
文章编号：2095-4980(2015)03-0511-09

基于石墨烯的太赫兹光电功能器件研究进展

苏娟^{a,b}, 成彬彬^{a,b}, 邓贤进^{a,b}

(中国工程物理研究院 a.电子工程研究所; b.微系统与太赫兹研究中心, 四川 绵阳 621999)

摘要：作为一种新型光电材料，石墨烯独特的能带结构和电子输运特性，使其与太赫兹科学有着密切的内在关系：石墨烯内部的等离子体振荡频率在太赫兹频段；人为调谐石墨烯的禁带宽度在0~0.3 eV时，正好覆盖太赫兹频段；光电导率的外部可控性等，这些特点使得石墨烯有望成为太赫兹频段新一代高性能设备研制的基础。最近的研究显示，石墨烯在太赫兹波产生、调控、检测等光电功能器件的研制中取得了很好的成果。重点介绍了基于石墨烯的太赫兹光电功能器件，包括太赫兹源器件、可调控器件及检测器研究的最新进展，并对这一快速发展的研究领域进行了展望。

关键词：石墨烯；太赫兹；等离子体激元；激光器；调制器；检测器

中图分类号：TN204

文献标识码：A

doi: 10.11805/TKYDA201503.0511

Recent progress on graphene-based terahertz optoelectronics

SU Juan^{a,b}, CHENG Binbin^{a,b}, DENG Xianjin^{a,b}

(a.Institute of Electronic Engineering;

b. Microsystem and Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: As a new kind of optoelectronic material, based on its unique band structures and electron transport properties, graphene is closely related to terahertz(THz) science: both its variable plasmon resonance and tunable bandgaps(0~0.3 eV) include the THz frequency band; its tunable optical conductivity; etc.. These properties have made graphene a potential candidate for the fabrication of new generation high-quality THz devices. Recently, researchers have made great progress in THz generation, manipulation, and detection based on graphene. In this paper, an introduction to the recent progress in graphene-based THz optoelectronics, including THz sources, tunable manipulation devices, and detectors, is given, and the prospects of this fast-developing field are also discussed.

Key words: graphene; terahertz; plasmons; laser; modulator; detector

作为频率在0.1 THz~10 THz(3 mm~30 μm)之间的电磁波，太赫兹波处于微波和红外之间由宏观电子学向微观光学过渡的特殊位置。长期以来，由于缺乏对该频段电磁波有效控制的材料和器件，涉及太赫兹频段的研究成果非常少。20世纪80年代以来，随着太赫兹波产生和检测技术的突破和发展^[1~4]，特别是超快技术的进步，获得宽带稳定的脉冲太赫兹波成为一种常规技术，促使太赫兹技术迅速发展，使其成为近年来研究的热点。从电子学到光学，各类与太赫兹产生、调控、检测息息相关的组件和技术进步，都推动了太赫兹应用系统的发展，使其在通信、天文、医学诊断、环境科学、安全等领域展现出了广阔的发展前景^[5~11]。

尽管太赫兹技术目前发展迅速，但由于太赫兹系统中要实现太赫兹波产生和检测间的电磁波转化，要求一定的相干检测方法来实现这一高动态过程，需要非常复杂和昂贵的设备^[12]。虽然现在已有很多电学、光学或半导体的技术来解决该问题，但其固有的缺点仍限制着太赫兹技术的进一步应用发展，科研工作者在不断寻求新原理、新材料来突破这一限制。近年来，同是研究热点的石墨烯，作为一种新型光电纳米材料，与太赫兹科学息息相关。这主要得益于其独特的能带结构和电子输运特性：石墨烯的带内跃迁，及等离子体振荡频率覆盖太赫兹频段^[13]；人为调谐石墨烯的禁带宽度在0~0.3 eV时，包含太赫兹频段^[14~15]；光电导率的外部可控性等，这些特点使得石墨烯有望成为太赫兹频段新型功能器件研制的基础，并提供了潜在的研究方向和手段。

本文对石墨烯材料得以在太赫兹领域运用的独特光学特性及其原理进行了介绍，基于此，对现有石墨烯太赫兹光电功能器件的研究进展进行了讨论，主要包括太赫兹源、可控调控器件及检测器件，并对这一快速发展的研究领域进行了展望。

1 石墨烯的光学特性

石墨烯与太赫兹科学紧密联系在一起的主要原因是石墨烯自身带内跃迁及等离子体振荡带来的独特光学特性。

1.1 带内和带间跃迁

石墨烯的光吸收与其光电导率的变化密切相关，主要由石墨烯的带间跃迁和带内跃迁来决定，如图 1 所示。石墨烯能带结构在狄拉克点附近的紧束缚哈密顿量是线性的，因此可用公式来描述其光电导率^[16-18]：

$$\sigma(\omega) = \sigma_{\text{intra}}(\omega) + \sigma_{\text{inter}}(\omega) \quad (1)$$

其中，

$$\sigma_{\text{intra}}(\omega) = \frac{ie^2 E_f}{\pi \hbar^2 \left(\omega + \frac{i}{\tau} \right)} \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{inter}}(\omega) = \frac{ie^2 \omega}{\pi} \int_0^\infty \frac{f(\varepsilon - E_f) - f(-\varepsilon - E_f)}{(2\varepsilon)^2 - (\hbar\omega + i\Gamma)^2} d\varepsilon \quad (3)$$

这里，假设 $E_f \gg k_B T$ ，其中， k_B 是玻尔兹曼常数， T 是温度， e 是电子电量， \hbar 是简化普朗克常量， ω 是角频率， E_f 是费米能级， f 函数是费米分布函数， τ 是动量弛豫时间， Γ 描述带间跃迁的展宽。

由上式可见，在低频段，石墨烯的光电导率主要由带内跃迁决定，高频段则取决于带间跃迁。当式(2)~式(3)中 ω 趋于无穷时，石墨烯在远红外到可见光频谱范围内的光电导率简化为常数 $e^2/4\hbar$ ，从而产生了 2.3% 的特征吸收^[20]，如图 1(a)所示。由于石墨烯的光电导率和费米能级相关，可以通过化学掺杂或栅极电注入的方式来调控载流子浓度及费米能级，进而实现对石墨烯光电导率的调控。

在红外频段，受带间跃迁的泡利阻塞影响，石墨烯可以实现从 0~2.3% 的弱吸收调控，实验上已制成了锁模激光器^[21]、超快红外调制器^[22-23]等，此外理论上提出可通过引入等离子体效应来增强调制深度^[24]。在太赫兹频段，带间跃迁对石墨烯光电导率的影响可以忽略，其光电导率的实部可写成类似德鲁德分布的形式^[25]：

$$\sigma(\omega) = \frac{\sigma_{\text{DC}}}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (4)$$

式中 σ_{DC} 是直流电导率。石墨烯因其独特的圆锥型能带结构，使 σ_{DC} 与载流子浓度 n 之间的关系呈现非线性，即 $\sigma_{\text{DC}} \propto E_f \propto \sqrt{n}$ ^[26-27]。因此，当 $\omega < \omega_0$ ，可对石墨烯电导率进行调控，其中 ω_0 由石墨烯材料自身品质决定且其典型值在 1 THz~4 THz 之间，即石墨烯的带内跃迁可实现 1 THz~4 THz 频段内的调控^[28-31]。随着频率的升高，大面积石墨烯基于带内跃迁对光电导率的调控能力开始下降。此时，可以通过引入图形化石墨烯的等离子体效应来增强对有效光电导率的调控。

1.2 等离子体振荡

石墨烯中载流子集体振荡引起的等离子体激元，表现出与平面或图形化金属及半导体二维电子气和介质边界之间的电磁波振荡(表面等离子体激元)极大的相似性，如图 2(a)、图 2(b)所示。但与金属中的表面等离子体激元相比，石墨烯呈现出不同的色散，更严格的场定位及更小的传播损耗^[32]。因此，近年来，无论是实验^[33-34]还是理论^[35-37]上，都对石墨烯等离子体的研究格外关注。另一主要原因是可以通过栅压来调节自由电子-空穴对激发的带内损耗和色散，影响其载流子浓度，进而实现对等离子体振荡的调控。前期相关研究主要集中在红外频段，且侧重于使用大面积石墨烯材料。在太赫兹频段，Ryzhii 理论计算了栅控石墨烯等离子体的特性^[38-39]，

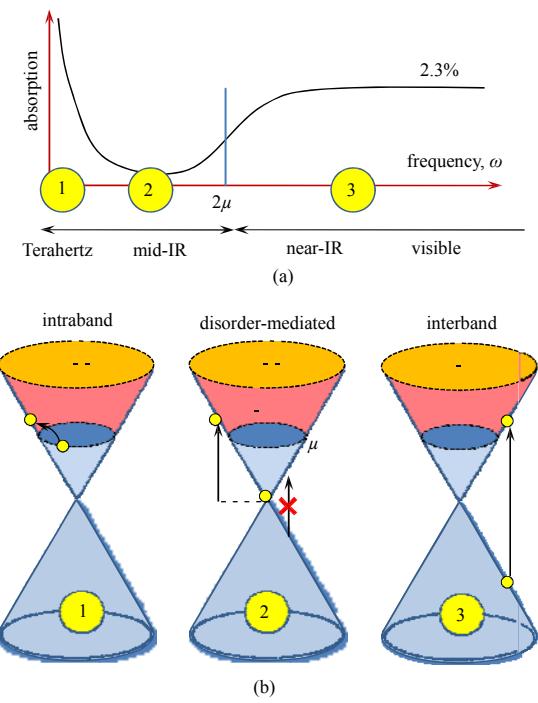


Fig.1 (a) Illustration of a typical absorption spectrum of graphene; (b) Illustration of the various optical transition processes^[19]

图 1 (a) 典型石墨烯吸收示意图；(b) 能带跃迁过程示意图^[19]

为可控太赫兹功能器件的研制奠定了基础。随后，Rana 研究小组提出了基于石墨烯等离子体激发的太赫兹激光器概念^[40]。研究表明，采用尺寸小于太赫兹波长、周期性排布的石墨烯图形化结构(带状、盘状等)，如图 2(c)所示，可以增强其太赫兹等离子体激发^[41-42]。

图形化石墨烯中太赫兹等离子体激元特性与电导率之间的关系，可简单描述为 $\omega_p \propto 1/\sqrt{LC} \propto \sqrt{\sigma_{DC}}$ ， ω_p 是等离子振荡频率， L 和 C 是等效电感和电容。该比例关系可通过经典 Maxwell-Garnett 理论进行严格推导^[43-44]，也可采用 RCL 等效电路进行半定量分析^[45-46]。前面可知 $\sigma_{DC} \propto E_f \propto \sqrt{n}$ ，所以得出 $\omega_p \propto \sqrt{\sigma_{DC}} \propto n^{1/4}$ ，即可以通过调控石墨烯中的载流子浓度对等离子体振荡频率进行调节。此外，Yan 认为采用多层石墨烯层叠的结构，可以提高石墨烯等离子体的振荡频率^[44]。此时，这种多层结构的有效电导率为 $N\sigma_{DC,0}$ ，其中 $\sigma_{DC,0}$ 是每层的有效电导率， N 是石墨烯的层数，由此可以得到 $\omega_p \propto N^{1/4}n^{1/4}$ ，实验结果与 $N^{1/2}$ 成正比^[25]，证实了 Yan 的结论。由此，栅电压调控的石墨烯等离子体激元，存在比例关系 $\omega_p \propto (V_g - V_{th})^{1/4}$ ，其中， V_g 是栅极电压， V_{th} 是阈值电压，即可以通过栅极电压来调控石墨烯的等离子体振荡频率^[25]，为石墨烯太赫兹可控功能器件的研制提供了理论基础。

2 基于石墨烯的太赫兹光电功能器件

基于以上石墨烯的独特光电特性，近年来，一些研究小组已经从理论和实验上提出或采用多种方法，在太赫兹波产生、调控、检测相关功能器件的研制中取得了很好的成果，下面分别进行介绍。

2.1 基于石墨烯的太赫兹源器件

太赫兹科学的迅速发展，离不开不同种类太赫兹源的研制，如量子级联激光器(QCL)、共振遂穿二极管(RTD)、基于肖特基二极管的倍频混频技术等。然而，QCL 无法进行室温操作，RTD 因材料和加工工艺受限于最大发射频率(>1 THz)和功率(超过 μ W)的提升，固态电子学的倍频混频技术存在器件结构复杂、不易小型化的问题等。石墨烯独特的无间隙能带结构与相对高能量的光学声子间强相互作用，使得实现带间粒子数反转并通过光泵浦获得太赫兹波增益成为可能^[47]，如图 3(a)所示。随后，该研究组实验上采用激光泵浦激发单层石墨烯/SiO₂/Si 样片与 0.12 mm 厚 CdTe(100)晶片的层叠结构实现了太赫兹的脉冲发射，同时也可作为太赫兹探测器使用^[48-51]，如图 3(b)所示。对于光泵浦石墨烯产生太赫兹辐射，因其光子能量很高，在 eV 量级，会加热载流子进而提高抽运阈值，阻碍粒子数反转^[52]。因此，为降低抽运光子能量，有研究组考虑采用电子注入方式激发石墨烯来提高太赫兹辐射增益^[51]。通过采用 p-i-n 结结构，将泵浦能量降到 meV 量级^[13,51,53]，如图 4 所示。此外，为了提高太赫兹波增益，进一步引入了垂直腔体或波导腔体的器件结构设计^[54-55]。

另一种通过光泵浦石墨烯产生太赫兹波的方法是将带间受激辐射与石墨烯等离子体效应进行耦合，增强等离子体振荡^[40]，如图 5 所示。这种现象类似于化合物半导体激光器中的光子增益过程，不同之处在于，由于等

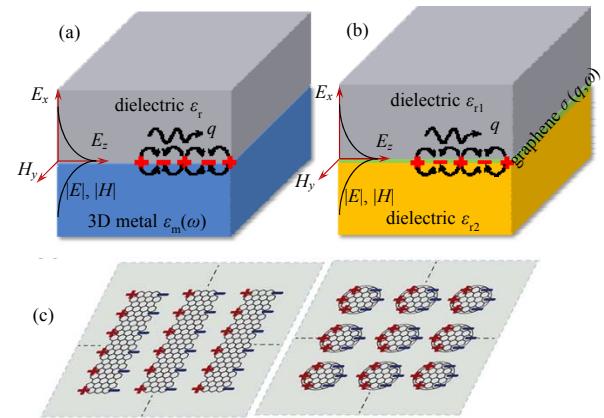


Fig.2 (a) Illustration of a TM Surface Plasmon Polariton (SPP) at a metal-dielectric interface; (b) Illustration of a TM plasmon mode in 2D graphene^[19]; (c) Illustration of graphene ribbon and disk subwavelength plasmonic structures highlighting charge distribution at the plasmon resonance frequencies^[25]

图 2 (a) 金属-介质界面 TM 表面等离子体激化示意图；(b) 二维石墨烯中的 TM 等离子体模式^[19]；(c) 图形化(带状、盘状)石墨烯的亚波长等离子体激化结构示意图^[25]

即可以通过栅极电压来调控石墨烯的等离子体振荡频率

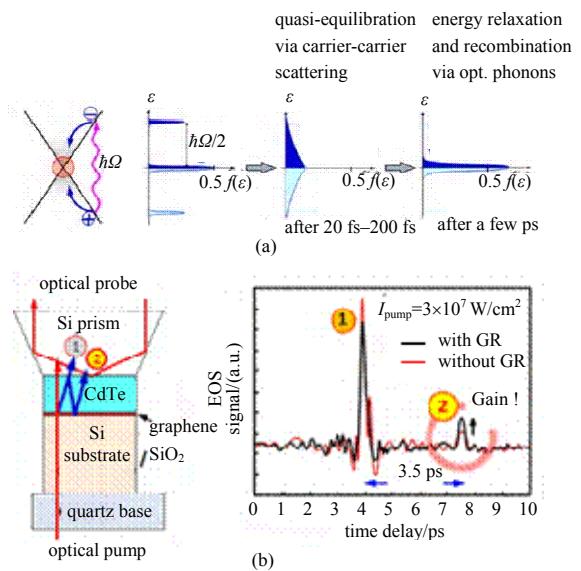


Fig.3 (a) Carrier relaxation and recombination dynamics in optically pumped graphene; (b) THz and optical probe geometry for observation of stimulated THz emission from optically pumped graphene^[51]

图 3 (a) 光泵浦石墨烯中载流子运动示意图；(b) 光泵浦激发石墨烯产生太赫兹脉冲发射的器件结构示意图^[51]

另一种通过光泵浦石墨烯产生太赫兹波的方法是将带间受激辐射与石墨烯等离子体效应进行耦合，增强等离子体振荡^[40]，如图 5 所示。这种现象类似于化合物半导体激光器中的光子增益过程，不同之处在于，由于等

离子体振荡小群速度和近石墨层中电磁场强限制，使其增益值非常大。增强的等离子振荡频率在 1 THz~10 THz 的范围，且其增益值的理论计算是化合物半导体的 10~100 倍，可用于制作 mW 级功率输出的小型太赫兹振荡器或放大器。但是，由于等离子体振荡会引起等离子模式的强相移，从而阻止太赫兹激光产生。因此，目前并没有用于太赫兹辐射的石墨烯等离子体振荡增强，或基于等离子体振荡产生太赫兹辐射的相关实验报道。于是，有研究小组理论上提出了一种引入纳米腔结构设计的方法来增强太赫兹辐射增益及强度^[56]，如图 6 所示。通过该结构对等离子体振荡模式进行强限制，结合其自身产生的强电磁发射，可以显著增强位于等离子振荡共振频率的太赫兹辐射，实现石墨烯等离子体太赫兹源的研制。

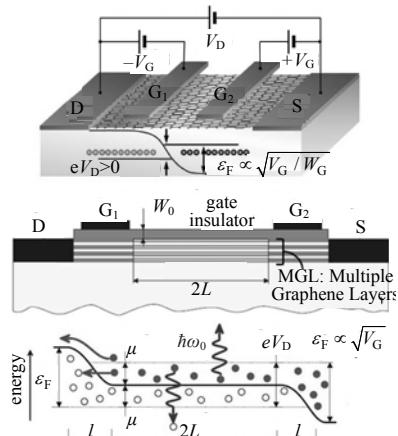


Fig.4 Illustration of a THz injection laser implemented in a dual-gate graphene-channel FET structure^[51]

图 4 基于双栅石墨烯沟道场效应晶体管的太赫兹激光器^[51]

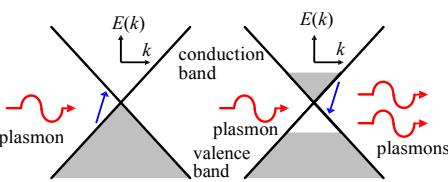


Fig.5 Energy bands of graphene showing stimulated absorption of plasmons (left); population inverted graphene bands showing stimulated emission of plasmons (right)^[40]

图 5 等离子体受激吸收的石墨烯能带示意图(左)；等离子体受激发射的石墨烯粒子数反转能带示意图(右)^[40]

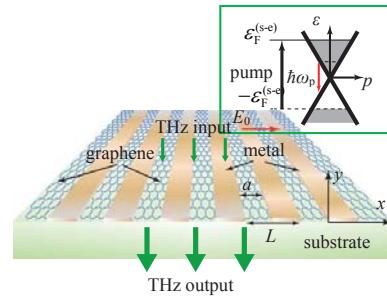


Fig.6 Illustration of graphene micro/nanocavities for terahertz radiation^[56]

图 6 引入纳米腔结构设计的石墨烯太赫兹源示意图^[56]

2.2 太赫兹调控器件

很多太赫兹应用系统的设计和研发，都需要实现太赫兹波的高速调制和切换，如短程链路的高吞吐量无线通信，成像系统中二维探测阵列的快速空间太赫兹调制等。目前，国内外的研究组采用不同的调控材料和电磁结构设计，如半导体^[57~59]、超材料结构^[60~62]、光子晶体^[63~64]、量子阱^[65]或它们的组合，通过光、电、磁、温、非线性等调控手段，实现了对太赫兹波振幅、相位、频率、损耗等特性进行调控的功能器件。但其性能受限于相应技术的固有缺点，使其调控性能只能在调制深度、插入损耗、宽带调控、器件结构设计复杂度、调控范围等方面进行折中优化，限制了它们在太赫兹光电领域中的广泛应用。因此，研究人员一直寻求实现综合性能优化的单独太赫兹调控器件。

石墨烯材料的特殊性为其在太赫兹调控领域的发展提供了可能。采用最简单的基于半导体异质结二维电子气的太赫兹调制器件结构，Sensale-Rodriguez 研究组最早提出用石墨烯代替金属栅极甚至是二维电子气半导体层来提高太赫兹调制性能^[28]，如图 7(a)所示。该结构一方面可以极大地减少金属栅极的信号损耗，另一方面因石墨烯电导率变化较大，可忽略原结构中半导体异质结二维电子气所致的电导率变化，理论预测其调制深度可由之前的几个百分点增加到 90%以上，且相应的损耗<5 dB，但实验测得的调制深度和插入损耗在 570 GHz 附近只有 15%±2% 和 5%，及 kHz 量级的调制速率^[29]，如图 7(b)所示。造成理论和实验如此大差距的原因主要是材料自身的品质及大面积石墨烯的使用。为了进一步提升调制性能，该研究小组提出了石墨烯层场增强的反射式电极结构设计，如图 7(c)所示，将调制深度提升到了 64%^[66]。该小组后续又开展了 4×4 太赫兹调制器阵列的成像应用研究^[67]。此外，电子科技大学的张怀武研究组，采用光控石墨烯/半导体硅复合结构(GOS)的方法，研制出了调制速率达到 1 MHz，调制深度 50%以上，工作频带覆盖 0.2 THz~2 THz 频段的全光学太赫兹调制器，并由此构建了 330 GHz 载波频率的太赫兹无线通信系统，实现了 1 Mbps 的通信速率^[68]。

以上的太赫兹调制主要基于石墨烯的带内跃迁，虽然理论和实验都获得了良好的调控性能，但随着入射太赫兹波频率的升高(>4 THz)，由于德鲁德散射，石墨烯的光电导率会急剧减低。因此，有研究组提出运用石墨烯的等离子体效应来扩展太赫兹调制的频率范围并提高调制性能^[41,69~70]。同时，引入超材料的被动式电极结构设计，可将电场强度有效地限制在一定的空间区域，虽然调制器会受限在一个相对窄的带宽，但可以提高调制深度和速率^[62,71~73]，如图 8 所示。最近，韩国科学技术院的 Lee 将石墨烯和超材料相结合，实现了电控太赫兹

开关，并应用到 THz-TDS 系统^[72,74]，如图 9 所示。在其等离子体共振频率附近，测得了 47% 和 32° 的调制振幅和相位，采用多层石墨烯结构后，实验数据达到了 58% 和 65°。这种基于石墨烯的电控开关在太赫兹系统中的集成应用，正是今后小型化、易集成的石墨烯太赫兹可控功能器件所期望的发展趋势。

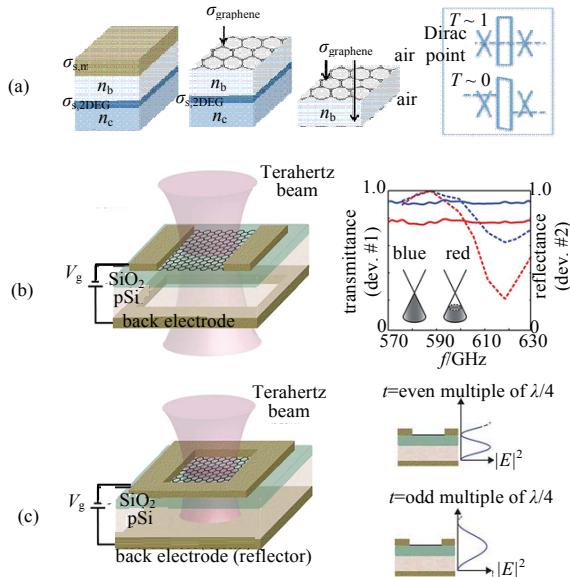


Fig.7 (a) Layer structures of traditional metal-gate/2DEG, graphene/2DEG and graphene/graphene THz modulator. Shown in the box are the schematic energy band diagrams of a graphene/insulator/graphene^[28]; illustrations of (b) a transmission-based THz beam modulator^[29] and (c) a reflectance-based THz beam modulator^[66]

图 7 (a) 传统金属栅/2DEG、石墨烯/2DEG 和石墨烯/石墨烯太赫兹调制器的层状结构及能带变化示意图^[28]；(b) 基于透射结构的石墨烯太赫兹调制器示意图^[29]；(c) 基于反射结构的石墨烯太赫兹调制器示意图^[66]

2.3 石墨烯用于太赫兹检测

太赫兹波能够穿透对红外和可见光不透明的介质材料，可以检测特定物质的光谱特性，在医学诊断、国土安全、过程控制等领域应用前景广阔。因此，室温高速太赫兹探测技术的突破，及最终实现高速多像素阵列集成，成为科研工作者对太赫兹探测未来发展的期望。目前，太赫兹检测器件的种类很多^[75]，主要有基于热传感元件、非线性电子元件(如肖特基二极管)、半导体晶体管(如高电子迁移率晶体管 HEMT、场效应晶体管 FET 等)^[76-77]以及新型纳米材料晶体管^[78]等的检测器件。基于热传感的太赫兹探测器存在着响应速率低，而非线性电子元件存在检测频率低等问题，因此，目前的研究多关注基于半导体晶体管的太赫兹检测器件。其获得快速太赫兹响应和探测率的关键，是高的载流子迁移率及良好的等离子体效应^[12]。

在室温下，石墨烯天然的二维电子气结构具有非常高的载流子迁移率，且高质量石墨烯对等离子体的传播衰减很弱，是用于太赫兹检测器件研制的理想材料。有研究组提出采用背栅式的双层石墨烯沟道进行太赫兹检测^[79]，如图 10(a)所示。在受到太赫兹波辐照时，产生的电子-空穴对会在石墨烯的双层带隙中迁移，进而引起源漏电流的改变。由于石墨烯高的带间吸收量子效率和光电增益，其室温响应率高于低温量子阱和量子点红外探测器。Ryzhii 研究组理论上提出一种基于多层石墨烯的 p-i-n 结太赫兹检测器件^[80]，如图 10(b)所示，同样是利用太赫兹波辐照产生电子、空穴的移动来感生光电流，通过光电流变化来对太赫兹波进行检测。

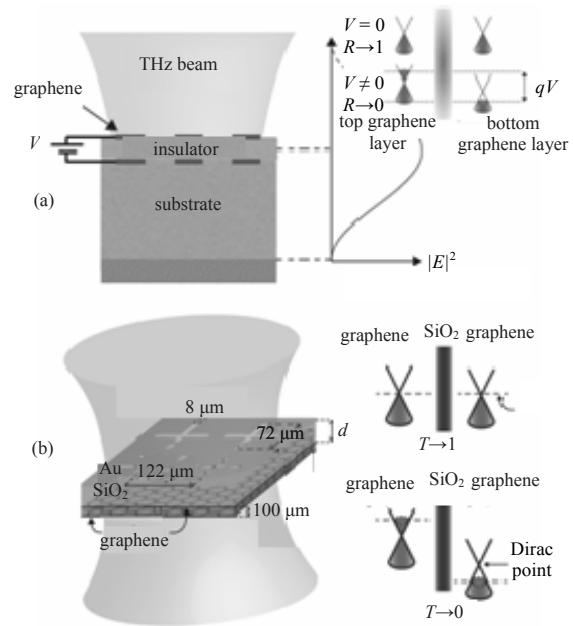


Fig.8 (a) Illustration of a THz modulator based on patterned graphene; (b) Illustration of an electrically tunable metamaterial-graphene based THz modulator^[25]

图 8 (a) 基于图形化石墨烯的太赫兹调制器示意图；(b) 电控超材料—石墨烯太赫兹调制器示意图^[25]

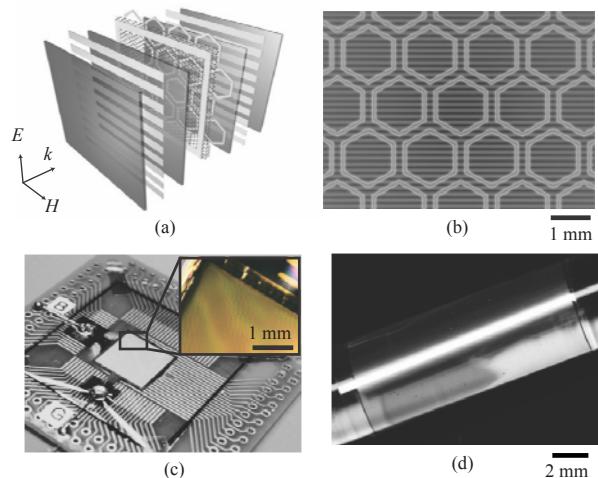


Fig.9 Illustration and device images of a gate-controlled THz switch based on active graphene metamaterials and its application in PCB for THz-TDS measurement^[72]

图 9 基于石墨烯-超材料的电控太赫兹开关及其在 THz-TDS 系统 PCB 中的应用^[72]

基于石墨烯的等离子体效应, Ryzhii 研究组理论上提出了双层石墨烯异质结构^[81], 每层石墨烯都有各自的电极结构, 并连接适当的天线, 如图 11 所示。通过入射太赫兹波共振激发的等离子体效应, 及石墨烯层间隧穿电流的非线性变化实现对太赫兹波的检测。最近, 有研究组提出将天线耦合到石墨烯的场效应晶体管中来提高检测灵敏度^[82-83], 如图 12(a)所示。其中, Vicarelli 小组实现了室温下对太赫兹连续波的检测, 并将其应用于大面积高速成像系统, 获得了 0.5 mm 的空间分辨率^[82](图 12(b)), 从而将基于石墨烯的太赫兹检测研究从之前的物理原型概念推向了实际应用, 为今后发展提供了研究思路。

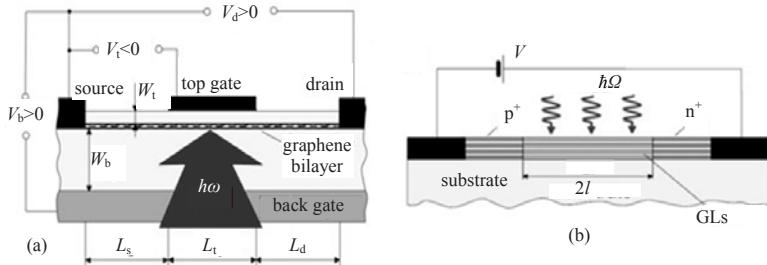


Fig.10 (a) Illustration of a graphene bilayer phototransistor with back gate structure^[79]; (b) Illustration of a terahertz photodetection using p-i-n multiple graphene layers structure^[80]

图 10 (a) 背栅式双层石墨烯太赫兹检测器示意图^[79]; (b) 基于多层石墨烯的太赫兹检测器示意图^[80]

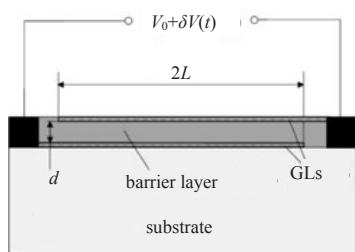


Fig.11 Schematic views of a THz detector based on a double-GL heterostructure^[81]

图 11 双栅石墨烯异质结构示意图^[81]

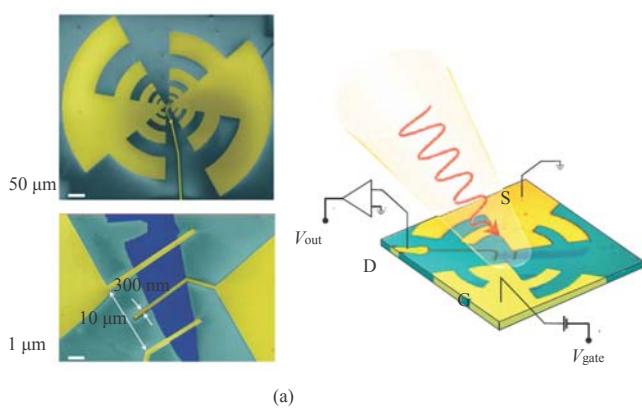


Fig.12 (a) Antenna-coupled GFET-terahertz detector; (b) Photograph of RT large-area fast THz imaging^[82]

3 结论

本文介绍了将石墨烯与太赫兹科学紧密联系在一起的光学性质, 主要是与其独特的单原子层二维蜂窝状晶格及圆锥型能带结构相关的带内跃迁和等离子体激发, 二者处于太赫兹频段。基于这些性质, 及石墨烯自身的高载流子迁移率、无间隙光谱、频率独立吸收、电可控等特点, 开发出了用于太赫兹波产生、调控、检测的不同种类光电功能器件。通过回顾近年来科研工作者在石墨烯太赫兹光电器件研究中取得的成就, 可以看到: 石墨烯已展现出了先进的太赫兹调控性能, 并从理论到实验都取得了一定的进展; 而石墨烯太赫兹源和检测器件的研制多处于理论阶段, 只在近一两年才有了少量的初步实验结果, 还有很大的研究潜力。值得注意的是, 大多数石墨烯光电功能器件的实验测试结果都劣于其理论预测, 一个重要的原因是相关实验报道中所用石墨烯, 其自身材料质量受限于当时的生长制备技术。随着目前石墨烯材料制备技术的不断进步, 已经可以获得大面积高质量的石墨烯材料, 为相应太赫兹光电功能器件由理论向实际的转化提供了硬件基础。总之, 基于石墨烯的太赫兹光电功能器件研制目前还处于初期阶段, 长远来看, 石墨烯太赫兹器件低损耗、小型化、易集成的特点, 使其极易与其他太赫兹组件进行集成以提升性能, 甚至实现单芯片太赫兹系统集成, 这都为未来太赫兹技术的发展提供了研究思路和方向。

参考文献:

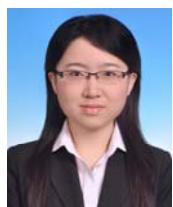
- [1] Mourou G, Stancampiano C V, Blumenthal D. Picosecond microwave pulse generation[J]. Appl. Phys. Lett., 1981, 38:470-472.
- [2] Auston D H, Cheung K P, Smith P R. Picosecond photo-conducting Hertzian dipoles[J]. Appl. Phys. Lett., 1984, 45:284-286.

- [3] HU B B,ZHANG X C,Auston D H,et al. Free-space radiation from electro-optic crystals[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990,56:506–508.
- [4] Brown E R,Smith F W,McIntosh K A. Coherent millimeterwave generation by heterodyne conversion in low-temperature-grown GaAs photoconductors[J]. *J. Appl. Phys.*, 1993,73:1480–1484.
- [5] Mittleman D. *Sensing With Terahertz Radiation*[M]. Berlin,Germany: Springer, 2002.
- [6] Fitch J M,Osiander R. Terahertz waves for communications and sensing[J]. *Johns Hopkins APL Tech. Dig.*, 2004,25(4):348–355.
- [7] Fitzgerald J,Wallace V P,Jimenez-Linan M,et al. Terahertz pulsed imaging of human breast tumor[J]. *Radiology*, 2006, 239:533–540.
- [8] Dobroiu A,Sasaki Y,Shibuya T,et al. THz-wave spectroscopy applied to the detection of illicit drugs in mail[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007,95(8):1566–1575.
- [9] CHAN W,Deibel J,Mittleman D. Imaging with terahertz radiation[J]. *Rep. Prog. Phys.*, 2007,70:1325–1379.
- [10] Lee Y. *Principles of Terahertz Science and Technology*[M]. Berlin,Germany:Springer, 2009.
- [11] O’Hara J F,Withayachumnankul W,Al-Naib I. A review on thin-film sensing with terahertz waves[J]. *J. Infrared Millimeter Terahertz Waves*, 2012,33(3):245–291.
- [12] Tredicucci A,Vitiello M S. Device concepts for graphene-based Terahertz photonics[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014,20(1):8500109
- [13] Ryzhii M,Ryzhii V. Injection and population inversion in electrically induced p-n junction in graphene with split gates[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2007,46:L151–L153.
- [14] Brey L,Fertig H A. Electronic states of graphene nanoribbons studied with the Dirac equation[J]. *Phys. Rev. B*, 2006, 73(23):235411.
- [15] Son Y W,Cohen M L,Louie S G. Energy gaps in graphene nanoribbons[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006,97(21):216803.
- [16] Dawlaty J. Measurement of the optical absorption spectra of epitaxial graphene from terahertz to visible[J]. *App. Phys. Lett.*, 2008,93:131905.
- [17] Falkovsky L A. Optical properties of graphene[J]. *J. Phys., Conf. Ser.*, 2008,129:012004.
- [18] Ando T,ZHENG Y,Suzuura H. Dynamical conductivity and zero-mode anomaly in honeycomb lattices[J]. *J. Phys. Soc. Jpn.*, 2002,71(5):1318–1324.
- [19] Low T,Avouris P. Graphene plasmonics for terahertz to mid-infrared application[J]. *ACS Nano*, 2014,8(2):1086–1101.
- [20] Nair R R,Blake P,Grigorenko A N,et al. Fine structure constant defines visual transparency of graphene[J]. *Science*, 2008, 320:1308.
- [21] SUN Z P,Hasan T,Torrisi F,et al. Graphene mode-locked ultrafast laser[J]. *ACS Nano*, 2010,4(2):803–810.
- [22] LIU M,YIN X,ZHANG X. Double-layer graphene optical modulator[J]. *Nano Lett.*, 2012,12(3):1482–1485.
- [23] Koester S J,LI M. High-speed waveguide-coupled graphene-on-graphene optical modulators[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 100:171107.
- [24] Ryzhii V,Otsuji T,Ryzhii M,et al. Effect of plasma resonances on dynamic characteristics of double graphene-layer optical modulator[J]. *J. Appl. Phys.*, 2012,112:104507.
- [25] Sensale-Rodriguez B,YAN R,LIU L,et al. Graphene for reconfigurable terahertz optoelectronics[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2013,101(7):1705–1716.
- [26] FANG T,Konar A,XING H,et al. Carrier statistics and quantum capacitance of graphene sheets and ribbons[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007,91(9):092109.
- [27] Falkovsky L A,Pershoguba S S. Optical far-infrared properties of a graphene monolayer and multilayer[J]. *Phys. Rev. B*, 2007,76:153410.
- [28] Sensale-Rodriguez B,FANG T,YAN R,et al. Unique prospects for graphene-based terahertz modulators[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011,99:113104.
- [29] Sensale-Rodriguez B,YAN R,Kelly M M,et al. Broadband graphene terahertz modulators enabled by intraband transitions[J]. *Nature Commun.*, 2012,3:780.
- [30] Horng J,Chen C-F,GENG B,et al. Drude conductivity of Dirac fermions in graphene[J]. *Phys. Rev. B*, 2011,83:165113.
- [31] Maeng I,Lim S C,Chae S J,et al. Gate-controlled nonlinear conductivity of Dirac fermion in graphene field-effect transistors measured by terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Nano Lett.*, 2012,12:551–555.
- [32] Jablan M,Buljan H,Soljaccie M. Plasmonics in graphene at infrared frequencies[J]. *Phys. Rev. B*, 2009,80:245435.
- [33] CHEN J,Badioli M,Alonso-González P,et al. Optical nano-imaging of gate-tunable graphene plasmons[J]. *Nature*, 2012, 487(7405):77–81.

- [34] Feia Z,Rodin A S,Andreeva G O,et al. Gate-tuning of graphene plasmons revealed by infrared nano-imaging[J]. *Nature*, 2012,487:72–85.
- [35] Vafek O. Thermo-plasma polariton within scaling theory of single-layer graphene[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006,97:266406.
- [36] Hwang H,Das Sarma S. Dielectric function, screening, and plasmons in 2D graphene[J]. *Phys. Rev. B*, 2007,75:205418-1.
- [37] Hwang H,Das Sarma S. Plasmon modes of spatially separated double layer graphene[J]. *Phys. Rev. B*, 2009,80:205405.
- [38] Ryzhii V. Terahertz plasma waves in gated graphene heterostructures[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2006,45:L923.
- [39] Ryzhii V,Satou A,Otsuji T. Plasma waves in two-dimensional electron-hole system in gated graphene heterostructures[J]. *J. Appl. Phys.*, 2007,101:024509.
- [40] Rana F. Graphene terahertz plasmon oscillators[J]. *IEEE Trans. on Nanotechnol.*, 2008,7(1):91–99.
- [41] JU L,GENG B,Horng J,et al. Graphene plasmonics for tunable terahertz metamaterials[J]. *Nature Nanotechnol*, 2011, 6:630–634.
- [42] Thongrattanasiri S,Koppens F H,Garcia de Abajo F J. Complete optical absorption in periodically patterned graphene[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2012,108:047401.
- [43] Allen S J,Stormer H L,Hwang J C M. Dimensional resonance of the two-dimensional electron gas in selectively doped GaAs/AlGaAs heterostructures[J]. *Phys. Rev. B*, 1983,28:4875–4877.
- [44] YAN H,LI X,Chandra B,et al. Tunable infrared plasmonic devices using graphene/insulator stacks[J]. *Nature Nanotechnol.*, 2012,7(5):330–334.
- [45] Shalaev V M. Electromagnetic properties of small-particle composites[J]. *Phys. Rep.*, 1996,272(2–3):61–137.
- [46] Genov D A,Sarychev A K,Shalaev V M,et al. Resonant field enhancement from metal nanoparticle arrays[J]. *Nano Lett.*, 2004,4:153–158.
- [47] Ryzhii V,Ryzhii M,Otsuji T. Negative dynamic conductivity of graphene with optical pumping[J]. *J. Appl. Phys.*, 2007,101:083114.
- [48] Karasawa H,Komori T,Watanabe T,et al. Observation of amplified stimulated terahertz emission from optically pumped heteroepitaxialgraphene-on-silicon materials[J]. *J. Infrared Millim. THz Waves*, 2011,32:655–665.
- [49] Boubanga-Tombet S,Chan S,Watanabe T,et al. Ultrafast carrier dynamics and terahertz emission in optically pumped graphene at room temperature[J]. *Phys. Rev. B*, 2012,85:035443–1–035443–6.
- [50] Otsuji T,Boubanga-Tombet S,Satou A,et al. Spectroscopic study on ultrafast carrier dynamics and terahertz amplified stimulated emission in optically pumped graphene[J]. *J. Infrared Milli. Terahertz Waves*, 2012,33:825–838.
- [51] Otsuji T,Watanabe T,Boubanga S A,et al. Emission and detection of terahertz radiation using two-dimensional electrons in III–V semiconductors and graphene[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2013,3(1):63–71.
- [52] Ryzhii V,Ryzhii M,Mitin V,et al. Effect of heating and cooling of photogenerated electron-hole plasma in optically pumped graphene on population inversion[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2011,50:094001–1–094001–9.
- [53] Ryzhii V,Ryzhii M,Mitin V,et al. Toward the creation of terahertz graphene injection laser[J]. *J. Appl. Phys.*, 2011,110: 094503–1–094503–9.
- [54] Dubinov A,Aleshkin V Y,Ryzhii M,et al. Terahertz laser with optically pumped graphene layers and Fabry–Perot resonator[J]. *Appl. Phys. Express*, 2009,2:092301–1–092301–3.
- [55] Ryzhii V,Dubinov A,Otsuji T,et al. Terahertz lasers based on optically pumped multiple graphene structures with slot-line and dielectric waveguides[J]. *J. Appl. Phys.*, 2010,107:054505–1–054505–5.
- [56] Popov V V,Polischuk O V,Davoyan A R,et al. Plasmonic terahertz lasing in an array of graphene nanocavities[J]. *Physical Review B*, 2012,86:195437.
- [57] Nozokido T,Minamide H,Mizuno K,et al. Generation of submillimeter wave short pulses and their measurements[J]. *Riken Review*, 1995,11:11–12.
- [58] Okada T,Tanaka K. Photo-designed terahertz devices[J]. *Scientific Reports*, 2011:1–5.
- [59] Busch S,Scherger B,Scheller M,et al. Optically controlled terahertz beam steering and imaging[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(8):1391–1393.
- [60] CHEN T, Padilla W J, Zide J M O,et al. Active terahertz metamaterial devices[J]. *Nature*, 2006,444(7119):597–600.
- [61] Paul O,Imhof C,Lngel B,et al. Polarization-independent active metamaterial for high-frequency terahertz modulation[J]. *Optics Express*, 2009,17(2):819–827.
- [62] Shrekenhamer D,Rout S,Strikwerda A C,et al. High speed terahertz modulation from metamaterials with embedded high electron mobility transistors[J]. *Optics Express*, 2011,19(10):9968–9975.

- [63] LI J S,HE J L,HONG Z. Terahertz wave switch based on silicon photonic crystals[J]. *Applied Optics*, 2007,46(22):5034–5037.
- [64] Joannopoulos J D,Johnson S G,Winn J N,et al. Photonic crystals:molding the flow of light[J]. Princeton University Press, 2011.
- [65] Libon H,Baumgartner S,Hempel M,et al. An optically controllable terahertz filter[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000,26(20):2821–2823.
- [66] Sensale-Rodriguez B,YAN R,Rafique S,et al. Extraordinary control of terahertz beam reflectance in graphene electro-absorption modulators[J]. *Nano Letters*, 2012,12(9):4518–4522.
- [67] Sensale-Rodriguez B,Rafique S,Yan R,et al. Terahertz imaging employing graphene modulator arrays[J]. *Opt. Exp.*, 2013, 21:2324–2330.
- [68] 刘海涛,文岐业,杨青慧,等. 石墨烯太赫兹调制器及 330 GHz 无线通信系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014, 12(4):481–486. (LIU Haitao,WEN Qiye,YANG Qinghui,et al. Graphene terahertz modulator and 330 GHz wireless communication system[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2014,12(4):481–486.)
- [69] Sensale-Rodriguez B,Yan R,ZHU M,et al. Efficient terahertz electro-absorption modulation employing graphene plasmonic structures[J]. *Applied Physics Letters*, 2012,101(26):261115.
- [70] Sensale-Rodriguez B. Graphene-insulator-graphene active plasmonic terahertz devices[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013,103(12): 123109.
- [71] YAN R,Sensale-Rodriguez B,LIU L,et al. A new class of electrically tunable metamaterial terahertz modulators[J]. *Optics Express*, 2012,20(27):28664–28671.
- [72] Lee S H,Choi M,Kim T T,et al. Switching terahertz waves with gate-controlled active graphene metamaterials[J]. *Nature Materials*, 2012,11(11):936–941.
- [73] CHEN H T,LU H,Azad A K,et al. Electronic control of extraordinary terahertz transmission through subwavelength metal hole arrays[J]. *Opt. Exp.*, 2008,16:7641–7648.
- [74] Lee S H,Choi J,Kim H D,et al. Ultrafast refractive index control of a terahertz graphene metamaterial[J]. *Scientific Reports*, 2013:1–6.
- [75] Sizov F,Rogalski A. THz detectors[J]. *Prog. Quantum Electron.*, 2010,34:278–347.
- [76] Knap W,Dyakonov M,Coquillat D,et al. Field effect transistors for terahertz detection: physics and first imaging applications[J]. *J. Infrared Millimeter Terahertz Waves*, 2009,30:1319–1337.
- [77] Oje fors E,Pfeiffer U R,Lisauskas A,et al. A 0.65 THz focal-plane array in a quarter-micron CMOS process technology[J]. *IEEE J. Solid-State Circuits*, 2009,44:1968–1976.
- [78] Vitiello S,Coquillat D,Viti L,et al. Room-temperature terahertz detectors based on semiconductor nanowire field-effect transistors[J]. *Nano Lett.*, 2012,12:96–101.
- [79] Ryzhii V,Ryzhii M. Graphene bilayer field-effect phototransistor for terahertz and infrared detection[J]. *Phys. Rev. B*, 2009,79:245311.
- [80] Ryzhii V,Ryzhii M,Mitin V,et al. Terahertz and infrared photodetection using p-i-n multiple-graphene-layer structures[J]. *J. Appl. Phys.*, 2010,107:054512.
- [81] Ryzhii V,Otsuji T,Ryzhii M,et al. Double graphene-layer plasma resonances terahertz detector[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2012,45:302001.
- [82] Vicarelli L,Vitiello M S,Coquillat D,et al. Graphene field effect transistors as room-temperature terahertz detectors[J]. *Nature Mat.*, 2012,11:865–871.
- [83] Mittendorff M,Winnerl S,Kamann J,et al. Ultrafast graphene-based broadband THz detector[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 103(2):021113.

作者简介:



苏 娟(1984–), 女, 内蒙古自治区鄂尔多斯市人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为新型太赫兹波调控原理和方法 .email: sjbounce@163.com.

成彬彬(1980–), 男, 湖北省随州市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为太赫兹雷达与成像技术.

邓贤进(1973–), 男, 四川省安岳县人, 博士, 研究员, 主要研究方向为电子学系统遥测、遥控, 毫米波固态功率合成、太赫兹通信技术、高速信号处理等.