

# 基于共振隧穿二极管设计实现的 Ka 波段振荡源

刘 军<sup>1</sup>, 顾国栋<sup>2</sup>, 刘博文<sup>1</sup>, 李亚明<sup>1</sup>, 梁士雄<sup>3</sup>, 宋瑞良<sup>1\*</sup>, 刘 宁<sup>1</sup>

(1. 中国电子科技集团公司第五十四研究所北京研发中心, 北京 100041;

2. 中国电子科技集团公司第十三研究所, 河北石家庄 050050; 3. 天津大学微电子学院, 天津 300072)

**摘要:** 目前 Sub-6 GHz 频段资源日益稀缺, 推动了毫米波在 5G/6G 通信领域的研究, 低相位噪声、高稳定度的毫米波振荡器的研究与开发具有重要的科研价值和应用前景. 本文采用具有负阻特性的共振隧穿二极管 (Resonant Tunneling Diode, RTD) 设计实现了一款 Ka 波段 MMIC (单片微波集成电路) 振荡源芯片, 有效降低了振荡电路的设计难度. RTD 是一种基于量子隧穿效应的半导体器件, 双势垒单势阱 (Double Barrier Quantum Well, DBQW) 结构是该器件最典型的结构, 其中势垒由宽带隙材料构成, 势阱由窄带隙的材料构成. RTD 同时具有非线性特性和负阻特性, 通过改变偏置电压可以分别实现源和探测器. 文中通过比较 GaAs 和 InP 外延材料的特性, 最终采用 InP 材料体系, 通过优化外延材料结构设计, 研制出的 RTD 器件峰谷电流比为 3.9, 峰值电流密度为 290 kA/cm<sup>2</sup>. 该振荡电路采用 InP 衬底设计实现, 主要电路结构包括 RTD、共面波导、金属-绝缘体-金属电容 (去耦电容和隔直电容) 和抑制电阻等. 去耦电容用作射频信号对地短路, 以避免射频功率被抑制电阻消耗; 隔直电容用于防止在片测量期间直流信号输入频谱分析仪导致仪器损坏; 抑制电阻用于抑制低频偏置振荡. RTD 的本征电容与使用短路传输线实现的等效电感一起组成 LC 振荡网络, 产生所需的振荡频率. 采用薄膜 NiCr 电阻来实现抑制电阻, 去耦电容和隔直电容采用 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 实现. 振荡器在片测试结果表明: 基波振荡频率为 30.67 GHz, 输出功率约为 -2.2 dBm, 相位噪声为 -87 dBc/Hz@1 MHz 和 -114 dBc/Hz@10 MHz, 可调带宽 0.72 GHz, FoM 为 -169.7 dBc/Hz, 电路直流总功耗 71.3 mW, 芯片面积 0.39 mm<sup>2</sup>. 仿真结果与实测结果之间的差异可能是由于器件加工误差、短路线偏差以及器件等效电路模型不够精确等原因. 本文研究的振荡源芯片在输出功率和芯片面积方面有一定的优势, 与国外采用相同工艺实现的振荡源性能之间还有一定的差距. 后续将通过优化材料结构、改进电路设计、合理设计抑制电阻阻值等手段进一步优化振荡源的性能. 本文研究的基于共振隧穿二极管实现的电路形式的振荡芯片属于国内首次报道, 且该方式有望应用于实现太赫兹频段振荡源.

**关键词:** 共振隧穿二极管; Ka 波段; 振荡源; 单片微波集成电路; 磷化铟

中图分类号: TN43; TN753.94

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2025)10-3773-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20250571

## The Design and Realization of Ka-Band Oscillator Based on Resonant Tunneling Diode

LIU Jun<sup>1</sup>, GU Guo-dong<sup>2</sup>, LIU Bo-wen<sup>1</sup>, LI Ya-ming<sup>1</sup>, LIANG Shi-xiong<sup>3</sup>, SONG Rui-liang<sup>1\*</sup>, LIU Ning<sup>1</sup>

(1. Beijing Research and Development Center, The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation (CETC54),

Beijing 100041, China; 2. The 13th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation (CETC13),

Shijiazhuang, Hebei 050050, China; 3. School of Microelectronic, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Currently, the resources in frequency band of Sub-6 GHz are increasingly scarce, which promotes the research of millimeter wave in 5G/6G communication field. As a key component to determine the communication quality and imaging accuracy, the research and development of millimeter-wave oscillator with low phase noise and high stability has important scientific research value and application prospect. This study presents a Ka-band MMIC oscillator chip based on resonant tunneling diodes (RTDs) with negative resistance characteristics, which effectively simplify oscillator circuit design. RTD is a semiconductor device based on quantum tunneling effect, with a double-barrier single-quantum-well (DBQW) structure as their most representative configuration—where the barriers are composed of wide-bandgap materials and the well of narrow-bandgap materials. RTDs exhibit both nonlinear and negative resistance properties, enabling them to operate

both as an oscillator and detector by changing the bias voltage. After comparing GaAs and InP epitaxial materials, the InP system was selected for its superior performance. Through optimized epitaxial structure, the fabricated RTD achieved a peak-to-valley current ratio of 3.9 and a peak current density of 290 kA/cm<sup>2</sup>. The oscillator circuit, implemented on an InP substrate, integrates a coplanar waveguide, metal-insulator-metal (MIM) capacitors (for decoupling and DC blocking), and suppression resistors. The decoupling capacitor shorts RF signals to ground to prevent power dissipation, while the DC-blocking capacitor protects spectrum analyzers from damage during on-wafer measurements. The low-frequency bias oscillations are suppressed by shunt resistor. The intrinsic capacitance of the RTD, combined with an equivalent inductance realized by a shorted transmission line, forms an LC oscillation network to generate the desired frequency. A thin film NiCr resistor is used for realizing stabilizing resistor. The MIM capacitor are realized by Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. The On-wafer testing results show fundamental oscillation frequency of 30.67 GHz, with an output power of -2.2 dBm, phase noise of -87 dBc/Hz@1 MHz and -114 dBc/Hz@10 MHz, a tuning bandwidth of 0.72 GHz, a figure of merit (FoM) of -169.7 dBc/Hz, and a total DC power consumption of 71.3 mW, and the chip area is 0.39 mm<sup>2</sup>. The difference between simulation and experimental results may stem from fabrication tolerances, transmission line deviations, and inaccuracies device equivalent circuit model of RTD. Compared with other Ka-band oscillator, this study has a higher output power and a smaller chip area, and there is still a gap between the performance of the oscillator implemented by the same process in foreign. The performance of the oscillator will be improved by optimizing the material structure, improving circuit design, and optimizing the suppression resistance values. The oscillator chip based on resonant tunneling diode is the first report in China, and this method is expected to be applied to realize terahertz frequency band oscillator.

**Key words:** resonant tunneling diode; Ka-band; oscillator; monolithic microwave integrated circuit; indium phosphide

## 1 引言

在万物互联时代背景下,自动驾驶、物联网和虚拟现实(VR, Virtual Reality)等新兴技术的蓬勃发展,对无线通信系统提出了更高要求.传统3G/4G网络在带宽和数据传输速率方面已难以满足现代信息产业需求,促使通信技术向更高效率演进.值得注意的是,当前Sub-6 GHz主流频段的资源日趋紧张,这直接推动了毫米波频段在5G/6G通信领域的应用研究<sup>[1,2]</sup>.凭借其丰富的频谱资源和大带宽优势,毫米波技术正成为突破通信瓶颈的关键方向,受到学术界和产业界的广泛关注<sup>[3-5]</sup>.

毫米波是指频率范围在30~300 GHz(对应波长1~10 mm)的电磁波,被广泛应用于远距离地面中继通信和卫星通信系统.作为毫米波应用的核心器件,频率源的性能至关重要.早期毫米波频率源因技术难度大、成本高昂,主要局限于军事用途.近年来,在国家政策支持下,随着5G/6G通信<sup>[6,7]</sup>、毫米波雷达<sup>[8]</sup>和成像<sup>[9]</sup>等民用需求的快速增长,毫米波频率源技术取得了显著进步.作为决定通信质量和成像精度的关键组件,研发具有低相位噪声和高稳定性的毫米波频率源具有重要的科研价值和应用前景.

RTD(Resonant Tunneling Diode)是一种基于量子隧穿效应的负阻器件,可以简化振荡源电路结构,提高系统稳定性,其开关响应可达皮秒级,可以工作在太赫兹(THz)频段(目前实现的最高工作频率为1.98 THz)<sup>[10-13]</sup>,且直流功耗低,可以显著降低系统能耗.本文采用InP基

RTD设计实现了一款Ka波段的振荡源,RTD本征电容与等效电感共同构成LC谐振电路,等效电感采用短路微带线的形式实现,简化了电路结构设计.在片测试结果表明:基波振荡频率为30.67 GHz,输出功率为-2.2 dBm,相位噪声为-87 dBc/Hz@1 MHz和-114 dBc/Hz@10 MHz,可调带宽0.72 GHz, FoM为-169.7 dBc/Hz,电路直流总功耗71.3 mW,电路总面积0.39 mm<sup>2</sup>.

## 2 RTD器件外延结构及特性

RTD主要由三部分组成:(1)发射极区,它是电子的来源;(2)由夹在两个薄的宽带隙材料(1~3 nm势垒)之间的窄带隙材料(4~6 nm厚的量子阱)构成的双势垒量子阱(DBQW, Double-Barrier Quantum-Well)结构,该部分是RTD器件的核心结构;(3)集电极区,用于收集通过双势垒结构隧穿电子.发射极和集电极区域由轻掺杂n型半导体实现,每一侧上的重掺杂半导体实现欧姆接触层.RTD通常在砷化镓(GaAs)和InP中实现.与GaAs相比,InP材料体系在导带偏移、电子有效质量方面具有更优的性能.同时,采用高掺杂的In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As用于实现器件电极时,可以降低欧姆接触电阻.因此,在本研究中采用InP用于研制RTD器件及其电路结构.为了获得高峰值-谷值电流比(PVCR, Peak-to-Valley Current Ratio)和高峰值-谷值电流密度,从而提高电路输出功率,对基于InP材料体系的外延材料结构进行优化设计,通过调整不同结构层的厚度如势垒层、势阱层等,获得满足设计需求的外延结构参数.最终,在本次设计中使用的外延层结构如图1所示.

	Top Contact metal	Doping/cm <sup>-3</sup>	Thickness/nm	
欧姆接触层	InGaAs	2×10 <sup>19</sup>	15	
	Highly doped contact			
发射极	InGaAs	3×10 <sup>18</sup>	25	
	Lighly doped contact			
DBQW	InGaAs	20	20	
	Undoped Spacer			
	AlAs			1.5
	Barrier			
	InGaAs			4.5
	Well			
AlAs	1.5			
Barrier				
集电极	InGaAs	3×10 <sup>18</sup>	400	
	Lighly doped contact			
欧姆接触层	InGaAs	2×10 <sup>19</sup>	200	
	Highly doped contact			
	Bottom Contact metal			

图1 本文中 InP 基 RTD 器件外延材料结构

在 3 英寸的晶片使用分子束外延 (Molecular Beam Epitaxy, MBE) 技术生长 RTD 外延材料. 与两端器件相比, 两端器件的制造过程相对简单. 流片过程中涉及的关键步骤包括顶部/底部接触、台面蚀刻、隔离、钝化等. 为了降低欧姆接触电阻率, 本研究采用的接触金属是 Ti/Pt/Au, 刻蚀工艺采用湿法刻蚀, 采用 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 钝化以获得良好的器件可靠性. 除此以外, 精确的掩模对准对于实现小尺寸器件至关重要. 最终研制的台面面积为 7 μm<sup>2</sup> 的 InP 基 RTD 器件照片如图 2(a) 所示.

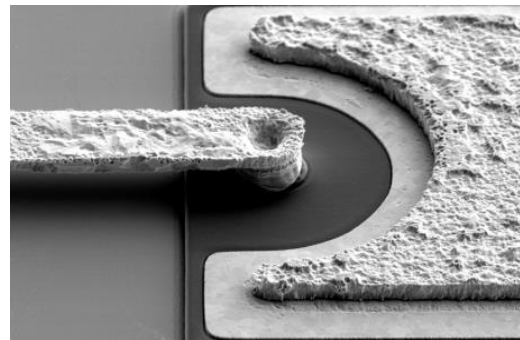
在室温下采用半导体参数分析仪 B1500 A 对研制的器件进行直流特性测试, 以表征器件的直流性能. 测试得到的器件直流特性曲线如图 2(b) 所示, 由图可以得到, 器件峰值电压  $V_p = 0.4$  V, 峰值电流  $I_p = 20.3$  mA, 谷值电流  $I_v = 5.2$  mA,  $PVCR = I_p/I_v = 3.9$ , 器件峰值电流密度  $J_p = I_p/A = 290$  kA/cm<sup>2</sup>, 其中 A 为器件台面面积.

### 3 电路结构设计与仿真分析

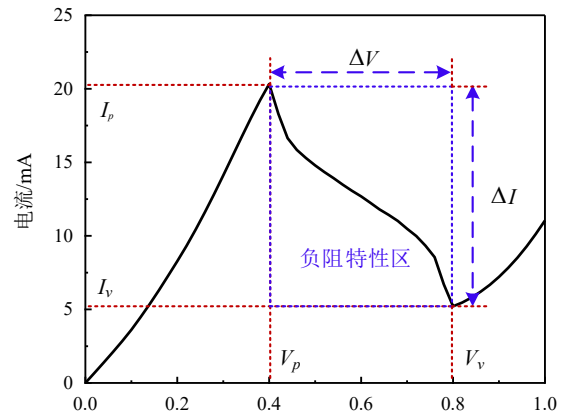
本文研制的 RTD 振荡器电路拓扑结构如图 3 所示.  $V$  表示将器件直流偏置点设置在负阻特性区的偏置电压. 抑制电阻  $R_E$  用于抑制低频偏置振荡,  $C1$  是去耦电容, 用作射频信号对地短路, 以避免射频功率被电阻  $R_E$  消耗. 电感  $L$  与 RTD 本征电容  $C_n$  共同形成 LC 谐振电路, 实现在目标频点的振荡. 在输出端电路加入隔直电容  $C2$ , 以防止在片测量期间直流信号输入频谱分析仪导致仪器毁坏. 振荡的工作频率  $f_0$  可以由下式估算:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_n}} \quad (1)$$

RTD 本征电容  $C_n$  可认为是在集电极侧形成耗尽区



(a) 器件实物图



(b) 器件直流特性测试图

图2 研制的 RTD 器件实物及其直流特性

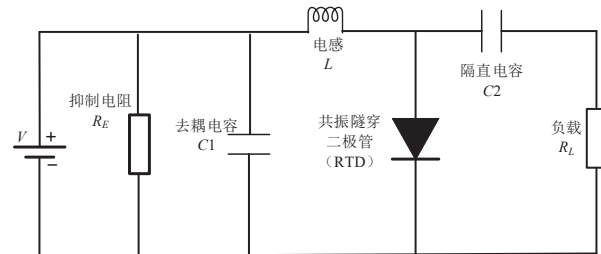


图3 电路拓扑结构

而产生的静态电容, 该耗尽区两侧为高掺杂的发射极和集电极, 因此可以视为标准的平行板电容器. 因此本征电容  $C_n$  可以采用下式进行表征:

$$C_n = \frac{\epsilon A}{d} \quad (2)$$

其中,  $\epsilon$  表示 InGaAs 介电常数;  $A$  表示器件台面面积;  $d$  表示包括隔离层在内的量子阱厚度.

对于长度为  $l$  的传输线, 输入阻抗  $Z_{in}$  可以表示为

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan(\beta l)}{Z_0 + jZ_L \tan(\beta l)} \quad (3)$$

其中,  $Z_0$  表示传输线特性阻抗;  $Z_L$  表示负载阻抗;  $\beta = \frac{2\pi f_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}}{c_0}$  表示相位常数;  $\epsilon_{eff} = \frac{1}{2}(\epsilon_r + 1)$  表示有效介电

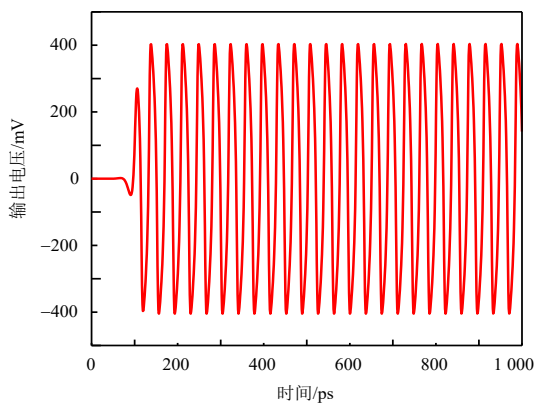
常数;  $c_0$  表示光速. 传输线为短路时, 负载为 0, 在电长度小于  $90^\circ$  时, 传输线电抗为感性, 式(3)可以表示为

$$j\omega L = jZ_0 \tan(\beta l) \quad (4)$$

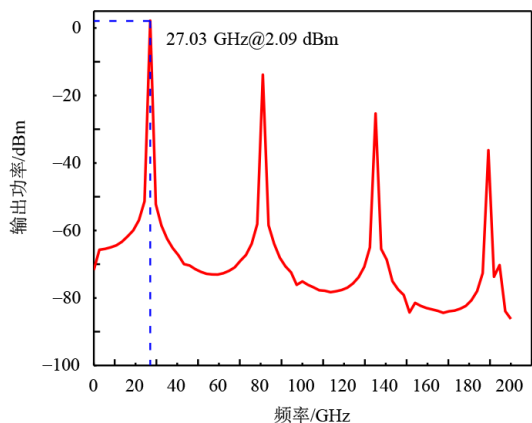
其中,  $l$  表示传输线长度;  $\omega = 2\pi f_0$  表示工作角频率. 因此, 对于确定电感值  $L$  与短路传输线长度  $l$  之间的关系可以表示为

$$L = \frac{Z_0 \tan(\beta l)}{\omega} \quad (5)$$

图 4 展示了电路仿真结果, 由图可以看出, 仿真得到的电路振荡频率为 27.03 GHz.



(a) 瞬态仿真结果



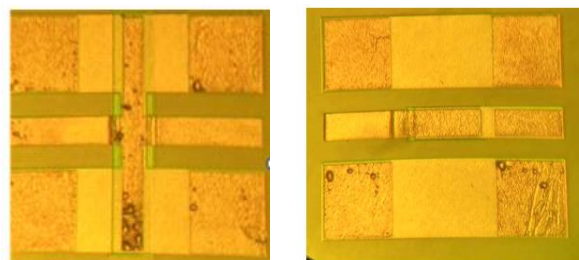
(b) 频谱仿真结果

图 4 电路仿真结果

#### 4 振荡源测试结果分析

如前文所述, 振荡器电路需要两种类型的电容 (去耦电容  $C1$  和隔直电容  $C2$ ). 本文采用 MIM 电容 (Metal-Insulator-Metal Capacitor) 的形式来实现两种电容结构, 设计并加工两种电容结构, 如图 5 所示. 去耦电容的回波损耗 ( $S_{11}$ ) 和插入损耗 ( $S_{21}$ ) 测试结果分别如图 6(a) 和图 6(b) 所示, 由图可以看出, 去耦电容在 Ka 波段插损都大于 20 dB, 因此可以在该频段作为去耦电容使用. 图 7(a) 和图 7(b) 分别展示了隔直电容测量的  $S_{11}$  和

$S_{21}$ , 可以看出, 插入损耗在该频段优于 0.5 dB, 可以实现隔直效果.



(a) 去耦电容

(b) 隔直电容

图 5 两种结构电容实物

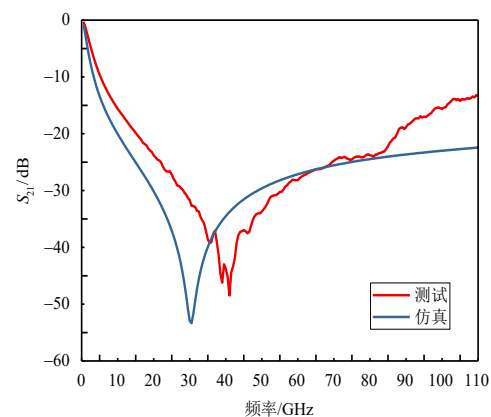
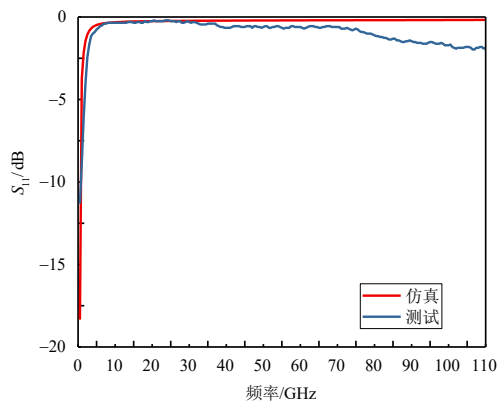


图 6 去耦电容  $C1$  仿真与测试  $S$  参数对比

最终研制的 Ka 波段振荡源实物图片如图 8 所示. 制作采用薄膜 NiCr 电阻来实现稳定电阻器  $R_E$ , 去耦电容和隔直电容采用  $\text{Si}_3\text{N}_4$  实现.

图 9 是 Ka 波段 MMIC RTD 振荡器的测试系统框图, 直流电源通过接地-信号-接地 (Ground-Signal Ground, GSG) 探针供电给芯片直流端, 接收端通过 GSG 探针和偏置器、线缆连接至是德科技 N9010A 频谱分析仪, 实现对振荡源芯片的频率、功率以及相位噪声等参

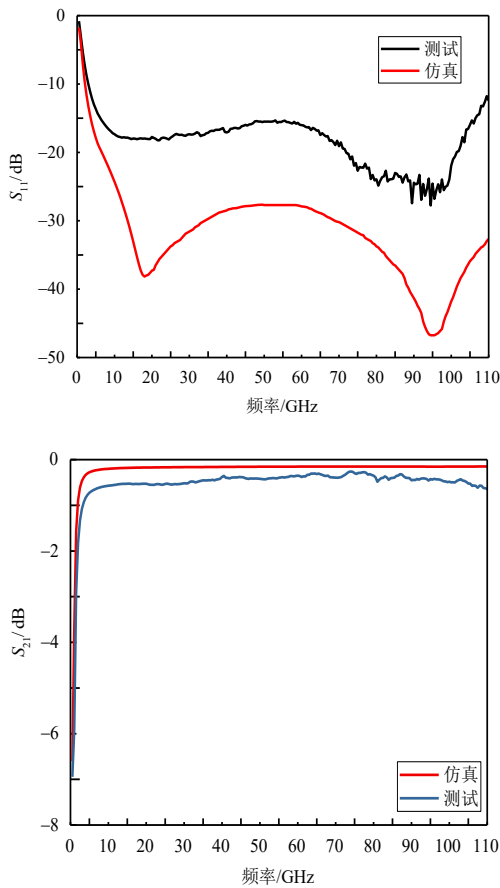


图7 隔直电容C2仿真与测试S参数对比

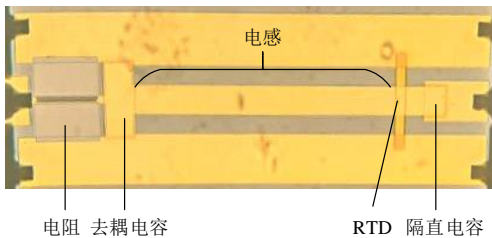


图8 振荡器芯片实物图

数的测试.

测试过程中,根据器件直流特性,需要将器件偏置点设置在负阻特性区,调整直流电源输入电压,最终将直流电压设置为0.63 V,电流为113.1 mA. 室温下在片

测试得到的振荡器输出频率、输出功率和相位噪声曲线如图10所示. 由图10可以看出,该振荡器芯片基波振荡频率为30.67 GHz,输出功率为-7.7 dBm,补偿测试系统中GSG探针、线缆以及偏置器的损耗后,输出功率约为-2.2 dBm,在该载频处测得的相位噪声为-87 dBc/Hz @1 MHz 和-114 dBc/Hz@10 MHz.

振荡器芯片的优值FoM(Figure of Merit)采用下式进行计算<sup>[4]</sup>:

$$FOM = PN(\Delta f) - 20\lg(f_0/\Delta f) + 10\lg(P_{dc}/1 \text{ mW}) \quad (6)$$

式中,PN(Δf)表示载波频率f<sub>0</sub>在Δf频偏处的相位噪声,P<sub>dc</sub>表示以mW为单位表示的振荡器功耗. 计算得到该振荡器芯片的FOM为-169.7 dBc/Hz.

对不同偏置电压条件下的振荡器进行了测试,输出频率和输出功率测试结果如图11所示. 由图11可知,输出频率范围为29.95~30.67 GHz,带宽为0.72 GHz;在0.58~0.65 V之间,补偿损耗后输出功率范围为-3.7~-2.2 dBm,对应频率范围为30.59~30.67 GHz.

仿真结果与实测结果存在一定的偏差,可能的原因有:

(1) 器件加工误差. 对流片后电路中的器件进行FIB切割,得到器件剖面图如图12所示. 对于3 μm的器件,实际流片后得到的器件尺寸约为1.9 μm. 根据式(2)可知,器件的本征电容减小,根据式(1),在电感值不变的条件下,电路的工作频率提高.

根据计算后得到的电容值,在保证电感值不变的条件下,仿真得到振荡源芯片的工作频率为32.05 GHz,仿真结果如图13所示.

(2) 短路线偏差的影响. 电感值受到短路线长度的影响,在实际流片过程中,实际的短路线长度因工艺误差的原因,会与实际设计的长度存在误差. 在保证本征电容不变的情况下,短路线长度对工作频率的影响如图14所示,可以看出,在长度变化100 μm范围内,频率变化3 GHz. 同时,由于去耦电容介质的存在,去耦电容上极板与短路线之间存在高度差,在实际流片过程中,二者之间约有6~8 μm的空隙,此处介质为电容介质,对电感性能也会产生影响.

(3) 器件等效电路模型不够精确. 在进行仿真计算

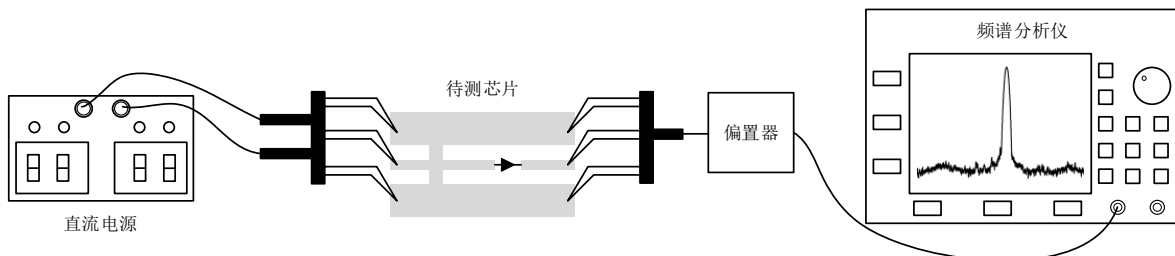
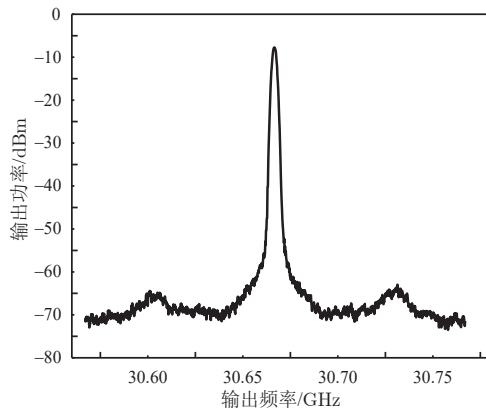
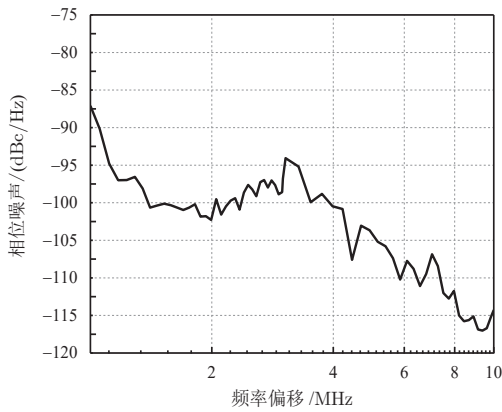


图9 振荡器芯片测试环境



(a) 输出频谱和功率测试结果



(b) 相位噪声测试结果

图10 振荡器芯片性能测试结果

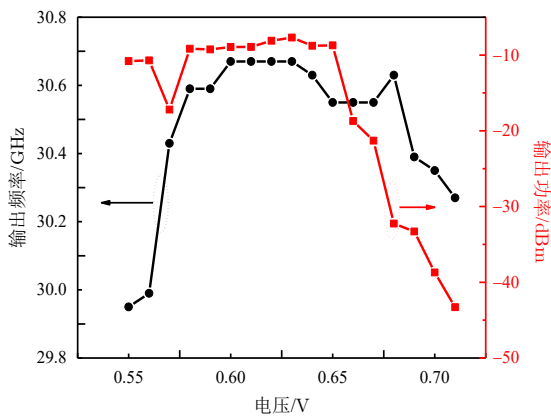


图11 振荡器芯片输出频率和输出功率随电压变化曲线

的过程中,只考虑器件的本征电容且认为它为常数,除此以外,器件模型还应考虑串联电阻、量子阱电感等参数.

表1对不同工艺实现的振荡源进行了性能对比,可以看出,本文研究的振荡源芯片在输出功率和芯片面

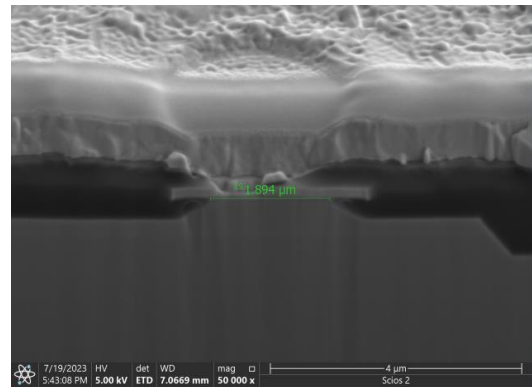


图12 器件FIB切割剖面图

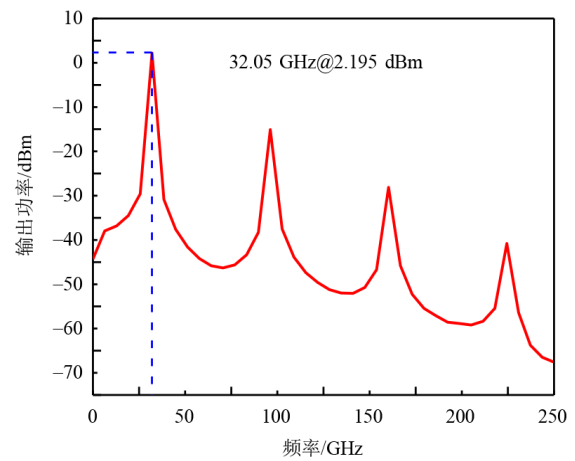


图13 改变本征电容后的振荡电路频谱仿真

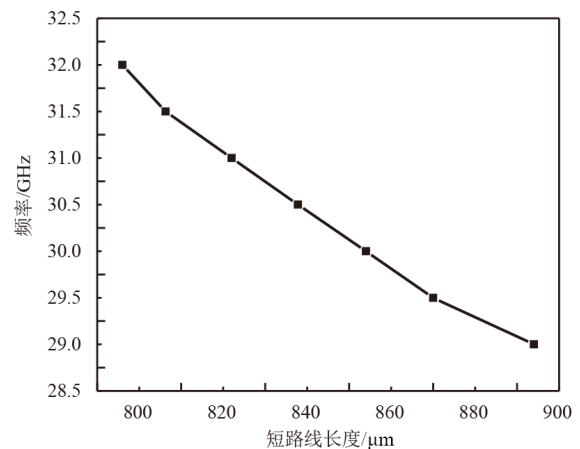


图14 短路线长度对工作频率的影响

积方面有一定的优势,与国外采用相同工艺实现的振荡源性能之间还有一定的差距.后续将通过优化材料结构、改进电路设计、合理设计抑制电阻阻值等手段进一步优化振荡源的性能.

表 1 不同振荡源性能对比

文献	工艺	频率/GHz	相位噪声@1 MHz/(dBc/Hz)	FoM	输出功率/dBm	芯片面积/mm <sup>2</sup>
文献[4]	55 nm SOI	24.48	-105.1	-181.3	-1.5	0.55
文献[14]	55 nm CMOS	34.34	-124.9@10 MHz	-180.3	-2.68	0.01
文献[15]	130 nm SiGe	30	-115.5	-184.4	-4.5	0.48
文献[16]	InP+RTD*2	28.75	-114	-178.3	-0.7	0.89
本文	InP+RTD	30.67	-87	-169.7	-2.2	0.39

## 5 结论

本文基于国内自主工艺采用 InP 基 RTD 设计实现了一款 Ka 波段的振荡源芯片。通过分析短路微带线的特性,提出采用短路传输线实现等效电感的方法,简化了电路结构设计。最终研制的振荡源芯片在片测试结果表明:基波振荡频率为 30.67 GHz,输出功率为-2.2 dBm,相位噪声为-87 dBc/Hz@1 MHz 和-114 dBc/Hz@10 MHz,可调带宽 0.72 GHz, FoM 为-169.7 dBc/Hz。该振荡器在芯片面积和输出功率方面表现出一定的优势,且电路结构简单。由于 InP 基 RTD 器件截止频率可达太赫兹频段,因此该形式振荡器有望实现太赫兹频段振荡器,并应用于太赫兹成像和太赫兹通信系统中,减小系统体积和复杂性。该形式的振荡源芯片属于国内首次报道。

## 参考文献

- [1] APARNA E, RAM G, KUMAR G A. A quadrilateral self-isolated wideband MIMO SIW fractal Koch snowflake slot antenna array for ka-band communications[J]. IEEE Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 2025, 48(1): 52-59.
- [2] 肖振宇,刘珂,朱立鹏. 无人机间毫米波阵列通信技术[J]. 通信学报, 2022, 43(10): 196-209.  
XIAO Z Y, LIU K, ZHU L P. Millimeter-wave array enabled UAV-to-UAV communication technology[J]. Journal on Communications, 2022, 43(10): 196-209. (in Chinese)
- [3] 李松亭,陈利虎. mMIMO 毫米波高速通信系统强鲁棒性技术研究综述[J]. 电子学报, 2023, 51(12): 3643-3655.  
LI S T, CHEN L H. A review of the robust technology of mMIMO millimeter-wave high-speed communication system[J]. Acta Electronica Sinica, 2023, 51(12): 3643-3655. (in Chinese)
- [4] 陈喆,王品清,周培根,等. 基于 45 nm CMOS SOI 工艺的毫米波双频段低相噪压控振荡器设计[J]. 电子学报, 2024, 52(7): 2161-2169.  
CHEN Z, WANG P Q, ZHOU P G, et al. Design of a millimeter-wave dual-band low phase noise VCO in 45 nm CMOS SOI process[J]. Acta Electronica Sinica, 2024, 52(7): 2161-2169. (in Chinese)
- [5] 沈瑞亮,冯文杰,倪啸宇,等. 基于间隙波导的毫米波宽带定向耦合器[J]. 电子学报, 2023, 51(8): 2118-2123.  
SHEN R L, FENG W J, NI X Y, et al. Millimeter-wave broadband directional coupler based on gap waveguide[J]. Acta Electronica Sinica, 2023, 51(8): 2118-2123. (in Chinese)
- [6] FU X N, ZHANG Z, GUO C G, et al. A compact SIW-fed antenna with wide-angle coverage and beam steering capability for enhanced mmW-UAV communication[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2025, 74(7): 10761-10771.
- [7] 周炳朋,马珊珊. 面向 6G 毫米波通信感知一体化的机动目标联合定位与测速[J]. 通信学报, 2023, 44(3): 81-92.  
ZHOU B P, MA S S. Simultaneous vehicular location and velocity detection towards 6G integrated communication and sensing[J]. Journal on Communications, 2023, 44(3): 81-92. (in Chinese)
- [8] MAHDIPOUR H, LAVIADA J, LAS-HERAS ANDRÉS F, et al. Leveraging complex-valued federated learning for accurate and privacy-respectful threat detection based on millimeter-wave imaging[J]. IEEE Access, 2025, 13: 91581-91594.
- [9] WANG M, WEI S J, LIANG J D, et al. RMIST-net: Joint range migration and sparse reconstruction network for 3-D mmW imaging[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 5205117.
- [10] IZUMI R, SUZUKI S, ASADA M. 1.98 THz resonant-tunneling-diode oscillator with reduced conduction loss by thick antenna electrode[C]//2017 42nd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. Piscataway: IEEE, 2017: 1-2.
- [11] KOYAMA Y, KITAZAWA Y, YUKIMASA K, et al. A high-power terahertz source over 10 mW at 0.45 THz using an active antenna array with integrated patch antennas and resonant-tunneling diodes[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2022, 12(5): 510-519.
- [12] AL-KHALIDI A, ALHARBI K H, WANG J, et al. Reso-

nant tunneling diode terahertz sources with up to 1 mW output power in the J-band[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2020, 10(2): 150-157.

- [13] CIMBRI D, WANG J, AL-KHALIDI A, et al. Resonant tunneling diodes high-speed terahertz wireless communications - a review[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2022, 12(3): 226-244.
- [14] ZHANG R, CHEN Z, LI Z K, et al. A wide tuning range low-phase-noise ku/ka dual bands SiGe VCO based on transformer-coupled tank[J]. IEEE Microwave and Wire-

less Components Letters, 2022, 32(5): 437-440.

- [15] WANG R M, LI J G, SHI C Q, et al. A 25-37GHz VCO employing stacked-coupled switched inductor and co-tuned buffer in 55nm CMOS for multi-band 5G mmW applications[C]//2021 IEEE 20th Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems. Piscataway: IEEE, 2021: 37-39.
- [16] WANG J, WANG L, LI C, et al. 28 GHz MMIC resonant tunnelling diode oscillator of around 1mW output power[J]. Electronics Letters, 2013, 49(13): 816-818.

#### 作者简介



刘 军 男,1989年8月出生于山东省寿光市. 中国电子科技集团公司第五十四研究所高级工程师. 主要研究方向为太赫兹芯片设计、太赫兹封装技术、太赫兹通信系统等.  
E-mail: lj\_bit@163.com



宋瑞良 男,1980年8月出生于天津市. 中国电子科技集团公司第五十四研究所正高级工程师. 主要研究方向为太赫兹射频前端、太赫兹系统及应用等.  
E-mail: songruiliang@hotmail.com

## 勘 误

本刊2024年第52卷第10期《动态步长卷积及其层间可解释性方法》(作者:张淑芳,郭子林,丁文鑫,罗曦哲,郭继昌)一文中,DOI应为“10.12263/DZXB.20231093”. 特此更正.

《电子学报》编辑部