2013年12月

Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2013)06-0842-06

基于肖特基阻性二极管的 140 GHz 二倍频器

王 成 ^{a,b}, 蒋 均 ^{a,b}, 缪 丽 ^{a,b}, 邓贤进 ^{a,b}

(中国工程物理研究院 a.电子工程研究所; b.太赫兹研究中心, 四川 绵阳 621999)

摘 要:介绍了一种基于肖特基阻性二极管的 140 GHz 二倍频器,该倍频器采用矩形波导内 嵌石英基片微带电路,通过四肖特基结正向并联结构提高驱动功率承受能力。倍频设计中应用了 自建精确二极管三维电磁模型、宽带电磁耦合结构和宽带阻抗匹配结构,以提高仿真结果和实际 器件的吻合度。测试结果表明:在频率为 65 GHz~75 GHz,功率为 20 dBm 的驱动信号激励下,二 倍频器输出频率为 130 GHz~150 GHz,输出功率为 3.3 dBm~8.0 dBm,倍频损耗为 11.7 dB~16.3 dB。 在 23 dBm~24 dBm 的最大驱动功率激励下,倍频器最大输出功率达 11.2 dBm/136 GHz,基本达到 了成像雷达的应用性能指标。

关键词:太赫兹;二倍频器;肖特基二极管;阻性管;器件建模 中图分类号:TN771 文献标识码:A doi: 10.11805/TKYDA201306.0842

140 GHz doubler based on Schottky varistor

WANG Cheng^{a,b}, JIANG Jun^{a,b}, MIAO Li^{a,b}, DENG Xian-jin^{a,b} (a.Institute of Electronic Engineering; b.Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: A 140 GHz doubler based on Schottky varistor is described. It applies quartz substrate microstrip circuits embedded in rectangular waveguide. Four Schottky junctions are paralleled together to receive higher driving signal power. Exact 3-D diode model, wideband power coupling and wideband impedance matching structure are used to improve the precision of simulation. Measured results indicate that under the input signal of 65 GHz-75 GHz, 20 dBm, the doubler output frequency can reach 130 GHz-150 GHz, output power is 3.3 dBm-8.0 dBm, and conversion loss is 11.7 dB-16.3 dB. The maximum output power of 140 GHz doubler is 11.2 dBm/136 GHz, when driven with maximum input power 23 dBm-24 dBm. This device is suitable for the application of 140 GHz imaging radar.

Key words: Terahertz; doubler; Schottky diode; varistor; device modeling

基于肖特基二极管的太赫兹倍频器已成为一种重要的常温固态半导体太赫兹源,它具有中等输出功率、低相 位噪声、易于调谐、常温工作且易于系统集成等特点,在太赫兹雷达、太赫兹成像和太赫兹测量仪器中有着重要 的应用。国外从 20 世纪 80 年代就开始开展基于肖特基二极管的太赫兹倍频器的研究,经过长期发展,逐渐形成 了以 NASA JPL(National Aeronautics and Space Administration-Jet Propulsion Laboratory),VDI(Virginia Diodes Inc.), RAL(Rutherford Appleton Laboratory),Teledyne 等为主的太赫兹肖特基器件研制机构。其输出频率可达 0.1 THz~ 2.5 THz,输出功率从低频到高频可达数百毫瓦至数十微瓦。文献[1]中,A Maestrini 等人已经在 2.48 THz~2.75 THz 范围内通过倍频链技术产生超过 1 µW 的功率,最大输出功率为 18 µW/2.58 THz。文献[2]中,D Porterfield 等人 研制的 190 GHz 倍频器,可以在脉冲工作状态下,输出最大 630 mW 的输出功率。国内开始 3 mm 毫米波及以上 频段倍频技术研究较晚,近年来已经逐渐实现了 400 GHz 及以下频段的倍频器件。文献[3-8]列出了一些国内倍 频器的研究成果,由于在二极管器件、仿真方法、制作工艺和测试手段上的不足,国内研究成果与国外尚存在较 大差距。

本文所研制的 140 GHz 二倍频器主要是针对 0.14 THz 逆合成孔径雷达发射前端应用,也可以为更高频段的 太赫兹倍频链提供驱动,或者为更高频段的太赫兹超外差检测系统提供本振。本文主要介绍了该倍频器的二极管 模型、器件拓扑结构和实验测试结果。

1 DBES105a 肖特基二极管建模

用于太赫兹频段倍频的肖特基二极管按照其工作原理可划分为阻性二极管和变容二极管,前者主要是利用肖特基二极管的电流-电压(*I-U*)非线性特性,倍频效率和功率容量较低,但带宽较宽;后者主要利用肖特基二极管的电容-电压(*C-U*)非线性特性,倍频效率和功率容量较高,但带宽较窄。

肖特基二极管电流-电压(I-U)非线性的函数为:

$$I(U) = I_{s} \left[\exp\left(qU/nKT\right) - 1 \right]$$
⁽¹⁾

式中: q 为电子电荷; U 为结偏压; n 为理想因子; K 为玻尔兹曼常数; T 为绝对温度; I_s 为饱和电流,考虑热电子发射理论时,饱和电流 I_s 可近似为:

$$I_{s} = A^{**}T^{2}W \exp\left(-q\phi_{b}/KT\right)$$
⁽²⁾

式中: A**为修正的理查德逊常数; W为耗尽区宽度; ø, 为势垒高度。

肖特基二极管电容-电压(C-U)非线性的函数为:

$$C(U) = \frac{\partial Q}{\partial U} = \frac{C_{j0}}{\left(1 - U/\phi_{bi}\right)^{\gamma}}$$
(3)

式中: Q 是结区电荷; C₁₀为零偏置结电容, 其表达式为:

$$C_{j0} = W \left(\frac{q \varepsilon_{\rm s} N_{\rm d}}{2 \phi_{\rm bi}} \right)^{\gamma} \tag{4}$$

式中: *ɛ* 为半导体耗尽区介电常数; *N* 为半导体施主杂质掺杂浓度。

140 GHz 二倍频器采用 UMS DBES 105a 肖特基二极管,该二极管是一种串联 阻性肖特基二极管对,单肖特基结面积为 5 μ m²,零偏置结电容为 C_{j0} =9.5 fF,直流 电阻为 R_s =4.4 Ω,理想化因子 n=1.2。该 二极管的物理尺寸为 530 μ m × 230 μ m × 100 μ m。由于其长度约为 140 GHz 波长的 1/4,DBES105a 肖特基二极管在设计中不 能当作集总参数器件处理。本文通过对 DBES105a 肖特基二极管半导体层结构研

究,建立了肖特基结非线性集总模型和外围半导体结构 三维电磁模型相结合的二极管联合仿真模型,并应用在 倍频器的精确仿真设计中。

肖特基二极管建模的原理图如图 1 所示,建模过程 中将肖特基二极管分为肖特基结区和外围结构。肖特基 结区物理尺度远小于波长,故可用直流和低频参数测量 得到其 *I-U*和 *C-U*特性,建立集总参数模型。二极管外 围结构主要包括 GaAs 衬底、结区以外的半导体层结构 和阳极阴极焊盘。外围结构电尺寸较大,是高频寄生参 数的主要产生因素。本文首先通过电镜测量其结构参数, 通过对半导体层结构的分析建立三维模型。需要指出的 是,三维电磁仿真不能模拟结区非线性特性,在建模过 程中结区通过微同轴探针法进行替代。建模过程中将 DBES105a 安置在如图 2(c)所示测试电路上,测量其射频 传输特性,并进行参数提取,以此为依据对外围电路三 维模型进行参数优化。将结区集总模型和三维模型结合 起来,就得到了如图 2(d)所示的联合仿真模型。







2 二倍频器拓扑结构

140 GHz 二倍频器采用波导腔体内嵌石英基片微带电路结构,其原理图如图 3 所示,石英基片电路结构如图 4 所示。为了提高倍频输出功率,最直接的办法是增加驱动信号功率,140 GHz 二倍频器采用 2 片 DBES105a 芯 片正向并联,一共包含 4 个肖特基结,可承受最大约 25 dBm 的驱动功率。驱动信号的输入和倍频信号输出分别 采用 WR12 和 WR6.5 标准矩形金属波导,通过微带探针实现石英基片电路与波导之间的信号耦合。石英基片微 带倍频电路采用屏蔽微带线形式,石英基片厚度 0.127 mm,宽度 0.6 mm,相对介电常数 3.78。倍频电路由主基 板和馈电滤波基板组成。主基片包含输入输出探针、直流偏置双工器、射频抑制低通滤波器和二极管安置段。驱 动信号自输入探针耦合至石英基片电路,穿过直流偏置双工器和射频抑制低通滤波器,激励安置在基片上的二极 管。二极管 *I-U* 非线性特性产生的谐波信号通过输出探针耦合至输出波导,由于射频抑制低通滤波器存在,二 次谐波信号向驱动信号端口的传播被抑制。



Fig.3 Schematic of 140 GHz doubler 图 3 140 GHz 二倍频器原理框图

Fig.4 Quartz substrate circuit structure of 140 GHz doubler 图 4 140 GHz 二倍频器石英基片电路结构

在倍频器设计中,偏置电路的作用非常重要。由于肖特基结采用正向并联结构,其*I-U*特性不是奇对称的, 所以倍频过程中不可避免将产生直流信号。从另一角度而言,正向并联二极管对将对输入的驱动信号进行整流, 输出直流信号,相当于一"电流源"。若该整流电流不能引出,将大大降低倍频器的倍频效率。在倍频器设计中, 偏置结构的引入往往会使倍频器无源结构的带宽减小。本文所设计的 140 GHz 二倍频器采用了一种宽带偏置双 工器结构,该结构中馈电滤波电路与主电路间通过直径 25 μm 的长金丝互联连接,馈电滤波电路本身可抑制驱动 信号,而 25 μm 长金丝互联连接引入的电感可进一步提高抑制度,综合的结果将大大提高偏置电路对驱动信号的 屏蔽带宽和抑制度。馈电电路引出的倍频器整流电流施加

在外部电阻上,可实现倍频器的自偏置,提高倍频效率。

图 5 为在-1.0 V 自偏置电压下的 140 GHz 二倍频器的 整体性能仿真结果。从仿真结果可知:在 130 GHz~150 GHz 频段内,20 dBm驱动下的倍频器输出功率为 11.1 dBm~8.6 dBm 左右,带内平坦度大约 2.5 dB。在 110 GHz~160 GHz 频段 内倍频器输出功率大于 6.6 dBm,带内平坦度为 4.9 dB。

3 实验测试结果

140 GHz 二倍频器的外部结构和内部电路的实物照片如图 6 所示。140 GHz 二倍频器腔体采用金属无氧铜材料加工,石英基片采用掩膜溅射工艺制作,二极管和石英基片等均通过微组装手段嵌入在腔体中,馈电接头为 2.92 mm K



图 5 140 GHz 二倍频器输出功率仿真结果

型连接器。140 GHz 二倍频器的测试现场照片如图 7 所示, 70 GHz 驱动信号由 70 GHz 二倍频器给出, 70 GHz 二倍频器工作频率范围为 65 GHz~75 GHz,最大输出功率为 24 dBm,其功率通过 VDI Erickson PM-4 功率计标

定。在 140 GHz 二倍频器和 70 GHz 二倍频器间加入隔离器以降低端口反射。140 GHz 二倍频器通过外加电阻实 现自偏置,改变外加电阻阻值,可改变偏置电压。140 GHz 二倍频器输出功率也通过 VDI Erickson PM-4 功率计 标定。



Fig.6 Photograph of 140 GHz doubler 图 6 140 GHz 二倍频器实物照片

Fig.7 Setup of measurement 图 7 测试平台照片

图 8 为在 20 dBm 输入功率下,140 GHz 二倍频器输出功率的仿真和实测结果,自偏置电阻为 36 Ω。需要指 出的是,提供驱动信号的 70 GHz 二倍频器在 65 GHz~66 GHz 范围内功率较低,仅为 18 dBm 左右,所以并不能 在整个 65 GHz~75 GHz 范围内均达到 20 dBm 输出。在图 8 数据的实际测试过程中,通过调整 70 GHz 二倍频器 输出功率,尽量使其输出功率逼近 20 dBm,但仍不可避免存在一些功率数值上的差异。图 5 中的计算结果是将 仿真中每个频点的输入功率均设置为 20 dBm 时得到的,而图 8 中的输出功率仿真曲线是在将实际测量得到的每 个频点的驱动功率导入仿真后重新计算得到的,与实际测试更为相符。测试结果表明:倍频器在 20 dBm 驱动下, 130 GHz~150 GHz 内的输出功率为 8.0 dBm~3.3 dBm,带内波动 4.7 dB,140 GHz 频点的输出功率 6.4 dBm。仿 真曲线和实测曲线趋势较为一致,但实测输出功率较仿真结果约低 3 dB~5 dB。







Fig.9 Measured 140 GHz doubler conversion loss under 20 dBm input 图 9 测量得到的 20 dBm 输入功率下的 140 GHz 倍频器倍频损耗

图 9 为在 20 dBm 输入功率下倍频损耗的仿真和实测结果,实测结果显示:在 130 GHz~150 GHz 范围内,二 倍频损耗为 11.7 dB~16.3 dB。在 130 GHz 频点倍频损耗最小,随着频率升高倍频损耗逐渐增大。140 GHz 频点 的倍频损耗为 13.8 dB。仿真和实测倍频损耗的差距也在 3 dB~5 dB 范围内。

图 10 为在 20 dBm 输入功率和 36 Ω 偏置下,140 GHz 倍频器自偏置电压(即 36 Ω 自偏置电阻电压)的仿真与 实测曲线。从图中可知,仿真和实测曲线的一致性非常好,最大偏差仅为 0.06 V。130 GHz~132 GHz 内偏置电压 较低的主要原因是输入功率较低。

从图 8、图 9 和图 10 的测试结果中可知: a) 倍频器输入功率非常好地按照理论设计耦合到了二极管,所以 二极管自偏置电压仿真和实测结果相符; b) 倍频器输出功率和倍频损耗的仿真和测试结果之间存在 3 dB~5 dB 的差距。根据既有的测试数据,140 GHz 频段的波导探针损耗大致为 0.35 dB,不会对倍频效率造成较大的影响。 因为在该频段,等离子体谐振频率与工作频率差距较大,所以导致以上差异的原因主要为肖特基二极管载流子在

第6期

846

3.0

强电场下的载流子速度饱和效应。在低电场下,载流子的漂移速度与所处电场成正比关系;在强电场下,载流子 速度在随电场增强达到饱和速度后,其速度随着场强增强逐渐降低,导致倍频效率降低。此外,当前的二极管模 型能够较好地模拟二极管阻性 *I-U*特性,但是 DBES105a 肖特基二极管在自偏置下处于变容-变阻混合工作模式, 模型精确度尚有差距。

12





Fig.10 Measured 140 GHz doubler self-biased voltage under 20 dBm input 图 10 测量得到的 20 dBm 输入功率下的 140 GHz 倍频器自偏置电压



图 11 为在 70 GHz 二倍频器最大驱动功率下,测量得到倍频器最大输出功率和相应的自偏置电压(偏置电阻 56 Ω)。测试结果表明:在 136 GHz 频点处,可以获得最大倍频输出功率 11.2 dBm。140 GHz 频点的输出功率为 9.2 dBm。在 142 GHz~150 GHz 范围内,由于阻抗失配导致输出功率存在谐振现象。测量得到的 140 GHz 二倍频器自偏置电压为-0.9 V~-2.2 V,从自偏置电压曲线与输出功率曲线的对比可知:自偏置电压与输出功率幅度有着非常强的相关关系,偏置电压越高,输出功率越大。这也可以理解为,当耦合至二极管的功率较大时,整流电流也随之增大,使得自偏置电阻上的电压值较大。

在 20 dBm 驱动功率时,最佳自偏置电阻为 36 Ω,相应的偏置电压为-0.9 V;在最大驱动功率下,最佳自偏 置电阻为 56 Ω,相应的偏置电压为-2.1 V。自偏置电阻的阻值是经验调试得到的,从偏置电压的变化可以得到定 性结论: a)该倍频器工作在变阻-变容混合工作模式下,随着输入功率的提高,如果保持偏压不变,则变容倍频 输出功率随着驱动信号负半周期幅度的增大而增大,而变阻倍频分量随着阻性电流的较大增加,二极管串联电阻 上分压和损耗的功率增加,极大地限制了倍频输出功率的提高; b)若提高负偏压绝对值,则使得整体倍频器工 作状态向变容状态转移,降低了倍频效率的下降幅度。

4 结论

在 140 GHz 二倍频器的研制过程中,通过对 UMS DBES105a 肖特基二极管建模和精确无源电磁结构仿真设计,并突破倍频器制作工艺和测试技术,获得了理论设计与实验测试符合度较好的结果。所研制的 140 GHz 二倍频器最大输出功率超过 10 dBm,基本达到了成像雷达的应用性能指标。在后续工作中,将在二极管模型、拓扑结构和制作工艺上继续改进,提高输出功率、带内平坦度及端口驻波性能。

参考文献:

- Maestrini A, Mehdi I, Siles J V, et al. Design and characterization of a room temperature all-solid-state electronic source tunable from 2.48 to 2.75 THz[J]. IEEE Transaction on Terahertz Science and Technology, 2012,2(2):177-185.
- [2] Porterfield D W,Crowe T W,Bishop W,et al. A high-pulsed-power frequency doubler to 190 GHz[C]// Proceedings of 30th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 13th Terahertz Electronic,2005. Charlottesville,VA,USA: [s.n.], 2005:78-79.
- [3] 安大伟,于伟华,吕昕. 基于石英基片的二毫米频段三倍频器的研制[J]. 红外与毫米波学报, 2011,30(4):377-380.
 AN Dawei,YU Weihua,LV Xin. Design and analysis of a 2 mm-band tripler based on quartz[J]. Journal of Infrared and Millimeter wave, 2011,30(4):377-380.)