

文章编号: 2095-4980(2016)05-0673-04

太赫兹准光混频器的设计与实现

徐明明^{1,2}, 郭大路³, 国爱燕^{1,2}, 高文军^{1,2}, 韩运忠^{1,2}

(1.中国空间飞行器设计总体部, 北京 100094;
2.北京市电磁兼容与天线测试工程中心, 北京 100094; 3.北京理工大学 信息与电子学院, 北京 100081)

摘 要: 设计了一种用于太赫兹接收机的准光混频器。该混频器主要由肖特基二极管集成平面天线和高阻硅透镜 2 部分组成, 其中肖特基二极管的截止频率为 3.5 THz。平面双缝天线、螺旋天线、对数周期天线分别与肖特基二极管进行一体化集成, 再通过高阻硅透镜来消除介质表面波, 以达到改善天线辐射性能的目的。所设计的准光混频器工作频率为 340 GHz, 并对该混频器的检波性能、方向图和混频性能进行了测试, 其变频损耗小于 15 dB。

关键词: 太赫兹; 肖特基二极管; 准光混频器

中图分类号: TN851.4

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201605.0673

Design and fabrication of quasi-optical mixers

XU Mingming^{1,2}, GUO Dalu³, GUO Aiyan^{1,2}, GAO Wenjun^{1,2}, HAN Yunzhong^{1,2}

(1.Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China; 2.Beijing Engineering Research Center of EMC and Antenna Test Technology, Beijing 100094, China; 3.School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Quasi-optical mixers for terahertz receiver are designed and realized. The quasi-optical mixers consist of two parts: an antenna integrated Schottky diode chip and a high-resistivity silicon lens. The cutoff frequency of the Schottky diode is 3.5 THz. The planar double slot antenna, equiangular spiral antenna and balanced log-periodic antenna are integrated with the Schottky diodes respectively. The silicon lens is adopted to improve the radiation performance and reduce the surface waves. The operating frequency of quasi-optical mixers is 340 GHz. The detection capability, radiation pattern and frequency conversion are measured. Its Double Side Band(DSB) conversion loss is below 15 dB.

Key words: terahertz; Schottky diodes; quasi-optical mixers

太赫兹(THz)波通常指频率在 0.1 THz~10 THz(波长 3 mm~30 μm)范围内的电磁波(1 THz= 10^{12} Hz)。它在电磁波谱中介于微波和红外辐射之间^[1]。由于太赫兹波的波长短, 光子能量低, 可穿透很多普通的非金属材料, 太赫兹波广泛应用于通信、卫星遥感、射电天文、安检成像等领域。

研究实用型太赫兹接收系统面临诸多技术的挑战。其中, 如何将自由空间辐射的信号高效耦合到探测器器件上是接收机设计研究的重点之一。目前, 通常采用的耦合技术有波导耦合和准光耦合技术。虽然波导方式能得到相对较低的损耗和较高的灵敏度, 但随频率的升高波导加工难度增大, 很难在更高频段实现高性能的应用^[2]。由于准光方式采用电子束制版和光刻等精加工技术, 能有效减小加工误差, 使准光耦合技术在太赫兹波段得到了广泛的应用^[3]。因此, 本文基于自主研发的太赫兹肖特基二极管设计了工作频率为 340 GHz 的太赫兹准光混频器, 并对该混频器的检波性能、方向图和变频损耗进行了测试。

1 太赫兹准光混频器的设计

太赫兹准光混频器主要由非线性器件(肖特基二极管)、平面天线、介质透镜和中频电路构成, 如图 1 所示。射频(Radio Frequency, RF)信号和本振(Local Oscillator, LO)信号通过介质透镜耦合到肖特基二极管与平面天线一体化集成的有源天线上实现信号的变频, 输出中频(Intermediate Frequency, IF)信号。

收稿日期: 2015-12-20; 修回日期: 2016-01-20

基金项目: 装备预先研究基金资助项目(9140A21080213HT05313)

1.1 太赫兹肖特基二极管

混频的核心器件是非线性器件，采用肖特基二极管作为非线性器件，具有高电子迁移率、结构简单的特点，能较好地适应太赫兹混频器的应用^[4-5]。图 2(a)和图 2(b)分别给出了自主研制的表面沟道式二极管的实物照片和电子显微照片，该二极管由本征 GaAs 层、N⁺GaAs 层、N⁻GaAs 层、氧化层等组成。

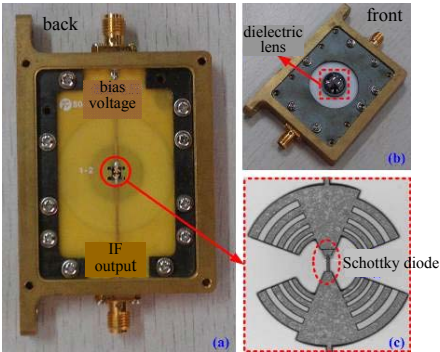


Fig.1 Terahertz quasi-optical mixers
图 1 太赫兹准光混频器

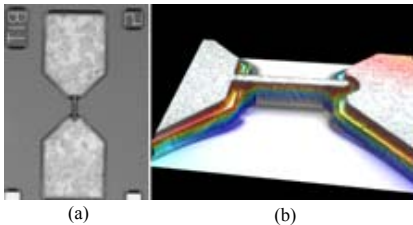


Fig.2 Pictures of Schottky diode
图 2 肖特基二极管照片

太赫兹肖特基二极管的 $I-U$ 特性测试曲线如图 3 所示，从图 3 可以看出，所研制的肖特基二极管的开启电压约为 0.7 V。级联电阻、理想因子、饱和电流、结电容和并联电容相关参数如表 1 所示，根据上述参数，计算可得二极管的截止频率为：

$$f_c = 1 / 2\pi R_s (C_{j0} + C_p) \approx 3.5 \text{ THz} \tag{1}$$

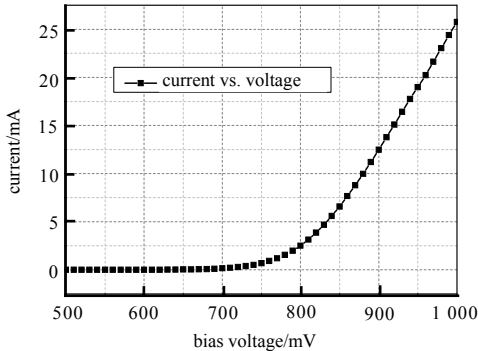


Fig.3 $I-U$ characteristic of the Schottky diode
图 3 肖特基二极管 $I-U$ 测试曲线

表 1 肖特基二极管相关参数	
Table1 Relevant parameters of the Schottky diode	
parameters	value
series resistance(R_s/Ω)	5.16
ideality(n)	1.24
saturation current(I_s/A)	2.54×10^{-14}
junction capacitance(C_{j0}/fF)	4.04
shunt capacitance(C_p/fF)	4.80

图 4 给出了自主研制肖特基二极管在不同工作频率下，肖特基二极管等效阻抗的实部值、虚部值与偏置电压的定量关系曲线，从图中可以看出，偏置电压从 0.5 V 升高到 0.8 V 时，肖特基二极管等效阻抗的实部值和虚部值都发生了明显的改变；当偏置电压在 0.85 V~1.0 V 的范围内变化时，肖特基二极管的等效阻抗未发生明显的变化，其实部值约为 22 Ω ，虚部值约为 0。

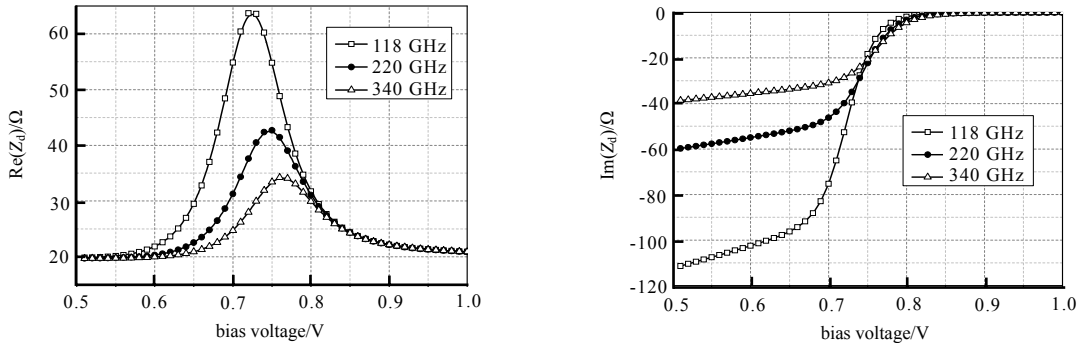


Fig.4 Relationship between equivalent impedance and voltage
图 4 肖特基二极管等效阻抗实部值、虚部值与电压的关系

1.2 太赫兹介质透镜有源集成天线

根据几何光学中射线法, 电磁波在介质中的辐射如图 5 所示。当电磁波在介质中的入射角大于临界角时, 电磁波会在介质与空气的分界面发生全反射, 造成电磁波在介质表面来回反射, 形成介质表面波, 影响天线的辐射性能^[4,6]。

通过将肖特基二极管集成平面天线安装于介质透镜的背面, 不仅能有效地避免表面波的产生, 而且能显著地提高天线的增益^[5-8], 因此, 本文采用高阻硅扩展半球透镜与有源平面天线集成, 其外形结构如图 6 所示。采用有限元法、矩量法、物理光学法等算法相结合对介质透镜进行优化设计, 最终优化的扩展半球介质透镜尺寸为: 半径 R 为 6.35 mm, 扩展长度 L 为 2.45 mm。此时, 扩展半球透镜天线的二维辐射方向图如图 7 所示, 从图中可以看出, 该介质透镜天线不仅具有较高的增益和较强的指向性的特点, 而且能明显抑制辐射方向图的副瓣。

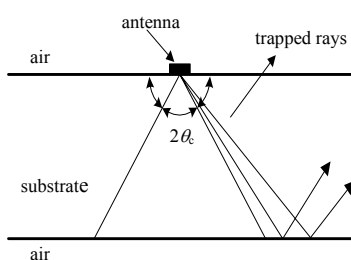


Fig.5 Generation of surface waves
图 5 电磁波在介质中的辐射

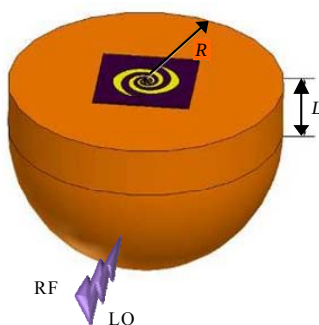


Fig.6 3-D model of a dielectric lens antenna
图 6 介质透镜有源集成天线示意图

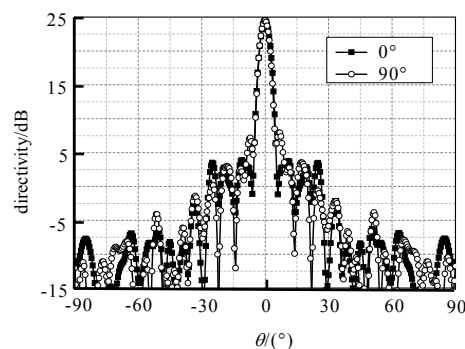


Fig.7 Simulated radiation pattern of the dielectric lens antenna
图 7 透镜天线辐射方向图

根据肖特基二极管的等效阻抗以及介质透镜的特性, 对肖特基二极管集成的平面天线和介质透镜进行一体化设计, 最终实现了工作频率为 340 GHz 的准光混频器。图 8 给出了该太赫兹准光混频器所采用的天线形式有: 平面双缝天线(图 8(a))、平面螺旋天线(图 8(b))和平面对数周期天线(图 8(c))。

2 太赫兹准光混频器性能测试

由于基于平面双缝天线、平面螺旋天线和平面对数周期天线的太赫兹准光混频器具有类似的测试结果, 本文仅给出了基于平面对数周期天线的准光混频器的相关测试结果。

使用太赫兹准光混频器的检波性能测试平台进行测试, 采用示波器和频谱仪相结合, 其中, 示波器可以直观地观测到检波后的信号波形, 频谱仪能精确地对接收信号进行频谱特性分析。

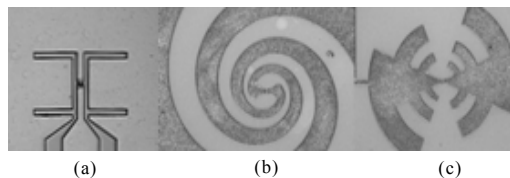


Fig.8 Planar antennas used in quasi-optical mixer
图 8 准光混频器采用的平面天线

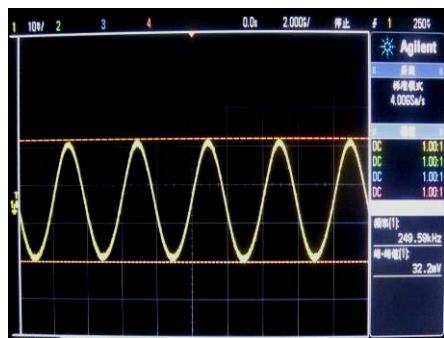


Fig.9 Measured response of the quasi-optical mixer
图 9 准光混频器的检波响应

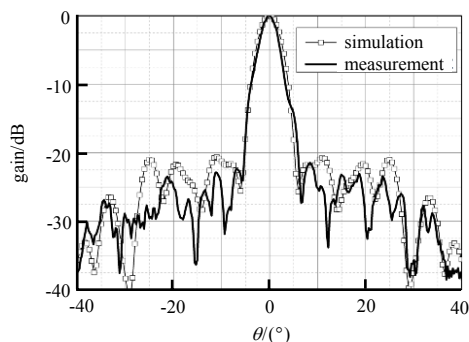


Fig.10 Radiation pattern of the quasi-optical mixer at 340 GHz
图 10 340 GHz 准光混频器的方向图

通过信号源倍频的方式产生载波频率为 340 GHz 的调幅信号照射所研制的太赫兹准光混频器, 该准光混频器的 IF 端口输出如图 9 所示的正弦信号波形。在此基础上, 通过控制转台可得如图 10 所示的天线方向图, 从图

中可以看出,测试结果与仿真结果的主瓣能较好地吻合,而旁瓣存在一定的差异。造成旁瓣偏差的原因有 2 点:由于检测信号较弱,准光混频器不能高效响应;由测试误差引起。

太赫兹准光混频器通过同时耦合空馈的 LO 信号(339 GHz)和 IF 信号(340 GHz)实现了信号的下变频,输出频率为 1 GHz 的 IF 信号。根据信号功率以及 Friis 传输公式,估得该太赫兹准光混频器的变频损耗小于 15 dB。

3 结论

本文基于截止频率为 3.5 THz 的肖特基二极管设计并研制了工作频率为 340 GHz 的太赫兹准光混频器。通过对该准光混频器检波性能、天线方向图和变频损耗(≤ 15 dB)的测试,验证了准光混频器设计实现方法的有效性和正确性。

参考文献:

- [1] CROWE T W, BISHOP W L, PORTERFIELD D W, et al. Opening the terahertz window with integrated diode circuits[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2005, 40(10): 2104–2110.
- [2] GEARHART S S, LING C G, REBEIZ G M. Integrated millimeter-wave corner-cube antennas[J]. IEEE Transaction on Antennas Propagation, 1987, 39(7): 1000–1006.
- [3] FILIPOVIC D F, GEARHART S S, REBEIZ G M. Double-slot antennas on extended hemispherical and elliptical silicon dielectric lenses[J]. IEEE Transaction on Microwave Theory & Techniques, 1993, 41(10): 1738–1749.
- [4] XU M M, MOU J C, CHEN L, et al. Design of lens integrated planar antenna on chip for quasi-optical mixers[C]// International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. Shenzhen, China: [s.n.], 2012: 1–4.
- [5] MEASTRINI Alain, THOMAS Bertrand, WANG H, et al. Schottky diode-based terahertz frequency multipliers and mixers[J]. Comptes Rendus Physique, 2010, 11(7): 480–495.
- [6] GEARHART Steven Scott. Integrated millimeter-wave and submillimeter-wave antennas and Schottky diode receivers[D]. USA: University of Michigan, 1994.
- [7] GUO Dalu, MOU Jinchao, MO J, et al. A terahertz quasi-optical detector based on a 3D printing lens[C]// 2015 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on IMWS-AMP. Suzhou, China: [s.n.], 2015.
- [8] YUAN Y, MOU J C, LI D B, et al. Design of integrated antenna-coupled detector for MMW and sub-MMW imaging[C]// 2010 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. Chengdu, China: [s.n.], 2010: 1315–1317.

作者简介:



徐明明(1987–), 男, 江西省永修县人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为卫星微波遥感、毫米波与太赫兹科学技术. email: xuminglc@163.com.

高文军(1973–), 男, 内蒙古和林格尔县人, 高级工程师, 主要研究方向为天线、星载 SAR 成像技术。

郭大路(1988–), 男, 山东省菏泽市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹成像技术。

国爱燕(1984–), 女, 河北省衡水市人, 博士, 工程师, 主要研究方向为微波系统论证。

韩运忠(1971–), 男, 山东省泰安市人, 高级工程师, 主要研究方向为天线技术。