

文章编号: 1007-8827(2018)06-0493-17

石墨烯场效应管及其在太赫兹技术中的应用

闭吕庆^{1,2}, 戴松松¹, 吴阳冰¹, 郭东辉¹

(1. 厦门大学 电子科学与技术学院, 现代电路与系统研究所, 福建 厦门 361005;

2. 玉林师范学院 电子与通信工程学院, 复杂系统优化与大数据处理广西高校重点实验室, 广西 玉林 537000)

摘要: 石墨烯是单原子厚度的二维碳同素异形体材料, 因其出色的电学、热学、光学及力学特性而被广泛应用于生物检测、医学、新能源、微电子、射频电路等领域。正是凭借着石墨烯独一无二的材料特性, 石墨烯基场效应管(GFETs)比传统的硅基晶体管具有更高的迁移率、微缩空间及特征频率。此外, 石墨烯零带隙的对称圆锥形能带结构, 以及在受外部激发下形成的负电导率特性(太赫兹频段), 使得GFETs能广泛应用于太赫兹功能器件中, 也为实现太赫兹技术商业化提供了一种兼容当前半导体产业技术的低成本选择。针对硅基晶体管发展面临的尺度瓶颈, 本文综述了GFETs器件的基本结构、射频/太赫兹领域的主要特性以及制备工艺, 并举例说明了其在太赫兹技术领域的最新应用。

关键词: 石墨烯; 石墨烯场效应管; 负动态电导率特性; 太赫兹技术

中图分类号: TQ127.1+1 文献标识码: A

收稿日期: 2018-08-01; 修回日期: 2018-10-30

基金项目: 国家自然科学基金(61836010); 复杂系统优化与大数据处理广西高校重点实验室科研课题(2017CSOBDP0103)。

作者简介: 闭吕庆, 博士, 讲师. E-mail: bilvqing@stu.xmu.edu.cn

通讯作者: 郭东辉, 博士, 教授. E-mail: dhguo@xmu.edu.cn

Graphene field effect transistors and their applications in terahertz technology: A review

BI Lu-qing^{1,2}, DAI Song-song¹, WU Yang-bing¹, GUO Dong-hui¹

(1. College of Electronic Science and Technology, Institute of Modern Circuits and Systems, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. School of Electronics and Communication Engineering, Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory of Complex System Optimization and Big Data Processing, Yulin Normal University, Yulin 537000, China)

Abstract: Graphene-based field effect transistors (GFETs) have a higher charge mobility and a higher cut-off frequency than traditional silicon-based transistors and are also smaller. The symmetrical conical band structure of the graphene channel with no band gap and negative dynamic conductivity of graphene with optical pumping in the terahertz (THz) band make them widely applicable in THz function devices, which are low cost and compatible with current semiconductor technology. In this paper, the scaling challenges for silicon-based transistors are discussed, and the basic structure, fabrication process and the main characteristics (C-V and I-V) in the THz/RF region for GFETs and graphene nanoribbon FETs are reviewed. Their novel uses in terahertz technology such as a terahertz electronic injection laser, a FET terahertz detector, a broadband FET terahertz modulator and an oscillator are summarized.

Key words: Graphene; Graphene field effect transistor; Negative dynamic conductivity; THz technology

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61836010); Foundation of Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory of Complex System Optimization and Big Data Processing (2017CSOBDP0103).

Corresponding author: GUO Dong-hui, Ph. D, Professor. E-mail: dhguo@xmu.edu.cn

Author introduction: BI Lu-qing, Ph. D, Lecturer. E-mail: bilvqing@stu.xmu.edu.cn

1 前言

石墨烯是单原子厚度的二维碳同素异形体材料, 具有六角蜂巢的晶格结构^[1]。自2004年被报道通过胶带剥离的方式获取并发现其电子特性后^[2],

石墨烯因出色的电学、热学、光学、力学特性而得到广泛关注与研究, 并被应用于生物检测、医学、新能源、微电子、射频(RF)电路等领域^[3-6], 被认为是未来高频率、高速度器件的可靠替代材料^[7], 也是延长半导体电子摩尔定律生效的重要可选方案^[8]。

过去十多年,摩尔定律使得主流半导体电子进入了一个动态发展的时期,并使得晶体管的价格每年降低25%,且市场年增长率达到17%^[9]。这其中的关键问题是基于硅的金属氧化物半导体场效应管(Si-MOSFETs)体积不断缩小。如今,7 nm 沟道长度的FETs已量产,而5 nm 沟道长度的器件也有望在未来实现^[8]。

然而,MOSFETs的微缩并非永远都能实现,其必然遇到极限体积的瓶颈,同时也会面临短沟道效应、寄生效应恶化、量子行为等问题的挑战,尤其是当沟道长度小于10 nm时的情况。因此,研究新的器件结构,寻找新的沟道材料已成为当前半导体行业突破瓶颈的一个急迫任务。例如,Siers等实现了一款包含4个CPU和1个GPU的Inter[®]片上系统(System On Chip,简称SOC)。该SOC采用三栅极晶体管结构(Tri-gate transistor)来提高沟道的控制并实现低压操作^[10]。而以III-V族化合物InP为沟道材料的MOSFETs,在相同的沟道长度下,其转移跨导比以Si为沟道材料的器件高60%^[11]。此外,文献[12]所述MOSFETs器件以InGaAs为沟道材料,在20 nm栅极长度时,其载流子迁移率超过了 $10\,000\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$,转移跨导高达 $3.1\text{ mS}/\mu\text{m}$,是典型的高电子迁移率晶体管(High electron mobility transistor,简称HEMT)。

2007年,Lemme等制造了第一个以单层石墨烯为沟道材料的顶栅场效应器件(Field effect device,简称FED),并证明了其相比于Si-MOSFETs更高的迁移率^[13]。之后,基于石墨烯的场效应(Graphene based field-effect transistors,简称GFETs)备受半导体业界所关注。凭借石墨烯超高的电子迁移率与超薄的材料厚度,GFETs获得了良好的传输性能,同时比HEMT具有更大的体积微缩空间与更低的造价。由于石墨烯超薄的平面结构特性,GFETs器件在缩小体积时,其性能没有明显降低,而且与现行CMOS技术工艺相兼容,使得它成为未来高性能、高集成度芯片的高竞争力选择^[14]。然而,石墨烯零带隙的能带结构,使得GFETs在复杂的逻辑电路中难以关断。尽管一些方法可以实现石墨烯带隙的打开,比如采用石墨烯纳米带与双层石墨烯,或者对石墨烯施加应力等,但因一系列的挑战而尚未能在现有的半导体工艺中实现量产。

因此,在当下,石墨烯基场效应管在半导体电子中主要应用于模拟的射频、太赫兹等非逻辑系统^[15]。太赫兹(Terahertz,简称THz)是指尚未被商

业开发利用的0.1 T ~ 10 THz 电磁波段,因其在生物鉴定、医学诊断、无损成像、高速通信等领域的巨大应用前景而在近年被广泛关注与研究。由于是介于微波与红外辐射之间的电磁波频段,太赫兹内的器件同时存在着电子传导与光学现象,并使微波段内的传统波向光学区域内的量子光子过渡。此外,凝聚态物质中的一些低能级激发现象(例如:离子激发、磁振子、超导能隙)也可在太赫兹波段中发生,而固体中发生的载流子散射、隧穿、重组等现象在太赫兹波段内的产生时长仅是皮秒级^[16]。太赫兹在电磁频谱中的特殊位置(电子器件和光学器件均涉及),使得覆盖该频段的方法空前的多样化,并对现代的固体器件提出了严峻的挑战。传统的微波电子晶体管固有的电子运动速度局限,随着频率向太赫兹频段接近($>0.1\text{ THz}$),其性能快速地降低。而红外光学器件也难以在频率低于20 THz的情况下有良好应用。因此,至今还未有成熟的固体器件被广泛应用于太赫兹频段^[17]。以石墨烯为沟道材料的GFETs因石墨烯超薄的材料厚度、超高的电子迁移速率和饱和速率,而成为当前太赫兹技术的一种热门器件,既被应用于基本的太赫兹技术(如相关THz源、THz探测等),也被应用于复杂的太赫兹系统中(太赫兹通信系统、太赫兹医疗诊断系统等)。

笔者在本文简述GFETs的基本结构、太赫兹相关的特性指标以及制备工艺,并重点介绍其在太赫兹技术中的最新应用。

2 石墨烯基场效应管

2007年,ITRS将石墨烯作为新兴器件的材料,并提出了建立全球开发石墨烯晶体管的研究计划,之后不久,第一个GFETs就被报道证实^[13]。此后,越来越多的团队成功地制造了石墨烯晶体管。例如,2010年,Lin Y-M团队实现了截止频率为100 GHz的石墨烯基晶体管^[18],而后一年又制造了基于石墨烯的集成电路^[19]。紧接着,GFETs在THz探测器^[20]、RF柔性电子^[21]、DNA生物传感器^[22]、THz宽带调制器^[23]等领域的应用也陆续得到开发。据此可预测,未来将会有越来越多更高性能的不同用途GFETs被研究与应用。本节将首先讨论GFETs的基本结构,然后分析其在太赫兹应用中的相关特性,以期对相关研究工作者有一个概括性的帮助。

2.1 石墨烯场效应管的结构

石墨烯场效应晶体管按操作原理可分为: 顶栅/背栅型、侧栅型和隧穿型。

2.1.1 顶栅/背栅型

顶栅/背栅型 GFETs 是基于传统 MOSFETs 原理的场效应管,也是当前最为普遍的石墨烯基场效应管。常见的结构形式有背栅型(Back-gated graphene FETs,简称 B-GFETs,又称为底栅型场效应管)、顶栅型(Top-gated graphene FETs,简称 T-GFETs)与顶-底双栅型(Top- and back-dual-gated graphene FETs)如图 1 所示。

2004 年,Novoselov 等提出了一种拥有背栅极的石墨烯场效应管^[24],并证实了电场对多层石墨烯沟道电阻的控制作用,为 B-GFETs 的应用提供了基础。之后,B-GFETs 常被设计作为化学与生物传感器^[22, 25, 26]。在图 1(a)所示的背栅型石墨烯场效应管中,采用半导体物质作为衬底材料,如掺杂后的硅与 SiC,其中 SiO₂、HfO₂、Al₂O₃是最常用的介电材料。由于沟道上方没有顶栅极,B-GFETs 避免了介电材料对沟道的影响,保持了石墨烯沟道的突出特性,但也因为无顶栅极,器件对沟道的控制需要在背栅极上施加较大的电压,不利于器件的实际应用。

相比于 B-GFETs,顶栅型石墨烯场效应管(图 1(b))在电路应用上更具有弹性,也更易于集成应用。但因为顶栅下介电材料对沟道形成了更多的散射源,以及在制造工艺中更容易造成对石墨烯沟道的破坏,T-GFETs 的载流子迁移率比 B-GFETs 低^[27]。因此,如何保持高的载流子迁移率成为了制造高质量 T-GFETs 需要考虑的关键因素之一。例如,Farmer 等采取了在沟道与顶栅介电层(HfO₂)之间加入有机聚合物缓冲层(NFC 1400-3CP)的办法,明显地提高了 T-GFETs 的载流子迁移率^[28]。图 1(c)为一种类似于 MOSFETs 结构的双栅石墨烯极场效应管。其以导电衬底作为背栅极,金属作为顶栅极,石墨烯作为连接源极与漏极的导电材料。

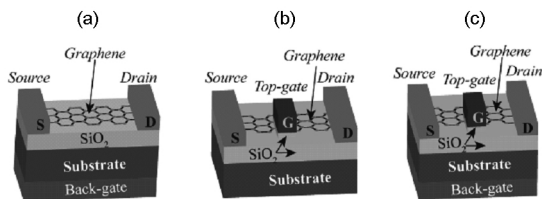


图 1 顶栅/背栅型 GFETs^[27]: (a) 背栅型;

(b) 顶栅型及 (c) 顶-底双栅型

Fig. 1 Top/Back gated GFETs: (a) Back-gated GFETs;

(b) Top-gated GFETs and (c) Back-and Top-dual-gated GFETs^[27].

2.1.2 侧栅型

2007 年,Molitor 等为了研究单层石墨烯的磁输运性质而设计了一个具有 4 个侧栅极的石墨烯霍尔棒^[29]。3 年后,一种金属侧栅极的双极石墨烯场效应管(SG-GFETs)也被提出^[30]。该场效应管以重掺杂 p 型 Si/SiO₂基底作为背栅极,而两个位于沟道同侧的侧栅极采用 5 nm 的 Ti 作为侧栅极金属,30 nm 的 Cu 作为连接电极。之后,因具有良好的调制能力,且不存在因顶栅极需要而在沟道上沉积介电层造成石墨烯沟道迁移率大幅下降的问题,侧栅结构的石墨烯基场效应管被作为新的 GFETs 类型而被重视。例如,文献^[31]提出了多种典型的 SG-GFETs,并研究侧栅极偏置电压对沟道输运特性的调制作用(图 2(a))。而在同一年,Hähnlein 等制作了一个具有高转移跨导且更为简单直观的侧栅型石墨烯场效应管^[32],该 SG-GFETs 没有顶栅和背栅,只有两个侧栅极以及漏极、源极,见图 2(b)。

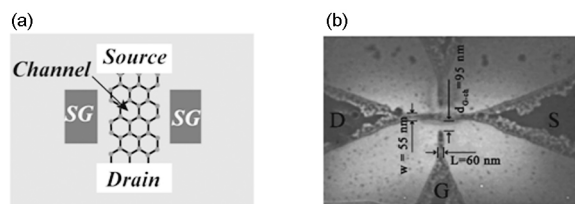


图 2 侧栅型 GFETs: (a) SG-GFETs 器件的原型结构图^[31]及 (b) SG-GFET 器件的 SEM 照片^[32]

Fig. 2 Side-gated GFETs: (a) Structures of the SG-GFETs^[31] device and (b) SEM image of SG-GFETs^[32].

2.1.3 隧穿型

因单层石墨烯无带隙的能带结构,石墨烯基场效应管无法完全关断(存在漏电流),也即不存在理想的关状态,是阻碍 GFETs 在逻辑电路应用的最大障碍。同时,GFETs 较大的非工作状态电流(关态电流)可导致器件产生较大的静态功耗,不利于大规模集成。而石墨烯基隧穿场效应管是有别于传统 MOSFETs 原理的新型石墨烯器件,因其很低的关态电流与较小的开/关门极电压摆幅而被关注。例如,在 2008 年,采用石墨烯纳米带(GNR)的隧穿型场效应管(Tunneling field-effect transistors,简称 TFETs)由 Zhang Qin 等提出,其结构见图 3(a)^[33]。该 TFET 以 5 nm 的石墨烯纳米带作为沟道材料,获得了 800 μ A/ μ m 的开态电流和 26 pA/ μ m 的关态电流,且开/关门极电压摆幅只有 0.1 V,亚阈值摆幅为 0.19 mV/dec(远小于传统 MOSFETs 60 mV/dec 的最小值限制)。相比于 ITRS 在 2007 年对 n-

MOSFETs 的预期目标,它具有快 5 倍的速度,低 20 倍的动态功率以及低 280 000 倍的关态功耗(静态功耗)。

在图 3(a) 中,TFET 器件的源极和漏极分别通过掺杂形成 n^+ 、 p^+ 型,而沟道也被设计成 p^+ 型,此时沟道的价带刚好与源极的费米能级对齐。当 V_{GS}

$= 0 \text{ V}$, $V_{DS} = -0.1 \text{ V}$ 时,管子处于关态,见图 3(b)。而当给栅源结施加反向偏置电压后($V_{GS} = -0.1 \text{ V}$, $V_{DS} = -0.1 \text{ V}$) 沟道能级上升,栅源结宽度变小,沟道价带高于源极的石墨烯费米能级,电子从沟道隧穿进入源极,形成电流,此时管子处于开态。

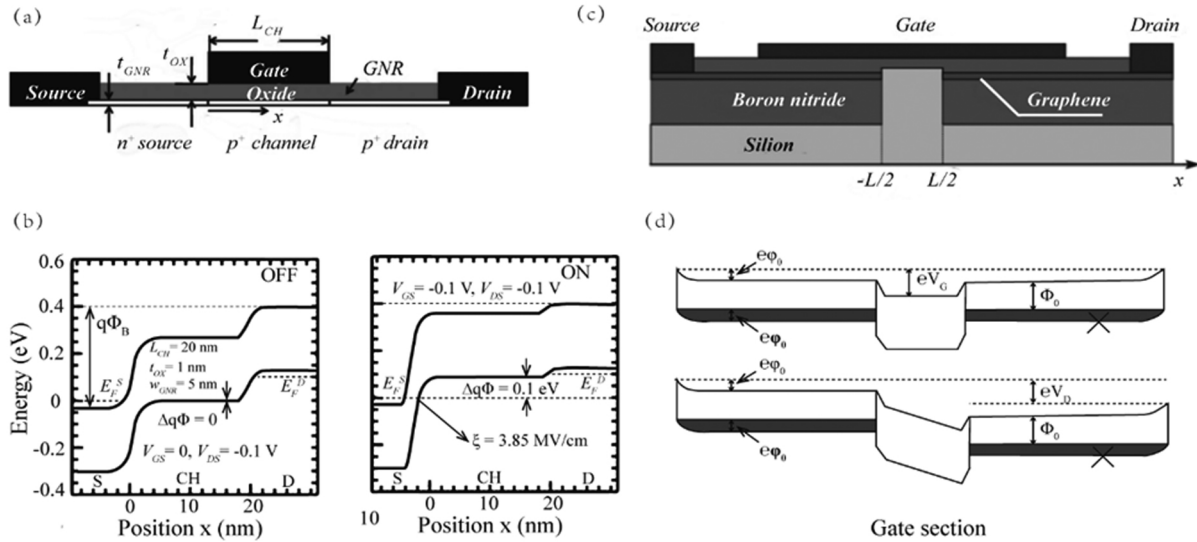


图 3 石墨烯基隧穿场效应管与对应能带图^[33,34]: (a) 基于石墨烯纳米带的 p-TFETs; (b) 石墨烯纳米带 p-TFETs 的能带图

(c) 一个隧穿结在沟道中间的 G-TFET; (d) 与 (c) 对应的 G-TFET 器件能带图
Fig. 3 Graphene-based tunneling field-effect transistors and energy band diagrams^[33,34]:
(a) p-channel GNR TFETs; (b) Energy band diagrams for the GNR p-TFETs;

(c) A G-TFET with tunnel contact in the middle of channel; (d) Band diagrams of the G-FET corresponding to (c).

与此不同的是,图 3(c) 是一个在沟道中间形成隧穿结的石墨烯基 TFET^[34]。其沟道电导率可通过门极进行有效控制,且连接石墨烯的费米能级刚好处于源极和漏极的价带和导带之间。当未施加栅源电压和漏源电压时($V_{GS} = 0 \text{ V}$, $V_{DS} = 0 \text{ V}$) 势垒两边的沟道能级相一致,管子处于关态。当施加栅源电压和漏源电压后($V_{GS} > 0 \text{ V}$, $V_{DS} > 0 \text{ V}$) 中间势垒和漏极能级降低,电子从连接源极的石墨烯隧穿进入连接漏极的石墨烯形成导带电流,此时管子处于开态,见图 3(d)。

除以上两种常见的结构外,一些特殊的 TFETs 也被设计。如文献[35]制作的 TFET 是依靠金属 (Al 和 Cu) 与石墨烯的连接形成隧穿结,避免了石墨烯掺杂等复杂工艺;而 Britnell 等设计的基于垂直石墨烯异质结构的隧穿场效应管,有望在高速与大规模集成应用中使用^[36]。

2.2 石墨烯场效应管的特性

石墨烯超薄的材料厚度、出色的电学特性以及独一无二的零带隙能带结构,使得石墨烯基场效应

管不仅具有优良的电路级优值系数(Figure of merit, 简称 FOM),也形成了独特的 $I-V$ 特性。但这些良好与独特的特性不仅是由石墨烯本身的性质决定的,也受到一些外部因数的影响,比如 GFETs 衬底质量、金属-石墨烯连接阻抗等^[14]。因此,本节将引入典型的场效应管小信号等效电路作为分析模型,并利用该模型分析与射频/太赫兹领域相关的 GFETs 特性及其外部影响因素,以便更好地了解 GFETs 在太赫兹技术中的应用基础。典型的场效应管小信号等效电路见图 4。图中虚线框内电路为本征晶体管(Intrinsic transistor),主要由栅源电容 C_{GS} 、栅漏电容 C_{GD} 、受控源 g_m 、 V_{GSi} 和漏源电阻 r_{ds} 构成。而 V_{GSi} 、 V_{DSi} 分别为内部栅源电压与内部漏源电压; R_D 、 R_S 分别为漏极与源极的连接电阻。此外,与等效电路相对应的场效应管各项特性参数见表 1。 V_{GS} 、 V_{DS} 为外部施加的电压; Q_{ch} 为沟道电荷; L_{ch} 、 W_{ch} 分别为沟道的长度和宽度; $C_G = C_{GS} + C_{GD}$ 为栅极总电容。

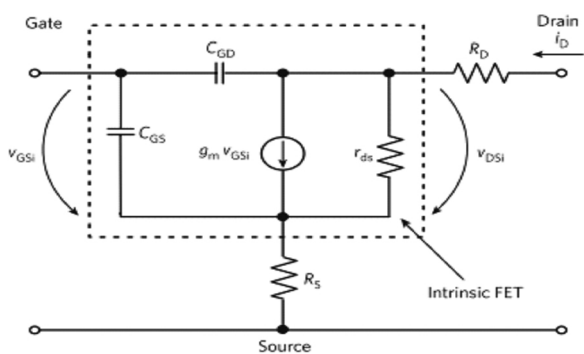


图 4 小信号场效应管等效电路^[15]

Fig. 4 Small-signal equivalent FET circuit^[15].

2.2.1 特征频率

特征频率(用 f_T 表示)是指晶体管因工作频率的增加而使电流增益下降至 1 倍(0 dB)时所对应的频率,此时晶体管无电流放大能力。因为场效应管的电流放大与功率放大特性都是紧密依赖频率的函数,并随着频率的升高而降低^[37],所以 GFETs 应用

$$f_T = \frac{1}{2\pi \tau_{total}} = \frac{g_m}{2\pi (C_{DS} + C_{GD}) [1 + g_{ds} (R_S + R_D)] + C_{GD} g_m (R_S + R_D)} \quad (4)$$

表 1 FETs 特性参数^[37,40]

Table 1 Performance measures of the FETs^[37,40].

Quantity	Definition
Intrinsic transconductance	$g_m = \frac{dI_D}{dV_{GSi}} \Big _{V_{DSi} = \text{const}}$ (5)
Drain conductance	$g_{ds} = \frac{1}{r_{ds}} = \frac{dI_D}{dV_{DSi}} \Big _{V_{GSi} = \text{const}}$ (6)
Gate-source capacitance	$C_{GS} = \frac{dQ_{ch}}{dV_{GSi}} \Big _{V_{DSi} = \text{const}}$ (7)
Gate-drain capacitance	$C_{GD} = \frac{dQ_{ch}}{dV_{DSi}} \Big _{V_{GSi} = \text{const}}$ (8)
Cut-off frequency	$f_T \approx \frac{g_m}{2\pi (C_{GS} + C_{GD}) [1 + g_{ds} (R_S + R_D)] + C_{GD} g_m (R_S + R_D)}$ (9)
Field-effect mobility	$\mu_{FE} = \frac{L_{ch} g_m}{W_{ch} C_G V_{DS}}$ (10)

由式(4)可知,在外部连接电阻为常数时,为获得更高的特征频率,应在提高内部跨导 g_m 的同时,尽量减小结电容 C_{GS} 、 C_{GD} ,以减小沟道延迟,而降低漏源电导 g_{ds} ,也有利于减少寄生延迟,提高特征频率。此外, C_{GD} 作为连接输入输出端的密勒电容,它的减小能明显降低输出端大信号对输入端的影响,避免器件产生振荡,提高器件的工作频率上限。

在基于半导体的场效应管中,内部跨导与结电

于射频电路、太赫兹领域的最重要 FOMs 之一就是特征频率。为使 FETs 件能工作在更高频率乃至太赫兹频段,需要器件在物理上具有更快的输入输出响应速度,以及更高的沟道电子迁移率和更短的沟道长度,以减小输入输出延迟与沟道传输延迟。在图 4 中,器件的总延迟可用下式表示^[38]:

$$\tau_{total} = \tau_{int} + \tau_{ext} + \tau_{par} = \tau_{channel} + \tau_{par} \quad (1)$$

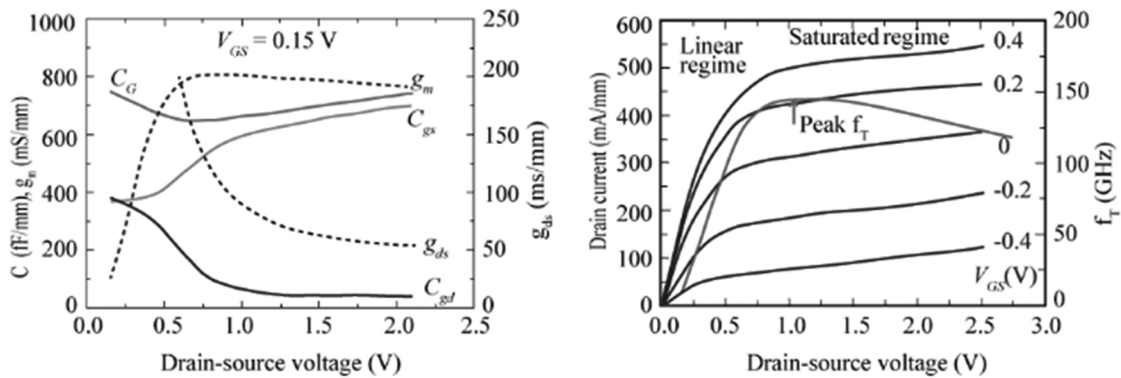
式中 τ_{int} 为载流子通过沟道的传输延迟, τ_{ext} 为载流子通过沟道延长与源级、漏极交叠区域的传输延迟,它们的和即为器件的总沟道传输延迟 $\tau_{channel}$ 。而 τ_{par} 为有源 FETs 件外部寄生参数充放电形成的 RC 时间常数,即为器件的寄生延迟(输入输出延迟)。在图 4 中,沟道传输延迟和寄生延迟表示如下^[39]:

$$\tau_{channel} = \frac{C_{GS} + C_{GD}}{g_m} \quad (2)$$

$$\tau_{par} = \frac{(C_{DS} + C_{GD}) \cdot (R_S + R_D)}{g_m \cdot r_{ds}} + C_{GD} (R_S + R_D) \quad (3)$$

所以,

容不仅与器件本身的材料与结构有关,也受外部输入偏置的影响^[42,43],见图 5。当 V_{DS} 较小,器件处于线性区时,因较小的 g_m 与较大的 g_{ds} , f_T 相对较低;而当 V_{DS} 逐步增大,使得器件进入饱和区后, g_{ds} 大幅下降,从而使得器件获得了较高的 f_T 。由此可见,提高 FETs 的 f_T 使得器件获得更好的频率特性,不仅需要关注器件本身的材料选择与结构设计,还应注意器件工作的外部条件。

图5 场效应管的C-V与I-V特性^[42, 43]Fig. 5 The C-V and I-V characteristics of the FETs^[42, 43].

石墨烯超薄的二维材料厚度和比其它材料更高的迁移率($2 \times 10^6 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$)^[44],使得GFETs器件在太赫兹技术应用中拥有巨大的优势与前景。依照FETs标度理论(Scaling theory)预测,器件的介电层与沟道厚度越小,越能在更短的沟道长度上抵制短沟道效应的影响^[45]。因此,以单原子厚度材料-石墨烯为沟道的GFETs器件可比III-V HEMTs器件、基于SOI的MOSFETs器件微缩至更小的尺寸,拥有更短的沟道长度。由表1中的公式(10)可得 $g_m = \frac{\mu_{FE} W_{ch} C_G V_{DS}}{L_{ch}}$,即 $g_m \propto \frac{\mu_{FE}}{L_{ch}}$ 。所以,拥有更短沟道长度与超高场效应迁移率的GFETs可获得更高的内部跨导,也就能实现更高的特征频率^[44]。自2008年第一个特征频率超过GHz的GFETs被报道后(500 nm的栅极长度)^[46],拥有更高 f_T 的GFETs不断被实现。如2009年 $f_T = 50 \text{ GHz}$ 的GFETs被实现(350 nm的栅极长度)^[7];2010年 $f_T = 100 \text{ GHz}$ 、 $f_T = 300 \text{ GHz}$ 的GFETs分别被报道,它们各自的栅极长度分别为:240、144 nm^[18, 47],而Cheng Rui团队在2012年实现的GFETs(67 nm的栅极长度)^[48],其 f_T 高达427GHz。这些例子都充分证明了GFETs在RF、THz领域的良好频率特性,但由公式(9)亦可知 f_T 不仅由 g_m 决定,还受到栅极电容 C_G 与连接电阻 R_S 、 R_D 的影响。

典型的T-GFETs器件栅极电容 C_G 约等于其单位面积上的氧化层电容 C_{ox} (Oxide capacitance per unit area)^[8],如下式所示:

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \quad (11)$$

式中 ϵ_{ox} 、 t_{ox} 分别为栅极介电层的介电常数与厚度。而当介电层很薄, t_{ox} 很小时,器件的栅极总电

容还需考虑量子电容 C_q 的影响,此时的 C_G 等于氧化层电容 C_{ox} 与量子电容 C_q 的串联^[49],如下式所示:

$$C_G = \frac{C_{ox} C_q}{C_{ox} + C_q} \quad (12)$$

式中 C_{ox} 表示器件的结构电容;而 $C_q = \frac{dQ_{ch}}{dV_{ch}}$ 表

示外部电压变化引起的载流子密度变化,与石墨烯的态密度(Density of states,简称DOS)成正比。其中 dV_{ch} 为栅极电压变化(dV_G)所引起的沟道电势变化量。由式(12)可知,量子电容 C_q 的串入使得GFETs器件的栅极总电容 C_G 变小,此时器件的 μ_{FE} 增大, f_T 增大,尤其是当器件栅极介电层很薄,石墨烯沟道的DOS为非无穷大时更甚。

另一个影响GFETs特征频率的重要因素是石墨烯-金属的连接电阻。在公式(9)中,当其它参数为常数时,更低的连接电阻($R_S + R_D$),有利于器件获得更高的 f_T 。而直至今,已知的最低金属-石墨烯连接电阻约为 $100 \Omega \cdot \mu\text{m}$ ^[50],虽然低于Si和III-V化合物FETs器件的连接电阻,但大部分已经报道的GFETs器件连接电阻却在几百至几千 $\Omega \cdot \mu\text{m}$ 之间,明显大于CMOS器件的连接电阻。因此,一些方法被采取以降低金属-石墨烯的连接电阻,例如温和的氧等离子体处理^[51]、紫外臭氧预处理^[52]、退火^[53]等。而选择能带结构与石墨烯相类似的金属电极,使得金属与石墨烯的连接形成欧姆连接而不是肖特基连接,也是一种降低连接电阻的有效方式^[54]。常用于连接石墨烯的金属有Ti/Au, Cr/Au, Cr/Pt, Ni和Co等。Gahoi在研究各种金属电极与CVD石墨烯的连接电阻时发现^[55],金与石墨烯的连接电阻是最低的,为 $92 \Omega \cdot \mu\text{m}$,此时需对B-GFETs器件的背栅施加-40 V的偏置电压。此外,

为减小连接电阻的影响,使得 GFETs 获得更高的 f_T , Hong 等从理论上研究了器件电阻对 GFETs 器件 RF 特性的影响,并提出了一种可有效降低器件分布电阻的自对准结构器件模型^[56]。

总之,拥有当前已知材料中最高电子迁移率与最薄厚度的石墨烯,使得 GFETs 在太赫兹技术应用中拥有了其它材料无法企及的独特优势,但要使得器件可在太赫兹频段广泛应用,甚至实现更高特征频率的应用,还需实现以下三点:(1) 选择合适高质量的衬底(例如 hBN^[57]),以减少器件衬底造成的沟道载流子迁移率下降、散射大幅增加的影响^[58];(2) 施加合适的漏源电压,并缩短器件沟道长度,来提高 GFETs 器件的跨导;(3) 提高石墨烯质量,选择合适的连接金属,以减小连接电阻,并降低寄生延迟,使得器件整体电阻由沟道电阻决定,提高器件的可控能力。此外,突破 GFETs 在 2012 年的 427 GHz 特征频率高点还需提高器件的制备工艺^[59],以降低因工艺过程造成的沟道电子迁移率下降影响,并克服器件缩小后(沟道长度小于 200 nm)连接电阻增大的难题^[60]。

2.2.2 $I-V$ 特性

在半导体中,电子的能带结构决定了该材料的电学及光学性能。石墨烯独特的零带隙对称圆锥形能带结构,使得它拥有了超越传统半导体材料的迁移率,但也使得石墨烯基场效应管因无法关断与较低的开/关比而不适于逻辑电路。同样因为零带隙的对称能带结构,GFETs 拥有了双极的 $I-V$ 特性^[14]。其原理如图 6 所示^[8],给 T-GFETs 的栅极施加一个正电压 V_{GS1} 时,石墨烯沟道的费米能级 E_{F1} 位于导带上,电子导电形成的漏极电流为 I_{D1} ;当栅极电压降低时,费米能级下降,并引起电子浓度的大幅度下降,继而使得漏极电流也下降。在 V_{GS2} 点(也称 V_F 点),费米能级位于导带与价带的交汇点—狄拉克点(Dirac point),此时载流子浓度为零,沟道电导率最小,漏极电流也最小。继续减小栅极电压使得费米能级位于价带上,此时沟道内形成空穴导电,漏极电流随着栅极电压的减小而增大。如在负栅极电压 V_{GS3} 点,对应的漏极电流为 I_{D3} 。因此,当器件是一个理想的对称结构时,GFETs 的 $I-V$ 特性也是对称的,而狄拉克点就是导电载流子(电子、空穴)的转换点,但因为热噪声、狄拉克点能级扰动、石墨烯缺陷等因素,此时的漏极电流并不为零,而是形成了一定大小的漏电流。

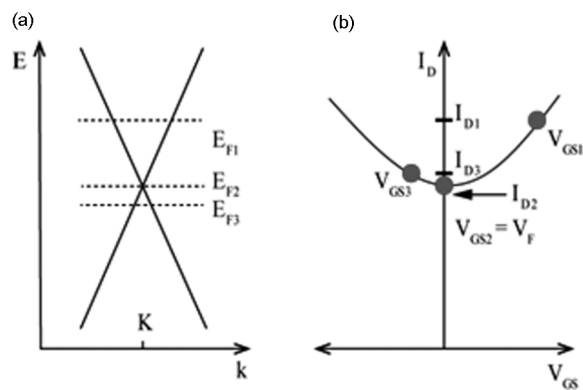


图6 GFETs 的对称 $I-V$ 特性:(a) 石墨烯的能带结构;

(b) GFETs 的 $I-V$ 转移特性^[8]

Fig. 6 Symmetrical $I-V$ characteristics of GFETs:

(a) The band structure of graphene;

(b) The $I-V$ transfer characteristics of GFETs^[8].

然而,在实际中,GFETs 又是不对称的。因为金属-石墨烯连接电阻受器件结构与栅极电压的影响,使得在不同栅极电压条件下($V_{GS} > V_F$ 或 $V_{GS} < V_F$),石墨烯沟道与源极、漏极连接区域形成的 p-n 结类型并不相同,导致了器件 $I-V$ 转移特性的非对称性。如图 7(a) 所示。当 $V_{GS} > V_F$, $V_{DS} > V_{GS} - V_F$ 时,沟道与源、漏极的连接均为 n 结,形成电子导电,如曲线 I 所示;当 $V_{GS} < V_F$ 时,连接为 p 结,形成空穴导电,如曲线 III;而当 $V_{GS} > V_F$, 且 $V_{DS} \approx V_{GS} - V_F$ 时,沟道与源极形成 n 结,与漏极形成 p 结,如曲线 II 所示。此时,对比 I、III 曲线可看出,GFETs 的 $I-V$ 转移特性是非对称的。

需要指出的是,由于石墨烯零带隙的能带特点,GFETs 不能像传统 MOSFETs 一样通过导电沟道的夹断机制来形成饱和电流。而一般来说,缺乏饱和电流将会使场效应器件在 RF 应用上面临诸多挑战。因为在缺乏电流饱和状态时,场效应管的输出特性几乎是线性的,其漏源电阻 r_{ds} 很小(与 R_S 、 R_D 同一数量级),可导致特征频率 f_T 的显著下降,并降低电流与功率增益^[58]。此外,由于 GFETs 的输出电流 I_D 跟随 V_{DS} 剧烈变化,在欠饱和或弱饱和时,随着输入 V_{GS} 电压的变化,靠近漏极端的沟道载流子数量也剧烈变化,形成了一个更大值的 C_{GD} ,也因此导致器件特征频率 f_T 的降低。

鉴于实现电流饱和对 GFETs 在更高太赫兹频率应用的重要性,一些研究人员研究了实现 GFETs 电流饱和的其它方法,例如通过施加很高的 V_{DS} 电压使得沟道内的载流子实现速度饱和,继而实现电流饱和。但由于载流子在石墨烯中的饱和速度很

高,器件的连接电阻也往往较大,使得施加的高 V_{DS} 电压更多地落在了连接电阻上,导致内部沟道难以获得足够大电势来满足载流子的速度饱和^[14]。此外,介电层与衬底存在的陷阱^[61],或者器件的带间隧穿^[62]等原因,也让 GFETs 沟道实现速度饱和更加地难以成功。

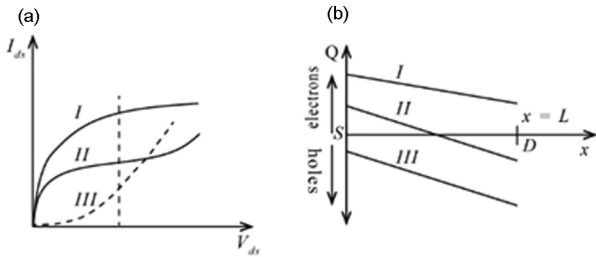


图7 (a) 不同栅极电压条件下的 GFETs 的 $I-V$ 特性曲线; (b) 沿沟道的总电荷密度^[14]

Fig. 7 (a) The $I-V$ characteristic of the GFETs under different gate voltage conditions; (b) The total charge density along the channel^[14].

幸运的是,即使不能实现载流子速度饱和,在一定的栅极电压条件下,GFETs 仍可实现准饱和 (Quasi-saturation) 的特性。如图 7(b) 所示:在 II 曲线的实例中,由于沟道与源极和漏极形成了不同的 $p-n$ 结,电子从源极进入,空穴从漏极注入,沟道各点的费米能级为经过狄拉克点的连续曲线。因为沟道电导率在狄拉克点处最低,并向两头逐步增大,使得电流被狄拉克点处的电导率所限制,形成了准饱和的特性。但是,让 GFETs 获得这种准饱和特性的低电导率区域(狄拉克点费米能级在 $\pm k_B T$ 范围内波动的区域)的长度随着电场的增大而减小,而向源极、漏极两边的电导率一直在增加,因此总电导率随着 V_{DS} 的增大而增大,电流也随 V_{DS} 的增大而增大,最后脱离了饱和态(图 7(a) 曲线 II 末端电流重新增大)。

双极性对称的 $I-V$ 转移特性,使得 GFETs 有望用于一些特殊功能器件或者倍频器上,而特定条件下输出电流的准饱和特性,也使其可工作于太赫兹频段的低频率点上,但直到如今,实现电流饱和的有效方法仍未见报道。因此,在未来,还需要付出更多的努力来研究与实现 GFETs 器件的电流饱和,以使其可工作于更高的太赫兹频率点上。

2.2.3 负动态电导率特性(太赫兹频段)

石墨烯基场效应的负动态电导率特性是指 GFETs 受光泵激发时,在 THz 波段所表现出来的特性。石墨烯的光导率可用久保公式(Kubo formula)来描述^[63-64]:

$$\sigma(\omega) = \sigma_{\text{inter}}(\omega) + \sigma_{\text{intra}}(\omega) = \frac{ie^2\omega}{\pi} \int_0^\infty \frac{f(\varepsilon - \varepsilon_F) - f(-\varepsilon - \varepsilon_F)}{(2\varepsilon)^2 - (\varepsilon + i\delta)^2} d\varepsilon + \frac{ie^2\varepsilon_F}{\pi\hbar^2(\omega + i/\tau_m)} \quad (13)$$

式中 e 是单元电荷, $f(\varepsilon)$ 是狄拉克点费米分布函数, ε_F 是费米能级, \hbar 是约化普朗克常量, δ 是带间跃迁宽带参数, τ_m 是动量弛豫时间。

因为无带隙的线性能谱结构,当入射的光子能量超过费米能级的两倍时,石墨烯的带间吸收在亚毫米波至近紫外线的宽范围内具有相同的吸收率:

$\alpha = \frac{\pi e^2}{c\hbar} \approx 2.3\%$, 其中 c 为真空光速。而当入射光子能量 $\hbar\omega < 2\varepsilon_F$ 时,由于泡利不相容的阻碍,光子能量被禁止吸收。因此,带间吸收的光导率实部可用下式描述:

$$\text{Re}\sigma_{\hbar\omega}^{\text{inter}} \approx \frac{e^2}{4\hbar}(1 - 2f(\hbar\omega)) \quad (14)$$

其中 $f(\hbar\omega)$ 为载流子分布函数。而带内吸收的光导率可用德鲁德模型来分析,其实部为:

$$\text{Re}\sigma_{\hbar\omega}^{\text{intra}} \approx \frac{(\ln 2 + \varepsilon_F/2k_B T) e^2}{\pi\hbar} \frac{k_B T \tau_m}{\hbar(1 + \omega^2 \tau_m^2)} \quad (15)$$

总的光导率实部如图 8 所示。在太赫兹频段内,带内吸收光导率(下降)与带间吸收光导率(上升)形成了交叉,总光导率的调制可通过对栅极施加静电场形成载流子掺杂来实现^[65]。而从公式(14)可知,当 $f(\hbar\omega) > 0.5$ 时,带间吸收光导率为负值,石墨烯形成载流子粒子反转。石墨烯在特定条件下的这种负光导率特性,使得 GFETs 也可在外部光泵激发下形成负的动态电导率,广泛用于有源太赫兹功能器件^[66]。

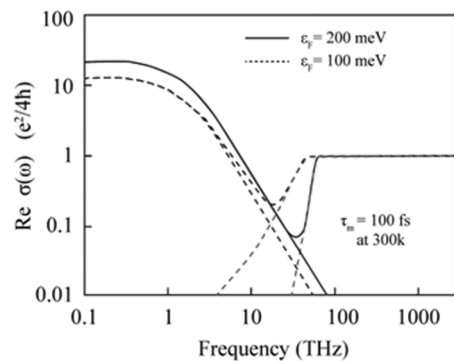


图8 石墨烯光导率实部^[66]: 红线为带间吸收光导率的; 蓝线为带内吸收光导率的实部

Fig. 8 Real part of the conductivity in graphene^[66]: red lines, $\text{Re}\sigma_{\hbar\omega}^{\text{inter}}$; blue lines, $\text{Re}\sigma_{\hbar\omega}^{\text{intra}}$.

2.3 石墨烯场效应管的制备

GFETs 器件的制备主要包括以下 4 个步骤(以 CVD 制备石墨烯, SiO₂/Si 衬底的 T-GFETs 为例):

- (1) 石墨烯的制备;
- (2) 石墨烯转移至衬底;
- (3) 栅极及其介电层的淀积;
- (4) 金属-石墨烯连接。

如图 9 所示,器件的制备工艺流程形成了石墨烯-衬底、石墨烯-介电层、石墨烯-金属等 3 个关键连接面,它们的连接质量极大地影响着器件的性能^[14],尤其是对器件特征频率的影响尤为明显。本节将简要叙述实现上述工艺流程的典型方法与关键步骤,并讨论工艺流程中一些对器件性能造成影响的因素。

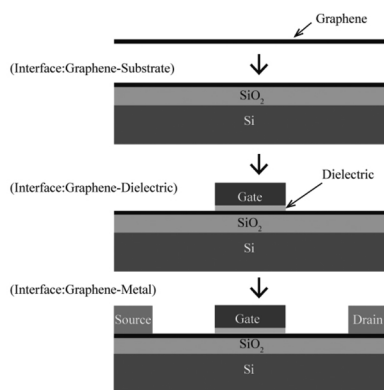


图 9 GFETs 器件的制备流程^[14]

Fig. 9 Schematic of the GFETs device fabrication process^[14].

2.3.1 石墨烯的制备与转移

机械剥离、外延生长、化学气相沉积(Chemical vapour deposition, 简称 CVD) 是获取高质量石墨烯的 3 种常用方法。其中,机械剥离法是最早实现石墨烯获取的方法,也是推动石墨烯发现、研究、应用的关键技术之一^[2]。它是通过透明胶带反复剥离石墨来获取单层或者少层石墨烯的。当只剩单层或者少层石墨烯在胶带上时,就可通过反向摩擦胶带来把它转移到衬底上,再通过拉曼光谱仪来确认石墨烯的层数^[67]。在此过程中,由于石墨烯紧密粘附在胶带上,使得它有可能受到胶带的污染而导致载流子迁移率的下降。此外,由于转移后所得的石墨烯并不是一致的(有些是单层的,有些是多层的),单层石墨烯所在的位置可能是衬底中的任意位置,因此这种方法不适于大规模生产使用。

外延生长石墨烯是指在高真空度环境下,通过对 SiC 衬底加热至 1 200 °C 使得 Si 原子沉积,C 原

子析出而形成石墨烯的。生长的石墨烯层数可通过调节加热时间与温度来控制。石墨烯质量与层数还取决于 SiC 面的终端是 Si 层还是 C 层。相对来说,C 层终端生长的石墨烯具有更高的载流子迁移率^[68]。在生长石墨烯并通过拉曼仪确认层数后,由于其已经位于 SiC 衬底上,因此可免于转移步骤而直接在同一块晶圆上制备多个 GFETs,有利于器件的大规模制造。但是,在这种器件结构中,石墨烯与衬底之间没有介电层的隔离,来自于衬底的电荷使得石墨烯形成重的电荷掺杂,并表现为金属性,影响了器件的性能。此外,较高的工艺温度使得这种方法与当前的 CMOS 工艺并不兼容,再加上昂贵的 SiC 衬底,使得基于外延法的 GFETs 制备不适于产业化。

CVD 法是当今最为流行的石墨烯制备方法。它是通过使碳源气体(如 CH₄、C₂H₂ 等)在高温金属催化剂(如 Cu、Ni 等)表面发生化学反应,形成 C 原子沉积,并在之后的冷却过程中析出 C 原子而在金属催化剂表面形成石墨烯。由于合成的石墨烯位于金属表面上,因此还需通过转移工序来转移到所需的绝缘衬底上才能应用于电子器件。机械剥离法转移与聚合物支持转移法是两种已成功用于从金属表面转移石墨烯至其它衬底的方法^[69]。在聚合物支持转移法中,PMMA(聚甲基丙烯酸甲酯)层首先被旋涂在金属石墨烯上,然后通过蚀刻将底层金属催化剂去除;接着将粘附有石墨烯的 PMMA 移到水中进行清洗,并放到已准备的衬底上(石墨烯面与衬底相接);最后将器件放入丙酮中,使 PMMA 溶解,完成石墨烯至衬底的转移^[70]。在当前,聚合物支持法是相对成熟并被广泛使用的石墨烯金属至衬底转移法,但蚀刻液造成的晶格缺陷与残留聚合物形成的污染都可使得石墨烯的质量受损,并最终影响器件的性能。因此,更多改进措施与办法被采取来提高转移的性能,使之能更好地应用于大规模生产中^[71]。

2.3.2 介电层的淀积

为使得 GFETs 获得好的 THz 特性,器件的栅极结电容必须很小,因此需要一个低漏电流、薄厚度、高介电常数、低界面陷阱密度的介电层^[14]。这个栅极介电层可通过热蒸发沉积或者原子层沉积(Atomic layer deposition, 简称 ALD)形成,但石墨烯的疏水性与化学惰性,使得这两种方法的实施面临着诸多的困难。虽然通过化学官能化来提高石墨烯表面的活性有助于利用 ALD 来沉积介电层,但是会破坏石墨烯晶格,导致迁移率的严重下降^[72]。Kim 等

采用电子束蒸发形成一个薄的金属层,并迅速氧化后作为 ALD 的成核层,有效的沉积了 Al_2O_3 作为介电层,并获得了较高的迁移率^[73]。

2.3.3 金属-石墨烯连接

由 2.2 节分析可知,良好的连接电阻,可减小器件的延迟,提高特征频率。用于形成金属-石墨烯连接的典型程序包括以下 3 个步骤:图案定义(电子束光刻)、电子束蒸发金属以及激光剥离(lift-off)^[14]。由于功函数的差异,金属与石墨烯的接触面形成界面偶极子层,并导致阶梯势垒,使得连接电阻较大。因此,金属-石墨烯的连接电阻工艺,不仅要求避免工艺过程对材料造成的污染和破坏,还必须选择高功函数的金属,以提高从金属至石墨烯转移的载流子密度,降低连接电阻^[50]。

如本节所述,石墨烯制备已实现产业化,介电层的淀积与金属-石墨烯的连接工艺均可用当前的半导体 CMOS 工艺技术实现,除了转移工艺外,GFETs 器件的制备工艺具备了在当前半导体技术实现产业化的基础,降低了产业化升级的壁垒,为推动基于石墨烯的半导体技术研究提供了动力。

3 基于石墨烯场效应管的太赫兹技术

由于石墨烯内电子和空穴特殊的能带结构,特别是其无质量、类中微子的形式,以及散射过程,使得石墨烯表现出了独一无二的传输特性,并有望用于电子器件中^[74,75]。石墨烯的电学特性主要包括以下几点^[76]:

- (1) 电子与空穴零带隙的线性色散能级。
- (2) 强烈的各向异性带间隧穿和高的电子空穴运动速度,使得它们在器件内的弹道输运仅为微米级。
- (3) 电场诱导的 p 区和 n 区可形成 $p-i-n$ 结。
- (4) 对石墨烯纳米带的侧向量子化,可形成带隙。
- (5) 高的电子和空穴迁移率(室温下可达到 $\mu = 2 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$; $T < 55 \text{ K}$ 时,可达到 $10^7 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)

这些特性使得石墨烯在高速电子器件领域具备优势,特别是在二极管、晶体管和纳米微机电(MEMS)器件上超越传统半导体材料,也让 GFETs 可用于各种太赫兹器件上。本节将分别分析叙述 GFETs 在太赫兹范围内的一些重要应用。

3.1 太赫兹发射器与激光器

太赫兹发射器、激光器等太赫兹源是发展太赫兹技术的基础组件。在这一领域发展过程中,V. Ryzhii、M. Ryzhii、T. Otsuji 等组成的团队做出了出色的贡献,并发表了很多的相关成果。2007 年,该团队研究了非平衡二维电子空穴系统在光泵石墨烯上的动态交流电导率,证明了强光泵下的石墨烯能产生粒子反转(Population inversion),并可导致太赫兹频段上的负交流电导率^[77]。在石墨烯上形成粒子反转的原理如图 10 所示。首先,在入射光激发下,石墨烯内部受激产生电子与空穴(能量 $\varepsilon_0 = \hbar\Omega/2$, $\hbar\Omega$ 为入射光子能量),并因载流子间的散射产生集体激发,短时间内(10~100 fs)形成了一个载流子的准平衡态(电子与空穴的总能量分布类似于费米分布)^[78-80]。接着,处于高能态的载流子辐射光学声子,并冷却全部粒子,使它们聚集在狄拉克点附近(空穴聚于狄拉克点下方,电子聚于狄拉克点上方)。由于较快的带内松弛(1 ps 或更低)和相对较慢的带间松弛,大量的电子和空穴聚集在狄拉克点的上方和下方,形成了粒子反转(THz 频段内)^[66]。

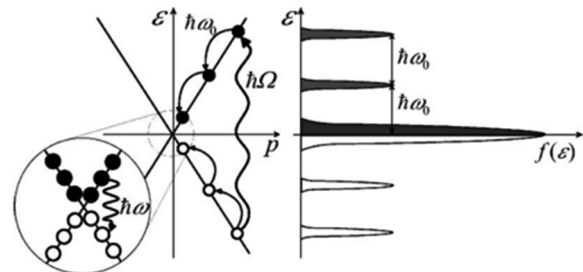


图 10 在光泵激发石墨烯上形成粒子反转的原理图^[77]

Fig. 10 Schematic view of population inversion in the optically pumped graphene^[77].

正是由于对石墨烯施加强度足够的外部激发可使之形成粒子反转^[81,82],石墨烯基场效应管太赫兹发射器、激光器不断地被研制成功。例如,V. Ryzhii 团队实现了基于单石墨烯层、多石墨烯层的光泵太赫兹激光器^[83-85]。在光泵石墨烯激光器中,光激发产生的电子和空穴通过辐射把能量转移到辐射的光子上,并聚集在狄拉克点附近的能级上。在这过程中,拥有相对较高光子能量的光泵需要复杂的配置,不便于石墨烯 THz 激光器在不同场合上的应用。而且,光激发的电子-空穴等离子体因从泵源上吸收了过多的能量(加剧粒子间的碰撞)而被明显加热,导致了准费米能量与电子-空穴有效温度的比值降低,并最终让获取足够大动态电导率的过程复杂化,阻碍粒子反转的形成。基于电子或者空穴

注入的石墨烯太赫兹激光器具有弱加热甚至冷却泵的特点,保证了更低的电子-空穴有效温度。

如图 11 所示,当施加一定的电压后,多石墨烯层的场效应管器件的动态电阻率在太赫兹频率范围内可为负值,而电子-空穴等离子体的冷却却又巩固了负动态电导率的影响,使得器件的太赫兹辐射得以实现,并具有宽频段、低德鲁德吸收、弱温度依赖、频谱电压可调的突出特点^[86]。而在 2017 年,Tamamushi 等展现了一种分布式反馈双栅极 GFET 电流注入激光器。该激光器在正向偏置下可形成 p-i-n 结,并在 100 K 环境温度下实现了 5.2 THz 的单模发射^[87]。

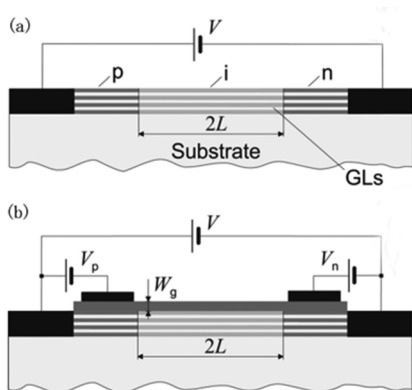


图 11 多石墨烯层太赫兹电子注入激光器^[86]: (a) 化学掺杂形成 n 结与 p 结; (b) 通过施加侧栅极电压诱导电子注入
 Fig. 11 MGL based terahertz electronic injection laser^[86]:
 (a) Chemically doped n- and p-sections;
 (b) Electrically induced by the side gate voltages.

而 Popov 等利用石墨烯共振纳米腔阵列实现了等离子体激发的太赫兹激光器^[88]。由于纳米腔阵列较强的离子限制以及太赫兹的超辐射特性,太赫兹波的幅度放大在离子共振频率点上得到了几个数量级的增强。

由于石墨烯独特的超快载流子弛豫/重组动力学,使得负动态电导率特性可在室温下宽的太赫兹频谱范围内发生,并将打破当前半导体激光器的操作温度限制。此外,石墨烯的二维等离子体激发特性大大的加强了光-粒子间的相互作用,提高量子效率与输出功率。得益于以上两点,相比于传统的半导体激光器,基于 GFETs 的电流注入激光器具有高量子效率(≈ 1)、高输出功率(毫瓦级),可室温下操作的优势^[89]。

3.2 太赫兹探测器

太赫兹探测器(Terahertz detector)是太赫兹技术的核心组件,被广泛应用于射电天文学、遥感、通

信与国防等领域。因此,基于各种结构的太赫兹探测器不断地被研究与实现。例如,Lu 等利用二维电子流在 HEMT 器件上实现了 2.5 THz 的太赫兹探测器^[90];而一种无源、兼容、宽带、柔性、大面积、偏振敏感的碳纳米管 THz 探测器也在 2014 年被证实^[91]。该 CNT THz 探测器在整个太赫兹频段的响应度约为 2.5 V/W,极化率高达 5:1。2015 年,Marczewski 等在硅无结场效应管(Silicon junctionless field effect transistors)上实现了室温下响应度达到 70 V/W,噪声功率仅为 460 pW/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 的太赫兹探测器^[92]。

尽管多种结构的太赫兹探测器已在实际中应用,但因石墨烯可吸收的电磁波频谱覆盖可见光至太赫兹的宽范围,而且带间电子跃迁强度是当今所有已知材料中最大的^[93-94]。此外,GFETs 拥有双极性的输运特点、超快的宽谱响应、超高的沟道电子迁移率以及与现行硅半导体工艺相兼容等优势,使得以 GFETs 为基础的太赫兹探测器吸引着大量研究人员的关注,并不断有高性能的探测器被实现与应用。如图 12 所示,以双层石墨烯作为沟道材料的 GFETs 太赫兹探测器在 THz 与红外频段获得了超越其它光学探测器(量子霍尔红外探测器、量子点红外探测器、量子线红外探测器、HgCdTe 和 InSb 探测器)的性能,并且其频谱特性可电压调制^[80]。

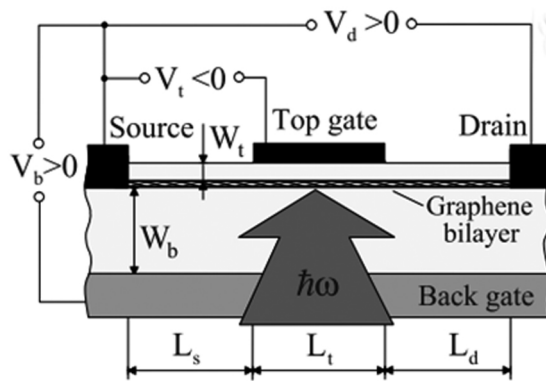


图 12 基于双层石墨烯的场效应管太赫兹探测器^[80]
 Fig. 12 Graphene bilayer based field-effect transistor terahertz detector^[80].

文献[97]证实了一种基于多石墨烯层 p-i-n 结构的场效应管太赫兹和红外探测器。因相对高的量子效率(Quantum efficiency)与低的热产生率(Termal generation rate),该探测器在太赫兹和红外频段表现出了高的响应度和探测灵敏度(室温环境下),并可在调制频率达到几十 GHz 的情况下使用^[97]。

而一种基于 T-GFETs 的天线集成 THz 直接探

测器在 2014 年被实现^[98]。它是第一个采用 CVD 石墨烯的直接 THz 探测器,可在室温下对 0.6 THz 的信号进行探测,并拥有 14 V/W 的最大电压响应度与 515 pW/√Hz 的最小等效噪声功率(Noise-equivalent power)。

基于等离子体共振的 THz 探测器原理在 1996 年由 Dyakonov 等提出后^[99],就不断地有相关研究被报道,并被成功制备与分析^[100]。因二维电子等离子体振荡的非线性,这类探测器的实施操作与电流检波组件密切相关^[66]。当 THz 信号频率与等离子体的共振频率或谐波频率接近时,共振探测器的响应度就相对高,因此可用于提高 THz 探测器的性能。Ryzhi 团队提出了一种基于纵向石墨烯基热电子晶体管(Vertical graphene-based hot-electron transistors,简称 GB-FETs)的表面等离子共振太赫兹探测器模型^[101],如图 13 所示。

该基于 GB-FETs 的太赫兹探测器获得了高达 30 A/W 的电流响应度(电压响应度约为 2×10^5 V/W),并在 1.67 THz 的频点上获得了约为 1.33×10^3 A/W 的最大电流响应度,且最大响应点可通过施加不同的偏置电压在 THz 范围内进行控制。高的热电子注入效率与无阻容分布参数限制的特性,使得基于 GB-FETs 的 THz 探测器在室温环境下 THz 频谱内获得了较高的电流与电压响应度,并可能超越其它基于标准半导体异质结构的太赫兹探测器。

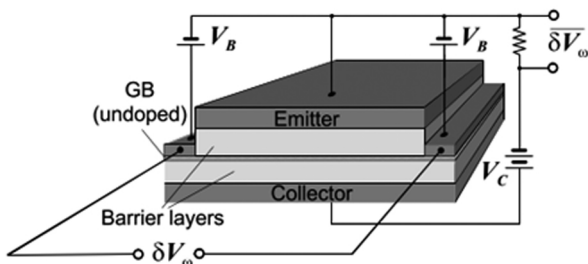


图 13 基于纵向石墨烯热电子晶体管的表面等离子共振太赫兹探测器^[101]

Fig. 13 Resonant plasmonic terahertz detection in vertical graphene-base hot-electron transistors^[101].

3.3 太赫兹调制器

过去 30 年,太赫兹科学与技术获得了巨大的发展,并被应用于天文学、光谱学、成像与通信等领域^[102]。与此同时,一些器件也被研究开发用于太赫兹频段,如太赫兹激光器、发射器、探测器、振荡器、传感器、调制器等。这些器件的研究应用极大地促进了太赫兹技术的推广与应用,但是在无损成像、

高速通信等领域,相比于其它关键器件(激光器、发射器、探测器),太赫兹调制器发展相对滞后,因此研究开发调制度大、信号衰减弱、易于集成的宽带 THz 调制器已经成为当前太赫兹科学与技术发展的紧迫课题。近年来,THz 调制器的研究与制备也取得了不少的成果,但更多的是利用拥有二维电子气(Two-dimensional electron gas,简称 2DEG)的半导体异质结构(Semiconductor heterostructures)来实现,使得器件的调制度受限于电子密度(传统半导体异质结构的电子密度最高约为: 1×10^{12} cm⁻²)的可调性而难以提高^[103],而器件金属栅极的存在,不仅使得 THz 信号被衰减,而且还会导致器件调制度的降低。因此,结合超材料(Metamaterials)或者采用等离子体结构(Plasmonic Structures)来加强 THz 辐射与 2DEG 相互作用的方法被采用,并实现了 50% 调制度的 THz 调制器^[104]。但超材料固有的窄带特性,使得器件很难适应宽范围 THz 波段的多样化需求^[105],而拥有超常光学与电学特性的单原子厚度石墨烯早已被人们所熟知,并被证明可用于制造 THz 频段的杰出器件^[106,107]。

Sensale-Rodriguez 等提出了一种可在室温下操作的石墨烯基 THz 幅度调制器^[108]。该调制器可通过调节石墨烯费米能级,改变 THz 照射下带内跃迁的态密度,继而实现 THz 波传播强度的调制,而理论计算表明,其调制度在使用单层石墨烯时可超过 90%,且最小信号衰减小于 5%。随后的实验进一步表明^[109],室温下高效、低衰减的 THz 宽带调制器可利用石墨烯载流子的带内跃迁行为实现,并首次在实验中验证了此类基于 GFETs 的 THz 调制器在 570 GHz 载波频率,调制频率 20 kHz 条件下,具有 15% 的幅度调制度。

如图 14(a) 所示,当受外部 THz 波照射时,石墨烯内部载流子跃迁以带内跃迁为主导^[110,111],此时石墨烯可看作是一个导电薄膜,其光导率紧随电导率变化,并可用简单的德鲁德模型(Drude model)来描述,如下式所示:

$$\sigma(\omega) = \frac{\sigma_{DC}(E_F)}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (16)$$

式中 ω 为入射电磁波频率, τ 为载流子动量散射时间(Carrier momentum scattering time), $\sigma_{DC}(E_F)$ 为直流电导率。由(16)式可知,石墨烯的 THz 波吸收可通过改变直流电导率或者费米能级进行调制,且当 $\omega \tau \ll 1$ 时 $\sigma(\omega) \approx \sigma_{DC}(E_F)$ 。

鉴于 Sensale-Rodriguez 提出的模型在实际应用

中因石墨烯质量的限制,调制度只有 15%,且调制频率也因器件过大而比较低,等离子体结构或者谐振腔结构被用来提高石墨烯基调制器的调制度^[112]。而通过一体化的集成方案,量子级联激光器在某些泵电流下可实现 100% 调制,而且更小的器件体积使得调制器的调制频率超过了 100 MHz^[113]。最近,一种基于共轭聚合物、石墨烯、硅等材料的高效宽带 THz 调制器被提出,它能有效地避免调制度与调制速度之间的矛盾,并获得了 93% 的调制深度^[23]。

石墨烯天然柔性的二维结构,可电调谐的高载流子密度($1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$),使得它易于与其它材料、结构相结合,也使得基于 GFETs 的 THz 调制器易于集成,减小系统复杂度。相比于其它 THz 调制器,石墨烯基 THz 调制器可通过小型化(因为石墨烯超薄的材料厚度)来降低寄生电容与寄生电阻,以获得更快的调制速度,也可通过实现 THz 辐射与石墨烯的强相互作用,取得更高的调制深度^[113]。

随着对基于 GFETs 的 THz 调制器研究地不断深入与发展,相信在未来将会有更多高性能的 THz 调制器被实现,并补上太赫兹科学与技术的关键器件上的这一短板。

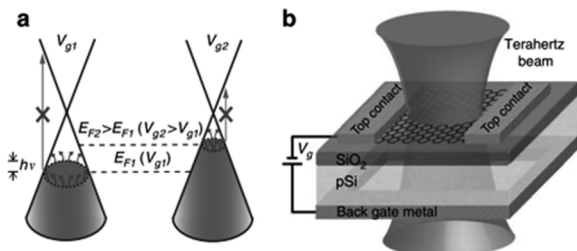


图 14 宽带 GFETs 太赫兹调制器的原理与结构^[109]:

- (a) THz 波辐射下的石墨烯能带结构(带内跃迁占主导);
- (b) 石墨烯基太赫兹调制器的模型

Fig. 14 Principle and structure of broadband GFETs terahertz modulator^[109]: (a) The band structure of the graphene irradiated by THz wave (dominated by internal transitions); (b) Graphene-based terahertz modulator model.

3.4 其它太赫兹技术应用

除了激光器、发射器、探测器、调制器外,GFETs 也被用于实现其它的 THz 技术器件。例如,Rana 等提出与分析了一种基于二维石墨烯材料的太赫兹振荡器^[114]。该太赫兹振荡器通过使石墨烯片产生受激辐射实现等离子波的放大,增加等离子波导以限制等离子波的横向传播并引导进入波导传输线,最终形成一个集成等离子波导的双顶栅 GFET 太赫兹

振荡器。石墨烯受激辐射实现等离子波放大的原理如图 15 (a) 所示。首先,频率处于太赫兹范围的入射等离子波被中等载流子密度($10^9 \sim 10^{12} \text{ cm}^{-2}$)的石墨烯所吸收,使得石墨烯内部载流子产生带间跃迁(价带→导带)。接着,带间跃迁形成的大量电子-空穴对快速冷却,使得石墨烯形成粒子反转。最后,负电导率的石墨烯再次导致带间跃迁(导带→价带)而输出放大的太赫兹波。因较慢的等离子波群速度与石墨烯层附近很强的等离子体电磁场限制,使得通过石墨烯获得的等离子体波放大增益比典型的半导体带间跃迁激光器更大。除了通过石墨烯获得等离子体波放大外,器件还需增加外接电路才可形成振荡器,其模型原理见图 15 (b)。

在此模型中,产生振荡所需满足的增益阈值如下式所示:

$$g_{th}(\omega) = \frac{1}{L} \log \frac{1}{|\Gamma(\omega)|^2} \quad (17)$$

式中 L 为石墨烯的长度, ω 为等离子体波的频率, $\Gamma(\omega)$ 为等离子体传输在石墨烯两个端点间的反射系数,且 $\Gamma(\omega) = \frac{Z_{ext}(\omega) - 2Z_0(\omega)}{Z_{ext}(\omega) + 2Z_0(\omega)}$; $Z_{ext}(\omega)$ 、 $Z_0(\omega)$ 分别为外部阻抗(包括金属与石墨烯的接触电阻)与等离子体传输线阻抗(Plasmon transmission line impedance)。当外部电阻远大于或者远小于传输线阻抗时,传输线两端发生全反射,此时振荡要求的增益阈值约为零。而当 $Z_{ext}(\omega) \approx 2Z_0(\omega)$ 时,振荡所需增益阈值为无穷大,也即不可能形成振荡。

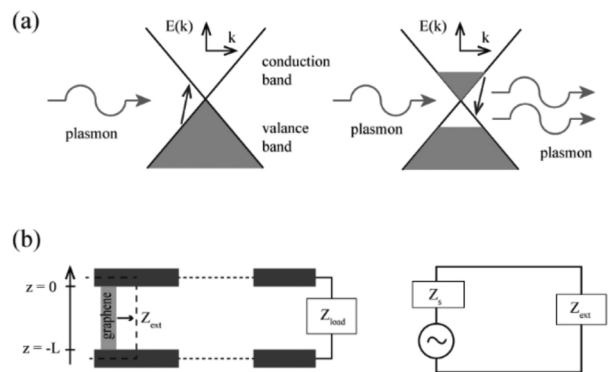


图 15 石墨烯受激辐射实现等离子波放大与振荡器^[114]:

- (a) 等离子波放大的原理; (b) 添加外部电路形成振荡器

Fig. 15 The amplification and oscillator in graphene through stimulated emission^[114]: (a) Principle of plasma wave amplification; (b) External circuit for the oscillator.

在 2011 年,一种由多石墨烯层与金属网状结构构成的 THz 放大器模型被提出^[115]。该放大器采用

网状结构的金属片作为滤波腔,并通过周期孔阵列结构诱导表面等离子体激元(Surface plasmon polaritons)以加强网孔附近的电场,实现对特定 THz 信号的最大传输(频率由金属的网孔结构参数决定)。而基于多石墨烯层光学泵的行波放大器既可通过调节石墨烯的层数实现对放大倍数的调节,也可通过增加栅极形成 GFETs 结构,再利用栅极电压控制石墨烯层的费米能级,实现对放大倍数的控制^[116]。

随着对石墨烯研究的持续发展与半导体器件工艺的不断进步,更多基于 GFETs 的 THz 创新技术将会涌现,如太赫兹混合器^[117]、移相器^[118]等,并推动着太赫兹科学与技术的进一步发展与应用。

4 结论

大规模集成电路的发展,迫使晶体管的尺度不断降低,并有可能令摩尔定律失效。石墨烯基场效应管凭借异常薄的二维沟道厚度,使得器件拥有更大的缩微空间而不用担心短沟道效应、寄生效应恶化、量子行为等问题。而众多基于传统 MOSFETs 的器件结构形式,让 GFETs 能更好地兼容当前的半导体技术,实现低成本的产业升级。此外,石墨烯出色的电学特性以及独一无二的零带隙能带结构,不仅使 GFETs 具有优良的电路级优值系数,也让它形成了独特的双极 $I-V$ 特性。不断被证实的越来越高的器件特征频率,让 GFETs 成为了当前太赫兹技术应用的热门器件,并在太赫兹发射器、激光器、探测器、调制器等领域展现了极高的性能与应用前景。

尽管 GFETs 在太赫兹技术应用领域有着独特的优势,但是要实现的全面应用与产业化,还需开展更多的研究与改进,尤其是在器件工艺上,因为石墨烯尚未能在硅基的衬底上直接生长,制备的转移工艺增加了材料受污染、形成缺陷的概率,使得器件无法达到预期性能。而石墨烯与金属的连接电阻、无法实现电流饱和等问题也是限制 GFETs 在太赫兹频段应用的重要原因。因此,未来还需开展更加深入的研究与探索,才能实现 GFETs 在太赫兹技术的全面应用与发展。

参考文献

- [1] Geim A K, Novoselov K S. The rise of graphene [J]. *Nature Materials*, 2007, 6(3): 183-191.
- [2] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films [J]. *Science*, 2004, 306(5696): 666-669.
- [3] Li Y F, Liu Y Z, Zhang W K, et al. Green synthesis of reduced

- graphene oxide paper using Zn powder for supercapacitors [J]. *Mater Lett*, 2015, 157: 273-276.
- [4] Li Shao-juan, Gan Sheng, Mu Hao-ran, et al. Research progress in graphene use in photonic and optoelectronic devices [J]. *New Carbon Materials*, 2014, 29(5): 329-356.
- [5] Liu Y Z, Li Y F, Yuan S X, et al. Synthesis of 3D N, S dual-doped porous carbons with ultrahigh surface areas for highly efficient oxygen reduction reactions [J]. *Chem Electro Chem*, 2018, 5: 3506-3513.
- [6] Singh V, Joung D, Zhai L, et al. Graphene based materials: Past, present and future [J]. *Progress in Materials Science*, 2011, 56(8): 1178-1271.
- [7] Robinson J a, Snyder D, Fanton M, et al. Development of graphene for high frequency electronics [C]. *Electron Devices Meeting (IEDM)*. 2009 IEEE International, 2009: 237-240.
- [8] Jacob A P, Xie R, Sung M G, et al. Scaling challenges for advanced CMOS devices [J]. *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, 2017, 26(01-02): 1740001.
- [9] Moore G E. No exponential is forever: But 'forever' can be delayed [C]. *IEEE Internation Solid-State Circuits Conference. ISSCC*, 2003, 2: 1-19.
- [10] Siers S, Damaraju S, George V, et al. The first 22nm IA multi-CPU and GPU system-on-chip using tri-gate transistors [C]. *Solid State Circuits Conference (A-SSCC)*, 2012 IEEE Asian. IEEE, 2012: 9-12.
- [11] Bawankar M. III-V Mosfet alternative TO Si/SiO₂ mosfet [J]. *Journal of Electronics & Communication Engineering*, 2008: 60-64.
- [12] Lin J Q, Antoniadis D A, Del Alamo J A, et al. Novel intrinsic and extrinsic engineering for high-performance high-density self-aligned in GaAs Mosfets: Precise channel thickness control and sub-40-nm metal contacts [C]. *Electron Devices Meeting (Iedm)*, 2014 IEEE International. IEEE, 2014: 25.1.1-25.1.4.
- [13] Lemme M C, Echtermeyer T J, Baus M, et al. A graphene field effect device [J]. *Electronics*, 2007, 28(4): 1-12.
- [14] Reddy D, Register L F, Carpenter G D, et al. Graphene field-effect transistors [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2011, 44(31): 313001.
- [15] Schwierz F. Graphene transistors [J]. *Nature Nanotechnology*, 2010, 5(7): 487-496.
- [16] Hartmann R R, Kono J, Portnoi M E. Terahertz science and technology of carbon nanomaterials [J]. *Nanotechnology*, 2014, 25(32): 32001.
- [17] Lee M, Wanke M C. Searching for a solid-state terahertz technology [J]. *Science*, 2007, 316(5821): 64-65.
- [18] Lin Y-M, Dimitrakopoulos C, Jenkins K A, et al. 100 GHz transistors from wafer scale epitaxial graphene [J]. *Science*, 2010, 327(5699): 662.
- [19] Lin Y M, Valdes-Garcia A, Han S J, et al. Wafer-scale graphene integrated circuit [J]. *Science*, 2011, 332(6035): 1294-1297.

- [20] 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.
- [21] Petrone N, Meric I, Chari T, et al. Graphene field-effect transistors for radio-frequency flexible electronics [J]. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 2015, 3(1): 44-48.
- [22] Dontschuk N, Stacey A, Tadich A, et al. A graphene field-effect transistor as a molecule-specific probe of DNA nucleobases [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 1-7.
- [23] Wang G, Zhang B, Ji H, et al. Monolayer graphene based organic optical terahertz modulator [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(2): 23301.
- [24] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Room-temperature electric field effect and carrier-type inversion in graphene films [J]. *ArXiv Preprint Cond-mat/0410631*, 2004.
- [25] Chen B, Liu H, Li X, et al. Fabrication of a graphene field effect transistor array on microchannels for ethanol sensing [J]. *Applied Surface Science*, 2012, 258(6): 1971-1975.
- [26] Zhang B Y, Liu T, Meng B, et al. Broadband high photore-sponse from pure monolayer graphene photodetector [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 1811.
- [27] Zhan B, Li C, Yang J, et al. Graphene field-effect transistor and its application for electronic sensing [J]. *Small*, 2014, 10(20): 4042-4065.
- [28] Farmer D B, Chiu H Y, Lin Y M, et al. Utilization of a buffered dielectric to achieve high field-effect carrier mobility in graphene transistors [J]. *Nano Letters*, 2009, 9(12): 4474-4478.
- [29] Molitor F, Güttinger J, Stampfer C, et al. Local gating of a graphene Hall bar by graphene side gates [J]. *Physical Review B*, 2007, 76(24): 245426.
- [30] Tian J F, Jauregui L A, Lopez G, et al. Ambipolar graphene field effect transistors by local metal side gates [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(26): 263110.
- [31] Chen C, Low T, Chiu H, et al. Graphene side gate engineering [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2012, 33(3): 330-332.
- [32] Hähnlein B, Händel B, Pezoldt J, et al. Side-gate graphene field-effect transistors with high transconductance [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(9): 93504.
- [33] Zhang Q, Fang T, Xing H, et al. Graphene nanoribbon tunnel transistors [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2008, 29(12): 1344-1346.
- [34] Svintsov D, Vyurkov V V, Lukichev V F, et al. Tunnel field-effect transistors with graphene channels [J]. *Semiconductors*, 2013, 47(2): 279-284.
- [35] Malec C E, Davidovi D. Transport in graphene tunnel junctions [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 109(6): 064507(1-7).
- [36] Britnell L, Gorbachev R V, Jalil R, et al. Field-effect tunneling transistor based on vertical graphene heterostructures [J]. *Science*, 2012, 335(6071): 947-950.
- [37] Schwierz F, Wong H, Liou J. *Nanometer CMOS* [M]. Pan Stanford Publishing, 2010.
- [38] Wang H, Hsu A, Lee D S, et al. Delay analysis of graphene field-effect transistors [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2012, 33(3): 324-326.
- [39] Moon J S, Antcliffe M, Seo H C, et al. Graphene review: An emerging RF technology [C]. *Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems (SiRF)*, 2012 IEEE 12th Topical Meeting on. IEEE, 2012: 199-202.
- [40] Schwierz F, Liou J. *Modern microwave transistors: theory, design, and performance* [M]. Wiley-Interscience, 2003.
- [41] Schroder D K. *Semiconductor Material and Device Characterization* [M]. John Wiley & Sons, 2006.
- [42] Nguyen L D, Tasker P J, Radulescu D C, et al. Design fabrication and characterization of ultra high speed AlGaAs/InGaAs MODFETs [C]. *Electron Devices Meeting, 1988. IEDM '88. Technical Digest, International. IEEE, 1988: 176-179.*
- [43] Hughes B, Tasker P J. Bias dependence of the MODFET intrinsic model elements values at microwave frequencies [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1989, 36(10): 2267-2273.
- [44] Morozov S V, Novoselov K S, Katsnelson M I, et al. Giant intrinsic carrier mobilities in graphene and its bilayer [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(1): 4-8.
- [45] Frank D J, Taur Y, Wong H P, et al. Generalized scale length for two-dimensional effects in Mosfets [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 1998, 19(10): 385-387.
- [46] Meric I, Baklitskaya N, Kim P, et al. RF performance of top-gated, zero-bandgap graphene field-effect transistors [C]. *Electron Devices Meeting, 2008. IEDM 2008. IEEE International. 2008: 1-4.*
- [47] Liao L, Lin Y-C, Bao M, et al. High-speed graphene transistors with a self-aligned nanowire gate. [J]. *Nature*, 2010, 467(7313): 305-308.
- [48] Cheng R, Bai J, Liao L, et al. High-frequency self-aligned graphene transistors with transferred gate stacks [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(29): 11588-11592.
- [49] Fang T, Konar A, Xing H, et al. Carrier statistics and quantum capacitance of graphene sheets and ribbons [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(9): 92109.
- [50] Zhong H, Zhang Z, Chen B, et al. Realization of low contact resistance close to theoretical limit in graphene transistors [J]. *Nano Research*, 2015, 8(5): 1669-1679.
- [51] Robinson J A, Labella M, Zhu M, et al. Contacting graphene [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(5): 53203.
- [52] Li W, Liang Y, Yu D, et al. Ultraviolet/ozone treatment to reduce metal-graphene contact resistance [J]. *Applied Physics*, 2013, 102(18): 183110.
- [53] Leong W S, Nai C T, Thong J T L. What does annealing do to metal-graphene contacts? [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(7): 3840-3847.
- [54] Lemaitre M G, Donoghue E P, McCarthy M a, et al. Improved transfer of graphene for organic, field-effect transistors [J]. *ACS nano*, 2012, 6(10): 9095-9102.

- [55] Gahoi A ,Wagner S ,Bablich A ,et al. Contact resistance study of various metal electrodes with CVD graphene[J]. *Solid-State Electronics* ,2016 ,125: 234-239.
- [56] Hong S K ,Jeon S C ,Hwang W S ,et al. Resistance analysis and device design guideline for graphene RF transistors[J]. *2D Materials* ,2015 ,2(3) : 34011.
- [57] Dean C R ,Young A F ,Meriç I ,et al. Boron nitride substrates for high-quality graphene electronics[J]. *Nature Nanotechnology* ,2010 ,5(10) : 722-726.
- [58] Wang H ,Hsu A L ,Palacios T. Graphene electronics for RF applications[J]. *IEEE Microwave Magazine* ,2012 ,13(4) : 114-125.
- [59] Hong S K ,Oh J G ,Hwang W S ,et al. Enhanced performance in graphene RF transistors via advanced process integration[J]. *Semiconductor Science and Technology* ,2017 ,32(4) : 45009.
- [60] Franklin A D ,Han S J ,Bol A A ,et al. Effects of nanoscale contacts to graphene[J]. *IEEE Electron Device Letters* ,2011 ,32(8) : 1035-1037.
- [61] Meriç I ,Dean C R ,Young A. Graphene field-effect transistors based on boron nitride gate dielectrics [J]. *Proceedings of the IEEE* ,2013 ,101(7) : 1609-1619.
- [62] Nguyen V H ,Bournel A ,Chassat C. Quantum transport of Dirac fermions in graphene field effect transistors[C]. *Simulation of Semiconductor Processes and Devices* ,2010 International Conference on. *IEEE* ,2010: 9-12.
- [63] Falkovsky L A ,Varlamov A A. Space-time dispersion of graphene conductivity [J]. *European Physical Journal B* ,2007 ,56(4) : 281-284.
- [64] Ando T ,Zheng Y ,Suzuura H. Dynamical conductivity and zero-mode anomaly in honeycomb lattices [J]. *Journal of the Physical Society of Japan* ,2002 ,71(5) : 1318-1324.
- [65] Sensale-rodriuez B ,Member S ,Yan R ,et al. Graphene for reconfigurable THz optoelectronics [J]. *Proceedings of the IEEE* ,2013 ,101(7) : 1705-1716.
- [66] Matsumoto K. *Frontiers of Graphene and Carbon Nanotubes* [M]. Springer ,2015.
- [67] Ferrari A C ,Meyer J C ,Scardaci V ,et al. Raman spectrum of graphene and graphene layers [J]. *Physical Review Letters* ,2006 ,97(18) : 187401.
- [68] Kedzierski J ,Hsu P-L ,Healey P ,et al. Epitaxial graphene transistors on SiC substrates [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices* ,2008 ,55(8) : 2078-2085.
- [69] Kumar S ,McEvoy N ,Kim H Y ,et al. CVD growth and processing of graphene for electronic applications[J]. *Physica Status Solidi (B)* ,2011 ,248(11) : 2604-2608.
- [70] Wei W ,Deokar G ,Belhaj M ,et al. Fabrication and characterization of CVD-grown graphene based Field-Effect Transistor [C]. *EMicrowave Conference (EuMC)* ,2014 44th European. *IEEE* ,2014: 367-370.
- [71] Regan W ,Alem N ,Alemán B ,et al. A direct transfer of layer-area graphene [J]. *Applied Physics Letters* ,2010 ,96(11) : 113102.
- [72] Lee B ,Park S-Y ,Kim H-C ,et al. Conformal Al₂O₃ dielectric layer deposited by atomic layer deposition for graphene-based nanoelectronics [J]. *Applied Physics Letters* ,2008 ,92(20) : 203102.
- [73] Kim S ,Nah J ,Jo I ,et al. Realization of a high mobility dual-gated graphene field effect transistor with Al₂O₃ dielectric [J]. 2009 ,94(6) : 62107.
- [74] Novoselov K S ,Geim A K ,Morozov S V ,et al. Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene [J]. *Nature* , Nature Publishing Group ,2005 ,438(7065) : 197-200.
- [75] Castro Neto A H ,Guinea F ,Peres N M R ,et al. The electronic properties of graphene [J]. *Reviews of Modern Physics* ,2009 ,81(1) : 109-162.
- [76] Ryzhii V ,Ryzhii M ,Satou A ,et al. Graphene-based terahertz devices: Concepts and characteristics [J]. *Future Trends in Microelectronics: From Nanophotonics to Sensors and Energy* ,2010: 293-306.
- [77] Ryzhii V ,Ryzhii M ,Otsuji T. Negative dynamic conductivity of graphene with optical pumping [J]. *Journal of Applied Physics* ,2007 ,101(8) : 83114.
- [78] Breusing M ,Ropers C ,Elsaesser T. Ultrafast carrier dynamics in graphite [J]. *Physical Review Letters* ,2009 ,102(8) : 86809.
- [79] George P A ,Strait J ,Dawlaty J ,et al. Ultrafast optical-pump terahertz-probe spectroscopy of the carrier relaxation and recombination dynamics in epitaxial graphene [J]. *Nano Letters* ,2008 ,8(12) : 4248-4251.
- [80] Dawlaty J M ,Shivaraman S ,Chandrashekar M ,et al. Measurement of ultrafast carrier dynamics in epitaxial graphene [J]. *Applied Physics Letters* ,2008 ,92(4) : 42116.
- [81] Satou A ,Ryzhii V ,Kurita Y ,et al. Threshold of terahertz population inversion and negative dynamic conductivity in graphene under pulse photoexcitation [J]. *Journal of Applied Physics* ,2013 ,113(14) : 143108.
- [82] Satou A ,Otsuji T ,Ryzhii V. Theoretical study of population inversion in graphene under pulse excitation [J]. *Japanese Journal of Applied Physics* ,2011 ,50(7) : 70116.
- [83] Dubinov A A ,Aleshkin V Y ,Ryzhii M ,et al. Terahertz laser with optically pumped graphene layers and fabri-perot resonator [J]. *Applied Physics Express* ,2009 ,2(9) : 92301.
- [84] Ryzhii V ,Ryzhii M ,Satou A ,et al. Feasibility of terahertz lasing in optically pumped epitaxial multiple graphene layer structures [J]. *Journal of Applied Physics* ,2009 ,106(8) : 84507.
- [85] Ryzhii V ,Dubinov A A ,Otsuji T ,et al. Terahertz lasers based on optically pumped multiple graphene structures with slot-line and dielectric waveguides [J]. *Journal of Applied Physics* ,2010 ,107(5) : 54505.
- [86] Ryzhii V ,Ryzhii M ,Mitin V ,et al. Toward the creation of terahertz graphene injection laser [J]. *Journal of Applied Physics* ,2011 ,110(9) : 94503.
- [87] Tamamushi G ,Watanabe T ,Mitsushio J ,et al. Current-injec-

- tion terahertz lasing in a distributed-feedback dual-gate graphene-channel transistor [C]. *Proc of SPIE*, 2017, 10111: 1011126.
- [88] Popov V V, Polischuk O V, Davoyan A R, et al. Plasmonic terahertz lasing in an array of graphene nanocavities [J]. *Physical Review B*, 2012, 86(19): 195437.
- [89] Otsuji T, Watanabe T. Graphene active plasmonic metamaterials for new types of terahertz lasers [C]. *SPIE Defense, Security, and Sensing. International Society for Optics and Photonics*, 2013: 87160P1-12.
- [90] Lü 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.
- [91] He X, Fujimura N, Lloyd J M, et al. Carbon nanotube terahertz detector [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(7): 3953-3958.
- [92] Marczewski J, Knap W, Tomaszewski D, et al. Silicon junctionless field effect transistors as room temperature terahertz detectors [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 118(10): 104502.
- [93] Nair R R, Blake P, Grigorenko N, et al. Fine structure constant defines visual transparency of graphene [J]. *Science*, 2008, 320(5881): 1308.
- [94] Wang F, Zhang Y, Tian C, et al. Gate-variable optical transitions in graphene [J]. *Science*, 2008, 320(5873): 206-209.
- [95] Xia F, Mueller T, Lin Y, et al. Ultrafast graphene photodetector [J]. *Nature Nanotechnology*, 2009, 4(12): 839-843.
- [96] Ryzhii V, Ryzhii M. Graphene bilayer field-effect phototransistor for terahertz and infrared detection [J]. *Physical Review B*, 2009, 79(24): 245311.
- [97] Ryzhii V, Ryzhii M, Mitin V, et al. Terahertz and infrared photodetection using p-i-n multiple-graphene-layer structures [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107(5): 54512.
- [98] Zak A, Andersson M A, Bauer M, et al. Antenna-integrated 0.6 THz FET direct detectors based on CVD graphene [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(10): 5834-5838.
- [99] Dyakonov M, Shur M. Plasma electronics: Nove rahertz devices using [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1996, 43(10): 1640-1645.
- [100] Svinsov D, Leiman V G, Ryzhii V, et al. Graphene nanoelectro mechanical resonators for the detection of modulated terahertz radiation [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2014, 47(50): 505105.
- [101] Ryzhii V, Otsuji T, Ryzhii M, et al. Resonant plasmonic terahertz detection in vertical graphene-base hot-electron transistors [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 118(20): 204501.
- [102] Dhillon S S, Vitiello M S, Linfield E H, et al. The 2017 terahertz science and technology roadmap [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, 50(4): 43001.
- [103] Lee S H, Choi M, Kim T T, et al. Gate-controlled active graphene metamaterials at terahertz frequencies [J]. *Technical Digest -2012 17th Opto-Electronics and Communications Conference, OECC 2012*, 2012, 11(11): 582-583.
- [104] Chen H-T, Padilla W J, Zide J M O, et al. Active terahertz metamaterial devices [J]. *Nature*, 2006, 444(7119): 597-600.
- [105] Paul O, Imhof C, Lagel B, et al. Polarization-independent active metamaterial for high-frequency terahertz modulation [J]. *Optics express*, 2009, 17(2): 819-827.
- [106] Rouhi N, Capdevila S, Jain D, et al. Terahertz graphene optics [J]. *Nano Research*, 2012, 5(10): 667-678.
- [107] Tassin A P, Koschny T, Soukoulis C M. Graphene for Terahertz Applications [J]. *Science*, 2013, 341(6146): 620-621.
- [108] Sensale-Rodriguez B, Fang T, Yan R, et al. Unique prospects for graphene-based terahertz modulators [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(11): 113104.
- [109] Sensale-Rodriguez B, Yan R, Kelly M M, et al. Broadband graphene terahertz modulators enabled by intraband transitions. [J]. *Nature communications*, 2012, 3: 780.
- [110] Dawlaty J M, Shivaraman S, Strait J, et al. Measurement of the optical absorption spectra of epitaxial graphene from terahertz to visible [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(13): 131905.
- [111] Choi H, Borondics F, Siegel D A, et al. Broadband electromagnetic response and ultrafast dynamics of few-layer epitaxial graphene [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(17): 172102.
- [112] Ryzhii V, Otsuji T, Ryzhii M, et al. Effect of plasma resonances on dynamic characteristics of double graphene-layer optical modulator [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112(10): 104507.
- [113] Liang G, Hu X, Yu X, et al. Integrated terahertz graphene modulator with 100% modulation depth [J]. *ACS Photonics*, 2015, 2(11): 1559-1566.
- [114] Rana F. Graphene Terahertz Plasmon Oscillators [J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2008, 7(1): 91-99.
- [115] Takatsuka Y, Sano E, Ryzhii V, et al. Terahertz amplifiers based on multiple graphene layer with field-enhancement effect [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2011, 50(7): 70118.
- [116] Azar O A, Abdi M, Baghban H. Graphene-based terahertz waveguide amplifier [J]. *Procedia Materials Science*, 2015, 11: 270-274.
- [117] Mao X, Cheng C, Huang B, et al. Optoelectronic mixer based on graphene FET [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2015, 36(3): 253-255.
- [118] Chen P Y, Argyropoulos C, Alu A. Terahertz antenna phase shifters using integrally-gated graphene transmission-lines [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(4): 1528-1537.