

# 二维金属线网格结构的太赫兹滤波特性仿真研究

刘立明 赵国忠 魏 波

(首都师范大学物理系, 太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048)

**摘要** 基于时域有限差分(FDTD)法对金属井字形栅网、互补的方块阵列和二者叠加而成的十字叉丝孔阵列 3 种类型的二维金属线网格结构在太赫兹波段的滤波特性进行了数值分析。研究发现,金属井字形栅网结构实现了高通滤波的功能,方块阵列结构实现了低通滤波的功能,十字叉丝孔阵列结构则实现了带通滤波的功能。模拟结果表明,随着周期的增大,井字形栅网以及其互补方块阵列的截止频率向低频扩展,叠加而成的十字叉丝孔阵列允许透过的中心频率也随着周期的增大向低频移动。另外,以十字叉丝孔阵列结构为例的多层金属网格结构仿真结果显示,当层与层之间的间隔为  $20\ \mu\text{m}$ ,层数多于 5 层之后,其上升沿和下降沿都变得十分陡峭,层数的增加可以大大提高结构的滤波性能。

**关键词** 太赫兹;金属网格;数值仿真;滤波

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201138.s111005

## Numerical Simulation of Filtering Characteristics of Two-Dimensional Metallic Grid in Terahertz Band

Liu Liming Zhao Guozhong Wei Bo

(Key Laboratory of THz Optoelectronics, Ministry of Education, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

**Abstract** Based on finite difference time domain (FDTD) method, the numerical simulation of filtering characteristics of the two dimensional metal grid which include the well-shaped grid, the array of complementary square metallic pill and the cross wire-hole array are carried out. The results show that the well-shaped metal grid structure achieves a high-pass of filter function, the array of square metallic pill achieves a low-pass of filter function, and the cross wire-hole array structure achieves a band-pass of filter function. Simulation results show that, with the increasing of the period the cut-off frequency of high-pass filter and low-pass filter move to low-frequency, and the center frequency allowed by the cross wire-hole array similarly moves to the low-frequency. The result of the multi-layer structure of the cross wire-hole array shows that, the rising edge and the falling edge become very steep when the spacing between layers is  $20\ \mu\text{m}$  and the more than 5 layers are used which greatly improved the filtering performance.

**Key words** terahertz; metallic grid; numerical simulation; filtering

**OCIS codes** 040.2235; 310.3915; 070.2615

## 1 引 言

太赫兹波段位于毫米波和红外线之间,属于远红外波段,是宏观电磁理论向微观量子理论过渡的区域,也是电子学向光电子学的过渡区域,有重要的学术和应用研究价值。近年来,随着太赫兹光谱技

术<sup>[1,2]</sup>和太赫兹成像技术<sup>[3,4]</sup>的发展,对太赫兹波段光学器件的需求越来越迫切。太赫兹系统主要由辐射源、探测器件和各种功能器件组成。在实际应用中,由于环境噪声以及应用需要的限制,常需滤除不必要频段的信号和噪声,以提高系统的性能。因

**收稿日期:** 2011-07-05; **收到修改稿日期:** 2011-09-01

**基金项目:** 国家自然科学基金(50971094)和北京市自然科学基金(1092007)资助课题。

**作者简介:** 刘立明(1987—),女,硕士研究生,主要从事太赫兹光谱方面的研究。E-mail: liuliming87@163.com

**导师简介:** 赵国忠(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事太赫兹光谱与成像、光电功能材料和光电子学等方面的研究。E-mail: guozhong-zhao@126.com(通信联系人)

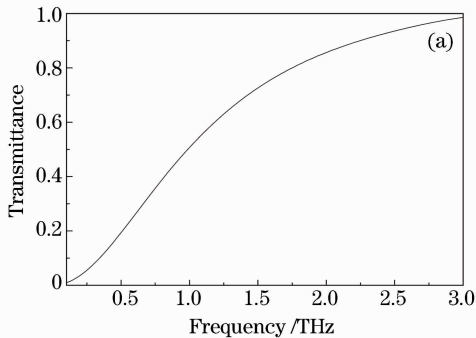
此,太赫兹滤波器在实际应用中有着重要的应用需求和应用价值。目前,在太赫兹波段的滤波器主要包含了3个种类:1)基于量子阱结构的太赫兹滤波器<sup>[5]</sup>;2)基于光子晶体的太赫兹滤波器<sup>[6~8]</sup>;3)基于光栅和金属表面等离子体等周期性金属结构的太赫兹滤波器<sup>[9~12]</sup>。其中,基于表面等离子体周期性金属结构的太赫兹滤波器由于其透射率高,且可通过改变金属周期性结构的形状和尺度,进而改变滤波器工作频率等优点,引起了越来越多研究者的兴趣。

本文基于时域有限差分(FDTD)法,对井字形金属栅网、互补的方块阵列以及二者叠加而成的交叉叉丝孔阵列3种类型的基于表面等离子体周期性金属网格结构在太赫兹波段的滤波特性进行了数值分析,为研制太赫兹滤波器提供了很好的数值参考和理论依据。

## 2 数值分析

### 2.1 井字形栅网与互补方块阵列太赫兹透射特性的数值模拟

井字形栅网结构的示意图如图1(a)所示,其中 $w$ 表示金属线的宽度, $d$ 表示金属线之间的间距, $T$ 表示井字形栅网的周期,即 $T = w + d$ ;与之互补



的方块阵列结构示意图如图1(b)所示,为了表示互补性依然用 $w$ 来表示金属块间的狭缝宽度,用 $d$ 来表示金属块的边长, $T$ 依然为金属方块阵列的周期。

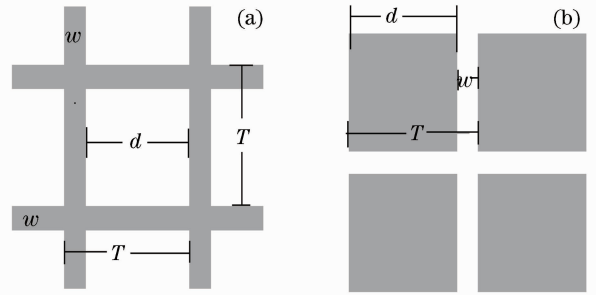


图1 金属网格结构示意图。(a)井字形栅网;  
(b)与之互补的方块阵列

Fig.1 Schematic diagram of metal mesh. (a) Well-shaped grid; (b) array of complementary square metallic pill

利用FDTD法的Concerto 6.0电磁场模拟软件对两种金属网格结构在0.1~3 THz范围内的滤波特性进行了仿真研究。

为了便于研究问题,始终保持 $w = 10 \mu\text{m}$ 不变。当 $d = 80 \mu\text{m}$ 时,模拟结果如图2所示,不难发现,井字形栅网在太赫兹波段实现了高通的滤波特性,而与之互补的方块阵列则出现了互补的透射谱,在太赫兹波段实现了低通的滤波特性。

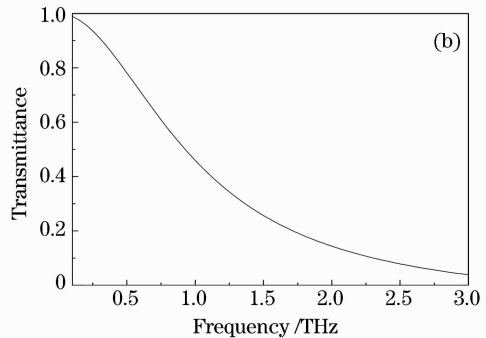


图2  $w = 10 \mu\text{m}$ ,  $d = 80 \mu\text{m}$ 的透射谱。(a)井字形栅网结构;(b)与之互补的方块阵列

Fig.2 Transmission spectra of  $w = 10 \mu\text{m}$  and  $d = 80 \mu\text{m}$ . (a) Well-shaped grid; (b) array of complementary square metallic pill

为了研究金属网格周期对滤波特性的影响规律,在固定 $w = 10 \mu\text{m}$ 的基础上依次改变 $d$ 的值分别为20,30,50,80,100和150  $\mu\text{m}$ ,进而来研究随着周期的改变,结构截止频率的变化情况。在此,将透射率50%所对应的频率定义为其截止频率。图3(a)表示井字形栅网的截止频率随 $d$ 的变化情况。结果表明,随着金属线间距的增大,即网格周期的增大,井字形结构的截止频率向低频移动。图3(b)表

示与之互补的金属方块阵列的截止频率随 $d$ 的变化情况,即随着周期的增大,其截止频率同样向低频移动。

### 2.2 交叉叉丝孔阵列的数值模拟

将井字形栅网结构与互补的方块阵列中心对应叠加就构成了线宽为 $w$ ,线长为 $d$ 的交叉叉丝孔阵列,其结构示意图如图4所示。

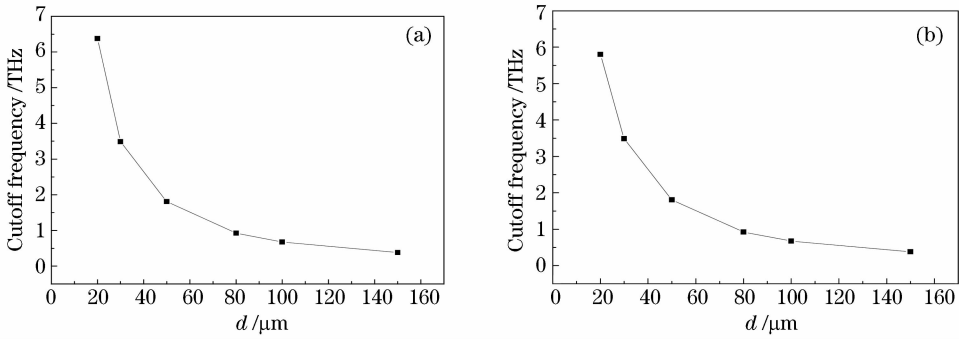


图 3 截止频率随  $d$  的变化关系。(a) 井字形栅网结构;(b)与之互补的方块阵列

Fig. 3 Variation of the cutoff frequency with  $d$ . (a) Well-shaped grid; (b) array of complementary square metallic pill

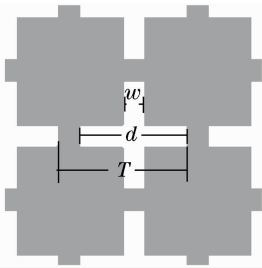


图 4 十字叉丝孔阵列的结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the cross wire-hole array

使十字叉丝孔的线宽  $w = 10 \mu\text{m}$ , 线长  $d = 80 \mu\text{m}$ , 模拟其在  $0.1 \sim 3 \text{ THz}$  范围内的透射特性, 如图 5 所示, 结果显示十字叉丝孔阵列结构在太赫兹波段实现了带通的滤波特性。

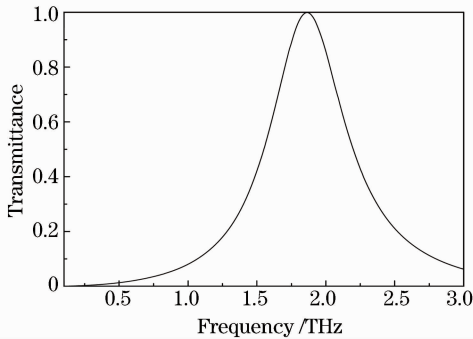


图 5  $w = 10 \mu\text{m}, d = 80 \mu\text{m}$  的十字叉丝孔阵列的透射谱

Fig. 5 Transmission spectrum of the cross wire-hole array with  $w = 10 \mu\text{m}$  and  $d = 80 \mu\text{m}$

同样, 在此基础上固定十字叉丝孔的线宽  $w = 10 \mu\text{m}$ , 依次改变十字叉丝孔的线长  $d$  分别为  $20, 30, 50, 80, 100$  和  $150 \mu\text{m}$ , 得到了其允许通过的中心频率随十字叉丝孔线长  $d$  的变化关系, 结果如图 6 所示, 随着十字叉丝孔线长的增加, 其允许通过的中心频率向低频方向移动。

综上所述, 在太赫兹波段亚波长的金属井字形栅网结构实现了高通滤波功能, 与之互补的方块阵列结构出现了互补的透射谱, 实现了低通滤波功能,

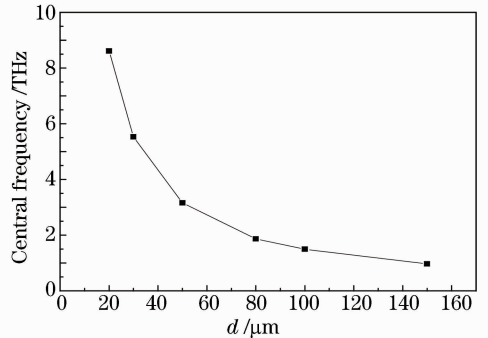


图 6 十字叉丝孔结构允许通过的中心频率随  $d$  的变化

Fig. 6 Variation of the central frequency allowed by the cross wire-hole array with  $d$

将二者叠加而成的十字叉丝孔阵列结构则实现了带通滤波的功能。另外, 若不考虑金属线宽的影响, 金属井字形栅网结构及其互补的方块阵列结构随着周期的增大, 截止频率向低频扩展, 同样, 叠加而成的十字叉丝孔阵列其透射的中心频率也随着周期的增大向低频移动。根据这一结论, 就可以根据实际应用过程中滤波的需要, 通过改变周期来实现相应的滤波要求。

### 2.3 多层十字叉丝孔阵列结构的数值模拟

单层的金属网格结构虽然实现了滤波的性能, 但其滤波性能并不十分理想, 在图 2 和图 5 的透射谱中, 截止频率处的上升沿和下降沿都比较平缓, 在此基础上, 以金属线宽  $10 \mu\text{m}$ , 金属线间距  $80 \mu\text{m}$  的十字叉丝孔阵列结构为例对多层金属网格结构进行了进一步仿真, 其中层与层之间的间距均为  $20 \mu\text{m}$ , 结果如图 7 所示。

不难看出, 随着层数的增加, 尤其在层数多于 5 层之后, 透射谱中上升沿跟下降沿都变得十分陡峭, 大大提高了结构的滤波性能, 但多层的网格结构会出现法布里-珀罗谐振腔效应, 在允许通过的频率范围内透射率谱出现振荡。

参 考 文 献

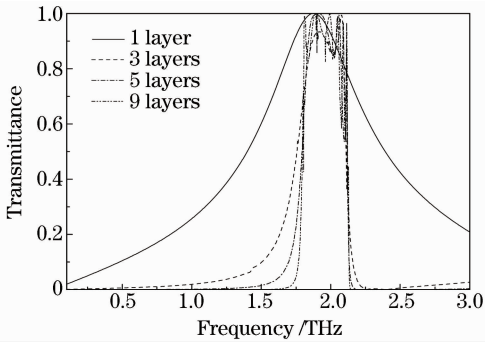


图 7 多层十字叉丝孔阵列结构的透射谱

Fig. 7 Transmission spectra of multi-layer structure for the cross wire-hole array

3 结 论

基于 FDTD 法对 3 种类型的二维金属线网格结构在太赫兹波段的滤波特性进行了仿真研究,结果表明金属井字形栅网结构实现了高通滤波功能,方块阵列实现了低通滤波功能,十字叉丝孔阵列结构则实现了带通滤波的功能。此外,在金属线宽固定的情况下,随着周期的增大,井字形栅网以及其互补方块阵列的截止频率向低频扩展,叠加而成的十字叉丝孔阵列,其透射中心频率也随着周期的增大向低频移动。另外,单层的金属网格结构,其滤波性能较差,层数的增加可大大改善金属网格结构的滤波性能,当层与层之间的间隔为 20  $\mu\text{m}$ ,层数多于 5 层之后,其上升沿跟下降沿都变得十分陡峭,大大提高了结构的滤波性能。

- 1 Ajay Nahata, Aniruddha S. Weling, Tony F. Heinz. A wideband coherent terahertz spectroscopy system using optical rectification and electro-optic sampling[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69**(16): 2321~2323
- 2 Zhang Cunlin, Zhang Yan, Zhao Guozhong *et al.*. Terahertz Detection and Imaging[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. 64~69  
张存林, 张 岩, 赵国忠 等. 太赫兹感测与成像[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008. 64~69
- 3 D. M. Mittleman, M. Gupta, R. Neelamani *et al.*. Recent advances in terahertz imaging[J]. *Appl. Phys. B*, 1999, **68**(6): 1085~1094
- 4 Yang Kun, Zhao Guozhong, Liang Chengsen *et al.*. Comparison between pulsed terahertz imaging and continuous-wave terahertz imaging[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2853~2858  
杨 昆, 赵国忠, 梁承森 等. 脉冲太赫兹波成像与连续波太赫兹成像特性的比较[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2853~2858
- 5 I. H. Libon, S. Baumgartner, M. Hempel *et al.*. An optically controllable terahertz filter[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **75**(20): 2821~2823
- 6 H. Némec, L. Duvillaret, F. Garet *et al.*. Thermally tunable filter for terahertz range based on a one-dimensional photonic crystal with a defect[J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, **96**(8): 4072~4075
- 7 Chaoyuan Chen, Ciling Pan, Cho-Fan Hsieh *et al.*. Liquid-crystal-based terahertz tunable Lyot filter[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(10): 101107
- 8 Y. Zhang, Z. J. Li, B. J. Li. Multimode interference effect and self-imaging principle in two-dimensional silicon photonic crystal waveguides for terahertz waves[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(7): 2679~2689
- 9 Stephan Biber, Arnd Hofmann, Roland Shulz *et al.*. Design and measurement of a bandpass filter at 300 GHz based on a highly efficient binary grating[J]. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 2004, **52**(9): 2183~2189
- 10 J. W. Lee, M. A. Seo, D. J. Park *et al.*. Shape resonance omni-directional terahertz filters with near-unity transmittance [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(3): 1253~1259
- 11 Dongmin Wu, Nicholas Fang, Cheng Sun *et al.*. Terahertz plasmonic high pass filter[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(1): 201~203
- 12 Yong Ma, A. Khalid, Timothy D. Drysdale *et al.*. Direct fabrication of terahertz optical devices on low-absorption polymer substrates[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(10): 1555~1557

栏目编辑: 李文喆