

# 基于磁光子晶体的磁控可调谐太赫兹 滤波器和开关\*

郭展 范飞 白晋军 牛超 常胜江<sup>†</sup>

(南开大学现代光学研究所, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

(2010年6月29日收到; 2010年9月2日收到修改稿)

本文研究了铁氧体磁性材料应用于太赫兹波导器件的可行性. 利用铁氧体磁性材料的磁导率随外磁场改变而变化的性质, 设计出了一种新颖的磁控连续可调谐太赫兹滤波器和开关. 利用平面波展开法(plane wave expansion, PWE)和时域有限差分法(finite difference time domain, FDTD)计算了二维磁光子晶体中外磁场变化对带隙位置和宽度的影响, 结果显示应用该结构实现的滤波器和开关具有良好的性能.

**关键词:** 磁光子晶体, 铁氧体, 太赫兹

**PACS:** 42.70.Qs, 42.79.Ci, 07.57.Hm

## 1. 引言

太赫兹波是指频率在 0.1—10 THz (波长 30  $\mu\text{m}$ —3 mm) 的电磁波, 在电磁波谱中位于微波和红外光之间, 被称为“太赫兹空隙”. 太赫兹技术在生物技术<sup>[1]</sup>、光谱学<sup>[2]</sup>、成像<sup>[3]</sup>、安检<sup>[4]</sup>等领域都有广阔的应用前景. 近年来太赫兹源和探测技术<sup>[5-8]</sup>的飞速进步, 大大促进了太赫兹技术的发展. 滤波器、开关等太赫兹功能器件是太赫兹应用系统中必不可少的组成部分. 研制具有良好性能、便于集成的太赫兹滤波器和开关, 是当今太赫兹研究领域的一大热点.

近年来, 用液晶、磁性材料等与光子晶体相结合的方法来设计功能器件, 能很方便地通过改变外电场、外磁场从而实现调谐功能, 因而受到广泛关注. Li 等人理论上研究了一个基于硅光子晶体平板的电控太赫兹开关<sup>[9]</sup>. Ghattan 等人在实验上进一步确定, 施加一个外电场以改变液晶的光轴, 可以显著影响光子晶体带隙中太赫兹波的传输<sup>[10]</sup>. 吴彝等利用布拉格光纤设计了一种磁场调制液晶太赫兹开关<sup>[11]</sup>, 但只能进行一维调控, 并且加工困难.

另外, 这些器件具有共同缺点: 只能提供一种功能. Zhang 等提出了一个既能实现开关、又能实现滤波的磁控液晶填充光子晶体波导器件<sup>[12]</sup>. 它由二维光子晶体波导(填充向列相液晶 E7)和可转动磁线圈组成, 通过转动外磁场, 改变液晶分子取向, 从而调节带隙. 该器件作为开关在 1 THz 具有较高消光比, 并且在 1.084—1.145 THz 范围可作为连续可调谐滤波器. 但该方法需要机械上转动磁场方向, 不易操作, 并且调谐范围较窄.

本文设计的磁光子晶体太赫兹器件既能实现开关和滤波两种功能, 又能消除液晶光子晶体器件调控不方便、调谐范围窄等缺点. 磁性材料可以通过调节外加直流磁场或温度来改变其光学性质. 对磁光子晶体加外磁场, 就可对其带隙进行调节, 以实现各种功能. Sigalas 等人理论上分析了磁导率  $\mu$  对光子晶体带隙的影响<sup>[13]</sup>. Kee 等研究了二维磁光子晶体的一些性质, 发现在施加外磁场后, 其能带位置向低频移动, 带隙宽度变窄<sup>[14]</sup>. 车明等研究了二维磁光子晶体中不同散射子形状对带隙结构的影响<sup>[15]</sup>.

本文利用铁氧体磁性材料的磁导率是外磁场的函数的性质, 通过改变外磁场大小, 来调节磁光

\* 国家重点基础研究发展计划(973) (批准号:2007CB310403), 国家自然科学基金(批准号:60772105), 天津市自然科学基金重点项目(批准号:10JCZDJC15200)和教育部博士点基金(批准号:20090031110033)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: sjchang@nankai.edu.cn

子晶体带隙,以实现滤波或开关功能.该方法不需要改变晶体结构和机械转动外场方向,只需调节外磁场大小,易于操控.并且由于磁导率变化前后对折射率差影响较大,所以带隙变化明显,调谐范围较宽.

## 2. 铁氧体磁性材料应用于太赫兹波导器件的可行性研究

铁氧体是一种具有铁磁性的金属氧化物,有较高的介电性能,饱和磁化强度较低,在高频时具有较高的磁导率.铁氧体按晶格结构可分为三类:尖晶石型、石榴石型和磁铅石型<sup>[16]</sup>.其中石榴石型铁氧体晶体在极化均匀的情况下,可实现低损耗 THz 传输,且吸收系数较低(0.05—0.3 cm<sup>-1</sup>)<sup>[17]</sup>.铁氧体介电常数的典型值在 12.0—16.0<sup>[18]</sup>,本文模拟中取 12.96.

本文设计的结构中施加的外磁场沿铁氧体柱轴向方向.由于横磁模(TM 模)的磁场方向平行于外磁场方向,它不与磁性材料的偶极矩相互作用,所以对于 TM 模,加磁场后其带结构不变.而横电模(TE 模)的磁场垂直于外磁场,它将引起外磁场周围磁偶极子的运动<sup>[14]</sup>.此情况下对于 TE 模,铁氧体的磁导率 $\mu$ 是频率 $\omega$ 、饱和磁化率 $M_s$ 、外磁感应强度 $B_{ex}$ 的函数:

$$\mu = \frac{(\omega_{ex} + \omega_m)^2 - \omega^2}{\omega_{ex}(\omega_{ex} + \omega_m) - \omega^2}, \quad (1)$$

其中 $\omega_{ex} = \gamma B_{ex}$ , $\omega_m = 4\pi\gamma M_s$ , $\gamma$ 为旋磁比<sup>[19]</sup>.毕海星等利用该式对二维正方格子铁氧体线缺陷光子晶体进行了磁导率计算<sup>[20]</sup>.本文根据(1)式计算了磁导率随外磁场和频率的变化关系,如图 1 所示.其中 $\omega$ 和 $\omega_{ex}$ 用归一化频率表示.对于饱和磁场铁氧体材料,我们取 $\omega_m = 1.0(2\pi c/a)$ <sup>[20]</sup>.由图可见,磁导率随外磁场增大而减小;当外磁场强度较小( $\omega_{ex} < 5(2\pi c/a)$ )时,磁导率变化较大,继续增大磁场,磁导率将趋近于 1.而磁导率随频率的变化很小,仅当外磁场强度接近饱和磁化强度( $\omega_{ex} \approx \omega_m = 4\pi\gamma M_s = 1.0(2\pi c/a)$ )时,磁导率才随频率的增大而迅速升高.

本文设计的结构中需要磁导率在 1.3—1.7 之间变化.图 2 计算了不同外磁场下,铁氧体磁导率随频率的变化. $B_{ex} \geq 1.5(\gamma^{-1})$ 时,曲线已经相当平缓,所以可以认为在我们讨论的频段内,铁氧体的

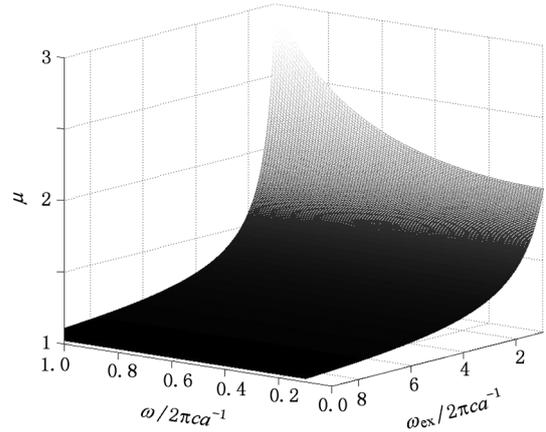


图 1 铁氧体磁导率随外磁场 $\omega_{ex}$ 和频率 $\omega$ 的变化( $\omega_m = 1.0(2\pi c/a)$ )

磁导率是无色散的.

当磁导率在 1.3—1.7 之间变化时,所加外磁场 $B_{ex}$ 应该在 3.4—1.5( $\gamma^{-1}$ )之间变化,计算得 $B_{ex}$ 的值为 38.7—17 T,这是实验中可以稳定获得的.

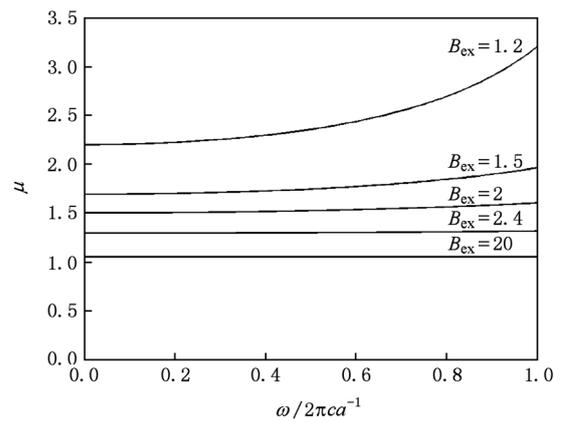


图 2 不同外磁场下,铁氧体磁导率随频率的变化( $\omega_m = 1.0(2\pi c/a)$ , $B_{ex}$ 单位为 $\gamma^{-1}$ )

## 3. 磁控可调谐光子晶体波导滤波器与开关的设计与数值模拟

图 3 是二维六角晶格线缺陷光子晶体波导的示意图,图中圆形区域为铁氧体柱的横截面(介电常数 $\epsilon = 12.96$ ,磁导率为 $\mu$ ),其余空间为空气(折射率 $n = 1$ ).晶格周期 $a = 150 \mu\text{m}$ ,柱半径 $r = 0.35 a$ .

加磁场前, $\mu = 1$ ,铁氧体 $n = \sqrt{\epsilon\mu} = \sqrt{12.96 \times 1} = 3.60$ ;空气 $n = 1$ .利用PWE方法,计算 TE 模的带结构如图 4 所示,可见由于铁氧体介电

常数较大, TE 模具有多个较宽的带隙, 带隙宽度约  $0.07(2\pi c/a)$  (0.14 THz).

沿铁氧体柱轴向施加外磁场  $B_{ex}$ , 调节  $B_{ex}$  大小

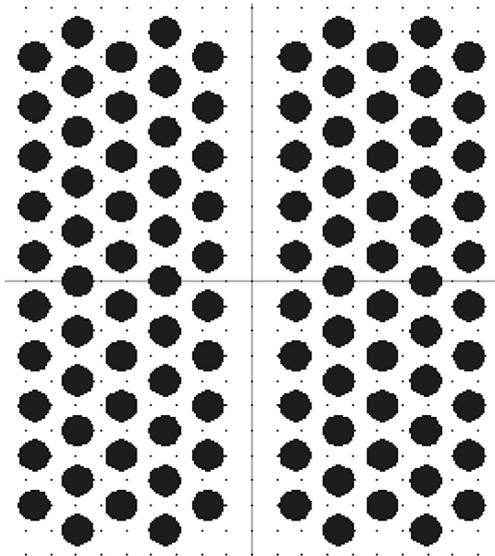


图3 二维六角晶格线缺陷光子晶体波导图

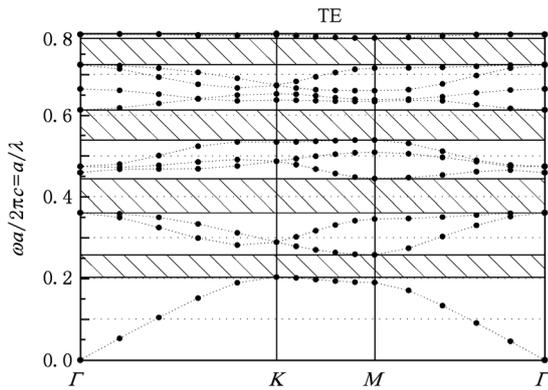
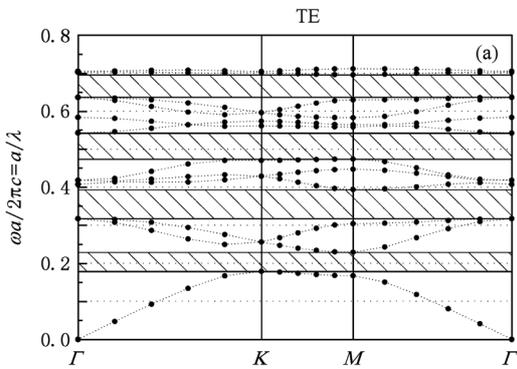


图4 未加磁场时磁光子晶体的带隙



在  $3.4-1.5(\gamma^{-1})$  之间变化, 以改变铁氧体磁导率的值, 使之在  $1.3-1.7$  之间连续变化. 利用PWE方法分别计算其 TE 模的带结构如图 5(a), (b) 所示. 由两图对比可见, 随着外磁场减小, 磁导率增加, 带结构的位置降低(带压缩), 带隙宽度稍微变窄. 第三个带隙(由低频到高频)在  $\mu = 1.3$  时归一化频率为  $0.47425-0.54271$  (0.9485—1.08542 THz), 当  $\mu = 1.7$  时, 归一化频率为  $0.4157-0.47782$  (0.8314—0.95564 THz), 带隙在变化前后几乎不交叠. 因此, 如果一束  $0.8314-1.08542$  THz 的光入射到该波导结构中, 那么当  $\mu = 1.3$  时, 高频部分 (0.9485—1.08542 THz) 可以低损耗的通过波导, 而低频部分 (0.8314—0.95564 THz) 将泄漏出波导而不能通过; 调节外磁场大小使  $\mu = 1.7$ , 此时高频部分泄漏出波导, 而低频部分可以通过. 这是很好的高通、低通滤波器的功能.

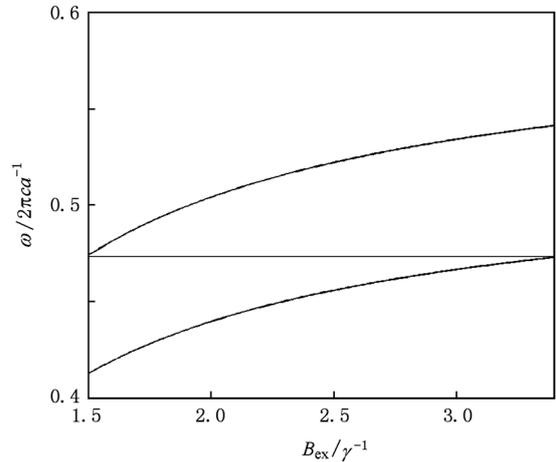


图6 带隙位置随磁场  $B_{ex}$  大小的变化

图6 是带隙位置随磁场  $B_{ex}$  大小的变化, 其中

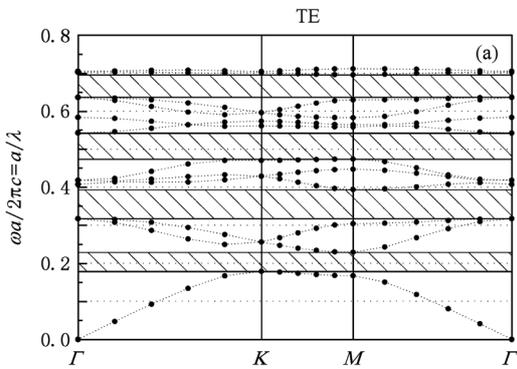


图5 加磁场后, 磁光子晶体的带隙 (a)  $\mu = 1.3$ ; (b)  $\mu = 1.7$

上、下曲线分别代表第三带隙的上下边沿. 当  $B_{\text{ex}}$  由  $1.5\gamma^{-1}$  增加为  $3.4\gamma^{-1}$  时, 磁导率  $\mu$  由 1.7 变为 1.3, 带隙的上边沿的归一化频率由 0.47782 (0.95564 THz) 变为 0.54271 (1.08542 THz), 带隙下边沿的归一化频率由 0.4157 (0.8314 THz) 变为 0.47425 (0.9485 THz), 带隙宽度几乎不变, 约为 0.13 THz. 因此, 假如一束 0.8314—1.08542 THz 的光入射到该波导结构中, 那么可以调节磁场大小, 使任意一段带宽约为 0.13 THz 的太赫兹波低损地通过波导而输出. 这是很好的连续可调谐带通滤波器的功能.

该结构还可以实现开关的功能. 如图 7 (a),

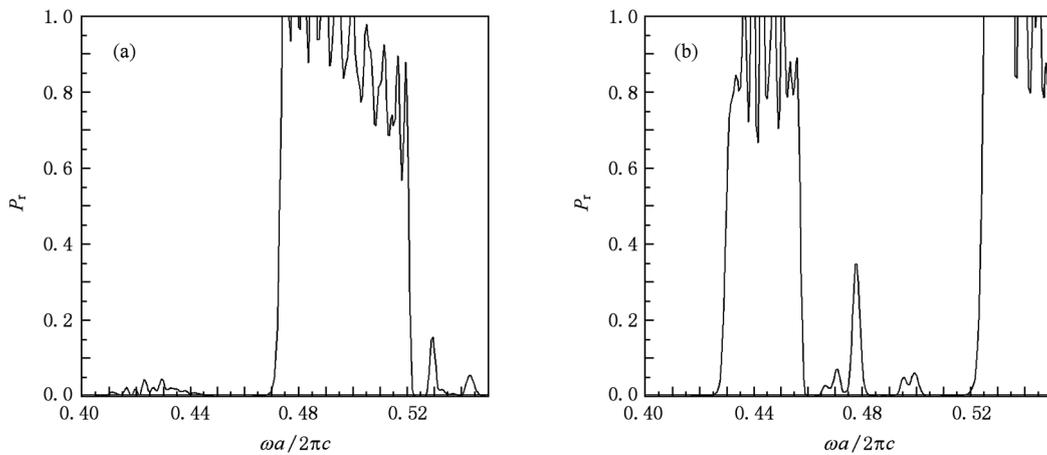


图 7 太赫兹波在磁光子晶体波导中的传输光谱 (a)  $\mu = 1.3$ ; (b)  $\mu = 1.7$

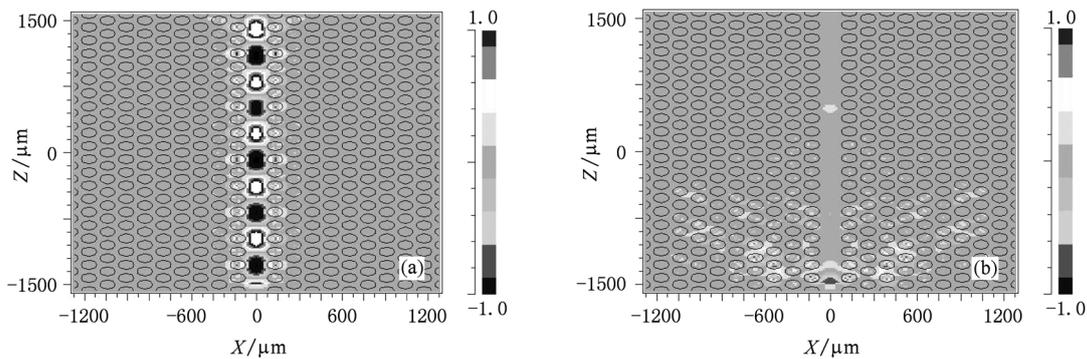


图 8 0.98 THz 的入射波在该波导中 TE 模的电场  $y$  分量的分布 (a)  $\mu = 1.3$ , (b)  $\mu = 1.7$

#### 4. 结 论

本文设计了一种新颖的基于铁氧体磁性材料光子晶体波导的磁控太赫兹连续可调谐滤波器和开关.

(b), 利用 FDTD 方法<sup>[21]</sup>, 入射一个高斯脉冲, 计算了上述两种情况下的光谱. 由图可见, 在磁场变化前后, 归一化频率为 0.47—0.53 和 0.42—0.47 的传输带分别由打开到关闭时, 传输带的边缘频率变化都很陡峭.

例如, 计算一个频率为 0.98 THz (归一化频率为 0.49) 的 TE 偏振入射太赫兹波在该波导中的电场  $y$  分量的分布, 结果示于图 8 中. 显然, 当  $\mu = 1.3$  时, 该入射太赫兹波可在波导中低损耗地传输; 当减小磁场大小使  $\mu = 1.7$  时, 入射波的大部分能量被泄漏到波导外而不能在波导中传输. 该太赫兹开关的消光比 ( $-10\log(P_{\text{off}}/P_{\text{on}})$ ) 可达到 30 dB.

通过调节外加磁场大小来改变磁性材料磁导率, 以改变光子晶体带隙, 从而实现滤波和开关的功能. 数值模拟结果显示, 这种新颖的结构可以实现 0.8314—1.08542 THz 的宽带连续可调谐滤波功能, 并且在 0.8314—1.08542 THz 范围内可实现开关功能.

- [1] Nagel M, Haring Bolivar P, Brucherseifer M, Kurz H, Bosserhoff A, Buttner R 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 154
- [2] Schmuttenmaer C A 2004 *Chem. Rev.* **104** 1759
- [3] Awad M M, Chevillat R A 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 221107
- [4] Woolard D L, Brown E R, Pepper M, Kemp M 2005 *P. IEEE* **93** 1722
- [5] Leitenstorfer A, Hunsche S, Shah J, Nuss M C, Knox W H 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 1516
- [6] Carr G L, Martin M C, McKinney W R, Jordan K, Neil G R, Williams G P 2002 *Nature* **420** 153
- [7] Rochat M, Ajili L, Willenberg H, Faist J, Beere H, Davies G, Linfield E, Ritchie D 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 1381
- [8] Krotkus A, Coutaz J L 2005 *Semiconductor Science and Technology* **20** 142
- [9] Li J S, He J L, Hong Z 2007 *Appl. Opt.* **46** 5034
- [10] Ghattan Z, Hasek T, Wilk R, Shahabadi M, Koch M 2008 *Opt. Commun.* **281** 4623
- [11] Wu B, Zhang H, Zhu L D, Guo P, Wang Q, Gao R M, Chang S J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1838 (in Chinese) [吴 犇、张 会、朱良栋、郭 澎、王 倩、高润梅、常胜江 2009 物理学报 **58** 1838]
- [12] Zhang H, Guo P, Chen P, Chang S J, Yuan J H 2009 *J. Opt. Soc. Am. B* **26** 101
- [13] Sigalas M M, Soukoulis C M, Biswas R, Ho K M 1997 *Phys. Rev. B* **56** 959
- [14] Kee C S, Kim J E, Park H Y, Park I, Lim H 2000 *Phys. Rev. B* **61** 15523
- [15] Che M, Zhou Y S, Wang F H, Gu B Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4770 (in Chinese) [车 明、周云松、王福合、顾本源 2005 物理学报 **54** 4770]
- [16] Zhou Z G 1998 *Ferrite magnetism materials* (Beijing: Science Press) p2—12 (in Chinese) [周志刚 2003 铁氧体磁性材料 (北京:科学出版社) 第2—12页]
- [17] Yang Q H, Zhang H W, Li L Y, Wen Q Y, Zha J 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 3957
- [18] Pozar D M 1998 *Microwave Engineering* (2nd ed) (New York: Wiley) p705
- [19] Sodha M S, Srivastava N C 1981 *Microwave Propagation in Ferrimagnetics* (New York: Plenum Press) p52—55
- [20] Bi H X, Zhou Y S, Zhao L M, Wang F H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5718 (in Chinese) [毕海星、周云松、赵丽明、王福合 2008 物理学报 **57** 5718]
- [21] BeamPROP, <http://www.rsoftdesign.com>

## Magnetically tunable magnetic photonic crystal for terahertz switch and filter\*

Guo Zhan Fan Fei Bai Jin-Jun Niu Chao Chang Sheng-Jiang<sup>†</sup>

(Institute of Modern Optics, Nankai University, Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology, Ministry of Education, Tianjin 300071, China)

(Received 29 June 2010; revised manuscript received 2 September 2010)

### Abstract

The feasibility of ferrite magnetism materials applied to THz waveguide devices is investigated. A novel continuously tunable bandpass filter and switch under the control of an external magnetic field in a terahertz wave band are designed. Detailed calculations on the shift and the variation in the position of the bandgap reveal that the filter and the switch achieved by this two-dimensional magnetic photonic crystal waveguide have good performances.

**Keywords:** magnetic photonic crystal, ferrite, terahertz

**PACS:** 42.70.Qs, 42.79.Ci, 07.57.Hm

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2007CB310403), the Nation Natural Science Foundation of China (Grant No. 60772105), the Key Program of the Applied Basic Research of Tianjin (Grant No. 10JCZDJC15200), and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20090031110033).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: sjchang@nankai.edu.cn