

# 太赫兹波在二维椭圆金属光子晶体的传输特性\*

王升 袁纵横 袁宇阳 郭亚东 熊显名  
(桂林电子科技大学电子工程与自动化学院 桂林 541004)

**摘要:**研究了一种由金属椭圆柱构成的二维正三角晶格的光子晶体结构,并应用有限积分法对太赫兹波段 TE 模的传输特性进行了仿真分析。通过改变晶格常数和椭圆的长、短半轴,分析了太赫兹波段 TE 模在金属光子晶体中的传输特性。结果表明,椭圆柱比圆柱更容易得到大的禁带带隙,通过分组优化组合,得到了对 TE 模禁带带隙最宽且最佳的光子晶体结构。这为太赫兹波段的光子晶体带阻滤波器的开发与制作提供了参考依据。

**关键词:**椭圆柱;光子晶体;正三角晶格;透射特性;TE 模

**中图分类号:** TP203 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

## Transmission characteristic Of 2-D elliptic cylinder metallic photonic crystal in THz range

Wang Sheng Yuan Zongheng Yuan Yuyang Guo Yadong Xiong Xianming

(College of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** Transmission characteristic of terahertz TE mode in two-dimensional regular triangular lattice elliptic cylinder metallic photonic crystals is simulated and studied through finite element algorithm. By changing the lattice constant, length of semimajor axis and semiminor axis of ellipsoid, the transmission patterns of terahertz TE mode in metallic photonic crystal are acquired. The research results indicate that elliptic cylinder is easier to get a wide band gap than cylinder, by grouping and combining the optimal parameters, got the best band gap photonic crystals structure of TE mode. These have provided theoretic foundation for the development and production of photonic crystal band-stop filter.

**Keywords:** elliptic cylinder; photonic crystal; regular triangular lattice; transmission characteristic; TE mode.

### 1 引言

1987年, YABLONOVITCH E<sup>[1]</sup>和 JOHN S<sup>[2]</sup>提出了光子晶体的概念,由于其潜在的巨大应用前景,光子晶体逐渐成为了一个新颖的科学研究领域。利用光子晶体光子带隙的基本性质,可以制作高效的光子晶体全反射镜<sup>[3]</sup>和低损耗的微波天线<sup>[4]</sup>;利用光子带隙具有对原子自发辐射的抑制功能,能够极大降低因自发辐射跃迁而产生的复合几率,设计制作了光子晶体无阈值激光器<sup>[5]</sup>;而在光子晶体中引入缺陷,可以使光子带隙中生成频率极窄的缺陷态,可以设计高性能光子晶体超窄带滤波器<sup>[6]</sup>;如果在光子晶体中引入的是一个线缺陷后,那么频率处在缺陷态中的电磁波将呈现很强的局域态,即电磁波只能沿线性缺陷传播,可以制作光纤<sup>[7]</sup>和光子晶体波导<sup>[8]</sup>;而根据光子晶

体对于入射方向不同的 TE 和 TM 模式的偏振光具有不同的带隙结构,又可以设计制作光子晶体偏振器<sup>[9]</sup>。

太赫兹(THz)波作为介于微波及红外光之间的特殊波段,相比于其他波段的电磁波具有许多优势<sup>[10-11]</sup>。在高速通信、太空通信等方面,THz 具有宽带宽、高保密和抗干扰等优点,同时 THz 通信系统还具有体积小、重量轻的优点<sup>[12-13]</sup>。而滤波器是通信系统所需的必要元件之一,在 THz 的通信系统中,由于应用需要以及环境噪声的影响等,有时必须滤除多余的频率和噪声,提高系统的性能,所以 THz 滤波器的研究有着重要的意义。

光子晶体具有光子频率禁带特性,任何一块光子晶体就是一个纯天然的带阻滤波器。近年来,不管是一维、二维还是三维光子晶体滤波器都获得了巨大的发展,其中处在临界维数的二维光子晶体系统,特别被物理研究学者们

收稿日期:2015-12

\* 基金项目:广西自动检测技术与仪器重点实验室主任基金项目(NO. YQ14102)和桂林电子科技大学创新团队资助

倚重<sup>[14]</sup>。2004年,Manchester大学NOVOSELOV K S和GEIM A K等人<sup>[15]</sup>从三维石墨块中成功剥离出了二维六角晶体的碳单层<sup>[16]</sup>。因其巨大的应用前景和实验的独创性,NOVOSELOV K S和GEIM A K一起荣获2010年的诺贝尔物理学奖。继其之后,许多新的二维材料和新的结构相继涌现。美国加利福尼亚大学的WU D等<sup>[17]</sup>用长度为1 mm,直径为30  $\mu\text{m}$ 的金属丝组成晶格常数为120  $\mu\text{m}$ 的二维正方晶格结构,实现了THz高通滤波器的研制。中国工程物理研究院电子工程研究所太赫兹研究小组邓贤进等人<sup>[18]</sup>成功研制完成了0.14 THz带通滤波器,首次成功实现了0.14 THz,0.5 km,10 Gb/s高速信号实时传输和软件化解调。中国工程物理研究院的陈琦等<sup>[19]</sup>设计出了0.35 THz二维光子晶体带通滤波器。在以后的研究中,涌现出来的新材料、新结构将会是THz滤波器研究的重点<sup>[20]</sup>。

本文研究了基于正三角形的椭圆铜圆柱光子晶体结构,运用有限积分法分析了THz波段TE模的透射特性,并利用软件仿真实理论分析了结构几何参数改变对TE模透射特性的影响。和正三角晶格的铜圆柱光子晶体结构<sup>[21]</sup>相比,椭圆结构的光子晶体能获得更大的禁带宽度。结构简单,易于制作。

## 2 光子晶体结构

光子晶体结构如图1所示,图中黑色部分为铜椭圆圆柱,设置晶格常数 $d$ ,椭圆长半轴 $a$ ,短半轴 $b$ ,铜柱轴向沿 $x$ 轴方向、与纸面垂直,空白部分为背景空气,其相对介电常数和相对磁导率取1,铜的电导率 $\sigma = 5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ ,激励采用THz TE波沿A方向入射( $Z$ 轴方向)。

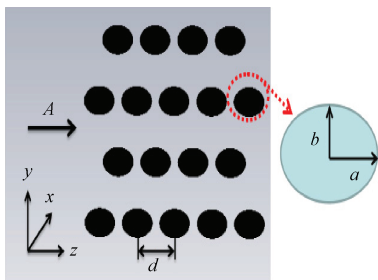


图1 光子晶体结构示意图

## 3 仿真结果和分析

仿真采用基于有限积分法的CST Microwave Studio (computer simulation technology)仿真软件,当 $d = 100$ , $a = 40$ , $b = 20 \mu\text{m}$ ,仿真结果如图2所示。TE模在2.09~2.69 THz的范围内出现一个禁带,禁带带宽为0.60 THz,曲线下落沿和上升沿陡峭,禁带带隙明显。

改变光子晶体结构的几何参数,模拟仿真得到的几何参量改变的透射带隙曲线如图3所示。晶格常数 $d = 100 \mu\text{m}$ ,短半轴 $b = 20 \mu\text{m}$ 不变,改变椭圆柱的长半轴 $a$ ,

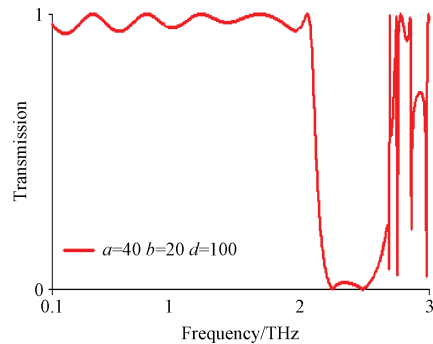
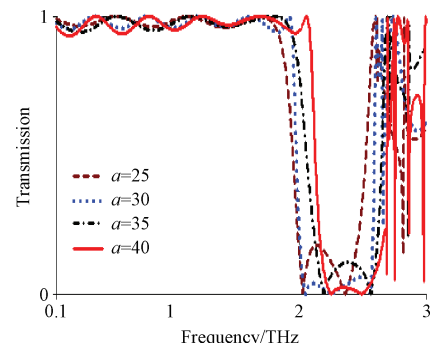
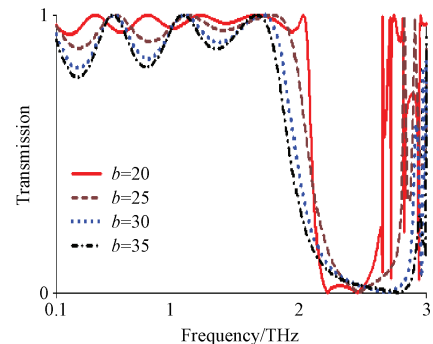


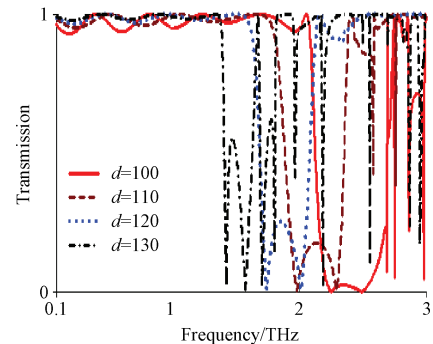
图2 仿真的透射曲线



(a) 长半轴 $a$ 对传输特性的影响



(b) 短半轴 $b$ 对传输特性的影响



(c) 晶格常数 $d$ 对传输特性的影响

图3 结构参数变化对透射曲线的影响

得到的透射曲线如图3(a)所示。当长半轴为35  $\mu\text{m}$ ,30  $\mu\text{m}$ ,25  $\mu\text{m}$ 时,TE模的禁带分别为2.02~2.65 THz,1.97~2.60 THz和1.91~2.55 THz,带宽为0.63 THz、0.63 THz、0.64 THz。由图3(a)可知,随着 $a$ 的减小,TE模的禁带宽度几乎不变,禁带范围和禁带中心频率左移,

但趋势不大,当  $a=30\ \mu\text{m}$ , 禁带带隙曲线最理想。保持晶格常数  $d=100\ \mu\text{m}$ , 长半轴  $a=40\ \mu\text{m}$  不变, 改变椭圆短半轴  $b$  的透射曲线如图 3(b) 所示。当短半轴为  $25\ \mu\text{m}$ 、 $30\ \mu\text{m}$ 、 $35\ \mu\text{m}$  时, TE 模的禁带分别为  $2.06\sim 2.85\ \text{THz}$ 、 $1.94\sim 2.99\ \text{THz}$ 、 $1.90\sim 3.01\ \text{THz}$ , 带宽为  $0.79\ \text{THz}$ 、 $1.05\ \text{THz}$ 、 $1.11\ \text{THz}$ , 可知, 随着  $b$  的增加, TE 模的禁带带宽变大, 禁带起始频率变小, 禁带曲线的下降沿变缓, 但禁带的中心频率几乎不变, 当  $b=35\ \mu\text{m}$ , 禁带宽度最大, 比  $b=20\ \mu\text{m}$  增加  $0.51\ \text{THz}$ , 增加将近  $85\%$ 。保持椭圆长半轴  $a=40\ \mu\text{m}$ , 短半轴  $b=20\ \mu\text{m}$  不变, 改变晶格常数  $d$ , 分别为  $110\ \mu\text{m}$ 、 $120\ \mu\text{m}$ 、 $130\ \mu\text{m}$ , 模拟仿真得到的几何参量改变的透射特性如图 3(c) 所示。当晶格常数  $d$  为  $110\ \mu\text{m}$ 、 $120\ \mu\text{m}$ 、 $130\ \mu\text{m}$  时, TE 模的禁带分别为  $1.86\sim 2.37\ \text{THz}$ 、 $1.68\sim 2.11\ \text{THz}$  和  $1.41\sim 1.65\ \text{THz}$ , 带宽为  $0.51\ \text{THz}$ 、 $0.43\ \text{THz}$ 、 $0.24\ \text{THz}$ 。表明晶格常数  $d$  对 TE 模的透射特性影响非常大, 随着  $d$  的增加, TE 模的整个禁带向低频移动, 趋势明显, 且禁带带宽迅速变窄, 曲线的波形越来越不理想。

综上所述, 取禁带宽度最大的每组最优值, 即  $a=30$ ,  $b=35$ ,  $d=100\ \mu\text{m}$ , 得到 TE 模的透射特性如图 4, 此时, TE 模的禁带范围  $1.89\sim 2.99\ \text{THz}$ , 禁带宽度  $1.10\ \text{THz}$ , 与原先  $a=40$ ,  $b=20$ ,  $d=100\ \mu\text{m}$  结构相比, 禁带宽度增加了  $0.50\ \text{THz}$ , 禁带带隙特性明显, 曲线光滑。

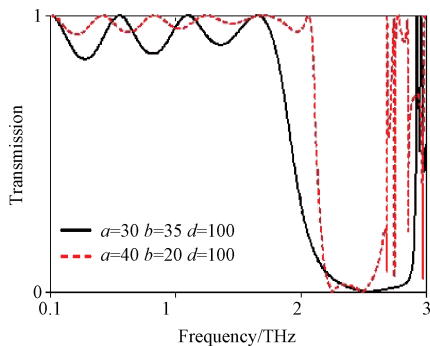


图 4 优化后的传输特性

#### 4 结论

本文采用了有限积分法, 研究了当二维正三角晶格铜椭圆柱光子晶体结构中的晶格常数  $d$ , 椭圆参量  $a$  和  $b$  改变时对 THz 波段 TE 模传输特性的影响, 并将 3 个几何参量进行分组优化, 得到最佳参量组合。相比于正三角晶格的铜圆柱, 正三角晶格的铜椭圆柱能够获得更大的禁带宽度, 晶格常数  $d$  对 TE 模透射特性影响最大, 随着  $d$  的增大, TE 模的禁带宽度急剧变窄, 整个禁带向低频移动, 趋势明显, 这说明光子晶体的结构越紧凑越容易得到大的禁带宽度; 当椭圆的短半轴  $b$  增大时, TE 模的禁带宽度增大, 禁带的起始频率变小, 但禁带中心频率几乎不变; 椭圆的长半轴  $a$  对 TE 模的透射特性影响不大, 当  $a$  改变时, TE 模的禁带宽度几乎不变, 禁带范围和中心频率轻微左

移。当  $d=100\ \mu\text{m}$ ,  $a=30\ \mu\text{m}$ ,  $b=35\ \mu\text{m}$  时, TE 模的禁带特性最佳, 禁带宽度为  $1.10\ \text{THz}$ 。本文设计的正三角晶格椭圆圆柱光子晶体结构简单, 通过调节结构参数可以有效地滤除不需要的波段。因此, 本文的研究为光子晶体带阻滤波器设计提供了重要参考。

#### 参考文献

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. Physical Review Letters, 1987, 58(4): 2059.
- [2] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattice [J]. Physical Review Letters, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [3] 苏安, 许敏明. 实现全反射镜功能的光子晶体禁带特性 [J]. 光谱实验室, 2012, 29(3): 1592-1596.
- [4] 江海涛, 李云辉, 李宏强, 等. 光子晶体在微波技术中的应用 [J]. 物理, 2003, 32(12): 799-803.
- [5] 张琴, 张晓霞, 刘华东, 等. 光子晶体激光器阈值特性的理论研究 [J]. 光学与光电技术, 2010, 8(3): 21-24.
- [6] 欧阳征标, 刘海山, 李景镇. 光子晶体超窄带滤波器 [J]. 光子学报, 2002, 31(3): 281-284.
- [7] 王伟, 侯蓝田. 光子晶体光纤的现状和发展 [J]. 激光与光电子学进展, 2008(2): 43-58.
- [8] 董小伟, 权炜, 刘文楷. 耦合腔光子晶体慢光波导结构 [J]. 光子学报, 2015, 44(2): 181-184.
- [9] 张春梅, 刘福平. 基于二维光子晶体的偏振器研究 [J]. 北京印刷学院学报, 2007(2): 76-78.
- [10] 赵国忠. 太赫兹科学技术研究的新进展 [J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(2): 1-6.
- [11] 何明霞, 李净延, 刘冠林. 太赫兹可控功能器件的研究进展 [J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(7): 567-576.
- [12] 赵国忠, 申彦春, 刘影. 太赫兹技术在军事和安全领域的应用 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(8): 1097-1101.
- [13] 姜万顺, 邓建钦. 太赫兹测试测量技术与仪器研究进展 [J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(5): 20-23.
- [14] 翟学超, 戚凤华, 许亚芳, 等. 二维六角晶格材料中的 Dirac 电子 [J]. 物理学进展, 2015(1): 1-49.
- [15] NOVOSELOV K S, GEIM A K, MOROZOV S V, et al. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films [J]. Science, 2004, 306(5696): 666 - 669.
- [16] 曹则贤. 物理学咬文嚼字之十二 各具特色的碳异形体 [J]. 物理, 2008, 37(6): 462-466.
- [17] WU D. Terahertz plasmonic high pass filter [J]. Applied Physics Letters, 2003, 83(1): 201-203.
- [18] 邓贤进, 王成, 林长星, 等.  $0.14\ \text{THz}$  超高速无线通信系统实验研究 [J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(6): 1430-1432.

(下转第 70 页)

刻的数据剔除,从而避免了系统的火灾误报。通过本系统的设计及仿真,可以看出基于可信度的信息融合技术的应用大大降低了火灾的误报率,解决了火灾误报率居高不下的问题,并且为日后的数据分析提供了可查数据。本系统利用模拟的数据从一定程度上验证了算法的可信性,日后需要利用真实数据和硬件的系统进行集成,为日后的系统开发提供参考。

## 参 考 文 献

- [1] 杨玲,孔庆红. 火灾安全科学与消防[M]. 北京:化学工业出版社,2011:223-243.
- [2] 薛伟. 基于 GSM 网络的火灾报警网络监控器的设计[J]. 电子测量技术,2008,31(2):24-26.
- [3] 水祺. 火灾报警系统中的信息融合[J]. 国外电子测量技术,2005,24(6):39-41.
- [4] 吴龙标,方俊,谢启源. 火灾探测与信息处理[M]. 北京:化学工业出版社,2006:34-54.
- [5] 刘岩俊. 基于 DSP 的嵌入式温度测量系统设计与实现[J]. 国外电子测量技术,2014,33(1):78-81.

- [6] 陈怀艳,王国华,李志强. 测试不确定度比与测量结果可信度的关系以及实践中的要求[J]. 电子测量与仪器学报,2005,19(1):14-20.
- [7] 郑学理,付敬奇. 基于 PDR 和 RSSI 的室内定位算法研究[J]. 仪器仪表学报,2015,36(5):1177-1185.
- [8] 王帅,李迎春,张廷华. 相机阵列中无视场重合图像时间配准方法研究[J]. 电子测量技术,2015,38(10):53-58.
- [9] FENG D CH, QIN H Y, ZENG Y. Study on straw incineration monitoring based on the combination of remote sensing image[J]. Instrumentation, 2014,1(3):25-42.
- [10] 崔学林,梁宝龙,黄斌,等. 湿度传感器测量不确定度评定[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(10):1544-1549.

## 作 者 简 介

陈雷,1980,男,汉,硕士,讲师,主要研究方向为计算机控制,故障诊断。  
E-mail:ch.\_l@163.com

(上接第 66 页)

- [19] 陈琦,张屹遐,何晓阳,等. 0.35 THz 二维光子晶体带通滤波器设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报,2014(3):321-324.
- [20] 薛超敏,刘建胜,郑铮,等. 太赫兹滤波器[J]. 激光与光电子学,2008,45(1):43-49
- [21] 谭毅,袁纵横. 太赫兹波在二维正三角晶格金属光子晶体中的传输特性[J]. 激光与光电子学进展,2012(7):127-131.

## 作 者 简 介

王升,1987年11月出生,工学硕士,主要研究方向为光电检测与遥感信息处理。  
E-mail:422296043@qq.com

袁纵横,1957年出生,教授,博士,主要研究方向为光学遥感。  
E-mail:yuanzongheng@sina.com