

文章编号: 1001-3806(2010)04-0489-04

## 线性损耗和双光子吸收下硅基波导调制不稳定性

周伟林<sup>1,2</sup>, 罗风光<sup>1</sup>, 余志华<sup>1</sup>, 李斌<sup>1</sup>, 赵新宇<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学 光电子科学与工程学院, 武汉 430074; 2. 湖南商学院 计算机与电子工程学院, 长沙 410205)

**摘要:** 为了分析线性损耗和双光子吸收对硅基波导调制不稳定性的影响, 采用理论论证和数值模拟相结合的研究方法, 推导了调制不稳定性增益谱、峰值增益、峰值增益频率和调制带宽的表达式。论证了波导的线性损耗、双光子吸收系数和脉冲光功率等参量对调制不稳定性的影响, 并对给定结构参量的脊波导进行了仿真分析。结果表明, 即使在微弱的光功率(几十毫瓦)下, 在反常色散区仍然存在强烈的调制不稳定性现象, 其增益是相同功率下光纤介质的  $10^2 \sim 10^3$  倍; 峰值增益频率和增益带宽随波导的线性损耗指数衰减; 峰值增益也随双光子吸收系数指数减少。这为硅基波导调制不稳定性实验研究和超连续谱产生提供了理论参考。

**关键词:** 光电子学; 硅基波导; 调制不稳定性; 数值模拟; 线性损耗; 双光子吸收

**中图分类号:** TN252

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.04.016

## Modulation instability of silicon optical waveguide considering linear loss and biphotonic absorption

ZHOU Wei-lin<sup>1,2</sup>, LUO Feng-guang<sup>1</sup>, YU Zhi-hua<sup>1</sup>, LI Bin<sup>1</sup>, ZHAO Xin-yu<sup>1</sup>

(1. Institute of Optoelectronics Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. School of Computer and Electronics Engineering, Hunan Business College, Changsha 410205, China)

**Abstract:** Taking into account the linear loss and biphotonic absorption effect of silicon-on-insulator (SOI) waveguide simultaneously, condition and gain spectra of modulation instability (MI) induced by combined effects of self-phase modulation and waveguide dispersions were investigated. Formulation for calculating the gain of MI was deduced theoretically, and expressions of peak gain, peak gain frequency and bandwidth of modulation instability were obtained as well. Impacts of various parameters on gain spectra of MI were analyzed theoretically and simulated in detail. Both theoretical analysis and simulation show that strong MI takes place even in the existence of low light power. The peak gain of MI is 2 to 3 orders of magnitude larger than that achieved in optical fibers with the same light power. Both peak gain frequency and bandwidth of gain spectra of MI are decreased exponentially with linear loss of waveguide, and peak gain is decreased exponentially with bi-photon absorption of waveguide as well. The work provides an important reference for experimentally investigating modulation instability and supercontinuum generation in silicon waveguide.

**Key words:** optoelectronics; silicon waveguide; modulation instability; numerical simulation; linear loss; biphotonic absorption

## 引言

与常规波导相比, 绝缘硅波导 (silicon-on-insulator, SOI) 由于具有与互补金属氧化物半导体 (complementary metal-oxide semiconductor, COMS) 技术无缝集成、强光束约束性和高非线性等独特优势, 因而已成为目前极具吸引力的研究对象之一<sup>[1-3]</sup>。结合目前日趋

成熟的硅器件制造工艺技术, 大量基于 SOI 平台潜在的光学函数功能和器件装置已被研究开发, 包括应用在激光产生与光放大、光学调制、光开关、可变光学衰减器和光学滤波等领域<sup>[4,5]</sup>。调制不稳定性是介质中的色散与非线性对传输光场联合作用的结果。光纤介质中的调制不稳定性分析已得到了十分深入的研究, 并在超短光脉冲和超连续谱产生等领域得到了广泛应用<sup>[6,9]</sup>。SOI 波导由于具有超微结构和高非线性, 因而, 即使在超短的传输距离(几毫米)内也能表现出强烈的调制不稳定性。PANOIU 等人在忽略波导的线性损耗和双光子吸收效应条件下, 对超微结构 SOI 硅光子线中两光束的交叉相位调制所导致的调制不稳定性进行了研究<sup>[10]</sup>。然而, 随着波导结构的微型化和加工

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60677023); 国家八六三高技术研究发展计划资助项目 (2006AA01Z240)

作者简介: 周伟林 (1972-), 男, 副教授, 博士研究生, 主要从事光通信和光传感方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: fglo@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2009-06-24; 收到修改稿日期: 2009-07-21

工艺的限制,波导的线性损耗和双光子吸收效应对调制不稳定性的影响也日趋明显,以致不可忽略。作者在同时考虑线性损耗和双光子吸收效应基础上,对SOI波导中飞秒脉冲传输调制不稳定性分析进行了研究,详细论证了各种参量对调制不稳定性的影响,并进行了仿真分析。

## 1 理论模型

超快飞秒脉冲在SOI波导中传输时,可以用以下非线性薛定谔方程来描述<sup>[10]</sup>:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + i \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} = -\frac{1}{2} \alpha A - \frac{1}{2} \alpha_{\text{FC}} A - \frac{1}{2} \frac{\beta_{\text{TPA}}}{A_{\text{eff}}} |A|^2 A + i \gamma_{\text{SPM}} |A|^2 A + i \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_{\lambda} A \quad (1)$$

式中,  $A$  为缓变脉冲振幅,  $z$  为脉冲在波导中的传输距离,  $T$  为相对时间参量,  $\beta_2$  和  $\beta_3$  分别为群速度色散系数和3阶色散系数,  $\alpha$  和  $\alpha_{\text{FC}}$  分别为线性损耗和自由载流子损耗,  $\beta_{\text{TPA}}$  为双光子吸收系数,  $\gamma_{\text{SPM}}$  是自相位调制系数,  $A_{\text{eff}}$  是模场有效面积, 可表示为:  $A_{\text{eff}} = \frac{(\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |E(x, y)|^2 dx dy)^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |E(x, y)|^4 dx dy}$ , 式中,  $E(x, y)$  是波导中的

传播模的电场分布<sup>[11]</sup>,  $\Delta n$  表示有效折射率的改变,  $\lambda$  为脉冲光波长。当飞秒脉冲功率较低(mW量级)时,波导中的自由载流子损耗和色散可以忽略<sup>[12]</sup>。将  $\xi = \frac{1}{\alpha} [1 - \exp(-\alpha z)]$  和  $u = \exp(\frac{\alpha}{2} z) A$  代入(1)式,即可得到归一化的薛定谔方程:

$$\frac{\partial u}{\partial \xi} + i \frac{1}{2} \beta_2 \exp(\alpha z) \frac{\partial^2 u}{\partial T^2} - \frac{1}{6} \beta_3 \exp(\alpha z) \frac{\partial^3 u}{\partial T^3} = -\frac{1}{2} \frac{\beta_{\text{TPA}}}{A_{\text{eff}}} |u|^2 u + i \gamma_{\text{SPM}} |u|^2 u \quad (2)$$

式中,  $\xi$  和  $u$  分别表示归一化传输距离和缓变脉冲振幅。很显然,(2)式的稳态解可表为:

$$u = u_0 \exp\left[\left(-\frac{\beta_{\text{TPA}} P_0}{2A_{\text{eff}}} + i \gamma_{\text{SPM}} P_0\right) \xi\right] \quad (3)$$

式中,  $u_0$  为光脉冲输入时的初始振幅,  $P_0 = |u_0|^2$  为光脉冲输入功率。对稳态解(3)式进行微扰,可得到:

$$u = (u_0 + a) \exp\left[\left(-\frac{\beta_{\text{TPA}} P_0}{2A_{\text{eff}}} + i \gamma_{\text{SPM}} P_0\right) \xi\right] \quad (4)$$

式中,  $a(\xi, T)$  为微扰, 且满足  $|a|^2 \ll P_0$ 。将(4)式代入(2)式, 并对  $a$  线性化得到:

$$\frac{\partial a}{\partial \xi} + i \frac{1}{2} \beta_2 \exp(\alpha z) \frac{\partial^2 a}{\partial T^2} - \frac{1}{6} \beta_3 \exp(\alpha z) \frac{\partial^3 a}{\partial T^3} = P_0 \left( i \gamma_{\text{SPM}} - \frac{\beta_{\text{TPA}}}{2A_{\text{eff}}} \right) (a + a^*) \quad (5)$$

式中,  $a^*$  是  $a$  的共轭复数。假设  $a$  的解为  $a(\xi, T) = U_0 \cos(K\xi - \Omega T) + jV_0 \sin(K\xi - \Omega T)$ , 其中,  $U_0$  和  $V_0$  分别代表  $U$  和  $V$  的振幅,  $K$  和  $\Omega$  分别为微扰波的波数和频率。将  $a(\xi, T)$  表达式代入(5)式得到关于  $U_0, V_0$  的耦合方程组:

$$\begin{cases} \left[ \frac{P_0 \beta_{\text{TPA}}}{A_{\text{eff}}} + iK - i \frac{\beta_3}{6} \exp(\alpha z) \Omega^3 \right] U_0 + \frac{\beta_2 \Omega^2}{2} \exp(\alpha z) V_0 = 0 \\ \left[ -\frac{\beta_2}{2} \exp(\alpha z) \Omega^2 - 2P_0 \gamma_{\text{SPM}} \right] U_0 + \left[ iK - \frac{i\beta_3}{6} \exp(\alpha z) \Omega^3 \right] V_0 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

显然, 要使上述方程组存在非平凡解, 应满足以下色散关系:

$$K = i \frac{P_0 \beta_{\text{TPA}}}{2A_{\text{eff}}} + \frac{\beta_3}{6} \exp(\alpha z) \Omega^3 \pm \frac{1}{2} \times \left[ 4\beta_2 P_0 \gamma_{\text{SPM}} \exp(\alpha z) \Omega^2 + \beta_2^2 \exp(2\alpha z) \Omega^4 - \frac{P_0^2 \beta_{\text{TPA}}^2}{A_{\text{eff}}^2} \right]^{1/2} \quad (7)$$

由(7)式可以看出, 只有当  $\beta_2 \leq 0$  时, 调制不稳定性才可能发生, 即调制不稳定性只在波导的反常色散区发生, 且其增益谱为:

$$g(\Omega) = 2\text{Im}(K) = -\frac{P_0 \beta_{\text{TPA}}}{A_{\text{eff}}} \times \left[ 4|\beta_2| P_0 \gamma_{\text{SPM}} \exp(\alpha z) \Omega^2 - \beta_2^2 \exp(2\alpha z) \Omega^4 + \frac{P_0^2 \beta_{\text{TPA}}^2}{A_{\text{eff}}^2} \right]^{1/2} \quad (8)$$

由(8)式可以看出, 群速度色散、光脉冲初始输入功率、自相位调制、波导损耗、双光子吸收和传输距离都对调制不稳定性的增益产生影响, 而3阶色散对调制不稳定性增益没有贡献, 这与光纤中的结论一致<sup>[7-8]</sup>。同时, 当调制频率为峰值增益频率:

$$\Omega_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2P_0 \gamma_{\text{SPM}}}{|\beta_2| \exp(\alpha z)}} \quad (9)$$

时, 增益谱  $g(\Omega)$  存在最大值:

$$g_{\text{max}}(\Omega) = \sqrt{4P_0^2 \gamma_{\text{SPM}}^2 + \frac{P_0^2 \beta_{\text{TPA}}^2}{A_{\text{eff}}^2}} - \frac{P_0 \beta_{\text{TPA}}}{A_{\text{eff}}} \quad (10)$$

此时, 对应的调制不稳定性增益谱带宽为:

$$\Delta\Omega = 2 \sqrt{\frac{P_0 \gamma_{\text{SPM}}}{|\beta_2| \exp(\alpha z)}} \quad (11)$$

从(9)式~(11)式可以看出, 调制不稳定性增益谱峰值决定于光脉冲输入功率  $P_0$ 、自相位调制系数  $\gamma_{\text{SPM}}$ 、双光子吸收系数  $\beta_{\text{TPA}}$  和有效模场面积  $A_{\text{eff}}$ ; 而调制不稳定性增益谱峰值频率  $\Omega_{\text{max}}$  和增益谱宽  $\Delta\Omega$  除了决定于

光脉冲输入功率  $P_0$  和自相位调制系数  $\gamma_{\text{SPM}}$  外,还与群速度色散系数  $\beta_2$ 、波导线性损耗  $\alpha$  和传输距离  $z$  有关。

## 2 数值模拟与仿真

为了便于分析,这里考虑尺寸为  $W = 1\mu\text{m}$ ,  $H = 0.6\mu\text{m}$  和  $h = 0.3\mu\text{m}$  的 SOI 脊波导,其它仿真参量为  $\alpha = 0.22\text{dB/cm}$ ,  $\beta_2 = -0.56\text{ps}^2/\text{m}$ ,  $\gamma_{\text{SPM}} = 47\text{W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $\beta_{\text{TPA}} = 5 \times 10^{-12}\text{m/W}$ ,  $A_{\text{eff}} = 3.8 \times 10^{-13}\text{m}^2$  [13]。

### 2.1 光脉冲功率对增益谱的影响

对  $P_0$  分别为 80mW, 100mW, 120mW 时的增益谱进行了仿真,其结果如图 1a 所示;图 1b 中给出了调制不稳定性增益谱峰值频率  $\Omega_{\text{max}}$  和增益谱宽  $\Delta\Omega$  随光脉冲初始功率  $P_0$  的变化关系。

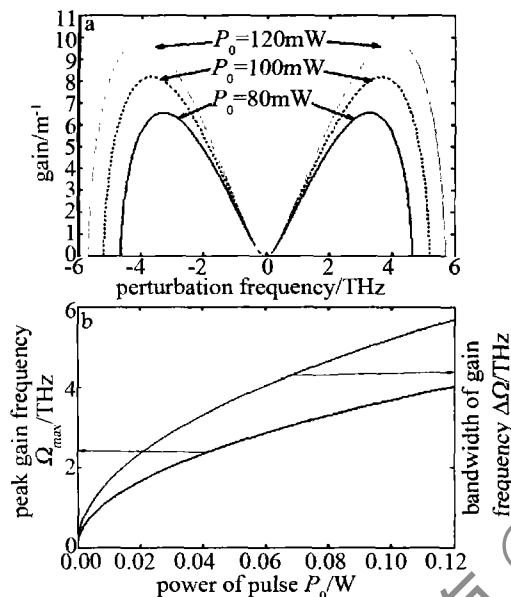


Fig. 1 a—gain spectra of modulation instability under different light power b—figure of peak frequency and bandwidth vary with light power

从图 1a、图 1b 可以看出,即使在微弱的光功率下(几十毫瓦),SOI 波导中仍然产生强烈的调制不稳定性现象,其增益是相同功率下光纤介质的  $10^2 \sim 10^3$  倍 [7],与参考文献 [8] 中所报道的实验结果基本一致。这是因为 SOI 波导的微纳米结构和超强光约束特性,导致极高的光功率密度,从而表现强烈的非线性。而且随着光脉冲的初始功率的增加,调制不稳定性也变得越强烈,表现为增益谱的峰值增益、增益带宽和峰值增益频率都随着脉冲光功率的增加而增加。这是因为光脉冲功率的增加会产生更强的非线性效应,从而引起更为强烈的调制不稳定性 [14]。

### 2.2 线性损耗对增益谱的影响

在线性损耗系数一定时,波导中的线性损耗随传输距离的增加而正比例地增加。图 2a、图 2b 中给出了调制不稳定性增益谱随传输距离的演变过程和峰值增益频率、增益谱带宽随传输距离的变化曲线。

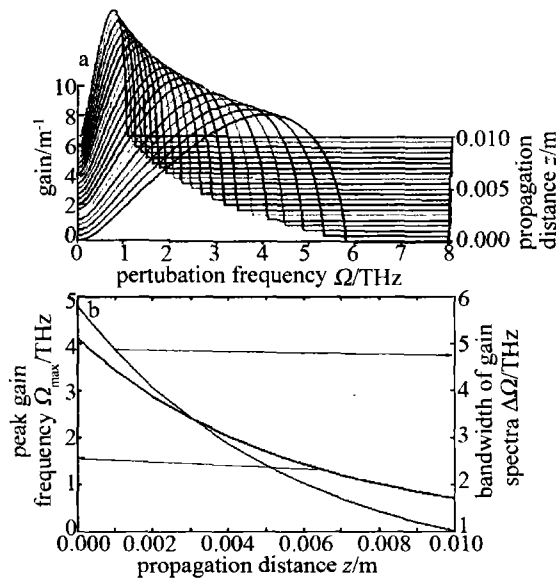


Fig. 2 a—dynamic evolution of gain spectra via propagation distance b—peak frequency and bandwidth vary with propagation distance

从图 2a、图 2b 可以看出,随着传输距离的增加,虽然增益谱峰值  $g_{\text{max}}$  并不发生改变,但峰值增益频率  $\Omega_{\text{max}}$  和增益谱带宽  $\Delta\Omega$  都随传输距离  $z$  的增加而指数衰减。这是由于随着传输距离  $z$  的增加,波导的线性损耗增加,导致脉冲功率衰减,从而使调制不稳定性减弱。

### 2.3 双光子吸收对增益谱的影响

图 3a、图 3b 中给出了不同双光子吸收情况下调制不稳定性的增益谱曲线和峰值增益随双光子吸收效应变化曲线。

从图 3a、图 3b 可看出,双光子吸收虽然不影响调制不稳定性增益谱的峰值增益  $\Omega_{\text{max}}$  频率和增益谱带宽  $\Delta\Omega$ ,但对峰值增益  $g_{\text{max}}$  有明显影响。且峰值增益  $g_{\text{max}}$  随着双光子吸收效应的增强而明显降低。

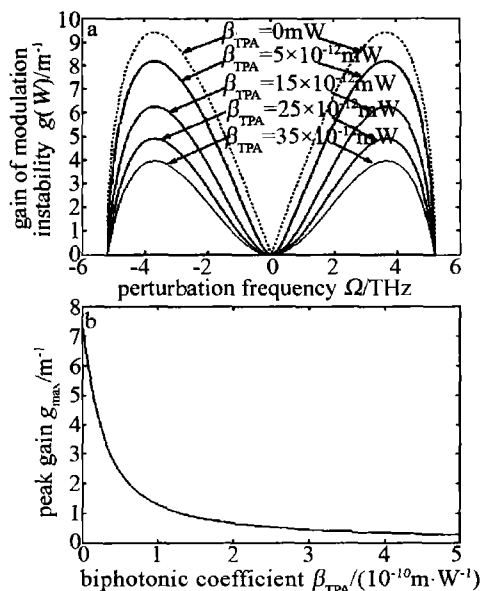


Fig. 3 a—gain spectra of modulation instability under different biphotonic absorption effects b—variation of peak gain with bi-photon absorption coefficient

### 3 结论

从飞秒脉冲在 SOI 波导中传输所满足的非线性薛定谔方程出发,在考虑波导的线性损耗和双光子吸收效应的情况下,理论推导了调制不稳定性增益谱表达式,论证了各种因素对调制不稳定性影响,并进行了仿真分析,部分结论得到了相关文献的实验验证。理论分析与仿真结果表明,调制不稳定性只能发生在反常色散区,其强度随着光脉冲的初始功率的增加而增强,表现为增益谱的峰值增益、增益带宽和峰值增益频率都随着脉冲光功率的增加而增加,且峰值增益频率和增益谱带宽都随传输距离的增加而指数衰减;双光子吸收虽然不影响调制不稳定性增益谱的峰值增益频率和增益谱带宽,但对峰值增益有明显改变,峰值增益随着双光子吸收效应的增强而降低。这些结论为硅基波导中的孤子传输和超连续谱产生及开发硅基波导非线性功能函数提供了理论参考。

#### 参考文献

- [1] GUO J Q. Theory analysis of array waveguide grid based on Si-slab [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(6):620-623 (in Chinese).
- [2] RONG H, LIU A, JONES R, *et al.* An all-silicon Raman laser [J]. *Nature*, 2005, 433(7023):292-294.
- [3] TANG B Q, XU J J, CHEN Z G, *et al.* Weak-light nonlinear optical effect and its application [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(6):581-585 (in Chinese).
- [4] FOERST M, NIEHUSMAN J, PLOTZING T. High-speed all-optical switch in ion-implanted silicon-on-insulator or micro-ring resonators [J]. *Opt Lett*, 2007, 32(14):2046-2048.
- [5] FOSTER M, TURNER A, SHARPING J, *et al.* Broad-band optical parametric gain on a silicon photonic chip [J]. *Nature Photonics*, 2006, 441(7096):960-963.
- [6] ZHUO H, WEN S, DAI X, *et al.* Influence of nonlinear dispersion on modulation instability of inherent and partially inherent ultra-short pulse in meta-materials [J]. *Appl Phys*, 2007, B87(4):635-641.
- [7] REN Z J, WANG J, YANG A L. Modulation instability in decreasing dispersion fiber with different profiles [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(2):156-159 (in Chinese).
- [8] PANOIU N C, CHEN X G, OSGOOD R M, *et al.* XPM-induced modulation instability in SOI photonic nanowires [C]//Frontiers in Optics, Optical Society of America. Rochester, New York: Optical Society of America, 2006:FWU2.
- [9] PORSEZIAN K, SENTHILNATHAN K, DEVIPRIYA S. Modulation instability in fiber Bragg grating with non-kerr nonlinearity [J]. *IEEE J Q E*, 2005, 41(6):789-796.
- [10] WU J W, LUO F G, ZHANG Q T, *et al.* Optical wave breaking of high-intensity femtosecond pulse in silicon optical waveguides [J]. *Opt & Laser Technol*, 2009, 41(3):360-364.
- [11] PANOIU N C, CHEN X G, OSGOOD R M, Jr, *et al.* Modulability in silicon photonic nanowires [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(24):3609-3611.
- [12] CHEN X G, PANOIU N C, HSTEH I, *et al.* Third-order dispersion and ultra-fast pulse propagation in silicon wire waveguides [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(24):2617-2619.
- [13] YIN L H, LIN Q, AGRAWAL P. Dispersion tailoring and soliton propagation in silicon waveguides [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(9):1295-1297.
- [14] AGRAWAL G P. *Nonlinear fiber optics* [M]. San Diego, CA: Academic, 2001:89-90.
- [15] SALI D R, MICKMAN J M. Light delocalization in a photonic crystals by a fill-fact or degeneracy [J]. *Phys Rev*, 2006, B74(2):195102.
- [16] JIN Y, HUANG Zh Y, CHEN X F, *et al.* Study on polarization of the phonyonic crystal defect mode [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(3):278-280 (in Chinese).
- [17] XIE Y M, LIU Zh D, WANG H Q. Local defect modes in photonic crystals with negative refractive index structural defects [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(2):196-197 (in Chinese).
- [18] GAO Y J, WANG Y L, CHEN H N, *et al.* Transmission band characteristics of photonic crystals with mirror symmetry [J]. *Journal of Guangxi University*, 2007, 32(4):326-328 (in Chinese).
- [19] LUO R H, LIANG R Sh, WEI Zh Ch, *et al.* Symmetrical structural one-dimensional photonic crystal super narrow-band filter with positive-negative index alternant multilayer [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(10):1016-1018 (in Chinese).
- [20] LI T S, CHEN M S, SHU S. Research on photonic crystal filter of multi-peak underwater optical communication [J]. *Optical Communication Technology*, 2008, 3(10):28-30 (in Chinese).
- [21] BORN M, WOLF E. *Principles of optics* [M]. 6th ed. New York: Pergamon, 1980:14-21.

(上接第 488 页)

些。增大入射角,对称结构光子晶体的透射峰迅速减小,因此,在设计窄带滤波器时应合理地选取入射角度。而非对称结构光子晶体禁带中心位置均向高频(短波)方向移动,且宽度变宽。当入射角为  $\pi/4$  时,在 2.5 倍频率处同样形成了一个新的光子禁带。以上的结论对于设计带阻滤波器和窄带滤波器具有理论指导意义。

#### 参考文献

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics [J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 58(20):2059-2062.
- [2] JOHN S. Strong localization of photon in certain disordered dielectric super lattices [J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 58(23):2486-2489.
- [3] LAXMI S, PARMANAND M. Photonic band gap effect in one-dimensional plasma dielectric photonic crystals [J]. *Solid State Communications*, 2006, 138(3):160-164.