

文章编号: 2095-4980(2020)04-0551-05

0.67 THz 宽带谐波混频器设计

何 月^{a,b}, 缪 丽^{a,b}, 田遥岭^{a,b}, 蒋 均^{a,b}, 黄 昆^{a,b}

(中国工程物理研究院 a.微系统与太赫兹研究中心, 四川 成都 610200; b.电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 为研制太赫兹多频段高灵敏度探测仪, 依靠太赫兹砷化镓平面肖特基二极管的非线性特性, 结合石英薄膜工艺, 设计了宽带 0.67 THz 谐波混频器, 并分析了砷化镓平面肖特基二极管性能表征参数指标对太赫兹混频器性能的影响。0.67 THz 谐波混频器采用整体综合的设计方法, 结合电气仿真软件 ADS 和电磁仿真软件 HFSS, 优化电路中不连续性微带与波导之间的电磁空间耦合效率, 以混频器的变频损耗为优化目标, 最终实现 0.67 THz 谐波混频器仿真设计。0.62~0.72 THz 射频范围内, 混频器单边带最低变频损耗小于 8 dB, 本振功率小于 4 mW, 本振端口与中频端口、射频端口与中频端口之间隔离度大于 -30 dB。

关键词: 太赫兹; 砷化镓; 肖特基二极管; 混频器

中图分类号: TN773

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2018329

Design of 0.67 THz sub-harmonic mixer

HE Yue^{a,b}, MIAO Li^{a,b}, TIAN Yaoling^{a,b}, JIANG Jun^{a,b}, HUANG Kun^{a,b}

(a. Microsystem and Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Chengdu Sichuan 610200, China;

b. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Aiming to develop terahertz multi-band high sensitivity receiver, a broadband 0.67 THz sub-harmonic mixer is developed based on the nonlinearity of terahertz GaAs planar Schottky diode and quartz film thinning process. The influence of the performance parameters of Schottky diode on the performance of terahertz mixer is analyzed, which provides a theoretical guide to diode selection and mixer evaluation. In the design of 0.67 THz sub-harmonic mixer, the synthetic design method is adopted by using the electrical and electromagnetic simulation software, and the optimization is made on the coupling between the discontinuous microstrip and waveguide in order to minimize the conversion loss. In the design of 0.67 THz sub-harmonic mixer, the best simulated conversion loss is less than 7 dB over 0.62~0.72 THz frequency range, the LO drive power is less than 4 mW, and the isolations are above -30 dB between LO port and IF port, RF port and IF port.

Keywords: terahertz; GaAs; Schottky diode; mixer

基于太赫兹平面肖特基二极管的太赫兹混频器、倍频器和检波器已成为重要的太赫兹固态关键组件, 具有中等功率输出、噪声低和功率消耗低等特点。其中太赫兹谐波混频器作为太赫兹接收机核心器件, 其重要的性能指标: 工作频率、变频损耗与噪声, 直接关系到整个系统的灵敏度与信噪比。随着砷化镓高频器件工艺的不断改善, 国内外研究机构对太赫兹器件性能的研究大幅度增加^[1-12]。2016 年 J TREUTTEL 团队报道了室温条件下 520~620 GHz 太赫兹接收机, 低温条件下在射频频率 540 GHz 处, 最低噪声温度为 585 K^[1]; 2018 年 A HAMMAR 团队报道了低噪声 874 GHz 太赫兹接收机, 在 10 GHz 中频带宽条件下, 双边带噪声温度低于 3 300 K^[2]。近几年国内太赫兹器件也发展迅速, 2017 年中国工程物理研究院团队研制了 0.34 THz 谐波混频器, 最低双边带变频损耗小于 5.6 dB, 最低噪声温度低于 757 K, 3 dB 射频带宽大于 50 GHz(317~367 GHz)^[3], 2018 年电子科技大学团队研制了 420 GHz 分谐波混频器, 最低变频损耗小于 10 dB^[4]。

收稿日期: 2019-09-28; 修回日期: 2019-11-16

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(2018YFB180005); 中国工程物理研究院院长基金资助项目(YZJLX2018009)

作者简介: 何 月(1988-), 男, 硕士, 主要研究方向为基于肖特基二极管的毫米波/太赫兹固态混频器和倍频器。email: heyue@mtrc.ac.cn

太赫兹肖特基二极管物理尺寸小(几十 μm 量级), 物理结构以及封装形式均对器件仿真设计有较大的影响, 因此在电磁仿真软件中建立二极管的物理结构模型, 分析二极管外围电路的寄生参数, 结合电气仿真软件谐波分析法, 定量表征太赫兹谐波混频器的射频小信号与本振信号高次谐波参量混频, 设计中频信号回路, 尽可能降低中频信号的损耗与引入的噪声分量, 提高接收机信噪比。

1 太赫兹肖特基二极管模型及参数分析

肖特基二极管是集总倍频电路中最核心的非线性器件。准确的肖特基二极管理论建模是仿真设计太赫兹器件的关键, 将肖特基二极管的外围半导体无源结构用三维建模方式模拟, 能够准确描述二极管在高频特性下的寄生参数; 肖特基非线性有源结区采用非线性集总元件模型, 能很好地描述二极管各种直流、交流、高频和大信号效应。

为准确表征平面肖特基二极管的高频特性, 建立如图 1 和表 1 所示的二极三维结构模型和电气参数模型, I_s 、零偏结电容 C_{j0} 、串联电阻 R_s 以及理想因子 M 为二极管器件的主要电气参数。 C_{j0} 以及二极管物理尺寸是限制器件工作极限频率的主要参数。 R_s 与 C_{j0} 受半导体工艺水平的限制, 为相互牵引的参数指标, 因此肖特基二极管设计或选型过程中需综合考虑 R_s 与 C_{j0} 对太赫兹混频器的影响。太赫兹混频器的噪声温度作为高灵敏度探测仪的重要技术指标, 直接影响接收机的信噪比和灵敏度。因此分析太赫兹混频器的噪声激励十分必要。

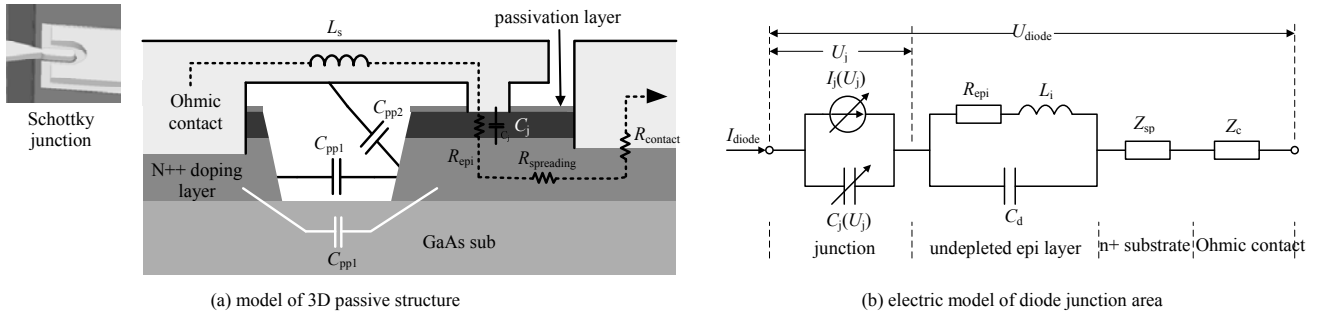


Fig.1 Model of Schottky diode
图 1 有源区肖特基二极管模型

表1 二极管电气模型各分量参数说明

Table1 The illustration of each component parameter in the diode electric model

parameter	function
nonlinear current $I_j(U_j)$	simulate $I-U$ behaviors of forward, backward and breakdown states
nonlinear capacitor $C_j(U_j)$	simulate $C-U$ behaviors of forward and backward states
epitaxial resistance R_{spi} , displacement capacitor C_d , inertial inductance L_i	simulate the plasma resonance in high frequency
skin-effect impedance Z_{sp}	simulate skin-effect
contact resistance Z_c	simulate contact resistance

太赫兹混频器的噪声主要由散射噪声、闪烁噪声、热阻噪声以及热电子噪声 4 种噪声组成。串联电阻 R_s 、二极管工作非线性电流 I_j 与这 4 种噪声有密切关系。

$$\text{散射噪声: } \overline{i_{\text{shot}}^2} = 2qI_j(U_j) \Delta f \tag{1}$$

$$\text{闪烁噪声: } \overline{i_{\text{flicker}}^2} = K_f \times (I_j(U_j))^{A_f} \Delta f \tag{2}$$

$$\text{热阻噪声: } \begin{cases} \overline{U_{\text{thermal1}}^2} = 4k_B T R_{spi} \Delta f \\ \overline{U_{\text{thermal2}}^2} = 4k_B T (R_{sp} + R_{\text{residual}}) \Delta f \end{cases} \tag{3}$$

$$\text{热电子噪声: } \overline{U_{\text{hot_electron}}^2} = 4k_B K_h R_{spi} \Delta f \tag{4}$$

式中: q 为电子电荷量; K_f 为闪烁噪声常数; A_f 为闪烁常数指数; k_B 为玻兹曼常数; T 为器件工作环境温

度; K_h 为热电子噪声常数。

从噪声源公式可以看出, 设计低噪声高灵敏度的太赫兹混频器时, 需尽可能降低二极管串联电阻 R_s (包括外延层电阻、肤效应电阻以及电路和装配引入的额外电阻等) 和混频器工作时的非线性电流 I_j 。降低器件电阻的方法有很多: 增加二极管结区掺杂浓度 n , 降低电路结构的长度等。降低非线性电流 I_j , 则主要为降低混频器的本振功率值。因此在设计低噪声太赫兹混频器过程中, 需从串联电阻和非线性电流的角度考虑, 降低器件的损耗与噪声。在电气仿真软件中建立理想状态下混频器电路原理图, 改变二极管的参数指标(串联电阻 R_s 和理想因子 M), 得到图 2 所示的结果。从图 2 仿真结果可以看出, R_s 和 M 均对混频器性能有较大影响, R_s 和 M 值越小越好。同样的方法对零偏置结电容 C_{j0} 、饱和电流 I_{sat} 进行分析, 可以发现二极管结电容对太赫兹混频器有同样的影响; 混频器一般为小信号处理, 饱和电流 I_{sat} 对混频器性能影响较小。

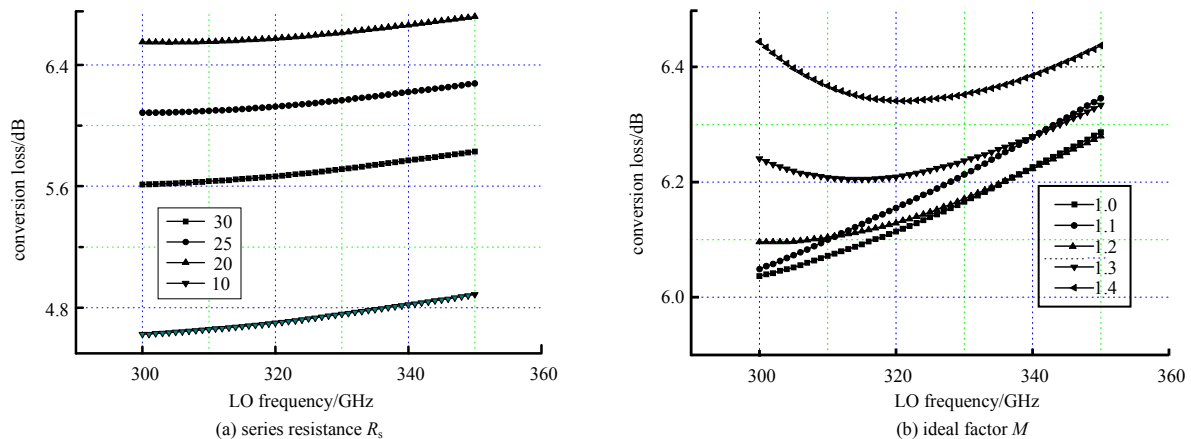


Fig.2 Influence of diode parameter on conversion loss

图2 二极管参数对变频损耗的影响

2 混频器设计

对太赫兹平面肖特基二极管参数进行分析比较, 设计 0.670 THz 谐波混频器电路时, 选用 ACST 公司商用二极管, 物理结构尺寸为 $75 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$, 砷化镓衬底厚度为 $4 \mu\text{m}$, C_{j0} 为 1.0 fF, R_s 为 25Ω , M 为 1.25。结合电磁仿真软件、电气仿真软件建立二极管物理结构三维模型与电气参数模型。为降低太赫兹信号传输介质的额外损耗, 太赫兹电路采用熔融石英减薄工艺实现的 $15 \mu\text{m}$ 石英基片作为载体, 本振信号输入采用矩形波导 WR2.8, 射频信号输入采用矩形波导 WR1.5, 中频采用 SMA 接头 50Ω 传输线输出。太赫兹混频器的设计过程大致为 3 个步骤: 首先建立二极管器件的三维模型和电气模型, 并对模型进行电气仿真, 得到二极管工作的最佳状态以及最佳阻抗值; 其次, 将混频器分为中频滤波器、本振波导与微带过渡、射频波导与微带过渡几个无源结构进行仿真; 最后, 在电磁仿真软件中得到无源结构的 S 参数 SNP 文件, 导入电路仿真原理图中, 进行整体仿真, 得到最终优化后的太赫兹混频器电路结构。

根据仿真设计步骤, 利用谐波分析法分析太赫兹二极管的非线性特性, 以表征混频器的潜在最优性能以及二极管最佳本振阻抗 $Z_{LO} = (152 - j311) \Omega$ 、射频阻抗 $Z_{RF} = (89 - j120) \Omega$, 最低变频损耗小于 6 dB, 其中本振功率为 2 mW。

为实现理想滤波器结构, 同时减小传输线的长度, 混频器中的中频滤波器采用 hammer-head 工字型多节滤波器结构, 提供对本振信号和射频信号的高抑制, 仿真电路结构如图 3 所示。仿真结果显示, 中频滤波器在本振频率 300~400 GHz 范围内抑制度大于 30 dB; 在射频频率 600~700 GHz 范围内抑制度大于 25 dB, 实现了多谐振点中频滤波器结构。这种结构的滤波器较传统高低阻抗实现的低通滤波器, 具有高抑制度和高紧凑度的特点, 可以大大缩短薄膜基片的加工长度, 为后续太赫兹混频器加工装配提供方便。

太赫兹混频器本振端口与射频端口的阻抗匹配采用矩形波导与微带线之间的电场耦合实现。在设计过程中为保证本振信号与射频信号的回路, 在二极管器件与本振波导探针之间采用高低阻抗线实现射频信号抑制, 防止射频信号从本振端口泄露, 增加本振端口与射频端口的隔离度。高低阻抗线对于射频信号, 相当于一个射频截止的低通滤波器结构, 同时也为本振信号提供良好的匹配网络。射频信号的输入波导具有高通特性, 因此减高后的射频矩形波导提供本振信号截止点。最终仿真的 0.67 THz 谐波混频器整体电路结构如图 4 所示。设计中

考虑实际加工工艺的限制，微带线最窄线宽控制在 $10\ \mu\text{m}$ 以上，熔融石英基片载体厚度为 $15\ \mu\text{m}$ ，尺寸为 $1\ 550\ \mu\text{m} \times 175\ \mu\text{m}$ ，整个微带结构采用悬置电路形式，以降低太赫兹信号传输的损耗，二极管装配采用导电银浆粘接。将图 4 中 $0.67\ \text{THz}$ 谐波混频器整体电路结构进行电磁仿真，导入 ADS 软件中进行谐波信号分析，得到图 5 所示的太赫兹混频器仿真结果。 $0.67\ \text{THz}$ 谐波混频器的最终设计仿真结果为：最低变频损耗小于 $8\ \text{dB}$ ，射频端口反射系数小于 $10\ \text{dB}$ ，本振端口最佳反射系数小于 $10\ \text{dB}$ ，在 $620\sim 720\ \text{GHz}$ 本振频率范围内，变频损耗小于 $15\ \text{dB}$ ，在 $630\sim 705\ \text{GHz}$ 本振频率范围内，变频损耗小于 $9\ \text{dB}$ 。进行无源结构仿真时，没有考虑传输线在太赫兹频段额外的损耗，仿真结果较测试值偏小。其中 $0.67\ \text{THz}$ 谐波混频器本振端口与射频端口之间的隔离大于 $30\ \text{dB}$ ，如图 6 所示，大大降低了本振信号与射频信号的泄露。

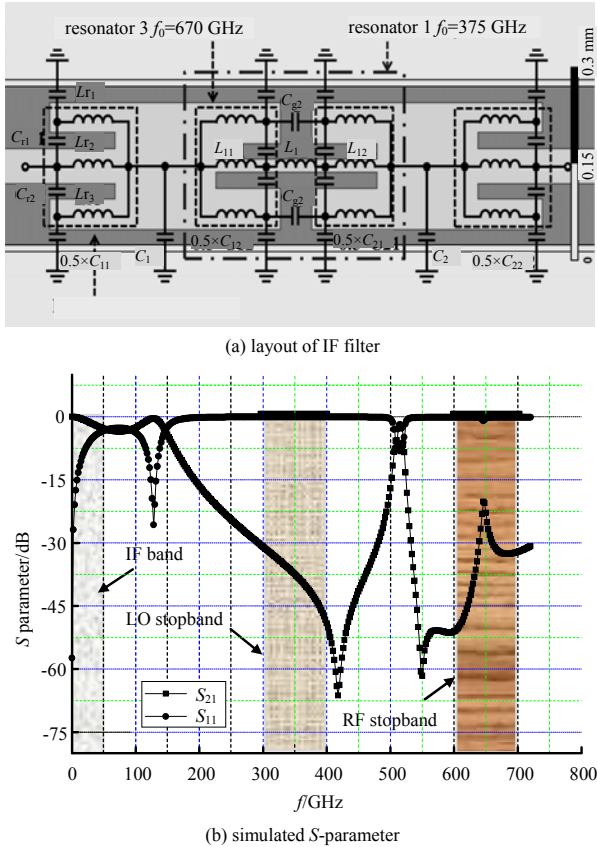


Fig.3 High rejection of IF filter between LO and RF frequency
图 3 中频滤波器在本振与射频频率抑制设计

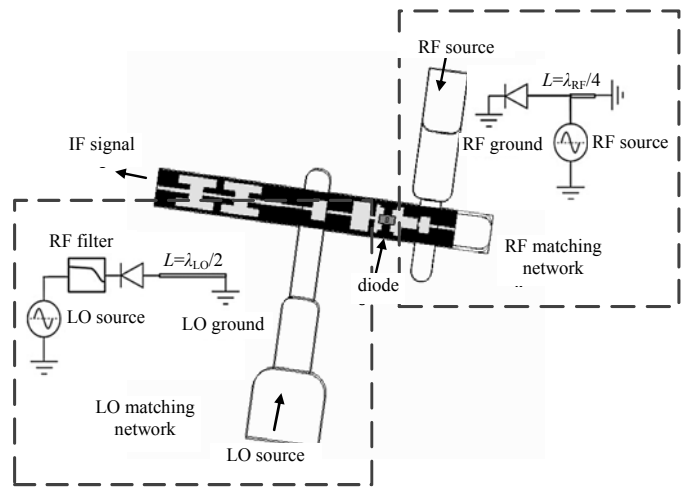


Fig.4 Simulated structure of 0.67 THz sub-harmonic mixer
图 4 0.67 THz 谐波混频器整体电路仿真

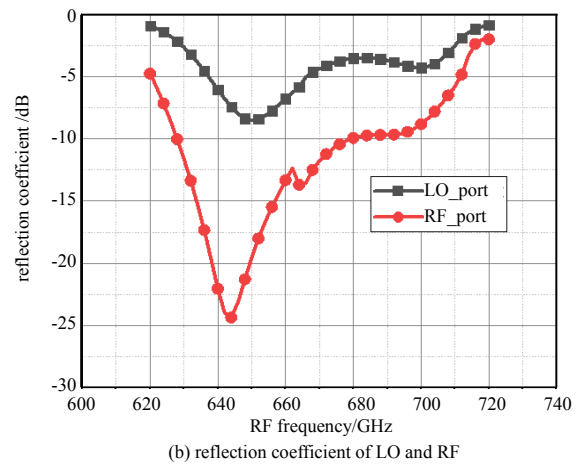
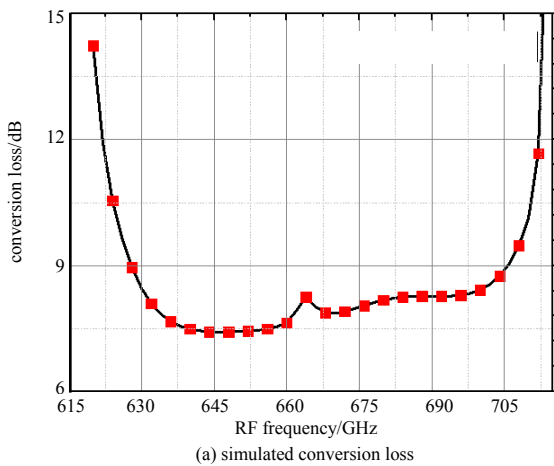


Fig.5 Simulated results of 0.67 THz sub-harmonic mixer
图 5 0.67 THz 谐波混频器性能仿真结果

3 结论

本文基于太赫兹平面肖特基二极管的非线性特性设计了 0.62~0.72 THz 谐波混频器, 结合二极管噪声产生机理与混频器电路形式, 分析了二极管主要参数指标对混频器性能的影响, 为二极管设计与选型提供了理论指导与分析。采用 15 μm 低损耗熔融石英基片作为太赫兹电路载体, 设计紧凑型的工字型 hammer-head 结构中频滤波器, 高低阻抗传输线结构实现太赫兹混频器本振与射频阻抗匹配, 最终实现低损耗的 0.67 THz 谐波混频器电路结构。

参考文献:

- [1] TREUTTEL J,GATILOVA L,MAESTRINI A,et al. A 520–620 GHz Schottky receiver front-end for planetary science and remote sensing with 1 070 K–1 500 K DSB noise temperature at room temperature[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology*, 2016,6(1):148–155.
- [2] HAMMAR A,SOBIS P,Drakinskiy V,et al. Low noise 874 GHz receivers for the international submillimetre airborne radiometer[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018,89(5):055104.
- [3] LIU G,ZHANG B,ZHANG L S,et al. 0.42 THz subharmonic mixer based on 3D precisely modeled diode[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2018,37(3):338–343.
- [4] WANG C,HE Y,LU B,et al. Robust sub-harmonic mixer at 340 GHz using intrinsic resonances of Hammer-Head filter and improved diode model[J]. *Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves*, 2017,38(1):1–19.
- [5] THOMAS B,MAESTRINI A,BEAUDIN G. A low-noise fixed-tuned 300–360 GHz sub-harmonic mixer using planar Schottky diodes[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2005,15(12):865–867.
- [6] 夏德娇,张勇. 330 GHz 太赫兹次谐波混频器设计[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2018,16(3):378–382. (XIA Dejiao, ZHANG Yong. Design of a 330 GHz sub-harmonic mixer based on planar Schottky diodes[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2018,16(3):378–382.)
- [7] YANG F,MENG H F,DUO W B,et al. Terahertz sub-harmonic mixer using discrete Schottky diode for planetary science and remote sensing[J]. *Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves*, 2017,38(5):630–637.
- [8] SCHLECHT E, ILES JV,LEE C,et al. Schottky diode based 1.2 THz receivers operating at room-temperature and below for planetary atmospheric sounding[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology*, 2014,4(6):661–669.
- [9] PETER S,DRAKINSKIY V,EMRICH A,et al. 300 GHz to 1.2 THz GaAs Schottky membrane TMIC's for next generation space missions[C]// 24th International Symposium on Space Terahertz Techniques. Groningen,Netherlands:[s.n.], 2013.
- [10] THOMAS B,SILES J,GILL J,et al. 560 GHz,664 GHz and 1.2 THz Schottky based MMIC sub harmonic mixers for planetary atmospheric remote sensing and FMCW radar[C]// Proceeding of International Symp. Space THz Technology. Tucson,AZ, USA:[s.n.], 2011:26–28.
- [11] SOBIS P J,WADEFALK N,EMRICH A,et al. A broadband,low noise,integrated 340 GHz Schottky diode receiver[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components*, 2012,22(7):366–368.
- [12] DRAKINSKIY V,SOBIS P,ZHAO H,et al. Terahertz GaAs Schottky diode mixer and multiplier MIC's based on e-beam technology[C]// 2013 International Conference on Indium Phosphide and Related Materials(IPRM). Kobe,Japan:IEEE, 2013:1–2.

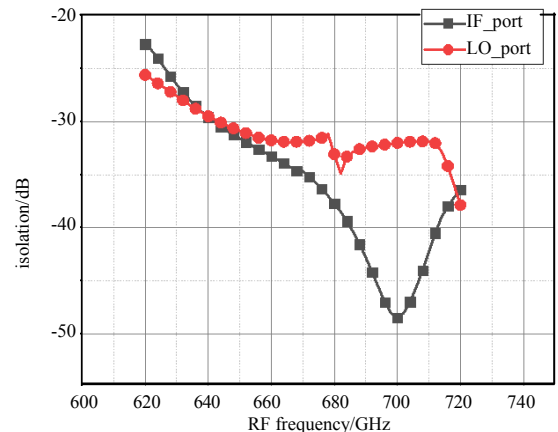


Fig.6 Simulated isolation of 0.67 THz sub-harmonic mixer
图 6 0.67 THz 谐波混频器各端口之间的隔离度仿真结果