#### 文章编号: 2095-4980(2017)01-0007-04

# 基于线性叠加技术的 0.38 THz 四倍频器设计

王亚冰, 何庆国, 刘亚男, 胡志富

(中国电子科技集团公司 第13研究所,河北 石家庄 050051)

摘 要:太赫兹倍频器是实现太赫兹源的重要途径之一。基于线性叠加技术,研制了 0.38 THz 单级无源四倍频单片。采用平面环形巴伦与正交混合网络级联的方式,设计了四路移相功分结构, 通过零电长度合成,实现了单级四倍频,同时基波和其他无用谐波得到了很好的抑制。设计中先 对无源结构进行三维电磁场仿真,然后与有源部分联合仿真优化,在 370~410 GHz 频率范围内, 变频损耗小于 25 dB。

## Design of 0.38 THz quadrupler based on linear superposition technique

WANG Yabin, HE Qingguo, LIU Yanan, HU Zhifu

(The 13th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang Hebei 050051, China)

**Abstract:** Terahertz frequency doubling technique is a primary way to obtain terahertz signal source with high performance. A 0.38 THz single stage passive Monolithic Microwave Integrated Circuit(MMIC) quadrupler chip is developed by using linear superposition technique. The four-way phase shift power divider is designed by the cascade of planar ring Balun and orthogonal hybrid network, which makes the suppression of fundamental and other useless harmonics. The first procedure in the design is the electromagnetism simulation of passive structure, then the passive structure is combined with the active structure and jointly simulated for optimization. The conversion gain is below -25 dB in the frequency of 370-410 GHz.

**Keywords:** quadrupler; linear superposition; Monolithic Microwave Integrated Circuit(MMIC); ring Balun; zero electrical length

太赫兹(THz)波是指频率范围为 0.1~10 THz 的电磁波,处于宏观电子学与微观光子学的交叉区域,具有其他 波段电磁波难以比拟的优势而被广泛应用于医学、卫星通信、安检及搜索等诸多领域<sup>[1]</sup>。要实现上述应用,首先 要解决频率源的问题。在太赫兹低端,即亚毫米波领域,固态倍频源以其体积小、质量轻、成本低、可靠性高等 优势,备受人们的关注<sup>[2]</sup>。目前,国际上主要依靠倍频器实现稳定的高频信号源。从公开的文献来看,中心频率 为 380 GHz 的四倍频器设计在国内还未出现,在太赫兹波段,相比于二倍频器,四倍频器的设计成果还比较少。

本文采用线性叠加技术<sup>[3]</sup>,通过对 4 路输入信号进行半波整流并使其依次产生 90°的相位差,从而直接合成 出四倍频信号,实现了单级四倍频。在叠加过程中,基波和其他无用谐波可以得到很好的抑制。

#### 1 线性叠加技术原理

本文采用线性叠加技术,图 1 显示了这种叠加过程。*I*<sub>1p</sub>,*I*<sub>Qp</sub>,*I*<sub>m</sub>,*I*<sub>Qm</sub>,这 4 列波的频率相同,相位依次相差了 90°,如图 1(a)所示。这 4 列波经过半波整流后,每列波的横轴下方的波形消失,形成了图 1(b)所示的类似脉冲 余弦的半波信号。4 列半波信号相互叠加即可合成出所需的 4ω<sub>0</sub> 信号,实现四倍频,将这几列信号波的傅里叶级 数的三角函数展开,经过推导计算,得到了最终的电流叠加结果,展开式见式(1):

$$I_{\rm c} = \frac{4}{\pi} \left[ 1 - \frac{2}{15} \cos(4\omega_0 t) + \frac{2}{63} \cos(8\omega_0 t) \cdots \right] \tag{1}$$

 $4\omega_0$ 信号对应的电流幅值为 $\frac{8}{15\pi}$ ,据此可以计算出采用线性叠加方式制作的四倍频器的倍频效率为:

$$\eta = (\frac{4}{\pi} \times \frac{2}{15} I_0) / I_0 = \frac{8}{15\pi} \approx 17\%$$
<sup>(2)</sup>

即变频损耗约为-15.4 dB,同时叠加过程中,基波、二次谐波和三次谐波相互抵消,并没有出现在最终的展 开式中,实现高的抑制度。



Fig.1 Process of linear superposition 图1 线性叠加流程

## 2 倍频器设计方案

输入信号经过四路移相功分器之后,产生了 4 列依次具有 90° 相位差的波,这 4 列波经过二极管半波整流之后,就可以按照前文 推导的叠加过程进行线性叠加,直接产生四倍频信号。

## 2.1 95 GHz 四路移相功分器的设计

本文采用了平面环形巴伦和正交混合网络级联的方式<sup>[4]</sup>,设计 了 95 GHz 的移相功分电路。如图 2 所示,输入信号由输入 PAD 进 入巴伦级,在节点 1 和节点 2 处,信号等幅且反相。之后,分别级 联完全相同的正交混合网络,即可在端口 2~5 输出 4 列等幅且依次 具有 90°相位差的信号。

通过版图设计布局,使输出端口呈严格的对称结构,这保证了 在级联过程中的精确性。图 3 和图 4 分别为 95 GHz 功分器的插入损



Fig.2 Design layout of phase shift power splitters 图2 移相功分器设计版图

耗和相位不平衡度的仿真结果。可以看出,在 95 GHz 附近,功分器损耗较小且具有很好的幅度一致性,而相位 不平衡度误差的仿真结果为 ± 2°,实现了很好的移相功分特性。

#### 2.2 二极管选取

利用二极管的单向导通特性可以实现半波整流。为了产生较好的整流效果,要求二极管具有很短的反向恢复 时间、较小的结电容及寄生参量。

本文采用氮化镓(GaN)基平面肖特基势垒二极管(Schottky Barrier Diode, SBD)作为整流二极管。通过空气桥 结构和衬底减薄技术,降低了器件的寄生参量,并通过工艺优化,实现了高频 GaN 基 SBD 的制备。通过测试, 提取出各种电学参数:正向的开启电压为 0.45 V@10 µA,反向击穿电压为 15.6 V@-100 µA,零偏下的总电容为 11.9 fF@1 MHz。图 5<sup>[5]</sup>为 GaN 基 SBD 的肖特基结的扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)照片。





Fig.5 SEM photo of Schottky junction for GaN based SBD 图 5 GaN 基 SBD 的肖特基结的 SEM 照片



Fig.6 Diagram of synthesizer structure 图6 合成器结构示意图

#### 2.3 零电长度合成及芯片倒贴技术

经过半波整流之后,4列半波信号需要通过四路合成器,直接合成出四倍频信号。合成时,合成器是有一定 带宽的,通过实验仿真发现,合成器的中心频率无论设计在  $\omega_0$ 附近,或是设计在  $4\omega_0$ 附近,最后的合成效果都 不理想。初步分析猜测,该合成的带宽范围应该包括基波频率到四次谐波频率。但是,这种超宽带合成器极难实 现,因此本文采用了零电长度的方法来进行合成,利用零电长度兼容宽带的特性,设计了一种4支二极管共输出 PAD 的创新型合成器结构,如图 6 所示。

4 支二极管的正极接有输入 PAD, 4 个阳极结设计在 1 个输出 PAD 上, 最大程度地减小了合成器尺寸, 实现 零电长度合成。

GaN 基 SBD 的制作工艺与无源工艺不兼容,不能整体流片,因此,采用了芯片倒贴的方式,将合成结构用 导电胶倒贴于单片上,很大程度上减小了装配所造成的损耗,如图 7 所示。将微带线末端的 PR 保护层刻蚀掉, 露出金属以方便与二极管 PAD 进行粘贴。



图 7 合成器装配示意图



图8 变频增益仿真结果

#### 3 380 GHz 四倍频器仿真结果

首先对倍频器的无源结构进行三维电磁场仿真和优化设计,然后将无源部分的仿真结果与二极管模型进行联合仿真。图 8 展示了当输入功率为 20 dBm 时的仿真结果。可以看出,该四倍频器在 370~410 GHz 的频带范围内, 变频损耗小于 25 dB,最小变频损耗小于 23 dB。

## 4 结论

本文采用线性叠加技术仿真设计了一款 0.38 THz 无源四倍频单片,电路结构简单,在 40 GHz 的带宽范围内 变频损耗小于 25 dB。为提高输出功率,可将功放器件接于整流二极管之后,放大器工作频率只需满足基波频率 即可,降低了对器件的要求,这一点对实现高功率的太赫兹源具有重要意义。

#### 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] PORTERFIELD D W. High-efficiency terahertz frequency triplers[C]// 2007 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium. Honululu,Hawaii,USA:[s.n.], 2007:337-340.
- [3] HUANG Daquan,LAROCCA T R,SAMOSKA L,et al. 324 GHz CMOS frequency generator using linear superposition technique[C]// Proceedings of the IEEE International Solid-State Circuits Conference. San Francisco,CA,USA:[s.n.], 2008:476-477.
- [4] YAN Long. Design and analysis on a micro strip power divider[J]. Computer & Network, 2011,37(7):434-437.
- [5] 梁士雄,刑东,王俊龙,等. GaN 基太赫兹肖特基二极管设计与制备[C]// 第一届全国太赫兹科学与技术学术年会.成都,四川:[s.n.], 2015:58-60. (LIANG Shixiong,XING Dong,WANG Junlong, et al. Design and preparation of THz GaN Schottky diode[C]// Proceedings of the First National Terahertz Science and Technology Academic Meeting. Chengdu, China:[s.n.], 2015:58-60.)

## 作者简介:



**王亚冰(1990-)**,男,石家庄市人,硕士, 工程师,主要研究方向为器件建模和 MMIC 设 计.email:wyb19901116@163.com. **何庆国(1966-)**,男,河北省正定县人,硕士,研究员级高工,主要研究方向为微波毫米波模块与组件.

**刘亚男**(1983-),女,河北省保定市人,硕士, 高级工程师,主要研究方向为器件建模和 MMIC 设计.

胡志富(1982-),男,湖北省黄梅县人,硕士, 高级工程师,主要研究方向为微波/射频器件大信号 建模和 MMIC 设计.