

文章编号: 2095-4980(2018)03-0378-05

330 GHz 太赫兹次谐波混频器设计

夏德娇, 张 勇

(电子科技大学 极高频复杂系统国防重点学科实验室, 四川 成都 611731)

摘要: 为了缓解微波频段频谱资源的日益紧张, 对太赫兹频段进行探索, 介绍了一款基于 GaAs 肖特基二极管的 330 GHz 次谐波混频器。设计采用了整体综合设计的方法, 进行高频结构模拟器(HFSS)与先进设计系统(ADS)联合仿真。优化过程中, 电路不连续性通过 HFSS 仿真结果表征, 电路传输特性和二极管非线性特性由 ADS 仿真结果表征, 通过优化传输线参数, 实现优化电路的目的。此方法增大了仿真优化空间, 降低了设计难度。仿真结果显示, 在 300~350 GHz 频段内, 混频器的变频损耗小于 8 dB。

关键词: 太赫兹; 综合设计; GaAs 肖特基二极管; 混频器

中图分类号: TN454

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201803.0378

Design of a 330 GHz sub-harmonic mixer based on planar Schottky diodes

XIA Dejiao, ZHANG Yong

(EHF Key Laboratory of Fundamental Science, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China)

Abstract: At present, the frequency spectrum resources in the microwave band are becoming increasingly scarce. The exploration of the terahertz band has provided new ideas for solving this problem. Terahertz technology is widely used in many fields, such as communications, radar and imaging. Terahertz mixer is a critical device in the terahertz transceiver system. Therefore, the study of terahertz mixer is very important. A 330 GHz sub-harmonic mixer based on GaAs planar Schottky diode is presented. An integrated design method is utilized. And a co-simulation in High Frequency Structure Simulator(HFSS) and Advanced Design System(ADS) is implemented. The circuit discontinuity is characterized by the simulation results of HFSS. The characteristics of the circuit transmission and the nonlinear characteristics of the diode are characterized by ADS simulation results. By optimizing the transmission line parameters, the purpose of optimizing the circuit is realized. This method increases the optimization range and reduces the design difficulty. Simulated results show that conversion loss of this mixer is less than 8 dB from 300 GHz to 350 GHz.

Keywords: Terahertz; integrated design; GaAs planar Schottky diode; mixer

太赫兹技术被广泛应用在通信、雷达和成像等领域之中, 太赫兹混频器是太赫兹收发系统中的关键器件, 太赫兹混频器的研究具有十分重要的意义。太赫兹波广义上是指波长在 3 mm 到 30 μm 之间的电磁波, 在频率上与毫米波和红外相邻, 从能量上又介于电子与光子之间。因此, 对于太赫兹技术的研究, 既不能完全用光学理论分析, 也不能完全遵照微波理论, 从而使得太赫兹技术目前还不及毫米波技术和红外技术成熟^[1-3]。太赫兹技术在通信、雷达、电子对抗和天文观测等系统中均有应用。如何获得性能稳定、小型化、高效率、低损耗的太赫兹收发前端, 是目前面对的技术挑战。太赫兹混频器是太赫兹收发前端中最为关键的器件, 其性能好坏直接影响整个系统的性能^[4-6]。随着半导体技术与工艺的发展, 太赫兹固态电路的非线性器件也日益丰富, 其中平面肖特基二极管以其开关时间短, 截止频率高, 结构简单等优点, 已成为太赫兹固态器件的主力军。本文采用整体仿真的方法, 设计了一款基于 Teratech 公司 AP1/G2/0P95 反向并联二极管对的次谐波混频器, 此混频器工作在 300~350 GHz, 频带范围内变频损耗小于 8 dB。

1 混频器设计原理

宽带混频器是利用通过二极管电流的非线性特性,并在产生新的频率组合分量中选取所需的分量。根据参与有效变频的本振谐波分量的阶数,混频器可分为基波混频和谐波混频。基波混频器相较而言有更低的变频损耗,但由于在太赫兹频段高性能本振源的制作技术难度大,费用高,稳定的高频太赫兹源相对较难实现,基波混频器应用受到很大限制^[7-9]。而谐波混频可以利用较低频率本振实现高频混频。因此,此设计采用次谐波混频。谐波参与混频其变频效率较低,而采用二极管反向并联的电路形式可抑制本振的奇次谐波参与混频,有效防止本振基波混频得到的频率分量输出,提高了混频效率。反向并联二极管对的电路连接形式见图 1,其中流过 2 个二极管的电流 i_1 和 i_2 可表示为:

$$i_1 = -i_s(e^{-\alpha U} - 1) \tag{1}$$

$$i_2 = i_s(e^{\alpha U} - 1) \tag{2}$$

式中: α 是二极管伏安特性曲线斜率参数; i_s 为二极管反向饱和电流; U 为二极管外加偏压。此时每个二极管上的电导可写为:

$$g_1 = \alpha i_s e^{-\alpha U} \tag{3}$$

$$g_2 = \alpha i_s e^{\alpha U} \tag{4}$$

总电导可写为 2 个电导之和,且只有本振激励时可以换算成:

$$g = g_1 + g_2 = \alpha i_s (e^{\alpha U} + e^{-\alpha U}) = 2\alpha i_s \cosh(\alpha U_{LO} \cos \omega_{LO} t) \tag{5}$$

将式(5)展开可得:

$$g = 2\alpha i_s [I_0(\alpha U_{LO}) + 2I_2(\alpha U_{LO}) \cos 2\omega_{LO} t + 2I_4(\alpha U_{LO}) \cos 4\omega_{LO} t + \dots] \tag{6}$$

混频产物为:

$$i = a_1 \cos \omega_{LO} t + a_2 \cos \omega_s t + a_3 \cos 3\omega_{LO} t + a_4 \cos (2\omega_{LO} + \omega_s) t + a_5 \cos (2\omega_{LO} - \omega_s) t + \dots \tag{7}$$

式中: U_{LO} 为本振电压; ω_{LO} 为本振信号的角频率; ω_s 为射频信号频率。

从式(7)中可以看出本振和射频排列组合分量 $m\omega_{LO} + n\omega_{RF}$ 中,输出总信号频率只包含 $m+n$ 为奇整数的分量,相比单管混频,有效防止了本振基波混频得到的频率分量的输出,大大提高二次谐波混频的效率。

2 混频器设计

2.1 混频器拓扑结构

混频器结构框图见图 2,主要包括:射频与本振信号探针过渡、反向并联肖特基二极管对、输入输出匹配电路,以及本振和中频滤波电路。电路制作以石英作为电路芯片材料,其介电常数低,高频介质损耗小,热膨胀系数小,热稳定性好,适合于高频电路使用,本设计中石英基片厚度约 50 μm 。传输线采用悬置微带形式,悬置微带形式传输结构相对介电常数近似为 1,进一步减少了高频介质损耗,提高混频效率。本振信号和射频信号分别通过 WR-5.1 和 WR-2.8 标准波导传输,信号通过 E 面探针实现波导中 TE₁₀ 模式和悬置微带中准 TEM 模的变换。通过上文提到的二极管反向并联电路形式,得到偶次谐波混频分量。再由输出端的中频滤波电路,从一系列频率分量中分离出所需中频信号。

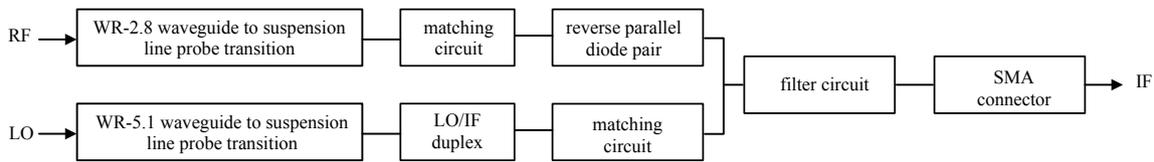


Fig.2 Topology of the mixer
图 2 混频器拓扑结构

2.2 肖特基二极管模型

肖特基二极管作为混频器的重要非线性元件,建立准确的二极管仿真模型是混频器仿真的关键。二极管生产厂家只会提供表征肖特基结特性的本征参数,而在太赫兹频段,肖特基二极管管芯封装尺寸和工作波长相比拟,因而由封装带来的寄生参数已经不能忽略,如何准确表征二极管高频寄生特性是二极管仿真模型建立中的重要问题。本文采用同轴探针法,在 HFSS 软件中建立二极管芯片的三维模型,见图 3。并通过其三维电磁仿真结果表

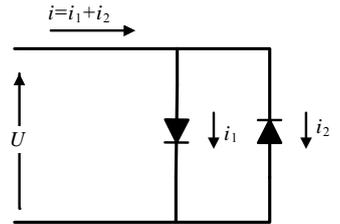


Fig.1 Reverse parallel diode pair
图 1 反向并联二极管对

征二极管的高频寄生效应。通过将 HFSS 仿真结果以 S5P 文件形式导入到 ADS 软件中，联立以本征参数表征结特性的 SPICE 模型，建立二极管工作模型，见图 4。

2.3 电路整体综合设计

电路仿真方面，不同于以往先分部设计，再设计各部分间匹配的方法。本文采取整体综合设计的方法，增大了仿真优化空间。综合设计法中不再单独优化各个单元电路，而将是通过经去嵌处理后的 HFSS 三维电磁仿真的结果表征电路中出现的非连续性，与 ADS 中传输线模型相结合，在 ADS 中建立完整的混频器整体电路模型。各电路模块只需进行初值仿真，电路各传输线变量的优化在电路整体仿真中进行。在 ADS 中进行谐波平衡法仿真，通过优化各段传输线参数，达到获得最优变频损耗的目标。然后按照优化后的传输线结构参数，在 HFSS 中将各传输线单元结构组合，建立混频器的无源结构整体模型，将仿真结果导出 SNP 文件到 ADS 中进行重新验证，以查看是否仍然满足指标。若不满足要求就需要返回前面的步骤进行调整，直到满足设计要求。

混频器整体电路结构见图 5，将电路分为传输线部分和非传输线部分。对于 ADS 中不能准确表征的非传输线部分，在 HFSS 中建立相应的非连续性模型，将其三维电磁仿真结果以 SNP 文件的形式导入到 ADS 中，实现准确表征非传输线部分的目的。

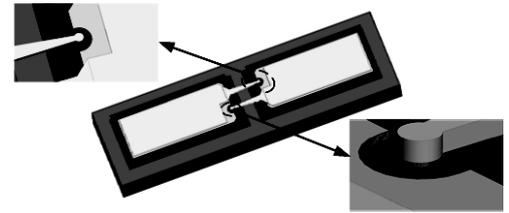


Fig.3 3D model of Schottky diode
图 3 肖特基二极管三维模型

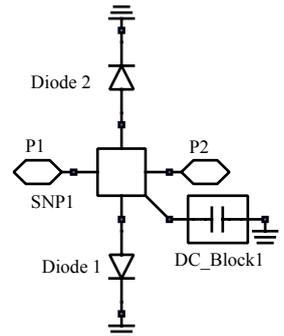


Fig.4 Diode working model in ADS
图 4 ADS 中二极管工作模型

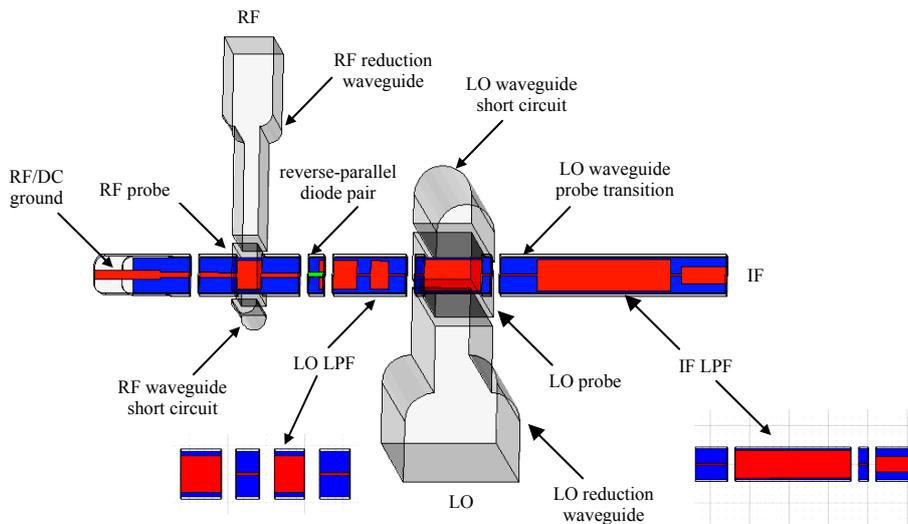


Fig.5 Decomposition diagram of terahertz subharmonic mixer circuit based on integrated design method
图 5 基于综合设计方法的太赫兹分谐波混频器电路分解示意图

对于悬置微带阶梯阻抗变换结构，可以通过 HFSS 的端口去嵌功能，将其不连续性结果导出 S2P 文件，代入 ADS 的二端口 S 参数数据模型，见图 6。因此，对于由悬置微带传输线单元结构构成的本振和低通滤波器来说，其可以在 ADS 中表示成图 7。



Fig.6 HFSS and ADS models for stepped impedance transformation structures with microstrip transmission lines
图 6 屏蔽腔悬置微带传输线阶梯阻抗变换结构 HFSS 和 ADS 模型

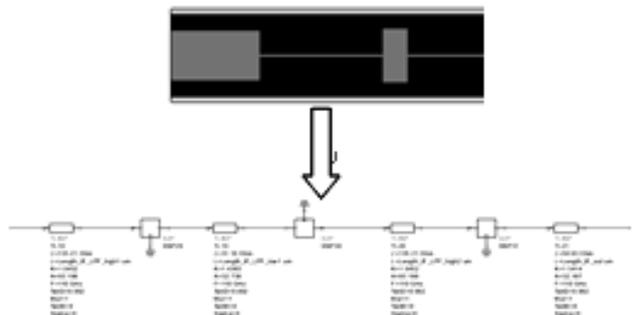


Fig.7 HFSS and ADS models of low-pass filters
图 7 低通滤波器 HFSS 和 ADS 模型

对于减高波导结构来说,可以采用和悬置微带传输线类似的处理方式,所不同的是矩形波导传输线可以直接采用 ADS 的矩形波导模型,见图 8。对于本振和射频波导探针过渡的波导短路面结构以及射频波导探针过渡中的射频直流地结构,可以通过去嵌,导出 SNP 文件,代入 ADS 的一端口 S 参数数据模型,以表征其短路特性,见图 9。

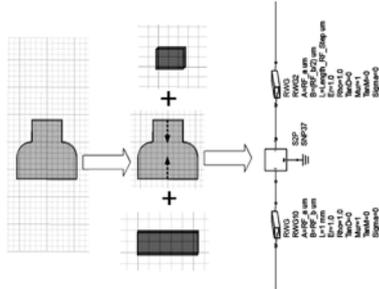


Fig.8 HFSS and ADS models of reduced waveguide
图 8 减高波导 HFSS 和 ADS 模型

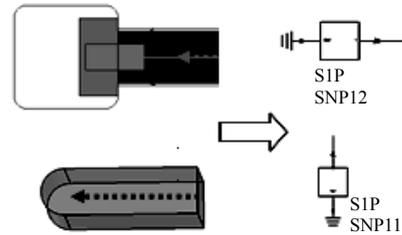


Fig.9 HFSS and ADS models for RF direct and waveguide short surfaces
图 9 射频直流地和波导短路面 HFSS 和 ADS 模型

而对于本振和射频波导探针过渡的探针结构部分则需在 HFSS 和 ADS 中建立四端口模型,见图 10。将上述非传输线部分的不连续模型、ADS 的传输线模型与二极管三维电磁模型相结合,建立 ADS 中整体仿真模型。并对其中传输线模型进行优化,以得到符合设计要求的变频损耗。

由于 HFSS 可以更精确表征高频段无源结构的电磁特性,完成在 ADS 中的优化仿真后,在 HFSS 中建立对应 ADS 中优化结果的三维电磁模型,模型见图 11。并将整体无源电路部分的三维电磁特性通过 SNP 文件格式导入 ADS 中,在 ADS 中进行谐波仿真验证。仿真结果见图 12,在 300~350 GHz 频带内,变频损耗小于 8 dB。

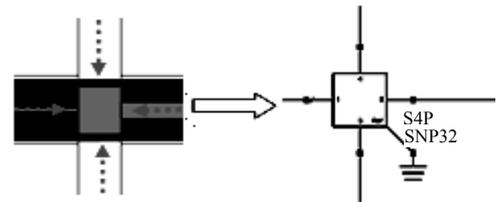


Fig.10 HFSS and ADS models for probe structures
图 10 探针结构 HFSS 和 ADS 模型

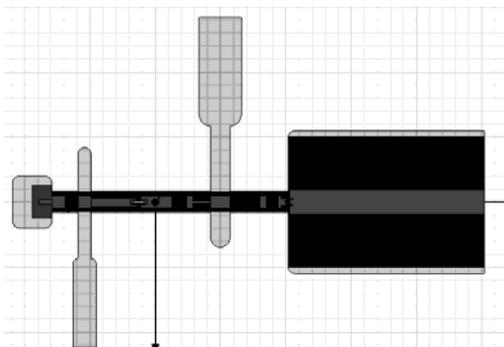


Fig.11 Overall structure model in HFSS
图 11 HFSS 整体结构模型

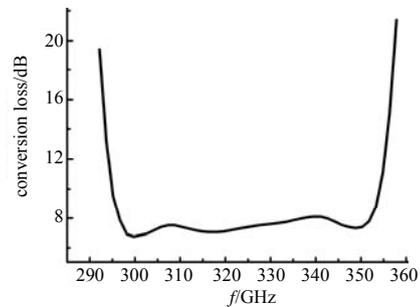


Fig.12 Conversion loss of the structure
图 12 整体结构变频损耗

相比以往先分部设计,再设计各部分间匹配的方法,整体综合设计的方法更加简单且效率更高,同时整体优化,更容易实现电路的小尺寸,因为分部设计会受到滤波器和探针尺寸的限制。

3 结论

文中采用整体综合设计的方法通过 HFSS 和 ADS 联合仿真,设计了一款基于平面肖特基二极管对的 330 GHz 次谐波混频器。在 300~350 GHz 工作频带内,在本振功率为 3 mW 和射频功率 0.1 mW 条件下,混频器变频损耗优于 8 dB,最小变频损耗为 6.6 dB。本设计达到了预期目标,填补了国内在此频段内混频器研究的空白,为今后太赫兹固态电路的设计提供了一定参考。

参考文献:

[1] 程兆华,祝大军,刘盛纲. 太赫兹技术的研究进展[J]. 现代物理知识, 2005,17(5):40-44. (CHENG Z H,ZHU D J,LIU S G. Research progress of terahertz technology[J]. Modern Physics Knowledge, 2005,17(5):40-44.)

- [2] PIESIEWICZ R,KLEINE-OSTMANN T,KRUMBHOLZ N,et al. Short-range ultra-broadband terahertz communications: concepts and perspectives[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2007,49(6):24-39.
- [3] 杨晓帆. 基于平面肖特基二极管的太赫兹分谐波混频器研究[D]. 成都:电子科技大学, 2012. (YANG X F. Research on terahertz subharmonic mixer based on planar Schottky diode[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2012.)
- [4] 何月,黄昆,缪丽,等. 250 GHz 太赫兹谐波混频器设计[J]. 微波学报, 2015(S1):69-72. (HE Y,HUANG K,MIU L,et al. Design of 250 GHz terahertz harmonic mixer[J]. Journal of Microwave, 2015(S1):69-72.)
- [5] 赵伟. 毫米波及太赫兹混频技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2015. (ZHAO W. Research on millimeter wave terahertz mixing technique[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2015.)
- [6] LIU G,ZHANG B,ZHANG L,et al. Design of a 340 GHz GaAs monolithic integrated sub-harmonic mixer[C]// 2015 Asia-Pacific Microwave Conference(APMC). [S.l.]:IEEE, 2015,3:1-2.
- [7] 冯震宇,张勇,肖筑文,等. 基于平面肖特基二极管的 440 GHz 次谐波混频器研究[J]. 微波学报, 2016(S1):280-283. (FENG Z Y,ZHANG Y,XIAO Z W,et al. Research on 440 GHz subharmonic mixer based on planar Schottky diode[J]. Journal of Microwave, 2016(S1):280-283.)
- [8] TANG A Y. Modeling and characterization of terahertz planar Schottky diodes[D]. Gothenburg,Sweden:Chalmers University of Technology, 2013.
- [9] 张勇,卢秋全,刘伟,等. 基于肖特基势垒二极管三维电磁模型的 220 GHz 三倍频器[J]. 红外与毫米波学报, 2014,33(4):405-411. (ZHANG Y,LU Q Q,LIU W,et al. 220 GHz triple frequency converter based on Schottky barrier diode three dimensional electromagnetic model[J]. Journal of Infrared and Millimeter Wave, 2014,33(4):405-411.)

作者简介:



夏德娇(1993-),女,湖北省恩施市人,在读硕士研究生,主要研究方向为固态太赫兹技术. email:754883856@qq.com.

张勇(1975-),男,成都市人,教授,博士生导师,IEEE会员,某重大项目首席专家,主要研究领域为微波与毫米波集成电路、固态太赫兹技术,以第一作者身份在国际国内刊物和会议上发表学术论文三十余篇,其中SCI收录十余篇.