中国光学 Chinese Optics 核心期刊

平面天线在场效应晶体管太赫兹探测器中的应用

王晓东，颜伟，李兆峰，张博文，黄镇，杨富华

引用本文:
王晓东, 颜伟, 李兆峰, 张博文, 黄镇, 杨富华. 平面天线在场效应晶体管太赫兹探测器中的应用[J]. 中国光学, 2020, 13(1): 1-13. doi: 10.3788/CO.20201301.0001
WANG Xiao-Dong, YAN Wei, LI Zhao-feng, ZHANG Bo-wen, HUANG Zhen, YANG Fu-hua. Application of planar antenna in field-effect transistor terahertz detectors[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(1): 1-13. doi: 10.3788/CO.20201301.0001

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3788/CO.20201301.0001

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

二维电子气等离激元太赫兹波器件

Terahertz-wave devices based on plasmons in two-dimensional electron gas

中国光学. 2017, 10(1): 51 https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0051

超高灵敏度太赫兹超导探测技术发展

Development of ultra high sensitivity superconducting THz detectors

中国光学. 2017, 10(1): 122 https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0122

新型有机晶体及超宽带太赫兹辐射源研究进展

Advances in organic nonlinear crystals and ultra-wideband terahertz radiation sources

中国光学. 2019, 12(3): 535 https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0535

半导体超晶格声子激光器的研究进展

Progress of semiconductor superlattice phonon laser

中国光学. 2017, 10(4): 415 https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0415

利用3D打印技术制备太赫兹器件

Fabrication of terahertz device by 3D printing technology

中国光学. 2017, 10(1): 77 https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0077

文章编号 2095-1531(2020)01-0001-13

平面天线在场效应晶体管太赫兹探测器中的应用

王晓东[1,3],颜 伟[1*],李兆峰[1,2,3*],张博文[1,2],黄 镇[1,2*],杨富华[1,2,3,4]
(1. 中国科学院半导体研究所 半导体集成技术工程研究中心,北京 100083;
2. 中国科学院大学 材料与光电研究中心,北京 100049;
3. 中国科学院大学 微电子学院,北京 100049;
4. 中国科学院半导体研究所 超晶格国家重点实验室,北京 100083)

摘要:为了提高场效应晶体管太赫兹探测器的响应度并降低噪声等效功率,需要对探测器集成平面天线的结构进行合理设计与优化,本文对集成平面天线结构的场效应晶体管太赫兹探测器的研究进行了深入调研。首先,对场效应晶体管太赫兹探测器的工作原理进行了分析,介绍了集成平面天线如何解决耦合太赫兹波效率低的问题。然后,介绍了一些常用的平面天线结构,包括偶极子天线、贴片天线、缝隙天线、grating-gate 和其他类型的结构,比较了各种天线的性能以及引入后对太赫兹探测器响应度的影响。通过对比不同天线结构的探测器响应度和噪声等效功率等参数指标,发现:采用平面天线结构之后,场效应晶体管太赫兹探测器的响应度有了大幅度的提升,各种类型的天线对探测器响应度都有不同程度的提升。本文着重介绍了几种集成于场效应晶体管的平面天线结构,包括各种天线的性能和研究进展,最后分析了场效应晶体管太赫兹探测器存在的问题和发展趋势。

关 键 词:场效应晶体管太赫兹探测器;平面天线;grating-gate 结构;响应度;噪声等效功率
中图分类号:TN827 + .2 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20201301.0001

Application of planar antenna in field-effect transistor terahertz detectors

WANG Xiao-Dong[1,3], YAN Wei[1*], LI Zhao-feng[1,2,3*], ZHANG Bo-wen[1,2],
HUANG Zhen[1,2*], YANG Fu-hua[1,2,3,4]
(1. *Engineering Research Center for Semiconductor Integrated Technology, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100083, *China*;
2. *Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*;
3. *School of Microelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*;
4. *State Key Laboratory of Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100083, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: yanwei@semi.ac.cn, lizhaofeng@semi.ac.cn, zhenhuang@semi.ac.cn*

Abstract: In order to improve the responsivity and reduce the noise equivalent power of Field-Effect Transistor

收稿日期:2019-04-11;**修订日期**:2019-06-08
基金项目:国家重点研发专项基金(No. 2016YFA02005003);国家自然科学基金(No. 61474115)
Supported by National Key Research and Development Fund(No. 2016YFA02005003); Natural Science Foundation of China(No. 61474115)

(FET) THz detectors, a suitable planar antenna structure is necessary. In this paper, we investigate the research progress of FET THz detectors integrated with planar antenna structures. Firstly, we analyze the working principle of FET THz detectors and clarify that an integrated planar antenna could effectively improve the detector's performance by enhancing its coupling efficiency with terahertz waves. Secondly, we present some typical planar antennas and discuss their pros and cons. These include the dipole antenna, the patch antenna, the slot antenna, the grating-gate, and others, which are each compared with respect to responsivity for the detectors. Finally, we find that the responsivity of the FET THz detectors can be greatly improved when applying planar antenna structure and that each type of antennas contributes uniquely. This work introduces several planar antennas integrated into FET THz detectors, including the performance and research progress of various antennas. Some existing problems are described and some predictions of the future development trends for this technology are summarized.

Key words: FET THz detectors; planar antenna; grating-gate; responsivity; noise equivalent power

1 引 言

太赫兹(THz)辐射是指波长在 30 μm ~ 3 mm,也就是频率在 0.1 ~ 10 THz 之间的辐射,在电磁波谱中其位于毫米波和红外波之间。太赫兹波是目前唯一没有得到充分研究、尚未大规模应用的电磁波。太赫兹波与物质之间存在着极为丰富的相互作用,不仅在基础研究领域,而且在安检成像、雷达、通信、天文、大气观测和生物医学成像等诸多领域有着广阔的应用前景。特别是在未来具有高精度、反隐身雷达和大数据传输速率的近距离通信技术中,太赫兹波将有着十分重要的应用前景。然而无论哪种太赫兹技术想要得到应用,均要依赖于太赫兹源和太赫兹探测器性能的提升,其中太赫兹探测器的研制和发展在太赫兹技术的研究和应用中有着举足轻重的地位。

传统的太赫兹探测器大多需要工作在低温条件下,体积较大,使用起来不方便,且响应速度较慢。场效应晶体管太赫兹探测器是近年来发展起来的一种探测频率连续可调的太赫兹探测器。它的基本探测原理是利用沟道中的二维电子气(2DEG)在特定边界条件下形成的等离子体波振荡效应,与入射的太赫兹波发生耦合或者共振,进而在晶体管的输出端转化为光电流或光电压。基于二维电子气的高电子迁移率晶体管太赫兹探测器具有高速、高灵敏度、低噪声、高频率分辨性、室温工作等优势。除此之外,该探测器还具备结构简单,容易制作,易于加工等特点,目前受到了人们的高度重视。

使用场效应晶体管作为太赫兹的发射源[1]和探测器[2]是由 Dyakanov 和 Shur 首次提出的,他们又于 1996 年提出了几种可行的器件结构[3],至此之后,很多使用复合半导体材料[4-6]或者硅[7-11]制作的场效应晶体管被用来进行太赫兹探测和发射的研究。

场效应晶体管太赫兹探测器目前尚处于研究阶段,并没有在市场上得到大规模的应用,这主要是因为场效应晶体管太赫兹探测器响应度较低、噪声等效功率较高。为了解决这个问题,常需要在场效应晶体管中集成一些特殊结构,如非对称连接的 pad、grating-gate 和平面天线[12-13],尤其是集成平面天线的方法,能够大幅度提升场效应晶体管太赫兹探测器的响应度[14],并且设计方法非常灵活,这引起了很多研究者的注意。

本文将主要从以下几个方面展开:第一部分介绍太赫兹波以及常见的太赫兹探测器,第二部分介绍场效应晶体管太赫兹探测器的常用表征参数,以及平面天线场效应晶体管太赫兹探测器的工作原理;第三部分分析国内外基于平面天线耦合太赫兹探测器的研究进展;第四部分总结平面天线在太赫兹探测器中的研究热点、不足以及未来的发展趋势。

2　平面天线场效应晶体管太赫兹探测器

2.1　表征参数

表征太赫兹探测器性能的参数很多,包括探测器的工作温度,能够探测的频率范围,探测太赫兹波的响应时间和响应度,以及噪声等效功率等,其中响应度和噪声等效功率是研究中最为常用的两个参数,也是表征太赫兹探测器性能最为直观的参数。

2.1.1　响应度

响应度(Responsivity)是表征太赫兹探测器将太赫兹波转化为电信号能力的物理量,其大小为太赫兹探测器平均输出电流(或电压)和平均输入功率的比值,单位为 A/W(或 V/W),在太赫兹探测器中,辐射的太赫兹波被场效应晶体管耦合存在着有效面积的问题,因此常用下式计算响应度[14]:

$$R_v = \frac{\Delta U S_t}{P_t S_a}, \tag{1}$$

式中 ΔU 为源漏之间探测到的直流电压,S_t 为太赫兹波的辐射束斑面积,P_t 为源漏之间的总功率,S_a 为场效应晶体管太赫兹探测器的有效面积。集成平面天线之后,平面天线的结构也会对响应度产生影响,这会在后文中做详细讨论。

2.1.2　噪声等效功率

噪声等效功率(NEP)也是描述太赫兹探测器最为重要的参数之一,它指的是产生单位信噪比所需的辐射功率,是太赫兹探测器能够探测到的最小功率,用于表征太赫兹探测器接收弱信号能力的性能参数,其大小为[14]:

$$NEP = \frac{N}{R_v}, \tag{2}$$

其单位为 $\mathrm{W}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$,式中 N 为晶体管的噪声等效功率,单位为 $\mathrm{V}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$,场效应晶体管太赫兹探测器工作时,源漏之间不加偏压,因此晶体管中的噪声只考虑热噪声[14]:

$$N = \sqrt{4kTR_d}, \tag{3}$$

其中 R_d 为源漏之间的电阻。集成平面天线之后,平面天线主要是通过影响响应度来改变太赫兹探测器的噪声等效功率。

2.2　探测原理

浅水波类比的模型详细地解释了场效应晶体管进行太赫兹波探测的原理[1-2]。以短沟道场效应晶体管为例(如图 1 所示),晶体管栅极下方的沟道中存在着非稳态的二维电子气,其中的电子动量弛豫时间极短,可以忽略电子和声子以及电子和杂质之间的碰撞,但是二维电子气中电子浓度极高,不可避免地就会存在着电子与电子之间的相互作用,在这种情况下,二维电子气就会表现出一些流体的性质,因此二维电子气也可以称为二维电子流。

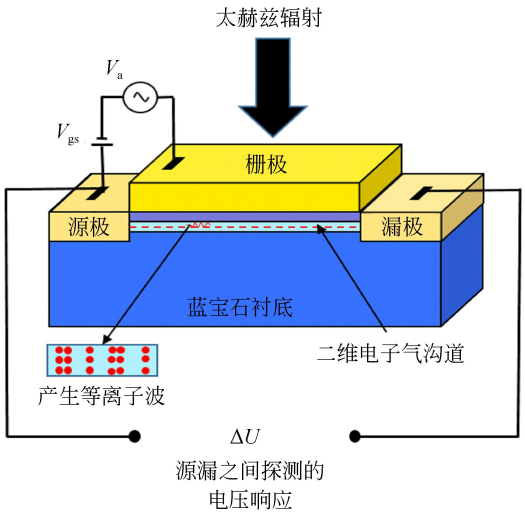

图 1　场效应晶体管太赫兹探测器结构示意图

Fig. 1　Schematic diagram of FET terahertz detector

联立流体力学方程和连续性方程,就可以得到场效应晶体管沟道中的二维电子气振荡频率[1]:

$$\omega_0 = \frac{\pi}{2L}\sqrt{\frac{e(U_{gs} - U_{th})}{m^*}}, \tag{4}$$

其中 L 为场效应晶体管的栅长,U_{gs} 为栅极电压,U_{th} 为场效应晶体管的阈值电压,m^* 是电子的有效质量,e 是电子电量。当入射的太赫兹辐射作用在场效应晶体管上时,会在场效应晶体管的栅源之间产生一个交流电压信号 U_a,同时激起沟道中等离子体波的振荡,并由此产生一个正比于入射波强度的直流源漏电压信号 ΔU,如果源漏之间没有外加电流信号,那么等离子体波的振荡频

率为上面公式(4)给出的基模形式。当入射的太赫兹波辐射频率接近于该基模数值或者是该数值的奇数倍时,ΔU 就会产生共振的极大值。源漏直流电压信号 ΔU 的表达式为[14]:

$$\frac{\Delta U}{U_0} = \frac{1}{4}\left(\frac{U_a}{U_0}\right)^2 f(\omega), \tag{5}$$

其中,$U_0 = U_{gs} - U_{th}$,$f(\omega)$则是表征影响该响应度大小的参数。对于太赫兹波的探测而言,其工作模式可以分为共振探测[10]和非共振探测[12]:当 $L \gg s\tau$ 时,场效应晶体管处于非共振模式,其中 ω_0 是辐射角频率基频,ω_n 是所有能够产生共振的辐射角频率,s 是等离子体波波速,τ 是电子动量弛豫时间;当 $\omega\tau \ll 1$,且 $L \ll s\tau$,场效应晶体管处于共振模式,其共振角频率大小为:

$$\omega_n = \omega_0(1 + 2n), n = 0,1,2,\cdots. \tag{6}$$

但是场效应晶体管太赫兹探测器响应度低、噪声等效功率高,其应用受到了较大的阻碍。场效应晶体管尺寸过小,使得太赫兹波长和探测器尺寸之间存在着严重的不匹配,以至于探测器耦合到的太赫兹波极少。设计一个尺寸较大的天线与场效应晶体管集成在一起,来增强太赫兹波和场效应晶体管的耦合效率,这样就能够提高太赫兹探测器的响应度。

2.2.1 常规等离子体波探测原理

在场效应晶体管太赫兹探测器中,接收天线的等效电路如图 2 所示。

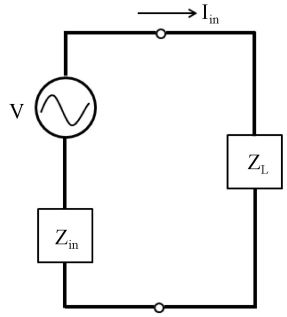

图 2 接收天线的等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of the receiving antenna

图中 V 是由太赫兹辐射产生的交流电压,Z_L 为场效应晶体管的负载阻抗,Z_{in} 为场效应晶体管的输入阻抗,为了使晶体管耦合的太赫兹辐射最多,需要满足两个基本的条件:极化匹配和阻抗匹配。极化匹配是指太赫兹辐射的极化方向和天线的极化方向一致时天线能够耦合到最多的太赫兹辐射,阻抗匹配是指输入阻抗和负载阻抗共轭匹配时天线传输给场效应晶体管的能量最大。平面天线场效应晶体管太赫兹探测器满足以上条件时,能够有效提高响应度。因此,设计工艺步骤简单可行、耦合太赫兹效率高的天线结构成为场效应晶体管太赫兹探测器研究的热点。

基于这种传输模式,2017 年中国科学院半导体研究所的 Zhang 通过理论推导,得出天线相关参数与响应度的关系为:

$$R_u = \frac{\Delta U}{P_{in} S_{ant}} = \frac{e\,|\,Z_T\,|^2 \lambda^2 D e_r e_{cd}}{8\pi K_B T S_{ant} \mathrm{Re}(Z_T)}, \tag{7}$$

其中 Z_T 为栅源之间的输入阻抗,D 为天线的方向性系数,e_{cd}为辐射效率,e_r 为接受效率,两者分别对应天线的接收和发射模式,De_re_{cd}表征天线参数改变时对于场效应晶体管响应度的影响因子。通过改变天线的结构和尺寸等参数,就可以调控 De_re_{cd}的数值,这样就能够提高场效应晶体管太赫兹探测器的响应度[15]。

2.2.2 自混频探测原理

另外一种检测理论是对于非共振探测而提出的基于沟道缓变近似的自混频检测理论[16-18],图 3 为其示意图。天线集成到场效应晶体管时,太赫兹波会在沟道中产生两个互相垂直的电场,横向电场用以调控二维电子气的运动速度,纵向电场用以调控二维电子气的浓度,从而可以在源漏之间测得一个直流响应,其响应度的大小对应着入射太赫兹波的辐射强度。

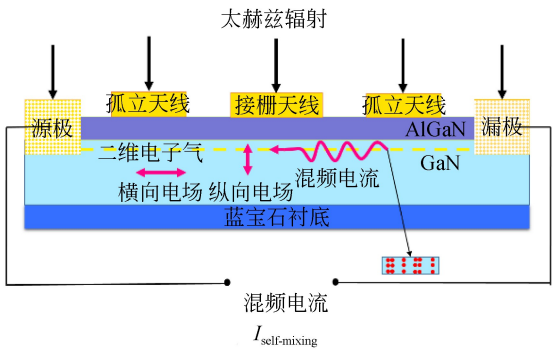

图 3 自混频探测理论示意图(图片引自文献[19],AIP 已授权)

Fig. 3 Schematic of self-mixing theory (reproduced from ref. [19], with the permission of AIP publishing)

在这种情况下,可以得出太赫兹波辐射产生的直流混频电流的大小为[14]:

$$I_{\text{Self-mixing}} = \frac{e\mu W}{2L} Z_0 P_0 \left(\bar{Z} \int_0^L \frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}V_{\text{geff}}} \dot{\xi}_x \dot{\xi}_z \cos\varphi \mathrm{d}x - \int_0^L \frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}V_{\text{geff}}} \xi_x \dot{\xi}_x \mathrm{d}x \right), \tag{8}$$

则其响应度为:

$$R_{\text{THz}} = I_{\text{Self-mixing}} / P_0 = \frac{e\mu W}{2L} Z_0 \left(\bar{Z} \int_0^L \frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}V_{\text{geff}}} \dot{\xi}_x \dot{\xi}_z \cos\varphi \mathrm{d}x - \int_0^L \frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}V_{\text{geff}}} \xi_x \dot{\xi}_x \mathrm{d}x \right), \tag{9}$$

其中 $\bar{Z} = \xi_Z / \dot{\xi}_Z$,表示栅极到沟道内二维电子气的有效距离,响应度的大小为混频电流与功率之比,这样响应度就可以通过沟道电子迁移率、沟道几何尺寸和天线效率得到增强。

天线在场效应晶体管太赫兹探测器中的应用涉及到两种理论,第一种理论是天线理论。这部分理论主要用来解释天线如何耦合和发射电磁波。这部分理论比较成熟,文中所引文献中的工作也基本上是对成熟的天线理论的常规应用。第二种理论是场效应晶体管的太赫兹探测理论,通过这个理论,可以研究天线与晶体管的相互作用和如何使探测器的探测性能得到增强。这部分理论还不是非常成熟,有待完善。目前主要的理论解释有两种:等离子体波理论和自混频理论。在等离子体波理论中,天线的作用主要是能量传输。天线和晶体管的电极相连接(栅源或者源漏)。天线耦合空间中的电磁波,把电磁波的能量传输给负载(晶体管)。而在自混频理论中,天线的主要作用是电场增强。天线耦合空间中的电磁波,使晶体管沟道内的电场得到增强。在该理论中,天线和晶体管的电极不是必须相连的,其中也不是必须要涉及到能量传输。目前依循这两种理论都可以指导天线设计并取得了不错的结果。但是这两种理论是否能够殊途同归,还有待继续研究。

3　平面天线场效应晶体管太赫兹探测器的研究进展

在场效应晶体管太赫兹探测器的天线设计方面,大部分研究者选择直接采用在微波领域较为成熟的天线设计,主要包含一些常见的平面天线结构,如偶极子天线,贴片天线,缝隙天线,grating-gate 以及一些其他类型的结构,如纳米天线结构或者直接将栅极制作为天线结构,下面将分别介绍这几种结构。

3.1　偶极子天线结构(Dipole antenna)

偶极子天线是在无线通信中使用最早、结构最为简单、应用最为广泛的天线之一,应用在太赫兹探测方面能取得很好的效果。偶极子天线通常由一对对称放置的导体构成,一端连接馈电线,另一端接地,从而在两导体相互靠近的地方形成馈电点,用来发射或者接收固定频率的信号,常用的集成于场效应晶体管太赫兹探测器中的偶极子天线包含以下几种:蝶形天线、螺旋形天线和对数周期天线。

3.1.1　蝶形天线结构(Bow-tie antenna)

蝶形天线是最为常用的偶极子天线之一,集成在场效应晶体管上时,两个相互靠近的蝶形分别连接晶体管的栅极和源极,漏极作为信号读出端口,具体的形式如图 4 所示。

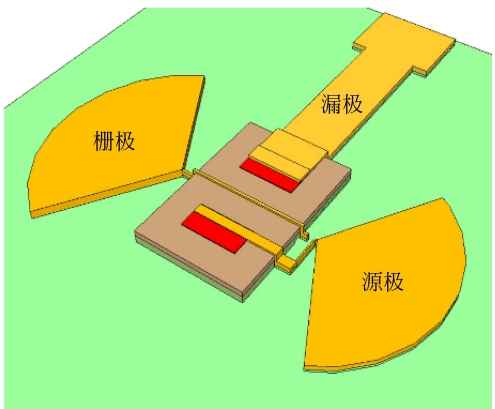

图 4　蝶形天线结构

Fig. 4　Bow-tie antenna

2011 年中国科学院苏州纳米所的 Sun 报导了一种蝶形天线和 GaN/AlGaN HEMT 集成的室温太赫兹探测器[17]。特殊结构的蝶形天线分别与场效应晶体管的源漏极相连,另一极与栅极相连,可以实现带宽为 0.1 ~ 2 THz,噪声等效功率为 $5 \times 10^{-10}\,\text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$,响应度为 42 mA/W 的探测。

2012 年中国科学院苏州纳米所的 Qin 等人基于自混频原理,设计了一种蝶形天线结

构[18-19],采用自混频探测理论计算出这种结构的相应表征参数,得到室温时的噪声等效功率为 1×10^{-9} W/$\sqrt{\text{Hz}}$,进一步降低温度到 77 K 时,噪声等效功率为 1×10^{-10} W/$\sqrt{\text{Hz}}$,响应度为 42 mA/W。

2013 年 Bauer 将蝶形天线与 0.25 μm 栅长的 GaN/AlGaN HEMT 结构相集成,通过调节不同的栅宽,来测试在不同栅宽条件下得到的噪声等效功率和响应度[20],得到最小的噪声等效功率为 1.25×10^{-10} W/$\sqrt{\text{Hz}}$,最大的响应度为 36.6 mA/W。相同的情况下,当设置 Si MOSFET 的栅长为 0.25 μm,其余条件都保持一致时,得到的噪声等效功率为 2×10^{-10} W/$\sqrt{\text{Hz}}$ [21]。

2015 年,Bauer 设计了与 2013 年相似的实验[22],将探测器的带宽提高到了 0.1 ~ 1.8 THz,在中心频率附近响应度达到 48 mA/W,噪声等效功率为 5.7×10^{-11} W/$\sqrt{\text{Hz}}$。在和相同的蝶形天线集成,并且各种参数设置都相同时,不论是 Si MOSFET,还是 GaN/AlGaN HEMT,两者都能够得到较低的噪声等效功率,HEMT 结构略占优势(噪声等效功率比 MOSFET 低一个数量级)。与 Si MOSFET 一样,GaN/AlGaN HEMT 作为太赫兹探测器也有着巨大的应用潜力。GaN HEMT 结构沟道电子迁移率高,更接近于全等离子体区域[23],并且沟道电阻较小,能够与天线形成较好的阻抗匹配[20]。

蝶形天线带宽大,能够提高太赫兹探测器的探测带宽,但是受衬底效应影响较大[15],在 HEMT 结构和 MOSFET 结构中都能使用这种平面天线,使用后能显著提高太赫兹探测器的响应度,其是未来集成场效应晶体管太赫兹探测器最具有潜力的平面天线结构之一。

3.1.2 螺旋天线结构(Spiral antenna)

螺旋形天线也是一种经典的对偶极子天线,它由两根或两根以上的螺旋臂组成,通常由同轴线馈电,同轴线内导体和螺旋线的一端相连接,同轴线外导体接地。具体形式如图 5 所示。

1995 年 Brown 首次报导了使用螺旋形天线和场效应晶体管进行耦合,可以产生 3.8 THz 的电磁波[6],开启了集成螺旋天线场效应晶体管的研究。

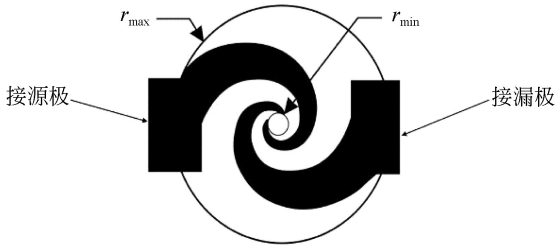

图 5 螺旋形天线结构

Fig. 5 Spiral antenna

2018 年中国科学院上海技术物理研究所的 Guo 将螺旋形天线集成在石墨烯场效应晶体管上[24],室温情况下实现了噪声等效功率为 3.5×10^{-10} W/$\sqrt{\text{Hz}}$,响应度为 2.8×10^{4} mV/W 的探测。该研究结果相比于其他关于石墨烯场效应晶体管太赫兹探测器的报导,响应度有了 1 ~ 2 个数量级的提升[25-27]。

同年,Ikamas 将螺旋形天线、蝶形天线分别和场效应晶体管进行耦合实验[28],结果发现,使用蝶形天线后,在 0.4 ~ 2.2 THz 时太赫兹探测器的响应度稳定在 45 mA/W(2.2×10^{5} mV/W),噪声等效功率为 4.8×10^{-11} W/$\sqrt{\text{Hz}}$。1.5 THz 时噪声等效功率为 7×10^{-11} W/$\sqrt{\text{Hz}}$,该结果比相关文献报道的在此频率下的窄带场效应晶体管太赫兹探测器的最佳结果要好,仅比最佳窄带器件在 0.6 THz 下的结果差四倍。该螺旋形天线平稳响应区间较窄,但是在 0.23 THz 时响应度更高。

螺旋形天线属于圆极化天线的一种,更适合用在极化方向不确定或方向随时间变化的情况,但是其增益较低,通过组成螺旋天线阵列能够明显提高增益。集成螺旋天线的太赫兹探测器响应度普遍不平稳,但是在某些特定的频率段,却有着非常高的灵敏度,这使得螺旋形天线在太赫兹探测中依然占有一席之地。

3.1.3 对数周期天线结构(Log-periodic antenna)

最后一种研究较多的偶极子天线是对数周期天线,也称为对数周期偶极子阵列。该结构由一系列半波偶极子单元构成,长度逐渐增大,半波偶极子单元紧密地连接在一条直线上,平行于馈电线,具体形式如图 6 所示。

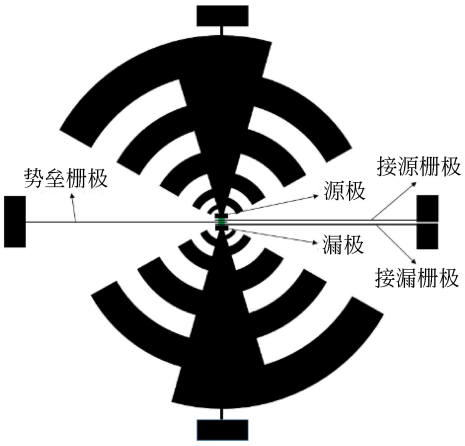

图 6　对数周期天线结构

Fig. 6　Log-periodic antenna

2010 年,Dyer 将一种高带宽的对数周期天线和 GaAs/AlGaAs HEMT 集成,实现了 20 K 时太赫兹探测器在 0.235 ~ 0.24 THz 的共振探测。该种太赫兹探测器的响应度达到了 7×10^{6} mV/W,噪声等效功率低至 5×10^{-10} W/$\sqrt{\text{Hz}}$。这种类型的器件不论是作为窄带宽的太赫兹探测器,还是用作太赫兹成像都有着巨大的优势[29]。

2011 年,Dyer 基于这种研究成果,将对数周期天线中的栅极制作为 grating-gate 结构(结构图见后文),实现了 20 K 时太赫兹探测器在 0.14 THz中心频率的可调谐探测。这种太赫兹探测器的响应度为 6×10^{5} mV/W,噪声等效功率为 1×10^{-8} W/$\sqrt{\text{Hz}}$ [30]。这与 Kim 在 2008 报道的室温可调场效应晶体管太赫兹探测器[31]相比性能(噪声等效功率为 5×10^{-8} W/$\sqrt{\text{Hz}}$,响应度为 8×10^{-2} mA/W)有了一定的提升。

2012 年,Vicarelli 首次采用石墨烯基的场效应晶体管与对数周期天线集成,实现了响应度为 150 mV/W,噪声等效功率为 3×10^{-8} W/$\sqrt{\text{Hz}}$的探测,从而将石墨烯场效应晶体管集成平面天线太赫兹探测器推向研究的高潮[32]。

对数周期天线具有很大带宽,但不同于螺旋形天线,对数周期天线存在着多个共振峰值,这取决于对数周期天线各偶极子天线的臂长,这些特点使得对数周期天线在某些共振峰频段(可以达到非常小的范围,如 0.235 ~ 0.24 THz,这个范围远小于螺旋形天线带宽)响应度极高。对数周期天线集成场效应晶体管太赫兹探测器的响应度与噪声等效功率性能优越,并且可以实现可调谐探测,栅极又能够制作为 grating-gate 结构[30]。这些特点使其成为未来太赫兹探测器研究的重要部分。

3.2　缝隙天线结构(Slot-antenna)

缝隙天线是指在金属平板、共面波导等材料上开一个或多个缝隙,电磁波通过缝隙向外部空间辐射的天线,辐射的方式类似于偶极子天线,缝隙形状和尺寸以及接收(或辐射)的电磁波决定辐射方向,具体形式如图 7 所示。

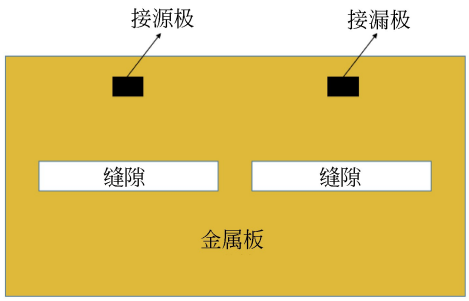

图 7　缝隙天线结构

Fig. 7　Slot antenna

2008 年,Kim 首次报导了天线耦合 GaAs MESFET 太赫兹探测器,其是一种由双缝隙天线,共面波导和 GaAs MESFET 组成的结构,得到该探测器带宽为 0.14 ~ 1 THz,噪声等效功率为 5×10^{-8} W/$\sqrt{\text{Hz}}$,响应度为 8×10^{4} mV/W。该种太赫兹探测器最大的优势体现在能够实现频率的可调谐性[31]。

2018 年,江苏大学的 Xu 在贴片天线上制作了 3 种缝隙天线:矩形、圆形和宝石形结构,并比较了 3 种缝隙天线和场效应晶体管耦合的效率,考虑面积以及各方面因素,发现圆形和宝石形结构的缝隙天线有更好的带宽性能,并且它们的增益和方向性也更好,通过减小天线的尺寸,能够更好的提高天线的相关性能[33]。

缝隙天线可以看作偶极子天线的互补形式,因此其性能和偶极子天线有很多相似之处,并且缝隙天线容易集成于太赫兹电路中,如共面波导

电路等。缝隙天线的性能不仅与缝隙的形状和尺寸有关,也与缝隙之间的距离息息相关,设计合适的缝隙尺寸、形状以及缝隙间距,能够更好地提高其增益与方向性,从而使太赫兹探测器的响应度得到提升。集成缝隙天线阵列场效应晶体管太赫兹探测器,有着功耗低、辐射效率高和性能稳定等一系列优点,而且将双缝隙天线与场效应晶体管进行耦合,能够实现较高响应度的探测。这些特点使得缝隙天线在太赫兹探测器中得到了充分应用。

3.3 贴片天线结构(Patch-antenna)

贴片天线是一种三明治式的定向天线,也称微带隙天线。它是由两个金属板(其中一个金属板比另一个大)叠加组成的,中间有个片状介电质,上层金属作为贴片天线的主结构,下层金属作为模拟地,具体形式如图 8 所示。

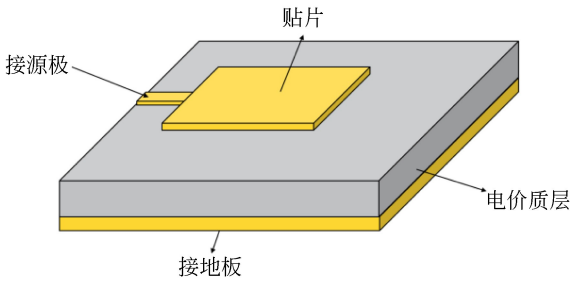

图 8 贴片天线结构

Fig. 8 Patch antenna

2009 年,Tanigawa 报导了贴片天线和高电子迁移率场效应晶体管(HFET)耦合的太赫兹探测器[34],贴片的接地线和 HFET 的源极相连,贴片天线和 HFET 的栅极相连,通过调节绝缘层厚度就可以调节天线的探测性能,发现太赫兹极化方向和天线极化方向平行时能探测到最大信号,垂直时信号最小,无天线时几乎探测不到信号,当栅源偏压处于阈值电压附近时,出现峰值,这与 Dyakonov 和 Shur 在 1996 年推导得到的结果[2]相一致。

2011 年,Boppel 用 150 nm CMOS 技术制作的 Si 基场效应晶体管,耦合微带隙贴片天线,在 0.55 ~0.6 THz进行测试,得到的噪声等效功率为 4.3×10^{-11} W/$\sqrt{\text{Hz}}$,响应度为 9.7×10^{5} mV/W。贴片天线阵列结构的引入,大幅度提高了场效应晶体管太赫兹探测器的响应度[35]。

2017 年,中国科学院半导体研究所的 Liu 在 Si 基衬底上集成了一种 0.86 THz 的太赫兹探测器,该太赫兹探测器包含一个接地的贴片天线和一个源端馈电的 NMOS 场效应晶体管,可以实现响应度为3.3×10^{6} mV/W,噪声等效功率为 1.06×10^{-10} W/$\sqrt{\text{Hz}}$的探测。该种类型的太赫兹探测器用 CMOS 技术能够实现批量化生产,用于太赫兹成像技术也能较清楚地显示出图形的一些细节,相比于之前的报道成像技术有了显著进步[36]。

贴片天线属于微带隙天线,带宽较窄,其极化方式容易调节,中心馈电时为线极化,偏心极化时为椭圆极化。贴片天线是集成平面天线场效应晶体管太赫兹探测器中最为常用的天线结构之一,主要是由于贴片天线制作工艺简单,与 COMS 制备工艺兼容,并且贴片天线也容易被制作为其他类型的天线(如缝隙天线),受衬底效应的影响较小,这些特点使得贴片天线在太赫兹探测器方面得到了较好的应用,也是未来产业化生产的希望之一。

3.4 Grating-gate 结构

Grating-gate 结构虽然不属于前面介绍的天线结构,但也属于广义的平面结构,这里也做一些相关的介绍。Grating-gate 结构是将场效应晶体管的栅极制作为分裂的块状结构,通过栅控部分和非栅控部分对沟道中二维电子气的共同调节,实现场效应晶体管太赫兹探测器的响应度与噪声等效功率的优化,具体形式如图 9 所示。

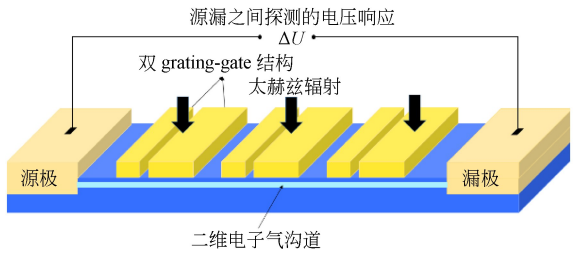

图 9 Grating-gate 结构

Fig. 9 Grating-gate structure

1995 年,Keay 以及 Drexler 首次提出双量子阱(DQW)中的阱间转化也可以通过太赫兹光子辅助隧穿来实现,从而开启了快速、电压可调的太

赫兹探测器的研究[37-38]。2002 年,Peralta 发现在 DQW 场效应晶体管上附加 Grating-gate 栅极时,会产生强烈的共振和电压可调节光电导现象,给出了响应度随栅压,太赫兹频率和温度之间的关系[39]。

自 2003 年开始,Popov 就 Grating-gate 做了一系列的研究,他运用第一性电磁方法得出了晶体管吸收太赫兹波产生响应是由于沟道中电子浓度的静态空间调制作用的结论,这种调制作用主要是栅极下方的等离子体作用引起的[40]。2005 年,他又提出了另一种新的解释栅控二维电子气等离子体振荡的理论,解决了平面电磁波在完全导带上衍射的关键问题,太赫兹吸收取决于栅长和栅与沟道间的距离[41]。

2006 年,popov 发现分离的电子沟道耦合太赫兹波的效率更高,对于设计更高频率的太赫兹器件具有重大意义[42]。2007 年他比较了共用二维电子气沟道以及分离电子沟道两种情况下,太赫兹电场的强度,发现采用分离电子沟道能够耦合到更多的太赫兹信号[43]。2008 年他发现采用短栅结构能够更好地调节非栅控部分的等离子体共振情况[44]。2011 年他沿用了一种双 Grating-gate 结构,将太赫兹探测器的响应度提高到了 8×10^6 mV/W[45]。2012 年采用的天线阵列结构,在室温时,可将太赫兹探测器的响应度提高到 1×10^6 mV/W[46]。

采用 Grating-gate 结构,提高场效应晶体管太赫兹探测器的响应度,是一种行之有效的方法,并且相比于引入平面天线结构,Grating-gate 结构不需要额外引入场效应晶体管之外的结构,不存在极化匹配、阻抗匹配的问题,制作方法也较容易,并且集成对数周期天线的场效应晶体管太赫兹探测器可以实现频率的可调谐性能[30]。这些特点使得 Grating-gate 结构在场效应晶体管太赫兹探测器中占有非常重要的地位。

3.5　其他类型的结构

除了前面介绍的几种平面天线结构和 Grating-gate 结构之外,也有一些其他类型的结构,也可以在一定程度上提高场效应晶体管太赫兹探测器的响应度。

2010 年,Tanigawa 提出在 GaN/AlGaN HEMT 结构上,将 HEMT 结构的栅极直接制作为半波偶极子天线结构,不需要额外引入天线结构,从而减小了耦合太赫兹波时的能量损耗。由于没有长传输线的传输损耗,这种结构在理论上可以达到很高的响应度,仿真结果约为 1.1×10^6 mV/W[47]。

2017 年,Hou 采用一种 nano-antenna 的结构集成于场效应晶体管的栅极上,对比有无该结构时,太赫兹探测器响应度的变化,发现该天线结构能够显著提高太赫兹探测器的性能。该器件能够实现室温时响应度为 1.5×10^7 mV/W,噪声等效功率为 5.8×10^{-13} W/$\sqrt{\text{Hz}}$的探测,相比于别的天线结构而言,对于太赫兹探测器的响应度有近 1 个量级的提升[48]。

用于提高场效应晶体管太赫兹探测器响应度的结构非常多,以上介绍的是几种常用结构,除了以上结构之外,还有一些其他结构,如用在热探测器、光探测器中的结构,这里不作详述。

4　结束语

场效应晶体管作为太赫兹探测器的应用已有近 30 年的历史,有了很多较为成功的提高响应度的方法,采用平面天线提高场效应晶体管太赫兹探测器响应度是其中研究较多的方法,相比于未采用天线的场效应晶体管太赫兹探测器,响应度有了大幅度的提升[14]。目前所采用的平面天线结构主要包括偶极子天线、缝隙天线、贴片天线以及 grating-gate,根据所耦合的材料与结构,各种类型的结构都有其适用的场合。

平面天线场效应晶体管太赫兹探测器的研究也有了诸多进展。首先,集成的天线种类趋于多样化;其次,场效应晶体管太赫兹探测器的探测原理得到了更为充分详细的解释,耦合天线结构的自混频原理得到了更进一步的发展[16,49-51];另外,平面天线的设计方法也有了一定的进步,从理论上推导出了天线参数和响应度之间的表达式[15,50];最后对于应用方面,集成平面天线能够显著提升太赫兹成像技术的成像效果。

但是集成平面天线场效应晶体管太赫兹探测器的研究也有很多限制:第一,衬底效应的限制,因为半导体器件需要制备在半导体晶圆衬底上,

而衬底的存在会导致很多太赫兹辐射没有被天线耦合,从而大幅度降低天线的性能;第二,天线和晶体管之间的阻抗匹配问题,因为晶体管在太赫兹波段的输入阻抗很难通过实际测试提取,所以天线与晶体管之间的阻抗匹配很难精准完成;第三,天线的探测理论有待更进一步的优化,常规的探测原理采用能量传输的模式计算探测器的响应度,自混频原理采用沟道电场的增强作用计算探测器的响应度,两种对于天线太赫兹探测器的解释,最后能否殊途同归,能否找到更普适的场效应检测理论? 第四,关于天线的设计原则,虽然很多研究都比较了不同天线的尺寸对于太赫兹探测响应度的影响,但是并没有真正完善的公式能够直接反映天线尺寸与响应度的关系,两种检测理论都推导了天线与响应度之间的联系,但是天线尺寸的变化,会对天线方向性系数产生何种程度的影响,如何改变天线的传输效率等,并没有给出直观的解释。另外,很多研究报导的平面天线集成到场效应晶体管中的结构,只能在仿真上实现,受到工艺技术等问题的限制,很难流片制作成品。

针对以上问题,本文给出了可供参考的一些解决思路:首先,对于衬底效应的问题,在研究场效应晶体管太赫兹探测器时,所沿用的衬底并不是越薄越好,这一点往往被很多研究者忽略,合适的衬底厚度往往能够大幅度提升探测器的响应度,具体的选择标准见文献[15]。其次,对于晶体管阻抗难以提取的问题,可以适当转换仿真时所添加的激励源,由于天线的互易性,将发射模式转化为接收模式,可以有效避免晶体管阻抗难以提取的问题。最后,对于天线的探测理论以及天线尺寸的设计原则,由于目前相关的理论研究并没有完善,这两类问题并没有得到很好的解决。如果研究者能对天线相关的电参数与响应度关系做更进一步的推导研究,相信在不久的将来,这些问题都会迎刃而解。

场效应晶体管太赫兹探测器的发展以及理论研究已经较为成熟,但大规模的工业应用仍然需要走很长的一段路,这主要是因为场效应晶体管太赫兹探测器响应度的提升,仍然没有非常成熟的方式。耦合平面天线能够有效解决这一个问题,建议研究者首先能够更多地从仿真方面优先模拟相应的各种模型,对于不合理的结构做出初步的筛选,对合理的结构再做更进一步的流片工艺。对于未来可以研究的方向,建议研究者可以从平面天线的种类入手,从而比较各种类型天线对于场效应晶体管太赫兹探测器响应度的提高程度,对比各种工艺实现的难易程度,对于同一种类型的天线,能够研究透彻天线各种参数的变化对于响应度的影响。对于相关理论的研究,目前的公式推导都只是局限在场效应晶体管的一些结论,并没有将集成的平面天线的参数考虑进去,理论研究需要研究更多的包含有天线的电特性参数,如天线的方向性、输入阻抗、辐射效率增益以及中心频率等,这样对于天线的设计而言,会有建设性的指导意义。

随着对于平面天线场效应晶体管太赫兹探测器的研究逐步深入,相关的理论研究会得到更进一步的完善,并最终推导出天线尺寸、形状等参数与探测器响应度更直观的表达。另一方面,随着工艺水平的逐步提高,天线的设计将会变的更加容易实现,场效应晶体管太赫兹探测器最终也会在市场上得到大规模的应用。基于此,平面天线场效应晶体管太赫兹探测器将会向着响应度更高、频率分辨性能更好、室温工作性能更好的趋势发展,相信在不久的将来,平面天线场效应晶体管太赫兹探测器会得到更为广泛的应用。

参考文献:

[1] DYAKONOV M, SHUR M. Shallow water analogy for a ballistic field effect transistor: new mechanism of plasma wave generation by dc current[J]. *Physical Review Letters*, 1993, 71(15): 2465-2468.

[2] DYAKONOV M, SHUR M. Detection, mixing, and frequency multiplication of terahertz radiation by two-dimensional electronic fluid[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1996, 43(3): 380-387.

[3] 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.

[4] LU J Q, SHUR M A, WEIKLE R M, *et al.*. Detection of microwave radiation by electronic fluid in AlGaN/GaN heterostructure field effect transistors[C]. *Proceedings of* 1997 *IEEE/Cornell Conference on Advanced Concepts in High Speed Semiconductor Devices and Circuits*, *IEEE*, 1997: 211-217.

[5] EL FATIMY A, TOMBET S B, TEPPE F, *et al.*. Terahertz detection by GaN/AlGaN transistors[J]. *Electronics Letters*, 2006, 42(23): 1342-1344.

[6] BROWN E R, MCINTOSH K A, NICHOLS K B, *et al.*. Photomixing up to 3.8 THz in low-temperature-grown GaAs[J]. *Applied Physics Letters*, 1995, 66(3): 285-287.

[7] LU J Q, SHUR M S, HESLER J L, *et al.*. Terahertz detector utilizing two-dimensional electronic fluid[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 1998, 19(10): 373-375.

[8] LÜ J Q, SHUR M S. Terahertz detection by high-electron-mobility transistor: enhancement by drain bias[J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 78(17): 2587-2588.

[9] KNAP W, DENG Y, RUMYANTSEV S, *et al.*. Resonant detection of subterahertz radiation by plasma waves in a submicron field-effect transistor[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 80(18): 3433-3435.

[10] KNAP W, DENG Y, RUMYANTSEV S, *et al.*. Resonant detection of subterahertz and terahertz radiation by plasma waves in submicron field-effect transistors[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 81(24): 4637-4639.

[11] 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.

[12] KNAP W, DYAKONOV M, COQUILLAT D, *et al.*. Field effect transistors for terahertz detection: physics and first imaging applications[J]. *Journal of Infrared*, *Millimeter*, *and Terahertz Waves*, 2009, 30(12): 1319-1337.

[13] KOPYT P, MARCZEWSKI J, KUCHARSKI K, *et al.*. Planar antennas for THz radiation detector based on a MOSFET [C]. *Proceedings of* 2011 *International Conference on Infrared*, *Millimeter*, *and Terahertz Waves*, *IEEE*, 2011: 1-2.

[14] 孙建东. 室温高灵敏度场效应自混频太赫兹波检测器[D]. 苏州: 中国科学院大学苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 2012.
SUN J D. High-responsivity, room-temperature, self-mixing terahertz detectors based on high-electron-mobility field-effect transistor[D]. Suzhou: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)

[15] ZHANG B W, YAN W, LI ZH F, *et al.*. Analysis of substrate effect in field effect transistor terahertz detectors[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(4): 8500607.

[16] LISAUSKAS A, PFEIFFER U, ÖJEFORS 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.

[17] 孙建冬, 孙云飞, 周宇, 等. 蝶形天线增强的 HEMT 室温太赫兹探测器[J]. 微纳电子技术, 2011, 48(8): 215-219.
SUN J D, SUN Y F, ZHOU Y, *et al.*. Room temperature terahertz detectors based on HEMTs enhanced by bowtie antennas[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2011, 48(8): 215-219. (in Chinese)

[18] SUN J D, SUN Y F, ZHOU Y, *et al.*. A terahertz detector based on AlGaN/GaN high electron mobility transistor with bowtie antennas[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2011, 1399(1): 893-894.

[19] SUN J D, SUN Y F, WU D M, *et al.*. High-responsivity, low-noise, room-temperature, self-mixing terahertz detector realized using floating antennas on a GaN-based field-effect transistor[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(1): 013506.

[20] BAUER M, LISAUSKAS A, BOPPEL S, *et al.*. Bow-tie-antenna-coupled terahertz detectors using AlGaN/GaN field-effect transistors with 0.25 micrometer gate length[C]. *Proceedings of* 2013 *European Microwave Integrated Circuit Conference*, *IEEE*, 2013: 212-215.

[21] PFEIFFER U R, OJEFORS E. A 600-GHz CMOS focal-plane array for terahertz imaging applications[C]. *Proceedings of ESSCIRC* 2008-34*th European Solid-State Circuits Conference*, *IEEE*, 2008: 110-113.

[22] BAUER M, RÄMER A, BOPPEL S, *et al.*. High-sensitivity wideband THz detectors based on GaN HEMTs with inte-

grated bow-tie antennas[C]. *Proceedings of* 2015 10*th European Microwave Integrated Circuits Conference*, *IEEE*, 2015: 1-4.

[23] 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.

[24] GUO W L, WANG L, CHEN X SH, *et al.*. Graphene-based broadband terahertz detector integrated with a square-spiral antenna[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(8): 1647-1650.

[25] SPIRITO D, COQUILLAT D, DE BONIS S L, *et al.*. High performance bilayer-graphene terahertz detectors[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(6): 061111.

[26] TONG J Y, MUTHEE M, CHEN S Y, *et al.*. Antenna enhanced graphene THz emitter and detector[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(8): 5295-5301.

[27] YANG X X, VOROBIEV A, GENERALOV A, *et al.*. A flexible graphene terahertz detector[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(2): 021102.

[28] IKAMAS K, ČIBIRAITĖ D, LISAUSKAS A, *et al.*. Broadband terahertz power detectors based on 90-nm silicon CMOS transistors with flat responsivity up to 2.2 THz[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2018, 39(9): 1413-1416.

[29] DYER G C, VINH N Q, ALLEN S J, *et al.*. A terahertz plasmon cavity detector[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(19): 193507.

[30] DYER G C, AIZIN G R, RENO J L, *et al.*. Novel tunable millimeter-wave grating-gated plasmonic detectors[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, 17(1): 85-91.

[31] KIM S, ZIMMERMAN J D, FOCARDI P, *et al.*. Room temperature terahertz detection based on bulk plasmons in antenna-coupled GaAs field effect transistors[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(25): 253508.

[32] VICARELLI L, VITIELLO M S, COQUILLAT D, *et al.*. Graphene field-effect transistors as room-temperature terahertz detectors[J]. *Nature Materials*, 2012, 11(10): 865-871.

[33] XU L J, TONG F CH, BAI X, *et al.*. Design of miniaturised on-chip slot antenna for THz detector in CMOS[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2018, 12(8): 1324-1331.

[34] TANIGAWA T, ONISHI T, IMAFUJI O, *et al.*. AlGaN/GaN plasmon-resonant terahertz detectors with on-chip patch antennas[C]. *Proceedings of* 2009 *Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference*, *OSA*, 2009: CThFF7.

[35] BOPPEL S, LISAUSKAS A, KROZER V, *et al.*. Performance and performance variations of sub-1 THz detectors fabricated with 0.15 μm CMOS foundry process[J]. *Electronics Letters*, 2011, 47(11): 661-662.

[36] LIU ZH Y, LIU L Y, 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.

[37] KEAY B J, ZEUNER S, ALLEN JR S J, *et al.*. Dynamic localization, absolute negative conductance, and stimulated, multiphoton emission in sequential resonant tunneling semiconductor superlattices[J]. *Physical Review Letters*, 1995, 75(22): 4102-4105.

[38] DREXLER H, SCOTT J S, ALLEN S J, *et al.*. Photon-assisted tunneling in a resonant tunneling diode: stimulated emission and absorption in the THz range[J]. *Applied Physics Letters*, 1995, 67(19): 2816-2818.

[39] PERALTA X G, ALLEN S J, WANKE M C, *et al.*. Terahertz photoconductivity and plasmon modes in double-quantum-well field-effect transistors[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 81(9): 1627-1629.

[40] POPOV V V, POLISCHUK O V, TEPERIK T V, *et al.*. Absorption of terahertz radiation by plasmon modes in a grid-gated double-quantum-well field-effect transistor[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 94(5): 3556-3562.

[41] POPOV V V, POLISCHUK O V, SHUR M S. Resonant excitation of plasma oscillations in a partially gated two-dimensional electron layer[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 98(3): 033510.

[42] POPOV V V, TSYMBALOV G M, FATEEV D V, *et al.*. Cooperative absorption of terahertz radiation by plasmon modes in an array of field-effect transistors with two-dimensional electron channel[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(12):

123504.

[43] POPOV V V, SHUR M S, TSYMBALOV G M, *et al*.. Higher-order plasmon resonances in GaN-based field-effect transistor arrays[J]. *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, 2007, 17(3): 557-566.

[44] POPOV V V, KOUDYMOV A N, SHUR M, *et al*.. Tuning of ungated plasmons by a gate in the field-effect transistor with two-dimensional electron channel[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 104(2): 024508.

[45] POPOV V V, FATEEV D V, OTSUJI T, *et al*.. Plasmonic terahertz detection by a double-grating-gate field-effect transistor structure with an asymmetric unit cell[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(24): 243504.

[46] POPOV V V, PALA N, SHUR M S. Room temperature terahertz plasmonic detection by antenna arrays of field-effect transistors[J]. *Nanoscience and Nanotechnology Letters*, 2012, 4(10): 1015-1022.

[47] TANIGAWA T, ONISHI T, TAKIGAWA S, *et al*.. Enhanced responsivity in a novel AlGaN/GaN plasmon-resonant terahertz detector using gate-dipole antenna with parasitic elements[C]. *Proceedings of the* 68*th Device Research Conference*, *IEEE*, 2010: 167-168.

[48] HOU H W, LIU ZH H, TENG J H, *et al*.. A sub-terahertz broadband detector based on a GaN high-electron-mobility transistor with nanoantennas[J]. *Applied Physics Express*, 2017, 10(1): 014101.

[49] SUN Y F, SUN J D, ZHOU Y, *et al*.. Room temperature GaN/AlGaN self-mixing terahertz detector enhanced by resonant antennas[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(25): 252103.

[50] SUN J D, QIN H, LEWIS R A, *et al*.. Probing and modelling the localized self-mixing in a GaN/AlGaN field-effect terahertz detector[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(17): 173513.

[51] HOU H W, LIU ZH H, TENG J H, *et al*.. Modelling of GaN HEMTs as terahertz detectors based on self-mixing[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 141: 98-102.

作者简介:

王晓东(1972—),男,山东莒县人,研究员,博士生导师,中国科学院半导体所集成中心主任,主要从事半导体微纳器件技术,纳米热电结构与器件,高效叠层太阳电池。E-mail: xdwang@ semi. ac. cn

颜　伟(1984—),男,辽宁盘锦人,博士,助理研究员,主要从事集成平面天线 GaN/AlGaN HEMT 太赫兹探测器的研究。E-mail: yanwei@ semi. ac. cn

李兆峰(1976—),男,江苏淮安人,研究员,硕士生导师,主要从事纳米光学与光电子学,特异材料,表面等离子体,光子晶体,微纳光学,太赫兹,MEMS 器件等的研究。E-mail: lizhaofeng@ semi. ac. cn

黄　镇(1993—),男,湖北武汉人,博士研究生,主要从事集成平面天线 GaN/AlGaN HEMT 太赫兹探测器的研究。E-mail: zhenhuang@ semi. ac. cn