

文章编号: 2095-4980(2018)04-0595-04

## 440 GHz 串联式宽带二倍频器设计

吴成凯, 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:** 研究了基于平面肖特基变容二极管的 440 GHz 串联式宽带二倍频器。在基波功率 20 mW 驱动下, 仿真显示在 400~480 GHz 变频损耗小于 10 dB, 输出功率大于 2 mW, 相对带宽 18%。整个倍频器制作在一块 30  $\mu\text{m}$  厚的石英基片上, 无机械调谐结构, 结构简单, 便于加工。

**关键词:** 太赫兹; 二倍频器; 宽带; 变容二极管

中图分类号: TN914.42

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201804.0595

## Design of a 440 GHz series broadband frequency doubler

WU Chengkai, ZHANG Yong

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

**Abstract:** A 440 GHz series frequency doubler based on planar Schottky varactor diode is studied. Under the driving of the fundamental power of 20 mW, the simulation result shows that the 400–480 GHz conversion loss is less than 10 dB, the output power is greater than 2 mW, and the relative bandwidth is 18%. The whole frequency multiplier is manufactured on a 30  $\mu\text{m}$  thick quartz substrate, which has no mechanical tuning structure. It is simple and convenient to manufacture.

**Keywords:** terahertz; frequency doubler; broadband; varactor diode

太赫兹波一般指频率为 0.1~10 THz 的电磁波, 介于毫米波和红外线之间。因其所处的特殊位置, 太赫兹波具有一系列独特的性质, 在宽带通信、精确制导、物体成像、天文观测等领域具有广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。目前, 太赫兹系统的发展主要受限于太赫兹波的产生, 太赫兹波的产生根据不同的原理有不同的方式。其中, 基于半导体器件由低频微波毫米波向太赫兹频段发展的倍频源具有高稳定性、高集成度、成本低的优势而备受关注。太赫兹固态倍频技术是目前获得太赫兹波的有效、经济的方式之一。利用固态器件的非线性效应产生输入基波的各次谐波, 然后用滤波器提取所需要的谐波分量, 从而降低系统的主振荡频率<sup>[2]</sup>。国外在固态倍频方面起步较早, 目前已经取得许多成果<sup>[3-8]</sup>。相比于国外, 国内在太赫兹固态倍频方向的研究起步较晚, 受限于半导体制作工艺和器件建模等方面的不足, 目前国内太赫兹倍频器的研究主要集中于太赫兹频段的低端。因此, 有必要拓展倍频器的工作频率到更高频段。本文根据实验室现有条件, 选择三管芯串联的平面肖特基二极管芯片, 以串联的形式来实现 440 GHz 的太赫兹源。

### 1 倍频器整体结构

输入基波通过 WR4.3 波导输入, 经过波导 E 面探针过渡结构完成波导 TE<sub>10</sub> 模式到悬置微带准 TEM 模式的转换, 再经过输入低通滤波器和输入匹配到达二极管处。输出对二次谐波进行匹配, 经过波导 E 面探针完成准 TEM 模式到波导 TE<sub>10</sub> 模式的转换, 最后通过 WR2.2 波导输出。偏置低通滤波器为二极管提供直流偏置, 阻止基波从偏置泄露。

由于二极管采用串联配置, 所以在输出波导一侧提供直流接地。该倍频器的设计思路是将倍频器的整体结构拆分成几个

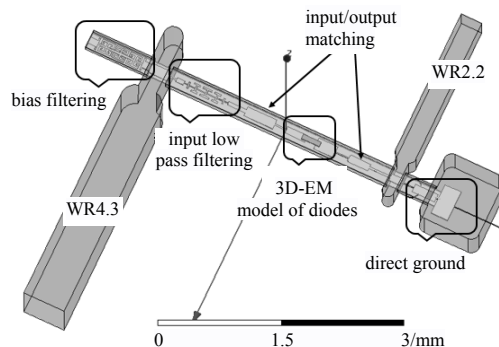


Fig.1 Structure of the frequency doubler  
图 1 倍频器整体结构

相对独立的单元电路进行单独设计, 各单元电路设计完成后再拼成一个整体, 其整体结构如图 1 所示。

## 2 单元电路仿真设计

### 2.1 寄生参数提取

倍频器采用平面肖特基二极管作为非线性元件, 当频率上升到太赫兹频段, 由于工作波长较短, 二极管封装大小等外围尺寸已经和工作波长相比拟, 因此必须考虑由封装带来的寄生参数。二极管三维电磁模型法的原理是在二极管已知物理结构参数的前提下, 借助 HFSS 软件, 根据二极管的物理结构建立三维电磁模型, 在二极管装配模型和肖特基结处设置波端口, 采用全波仿真提取相应的  $S$  参数。二极管本身的寄生参数和装配模型的寄生参数都包括在  $S$  参数中。本文在 HFSS 中建立的二极管的三维电磁模型如图 2 所示。将提取的  $S$  参数导出到先进设计系统(Advanced Design System, ADS)中并结合二极管的本征 SPICE 参数建立二极管完整的非线性模型。

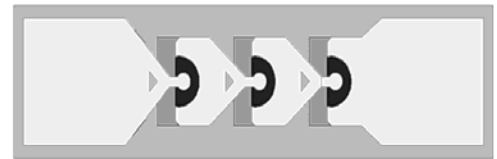


Fig.2 3D EM model of Schottky diode  
图 2 肖特基二极管三维电磁模型

### 2.2 输入低通滤波器设计

输入低通滤波器需要通过基波, 反射二极管产生的高次谐波以提高倍频效率。因此, 输入低通滤波器需要较宽的阻带。传统的高低阻抗线低通滤波器由于寄生通带的影响, 阻带不是太宽, 而且受限于因屏蔽悬置微带单模传输而要求侧壁宽度比较窄, 导致高低阻抗线低通滤波器长度较长, 从而增加了石英基片的长度。共模谐振单元(Common Mode Resonant Cell, CMRC)工字型低通滤波器利用谐振枝节在阻带形成几个传输零点, 且零点位置可灵活调节, 所以本文采用 CMRC 工字型滤波器作为输入的低通滤波器。图 3 为输入低通滤波器的仿真结果。在 200~230 GHz 输入频段,  $S_{11}$  低于 -20 dB, 在 380~720 GHz 频段,  $S_{21}$  低于 -40 dB。

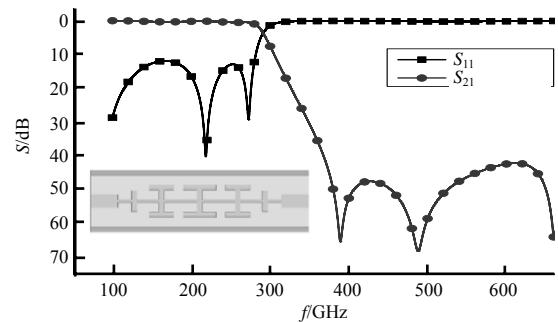
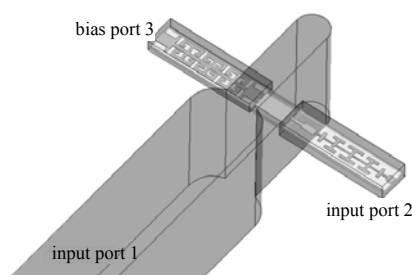


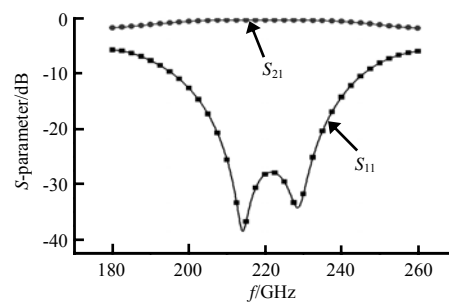
Fig.3 Simulation result of input lowpass filter  
图 3 输入低通滤波器仿真结果

### 2.3 输入过渡结构设计

输入过渡结构的作用是完成波导  $TE_{10}$  模式到悬置微带准 TEM 模式的转换, 本文并没有单独设计  $E$  面探针, 而是将偏置低通滤波、输入低通滤波和  $E$  面探针组合为一个整体进行优化设计, 如图 4(a)所示。通过调节探针距离短路面的距离和匹配线等参数, 以输入端回波损耗、射频端与直流端的隔离度为目标经过多次仿真与优化, 最后仿真结果如图 4(b)所示。



(a)



(b)

Fig.4 Input transition structure(a) and simulation result(b)  
图 4 输入过渡结构(a)和仿真结果(b)

### 2.4 输出过渡结构设计

输出过渡结构将准 TEM 模式转换成波导  $TE_{10}$  模式, 如图 5 所示。串联式倍频器二极管芯片并未搭接在腔体上, 因此还需要为倍频器提供直流地。因此, 本文在输出波导过渡处增加接地端, 通过跳金丝到腔体的方式为二极管提供直流回路, 此外, 金丝一侧的微带电路还可以为整个悬置微带提供支撑的作用。

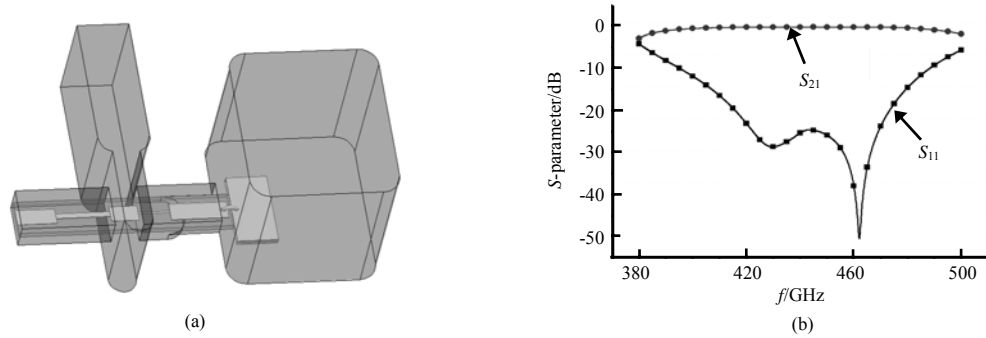


Fig.5 Output transition structure(a) and simulation result(b)  
图 5 输入过渡结构(a)和仿真结果(b)

### 3 倍频器整体谐波平衡仿真

将前文中各单元电路的  $S$  参数以 SNP 文件导出到 ADS，联立二极管的本征 SPICE 参数，再添加高低阻抗线形式的输入、输出匹配电路，建立起如图 6(a)所示的倍频器整体仿真电路原理图。输入输出匹配线的阻抗值、电长度以及偏压大小为优化变量，以输出功率和效率为优化目标曲线进行仿真和优化，并且根据匹配线的阻抗值和电长度在 HFSS 软件求得所需的匹配线对应的长度和宽度，再将该匹配线的 SNP 文件导出至 ADS 软件中，重新仿真和优化。经过多次这样的迭代，直到原理图和替换成实际的匹配线的仿真结果基本一致。图 6(b)为倍频器的变频损耗和输出功率随输出频率的变化。结果显示，在基波 20 mW 驱动下，该倍频器在 400~480 GHz 变频损耗小于 10 dB，输出功率大于 2 mW，相对带宽达到 18%。

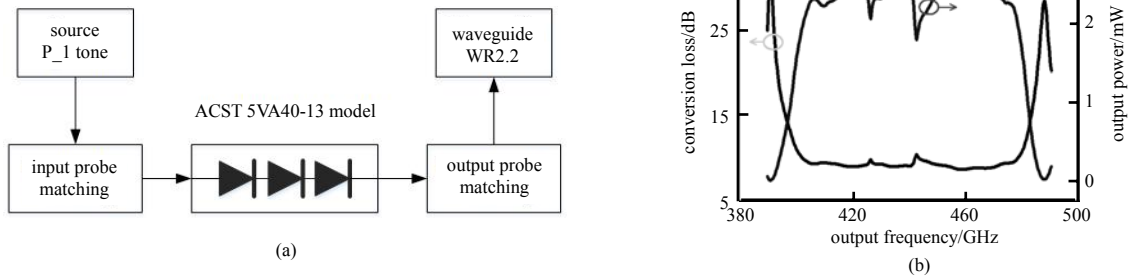


Fig.6 Simulation schematic(a) and simulation result of harmonic balance(b)  
图 6 整体电路仿真原理图(a)和整体谐波平衡仿真结果(b)

固定输入频率为 440 GHz，扫描输入功率，得到变频效率随输入功率的变化如图 7 所示。变频效率随着输入功率的增加，先增大后减小，输入功率在 28 mW 时，变频效率达到最大，这时二极管进入饱和状态。

### 4 结论

本文利用肖特基势垒变容二极管设计了一款 440 GHz 的串联式宽带二倍频器。采用分部设计的方法，利用 ADS 和 HFSS 进行联合仿真，仿真显示，在 400~480 GHz 输出频段内，在 20 mW 功率驱动下，变频损耗低于 10 dB，输出功率大于 2 mW。随后，将对倍频器进行加工测试，以验证设计方法的正确性，使之尽早应用于太赫兹系统中。

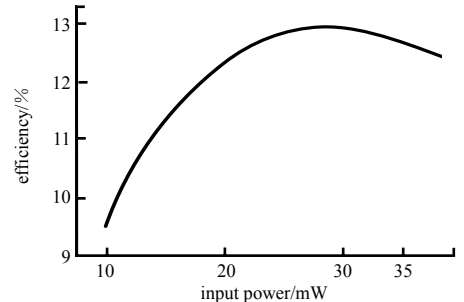


Fig.7 Conversion efficiency vs. input power  
图 7 变频效率随输入功率的变化

### 参考文献：

[ 1 ] 刘盛纲. 太赫兹科学技术的新发展[J]. 中国基础科学, 2006,8(1):7-12. (LIU Shenggang. Recent development of terahertz science and technology and its applications[J]. China Basic Science, 2006,8(1):7-12.)

- [ 2 ] 张勇,林元根. 185 GHz 固态二倍频器研究[J]. 电子科技大学学报, 2010(2):232-235. (ZHANG Yong,LIN Yuangen. 185 GHz solid-state circuits frequency doubler[J]. Journal of UEST of China, 2010(2):232-235.)
- [ 3 ] PORTERFIELD D W. High-efficiency terahertz frequency triplers[C]// 2007 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Honolulu,Hawaii,USA:[s.n.], 2007:337-340.
- [ 4 ] CHATTOPADHYAY G,SCHLECHT E,GILL J,et al. A broadband 800 GHz Schottky balanced doubler[J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2002,12(4):117-118.
- [ 5 ] MAESTRINI A,WARD J S,GILL J J,et al. A 540-640 GHz high-efficiency four-anode frequency tripler[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2005,53(9):2835-2843.
- [ 6 ] MAESTRINI A,WARD J S,JAVADI H,et al. Local oscillator chain for 1.55 to 1.75 THz with 100  $\mu$ W peak power[J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2005,15(12):871-873.
- [ 7 ] LI Y,MDHDI I,MAESTRINI A,et al. A broadband 900 GHz silicon micromachined two-anode frequency tripler[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2011,59(6):1673-1681.
- [ 8 ] ALJABBARI N,BAUWENS M F,WEIKLE R M. 160 GHz balanced frequency quadruplers based on quasi-vertical Schottky varactors integrated on micromachined silicon[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology, 2014,4(6): 678-685.

#### 作者简介:



吴成凯(1991-),男,四川省资阳市人,在读硕士研究生,主要研究方向为微波毫米波电路与系统、固态太赫兹技术等。email: 824169505@qq.com.

张勇(1975-),男,四川省南充市人,教授,博士生导师,主要研究方向为微波毫米波电路与系统、固态太赫兹技术等。