



# 石墨烯材料在天线技术中的应用

柳絮, 孙霄, 李守豪, 杨飞要, 李科, 魏迪\*

北京石墨烯研究院, 北京 100095

\* 联系人, E-mail: diwei@hotmail.com

2020-04-30 收稿, 2020-06-16 修回, 2020-06-29 接受, 2020-07-10 网络版发表

北京市科学技术委员会项目(Z181100004818004, Z181100001018029, Z191100006119027)资助

**摘要** 电子信息产业是全球产业中重要的组成部分, 通讯产业是电子信息产业的基础, 而天线技术更是通讯产业的基础. 石墨烯被预言是下一代逻辑器件的主要材料, 同时由于其优异的透光性和柔韧性, 有望实现普通硅基材料所不能实现的透明、弯折功能, 从而成为智能可穿戴材料的重要组成部分. 为满足5G技术的超高频波段响应、不同地区手机电磁波谱吸收频段不同、物联网追踪以及透明防伪等技术需求, 本课题组成功制备出世界首款柔性透明石墨烯射频天线, 实现了柔性和透明的结合, 展现出优异的性能和稳定性. 利用石墨烯带隙可调特性和宽光谱吸收的特点, 实现不同频段电磁波谱吸收, 以满足天线对多频段的适用性. 通过改变石墨烯的层数、构型以及导电性实现天线多个频段的调节, 避免通过不同物理开关调控频段所造成的复杂性, 从而将不同天线整合在一个石墨烯天线系统内, 大大降低天线占用器件内部的体积并减少功耗. 同时, 本课题组开发了可打印石墨烯墨水, 设计并制备可调谐缝隙天线, 通过外加电压的方式, 可以达到带宽和谐振频率的调节. 本文基于本课题组的研究, 对石墨烯材料在柔性透明天线和可调谐天线领域的进展进行了总结.

**关键词** 高品质石墨烯薄膜, 可打印石墨烯墨水, 柔性透明射频天线, 5G, 可调谐天线

物联网(Internet of Things, IoT)是近年来发展最快的技术之一, 无线通信器件是IoT网络的重要组成部分, 天线作为通信系统收发信号的出入接口, 在保证通信质量方面扮演着极为重要的角色. 可穿戴天线和可调谐天线器件作为天线技术中的重点研究领域, 引起了广泛的关注. 器件透光度、柔性和性能是可穿戴天线的重要参数; 高性能可调谐天线的研制则是在频谱日益紧缺形势下的研究重点. 石墨烯因其独特的优异性能, 被预言是下一代逻辑器件的主要材料<sup>[1]</sup>, 逐渐在天线技术领域崭露头角<sup>[2]</sup>.

石墨烯拥有狄拉克锥电子结构、超高的载流子迁移率和室温量子霍尔效应等独特的性质<sup>[3-8]</sup>. 研究测得悬空石墨烯器件的载流子迁移率 $2 \times 10^5 \text{ cm}^2/(\text{V s})$ <sup>[9,10]</sup>, 远远优于其他传统半导体材料. 石墨烯单原子层的厚

度决定了其良好的透光度, 单层石墨烯对可见光的吸光度约为 2.3%, 而对于少层石墨烯, 吸光度与层数大致呈简单的线性关系<sup>[3]</sup>, 石墨烯的高透光度使其非常适用于透明导电材料领域. 除可见光外, 石墨烯对红外和中红外光也均有吸收, 石墨烯的宽光谱吸收特性使其在透明导电薄膜等领域具有很大的潜在应用价值. 此外, 石墨烯还具有优异的力学性能和热学性能. 采用纳米压痕法测得石墨烯杨氏模量为1 TPa, 弹性常数为 $1 \sim 5 \text{ N/m}$ <sup>[4]</sup>, 证明石墨烯具有极高的机械强度和优良的柔韧性. 较长的声子自由程使得石墨烯具有优异的热导率, 机械剥离石墨烯的热导率为 $3000 \text{ W/mK}$ <sup>[11]</sup>, 化学气相沉积法生长的石墨烯薄膜的热导率也高达 $2500 \text{ W/mK}$ <sup>[12]</sup>. 氧化石墨烯材料虽然降低了石墨烯片层的电导, 却赋予其更多性能. 例如, 能够均匀地分散在水等

引用格式: 柳絮, 孙霄, 李守豪, 等. 石墨烯材料在天线技术中的应用. 科学通报, 2020, 65: 4107-4122

Liu X, Sun X, Li S H, et al. Graphene-based materials for antenna applications (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 4107-4122, doi: 10.1360/TB-2020-0515

溶剂中,作为表面活性剂帮助石墨烯片层的分散以形成稳定的石墨烯墨水材料<sup>[13,14]</sup>;真空抽滤和蒸发干燥制得的氧化石墨烯薄膜,经高温还原后可以得到兼具柔性、优异的机械性能和高导电率的石墨烯薄膜<sup>[15,16]</sup>.石墨烯材料的制备方法多样,例如机械剥离法<sup>[5]</sup>、液相剥离法<sup>[17,18]</sup>、石墨烯氧化物还原法<sup>[19~21]</sup>、外延生长法<sup>[22,23]</sup>和化学气相沉积法<sup>[24~27]</sup>等,这些方法在材料性能和制备成本方面各有优劣,不同方法制备的石墨烯材料可以应对不同的应用场景.

目前,石墨烯材料在天线技术领域内突出性的应用主要集中在两个方向:透明柔性天线和可调谐天线.鉴于石墨烯高透光率、高载流子迁移率、高物理强度等独特的物理性能,本文将着重介绍应用石墨烯独特性能的柔性透明射频天线和可调谐天线两个主要方向.

## 1 柔性透明射频天线

随着可穿戴电子器件以及穿戴式智能终端的迅速发展和日益普及,具备智能、便携、穿戴舒适、美观等特点的电子产品受到广泛关注,同时人们对其性能指标和外观的需求也逐步提升.可穿戴设备可以实时监测人体生理参数和体征信号,与后台共享或者通过无线通信设备传输数据,在医疗看护、健康管理等方面有着广泛的应用前景;在军事方面,士兵通过携带、穿戴便携式无线通信设备,可以及时收集到战地状况、士兵体征信息和环境信息等,实时反馈并接受进一步指令,有效提高单兵作战能力.可穿戴智能设备的发展,依赖于柔性传感技术、柔性能源技术和可穿戴

天线技术的开发,作为柔性可穿戴产品数据传输的重要组成部分,柔性可穿戴天线是研究的重点.柔性可穿戴天线需要具备易穿戴、透明、可形变和易与人体共形的特点.目前柔性可穿戴天线的发展主要集中于两个方面,一方面是在柔性织物基体上编织或者印刷得到柔性可穿戴织物天线<sup>[28,29]</sup>;另一方面是在服装或者佩戴物体上设计天线<sup>[30]</sup>.然而,这两类天线虽然满足了柔性的需求,却忽略了透明这一重要特性,使得此类柔性天线的应用局限在衣物上,无法进一步向皮肤表面和透明物体表面等应用场景拓展.

柔性透明可穿戴天线需要同时满足柔性和透明的特性.以实时监测人体眼压和体液中葡萄糖浓度的角膜接触镜<sup>[31,32]</sup>为例,使用透明天线用于传输传感器收集到的大量数据,可以确保角膜接触镜不会妨碍使用者的正常活动.此外,天线应具有一定的柔性和可形变的特性,才能较好地贴合眼球的弧度和配合眼部运动,从而减小佩戴此类设备眼睛产生的异物感,提升患者的佩戴舒适度.透明可穿戴天线也可加载于眼镜片的边缘<sup>[33]</sup>,其柔性使天线完美的贴合眼镜片的曲面,既保证在复杂表面上天线的正常使用,又不影响眼镜片透光性,两者共同满足的条件下,使柔性透明天线可以有效地集成于眼镜这种常用的物体上.

在不久的未来,柔性透明天线技术将更多地进入日常生活中,通过智能家居(建筑)、智能车窗等,为日常生活提供更多便利.如图1所示,将透明天线集成于眼镜片表面,既不影响视物,同时可将眼镜作为传感设备,用于监测环境温湿度、紫外线指数、空气质量等

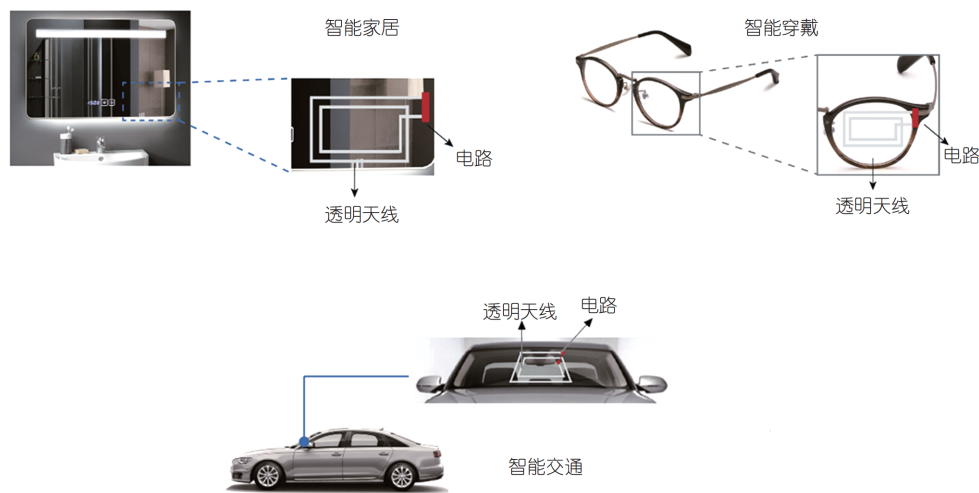


图1 (网络版彩色)柔性透明天线将大大拓宽射频技术的应用范围<sup>[2]</sup>  
Figure 1 (Color online) The applications of flexible and transparent antennas<sup>[2]</sup>

信号, 实时反馈至智能终端; 用户可通过远程发送指令到负载有柔性透明天线的智能镜子(玻璃)上, 在实现镜子本身的用途基础上, 实现除雾、播放音乐、显示室内温度等功能; 透明柔性天线可用于智能交通领域, 将其用于汽车玻璃, 既不影响驾驶员的视线, 还能实现当车辆行经高速公路收费站时不停车缴费, 可以被装有射频识别(radio frequency identification, RFID)读取装置的路灯等设备识别, 以实现实时定位的功能. 实时、非侵入、透明并且兼具柔性的无线通信天线在未来具有非常广阔的应用前景.

用于无线电子设备的柔性透明天线的研发仍是一个亟待解决的课题. 目前市面上的传统天线主要由普通金属、合金或纳米颗粒(如银、铜或铝)制成<sup>[34,35]</sup>. 这类金属天线有很多局限性, 如透明度低、易被腐蚀或氧化等. 此外, 就可穿戴柔性电子产品而言, 天线对形状变化的容忍度是至关重要的, 因为身体的运动和衣服的褶皱很容易导致天线发生形变<sup>[16,36]</sup>, 金属天线弯曲或折叠时, 其阻抗会发生剧烈的变化, 进而导致天线性能的减弱或丧失. 在思考如何实现柔性和透明性的同时, 还必须兼顾天线材料的高导电性和稳定性. 因此, 制作高性能的柔性透明天线是极具有难度的, 这也是导致该领域发展缓慢的主要原因之一. 导电聚合物<sup>[37]</sup>、碳纳米管<sup>[38-40]</sup>、石墨烯纸/墨水<sup>[41-44]</sup>、MoS<sub>2</sub><sup>[45]</sup>和2D MXene<sup>[46]</sup>等新型材料已经率先尝试应用于柔性透明天线的研制, 相应的性能参数列举在表1中. 然而, 它们的低导电性和低透明度仍然影响着天线的性能及其潜在的应用.

石墨烯是单原子层二维材料, 其独特的物理特性和各方面优异性能, 赋予石墨烯天线特有的优势, 体现在体积小、质量轻、易于共形和分子层面多频化控制等方面, 因此得到了广泛关注. 其相关中间产品市场预计达到530亿美元, 可以广泛应用于电子材料、透明导电薄膜、高效光电转换及能源存储器件等. 采用石墨烯作为天线的导电材料, 不仅透光性好、柔韧性好、与基材附着力强, 并且可以设计成不同使用频段的射频器件, 包括低频(low frequency, LF)、高频(high frequency, HF)、超高频(ultra high frequency, UHF)以及微波(microwave)器件, 大大拓宽了射频技术的应用范围. 石墨烯是零带隙材料, 通过调节石墨烯层数或者通过电流调节石墨烯下方铁磁体材料可以改变石墨烯天线的频率, 这为分子尺度层面设计多频段天线提供了可能. 单层石墨烯薄膜可以弯曲甚至折叠<sup>[52]</sup>进而实现石墨烯基天线的柔性. 致密的电子云使无缺陷的石墨烯薄膜在日常条件下可以不渗透任何原子和分子, 甚至是氢, 因此石墨烯薄膜可以作为一种非常有效的防腐涂层<sup>[53,54]</sup>, 可以极大地提高石墨烯基天线的稳定性, 延长其使用寿命. 石墨烯优异的性能为其在透明柔性射频天线方面的应用带来了无尽的可能. 此外, 制造石墨烯天线的工艺包括印刷、蚀刻和激光切割等, 不同的工艺有各自的优缺点, 适用于不同的基材和应用场景. 因此, 石墨烯射频天线不仅具有非常大的新颖性和创造性, 而且具有非常广阔的市场前景以及产业竞争力.

2015年, 英国曼彻斯特大学Hu研究组与诺奖获得者Novoselov<sup>[41]</sup>合作, 利用丝网印刷的方式将石墨烯墨

表1 当前用于无线传输的柔性透明射频天线对比<sup>[47]a)</sup>

Table 1 Comparison of the current flexible and transparent antennas for wireless communication<sup>[47]</sup>

| 材料                       | 透光率                       | 柔性 | 面电阻<br>( $\Omega/\text{sq}$ )@厚度 | 带宽<br>( $ S_{11}  > 10 \text{ dB}$ ) | 文献   |
|--------------------------|---------------------------|----|----------------------------------|--------------------------------------|------|
| 二维过渡金属碳氮化物               | ~49%@62 nm<br>~26%@114 nm | 是  | ~47@62 nm<br>~20@114 nm          | $f_0$ ~2.4 GHz                       | [46] |
| 石墨烯墨水                    | -                         | 是  | -                                | 3.8~15.5 GHz                         | [43] |
| 石墨烯纳米片                   | -                         | 是  | 0.19@62000 nm                    | ~MHz                                 | [44] |
| 石墨烯墨水                    | -                         | 是  | -                                | 3.75~12.88 GHz                       | [48] |
| 单层石墨烯                    | 是                         | 否  | -                                | $f_0$ ~ 20.7 GHz                     | [49] |
| 银纳米粒子改性的苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物 | 52%                       | 是  | 19.5                             | $f_0$ ~ 2.2 GHz                      | [50] |
| 石墨片                      | -                         | -  | 65@500 nm                        | 0.46~0.52 GHz                        | [51] |
| 碳管                       | -                         | 否  | 10@350 nm                        | 1.5~2 GHz                            | [39] |

a)  $f_0$ : 谐振频率; “-”表示未注明

水打印在纸质基底上制作出石墨烯射频天线(图2)。所用石墨烯墨水中不含常用的不导电黏结剂,因此不会对石墨烯材料的导电性能产生影响,其电导可达 $4.3 \times 10^4$  S/m,面电阻低至 $3.8 \Omega/\text{sq}$ 。石墨烯天线的测试结果显示,在960 MHz时反射系数 $S_{11}$ 最低可达 $-11.6$  dB,0.89~1.02 GHz频段区间内反射系数均 $< -10$  dB。天线的增益测试显示,962 MHz对应的实际增益是 $-0.6$  dBi,并且在930~990 MHz频段区间内实际增益仍 $> -1$  dBi。当实际增益 $= -1$  dBi时,该天线可读的距离可达10 m。

随后, Hu研究组<sup>[42]</sup>改进了石墨烯天线的形状,并在不同弯曲情况下测试了天线的性能。打印石墨烯天线放置于不同曲率半径的圆柱体上测试其在不同弯曲程度下的反射系数和增益(图3(a)~(d)),天线的反射系数在不同弯曲程度下的变化不大,而天线增益虽然在高频段变化较大,但在1.9~2.2 GHz间的变化仍维持在一个相对可以接受的范围内。将两个完全一样的石墨烯天线弯曲后紧密贴附在模特的左右手腕内侧(图3(e)),实验证明这两个天线均可成功地传输信号并接受对方发射来的信号。如图3(f)所示,传输系数测试结果显示,两个天线距离0.5 m时,1.67~2.87 GHz的波段内的传输系数大于 $> -32$  dB,证实了石墨烯是一种非常适用于柔性射频天线的材料。

2018年,意大利国家研究院有机合成与光反应研究中心Palermo课题组<sup>[55]</sup>以石墨烯纸为原料在柔性基底上制作射频天线,并成功应用于门禁管理、智能标签等领域。该石墨烯纸由石墨烯纳米片压制而成,其电导约为 $4.2 \times 10^5$  S/m,具有非常好的柔性。该课题组设计了一种螺旋环绕的天线结构,借助激光切割或者机械切割的方式制得柔性石墨烯天线图案。对该天线进行

相应的柔性测试分别以45和90 mm的曲率半径对其进行连续上万次的弯曲,弯曲前后的性能对比结果表明,天线的谐振峰位置基本无变化。为了进一步检测该石墨烯天线的稳定性,相关研究人员将其嵌入纺织物内用于实验室门禁,试验时长超过1年,在此期间,该天线从未失效。该工作不仅测试了曲率半径的不同对天线性能的影响,同时提供了一种可行的应用场景,进一步肯定了石墨烯在柔性可穿戴射频器件应用中的适用性和稳定性。

石墨烯墨水和石墨烯纸虽然有良好的导电性,但其透明度低,不符合透明天线的使用需求。单层石墨烯薄膜在透明度方面显示出独特的优势。Koh研究组<sup>[49]</sup>将化学气相沉积法生长的单层石墨烯置于石英基底上,整合出石墨烯透明偶极子天线(图4)。他们首先将单层石墨烯转移至石英基底,然后再在石墨烯表面电子束蒸镀一层Au,接下来先后刻蚀掉多余的Au和石墨烯,最终得到石墨烯透明天线。制得的天线在20.7 GHz附近的反射系数 $S_{11}$ 约 $-10$  dB,该研究也证实了单层石墨烯有可能在透明射频器件上大放异彩。

石墨烯材料在射频领域的相关进展虽令人振奋,但目前石墨烯天线大多使用石墨烯纳米片作为原材料,高品质石墨烯薄膜优异的性质并未被充分利用。此外,目前对石墨烯透明天线的研究停留在其性能以及天线结构的层面,离真正走进人们的日常生活还有一段距离。

在众多透明材料中,银纳米线(silver nanowire, AgNW)、氧化铟锡(indium tin oxide, ITO)以及石墨烯薄膜吸引了广大研究者的关注。ITO是一种常见的透明导电材料,但其具有明显的脆性,弯曲时容易断裂,并

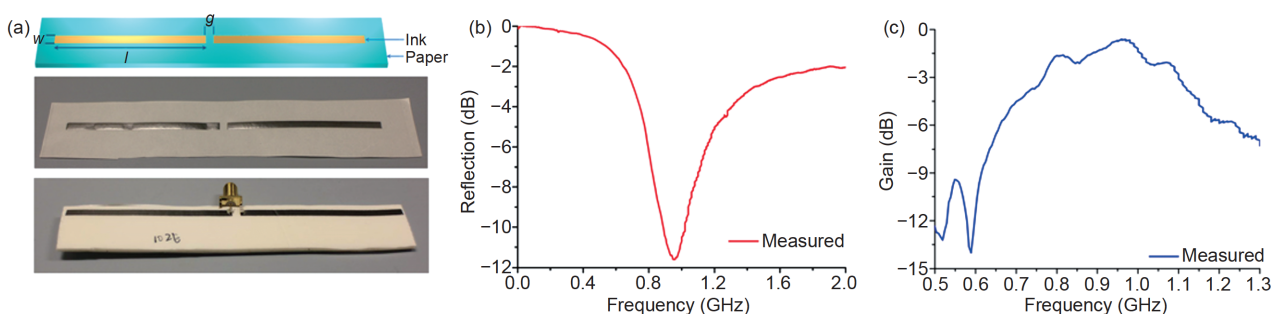


图2 (网络版彩色)石墨烯偶极子天线的实物图以及相应性能。(a) 偶极子天线的几何尺寸、实物图片以及与SMA的连接方式。(b) 石墨烯偶极子天线的反射系数测试。(c) 石墨烯偶极子天线的增益变化<sup>[41]</sup>

Figure 2 (Color online) The prototype and characterization of graphene laminate dipole antenna. (a) Geometric dimension of the dipole antenna. Photo of the printed graphene laminate dipole antenna, and the antenna connected with a SMA for measurement. (b) Measured reflection of graphene laminate dipole antenna. (c) Measured realized gain of graphene laminate dipole antenna<sup>[41]</sup>

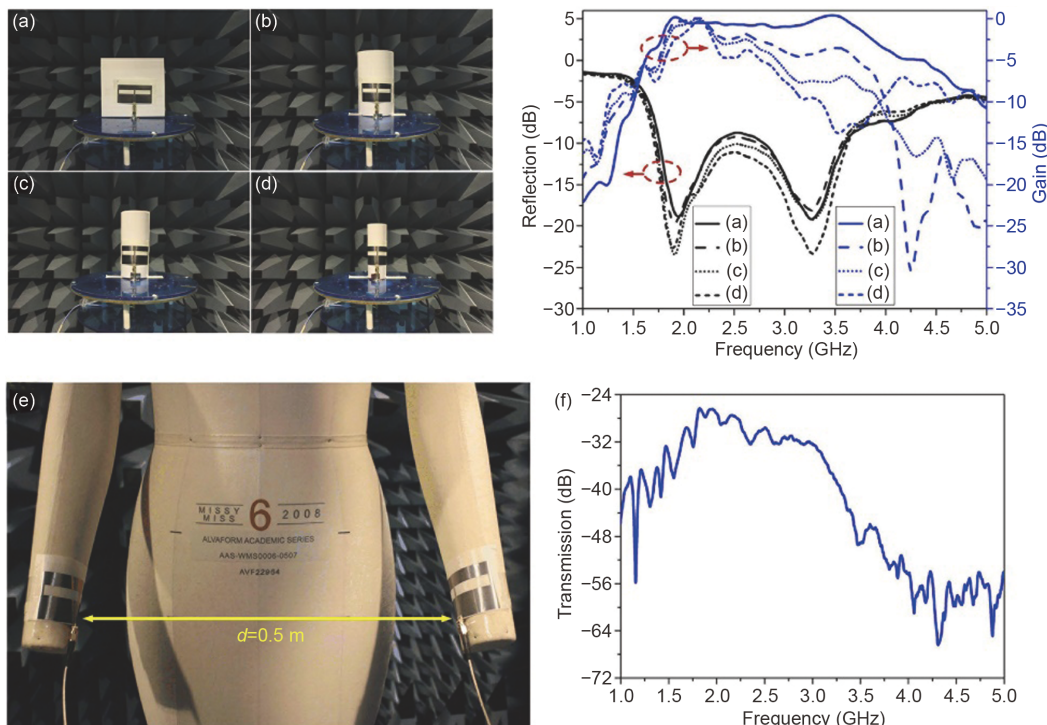


图3 (网络版彩色)打印石墨烯天线置于不同曲率半径的圆柱体上的性能测试(a~d), 以及可穿戴天线的性能测试(e, f). (a) 未弯曲; 曲率半径5.0 (b)、3.5 (c)和2.5 (d). 置于模特手腕处的柔性石墨烯天线照片(e), 以及对天线相互接收和发射情况的测试结果(f)<sup>[42]</sup>  
 Figure 3 (Color online) Measurement of the printed graphene enabled antenna bended on cylinders with different radii (a–d), and the transmission between two on-body printed graphene enabled wearable antennas (e, f). (a) Un-bended, bended with  $r = 5.0$  (b), 3.5 (c), and 2.5 cm (d). Measurement setting of the wearable antennas on mannequin (e) and transmission between two antennas attached on hands of mannequin with 0.5 m separation (f)<sup>[42]</sup>

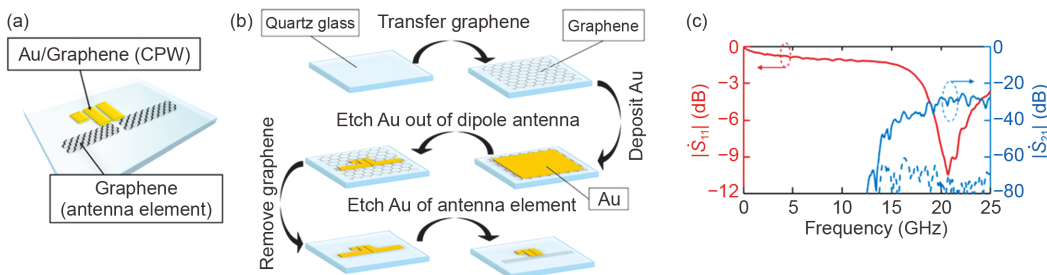


图4 (网络版彩色)石墨烯透明偶极子天线. (a) 示意图; (b) 制备流程示意图; (c) 散射参数测试<sup>[49]</sup>  
 Figure 4 (Color online) Graphene-based optically transparent dipole antennas. (a) Overview of the graphene dipole antenna. (b) Fabrication procedure of the graphene dipole antenna. (c) The reflection coefficient and transmission coefficient of the graphene dipole antenna<sup>[49]</sup>

且铜是一种非常稀少的元素<sup>[56,57]</sup>, 这些不足严重限制了ITO在柔性透明导电器件中的应用. AgNW旋涂于透明柔性基底上制得的AgNW膜, 其具有良好的导电性、柔性和透光度, 符合柔性透明天线材料的基础性能需求. 但是, AgNW膜在潮湿环境中易被腐蚀<sup>[58]</sup>, 电导率不能保持长期稳定, 导致基于AgNW膜的天线无法长期使用. 单层石墨烯薄膜具有非常好的柔韧性<sup>[59]</sup>和透光度<sup>[3]</sup>, 满足了天线对柔性和透明的要求. 然而,

单层石墨烯薄膜的电导较低, 无法满足对天线材料电导的需求. 单独使用AgNW或石墨烯都无法获得稳定的、高质量的柔性透明天线. 综合考虑以上因素, 本课题组<sup>[47]</sup>最终选择石墨烯/银纳米线/乙烯醋酸乙烯酯/聚对苯二甲酸乙二醇酯(graphene/AgNW/EVA/PET)复合材料用于透明柔性射频天线的研制, 构筑了一款基于graphene/AgNW的柔性透明天线(图5(a)). 该复合材料的导电层包含一层单层的高质量、大单晶石墨烯薄膜,

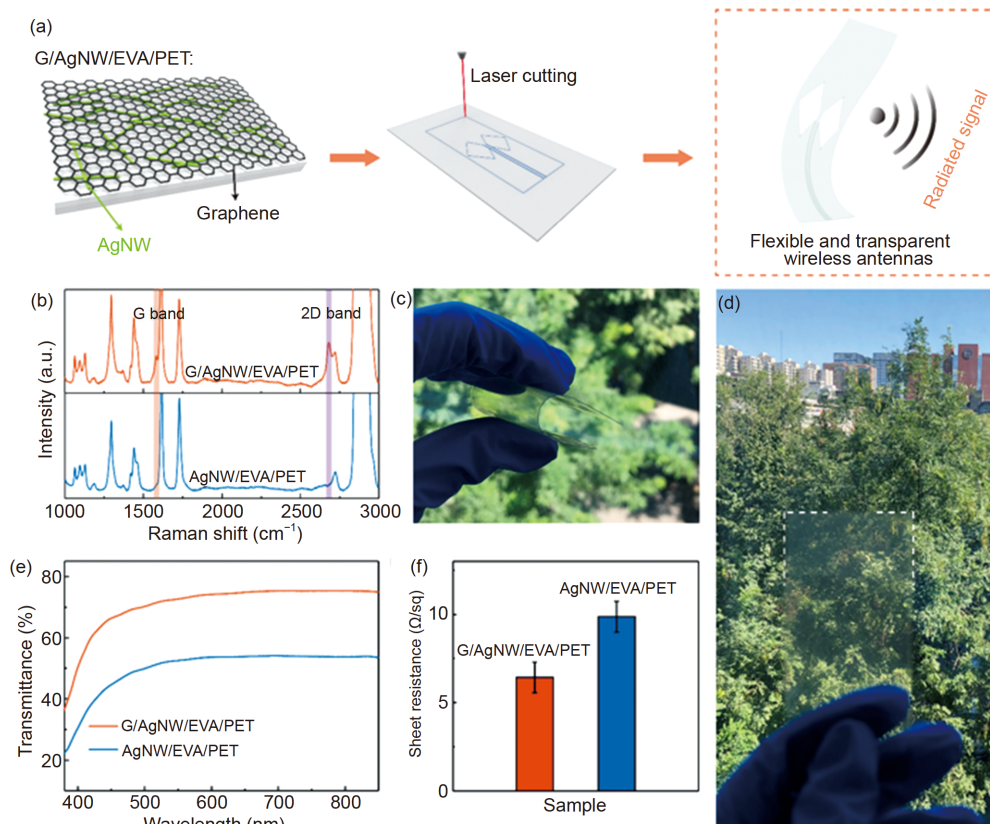


图5 (网络版彩色)Graphene/AgNW天线的制备以及复合材料的相关性能表征。(a) 激光切割制备天线的示意图。(b) Graphene/AgNW/EVA/PET与AgNW/EVA/PET的拉曼光谱。Graphene/AgNW/EVA/PET材料优异的柔性(c)和透光度展示(d)。Graphene/AgNW/EVA/PET与AgNW/EVA/PET的透光度(e)和面电阻对比(f)<sup>[47]</sup>

Figure 5 (Color online) Characterization of graphene and hybrid films for antennas. (a) Schematic of the fabrication process of graphene/AgNW-based flexible and transparent antennas. (b) Raman spectra of graphene/AgNW/EVA/PET film and AgNW/EVA/PET film. The graphene/AgNW/EVA/PET film is flexible (c) and highly transparent (d). The transparency (e) and sheet resistance (f) comparison of film graphene/AgNW/EVA/PET and AgNW/EVA/PET<sup>[47]</sup>

其下方是AgNW，基底材料为乙烯醋酸乙烯酯/聚对苯二甲酸乙二醇酯(EVA/PET)。我们采用乙烷作为碳源生长大单晶石墨烯薄膜，实现了毫米级尺寸、层数均匀且质量高石墨烯的快速制备，石墨烯单畴尺寸达2 mm。借助热压法和电化学鼓泡法，我们制备得到柔性透明导电复合材料graphene/AgNW/EVA/PET。该材料的拉曼光谱显示了石墨烯的特征峰(图5(b))，包括~1580 cm<sup>-1</sup>的G峰和~2700 cm<sup>-1</sup>的2D峰，而在~1350 cm<sup>-1</sup>未观察到明显的D峰，说明石墨烯薄膜被成功地转移到基底材料上。Graphene/AgNW/EVA/PET材料具有非常好的柔性，可以被轻松弯折(图5(c))，透光度高达75%(图5(d)，(e))，面电阻为6 Ω/sq(图5(f))；该材料在室温以及潮湿环境下都具有很好的抗腐蚀性能。

二维石墨烯薄膜与一维AgNW的协同作用解决了AgNW易被腐蚀以及单层石墨烯薄膜导电性不足的问题，因此，这种复合材料非常适合用于柔性透明天线。

这是因为：(1) 将石墨烯作为二维功能材料引入AgNW网络中，改变了复合材料的导电模式，从线基(一维)导电模式转变为平面基(二维)导电模式。没有石墨烯覆盖的AgNW/EVA/PET材料的面电阻约10 Ω/sq，而转移一层大单晶石墨烯薄膜后，graphene/AgNW/EVA/PET材料的面电阻降低至6 Ω/sq，材料的整体电导率进一步提高，热能耗散减少，这对天线与集成芯片之间阻抗匹配程度的进一步提升非常重要。(2) 石墨烯薄膜保护AgNW不受腐蚀。热压法的使用将复合材料中的AgNW埋藏在EVA衬底中，并与表面的石墨烯薄膜紧密贴合。与传统的防腐蚀保护(如在一维纳米线表面包覆一层其他材料)相比，在不牺牲天线各部件性能的前提下，该方法提高了天线各部分间的集成度。(3) 热压技术的使用还进一步提高了材料整体的透明度，graphene/AgNW天

线的透光率达到75%以上. 石墨烯层与AgNW之间的协同作用使得复合材料实现了更好的导电性、更强的稳定性和更高的透光度, 对于高性能、耐腐蚀、长寿命、全透明且柔性的无线通信天线至关重要.

在综合考虑共平面波导的要求后, 基于graphene/AgNW/EVA/PET复合材料, 本课题组<sup>[60,61]</sup>最终选择的是一种蝶形缝隙的天线结构(图6(a)). 激光切割graphene/AgNW/EVA/PET复合薄膜可以得到理想的天线结构. 仿真分析和实际测试结果表明, graphene/AgNW柔性透明天线属于超宽带天线, 可以在较大的波段范围内工作. 天线的谐振频率出现在8.293 GHz, 此时对应的 $S_{11}$ 反射系数为 $^{TM}19$  dB,  $|S_{11}| > 10$  dB的频率范围为5.6~12.8 GHz, 相对带宽为86.8%(图6(b)). 基于天线的等效电路图, 天线的反射系数模拟数据与实测数据相当一致. 在谐振频率8.293 GHz处, 天线的阻抗为 $43.133 + 6.295j$ , graphene/AgNW透明柔性射频频天线仅有1.2%的输入功率被反射. 归一化的三维辐射方向图(图6(d), (e))显示, 6.0 GHz时, H面呈现一种近似全向的辐射模式, E

面呈现一种近似偶极的辐射模式, 非常适用于智能家居等应用场景. 我们还测试了graphene/AgNW天线的稳定性, 连续20 d的测试结果表明, 天线的 $S_{11}$ 反射系数的变化几乎可以忽略不计, 证明该天线具有良好的稳定性.

天线的柔性同样是大家非常关注的问题. 本课题组<sup>[47]</sup>利用泡沫模具将天线弯曲成不同的弧度(弯曲测试示意图如图7(a)所示, 实物照片如图7(b)所示), 测试在特定弯曲状态下天线的反射系数和方向图(图7(c), (d)). 结果显示, 无论处于 $0^\circ$ 的非弯曲状态, 还是其他弯曲角度, 甚至 $90^\circ$ , 天线反射系数的峰形和振幅都没有明显变化, 并且6.4 GHz下的方向图基本没有随天线弯曲弧度的变化而发生显著变化. 这表明该柔性透明天线在不同的弯曲状态下均能够正常工作, 不会因为形变而造成天线失效, 为之后在复杂物体表面的使用提供了基础. 利用 $90^\circ$ 的模具, 将天线由 $0^\circ$ 弯曲到 $90^\circ$ , 连续反复弯曲1000次, 疲劳测试结果显示天线的反射系数基本没有发生任何变化, 证明该天线在对抗物理形变方面具有很好的稳定性.

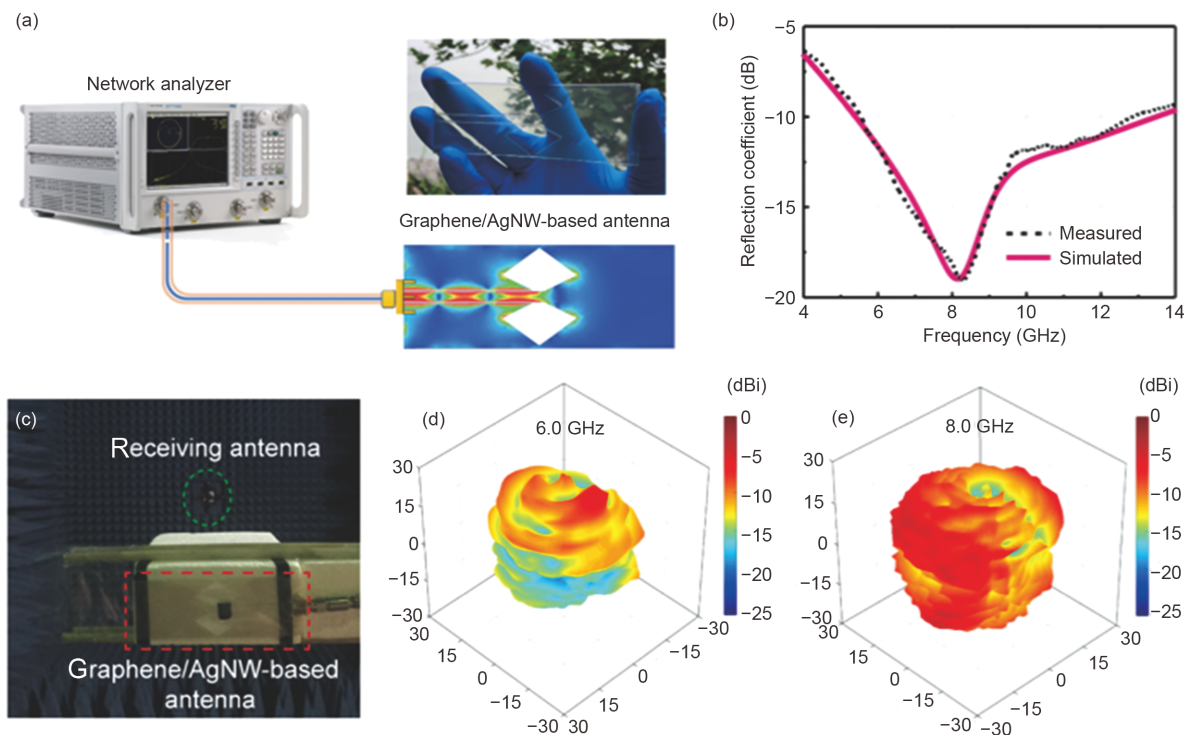


图6 (网络版彩色)Graphene/AgNW天线的性能测试. (a) 矢量网络分析仪测试示意图; (b) 实际测试(虚线)与仿真模拟(实线)的反射系数; (c) 方向图测试装置; 6.0(d)和8.0 GHz(e)下, 天线的归一化三维方向图, 两幅图的中心均对应 $-30$  dBi<sup>[47]</sup>

Figure 6 (Color online) Graphene/AgNW-based antenna and its fundamental wireless performance. (a) Schematic of the reflection coefficient measurement for the graphene/AgNW-based antenna. (b) Measured (dashed line) and simulated (solid line) reflection coefficients of the graphene/AgNW-based antenna. (c) Photograph of the radiation pattern measurement setup in an anechoic chamber. Experimental 3D normalized radiation patterns of the graphene/AgNW-based antenna at 6.0 (d) and 8.0 GHz (e). Each plot center corresponds to  $-30$  dBi<sup>[47]</sup>

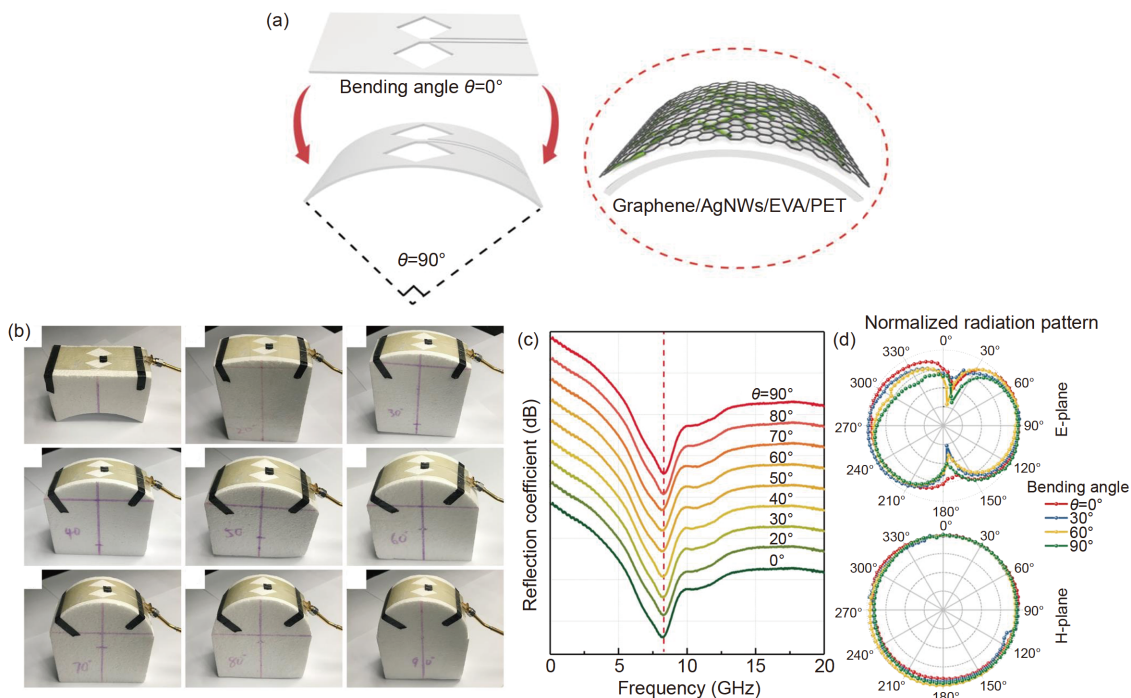


图7 (网络版彩色)Graphene/AgNW天线的弯曲性能测试。(a)天线的弯曲测试示意图;(b)天线处于不同弯曲状态的照片;(c)不同弯曲状态下,天线的反射系数变化。(d)6.4 GHz时,0°、30°、60°、90°时天线的归一化E面和H面方向图<sup>[47]</sup>

Figure 7 (Color online) Bending characteristics of the graphene/AgNW-based antenna. Schematic (a) and photographs (b) of the bending test experimental setup for the graphene/AgNW-based antenna. The antenna subjected to a series of bending angles. Reflection coefficients (c) and normalized E-plane and H-plane radiation patterns (d) at 6.4 GHz of the graphene/AgNW-based antenna subjected to a series of bending angles ranging from 0° to 90°<sup>[47]</sup>

为进一步测评graphene/AgNW天线的商用价值,我们将该天线与商用的集成电路芯片相连接,制备得到基于graphene/AgNW天线的RFID标签,然后利用读写器测试标签性能。射频识别读取系统包含1个收发器和1个转调器,即RFID读写器和标签。读写器发出的射频信号被RFID标签的天线捕捉,并转化为电势差;通过阻抗匹配模块,标签天线接收输入信号的一部分,并将包含芯片信息的信号反射回去。反射信号的振幅变化被称为调制散射,能够被读写器检测并接收,进而显示在屏幕上,完成RFID标签的读取(图8(a), (b))。作为RFID标签的重要参数,测试了其最大读取距离。在每个距离下对每种标签进行10次测试,并记录不同距离时天线的成功读取次数。测试结果表明,基于graphene/AgNW的RFID标签的最远读取距离高达130 cm,而基于纯AgNW的RFID标签读取距离仅有50 cm。因此,graphene/AgNW柔性透明天线与芯片的阻抗匹配性远远高于纯AgNW天线。

利用单层石墨烯薄膜与AgNW之间的协同效应进行透明柔性射频天线的制备不仅可以保证天线的透光

度和柔性,也大大提高了天线的整体性能,是一种非常有效的方式。该方法不仅为下一代无线电子通信设备的设计提供了一种崭新的思路,更为重要的是,二维石墨烯和一维AgNW材料的组合可以被借鉴和拓展,用于射频以外更广阔的应用场景。由于石墨烯独特的光学、电学以及力学性质,石墨烯天线在柔性和透光性等方面无疑具备独特的优势。然而,抛开材料特性,单就天线基本性能(如反射系数、增益、读取距离等)而言,石墨烯天线与技术成熟度更高的传统金属天线相比仍有很大差距。目前,石墨烯天线研究进展频现突破,但大多数器件或因增益较差,或因透明性等特性不突出,而不具有实操性,因此,石墨烯基柔性透明射频天线未来仍有很长的路要走。

## 2 基于石墨烯的可调谐天线

随着无线通信系统的快速发展,开发可移动化、高集成化、小型化和功能化的终端系统,已成为普遍关注的研究热点。天线作为通信系统中接收、发射信号的接口,是无线通信系统的关键部件,其性能、尺寸

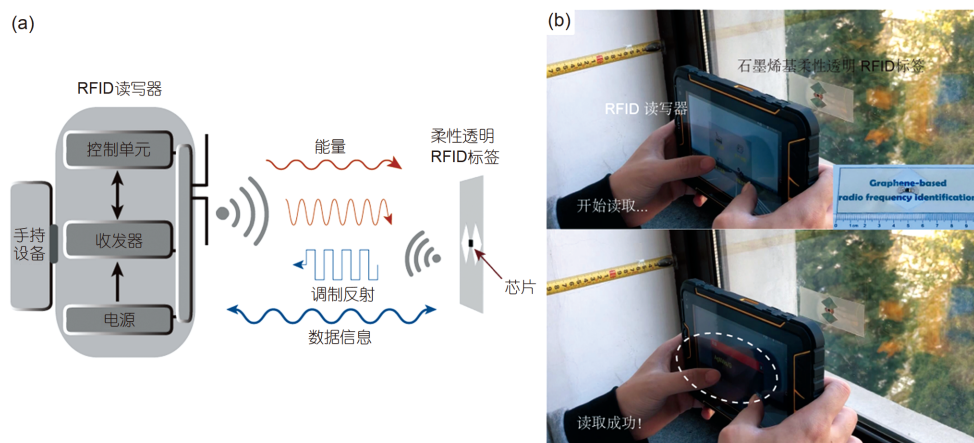


图 8 (网络版彩色)Graphene/AgNW柔性透明标签的读取原理示意图(a)和读取测试照片(b)<sup>[47]</sup>  
 Figure 8 (Color online) Working mechanism illustration and tests of flexible and transparent RFID tags. (a) Working principle of RFID. (b) The flexible and transparent graphene/AgNW-based RFID tag was tested with the RFID reader<sup>[47]</sup>

和频谱的利用率对无线通信系统的影响极为重要。无线通信系统必将朝着轻质化、小尺寸化、多频段化、多功能化的方向发展，系统的集成度越高、体积越小，留给天线的空间就更小，对其尺寸和性能的要求越高。由于受终端系统小尺寸的限制，若采用多个窄频谱的天线以达到来覆盖多个或较宽的工作频段，不仅不利于器件小型化，还会因天线密度的增加带来复杂的交叉耦合，造成严重的电磁干扰，影响通信质量。可调谐天线能够在不改变天线自身结构尺寸的前提下，获得不同谐振频率或者较宽可用频段的特性，既满足维持系统小型化和不同标准频段下的应用需求，提高频谱利用率，又能降低无线终端系统的研制复杂度，从而降低通信系统的整体成本，并减轻其重量。与3G和4G移动通信相比，5G移动通信使用更宽的带宽，所需频谱数量也远超之前几代移动通信之和。因此，5G移动通信更需要使用新的可调谐天线技术来满足其小型化、集成化和多频/宽频带特性的需求；使单一天线具有多个天线的阵列特性，设计可以涵盖多个工作频段范围并具有多用途的可调谐天线具有非常重要的意义<sup>[62-64]</sup>。

频率可调谐即在保持天线除频率之外的电磁性能参数基本不变的前提下，实现天线工作频率的切换或者改变。根据频率变化的方式，天线的频率可调谐可以分为频率离散可调谐和频率连续可调谐<sup>[65,66]</sup>。频率的离散可调谐是通过某种方式实现离散频点或频带间的可切换，而频率的连续可调谐是频点在频带间平滑过渡来进行连续变化，但天线的极化特性、辐射方向图等参数应保

持基本不变。实现天线可调谐的方式主要包括机械调谐、物理调谐、电调谐、光调谐以及材料调谐等方式<sup>[67-69]</sup>。机械调谐<sup>[70]</sup>是较为早期的天线调谐方法，其通过机械方式改变天线的物理尺寸从而实现调谐。该方法容易实现、成本低且设计简单，但是由于响应速度慢和器件尺寸大，在现阶段可调谐通信系统中已经很少使用。物理调谐指通过修改天线辐射部分的物理结构来实现天线的调谐<sup>[71-74]</sup>，例如可旋转、可移动的天线贴片和可拉伸柔性天线。电调谐通过加载射频微机电系统(radio frequency micro-electro-mechanical system, RF MEMS)<sup>[75-77]</sup>、PIN二极管<sup>[78-80]</sup>、场效应晶体管(field effect transistor, FET)<sup>[80,82]</sup>等电子开关元件，改变天线的辐射结构拓扑和谐振回路，进而调节天线的表面电流分布，实现天线工作频率的离散可调；或者加载可变电抗的元器件，例如变容二极管<sup>[83-85]</sup>，通过改变变容二极管加载的偏置电压，改变有效电长度，达到频率连续可调。电调谐方式中，电控元件会对可调谐天线的辐射性能产生极大影响，同时在器件设计过程中还需考虑偏置电路和能源供给部件的设置，因此电调谐方式虽然可以赋予天线可调谐的功能，却给天线设计增加了难度。光调谐技术采用激光照射或者用光纤引导激励的方式来控制天线结构的通与断，以实现天线的调谐<sup>[86-89]</sup>。光调谐方式无须另行添加偏置电路，从而消除了偏置电路对于天线辐射性能的影响；激光信号与微波信号之间不会产生相互干扰，具有良好的光电隔离特性，提高可调谐天线的稳定性；同时，光控开关的响应速度能够达到皮秒级别，相比于RF MEMS

(1~200  $\mu\text{s}$ )和PIN管(1~100 ns)的开关时间,光调谐速度远远超过电调谐方式<sup>[90]</sup>.材料调谐则是通过直接使用或添加相应的功能材料,例如铁氧体<sup>[91]</sup>、铁电体<sup>[92]</sup>、液晶材料<sup>[93,94]</sup>、液态金属<sup>[95]</sup>、石墨烯等离子体<sup>[96]</sup>等,改变天线整体的相对介电常数和相对磁导率等属性,实现天线的调谐特性.此外,近年来超材料在频率可调谐天线中的应用也有了相应研究<sup>[97]</sup>,主要有加载单负介质超材料结构单元的天线<sup>[98,99]</sup>、加载超表面的天线<sup>[100,101]</sup>和基于复合左右手的零阶谐振天线<sup>[102,103]</sup>.

作为新材料,石墨烯因其优异的性能受到广泛关注,有望成为无线通信系统中的重要材料和组成部分.相比于前面提到的材料,石墨烯材料的制备相对简单且容易控制其成分和形态.通过外加电场等手段,石墨烯材料的电性能发生变化,从而改变微波器件的整体电性能,因此,石墨烯材料可以用在多种多样的可重构和可调谐器件上.例如,基于少层石墨烯的可调谐移相器<sup>[104]</sup>,通过施加偏置电压改变石墨烯电阻.偏置电压增大,石墨烯电阻降低,在5 V偏置电压作用下,发生40°的最大相移.通过偏置电压调节石墨烯电阻,使其作为可变电阻调节微带衰减器的损耗<sup>[105]</sup>.基于石墨烯纳米片的接地共面波导衰减器<sup>[106]</sup>,加载0~6 V的偏置电压,调节石墨烯两端电阻由753降至92  $\Omega$ ,在3.5~38 GHz的工作频段内,其衰减变化范围为-2.5~14 dB.石墨烯材料在各式可调谐天线器件中也有着广泛的应用.在Si/SiO<sub>2</sub>晶片上转移化学气相沉积制备的单层石墨烯薄膜得到微波缝隙天线<sup>[107]</sup>,其工作频段为8~12 GHz,天线的反射系数波形随着加载的直流偏置电压发生整体的偏移.当偏置电压为50 V时,天线的面电阻降低,而当偏置电压反向加载达到200 V时,天线的面电阻升高,天线的反射系数发生的最大偏移量为24 MHz.同样,由化学气相沉积少层石墨烯薄膜制得的石墨烯贴片X波段缝隙天线<sup>[108]</sup>,在-20~0 V偏置电压作用下,谐振频率只发生7.5 MHz的偏移,但其反射系数在谐振频率处发生了20 dB的变化.包含双层掺杂石墨烯的GPS天线<sup>[109]</sup>,其谐振频率位于1.545 GHz左右,在门电压1~-1 V作用下,谐振频率从1.554降至1.551 GHz,只表现出3 MHz的偏移,在相应谐振频率处的反射系数分别为-32和-18 dB,与未加载电压时的-25 dB相比,反射系数发生明显变化.由少层石墨烯片层组成石墨烯贴片微带天线<sup>[110]</sup>.随着偏置电压的增大,石墨烯贴片的面电阻由初始的1500降至20  $\Omega/\text{sq}$ ,谐振频率从未加载偏置电压时的5.05 GHz变化至加载

5 V时的4.50 GHz,最大偏移达到550 MHz.使用刮涂工艺将含有石墨烯纳米片的高导电墨水反复多次涂覆于织物上,干燥后的面电阻可以减小至2.7  $\Omega/\text{sq}$ ,可作为微带天线的导电层<sup>[111]</sup>;通过天线结构设计,微带天线可以在2.9和6.0 GHz两个频段内工作并进行切换.毫米波可重构Vivaldi天线中<sup>[112]</sup>,石墨烯纳米片作为可调节电阻在0~4 V直流偏置电压作用下,电阻由200降至20  $\Omega$ ,从而改变天线的方向图和辐射效率.对于LTE和WiFi可重构天线<sup>[113]</sup>,石墨烯作为开关,使用直流偏压调节其导电性,为天线的带宽和增益增加了可调节性,同时也为器件的透明性和灵活性提供了解决方案.在太赫兹天线中调节石墨烯化学势,可以控制天线的主波束方向、共振频率、峰值增益和前后比等主要参数<sup>[114]</sup>.石墨烯贴片太赫兹等离子体天线利用外加电场动态调节石墨烯的电导,实现了共振频率在0.8~1.8 THz范围内的调节<sup>[115]</sup>.平面天线加入石墨烯作为开关,在外加直流偏置电压的作用下,其化学势随着电压的增加而增大,当电压高于40 V时天线中的石墨烯贴片的化学势约为0.8 eV,不同的化学势可以对应不同的状态,从而达到对天线进行开关控制.天线的谐振频率和回波损耗在不同的化学势下发生变化,尤其在2.5 GHz以下的低频段,频率偏移现象明显<sup>[116]</sup>.大多数石墨烯基可调谐天线仅仅是基于理论和仿真模型分析其性能,并未制得相应的天线实物加以测试验证,设计出的天线通常只表现出较小幅度的频率变化或者很窄的工作带宽.同时,频率调谐的方式多采用加载偏置电压,且加载电压值相对较高,不利于系统的集成化、小型化和低能耗.除了电压调节外,天线的变形和外界环境也可以对天线性能起到调谐作用.高温还原的多层石墨烯薄膜和纤维素纸构成的柔性天线可以承受弯曲变形,随着弯曲角度增大,谐振频率向低频偏移<sup>[116]</sup>.丝网印刷石墨烯纳米片墨水于纸基基质材料制成曲折线形式的偶极子天线,在不同弯曲半径下呈现不同的工作频段和性能<sup>[117]</sup>.利用还原氧化石墨烯和纳米银复合材料对氨气敏感的特性,将复合材料引入微带天线中,随着氨气含量增大,复合材料的电阻升高,天线谐振频率向高频偏移<sup>[118]</sup>.

近期,本课题组<sup>[119]</sup>成功研制了基于石墨烯墨水的带宽可调谐缝隙天线(图9),其工作频段处于5G频段,2.83~6 GHz.在整个工作带宽上,天线的增益整体高于-11 dBi,效率整体高于10%.石墨烯基可调谐天线的设计是在普通天线设计基础上改进其结构,在传统微

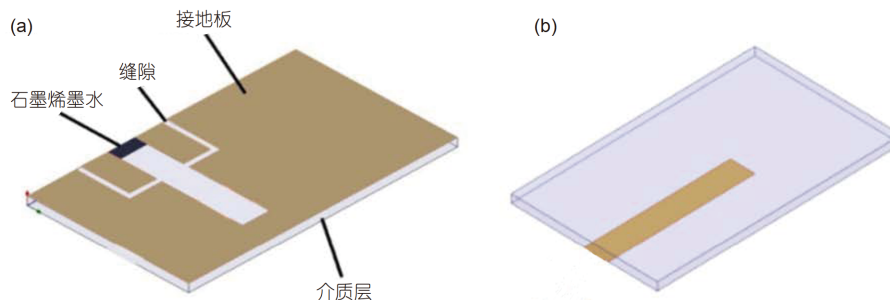


图9 (网络版彩色)微带缝隙天线结构示意图。(a)顶视图;(b)底视图<sup>[119]</sup>  
Figure 9 (Color online) Top view (a) and bottom view (b) of the slot antenna<sup>[119]</sup>

带天线中引入缝隙,并在缝隙处涂覆石墨烯墨水,静置后干燥的石墨烯墨水材料附着在介质基片与天线的交接处。

石墨烯墨水由石墨烯粉体和氧化石墨烯水分散液充分混合而成,在石墨烯墨水体系中,氧化石墨烯片层不仅充当良好的表面活性剂,帮助石墨烯粉体均匀地分散在去离子水中;而且调节氧化石墨烯和石墨烯粉体的比例也可以调节石墨烯墨水的初始电阻,进而更好地匹配天线的电阻需求,提高石墨烯墨水在天线器件上的适用性。通过外加直流电压,石墨烯墨水中的氧化石墨烯在电压作用下发生还原<sup>[120]</sup>。墨水的电阻随着电压的增加而减小,导致天线阻抗发生变化,进而改变天线整体电阻,从而使天线具备可调谐的能力,谐振带宽发生变化。带宽的可调谐使得一种天线可以完成多个天线的工作,大大提高了其空间利用率。这种直流电压加载的设计可以避免偏置电压发生装置的使用和偏置电路的引入,大大减少了系统的复杂度和使用成本,同时也避免了偏置电路和偏置电压的引入对天线电磁性能的影响。石墨烯墨水不仅方便涂覆,同时也适用于喷墨打印、丝网印刷等方式,可以更加精确地打印在基质材料上,提高石墨烯天线的可加工性,为后期天线的规模化生产和柔性打印天线的开发打下基础。

### 3 总结和展望

天线技术的发展是实现未来万物互联的必备条件,作为物联网非常核心的一部分,天线技术涉及人们生活的方方面面,极大地便利了人们的日常生活。但在柔性电子器件飞速发展以及万物超薄化、可视化的大发展潮流下,天线的不透明性且弯曲易失效的问题日益突出,并成为阻碍该领域进一步发展的一大难题。同时,发展多模式、多标准集成以及多功能一体化的终

端系统的需求变得越来越迫切。

利用高品质石墨烯薄膜和AgNW之间的协同作用,大单晶graphene/AgNW复合材料解决了透光度与导电性的问题。与此同时,石墨烯的保护作用使得天线具有优越的抗氧化、抗腐蚀性能,显著提高了天线的稳定性和寿命,以实现柔性透明天线的制备。高质量石墨烯薄膜作为一种新型材料在透明柔性器件的设计与制备方面具有非常大的应用价值。传统化学气相沉积工艺较难与目前既有的天线工艺进行有效且低成本结合,但石墨烯衍生材料(石墨烯墨水)结合打印电子技术可以迅速融入现有的制造工艺。基于石墨烯墨水的带宽可调谐缝隙天线在微带天线的设计中引入缝隙、并涂覆价廉易得的石墨烯墨水。石墨烯和氧化石墨烯按需求的质量比进行混合,可以得到初始电阻适应天线需求、可滴涂、且可打印的石墨烯墨水材料。其中,氧化石墨烯作为表面活性剂协助石墨烯粉末在水系溶剂中均匀分散,且两者比例可调,拓宽了石墨烯墨水的使用场合。在外加电场的作用下,石墨烯墨水的电阻发生变化,使得天线谐振点和带宽发生改变,起到调谐作用。石墨烯墨水中的氧化石墨烯不仅对外加电压敏感,同时对于环境湿度等条件都有灵敏的响应,为之后发展多种调谐方式提供了可能。

利用石墨烯以及石墨烯衍生材料的独特性能,能够发展出新型的射频天线或功能性增强天线,为天线的柔性透明和可调谐提供了新思路。然而,石墨烯在天线领域的应用仍然存在需要突破的问题,例如高品质石墨烯材料的制备与使用、相关物理性能的提高、石墨烯基天线的结构设计以及天线增益和效率的提高等,但我们对石墨烯新型材料在天线技术中的开发和应用充满期待。

## 参考文献

- 1 Novoselov K S, Fal'ko V I, Colombo L, et al. A roadmap for graphene. *Nature*, 2012, 490: 192–200
- 2 Sun X. High-quality graphene: Growth and its radio frequency applications (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: Peking University, 2019 [孙霄. 高品质石墨烯生长方法及其射频器件的应用探索. 博士学位论文. 北京: 北京大学, 2019]
- 3 Nair R R, Blake P, Grigorenko A N, et al. Fine structure constant defines visual transparency of graphene. *Science*, 2008, 320: 1308
- 4 Lee C, Wei X, Kysar J W, et al. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. *Science*, 2008, 321: 385–388
- 5 Novoselov K S. Graphene: Materials in the flatland. *Rev Mod Phys*, 2011, 83: 837–849
- 6 Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene. *Nature*, 2005, 438: 197–200
- 7 Akturk A, Goldsman N. Electron transport and full-band electron-phonon interactions in graphene. *J Appl Phys*, 2008, 103: 053702
- 8 Xu X, Pereira L F C, Wang Y, et al. Length-dependent thermal conductivity in suspended single-layer graphene. *Nat Commun*, 2014, 5: 3689
- 9 Bolotin K I, Sikes K J, Jiang Z, et al. Ultrahigh electron mobility in suspended graphene. *Solid State Commun*, 2008, 146: 351–355
- 10 Du X, Skachko I, Barker A, et al. Approaching ballistic transport in suspended graphene. *Nat Nanotechnol*, 2008, 3: 491–495
- 11 Balandin A A, Ghosh S, Bao W, et al. Superior thermal conductivity of single-layer graphene. *Nano Lett*, 2008, 8: 902–907
- 12 Cai W, Moore A L, Zhu Y, et al. Thermal transport in suspended and supported monolayer graphene grown by chemical vapor deposition. *Nano Lett*, 2010, 10: 1645–1651
- 13 Cote L J, Kim J, Tung V C, et al. Graphene oxide as surfactant sheets. *Pure Appl Chem*, 2010, 83: 95–110
- 14 Koltonow A R, Kim J, Cote L J, et al. Graphene oxide as a two-dimensional surfactant. *MRS Proc*, 2011, 1344: mrss11
- 15 Fan C, Wu B, Song R, et al. Electromagnetic shielding and multi-beam radiation with high conductivity multilayer graphene film. *Carbon*, 2019, 155: 506–513
- 16 Tang D, Wang Q, Wang Z, et al. Highly sensitive wearable sensor based on a flexible multi-layer graphene film antenna. *Sci Bull*, 2018, 63: 574–579
- 17 Li X, Zhang G, Bai X, et al. Highly conducting graphene sheets and Langmuir-Blodgett films. *Nat Nanotechnol*, 2008, 3: 538–542
- 18 Paton K R, Varrla E, Backes C, et al. Scalable production of large quantities of defect-free few-layer graphene by shear exfoliation in liquids. *Nat Mater*, 2014, 13: 624–630
- 19 Hummers Jr W S, Offeman R E. Preparation of graphitic oxide. *J Am Chem Soc*, 1958, 80: 1339
- 20 Voiry D, Yang J, Kupferberg J, et al. High-quality graphene via microwave reduction of solution-exfoliated graphene oxide. *Science*, 2016, 353: 1413–1416
- 21 Li D, Müller M B, Gilje S, et al. Processable aqueous dispersions of graphene nanosheets. *Nat Nanotechnol*, 2008, 3: 101–105
- 22 Berger C, Song Z, Li X, et al. Electronic confinement and coherence in patterned epitaxial graphene. *Science*, 2006, 312: 1191–1196
- 23 Sutter P W, Flege J I, Sutter E A. Epitaxial graphene on ruthenium. *Nat Mater*, 2008, 7: 406–411
- 24 Kim K S, Zhao Y, Jang H, et al. Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes. *Nature*, 2009, 457: 706–710
- 25 Li X, Cai W, An J, et al. Large-area synthesis of high-quality and uniform graphene films on copper foils. *Science*, 2009, 324: 1312–1314
- 26 Li X, Cai W, Colombo L, et al. Evolution of graphene growth on Ni and Cu by carbon isotope labeling. *Nano Lett*, 2009, 9: 4268–4272
- 27 Deng B, Pang Z, Chen S, et al. Wrinkle-free single-crystal graphene wafer grown on strain-engineered substrates. *ACS Nano*, 2017, 11: 12337–12345
- 28 Liu N. Study on wearable antennas and propagation for body-centric wireless communications (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012 [刘宁. 人体中心网络可穿戴天线及传播特性研究. 博士学位论文. 北京: 北京邮电大学, 2012]
- 29 Zeng W, Shu L, Li Q, et al. Fiber-based wearable electronics: A review of materials, fabrication, devices, and applications. *Adv Mater*, 2014, 26: 5310–5336
- 30 Wu Q. On the conformal microstrip arrays for body wearable applications (in Chinese). Master Dissertation. Xi'an: Xidian University, 2010 [吴强. 可穿戴微带共形天线阵的研究. 硕士学位论文. 西安: 西安电子科技大学, 2010]
- 31 Kim J, Kim M, Lee M S, et al. Wearable smart sensor systems integrated on soft contact lenses for wireless ocular diagnostics. *Nat Commun*, 2017, 8: 14997
- 32 Park J, Kim J, Kim S Y, et al. Soft, smart contact lenses with integrations of wireless circuits, glucose sensors, and displays. *Sci Adv*, 2018, 4: eaap9841
- 33 Hong S, Kang S H, Kim Y, et al. Transparent and flexible antenna for wearable glasses applications. In: Proceedings of the IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016. 2797–2804
- 34 Low Z N, Cheong J H, Law C L. Low-cost PCB antenna for UWB applications. *Antennas Wirel Propag Lett*, 2005, 4: 237–239

- 35 Lee H H, Chou K S, Huang K C. Inkjet printing of nanosized silver colloids. *Nanotechnology*, 2005, 16: 2436–2441
- 36 Su Y, Ping X, Yu K J, et al. In-plane deformation mechanics for highly stretchable electronics. *Adv Mater*, 2017, 29: 1604989
- 37 Kirsch N J, Vacirca N A, Plowman E E, et al. Optically transparent conductive polymer RFID meandering dipole antenna. In: Proceedings of the RFID, 2009 IEEE International Conference on RFID, 2009. 278–282
- 38 Vacirca N A, McDonough J K, Jost K, et al. Onion-like carbon and carbon nanotube film antennas. *Appl Phys Lett*, 2013, 103: 073301
- 39 Puchades I, Rossi J E, Cress C D, et al. Carbon nanotube thin-film antennas. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2016, 8: 20986–20992
- 40 Rutherglen C, Jain D, Burke P. Nanotube electronics for radiofrequency applications. *Nat Nanotechnol*, 2009, 4: 811–819
- 41 Huang X, Leng T, Zhang X, et al. Binder-free highly conductive graphene laminate for low cost printed radio frequency applications. *Appl Phys Lett*, 2015, 106: 203105
- 42 Huang X, Leng T, Zhu M, et al. Highly flexible and conductive printed graphene for wireless wearable communications applications. *Sci Rep*, 2015, 5: 18298
- 43 Pan K, Fan Y, Leng T, et al. Sustainable production of highly conductive multilayer graphene ink for wireless connectivity and IoT applications. *Nat Commun*, 2018, 9: 5197
- 44 Scidà A, Haque S, Treossi E, et al. Application of graphene-based flexible antennas in consumer electronic devices. *Mater Today*, 2018, 21: 223–230
- 45 Chang H Y, Yogeesh M N, Ghosh R, et al. Large-area monolayer MoS<sub>2</sub> for flexible low-power RF nanoelectronics in the GHz regime. *Adv Mater*, 2016, 28: 1818–1823
- 46 Sarycheva A, Polemi A, Liu Y, et al. 2D titanium carbide (MXene) for wireless communication. *Sci Adv*, 2018, 4: eaau0920
- 47 Sun X, Liu H, Qiu H, et al. Utilization of synergistic effect of dimension-differentiated hierarchical nanomaterials for transparent and flexible wireless communicational elements. *Adv Mater Technol*, 2020, 5: 1901057
- 48 Huang X, Leng T, Hsin Chang K, et al. Graphene radio frequency and microwave passive components for low cost wearable electronics. *2D Mater*, 2016, 3: 025021
- 49 Kosuga S, Suga R, Hashimoto O, et al. Graphene-based optically transparent dipole antenna. *Appl Phys Lett*, 2017, 110: 233102
- 50 Park M, Im J, Shin M, et al. Highly stretchable electric circuits from a composite material of silver nanoparticles and elastomeric fibres. *Nat Nanotechnol*, 2012, 7: 803–809
- 51 Shin K Y, Hong J Y, Jang J. Micropatterning of graphene sheets by inkjet printing and its wideband dipole-antenna application. *Adv Mater*, 2011, 23: 2113–2118
- 52 Geim A K, Novoselov K S. The rise of graphene. *Nat Mater*, 2007, 6: 183–191
- 53 Bunch J S, Verbridge S S, Alden J S, et al. Impermeable atomic membranes from graphene sheets. *Nano Lett*, 2008, 8: 2458–2462
- 54 Hu S, Lozada-Hidalgo M, Wang F C, et al. Proton transport through one-atom-thick crystals. *Nature*, 2014, 516: 227–230
- 55 Scidà A, Haque S, Treossi E, et al. Application of graphene-based flexible antennas in consumer electronic devices. *Mater Today*, 2018, 21: 223–231
- 56 Ellmer K. Past achievements and future challenges in the development of optically transparent electrodes. *Nat Photon*, 2012, 6: 809–817
- 57 Nakamura E, Sato K. Managing the scarcity of chemical elements. *Nat Mater*, 2011, 10: 158–161
- 58 Elechiguerra J L, Larios-Lopez L, Liu C, et al. Corrosion at the nanoscale: The case of silver nanowires and nanoparticles. *Chem Mater*, 2005, 17: 6042–6052
- 59 Meyer J C, Geim A K, Katsnelson M I, et al. The structure of suspended graphene sheets. *Nature*, 2007, 446: 60–63
- 60 Tung T T, Chen S J, Fumeaux C, et al. Scalable realization of conductive graphene films for high-efficiency microwave antennas. *J Mater Chem C*, 2016, 4: 10620–10624
- 61 Zhang X, Hosseini A, Subbaraman H, et al. Integrated photonic electromagnetic field sensor based on broadband bowtie antenna coupled silicon organic hybrid modulator. *J Lightwave Technol*, 2014, 32: 3774–3784
- 62 Jin P, Ziolkowski R W. Broadband, efficient, electrically small metamaterial-inspired antennas facilitated by active near-field resonant parasitic elements. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2010, 58: 318–327
- 63 Luk K M. The importance of the new developments in antennas for wireless communications. *Proc IEEE*, 2011, 99: 2082–2084
- 64 Wong H, Luk K M, Chan C H, et al. Small antennas in wireless communications. *Proc IEEE*, 2012, 100: 2109–2121
- 65 Zhang D Y. Study on simulation design of plane tunable antenna (in Chinese). Master Dissertation. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2006 [张天宇. 平面可调谐天线的仿真设计研究. 硕士学位论文. 成都: 电子科技大学, 2006]
- 66 Wei S J. Research on tunable antenna and substrate-integrated magnetic dipole (in Chinese). Doctor Dissertation. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018 [韦升俊. 可调谐天线及基片集成磁偶极子的研究. 博士学位论文. 成都: 西南交通大学, 2018]
- 67 Christodoulou C G, Tawk Y, Lane S A, et al. Reconfigurable antennas for wireless and space applications. *Proc IEEE*, 2012, 100: 2250–2261
- 68 Costantine J, Tawk Y, Christodoulou C G. Reconfigurable Antennas. Handbook of Antenna Technologies. Singapore: Springer, 2015. 1–30

- 69 Costantine J, Tawk Y, Barbin S E, et al. Reconfigurable antennas: Design and applications. *Proc IEEE*, 2015, 103: 424–437
- 70 Wu Z A. Research and design on frequency reconfigurable antennas (in Chinese). Master Dissertation. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012 [吴志昂. 频率可重构天线研究与设计. 硕士学位论文. 成都: 西南交通大学, 2012]
- 71 Tawk Y, Costantine J, Christodoulou C G. A frequency reconfigurable rotatable microstrip antenna design. In: Proceedings of the 2010 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Toronto, Canada, 2010. 1–4
- 72 Mazlouman S J, Soleimani M, Mahanfar A, et al. Pattern reconfigurable square ring patch antenna actuated by hemispherical dielectric elastomer. *Electron Lett*, 2011, 47: 164–165
- 73 Liyakath R A, Takshi A, Mumcu G. Multilayer stretchable conductors on polymer substrates for conformal and reconfigurable antennas. *Antennas Wirel Propag Lett*, 2013, 12: 603–606
- 74 Costantine J, Tawk Y, Woodland J, et al. Reconfigurable antenna system with a movable ground plane for cognitive radio. *IET Microw Antennas Propag*, 2014, 8: 858–863
- 75 Zohur A, Mopidevi H, Rodrigo D, et al. RF MEMS reconfigurable two-band antenna. *Antennas Wirel Propag Lett*, 2013, 12: 72–75
- 76 Erdil E, Topalli K, Unlu M, et al. Frequency tunable microstrip patch antenna using RF MEMS technology. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2007, 55: 1193–1196
- 77 Cetiner B A, Crusats G R, Jofre L, et al. RF MEMS integrated frequency reconfigurable annular slot antenna. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2010, 58: 626–632
- 78 Kim B, Pan B, Nikolaou S, et al. A novel single-feed circular microstrip antenna with reconfigurable polarization capability. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2008, 56: 630–638
- 79 Qin P Y, Guo Y J, Weily A R, et al. A pattern reconfigurable u-slot antenna and its applications in mimo systems. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2012, 60: 516–528
- 80 Hinsz L, Braaten B D. A frequency reconfigurable transmitter antenna with autonomous switching capabilities. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2014, 62: 3809–3813
- 81 Aboufoul T, Alomainy A, Parini C. Reconfiguring UWB monopole antenna for cognitive radio applications using GaAs FET switches. *Antennas Wirel Propag Lett*, 2012, 11: 392–394
- 82 Yang X, Lin J, Chen G, et al. Frequency reconfigurable antenna for wireless communications using GaAs FET switch. *Antennas Wirel Propag Lett*, 2015, 14: 807–810
- 83 White C R, Rebeiz G M. Single- and dual-polarized tunable slot-ring antennas. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2009, 57: 19–26
- 84 Tawk Y, Costantine J, Christodoulou C G. A varactor-based reconfigurable filter antenna. *Antennas Wirel Propag Lett*, 2012, 11: 716–719
- 85 Bai Y Y, Xiao S, Liu C, et al. Design of pattern reconfigurable antennas based on a two-element dipole array model. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2013, 61: 4867–4871
- 86 Tawk Y, Albrecht A R, Hemmady S, et al. Optically pumped frequency reconfigurable antenna design. *Antennas Wirel Propag Lett*, 2010, 9: 280–283
- 87 Sathi V, Ehteshami N, Nourinia J. Optically tuned frequency-reconfigurable microstrip antenna. *Antennas Wirel Propag Lett*, 2012, 11: 1018–1020
- 88 Patron D, Daryoush A S, Dandekar K R. Optical control of reconfigurable antennas and application to a novel pattern-reconfigurable planar design. *J Lightwave Technol*, 2014, 32: 3394–3402
- 89 Pendharker S, Shevgaonkar R K, Chandorkar A N. Optically controlled frequency-reconfigurable microstrip antenna with low photoconductivity. *Antennas Wirel Propag Lett*, 2014, 13: 99–102
- 90 Xue X L. Research and design on optically controlled frequency-reconfigurable antenna (in Chinese). Master Dissertation. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018 [薛喜亮. 光控频率可重构天线的研究与设计. 硕士学位论文. 南京: 南京航空航天大学, 2018]
- 91 Dixit L, Pourush P K S. Radiation characteristics of switchable ferrite microstrip array antenna. *IEEE Proc-Microw Antennas Propag*, 2000, 147: 151–155
- 92 Jiang H, Patterson M, Brown D, et al. Miniaturized and reconfigurable CPW square-ring slot antenna loaded with ferroelectric BST thin film varactors. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2012, 60: 3111–3119
- 93 Liu L, Langley R J. Liquid crystal tunable microstrip patch antenna. *Electron Lett*, 2008, 44: 1179–1181
- 94 Hu W, Ismail M Y, Cahill R, et al. Liquid-crystal-based reflectarray antenna with electronically switchable monopulse patterns. *Electron Lett*, 2007, 43: 744–745
- 95 Dey A, Guldiiken R, Mumcu G. Microfluidically reconfigured wideband frequency-tunable liquid-metal monopole antenna. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2016, 64: 2572–2576
- 96 Perruisseau-Carrier J, Tamagnone M, Esquiús-Morote M, et al. Resonant and leaky-wave reconfigurable antennas based on graphene plasmonics.

- In: IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (Apsursi), 2013. 136–137
- 97 Sheng L L. Study and design on the frequency reconfigurable antenna based on metamaterials (in Chinese). Master Dissertation. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016 [盛丽丽. 基于超材料的频率可重构天线研究与设计. 硕士学位论文. 成都: 电子科技大学, 2016]
- 98 Xiong J, Lin X, Yu Y, et al. Novel flexible dual-frequency broadside radiating rectangular patch antennas based on complementary planar ENZ or MNZ metamaterials. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2012, 60: 3958–3961
- 99 Mehdipour A, Denidni T A, Sebak A R. Multi-band miniaturized antenna loaded by ZOR and CSRR metamaterial structures with monopolar radiation pattern. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2014, 62: 555–562
- 100 Zhu H L, Liu X H, Cheung S W, et al. Frequency-reconfigurable antenna using metasurface. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2014, 62: 80–85
- 101 Turpin J P, Wu Q, Werner D H, et al. Near-zero-index metamaterial lens combined with AMC metasurface for high-directivity low-profile antennas. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2014, 62: 1928–1936
- 102 Somarith S, Hyunseong K, Sungjoon L. Frequency reconfigurable and miniaturized substrate integrated waveguide interdigital capacitor (SIW-IDC) antenna. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2014, 62: 1039–1045
- 103 Chiu S C, Yang L Y O, Lai C P, et al. Compact CRLH asymmetric-CPS resonant antenna with frequency agility. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2014, 62: 527–534
- 104 Yasir M, Bistarelli S, Cataldo A, et al. Tunable phase shifter based on few-layer graphene flakes. *IEEE Microw Wireless Compon Lett*, 2019, 29: 47–49
- 105 Pierantoni L, Mencarelli D, Bozzi M, et al. Microwave applications of graphene for tunable devices. In: Proceedings of the 9th European Microwave Integrated Circuit Conference, Rome, Italy, 2014. 512–515
- 106 Wu B, Zhang Y, Zu H, et al. Tunable grounded coplanar waveguide attenuator based on graphene nanoplates. *IEEE Microw Wireless Compon Lett*, 2019, 29: 330–332
- 107 Dragoman M, Neculoiu D, Bunea A C, et al. A tunable microwave slot antenna based on graphene. *Appl Phys Lett*, 2015, 106: 153101
- 108 Bunea A C, Neculoiu D, Dragoman M, et al. X band tunable slot antenna with graphene patch. In: Proceedings of the 45th European Microwave Conference (EuMC), Paris, France, 2015. 614–617
- 109 Grande M, Bianco G V, Laneve D, et al. Gain and phase control in a graphene-loaded reconfigurable antenna. *Appl Phys Lett*, 2019, 115: 133103
- 110 Yasir M, Savi P, Bistarelli S, et al. A planar antenna with voltage-controlled frequency tuning based on few-layer graphene. *Antennas Wirel Propag Lett*, 2017, 16: 2380–2383
- 111 Kumar J, Basu B, Talukdar F A, et al. Multimode-inspired low cross-polarization multiband antenna fabricated using graphene-based conductive ink. *Antennas Wirel Propag Lett*, 2018, 17: 1861–1865
- 112 Fan C, Wu B, Hu Y, et al. Millimeter-wave pattern reconfigurable Vivaldi antenna using tunable resistor based on graphene. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2020, 68: 4939–4943
- 113 Alvarez C N, Cheung R, Thompson J S. Graphene reconfigurable antennas for LTE and WIFI systems. In: Proceedings of the 2014 Loughborough Antennas and Propagation Conference, Loughborough, UK, 2014. 434–438
- 114 Luo Y, Zeng Q, Yan X, et al. Graphene-based multi-beam reconfigurable THz antennas. *IEEE Access*, 2019, 7: 30802–30808
- 115 Tamagnone M, Gómez-Díaz J S, Mosig J R, et al. Reconfigurable terahertz plasmonic antenna concept using a graphene stack. *Appl Phys Lett*, 2012, 101: 214102
- 116 Leng T, Huang X, Zhang X, et al. Design of reconfigurable planar antenna using graphene based switch. In: Proceedings of the 2015 IEEE 4th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation, Kuta, Indonesia, 2015. 138–139
- 117 Leng T, Huang X, Chang K H, et al. Graphene nanoflakes printed flexible meandered-line dipole antenna on paper substrate for low-cost RFID and sensing applications. *Antennas Wirel Propag Lett*, 2015, 15: 1565–1568
- 118 Wu B, Zhang X, Huang B, et al. High-performance wireless ammonia gas sensors based on reduced graphene oxide and nano-silver ink hybrid material loaded on a patch antenna. *Sensors*, 2017, 17: 2070
- 119 Chen X, Liu X, Li S, et al. Tunable wideband slot antennas based on printable graphene inks. *Nanoscale*, 2020, 12: 10949–10955
- 120 Pei S, Cheng H M. The reduction of graphene oxide. *Carbon*, 2012, 50: 3210–3228

Summary for “石墨烯材料在天线技术中的应用”

## Graphene-based materials for antenna applications

Xu Liu, Xiao Sun, Shouhao Li, Feiyao Yang, Ke Li & Di Wei\*

*Beijing Graphene Institute, Beijing 100095, China*

\* Corresponding author, E-mail: [diwei@hotmail.com](mailto:diwei@hotmail.com)

Internet of Things (IoT) has become one of the trending technologies in recent years. With the wide applications and rapid development of wireless communication and IoT, there are growing number of requirements on novel device design, such as flexible antennas and tunable antennas. The demand of transparent and flexible wireless communicational devices is ever-increasing for a wide range of scenarios, such as noninvasive healthcare, real-time wearable electronics, etc. Besides, a highly integrated antenna with tunable bandwidth and low energy consumption is in pressing demands in order to reduce the number of antennas and achieve better signal strength and higher speed signal transmission. Graphene materials have drawn much attention due to its extraordinary optical properties, high electrical and thermal conductivity, and excellent mechanical properties. All of these properties underline that graphene can be considered as a highly competitive material for wearable communication devices. Moreover, the electrical resistance of graphene and graphene oxide could be simply changed by external electric fields, applied strain and environment, which alters the electrical characteristics of the graphene-based microwave devices. Accordingly, graphene materials have a great potential in various reconfigurable or tunable devices.

Our group fabricated the first graphene-based flexible and transparent wireless antenna with 2D large single-crystalline graphene and 1D AgNW hybrid material based on the features of graphene, such as high carrier mobility, transparency and flexibility, etc. The antenna exhibited a 75% light transmittance and an ultrawide bandwidth ranging from 5.6 to 12.8 GHz, combining with outstanding durability and stability with an almost negligible variation of reflection coefficients over 1000 bending cycles. Further research confirmed that the existence of graphene harmonized the compatibility between antenna and integrated chips, hence improved the total performance of the radio frequency identification (RFID) tags. Graphene/AgNW-based RFID tag was fabricated with an operating UHF band of 850–960 MHz and a reading distance of 130 cm, showing a great commercial potential. The excellent performance and unique properties of graphene/AgNW-based antenna and RFID tag came from the synergistic effect between 1D and 2D nanomaterials, providing a new vision for the design of next generation wireless electronics. Meanwhile, a slot antenna with tunable bandwidth was proposed. The antenna consisted of a planar slot antenna with graphene ink printed at the gap between the ground and a small patch. The graphene ink was made from the mixture of graphene powder and graphene oxide aqueous dispersion. Graphene oxide sheets functioned as effective surfactants rendering assistance to form uniform printable inks, displayed alterable electrical resistance by optimization of mixing proportions between graphene and graphene oxide. Dried graphene inks displayed tunable electrical resistance under applied DC voltages. The variation in the resistance of graphene ink affected radiation of the slot antenna, resulting in a shift of operating bandwidth. The proposed antenna achieved a shifting bandwidth of 0.54 from 6 to 5.46 GHz after applying DC voltage less than 15 V. Such cost-effective, easily acquired, and printable graphene inks integrated the dual advantages of graphene and graphene oxide. It could be further applied in many other fields of printable electronic devices.

**high-quality graphene films, printable graphene inks, flexible transparent RFID tags, 5G, tunable antenna**

doi: [10.1360/TB-2020-0515](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0515)