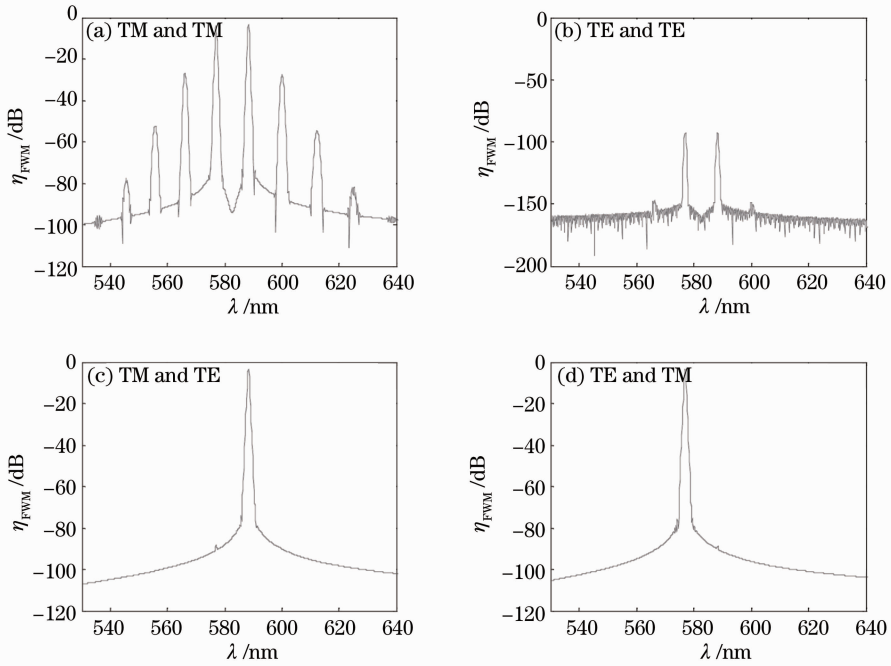


图 5 $w=50$ nm 时, S_1 与 S_3 不同偏振态下波导的 FWM 效率

Fig. 5 FWM efficiency under different polarized S_1 and S_3 when $w=50$ nm

表 2 FWM 与门
Table 2 FWM AND logical gate

Polarization state of ω_1	Polarization state of ω_3	FWM efficiency $\eta_{\text{FWM}}/\text{dB}$	Transmission coding
1	1	-30	1
0	0	No idler waves	0
1	0	No idler waves	0
0	1	No idler waves	0

值得指出的是,上述结果都是在理想状态下分析与仿真得到的,实际器件制作过程中可能由于工艺精度以及偏振控制精度等在 FWM 效率上有所出入,但逻辑关系应该可以保证。

4 结 论

根据经典 FWM 理论分析了在非线性 MIM 波导中偏振与波导双折射对 FWM 过程的影响。通过将非线性 MIM 波导等效为双折射介质解释了在抽

运光正交时 FWM 效应不能产生的原因。并利用这一特性结合 SP 传播模式设计了基于 FWM 的逻辑器件。

参 考 文 献

- 1 Y. Guo, L. Yan, W. Pan *et al.*. A plasmonic splitter based on slot cavity [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(15): 13831~13838
- 2 F. Hu, H. Yi, Z. Zhou. Band-pass plasmonic slot filter with band selection and spectrally splitting capabilities [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(6): 4848~4855
- 3 L. Chen, S. He, L. Shen. Finite-size effects of a left-handed material slab on the image quality [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(10): 107404
- 4 X. Zhang, Z. Ma, H. Yu *et al.*. Plasmonic resonance of whispering gallery modes in an Au cylinder [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(5): 3902~3907
- 5 H. Lu, X. Liu, D. Mao *et al.*. Induced transparency in nanoscale plasmonic resonator systems [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(16): 3233~3235
- 6 Chen Juan, Yan Lianshan, Pan Wei *et al.*. Arbitrary polarization transformation based on two-dimensional metallic rectangular gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1224001
陈娟, 闫连山, 潘炜等. 二维金属矩形光栅的偏振控制及其透射特性[J]. *光学学报*, 2011, **31**(12): 1224001
- 7 Gan Fuxi, Wang Yang. Breaking through the optical diffraction limits, developing the nano-optics and photonics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900104
于福熹, 王阳. 突破光学衍射极限, 发展纳米光学和光子学[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900104
- 8 Guan Chunying, Yuan Libo, Shi Jinhui. Microstructured-fiber surface plasmon resonance sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0206003
关春颖, 苑立波, 史金辉. 微孔光纤表面等离子体共振传感特性分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 0206003
- 9 Zhang Xingfang, Zhang Lamei, Fan Qunfang *et al.*. Tunable localized surface plasmon resonance of gold nanoshell particle [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0910001
张兴坊, 张腊梅, 范群芳等. 金纳米球壳结构局域表面等离子体共振调谐特性[J]. *中国激光*, 2011, **38**(9): 0910001
- 10 Ma Weitao, Zhou Jun, Huang Shuiping *et al.*. Characteristic of subwavelength dielectric grating with metal layer and its sensing applications [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0905008
马伟涛, 周骏, 黄水平等. 金属膜衬底上亚波长介质光栅结构的特性及传感应用[J]. *中国激光*, 2011, **38**(9): 0905008
- 11 C. Min, P. Wang, C. Chen *et al.*. All-optical switching in subwavelength metallic grating structure containing nonlinear optical materials [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(8): 869~871
- 12 C. Min, P. Wang, X. Jiao *et al.*. Beam manipulating by metallic nano-optic lens containing nonlinear media [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(15): 9541~9546
- 13 G. A. Wurtz, R. Pollard, A. V. Zayats. Optical bistability in nonlinear surface-plasmon polaritonic crystals [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **97**(5): 057402
- 14 Z. F. Bi, A. W. Rodriguez, H. Hashemi *et al.*. High-efficiency second-harmonic generation in doubly-resonant $\chi(2)$ microring resonators [J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(7): 7526~7543
- 15 E. Poutrina, C. Ciraci, D. J. Gauthier *et al.*. Enhancing four-wave-mixing processes by nanowire arrays coupled to a gold film [J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(10): 11005~11013
- 16 K. Inoue. Polarization effect on four-wave mixing efficiency in a single-mode fiber [J]. *IEEE J. Quantum Electronics*, 1992, **28**(14): 883~894
- 17 K. O. Hill, D. C. Johnson, B. S. Kawasaki *et al.*. CW three-wave mixing in single-mode optical fibers [J]. *J. Appl. Phys.*, 1978, **49**(10): 5098~5106
- 18 R. W. Boyd. *Nonlinear Optics* (3rd ed.) [M]. Waltham: Academic Press, 2008. 213~214
- 19 S. Song, C. T. Allen, K. R. Demarest *et al.*. Intensity-dependent phase-matching effects on four-wave mixing in optical fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(11): 2285~2290
- 20 E. Palik. *Handbook of Optical Constants of Solids* [M]. New York: Academic Press, 1985. 350
- 21 G. Zheng, W. Su, Y. Chen *et al.*. Band-stop filters based on a coupled circular ring metal-insulator-metal resonator containing nonlinear material [J]. *J. Opt.*, 2012, **14**(5): 055001
- 22 J. A. Dionne, L. A. Sweatlock, H. A. Atwater. Plasmon slot waveguides: towards chip-scale propagation with subwavelength-scale localization [J]. *Phys. Rev. B*, 2006, **73**(3): 035407

栏目编辑: 李文喆