

学校编码: 10384

分类号 \_\_\_\_\_ 密级 \_\_\_\_\_

学 号: 23120141153109

UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

**微型 G-FET 器件研制系统及其关键技术**

**Micro-System of G-FET Device Development and its Key  
Technology**

陈金龙

指导教师姓名: 郭东辉 教授

专 业 名 称: 电子与通信工程

论文提交日期: 2017 年 月

论文答辩时间: 2017 年 月

学位授予日期: 2017 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2017 年 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( )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):

年 月

---

厦门大学博硕士学位论文摘要库

---

## 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）：

年 月 日

---

## 摘要

GFET（石墨烯场效应管）以其超高的电导率和极小的器件尺寸有望续写摩尔定律的神话，成为新一代半导体器件。而构成 GFET 的核心材料——石墨烯的高品质制备是研究微纳器件性能及其应用的基础和前提。作为传统 CVD 法和 MEMS 技术的结合—— $\mu$ CVD（微型化学气相沉积）系统具有低成本、高效率、可重复性等优势，极大地促进了纳米材料制备方案的改进及其应用的发展。

本文首先介绍了 GFET 的结构特征和制备工艺，相应地阐述了石墨烯的特性、转移技术、工艺目标等，接着从  $\mu$ CVD 系统的三个关键技术——结构设计、温度测控和显微成像展开论述。结构设计技术解决了  $\mu$ CVD 芯片的温度分布问题，使电流产生的焦耳热均匀分布在反应平台上；温度测控技术解决了  $\mu$ CVD 系统中影响石墨烯生长质量的决定因素——温度的精确检测和稳定控制问题；显微成像技术作为  $\mu$ CVD 系统生长石墨烯实验中的辅助监控手段，其自动聚焦和图像拼接成为整个成像系统的关键。

本论文的主要工作及技术创新点体现在：

(1) 基于  $\mu$ CVD 系统的理论模型分析，采用机械设计软件 SolidWorks 2014 绘制  $\mu$ CVD 芯片的 3D 结构，并将其导入到 ANSYS 软件中进行结构、热、电多物理场耦合仿真分析，从而设计出六悬臂加热芯片，确保了反应平台的温度均匀性。

(2) 采用非接触式红外探头对  $\mu$ CVD 系统的温度检测进行设计，运用 STM32 微控制器和模糊 PID 控制算法实现了温度的快速响应、稳定输出。搭建温度测控软硬件平台后进行实验，结果证明可以有效实现高温的检测与控制。

(3) 选用 1400 万像素 CMOS CGU3-1400C 摄像头进行二次开发，提出优化的自动聚焦算子，并用 MATLAB 仿真其聚焦曲线。设计出  $\mu$ CVD 系统显微成像软件，实现  $\mu$ CVD 系统石墨烯的图像采集、处理及拼接融合功能。

此外，本文还就整个  $\mu$ CVD 系统的平台搭建、设备选型、输气方案、腔体结构等进行简要设计，并对  $\mu$ CVD 显微成像软件的操作流程进行详细说明，以方便科研人员的使用。

**关键词：**GFET； $\mu$ CVD；石墨烯；温度控制；显微成像

---

厦门大学博硕士学位论文摘要库

---

## Abstract

GFET (Graphene Field Effect Transistor) with its ultra-high conductivity and very small device size is expected to write the myth of Moore's Law, becoming a new generation of semiconductor devices. The GFET's core nanomaterials, graphene's high-quality, large-size preparation is the basis and premise of studying the performance and application of micro-nano devices. The combination of traditional CVD and MEMS technology has the advantages of low cost, high efficiency and repeatability, which greatly promoted the improvement of nanometer material preparation scheme and its application development.

In this paper, the structural characteristics and preparation process of GFET are introduced, and the characteristics, transfer technology, process goal of graphene are described. And then from the  $\mu$ CVD system of the three key technologies, structural design, temperature measurement and control and microscopic imaging discussed.

The main work and technical innovation of this thesis are as follows:

(1) Based on the theoretical model analysis of  $\mu$ CVD system, the 3D structure of  $\mu$ CVD chip was drawn by using SolidWorks 2014, and the structure of the  $\mu$ CVD chip was introduced into ANSYS software to simulate the structure, thermal and electric multi-physics coupling. Ensuring the temperature uniformity of the reaction platform.

(2) The non-contact infrared probe is used to design the temperature detection of  $\mu$ CVD system. The STM32 micro controller and fuzzy PID control are used to realize the rapid response of temperature and stable output. After setting up the temperature measurement and control hardware and software platform, the experiment proves that the high temperature detection and control can be realized effectively.

(3) The 14-million pixels CMOS CGU3-1400C camera was used for secondary development, and an optimized auto focus algorithm was proposed, and the focusing curve was simulated with MATLAB. The  $\mu$ CVD system micro-imaging software is designed to realize the image acquisition, processing and splicing fusion of graphene growth in  $\mu$ CVD system.

This paper also design the entire  $\mu$ CVD system's platform construction, equipment selection, gas transmission program, cavity structure.

**Keywords: GFET;  $\mu$ CVD; Graphene; Temperature control; Microscopic imaging**

---

厦门大学博硕士学位论文摘要库



# 目 录

<b>第一章 绪论</b>	<b>1</b>
1.1 引言	1
1.2 相关技术发展现状	2
1.3 关键技术及其研究进展	4
1.3.1 $\mu$ CVD 结构设计技术	4
1.3.2 $\mu$ CVD 温度测控技术	5
1.3.3 $\mu$ CVD 显微成像技术	7
1.4 论文工作及章节安排	9
1.4.1 论文主要研究内容	9
1.4.2 章节安排	9
<b>第二章 GFET 的结构特征与制备工艺</b>	<b>11</b>
2.1 场效应管的基本结构与特征	11
2.1.1 场效应管的基本结构	11
2.1.2 场效应管的工作原理与特性	12
2.2 GFET 的基本结构与特性	14
2.2.1 石墨烯场效应管的基本结构	15
2.2.2 石墨烯场效应管的工作原理与特性	16
2.3 $\mu$ CVD 制备 GFET 工艺简介	17
2.3.1 石墨烯特性与工艺目标	18
2.3.2 $\mu$ CVD 法石墨烯转移技术	20
2.3.3 $\mu$ CVD 法 GFET 制备原理和流程	22
2.4 本章小结	24
<b>第三章 用于生长石墨烯的<math>\mu</math>CVD 微芯片设计</b>	<b>25</b>
3.1 $\mu$ CVD 系统的理论模型分析	25
3.1.1 温度稳定时间模型	25
3.1.2 气体交换速率模型	31
3.1.3 气体流动状态模型	32
3.2 $\mu$ CVD 微芯片建模与仿真	33

---

3.2.1 ANSYS 有限元分析软件简介	34
3.2.2 $\mu$ CVD 微芯片结构优化	34
3.2.3 $\mu$ CVD 微芯片耦合仿真	37
<b>3.3 仿真结果与讨论</b>	<b>40</b>
<b>3.4 本章小结</b>	<b>42</b>
<b>第四章 <math>\mu</math>CVD 温度测控系统</b>	<b>45</b>
<b>4.1 温度检测技术</b>	<b>45</b>
4.1.1 温度检测技术简介	45
4.1.2 基于红外辐射的测温原理	47
4.1.3 温度检测系统误差分析	49
<b>4.2 温度控制技术</b>	<b>51</b>
4.2.1 温度控制技术简介	52
4.2.2 基于模糊 PID 的控温原理	54
<b>4.3 温度测控系统硬件设计</b>	<b>56</b>
4.3.1 硬件开发平台介绍	56
4.3.2 硬件原理图设计及平台搭建	61
<b>4.4 温度测控系统软件设计</b>	<b>63</b>
4.4.1 软件开发平台介绍	63
4.4.2 温度检测程序设计	65
4.4.3 温度控制程序设计	67
4.4.4 温度测控系统校准实验	68
<b>4.5 本章小结</b>	<b>70</b>
<b>第五章 <math>\mu</math>CVD 显微成像系统</b>	<b>71</b>
<b>5.1 自动聚焦技术</b>	<b>71</b>
5.1.1 传统自动聚焦算法	71
5.1.2 优化自动聚焦算法	74
5.1.3 优化算子比较及分析	75
<b>5.2 图像拼接技术</b>	<b>77</b>
5.2.1 图像拼接原理	77

---

5.2.2 图像预处理-----	78
5.2.3 图像匹配-----	80
5.2.4 图像融合-----	82
<b>5.3 显微成像系统设计-----</b>	<b>83</b>
5.3.1 显微成像总体设计-----	83
5.3.2 图像采集模块-----	85
5.3.3 图像处理模块-----	87
<b>5.4 本章小结-----</b>	<b>88</b>
<b>第六章 <math>\mu</math>CVD 系统使用及说明-----</b>	<b>89</b>
<b>6.1 <math>\mu</math>CVD 系统整体架构-----</b>	<b>89</b>
<b>6.2 <math>\mu</math>CVD 系统装配-----</b>	<b>90</b>
6.2.1 气路装配-----	90
6.2.2 腔体装配-----	94
<b>6.3 <math>\mu</math>CVD 显微成像系统使用说明-----</b>	<b>98</b>
6.3.1 系统设置-----	98
6.3.2 系统操作-----	99
6.3.3 实例测试-----	102
<b>6.4 本章小结-----</b>	<b>103</b>
<b>第七章 总结与展望-----</b>	<b>107</b>
7.1 系统设计总结-----	107
7.2 发展趋势与展望-----	108
<b>参考文献-----</b>	<b>111</b>
<b>攻读硕士学位期间申请的软件著作权及参与项目-----</b>	<b>117</b>
<b>致谢-----</b>	<b>119</b>

---

## Contents

<b>Chapter I Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Introduction	1
1.2 Research Status of Related Technology	2
1.3 Key Technology and its Research Progress	4
1.3.1 $\mu$ CVD Structural Design Technology	4
1.3.2 $\mu$ CVD Temperature Measurement and Control Technology	5
1.3.3 $\mu$ CVD Microscopic Imaging Technology	7
1.4 Main Works and Chapters	9
1.4.1 Main Research Works	9
1.4.2 Chapter Arrangements	9
<b>Chapter II Structural Characteristics and Preparation of GFET</b>	<b>11</b>
2.1 The Basic Structure and Characteristics of Field Effect Transistor	11
2.1.1 The Basic Structure of The Field Effect Transistor	11
2.1.2 The Working Principle and Characteristic of Field Effect Transistor	12
2.2 The Basic Structure and Characteristics of GFET	14
2.2.1 The Basic Structure of Graphene Field Effect Transistor	15
2.2.2 The Principle and Characteristics of Graphene Field Effect Transistor	16
2.3 Introduction to GFET Process for $\mu$ CVD Preparation	17
2.3.1 Graphene Properties and Process Objectives	18
2.3.2 $\mu$ CVD Graphene Transfer Technology	20
2.3.3 $\mu$ CVD GFET Preparation Principles and Processes	22
2.4 Chapter Summary	24
<b>Chapter III <math>\mu</math>CVD Microchip Design for Growth of Graphene</b>	<b>25</b>
3.1 $\mu$ CVD Systematic Theoretical Model Analysis	25
3.1.1 Temperature Stabilization Time Model	25
3.1.2 Gas Exchange Rate Model	31
3.1.3 Gas Flow State Model	32
3.2 $\mu$ CVD Microchip Modeling and Simulation	33
3.2.1 ANSYS Introduction to Finite Element Analysis Software	34
3.2.2 $\mu$ CVD Microchip Structure Optimization	34
3.2.3 $\mu$ CVD Microchip Coupling Simulation	37

<b>3.3 Simulation Results and Discussion</b>	<b>40</b>
<b>3.4 Chapter Summary</b>	<b>42</b>
<b>Chapter IV <math>\mu</math>CVD Temperature measurement and control system</b>	<b>45</b>
<b>4.1 Temperature Detection Technology</b>	<b>45</b>
4.1.1 Brief Introduction to Temperature Detection Technology	45
4.1.2 Radiation Principle Based on Infrared Radiation	47
4.1.3 Error Analysis of Temperature Detection System	49
<b>4.2 Temperature Control Technology</b>	<b>51</b>
4.2.1 Brief Introduction to Temperature Control Technology	52
4.2.2 Control Principle of Fuzzy PID Based on Fuzzy	54
<b>4.3 Hardware Design of Temperature Measurement and Control System</b>	<b>56</b>
4.3.1 Hardware Development Platform	56
4.3.2 Hardware Schematic Design and Platform Construction	61
<b>4.4 Software Design of Temperature Measurement and Control System</b>	<b>63</b>
4.4.1 Software Development Platform	63
4.4.2 Temperature Detection Program Design	65
4.4.3 Temperature Control Program Design	67
4.4.4 Temperature Measurement and Control System Calibration Experiment	68
<b>4.5 Chapter Summary</b>	<b>70</b>
<b>Chapter V <math>\mu</math>CVD Microscopic Imaging System</b>	<b>71</b>
<b>5.1 Automatic Focus Technology</b>	<b>71</b>
5.1.1 Traditional Auto Focus Algorithm	71
5.1.2 Optimize the Auto Focus Algorithm	74
5.1.3 Comparison and Analysis of Optimization Operators	75
<b>5.2 Image Stitching Technology</b>	<b>77</b>
5.2.1 Image Stitching Principle	77
5.2.2 Image Preprocessing	78
5.2.3 Image Matching	80
5.2.4 Image Fusion	82
<b>5.3 Microscopic Imaging System Design</b>	<b>83</b>
5.3.1 Microscopic Imaging Overall Design	83
5.3.2 Image Acquisition Module	85
5.3.3 Image Processing Module	87

---

<b>5.4 Chapter Summary</b> -----	<b>88</b>
<b>Chapter VI <math>\mu</math>CVD System Use and Description</b> -----	<b>89</b>
<b>6.1 <math>\mu</math>CVD The Overall Architecture of the System</b> -----	<b>89</b>
<b>6.2 <math>\mu</math>CVD System Assembly</b> -----	<b>90</b>
6.2.1 Air Assembly-----	90
6.2.2 Cavity Assembly-----	94
<b>6.3 <math>\mu</math>CVD Microscopic Imaging System Instructions</b> -----	<b>98</b>
6.3.1 System Settings-----	98
6.3.2 System Operation-----	99
6.3.3 Instance Test-----	102
<b>6.4 Chapter Summary</b> -----	<b>103</b>
<b>Chapter VII Summary and Prospect</b> -----	<b>107</b>
7.1 Design Summary-----	107
7.2 Trends and Prospects-----	108
<b>References</b> -----	<b>111</b>
<b>Software Copyrights and Participation Projects</b> -----	<b>117</b>
<b>Acknowledgements</b> -----	<b>119</b>

# 第一章 绪论

## 1.1 引言

自从摩尔定律统治的近半个世纪以来,信息技术进入了飞速发展时期,产业规模、效益也急剧攀升,电子消费类产品、智能穿戴等新兴的黑科技产品层出不穷,使人们的精神生活变得丰富多彩。随着云计算、大数据、区块链等技术的异军突起,未来 10 年智能信息产业将迎来新的变革与布局,而这些技术回归到底层硬件,都得基于集成电路的发展。众所周知,摩尔定律已开始进入瓶颈期,芯片开发者尽力缩短器件特征尺寸的同时,也致使其接近材料的物理极限,就是说集成电路开始进入后摩尔时代<sup>[1,7,9]</sup>。后摩尔时代使得集成电路发展线路不再明晰、系统复杂度持续增长,这些急需解决的问题使得科研人员朝新的方向去探索。新器件、新结构、新材料的不断研发使得续写摩尔神话成为可能,其中具有高载流子迁移率的沟道材料——石墨烯成为科研人员的宠儿。

石墨烯是一种新兴的具有单原子层厚度的二维平面材料,也是碳的同素异形体。其实在之前的很久一段时间,大家普遍认为,严格的二维晶体结构由于不具备热稳定性而不能独立存在,更多的是以三维碳纳米材料石墨、金刚石等形式存在<sup>[2,3]</sup>。直到 2004 年,英国曼彻斯特大学的安德烈·海姆(Andre Geim)教授和康斯坦丁·诺沃肖诺夫(Kostya Novoselov)博士通过胶带以微机械力高温剥离石墨的方法首次得到石墨烯<sup>[4]</sup>,但是机械剥离法获取的石墨烯存在效率低,膜厚均匀性差等问题。所以,石墨烯的高效生长一直以来成为 Graphene 研制人员面临的挑战,同时也给研究学者们带来了一股石墨烯制备方法的探索热潮。

石墨烯场效应管的研究使集成电路在尺寸和功耗遭遇“天花板”后再次看到春天,而这一切得益于石墨烯材料的高效稳定量产。目前相对成熟、得到验证的制备方法有微机械剥离法、热解 SiC 法、化学气相沉积(Cheical Vapor Deposition, CVD)法<sup>[5,6,8]</sup>等。各种方法制备效果优劣兼备,权衡利弊,化学气相沉积法以其设备简单、方便量产,转移技术成熟等优点得到广泛应用。

传统化学气相沉积法虽然在同等制备方法上有一定的优势,但是该方式也存在实验设备沉重、器材昂贵、重复实验时间成本高、反应时间长的问题,所以 CVD 石墨烯量产之路依旧艰辛。如果石墨烯制备这个源头问题得不到解决,那集

---

成电路的未来依旧迷茫。随着微机电加工技术的日渐完善，传统 CVD 系统微型化为探索石墨烯制备开辟了新的道路，对石墨烯场效应管的研发也起到了积极的推动作用。

## 1.2 相关技术发展现状

石墨烯的优良特性吸引着众多科研人员对其应用进行探索，而应用的前提是可以高效率、低成本、方便快捷地获取晶格完整、尺寸完备的石墨烯。所以更多的研究人员投身到石墨烯的制备上，并且逐步形成了相对成熟的制备方法。目前石墨烯制备技术有机械剥离法<sup>[10]</sup>、SiC 外延生长法<sup>[11]</sup>、氧化还原法<sup>[12]</sup>、化学气相沉积法(CVD)<sup>[13,14,17,18]</sup>等。机械剥离法是通过胶带连续撕离高定向热解石墨而得到石墨烯的简便方法，该方法虽然成本低廉，操作简便，但是费时费力、自动化程度低、质量难以得到保证；SiC 外延生长法是直接高温加热 SiC 单晶，石墨烯从其表面析出，相应的生长厚度由加热温度进行控制，但是生长过程受衬底影响较大，并且石墨烯的导电性也会相应降低，所以该方法不宜量产石墨烯<sup>[15]</sup>；氧化还原法是基于传统的化学反应进行的，先氧化石墨原料，超声分离后再还原得到石墨烯粉末，缺点是氧化还原制备难度高，石墨烯易出现结构缺陷继而导致部分性能降低<sup>[16]</sup>；化学气相沉积法(CVD)就是碳源气体在载气、保护气体配比下，高温流过金属薄膜表面发生裂解，碳原子在基体表面析出石墨烯的过程。和其它几种方法相比，化学气相沉积法碳源丰富低价，催化剂种类多，关键是该方法成熟稳定，可重复性强，制备出的石墨烯面积大，形貌完整，过程可控。总的来说，化学气相沉积法(CVD)深受碳纳米科研工作者们热捧，并在持续实践中总结经验，不断完善。

中国政府在 2014 年提出“中国制造 2025”，提前布局未来的产业，旨在优化本国的制造业，完成由中国制造到中国智造、中国创造的过渡。这其中传感器/MEMS（Micro-Electro-Mechanical System，微机电系统）技术与其关系紧密。MEMS 是一个相对独立的智能系统，其内部尺寸在微米级别甚至更小，概括来说 MEMS 具有微型化、智能化、精细化以及集成化特性<sup>[19-24]</sup>。文献[25]用 MEMS 技术建立一套半导体测试芯片，用 CMOS-MEMS 工艺获取制作过程中的数据参数来对材料特性和设备性能进行检测。文献[26]基于 SiGe-MEMS 技术集成的



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