

THz光子晶体天线仿真与设计

张振兴¹, 赵青², 宣银良², 薄勇², 何果²

(1. 中国运载火箭技术研究院研究发展中心 北京 丰台区 100076; 2. 电子科技大学物理电子学院 成都 610054)

【摘要】在THz频段喇叭天线的口径面上加装金属面,金属面上环绕天线口径排布金属圆柱构成光子晶体,利用光子晶体带隙可以抑制表面波的特性,建立了THz光子晶体天线的物理模型。采用电磁仿真软件优化设计了一个新型的THz光子晶体天线,该天线工作频率为300 GHz,最大增益为17.6 dB。与传统的喇叭天线相比,其增益变大,主瓣变窄,背瓣减弱,方向性得到了较大的改进。

关键词 增益; 喇叭天线; 光子晶体; THz波

中图分类号 TN82

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2014.05.011

Design of the THz Photonic Crystal Antennas

ZHANG Zhen-xing¹, ZHAO Qing², XUAN Yin-liang², BO Yong², and HE Guo²

(1. Research and Development Center, CALT Fengtai Beijing 100076;

2. School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract A novel photonic-band-gap (PBG) horn antenna model is presented by using a metallic PBG structure which is formed by square arrays of metal posts. The lowest global band gap of the two-dimensional PBG structure is determined numerically and the gap is used to reflect and focus the antenna radiation. The horn antenna is designed by using the photonic crystals and simulated by using electromagnetic simulation software. The operating frequency of THz antenna is 300 GHz and the gain of THz antenna gain is 17.6 dB. Compared with the traditional antenna, the gain is increased, main lobe narrowed, antical lobe weakened, and the directivity improved.

Key words gain; horn antenna; photonic crystals; THz wave

THz波具有很多独特的性质,如瞬态性、带宽性、低能性等。THz波系统的应用前景非常广泛,涉及卫星通讯、生物医药、无损检测以及农业等各个方面,使其越来越受到科学家的重视^[1]。尽管如此,目前没有高效稳定的THz源和THz天线是一个普遍的难题,所以研究高增益、高方向性的THz天线变得越来越迫切。本文提出利用光子晶体的带隙特性,对天线辐射波束进行聚束,提高天线的增益研究方案,开展新型THz光子晶体天线作用机理及特性方面的研究工作,从物理模型建立、天线的仿真设计及结果分析等方面进行阐述。

1 THz光子晶体天线的物理模型

光子晶体具有频率带隙,频率落在带隙范围内的电磁波将不能在其中传播^[2-3]。对于光子晶体,将Maxwell方程组变为时谐电磁场分量的本征值问题。通过求解本征值,可以清楚看到带隙现象。首先要

考虑金属光子晶体的色散特性,从而找到光子晶体的带隙。图1a所示为2维矩形点阵的PBG结构,金属柱的半径为 r ,并且周期为 a 。

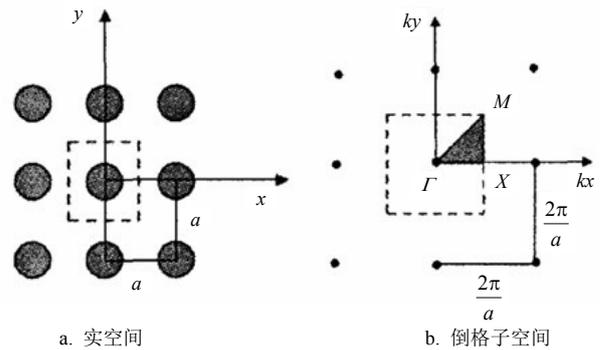


图1 二维光子晶体实空间与倒格子空间

图1b所示为倒格子空间中的结构分布图,虚线部分是第一Brillouin区,阴影的部分是简约Brillouin区。由光子晶体的周期性以及Bloch定理可以知道整个波实空间都可以平移简约Brillouin区而得到,而简

收稿日期: 2013-07-02; 修回日期: 2013-09-16

基金项目: 国家自然科学基金(11275045, 11274058); 国家863项目(2013AA064603); 四川省支撑项目(13ZC2317)

作者简介: 张振兴(1980-),男,博士,主要从事天线、等离子体应用等方面的研究。

约Brillouin边界上的本征频率必定是极值。因此, 求解本征模时, 只需要沿着简约Brillouin边界扫描。

在二维情况下入射波有TM模和TE模两种相互独立的模式。磁场分量在TE模的情况下垂直于二维平面, 而电场分量在TM情况下垂直于二维平面。计算时根据Bragg条件假定取 $r/a=0.42$ 进行求解, 得到能带分布如图2所示。

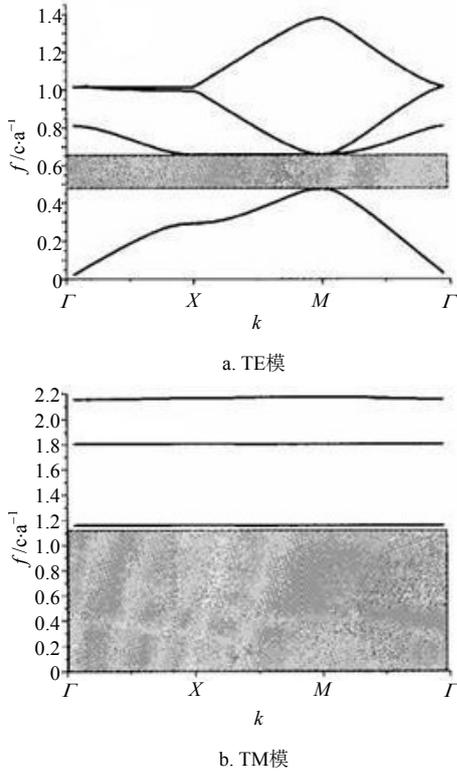


图2 TE模式和TM模式能带图

$r/a=0.42$ 的二维矩形点阵的完全禁带为 $[0.48, 0.66] c/a$, 频率在该范围内的电磁波不能在其中进行传播。

依据上面光子晶体理论基础, 在喇叭天线上加装金属面, 再在金属面上围绕喇叭口周期排列金属圆柱构成光子晶体, 建立光子晶体喇叭天线物理模型如图3所示。

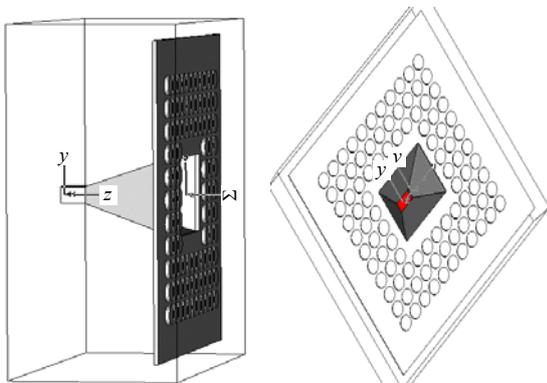


图3 光子晶体喇叭天线模型

设计喇叭天线时, 当给定增益系数, 应将喇叭设计成最佳喇叭, 此时, 首先根据工作波长确定电波导的尺寸, 从而确定喇叭的内部尺寸设计出初步的模型^[5]。根据标准增益的情况来考虑, 首先确定喇叭天线的工作频率 $f=300$ GHz, $\lambda=1$ mm, 由此确定波导的尺寸, 选择波导 $a=750 \mu\text{m}$, $b=360 \mu\text{m}$, 然后根据标准增益的计算公式, 取 $G=20$ dB进行考虑, 即有:

$$\begin{cases} G \approx 0.5 \frac{4\pi}{\lambda^2} D_1 D_2 \\ D_1 \approx \sqrt{3\lambda R_1} \\ D_2 \approx \sqrt{2\lambda R_2} \\ \frac{R_1}{R_2} = \frac{1-b/D_2}{1-a/D_1} \end{cases} \quad (1)$$

由此可以求出喇叭天线的基本尺寸 $D_1=2.297$ mm, $D_2=1.731$ mm。

2 THz光子晶体天线的设计仿真及结果分析

针对上述物理模型^[6-7], 通过仿真优化喇叭天线仿真结果如图4所示。

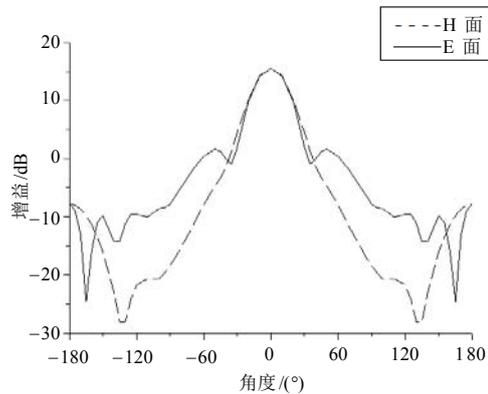


图4 $f=300$ GHz时, 太赫兹喇叭天线E面和H面的2D方向图
图4为没有加光子晶体时喇叭天线在300 GHz时的方向图, 可以看出太赫兹喇叭天线能量的最大辐射方向为轴向, 最大增益出现在 $\theta=0$ 时, 最大增益为15.6 dB, 3 dB主瓣宽度为29.5°。副瓣较明显, 背瓣也较突出。整个天线的辐射不够集中。

在口径天线中电磁波从口径出来之后, 会在金属表面形成一层表面波, 表面波传播到转角处时, 将会产生二次辐射从而形成边缘绕射, 对整个方向图产生不利的影响, 降低它的增益。本文利用光子晶体的带隙消除表面波对它的影响, 并且改善其增益和方向性。根据上面提到的禁带^[8-9], 选择光子晶体的 $a=600 \mu\text{m}$, 可以得出它的禁带为240~330 GHz,

完全在喇叭天线的工作频率上, $r=252\ \mu\text{m}$, 高度 $h=100\ \mu\text{m}$ 。本文对该模型用电磁波软件进行仿真(工作频率为300 GHz), 如图5~图6所示。

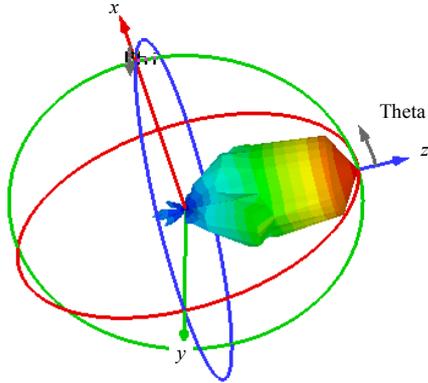


图5 $f=300\ \text{GHz}$ 时, 光子晶体喇叭天线的3D方向图

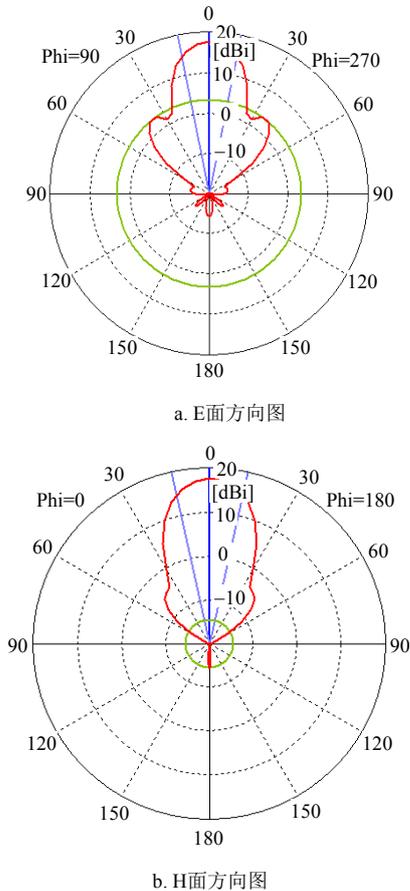


图6 $f=300\ \text{GHz}$ 时, 光子晶体喇叭天线的E面和H面方向图

从图5和图6可以看出天线的辐射方向还是为轴向, 最大增益一样出现在 $\theta=0$ 时, 增益为 17.6 dB。3 dB 主瓣宽度为 23.4° 。能量较集中, 背瓣变得很小, 副瓣也更加偏向轴向。本文将加入光子晶体和未加入光子晶体前的E面和H面方向图做了比较, 如图7所示, 虚线为普通天线。

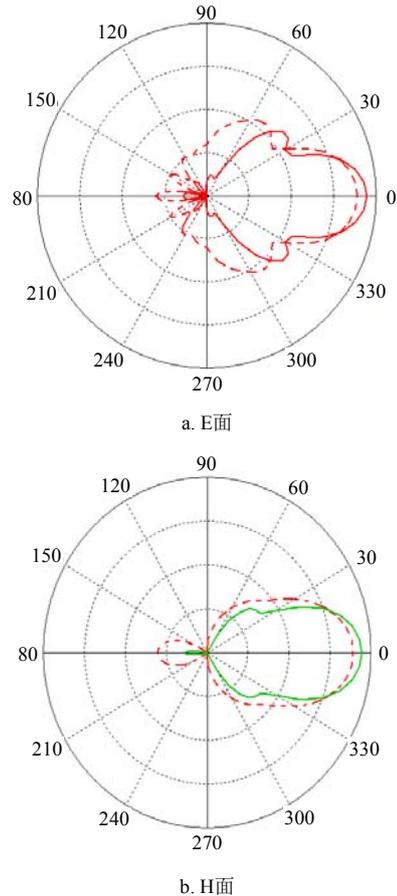


图7 普通天线与光子晶体天线在 $f=300\ \text{GHz}$ 时, E面和H面方向图

从图7可以清晰地看出, 加装光子晶体后, 最大增益有了2 dB的提高, 整个电磁波的能量更加集中, 背瓣减小很多, 与理论较吻合^[2,10], 由于光子晶体的带隙是针对无限长的在空气中的金属圆柱排列, 在理想二维的情况下得出的。本文加入的金属是有限的阵列且高度也不是无限的, 不可能达到理想的完全屏蔽背瓣和旁瓣的效果, 电磁波经过多次散射之后部分能量会泄露到金属阵列外面, 而形成旁瓣和背瓣。因此加入光子晶体之后旁瓣反而有所增加。从H面比较容易看出, 加入光子晶体会使辐射波束变窄, 且增益提高。天线的方向图有了较大的改善。光子晶体喇叭天线在3个不同频率下的E面方向图如图8~图10所示。

比较3个不同频率的方向图可以看出, 随着频率的提高, 虽然后瓣还是有明显的抑制作用, 但是 $\theta=90^\circ$ 的位置能量的辐射越来越强, 随着频率的不断提高, 主瓣增益不断增加, 副瓣的能量也越来越强, 光子晶体带隙的作用越来越弱, 考虑的光子能带位于240~330 GHz, 显然实际情况比这个要小得多。

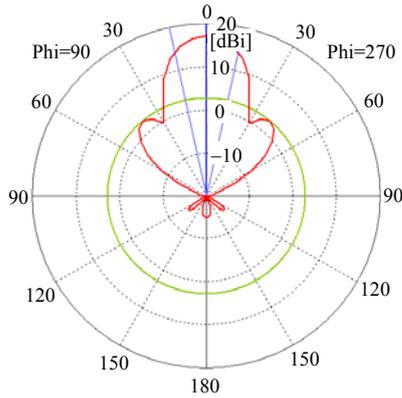


图8 $f=285$ GHz时光子晶体喇叭天线的E面方向图

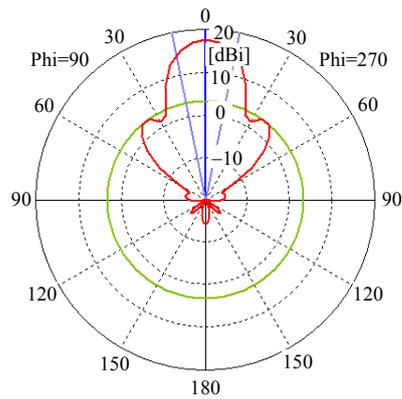


图9 $f=300$ GHz时光子晶体喇叭天线E面方向图

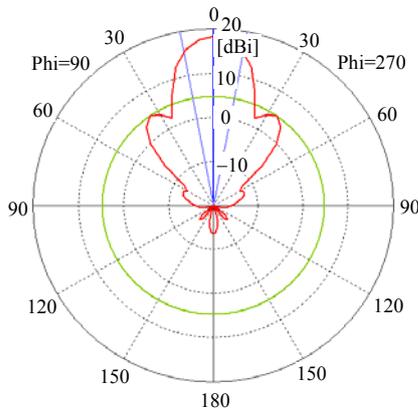


图10 $f=320$ GHz时光子晶体喇叭天线E面方向图

3 结论

本文采用光子晶体中金属柱结构, 半径 $r=252 \mu\text{m}$, 周期 $a=600 \mu\text{m}$, 高度 $h=100 \mu\text{m}$ 。设计了一种工作频

率为300 GHz、最大增益为17.6 dB的THz光子晶体天线。结果证明, 加入光子晶体后喇叭天线的性能有了很好的改善, 由于光子晶体对于表面波的抑制作用, 天线的方向图变得较集中, 背瓣大部分降低, 副瓣也往轴向集中, 主瓣得到了2~3 dB的提高。

参 考 文 献

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(20): 2059-2062.
- [2] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [3] SOZUMER S H, HAUS J W. Photonic bands[J]. Sim Pie-Cubic Lattice, 1993, 10(2): 296-302.
- [4] NATHAN J, MARK S. Two-dimensional terahertz photonic crystal fabricated by deep reactive ion etching in Si[J]. Appl Phys Lett, 2003, 83(12): 21-23.
- [5] 唐剑明, 赵青, 郑灵, 等. 3 mm圆锥喇叭聚焦天线的理论与仿真[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(2): 436-440.
TANG Jian-ming, ZHAO Qin, ZHEN Ling, et al. Theory and simulation of 3 mm conical horn focusing lens antennas[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(2): 436-440.
- [6] RADISIC V, QIAN Y, ITOH T. Broadband power amplifier using dielectric photonic bandgap structure[J]. IEEE Microwave Guided Wave Lett, 1998, 8(1): 13-14.
- [7] HUANG Y, YANG D. Characteristics of guided and leaky waves on multilayer thin-film structures with planar material gratings[J]. IEEE Trans on MTT, 1997, 45(3): 428-435.
- [8] JOANNOPOULOS J D, MEADE R D, WINN J N. Photonic crystals: Molding the flow of light[M]. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 1995.
- [9] 林宝勤, 徐利军, 袁乃昌. 2维金属型光子晶体的有限差分法分析[J]. 电波科学学报, 2006, 21(2): 233-237.
LIN Bao-qin, XU Li-jun, YUAN Nai-chang. Finite difference analysis of 2-D metal photonic crystals[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2006, 21(2): 233-237.
- [10] LEUNG K M, LIU Y F. Photo band structures: the plane-wave method[J]. Physical Review B, 1990, 4(11): 10188-10190.

编辑 黄 莘