

信号噪声对微纳波导中四波混频效应的影响分析

张先涛 闫连山 郭迎辉 王鲁俊 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 基于微纳波导中的四波混频效应(FWM)可以实现相应的光逻辑功能,研究了在这类非线性波导中,信号噪声对四波混频效应的影响。针对通信系统中常见的高斯噪声,具体分析了在金属-介质-金属(MIM)结构的波导中,输入信号光分别受到幅度噪声、频率噪声、相位噪声以及加性噪声影响之后对四波混频效应的各种影响。结果表明,在相位噪声的平均功率增大到 1.44 以上时,基于四波混频所产生闲频光的归一化强度小于 -40 dB,远低于无噪声时的 -18 dB,非线性效率出现较大降低;而当信号光受其他噪声影响时,四波混频产生闲频光的强度与无噪声时基本相同。由此可得,四波混频对相位噪声比较敏感,而其他类型的噪声对四波混频无明显影响。

关键词 非线性光学;金属-介质-金属波导;四波混频;高斯噪声

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.s105003

Analyses of Noise on the Four-Wave-Mixing Effect in Micro-Nano Waveguides

Zhang Xiantao Yan Lianshan Guo Yinghui Wang Lujun Pan Wei Luo Bin

(Center for Information Photonics & Communications, Southwest Jiaotong University,

Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract Optical logics can be achieved by utilizing four-wave-mixing (FWM) effects in micro-nano waveguides. We analyze the contributions of signal noise onto the efficiency of FWM in such nonlinear waveguides. Since Gaussian noise exists extensively in most practical systems, we analyze the FWM process of the input signals, which are affected by amplitude noise, frequency noise, phase noise and additive noise in the metal-insulator-metal (MIM) waveguides. Results show that, with the average power of the phase noise increasing over 1.44, the normalization intensity of the idle light generated in the FWM process is less than -40 dB, compared to -18 dB without noise, indicating a significantly reduction of nonlinear efficiency. However, if the signals are affected by other kinds of noise, the intensity of the idle light is nearly the same as that without noise. Therefore, FWM process in such waveguides is sensitive to Gaussian phase noise, while it's not sensitive to other kinds of noise.

Key words nonlinear optics; metal-insulator-metal waveguide; four-wave-mixing; Gaussian noise

OCIS codes 190.4380; 240.4350; 160.4330

1 引 言

以表面等离子体(SPs)微纳器件为代表的集成光子技术近年来受到广泛关注,成为下一代全光集成光路的理想解决方案之一^[1-3]。由于集成光路同时涉及多种功能器件(如开关、耦合、逻辑门、转换等)^[4-6],利用非线性材料与SPs特性相结合为相关

功能的实现提供了新的途径,包括光束聚焦、开关效应、双稳态效应^[7-10]等,以及微纳尺度四波混频实现光逻辑等^[11]。然而类似研究都是考虑理想的信号(没有噪声),而实际应用中无论是光源(抽运)还是传输中的放大器等都可能带来各种噪声,因此,有必要考虑噪声影响下的非线性效应综合表现。

收稿日期: 2013-10-06; 收到修改稿日期: 2013-11-08

基金项目: 国家 973 计划(2013CBA01704)、国家自然科学基金(61275068)、教育部博士点基金(20130184110015)

作者简介: 张先涛(1991-),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: zxt19910318@126.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 (通信联系人)

本文主要针对微纳波导中基于四波混频实现光逻辑的结构,研究各类噪声对四波混频效应的影响,为实际设计提供参考依据。

2 无噪声影响时的四波混频

图1所示结构为所研究的非线性金属-介质-金属(MIM)波导示意图,整个结构由非线性材料的波导与金属包层组成。 S_1 和 S_2 分别为信号光,频率分别为 f_1 和 f_2 , W_1 为核心介质层的宽度, W_2 为金属包层银的宽度, L 为波导的长度。采用的非线性材料相对介电常数为2.2801,三阶电极化率为 $5 \times 10^{-22} \text{ m}^2 \text{ V}^{-2}$,金属包层为银,采用Drude介电常数模型^[12], $W_1 = 50 \text{ nm}$, $W_2 = 375 \text{ nm}$, $L = 28 \mu\text{m}$ 。当信号光 S_1 和 S_2 的光强达到某一阈值,在满足相位匹配的情况下可以在波导内部可产生四波混频效应,即输出信号光 S_{out} 中会包含一些由四波混频产生的闲频光^[13-17]。

在图1所示的MIM波导结构中,核心介质厚度50 nm,此时波长小于340 nm(频率大于882.35 THz)的TM波(横磁波)以及波长大于320 nm(频率小于937.5 THz)的TE波(横电波)被截止。随着核心介质厚度的增加,TM波的截止波长基本保持在340 nm,而TE波的截止波长逐渐增加。当 $W_1 = 250 \text{ nm}$ 时,波长大于730 nm的TE波被截止^[11]。为使波导内能够发生四波混频效应,选取的信号光 S_1 和 S_2 应该在各种模式的截止波长范围内。

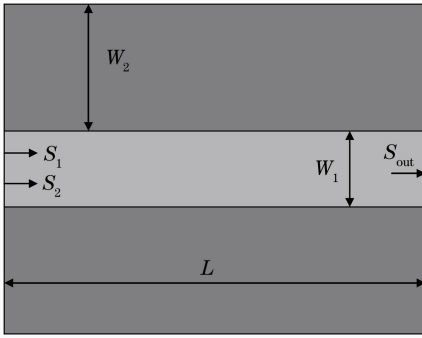


图1 MIM波导结构

Fig. 1 Structure of MIM waveguide

利用时域有限差分方法(FDTD)进行仿真,设定信号光 S_1 和 S_2 的频率分别为 $f_1 = 430 \text{ THz}$ 和 $f_2 = 420 \text{ THz}$,均为TM波,信号光的强度均为 $4 \times 10^9 \text{ V/m}$ 。在无噪声影响的情况下,发生四波混频效应,归一化强度结果如图2所示。

使用归一化强度表示输出光 S_{out} ,由图2可知,四波混频产生的闲频光的归一化强度较高,对应的4个闲频光 f_3, f_4, f_5, f_6 ,归一化强度分别为 -18.5 dB ,

$-19 \text{ dB}, -32.5 \text{ dB}, -34 \text{ dB}$ 。

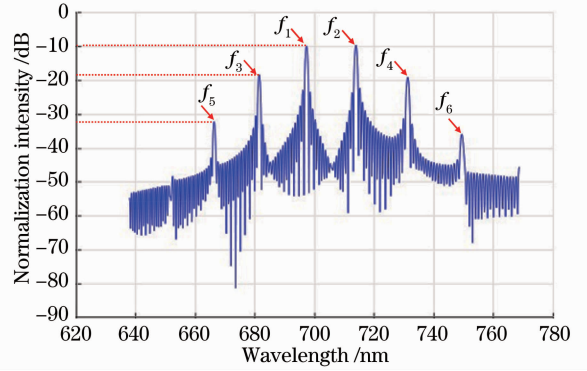


图2 无噪声影响时的四波混频

Fig. 2 FWM without noise

3 噪声功率对四波混频过程的影响

对于形如 $s(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$ 的信号来说,噪声可以对其各个参量进行影响从而变成形如下式的信号:

$$s(t) = A[1 + a(t)] \sin\{[\omega + \Omega(t)]t + \varphi + \Phi(t)\} + A(t), \quad (1)$$

式中 $a(t), \Omega(t), \Phi(t), A(t)$ 分别表示幅度噪声,频率噪声,相位噪声和加性噪声,它们均服从方差为 δ^2 ,均值为0的高斯分布。给信号光加入不同噪声,在波导内发生四波混频效应,通过与无噪声时的四波混频效应相比,可以看出该种噪声对四波混频的影响。

图3(a)~(d)所示的是在低功率噪声[高斯噪声服从 $N(0, 0.01)$ 分布]影响下的四波混频过程。当高斯噪声服从 $N(0, 0.01)$ 分布时, $u = 0, \delta^2 = 0.01$,噪声的时域信号强度范围大概在 $(-0.3, 0.3)$ 。

从图3可以看出,当所加的噪声功率较小时,无论何种噪声,对四波混频过程都没有影响,产生的各个闲频光的归一化强度与无噪声时相同。

图4(a)~(d)表示高斯噪声在服从 $N(0, 0.1)$ 分布时,各种噪声对四波混频过程的影响。从图中可以看出,受该功率下的高斯噪声影响得到四波混频效率有一点变化,虽然得到的各种情况下的四波混频产生闲频光的归一化强度不变;但与无噪声时的四波混频相比,受幅度噪声和相位噪声影响下的四波混频边频出现一些小毛刺,如图4中(a),(d)所示。

图5(a)~(d)所示的是在较高噪声功率[高斯噪声服从 $N(0, 0.5)$ 分布]影响下的四波混频过程。在这种情况下, $\delta^2 = 0.5$,噪声的时域信号强度范围

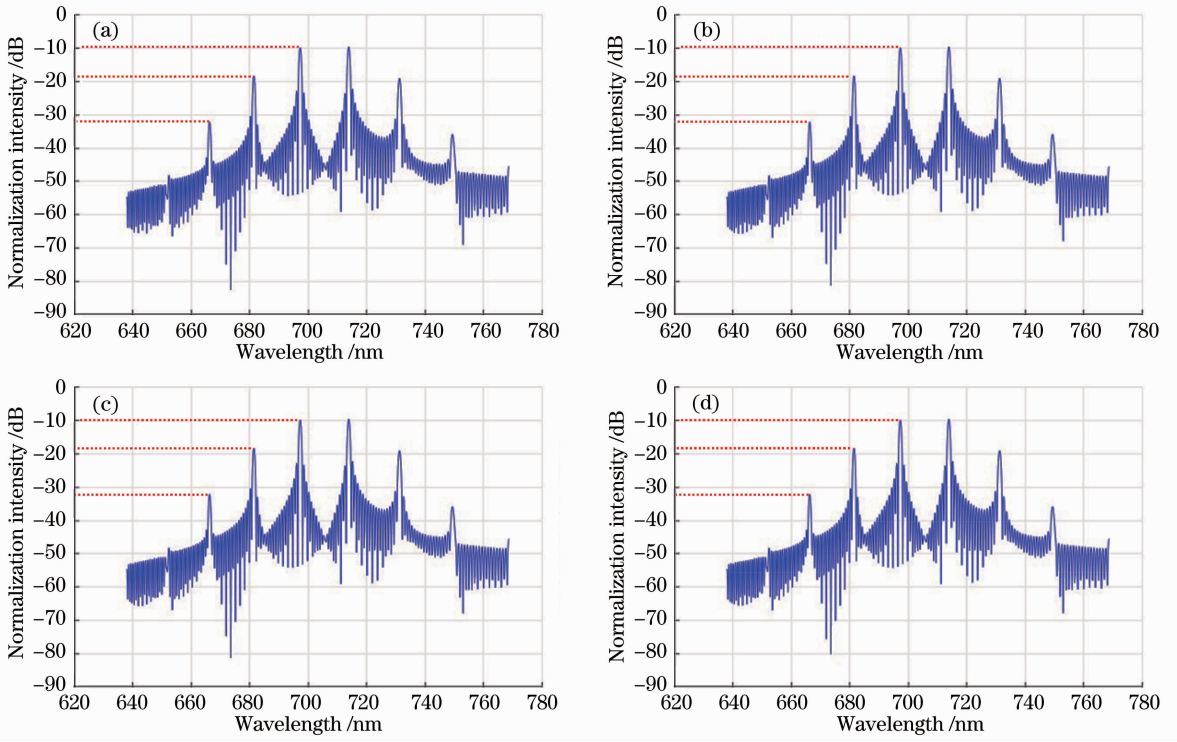


图 3 高斯噪声服从 $N(0, 0.01)$ 分布时的四波混频效率。(a) 幅度噪声；(b) 加性噪声；(c) 频率噪声；(d) 相位噪声
 Fig. 3 FWM efficiency with Gaussian noise following distribution of $N(0, 0.01)$ 。(a) Amplitude noise；(b) additive noise；
 (c) frequency noise；(d) phase noise

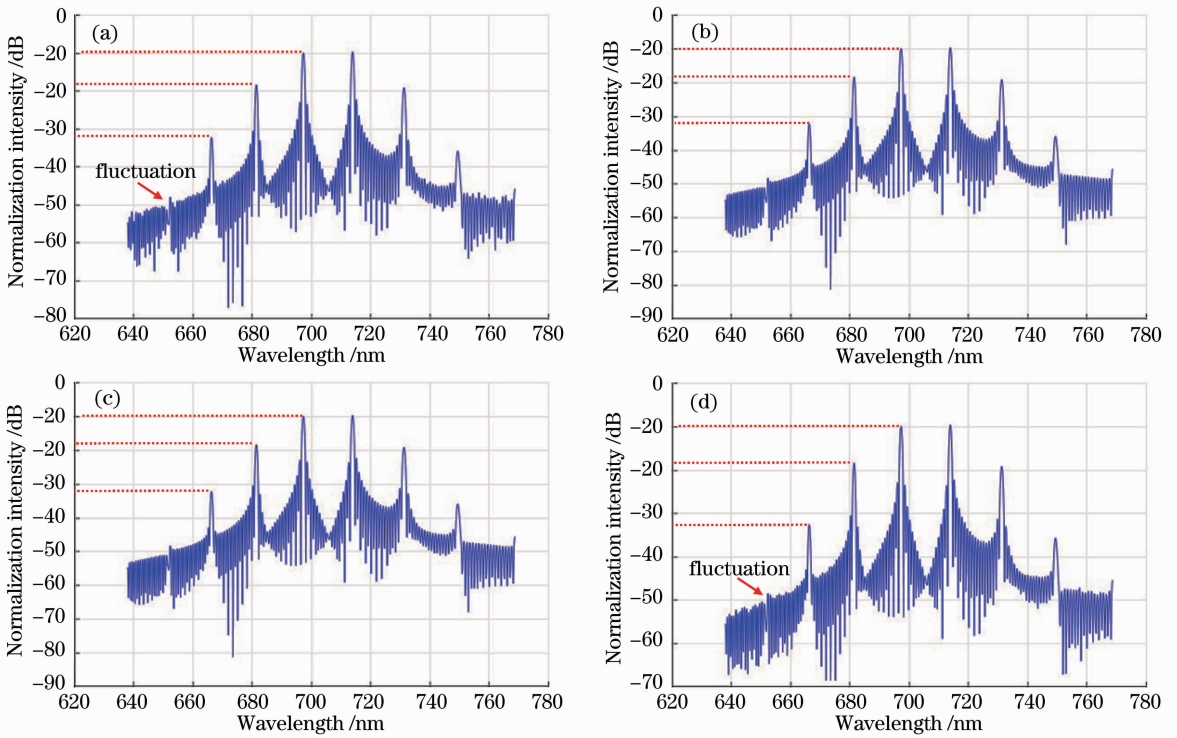


图 4 高斯噪声服从 $N(0, 0.1)$ 分布时的四波混频。(a) 幅度噪声；(b) 加性噪声；(c) 频率噪声；(d) 相位噪声
 Fig. 4 FWM efficiency with Gaussian noise following distribution of $N(0, 0.1)$ 。(a) Amplitude noise；(b) additive noise；
 (c) frequency noise；(d) phase noise

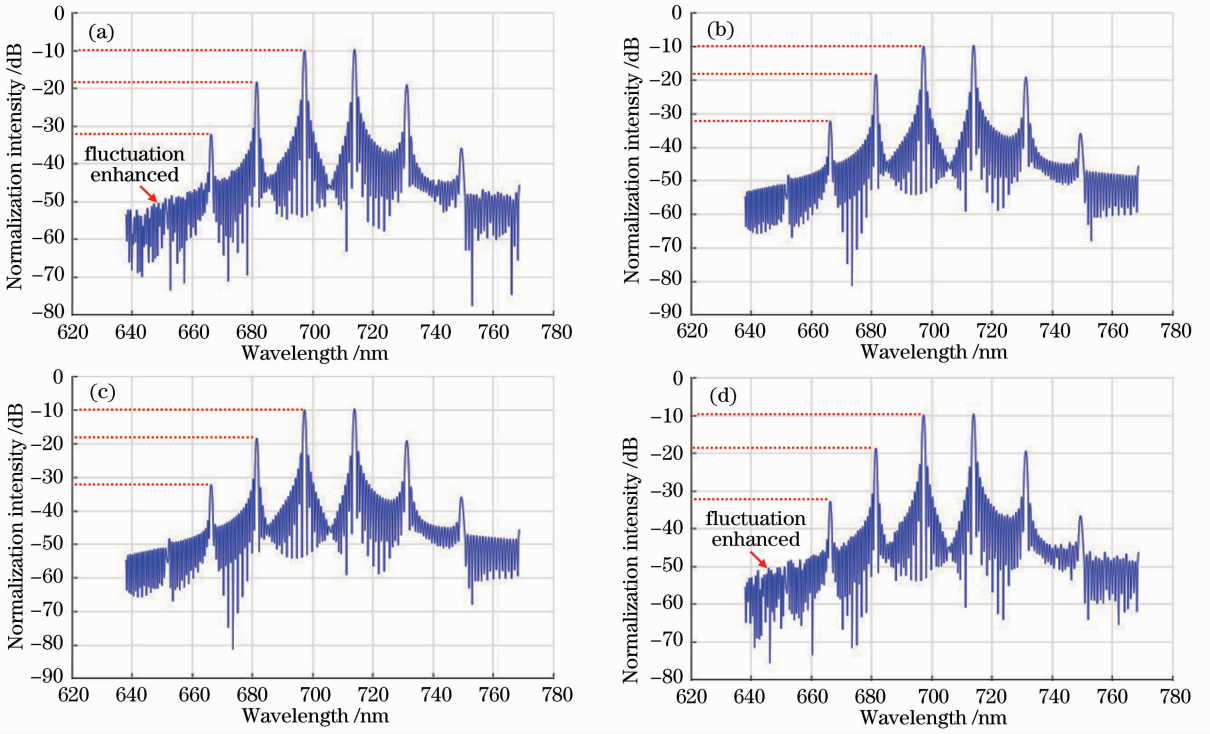


图 5 高斯噪声服从 $N(0,0.5)$ 分布时的四波混频。(a) 幅度噪声；(b) 加性噪声；(c) 频率噪声；(d) 相位噪声

Fig. 5 FWM efficiency with Gaussian noise following distribution of $N(0,0.5)$. (a) Amplitude noise; (b) additive noise; (c) frequency noise; (d) phase noise

大概在 $(-2.12, 2.12)$ 。从图中可以看出,加性噪声和频率噪声依然对四波混频没有影响,闲频光的归一化强度与无噪声时相同;幅度噪声使得四波混频边频波动越来越明显,但其闲频光的归一化强度不变;相位噪声不仅使边频波动更加明显,还使得四波混频产生的 4 个闲频光的归一化强度减小到 $f_3 = -20$ dB, $f_4 = -21$ dB, $f_5 = -35.5$ dB 和 $f_6 = -41$ dB。

由此,在噪声的平均功率 $\delta^2 \leq 0.25$ 时,可以发现等功率的幅度噪声、加性噪声、频率噪声和相位噪声中,四波混频几乎不受前三者的影响,而受相位噪声的影响最大。

对幅度噪声、频率噪声和加性噪声进行分析,在大量不同噪声功率 ($\delta^2 \geq 0.25$) 的情况下,和各种噪声对四波混频的影响下,所得到的信号光 f_1 、闲频光 f_3 和 f_5 的归一化强度如表 1~3 所示。

表 1 幅度噪声平均功率时的四波混频过程

Table 1 FWM process under different average powers of amplitude noise

δ^2	0.8^2	1^2	1.2^2	1.5^2	2^2	4^2	6^2	8^2	10^2
f_1 /dB	-10	-10.0	-10.0	-10	-10	-11.0	-11.5	-15.0	-17
f_3 /dB	-18	-17.5	-17.5	-18	-17	-17.5	-14.5	-17.0	-17
f_5 /dB	-31	-30.5	-30.0	-31	-32	-27.0	-26.0	-21.5	-21

表 2 频率噪声平均功率不同时的四波混频过程

Table 2 FWM process under different average powers of frequency noise

δ^2	0.8^2	1^2	1.2^2	1.5^2	2^2	4^2	6^2	8^2	10^2
f_1 /dB	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0
f_3 /dB	-18.5	-18.5	-18.5	-18.5	-18.5	-18.5	-18.5	-18.5	-18.5
f_5 /dB	-33.0	-33.0	-33.0	-33.0	-33.0	-33.0	-33.0	-33.0	-33.0

从表 1 可以看出,当噪声功率 $\delta^2 \geq 4^2$ 时,幅度噪声对四波混频的影响开始变得明显,此时幅度噪声的强度范围大概在 $(-12, 12)$,即最大噪声的强度与信号的强度之比为 12,随着噪声功率的增大,噪

声逐渐掩盖了信号,在输出光 S_{out} 中得到的四波混频闲频光的强度大于信号光的强度,考虑到实际信道里面的噪声功率通常不可能达到,因此可以认为幅度噪声对四波混频的影响不大。

表3 加性噪声平均功率不同时的四波混频过程

Table 3 FWM process under different average powers of additional noise

δ^2	0.8^2	1^2	1.2^2	1.5^2	2^2	4^2	6^2	8^2	10^2
f_1/dB	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0	-10.0
f_3/dB	-18.5	-18.5	-18.5	-18.5	-18.5	-18.5	-18.5	-18.5	-18.5
f_5/dB	-33.0	-33.0	-33.0	-33.0	-33.0	-33.0	-33.0	-33.0	-33.0

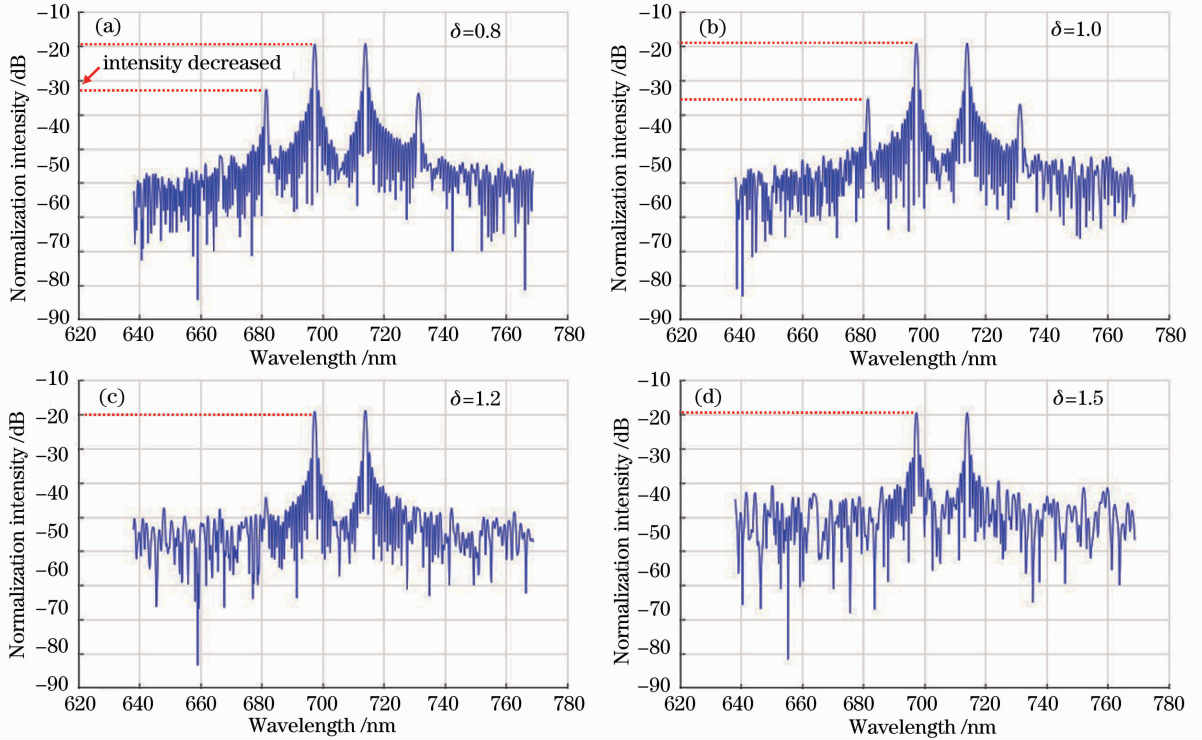
结合图2、图3、图4、表2和表3,考虑到实际信道噪声的功率范围,不同噪声功率强度的频率噪声和加性噪声对四波混频没有影响。

在前面的讨论中知道,相位噪声对四波混频过程的影响最明显。下面着重考虑相位噪声对四波混频的影响,分别设定噪声功率 $\delta^2 = 0.8^2, \delta^2 = 1^2, \delta^2 = 1.2^2, \delta^2 = 1.5^2$ 。

从图6(a)中发现,当 $\delta = 0.8$ 时,无噪声时四波混频产生闲频光 f_5 和 f_6 已经消失,边频的波动更加明显,四波混频产生的闲频光 f_3 和 f_4 的强度继

续减小。当 $\delta \geq 1.2$ 时,无噪声时四波混频产生闲频光 f_3, f_4, f_5 和 f_6 全部消失,即四波混频现象几乎没有发生。

为使上述结果更具普遍性,改变波导参数、信号光的偏振态及强度再进行仿真。在确保信号光 S_1 和 S_2 能在波导内传输的前提下,改变波导核心介质的厚度、信号光的频率、偏振态(TE偏振或TM偏振)及强度,给信号光叠加噪声之后,在波导内部产生四波混频的结果仍然满足以上结论。

图6 δ 分别为0.8, 1.0, 1.2, 1.5时的高斯相位噪声对四波混频的影响Fig. 6 FWM efficiency under Gaussian phase noise with δ of 0.8, 1.0, 1.2, 1.5

4 结 论

在微纳波导中四波混频现象跟信号的频率噪声和加性噪声无关,较强的幅度噪声对四波混频产生的影响也几乎可以忽略,但相位噪声会对四波混频产生明显的影响,当相位噪声功率 $\delta^2 \geq 1.44$ 时,四波混频将会完全消失。因此,除了控制相位噪声确保四波混频效率以外,在不希望波导中发生四波混

频时,可以人为引入合适的相位噪声消除四波混频效应。

参 考 文 献

- 1 Yinghui Guo, Lianshan Yan, Wei Pan, *et al.*. A plasmonic splitter based on slot cavity[J]. *Opt Express*, 2011, 19(15): 13831-13838.
- 2 William L Barnes, Alain Dereux, Thomas W Ebbesen. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, 424(6950):

- 824—830.
- 3 Hu F, Yi H, Zhou Z. Band-pass plasmonic slot filter with band selection and spectrally splitting capabilities[J]. *Opt Express*, 2011, 19(6): 4848—4855.
 - 4 Yan Senlin. All-optical XNOR, NOR, NOT logic gates and combinatorial optoelectronic logic gate using chaotic synchronization of coupling lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(s1): s100412.
颜森林. 全光 XNOR、NOR、NOT 及组合光电 NOR 激光混沌耦合同步系统逻辑门研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(s1): s100412.
 - 5 Luo Xuan, Jiang Yang, Yu Jinlong, *et al.*. Simultaneous optical signal dropping and cleaning by utilizing FWM effects based on optical logic gate in optical fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2524—2528.
罗 旋, 江 阳、余晋龙, 等. 基于光纤中四波混频效应光逻辑门的信号同步提取与擦除[J]. *光学学报*, 2010, 30(9): 2524—2528.
 - 6 Liang Xiao, Liu Tiegeng, Liu Kun, *et al.*. Method of real-time calibration for tunable optical filter nonlinearity[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(6): 1445—1449.
梁 霄, 刘铁根, 刘 琨, 等. 一种可调谐光滤波器非线性实时标定方法研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(6): 1445—1449.
 - 7 S A Maie, M L Brongersma, P G Kik, *et al.*. Plasmonic-a route to nanoscale optical devices[J]. *Adv Mater*, 2001, 13(19): 1501—1505.
 - 8 A B Evlyukhin, S I Bozhevolnyi, A L Stepanov, *et al.*. Focusing and directing of surface plasmon polaritons by curved chains of nanoparticles[J]. *Opt Express*, 2007, 15(25): 16667—16680.
 - 9 Zhihao Yu, Xinghai Chen, Yuxiang Weng, *et al.*. Nonlinear chirp effect introduced by Kerr medium as optical switches in ultrafast time-resolved measurements [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(7): 1117—1119.
 - 10 Baruch Fischer, Jeffrey O White, Mark Cronin-Golomb, *et al.*. Nonlinear vectorial two-beam coupling and forward four-wave mixing in photorefractive materials[J]. *Opt Lett*, 1986, 11(4): 239—241.
 - 11 Wang Lujun, Yan Lianshan, Guo Yinghui, *et al.*. Optical logic gate based on four-wave mixing in subwavelength metallic waveguide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0419002.
王鲁俊, 闫连山, 郭迎辉, 等. 基于微纳波导四波混频效应的全光逻辑实现[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0419002.
 - 12 He Sailing, Dai Daoxin. *Micro-Nano Photonic Integration*[M]. Beijing: Science Press, 2010.
何赛灵, 戴道铤. *微纳光子集成*[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
 - 13 Li Chunfei. *Nonlinear Optics*[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2009.
李淳飞. *非线性光学*[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
 - 14 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.
 - 15 R W Boyd. *Nonlinear Optics* (3rd ed.) [M]. Waltham: Academic Press, 2008. 213—214.
 - 16 E Poutrina, C Ciraci, D J Gauthier. Enhancing four-wave-mixing processes by nanowire arrays coupled to a gold film[J]. *Opt Express*, 2012, 20(10): 11005—11013.
 - 17 S Song, C T Allen, K R Demarest. Intensity-dependent phase-matching effects on four-wave mixing in optical fibers [J]. *J Lightwave Technol*, 1999, 17(11): 2285—2290.

栏目编辑: 韩 峰