

# Design and Performance Analysis of High-Speed Photonic Crystal Modulator

Ke Ji, Heming Chen\*

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing  
Email: \*yourjk1991@163.com

Received: Jul. 9<sup>th</sup>, 2012; revised: Jul. 16<sup>th</sup>, 2012; accepted: Sep. 2<sup>nd</sup>, 2012

**Abstract:** A high speed modulator based on photonic crystals using the feature of the disappearing of the defect mode is presented in the paper. The optical wave is in 1550 nm. The modulator using a photonic crystal of triangular lattice with dielectric cylinder. On basis of the triangular lattice photonic crystal, the modulator uses the structure of direct coupling of point defects and line defects. The high-speed photonic crystal modulator based on a round point defect resonator is designed by introducing optical controlled GaAs as a tunable material. It has an extinction ratio of 49.7 dB, insertion loss as low as 0.352 dB, modulation rate up to 296 Gbit/s.

**Keywords:** Photonic Crystal; High-Speed; Defect Mode; Modulator

## 高速光子晶体调制器的设计与性能分析

季珂, 陈鹤鸣\*

南京邮电大学, 南京  
Email: \*yourjk1991@163.com

收稿日期: 2012年7月9日; 修回日期: 2012年7月16日; 录用日期: 2012年9月2日

**摘要:** 本文设计了一种利用光子晶体缺陷态消失的光子晶体调制器, 它的工作波长为 1550 nm, 该调制器采用了介质柱型的三角晶格光子晶体。在三角晶格光子晶体的基础上, 采用点缺陷与线缺陷直接耦合的结构, 通过在点缺陷中引入非线性材料砷化镓(GaAs)作为可调谐物质, 设计了基于圆形点缺陷谐振腔的光控高速光子晶体调制器。该调制器消光比高达 49.7 dB, 插入损耗低至 0.352 dB, 调制速率为高达 296 Gbit/s。

**关键词:** 光子晶体; 高速; 缺陷模; 调制器

### 1. 引言

无线 3G、高清视频、高速宽带上网和云计算等业务的需求推动了网络 IP 流量的快速增长, 人们对通信带宽的需求也在不断增长, 提高传输速率是提高传输带宽的一项重要技术。高速光通信系统成为研究热点, 而高速光调制器是高速光通信系统的关键器件, 其中寻找高调制速率的光调制器是工作的重点, 国内外已有不少研究人员从事光调制器的研究<sup>[1-4]</sup>。目前采用了多种方案来实现光调制<sup>[5-7]</sup>, 其中基于硅基材料的

\*通讯作者。

调制器调制速率不高<sup>[4,8]</sup>, 光子晶体材料凭借其优良特性及制作工艺, 在光调制器中发挥着重要的作用。本文提出的利用光子晶体缺陷态消失特性的光调制器, 调制速率高达 296 Gbit/s, 具有高调制速率、高消光比、低插入损耗的特点。

### 2. 高速光子晶体调制器的原理和结构设计

#### 2.1. 高速光子晶体调制器的调制原理

本文根据基于“调制后缺陷模消失”的原理来设计调制器。调制后缺陷模消失是根据光子晶体的光子

局域特性，如果在光子晶体中引入点缺陷，在光子带隙中将形成相应的缺陷能级<sup>[7]</sup>；如果在光子晶体中引入线缺陷，就可以形成一条光的通路，此时线缺陷相当于波导，使落在光子禁带范围内的光能够沿着线缺陷传播；那么如果在二维光子晶体中同时引入点缺陷和线缺陷，当点缺陷位于线缺陷附近时，线缺陷传导模就会受到点缺陷的影响，线缺陷波导和点缺陷微腔就会产生模场能量的耦合，从而形成点、线缺陷所共有的共振频率，即共振缺陷模。

本文设计的光子晶体调制器采用点、线缺陷组合的结构，在点缺陷谐振腔中填充可调谐物质，泵浦光强度的变化会导致点缺陷处可调谐物质的折射率发生改变，从而使缺陷模消失，从而实现了对信号光的“通”、“断”调制。

如图 1 所示，其中图 1(a)为调制之前的带隙及缺陷模分布图，图 1(b)为调制后缺陷模消失的示意图。信号光均取在未调制前缺陷模频率处，调制前，信号光可以通过调制器，此时调制器处于“通”状态。但在调制之后，缺陷模消失，此时信号光不能通过，调制器处于“断”状态<sup>[9]</sup>。

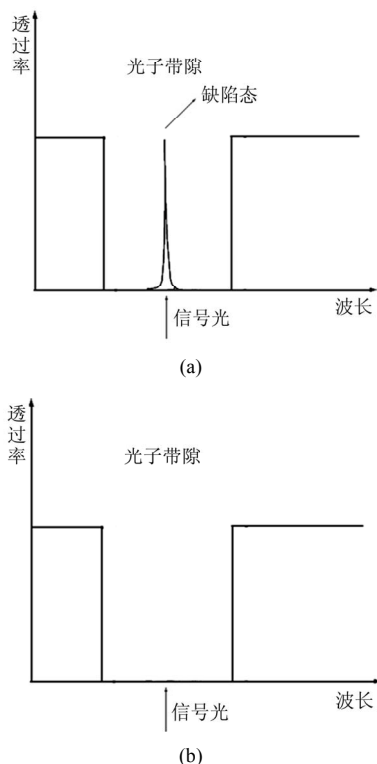


Figure 1. Schematic of modulating based on the changing of the defect mode  
图 1. 基于缺陷模改变实现调制的示意图

## 2.2. 高速光子晶体调制器的结构设计

目前，二维光子晶体晶格多采用四方晶系、六角晶系和三角晶系。其中，三角晶系受制造不均匀性的影响较小，易出现完整的光子禁带。但在三角晶系中要得到完整的禁带，必须保证足够的孔隙率<sup>[4]</sup>。本文所设计的高速光子晶体调制器的光子晶体采用 $S_1$ 介质柱型的三角晶格，如图 2 所示。

在图 2 中，圆形硅介质柱的半径为  $r = 0.2232 \mu\text{m}$ ，折射率均为 3.4，晶格常数为  $a = 0.744 \mu\text{m}$ ；背景为空气，折射率为 1。

用 Rsoft 软件可以仿真计算得到 TE 偏振模的光子带隙分布图，如图 3 所示。

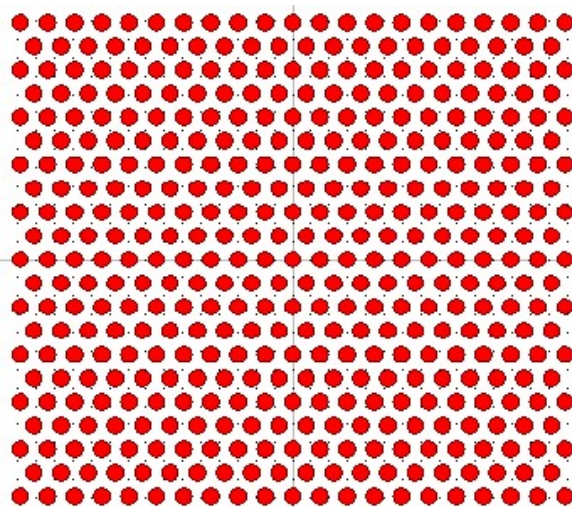


Figure 2. The lattice structure of the photonic crystal  
图 2. 光子晶体的晶格结构

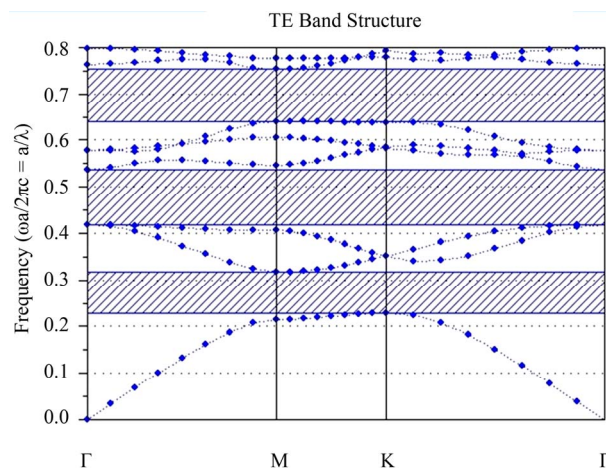


Figure 3. Bandgap structure of photonic crystal of triangular lattice with dielectric cylinder  
图 3. 介质柱型三角晶格光子晶体的带隙结构图

由图 3 可知,斜线部分为光子禁带,光子禁带的最大带隙的归一化频率  $(a/\lambda)$  范围为 0.42049~0.54042,禁带宽度为 0.11993,对应的波长为 1.377~1.769  $\mu\text{m}$ 。本文所设计的高速光子晶体调制器的工作波长为 1550 nm,在此禁带范围之内。

为了实现对 1550 nm 的光进行调制,在三角晶格的光子晶体中同时引入了点缺陷和线缺陷,并采用了直接耦合的方式,如图 4 所示。

在图 4 中,点缺陷的两侧引入了线缺陷,并且在线缺陷与点缺陷之间有一个  $S_i$  介质柱,它有利于中心点缺陷的局域作用。但点缺陷与线缺陷之间的介质柱不能过多,例如大于等于 2 个的时候,将不利于 1550 nm 的光波从点缺陷耦合到线缺陷中去。

在点缺陷中填充非线性材料砷化镓(GaAs)<sup>[10,11]</sup>,它具有泵浦功率低、回应速度快等优点,其折射率定义为  $N = n - in'$ 。当没有泵浦光入射时,GaAs 材料处于基态,折射率实部为 3.55,虚部为 0;当使用强度为  $0.4\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 、波长为 810 nm 的泵浦光源照射时,GaAs 处于激发态,其折射率实部为 3.55,虚部约为 2.55<sup>[12-15]</sup>。综上所述,通过控制泵浦光就能使点缺陷处的非线性材料 GaAs 的折射率发生改变,从而使点缺陷处的缺陷模发生变化,实现对光的调制。

### 3. 高速光子晶体调制器的性能分析

#### 3.1. 点缺陷尺寸的选取

本文是在三角晶格的光子晶体中引入一个点缺陷以实现对 1550 nm 的光波的“通”、“断”调制,因此点缺陷的选择对调制器性能起着决定性的作用。并且采用的是点缺陷和线缺陷直接耦合的方式,由于本文是对 1550 nm 的光波进行调制,不同尺寸的点缺陷

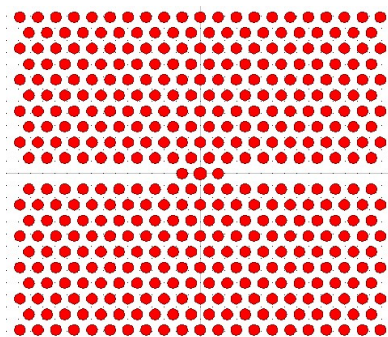


Figure 4. The structure of high-speed photonic crystal modulator  
图 4. 高速光子晶体调制器的结构

将对应不同的中心频率,因此通过对调制器中不同半径的圆形点缺陷所对应的缺陷模进行仿真分析,可以选出适合 1550 nm 的光波点缺陷的尺寸。

在无泵浦光照射时,点缺陷处 GaAs 的折射率实部为 3.55,虚部为 0。此时直接耦合方式的高速光子晶体调制器中,经 Rsoft 软件仿真可得,缺陷模频率对应 1550 nm 的光波的圆形点缺陷的缺陷模如图 5 所示。

图 5 中,缺陷模频率为 1550 nm,点缺陷对应的半径为  $R = 1.245r$ 。

#### 3.2. 高速光子晶体调制器的性能分析

下面对高速光子晶体调制器的消光比、插入损耗、调制速率进行了详细的分析,这些性能指标的值反映了调制器性能的好坏。

1) 高速光子晶体调制器的消光比:消光比是评价数字调制能力的重要指标,仿真得出调制器输出端的 1550 nm 的光波的时域稳态响应图。如图 6 所示,为调制器“通”、“断”两种状态下的时域稳态响应图。

由图 6(a)可知,当高速光子晶体调制器处于稳定的“通”状态时,输出的 1550 nm 的光波强度与输入的 1550 nm 的光波强度之比(即透过率)为 0.92216,图 6(b)所示为调制器处于稳定的“断”状态时,1550 nm 的光波的时域稳态响应图,透过率为  $9.8802 \times 10^{-6}$ ,消光比的定义为<sup>[11]</sup>

$$\eta = 10 \log(I_{\max}/I_{\min}) \quad (1)$$

式中,  $I_{\max}$  是调制后的传输光强的最大值,  $I_{\min}$  是调制后传输光强的最小值,  $\eta$  是调制器的消光比。

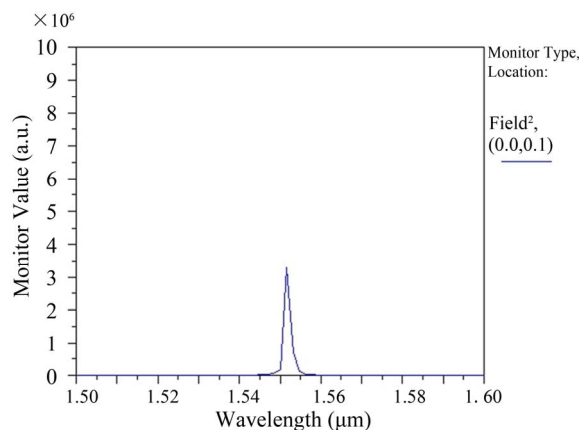


Figure 5. The defect mode of the round point defect  
图 5. 圆形点缺陷对应的缺陷模



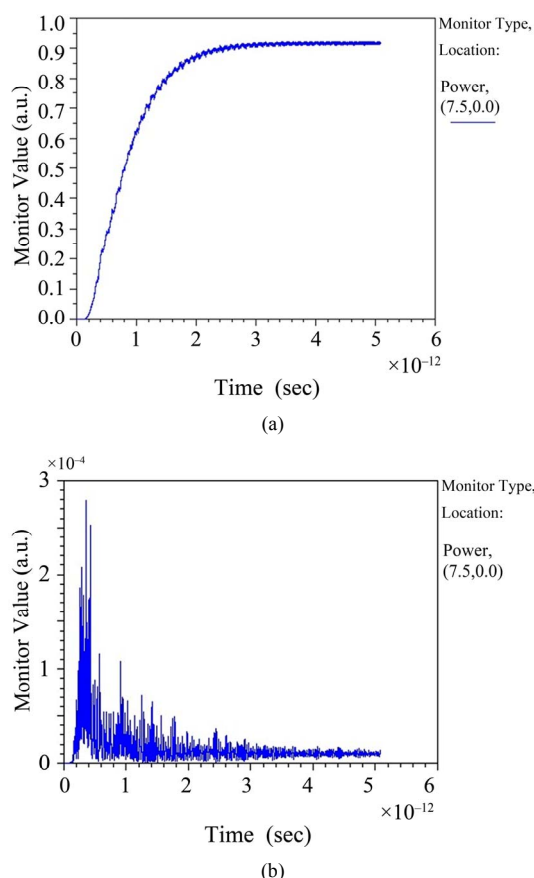


Figure 6. Time domain steady-response intensity of the high-speed photonic crystal modulator. (a) Time domain steady-response intensity of the on-state; (b) Time domain steady-response intensity of the off-state

图 6. 高速光子晶体的时域稳态响应图。(a) “通” 状态时域稳态响应图；(b) “断” 状态时域稳态响应图

由式(1)可知，该高速光子晶体调制器的消光比  $\eta$  约为 49.7 dB。

2) 插入损耗：插入损耗的公式为<sup>[11]</sup>

$$\gamma = 10 \log \left( I_{in} / I_{out_{max}} \right) \quad (2)$$

式中， $I_{in}$  是无调制器时的传输光强， $I_{out_{max}}$  是附加调制信号时所产生的最大传输光强。根据仿真所得到的数据，由式(2)可知，该高速光子晶体调制器的插入损耗  $\gamma$  约为 0.352 dB。

3) 调制速率：调制速率的公式为

$$v = 1/T \quad (3)$$

$v$  为调制速率， $T$  主要为系统的稳定时间，由图 6 可知，该调制器的系统稳定时间大约为 3.3824 ps，由式(3)可知，该高速光子晶体调制器的调制速率约为 296 Gb/s。

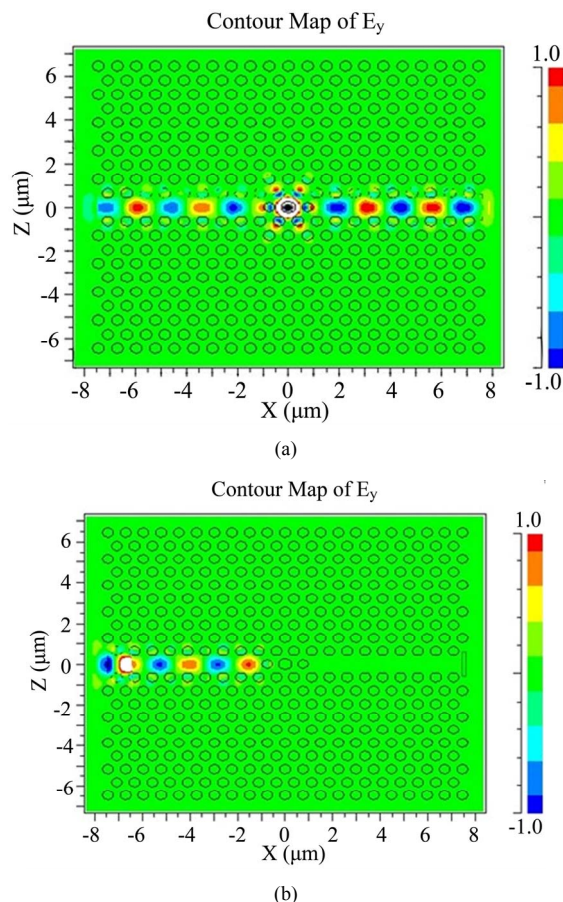


Figure 7. Steady field ( $E_y$ ) distribution of the modulator. (a) Steady field ( $E_y$ ) distribution of the on-state; (b) Steady field ( $E_y$ ) distribution of the off-state

图 7. 稳态场强( $E_y$ )分布图。(a) “通” 状态下稳态场强( $E_y$ )分布图；(b) “断” 状态下的稳态场强( $E_y$ )分布图

4) 工作波长在 1550 nm 的高速光子晶体调制器的稳态场强分布图如图 7 所示。

由图 7 可知，1550 nm 的光波受到高速光子晶体调制器的调制效果好，消光比高。

## 4. 结论

本文在仿真实验的基础上，利用光子晶体缺陷态消失特性设计了高速光子晶体调制器，该调制器的工作波长为 1550 nm。运用 Rsoft 软件进行仿真计算得到，该高速光子晶体调制器的消光比高达 49.7 dB，插入损耗低至 0.352 dB，调制速率为高达 296 Gb/s。本文设计的调制器在高速光通信系统中具有重要价值。

## 参考文献 (References)

[1] 苏坚. 基于光子晶体的 THz 波调制器特性研究[D]. 南京邮电

- 大学.
- [2] 苏坚, 陈鹤鸣. 基于液晶光子晶体的太赫兹波调制器[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2710-2713.
- [3] 王江涛, 陈向宁. 铁电液晶光寻址空间光调制器性能分析[J]. 应用光学, 2012, 33(1): 57-63.
- [4] 张彬, 毛陆虹, 谢生, 郭维廉, 陈燕, 于欣, 张世林. 硅基环形电—光调制器的理论分析和性能优化[J]. 天津大学学报, 2010, 43(3): 189-193.
- [5] 陈燕, 张世林, 张彬, 毛陆虹, 郭维廉. 光调制器综述[J]. 半导体技术, 2008, 33(4): 286-288.
- [6] 陈鹤鸣, 王国栋. 一种新型缺陷模迁移光子晶体全光开关设计[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 167-272.
- [7] H. M. Chen, *et al.* Optically-controlled high-speed terahertz wave modulator based on nonlinear photonic crystals. *Optics Express*, 2011, 19(4): 3599-3603.
- [8] 马锡英. 光子晶体原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [9] M. Notomi, A. Shinya, S. Mitsugi, G. Kira, E. Kuramochi and T. Tanabe. Optical bistable switching action of Si high-Q photonic-crystal nanocavities. *Optics Express*, 2005, 13(7): 2678-2687.
- [10] 刘培生. 晶体点缺陷基础[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [11] 李陶德瑾. 基于复晶格光子晶体 THz 波调制器特性的研究[D]. 南京邮电大学.
- [12] 卢俊, 王丹, 陈亚孚. 光电子器件物理学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 233-245.
- [13] H. F. Tiedje, H. K. Haugen and J. S. Preston. Measurement of nonlinear absorption coefficients in GaAs, InP and Si by an optical pump THz probe technique. *Optics Communications*, 2007, 274(1): 187-197.
- [14] A. R. M. Javan, N. Granpayeh. Fast Terahertz wave switch/modulator based on photonic crystal structures. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2009, 23(1): 203-212.
- [15] P. Kūzel, F. Kadlec and H. Němec. Propagation of Terahertz pulses in photoexcited media: Analytical theory for layered systems. *Journal of Chemical Physics*, 2007, 127(2): 1-11.