

文章编号: 2095-4980(2024)08-0828-07

RTD 太赫兹探测器与片上天线的匹配技术

吕佳琦^{ab}, 苏娟^{ab}, 谭为^{*ab}

(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: 高信息传输速率和大带宽容量的太赫兹通信被认为是实现 6G 的关键技术, 这需要高效、稳定和紧凑的太赫兹源和探测器。为提升探测性能, 研究了一种共振隧穿二极管(RTD)与缝隙天线片上集成的准光式太赫兹探测器。针对电路的高频损耗和寄生效应问题, 采用协同考虑阻抗匹配因子和天线辐射效率的设计准则, 设计了 0.67 THz 的小偏压 RTD 偏馈式探测器。采用高频结构仿真器(HFSS)和先进设计系统(ADS)软件联合仿真表征其探测性能, 当输入功率为 -30 dBm 时, 该探测器在 0.67 THz 的电流灵敏度达 2.349 A/W, 相比微波段采用阻抗匹配因子最大的设计准则, 灵敏度提升了 28.01%。

关键词: 太赫兹探测器; 共振隧穿二极管; 缝隙天线; 阻抗匹配

中图分类号: TN82

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023422

Matching technology of resonant tunneling diode terahertz detector and on-chip antenna

LYU Jiaqi^{ab}, SU Juan^{ab}, TAN Wei^{*ab}

(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: Terahertz communication with high information transmission rate and large bandwidth capacity is considered as a key technology to achieve 6G communication, which requires efficient, stable and compact terahertz sources and detectors. In order to improve the detection performance, the quasi-optical terahertz detector based on integration of Resonant Tunneling Diode(RTD) and on-chip slot antenna is studied. Aiming at the problems of increased loss and parasitic effects of the circuit at high frequencies, a design criterion that jointly considers impedance match factor and antenna radiation efficiency is proposed, and a RTD detector at a small bias voltage is designed at 0.67 THz. The detection performance is characterized by co-simulating of High Frequency Structure Simulator(HFSS) and Advanced Design System(ADS). The current sensitivity of the detector at 0.67 THz is about 2.349 A/W at the input power of -30 dBm. Compared with the design scheme of maximizing impedance match factor at microwave frequencies, the sensitivity is increased by 28.01%.

Keywords: terahertz detector; Resonant Tunneling Diode; slot antenna; impedance matching

太赫兹(THz)波是指频率在 0.1~10 THz 范围内的电磁波, 其位于电磁波谱的微波和红外波段之间, 处于电子学领域向光子学领域的过渡区。由于缺乏高效的辐射源和高灵敏的探测器, 电磁波谱的“太赫兹间隙(THz gap)”在很长一段时间内并未得到有效利用。近年来, 随着器件技术的进步, 太赫兹系统在系统体积、复杂性及成本方面都有了显著改善, 下一代太赫兹源和探测器的稳定可用性提升, 使“太赫兹间隙”逐渐缩小。作为太赫兹技术应用的核心器件之一, 太赫兹探测器的功能是接收太赫兹信号并将其转换为可读信号。太赫兹探测技术的发展源于 20 世纪初热电偶的光谱应用, 从 20 世纪 70 年代至今, 涌现出各式太赫兹探测器: 基于热效应的高莱探测器和测辐射热计、肖特基势垒二极管整流探测器、等离子体类型的场效应晶体管探测器等^[1]。近几十年来, 太赫兹探测器不断丰富和发展, 旨在实现高灵敏度、低等效噪声功率、高响应速度、宽探测频带、室温可工作和

收稿日期: 2023-12-22; 修回日期: 2024-01-17

*通信作者: 谭为 email:tanwei_mtrc@caep.cn

紧凑小型化等性能^[2]。

共振隧穿二极管(RTD)是一种既可用于太赫兹振荡器,又可用于太赫兹探测器的半导体器件,在太赫兹无线通信系统中具有很大的应用潜力^[3]。当工作在负微分电阻区(Negative Differential Resistance, NDR)时,RTD 可作为太赫兹振荡源,具有室温工作、功耗低、易集成和覆盖频率较宽等优点,可用于太赫兹无线通信系统中的发射机^[4];当施加偏压在正阻区(Positive Differential Resistance, PDR)时,利用强非线性特性,RTD 可实现高灵敏度的太赫兹探测^[5]。通过调节工作偏压,RTD 可同时作为太赫兹信号的发射机和接收机,进一步实现单片电路上太赫兹信号的收发,有望在太赫兹频率范围内的低成本和短距离无线通信中发挥重要作用。本文以实现高灵敏度太赫兹探测器为目标,从阻抗匹配和天线辐射效率的角度出发,深入研究 RTD 与缝隙天线片上集成的太赫兹探测器的灵敏度提升方法,提出了工作在小偏压区的 RTD 探测器新模式,为太赫兹通信收发机的进一步发展提供参考。

1 RTD 及探测器的基本原理

1.1 RTD 的基本结构及 I-U 特性

作为一种垂直传输单极双端半导体有源器件,RTD 的核心结构为由发射极势垒-势阱-集电极势垒构成的双势垒量子阱结构(Double Barrier Quantum Well, DBQW),其与未掺杂或轻掺杂隔离层、发射极/集电极层、高掺杂半导体材料接触层、衬底和欧姆电极共同构成 RTD 器件的典型层结构,如图 1 所示。在不同外加偏压下,DBQW 结构的能级发生变化^[6],形成了 RTD 输出电流与偏压之间的 I-U 特性关系,如图 2 所示。峰值电压 U_p 对应于势阱中共振能级与发射极的导带底对准时的偏压,此时 RTD 的电流达到峰值 I_p 。随着偏压的进一步增大,共振能级下移至发射极导带以下,电流减小至谷值 I_v ,从而形成了 U_p 至 U_v 之间的负微分电阻区。

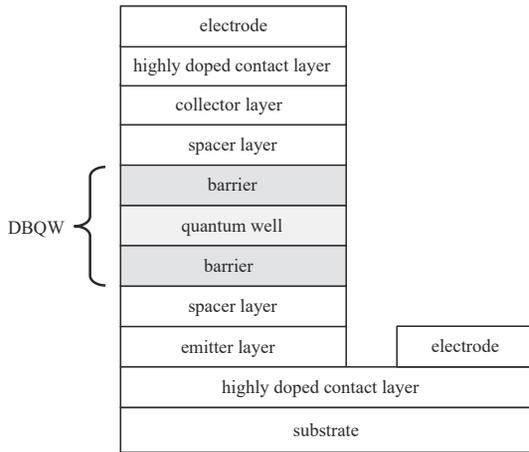


Fig.1 Typical layer structures of RTD
图 1 RTD 的典型层结构图

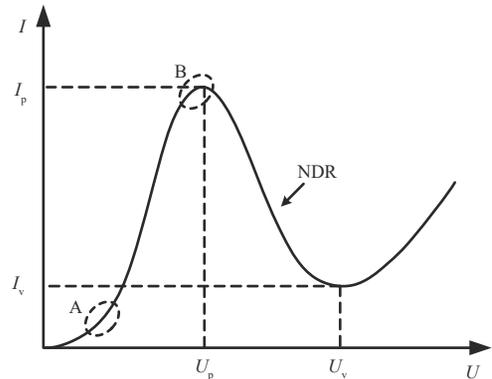


Fig.2 I-U characteristics of RTD
图 2 RTD 的 I-U 特性曲线图

1.2 RTD 探测器的工作原理

RTD 利用直流 I-U 曲线正阻区的非线性特性实现探测功能。在探测电路中,RTD 两端的电压由偏置电压和交流小信号电压组成: $U = U_0 + u_0 \cos \omega_0 t$ 。对 RTD 的直流 I-U 曲线进行泰勒级数展开^[7],可得二极管电流为:

$$I(U) = I(U_0) + u_0 \cos \omega_0 t \frac{dI}{dU} \Big|_{U_0} + \frac{u_0^2 \cos^2 \omega_0 t}{2} \times \frac{d^2 I}{dU^2} \Big|_{U_0} + \dots = I(U_0) + \frac{u_0^2}{4} \times \frac{d^2 I}{dU^2} \Big|_{U_0} + u_0 \cos \omega_0 t \frac{dI}{dU} \Big|_{U_0} + \frac{u_0^2 \cos(2\omega_0 t)}{4} \times \frac{d^2 I}{dU^2} \Big|_{U_0} + \dots \quad (1)$$

式中: $I(U_0)$ 为偏置电流; $\frac{u_0^2}{4} \times \frac{d^2 I}{dU^2} \Big|_{U_0}$ 为直流整流电流。输出电流中还包含基波和高次谐波的交流信号,经过低通滤波器滤除,提取出输出电流中的整流分量,通过测试输出直流分量实现太赫兹信号的功率检测。

对于整流式太赫兹探测器,表征性能的主要指标为探测灵敏度和等效噪声功率(Noise Equivalent Power, NEP)。电流探测灵敏度 β_i (单位 A/W) 定义为在给定输入交流功率下直流输出电流变化的量度:

$$\beta_i = \frac{\Delta I_{dc}}{P_{in}} = \frac{1}{2} \times \frac{d^2 I/dU^2}{dI/dU} \quad (2)$$

等效噪声功率(单位 $W/Hz^{0.5}$)定义为电流噪声密度与电流灵敏度之比:

$$P_{NE} = \frac{i_n}{\beta_i} \quad (3)$$

本文研究的 RTD 探测器工作在小偏压情况下, 其噪声主要包括电阻热噪声和电流散粒噪声, 电流噪声表示为:

$$i_n = \sqrt{\frac{4kT}{R_j + R_s}} + \sqrt{2eI_d} \quad (4)$$

式中: k 为玻尔兹曼常数; T 为绝对温度; e 为电子电荷; I_d 为偏置电流; R_j 为 RTD 的结电阻; R_s 为 RTD 的串联电阻。

为提高探测器灵敏度, 必须尽可能提高式(1)中的整流电流。从两方面进行分析: 一是和器件相关的非线性项。由式(2)可知探测器的本征电流灵敏度与其成正比, 该项和直流偏置点有关。图 2 所示的 $I-U$ 曲线中, 非线性最强的位置出现在峰值附近(B 区), 也是 RTD 探测器比较常用的工作区^[8], 但电流噪声大, 功耗大且易进入负阻区产生振荡; 而小偏压区域(A 区)的电流噪声小且工作稳定, 便于实现小信号的检测。因此, 本文首先从器件层面研究了增强小偏压下 RTD 本征电流灵敏度的可行性^[9]。考虑到 RTD 的 $I-U$ 特性与器件的能带结构紧密相关, 从物理原理出发, 基于电子共振隧穿过程, 构建了一种更为精确的 $I-U$ 非线性物理模型, 模型中包含了能带结构参数。基于该模型, 通过减小势阱厚度提升共振隧穿能级, 并同步增大势垒厚度抑制非共振隧穿电流。实验结果表明, 该能带结构调控有效增强了直流非线性, 相应本征电流灵敏度约提升 6 倍, 达到了 $6.74 A/W$ ^[9]。

实现探测灵敏度提升的另一途径是改善与电路相关的交流信号幅度项。其与天线的阻抗匹配、电路结构设计相关。本文的工作重点是通过对小偏压 RTD 与天线集成的设计提升太赫兹探测器性能。

2 RTD 与缝隙天线集成的分析与设计

2.1 RTD 探测器灵敏度分析

图 3 为 RTD 探测器的等效电路图。RTD 由结电阻 R_j 、结电容 C_j 和串联电阻 R_s 组成的电路表示, 阻抗为 $Z_{RTD} = R_{RTD} + jX_{RTD}$; U_{RTD} 为 RTD 两端电压; 天线阻抗为 $Z_A = R_A + jX_A$, 由于互易性, 天线的阻抗在接收和发射时是一致的; I_A 为输入电流; U_A 为激发电压。RTD 与接收天线集成, 为使传输到 RTD 的功率尽可能多, RTD 的阻抗 Z_{RTD} 与天线阻抗 Z_A 需共轭匹配^[10]。在图 2 所示的 B 区峰值附近, RTD 的结电阻接近无穷大, 与天线的阻抗匹配十分困难, 传输给 RTD 的功率损失较多。而工作在小偏压下, 阻抗匹配设计较之更加可行。

传输到 RTD 的功率为:

$$P_{RTD} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}\{U_{RTD} I_A^*\} = \frac{1}{2} \times \frac{|U_A|^2}{(R_A + R_{RTD})^2 + (X_A + X_{RTD})^2} R_{RTD} \quad (5)$$

传输给 RTD 的功率与最大传输功率(共轭匹配)之比定义为阻抗匹配因子 q :

$$q = \frac{4R_A R_{RTD}}{(R_A + R_{RTD})^2 + (X_A + X_{RTD})^2} \quad (6)$$

反射系数 S_{11} 为:

$$|S_{11}|^2 = 1 - q = \left| \frac{Z_{RTD} - Z_A^*}{Z_{RTD} + Z_A} \right|^2 \quad (7)$$

图 4 为小偏压下 RTD 的阻抗随频率变化图。可以看出, RTD 的阻抗实部随频率增大而减小。在低频段, RTD 的阻抗实部较大, 与天线的阻抗匹配相对容易; 而在高频段, 由于天线与 RTD 的寄生电阻和损耗越来越显著,

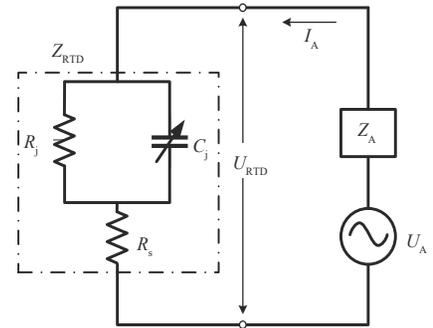


Fig.3 Equivalent circuit of RTD detector

图 3 RTD 探测器等效电路图

二者匹配难度大大增加。在现有的文献和研究中^[11-14]，RTD 探测器大多工作在 0.3 THz 附近，其电路设计主要为 RTD 与带有 1/4 波长阻抗变换器的蝶形天线集成。但在 0.6 THz 以上，RTD 的阻抗实部仅为几欧(见图 4)，显著低于蝶形天线的阻抗实部。经仿真后发现，采用此种天线结构设计的 0.67 THz 探测器阻抗匹配效果不佳，表明在 0.3 THz 时所使用的天线结构已不再适用，需探寻其他更易于在太赫兹高频段匹配的天线结构。

当 RTD 作为太赫兹振荡源时，多种不同天线类型(如缝隙天线、贴片天线、薄膜天线和波导天线等)的振荡器得到深入研究^[15-16]，其中缝隙天线 RTD 振荡器实现了目前最高振荡频率 1.98 THz^[17]。鉴于其电路形式无需传输线集成和低互连损耗的优势^[18-19]，本文采用改进的缝隙天线设计 0.6 THz 以上的 RTD 探测器，探索缝隙天线与 RTD 阻抗匹配的最优设计形式。

天线接收的功率为：

$$P_{in} = \frac{1}{2} R_A |I_A|^2 \tag{8}$$

该功率包括辐射功率和欧姆损耗两部分：

$$P_{in} = \frac{1}{2} R_{radiation} |I_A|^2 + \frac{1}{2} R_{ohmic} |I_A|^2 \tag{9}$$

辐射效率为辐射功率与天线输入功率之比：

$$E_{radiation} = \frac{\frac{1}{2} R_{radiation} |I_A|^2}{\frac{1}{2} R_A |I_A|^2} = \frac{R_{radiation}}{R_{radiation} + R_{ohmic}} \tag{10}$$

在微波段，通常 RTD 与天线阻抗匹配是在天线谐振点附近，此时天线的辐射效率接近 100%，一般忽略其对探测灵敏度的影响，此时阻抗匹配程度成为探测灵敏度的主要影响因素，传统设计思路是追求阻抗匹配因子 q 最大。在太赫兹高频段，如 0.67 THz，天线在谐振点附近的阻抗实部非常大，RTD 的阻抗实部仅为几欧，为实现阻抗匹配，需调整天线，使其在 0.67 THz 时的阻抗实部减小。可行的办法是减小天线尺寸，使谐振点由 0.67 THz 向更高频处移动。图 5 为 RTD 的共轭阻抗和天线阻抗随频率的变化图，在 0.67 THz 处，RTD 的阻抗约为 $(2.838 - j47.44) \Omega$ ，与缝隙天线阻抗匹配效果较好；但缝隙天线工作在 0.67 THz 时偏离谐振点较远，天线辐射效率仅为 40.5%，意味着有一半以上的天线接收能量转化为热损耗，故此时不能忽略辐射效率变化导致的探测器灵敏度变化。因此，要提高探测器在 0.67 THz 左右的灵敏度，必须综合考虑阻抗匹配与辐射效率两个主要因素，而不能仅沿用微波段的阻抗匹配因子 q 最大法。为此，提出综合考虑阻抗匹配因子与辐射效率乘积的设计方法，定义为总效率 α ：

$$\alpha = (1 - |S_{11}|^2) \times E_{radiation} \tag{11}$$

2.2 RTD 探测器仿真建模

基于上述分析，对 RTD 探测器建模，利用全波三维电磁仿真软件 HFSS 对探测器的无源结构进行设计。基于 RTD 和缝隙天线的三维结构尺寸、各层掺杂浓度等参数，建立 RTD 与缝隙天线集成的三维模型。对于探测器的有源部分，利用 RTD 的本征参数，在 ADS 仿真软件中建立 RTD 直流非线性的 SPICE 模型，用压控电流源 $I_f(U_f)$ 表示结电阻

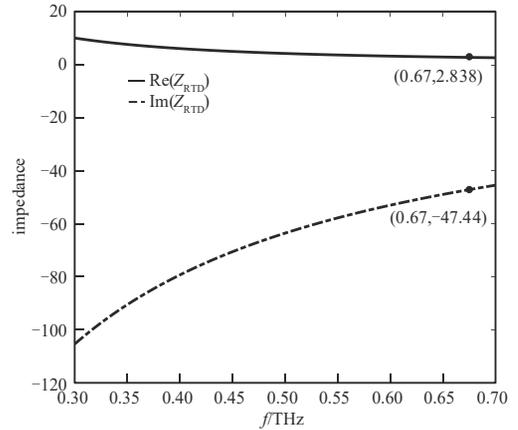


Fig.4 Relationship between frequency and RTD impedance
图 4 RTD 阻抗随频率变化图

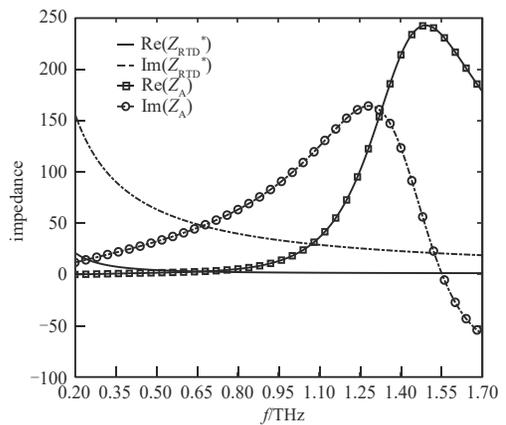


Fig.5 RTD conjugate impedance and slot antenna impedance versus frequency
图 5 RTD 共轭阻抗和缝隙天线阻抗与频率的关系图

R_j , 使用 ADS 中的符号定义模块描述 RTD 的非线性特征。在 HFSS 中进行相应仿真设置, 提取 0.67 THz 工作频段的阻抗参数文件, 再结合 ADS 中 RTD 的 SPICE 参数模型, 组成工作于太赫兹频段完整的探测电路模型, 如图 6 (a)所示。图 6(b)为缝隙天线的平面结构图, L 和 W 分别为天线的长度和宽度, S 为馈电点与中心的距离, 偏馈量表示为 $\delta=S/(L/2)$, 本文采用 RTD 与缝隙天线偏馈集成的方法实现总效率 α 的提升。

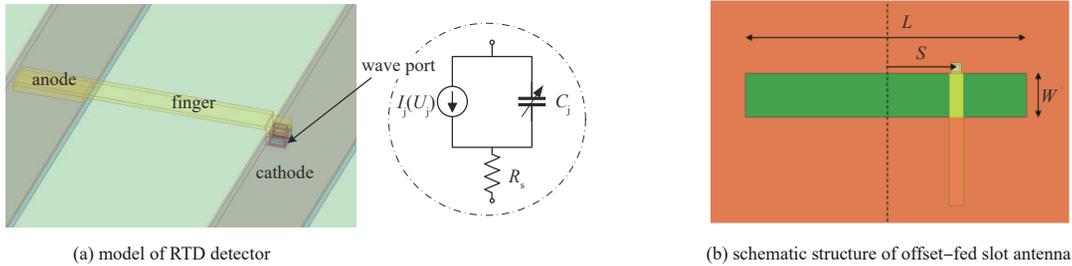
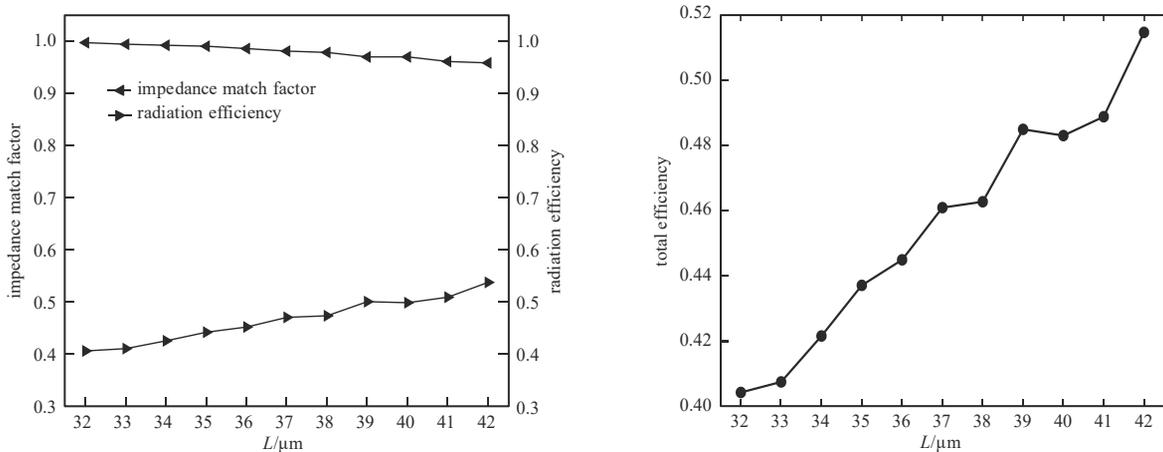


Fig.6 Model of RTD detector and structure of offset-fed slot antenna

图 6 RTD 探测器模型和偏馈缝隙天线结构

3 仿真结果与分析

在仿真软件中建立好模型, 首先将 RTD 置于缝隙天线中心处馈电, 调整缝隙天线尺寸, 使其与 RTD 在 0.67 THz 有良好的阻抗匹配。在太赫兹高频段, 探测器存在显著的寄生效应和高损耗问题, 要求同时考虑阻抗匹配和辐射效率对探测灵敏度的影响。图 7(a)为阻抗匹配因子与辐射效率、缝隙天线尺寸关系图。设天线宽度为 $6.1 \mu\text{m}$ 并保持该参数不变, 增加天线长度, 天线谐振点由高于 0.67 THz 处向更低频移动。由于离谐振点越近, 辐射效率越高, 故在 0.67 THz 时, 随着天线长度的增加, 辐射效率也逐渐升高。由 2.1 节分析可知, 在 0.67 THz 时阻抗匹配因子和辐射效率两个因素相互制约。如图 7(a)所示, 随着天线长度的增加, 阻抗匹配因子变小, 辐射效率增加, 两者的变化随天线长度的增加呈现出相反趋势。反射系数为 -26 dB 即阻抗匹配因子为 0.997 6 时, 辐射效率仅为 40.51%, 当辐射效率上升时, 阻抗匹配效果变差, 因此需综合考虑二者, 即总效率 α 提高灵敏度。从探测器反射系数为 -26 dB 时的传统最优设计出发, 适当增加天线长度, 辐射效率提升, 但阻抗匹配效果会显著恶化。为解决该问题, 本文提出调整 RTD 馈电位置的方法, 使天线与 RTD 的阻抗匹配效果在 0.67 THz 时得到一定修复。从图 7(b)中可以看出, 通过增加天线尺寸和优化 RTD 偏馈位置, 如表 1 所示, 综合考量辐射效率与阻抗匹配因子, 总效率逐渐升高。由此可见, 在容忍一定程度阻抗匹配效果恶化的情况下获得辐射效率提升, 可以使探测器总效率提升。



(a) dependence of impedance match factor and radiation efficiency on slot antenna size

(b) dependence of total efficiency on slot antenna size

Fig.7 Impedance match factor, radiation efficiency and total efficiency as function of offset for various values of antenna length at 0.67 THz

图 7 0.67 THz 时, 不同天线长度和偏馈量下的阻抗匹配因子、辐射效率和总效率

当天线长度从 $32 \mu\text{m}$ 增加到 $42 \mu\text{m}$ 时, RTD 偏馈量为 53.81%, 在 0.67 THz 时反射系数约为 -13.84 dB , 较未偏馈时的阻抗匹配因子减小, 但辐射效率增大, 总效率比阻抗匹配最佳时要提升 27.35%。结合 ADS 软件进行灵敏度仿真, 仿真结果表明, 在 0.67 THz, 输入功率为 -30 dBm 时, 传统设计思路下最优结构(天线长度为 $32 \mu\text{m}$, 中心

馈电)的探测灵敏度为 1.835 A/W, NEP 为 4.019 pW/Hz^{0.5}, 而本文设计的最优结构(天线长度 42 μm, 偏馈 53.81%)的探测灵敏度为 2.349 A/W, NEP 为 3.140 pW/Hz^{0.5}, 与前者相比, 灵敏度提升 28.01%, NEP 约减小 21.87%, 如图 8 所示。

表 1 0.67 THz 时, 不同天线长度和偏馈量下的反射系数、辐射效率和总效率

Table1 Reflection coefficient, radiation efficiency and total efficiency as function of offset for various values of antenna length at 0.67 THz

$L/\mu\text{m}(W=6.1\ \mu\text{m})$	$\delta/\%$	$ S_{11} /\text{dB}$	$E_{\text{radiation}}/\%$	α
32	0	-26.12	40.51	0.404 17
33	15.15	-22.66	40.96	0.407 40
34	24.12	-21.33	42.46	0.421 50
35	30.29	-20.37	44.11	0.437 04
36	35.00	-18.59	45.11	0.444 89
37	39.46	-17.30	46.96	0.460 91
38	43.68	-16.74	47.27	0.462 71
39	46.15	-15.26	49.98	0.484 94
40	50.00	-15.27	49.78	0.483 03
41	51.71	-14.14	50.84	0.488 82
42	53.81	-13.84	53.69	0.514 72

综上, 在太赫兹高频段, 中心结构 RTD 与适当尺寸的缝隙天线可实现良好的阻抗匹配, 但最高灵敏度受限于较低的辐射效率。采用增大缝隙天线尺寸叠加 RTD 偏馈结构的设计方法, 虽一定程度上牺牲部分阻抗匹配效果, 但辐射效率的提高会总体提升探测灵敏度。因此, 对于提升太赫兹高频段的探测性能, 较传统微波段设计方法(阻抗匹配因子最大法), 本文提出的综合考虑阻抗匹配和辐射效率的设计方案(总效率最大法)优越性明显。

4 结论

本文针对 RTD 探测器工作在峰值电压附近时电流噪声大、功耗大和易进入负阻区产生振荡的问题, 提出基于小偏压下非线性增强的 RTD 来实现太赫兹探测器的新模式。从 RTD 与片上天线集成的电路结构出发, 深入分析了在太赫兹高频段 RTD 阻抗实部减小和电路寄生损耗增大造成的匹配困难问题, 提出了协同考虑阻抗匹配因子和天线辐射效率的优化设计方案。针对 0.67 THz 的探测器设计, 采用 RTD 与缝隙天线进行偏馈集成的方法, 通过增大缝隙天线长度提高辐射效率, 并调整偏馈量优化阻抗匹配, 最终设计的探测器灵敏度达 2.349 A/W, NEP 低至 3.140 pW/Hz^{0.5}, 相比沿用微波段阻抗匹配因子最大的设计方法, 灵敏度提升 28.01%, NEP 降低 21.87%。小偏压 RTD 太赫兹探测器的研究, 展现了太赫兹探测技术研究的新视角, 为 RTD 太赫兹通信收发机的发展及应用提供了重要参考。

参考文献:

- [1] LEWIS R A. A review of terahertz detectors[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2019, 52(43): 433001. doi:10.1088/1361-6463/ab31d5.
- [2] 张玉平, 唐利斌, 刘玉菲, 等. 太赫兹新型探测器的研究进展及应用[J]. 红外与毫米波学报, 2020, 39(2): 191-210. (ZHANG Yuping, TANG Libin, LIU Yufei, et al. The research progress and application of novel terahertz detectors[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2020, 39(2): 191-210.) doi:10.11972/j.issn.1001-9014.2020.02.007.
- [3] CIMBRI D, WANG Jue, 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. doi:10.1109/TTHZ.2022.3142965.
- [4] ASADA M, SUZUKI S. Terahertz emitter using resonant-tunneling diode and applications[J]. Sensors, 2021, 21(4): 1384. doi:10.3390/s21041384.
- [5] OSHIRO A, NISHIGAMI N, YAMAMOTO T, et al. PAM4 48-Gbit/s wireless communication using a resonant tunneling diode in the 300 GHz band[J]. IEICE Electronics Express, 2022, 19(2): 20210494. doi:10.1587/elex.18.20210494.
- [6] SUN Jianping, HADDAD G I, MAZUMDER P, et al. Resonant tunneling diodes: models and properties[J]. Proceedings of the

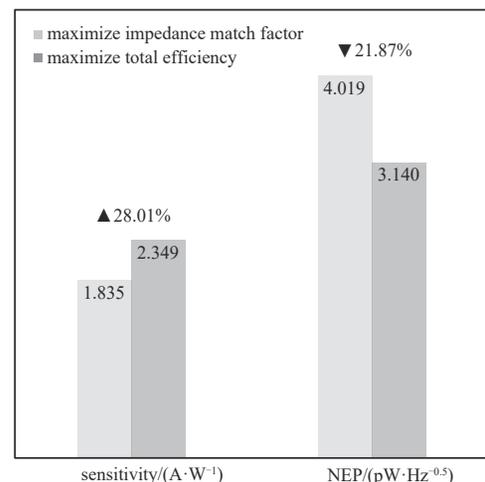


Fig.8 RTD detector performance under different design schemes
图8 不同设计方案下的RTD探测器性能

- IEEE, 1998,86(4):641–660. doi:10.1109/5.663541.
- [7] POZAR D M. Microwave engineering,international adaptation[M]. 4th ed. Hoboken,New Jersey,USA:Wiley, 2021.
- [8] WEBBER J,NISHIGAMI N,KIM J,et al. Terahertz wireless communications using resonant tunneling diodes with radio-over-fibre[J]. Electronics Letters, 2019,55(17):949–951. doi:10.1049/el.2019.1840.
- [9] WANG Dongshuang,SU Juan,YI Hong,et al. Analytical modeling and Band-Structure engineering of resonant tunneling diode for biased terahertz detector[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2022,69(3):994–998. doi:10.1109/TED.2022.3143482.
- [10] BALANIS C A. Antenna theory: analysis and design[M]. 4th ed. Hoboken,New Jersey,USA:Wiley, 2016.
- [11] NAGATSUMA T,FUJITA M,KAKU A,et al. Terahertz wireless communications using resonant tunneling diodes as transmitters and receivers[C]// The third International Conference on Telecommunications and Remote Sensing. Luxembourg:SCITEPRESS, 2014:41–46. doi:10.5220/0005421000410046.
- [12] DIEBOLD S,NISHIO K,NISHIDA Y,et al. High-speed error-free wireless data transmission using a terahertz resonant tunneling diode transmitter and receiver[J]. Electronics Letters, 2016,52(24):1999–2001. doi:10.1049/el.2016.2941.
- [13] YU Xiongbin,KIM J Y,FUJITA M,et al. Efficient mode converter to deep-subwavelength region with photonic-crystal waveguide platform for terahertz applications[J]. Optics Express, 2019,27(20):28707–28721. doi:10.1364/OE.27.028707.
- [14] WEBBER J,OSHIRO A,IWAMATSU S,et al. 48 Gbit/s 8K video transmission using resonant tunneling diodes in 300 GHz band[J]. Electronics Letters, 2021,57(17):668–669. doi:10.1049/ell2.12219.
- [15] FEIGINOV M. Frequency limitations of resonant-tunneling diodes in sub-THz and THz oscillators and detectors[J]. Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves, 2019,40(4):365–394. doi:10.1007/s10762-019-00573-5.
- [16] OUREDNIK P,FEIGINOV M. Double-resonant-tunneling-diode bridge-less patch-antenna oscillators operating up to 1.09 THz[J]. Applied Physics Letters, 2022,120(18):090519.
- [17] IZUMI R,SUZUKI S,ASADA M. 1.98 THz resonant-tunneling-diode oscillator with reduced conduction loss by thick antenna electrode[C]// 2017 the 42nd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves(IRMMW-THz). Cancun, Mexico:IEEE, 2017:1–2. doi:10.1109/IRMMW-THz.2017.8066877.
- [18] YU Xiongbin,SUZUKI Y,VAN TA M,et al. Highly efficient resonant tunneling diode terahertz oscillator with a split ring resonator[J]. IEEE Electron Device Letters, 2021,42(7):982–985. doi:10.1109/LED.2021.3082577.
- [19] VAN T M,SUZUKI Y,YU X,et al. Structure dependence of oscillation characteristics of structure-simplified resonant-tunneling-diode terahertz oscillator[J]. Applied Physics Express, 2022,15(4):042003. doi:10.35848/1882-0786/ac5b32.

作者简介:

吕佳琦(1998-),女,在读硕士研究生,主要研究方向为太赫兹半导体器件与电路 .email:13668147342@163.com.

苏娟(1984-),女,博士,副研究员,主要研究方向为太赫兹半导体器件与应用模块开发.

谭为(1985-),男,博士,副研究员,主要研究方向为太赫兹器件物理和微纳器件.