

基于 65 nm 标准 CMOS 工艺的 3.0 THz 探测器

方桐^{1,3}, 刘力源^{1,3*}, 刘朝阳^{1,3}, 冯鹏^{1,3}, 李媛媛^{2,3}, 刘俊岐^{2,3}, 刘剑^{1,3},
吴南健^{1,3}

(1. 中国科学院半导体研究所 半导体超晶格国家重点实验室, 北京 100083;

2. 中国科学院半导体研究所 半导体材料科学重点实验室, 北京 100083;

3. 中国科学院大学 材料与光电研究中心, 北京 100049)

摘要: 基于 Dyakonov 和 Shur 等离子体波振荡原理设计并流片制备了一种采用 65 nm 标准 CMOS 工艺的 3.0 THz 探测器, 探测器包括贴片天线、NMOS 场效应晶体管、匹配网络及陷波滤波器。探测器在室温条件下可达到 526 V/W 的响应率 (R_v) 和 73 pW/Hz^{1/2} 的噪声等效功率 (NEP)。采用该探测器和步进电机搭建了太赫兹扫描成像系统, 获得了太赫兹源出射光斑的远场形状, 光斑的半高宽 (FWHM) 为 240 μm; 并对聚甲醛牙签和树叶进行了扫描成像实验, 结果表明 CMOS 太赫兹探测器在成像领域有潜在的应用前景。

关键词: CMOS; 太赫兹; 太赫兹成像; 太赫兹探测器

中图分类号: TN386.1 文献标识码: A

A 3.0 THz detector in 65 nm standard CMOS process

FANG Tong^{1,3}, LIU Li-Yuan^{1,3*}, LIU Zhao-Yang^{1,3}, FENG Peng^{1,3}, LI Yuan-Yuan^{2,3}, LIU Jun-Qi^{2,3},
LIU Jian^{1,3}, WU Nan-Jian^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

3. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A 3.0 THz detector based on plasma-wave theory proposed by Dyakonov and Shur was designed and fabricated in 65 nm standard CMOS process, the detector consists of a patch antenna, a NMOS field effect transistor, a matching network, and a notch filter. The detector can achieve a room-temperature responsivity (R_v) of 526 V/W and a noise equivalent power (NEP) of 73 pW/Hz^{1/2}. The terahertz scanning imaging system was built with the detector and stepper motor, and the far-field shape of the terahertz source beam was obtained, the full width at half maximum (FWHM) of the beam is 240 μm; and the image of the polyformaldehyde toothpick and tree leaf were obtained through the scanning imaging system, it shows that CMOS terahertz detectors have potential applications in the imaging field.

Key words: CMOS, THz, terahertz imaging, terahertz detector

PACS: 07. 57. Kp, 42. 79. Pw, 84. 40. Ba, 85. 30. Tv, 85. 35. Be

收稿日期: 2019-05-08, 修回日期: 2019-12-01

Received date: 2019-05-08, Revised date: 2019-12-01

基金项目: 国家重点研发计划资助 (2016YFA0202200), 中国科学院青年创新促进会计划 (2016107), 北京市科技计划项目 (Z181100008918009).

Foundation items: Supported by the National Key R&D Program of China (2016YFA0202200); Youth Innovation Promotion Association Program; Chinese Academy of Sciences (2016107) and Beijing Municipal Science and Technology Project (Z181100008918009).

作者简介 (Biography): 方桐 (1992-), 男, 湖北武汉人, 博士研究生在读, 主要研究领域为 CMOS 太赫兹探测器及图像传感器. E-mail: fang-tong@semi.ac.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: liuly@semi.ac.cn

引言

太赫兹波是指频率范围为 0.1~10 THz (1 THz = 10^{12} Hz, $\lambda \sim 3\ 000\ \mu\text{m} \sim 30\ \mu\text{m}$) 的电磁波, 介于红外波和毫米波之间。太赫兹波具有许多独特的性质: 太赫兹波能透过许多干燥的、非金属、非极性的材料如纸张、塑料、纺织物等; 太赫兹波的光子能量很低, 属于非电离辐射, 不会对生物组织产生有害的电离辐射; 与毫米波相比, 太赫兹波频率更高, 波长更小, 具有更高的空间分辨率; 许多分子的震动、碰撞频率和等离子体振动频率在太赫兹波段, 对于许多物质有特定的光谱指纹; 太赫兹波容易被水吸收, 可用于检测水的分布。鉴于太赫兹波的上述独特性质, 太赫兹波成像在安全检查^[1]、生物医学成像^[2]、毒品和爆炸物检测^[3]、质量监控^[4]、无损检测^[4]等领域具有重要的应用价值。

太赫兹波探测是成像的基础, 传统的商用探测器主要有辐射热测量计、热释电探测器及高莱探测器。虽然这些探测器的响应率比较高且探测波长范围大, 但由于它们都是基于热探测原理, 所以响应速度很慢^[5], 不能测量快速变化的信号; 部分辐射热测量计需低温工作才可以达到较高响应率及低噪声性能^[6]。另外, 高莱探测器需配合使用调制器才能输出测量结果且其探测量程较小, 通常小于 $10\ \mu\text{W}$ ^[7]。与上述探测器相比, CMOS 太赫兹探测器可以在室温工作, 不需要额外调制, 具有较快的响应速度和可接受的响应率。此外, CMOS 太赫兹探测器还具有低成本、可阵列化、易于与读出电路进行片上集成等优点^[8]。基于等离子体波振荡原理的 CMOS 太赫兹探测器利用场效应晶体管 (FET) 探测太赫兹波, 其原理首先由 Dyakonov 和 Shur 提出, 该理论允许 FET 检测频率远超过其器件截止频率 (f_T) 的太赫兹波。探测器输出的直流电压信号正比于接收到的太赫兹辐射功率^[9]。Knap 等人首次采用 GaAs/AlGaAs 和 GaN/AlGaN 异质结 FET 和硅基 FET 检测太赫兹波^[10-11]。随后, 许多 CMOS 太赫兹波探测器相继被研制出来^[12-14], 其中有些可以实现实时太赫兹波成像^[13-14], 但是大多只能探测低于 1 THz 的太赫兹波。

太赫兹成像分为主动成像和被动成像。由于自然界中物体散射的太赫兹波信号非常微弱, 目前大部分太赫兹成像是主动成像, 即用太赫兹源照射物体, 探测器接收由物体反射或透射的太赫兹波进行成像, 接收到的太赫兹波信号强弱将直接影响成

像质量。随着太赫兹波频率的升高, 太赫兹波在大气中的衰减也会更加严重^[15-16], 从而探测器能接收到信号更小。从图 1 我们可以看到在 1 THz 以上时大部分频点的大气衰减达到了 10 dB/m, 即功率为 1 mW 的太赫兹波经过 1 m 的距离传输后, 将衰减为 0.1 mW。但在 3.0 THz 附近, 如图中圆圈所标注, 大气吸收相对较弱, 大约在 2~3 dB/m, 用于室内短距离成像时还能保证足够的功率。

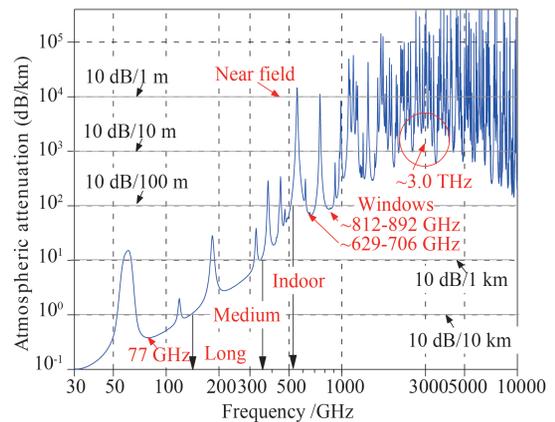


图 1 电磁波大气衰减图 (大气压力为 101.300 kPa、温度为 15°C、水汽密度为 7.5g/m^3)

Fig. 1 Electromagnetic wave attenuation map (Atmospheric pressure is 101.300 kPa, temperature is 15°C, and water vapor density is 7.5g/m^3)

基于 Dyakonov 和 Shur 等离子体波振荡原理设计并流片制备了一种采用 65 nm 标准 CMOS 工艺的太赫兹波探测器, 它可以探测 THz-QCL 激射出的 3.0 THz 太赫兹波。在 5 kHz 脉冲工作模式 THz-QCL 下测得的探测器的室温响应率为 526 V/W, 噪声等效功率 (NEP) 为 $73\ \text{pW/Hz}^{1/2}$ 。我们采用机械扫描对 THz-QCL 光源、聚甲醛牙签和树叶进行了成像, 获得了光源的远场光斑形状, 以及可清晰分辨的牙签超细毛刷和树叶茎络。

1 探测器设计

探测器的结构如图 2 所示。探测器包括一个 NMOS 场效应晶体管、一个集成的片上贴片天线、一个匹配网络和一个陷波滤波器^[8,17]。太赫兹波照射到片上天线, 经过匹配网络馈入到 NMOS 效应晶体管的源端; 栅极处接有一陷波滤波器, NMOS 管的漏极作为输出。

探测器的核心是 NMOS 场效应晶体管。根据 Dyakonov 和 Shur 理论^[9,10,18], 室温下, $\omega\tau < 1$ 时, 探测

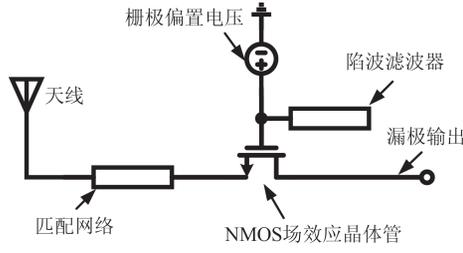


图2 探测器结构图

Fig. 2 Architecture of the detector

器工作在非共振模式,等离子体波在场效应晶体管的沟道中严重衰减,在到达漏端前衰减为零,并在源漏之间产生一直流电压大小为, $\Delta U = U_a^2/4(V_g - V_{th})$, U_a 为入射太赫兹波强度, V_g 为栅极电压, V_{th} 为阈值电压。当工作在非共振模式时,等离子体波在沟道中的传输模式可以近似用分布式电容和电阻模型来描述^[8,12-13,19-20]。我们将晶体管沟道划分为分布式电容和电导描述等离子体波在沟道中的传播^[20]。我们仿真了 65 nm CMOS 工艺、频率在 3.0 THz 下 NMOS 管沟道的模型。太赫兹波激励从 NMOS 管的源端给出,振幅设为 1 mV,得到如图 3 所示结果。图 3(a)横坐标为沟道长度,65 nm 工艺制成下的最小沟道长度为 60nm;纵坐标为时间,不同时刻入射的太赫兹幅度不一样。图 3(b)为我们取第一个峰值对应时刻的太赫兹波沟道衰减图,从图中可以看出太赫兹波在沟道内逐渐衰减,在到达漏极前就衰减为零。在 NMOS 晶体管沟道内 x 点处的电流 $I(x, t)$ 可写为^[21]:

$$I(x, t) = WC_{ox} [V_G - V(x, t) - V_{TH}] \mu_n \frac{\partial V(x, t)}{\partial x}, \quad (1)$$

C_{ox} 与 W 的乘积表示为单位长度的总电容, $V(x, t)$ 为 x 点处的沟道电势, V_G 为加在栅极上的电压, V_{TH} 为 NMOS 管的阈值电压,在源极加一幅值大小为 $U_a \cos \omega t$ 的信号,设在 $x = L_{eff}$ 处太赫兹波信号的幅值被衰减为零,公式(1)所对应的边界条件为 $V(0, t_1) = U_a \cos \omega t_1$ 和 $V(L_{eff}, t_1) = 0$ 。对公式(1)两边同时乘以 dx 并积分,可得:

$$\int_{x=0}^{x=L_{eff}} I(x, t_1) dx = \int_{V=U_a \cos \omega t_1}^0 WC_{ox} \mu_n [V_G - V(x, t) - V_{TH}] dV \\ = -WC_{ox} \mu_n (V_G - V_{TH}) U_a \cos \omega t_1 + \\ WC_{ox} \mu_n U_a^2 (\cos 2\omega t_1 + 1)/4, \quad (2)$$

等式右边包含一直流项 $\frac{1}{4} WC_{ox} \mu_n U_a^2$, 因此总电流 $I(x, t_1)$ 必定包含一直流 $I_1 = \frac{1}{4} \frac{W}{L_{eff}} C_{ox} \mu_n U_a^2$, 意味着有

一直流电流从沟道内 $x = L_{eff}$ 处流向源极,从 L_{eff} 处到源端的跨导可表示为 $G = \frac{W}{L_{eff}} C_{ox} \mu_n (V_G - V_{TH})$, 因此

在 $x = L_{eff}$ 处会有一感应电动势 $V(L_{eff}) = \frac{U_a^2}{4(V_G - V_{TH})}$, 由于

于漏极开路,所以漏极会有同样大小的直流电压信号输出,且该直流信号与探测到的太赫兹辐射功率成比例。结果和 Dyakonov 和 Shur 的等离子体波理论结果一致^[9-10,18]。因此 65 nm 工艺下 NMOS 晶体管是可以进行 3.0 THz 探测的,为了使从源端视入的高频阻抗尽量大,以提高场效应晶体管输出的电压信号^[8],我们使 NMOS 管栅极长度为 60 nm 宽度为 120 nm,这是该工艺中可用的最小尺寸器件。

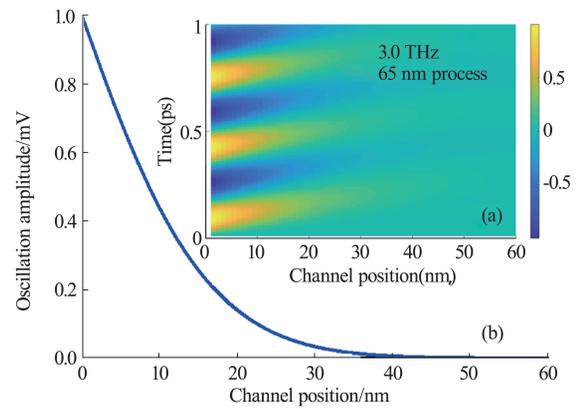


图3 NMOS 场效应晶体管沟道中太赫兹波衰减仿真图

Fig. 3 Simulation diagram of terahertz wave attenuation in NMOS field-effect transistor channel

天线的结构对探测器性能的影响非常大。设计出能够在 3.0 THz 下工作并具有较高响应的天线至关重要。目前在 CMOS 工艺下实现的太赫兹探测器采用的片上天线有螺旋天线^[22], 环形天线^[13], 折叠式偶极子天线^[23] 和贴片天线^[12]。我们选择贴片天线,与其他设计相比带宽虽然窄但具有较高的辐射效率。

通常贴片天线由一个长约等于 $\lambda/2$ (λ 为介质中的波长) 的辐射贴片和一个较大的接地平面构成^[24]。文献[14]报道的 860 GHz CMOS 探测器,采用的辐射贴片大小为 $67 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$, 接地平面大小为 $220 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ 。当工作在 3.0 THz 时,由于短波长和介质层的高介电常数,天线尺寸会减小。CMOS 65 nm 工艺有 9 层金属作为互连线,我们选择最底层金属层 M1 作为贴片天线的接地平面。辐射贴片与接地平面之间的距离会大大影响天线的特

性,因此我们仿真研究了不同金属层构造辐射贴片的天线性能,分别选用 M4 到 M9 的金属层作为天线的辐射贴片。

图 4 是仿真的天线归一化功率及辐射效率与金属层的变化关系。我们发现,当天线的接收功率相近时,顶层(M9)的辐射功率和辐射效率最高,其仿真的辐射效率为 70%。辐射贴片和接地平面之间介电绝缘体的总厚度为 $4.6 \mu\text{m}$ 。辐射贴片的长度为 $30 \mu\text{m}$,宽度为 $2 \mu\text{m}$ 。连接天线中心的顶部金属和底部金属之间的通孔可为 NMOS 的源极提供一个直流地。由于天线的中心是零场强(H 平面),通孔不会降低天线的电磁性能。这种结构不需要通过天线产生额外的源极偏置,从而降低了系统复杂性,有利于实现阵列^[8,13]。

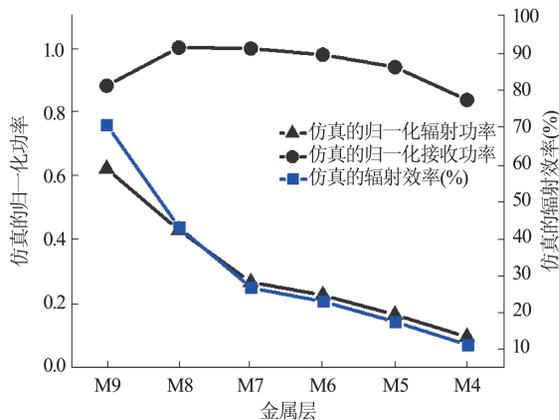
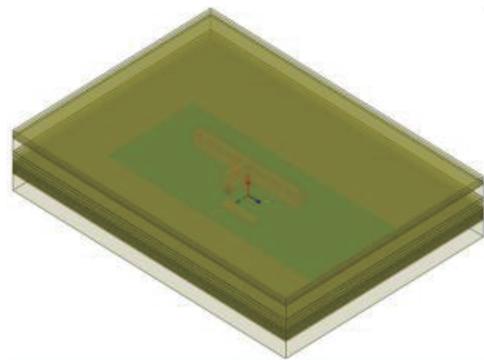
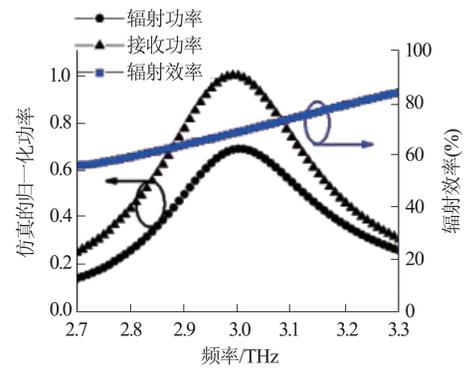


图 4 仿真的归一化功率和辐射效率随金属层的变化曲线
Fig. 4 Simulated normalized power and radiation efficiency versus metal layer

为了提高功率传输效率,我们使用微带传输线和金属层之间的通孔来形成匹配网络。传输线由顶层金属构成,长 $5 \mu\text{m}$ 宽 $2 \mu\text{m}$,顶部金属层和底部金属层之间的通孔长度是 $4.6 \mu\text{m}$ 。此外,还要考虑焊盘和压焊线的影响。在太赫兹频率下,由于金属线的寄生效应,栅极不是一个理想的交流地,造成栅极电压波动。我们在 NMOS 管的栅极放置了一个陷波滤波器,如图 5(a)所示,陷波滤波器的长度为 $9 \mu\text{m}$,宽度为 $2 \mu\text{m}$,使用第六层金属构成,它能在栅极形成一个对太赫兹波的交流地。贴片天线的完整仿真模型(a)及其仿真的归一化功率及辐射效率如图 5(b)所示,仿真的天线中心工作频点约在 3.0 THz 附近。



(a)



(b)

图 5 (a)贴片天线的仿真模型,(b)模型(a)的归一化功率及辐射效率仿真结果

Fig. 5 (a) Simulation model of the patch antenna and (b) Simulated normalized power of model (a)

2 探测器性能测试

我们采用 CMOS 65 nm 工艺流片制备了探测器阵列,图 6 为包含多种天线尺寸的太赫兹探测器芯片照片及本文中所测像素的放大照片,芯片包括焊盘在内尺寸为 $1.5 \times 1.5 \text{ mm}^2$ 。目前,实验室使用的返波管^[25]和倍频器^[26]太赫兹源,激射频率大多数在 1.0 THz 以下且随着频率的升高其输出功率逐渐下降,在 1.0 THz 附近功率只有数微瓦。近年来,随着太赫兹量子级联激光器 (THz-QCL) 的发展,THz-QCL 可以在几个 THz 处产生很强功率的辐射。2014 年英国的 E. H. Linfield 小组研制了一款激射频率为 3.4 THz、脉冲峰值功率高达 1.01 W 的 THz-QCL^[27]。因此测试 3.0 THz 的探测器采用 THz-QCL 是最佳选择。由于频率越高对应的波长越短,以 3.0 T 太赫兹波为例,真空波长为 $100 \mu\text{m}$,理论上空间分辨率可以达到 $50 \mu\text{m} (\lambda/2)$ 。因此,基于 THz-QCL 的成像系统可以在更大的动态范围实现微米级的图像空间分辨率。图 7 为单个探测器扫描光源

光斑的装置图。探测器输出电压由锁相放大器读出^[28],太赫兹光源需要周期性调制,且需要给锁相放大器一个参考频率。若采用连续型太赫兹光源,需要外加一个机械斩波器对太赫兹光源进行调制,这会增大系统复杂度。使用脉冲型THz-QCL无需外加机械斩波器,而采用脉冲电流源对QCL管芯进行驱动,实现THz-QCL周期性调制输出。图7脉冲电流源频率为5 kHz,脉宽为2 μ s,电流脉冲占空比为1%。THz-QCL放置于真空杜瓦内由液氮降温,稳定工作时温度约在10 K。脉冲电流源同时还为锁相放大器提供一个5 kHz的参考信号。THz-QCL输出的太赫兹波由两个离轴抛物面镜聚焦到待测探测器,探测器固定在二维步进平台上。探测器的输出接到锁相放大器的输入,电脑控制步进电机扫描光斑的同时通过GPIB数据采集卡从锁相放大器采集实时数据。

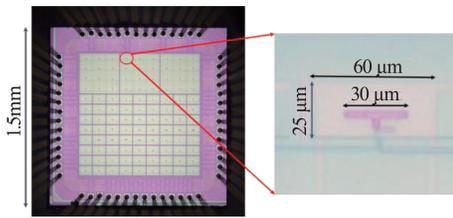


图6 芯片照片及3.0 THz天线照片(左图标记部分)
Fig. 6 Chip microphotograph and a close-up photograph of 3.0 THz antenna (The marked one)

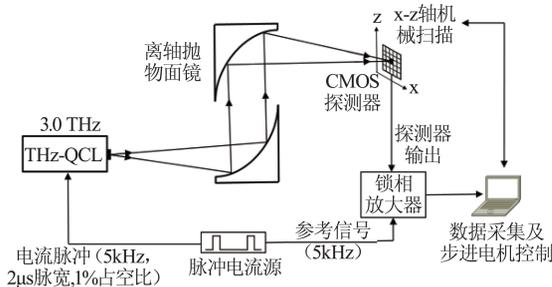


图7 扫描光源光斑实验装置示意图
Fig. 7 Measurement set-up for scanning of the source beam

图8(a)为栅极偏置在0.23 V时单个探测器扫描得到的THz-QCL光斑二维图像,扫描范围为 $1.4 \times 1.2 \text{ mm}^2$,扫描步长为20 μ m,图8(b)为光斑的水平横截面图。该THz-QCL发出的光斑未经过光束整形,因此扫描获得的光斑图不是理想的高斯分布。我们使用热释电功率计原位替换探测器以测量光源的功率,测量值为0.165 mW。由于脉冲电流驱动的占空比为1%,热释电探测器显示的功率

应为测量的平均功率,故探测器接收到光源发出的总功率 P_{beam} 为16.5 mW(为了减小THz-QCL管芯发热,探测器的响应率足够时,无需使THz-QCL最大功率输出)。锁相放大器显示的值是实际检测信号基频幅值的有效值^[26],所以探测器输出的实际电压 U_{out} ,应为:

$$U_{\text{out}} = \frac{\sqrt{2} * V_{\text{LOCK-IN}}}{\frac{2}{\pi} \sin(\pi * 0.01)} \quad (3)$$

根据扫描的光斑图像及计算出的光源总功率,我们可以使用下面的公式^[20]计算探测器的电压响应率 R_v :

$$R_v = \iint \frac{U_{\text{out}}}{P_{\text{beam}} * A_{\text{eff}}} dx dz \quad (4)$$

A_{eff} 是天线的有效面积, $A_{\text{eff}} = \frac{D\lambda^2}{4\pi}$, D 是天线的方向性参数,其仿真值为2.75 dBi。

探测器的噪声等效功率(NEP)定义为1赫兹带宽内像素输出信号信噪比为1时所需要的人射功率。在数学表达式上,NEP为像素在某一特定频点

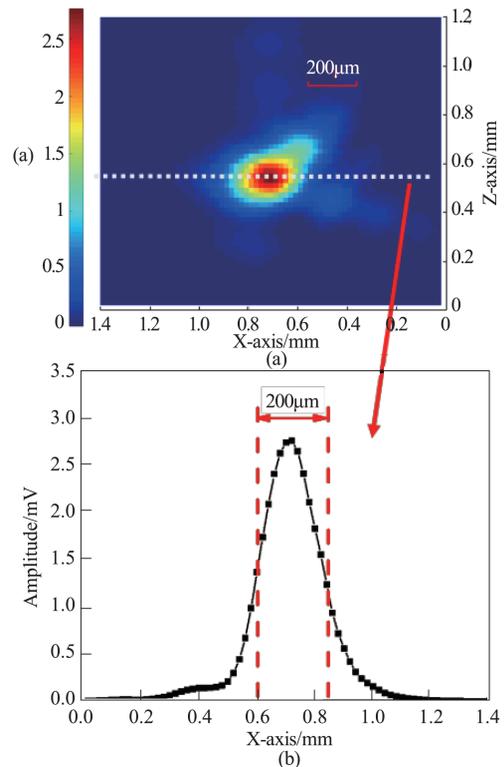


图8 (a)单像素偏置在0.23 V时的光斑扫描图(20 μ m的扫描步长), (b)为光斑的水平横截面图

Fig. 8 (a) Scanned image of the source beam using the single detector biased at 0.23 V (20 μ m step size), (b) horizontal section of the source beam

噪声电压 V_n 与电压响应率 R_v 的比值^[29-30], 即:

$$NEP = \frac{V_n}{R_v} \quad (5)$$

图 9 为使用罗德-施瓦茨 2 Hz-50 GHz 信号源分析仪测量芯片噪声电压的示意图。由于芯片的输出阻抗未知, 且信号源分析仪的输入阻抗为 50Ω , 我们使待测芯片的输出先连接到输入阻抗为 $100 \text{ M}\Omega$ 的低噪声电压放大器 SR560 上, 低噪声电压放大器的放大倍数设置为 1 (即不进行放大), 再将低噪声放大器的 50Ω 输出端口连接到信号源分析仪的 50Ω 输入端, 通过电脑改变直流电源的电压, 同时从信号源分析仪采集数据, V_n 的计算公式为:

$$V_n = 2 * \sqrt{\frac{10^{P_n/10}}{BW} * 1000 * 50 \Omega} \quad (6)$$

P_n 为信号源分析仪读取的数值, 单位为 dBm, BW 为 200 Hz。结合式(5)可以计算出探测器的 NEP 值。

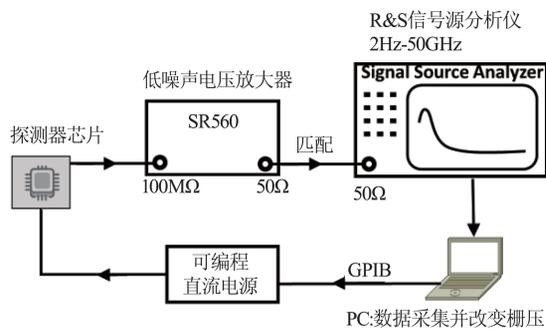


图 9 芯片噪声电压测量示意图

Fig. 9 Measurement set-up for chip noise voltage

图 10 给出了探测器的电压响应率 (R_v) 和噪声等效功率 (NEP) 随栅极偏压的变化关系。当栅极偏置电压为 0.23 V 时, 峰值响应率为 526 V/W。当栅极偏置电压为 0.24 V 时, 最小 NEP 为 73 pW/Hz^{1/2}。表 1 为我们的探测器与已报道高频 CMOS 太赫兹探测器之间的性能比较。从表中可以看出, 我们的探测器实现了相对较高的响应率和较低的噪声等效功率。

3 太赫兹成像测试结果

我们利用 THz-QCL 和 CMOS 探测器搭建了如图 11 所示的单像素太赫兹透射成像系统。首先利用两个抛物面镜将 THz-QCL 发出的太赫兹光波聚焦到待成像物体平面上, 经过待成像物体散射的太赫兹光波再经过两个抛物面镜聚焦在探测器上, 通过电脑控制步进电机使待成像物体在 X 轴和 Z 轴移

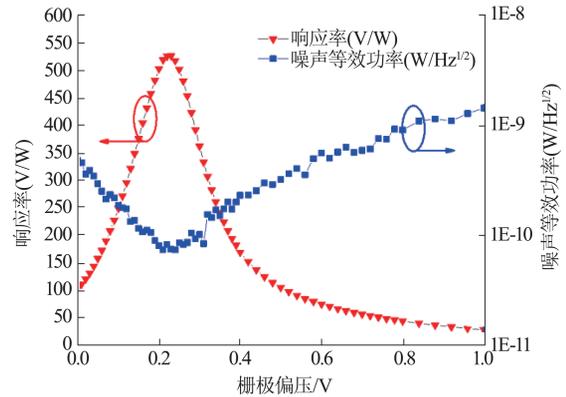


图 10 测量的响应率 R_v 和噪声等效功率 NEP 随栅压变化的曲线

Fig. 10 Measured R_v and NEP as a function of gate bias voltage

表 1 高频 CMOS 太赫兹探测器之间的性能比较

Table 1 Performance comparison between high frequency CMOS terahertz detectors

CMOS 工艺	频率 [THz]	R_v [V/W]	NEP [pW/Hz ^{1/2}]	参考文献
65 nm CMOS	3.0	526	73	本工作
90 nm CMOS	4.75	75	404	[31]
90 nm CMOS	4.25	230	110	[32]
90 nm CMOS	2.54, 3.13	336, 308	63, 85	[33]
90 nm CMOS	3.1	230	85	[34]
130 nm CMOS (SBD)	4.92	383	430	[35]
150 nm CMOS	2.9	30	487	[36]

动并同时通过 GPIB 数据采集卡从锁相放大器采集实时数据。

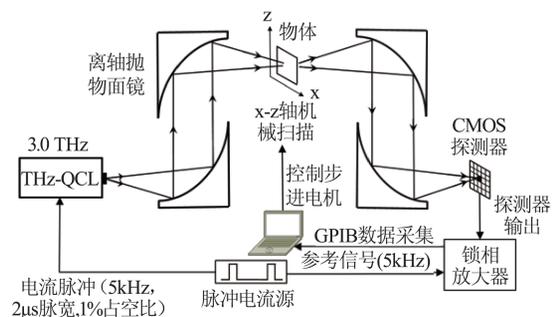


图 11 太赫兹透射成像系统示意图

Fig. 11 Block diagram of the terahertz transmission imaging system

图 12 显示了聚甲醛牙签的扫描成像结果, 扫描步长为 $100 \mu\text{m}$, (a) 为牙签的实物照片, (b) 显示了牙签扫描结果, (c) 显示了牙签的尺寸。(d) 是 (b) 的

单行数据显示结果。由图(c)和(d)可见牙签的毛刷之间的间距为 $800\ \mu\text{m}$, 共有 11 根毛刷, 总长度为 $8\ \text{mm}$, 由于衍射效应成像显示毛刷宽度约为 $400\ \mu\text{m}$ 。

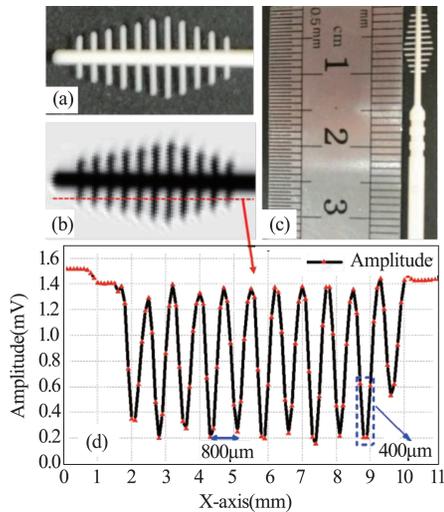


图 12 扫描的牙签的成像图($100\ \mu\text{m}$ 步长), (a) 为牙签的实物照片, (b) 为牙签扫描结果, (c) 显示了扫描的尺寸, (d) 是 (b) 的单行数据显示结果

Fig. 12 Scanned image of a toothpick ($100\ \mu\text{m}$ step size), (a) physical photograph of the toothpick, (b) Scanned image of the toothpick, (c) shows the scanned size. (d) is the result of the single-line data display in (b)

图 13 为树叶照片(a)和扫描成像图(b), 扫描步长同样为 $100\ \mu\text{m}$ 。图中可以清晰看见树叶的茎络, 图(c)为图(b)的部分放大结果, 图(c)中的树叶经络明显小于图中显示的 $500\ \mu\text{m}$ 标尺长度。

我们将 CMOS 探测器换成高莱探测器对树叶进行扫描成像。由于高莱探测器是基于热感应的, 无法响应 $5\ \text{kHz}$ 的高频调制, 所以我们在 THz-QCL 出光口附近增加了机械斩波模块, 斩波频率设置为 $20\ \text{Hz}$, 并且将机械斩波器的 $20\ \text{Hz}$ 同步信号输出接到锁相放大器的参考频率输入端口。图 14 为高莱探测器对树叶扫描成像的结果, 扫描步长为 $100\ \mu\text{m}$ 。由于高莱探测器响应速度较慢, 为了使锁相放大器读数稳定, 我们将锁相放大器的积分时间设置为 $300\ \text{ms}$; 同时, 为了减小步进电机抖动造成的数据误差, 每次步进后停顿 $0.5\ \text{s}$, 每个像素点耗时约 $0.8\ \text{s}$ 。高莱探测的响应频段非常广 ($15\sim 8\ 000\ \mu\text{m}$)^[7], 对环境中的其他电磁波也会有响应。因此, 我们先开启 THz-QCL 进行一次扫描成像, 结果如图 14 (a) 所示, 一共扫描了 90×100 个像素点, 耗时约 2 小

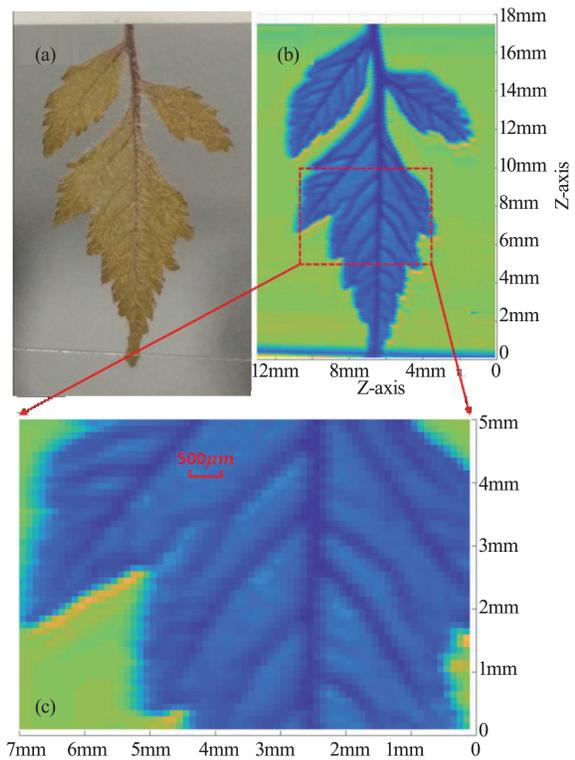


图 13 使用 CMOS 探测器扫描的树叶的成像图($100\ \mu\text{m}$ 步长), (a) 为待成像树叶, (b) 为扫描成像结果, (c) 为 (b) 的局部放大结果

Fig. 13 Scanned image of a leaf ($100\ \mu\text{m}$ step size) using CMOS detector, (a) is the leaf to be imaged, (b) is the scanned image result, and (c) is the partial enlargement result of (b)

时。然后我们将 THz-QCL 关掉后进行第二次扫描成像, 结果如图 14 (b) 所示 (其他实验条件不变), 可以看出环境中的电磁波对样品也有成像作用但树叶轮廓整体比较模糊。为了去除环境中电磁波对成像造成的影响, 我们用图 (a) 的数据减去图 (b) 的背景数据得到图 (c), 可以看出图 (c) 的树叶成像图比图 (a) 清晰了许多, 图 (d) 为采用 CMOS 探测器扫描得到的图像。可以看出 CMOS 探测器成像不仅比使用高莱探测器清晰许多, 而且只需要扫描成像一次, 大大缩短了成像时间; 并且不需要额外机械斩波器进行调制, 减小了系统复杂度。

4 结论

报道了一种采用 $65\ \text{nm}$ CMOS 工艺制成的 $3.0\ \text{THz}$ 探测器。探测器贴片天线由顶层金属 M9 和底层金属构成, 辐射贴片通过由微带线和金属层之间的通孔构成的匹配网络连接至 NMOS 场效应晶体管的源端; 栅极连接陷波滤波器以消除焊盘和压焊线

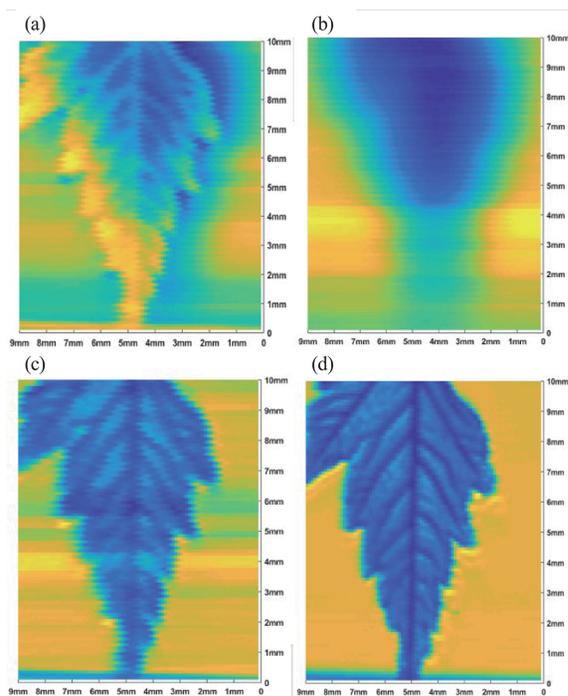


图 14 高莱探测器树叶扫描成像图(100 μm 步长), (a) 为 THz-QCL 打开时采集到的数据即树叶加背景, (b) 为 THz-QCL 关闭状态采集到的数据即背景, (c) 为图(a)减去图(b)得到的树叶图, (d) 为采用 CMOS 探测器扫描得到的树叶图

Fig. 14 Scanned image of a leaf (100 μm step size) using Golay-Cell detector, (a) the data collected when the THz-QCL is turned on which is the leaves and the background, and (b) the data collected when the THz-QCL is turned off which is the background. (c) is the leaf diagram obtained by subtracting the graph (b) from (a), and (d) is the leaf image scanned by our CMOS detector

的影响。室温条件下探测器可以达到 526 V/W 的响应率和 73 $\text{pW}/\text{Hz}^{1/2}$ 的噪声等效功率。我们采用机械扫描技术获得了 THz-QCL 光斑的远场形状, 对聚甲醛牙签和树叶进行了扫描成像, 成像结果可清晰地分辨出牙签上的超细毛刷和树叶的茎络; 对比使用高莱探测器的成像结果, CMOS 探测器在成像速度和分辨率方面均优于高莱探测器。

References

- [1] Woolard D L, Jensen J O, Hwu R J. Terahertz science and technology for military and security applications [M]. *world scientific*, 2007.
- [2] Cassar Q, Al-Ibadi A, Mavarani L, et al. Pilot study of freshly excised breast tissue response in the 300 - 600 GHz range [J]. *Biomedical optics express*, 2018, **9**(7): 2930-2942.
- [3] Hoshina H, Sasaki Y, Hayashi A, et al. Noninvasive mail inspection system with terahertz radiation [J]. *Applied spectroscopy*, 2009, **63**(1): 81-86.

- [4] Hosako I, Oda N. Terahertz imaging for detection or diagnosis [J]. *SPIE Newsroom*, 2011, 102.1201105): 003651.
- [5] Lee Y S. Principles of terahertz science and technology [M]. *Springer Science & Business Media*, 2009.
- [6] Kreisler A J, Gaugue A. Recent progress in high-temperature superconductor bolometric detectors: from the mid-infrared to the far-infrared (THz) range [J]. *Superconductor Science and Technology*, 2000, **13**(8): 1235.
- [7] Golay detector datasheet for GC-1P with HDPE window, Tydex Inc, accessed on Mar. 2019. [Online]. Available: http://www.tydexoptics.com/products/thz_devices/golay_cell/
- [8] Liu Z, Liu L, Yang J, et al. A CMOS fully integrated 860-GHz terahertz sensor [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2017, **7**(4): 455-465.
- [9] Dyakonov M I, Shur M S. Plasma wave electronics: novel terahertz devices using two dimensional electron fluid [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1996, **43**(10): 1640-1645.
- [10] Knap W, Kachorovskii V, Deng Y, et al. Nonresonant detection of terahertz radiation in field effect transistors [J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, **91**(11): 9346-9353.
- [11] Knap W, Teppe F, Meziani Y, et al. Plasma wave detection of sub-terahertz and terahertz radiation by silicon field-effect transistors [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **85**(4): 675-677.
- [12] Ojefors E, Pfeiffer U R, Lissauskas A, et al. A 0.65 THz focal-plane array in a quarter-micron CMOS process technology [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2009, **44**(7): 1968-1976.
- [13] Al Hadi R, Sherry H, Grzyb J, et al. A 1 k-pixel video camera for 0.7 - 1.1 terahertz imaging applications in 65-nm CMOS [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2012, **47**(12): 2999-3012.
- [14] Fang T, Dou R, Liu L, et al. A 25 fps 32x 24 Digital CMOS Terahertz Image Sensor [C]. *IEEE Asian Solid-State Circuits Conference (A-SSCC)*. IEEE, 2018: 87-90.
- [15] International Telecommunication Union ITU-R P. 676-11: Attenuation by Atmospheric Gases (ITU, 2016).
- [16] The HITRAN Database. accessed on Mar. 2019. [Online]. Available: <http://www.cfa.harvard.edu/hitran/>
- [17] Fang T, Liu Z, Liu L, et al. Detection of 3.0 THz wave with a detector in 65 nm standard CMOS process [C]. *IEEE Asian Solid-State Circuits Conference (A-SSCC)*. IEEE, 2017: 189-192.
- [18] Gutin A, Kachorovskii V, Muraviev A, & Shur M. Plasmonic terahertz detector response at high intensities [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, **112**(1): 014508.
- [19] Khmyrova I, Seijyou Y. Analysis of plasma oscillations in high-electron mobility transistorlike structures: Distributed circuit approach [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **91**(14): 143515.
- [20] Lissauskas A, Pfeiffer U, Ojefors E, et al. Rational design of high-responsivity detectors of terahertz radiation based on distributed self-mixing in silicon field-effect transistors [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, **105**(11): 114511.
- [21] Razavi B. Design of Analog CMOS Integrated Circuits [M]. Xi'an Jiaotong University Press (毕查德, 拉扎维, 陈贵灿, 等. 模拟 CMOS 集成电路设计. 西安交通大学

- 出版社), 2003.
- [22] Lisauskas A, Glaab D, Roskos H G, *et al.* Terahertz imaging with Si MOSFET focal-plane arrays [C]. *Terahertz Technology and Applications II. International Society for Optics and Photonics*, 2009, **7215**: 72150J.
- [23] Al Hadi R, Sherry H, Grzyb J, *et al.* A broadband 0.6 to 1 THz CMOS imaging detector with an integrated lens [C]. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*. IEEE, 2011: 1-4.
- [24] John D. Kraus. Antennas. For All Applications [M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronic Industry (约翰·克劳斯·天线·北京:电子工业出版社)
- [25] Kompfner R, Williams N T. Backward-wave tubes [J]. *Proceedings of the IRE*, 1953, **41**(11): 1602-1611.
- [26] Ward J, Schlecht E, Chattopadhyay G, *et al.* Capability of THz sources based on Schottky diode frequency multiplier chains [C]. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (IEEE Cat. No. 04CH37535)*. IEEE, 2004, **3**: 1587-1590.
- [27] LI L, CHEN L, ZHU J, *et al.* Terahertz quantum cascade lasers with > 1 W output powers [J]. *Electronics Letters*, 2014, **50**(4): 309-310.
- [28] SR 830 User's Manual. accessed on Mar. 2019. [Online]. Available: <https://www.thinksrs.com/downloads/pdfs/manuals/SR830m.pdf>
- [29] Tauk R, Teppe F, Boubanga S, *et al.* Plasma wave detection of terahertz radiation by silicon field effects transistors: Responsivity and noise equivalent power [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(25): 253511.
- [30] Mackowiak V, Peupelmann J, Ma Y, *et al.* *Nep - noise equivalent power* [M]//Thorlabs, Inc. 2015.
- [31] Zdanevičius J, Čibiraitė D, Ikamas K, *et al.* Field-Effect Transistor Based Detectors for Power Monitoring of THz Quantum Cascade Lasers [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2018, **8**(6): 613-621.
- [32] Bauer M, Venckevičius R, Kašalynas I, *et al.* Antenna-coupled field-effect transistors for multi-spectral terahertz imaging up to 4.25 THz [J]. *Optics express*, 2014, **22**(16): 19235-19241.
- [33] Boppel S, Lisauskas A, Bauer M, *et al.* Optimized Terahertz FET detector performance based on an analytical device model verified up to 9 THz [C]. *Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2013 38th International Conference on*. IEEE, 2013: 1-1.
- [34] Ikamas K, Lisauskas A, Boppel S, *et al.* Efficient detection of 3 THz radiation from quantum cascade laser using silicon CMOS detectors [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2017, **38**(10): 1183-1188.
- [35] Ahmad Z, Lisauskas A, Roskos H G. 9.74-THz electronic Far-Infrared detection using Schottky barrier diodes in CMOS [C]. *IEEE International Electron Devices Meeting. IEEE*, **2014**: 4.4. 1-4.4. 4.
- [36] Boppel S, Lisauskas A, Mundt M, *et al.* CMOS integrated antenna-coupled field-effect transistors for the detection of radiation from 0.2 to 4.3 THz [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2012, **60**(12): 3834-3843.