2013年2月 Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2013)01-0043-07

InP 基三端太赫兹固态电子器件和电路发展

金 智,苏永波,张毕禅,丁 芃,汪丽丹,周静涛,杨成樾,刘新宇

(中国科学院 微电子研究所, 北京 100029)

摘 要:随着微电子技术的飞速发展,半导体器件的截止频率已经进入到太赫兹频段,太赫 兹电路的频率特性得到极大发展。以固态器件为基础的太赫兹电路的工作频率进入到 THz 频段。 本文重点介绍 InP 基双极器件和场效应器件的发展以及在太赫兹电路和系统中的应用。 关键词:太赫兹; InP 基晶体管;固态电子器件;太赫兹单片集成电路

中图分类号: TN322⁺.8 文献标识码: A

Development of InP-based three-terminal terahertz solid state electronic devices and circuits

JIN Zhi, SU Yong-bo, ZHANG Bi-chan, DING Peng, WANG Li-dan, ZHOU Jing-tao, YANG Cheng-yue, LIU Xin-yu (Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: The fast development of microelectronics makes the cutoff frequency of semiconductor devices exceed terahertz, which significantly improves the frequency characteristics of terahertz circuits. The solid-state electronic circuits can operate at terahertz frequency. The development of InP-based bipolar devices and field effect transistors are reviewed, and their applications in terahertz circuits and systems are introduced as well.

Key words: terahertz; InP-based transistors; solid state electronic device; Terahertz Monolithic Integrated Circuits(TMIC)

1 太赫兹及太赫兹系统

太赫兹指频率在 0.1 THz~10 THz 范围的电磁波,其波长在 30 μm~3 mm 之间,介于微波和光波之间,具有 波长短、透过率高、带宽宽等特点,在太赫兹成像、太赫兹频谱和太赫兹通信等方面具有广阔的应用前景^[1]。太 赫兹波对很多非极性材料具有很强的穿透力,可以轻易透过多种非金属外包装材料。太赫兹光子能量很低(只有 几个电子毫伏),不会对被探测物质造成损伤。在安检成像领域,通过探测分析太赫兹波的时域谱或者 2D 图像, 可以发现隐藏的武器和爆炸物。在无损探测领域,太赫兹波被成功用于检测美国国家航空航天局太空舱的外壁缺 陷情况。在军事研究领域,太赫兹波的独特性能,使其在通信、雷达、电子对抗、制导和卫星方面具有广阔的应 用空间。太赫兹波是非常好的宽带信息载体,与光波相比,其具有波束宽、易定位和能耗低的优点,非常适合卫 星间通信。综上所述,太赫兹成像、太赫兹通信和太赫兹波谱是太赫兹应用的 3 个主要方向。

太赫兹产生、太赫兹传输和太赫兹探测是太赫兹得以应用的基础。太赫兹系统分为主动探测和被动探测。主 动探测系统由发射和接收构成。在发射端,较低频率的发射控制信号与太赫兹源经过混频器形成调制的太赫兹信 号,信号经功率放大器放大,经天线发射出去;在接收端,太赫兹波经天线接收,经低噪声放大器放大,进入混 频器,通过与本振源进行下混频,变为中频信号,由后端进行信号处理。其中本振源、混频器、功率放大器、低 噪声放大器都工作在太赫兹频段,这对半导体器件和电路的频率特性提出非常高的要求。太赫兹通信系统和主动 成像系统的基本构成与此类似。由于物体的太赫兹波较弱,主动式探测实际上是采用太赫兹波照射物体,而探测 反射的太赫兹波,其信噪比要好得多。与主动探测系统相比,被动探测系统没有发射端,天线收集的太赫兹信号 经低噪声放大器放大后,经过混频器并与本振下混频,中频信号经过中频放大器后进行探测。这2种系统的噪声 系数主要由接收端的第1级低噪声放大器的噪声系数决定,能得到很好的抑制,具有非常好的噪声特性。制作在 太赫兹频段工作的低噪声放大器非常困难,通常在接收天线后直接采用混频器,将太赫兹波变为较低频率的信号 进行处理。这种结构的系统噪声特性由混频器的噪声和损耗决定,与前一种相比,噪声特性较差。

尽管目前太赫兹技术的研究取得很大进步,但由于高效太赫兹源和探测器的缺乏,严重阻碍着太赫兹技术的 发展与应用。在太赫兹源的产生与探测方面,太赫兹的频率范围相对于微波其频率太高,而相对于光波频率又太 低,因此电子学和光学在太赫兹频段形成了"太赫兹空白"。在太赫兹源与太赫兹探测技术研究中,主要有真空 电子学方法、光学方法和微电子学方法。真空电子学方法是利用真空电子管等电子器件实现太赫兹波的产生与探 测,其缺点是体积庞大,运行与维护的外围系统复杂、昂贵。光学方法主要是利用超晶格结构形成子能级,通过 电子在子能级间的跃迁,实现太赫兹波的产生与探测,由于太赫兹波的能量小,环境的热扰动对其性能影响巨大, 所以无论是亚能级的太赫兹激光器还是太赫兹探测器,都需要增加制冷系统,使其工作在非常低的温度下。微电 子学方法,主要是采用基于半导体的固态电子器件构成的微电子集成电路,这些电路可以实现太赫兹源,对太赫 兹信号进行混频和放大等功能,实现特定频率的太赫兹波的产生与探测。目前通过微电子学方法可以获得频率超 过2 THz 的太赫兹源和达到 THz 的信号探测和处理^[2-3]。该类器件具有体积小,成本低,可规模化生产,易于集 成等优点。特别是近些年来快速发展的以三端太赫兹器件为核心的太赫兹单片集成电路(TMIC),其工作频率已 突破 600 GHz,可以实现太赫兹信号的放大,成为了最具发展和应用前景的太赫兹器件和电路^[4]。

2 太赫兹三端固态电子器件

太赫兹系统的发展对器件的频率特性提出非常高的要求。三端半导体器件指双极器件和场效应器件等三端口、具有放大功能的器件。器件频率特性的 2 个最关键指标是增益截止频率(*f*_T)和最高振荡频率(*f*_{max})(或称为功率 增益截止频率)。要实现太赫兹电路,关键是如何提高器件的 *f*_{max},太赫兹频段工作的电路工作频率通常为器件 *f*_{max} 的 2~3 倍。三端电子器件具有增益高、噪声系数低等特性,广泛应用于现代的通信、空间探测等系统中。

继 Si 和 GaAs 半导体材料之后发展起来的 InP 基材料具有生长手段成熟,能带易于剪裁,具有非常高的载流 子迁移率等特性,是太赫兹电子器件的理想材料。太赫兹三端电子器件充分利用 InP 基材料的优异特性,主要有 InP 基异质结构双极晶体管(Heterojunction Bipolar Transistor, HBT)和高电子迁移率晶体管(High Electron Mobility Transistor, HEMT)两种形式。

2.1 InP 基 HBT 器件

InP 基 HBT 为纵向器件,其结构见图 1,由发射极、基极和集电极构成。器件载流子从发射极注入基极,在集电极反向电场的作用下被扫出集电极。InP 基 HBT 是利用较宽带隙的 InP 材料作为发射极,而窄带隙的 InGaAs 材料作为基极和集电极,这样器件的发射极注入效率会得到很大的提高;同时,发射极的掺杂浓度可以降低,有

效地减小发射结的电容,改 善器件的频率特性;基极的 掺杂浓度可以很高,在获得 增益的同时降低接触电阻, 提高频率特性。载流子从发 射极到集电极所经过的时 间为渡越时间,器件的 $f_{\rm T}$ 与载流子的渡越时间成反 比;此外,衡量器件另一个 重要的特性是器件的 $f_{\rm max}$ 。 对于 HBT 器件而言, $f_{\rm T}$ 和 $f_{\rm max}$ 分别为:



$$f_{\rm T} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{nkT}{qI_{\rm C}} (C_{\rm BE} + C_{\rm BC}) + \frac{T_{\rm B}^2}{\nu D_n} + \frac{X_{\rm dep}}{2\nu_{\rm sat}} + (R_{\rm E} + R_{\rm C})C_{\rm BC} \right]^{-1}$$
(1)

$$f_{\rm max} = \sqrt{\frac{f_{\rm T}}{8\pi r_{\rm B} C_{\rm BC}}} \tag{2}$$

式中: n为发射极-基极的理想因子; k为普朗克常数; T是器件的温度; q为电子的电荷; $I_{\rm C}$ 是集电极电流; $C_{\rm BE}$ 是基极-发射极的结电容; C_{BC}是基极-集电极的结电容; T_B是基极的厚度; v 是与基极电场有关的系数; D_n是电 子的扩散系数; X_{den} 是集电极的耗尽层厚度; v_{sat} 是电子的饱和速度; R_E 是发射极的电阻; R_C 是集电极的电阻; $r_{\rm B}$ 是与基极相关的电阻。由上述公式可以看到,为增加器件的 $f_{\rm T}$ 和 $f_{\rm max}$,需要增加器件的工作电流,减小器件的 基极和集电极的厚度,并减小器件结电容和电阻寄生参数。随器件集电极厚度的减小,器件的击穿电压随之减小, 为得到较高的击穿电压,采用带隙较宽的 InP 材料作为集电极,但 InP 材料作为集电极与 InGaAs 基极材料之间 存在导带尖峰,会阻挡载流子的运动,影响器件的直流,降低器件的频率特性,因此为提高器件频率特性,利用 InP 基材料的优异特性,优化器件的能带结构,消除导带尖峰非常重要。为实现高击穿电压、高速的 InP 基 HBT 器件,有3种方法消除集电极的导带尖峰:a)采用在基极 InGaAs 材料和集电极 InP 间插入带隙介于 InGaAs 和 InP 之间的多层材料,材料的带隙宽度从基极到 InP 层逐渐升高,使集电极能带平缓过渡,消除导带尖峰^[5]; b) 在 基极 InGaAs 和集电极 InP 之间插入超晶格结构,超晶格的阱和垒的组分固定,阱的厚度从基极到集电极顺次减 小, 而垒的厚度依次增加, 在超晶格中形成从基极到集电极的子能带, 实现能带过渡^[6]; c) 改变基极材料的能 带结构消除导带尖峰,将基极材料变为 GaAsSb, GaAsSb 材料的导带顶高于 InP 材料的导带顶, 二者形成 II 型 能带结构,这种结构中没有导带尖峰的存在^[7]。导带尖峰的消除增加了载流子的饱和速度,缩短集电极的渡越时 间,提高了器件的fr。此外,在基极引入准电场,提高载流子在基极的运动速度,以及减小基极的厚度,都能减 小载流子在基极的渡越时间,提高器件的fr。为使器件的fmax提高,除提高fr外,还要减小超薄基区的欧姆接触 电阻,超薄基极欧姆接触电阻与基极材料表面状态具有很大的关系,对表面进行处理,减小表面损伤能获得较小 的欧姆接触电阻率。

 $f_{\rm T}$ 增加主要靠减小基极和集电极的厚度来实现。最初,基极采用 Be 掺杂的 InGaAs 材料实现,然而 Be 的扩 散速度较快,通常形成较宽的掺杂过渡区,难以得到较小的基极厚度, $f_{\rm T}$ 一般难以达到 200 GHz。C 在 InGaAs 材料中是两性杂质,在适宜的生长条件下可以形成 p 型掺杂,且 C 的扩散速度较小,易于得到陡峭的 pn 结,基 极的厚度能够准确控制。单异质结 InP HBT 通过采用 C 掺杂基极,基极厚度减薄到 12.5 nm,集电极减薄到 55 nm 时,0.32 µm 宽的发射极器件的 $f_{\rm T}$ 到达 765 GHz, $f_{\rm max}$ 为 227 GHz^[8]。采用 20 nm 厚的 C 掺杂基区,集电极采用组 分渐变消除导带尖峰,厚为 150 nm,发射极宽度为 0.8 µm 时,首次实现了 InP 双异质结双极型晶体管(Double Heterojunction Bipolar Transistor, DHBT)的 $f_{\rm T}$ 超过 300 GHz^[6];采用超晶格消除导带尖峰,当集电极厚度减小到 60 nm 时,发射极宽度为 250 µm,器件的 $f_{\rm T}$ 分别为 660 GHz^[6]。器件的 $f_{\rm max}$ 主要通过减小结面积,降低基极接触 电阻等方法来实现。早期的 InP HBT 的 $f_{\rm max}$ 提高主要靠集电极侧向腐蚀或转移衬底技术来减小基极—集电极结面 积来实现,通过减小集电极接触面积, $f_{\rm max}$ 可达到 1 THz^[9],然而这种方法在转移过程中形变,使器件的成品率 急剧下降,目前的工艺中较少采用。现有的工艺都采用 3 台面平坦化工艺实现,采用发射极和基极自对准工艺, 减小基极的寄生电阻;通过减小基极面积来减小寄生电容,提高 $f_{\rm max}$,现有的工艺,基极的宽度可减小到 150 nm^[10]。 减小发射极的宽度,也能使器件的 $f_{\rm max}$ 得到有效的提高。采用上述多种工艺结合,在发射极和基极厚度为 30 nm, 集电极厚度为 100 nm,发射极宽度为 130 nm,长度为 2 µm 时,器件的 $f_{\rm T}$ 达到 0.52 THz, $f_{\rm max}$ 达到 1.2 THz,为 HBT 器件中的最高水平^[11]。

2.2 InP 基 HEMT 器件

HEMT 器件是一种场效应器件,由源极、 栅极和漏极组成的三端器件。通过控制栅电 压来达到改变漏极电流的目的。InP基 HEMT 器件的结构示意图和能带结构见图 $2^{[12]}$ (图 中 E_F 为费米能级)。它的外延层结构是先在 InP 衬底上生长 InAlAs 缓冲层,生长 InGaAs 的沟道层,再生长 InAlAs 爆冲层,生长 InGaAs 的沟道层,最后生长 InAlAs 势垒层和重型掺 杂的 InGaAs 盖层。这些层状结构形成如图 1 的能带结构,其中 InAlAs 缓冲层和势垒层将 窄带隙的 InGaAs 材料夹在中间形成一个量 子阱结构,而δ掺杂则提供电子,这样电子 就被限制在量子阱中,形成二维电子气(Two



Dimensional Electron Gas, 2DEG),由于 2DEG 和掺杂层被隔离层所隔离,且 InGaAs 沟道层和 InAlAs 隔离层都 没有掺杂,因此电子受到的带电离子的散射小,迁移率高。栅金属与势垒层形成肖特基接触,由肖特基势垒控制 沟道二维电子气的浓度,从而产生漏极电流的调制效应。HEMT 器件在非常高频率下通常具有较小的噪声特性,常用于制作低噪声器件。InP 基 HEMT 的 *f*_T,*f*_{max} 和最小噪声系数(*F*_{min})为:

$$g_{\rm m} = \frac{WC_{\rm ox}\mu_{\rm n}}{L} \times (V_{\rm GS} - V_{\rm T}) \times (1 - \alpha) \tag{3}$$

$$f_{\rm T} = \frac{g_{\rm m}}{2\pi (C_{\rm gs} + C_{\rm gd})} \tag{4}$$

$$f_{\max} = \frac{f_{\rm T}}{\sqrt{4g_{\rm ds}(R_{\rm i} + R_{\rm s} + R_{\rm g}) + \frac{2C_{\rm gd}}{C_{\rm gs}} \left[\frac{C_{\rm gd}}{C_{\rm gs}} + g_{\rm m}(R_{\rm i} + R_{\rm s})\right]}}$$
(5)

$$F_{\min} = 1 + \frac{2fL}{f_{\rm T}} \left[\frac{I_{\rm opt}(R_{\rm g} + R_{\rm s})}{E_{\rm c}L} \right]^{1/2}$$
(6)

式中: g_m 是器件的跨导; W 为器件的栅宽; C_{ox} 为器件的等效栅电容; μ_n 为载流子迁移率; L 为栅长; V_{GS} 为栅 电压; V_T 为阈值电压; α 为常数; C_{gs} 和 C_{gd} 为栅源电容和栅漏电容; g_{ds} 为输出跨导; R_i , R_s 和 R_g 分别是本征、源、 栅电阻; f 为对应的频率; I_{opt} 为最佳噪声系数对应的电流; E_c 为常数。可以看到,为增加器件的 f_T 和 f_{max} 需要提 高器件载流子的迁移率,减小器件的栅长,减小器件的寄生电容和电阻。沟道的迁移率与材料的组分密切相关, 通过在沟道中引入富 In 的应变材料,可以有效提高器件沟道迁移率,现在太赫兹频段的 HEMT 通常采用高 In 组分的沟道或 InAs 复合沟道;通过减小源、漏欧姆接触电阻和采用非常合金的欧姆接触工艺,有效减小寄生电 阻; 同时,制作 T 型栅来减小栅电阻。通过采用这些方法有效提高了器件的频率特性。

从式(3)和式(4)可以看到,提高 $f_{\rm T}$ 的关键是增强栅控能力,减小栅长,提高载流子的迁移率。与 InP 匹配的 InGaAs 沟道材料的迁移率可以达到 8 000 cm²/(V·s),采用富 In 组分的 InGaAs 沟道材料可有效增加器件的载流子 迁移率,最近采用 InGaAs/InAs/InGaAs 的复合沟道其迁移率达到 15 000 cm²/(V·s)^[13],最好频率特性的 HEMT 即 采用这种高迁移率的沟道。栅长减小是 HEMT 中最为复杂的工艺。为减小栅极的寄生电阻,现有的 HEMT 都采 用 T 型栅工艺。T 型栅的工艺采用多层光刻胶实现,较多的有 PMMA/MMA/PMMA、ZEP/PMGI/ZEP 等多层光刻 胶,采用电子束曝光来实现^[14]。可实现最小栅长 30 nm 的器件^[15]。采用介质和多层胶,并结合干法刻蚀的方法 进一步减小栅长,提高栅制作的稳定性,采用这种方法制作的最小栅长减小到 15 nm^[16]。为提高栅控能力,需减 小沟道与金属栅间的间距,通过生长多层的外延结构,利用 InP 基材料的选择腐蚀特性,可以控制势全层的厚度,但为保证二维电子气的密度,器件的势全层通常为 10 nm,采用具有选择比高的 InP/InAIAs 复合势全层,可将势 全层的厚度控制到 8 nm,结合复合势全层、介质和控制势全层腐蚀方法,势全层的厚度可以降低到 4 nm,有效 地增大了器件的跨导,在 40 nm 栅长时器件的跨导达到 2.3 S/mm。现有的器件的 $f_{\rm r}$ 超过 600 GHz。为增加器件 的 $f_{\rm rax}$,除提高器件的 $f_{\rm r}$ 外,最重要的是减小栅极的寄生电阻和栅源、栅漏间的电容以及器件的欧姆接触。T 型 栅是减小栅极寄生电阻的关键技术,在现有 T 型栅的基础上,提高栅脚高度,减小寄生电容,在栅长 35 nm, $f_{\rm T}$ 达到 385 GHz, $f_{\rm max}$ 大于 1 THz^[13]。

3 太赫兹单片集成电路

太赫兹系统中太赫兹源、低噪声放大器和功率放大器,以及混频器是核心电路。太赫兹频段的混频器更多采用双端器件来实现,这里不做介绍,现主要介绍基于 HBT 和 HEMT 的 TMIC。20 世纪由于器件工艺的限制,半导体单片集成电路的工作频段主要集中在 W 波段。重点研究如何提高电路的功率和改善电路的噪声特性。近年来, InP 基 HBT 和 HEMT 的 *f*_{max}突破 1 THz, TMIC 得到了迅猛的发展。

基于三端器件的太赫兹频率源有压控振荡器(Voltage Controlled Oscillator, VCO)或锁相环(Phase Locked Loop, PLL),后者具有更好的频率稳定度,但制作难度非常高。2007年,采用栅长为 35 nm 的 InP HEMT 技术 实现了 314 GHz 和 346 GHz 的基频振荡器,输出功率分别为 46 μ W 和 25 μ W^[17]; 2008 年实现了 330 GHz 的振荡器模块,输出功率达到 0.27 mW^[18]。

与 HEMT 器件相比, HBT 器件为纵向型器件,具有较小表面效应和较小的 1/f 噪声特性,制作 VCO 将具有 较小的相位噪声。2007 年,采用 300 nm 宽度的发射极的 HBT 实现了 311 GHz 的基频振荡器^[19]。2010 年,Teledyne

研制成功最高频率达到 570 GHz 基频振荡器,振荡器集成了混频器,固定频率的振荡电路在 310 GHz 输出功率 为-6.2 dBm,412 GHz 输出功率为-5.6 dBm,在 573 GHz 输出功率达到-19.2 dBm,VCO 在 300 GHz 的调谐带宽 为 12 GHz,在 286 GHz,偏频 10 MHz 的相噪为-96.6 dBc/Hz^[20]。同年,采用 250 nm InP HBT 技术研制了单片 PLL 电路,该电路集成 300 GHz VCO,2:1 静态分频器,五级亚谐波相位探测和有源环状滤波器。该 PLL 可从 300.76 GHz~301.12 GHz 锁定,输出功率为-23 dBm,相位噪声在 100 kHz 偏频下为-78 dBc/Hz,其功耗 301.6 mW^[21]。 这是目前报道的最高工作频率的 PLL。

进入 21 世纪,太赫兹功率放大器有了较快的发展,2007 年采用 InP HEMT 技术实现了频率大于 300 GHz 的单片集成功率放大器,在 335 GHz 的小信号增益达到 12 dB,饱和输出功率 2 mW^[22];2008 年采用发射极宽度为 250 nm 的 InP DHBT 实现了工作在 324 GHz 的单片功率放大器,增益达到 4.8 dB,饱和输出功率 1.3 mW^[23]。2010 年采用栅长为亚 50 nm InP 基 HEMT 实现了 220 GHz,50 mW 的功率放大器模块,在频率范围 207 GHz~230 GHz 增益达到 11.5 dB^[24];同年报道了固态功率放大器模块,在 340 GHz 的小信号增益为 15 dB,输出峰值功率达到 10 mW^[25]。

在低噪声放大器方面,2010 年采用 InP HBT 工艺实现了大于 300 GHz 的放大器,六级趋放在 290 GHz 的增益为 17.3 dB,单级共射、共基 LAN 在 288 GHz 的增益为 8.4 dB,在 300 GHz 的噪声系数为 11.2 dB,两级共射、 共基 LAN 在 315 GHz 的增益为 20.5 dB,3 dB 带宽为 17 GHz^[26]。采用高截止频率的 InP HEMT 实现了工作频率 达到 0.48 THz 的放大器模块,在 465 GHz~482.5 GHz 五级放大器的峰值增益为 11.7 dB^[27]。2010 年报道了 0.55 THz 的 InP HEMT 共源--共栅 MMIC 放大器,三级放大器在 300 GHz 的增益为 17 dB,噪声系数为 8.3 dB,窄带放大 器在 0.55 THz 的增益为 10 dB^[28]。2011 年采用 30 nm InP HEMT 实现了 0.67 THz 的低噪声放大器。五级放大器 的噪声系数为 13 dB,增益为 7 dB,十级放大器的峰值增益达到 30 dB^[4]。最近,Northrop Grumman 公司声称实 现了高达 850 GHz 的低噪声放大器^[29],为系统实现更高频率提供了基础。

4 太赫兹三端固态电子器件和电路展望

太赫兹频段广阔的应用前景引起了广泛的关注。随着半导体技术的不断发展,三端固态电子器件和电路将向 更高频率、更高集成度以及规模化方向发展。

InP 基固态电子器件和电路的发展充分显示了其在太赫兹方面的应用优势,充分发挥 InP 材料的优越特性, 向更高频率迈进将是今后的努力方向。减小器件尺寸,减小器件寄生效应,是进一步提高器件频率特性的关键。 此外,在太赫兹电路设计方面,随工作频率的不断提高,为减小衬底损耗,衬底的厚度逐渐减小,从工作频率 0.1 THz 的 100 µm 厚的衬底,到 300 GHz 的 25 µm,减小衬底厚度,降低损耗将对电路工作频率和效率的提高 起着重要的作用。据 ITRS 预测^[30], InP HEMT 的栅长在 35 nm 时其 $f_{\rm T}$ 将达到 700 GHz, $f_{\rm max}$ 超过 1 000 GHz; InP HBT 在发射极宽度 65 nm 时, $f_{\rm T}$ 达到 1 THz, $f_{\rm max}$ 达到 2 THz,击穿电压达到 3 V。这样的电路可用于制作工作高 达 1 THz 的 TMIC。预期 InP 基 HBT 到 32 nm 节点, $f_{\rm T}$ 将达到 1.4 THz, $f_{\rm max}$ 达到 2.8 THz,将会推进 TMIC 向更 高频率发展。

Si 工艺技术适于大规模、高集成电路。随着 Si 器件向更小节点发展,特别是 RF CMOS 技术的发展,器件的频率特性得到了大幅度提高。预期在更高工作频率发挥更大的作用,甚至有向太赫兹频段发展的可能。RF CMOS 器件预期在 2020 年将达到 10 nm 节点,采用 SOI 技术或多栅器件,器件的 f_T 和 f_{max}都将超过 1 THz^[30]。此外,目前 GeSi/Si HBT 发射极宽度减小到 90 nm, f_{max}达到 0.5 THz,随着工艺的进步,将会在太赫兹电路上有 所突破。Si 技术的发展对太赫兹技术的大规模应用将产生深远的影响。

总之,随着半导体材料和器件工艺的发展,三端固态电子器件的频率特性将不断提高,在太赫兹研究领域将 起着越来越重要的作用。

参考文献:

- [1] Siegel P H. Terahertz technology[J]. IEEE Trans. on Microwave Theory and Technology, 2002, 50(3):910-928.
- [2] Maestrini A, Thomas B, Wang H, et al. Schottky diode-based terahertz frequency multipliers and mixers[J]. Comptes Rendus Physique, 2010,11(7-8):480-495.
- [3] Siegel P H,Smith R P,Gaidis M C,et al. 2.5-THz GaAs Monolithic Membrane-Diode Mixer[J]. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 1999,47(5):596-604.
- [4] Deal W R, Leong K, Radisic V, et al. Low Noise Amplification at 0.67 THz Using 30 nm InP HEMTs[J]. IEEE Microwave and

Wireless Components Letters, 2011,21(7):368-370.

- [5] Ida M,Kurishima K,Watanabe N. Over 300 GHz fT and fmax InP/InGaAs Double Heterojunction Bipolar Transistors With a Thin Pseudomorphic Base[J]. IEEE Electron Device Letters, 2002,23(12):694-696.
- [6] Griffith Z,Lind E,Rodwell M J W,et al. 60 nm collector InGaAs/InP Type-I DHBTs demonstrating 660 GHz fT,BVCEO=2.5 V, and BVCBO=2.7 V[C]// Compound Semiconductor Integrated Circuits(CSIC). San Antonio,TX:[s.n.], 2006:275-278.
- [7] Matine N, Dvorak M W, Xu X G, et al. InP/GaAsSb/InP Double Heterojunction Bipolar Transistors with High Cut-off Frequencies and Breakdown Voltages[C]// Proc.Indium Phosphide and Related Materials(IPRM). Davos:[s.n.], 1999:179-182.
- [8] Snodgrass W, Hafez W, Harff N, et al. Pseudomorphic InP/InGaAs Heterojunction Bipolar Transistors(PHBTs) Experimentally Demonstrating fT=765 GHz at 25°C Increasing to fT=845G Hz at -55°C[C]// International Electron Devices Meeting(IEDM). San Francisco, CA:[s.n.], 2006:1-4.
- [9] Lee Q, Martin S C, Mensa D, et al. Submicron Transferred-Substrate Heterojunction Bipolar Transistors[J]. IEEE Electron Device Letters, 1999,20(8):396-398.
- [10] Jain V,Rode J C,Chiang H W,et al. 1.0 THz/fmax InP DHBTs in a refractory emitter and self-aligned base process for reduced base access resistance[C]// 69th Device Research Conference. Santa Barbara,CA:[s.n.], 2011:271-272.
- [11] Urteaga M,Pierson R,Rowell P,et al. 130 nm InP DHBTs with ft>0.52 THz and fmax>1.1THz[C]// 69th Device Research Conference. Santa Barbara,CA:[s.n.], 2011:281-282.
- [12] High Electron Mobility Transistors(HEMT)[EB/OL]. [2012-12-20]. http://www.mwe.ee.ethz.ch/en/about-mwe-group/research/ vision-and-aim/high-electron-mobility-transistors-hemt.html.
- [13] Lai R,Mei X B,Deal W R,et al. Sub 50 nm InP HEMT Device with Fmax Greater than 1 THz[C]// International Electron Devices Meeting. Washington, DC:[s.n.], 2007:609-611.
- [14] Wakita A S,Su C Y,Rohdin H,et al. Novel high-yield trilayer resist process for 0.1 µm T-gate fabrication[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 1995,13(6):2725-2728.
- [15] Shinohara K, Chen P S, Bergman J, et al. Ultra-high-speed low-noise InP-HEMT technology[C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. San Francisco, CA:[s.n.], 2006:337-340.
- [16] Yeon Seong Jin, Park Myonghwan, Choi JeHyuk, et al. 610 GHz InAlAs/In0.75GaAs Metamorphic HEMTs with an Ultra-Short 15-nm-Gate[C]// International Electron Devices Meeting. Washington, DC:[s.n.], 2007:613-616.
- [17] Radisic V,Mei X B,Deal W R,et al. Demonstration of Sub-Millimeter Wave Fundamental Oscillators Using 35-nm InP HEMT Technology[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2007,17(3):223-225.
- [18] Radisic V,Samoska L,Deal W R,et al. A 330-GHz MMIC oscillator module[C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Atlanta,GA:[s.n.], 2008:395-398.
- [19] Radisic V,Sawdai D,Scott D,et al. Demonstration of a 311-GHz Fundamental Oscillator Using InP HBT Technology[J]. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, 2007,55(11):2329-2335.
- [20] Seo M, Urteaga M, Hacker J, et al. InP HBT IC Technology for Terahertz Frequencies: Fundamental Oscillators Up to 0.57 THz[J]. IEEE J. Solid-State Circuits, 2011,46(10):2203-2214.
- [21] Seo M, Urteaga M, Rodwell M, et al. A 300 GHz PLL in an InP HBT technology[C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Baltimore, MD:[s.n.], 2011:1-4.
- [22] Deal W R, Mei X B, Radisic V, et al. Development of Sub-Millimeter-Wave Power Amplifiers[J]. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, 2007,55(12):2719-2726.
- [23] Hacker J,Urteaga M,Mensa D,et al. 250 nm InP DHBT monolithic amplifiers with 4.8 dB gain at 324 GHz[C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Atlanta,GA:[s.n.], 2008:403-406.
- [24] Radisic V,Leong M K H,Mei X,et al. A 50 mW 220 GHz power amplifier module[C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Anaheim,CA:[s.n.], 2010:45-48.
- [25] Radisic V,Deal W R,Leong K M K H,et al. A 10-mW Submillimeter-Wave Solid-State Power-Amplifier Module[J]. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, 2010,58(7):1903-1907.
- [26] Urteaga M,Seo M,Hacker J,et al. InP HBT Integrated Circuit Technology for Terahertz Frequencies[C]// Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium(CSICS). Monterey,CA:[s.n.], 2010:1–4.
- [27] Deal W R,Mei X B,Radisic V,et al. Demonstration of a 0.48 THz Amplifier Module Using InP HEMT Transistors[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2010,20(5):289-291.
- [28] Deal W R,Leong K,Mei X B,et al. Scaling of InP HEMT cascade integrated circuits to THz frequencies[C]// Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium(CSICS). Monterey,CA:[s.n.], 2010:1-4.

金 智等:InP基三端太赫兹固态电子器件和电路发展

- [29] Skyler Frink. DARPA creates solid state receiver that operates at 0.85 terahertz[EB/OL].(2012-08-04)[2012-12-20]. http:// www.militaryaerospace. com/articles/2012/08/darpa-creates-solid.html.
- [30] ITRS Reports and Ordering Information[EB/OL]. [2012-12-20]. http://www.itrs.net/reports.html.

作者简介:



金 智(1970-),男,河北省迁西县人, 博士,研究员,博士生导师,中科院百人计划 学者,微波器件与集成电路研究室主任,从事 太赫兹固态电子器件与电路、InP 基毫米波器 件与电路及石墨烯器件与电路的研究工作,发 表文章 100 多篇.email:jinzhi@ime.ac.cn.

丁 芃(1983-),男,山东省梁山市人,博士,主要从 事太赫兹 InP 基高电子迁移率晶体管器件工艺与性能方面 的研究.

周静涛(1975-),男,山东省林清市人,博士,副研究员,主要从事肖特基二极管器件与电路技术和硅基光电集成技术研究,发表文章 20 余篇,申请国家发明专利 10 项.

刘新宇(1973-),男,安徽省泗县人,博士,研究员,博士生导师,中科院微电子研究所副所长,主要从事化合物半导体器件和集成电路的研究,发表文章 90 余篇,申请国家发明专利 26 项.

苏永波(1983-),男,石家庄市人,博士,主要从事化合物半导体 InP 基异质结双极型晶体管器件与电路方面的研究,发表文章 10 余篇.

张毕禅(1985-),男,北京市人,硕士,主要 从事 InP 基 HBT 器件和电路制备工艺的研究.

汪丽丹(1988-), 女, 江西省宜春市人, 在读硕士研究生, 主要从事化合物半导体 InP 基高电子迁移率晶体管器件方面的研究.

杨成樾(1980-),男,北京市人,工程师,主要从事肖特基二极管器件工艺与电路模块封装 技术研究,申请国家发明专利10项.

第1期