

双光子吸收对光子晶体定向耦合 全光开关的影响*

赵 鲲, 丁迎春

(北京化工大学 物理系, 北京 100029)

摘 要: 利用时域有限差分方法, 在非线形条件下, 考虑双光子吸收效应的同时, 建立了分析 2 维光子晶体定向耦合波导光开关的模型。数值计算结果表明, 对于长度较短的波导耦合器件, 在强控制光和非线性条件下, 双光子吸收效应会对波导的耦合作用产生一定的影响, 从而改变入射光的透射特性, 使光开关控制的动态过程发生变化。故而在设计全光开关器件时, 对强控制光条件下的非线性双光子吸收效应有必要作为影响因素考虑进去。

关键词: 2 维光子晶体; 定向耦合; 时域有限差分法; 双光子吸收; 透射特性

中图分类号: O437 **文献标志码:** A

全光开关是一种重要的集成光子学器件, 完全利用光子与介质的相互作用来实现对光传输过程的“开”“关”控制作用。目前的各种光开关结构还不能满足未来通信的需求, 光子晶体的出现展示了重要的应用前景, 如高效率激光器、光电子器件、新型波导等, 这些应用都基于光子晶体的禁带特征^[1]。利用光子晶体的光子禁带特性, 可以通过在 2 维光子晶体中制造线缺陷来实现波导, 将 2 条这样的波导平行地排列在一起, 可以实现定向波导耦合器, 它通过波导间的耦合作用, 可以将一个波导中被激励的基模耦合到另一个波导中, 实现光能量在 2 个波导间的来回传递, 从而实现光开关的功能。F. Cuesta-Soto 等人提出了一种由空气中的介质柱所组成的定向光子晶体耦合器, 其耦合长度可以通过减小用于隔开传输波导的介质柱的半径来调节, 进而实现光开关功能^[2]。本文利用时域有限差分(FDTD)法^[3], 研究了在高功率激光且不能忽略介质的非线性克尔系数的情况下, 双光子吸收效应对波导耦合作用产生的影响。

1 理论模型

1.1 光开关的定向波导耦合结构

在由空气和介质组成的 2 维三角形晶格结构的光子晶体中, 抽掉两排介质柱, 引入 2 个线缺陷后, 就形成了 2 个平行排列的入射光波导, 入射端口为 port1 或 port2, 中间由 3 排介质柱隔开, 调整最中间一排介质柱的半径, 形成控制光波导, 使控制光的传播被限制在其中^[2], 如图 1 所示, a 为晶格常数, port3 和 port4 为输出端口。考虑到光源为强激光时, 介质的非线性克尔效应会使介质的折射率发生变化, 致使波导对信号的耦合作用发生变化, 因此, 通过改变耦合器的 2 个输出端口的能量比例^[2], 从而实现控制光的动态开关作用。

克尔效应属于三阶非线性效应, 在介质的克尔系数不能忽略的同时, 尤其是入射光强度较大时, 三阶非线性效应中的吸收效应会比较明显, 也应该作为考虑因素。由于定向耦合器是光通信系统中的关键器件之一, 多用于通信波长范围的光控技术, 而在通信窗口中的非线性吸收过程, 最主要的就是双光子吸收(TPA)效应^[4]。所以在实现开关功能的过程中, 我们还应该考虑到由于双光子吸收现象产生的对光的非线性吸收及其影响。

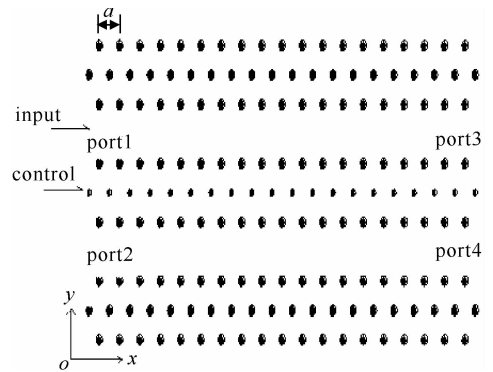


Fig. 1 Schematic of the photonic crystal directional coupler

图 1 光子晶体线缺陷波导耦合器结构图

* 收稿日期: 2008-07-23; 修订日期: 2009-04-21

作者简介: 赵 鲲(1984—), 女, 研究生, 主要从事光子晶体方面的研究; Zhaokun2006@163.com。

1.2 考虑非线性吸收的 FDTD 理论模型

在 Maxwell 方程组中,认为电导率 σ 与材料的吸收有关,如果在给定波长 λ 时,考虑到吸收损耗,则介质的复介电常数 $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 = \epsilon' + i\epsilon''$ 和复折射率 $n = n_r + ik$ 。其中, ϵ_r 和 ϵ_0 分别为介质的相对介电常数和真空中介电常数, ϵ' 和 ϵ'' 分别为介电常数的实部和虚部, n_r 和 k 分别是折射率的实部和虚部。根据介电常数与折射率的关系,可以得到

$$\epsilon' = \epsilon_0 (n_r^2 - k^2), \quad \epsilon'' = 2\epsilon_0 n_r k \quad (1)$$

式中: $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m。非线性条件下考虑双光子吸收效应^[5],则吸收系数为

$$\alpha = \alpha_0 + \beta I \quad (2)$$

式中: α_0 和 β 分别为线性和非线性吸收系数。对用于通信系统波长的大多数光子晶体(如 AlGaAs 或 Si), $\alpha_0 \approx 0$ ^[6]。折射率虚部 k 与吸收系数有关^[5],即

$$k = \lambda\alpha / (4\pi) \quad (3)$$

电流与场强关系为^[6]

$$I = \frac{1}{2} c \epsilon_0 n_r |\mathbf{E}|^2 \quad (4)$$

式中: c 为光速。电导率可以表示为复介电常数虚部的函数

$$\sigma = \frac{2\pi c}{\lambda} \epsilon'' \quad (5)$$

综上所述,可以得到电导率与场强的函数关系

$$\sigma = \frac{1}{2} \beta \epsilon_0^2 n_r^2 c^2 |\mathbf{E}|^2 \quad (6)$$

对图 1 所示的光子晶体波导结构分析可知,在垂直于介质柱体的方向上,介电常数(折射率)是空间位置的周期函数,而在平行于介质柱体的方向上,介电常数不随空间位置变化。所以 3 维问题可转化为 2 维问题来处理。本文以 TM 波为例进行研究,采用 Yee 氏网格划分的 FDTD 模型^[3],考虑非线性条件下存在双光子吸收的情况,可以得到 Maxwell 差分方程为

$$E_z^{n+1}(i, j) = \frac{\epsilon_r^1(i, j) - \sigma^1(i, j) \Delta t / 2}{\epsilon_r^1(i, j) + \sigma^1(i, j) \Delta t / 2} E_z^n(i, j) + \frac{\Delta t}{\epsilon_r^1(i, j) + \sigma^1(i, j) \Delta t / 2} \times \left[\frac{H_y^{n+1/2}(i+1/2, j) - H_y^{n+1/2}(i-1/2, j)}{\Delta x} - \frac{H_x^{n+1/2}(i, j+1/2) - H_x^{n+1/2}(i, j-1/2)}{\Delta y} \right] \quad (7)$$

$$H_x^{n+1/2}(i, j+1/2) = H_x^{n-1/2}(i, j+1/2) - \frac{\Delta t}{\Delta y} [E_z^n(i, j+1) - E_z^n(i, j)] \quad (8)$$

$$H_y^{n+1/2}(i+1/2, j) = H_y^{n-1/2}(i+1/2, j) + \frac{\Delta t}{\Delta x} [E_z^n(i+1, j) - E_z^n(i, j)] \quad (9)$$

$$\sigma^1(i, j) = \frac{1}{2} \beta \epsilon_0^2 c^2 \langle n_r^1(i, j) \rangle^2 |E_z^{n+1}(i, j)|^2 \quad (10)$$

式(7)~(10)中的上标 I 表示由于光克尔效应和双光子吸收效应而依赖于强度,带上标的介电常数和折射率可以利用一个已有的非线性 FDTD 方法得到^[6],进而就可以得到考虑 TPA 的定向耦合波导的中场的完全解。

2 数值计算与分析

由于定向耦合波导的传输状态与波导的传播常数、耦合系数及长度等参量有关^[2],为了研究非线性条件下双光子吸收效应对传输状态的影响,以上参量均不变,将考虑和不考虑双光子吸收的 2 种情况做对比分析。模型的具体参数为:选取 Si 作为介质材料,能得到较大的光子禁带,波长在 $1.55 \mu\text{m}$ 时,折射率 n 为 3.48,克尔系数 $n_2 = 14.5 \times 10^{-18}$ m^2/W ,双光子吸收系数 $\beta = 6 \times 10^{-12}$ m/W^2 ^[7]。取晶格常数 $a = 0.6 \mu\text{m}$,介质柱半径 $r = 0.15a$,为形成控制光波导,将最中间的一排介质柱半径 r 减小为 $0.1a$ 。为了节省计算空间,光子晶体介质柱在 x 和 y 方向取 20 和 11,在计算中网格划分把每个周期原胞划分为 20×20 ,整个区域网格被划分为 400×220 。由 FDTD 法得到的完整晶体结构的透射谱,如图 2 所示,可以看出在规一化频率(a/λ)下的禁带宽度为 $0.321 \sim 0.465$,故使用连续调制高斯脉冲源,取入射和控制光的中心频率 a/λ 分别为 0.387 和 0.347。

由于光子晶体器件可以实现小型化,便于集成,在本文的讨论中,设定的波导长度短,选取了较大的控制光强度,为 13 GW/cm,以便于更清楚的看到双光子吸收效应的影响。在非线性条件下没有考虑 TPA 效应,即 $\beta=0$,由 FDTD 的数值模拟可以得到光子晶体定向耦合器中的场分布图,如图 3 所示,图 3(a)中入射光从 port1 进入,绝大部分从 port4 出来了,图 3(b)中看到控制光被限制在中间一排改变了半径的介质柱中传播。这是因为控制光强使得介质的折射率发生了变化,增加了对光子晶体波导的耦合作用。

如果在非线性条件下考虑 TPA 效应,即 $\beta=6 \times 10^{-12}$ m/W,这时由图 4(a)看到,入射光进入 port1,而从

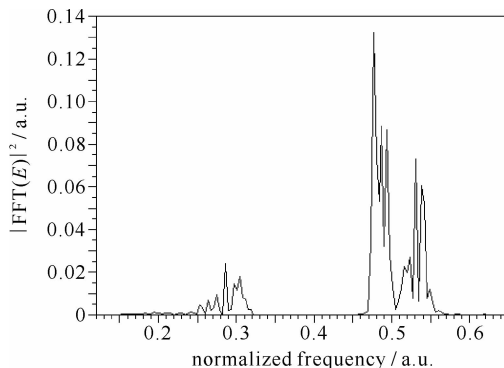
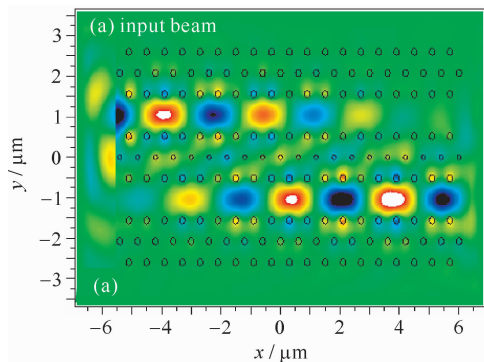


Fig. 2 Transmission spectra of the photonic crystals for Gaussian pulse

图 2 高斯脉冲激励下的光子晶体透射

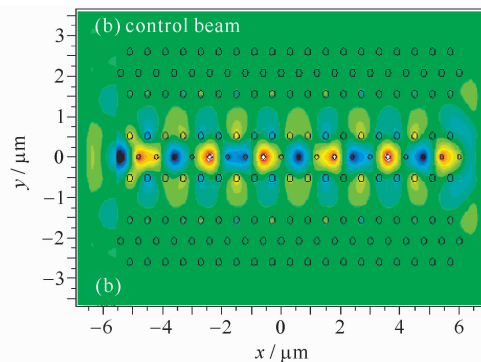


Fig. 3 Field distributions of input and control beams in waveguide for nonlinearity without TPA

图 3 非线性条件下未考虑 TPA 时,耦合波导中入射光和控制光的电场分布情况

port4 出来的光并不占绝对多数了,入射光的一部分被分到 port3 输出,这是由于双光子吸收效应使控制光损耗了部分能量,从而耦合效果降低。控制光的损耗可以从图 4(b)中看到,集中于中间一排介质柱上传播的光,由于双光子吸收了部分能量,与图 3 中未考虑 TPA 的情况相比,场的强度变弱了。

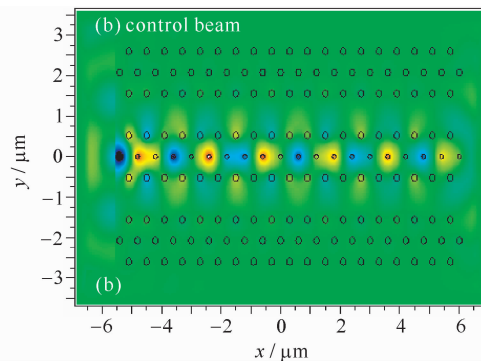
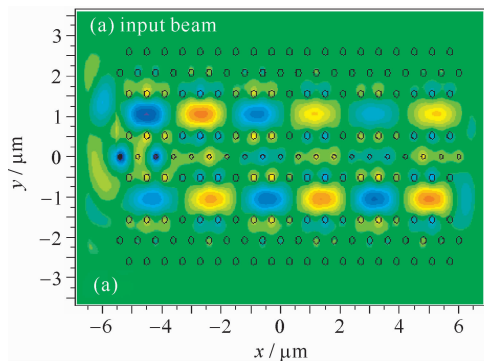


Fig. 4 Field distributions of input and control beams in waveguide for nonlinearity with TPA

图 4 非线性条件下考虑 TPA 时,耦合波导中入射光和控制光的电场分布情况

为了更好的理解 TPA 对光开关作用的影响,我们作出了入射光规一化的透射特性,如图 5 所示。可以看到,在未考虑 TPA 时,如图 5(a)所示,入射光的绝大部分从 port4 出来,其出射能量远远大于 port3;而考虑 TPA 时,从图 5(b)可以看到,入射光只是部分从 port4 出来,2 个出射端口的能量比值相差并不太大,这就是因为双光子吸收损耗了控制光能,减弱了耦合作用,从而使输入光的传输状态发生改变导致的。同时,还可以看到,在考虑 TPA 后,由于散射效果加强,使得 port3 和 port4 的输出频谱变宽了,不过出射光的中心频率基本没有移动。

本文以 TM 波进行计算,是因为通信窗口中,在 TM 模式下双光子吸收系数随波长的变化非常微小^[9],在不影响计算结果的情况下可以看作是一个恒量,我们在计算中就是把它当作一个恒量来处理的。可以看到,在考察定向耦合结构光开关的开关效果时,尤其是控制光较强时,吸收效果比较明显时,有必要将双光子吸收的

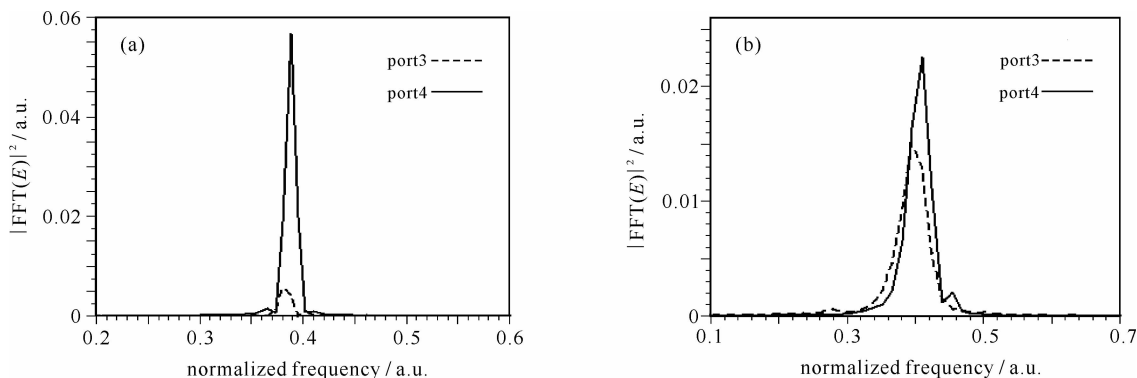


Fig. 5 Normalized transmission characteristics of input beam (a) without TPA and (b) with TPA

图 5 (a)未考虑 TPA 和(b)考虑 TPA 时,入射光的归一化透射特性

非线性效应考虑进去。

3 结 论

本文利用 FDTD 方法,建立 2 维光子晶体定向耦合波导开关模型,研究了 2 维光子晶体线缺陷波导定向耦合器的光开关作用,在非线性条件下,对不考虑和考虑双光子吸收的两种情况进行对比,发现 2 种情况下入射光的透射特性有一定的差异,不考虑 TPA 时,入射光从 port1 进入,绝大部分可以从 port4 出来,但是考虑了双光子吸收后,由于它对控制光的损耗吸收,会导致波导间的耦合作用减弱,使得光从 port3 出射的比例增加,这对控制光的动态开关作用产生了影响。本文是在强控制光的条件下对 TPA 效应的影响进行的分析,光强越强,吸收效果越明显,这种影响在动态开关过程中,尤其是强控制光下对透射结果控制精度要求较高时,应该给予考虑。这为设计耦合波导光开关器件时,提高开关控制的精确性提供了参考。

参考文献:

- [1] 汤炳书,沈廷根. 2 维光子晶体中的掺杂效应数值研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(4):562-564. (Tang Bingshu, Shen Tinggen. Numerical study of impurity-doping effects in two-dimensional photonic crystals. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(4):562-564)
- [2] Cuesta-Soto F, Martínez A, García J, et al. All-optical switching structure based on a photonic crystal directional coupler[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(1):161-167.
- [3] 葛德彪. 电磁波时域有限差分法[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2005:15-18. (Ge Debiao. Electromagnetic finite difference time domain method. Xi'an: Xidian University Press, 2005:15-18)
- [4] Liang T K, Nunes L R, Sakamoto T, et al. Ultrafast all-optical switching by cross absorption modulation in silicon wire waveguides[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(19):7298-7303.
- [5] Dekker R, Usechak N, Först M, et al. Ultrafast nonlinear all-optical processes in-silicon-on insulator waveguides[J]. *Appl Phys*, 2007, **40**:249-271.
- [6] Nobuo S. FDTD analysis of two-photon absorption and free-carrier absorption in Si high-index-contrast waveguides[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, **25**(9):2495-2501.
- [7] Tsang H K, Liu Y. Nonlinear optical properties of silicon waveguides[J]. *Semicond Sci Technol*, 2008, **23**:1-9.
- [8] Wagner S J, Joachim M, Helmy A S, et al. Polarization-dependent nonlinear refraction and two-photon absorption in GaAs/AlAs superlattice waveguides below the half-bandgap[J]. *Opt Soc Am B*, 2007, **24**(7):1557-1563.

Effect of two-photon absorption on all-optical switch based on photonic crystal directional coupler

Zhao Kun, Ding Yingchun

(Department of Physics, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: An analytic approach to all-optical switch was present, and the two-photon absorption effect were taking into account to analyze all-optical switch, which is based on two-dimensional photonic crystal directional coupler, by means of the finite-difference time-domain method. The numerical study shows that, for short device and high intensity control beam, nonlinear two-photon absorption(TPA) can take effect on the process of coupling action in all-optical switch, and then change the transmission characteristics of input beam. Therefore, under realistic conditions, TPA should be considered in desgning all-optical switch devices based on photonic crystal directional coupler.

Key words: two-dimensional photonic crystal; directional coupler; finite-difference time-domain; two-photon absorption; transmission characteristics