

doi:10.3788/gzxb20144309.0923001

非线性一维光子晶体反射谱的多值特征研究

张荣军,张娟,夏睿申

(上海大学 通信与信息工程学院 特种光纤与光接入网省部共建教育部重点实验室,上海 200072)

摘 要:以含有一层 kerr 非线性介质的一维光子晶体为对象,基于子层逆向递推算法,给出了非线性反射谱一种简单有效的数值计算方法.基于此方法得到了该结构在 1 535~1 565 nm 范围内的非线性反射谱.当输入光强高于阈值时,缺陷模缓慢移动并出现弯曲倾斜的多值特征.分析了上跳波长、下跳波长随输入光强的变化趋势.研究了线性周期介质和非线性介质结构参数对反射谱的影响.研究表明:增加周期介质的周期、高低折射率比和非线性层厚度都能使缺陷模变窄,输入光强阈值和上跳波长、下跳波长的阈值波长降低;而非线性介质的三阶非线性系数增大时,输入光强阈值降低,但缺陷模宽度、上跳波长和下跳波长的阈值波长没有明显改变.这种多值特征对于设计光学开关、光学滤波器等有着重要的指导作用.

关键词:非线性;克尔介质;光学滤波器;反射谱;多值特征;阈值

中图分类号:O437

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)09-0923001-5

Multiple-valued Characteristic Research of Nonlinear One-dimensional Photonic Crystal Reflection Spectrum

ZHANG Rong-jun, ZHANG Juan, XIA Rui-shen

(Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks,

School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Based on the sublayer division and backward recursion algorithm, a simple and efficient numerical method for calculating the nonlinear reflection spectrum of one-dimensional photonic crystal with one kerr nonlinear defect layer was presented. The nonlinear reflection spectrum in the wavelength range of 1 535 nm to 1 565 nm was obtained by the method. When incident intensity is higher than the threshold, the defect mode moves slowly and appears inclined curved multiple-valued features at certain wavelengths. The influence of incident intensity on jump-up wavelength and jump-down wavelength was analyzed. The influence of parameters of periodic dielectric layer and nonlinear layer on reflection spectrum were investigated systematically. The results showed that the period, high-low refractive index ratio of periodic medium and the thickness of nonlinear defect layer is increased, the defect mode width is narrowed and the threshold of incident intensity, jump-on and jump-down wavelength is decreased. While when the third-order nonlinear coefficient is increased for nonlinear layer, the threshold of incident intensity is decreased and the defect mode width, jump-on and jump-down wavelength threshold is not changed obviously. The multiple-valued feature has an important role in the design of optical switch, optical filter, et al.

Key words: Nonlinear; Kerr medium; Optical filter; Reflection spectrum; Multiple-valued feature; Threshold

OCIS Codes: 230.5298; 190.3270; 190.1450; 230.4320

基金项目:国家自然科学基金(No. 10804070),上海市重点学科(No. S30108)资助

第一作者:张荣军(1989-),男,硕士研究生,主要研究方向为非线性一维光子晶体. Email:tineer20051@163.com

导师(通讯作者):张娟(1976-),女,副教授,博士,主要研究方向为光通信无源器件、光信号处理、光子晶体、晶体光学等方面的研究.

Email:juanzhang@staff.shu.edu.cn

收稿日期:2013-12-25;录用日期:2014-01-22

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

光子晶体具有周期性的介电结构,其最基本特征是光子带隙和光子局域,由 Yablonovitch^[1] 和 John^[2] 在 1987 年首次分别独立提出. 其中一维光子晶体具有结构简单、容易实现、易于集成和插入损耗小等优点而被广泛研究并实际应用^[3-8]. 当一维光子晶体中引入非线性介质时,其光学特性变得更加丰富多彩,在光开关、光双稳态、光限制等领域有重要的应用^[9-11].

光学双稳态作为一种重要的非线性光学现象,于 1975 年由贝尔实验室的 McCall S L 等人从置于 Fabry-Pero 干涉腔中的钠蒸汽中首次测得^[12],之后光学双稳态迅速成为了一个重要的研究领域. 目前非线性一维光子晶体在光学双稳态方面的研究主要集中在两个方面. 一是光学传输特性的计算方法研究^[13-17];二是从结构设计和材料选择上进行的降低输入光强阈值的研究^[18-22]. He J 等提出了一种基于非线性材料 GaAs 的新颖结构,即将分布反馈结构和 Fabry-Perot (F-P) 结构相结合,并引入一层相位匹配层,该结构大大降低了双稳态的输入光强阈值^[23];Kwan P K 等基于一维非线性的 Helmholtz 方程,采用连续法计算了具有 Kerr 非线性的多介质层结构的光学双稳态^[24]. 由于输入、输出光强之间的双稳态特性,某一波长对应的透射率或反射率并非只有唯一值,故反射谱或透射谱会出现类似双稳态曲线的一对多的多值特征. 目前针对非线性一维光子晶体反射谱或透射谱的系统研究和讨论还鲜有报道. 文献[23]虽然给出了该结构的非线性反射谱,但仅指出当入射光强增大到某一值后反射谱出现向一侧弯曲;文献[24]中作者也仅给出了某一固定输入光强值时该结构的非线性透射谱,且计算较复杂.

本文以最简单的含有一层非线性 Kerr 介质的一维光子晶体为对象,基于子层逆向递推算法,给出了非线性反射谱的一种简单有效的数值计算方法. 基于此方法得到了该结构在 1 535~1 565 nm 波段范围内的非线性反射谱. 系统讨论了上跳波长、下跳波长随输入光强的变化趋势,同时研究了线性周期介质的高低折射率比、周期数和非线性介质的厚度、三阶非线性极化系数对非线性反射谱的影响.

1 物理模型与分析方法

具有一层非线性缺陷的光子晶体结构如图 1. 其中 A、B 介质的折射率分别为 n_A 和 n_B , 厚度分别为 d_A 和 d_B , λ_0 为入射光在真空中的波长. D 为非线性介质,有效折射率为 n_D ,线性部分折射率为 n_{D0} ,厚度为 d_D ,该光子晶体的结构简式为 $(AB)^N D (BA)^N$, N 为 AB 单元的周期数,假设光子晶体两外侧环境均为空气.

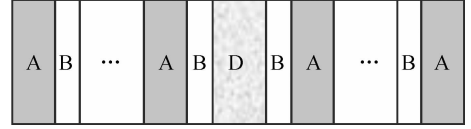


图 1 非线性一维光子晶体结构

Fig. 1 Structure of nonlinear one-dimensional photonic crystal

基于子层逆向递推算法^[16],从输出端反推输入端,则一个输出值只有一个输入值与之对应. 这种分层算法的思想就是将非线性介质均分为 M 个子层,只要分割的子层数足够多,则对每一个子层来讲,可将其折射率视为定值,即每个子层是一个均匀介质层. 于是该非线性介质层可看成由每层均是均匀介质的 M 个子层所构成,其中每个子层的折射率不同.

考虑平面波沿着一维光子晶体方向传播(Z 轴),每层介质中的电场 E 可表示为前向波和后向波之和

$$E = Ae^{ikz} + Be^{-ikz} \quad (1)$$

其中, A 、 B 分别表示为前向波和后向波的振幅. 在线性介质层中, A 、 B 是一个常数,而在非线性层中, A 、 B 不是一个常数. 当将非线性层划分为 M 个子层后,保证每个子层的厚度足够小,每个子层的 A 、 B 可以视为一个常数. 在相邻的两个子层的交界面处,应用电磁场的边界条件,得到相邻子层的关系

$$\begin{pmatrix} A_m \\ B_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{i\beta_m d_m} & 0 \\ 0 & e^{-i\beta_m d_m} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \left(1 + \frac{n_{m-1}}{n_m}\right) & \frac{1}{2} \left(1 - \frac{n_{m-1}}{n_m}\right) \\ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{n_{m-1}}{n_m}\right) & \frac{1}{2} \left(1 + \frac{n_{m-1}}{n_m}\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{m-1} \\ B_{m-1} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中, $\beta_m = k_m d_m$, k_m 为波矢, d_m 为子层厚度 ($d_m = d_D / M$), n_m , n_{m-1} 为相邻子层的有效折射率. 定义

$$Q^m = \begin{pmatrix} e^{i\beta_m d_m} & 0 \\ 0 & e^{-i\beta_m d_m} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \left(1 + \frac{n_{m-1}}{n_m}\right) & \frac{1}{2} \left(1 - \frac{n_{m-1}}{n_m}\right) \\ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{n_{m-1}}{n_m}\right) & \frac{1}{2} \left(1 + \frac{n_{m-1}}{n_m}\right) \end{pmatrix} \quad (3)$$

则式(2)可改写为

$$\begin{pmatrix} A_m \\ B_m \end{pmatrix} = Q^m \begin{pmatrix} A_{m-1} \\ B_{m-1} \end{pmatrix} \quad (4)$$

因为要从输出端反推上一层的场强,需要对式(4)求逆矩阵,则

$$\begin{pmatrix} A_{m-1} \\ B_{m-1} \end{pmatrix} = \bar{Q}^m \begin{pmatrix} A_m \\ B_m \end{pmatrix} \quad (5)$$

这样就从 m 层的场强求出上一层 $m-1$ 层的场强,然后求出 $m-1$ 层的折射率,即

$$n_{m-1} = n_{D_0} + \frac{\chi^{(3)}}{2n_{D_0}} |A_{m-1} + B_{m-1}|^2 \quad (6)$$

当第 $m-1$ 层子层的折射率求出来后,就可以求出该子层的传输矩阵,按照此方法,依次反向递推便可

求出所有 M 个子层的折射率和对应的传输矩阵. 那么非线性层 D 的总传输矩阵可表示为

$$M_D = M_1 \cdot M_2 \cdot M_3 \cdots M_M \quad (7)$$

对于整个非线性结构 $(AB)^N D (BA)^N$, 总传输矩阵为

$$M = M_{(AB)^N} \cdot M_D \cdot M_{(BA)^N} = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} \quad (8)$$

那么, 透射系数 t 和透射率 T 依次为

$$t = \frac{E_{out}}{E_{in}} = \frac{2}{M_{11} + M_{12} + M_{21} + M_{22}} \quad (9)$$

$$T = \frac{|E_{out}|^2}{|E_{in}|^2} = |t|^2 \quad (10)$$

要想获得非线性反射谱, 如果这时仍从输出端光强考虑, 则只能得到缺陷模的移动而不会出现缺陷模移动的同时出现弯曲倾斜的多值特征. 这是因为从输出端考虑, 一个输出光强 I_{out} 只对应一个输入光强 I_{in} , 只能得到一个反射率值. 本文考虑从输入、输出光强的双稳态曲线出发进行反射谱的计算. 给定一输出光强 I_{out} 的范围, 按照式(10)计算某一波长时对应的输入光强, 从而可得到该波长输入、输出光强的双稳态曲线, 然后再从该双稳态曲线出发, 得到某一固定输入光强时对应的若干个输出光强值, 计算得到多个反射率值. 如图2所示为1557 nm波长时的该结构的双稳态曲线. 图上标出了入射光强取 $0.31 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$ 时的两个输出光强 I_{out1} 和 I_{out2} , 由

$$R = 1 - \frac{I_{out}}{I_{in}}, (I_{out} = I_{out1}, I_{out2}) \quad (11)$$

可计算得到两个反射率值. 通过对不同波长的双稳态曲线的类似计算, 最后可得到该结构的非线性反射谱.

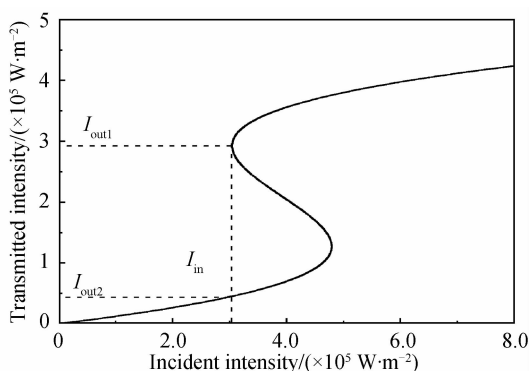


图2 单一波长的输入输出光强双稳态

Fig. 2 Single wavelength bistability of input-output characteristics

2 非线性反射谱

以图1结构为对象, 对非线性反射谱中的多值特征进行数值分析. 其中基本参数为: $N=5$, 介质A的折射率为 $n_A=1.38$, 厚度为 $d_A=\lambda_0/4 \times n_A$; 介质B的折射率为 $n_B=2.35$, 厚度为 $d_B=\lambda_0/4 \times n_B$; 非线性层D的

线性部分折射率为 $n_{D0}=2.35$, 厚度为 $d_D=659.5 \text{ nm}$, 三阶非线性极化系数的绝对值为 $|\chi^{(3)}|=1.706 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-2}$; 中心波长 $\lambda_0=1550 \text{ nm}$.

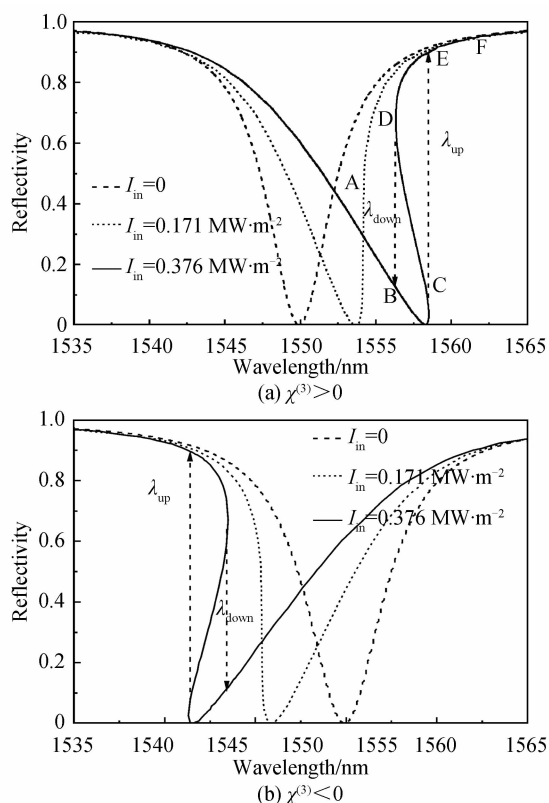


图3 非线性反射谱

Fig. 3 Nonlinear reflectivity spectrum

图3为不同输入光强时的反射谱, 其中(a)和(b)分别为非线性介质的三阶非线性极化系数符号相反时的情况, λ_{up} 和 λ_{down} 分别为多值情况时的上跳和下跳波长. 当输入光强 $I_{in}=0$ 时, 缺陷模处于中心波长1550 nm处, 相当于线性结构的反射谱. 对于 $\chi^{(3)} > 0$ ($\chi^{(3)}=1.706 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-2}$) 的聚焦型介质, 随着输入光强的增大, 非线性层折射率微小增大, 缺陷模从1550 nm缓慢红移, 如图3(a)所示. 当输入光强达到阈值 ($I_{in}=0.171 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$) 时曲线接近临界状态. 若输入光强继续增大, 曲线则出现弯曲倾斜现象, 在某一波长范围内出现反射率多值特征, 如图3(a)的实线所示. 当输入端的入射波长从1535 nm缓慢增大时, 曲线依次通过A、B、C然后上跳到E. 当入射波长从1565 nm缓慢减小时, 曲线依次通过F、E、D然后下跳到B, 这是一个典型的双稳态行为. 对图3(b)中三阶非线性极化系数 $\chi^{(3)} < 0$ ($\chi^{(3)}=-1.706 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-2}$) 的散焦型介质, 随着输入光强的增大, 缺陷模从中心波长1550 nm处开始蓝移, 同样出现多值特征.

当输入光强超过阈值后, 缺陷模出现多值特征, 上跳波长 λ_{up} 、下跳波长 λ_{down} 缓慢移动, 变化趋势如图4. 可以看出, 上跳波长的移动是一种近似线性的移动, 而

下跳波长的移动先开始较快,后来缓慢变慢.上跳波长移动的速度明显快于下跳波长移动的速度,使多值区间的宽度 $\Delta\lambda=\lambda_{up}-\lambda_{down}$ 逐渐增大.

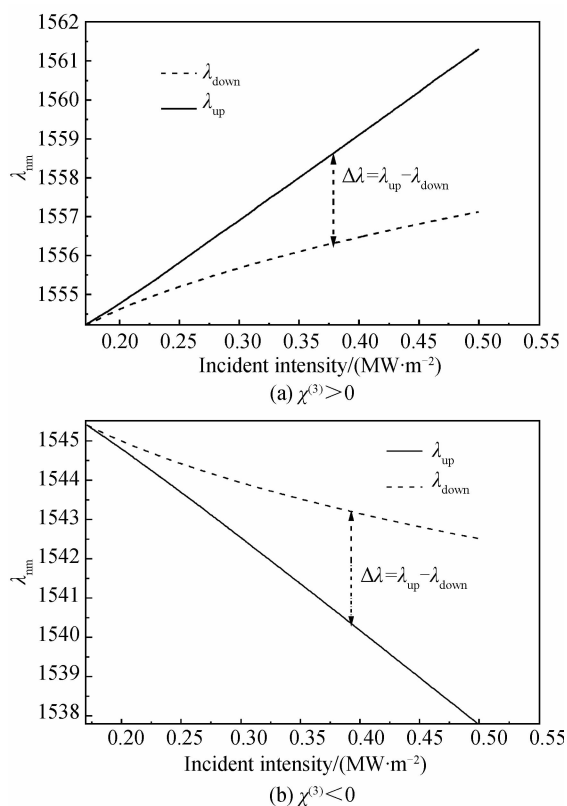


图4 上跳波长、下跳波长随输入光强的变化关系
Fig. 4 The influence of incident intensity on λ_{up} , λ_{down}

图5为缺陷模波长位置随入射光强的变化,其中 $\chi^{(3)} > 0$. 可见缺陷模随入射光强的增大向长波方向近似线性移动. 类似地,对 $\chi^{(3)} < 0$ 时缺陷模随入射光强的增大向短波方向也是近似线性变化的.

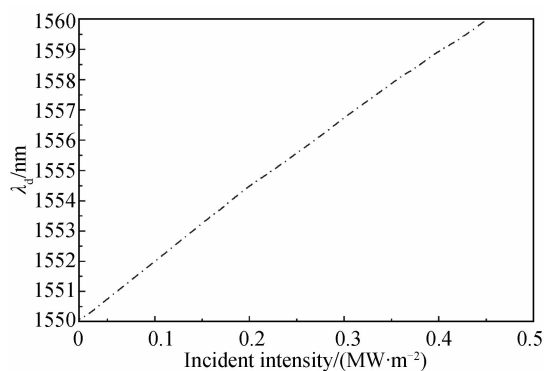


图5 缺陷模波长随输入光强的变化曲线 ($\chi^{(3)} > 0$)
Fig. 5 The influence of incident intensity on defect mode wavelength ($\chi^{(3)} > 0$)

3 结构参数对非线性反射谱的影响

以三阶非线性极化系数为正值时的情况进行讨论,对三阶非线性极化系数为负值时的情况有类似结果,只是缺陷模移动和弯曲方向不同.

3.1 线性介质层参数改变

首先讨论高低折射率比值对反射谱的影响. 图6为 $n_A = 1.38$, $n_B = 2.75$, 即高低折射率比值从原来 $2.35/1.38$ 增大到 $2.75/1.38$ 时不同输入光强的反射谱,其他参数同基本参数. 对比图6和图3(a)可知,高低折射率比值增大时缺陷模明显变窄,同时输入光强阈值及上跳波长、下跳波长的阈值波长也降低.

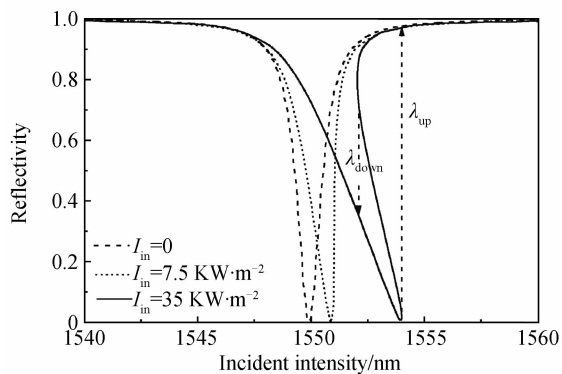


图6 高低折射率比值增加时的反射谱
Fig. 6 The reflection spectrum of high-low refractive index ratio increased

其次讨论周期性介质层的周期数对反射率的影响. 图7(a)为左右周期数均增大为6时不同输入光强的情况. 其中阈值情况如中间虚线所示. 图7(b)为周期分别为4、5、6时的阈值反射谱. 对比图7与图3(a),

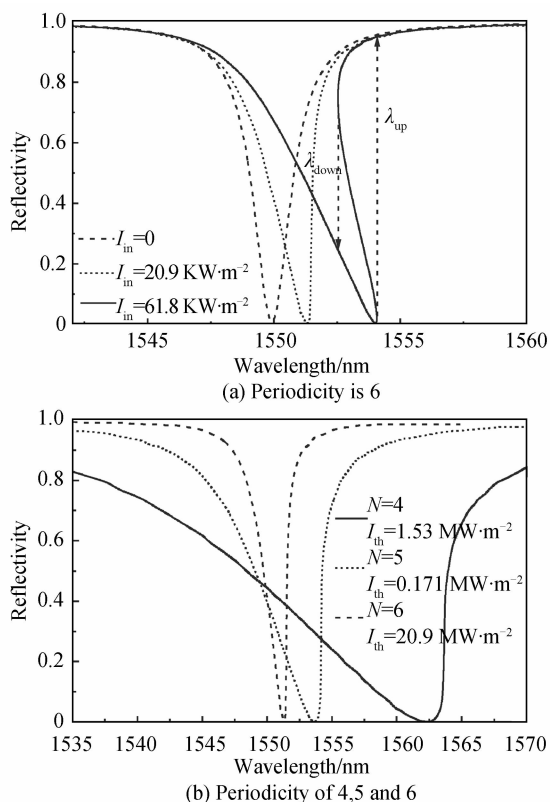


图7 不同周期时的反射谱
Fig. 7 The reflection spectrum with different periodicity

增加周期缺陷模变窄,且输入光强阈值降低, λ_{up} 和 λ_{down} 的阈值也相应降低.增大周期使输入光强阈值降低与文献[25]在讨论双稳态时得出的增加周期降低双稳态阈值是一致的.

图8为左侧周期数不变,右侧周期数增大为6时不同输入光强的情况.其中阈值情况如中间虚线所示.对比图8和图3(a),当左右不对称的增加周期数时,除缺陷模变窄,输入光强阈值降低, λ_{up} 和 λ_{down} 的阈值也降低外,它还有一个显著的特征就是缺陷模的最小反射率不为0,相比对称结构明显变大.

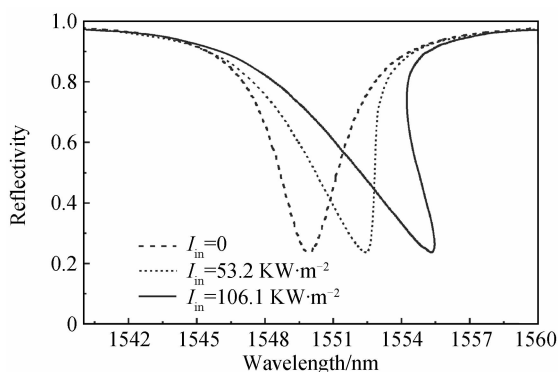


图8 左侧周期不变,右侧周期增大为6时的反射谱
Fig. 8 The reflection spectrum of left periodicity unchanged and right periodicity is 6

理论上可以解释为:周期数增加和高低折射率比值增大会使得非线性层中的场强增大,非线性层的非线性效应增强^[25],从而最终导致了输入光强阈值降低.另一方面,周期增加和高低折射率比值增大都使缺陷模变窄,使能量更集中在中心处,也能使输入光强阈值降低.此外,缺陷模变窄使得入射波长只有更接近缺陷模波长才能使两者共振产生双稳态曲线,从而使上跳波长和下跳波长的阈值波长也得到降低.

3.2 非线性层参数改变

图9(a)为非线性层的厚度增加一倍,其它参数不变时的结果;图9(b)为三阶非线性极化系数增大(取 $\chi^{(3)} = 2 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-2}$),其它参数不变时的结果.可以看出,非线性层厚度成倍增加时,与之前讨论的线性介质层参数变化对反射谱的影响相同,即缺陷模变窄、输入光强阈值降低和上跳波长、下跳波长阈值降低.但增大三阶非线性极化系数,缺陷模、上跳、下跳波长的阈值波长并没有变化,只是输入光强的阈值降低.

上述分析结果理论上可以理解为:对于只含有一个非线性层的一维光子晶体,左右两侧的周期性线性层可以视为F-P腔,当缺陷层的厚度增加一倍时,使得整个一维光子晶体的腔长增加,使缺陷模变窄^[25],缺陷模变窄不仅降低输入光强阈值同时还能降低上跳波长和下跳波长的阈值波长.而对于增大三阶非线性系数,它并没有改变一维光子晶体的空间结构,不能使缺

陷模变窄,它只能增强非线性层的非线性效应,从而只能降低输入光强的阈值而不能降低上跳波长和下跳波长的阈值波长.

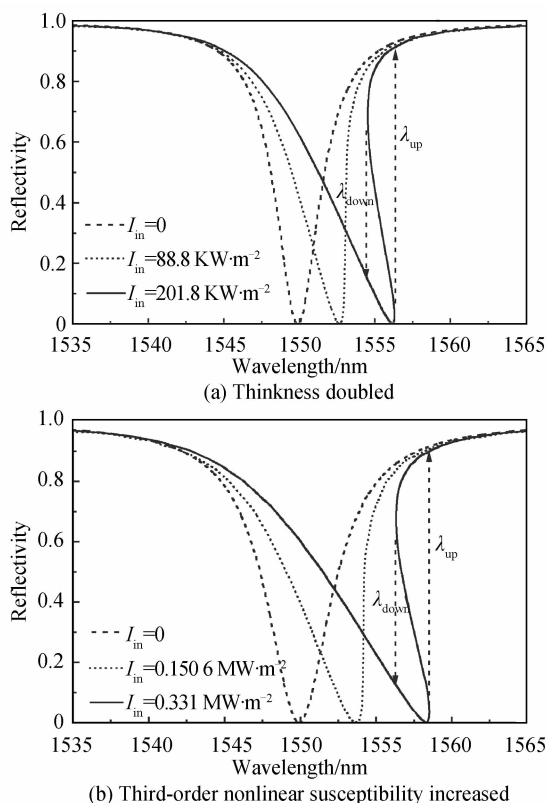


图9 不同非线性层参数时的反射谱
Fig. 9 The reflection spectrum with different nonlinear layer parameters

对比改变周期性介质层参数和非线性层参数对反射谱的影响,可以看出,反射谱对周期性介质层的折射率比值和周期的变化要明显敏感于对非线性层的厚度和三阶非线性系数的变化.这对于降低输入光强阈值和上跳波长、下跳波长的阈值波长将非常有意义.

4 结论

本文以含有一层非线性kerr介质的一维光子晶体为对象,基于子层逆向推算算法,给出了非线性反射谱的一种简单有效的数值计算方法.从单个波长的输入输出光强双稳态出发,计算出此单一入射波长在一个固定输入光强下的反射率值.按照此方法,改变入射波长,计算出在相同固定输入光强下的反射率值,最终得到非线性反射谱.并讨论了上跳波长和下跳波长随输入光强的变化关系,结果表明无论对于聚焦型结构还是散焦型结构,上跳波长随输入光强的增大都是近似线性变化的,而下跳波长是非线性变化的.详细讨论了各个参数改变下对非线性反射谱的影响.研究发现,增加周期介质的周期、高低折射率比和非线性层厚度都能使缺陷模变窄,输入光强阈值和上跳波长、下跳波长的阈值波长降低;而非线性介质的三阶非线性系数

增大时,输入光强阈值降低,但缺陷模宽度、上跳波长和下跳波长的阈值波长没有明显改变.这种多值特征对于设计光学开关、光学滤波器等都有着重要的指导作用.

参考文献

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Physical Review Letters*, 1987, **58**(20):2059-2061.
- [2] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. *Physical Review Letters*, 1987, **58**(23):2486-2489.
- [3] LIU Qi-neng. Resonance theory of the defect mode of 1-D doping photonic crystal [J]. *Acta Photonic Sinica*, 2012, **41**(4):446-450.
刘启能. 一维掺杂光子晶体缺陷模的共振理论 [J]. 光子学报, 2012, **41**(4):446-450.
- [4] LIU Qi-neng, LIU Qin. Dispersion characteristics of total reflection tunnel in 1D photonic crystal [J]. *Acta Photonic Sinica*, 2013, **42**(5):611-614.
刘启能, 刘沁. 一维光子晶体全反射隧穿的色散特性 [J]. 光子学报, 2013, **42**(5):611-614.
- [5] LIU Xiao-jing, LI Na, ZHANG Si-qi, et al. Transmission characteristic of ladder type function photonic crystals [J]. *Acta Photonic Sinica*, 2012, **41**(10):1193-1199.
刘晓静, 李娜, 张斯淇, 等. 一维新型阶跃函数光子晶体透射特性 [J]. 光子学报, 2012, **41**(10):1193-1199.
- [6] DAI X Y, XIANG Y J, WEN S C, et al. Thermally tunable and omnidirectional terahertz photonic bandgap in the one-dimensional photonic crystals containing semiconductor InSb [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, **109**(5):053104.
- [7] ZHANG Juan, YU Shuai, GUO Shen, et al. Design of flat-top polarization filters based on one-dimensional photonic crystal theory [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2010, **38**(1):0105005.
张娟, 于帅, 郭森, 等. 基于一维光子晶体理论的平顶偏振滤波器设计 [J]. 中国激光, 2010, **38**(1):0105005.
- [8] SKOROMETS V, NEMEC H, KADLEC C, et al. Electric field-tunable defect mode in one-dimensional photonic crystal operating in the terahertz range [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **102**(24):241106.
- [9] LIU Y, QIN F, ZHOU F, et al. Ultrafast and low-power photonic crystal all-optical switching with resonant cavities [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, **106**(8):083102.
- [10] SOON B Y, HAUS J, SCALORA M, et al. One-dimensional photonic crystal optical limiter [J]. *Optics Express*, 2003, **11**(17):2007-2018.
- [11] LI Wen-hui, BI Wei-hong, WANG Jin-sheng. Bistable anisotropy in one-dimensional coupled cavity optical waveguides with Kerr defect [J]. *Acta Photonic Sinica*, 2011, **40**(4):529-532.
李文慧, 毕卫红, 王金生. Kerr 缺陷一维耦合腔光波导的双稳态方向性 [J]. 光子学报, 2011, **40**(4):529-532.
- [12] MCCALL S L, GIBBS H M, VENKATESAN T N C. Optical transistor and bistability [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1975, **65**:1184.
- [13] DANCKAERT J, FOBELETS K, VERETENNICOFF I, et al. Dispersive optical bistability in stratified structures [J]. *Physical Review B*, 1991, **44**(15):8214-8225.
- [14] HAUS J W, SOON B Y, SCALORA M, et al. Coupled-mode equations for Kerr media with periodically modulated linear and nonlinear coefficients [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2002, **19**(9):2282-2291.
- [15] CHEN L X, DENG X X, DING W Q, et al. Finite-difference time-domain analysis of optical bistability with low threshold in one-dimensional nonlinear photonic crystal with Kerr medium [J]. *Optics Communications*, 2002, **209**(4):491-500.
- [16] CHEN Li-xue, DING Wen-qiang, LI Wen-hui, et al. Transfer matrix algorithm of one-dimensional inhomogeneous Kerr medium [J]. *Acta Photonic Sinica*, 2004, **33**(4):497-500.
陈历学, 丁卫强, 李文慧, 等. 一维非均匀 Kerr 介质的传输矩阵算法 [J]. 光子学报, 2004, **33**(4):497-500.
- [17] YUAN Qiu-hong, XIE Kang, LIU Zheng-hua, et al. An original algorithm of propagation characteristics of one-dimensional photonic crystal with inhomogeneous Kerr medium [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2009, **26**(6):703-707.
苑秋红, 谢康, 刘正华, 等. 含 Kerr 介质一维光子晶体传播特性的一种新算法 [J]. 量子电子学报, 2009, **26**(6):703-707.
- [18] PAN T, TANG C, GAO L, et al. Optical bistability of nonlinear multilayered structure containing left-handed materials [J]. *Physics Letters A*, 2005, **337**(4):473-479.
- [19] HOU P, CHEN Y Y, SHI J L, et al. Optical bistability in one-dimensional photonic band gap structures with coupled nonlinear defects [J]. *Optics Communications*, 2007, **273**(2):441-445.
- [20] LYUBCHANSKII I L, DADOENKOVA N N, ZABOLOTIN A E, et al. Optical bistability in one-dimensional magnetic photonic crystal with two defect layers [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, **103**(7):07B321(1-3).
- [21] AGHAIE M, HEBRI D, GHAEDZADEH A, et al. Controlled bistability by using array defect layers in one-dimensional nonlinear photonic crystals [J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(13):2477-2484.
- [22] KONG X K, LIU S B, ZHANG H F, et al. Tunable bistability in photonic multilayers doped by unmagnetized plasma and coupled nonlinear defects [J]. *IEEE Quantum Electronics*, 2013, **19**(1):8401407(1-7).
- [23] HE J, Cada M. Combined distributed feedback and Fabry - Perot structures with a phase - matching layer for optical bistable devices [J]. *Applied Physics Letters*, 1992, **61**(18):2150-2152.
- [24] KWAN P K, Lu Y Y. Computing optical bistability in one-dimensional nonlinear structures [J]. *Optics Communications*, 2004, **238**(1):169-175.
- [25] CHEN Xian-feng, SHEN Xiao-ming, JIANG Mei-ping, et al. Study on the bistability of nonlinear Bragg microcavity [J]. *Acta Photonic Sinica*, 2007, **36**(4):613-616.
陈宪锋, 沈小明, 蒋美萍, 等. 非线性 Bragg 微腔的双稳态研究 [J]. 光子学报, 2007, **36**(4):613-616.