

基于六角格子光子晶体波导的高效全光二极管设计

刘云凤 刘彬 何兴道 李淑静

High efficiency all-optical diode based on hexagonal lattice photonic crystal waveguide

Liu Yun-Feng Liu Bin He Xing-Dao Li Shu-Jing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 064207 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.064207

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.064207>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I6>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

外腔镜非线性运动对激光回馈应力测量系统精度的影响及修正

Correction of error induced by nonlinear movement of feedback mirror in laser feedback stress measurement system

物理学报.2015, 64(8): 084208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084208>

用于直接驱动的快速变焦新方案

A novel fast zooming scheme for direct-driven laser fusion

物理学报.2015, 64(5): 054209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.054209>

单光子调制锁定 Fabry-Perot 腔

Fabry-Perot cavity locked by using single photon modulation

物理学报.2012, 61(20): 204203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.204203>

基于多路复用体全息光栅的角度放大器设计

Design of angular magnifier based on multiplexed volume holographic grating

物理学报.2012, 61(6): 064216 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.064216>

基于六角格子光子晶体波导的高效全光二极管设计*

刘云凤 刘彬† 何兴道 李淑静

(南昌航空大学, 江西省光电检测技术工程实验室, 南昌 330063)

(2015年10月26日收到; 2015年11月28日收到修改稿)

提出了一种基于六角格子光子晶体波导微腔和 Fabry-Perot (FP) 腔非对称耦合的全光二极管结构, 它由一个包含非线性 Kerr 介质的高 Q 值微腔与一个光子晶体波导中的 FP 腔组成. 通过有限时域差分方法对其传输特性进行了仿真, 发现通过两腔的非对称耦合可以实现在特定光强度下的正向传输、反向截止的功能. 在靠近微腔方向光入射时, 特定强度的光可以激发非线性微腔的 Kerr 效应, 改变了 Fano 腔的共振频率, 从而变成透射状态. 而远离微腔方向光入射, 由于这个不对称的结构造成场局域的分布不对称, 激发微腔 Kerr 效应的光强还不够, 所以光不能透射. 所设计的全光二极管结构具有良好的性能参数: 最大透射率高和高透射比、光强阈值低和易于集成等.

关键词: 全光器件, 光子晶体波导, 全光二极管

PACS: 42.79.-e, 42.70.Qs, 42.65.Pc

DOI: 10.7498/aps.65.064207

1 引言

光子晶体^[1,2]是一种介电常数空间周期性变化, 能够控制光子行为的一种人工结构. 它最突出的特点就是具有光子带隙^[3], 而频率处于带隙内的光是禁止传播的. 由于光子晶体对光的有效可控特性, 基于光子晶体结构的光学器件得到了很大发展, 目前已经研制出多种光子晶体光学器件, 如光子晶体光纤^[4-6]、光子晶体波导^[7-9]、光开关^[10-12]、分束器^[13-15]、分插复用器^[16-18]和光学滤波器^[19-21]等. 研究发现, 基于光子晶体的光开关器件可以利用电光效应、热光效应或三阶 Kerr 等非线性效应控制光子晶体或其内部缺陷的折射率, 从而改变光的透射或反射, 具有反应快、功耗低、可集成化等特点.

全光二极管是指光从一端入射有透射信号, 而从相反的方向入射无透射信号的器件, 具有类似于电子二极管具有正向导通、反向截止的功能. 所以

全光二极管在集成光学电路和全光网络中有重要应用. 1994年, Scalora 等首次提出全光二极管的概念, 他们通过使用折射率在空间线性变化材料组成一维非线性光子晶体来实现全光二极管^[22,23]. 之后, 人们不断提出各种类型的全光二极管设计方案: 包括具有非对称结构的二维非线性光子晶体微腔^[24-26]; 左手周期材料^[27]; 在涂有有机材料的银光栅结构中实现的可调表面等离子体激元^[28]; 由一维光子晶体和损耗金属薄膜组成的光隧道异质结构^[29]; 低对称性磁光子晶体材料^[30]; 周期性极化铌酸锂波导^[31]; 非对称的非线性吸收材料的多层结构^[32]; 光子晶体光纤^[33]; 基于液晶光子晶体异质结电调制光二极管^[34,35]. 然而以上设计在全光二极管总的性能参数如光强阈值、透射比 $(T_{\lambda}^{+} - T_{\lambda}^{-}) / (T_{\lambda}^{+} + T_{\lambda}^{-})$ 和最大透射率等方面或多或少有所缺陷. 一款综合性能优秀并且易于制作和集成的全光二极管在集成光学电路中具有重要的应用价值.

本文提出利用二维六角格子光子晶体波导

* 国家自然科学基金 (批准号: 61205119) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liubin_d@126.com

旁侧的高 Q 值非线性 Fano 微腔和波导中的 Fabry-Perot (FP) 腔结构, 通过两个结构的不对称耦合, 实现高效被动型全光二极管效果, 这种结构可在半导体工艺基础上进行制作并与其他器件集成. 本文通过非线性的有限时域差分 (FDTD) 方法对该结构的传输特性进行数值仿真, 并对衡量全光二极管功能的重要参数如光强阈值、透射比和最大透射率等进行计算和分析.

2 模型

我们设计了一个二维六角光子晶体结构, 背景为空气, 其折射率为 $n_0 = 1$, 圆形介质柱为 GaAs 材料, 折射率为特定值 $n = 3.46$ 是常用 Kerr 非线性材料. 晶格常数 a , 介质柱直径为 $0.24a$. 通过除去一排介质柱就形成线缺陷波导结构. 而对高 Q 的光子晶体微腔, Q 值可以达到 10^5 以上, 因此具有非常好增强材料的 Kerr 非线性作用. 在光子禁带中的微腔模式很多, 要充分利用微腔的 Kerr 非线性效应, 尽量选择光场局域在非线性材料上的模式. 我们在线缺陷波导结构下面的第二层中引入椭圆介质柱结构的点缺陷替换其中的一个 GaAs 柱的结构, 如图 1(a) 所示. 设置椭圆长短轴分别为 $0.53a$ 和 $0.3a$, 使得点缺陷的共振频率落在光子晶体波导横磁 (TM) 波的工作波长范围内. 此时点缺陷与波导耦合形成 Fano 共振腔. 微腔与线缺陷波导距离一层介质柱, 所以光能够在它们之间进行耦合. 同时, 在微腔上方的波导结构位置中加入一个介质柱作为反射层 A 阻断线缺陷波导, 使微腔对应共振峰由反射型变成透射型, 形成一个透射型的 Fano 共振腔. 并对反射层 A 进行适当优化 (增加两个小的介质柱, 直径为 $0.05a$). 通过 FDTD 仿真得到其透射谱如图 1(b) 所示, 在归一化频率 0.55432 处得到一个非常尖锐的 Fano 透射峰, 计算其品质因子 $Q = \omega_0/\Delta\omega$, $\Delta\omega$ 为峰半高宽, ω 为峰中心频率, 大约 3300. 由于光子晶体中的微腔可以具有超高的品质因子 Q , 对于一个单模腔, 耦合进入腔内的光强与入射光和 Q 因子成正比 $I_{\text{cav}} = I_0(Q/\pi)$, 其中 I_{cav} 是腔内光强, I_0 是入射光强^[29]. 如果腔内介质为非线性三阶 Kerr 材料, 这意味着腔内的非线性要比光直接照射同种均匀介质强 Q/π 倍. 通过仿真得到透射峰的光场分布如图 1(c) 所示, 可以看到光场大部分局域在微腔的 GaAs 材料上, 并且峰的位置可以通过改变微腔的结构和折射率进行微调. Fano 共振腔结构的透射谱与光子晶体的结构

有关, 可以通过改变微腔和周围波导结构调节其峰值位置和透射率, 这对设计新功能器件十分有利. 假设介质具有 Kerr 非线性. 我们选择工作波长在离开透射峰一点点的位置, 这时假设介质当相对弱的光以共振频率入射时, 得到的是共振反射; 而入射光逐渐增强时, 共振峰的位置由于折射率的非线性变化而移动, 这个过程中在某一个光强光会迅速从反射状态变成透射状态, 实现了一次由关到开的过程. 但是, 由于腔的非线性物理特性, 入射光由强变弱的过程中, 则会在另一处光强从透射状态变成反射状态, 也经历一次由开到关的过程. 前后两个过程中透射率突变所对应的光强不同. 这样一个结构存在两个稳态, 因而可以作为光学双稳态开关器件.

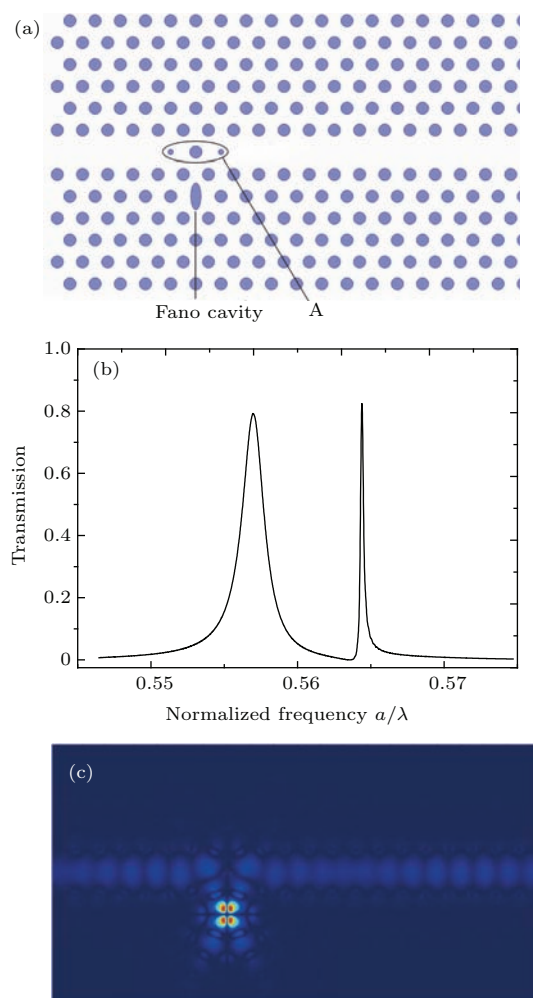


图1 (网刊彩色) (a) 光子晶体波导中对应微腔的位置加入三个介质柱反射层结构; (b) TM 波透射谱; (c) Fano 共振峰的光场分布

Fig. 1. (color online) (a) Schematic diagram with adding three dielectric cylinder to photonic crystal as a reflector layer above the micro-cavity; (b) the transmission spectra; (c) the optical field distribution of Fano resonance peak.

全光二极管的功能是实现工作频率的光单向导通, 反向截止. 这就要求在设计的过程中充分利用光的非线性效应, 并且还需要光在正、反方向入射时的不对称特性. 所以我们在图 1(a) 高 Q 值非线性微腔的基础上, 在光子晶体波导中再增加一个反射层 B, 这个反射层和原来的反射层 A 正好在光子晶体波导中形成了 FP 腔的结构. 由于反射层 A 位于微腔的正上方, 因而整个结构就变成 FP 腔与 Fano 共振腔的耦合结构, 如图 2(a) 所示. 通过改变反射层 B 的位置就可以改变 FP 腔的腔长, 调节 FP 腔共振频率在光子晶体波导的导模范围内, 并且靠近 Fano 腔的共振频率. 这样可以保证它们在一起时可以相互干涉, 形成不对称结构.

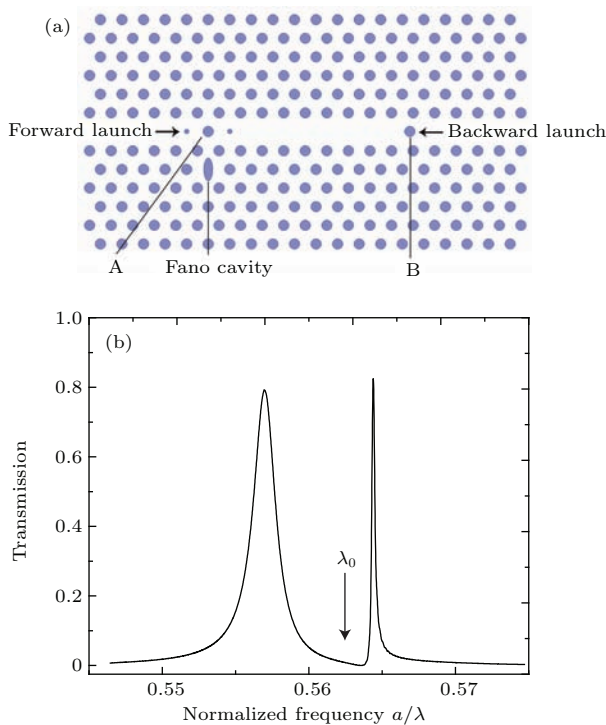


图 2 (a) 全光二极管设计结构; (b) 不考虑非线性效应下的 TM 波透射谱

Fig. 2. (a) Schematic diagram of the all-optical diode structure; (b) transmission spectra of the structure without nonlinear effect.

这里我们调节反射层 B 距离反射层 A 中心为 $9.35a$ 时, 通过 FDTD 仿真二极管结构在比较弱的光强入射情况下的透射谱 (不考虑非线性效应), 如图 2(b) 所示. 可以看到, 透射谱中同时出现 Fano 微腔和 FP 腔相互耦合形成的两个透射峰: 靠近长波相对较宽的峰是 FP 腔的透射峰, 归一化频率 0.5570; 靠近短波比较窄的是 Fano 腔的透射峰, 归一化频率 0.5644. 宽峰处光场在 FP 腔内有强局域,

与微腔的共振很弱. 而窄峰的光场强局域在微腔中, 在这里光场得到极大的增强.

3 全光二极管传输特性仿真与性能分析

如果考虑微腔点缺陷材料 Kerr 非线性效应, 选择非常接近窄峰的反射区域内波长为 λ_0 作为工作波长. 工作波长 λ_0 的光正向入射时, 入射光虽然会被反射层 A 以及微腔周围介质柱反射回去, 但是由于光场直接从波导照射到紧靠微腔周围的介质柱上, 必然会有消逝波进入微腔. 随着入射光强的增强, 就会激发微腔内点缺陷介质的非线性 Kerr 效应, 从而使得微腔介质的折射率改变, 窄峰的波长会朝向 λ_0 位置动态的移动, 在某一光强下, 会由反射状态突然变成透射状态. 由于结构的非对称性, 入射光从反方向入射时, 入射光首先会被反射层 B 反射, 消逝波首先要进入 FP 腔, 再由 FP 耦合到达微腔, 导致消逝波在空间上的分布不同于正向入射的情况. 因此, 同样强度的光入射, 反向入射可能还未有效地激发微腔内介质的非线性 Kerr 效应, 对折射率的改变小于正向入射情况. 利用该效应, 我们可以设计出高效率的全光二极管.

GaAs 在可见光波段的非线性 Kerr 系数为: $n_2 = 1.5 \times 10^{-5} \mu\text{m}^2/\text{W}$. 由于微腔的局域效应, 在波导旁点缺陷之外的其他位置, 光场分布要远远弱于点缺陷的光场. 因此只考虑了点缺陷的非线性, 忽略了其他位置上 GaAs 的非线性. 对全光二极管结构的传输特性在可见光波段进行仿真. 我们选择 $\lambda_0 = 0.56262$ 作为工作频率, 这个频率位于反射禁带内, 处在宽峰和窄峰之间并靠近窄峰. 图 3(a) 是以功率密度 $P = 0.3 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$ 正向入射的电场图. 可以看到, 工作波长的光以连续波正入射时, 大部分光都被反射层 B 和微腔反射, FP 腔内几乎没有场分布. 如果把功率密度提高到 $P = 0.7 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$: 光正向入射时, 如图 3(b) 所示, 可以完全激发微腔内的 Kerr 非线性效应, 实现正向导通; 反向入射时, 如图 3(c) 所示, 由于结构的非对称性, 大部分光还是被反射而不能通过光子晶体波导. 而当入射光的功率密度达到 $P = 1.5 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$, 这时反向入射的光才能够实现导通, 如图 3(d) 所示. 所以, 对于功率密度 $P = 0.7 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$, 我们所设计的结构实现了全光二极管正向导通、反向截止的功能.

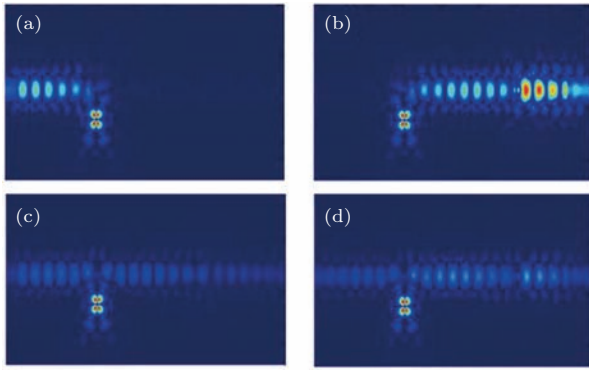


图3 (网刊彩色) (a) $P = 0.3 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$ 正向入射光场分布; (b) $P = 0.7 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$ 正向入射光场分布; (c) $P = 0.7 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$ 反向入射光场分布; (d) $P = 1.5 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$ 反向入射光场分布

Fig. 3. (color online) Optical field distributions with non-linear Kerr effect at λ_0 : (a) Forward launch at $P = 0.3 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$; (b) forward launch at $P = 0.7 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$; (c) backward launch at $P = 0.7 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$; (d) forward launch at $P = 1.5 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$.

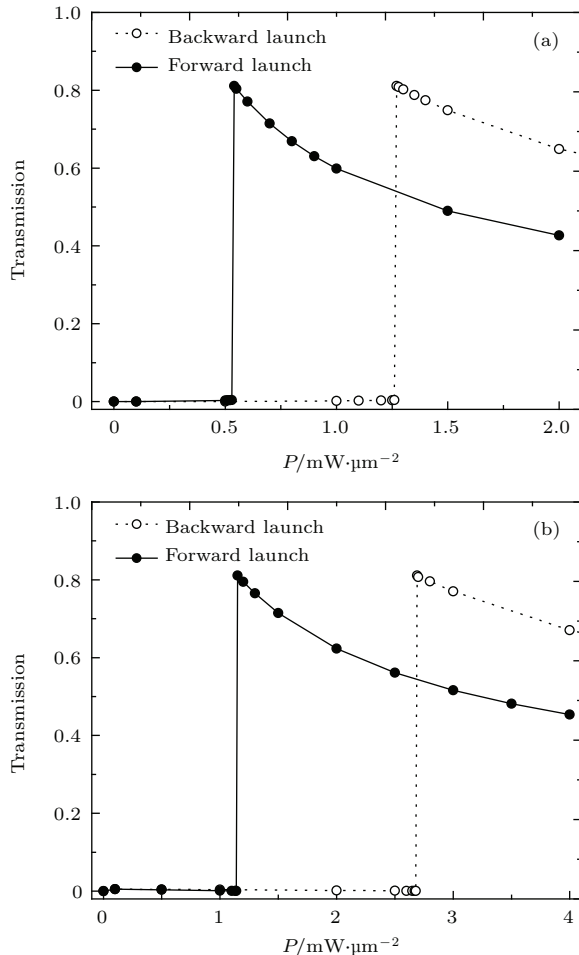


图4 不同工作波长时全光二极管正向和反向透射率随入射光功率密度的变化关系 (a) $\lambda_0 = 0.56262$; (b) $\lambda_0 = 0.5623$

Fig. 4. Relationship between transmission with forward and backward input power density: (a) $\lambda_0 = 0.56262$; (b) $\lambda_0 = 0.5623$.

接下来, 我们利用FDTD方法仿真了不同工作波长下正向和反向反透射率随入射光功率密度的变化关系. 图4(a)为工作波长 $\lambda_0 = 0.56262$ 的正反透射率与波长的关系. 可以看到, 当功率密度达到 $P = 0.5 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$ 时, 正向入射时由反射变为透射, 透射率突然增大80%, 而反向透射率几乎为0, 使得正反透射比非常高. 而在功率密度增大到 $P = 1.3 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$ 时, 反向入射才由反射变为透射, 透射率突然增大. 所以, 在功率密度 $0.5 \text{ mW}/\mu\text{m}^2 \leq P \leq 1.3 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$ 时, 该结构的正反透射率随着入射光强的变化显示了全光二极管的效果, 可得到单向导通的功能, 并且达到80%的最大透射率. 工作波长 $\lambda_0 = 0.5623$, 由于更加远离Fano峰, 如图4(b)所示, 所以需要到达更高的功率密度 $1.15 \text{ mW}/\mu\text{m}^2 \leq P \leq 2.69 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$ 时, 才能实现全光二极管正向导通、反向截止的效果. 也就是说, 选择的工作波长越靠近Fano峰, 全光二极管所需的功率阈值越低.

4 结 论

本文提出在二维六角格子光子晶体波导中, 通过高 Q 值的非线性微腔和FP腔的非对称耦合实现高效的全光二极管效应. 我们通过FDTD方法对其传输特性进行了全面的仿真和分析, 数值结果证明, 这个设计在全光二极管的各项性能参数上具有很好的效果: 高 Q 值的微腔使得光强的阈值功率比较低, 最大透射率大于80%, 高的正反透射比, 并且易于集成等. 相比于其他结构的全光二极管设计, 本方案的上述性能都具有潜在优势, 有可能使其成为高效的应用器件.

参考文献

- [1] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [2] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [3] Ho K M, Chan C T, Soukoulis C M 1990 *Phys. Rev. Lett.* **65** 3152
- [4] Yang Q Q, Hou L T 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8345 (in Chinese) [杨倩倩, 侯蓝田 2009 物理学报 **58** 8345]
- [5] Russell P 2003 *Science* **299** 358
- [6] Lou S Q, Wang Z, Ren G B, Jian S S 2004 *Chin. Phys.* **13** 1052
- [7] Wang C X, Xu X S, Li F, Du W, Xiong G G, Liu Y L, Chen H D 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 2472
- [8] Zhu X G, Yu T B, Chen S W, Shi Z, Hu S J, Lai Z Q, Liao Q H, Huang Y Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1014 (in Chinese) [朱桂新, 于天宝, 陈淑文, 石哲, 胡淑娟, 赖珍荃, 廖清华, 黄永箴 2009 物理学报 **58** 1014]

- [9] Lu H, Tian H P, Li C H, Yue J F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2049 (in Chinese) [鲁辉, 田慧平, 李长红, 纪越峰 2009 物理学报 **58** 2049]
- [10] Zhao Y H, Qian C J, Qiu K S, Gao Y N, Xu X L 2015 *Opt. Express* **23** 9211
- [11] Chen H M, Wang G D 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 0323006 (in Chinese) [陈鹤鸣, 王国栋 2011 光学学报 **31** 0323006]
- [12] Li Z J, Zhang Y, Li B J 2006 *Opt. Express* **14** 3887
- [13] Zhou X P, Shu J 2013 *Acta Opt. Sin.* **33** 0423002 (in Chinese) [周兴平, 疏静 2013 光学学报 **33** 0423002]
- [14] Sesay M, Jin X, Ouyang Z B 2013 *J. Opt. Soc. Am. B* **30** 2043
- [15] Ren H L, Qin Y L, Liu K, Wu Z F, Hu W S, Jiang C, Jin Y H 2010 *Chin. Opt. Lett.* **8** 749
- [16] Ren H L, Qin Y L, Wen H, Cao Q J, Guo S Q, Chang L P, Hu W S, Jiang C, Jin Y H 2012 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **24** 332
- [17] Fasihi K, Mohammadnejad S 2009 *Opt. Express* **17** 8983
- [18] Wu Y D, Hsu K W, Shih T T, Lee J J 2009 *J. Opt. Soc. Am. B* **26** 640
- [19] Yang C Y, Xu X M, Ye T, Miao L P 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 017807 (in Chinese) [杨春云, 徐旭明, 叶涛, 缪路平 2011 物理学报 **60** 017807]
- [20] Chen Y, Wang W Y, Yu N 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 034205 (in Chinese) [陈颖, 王文跃, 于娜 2014 物理学报 **63** 034205]
- [21] Zhuang Y Y, Zhou W, Ji K, Chen H M 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 224202 (in Chinese) [庄煜阳, 周雯, 季珂, 陈鹤鸣 2015 物理学报 **64** 224202]
- [22] Scalora M, Dowling J P, Bowden C M, Bloemer M J 1994 *Appl. Phys.* **76** 2023
- [23] Tocci M D, Bloemer M J, Scalora M, Dowling J P, Bowden C M 1995 *Appl. Phys. Lett.* **66** 2324
- [24] Zhao N S, Zhou H, Guo Q, Hu W, Yang X B, Lan S, Lin X S 2006 *Opt. Soc. Am. B* **23** 2434
- [25] Lin X S, Wu W Q, Zhou H, Zhou K F, Lan S 2006 *Opt. Express* **14** 2429
- [26] Zhou H, Zhou K F, Hu W, Guo Q, Lan S, Lin X S, Gopal A V 2006 *Appl. Phys.* **99** 123111
- [27] Feise M W, Shadrivov I V, Kivshar Y S 2005 *Phys. Rev. E* **71** 037602
- [28] Hu X Y, Chin X, Li Z Q, Gong Q H 2010 *New J. Phys.* **12** 023029
- [29] Xue C H, Jiang H T, Chen H 2010 *Opt. Express* **18** 7479
- [30] Khanikaev A B, Steel M J 2009 *Opt. Express* **17** 5265
- [31] Callo K, Assanto G 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 314
- [32] Philip R, Anija M, Yelleswarapu C S, Rao D 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 141118
- [33] Konorov S O, Biryukov D A S, Bugar I, Beloglazov M J, Skibina N B, Chorvat jr D, Chorvat D, Scalora M, Zheltikov A M 2004 *Appl. Phys. B: Lasers Opt.* **34** 1417
- [34] Hwang J, Song M H, Park B, Nishimura S, Toyooka T, Wu J W, Takanishi Y, Ishikawa K, Takezoe H 2005 *Nat. Mater.* **4** 383
- [35] Song M H, Park B, Takanishi Y, Ishikawa K, Nishimura S, Toyooka T, Takezoe H 2006 *Thin Solid Films.* **509** 49

High efficiency all-optical diode based on hexagonal lattice photonic crystal waveguide^{*}

Liu Yun-Feng Liu Bin[†] He Xing-Dao Li Shu-Jing

(Jiangxi Engineering Laboratory for Optoelectronics Testing Technology, Nanchang Aeronautical University,
Nanchang 330063, China)

(Received 26 October 2015; revised manuscript received 28 November 2015)

Abstract

A high efficiency all-optical diode based on 2D hexagonal lattice photonic crystal (PC) waveguide is proposed. The structure is asymmetrically coupled by a high Q factor micro-cavity-containing nonlinear Kerr medium and a Fabry-Perot cavity in PC waveguide. The transmission properties are numerically investigated by finite-difference time-domain (FDTD) method. Because of interference between the two cavities, the structure can achieve the function of forward transmission and backward cut-off under a suitable light intensity. For light incidence close to the direction of micro-cavity, nonlinear Kerr effect of micro-cavity can be excited by a certain light intensity. Then the resonant frequency of Fano cavity will change and forward incidence becomes transmission from reflective state. But for light incidence away from the direction of micro-cavity, the field distribution is asymmetric due to the asymmetric structure, so backward incidence needs stronger incidence light to excite Kerr effect and keeps reflective state. This design of all-optical diode has many advantages, including high maximum transmittance, high transmittance contrast ratio, low power threshold, and ease of integration, and so on.

Keywords: all-optical devices, photonic crystal waveguides, all-optical diode

PACS: 42.79.-e, 42.70.Qs, 42.65.Pc

DOI: 10.7498/aps.65.064207

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61205119).

[†] Corresponding author. E-mail: liubin_d@126.com