

# 石墨烯与太赫兹科学

韩鹏昱<sup>1</sup> 刘伟<sup>2</sup> 谢亚红<sup>2</sup> 张希成<sup>1,†</sup>

(1 伦斯勒理工学院太赫兹研究中心 特洛伊 美国 12180)

(2 加州大学洛杉矶分校材料科学与工程系 洛杉矶 美国 90024)

**摘要** 石墨烯(Graphene)是材料科学和物理科学领域一颗冉冉升起的新星. 作为一种具有优异晶体品质和电子性质的二维材料,石墨烯表现出独特的电子输运、光学耦合、电磁学和其他新奇的性质. 例如,石墨烯的禁带宽度和有效质量为零,其电子和空穴的运动方式与相对论性粒子相同. 另外,石墨烯拥有已知材料中最高的迁移率,且其迁移率基本与温度无关. 石墨烯具有众多的新颖物理现象和应用潜能,其中在太赫兹科学上的应用前景尤其广阔. 石墨烯的等离子振荡、可外部控制的导电率及可人为调谐的禁带宽度都与太赫兹科学息息相关. 文章重点地介绍了石墨烯的基本性质和最新研究进展,并展望了石墨烯在太赫兹科学上的应用前景,包括石墨烯的太赫兹特性研究及石墨烯太赫兹器件.

**关键词** 石墨烯,二维晶体,应用,太赫兹

## Graphene and terahertz science

HAN Peng-Yu<sup>1</sup> LIU Wei<sup>2</sup> XIE Ya-Hong<sup>2</sup> ZHANG Xi-Cheng<sup>1,†</sup>

(1 Center for Terahertz Research, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy 12180, USA)

(2 Department of Material Science and Engineering, University of California, Los Angeles 90024, USA)

**Abstract** Graphene is a very promising rising star in material science and physics. As an excellent two-dimensional material with high crystal and electronic qualities, Graphene exhibits unique electron transport, optical coupling, magnetic and other properties. For example, Graphene has zero bandgap and zero effective mass, with electrons and holes behaving as relativistic particles. Moreover, Graphene has the highest mobility which is almost independent of temperature. Among a cornucopia of new physics and potential applications, Graphene has intriguing uses in terahertz (THz) science because it is closely related to THz waves through plasma oscillation, externally tunable resistivity, and variable THz bandgaps. In this paper an introduction to Graphene and its recent progress is given. The prospects of Graphene in THz science are discussed, including its THz properties and device potential.

**Keywords** Graphene, two-dimensional crystal, applications, terahertz

### 1 从铅笔到石墨烯

石墨烯(Graphene)是碳原子紧密堆积成的单层蜂窝状结构晶体<sup>[1]</sup>,可以看作是由碳原子和 C—C 键构成的原子量级的六角状线网. 石墨烯的名字来源于 GRAPHITE + ENE(石墨+烯),而且石墨可以看作是由很多层的石墨烯堆积而成.

令人惊奇的是,石墨烯在几个世纪以前就已经

存在于人们的生活中,只是没有引起人们足够的重视. 每当人们用铅笔写字或绘画时,划痕中间就包含了当今物理学和纳米技术领域最热门的新材料:石墨烯<sup>[2,3]</sup>(见图1). 石墨的层状结构在几十年前就已经发现了,自然而然地物理学家和材料学家试图通过化学剥离和微机械剥离的方法来把石墨分离为层

2009-02-11 收到

† 通讯联系人. Email: zhangxc@rpi.edu

状的结构. 美国哥伦比亚大学的一个研究小组在石墨烯的制备上已经取得了一定的进展, 他们改进了微机械剥离法并创造出了一种高科技铅笔——“纳米铅笔”. 用这种纳米铅笔可以制出只有几十层原子厚的石墨块<sup>[4]</sup>. 2004年, 英国曼彻斯特大学的一个研究小组在石墨烯的研究上取得了里程碑式的发现<sup>[1]</sup>. 他们把石墨薄片粘在胶带上, 把有粘性的一面对折, 再把胶带撕开, 这样石墨薄片就被一分为二. 通过不断地重复这个过程, 片状石墨越来越薄, 最终就可以得到一定数量的石墨烯.

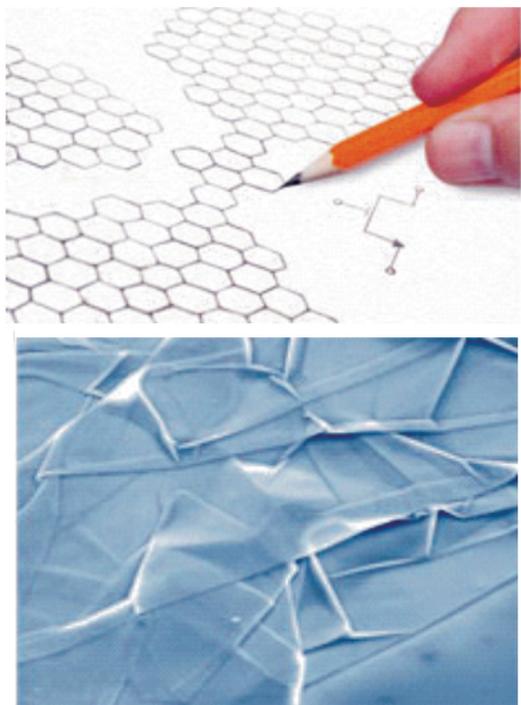


图1 石墨烯可以在铅笔划痕里存在. 上图为铅笔绘制的石墨烯的二维结构图; 下图为石墨烯在隧道电子显微镜下的图像(引自网页 <http://www.spectrum.ieee.org/jun08/6252>)

包括石墨、富勒烯和石墨烯在内的碳元素家族成员拥有相同的基本原子排列结构. 这种基本排列结构由6个碳原子组成, 通过化学键组成规则的六边形, 在化学上这被称为苯环. 石墨家族的其他组成形态都可以认为是由石墨烯组成的. 巴基球(buckyball)和其他很多非管状富勒烯都可以认为是由石墨烯堆积而成的原子尺度的球状、拉伸椭球状结构等. 碳纳米管本质上也是由石墨烯片卷曲而成的微小的圆柱体. 石墨则是由多层石墨烯堆积成的三维材料, 层与层之间通过分子间很弱的范德瓦尔斯力连接在一起的.

除了曼彻斯特大学提出的机械剥离法外, 科学家们也在探索其他制备石墨烯的方法, 并取得了一

定的成功. 其中一种方法是通过对含碳的单晶过渡金属进行高真空退火处理来生长大面积的石墨烯, 称作外延生长法. 采用外延法生长出具有均匀厚度的石墨烯样品, 并且石墨烯还要与衬底很好地连接, 这是非常有挑战性的工作, 因为通常衬底与碳原子层的粘合会影响到碳原子层的性质<sup>[5,6]</sup>. 另外一种方法是高温加热碳化硅到1100°C, 使其分解成为石墨烯. 这种制备石墨烯的流程只能得到较小尺寸的样品, 而且在制作工艺上还需要进行更多的研究, 以使其能够与多数电子应用方面的制造技术兼容<sup>[7]</sup>. 还有些研究人员开发了一些化学方法来制备石墨烯, 其中大多数都是利用哈默斯方法来得到石墨烯的氧化物. 例如, 将氧化石墨烯纸放入联胺溶液, 可以把氧化石墨烯纸还原为单层石墨烯<sup>[8]</sup>. 最近有人提出了一种可以得到克以上重量石墨烯的独特方法, 他们利用金属钠和乙醇反应获得乙醇钠, 然后把得到的乙醇盐进行高温分解, 最后用水冲洗去掉钠盐<sup>[9]</sup>, 剩下的产物就是大量的石墨烯.

## 2 石墨烯的奇特性质

作为一种独特的二维晶体, 石墨烯具有众多奇特的性质. 由于石墨烯是由纯的碳原子组成并且具有整齐的晶格结构, 因此它显示出很高的晶体质量. 到目前为止, 在石墨烯中还没有发现类似空位或者位错这样的点缺陷. 石墨烯中碳原子之间的键能很大而且具有很好的柔韧性, 这使其具有比钻石更大的硬度而且在对其施加机械力的时候其平面很容易弯曲. 在发生较大形变的时候, 这种柔韧性可以使石墨烯的原子结构适应外界的形变, 而不至于发生根本的改变. 科学家们最近已经利用原子力显微镜测量出了悬空的片状石墨烯的弹性系数<sup>[10]</sup>. 他们将片状石墨烯悬空放置于二氧化硅凹槽上, 利用原子力显微镜的探针来测量其机械特性. 石墨烯很高的弹性系数和杨氏模量使其具有很好的机械强度. 由于这些固有的优良性质, 石墨烯有可能会应用在压力传感器和共鸣器领域.

由于石墨烯优良的晶体特性, 它具有很好的电导率和热导率. 电子可以自由移动而不会受到晶格缺陷和杂质原子的散射影响. 由于原子间很强的化学键, 即使是在室温下石墨烯中的电子不可避免地会与碳原子之间的碰撞对电子的影响也是很小的. 最近人们通过一种非接触光学方法测量了在室温下石墨烯的热导率, 约为  $5 \times 10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ <sup>[11]</sup>. 这个

数值要高于碳纳米管和钻石. 通过维德曼 - 弗兰兹定律 (Wiedemann - Franz law) 可以推导出石墨烯的导热性主要是由声子散射决定的. 另外, 石墨烯的这种弹道式的热导率是各向同性的<sup>[12]</sup>.

载流子输送实验的结果显示室温下石墨烯具有非同寻常高的电子迁移率, 大于  $15000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[13]</sup>. 另外, 电导率实验的对称性说明空穴和电子的迁移率几乎是相同的<sup>[14]</sup>. 在  $10 - 100 \text{ K}$  的温度范围内, 迁移率是几乎不受温度影响<sup>[15]</sup>, 这就意味着石墨烯中电子主要的散射机理是缺陷散射. 计算表明, 在室温下和载流子浓度为  $10^{12} \text{ cm}^{-2}$  时, 石墨烯内的声学声子散射将迁移率限制到  $200000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  以内<sup>[15, 16]</sup>. 这时相应的电阻率为  $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ , 低于金属银的电阻率, 而银是已知的室温下电阻率最低的物质. 然而, 室温下对于制备在二氧化硅衬底上的石墨烯来说, 衬底的光学声子的散射对载流子迁移率的影响要比石墨烯内部声子的散射来得更大, 因而把迁移率限制在  $40000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  左右<sup>[15]</sup>.

石墨烯一个很特别的性质就是其传导电子的特征. 在凝聚态物理中, 人们通常用薛定谔方程来描述材料的电子性质. 石墨烯是一个例外, 它的载流子行为跟相对论粒子相似, 并且更容易用狄拉克方程而不是薛定谔方程描述<sup>[17, 18]</sup>. 人们称这些具有有效速度  $v_F \approx 10^6 \text{ m/s}$  的准粒子为无质量的狄拉克 - 费米子, 并且把它们看作是失去静止质量  $m$  的电子或者是获得电子电量  $e$  的中微子. 因此, 石墨烯的出现使得相对论量子力学不再仅局限于宇宙学或者高能物理领域, 而是已经进入了日常生活状态下的实验室中.

人们发现石墨烯的量子霍尔效应有一个很有趣的现象, 零场下石墨烯在狄拉克点附近的电导率  $\sigma$  并没有因为载流子的浓度  $n$  趋近零 ( $0$  浓度) 而消失, 相反地却接近量子化的电导率  $4e^2/h$ <sup>[19]</sup>. 这个最小的非零电导率的产生原因尚不清楚. 然而, 石墨烯原子层的起伏或者氧化硅衬底中电离的杂质原子, 会在局部形成一系列载流子聚集的小团, 从而可能导致了石墨烯的非零最小导电性<sup>[14]</sup> (见图 2). 尽管几种理论已经预示最小电导率应该是  $4e^2/h\pi$ , 但是绝大多数的测量结果却是  $4e^2/h$  或者更大<sup>[13]</sup>, 并且最小电导率取决于杂质的浓度<sup>[20]</sup>.

除了高迁移率和最小电导率以外, 石墨烯在磁场中也表现出非常有趣的行为现象. 石墨烯表现出异常的量子霍尔效应, 其霍尔电导率数值为  $\sigma_{xy} =$

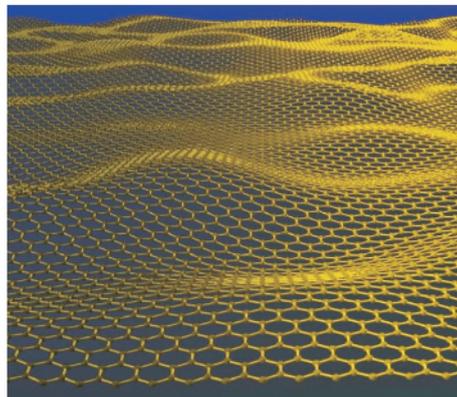


图 2 石墨烯的一种可能的结构图, 可以看到一些微小尺度下的起伏 (引自网页 <http://www.thp.uni-koeln.de/graphene08>)

$\pm 4(N + 1/2)e^2/h$ , 相对于标准序列数值改变了  $1/2$ , 其中  $N$  是朗道能级指数, 因为双能谷简并和双自旋简并, 造成了电导率公式中出现系数  $4$ <sup>[13]</sup>. 这种奇异的现象甚至可以在室温下得到<sup>[19]</sup>. 双原子层石墨烯也表现出量子霍尔效应, 但是其数值却遵循标准序列  $\sigma_{xy} = \pm 4Ne^2/h$ . 有趣的是, 在  $N=0$  时, 第一个峰值不见了, 这显示双分子层石墨烯在中性点处具有金属的性质.

作为一种单原子层材料, 石墨烯独特的电子特性使其具有较高的不透明度, 单层石墨烯对白光的吸收比例可以用一个简单的公式来计算:  $\pi\alpha \approx 2.3\%$ , 其中  $\alpha$  为精细结构常数<sup>[21, 22]</sup>. 这个结果已经被实验所证明: 在白光波段, 吸收与波长基本无关, 且与层数成正比, 显示了石墨烯独特的光学性质 (见图 3).

### 3 石墨烯与太赫兹领域

太赫兹光谱学是一种应用领域广阔且具有很好前景的探测和成像技术<sup>[23]</sup>. 由于其能带结构和其他特性, 石墨烯与太赫兹科学有着内在的必然联系. 例如, 当载流子浓度适中 ( $10^9 - 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ) 时, 石墨烯内部的等离子体振荡频率就是在太赫兹频段<sup>[24]</sup>. 双原子层石墨烯或者外延生长的石墨烯可能成为半导体, 其禁带宽度可以设计为  $0 - 0.3 \text{ eV}$ , 正好覆盖太赫兹频段<sup>[25, 26]</sup>. 另外, 太赫兹光谱学可以用来研究和理解石墨烯和衬底之间的基本相互作用及其对电子输运特性的影响.

太赫兹光谱学可以用来研究石墨烯的基本特性从而对优化其制备过程作出贡献. 太赫兹辐射已经被用于研究等离子体振荡, 半导体和纳米结构的能

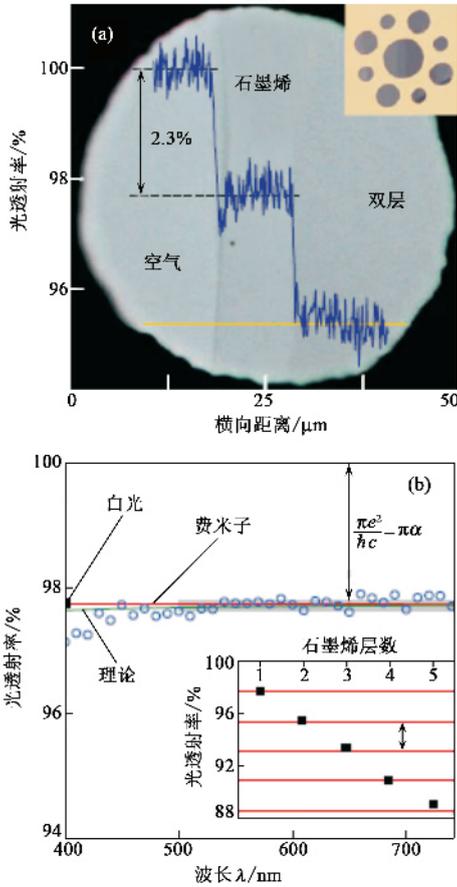


图3 石墨烯的光学透射性质。(a)白光通过空气、单层石墨烯、双层石墨烯的透射率 (b)透射率与波长及石墨烯层数的关系 (引自文献 [22])

量带隙和光学声子. 当载流子的二维浓度为  $10^9 - 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  时, 其对应的三维浓度可以根据石墨层的间距 (0.335 nm) 估算为  $3 \times 10^{16} - 3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . 如果用经典的德鲁德模型 (Drude model) 来计算石墨烯的等离子体谐振频率  $\nu_p = 1/2\pi \sqrt{Ne^2/\epsilon_0 m}$ , 其频率数值为 1—30 THz. 在量子力学体系中, 等离子体遵循线性的能量 - 动量色散关系, 就像一个光子在电量为中性的点附近 (狄拉克点) 一样, 由此得到的等离子体谐振频率也在 1—30 THz 之间 [24]. 在石墨烯器件中, 多层石墨烯外延层和石墨烯 - 衬底之间的相互作用改变了石墨烯的电子状态、能带隙和光学声子结构. 通过设计和制作一定的结构, 石墨烯会有比较显著的带隙  $\Delta E$ . 例如, 双层石墨烯的能带隙可以设计为 0—0.3 eV. 对于单层石墨烯, 可以通过超晶格结构或者通过制备石墨烯纳米带来控制  $\Delta E$ :  $\Delta E (\text{eV}) \approx 1/d (\text{nm})$ , 其中  $d$  是纳米带的宽度 [26]. 太赫兹光谱学可用来研究这些从 1 meV — 0.1 eV 能带隙. 石墨烯可调节的能带隙使其用作可调节的

太赫兹发射器和探测器成为可能.

太赫兹光谱学是一种非接触和非破坏性的技术, 可以用于研究诸如电致电阻和磁致电阻等石墨烯的性质. 石墨烯具有双极电场效应, 它的载流子浓度在外加电场的作用下可以连续地从 n 型 (电子) 变到 p 型 (空穴). 这与传统金属有很大不同 (见图 4). 在强电场的作用下, 石墨烯的电子和空穴浓度可以高达  $10^{13} \text{ cm}^{-2}$ , 而其电阻可以下降 17 倍 [1, 13, 19]. 另外, 从文献的模拟结果可以看出 [27, 28], 石墨烯纳米带的自旋和轨道对称性使其具有极高的磁致电阻和高度自旋极化的电流. 理论预测磁致电阻将会减小 10000 倍. 因为太赫兹光的透射率和反射率对石墨烯的电阻很敏感, 太赫兹光谱学可以用来研究石墨烯的电致电阻和磁致电阻.

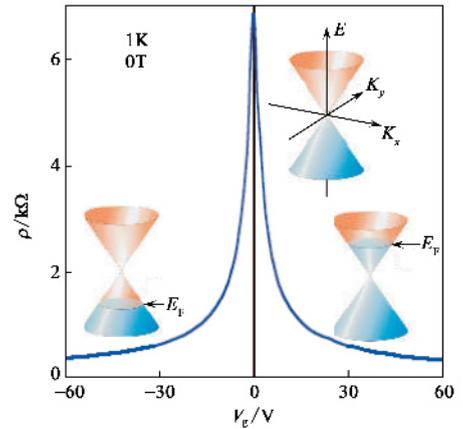


图4 单层石墨烯的双极电场效应. 不同的栅极电场极性和大小引起不同的电阻和载流子类型 (引自文献 [13])

太赫兹光谱学具有超快的时间分辨能力. 利用光泵浦 - 太赫兹探测光谱学, 可以研究外延生长的石墨烯层和石墨烯器件中光生电子和空穴的超快弛豫和复合等动态过程 [29]. 石墨烯在太赫兹频段的导电性取决于载流子浓度和载流子的能量分布, 这就使得探测载流子弛豫过程和带间能级的复合等动态过程成为可能.

在整个电磁波谱中, 太赫兹光谱区域是迄今为止研究和开发得最少的, 主要是因为这个频段的辐射的产生和探测是件难度很大的工作. 在半导体芯片上制作太赫兹的发射器和探测器是一项很有吸引力而且很必要的技术, 这样可以减小太赫兹系统的尺寸并拓宽太赫兹的应用范围. 到目前为止, 在芯片上制作的太赫兹发射器和探测器的性能还不是特别理想. 场效应晶体管等利用半导体芯片制作的太赫兹发射器的平均功率很低 (单管约为几纳瓦), 而且

不能大范围调节其发射频率<sup>[30]</sup>. 最新的太赫兹探测装置可以达到  $nW/\sqrt{Hz}$  的灵敏度<sup>[31]</sup>. 由于石墨烯的高迁移率和可调节电阻, 基于石墨烯的太赫兹器件可能会有更大的发射功率、更高的探测灵敏度和更好的调节能力(见图5).

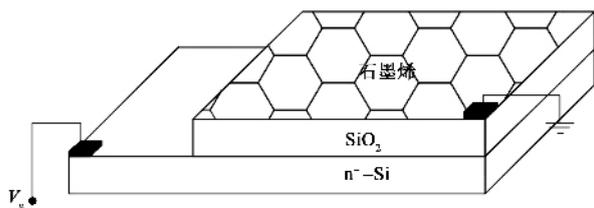


图5 基于石墨烯的太赫兹发射器示意图

石墨烯的独特性质使其还可能被用在其他太赫兹器件方面. 石墨烯异质结构中的载流子浓度可以通过外加的栅极电场大小进行调节. 载流子浓度的升降会造成石墨烯结构的电阻率的变化. 这种电阻的可调节性使得石墨烯作为太赫兹器件很有应用前景. 具体例子如下:

(1) 太赫兹调制器: 在外场作用下, 石墨烯表现出较高的电致电阻和磁致电阻, 可以用来改变太赫兹光在石墨烯器件中透射率或反射率, 从而实现太赫兹调制器.

(2) 可调谐太赫兹滤波器: 它与调制器工作原理相似, 石墨烯太赫兹滤波器的透射率可以调节, 且滤波器的频率范围也可调.

(3) 太赫兹波导: 石墨烯优良的导电率和二维平面性质使其成为太赫兹波导材料的自然选择. 而且作为波导材料, 其反射率可以调节.

(4) 太赫兹起偏器: 石墨烯可以很容易地长在硅片或碳化硅衬底上. 窄带的石墨烯阵列对太赫兹光具有各向异性的透射率, 从而可以作为太赫兹起偏器使用.

(5) 太赫兹分光器: 多层石墨烯可以用作太赫兹光的分光器, 而且其透射光与分射光的比例可以通过石墨烯的层数及外加电场的大小进行调节, 使得连续可调的太赫兹分光器成为可能.

## 4 石墨烯的应用前景

现在世界各地的科学家们都在研究石墨烯丰富多彩的应用. 其中一种马上可以预见的用途恐怕就是利用石墨烯极高的表面积-体积比来制作复合材料了. 事实上, 有人已经证实, 微米大小的粉末状石

墨烯微晶可以通过一种适合大量生产的方法制备出来<sup>[8]</sup>. 这使得仅用小于百分之一体积填充比的石墨烯就可以做出导电塑料来. 再加上其低廉的造价, 这种掺杂石墨烯的复合材料在多方面有着诱人的用途. 另外, 由于石墨烯很高的表面积-质量比, 它还可以用作超大电容器的导电盘<sup>[32]</sup>. 有人相信, 石墨烯的应用会使超大电容器存储的能量密度远大于现在的水平.

石墨烯另外一个很有前途的应用是利用它原子尺寸的厚度制作场致发射器, 因为针状器件在强电场作用下可以释放电子<sup>[33,34]</sup>. 在分离出石墨烯之前很长一段时间, 薄的石墨片就已经应用于等离子体显示器的商用样机上, 而且在这个方面产生了大量专利. 石墨烯微粒将来可能会表现出更加优越的发射特性.

石墨烯的高电导率和一定的光透明度, 使其成为制作透明导电电极的有力候选者, 可以应用在触摸屏、液晶显示器、有机光电池和有机发光二极管等方面. 尤其是和脆弱的铟锡氧化物相比, 石墨烯的机械强度和韧性都具有很大的优越性, 而且石墨烯薄膜可以通过溶液进行大面积沉积<sup>[35,36]</sup>.

由于石墨烯的二维结构, 它可以作为优异的探测器. 石墨烯的单原子层结构使其能充分地暴露在周围的环境中, 从而可以非常有效地探测到吸附分子的存在. 分子探测可以通过间接的方式进行: 当气体分子吸附在石墨烯的表面时, 吸附处会产生局部的电阻改变, 而这种电阻改变可以被检测到. 虽然其他材料也有类似的性质, 但石墨烯却具有很明显的优点. 这就是, 石墨烯即使在载流子数目很小的情况下, 电导率依然高, 而且其噪声很低, 这使得其表面电阻的变化很容易探测到<sup>[37]</sup>.

石墨烯日后最大的用途可能还是在电子学上. 即使是在日常生活的条件下, 石墨烯中的电子可以在亚微米范围内没有阻碍地运动. 电子以其  $10^6$  m/s 的速度, 从源极转移到漏极只需要不到 0.1 ps 的时间. 除了高迁移率, 石墨烯的低噪声使其能够用作场效应管的沟道<sup>[38]</sup> (见图5). 最近人们已经成功地利用石墨烯制作出了具有京赫兹(GHz)响应频率的晶体管<sup>[39]</sup>.

石墨烯有朝一日有望在集成电路产业中取代硅. 当分立器件的尺寸到达 10nm 的时候, 硅工艺就会遇到瓶颈. 另一方面, 当石墨烯缩小到只有几个苯环尺寸大小的时候, 仍然可以保持很高的电导率, 而硅和金属无法做到这一点. 此外, 当用石墨烯来制作

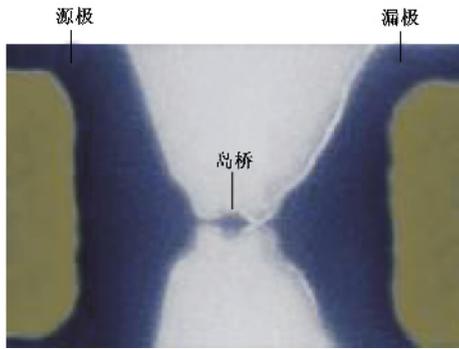


图6 纳米尺度的石墨烯三极管. 源极与漏极之间的岛桥的横向尺寸为100nm,即单电子器件(引自文献[2])

纳米带时,由于对电子的量子约束效应,会形成一条半导体带隙.这使得石墨烯可以像半导体硅器件一样工作.有人甚至预测将来可能会用石墨烯来制作整个电子线路,包括电极、导电沟道和量子点,从而使单个电子元件的尺寸小于 $10\text{nm}^{[13]}$ .

现在预言石墨烯能够取得什么辉煌的应用还为时尚早.但是石墨烯提供了一条研究低维物理的途径,在这条通道上,我们将看到石墨烯更多独特的性质和崭新而又更加广泛的用途.

致谢 本文作者韩鹏昱和张希成感谢 Army Research Office 的资助.

### 参考文献

- [ 1 ] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V *et al.* *Science*, 2004, 306 : 666
- [ 2 ] Geim A K, Kim P. *Sci. Am.*, 2008( 4 ) : 90
- [ 3 ] Geim A K, MacDonald A H. *Physics Today*, 2007( 8 ) 35
- [ 4 ] Zhang Y, Small J P, Pontius W V *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 86 : 073104
- [ 5 ] Sutter P W, Flege J I, Sutter E A. *Nature materials*, 2008, 7 : 406
- [ 6 ] Reina A, Jia X, Ho J *et al.* *Nano Letters*, 2008, DOI : 10.1021/nl801827v
- [ 7 ] Berger C, Song Z, Li X *et al.* *Science*, 2006, 312 : 1191
- [ 8 ] Stankovich S, Dikin D, Dommett G *et al.* *Nature*, 2006, 442 : 282
- [ 9 ] Choucair M, Thordarson P, Stride J A. *Nature Nanotechnology*, 2009, 4 : 30
- [ 10 ] Barone V, Hod O, Scuseria G E. *Nano Letters*, 2006, 6 : 2748
- [ 11 ] Balandi A A, Ghosh S, Bao W *et al.* *Nano Letters*, 2008, 8 : 902

- [ 12 ] Saito K, Nakamura J, Natori A. *Phys. Rev. B*, 2007, 76 : 115409
- [ 13 ] Geim A K, Novoselov K S. *Nature Mater.*, 2007, 6 : 183
- [ 14 ] Charlier J C, Eklund P C, Zhu J *et al.* *Electron and Phonon Properties of Graphene : Their Relationship with Carbon Nanotubes*. In : Jorio A, Dresselhaus G, Dresselhaus M S (Eds.). *Carbon Nanotubes : Advanced Topics in the Synthesis, Structure, Properties and Applications*, Berlin/Heidelberg : Springer - Verlag, 2008
- [ 15 ] Chen J, Jang C, Xiao S *et al.* *Nature Nanotechnology*, 2008, 3 : 206
- [ 16 ] Akturk A, Goldman N. *J. Appl. Phys.*, 2008, 103 : 053702
- [ 17 ] Katsnelson M I. *Eur. Phys. J. B*, 2006, 51 : 157
- [ 18 ] Katsnelson M I, Novoselov K S, Geim A K. *Nature Phys.*, 2006, 2 : 620
- [ 19 ] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V *et al.* *Nature*, 2005, 438 : 197
- [ 20 ] Chen J, Jang C, Adam S *et al.* *Nature Physics*, 2008, 4 : 377
- [ 21 ] Kuzmenko A B, van Heumen E *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2008, 100 : 117401
- [ 22 ] Nair R R, Blake P, Grigorenko A N *et al.* *Science*, 2008, 320 : 1308
- [ 23 ] Ferguson B, Zhang X C. *Nature Materials*, 2002, 1 : 26
- [ 24 ] Ryzhii M, Ryzhii V. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2007, 46 : L151
- [ 25 ] Brey L, Fertig H A. *Phys. Rev. B*, 2006, 73 : 235411
- [ 26 ] Son Y W, Cohen M L, Louie S G. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, 97 : 216803
- [ 27 ] Liu J, Wright A R, Zhang C *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 93 : 041106
- [ 28 ] Kim W Y, Kim K S. *Nature Nanotechnology*, 2008, 3 : 408
- [ 29 ] George P A, Strait J *et al.* *Nano Letters*, 2008, 8 : 4248
- [ 30 ] Knap W, Łusakowski J *et al.* *IEICE Trans. Electron.*, 2006, E89-C : 926
- [ 31 ] Pfeiffer U R, Ojefors E. *Solid-State Circuits Conference*, 2008, 110
- [ 32 ] Stoller M D, Park S *et al.* *Nano Letters*, 2008, 8 : 3498
- [ 33 ] Malesev A, Kemps R, Vanhulsel A *et al.* *J. Appl. Phys.*, 2008, 104 : 084301
- [ 34 ] Eda G, Unalan H E, Rupesinghe N *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 93 : 233502
- [ 35 ] Wang X, Zhi L, Müllen K. *Nano Letters*, 2008, 8 : 323
- [ 36 ] Eda G, Fanchini G, Chhowalla M. *Nature Nanotechnology*, 2008, 3 : 270
- [ 37 ] Schedin F, Geim A K, Morozov S V *et al.* *Nature Mater.*, 2007, 6 : 652
- [ 38 ] Ponomarenko L A, Schedin F *et al.* *Science*, 2008, 320 : 356
- [ 39 ] Lin Y, Jenkins K A *et al.* *Nano Letters*, 2009, DOI : 10.1021/nl803316h