**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**

**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GFET的核心纳米材料——石墨烯的高质量大尺寸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——μCVD（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，相应的阐述了石墨烯的特性、转移技术、工艺目标等，接着从μCVD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μCVD芯片的温度分布问题，使电流产生的焦耳热能量均匀分布在反应平台上；温度测控技术解决了μCVD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μCVD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μCVD系统的理论模型分析，采用机械设计软件SolidWorks 2014绘制μCVD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μCVD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μCVD系统显微成像软件，实现μCVD系统石墨烯生长的图像采集、处理及拼接融合功能。

此外，本文还就整个μCVD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μCVD显微成像软件的操作流程进行详细说明，以方便工程科研人员的使用。

**关键词：**GFET；μCVD；石墨烯；温度控制；显微成像

# 绪论

## 引言

在过去由摩尔定律统治的近半个世纪以来，信息技术行业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、智能穿戴等新兴带有黑科技感的应用层出不穷，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，芯片开发者在想方设法缩短其特征尺寸，几近材料的物理极限，也就是说集成电路开始进入后摩尔时代[1,7,9]，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，其中高传输速度的沟道材料——石墨烯成为科研人员的宠儿。

石墨烯是一种新兴的纳米材料，特点是水平方向上的结构无限重复，垂直方向上拥有一个碳原子的厚度，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，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，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。所以石墨烯的高效可控生长成为一直以来Graphene制备系统开发面临的挑战，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大尺寸高效稳定量产，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(Chemical Vapor Deposition，CVD)法等，各种方法制备效果优劣兼备，权衡利弊，化学气相沉积CVD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CVD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，所以对石墨烯产出方法达到高效批量的目标依然任重而道远，如果不在石墨烯材料制备这个源头问题上工夫尽施，那集成电路的未来依旧迷茫。随着微机电加工MEMS的技术日渐完善，传统CVD系统微型化为探索石墨烯制备开辟了新的道路，在解决传统CVD法问题的同时，也对石墨烯场效应管的研发不管在基础研究还是工程应用上，都起到了深远的意义。

## 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[10]、SiC外延生长法[11]、氧化还原法[12]、化学气相沉积法(CVD)[13,14,17,18]等。机械剥离法是最原始的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[15]；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进而导致部分性能降低[16]；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。和其他几种方法相比，化学气相沉积法碳源丰富低价，催化剂选材种类多，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2012年提出中国制造2025，提前布局规划未来的产业，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[24]。文献[25]用MEMS技术建立一套半导体测试芯片，用CMOS-MEMS获取工艺制作过程中的数据参数来对材料特性和设备性能进行反馈。文献[26]基于SiGe-MEMS技术集成的CMOS加速度计尺寸只有。为了解决传统CVD法在材料合成上的时间长、成本高、不易转移的弊端，科学家们正试图将CVD微型化，即结合MEMS技术，完成纳米新材料的原位合成。早在2003年UC Berkeley传感器和执行器中心（Berkeley Sensor and Actuator Center）的研究人员成功地在桥型MEMS上生长出了碳纳米管[19]。文献[19]根据传统的CVD法工作原理，采用乙烯为碳源，催化剂是5nm的镍、铁混合物颗粒，在22um厚的重掺杂悬臂上生长出5um长的碳纳米管，生长温度和速度分别为850-1100℃、0.25um/min。相较于传统CVD，该系统仅仅在生长衬底上采用微小化构型，温度供给还是采用传统CVD设备，生长周期长。

直到2009年，μCVD(Micro-CVD，Micro Chemical Vapor Deposition，微型化学气相沉积)被Berkeley传感器中心的研究人员首次提出，该系统结合MEMS技术将传统CVD流程整套微型化，并在其上成功生长出石墨烯和碳纳米管。文献[20]使用MEMS技术在SOI晶圆上刻蚀直径5um的通孔，同样在催化剂Fe纳米微粒、氢气和乙烯配比下，通电电压16.65V，电流128mA产生高温750℃的情况下生长出100um长的碳纳米管。2010年，周勤博士在IEEE国际MEMS大会上又首次提出生长石墨烯的μCVD系统。文献[21]提出在通电温度达到1000℃一个标准大气压下，催化剂是镍微粒，并将甲烷和氢气作为反应气体，在的加热平板上生长出了单层石墨烯。早期版本的μCVD芯片在生长碳纳米管时发现其生长质量不好，碳纳米管出现蜷曲折叠现象，以致影响其特性，文献[22]对文献[20]的芯片结构进行改进，在μCVD芯片顶部50um处增加一块石英平板来导流，使反应气体的流动状态处于层流，从而生长出没有蜷曲结构完整的碳纳米管。2011年，文献[23]的工作展示了用μCVD芯片生长的单壁碳纳米管直接无损沉淀在一张A4纸上。这些文献的探索都揭示了以化学气相沉积为基础的μCVD工艺旨在将纳米材料生长过程微型化，在微米尺寸的生长环境下，由微加热器短时稳定产生高温，从而高速可靠地合成尺寸和结构可控的碳纳米器件。但是生长过程中的关键因素——温度的分布均匀性问题一直没有得到妥善解决，从而影响石墨烯等材料的质量及合成效率。

## 关键技术及其研究进展

### μCVD结构设计技术

μCVD系统的设计灵感来源于传统化学气相沉积技术，影响CVD系统制备完整大尺寸纳米材料的因素有碳源气体、催化剂、热台温度、载气、气压和衬底的选择。国内外很多科研人员对传统CVD系统的制备过程进行了大量的研究，浙江大学何丕模团队采用CVD法，用镍催化剂在硅纳米线上制备了纳米尺寸的石墨烯，表征后得出结论，在硅纳米线上生长石墨烯，质量随镍厚度的增加而提高[27]。文献[30]用简单的气相沉积技术生长了ZnO纳米线，并探索铜催化剂厚度、气压、温度对生长质量的影响。很多对CVD系统的改进结论都可以运用到μCVD中来。传统CVD设备合成碳纳米管、石墨烯等材料也存在一定的挑战：传统设备体积庞大，成本高，巨大的腔体热容量延长了加热及冷却时间；一定比例的碳源气体和载气在换流时同样需要很长时间；为了加快制备速度，则需要加大气体流速，气流提速的同时也加大了流体的雷诺数，从而流动状态从层流变成紊流，加大了反应的不确定性，从而影响生长质量。微加热器的研制则在很大程度上改善了这一问题，Ehmann等人[31]基于多晶硅研制的加热材料稳定性较差，功耗也达不到理想效果，Belmonte[32]团队设计的四悬臂微加热器虽然降低了功率，但工程应用能力不足，文献[33]设计的微型加热平台以铂为加热电阻丝，将微加热器与纳米材料融合实现了系统小型化、低功耗和高灵敏度。

Berkeley科研人员提出的μCVD系统同样引入微加热器，将传统加热系统的尺寸由数米缩小到数微米，大大减少了反应腔体的热容量，虽然热容量的骤缩减少了工艺的时间成本，但带来的温度问题同样棘手，局部的过高温度甚至会烧坏芯片。2010年，用于制备石墨烯的μCVD芯片结构被提出，如图1.1(a)所示。μCVD芯片使用MEMS技术将反应平台构建于SOI晶圆上，中间加热平台尺寸是，采用DRIE工艺刻蚀六个支撑臂使之处于悬空状态，一方面加大中间热平板与空气的热交换，另一方面缓冲热胀冷缩效应，增加芯片的寿命。加热台通过焊盘固定在基板上，并用引线键合的工艺将焊盘与外部电路连接，反应后加热台的温度分布如图1.1(b)所示，可以看出高温区域集中在六个悬臂处，且与中间加热台温差范围较大。

加热一段时间后，文献[21]采用的降温策略是直接断电，自然冷却，这导致生长的石墨烯有较多的结构缺陷，如图1.2(a)。表征石墨烯可以采用拉曼光谱仪，石墨烯表现出3个频峰，分别叫D-峰，G-峰和2D-峰，其中D-峰表征石墨烯的缺陷程度，文献[21]的实验结果如图1.2(b)。不可忽视的D-峰表明石墨烯存在缺陷。

### μCVD温度测控技术

由上文说明可知，温度——影响μCVD系统石墨烯生长质量的重要因素，开始对加热冷却过程中的时间精度控制提出了严苛的要求。传统CVD因为反应腔体的热容量大，可以采用热电偶来测量温度，并且精度可以达到0.1℃，可是μCVD系统加热平台只有微米级别，传统CVD的测温方法无法完全移植到μCVD系统上。文献[36]采用分布式光频域反射技术(OFDR)对全光纤放大器纤芯内部的不同部位进行温度测量，对未来高功率光纤激光器的温度监测提供参考，但是其应用场景单一，不适用与本系统。文献[37]对铂电阻温度测量精确度的影响因素进行讨论，从而探索了铂电阻温度测量的新方法。张兴红[38]团队设计了一种高精度分体式多声道超声波温度测量仪，是运用超声波测温技术，把被测物体当作传播介质，确定传播长度后，通过测量超声波在被测物中的传播时间计算介质的温度，由于μCVD设备反应腔内需经抽真空处理，而超声波传播需要介质，所以也不能应用于本系统。文献[39]根据不同领域的应用经验，给出了不同的温度监测手段，并提出在实际使用中，应综合考虑被测对象的特征来进行选择，这些特征包括被测对象温度范围、变化周期、精度要求、尺寸大小等。

近些年，辐射测温技术在微型设备中应用广泛，并且得到长足改进与发展，文献[40]主要介绍了红外辐射测温仪的原理、分类、结构以及工程应用，指出红外辐射适合测量微量物体的问题，属于非接触式测温，并且理论上不存在测温上限，据统计，国外辐射温度计的使用比率高达67%，技术成熟，用户普及率高。所以结合μCVD设备，从系统易用、温度范围广等因素的综合考量，设计一套简单易用，精度可靠的基于红外辐射的测控系统十分必要。

温度控制技术同样影响人们的生活生产，对μCVD设备温度的高精度低时延控制，是生长高质量石墨烯的必要条件。随着科技的飞速发展和应用的不断拓新，尤其近些年微电子技术的崛起后，科学工作者对温度控制策略的研究热情与日俱增，也取得的不少进展，如遗传算法[41,42]、模糊理论[43,44]、神经网络PID[45,46]等。模糊控制理论诞生于上个世纪七十年代，Mamdani率先在蒸汽控制中采用模糊推理技术。随后的二十多年里，德国、美国、日本等国学者在智能控制领域相继发表多篇相关文章。我国虽然在温控领域起步晚，但是近些年来在国家科教兴国的大战略下也涌现一大批科研成果。早在1999年，刘兴池[47]团队就在电加热炉中使用SR70模糊控制器，精度达到℃，首次体验了常规控制器无法达到的效果，比如时效性强、稳定可靠高精度等。文献[48]以电热炉温控为对象，对传统PID控制进行优化改进，提出自适应模糊PID控制算法并在PLC上实现，精确性方面得到明显提高。文献[49]指出，在烟草制丝工艺中，气流式烘丝机（HXD）用于烘干、膨胀和定型烟丝，炉温鲁棒性直接影响烟丝质量指标，董伟等人在PID基础上引入温度补偿，实现控温阀门的快速响应，最终使Cpk（过程控制能力指数）从0.68升至1.49，大大提高系统的稳定性。

### μCVD显微成像技术

现代纳米电子学发展至今，因为其构型体积小，芯片结构复杂，已经很难以无损高清方式成像整个装置，这意味着一旦设计和制造流程之间缺少反馈，势必会妨碍生产进度、影响质量控制。显微光学成像技术是对微观样品反射的可见光通过透镜处理，将微观结构放大成像的技术，同样也可以通过数字图像采集器，如CCD、CMOS镜头来进行捕捉记录，最终显示在计算机上并完成后期图像处理等工作。显微成像视觉系统多应用于生物医学、微电子、材料科学、精密光电子等领域，广义上又可以将其分为光学宽视场显微镜、共聚焦显微镜和体视显微镜[50]三个大类。显微成像系统的关键在于对采集到的图像进行符合应用场景的图像处理，例如如何快速聚焦图像，使成像清晰；又比如显微拍照采集的是待测物体的局部图像，如何精确无误地将多幅局部图拼接成全景高清图等。μCVD显微成像系统就面临这样的问题，生长石墨烯的热台尺寸在毫米级，镜头距离热台表面近，需要快速聚焦并且采集图像清晰度高，这样才能对所长石墨烯材料的表面实时准确观察，同时由于采集的是多幅局部图像，后续需要完成图像拼接、融合工作。所以对于μCVD显微成像系统，除了在用于观察石墨烯生长情况的电子目镜选型上下功夫外，自动聚焦、图像拼接和融合技术成为能够完整观察石墨烯生长状况的关键技术。

显微成像通常是一类景深很小的光学系统，这对聚焦技术提出了一定难度，随着基础研究的不断推进和科学技术的不断发展，研究人员开始改进自动聚焦算法，以提高成像效率、精度和稳定性。早在1999年，自动对焦领域最具代表性和里程碑式的一篇文章Focusing Techniques[51]诞生了，其为清晰度评价函数奠定了理论基础。自动聚焦的关键难点在于如何快速准确地确定图像的清晰度，即清晰度评价函数的建模。清晰度评价函数应具备单峰性、精确性、尖锐性和单调性等特征[52,53,71]，普遍的自动聚焦算法是根据空域和频域来划分的，空域分析来看是比较图像灰度变化的剧烈程度，清晰图像比模糊图像有更多的边际信息，具体可分为：灰度梯度法[54,55,56]、灰度差分法[57,58]、灰度方差法[59]和灰度熵法[60,61]等；频域角度来看，离焦是个低通滤波的过程，聚焦图像比离焦图像有更多的细节和高频分量，具体算法有傅里叶变换法[62]、拉普拉斯算子法[58]、小波变化法[63,64]和DCT变换法[65]等。在众多的被动式聚焦算法中，聚焦窗格的选择往往直接影响聚焦的成败，通常采用中心取窗法、多点取窗法等，文献[66]指出了固定窗格大小在聚焦算法中的劣势，并提出使用高斯非均匀采样来增大视窗尺寸，后来出现了很多自适应聚焦窗口选择算法，文献[67][68][69]分别采用基于图像一阶矩、AFSA区域自调节、内容重要度加权的增强算法来改善显微系统的适应性。自动聚焦技术还受到背景杂质和噪声的影响，尤其在拍摄户外复杂场景下的显微图片，四川大学的郭晓博[70]团队在聚焦岩石薄片显微图像时，提出了一种改良版Vollath清晰度评价函数，并且结合爬山算法可以有效地抑制噪声，最终在单峰性和抗噪性上表现优异。文献[72,73]则是从传统的空域聚焦算法角度出发，提出改进型Robert函数，根据自动聚焦函数的评价指标[88]，用新算法与传统的Robert法、灰度差分绝对值法、Brenner函数法作比较，得出改进Robert算法可以增加聚焦的单峰陡峭度，并且采用动态选择聚焦窗口结合大步长和小步长的爬山搜索算法，大大提高了显微视觉系统自动聚焦的稳定性，后来又提出显微视觉系统在大范围视场下自动聚焦及控制策略。

采用适当的自动聚焦算法采集局部图像后，接下来就得完成拼接及融合工作，显微成像系统往往由于其景深小受制于只能拍摄局部图像而无法获取全局场景，而图像拼接及融合技术是运用计算机视觉、计算机图形学自动构建宽视野、高分辨率的图像，近些年已成为图像视觉领域的研究热点并广泛运用于虚拟现实、生物医疗、卫星遥感、机器视觉、消费娱乐等领域。图像拼接的目标是将两张有重叠区域的图像合并成一幅高分辨率大图，关键在于搜寻两幅图的公共区域，明确匹配区域的相对位置。常见的图像配准方法有两种，一种是基于图像灰度的匹配算法，即定义相似度匹配函数，权衡两幅图的灰度相似性信息，具体有模板匹配法[74,75]、快速傅里叶法[76]等；另外一种是基于特征的匹配算法，也就是首先提取图像的颜色、纹理、边角特征，然后与相邻图像比较后配准融合，具体有SIFT[77-84]（Scale Invariant Feature Transform）法、Susan算法[85]和Harris角点检测法[86,87]等。其中SIFT算法由于具备尺度、视角、旋转、光照不变性能够应对噪声干扰而被广泛运用。文献[81]是对传统SIFT算法进行改进，快速提取图像特征后采用加权平均融合算法实现图像完美拼接。而张永梅[82]等人也是改进SIFT算法，对描述子尺度和梯度方向建立最小领域匹配，结合局部均方根误差（RMSE）、RANSAC算子实现彩色图像的拼接工作。

## 论文工作及章节安排

### 论文主要研究内容

### 章节安排

# GFET的结构特征与制备工艺

## 场效应管的基本结构与特征

信息时代是伴随着电子元器件的快速更迭到来的，众所周知，电子管是第一代信息产品的元器件，从诞生之初就不断在与尺寸、重量、可靠性等指标作斗争。1904年，著名英国物理学家弗莱明发明了世界上第一支电子管，标志着世界进入了电子时代。但是随着历史的不断推移，电子管体积大、功耗大、发热厉害、稳定性弱、寿命短等缺点在应用场景的更替中得到充分的暴露。1947年12月16日，威廉·邵克雷(William Shockley)、约翰·巴顿（John Bardeen)和沃特·布拉顿（Walter Brattain）三位伟大的科学家在贝尔实验室研制的世界第一个晶体管预示着信息时代的再次变革，因为晶体管体积小、工艺简单、可靠性高等优点在各种应用场景下弥补了电子管的诸多不足。后来随着平面制作工艺的改进，场效应晶体管也应运而生，逐步成为信息时代大舞台的又一主角。

### 场效应管的基本结构

场效应管和三极管类似，也是一种具有正向受控作用的半导体器件，有结型(JFET)和金属-氧化物-半导体型(MOSFET)之分。

场效应管是以衬底为基础，根据衬底选择P型或N型硅片的不同来进行分类，以P型衬底为例，结构示意见图2.1。在衬底两侧扩散两个高掺杂的N+区，分别是源区和漏区，与P型衬底构成两个基本的P-N结，在源、漏区分别制作一个欧姆电极用来形成导电回路。衬底表面再生长一层二氧化硅(SiO2)薄膜作为绝缘层，其上制作一个欧姆接触电极，称作栅极，用G表示。在工作状态下，源极和漏极之间施加工作电源VDS，源极接正电压，漏极接负电压，同时在接触电极G上引出一个电压VG，其负电压接源极，这样在漏极电压的作用下，场效应管的源区和漏区之间形成N型(即电子型)导电沟道，源区电子通过沟道流向漏区，从而形成自漏区指向源区的电流。

### 场效应管的工作原理与特性

场效应管由两个P-N结组成，导电沟道由多子形成，因此又称作单极型半导体器件。通常用到的金属-氧化物-半导体场效应管(MOSFET)根据衬底选择不同分为P型和N型，每一种又有增强型和耗尽型之分，即EMOS和DMOS。

以N沟道增强型EMOS为例，当场效应管的VG大于一定值时，晶体管导通，这个电压值叫导通电压，通常情况下，VS=0。在栅源电压VGS的作用下，源区和漏区之间形成电子型导电沟道，当然为了形成回路，还需要在源区和漏区之间加上VDS，用来产生正向工作电流ID。

首先，VGS=VDS=0，即不给栅源极和栅漏极施加电压，两个掺杂N+区各自形成PN结，因为被空间电荷区所包围，所以彼此隔断，互不影响；接着施加栅源电压VGS，由于栅极以下的SiO2层和衬底之间在VGS作用下形成平板电容器，从而产生指向衬底的电场，该电场吸引N+区的多子电子和衬底中的少子电子，排斥衬底中多子空穴，从而使两个N+区打通，形成空间电荷区，阻断了源区和漏区；当VGS逐步加大时，平板电容器加大吸引电子的力度，直到空间电荷区电子浓度大于空穴浓度，形成电子型导电沟道，并与N+区相通，将刚开始形成沟道所需的VGS值称作开启电压VGS(th)；这时，在外加正电压VDS的作用下，源区中掺杂的多子电子通过N沟道漂移至漏区，形成自漏区指向源区的漏极电流，很显然，VGS越大，吸引电子能力越强，N沟道电导率越大，而VDS越大，漏极电流ID相应越大。

当形成导电沟道时，较小的漏源电压对沟道的变化影响甚微，而随着VDS的增大，平板电容器的电压也会发生相应变化，导致靠近漏极的沟道深度开始变窄，因为沟道电阻与横截面积成反比，横截面积越小电阻越大，ID增速变缓，直到近漏端的沟道完全被夹断。

综上可以得出，场效应管工作原理体现在：1.流经场效应管漏区和源区的电流完全由沟道中多子决定的；2.场效应管是利用工作电压的变化来改变半导体导电沟道的电阻大小，从而改变导通电流的大小。

在描述场效应管的伏安特性时，常用输出特性和转移特性来表示，其中输出特性曲线族公式（2.1）：

 （2.1）

图2.2显示了N沟道EMOS的输出特性曲线，可见图示可划分可变电阻区、恒流区、截止区和击穿区四个工作区，分别介绍一下各工作区的特性。

当电压满足不等式：、限定时，场效应管工作在可变电阻区，该工作区域内，由、共同决定，见下式：

 （2.2）

式中是自由电子迁移率，是单位面积的栅极电容量，是N沟道的宽度，是沟道长度。由图2.1可以看出与近乎呈线性关系。

恒流区是沟道开始被夹断的工作区域，由电压不等式：、导出，同样可推出漏极电流，式（2.3）显示了的具体来源：

 （2.3）

很显然，式中表示由控制，如果考虑沟道长度调制效应，就可以类比晶体三极管的基区宽度调制效应，引入厄尔利电压，式（2.3）则修正为：

 （2.4）

由以上几个漏极电流公式可以看出，、、也是重要影响因素，但是集成工艺确定后，这几个参数也基本上为定值，所以在电路设计中，导电沟道的宽长比就成为了改变的重要因子了。

截止区是发生在，即导电沟道还没有形成的时候，没有导电沟道，没有多子迁移的通道，就没有电流形成的条件，因此。

当足够大时，很容易在PN结上诱发雪崩击穿，这时候剧增。当然，如果过大，也可以导致绝缘层发生破坏性永久性损坏。

## GFET的基本结构与特性

石墨烯凭借着在载流子迁移率上超高的表现力赢得了广泛的关注，也因此被认为是续写摩尔定律的不二材料，GFET（石墨烯场效应管）也开始成为众多科研人员的研究重点。早在石墨烯被盖姆教授和诺沃肖诺夫博士在2004年发现时，就报道了石墨烯在室温下的迁移率——10000~15000cm2/Vs，以石墨烯作为导电沟道，代替硅实现超高速晶体管是科研人员不懈奋斗的目标。同时，超高速场效应管应该对输入电压的变化响应极快，可是响应速度受制于沟道宽长，缩短沟道长度，可以提高器件响应速率，但是容易受制于短沟道效应，影响器件稳定性，当然减薄沟道厚度可以缓解短沟道效应，目前以硅等四价元素为主的半导体器件沟道厚度一般在10~15nm，而石墨烯自身就只有一个原子层的厚度0.34nm，不仅克服了短沟道效应，而且实现了超高的响应速度。综上，GFET很可能继任目前的半导体器件，成为下一代信息高速路上的基石。

### 石墨烯场效应管的基本结构

石墨烯场效应管GFET的基本结构和典型的MOSFET结构类似，其根本区别在于GFET用单原子层厚度的新材料石墨烯作导电沟道，根据FET中栅极的位置不同，又将GFET分为顶栅和背栅两种，如图2.3所示。在顶栅这一类别中，又根据在石墨烯和栅电极之间是否覆盖栅介质，分为局部栅和全栅两种类型。GFET的结构简单，主要组成要素是Si/SiO2衬底、源/栅/漏金属电极、石墨烯导电沟道以及栅介质，衬底、沟道尺寸影响GFET的导电特性，实验过程中需要通过不断调整尺寸配比测试GFET的阈值电压、截止频率等特性来实现其最优性能。在顶栅结构的石墨烯场效应管中，单层石墨烯薄片被转移至Si/SiO2基底上，基于石墨烯转移技术的不断成熟，通过退火工艺使石墨烯层紧紧贴住氧化层，其次在石墨烯薄膜表面生长一定厚度的栅介质层，该层介质不能破坏石墨烯的结构，且具有一定的介电常数，防止给栅极加电压时发生击穿现象，最后就是在源、漏极以及栅介质层表面沉淀金属，制作电极实现欧姆接触。而在背栅结构的GFET中，则要求Si/SiO2衬底重掺杂，同时背栅型不需要生长栅介质层，跟顶栅型类似，需要在源漏极沉积电阻很小的金属电极来提高器件的响应速率。

### 石墨烯场效应管的工作原理与特性

石墨烯场效应管GFET的工作原理要从石墨烯的三维能带结构来分析，石墨烯是由碳原子组成的蜂窝状二维结构，其中的每个碳原子外都有4个价电子，3个价电子与相邻的3个碳原子外的价电子通过sp2杂化形成键，另外一个价电子通过p轨道形成于石墨烯法平面上的键，并且可以自由移动，这是石墨烯具有良好导电性的微观解释。

通过推导得到石墨烯在第一布里渊区的三维能带结构，如图2.4。可以看出，石墨烯中碳原子的三维能带近似为两个相对的圆锥，分别为石墨烯的导带和价带。两个能带相交于处在费米能级平面上的6个角点，该角点又称作狄拉克点，所以石墨烯被称是带隙宽度为零的半金属。

图2.5中显示的是典型GFET的沟道电阻R与栅极电压Vg的关系曲线，分析看出，当施加在栅极上一定的电压Vg时，石墨烯的费米能级会发生上下偏移。当加在栅极上的电压Vg为正电压时，石墨烯会感应相应的负电荷来平衡栅极电压形成的电场，石墨烯中费米能级平面处于狄拉克点以上，即石墨烯三维能带中的导带中，此时电子成为石墨烯的导电电荷。当Vg朝负电压方向移动并且经过零点时，同时，石墨烯的费米能级向下移动到狄拉克点，因为此时石墨烯的态密度DOS为零，石墨烯中的载流子密度最低，电阻最大。当Vg继续向负方向增大，则石墨烯的费米能级向下移动到价带，相应地，空穴成为此时石墨烯的导电电荷。由Vg向正负两个方向的不断增大，GFET中导电沟道的电阻也不断减小。因为参与GFET导电的载流子电荷有电子和空穴，所以石墨烯具有双极型特性。

## μCVD制备GFET工艺简介

### 石墨烯特性与工艺目标

石墨烯是业界最理想的二维结构材料，所谓二维晶体材料，就是指在二维平面上具有无限延展且周期重复的结构，厚度达到纳米级的材料。虽然二维材料具有相当多独到的优良特性，但在科学界长期普遍认同，严格的二维材料因范德华力不具备热力学稳定性而不能单独稳定存在，并有相应的Peierls理论[88]支撑。事实上，直到2004年两位科学家发现石墨烯的存在，才打破了科学界这一致结论，也掀起了国内外科学人员对二维碳材料，尤其是石墨烯的研究热潮。

石墨烯可以通过其在空间的环绕、卷曲、层叠得到富勒烯、碳纳米管和石墨，如图2.6所示。石墨烯中单层碳原子厚度约为0.34nm，其中碳-碳键长0.14nm，碳原子的4个价电子中，3个与相邻的碳原子sp2杂化形成键，另一个价电子在p轨道上形成垂直于石墨烯且自由移动的键，这就解释了石墨烯具有优越导电性的原因。上文提到石墨烯的三维能带结构看出，石墨烯的导带和价带相交于狄拉克点，费米能级可以在电场的作用下完成于导带和价带之间的上下平移，同时实现载流子导电电荷在电子和空穴之间的转换，故石墨烯具有双极性导电特性。

结构决定特性，作为理想的新材料，石墨烯表现出各种优质特性，尤其在电学特性上的超高载流子迁移率、可调整能带，让人们对它的应用前景充满期待。

1. 电学特性

石墨烯是典型的零带隙半导体，在门电场的作用下完成载流子空穴与电子的转换。当施加的门电压为正时，石墨烯的费米能级上提到狄拉克点之上，进入导带中完成电子作为载流子；当门电压为负时，其费米能级下降到狄拉克点以下，空穴进入价带中作为载流子。石墨烯载流子的迁移率达到200000，在目前的导体中也是最大的。利用石墨烯的电学特性研制的各种器件在微电子屏显、生物传感、气体探测等领域发挥着举足轻重的作用。

1. 力学特性

实验证明，石墨烯是如今认识的材料中机械强度最大的，其破坏强度为42，杨氏模量达到1.0，比世界上最好的钢铁强度的100多倍还要坚硬，即使不是纯净的单层石墨烯薄片，在其他物质中掺入石墨烯也能大大提高原物质的机械强度。

1. 光学特性

纯净的石墨烯还具有独特的光学特性，可吸收2.3%的可见光，近似乎透明物质，所以石墨烯97.7%的高透光率足以在未来的可穿戴智能设备的屏显模块占据一席之地，同时，单层石墨烯的比表面积为2630，是碳纳米管的10倍之多。

1. 热学特性

现如今，电子产品的高能耗以及半导体集成电路中的元器件散热问题一直让工程人员头疼不止，而石墨烯的超高导热率达到5000，超快的传热速率是金刚石的3倍，可以作为未来微电子器件的充分材料。

### μCVD法石墨烯转移技术

不管是传统的CVD制备石墨烯，还是改进型μCVD系统，也不论是对制备的石墨烯进行科研学习还是工程应用，都必须将石墨烯转移到特定的衬底上进行才行，可以看出，石墨烯转移技术的完善与否直接决定了石墨烯的质量好坏以及后期的应用前景，传统的CVD石墨烯转移技术有：基体刻蚀法，“roll-to-roll”法，电化学转移法，下面做简单介绍。

基体刻蚀法也就是湿法转移技术，流程如下图所示。其核心思想是用PMMA胶作为中间载体，之后再去除PMMA。基本流程是首先在生长石墨烯的衬底表面旋涂一层PMMA，控制好PMMA薄膜的厚度，接着配制过硫酸铵溶液，并将PMMA/石墨烯/CVD衬底置于溶液中，腐蚀铜箔后，PMMA/石墨烯漂浮在液面上，用去离子水替换过硫酸铵，清洗石墨烯，然后用新的Si-SiO2衬底在去离子水中捞起PMMA/石墨烯，使其紧贴衬底表面，静置后烘干，最后用丙酮溶掉PMMA。该方法在2009年被首次使用[89]，但是转移后的石墨烯存在破碎现象，后期在Li，Park等人提出的改进方法下，明显提高了石墨烯的转移质量，也使该方法成为石墨烯转移的主流方法之一。

“roll-to-roll”法第一次使用是将石墨烯从Ni基底“甩”到聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）上，其操作流程如图2.8。首先，在PET上涂一层乙烯-醋酸乙烯酯（EVA），再用150℃的热滚筒将EVA/PET和石墨烯/Ni贴合在一起，接着用冷滚筒将PET/EVA/石墨烯从Ni衬底上“甩”出来，从而将石墨烯转移到目的衬底上。

电化学转移法是利用化学溶剂电解的原理来实现的，跟基体刻蚀法类似首先在石墨烯衬底表面旋涂PMMA作为阴极，用碳棒作为阳极，电解质为,该方法最大的优势在于保持石墨烯表面的充分完整性，并且成本低，具有良好的应用前景。

### μCVD法GFET制备原理和流程

μCVD法制备石墨烯的操作流程如下：

1、合成工艺在一个大气压下（101.325kPa）进行。

2、用氢气冲刷反应腔30分钟，施加一个小电压，使反应台温度上升。

3、逐渐增加供电电压到芯片成轻微的红色（Mild red color），此时温度大约达到800℃。

4、保持氢气环境20min，以去除因为之前暴露在空气中形成的自然氧化物。这个退火过程也是必需步骤。

5、逐渐增加电压，到加热台呈现明亮的橙色（Bright orange color），预计温度能够达到1000℃。

6、引入反应气。甲烷与氢气体积比率1.5%。

7、在铜催化剂协助下，甲烷分解，分解出的碳溶解进入铜层表面。当铜层表面沉积一层碳原子后，因为高温下碳原子在铜箔中的溶解度低，当铜表面覆盖一层石墨烯后会自抑制生长，从而容易生长出大面积石墨烯。

8、5min后停止加热，快速冷却，甲烷停止分解，碳淀积成石墨烯。

μCVD法制备好石墨烯后按下列流程完成石墨烯的转移。转移工艺流程图见2.10。

1.配制相应浓度的聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）胶，在μCVD芯片石墨烯一侧旋涂一层PMMA胶，控制PMMA薄膜厚度。

2.将PMMA/石墨烯/μCVD衬底烘干，固化PMMA。

3.配制过硫酸铵溶液，并将PMMA/石墨烯/μCVD衬底置于溶液中，腐蚀铜箔后，PMMA/石墨烯漂浮在液面上。

4.用去离子水替换过硫酸铵，清洗石墨烯。

5.用Si-SiO2衬底在去离子水中捞起PMMA/石墨烯，使其紧贴衬底表面，静置后烘干。

6.将PMMA/石墨烯/Si-SiO2浸泡在丙酮，融掉PMMA。

## 本章小结

# 用于生长石墨烯的μCVD微芯片设计

## μCVD系统的理论模型分析

### 温度稳定时间模型

传热是因为存在温差而导致的热能转移，转移方式因介质不同而产生差异，众所周知，传热模式分为热传导、热对流及热辐射。稳态下分析μCVD芯片的温度分布就得知道各种传热模式的速率方程及物理机理。

热传导是物质中质点之间相互作用的结果，由于分子的随机运动，加上能量的分布不均，在相邻分子发生碰撞的同时，能量较大的分子会向能量较小的分子运动。分子在不同温度的两表面活动状态见图3.1。

热传导的速率方程可以用一维单壁模型来描述，通过分析速率方程可以知道单位时间内在物质中传递能量的多少。一维平壁热传导模型见图3.2。热传导的速率方程为：

 （3.1）

热流密度表示单位面积沿方向传热的速率，很明显，它与材料热导率和方向上的温度梯度成正比。μCVD芯片极大的宽高比可以被假设为一维单壁结构，且在稳态和单壁温度线性分布的情况下，,则带入上式得到热流密度为

 （3.2）

于是，假设芯片底面面积为A，则芯片热传导传热速率为。

热对流一方面是由分子的随机运动导致的能量传输，另一方面流体的整体运动也会带走热量。根据流体的性质也可将对流分为受迫对流和自然对流。本文讨论的是流体的内部热能，也就是显热，有时候热对流还会发生潜热交换，即换热过程伴随着流体相态的改变。不管流体性质如何，其速率方程都可以用下面表达式描述

 （3.3）

式中，热流密度与对流换热系数有关，同时与流体温度和芯片表面温度差成正比。此式也称为牛顿冷却公式，其关键在于求对流换热系数，该参数与流体的运动特性和芯片表面的几何形状有关。仿真过程中假设该经验值为已知的，下表是自然对流和受迫对流下换热系数的典型值，可作仿真时参考。

热辐射是由于物质本身的组成成分发生电子排列位置的改变造成的，不管物质何种形态，都将经过电磁波的方式进行传输，考虑芯片表面的热辐射模型，定义单位面积在单位时间内发射的能量，理想黑体热辐射的发射速率由斯蒂芬-波尔茨曼定律给出

 （3.4）

其中，是芯片表面的温度，称为斯蒂芬-波尔茨曼常数，实际情况下，表面辐射的发射速率比理想黑体小，由下式给出

 （3.5）

并称为发射率，值，实际表征表面的辐射强度，同样与表面的几何形状、粗糙程度有关。

芯片表面既向外辐射能量也吸收来自周围环境的热辐射，假设芯片表面的吸收率和发射率相同，则表面辐射出去的能量与来自环境热辐射的能量之差为

 （3.6）

即为单位面积表面的净辐射速率。为方便起见，引入和热对流换热系数相对等的辐射换热系数，因为推导得

 （3.7）

由传热的3种模式引入热阻的概念，相较于电阻是电动势与电子迁移速率的关系，热阻可以定义为温度势与传热速率的比值，由式（3.2）可以得到平壁的导热热阻为

 （3.8）

同样地，由式（3.3）和（3.6）可以得到平壁的对流热阻和辐射热阻为

 （3.9）

 （3.10）

μCVD芯片由催化剂Cu，氧化层SiO2，以及衬底Si三层平壁组成的复合壁，复合壁模型见图3.3。

总热阻为

 （3.11）

其中，。

## μCVD微芯片建模与仿真

### ANSYS有限元分析软件简介

随着现代工业的不断推进，工程界对以有限元分析为主的CAE技术的认识不断提高，各行各业开始引进便捷高效的CAE软件[52]，ANSYS就是其中的重要一环，现已更新至17.0版本。ANSYS Workbench具有的结构、热电、磁、振动等多物理场耦合功能，使其在航空工业、电力电子、机械制造等众多领域应用广泛。ANSYS热分析用于计算一个系统或部件的温度分布及其他热物理参数。方法是先定义实体材料属性，并设置热传导、热对流及热辐射的环境参数、再将结构网格化成多个节点，基于能量守恒的热平衡原理，使用有限元分析法迭代计算各节点的温度，结果以梯度图和分析报告导出。

有限元[43](FEM)是求解数理方程的一种数值计算方法，是将弹性理论、计算数学和计算机软件相结合的一种分析技术，在材料科学、土木工程、国防军工等领域颇受重视。总的来说，有限元法是Rayleigh Ritz[96]法的一种局部化情况。

ANSYS有限元分析的实施过程主要分为3个阶段：前处理、分析计算和后处理阶段。其中，前处理阶段负责三维建模，将整体结构简化为理想的数学模型后，用离散的有限个网格单元代替连续实体结构或求解区域，经过一系列的分析计算和求解处理，后处理阶段对计算结果进行分析、整理输出数据表、报告或者图像。ANSYS Workbench[54]集设计、仿真、优化功能于一体，对各种数据进行项目协同管理，支持CAD-CAE间双向参数传输，极大地提高了设计人员的应用能力和工作效率。

### μCVD微芯片结构优化

### μCVD微芯片耦合仿真

## 仿真结果与讨论

## 本章小结

# μCVD温度测控系统

## 温度检测技术

### 温度检测技术简介

温度是国际标准单位制中规定的7个基本物理量之一，用以表征物体的冷热程度。按照测量对象和精确度要求不同可将测温方法分为接触式和非接触式，具体分类情况见图4.1。其中以接触式为主要特征的测量方法又分为热体积式、电量式和光色式主流类型[39]。接触式测温的原理是将被测物质与温度传感器直接接触，这样被测介质的分子可以有效触碰传感器构件，当分子动能平衡后就可以显示稳定的温度了。接触式测温精度高，可是由于深入被测介质，导致测温面积窄，平衡时间长，无法测量实时性要求高的场景，另外接触式测温高度依赖传感元件的稳定性，测量温度范围有限，因为温度过高可能会烧坏传感元件而导致失灵。非接触式测温主要是采集被测温度场的辐射因子，根据其强度、连续性、波长分布等参量进行的量化分析。非接触式测温温度上限高，实时性好，不用担心感温元件的损坏，可是为了提高测温精度和敏感度，非接触式测温对介质的辐射强度及发射率有一定的要求。

### 基于红外辐射的测温原理

在自然界中，若物体的本身温度高于绝对零度（-273.15℃），即表明该物体存在一定程度的热分子运动，故会以电磁波的形式向周边辐射，众所周知，电磁波谱的波长范围从皮米到亿米级，如下图，定义上可分为可见光、无线电波、紫外线等，这其中就包括红外线（0.75~300）这种具有强烈热效应的波谱。物体的红外辐射特性、辐射能量的大小与其表面状况有着十分紧密的关系。

我们假想有这样一种物质，它对大自然的环境辐射既是完全吸收体又是完全发射体，设定其反射系数为1，我们称这样的理想体叫黑体，而其他物质的发射率（该物质的辐射度和与该物质具有相同温度的黑体的辐射度之比）小于1，这样的物质统称为灰体。定义理想黑体的辐射功率为，普朗克分布定理揭示了黑体向外辐射的能量在不同热力学温度下按波长的分布规律，数学公式如下

 （4.1）

式中，表示黑体的辐射出度，单位是，是辐射波长，表示热力学温度，其中、是第一、二辐射常数，分别为，。通过此公式可以绘制黑体辐射的光谱分析图，如下。

红外测温遵循的基本原理是斯忒潘-彼尔兹曼定律，该定律指出绝对黑体总的辐射出度与它的绝对温度的四次方成正比。后面证实这一定律不只适用于理想黑体，对于任何实际物体来说也是成立的。斯忒潘-彼尔兹曼定律的数学表达式是，是斯忒潘-彼尔兹曼常数，，这是黑体辐射能量的关系，实际物体的辐射能量与绝对温度的关系将引入发射率，用公式表示为

 （4.2）

其中，表示实际物体辐射能量与温度的关系，并且不随波长变化而变化，通常，这样推导得

 （4.3）

实际灰体温度为

 （4.4）

通过公式计算即可知道实际物体的温度。

对于灰体辐射能量的峰值所在波长位置与温度的关系可以用维恩位移定理来解释，，,很容易看出反比例关系。

### 温度检测系统误差分析

对于温度检测系统来说，系统误差不可避免，关键在于怎么分析误差的影响因素以及减少误差的手段。

发射率——其实就是表征实际物体相对黑体的辐射能力，根据观测角度不同分为半球发射率和方向发射率。它在一定程度上不仅与物体的表面状况（抛光、粗糙、氧化、喷砂等）相关，还与材料种类、几何形状、透过率、测量角度有联系。大部分有机物或金属氧化表面的发射率都在0.85~0.98之间[55]，光洁金属表面的辐射率很低，如果物体的表面比较光滑，则其会表现出敏感的方向性。实验证明辐射温度的误差为。基尔霍夫定理证明单色发射率和吸收率的关系，即。当物体处于热平衡状态下满足吸收率、透射率、反射率之和为1，即。对于不透明的物体，其透射率，同时考虑吸收率和反射率，满足。通常要根据红外测温仪设定的发射率来补偿因物体表面状况差异而导致的测温精度的影响。所以对于未知物体的发射率，可以先在低温环境下用接触式测温仪测量物体表面温度，同时用红外测温仪测量，调整发射率，控制两种测温方式在同一场景下的温度处于一定范围内，此时发射率即为待测物体的发射率，可用于高温环境的测量。

结合前人的工作经验，将红外辐射的发射率设定方案总结如下：

1. 发射率修正法。该措施是使用其它专业设备测量待测物低温环境下的发射率，再依据此修正高温环境下红外辐射测温的发射率。
2. 黑体逼近法。该方法是采取一定措施使被测物表面的有效发射率接近1，从而缩小发射率对测温结果的影响。但是此方法往往需要破坏待测物，所以不常使用。
3. 反射率法。向待测物表面投射一辐射源，测量其反射信息，进而获取该物体的发射率。该方法需要额外设备配合工作，成本较大。
4. 多光谱辐射法。也就是在同一个仪器中制造多个光谱通道，利用多通道的辐射信息获取温度，经过数据处理后得到材料的发射率。该方法不需要辅助设备，也不会破坏待测物体结构，是今后修正发射率的发展方向之一。

距离系数K是提高红外测温精度的可控因素之一，K值越大，所需探头的光学系统分辨率越高，所以实际测量时，要充分计算待测物测量表面的直径大小并把握好距离系数。

环境因素——包括大气吸收率、背景温度等。大气投射是影响测温误差的关键因素之一[56]。在8~12波段，大气透射率误差与测温误差成反比，当大气吸收率达到20%时，测温误差在0.8%左右。众所周知，大气分子的吸收是构成红外辐射能量衰减的重要原因之一，大气分子（主要是水蒸气、臭氧、二氧化碳等）中容易与红外光谱区某些波段产生共振现象，从而吸收辐射源传输过程中的能量。况且空气中悬浮微粒的散射效应更能加大对辐射能量的吸收作用。

## 温度控制技术

### 温度控制技术简介

温度控制技术是把温度作为参变量，控制输入信号（电流、电压、阀门闭合度等）使其处于动态平衡，达到理想稳定态的一种自动化技术。常用的温度控制策略有以下几种：

1. 常规PID控制

PID控制即将误差的比例、积分、微分进行线性累加，得到合适的输出加载到受控对象上进行调控的算法。基本原理示意图如下。

PID控制器的关键在于P、I、D三个控制系数的确定，往往需要不断尝试获得经验值或者借助PID模拟平台在线调试。其控制系数的作用如下：

比例系数：调节作用与误差大小成比例。越大，系统响应越快，作用幅度越大，所以太大的比例系数容易造成系统超调，引起震荡；但是过小的比例系数使系统反应缓慢，产生一定的时延。

积分系数：降低系统的稳态误差，提高误差度。积分的作用是累积误差值，用于在系统稳定时的修正，积分项对误差的影响取决于时间的累积和积分系数。积分作用常与另两种调节规律结合形成PI或PID控制器。

微分系数：微分项具有预测作用，抑制趋势的变化方向，产生超前的控制作用，用于改善控制器的动态特性。过大的会降低系统的抗干扰能力。

常规PID控制的最大优点是控制机理完全独立于对象的数学模型，但是参数无法自整定，需要现场支持，依赖从业人员的长期经验，调节周期长，容易产生震荡等缺点也一直让人诟病。

1. 模糊控制

模糊控制是将人类专家对特定对象的调节经验，运用模糊集理论进行量化，转化为可数学实现的控制器，从而实现自动化。原理示意图如下：

模糊推理引擎是整个控制器的核心，包括输入模糊化、规则库建立、模糊推理和输出清晰化四个模块。

1.输入模糊化

首先将输入量（系统误差、误差变化率）按照量化因子、进行尺度变换，完成输入变量从基本论域到模糊论域的映射，接着定义模糊语言取值以及论域值在其上的隶属值。隶属值的选取依赖隶属函数的选择，常见的隶属函数类型有正态分布型、三角型、梯型。模糊语言值的个数一般为奇数个，即NB（负大）、NM（负中）、NS（负小）、ZO（零）、PS（正小）、PM（正中）、PB（正大）。

2.规则库建立

模糊规则库由若干条控制规则组成，控制规则是根据人类控制专家的经验总结得到，按照IF ...is ...AND ...is ...THEN ...is ...的形式表达，对模糊子集建库后以表格的形式展示。

1. 模糊推理

模糊推理是在模糊规则库建立的前提下对输入进行规则映射，得到模糊输出量的过程。模糊推理方法有Mamdani推理法、Larsen推理法、Zadeh推理法等。

1. 输出清晰化

清晰化是第一步的逆过程，经模糊推理得到的是输出论域值，还需要经过比例因子转换为清晰的控制量。常用的清晰化手段有加权平均法、最大隶属度法等。

模糊控制是一种规则控制，采用语言驱动型，设计中不需要对被控对象建立精确的数学模型，鲁棒性强，有较强的容错能力，对纯滞后、参数时变或非线性温控系统比较适用，但是对输入信息的简单模糊处理会减弱系统的控制精度和动态品质，同时规则库的建立同样依赖工程人员经验所得。

1. 神经网络控制

神经网络控制是采用数理模型的方法模拟生物神经细胞结构，用简单的处理单元连接扩散成复杂网络，并采用BP算法（误差反向传播）控制。原理如下图：

神经网络控制响应速度快，有一定的抗干扰能力，易于软硬件实现，适用于多变量、多参数、非线性和时变系统。

在实际应用的温控算法选择中，往往根据工作场景不同，有效地联合多种控制策略，将线性与非线性结合起来，使温度控制达到精确度与时效性、鲁棒性共存的状态。

### 基于模糊PID的控温原理

μCVD系统的温度控制要求是高温稳定，响应快，精度高，常规PID控制往往因为参数无法自整定而达不到系统要求，所以本文选择基于模糊PID的控温策略，利用模糊推理实现PID参数自整定，是温度控制达到理想的稳定效果。

模糊PID参数自整定温控结构示意图如下：

运用模糊PID控制算法，首先要找出P、I、D三个控制系数与温度偏差、偏差变化率之间的模糊关系，过程中不断修正控制参数，以满足不同、对控制参数的不同要求。

具体实现时，根据，输入量的不同对其模糊处理，推理后得到不同的模糊输出量再清晰化，最后根据清晰化的值整定、、，常用的、、整定原则如下：

1. 当偏差较大时，为了系统快速响应，应取较大值，为了避免系统偏差变化率瞬时过大，应取较小值，同样为了防止控制超调，通常取值为0。
2. 当偏差处于中等位置时，应取较小值，取值适当就行，此时在系统的影响因子优先级中排名最高。
3. 当偏差较小时，为了保证系统的鲁棒性，和同时取较大值，值的选取取决于，当较小时，取较大值，反之亦然。

运用模糊控制的经典方法首先将，模糊化，假设输入量的模糊子集为{NB，NM，NS，Z，PS，PM，PB}，同时将输入量温度误差，误差变化率映射到论域（-3,3），再将输出量、、的模糊子集定义为{Z，PS，PM，PB}，输出量量化到论域（0,3），根据前文的整定原则，可得到模糊控制规则为：

IF (e is NB) THEN ( is PB) AND ( is Z) AND ( is PS)

IF (e is NM) AND (ec is NM)THEN ( is PM) AND ( is PS) AND ( is PM)

IF (e is NS) AND (ec is NS)THEN ( is PB) AND ( is PB) AND ( is PM)

IF (e is PS) AND (ec is NS)THEN ( is PB) AND ( is PB) AND ( is PM)

......

最后进行模糊控制的第四步：清晰化处理，即将相应的输出论域结合比例因子得到真实的PID控制系数，再将其输入到温控系统中完成参数自整定。

## 温度测控系统硬件设计

### 硬件开发平台介绍

### 硬件原理图设计及平台搭建

## 温度测控系统软件设计

### **软件开发平台介绍**

### **温度检测程序设计**

### 温度控制**程序**设计

### **温度测控系统校准实验**

## 本章小结

# μCVD显微成像系统

## 自动聚焦技术

### 传统自动聚焦算法

本文选用的显微成像平台是属于光学成像系统，光学成像是通过光波将待测物的实像经过镜头系统传播到像平面的信息传递系统，模型如下图所示。

所谓聚焦，是指像平面和聚焦平面重叠在一起，能量最为集中，图像信息最为丰富，细节最为明显，放在频域上分析，聚焦图像比离焦图像拥有更多的高频分量。实现μCVD显微成像系统快速清晰地采集图像，关键在于聚焦评价函数的算法选型及性能改进上。下面首先介绍一下传统自动聚焦评价函数的原理。

1. 灰度差分法

该算法是利用图像相邻像素差的绝对值之和来表征聚焦程度，评价函数的数学形式如下：

 （5.1）

上式中，表示图像在处的像素灰度值，、分别表示图像ROI（Region of Interest）区域的行、列数，采集多张图像分别计算，当取最大时聚焦。

该算法提出时间较早，计算量少，形式简单明了，适合于对聚焦精度要求不高的成像环境下。

1. 灰度方差法

该算法首先计算一幅图像的灰度平均值，然后用图像的标准差作为自动聚焦评价函数的最终值，用以表示图像的清晰程度。函数表示如下：

 （5.2）

 （5.3）

同样地，表示图像在处的像素灰度值，表示该幅图像的灰度平均值，当图像处于清晰状态下时最大。

该算法是基于图像的统计信息，利用灰度变化的平均程度来评价的，需要率先计算均值，有一定的计算量。

1. Roberts法

该算子是1963年Roberts提出的提取图像边缘的算法，采用的是图像中对角方向相邻的两个像素差之和，充分考虑了像元之间的位置关系，函数式如下：

 （5.4）

该算法相比较灰度差分法，计算量相当，但是比灰度差分法多比较一个位置信息，更能表征图像的灰度变化敏锐度，精度也得到一定提高。

1. 灰度熵法

灰度熵法通过表示图像的信息熵来衡量图像的清晰度，当图像模糊时，熵值增大，反之，图像清晰时熵值减小。我们假设图像的灰度值在区间[0,H]，对ROI区域统计直方图，则在k位置图像取灰度值为g的概率为，则图像的灰度熵为：

 （5.5）

  （5.6）

当处于聚焦位置时，熵值最小。

1. 傅里叶变换法

傅里叶变换法是从频域的角度来考虑图像的清晰度，正是上文提出的清晰度与图像边缘细节和高频分量的关系得出的算法。实际运用时，将图像经过傅里叶变换从空域转换到频域，用能量谱来表示一幅图的高频分量，其傅里叶变换用下式表示：

 （5.7）

得到傅里叶谱和能量谱分别为：

 （5.8）

上式、为时域变量，、为频域变量，和是傅里叶谱的实部与虚部，当图像聚焦时，取值最大。很明显，该算法计算量巨大，会产生一定的时延。

还有一些传统的聚焦评价算子，如梯度能量（EOG）、Sobel算子、Tenengard函数、拉普拉斯Laplacian算子、Vollaths函数等等都是利用数学函数的优越性表征图像清晰度，它们各具优势，各有应用场景，都表现出了评价函数很好的特点。

### 优化自动聚焦算法

理想的自动聚焦曲线应该是单峰、没有起伏的，在聚焦点附近曲线尖锐，变化突兀明显，当远离聚焦点时，曲线变化平稳缓慢，如图5.2所示。

在没有环境干扰的情况下，各种聚焦算子都可以满足评价函数的要求，当工作台抖动、镜头有污渍、环境质量不良时，聚焦算子也会对噪声表现一定的敏感度，所以自动聚焦算法必须具备抗干扰能力。本文提出的一种改进Roberts算法可以提高函数曲线在聚焦点附近的陡峭度，减缓离焦点的曲线平滑度，降低噪声影响。具体实现步骤如下：

1. 依据Roberts算子计算图像中各像素的梯度能量值：

 （5.9）

1. 保留能量突变点，忽略平滑点。清晰图像的细节信息丰富，梯度变化也大，而模糊图像变化不明显，所以由灰度方差法，，设定阈值表示该图像的平均模糊程度，当梯度能量值时，保留此时的能量值，否则此点，摒弃此点。
2. 定义最终的自动聚焦评价函数：

 （5.10）

当最大时，图像处于聚焦状态。

此算法是在Roberts算子的基础上加以改进，只关注图像的清晰区域，忽略模糊部分，这样生成的聚焦曲线更注重细节，更能体现聚焦时的能量集中性。

### 优化算子比较及分析

1. 陡峭区宽度

在显微成像系统中，电子目镜随着z轴的移动远离焦平面时，图像变得模糊，聚焦算子值也会下降，靠近焦平面时，图像变得清晰，函数值也会迅速变大逼近峰值，我们把聚焦曲线分为陡峭区和平缓区，分别代表模糊类和清晰类图像。而陡峭区宽度，其中、分别表示曲线的左、右临界点，陡峭区宽度越短，聚焦算子受环境影响越小，抗干扰能力越强。

1. 清晰度比率

清晰度比率，其中、分别表示聚焦算子函数的最大、最小值，其用来表示聚焦函数对不同离焦程度图像的辨别能力，越大，清晰图和模糊图差异越明显，越容易区分。

1. 灵敏度

聚焦算子的灵敏度体现在焦平面附近的变化程度，在聚焦曲线峰值附近任意取几个点，如果变化剧烈，表示焦平面越容易捕捉，聚焦越灵敏，反之则易受噪声影响，聚焦迟钝。

## 图像拼接技术

### 图像拼接原理

图像拼接是将由传感器拍摄的一组具有重叠区域的局部图，通过先进的算法获得局部图之间的位置映射关系，再结合像素融合技术，消除连接处的尖锐毛刺，最终合并成一幅具有广视角、高分辨率的视图。其关键在于寻找重叠部分以及确定匹配区域的位置关系。

假设待拼接的两幅图Img1和Img2，像素表示分别为和并且有重合区域，则基于Img1，将Img2拼接起来的映射可表示为：

 （5.11）

上式表示两图的坐标映射。根据矩阵学理论可知，只需求得，即可将Img2矩阵上的像素点转换到Img1上形成最终拼接图的像素点，变换式为

 （5.12）

只要找到确定的变换矩阵，即可完成拼接工作。变换矩阵中表示尺度变换和旋转因子，、分别表示水平、垂直方向上的平移量。实际使用中，由于平台抖动、光照、环境等内外在因素的影响，需要借助拼接算法寻找最优的变换关系，达到拼接目的。

### 图像预处理

电子目镜采集的高倍原始图像往往由于镜头污渍、光线干扰、环境尘土等因素存在噪声，导致拍摄的局部图质量不佳，对后续寻找匹配区域、拼接工作造成极大的影响，所以在进行图像拼接的第一步需要进行图像预处理。图像预处理是计算机视觉中常见的改善图片质量手段之一，通过各种滤波、锐化、去燥工具来消除噪声、增强对比度，使图像清晰，展示更多的细节信息。具体的预处理手段有下列几种：

1. 图像灰度化

电子目镜采集的图像是彩色图片，存储格式一般为RGB格式，但是彩色图像的信息量太多，计算复杂，实际工程往往将彩色图像灰度化，去除色彩信息，保留亮度信息。数字图像中的灰度值传递的是像素点的明暗程度，一般将黑色灰度值定义为0，白色灰度值定义为255。将RGB彩色制式图像灰度化通常有三种方法，分别如下：

1. 平均值法。，此种方法运算简单，图片经过平均处理后亮度较柔和。
2. 最大值法。，此种方法无需计算，经过简单的数值比较即可得到图像灰度值，处理后亮度会有不同程度的偏高。
3. 加权值法。，其中、、分别为权重。当权值不同时会表现不同的亮度信息。
4. 图像去噪

图像噪声存在于从电子目镜采集到后期图像处理的各个阶段，典型的图像噪声类型有高斯噪声和脉冲噪声。高斯噪声符合零均值高斯分布且独立于每个像素和像素亮度，而脉冲噪声一般由电子目镜的光学传感器单元异常、图像存储失败和传输异常等问题引起，出现的概率不高。噪声会影响图像质量，弱化图像特征，必然对图像拼接带来麻烦，为了后续工作稳定执行，提高拼接成功率，必然要对图像进行去噪工作。常见的图像去噪方法有：

1. 中值滤波法。中值滤波是用一个N\*N（N为奇数）的窗口在图像上滑动，将窗口内的像素灰度值按从小到大依次排序，取中值作为窗口中心点的灰度值。此种方法既可以消除孤立的脉冲噪点，又可以很好地保护图像细节，特别适用于含有椒盐噪声的图片。
2. 均值滤波法。均值滤波同样是采用N\*N的窗口扫描图像，取窗口内各像素点灰度值的平均值作为中心点处的灰度值，该算子计算速度快，抑制噪点的同时会引起图像模糊，致使边界不明晰。
3. 高斯滤波法。高斯滤波对于抑制服从正态分布的噪声很有效，如果一个噪声幅度满足高斯分布，其功率谱密度是均匀分布的，则称其为高斯白噪声，高斯滤波特别适用于抑制此类噪声。针对一幅图像，高斯滤波是利用核函数形成的卷积算子来进行处理，常见的一维高斯分布为，将输入图像的灰度像素值作为权重，乘以核函数输出到中心位置。相比较均值滤波，高斯滤波平滑效果更柔和。
4. 图像锐化

图像锐化（增强）是为了使图像的边缘、轮廓线以及细节更清晰，从而补偿图像的轮廓，增强灰度跳变部分来强化对比度。图像锐化一般分为微分法和高通滤波法两类，具体有梯度锐化、拉普拉斯锐化、Sobel锐化、Priwitt锐化等等。

### 图像匹配

拍摄图像经过预处理后就可以进入匹配工作了，图像匹配是寻求局部图的公共重合区域，并找到两幅图特征处的位置映射关系。图像匹配方法可以分为基于图像灰度信息的配准和基于特征的配准方式。本文采用的SIFT是基于图像特征的匹配算法，它可以对位置、尺寸、旋转、亮度表现不变性，对视角变化、仿射变换、噪声也保持很强的适应性。SIFT算法独特性好，信息量完善，很少的物体也能够计算得出丰富的SIFT特征向量，并且有一定的可扩展性。下面介绍一下基于SIFT算法的图像匹配过程：

1. 图像尺度变换，检测尺度空间的极值。

构建尺度空间是为了寻找位置变化中具有不变性的关键点信息，即在尺度空间中找到稳定的特征点。尺度空间可表示为：

 （5.13）

其中，为高斯核函数，为经过预处理的图像，\*表示卷积运算。经过该运算后可得到高斯金字塔，为了在尺度空间内找到不变的极值点，在SIFT中引入了DOG（高斯差分）函数，其定义为

 （5.14）

其中，和为连续图像的平滑尺度，经过上述运算后可得到高斯差分金字塔。在高斯差分金字塔的每组中选取像素点与该组相邻层的若干相邻点比较，选取极值点作为初步特征点。由于计算机中存储的是离散数据，之前选取的初步特征点不一定是连续空间的极值点，所以需要对DOG空间进行拟合处理，去除图像边缘位置的极值点来定位精确的特征点。

1. 特征点方向计算。

计算特征点的方向是为了实现算法的旋转不变性。在尺度空间确定的情况下，可以计算每个特征点的梯度幅度和幅角，分别为：

 （5.15）

 （5.16）

1. 特征点描述。

特征点描述符是跟尺度空间相关的，方法是先将坐标轴旋转为特征点的方向，确保旋转不变性，之后以特征点为中心取相应的确定尺寸大小的窗口，分块计算窗口中的梯度方向直方图，并且分别累加每个梯度方向的数据，形成种子点。

1. 特征点匹配。

上述三个步骤都是对两幅待拼接的局部图处理的，得到特征点描述后，我们定义特征点向量之间的欧式距离作为评判特征点相似度的标准。取图像1中的某个关键点，并找出其与图像2中欧式距离最近的两个关键点，距离为、（为最近点，为次近点），如果满足（G为阈值），则接受这一对匹配点。很显然，降低阈值G，两幅图的SIFT匹配点会响应减少，但是稳定性会提高。下图展示的是图像匹配的样例，两幅图中的相似特征点用红色线条连接起

### 图像融合

图像融合是在确定局部图重合区域并且位置关系的基础上实现图像的无缝连接、平滑过渡。融合过程可以在信号级、像素级、特征级以及决策级等不同的层次进行，完善图像融合效果需要满足两个基本要求：一是找准局部图之间的变换关系，无缝拼接并且过渡柔和，减少突兀感；二是尽量少丢失图像信息，尤其是特征点细节。常见的图像融合算法有加权平均算法[97]、中值滤波法、小波变换法[96]等。加权平均法计算量小，适用于匹配区域色差小的局部图，且表现很好的实时性；中值滤波思想是利用中值滤波器解决重合部分像素值的突变，优点是可以增强细节，保持较高频的图像信息；小波变换可以同时运用高频和低频融合规则，对图像加权融合，是像素级融合算法中重要的算法之一。本文基于石墨烯薄片的图像清晰度和融合实时性两点，采取运算速度快的加权平均法。

加权平均融合算法是一种简单直接的像素级融合方法，它是将两幅已确定匹配区域的局部图的相应像素灰度值进行加权平均，作为最终的公共区域得到融合图像。我们假定有两幅局部图和，经过SIFT算法配准后得到公共区域，并且假设重合区域图像和对应像素的权重分别为和，那么融合图像可表示为：

  （5.17）

上式中要求，，且，和的值可由渐入渐出算法[98]确定。

## 显微成像系统设计

### 显微成像总体设计

### 图像采集模块

### 图像处理模块

## 本章小结

# μCVD系统使用及说明

## μCVD系统整体架构

## μCVD系统装配

### 气路装配

高纯气体是指纯度大于99.999%的气体[99]，其对纯度、干燥度、洁净度等方面有着极高的要求，该类型气体在微纳材料实验中应用广泛。所有高纯度、高洁净的气体均需通过管路输送到设备用点，为了达到工艺对气体的质量要求，在气体出口指标一定的情况下，需更加重视配管系统的材料选型和结构优化上。

1、μCVD系统实验输气方案

（1）输送气体：氢气（H2）、甲烷（CH4）、氩气（Ar）

（2）输送环境：常温（25℃）、常压（101KPa）

（3）输送方式：采用气瓶供气、高精度流量计控流、气压表测压差以及真空泵排气。首先将大量气瓶置于安全房内集中存储，通过管路和气瓶减压阀将所需气体输送到实验台腔体入气口。一般气瓶内气压在1.0~30MPa[100]，经气瓶减压阀减压后可将为1~2MPa，再经流量计控制到所需的气压，真空泵用于清洁腔内原始环境，构建反应气体以及排除废气。其输送方式如下示意图。

（4）注意事项：➀石墨烯制备实验前必须对周围环境进行除尘和吸湿。在高纯气体使用和运输中，为了使高纯气体不受污染，要有严格的控制措施，设置专门的贮气室。H2、CH4分开放置，保持通风。

➁选用合适的压力调节阀和输气管道，压阀和管道要求严密不漏气，调节阀和气体接触部分具有耐腐蚀性，阀内最好装有滤网以滤除微粒。

➂尽量控制管线长度，减少连接件的使用。腔体气体输出口必须安装回火器，防止可燃气体回流引起爆炸。实验废气应妥善处理，安装必要的检测报警装置。

1. 阀门和转接头

阀门的选择需考虑管路结构、压差范围、耐腐蚀性、流量控制比和气体种类等因素。一般可根据输气管道的选用配套使用。转接头的确定是根据腔体进气、出气口结构和螺纹类型选用的304不锈钢快拧接头。该接头是将PU管塞入接头内，用螺母锁紧PU管而达到密封效果。

### 腔体装配

## μCVD显微成像系统使用说明

### 系统设置

### 系统操作

### 实例测试

## 本章小结

# 总结与展望

## 系统设计总结

## 发展趋势与展望