

学校编码: 10384  
学号: 31420101150131

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_  
UDC\_\_\_\_\_

廈門大學

碩 士 学 位 论 文

壳聚糖剥离石墨制备石墨烯  
及生物传感器的构建

Graphene Prepared by Directly Exfoliating Graphite with  
the Aid of Chitosan and Its Application in Biosensor

王振兵

指导教师姓名: 翁建 教授

专 业 名 称: 生物医学工程

论文提交日期: 2013 年 6 月

论文答辩时间: 2013 年 6 月

学位授予日期: 2013 年 6 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评阅人: \_\_\_\_\_

2013 年 6 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( 翁建 教授 )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名): 王振兵  
2013 年 6 月 7 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：王振兵

2013 年 6 月 7 日

## 摘要

石墨烯为二维片状结构，具有较大的比表面积和异常的电学性能，在生物医学和生物技术领域的应用研究引起了极大的关注。目前关于氧化石墨烯（GO）和还原石墨烯（RGO）的研究虽然取得了很大的进展，但依然存在一个非常严重的问题，即在制备过程中，石墨烯原始结构遭受氧化破坏，使其丧失独有的特性，限制了它在实际中的进一步应用。本论文利用天然高分子壳聚糖作为稳定剂，在水溶液中直接剥离石墨，成功制备了结构完整的原始石墨烯，并用于构建传感器，主要研究结果如下：

1. 在壳聚糖的乙酸水溶液中，石墨经超声处理被剥离制备成壳聚糖稳定的石墨烯。形貌与结构的表征结果表明所得石墨烯几乎没有任何氧化缺陷，尺寸范围为 200~500 nm，表面较为平整，单层厚度为 0.997 nm；
2. 石墨烯制备过程中，壳聚糖的最佳浓度为  $0.2 \text{ mg mL}^{-1}$ ；最佳超声时间为 40 h；测得石墨烯的浓度为  $0.123 \text{ mg mL}^{-1}$ ，消光系数  $\alpha_{\langle 266 \rangle} = 1678 \text{ mL mg}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ；石墨烯分散液在 pH 2~4 的范围内具有较好的稳定性，其中在 pH 4 时分散性最好，而且具有一定的 pH 响应性能，通过调节分散液的 pH 可以使其发生可逆聚集(从 pH 4 到 9 或反之)；最后探讨了壳聚糖剥离石墨制备石墨烯的机理；
3. 所制备的石墨烯具备类过氧化氢酶催化活性，其最稳定 pH 为 4，最适活性温度为  $42 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ；动力学催化实验表明它的催化活性是相同浓度 GO 的 45 倍，RGO 的 4 倍；电化学实验结果证明其良好的催化活性源于较高的导电性；利用所制备的石墨烯检测不同水样中过氧化氢的含量，结果表明其具有较高的灵敏度，准确度和精确度；
4. 石墨烯修饰电极对多巴胺（DA）与抗坏血酸（AA）的电化学氧化行为均为吸附-脱吸附控制。经石墨烯-壳聚糖修饰的电极对单一 DA 的电化学氧化表现出很好的电化学活性，但由于壳聚糖的存在而不能实现 DA 的选择性识别。利用丙烯酸代替壳聚糖，得到丙烯酸溶液分散的石墨烯，经石墨烯-丙烯酸分散液修饰的电极可以实现 DA 的选择性检测，DA 最低检测限为 8.3 nM。

**关键词：**石墨烯；类过氧化氢酶；催化活性；生物传感器

## Abstract

Graphene, with large area sheet structure and exceptionally electronic property, has attracted intense interest in the area of biomedical and biotechnology. Recently great attention has been focused on the preparation and application of graphene oxide (GO) and reduced graphene oxide (RGO). However, these methods suffer from one significant disadvantage because of the structural defect resulted from the oxidation process which disrupts the band structure and completely degrades the electronic properties that make graphene unique. Hence, pristine graphene with high conductivity is required in many applications. In this thesis, defect-free graphene from pristine graphite was prepared by simply ultrasonication at the aid of chitosan and applied in biosensor. The major results of the thesis are outlined as followed:

1. Graphene was prepared from pristine graphite in chitosan-acetic acid solution by simply ultrasonication. The characterization results demonstrated that as-obtained graphene was defect-free with the scale of 200~500 nm and flat surface. The apparent height of monolayer graphene was 0.997 nm.
2. The optimal concentration of chitosan was  $0.2 \text{ mg mL}^{-1}$  and optimal ultrasonic time was 40 h. The concentration of graphene came up to  $0.123 \text{ mg mL}^{-1}$ . The extinction coefficient of graphene at 266 nm was  $\alpha_{266} = 1678 \text{ mL mg}^{-1} \text{ m}^{-1}$ . The resulted suspension of graphene with few layers had a good stability in a certain range of pH 2 to 4 due to the existence of chitosan, and the optimal pH was 4. Because of the existence of chitosan, graphene had a good pH-responsive ability and could be switched reversibly between a well dispersed and a more aggregated state by adjusting pH from 4 to 9.
3. Results demonstrated that as-prepared graphene had the peroxidase-like catalytic activity, and the optimal pH and temperature was 4 and  $42 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectively, which was similar to the peroxidase. The catalytic activity of graphene was 45 times higher than that of GO and 4 times higher than that of RGO with the same concentration of  $30 \text{ } \mu\text{g mL}^{-1}$ . The excellent electrochemical property of as-obtained graphene indicated that the high peroxidase catalytic activity was attributed to the fast electron transfer on the surface of graphene. At last as-obtained graphene was used to determine hydrogen peroxide in three real water samples with satisfactory results.

4. Further experiments were carried out to study the application of as-obtained graphene in the DA biosensor. The results indicated that the oxidation of DA and AA in graphene-modified electrode was an adsorption-desorption control. The graphene-chitosan-modified electrode had a good responsive ability to the oxidation of DA alone. However, it could not detect the dopamine selectively in the presence of AA, which was due to the existence of chitosan. The dispersion of graphene-chitosan was further treated by centrifuging, washing, and dispersing in acrylic acid solution. The electrode modified by graphene-acrylic acid dispersion could detect DA selectively in the presence of large excess of AA, and the detection limit of DA could be as low as 8.3 nM

**Key words:** Graphene; Peroxidase-like; Catalytic activity; Biosensor

# 目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
目 录.....	IV
Contents.....	VI
<b>第一章 绪论</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 石墨烯的结构与性质</b> .....	<b>1</b>
1.1.1 石墨烯的结构.....	1
1.1.2 石墨烯的性质.....	2
<b>1.2 石墨烯制备的研究现状</b> .....	<b>4</b>
1.2.1 机械剥离法.....	4
1.2.2 外延生长法.....	4
1.2.3 化学气相沉积法.....	5
1.2.4 氧化石墨烯的化学还原法.....	7
1.2.5 电化学法.....	8
1.2.6 液相剥离法.....	8
<b>1.3 石墨烯基生物传感器概述</b> .....	<b>9</b>
<b>1.4 本论文的选题依据及其研究思路</b> .....	<b>10</b>
<b>参考文献</b> .....	<b>12</b>
<b>第二章 壳聚糖剥离石墨制备石墨烯及其表征</b> .....	<b>23</b>
<b>2.1 引言</b> .....	<b>23</b>
<b>2.2 实验部分</b> .....	<b>23</b>
2.2.1 实验试剂.....	23
2.2.2 实验仪器.....	24
2.2.3 实验方法.....	24
2.2.4 样品表征.....	25
<b>2.3 结果与讨论</b> .....	<b>26</b>

2.3.1 石墨烯的形貌与结构表征.....	26
2.3.2 壳聚糖浓度对石墨烯收率的影响.....	34
2.3.3 超声时间对石墨烯收率的影响.....	35
2.3.4 pH 对石墨烯分散液稳定性的影响.....	36
2.3.5 石墨烯浓度的测量.....	39
<b>2.4 本章小结.....</b>	<b>40</b>
<b>参考文献.....</b>	<b>42</b>
<b>第三章 石墨烯基生物传感器的构建.....</b>	<b>46</b>
<b>3.1 引言.....</b>	<b>46</b>
<b>3.2 实验部分.....</b>	<b>47</b>
3.2.1 实验试剂.....	47
3.2.2 实验仪器.....	47
3.2.3 实验方法.....	48
<b>3.3 结果与讨论.....</b>	<b>50</b>
3.3.1 过氧化氢的识别.....	50
3.3.2 多巴胺的识别.....	65
<b>3.4 本章小结.....</b>	<b>78</b>
<b>参考文献.....</b>	<b>80</b>
<b>第四章 结论与展望.....</b>	<b>85</b>
<b>4.1 结论.....</b>	<b>85</b>
<b>4.2 展望.....</b>	<b>86</b>
<b>硕士期间发表论文情况.....</b>	<b>87</b>
<b>致谢.....</b>	<b>88</b>



# Contents

<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	1
<b>1.1 Structure and properties of graphene</b> .....	1
1.1.1 Structure of graphene.....	1
1.1.2 Properties of graphene .....	2
<b>1.2 Research progress of graphene preparation</b> .....	4
1.2.1 Mechanical exfoliation .....	4
1.2.2 Epitaxial growth.....	4
1.2.3 Chemical vapor deposition.....	5
1.2.4 Chemical reduction of graphene oxide.....	7
1.2.5 Electrochemical synthesis .....	8
1.2.6 Liquid-phase exfoliation.....	8
<b>1.3 Overview of graphene-based biosensor</b> .....	9
<b>1.4 Objectives and conceivability of this dissertation</b> .....	10
<b>References</b> .....	12
<b>Chapter 2 Preparation and characterization of graphene</b> .....	23
<b>2.1 Introduction</b> .....	23
<b>2.2 Experimental</b> .....	23
2.2.1 Reagent.....	23
2.2.2 Instrument.....	24
2.2.3 Method.....	24
2.2.4 Characterization of graphene .....	25
<b>2.3 Results and discussion</b> .....	26
2.3.1 Morphology and structure characterization of graphene.....	26
2.3.2 Effect of chitosan concentration on the yield of graphene .....	34
2.3.3 Effect of ultrasonic time on the yield of graphene.....	35
2.3.4 Effect of pH on the stability of dispersion .....	36
2.3.5 Measurement of graphene concentration.....	39
<b>2.4 Conclusions</b> .....	40
<b>References</b> .....	42
<b>Chapter 3 Constructure of graphene-based biosensor</b> .....	46

<b>3.1 Introduction</b> .....	46
<b>3.2 Experimental</b> .....	47
3.2.1 Reagent.....	47
3.2.2 Instrument.....	47
3.2.3 Method.....	48
<b>3.3 Results and discussion</b> .....	50
3.3.1 Dectection of H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	50
3.3.2 Dectection of dopamine.....	65
<b>3.4 Conclusions</b> .....	78
<b>References</b> .....	80
<b>Chapter 4 Conclusions and prospect</b> .....	85
<b>4.1 Conclusions</b> .....	85
<b>4.2 Prospect</b> .....	86
<b>Publication</b> .....	87
<b>Acknowledgements</b> .....	88

## 第一章 绪论

### 1.1 石墨烯的结构与性质

2004年,英国曼彻斯特大学科学家 Geim 及 Novoselov 等[1]利用微机械剥离技术剥离石墨,制备了石墨烯,在世界范围内掀起了一股新的碳材料的研究热潮。在石墨烯被发现之前,碳的二维晶体结构是否实际存在,在学术界一直存在争议。一种较普遍的观点认为,任何二维晶体在一定温度下不会稳定存在。理论上也同时预测,大石墨烯分子或者层片不可能结晶生长[2, 3]。石墨烯的发现,推翻了严格二维晶体无法在有限温度下存在的理论,对凝聚态物理的发展产生了重大的影响。2010年诺贝尔物理学奖授予了 Geim 和 Novoselov,以表彰他们在石墨烯领域的卓越研究,至此,关于二维石墨烯纳米材料的研究引起了一股狂潮。

#### 1.1.1 石墨烯的结构

简单地说,石墨烯是指将石墨层层剥离开来得到的单层片,由原子力显微镜技术可知其仅有一个碳原子尺寸厚,约为 0.334 nm。完美的石墨烯只包括类似苯环的六边形单元,是一种由  $sp^2$  杂化的碳原子紧密排列而成的蜂窝状晶体结构,这些 C-C ( $sp^2$ ) 键致使石墨烯具有优异的结构刚性。石墨烯每个晶格内有三个  $\sigma$  键,其中的 C-C 键长约为 0.142 nm,连接十分牢固,形成稳定的六边形。垂直于晶面方向上的  $\pi$  键在石墨烯导电过程中起到了很大的作用,而且  $\pi$  键的电子比  $\sigma$  键电子活泼,容易参与化学反应。当在石墨烯中引入五边形和七边形,就会在平面结构中形成缺陷,如果只有一个单独的五边形存在,则石墨烯平面就会发生卷曲,如果有十二个五边形则会形成一个零维的富勒烯[4]。相反,如果只有一个单独的七边形存在,则石墨烯平面会形成马鞍形。因此添加不同的五边形和七边形会形成各种不同的复杂形状。如图 1-1 所示,由一个石墨烯片能够制出多种不同形状不同维数的碳材料,它们可以通过进一步翘曲形成零维的富勒烯,沿一定的角度卷曲形成一维的碳纳米管,通过层层堆叠形成三维的石墨,因此石墨烯是构成其它维度碳材料的基本单元。

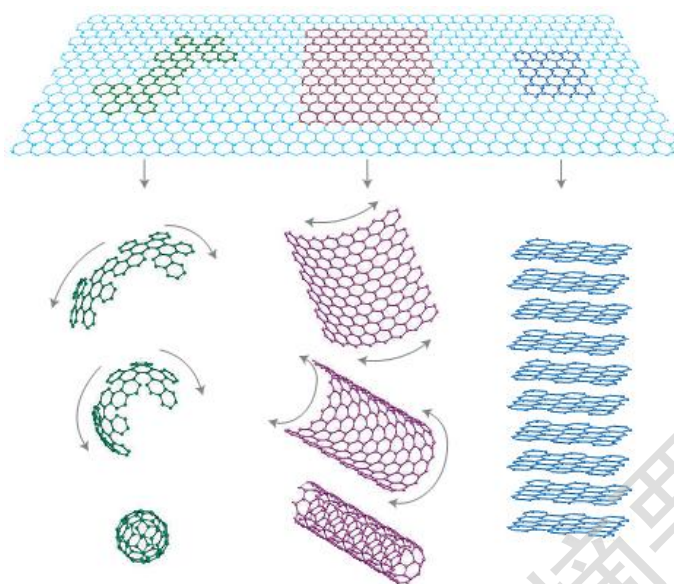


图 1-1 石墨烯及其派生物的示意图[5]

Figure 1-1 Schematic of graphene and its derivatives

### 1.1.2 石墨烯的性质

石墨烯独特的结构决定了其很多优异的特性。它是一种非常轻的材料，朱宏伟等[4]根据其晶格结构计算出它的面密度为  $0.77 \text{ mg m}^{-2}$ 。Lee 等[6]利用纳米压印技术和离子光刻技术在硅基底形成直径为  $1\sim 1.5 \mu\text{m}$ ，深为  $500 \text{ nm}$  的纳米压痕图案，如图 1-2，然后将机械剥离的石墨烯片沉积到该基底表面，通过原子力显微探针技术测得石墨烯的抗拉强度为  $125 \text{ GPa}$ ，杨氏模量为  $1.1 \text{ TPa}$ ，强度极限为  $42 \text{ N m}^{-1}$ 。

日常所用钢的强度极限大多分布在  $0.25\times 10^9 \sim 1.2\times 10^9 \text{ N m}^{-2}$ 。如果将钢做成同石墨烯一样的厚度 ( $\sim 0.334 \text{ nm}$ )，则可以推算出它的二维强度极限为  $0.084 \sim 0.4 \text{ N m}^{-1}$ 。由此我们可以看出理想石墨烯的强度约为普通钢的 100 倍。面积为  $1 \text{ m}^2$  的石墨层片可承受  $4 \text{ kg}$  的质量。在很多材料研究中，通常以炭黑或者石墨作为填料来改善材料的结构与性能，同样，石墨烯从发明以来在纳米材料科学与技术领域的应用就得到巨大关注，一系列研究表明，石墨烯作为一种典型的二维增强相[7]，在复合材料领域具有潜在的应用价值。在室温条件下，石墨烯的热导率约为  $5 \text{ kW m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [8]，高于碳纳米管和金刚石，是同样温度下铜的热导率 ( $401 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) 的 10 倍多，其理论比表面积可达  $2630 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ [9]，最近实验[10-14]与理论[15-17]研究表明石墨烯在气体分子与生物分子的检测中具有巨大的应用潜力。

Geim 等[18]利用单层石墨烯片制成的传感器可以感应单个原子或分子，其依据的原理是当气体分子吸附或者脱离石墨烯表面时，吸附的分子改变了石墨烯的局部载流子浓度，导致电阻发生阶跃性变化。此外石墨烯具有密度低、化学性能稳定和表面容易功能化等特性，有望在清洁能源技术中得到重大应用[19-23]。Ruoff 等[20]制备了基于还原石墨烯的粉末材料，利用比表面积检测法测得其比表面积为  $640 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ，在 1 个大气压下，77 K 所得石墨烯材料对氢气的吸收能力为 0.68%。石墨烯具有优异的光学性能，理论和实验结果均表明，单层石墨烯吸收 2.3% 的可见光，即透过率为 97.7%，而且随着石墨烯层数的增加，透过率呈线性递减[24, 25]。如图 1-3 所示，从基底到单层石墨烯、双层石墨烯的可见光透射率依次相差 2.3%，因此可以根据石墨烯薄膜的可见光透射率来估算其层数。

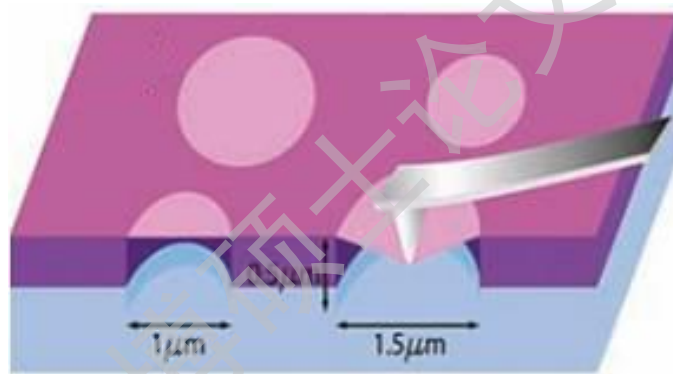


图 1-2 纳米压痕技术测量石墨烯片力学性能的原理图[6]

Figure 1-2 Schematic of nanoindentation on measurement of the mechanical properties of monolayer graphene

另外，石墨烯还具有非常出色的导电性。作为一种零能带间隙的半导体，石墨烯表现出二级电场效应，而且它的载流子可以在电子与空穴之间轮流转变，其密度可以达到  $10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ，室温迁移率能够达到  $15000 \text{ cm}^2 \text{ V s}^{-1}$ [1, 26, 27]。石墨烯之所以具有好的导电能力，是因为它的每个碳原子均为  $\text{sp}^2$  杂化，并贡献剩余一个 p 轨道电子形成  $\pi$  键， $\pi$  电子可以自由移动。由于原子间作用力非常强，在常温下，即使周围碳原子发生挤撞，石墨烯中的电子受到的干扰也很小。电子在石墨烯中传输时不易发生散射，迁移率可达  $2 \times 10^5 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ [28]，约为硅中电子迁移率的 140 倍。其电导率可达  $10^6 \text{ S m}^{-1}$ [29]，石墨烯的面电阻为  $31 \Omega (\text{sq})^{-1}$ ，是室温下导电性最佳的材料。

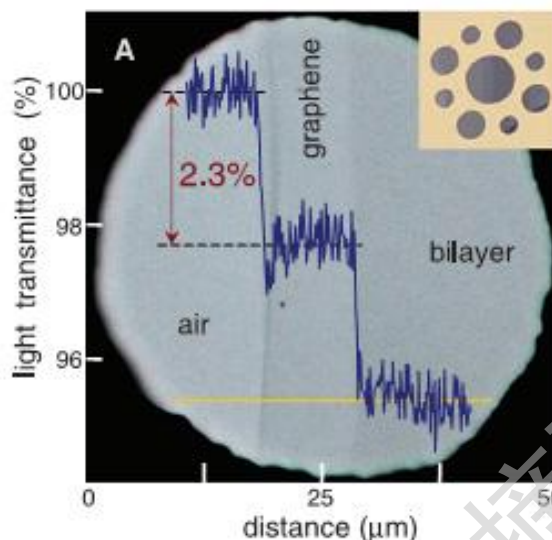


图 1-3 石墨烯的光学性能图[25]

Figure 1-3 The optical property of graphene

## 1.2 石墨烯制备的研究现状

### 1.2.1 机械剥离法

石墨层片之间以较弱的范德华力结合,简单施加外力即可从石墨上直接将石墨烯剥离下来。2004年 Geim 等人最初发现石墨烯时就是利用胶带,从高定向热解石墨晶体上反复撕揭,随后将粘有石墨烯的胶带在丙酮中超声,再用硅片将分散在丙酮中的石墨烯捞出并观察到石墨烯薄膜[1],其中石墨烯薄膜的厚度可以通过透射电子显微镜(TEM)、原子力显微镜(AFM)及拉曼光谱等技术得到确定[30-32]。这种方法虽然能制备出大片层,高质量的石墨烯,但是费时费力,产率以及产物中石墨烯的单层率也极低,因此不可能用这种方法大规模的生产石墨烯,而仅适合于石墨烯的基础性研究[5]。

### 1.2.2 外延生长法

外延生长法是以单晶碳化硅片(SiC)为原料,将其表面温度升高到 1200 ~ 1600 °C,由于硅的升华速率要高于碳,所以在升温过程中过量的碳会留在表面,最后重新排列成类似石墨烯的结构,得到外延生长的石墨烯[33-38]。例如,

Shivaraman 等[33]将化学机械法抛光的 4H-SiC 基底在 1400 °C 下真空加热 1 h, 得到了增长的石墨烯, 证明了立方体晶格的  $\beta$ -SiC 也可以用来制备石墨烯。Berger 等[37]将单晶 4H 或 6H-SiC 表面进行氧化或氢气刻蚀后, 在超低压高真空条件下进行电子轰击, 加热到 1000 °C 以去除表面的氧化物, 然后升温至 1250~1450 °C, 保持恒温 1~20 min, 获得增长的石墨烯薄片, 其厚度由加热温度决定。图 1-4 为石墨烯在 SiC 基片上的低能电子衍射 (LEED) 谱及扫描隧道电子显微镜图像 (STM), 显示出石墨烯中碳的六边形晶格特性。

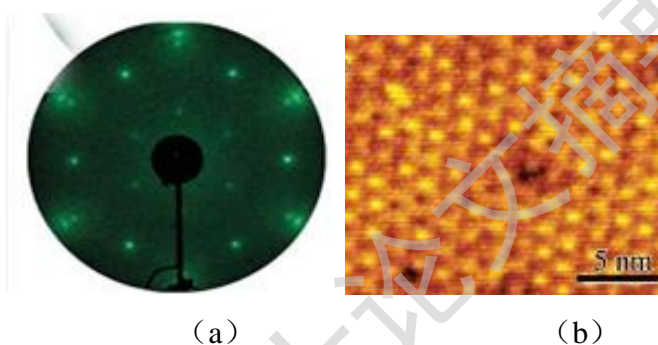


图 1-4 SiC 外延生长法制备的石墨烯的 (a) LEED 谱; (b) STM 图像[37]

Figure 1-4 Epitaxial growth of graphene on SiC (a) LEED spectrum; (b) STM image

Varchon 等[39]通过实验证明在富硅的和富碳的晶面均能形成石墨烯, 其中富硅晶面所形成的石墨烯结构较规整, 而富碳晶面形成的石墨烯膜形成堆叠的无序结构。但是这些多层的石墨烯却能表现出良好的电学性能, 用它制备的顶级门控晶体管 (top-gated transistor) 的电子迁移率能达到  $5000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 。外延生长法的优势在于它能在单一的基体上制备多种器件 (如晶体管), 但是这种方法制备条件较苛刻, 需要高温, 高真空或惰性气氛及单晶基底, 而且生产的石墨烯片层数不一, 基底掺杂容易影响石墨烯的电学性能, 所以尚不能满足电子器件的应用要求[40]。除 SiC 外, 对某些含碳金属进行真空加热, 也会在金属表面形成石墨烯[41]。

### 1.2.3 化学气相沉积法

通过微机械剥离法, 可以生产高质量大尺寸的石墨烯, 但是产率太低。目前, 可以用来代替机械剥离法, 而且能够大量生产石墨烯的方法就是化学气相沉积

(Chemical Vapor Deposition, CVD) [42-50]。它是以有机气体、液体或是固态物质作为碳源，将其置于高温、气态条件下发生反应，生成的碳原子会沉积在加热的固态基底表面并逐渐生长成连续的石墨烯薄膜。

Li 等[42]利用 CVD 法，在 1000 °C 条件下以甲烷和氢气的混合物作为前驱物，在铜箔表面合成了大面积，高质量，均一的石墨烯薄膜。所得石墨烯薄膜主要为单层，仅有少于 5% 的区域为多层。特别要强调的是，他们不仅实现了在沉积有 300 nm 厚铜箔的硅基底上生长石墨烯的办法，而且能够将所得石墨烯薄膜很容易地转移到其它的基底上面，比如 SiO<sub>2</sub>/Si 或者玻璃。

微波拉曼增强 CVD 法也是一种经常用来大量生产石墨烯的方法，但是这种方法价格相对昂贵而且很容易生成无定形碳等副产物[43]。Dervishi 等[44]发明了一种利用无线电波作为反应催化剂的 CVD 法，用来生产大尺寸石墨烯，这种方法不但大大减少了反应过程中的能量消耗，而且阻止了无定形碳或者其它副产物的产生。Wang 等[49]采用微波增强化学气相法在包裹 Ni 的 Si 衬底上生长了 20 nm 左右的石墨烯片，但是石墨烯片中引入了微量杂质 Ni 元素，对其性能造成了一定的影响。

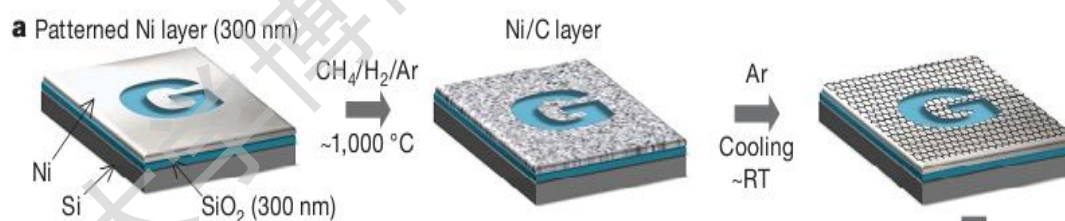


图 1-5 CVD 法制备石墨烯示意图[29]

Figure 1-5 Schematic of preparing graphene by CVD

Kim 等[29]报道了在较薄的镍层上采用 CVD 方法合成大尺度石墨烯层，其中通过改变催化金属镍层的厚度和沉积时间等可以控制石墨烯的层数。如图 1-5，它们将基底预先图案化，最后获得了各种尺寸和形状的石墨烯薄膜，而且能够将图案化的石墨烯薄膜转移到任意的衬底，为大尺寸生产石墨烯电极和设备提供了有效的方法。

Reina 等[50]在多晶镍层上采用常压化学气相沉积法制成大尺寸的单层和数层石墨烯片薄膜，并能将膜层转移到普通的衬底，沉积的膜层厚度在 1-12 原子



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库