

High Gain and Low Side-Lobe THz Corrugated Horn Antenna Based on MEMS Technology*

Zijian Gao, Liming Si[#], Yong Liu, Xin Lv

Beijing Key Laboratory of Millimeter Wave and Terahertz Technology, Department of Electronic Engineering,
School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing
Email: [#]LMS@bit.edu.cn

Received: Jan. 31st, 2013; revised: Feb. 7th, 2013; accepted: Feb. 19th, 2013

Abstract: A novel high gain and low side-lobe terahertz (THz) corrugated horn antenna based on Micro-electro-mechanical-systems (MEMS) technology is proposed. Properties of the antenna for different corrugated groove sizes and numbers are investigated and optimized by using three-dimensional (3D) electromagnetic full-wave finite element method (FEM) simulation software package Ansys High Frequency Structure Simulator (HFSS). The gain and side-lobe of the THz antenna can be designed greater than 8 dB and less than -13 dB, respectively in the band wide for 10 dB return loss from 275 GHz to 580 GHz. The results show that the corrugated groove can effectively improve the gain and depress the side-lobe of the horn antenna at the THz frequency range. Meantime, the THz functional devices could be effectively fabricated using MEMS technology.

Keywords: Terahertz (THz); Micro-Electro-Mechanical-Systems (MEMS) Technology; Horn Antenna; Corrugated Groove

基于 MEMS 工艺的高增益低副瓣太赫兹波纹喇叭天线设计*

高子健, 司黎明[#], 刘 涌, 吕 昕

北京理工大学信息与电子学院电子工程系, 毫米波与太赫兹技术北京市重点实验室, 北京
Email: [#]LMS@bit.edu.cn

收稿日期: 2013 年 1 月 31 日; 修回日期: 2013 年 2 月 7 日; 录用日期: 2013 年 2 月 19 日

摘 要: 本文提出了一种基于微电子机械系统(MEMS)工艺的高增益低副瓣太赫兹波纹喇叭天线设计方法。利用三维全波有限元电磁仿真软件 Ansys HFSS, 对角锥喇叭的波纹开槽尺寸和条数进行参数分析和优化设计, 获得了在 275 GHz 至 580 GHz 的有效带宽内(回波损耗小于 10 dB)增益超过 8 dB 和副瓣电平小于-13 dB 的太赫兹波纹喇叭天线。结果表明波纹开槽可有效提高太赫兹喇叭天线增益并压低副瓣, 同时也说明 MEMS 工艺可有效用于太赫兹功能器件设计。

关键词: 太赫兹; 微电子机械系统(MEMS)工艺; 喇叭天线; 波纹开槽

1. 引言

太赫兹(Terahertz, THz)波, 通常是指频率在 0.1

THz~10 THz(波长 3 mm~30 μ m)范围内的电磁波谱, 其在天文、物理、化学、生命、材料、医疗、国防、航天等方面蕴含着巨大的应用潜力^[1-6]。太赫兹波位于微波和红外波之间, 由于受到太赫兹产生源、传输系统和灵敏探测器的限制, 使得该频段功能器件的发展较为滞后, 形成了电磁波谱中的太赫兹空白(THz Gap)^[1-3]。

*资助信息: 国家高技术研究发展计划(863 计划)(批准号: 2012AA8123012), 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(批准号: 2010CB327505 和 61372010302)和国家自然科学基金(批准号: 61275107)资助的课题。

[#]通讯作者。

在太赫兹无源器件的研究方面，有人提出利用 MEMS 工艺设计太赫兹的传输线、螺旋天线以及角锥喇叭天线等^[7,8]。但是这些传统微波无源功能器件结构缩比到太赫兹频段，常常表现出低效率、高损耗、低增益和高副瓣等缺点。为了改善其性能，新材料和新结构被大量应用与太赫兹无源功能器件设计。如利用超材料(Metamaterial)可设计出高性能、宽频带的太赫兹传输线、天线、90 度转弯波导以及调制器等^[9-13]。最近的研究还表明，亚波长结构的波纹开槽，可以使得电磁波的传输获得增强^[14,15]。

本文基于 MEMS 湿法刻蚀与干法刻蚀工艺相结合的工艺，提出了加载平面波导开槽的角锥喇叭天线新结构，该设计方法可以有效改善角锥喇叭天线的增益和副瓣电平。

2. MEMS 工艺

对于一维直线阵列，通过相邻两基线的长度差以获得长度小于半个波长的虚拟短基线的方法有两种，一种是以某一个外侧阵元为公共相位测量点进行比值相减，此时，其余两个阵元相对于此阵元而言是位于同一侧。分析表明，同侧相减可以不出现整周数的跳变，是一种不需要对整周数差值进行补偿的方法。但对于高频信号，由于波长较短，此时将遇到小于半个波长的天线基线长度不可实现的问题。

天线的加工实现拟采用硅基片湿法刻蚀和干法刻蚀工艺结合的方式，全部表面进行镀金处理。传统的角锥喇叭的加工的流程如图 1 所示，通过各向异性的 KOH 溶液对晶向(100)的 400 μm 硅基片进行湿法刻蚀。根据各向异性刻蚀原理，单晶硅自然结构并不会被破坏(图 2 所示)，因此喇叭的加工夹角为单晶硅(100)面与(111)面的自然夹角(54.7°)。

喇叭喉部与波导相接部分采用台阶设计，一方面可以使喇叭口面长宽比不用受到波导结构的限制；另一方面可以降低喇叭结构与馈源波导相接时，对位精度对天线性能产生的影响。天线的开槽结构可以采用干法刻蚀工艺进行加工，以保证天线开槽结构尺寸的加工误差较低，从而使其对天线性能的影响降至最低。

3. 天线结构与仿真结果分析

本文设计的天线的结构图 3 所示，采用台阶角锥

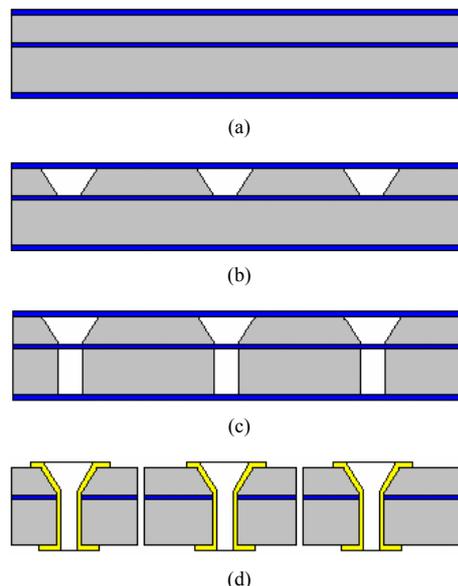


Figure 1. MEMS process for the fabrication of horn antenna
图 1. 角锥喇叭 MEMS 加工流程

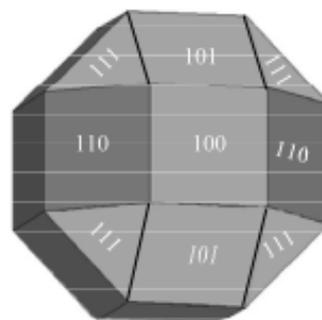


Figure 2. Schematic diagram of a single crystal silicon
图 2. 单晶硅晶面示意图

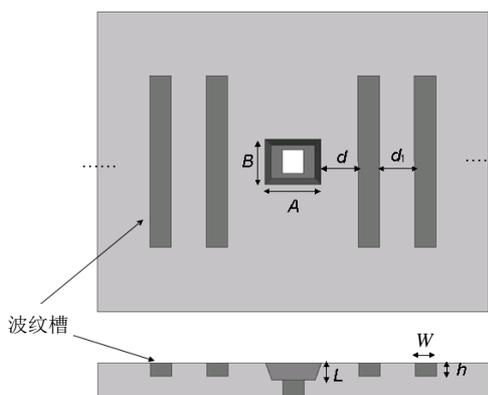


Figure 3. Schematic diagram of the antenna structure
图 3. 天线结构示意图

喇叭形式。喇叭高度与加工硅片的厚度相同，为 $L = 0.4 \text{ mm}$ ，口面尺寸为 $A = 1.05 \text{ mm}$ ， $B = 0.8 \text{ mm}$ ，喇叭喉部台阶尺寸为口面按照 54.7° 倾角收缩得到。

对于没有引入波纹开槽结构的喇叭天线，由于喇叭尺寸微小，为了方便固定，划片时势必会保留较大的天线尺寸，在喇叭周围的金属表面上的电场能量分布情况如图 4 所示。

从图 4 可以看出：在喇叭口面周围的金属表面上有大量的能量分布；这些能量沿着金属表面向周边扩散的范围很大；能量扩散的方向与 E 面相平行(X 轴方向)。产生上述现象的原因是电场线与喇叭的 E 面扩展壁垂直，因此必然有壁电流沿着 E 面扩展壁向喇叭口面流动。当电流到达喇叭口面时并不会停止，而是继续沿着喇叭口面外围的金属表面继续流动，因此会产生很大的能量分布在金属表面。对于喇叭的 H 面扩展壁来说，由于其与电场线方向平行，因此理论上几乎没有壁电流产生，图中所以沿着 Y 轴方向分布的电场能量较小。由于有很大的电场能量沿着 X 轴分布，其扩散的范围超过了几个周期，有可能导致能量的相互抵消，这就会使天线的增益下降。

为此，我们通过加载平面波纹，将更多的能量限制在波纹开槽以内的区域。此时通过调节开槽的位置就可以使电场辐射可以得到更好地叠加，从而提高天线的效率和方向性系数，使增益得到明显的提高。图 3 所示的波纹开槽结构参数的取值分别为：缝隙宽度 $w = 0.29 \text{ mm}$ (约为半波长)；缝隙深度 $h = 0.14 \text{ mm}$ (约为四分之一波长)；第一级缝隙距离喇叭开口的距离 $d = 0.18 \text{ mm}$ (约为四分之一波长)；第二级以上的缝隙间距 $d_1 = 0.27 \text{ mm}$ (约为半波长)。

在喇叭的 E 面扩展壁两侧加载一级开槽结构后，

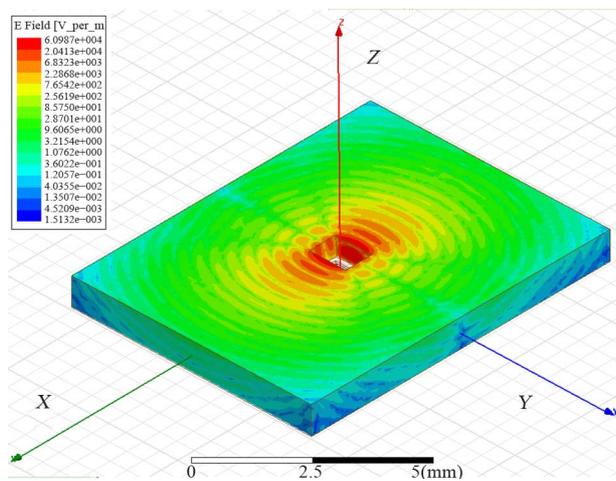


Figure 4. Electric-field distribution of the horn antenna
图 4. 角锥喇叭周围能量分布

天线方向图的最大增益和副瓣电平都得到了改善，图 5 所示为 500 GHz 加载平面波纹槽前后的方向图对比。

由图 6(a)可以看出，在喇叭两侧各加载一道开槽后，仍旧有部分能量可以向外扩散，所以可以通过进一步增加开槽的数量来改善天线性能。加载 4 级、6 级、8 级和 10 级的开槽结构后，在 500 GHz 天线金属表面的电场能量分布和方向图分别如图 6 和图 7 所示。

从图 6 和图 7 可以看出，当开槽数量增加时，能量被越来越多的限制在靠近喇叭口的金表面，对天线的方向图增益和副瓣电平的改善也更加明显。

为研究波纹开槽数进一步增加对天线方向图的最大增益及副瓣电平的影响，我们通过 Ansys HFSS 进一步计算如图 8 所示。从该图可以看出，当波纹开槽数量增加到一定程度时，开槽对天线的方向图的优化会达到一个极限，也就是说，达到某一极限值后，进一步增加波纹开槽数，天线的性能将不再提高，相反地，天线的复杂性还会增加。

根据增益、副瓣电平以及结构复杂性的综合考虑，本文设计的天线采用加载 6 级波纹的形式。仿真得到天线的回波损耗、频段内增益如图 9 所示。根据仿真结果，天线在 275 GHz~580 GHz 的回波损耗低于 -10 dB，在该有效工作频段内，天线的增益均大于 8 dB 以上，且副瓣电平小于 -13 dB。图 10 给出了 520 GHz 的辐射方向图，说明该天线在 520 GHz 时的最大增益为 16 dB，副瓣电平在 -13 dB 以下，且交叉极化小于 -50 dB。

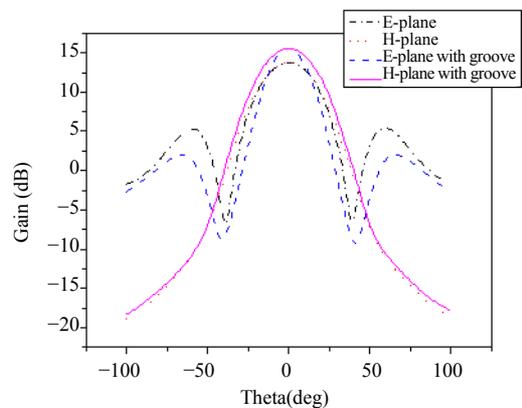


Figure 5. A comparison of radiation patterns of the horn antenna with and without the corrugated groove
图 5. 加载一级波纹开槽前后的方向图对比

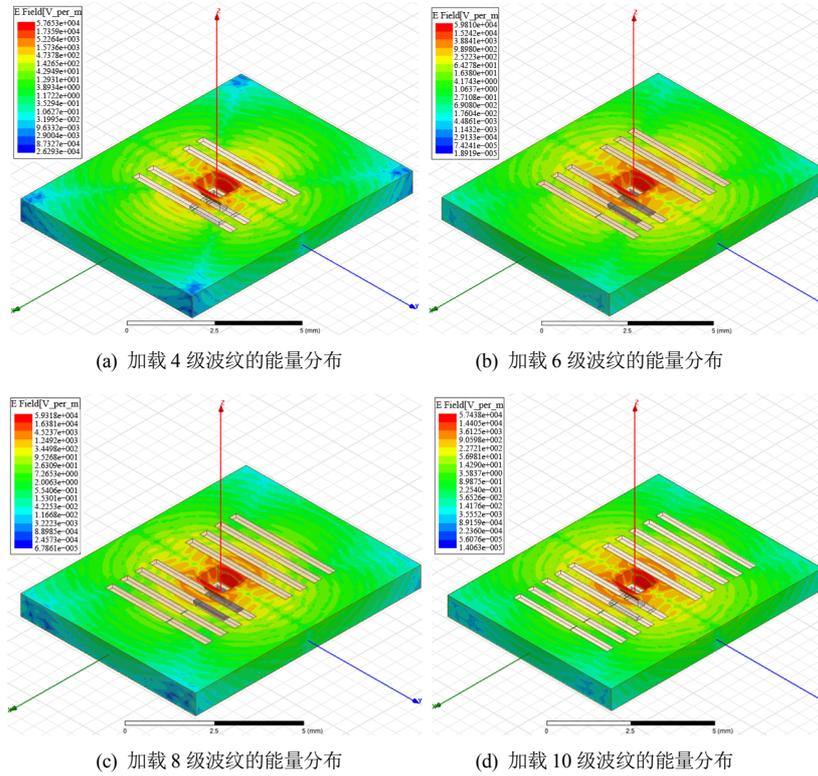


Figure 6. Electric field distributions of the horn antenna for (a) 4 corrugated grooves, (b) 6 corrugated grooves, (c) 8 corrugated grooves, and (d) 10 corrugated grooves

图 6. 加载波纹开槽对 500 GHz 喇叭口面周围能量分布的影响: 加载(a) 4 级, (b) 6 级, (c) 8 级, (d) 10 级

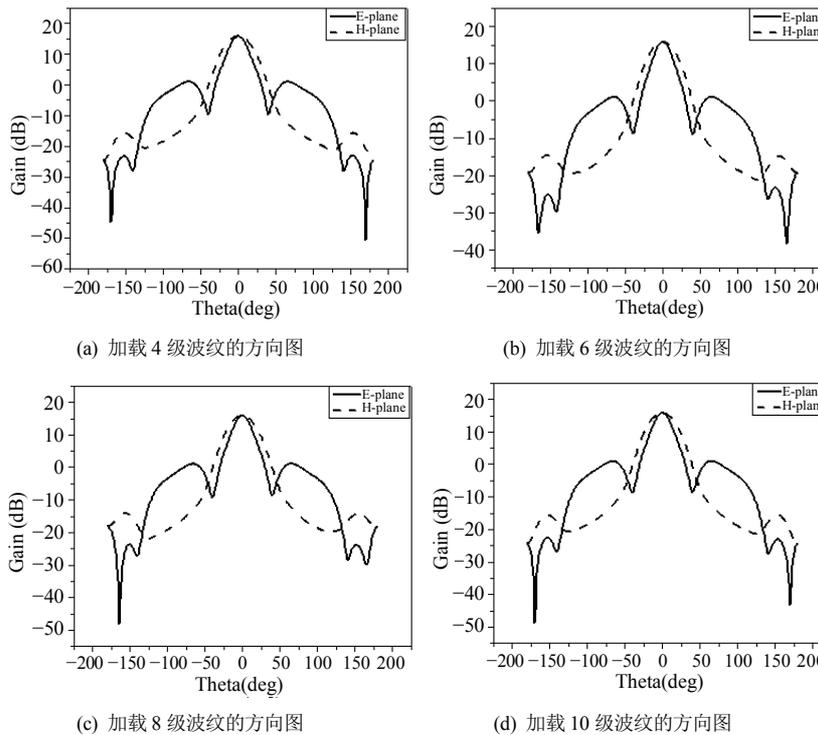


Figure 7. Radiation patterns of the horn antenna for (a) 4 corrugated grooves, (b) 6 corrugated grooves, (c) 8 corrugated grooves, and (d) 10 corrugated grooves at 500 GHz

图 7. 加载波纹开槽对 500 GHz 喇叭天线方向图的影响: 加载(a) 4 级, (b) 6 级, (c) 8 级, (d) 10 级

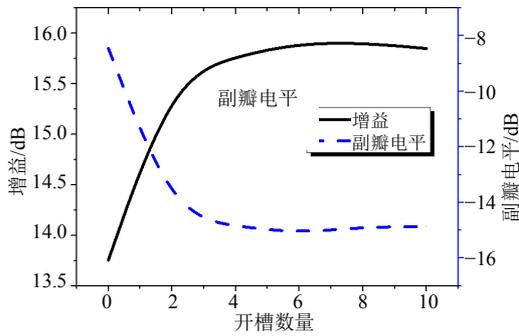


Figure 8. Antenna gains and side lobes for different number of corrugated grooves
图 8. 开槽数量与增益及副瓣电平的关系

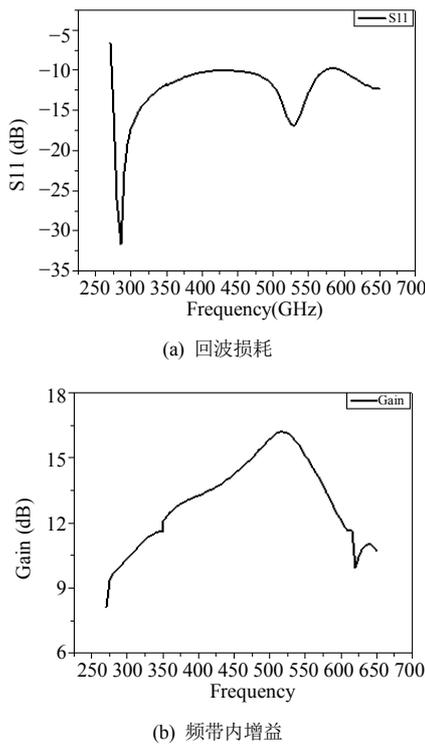


Figure 9. (a) Return loss and (b) gain for the proposed horn antenna
图 9. 天线的(a) 回波损耗与(b) 增益

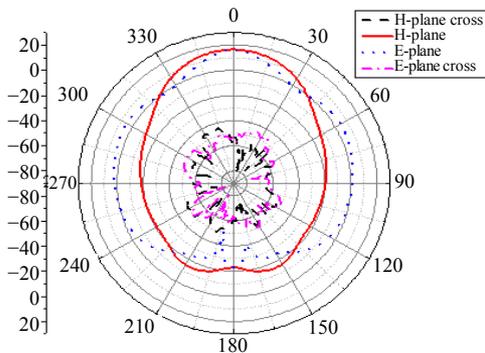


Figure 10. Radiation pattern at 520 GHz
图 10. 520 GHz 辐射方向图

4. 结论

本文提出了一种基于 MEMS 工艺的高增益低副瓣太赫兹波纹喇叭天线设计方法。通过波纹加载的方法，获得了宽频段，方向性好的高增益低副瓣太赫兹波纹喇叭天线。利用 MEMS 工艺下的单晶硅(100)面与(111)面的自然夹角(54.7°)所设计的角锥喇叭天线，在外加波纹开槽情况下，可以获得 35%的有效带宽(275 GHz~580 GHz)，且在有效频段内天线的增益大于 8 dB，副瓣电平小于-13 dB。基于 MEMS 工艺的太赫兹波纹喇叭天线性能明显优于传统的角锥喇叭天线，可有效应用与太赫兹通信、雷达、成像等系统。

参考文献 (References)

- [1] P. H. Siegel. Terahertz technology. IEEE Transactions on Microwave Theory and Technology, 2002, 50: 910.
- [2] B. Ferguson, X. C. Zhang. Materials for terahertz science and technology. Nature Materials, 2002, 1(1): 26-33.
- [3] M. Tonouchi. Cutting-edge terahertz technology. Nature Photonics, 2007, 1(2): 97-105.
- [4] 司黎明, 侯吉旋, 刘涌, 吕昕. 基于负微分电阻碳纳米管的太赫兹波有源超材料特性参数提取[J]. 物理学报, 2013, 62(3): 037806.
- [5] L. M. Si, Y. Liu, H. Lu, H. J. Sun, X. Lv and W. Zhu. Experimental realization of high transmittance THz 90°-bend waveguide using EMXT structure. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(5): 519-522.
- [6] L. M. Si, X. Lv. Terahertz waves hairpin microstrip band-pass filter and its application to overlaid dielectric material detection. Modern Physics Letter B, 2008, 22(29): 2843-2848.
- [7] R. N. Dean, P. C. Nordine and C. G. Christodoulou. 3-D helical THz antennas. Microwave and Optical Technology Letters, 2000, 24(2): 106-111.
- [8] J. X. Chen, W. Hong, H. J. Tang, P. P. Yaw, L. Zhang, G. Q. Yang, D. B. Hou and K. Wu. Silicon based millimeter wave and THz ICs. IEICE Transactions on Electronics, 2012, 7: 1134-1140.
- [9] L. M. Si, H. J. Sun and X. Lv. Thz leaky-wave antenna with high-directivity and beam-steering using CPW CRLH metamaterial resonators. Proceedings of the 3rd International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging, Beijing, 2009, 7385(1): 1-8.
- [10] L. M. Si, Y. Yuan, H. Sun and X. Lv. Characterization and application of planar terahertz narrow bandpass filter with metamaterial resonators. International Workshop on Metamaterials, Nanjing, 2008: 351-354.
- [11] L. M. Si, Y. Liu, S. Zhu and H. Xin. Integrated THz horn antenna using EBG structures. UNSC-URSI National Radio Science Meeting, Boulder: University of Colorado at Boulder, 2011.
- [12] Y. Liu, L. M. Si, S. Zhu and H. Xin. Experimental realization of an integrated THz electromagnetic crystals (EMXT) H-plane horn antenna. Electronics Letters, 2011, 47(2): 80-82.
- [13] L. M. Si, H. Sun and X. Lv. Theoretical investigation of terahertz amplifier by carbon nanotubes within transmission line metamaterials. Microwave and Optical Technology Letters, 2011, 53(4): 515-518.
- [14] S. S. Akarca-Biyikli, I. Bulu and E. Ozbay. Enhanced transmission of microwave radiation in one-dimensional metallic gratings with subwavelength aperture. Applied Physics Letters, 2004, 85(7): 1098-1100.

- [15] M. Beruete, I. Campillo, J. S. Dolado, J. E. Rodriguez-Seco, E. Perea and M. Sorolla. Enhanced microwave transmission and beaming using a subwavelength slot in corrugated plate. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2004, 3: 328-331.