

文章编号:1001-9014(2011)01-0033-05

基于石英基片的二毫米波段二次谐波混频器设计和研制

安大伟¹, 于伟华^{2*}, 吕昕²

(1. 中国气象局 国家卫星气象中心, 北京 100081; 2. 北京理工大学 信息与电子学院, 北京 100081)

摘要:介绍了一种基于石英基片的2mm波段二次谐波混频器. 阐述了谐波混频器的基本原理, 建立了混频二极管对结构的高频模型, 并用全波分析软件对整个电路进行了仿真优化. 实测得到射频信号在116~120GHz范围内, 当本振频率为59GHz、功率为7~14dBm时, 最低变频损耗为17dB, 最高变频损耗为20dB. 混频器的 P_{1dB} 为1dBm, 各端口隔离度均优于20dB. 研制的集成2mm波段二次谐波混频器实测结果与设计结果吻合较好.

关键词:毫米波; 谐波混频器; 反向并联二极管对; TRL方法

中图分类号: TN454 **文献标识码:** A

Design and fabrication of a 2mm-band sub-harmonic mixer based on quartz

AN Da-Wei¹, YU Wei-Hua^{2*}, LV Xin²

(1. National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

2. School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: An integrated 2mm band sub-harmonic mixer based on quartz circuits was presented. General harmonic mixer theory was introduced. The equivalent circuit model for the anti-pair diodes was built. Then the extensive simulation and optimization by the full wave analysis software were done. When the 59GHz LO signal's power was set between 7~14dBm, the mixer yielded a least conversion loss of 17dB and a maximum loss less than 20dB under working frequency of 116~120GHz. The P_{1dB} of the mixer is about 1dBm. The isolation between the three ports is better than 20dB. The measured results of the sub-harmonic mixer are agreed well with the simulated ones.

Key words: millimeter wave; sub-harmonic mixer; anti-pair diode; TRL method

PACS: 07.57.Kp

引言

在气象探测领域,毫米波技术正日益广泛地被开发和利用. 由于大气探测中丰富的气象信息包含在特定的毫米波频段内,需要毫米波接收机将射频信号转移到中频以便于数据分析和产品应用. 因此开发毫米波接收机中关键器件谐波混频器就成了当务之急.

针对毫米波亚毫米波频段的谐波混频器,国外已进行了大量的研究^[1,2],主要是基于石英工艺的混频电路技术. 但在国内,由于半导体工艺制约,目前还未见基于石英基片的毫米波亚毫米波混频器相

关报道. 本文介绍了一种2mm波段的谐波混频器,电路采用自主开发的基于石英基片工艺的微带传输线结构,并建立了相关二极管对模型. 石英基片工艺制造的微带电路具有质地坚硬不易变形、传输损耗低、主模截止频率高、电路精度高、易于一体化大规模生产等优点. 混频器选用反向并联的肖特基二极管对作为非线性器件,其优点将在下面内容中详细介绍.

1 谐波混频基本原理和管对建模

毫米波频段混频器大多使用肖特基二极管作为非线性器件,它具有噪声小,带宽大,工作稳定,结构

收稿日期:2010-03-01,修回日期:2010-07-05

Received date: 2010-03-01, revised date: 2010-07-05

作者简介:安大伟(1980-),男,博士,湖北省荆门市人,星载遥感仪器总体设计和毫米波亚毫米波技术, E-mail: andawei@cma.gov.cn.

* 通讯作者: E-mail: ywhbit@bit.edu.cn.

简单,截止频率高的特点.反向并联二极管对通过抑制部分混频产物可减小变频损耗,减小本振噪声通带以降低噪声系数并具有固有的抗反向峰值电压能力的特点^[3-6].容易推出反向并联二极管对跨导为:

$$g = g_1 + g_2 = 2\alpha i_s (e^{\alpha v} + e^{-\alpha v}) = 2\alpha i_s \cosh(\alpha v) \quad (1)$$

式中, g 表示管对跨导; g_1, g_2 分别为单二极管的时变电导; i_s 为二极管反向饱和电流.在忽略交叉调制的情况下,时变电导仅由 v_{LO} 调制,故有:

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

对于 $V = V_{LO} \sin \omega_{LO}t + V_s \sin \omega_s t$,环路外电流表达式为:

$$i = g(V_{LO} \sin \omega_{LO}t + V_s \sin \omega_s t) = A \cos \omega_{LO}t + B \cos \omega_s t + C \cos 3\omega_{LO}t + E \cos(2\omega_{LO} + \omega_s)t + F \cos(2\omega_{LO} - \omega_s)t + G \cos(4\omega_{LO} + \omega_s)t + \dots \quad (3)$$

可以看出,环路外总电流仅包含频率 $m\omega_{LO} \pm n\omega_s$ 满足 $m+n$ 为奇数条件的谐波分量.

二极管环路内的电流表达式为:

$$i_c = \frac{(i_2 - i_1)}{2} = i_s [\cosh(\alpha V) - 1] \quad (4)$$

将 $V = V_{LO} \sin \omega_{LO}t + V_s \sin \omega_s t$ 代入上式的级数形式得环路内电流:

$$i_c = i_s \left[1 + \frac{(V_{LO} \sin \omega_{LO}t + V_s \sin \omega_s t)^2}{2!} + \dots - 1 \right] = \frac{i_s}{2} \left\{ \frac{V_{LO}^2 + V_s^2}{2} + \frac{V_{LO}^2}{2} \cos 2\omega_{LO}t + \frac{V_s^2}{2} \cos 2\omega_s t + V_{LO} V_s [\cos(\omega_{LO} - \omega_s)t + \cos(\omega_{LO} + \omega_s)t] \dots \right\} \quad (5)$$

式中, v_{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.

可以看出,环路内总电流仅包含频率 $m\omega_{LO} \pm n\omega_s$ 满足 $m+n$ 为偶数条件的谐波分量.

因此归纳出管对结构用于混频电路具有以下优点:

1) 外部电流只含有偶次本振谐波混频项,而且幅度比单管的增大一倍.

2) 奇次本振谐波混频项仅存在于管对环路内部,因此电路中的输出干扰频率减少,从而可减小变频损耗.

3) 在混频时,仅在 $2\omega_{LO} \pm \omega_{IF}$ (ω_{IF} 为中频频率)附近的本振噪声才会经混频而输出,此部分噪声已大大减弱.

本文采用的 DBES105a 就是一个反向并联肖特

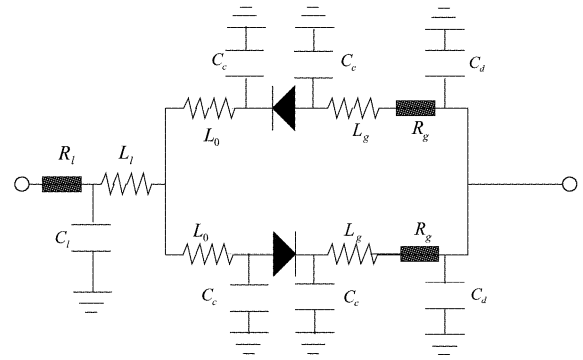


图1 肖特基二极管对模型

Fig. 1 The model for Schottky anti-pair diode structure

基二极管对 MMIC 芯片,利用其作为非线性器件可得到良好的谐波混频特性,其输入输出端口为倒装焊盘形式.然而将该芯片应用在毫米波的高频段时,由器件封装、倒装互连和空腔结构导致的寄生效应将严重影响电路性能,而商用的二极管模型参数已不能准确表征该反向并联管对的高频特性,本文采用TRL去嵌入测试结果和构建初级模型相结合的方法,建立了可应用到2mm波段的精确DBES105a管对模型.其中在TRL去嵌入测试中,DUT为与实际工作环境一致的基于石英基片的反向并联管对,T、R、L结构也用石英电路实现,对其分别测试并采用TRL算法可得到去嵌入的二极管参数.结合2mm波段谐波混频器工作和封装环境建立了该反向并联二极管对的电路模型如图1所示.该等效电路与TRL测试结果拟合,最终可得到模型中的各元件参数如表1所示.

表1 二极管对模型参数

Table 1 Parameters of the pair diode

参数	$R_i(\Omega)$	$L_j(\text{pH})$	$C_i(\text{fF})$	$C_c(\text{fF})$	$L_g(\text{pH})$	$R_g(\Omega)$	$C_d(\text{fF})$	$L_0(\text{pH})$
数值	0.0022	20.28	19.48	17.66	117.68	0.65	15	77.49

2 谐波混频器电路设计和优化

图2是二次谐波混频器的电路图,混频器微带电路在石英基板上实现.该电路图从右到左依次为射频输入信号波导微带转换结构、反向并联二极管对、本振低通滤波器、本振输入信号波导微带转换T型节结构、 $\lambda_{LO}/4$ 高阻线、中频低通滤波器、中频输出端口.

该二次谐波混频器的工作流程可描述为:112~124GHz的射频信号从右边射频输入端口经过波导微带过渡结构,由阻抗匹配网络进入到二极管对中,与本振信号一起参与混频;固定频率的本振信号

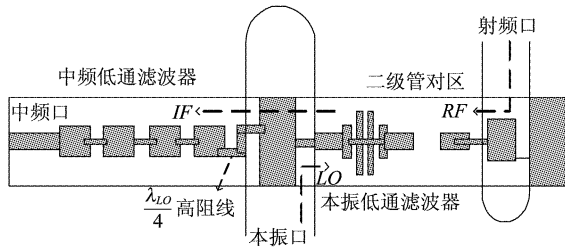


图2 分谐波混频器的结构图
Fig.2 Configuration of the sub-harmonic mixer

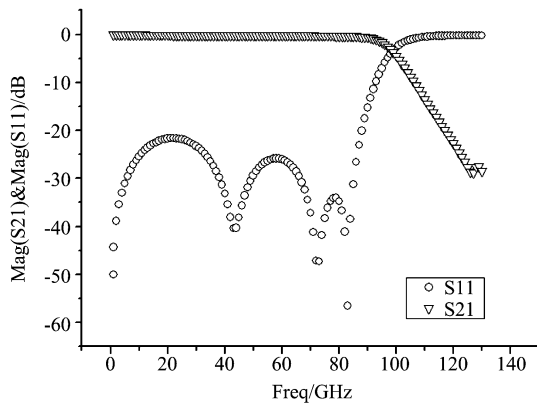


图3 本振低通滤波器 S 参数仿真结果
Fig.3 S parameters for LO LPF

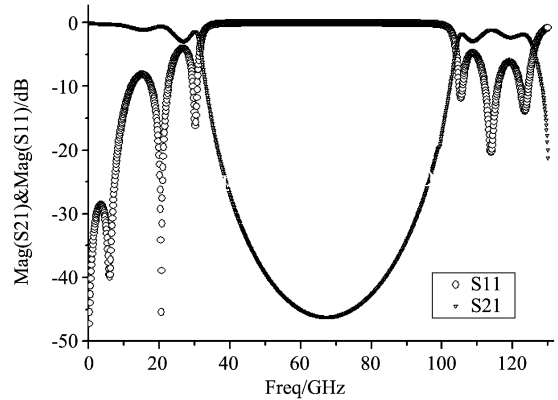


图4 中频低通滤波器 S 参数仿真结果
Fig.4 S parameters for IF LPF

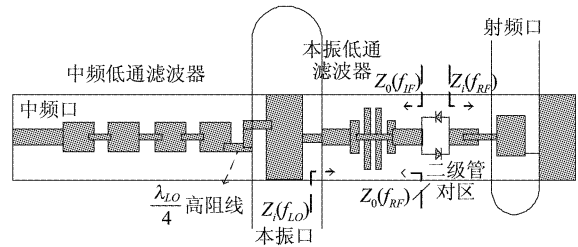


图5 分谐波混频器电路的匹配图
Fig.5 Matching structure of the sub-harmonic mixer

(59GHz)从本振端口输入,经由本振低通滤波器和阻抗匹配网络,进入二极管对中:其中本振端的本振低通滤波器用于防止射频信号和其它闲频信号泄露到本振端口,增加端口之间的隔离度,同时保护本振源;混频后的信号经由中频低通滤波器,从IF端口输出;IF端口的低通滤波器负责中频信号的滤波及抑制混频后的组合分量,同时还 将射频和本振信号与中频端口隔离开来,从而提高射频输入口、本振输入口与中频输出口的隔离度。

本振端口低通滤波器和中频低通滤波器均可利用基于有限元法的电磁场全波分析软件 HFSS 进行仿真分析并优化,优化后的仿真结果如图3和图4所示.本振滤波器在0~80GHz范围内插入损耗小于0.2dB,回波损耗优于20dB,该滤波器在其通带内对本振和中频信号导通良好,在其通带外对射频信号抑制良好,起到较好的端口隔离效果.低通滤波器在0~12GHz范围内插入损耗小于0.1dB,回波损耗优于20dB,该滤波器在通带内对中频信号导通良好;在通带外对59GHz本振信号抑制良好;但该滤波器对射频信号的抑制不够.由于本振低通滤波器对射频信号已进行了良好的滤波,因此总体上可满足端口隔离的要求。

$\lambda_{LO}/4$ 高阻线的长度初始值可设定为本振信号的1/4波长,宽度初始值可设定为20 μm (阻抗约800欧姆),使用HFSS软件对其长度和宽度进行仿真优化,最终实现对本振信号的强反射,使得输入的本振信号在本振信号波导微带转换T型节结构中只向本振低通滤波器一端单向传输.仿真结果显示该高阻线在55~65GHz范围内,反射很大,本振信号无法向中频端口方向传输,只能向二极管对传输并参与混频。

输入匹配电路对射频和本振信号导通,如图5,输出匹配信号对中频信号导通.输入阻抗匹配网络将源阻抗匹配到二极管对所需低阻抗.输出阻抗匹配网络将二极管对阻抗匹配到负载所需50欧姆,使得转换增益最高.本振端口的本振低通滤波器使得本振信号向混频管对方向通过,同时使得混频得到的中频信号向中频端口通过,并实现射频信号与本振源的隔离.在二极管对两端的射频和中频端阻抗分别为 $Z_i(f_{RF})$ 、 $Z_o(f_{IF})$,通过输入输出匹配和滤波电路,使得 $Z_i(f_{RF})$ 、 $Z_o(f_{IF})$ 等同于匹配负载,使得 $Z_o(f_{RF})$ 等同开路.在实际电路设计中,混频二极管对采用通过前述方法建立的等效电路模型,因此在进行电路匹配时,已将各种寄生效应一并考虑。

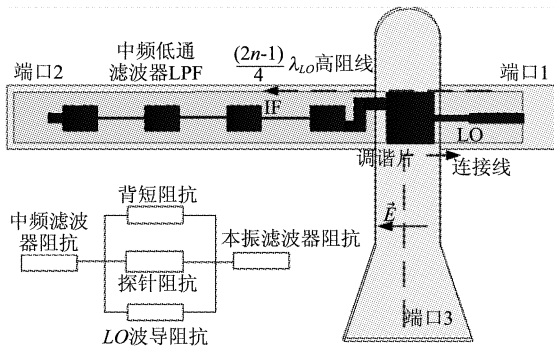


图6 本振端口 T 型节结构图和等效电路
Fig. 6 T structure for LO port and equivalent circuit

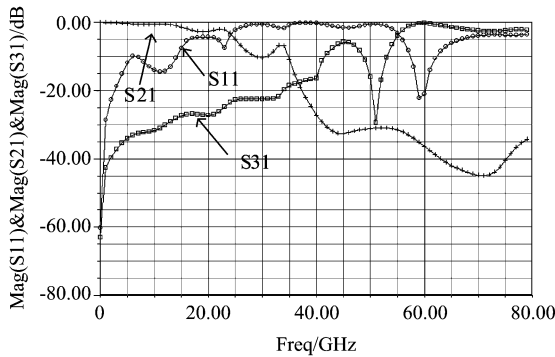


图7 本振端口 T 型结构建模 S 参数性能
Fig. 7 S parameters for LO T structure

本振信号和射频信号的 E 面微带到波导转换结构稍有不同. 如图 6 所示, 本振波导微带转换探针两边均接相关电路, 其左端接中频低通滤波器, 右端接本振低通滤波器, 探针与中频低通滤波器的连接处为 $\lambda_{LO}/4$ 高阻抗线, 对本振信号进行隔离, 防止本振信号串入中频端口, 同时要求其不影响混频后的中频信号通过本振探针、中频低通滤波器到达中频端口. 图 6 给出了该 T 型节结构模型和等效电路.

利用 HFSS 对本振端口 T 型节的结构进行分析, 此结构尺寸变化较大, 包括多个不连续问题和边值问题, 图 7 给出了其 S 参数性能. 可以看出, 1 和 2 端口间中频信号导通良好, 本振信号得到良好抑制, 同时本振输入端口 3 和 1 之间的导通性能良好, 本振信号能够进入混频电路参与混频. 该电路达到设计要求.

3 应用

图 8 为二次谐波混频器的内部结构图和显微镜下的电路图. 其中射频信号和本振信号由波导馈入 (波导和平面微带在同一平面), 进入内部平面微带电路后进行混频, 中频信号由 SMA 接头从电路中引出.

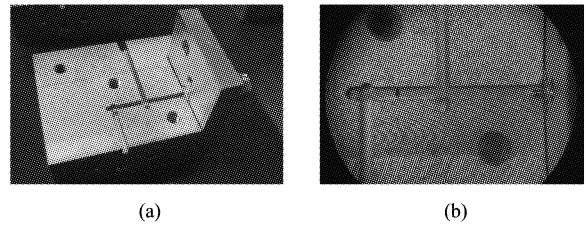


图8 (a) 安装盒的结构图 (b) 混频器电路图
Fig. 8 (a) Fixing box structure (b) Scheme of mixer

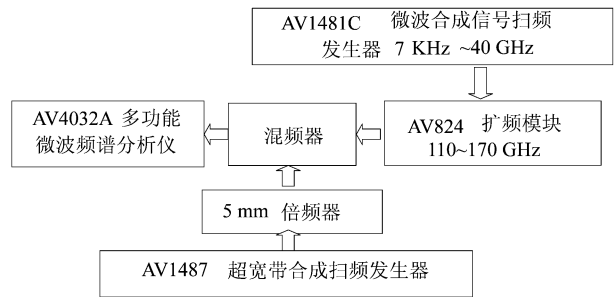


图9 谐波混频器测试平台
Fig. 9 Testing platform for sub-harmonic mixer

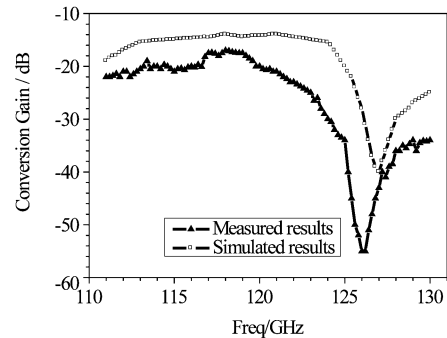


图10 分谐波混频器转换增益仿真/测试曲线
Fig. 10 Comparison of conversion loss between tested and simulated power

混频器屏蔽腔表面镀金、石英基板微带电路表面镀金, 黑色小块为混频二极管对. 测试平台如图 9 所示.

谐波混频器测试和建模仿真结果如图 10, 其中谐波混频器仿真模型建立过程如下: 先将反向并联二极管模型导入到 ADS 软件, 然后在 HFSS 软件中建立石英微带无源电路 (包括屏蔽环境) 模型, 并将优化后的模型 S 参数导入 ADS 软件中, 在该软件中按照设计拓扑结构连接线路, 设置实际工作环境优化得到仿真结果. 混频器电路仿真结果表明射频信号频率在 115 ~ 123GHz 范围内, 转换增益 (双边带 DSB) 优于 -15dB, 带内较平坦, 但在 127GHz 频点处有一个急剧变差的零点. 测试结果表明射频信号在 116 ~ 120GHz 范围内, 转换增益优于 -20dB, 在中心频点 118GHz 附近, 转换增益最低, 可达 -17dB, 转换

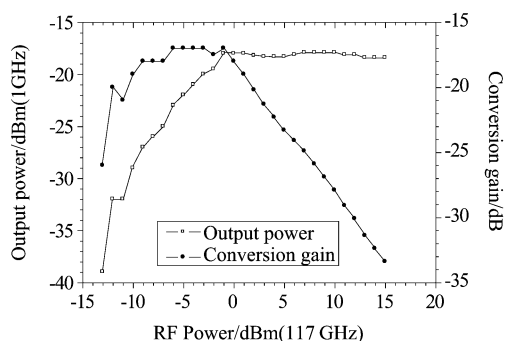


图 11 中频功率和转换效率随输入功率变化测试曲线
Fig. 11 IF output power and efficiency as a function of RF

增益急剧变差的零点偏移到 126GHz, 比仿真零点偏低 1GHz. 可以看出电路性能总体趋势向低频偏移, 分析其原因在于二极管对模型是在 3mm 探针平台上建立的, 造成混频器实测结果频率偏低.

图 11 为射频频率为 117GHz 时中频输出和转换效率随输入功率的变化曲线. 射频信号的功率扫描范围为 $-13 \sim 15$ dBm, 当输入信号功率在 $-10 \sim 0$ dBm 范围内, 转换增益较为平坦, 约为 ± 1.5 dB, 中频输出功率线性度良好, 当输入功率大于 0 dBm 时, 转换增益急剧变坏, 中频输出功率不再增加, 混频器趋向饱和. 该混频器的 1dB 压缩点为 1 dBm. 另外, 该混频器的射频和本振端口隔离度优于 20 dB, 本振和中频端口隔离度优于 20 dB.

4 结论

(上接 8 页)

- [2] Peng Chubing, Mansuripur Masud. Amorphization induced by subnanosecond laser pulses in Phase-change optical recording media[J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(22):4367—4375.
- [3] Zuo Fangyuan, Wang Yang, Wu Yiqun, *et al.* Study of ultrafast carrier dynamics in amorphous $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ film by femtosecond-resolved reflectivity spectroscopy [J]. *Acta Physica Sinica*, (左方圆, 王阳, 吴谊群, 等. $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 非晶薄膜中超快载流子动力学的飞秒分辨反射光谱研究. *物理学报*) 2009, **58**(10):7250—7254.
- [4] Huang S M, Huang S Y. Investigation of phase changes in $\text{Ge}_1\text{Sb}_4\text{Te}_7$ films by single ultra-fast laser pulses[J]. *Applied Physics A*, 2006, **10**(1007):529—533.
- [5] Wei Shenjin, Li Jing, Wu Xia, *et al.* Phase change characteristics of aluminum doped $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ films prepared by magnetron sputtering [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(17):10584.
- [6] Tominaga J, Atoda N. Study of the Crystallization of GeSbTe Films by Raman Spectroscopy [J]. *Jpn. J. Appl. Phys*, 1999, **38**:L322.
- [7] Satoh H, Sugawara K, Tanaka K. Nanoscale phase changes

本文分析了谐波混频电路的工作原理, 建立了准确的混频二极管对高频模型, 对 2mm 波段的分谐波混频器进行了电路分析, 并对各子电路进行了建模仿真与优化, 最终完成了实物研制. 从测试与仿真结果对比可以看出, 此基于石英工艺的 2mm 波段二次谐波混频器设计合理, 模型比较准确.

REFERENCES

- [1] Bertrand Thomas, Alain Maestrini, Gérard Beaudin. A Low-Noise Fixed-Tuned 300 360-GHz Sub-Harmonic Mixer Using Planar Schottky Diodes [J]. *MICROWAVE AND WIRELESS COMPONENTS LETTERS*, 2005, **15**(12):865—867.
- [2] Bertrand Thomas, Byron Alderman, Dave Matheson, *et al.* A Combined 380 GHz Mixer/Doubler Circuit Based on Planar Schottky Diodes [J]. *IEEE MICROWAVE AND WIRELESS COMPONENTS LETTERS*, 2008, **18**(5):353—355.
- [3] ZHOU Mi, XU Jun, LUO Sheng-Du, *et al.* Ka-Band Fourth Harmonic Mixer With 1-D EBG Structure [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (周密, 徐军, 罗慎独, 等. 一种使用一维电磁带隙结构 Ka 频段四次谐波混频器. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(2):147—149.
- [4] Bertrand Thomas, Simon Rea, Brian Moyna, *et al.* A 320 ~ 360GHz Subharmonically Pumped Image Rejection Mixer Using Planar Schottky Diodes [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2009, **19**(2):101—103.
- [5] Erich Schlecht, John Gill, Robert Dengler, *et al.* A Unique 520 ~ 590 GHz Biased Subharmonically Pumped Schottky Mixer [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2007, **17**(12):879—882.
- [6] Marsh S, Alderman B., Matheson D., *et al.* Design of low-cost 183 GHz subharmonic mixers for commercial applications [J]. *IET Circuits, Devices & Systems*, 2007, **1**(1):1—6.
- [7] in crystalline $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ films using scanning probe microscopes [J]. *J. Appl. Phys*, 2006, **99**:024306.
- [8] Granato A V. Thermodynamic and kinetic properties of amorphous and liquid states [J]. *Metallurgical And Materials Transactions A*, 1998, **29**:1837.
- [9] Baker D A, Paesler M A, Lucovsky G, *et al.* Application of bond constraint theory to the switchable optical memory material $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **96**:255501.
- [10] Turyanitsa I D, Vodopyanov L K, Rubish V M, *et al.* Raman spectra and dielectric properties of glasses of the Sb-S-I system [J]. *Zh. Prikl. Spektrosk.* 1986, **44**:798—802.
- [11] Zhang Guangjun, Gan Fuxi, Jiang Xiongwei, *et al.* Morphological characteristics of amorphous $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ films after a single femtosecond laser pulse irradiation [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2006, **252**(12):4083—4090.
- [12] Jang M H, Park S J, *et al.* Phase change behavior in oxygen-incorporated $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ films [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, **95**(1):012102.
- [13] Kolobov A V, Fons P, Frenkel A I, *et al.* Understanding the phase-change mechanism of rewritable optical media [J]. *Nature Materials* 2004, **3**:703—708.