

UDC: 38
中文图书分类号: TN313

学校代码: 10005
学号: S201302221
密级: 公开

北京工业大学硕士专业学位论文 (全日制)

题目: AlGaIn/GaN HEMT 器件结温测量方法与热阻
特性的研究

英文题目: STUDY JUNCTION TEMPERATURE
MEASUREMENT AND THERMAL
PROPERTIES OF AlGaIn/GaN HEMT

论文作者: 李世伟
学科专业: 集成电路工程
研究方向: 新型微电子器件与可靠性
申请学位: 工程硕士
指导教师: 郭春生副教授
所在单位: 电子信息与控制工程学院
答辩日期: 2016年5月
授予学位单位: 北京工业大学



独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的
研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他
人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京工业大学或其它教育机构
的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均
已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签名：李世伟

日期：2016年6月2日

关于论文使用授权的说明

本人完全了解北京工业大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权
保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部
分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

签 名：李世伟

日 期：2016年6月2日

导师签名：郭春生

日 期：2016年6月2日

摘要

GaN 基微波功率 HEMT 器件凭借电子饱和速度快、击穿电场强、最大允许工作温度高等特点,在大功率、高频应用领域显示出卓越的性能。然而 GaN HEMT 器件栅长尺寸小,功率密度大,在大功率使用下器件的结自升温高,将直接影响器件沟道电子迁移率、输出电流、跨导和频率等器件特性。由于自升温效应的影响,沟道温度会升高,最终影响器件可靠性以及使用寿命。温升引起的一系列问题将成为影响器件性能的重要因素,因此结温及热阻的准确测量成为评估 GaN HEMT 器件工作时热特性的一个关键指标。

针对该问题本文设计了 GaN 基 HEMT 器件匹配电路,以红外热像仪测量的 HEMT 器件结温升为边界条件,结合物理数值模拟仿真准确提取小尺寸栅极结温升。在此基础上,本文研究了不同工作环境下热阻的变化规律和器件在相同频率不同占空比下温升对比规律。本文主要包括以下工作:

一、基于红外热像仪的测试结果,结合数值模拟仿真提出一种小尺寸栅极 HEMT 器件结温升测量方法。由于红外热像仪的空间分辨率最高为 $3\mu\text{m}$,而 HEMT 器件的栅极长度在 $0.2\mu\text{m}$ - $1\mu\text{m}$ 之间,红外热像仪测量结果只是一个平均温度,比实际温度低。通过建立准确的仿真模型可以得到不同栅极长度范围内的温度。

二、在不同的加载功率以及壳温下对 HEMT 器件的热阻变化规律进行研究。首先在防自激电路的匹配下利用红外热像仪对 HEMT 器件进行结温升的测量,根据不同条件下的测量结果推算出其热阻,研究热阻的变化规律。然后通过拉曼法在同样的测试条件下测量器件结温升,来验证红外热像仪法的准确性。研究结果表明,热阻会随着功率以及壳温的增大而变大。

三、利用 Sentaurus TCAD 对 GaN HEMT 器件进行稳态以及瞬态模拟。在红外热像仪测试数据基础上,利用数值模拟方法对 HEMT 器件进行建模仿真,通过模拟结果推算出热阻值,并与红外热像仪法测量结果进行对比,进一步证实热阻变化规律。然后改变模型中栅极长度,在不同的栅极长度下观察结温变化规律。最后进行瞬态模拟仿真,通过模拟结果研究器件在加载不同脉冲条件下温升变化情况。

关键词: GaN HEMT, 热阻, 红外热像仪法, SentaurusTCAD 模拟

Abstract

Due to fast electron saturated velocity, strong breakdown electric field and high operating temperature, GaN-based HEMT microwave power devices show superior performance in the field of high power and high frequency applications. However, small gate length and high power density of GaN HEMT lead to the high self-heating junction temperature, which directly affect the device channel electron mobility, output current, trans-conductance and frequency. Since the self-heating effect, the channel temperature appear to rise, and finally affect device reliability and lifetime. A series of problems caused by the temperature rise is an important factor affecting the performance of the device. Therefore, accurate measurement of the thermal resistance becomes a critical factor when evaluating the thermal characteristics of GaN HEMT device. In this paper, we design the anti-self-excitation circuit of GaN HEMT. Junction temperature of HEMT device is measured by infrared. Combined with the TCAD a junction temperature measurement methods under short gate length is proposed. Simultaneously the variation of thermal resistance under different condition is investigated. And the device temperature rise at different duty cycles are compared.

The research work includes the following aspects:

1. Based on the results of infrared, an accurate method is proposed to measure the junction temperature of HEMT device by TCAD. The highest spatial resolution of infrared is 3 μ m, while the gate length of HEMT device is between 0.2 μ m-1 μ m. The result of infrared measurement is average, and is lower than the actual temperature. We obtain the temperature range of different gate lengths from the simulation model.
2. The variation of thermal resistance under different power and different case temperature is investigated. The junction temperature of the HEMT device is measured by infrared under anti-self-excited circuit. According to the measurement results under different conditions, the thermal resistance is calculated to study the variation of thermal resistance. The accuracy of the method is evaluated by Raman. The results show that the thermal resistance increase with the power and the case temperature increase.
3. Simulation model is built by TCAD based on the test data from infrared. Thermal resistance is calculated from simulation results and compared with infrared image method. In order to confirm the variation of thermal resistance. The junction

temperature variation are measured under different gate lengths through the simulation model. Finally the transient simulation is carried out. The temperature changes under different pulse conditions is studied from the simulation.

Key words: AlGaIn/GaN HEMT, thermal resistance, infrared image method, Sentaurus TCAD simulation method

目录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题研究的背景及意义.....	1
1.2 国内外研究进展.....	2
1.3 本文主要内容.....	4
第 2 章 小尺寸栅极 HEMT 器件结温测量技术研究.....	5
2.1 结温升测量方法.....	5
2.1.1 红外法测温原理.....	5
2.1.2 拉曼法测温原理.....	6
2.1.3 电学法测温原理.....	6
2.2 模型选择.....	9
2.2.1 模拟软件.....	9
2.2.2 物理模型.....	10
2.3 小尺寸栅极 HEMT 器件结温测量方法.....	12
2.3.1 测量过程.....	12
2.3.2 实验结果与讨论.....	15
2.4 本章小结.....	15
第 3 章 不同环境对 GaN 基 HEMT 器件热阻影响的研究.....	17
3.1 防自激电路设计.....	17
3.1.1 阻抗匹配.....	17
3.1.2 自激振荡.....	18
3.1.3 CREE 公司 HEMT 器件防自激电路设计.....	19
3.2 红外热像仪法器件结温升测试.....	21
3.2.1 测量设备.....	21
3.2.2 器件结构.....	25
3.2.3 红外测试过程.....	25
3.3 不同壳温对 GaN HEMT 器件热阻影响.....	27
3.3.1 实验过程.....	28
3.3.2 实验结果与讨论.....	28
3.4 不同加载功率对 GaN 基 HEMT 器件热阻影响.....	30
3.4.1 实验过程.....	30

3.4.2 实验结果与讨论	31
3.5 拉曼法器件温升测试.....	32
3.6 本章小结	35
第4章 GaN 基 HEMT 器件稳态和瞬态温升模拟.....	37
4.1 CREE 公司 GaN 基 HEMT 器件参数测量以及模型建立	37
4.1.1 HEMT 器件参数测量	37
4.1.2 HEMT 器件仿真模型建立	42
4.2 GaN 基 HEMT 器件稳态模拟.....	44
4.2.1 稳态模型建立	44
4.2.2 实验结果与讨论	45
4.3 GaN 基 HEMT 器件瞬态模拟.....	48
4.3.1 脉冲上升沿过程温升对比	48
4.3.2 脉冲下降沿过程温升对比	49
4.4 本章小结	52
结论	53
参考文献.....	55
攻读学位期间发表的学术论文	59
致谢	61

第 1 章 绪论

随着工艺技术的不断提高, 半导体器件开始向高频、大功率、高集成度方向快速发展, 尤其是半导体微波功率器件, 由于其显著的高频、大功率等特性被广泛应用在航天、通信、雷达等领域^[1,2]。然而, 随着器件尺寸的不断缩小, 器件功率密度的增加, 在大功率使用下器件内部会产生大量热量而引起结自升温过高, 这将直接影响器件沟道电子迁移率、输出电流、跨导和频率等器件特性, 并将严重影响器件的可靠性以及使用寿命。因此结温升以及热阻的准确测量成为评估微波功率器件工作时热特性的一个关键因素。

1.1 课题研究的背景及意义

HEMT (High Electron Mobility Transistor), 高电子迁移率晶体管是一种异质结场效应晶体管。异质结是 HEMT 器件最显著的一个特性, 沟道内没有散射效应, 因而载流子的迁移率很高, 从而使 HEMT 器件得到特殊的性能^[3]。

上世纪 70 年代随着 MBE 以及 MOCVD 技术的进步使得异质结、超晶格以及量子阱能够真正的制作出来。而 DING 等研究人员在 1978 年首次证明了在 AlGaAs/GaAs 调制掺杂超晶格中的迁移率增强。直到 1980 年, Mimura 等研究人员把这种迁移率增强效应应用到场效应晶体管。调制掺杂最重要的一个优点就是其迁移率^[4,5]。之后, 调制掺杂场效应晶体管得到了快速发展成为了一种主要研究方向, 并且这种类型的场效应晶体管因为其特殊的特性被应用到不同的领域中。

GaN 材料的研究与应用是目前半导体行业研究的热点与前沿, 是制造微电子器件、光电子器件的新型半导体材料, 属于第三代半导体材料。它具有宽的直接带隙、强的原子键、高的热导率、化学稳定性好等特性以及强的抗辐照能力, 由于 GaN 材料的这些特性, 其可以应用在高温、高压、大功率等环境下以及强的辐照环境中, 使其应用范围更加广泛。但是随着器件工艺技术的不断发展, GaN 基微波功率器件其尺寸越来越小, 有源区体积变得越来越小, 厚度也越来越薄, 因此功率密度会随着所加功率不断增大, 在大功率条件器件工作时导致内部热量不断积累, 致使温度越来越高, 会影响器件的沟道电子迁移率、输出电流、跨导和频率等器件特性, 由于器件这些自热效应^[6,7], 沟道温度会不断升高, 将严重影响器件的可靠性以及使用寿命。这些问题都将成为制约 GaN 材料发展的重要因素。

1.2 国内外研究进展

随着器件尺寸的不断缩小,功率微波器件的有源区体积越来越小,从而引起的温升问题成为制约器件一系列特性与可靠性的最大因素,因此温升与热阻的准确测量成为 GaN 基器件发展过程中的亟待解决的关键技术。近年来越来越多的国内外研究学者为了改善温升对器件特性以及可靠性的影响,展开了大量的研究工作^[8,9]。器件温升测量其实就是在器件工作状态下利用现有的技术直接观察或者间接测量与器件温度有关的物理量,从而得到器件芯片的温度。

针对目前结温升的测量方法,比较常见的可以分为物理接触法、光学法、以及电学法。每一种方法都有各自的优点以及缺点,并且针对这几种温升测量方法国内外研究学者都做了大量的研究,以便找到更准确有效的测量的方法。但是,目前测量器件温升时往往只运用其中某一种方法。由于对器件的破坏性操作、空间分辨率不足、温度分辨率不足等原因导致最终测量出的结果不准确。

物理接触法是一种将温度传感器与被测器件的芯片接触在一起进行温度测量的方法。这种方法必须使传感器探头与被测器件芯片表面之间接触良好,因此被测器件必须是未封装的,或者将封装后的器件进行开帽处理才能利用此方法进行温升测量。同时由于物理接触法是一种热电偶、铂电阻或者温敏二极管式探头,其对温度的敏感度比较低,对温度的响应速度远不及被测器件温度变化的速度,因此在响应速度比较快的瞬态温升测量中极少使用。光学测温的方法是利用被测半导体器件的激发辐射、散射、反射辐射等特性进行温度测量的一种技术手段。利用光子束聚集在器件某一点处所产生的散射、折射等物理特性,然后检测器件折射或者散射后的光子束的相位或者能量变化来确定某一处的温度变化^[10]。其测量方法是一种非接触式测量,利用测量设备发出的光子与被测器件发生物理反应,去计算最终的被测点处的温度变化。因为利用光子束照射产生散射或者折射物理特性,因此其空间分辨率比较高,但是也会受到仪器设备技术参数的限制。并且由于其利用光子束照射器件芯片表面来测量温度变化,其被测芯片必须为暴露在测量环境下,属于一种对被测器件进行破坏测试的方法。电学法是根据半导体器件电学参数与温度之间相关性来测量器件工作温升的。小电流下器件的 PN 结电压与温度呈现出良好的线性关系^[11]。因此可以将结电压随温度的变化作为温敏参数来研究器件的结温升以及热阻。因为电学法是根据被测器件某个电学特性参数作为温敏参数来观察温度的变化,被测器件不需要进行破坏性处理。其是一种非探头式的物理接触的测量技术,不需要器件进行开帽处理,是一种无损的测量方法。在测试时可以直接给器件加载功率,让器件有源区温度自发驱动,不会受到器件封装形式的影响^[11]。所以只要器件的电学参数与温度呈现出良好的线性

关系即可以利用电学法测量器件的温升与热阻。而本课题中所使用的 HEMT 器件在高温时（温度高于 100°C ）其温度系数并非线性关系，因此本课题未使用电学法来测量器件温升。

结温升的测量最主要目的是为了得到器件热阻，而在器件工作、老炼或寿命试验时，热阻值是计算器件结温的重要参数。针对以上只用单一方法测量器件温升所存在的不足，本文将红外法与数值模拟仿真法结合起来测量温升，会得到更加准确且有效的结果，同时能够更准确的得到器件的热阻，给器件在实际工作中的应用提供了可靠的数据依据。

在利用热阻值计算结温时，通常会热阻当成一个恒定不变的值。但研究发现，器件热阻会随着诸多因素发生变化。台湾大学 Ying Shangpin 等^[12]研究团队发现 LED 器件热阻随加载功率、环境温度的增加而变大，同样中科院研究王立新等^[13]发现 VDMOS 器件热阻也有此种变化规律。近几年来大多数研究者利用数值模拟方法研究 HEMT 器件的电学特性、热特性等，并且都对此展开了大量工作，通过模拟来分析制约器件特性的原因，诸如南通大学的余晨辉等^[14]对双异质结 HEMT 器件电流崩塌效应的研究，北京工业大学的张亚民等^[15]对 AlGaIn/GaN HEMT 器件自加热效应进行二维瞬态模拟，常熟理工学院的顾江等^[16]对 HEMT 器件电流崩塌与界面热阻与温度的研究，以及南开大学 Wang Xiaodong 等^[17]研究者都基于模拟仿真对器件性能进行分析并提出了极具价值的理论分析模型。然而，目前对 HEMT 器件的热阻随加载功率及温度的变化规律的研究甚少。同时 HEMT 器件的功率密度大，在对 AlGaIn/GaN HEMT 随加载功率、环境温度等条件进行加速寿命试验时，将热阻做定值会错误估计器件可靠性，从而严重影响 HEMT 器件在实际工作的应用。

综上所述，以上结温升测量方法不能准确有效的测量出实际温度，最终导致测量的器件热阻不准确，并且通过研究发现热阻并非一个固定不变的值，它会随着诸多因素发生变化^[13]。目前对于器件热阻随着不同环境、加载功率等因素发生变化的情况，国内外研究学者做了大量的研究，并提出了极具价值的研究结果，但对 GaN HEMT 器件热阻变化原因的研究甚少。HEMT 器件凭借着其一系列的优良特性应用在广泛的领域，而热阻是监测器件在工作中热特性的重要标准，准确且有效的结温升及热阻的测量成为目前 HEMT 器件在实际应用中的关键问题。

1.3 本文主要内容

针对以上问题，本论文采用红外热像测温法与数值模拟法相结合，研究了 CREE 公司的 AlGaIn/GaN HEMT 热阻在不同环境下的变化规律。本论文主要进行了如下工作：

- 一、小尺寸栅极 HEMT 器件结温测量方法。利用红外热像仪法对 HEMT 器件进行温升测量，因为红外热像仪的空间分辨率最高为 $3\mu\text{m}$ ，所测量的器件栅极（ $0.45\mu\text{m}$ ）温度为栅极及其附近范围的平均温度，比实际温度低。利用 Sentaurus TCAD 进行模拟仿真，从模型中提取出 $0.45\mu\text{m}$ 范围内的器件结温，此温度更接近实际温度。
- 二、在不同加载功率以及不同壳温下利用红外法对 GaN HEMT 器件进行结温升测量。通常利用热阻去计算器件的工作结温时，往往将热阻看做是一个定值，在不同条件下进行老化寿命试验时，将热阻看做定值会估错器件实际可靠性。因此要研究在器件在不同工作条件下热阻的变化规律，从正确的热阻值中推算出器件此条件下的结温。并通过拉曼法去验证红外法测试结果的正确性。
- 三、利用 Sentaurus TCAD 对 GaN HEMT 器件进行稳态以及瞬态模拟。为了进一步说红外热像仪法研究出的热阻变化规律，首先利用数值模拟方法对 HEMT 器件进行建模仿真，通过模拟结果推算出热阻值，并与红外热像仪法测量结果进行对比。进一步证实热阻变化规律以及理论解释的正确性。最后在正确的仿真模型基础上改变栅长的大小，研究栅极长度对热阻值得影响。并对建立好的模型进行瞬态模拟，对比相同频率下不同占空比的温升变化。文章的最后对全文进行总结。

第 2 章 小尺寸栅极 HEMT 器件结温测量技术研究

本章主要介绍了测量器件结温升的方法,并结合数值模拟仿真提取小尺寸栅极 HEMT 器件结温,为下文研究 HEMT 器件热阻随不同环境、加载功率等因素发生变化做了必要的理论以及数据基础。

2.1 结温升测量方法

2.1.1 红外法测温原理

红外热像仪测试原理就是利用光学成像以及红外探测器将被测物体发出的不可见红外能量转变为可见的热分布图像来进行测温的^[18]。最终由探测器接收形成热分布图传到 PC 机,而探测到的红外图像与被测物体表面的热分布是相对应的,被测物体的不同温度最终会以不同颜色显示出。红外线是一种位于 0.75-100 μm 波段之间的电磁波,它会伴随着物体内部的热运动不断向周围散发,红外热像仪就是利用被测物体表面温度与红外辐射波长分布之间的关系这一原理来进行温度测量^[19,20]。

如图 1 为红外热像仪,其主要是由红外探测器元件来探测被测物体的辐射出的红外电磁波。被测物体的红外辐射经过镜头聚集到红外探测器上,此时由探测器转变之后产生电信号,该信号经放大后会数字化然后经过热像仪的电子处理部分,再转化成我们能在显示器上看到的红外图像。

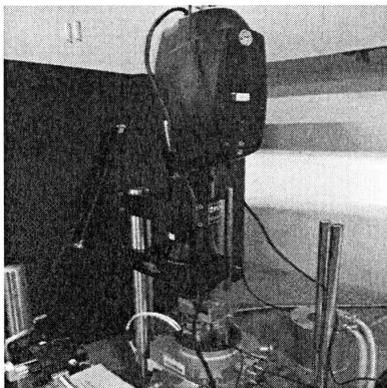


图 2-1 红外热像仪

Fig 2-1 Infrared image

红外测温法会有一些的误差,如环境因素,温度越高被测物体产生的附加辐射影响越大,环境清晰度越低,误差越大;测量距离,红外测温仪与被测物体之间必须保持合适的测量距离,测试结果才能准确;目标尺寸,由于受到红外波长

的限制,被测物体的尺寸大小也是影响测量结果的因素;同时被测物体的表面辐射率等因素也会影响红外测温法的准确性。

2.1.2 拉曼法测温原理

拉曼光谱法近几年得到了广泛的应用,它是利用激光入射到样品会产生散射光,这些散射光分为弹性散射和非弹性散射,当入射光子与晶格发生碰撞时若没有能量转换,此时原入射光频率不发生改变,这种弹性散射称为瑞丽散射,此外还有一系列对称分布着若干条很弱的与入射光频率相同的拉曼谱线,光子会吸收或者发射一个声子,频率会发生改变,这种非弹性散射称为拉曼散射。拉曼散射频率与温度有关^[21],因此可以测量被测器件加载功率前后的拉曼频移来测量其温度变化。并且不同材料的拉曼光谱有着各自不同于其他材料的特征光谱-特征谱,其表征了和鉴别材料提供了指纹谱。其中 Kuball 研究团队所运用的显微拉曼光谱法使用最广,影响最大,其空间分辨率可以达到 $1\mu\text{m}$,并且时间分辨率可达到 $0.1\mu\text{s}$ ^[22]。图 2-2 给出了 Kuball 运用显微拉曼光谱法测量的 GaN HEMT 器件沿栅长方向的温度分布^[23]。从实验结果中可以看出 HEMT 器件的沟道最高温度点位于栅极靠近漏极一侧^[24]。拉曼法测温最大的缺点就是不能够准确的找到被测器件最高温度点位置,其温度分辨率过低,大约为 10K ^[25]。

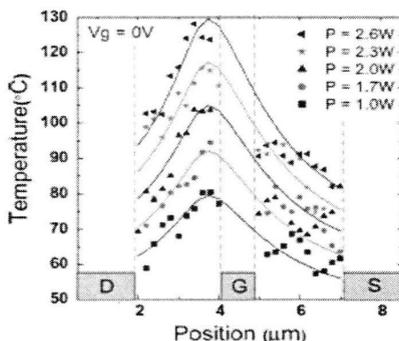


图 2-2 AlGaIn/GaN HEMT 器件温度分布

Fig 2-2 Temperature distribution of AlGaIn/GaN HEMT

2.1.3 电学法测温原理

基于半导体器件电学参数与温度的关系,在小的测试电流下半导体 pn 结结电压随温度呈现良好的线性关系^[26]。因此,可以测出结电压与温度的关系作为温度系数,最终外推出被测器件工作时的结温升。将不同温度下器件结电压作为温敏参数,将 HEMT 器件放在温箱里,利用电源测量在不同温度下器件的结电压。结电压与温度之间的关系斜率即为温度系数 a 。要想得到一种器件的温度系

数 a ，要在不同温度下对器件的结电压进行检测。将器件放在温箱中如图 2-3，利用电源如 Agilent2400 给器件加载小的测试电流以保证不产生结自升温，如 1mA、10mA，将温箱温度设置为 50℃，同时检测器件结两端电压。利用小电流测量目的是为了不引起器件内部自升温^[27]，当加载小电流后可以将此时温箱环境中的温度当做器件的结温。如果利用大电流当做测试电流，当加载测试电流后，器件本身所加载的功率会产生一定的热量，最终导致温箱环境温度与器件结温之间存在一定误差。改变温箱温度，重复相同的步骤，检测器件结电压。将记录下的数据进行拟合处理，算出结电压与温度之间关系斜率即为温度系数 a ，可以利用温度系数外推出结电压下所对应的器件结温。



图 2-3 温箱

Fig 2-3 Temperature Box

根据热阻的基本原理，热阻即当稳定的功率 P 加载在器件两端时，器件内部会产生热量，而阻碍热流通路上热量传递的阻力就是热阻，它表示了不同介质之间热量传递能力的大小^[28]。稳态热阻表示了器件加载功率后，热流通路上会出现温差 T ，温差 T 与所加载功率之间的比值即为此处材料的稳态热阻，即热阻表示了功率 1W 所引起的温升，单位 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。根据 JEDEC 标准^[29]，半导体器件热阻公式 (2-1) 为：

$$R_{th}=(T_j-T)/P \quad (2-1)$$

其中， P 为器件所加载功率， T_j 为器件在加载功率条件下多达到的稳定结温， T 为参考温度点。参考温度点可以为器件壳，也可以为大气。当利用 Phase11 热阻测试仪来测量器件热阻时，如图 2-4，首先要测量器件的温度系数 a ，将得到的斜率和截距输入测试仪中，即可测量器件热阻，过程中可以检测器件结温。传统的电学法测量结温与热阻最大的优势在于其是一种非破坏性的测试方法，并且只通过测量一些与温度相关的电学参数即可得出结温的变化关系。但是，对于 CREE 公司的 HEMT 器件，将栅源电压作为温敏参数，在测量温度系数时发现，加载小测试电流后，当温箱温度超过 100℃后，结电压与温度并非一个线性关系，会出现一定的弯曲程，并且对于 HEMT 器件其工作时容易产生自激现象，因此不再适合利用电学法测量 HEMT 器件的结温以及热阻，否则会导致最终测量结

果有较大误差。如图 2-5 为利用温箱测试的三支不同 HEMT 器件结电压与温度之间关系。

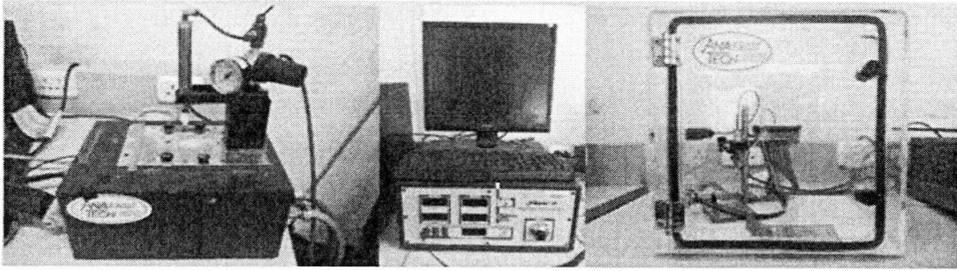
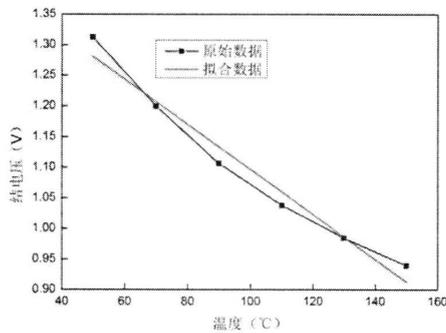
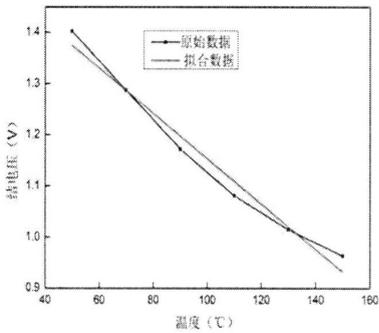


图 2-4 Phase11 热阻仪

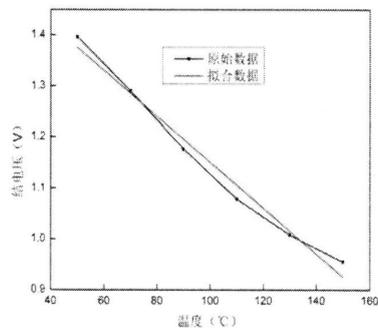
Fig 2-4 Thermal instrument of Phase11



(a)



(b)



(c)

图 2-5 三支不同 HEMT 器件结电压与温度关系

Fig 2-5 The junction temperature and voltage relationship of three different HEMT device

三种方法各有自己的优缺点，红外热像仪法与拉曼法都是一种非接触式的测量方法，都可以获得器件芯片的温度分布。缺点是被测器件需要进行开帽处理，

即需要裸露表面,是一种破坏性测试,并且空间分辨率不满足小尺寸栅极测量要求。测试设备较昂贵,测试过程比较繁琐。电学法同样是一种非接触式测量,不需要对器件进行开帽,可以获取纵向热阻的构成。缺点是测量 HEMT 器件时容易产生自激现象,导致测量结果不准确。因此本文中利用红外热像仪法与物理数值模拟仿真方法来研究器件的热特性。

2.2 模型选择

2.2.1 模拟软件

Sentaurus TCAD即Technology CAD,是一种利用计算机来进行数值模拟的方法,它可以对半导体工艺技术和半导体器件进行开发以及优化。其是瑞士ISE公司开发研制的设计制造软件。它被广泛应用到工艺器件模拟以及集成电路等半导体行业。TCAD通过计算机来对基本的物理偏微分方程进行求解,比如扩散方程和传输方程^[30]。因为它利用的是最底层的物理求解方法,因此可以在模拟精度上与实际试验结果很接近,对器件生产工艺过程中产生极具价值的预测作用。随着集成电路技术的不断发展,器件的特征尺寸越来越小,导致工艺过程越来越复杂。因此,在生产新的器件或者研制新得工艺技术过程中,可以先利用数值模拟的方法来对实际器件进行模拟,观察器件的各项特性,这样可以降低器件制造过程的成本,以及缩短的制造和研发周期。一般TCAD可以包括两个主要的部分:器件模拟和工艺模拟。器件模拟可以对半导体器件的电学特性、热特性等性能进行模拟测量。在模拟过程中会将器件描绘成离散的有限元结构,并对器件的各项尺寸、参数进行设置。在利用软件进行工艺模拟时,会根据不同的工艺步骤选择不同的物理方程,比如器件工艺过程中的氧化、刻蚀、淀积、离子注入等,都可以在模拟过程中进行表现出来。本文中主要用到了器件模拟,根据对实际器件的结构、参数以及元素等分析来模拟器件的电学特性、热特性等。在模拟过程中会用到物理模型,通过计算这些模型的载流子连续方程、泊松方程等来估算器件内部的特性。利用实际测试器件的数据作为边界条件,来模拟器件的各项特性。

TCAD主要包括以下几种套件:Sentaurus Process、Sentaurus Structure Editor、Sentaurus Device、Inspect、Tecplot SV等。本文在进行模拟过程中用到了结构编辑器、网格划分、器件模拟器、Tecplot SV等部分。本课题中使用TCAD模拟优点是可以模拟得到小尺寸栅极温度,缺点是进行模拟时边界条件难以获得。

2.2.2 物理模型

在对AlGaIn/GaN HEMT器件进行电学特性以及热特性模拟仿真时，物理模型的选择尤为重要。半导体器件内部各种物理特性，尤其在不同的应用环境中，会出现不同的现象。所以对不同器件进行模拟要选择不同的物理模型，同时根据模拟需求来选择不同的物理方程。选择正确的物理模型是最终模拟结果是否准确的前提^[31]。

1) 漂移-扩散模型

目前在数值模拟过程中漂移-扩散模型是运用最广泛的经典模型。模拟过程中主要是利用计算机对不同的物理方程进行求解的过程，如载流子运输方程、泊松方程、载流子连续方程等，获得模拟器件的载流子运输以及扩散行为，最终获得不同的电学参数。

泊松方程如式 2-1:

$$\nabla^2 \psi = -\frac{q}{\varepsilon} (p - n + N_D^+ - N_A^-) \quad (2-1)$$

其中， q 为基本电荷， ε 为相对介电常数， N_D^+ 和 N_A^- 分别为电离施主和电离受主浓度， n 和 p 分别为电子和空穴浓度。

载流子连续性方程如式 2-2、2-3

$$\nabla \cdot \vec{J}_n = qR + q \frac{\partial n}{\partial t} \quad (2-2)$$

$$-\nabla \cdot \vec{J}_p = qR + q \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2-3)$$

其中， \vec{J}_n 和 \vec{J}_p 分别为电子和空穴电流密度， R 为空穴复合率。

载流子输运方程:

$$\vec{J}_n = -nq\mu_n \nabla \phi_n \quad (2-4)$$

$$\vec{J}_p = -pq\mu_p \nabla \phi_p \quad (2-5)$$

其中 ϕ_n 和 ϕ_p 分别为电子和空穴的准费米势， μ_n 和 μ_p 分别为电子和空穴迁移率。

将上述方程组合起来构成了漂移-扩散模型。器件在实际工作时往往会产生自热效应，在建立仿真模型时，为了更好的去模拟器件自热，一般会将热动力学模型用到建立的仿真模型中去。在热动力学模型中晶格与载流子处于热平衡状态。因此在漂移-扩散模型基础上，会将温度对载流子运输的影响考虑进去。修正之后的载流子运输方程为 2-6、2-7 所示:

$$\vec{J}_n = -nq\mu_n(\nabla\varphi_n + P_n\nabla T) \quad (2-6)$$

$$\vec{J}_p = -pq\mu_p(\nabla\varphi_p + P_p\nabla T) \quad (2-7)$$

T 为晶格温度， P_n 和 P_p 为热电功率。

热动力学模型基本方程除了泊松方程和连续性方程，还有晶格热流方程：

$$\frac{\partial}{\partial t} c_L T - \nabla \cdot \kappa \nabla T = -\nabla \cdot [(P_n T + \varphi_n) \vec{J}_n + (P_p T + \varphi_p) \vec{J}_p] + a + b \quad (2-8)$$

$$a = -\left(E_c + \frac{3}{2}kT\right) \nabla \cdot \vec{J}_n - \left(E_v - \frac{3}{2}kT\right) \nabla \cdot \vec{J}_p$$

$$b = qR(E_c - E_v + 3kT)$$

其中 c_L 为晶格热容， k 为玻尔兹曼常数， κ 为热导率， E_c 和 E_v 分别为导带和价带能级。

2) 载流子迁移率模型

在模拟仿真中，对于非掺杂材料，一般会将迁移率看作只跟晶格温度有关，这种最简单的情况称之为固定迁移率模型。在仿真掺杂材料时，迁移率不仅仅跟晶格温度有关，它同样会受到杂质散射的影响，所以在建模的过程中必须考虑器件中掺杂的影响。在高电场的情况下，载流子漂移速度不再随电场强度增大而变大，而是随着电场强度的变大，载流子的漂移速度逐渐变小。因此迁移率模型选择是否正确直接决定了仿真结果是否准确。低电场迁移率模型，载流子迁移率会因为电离杂质对载流子的散射作用而退化。在进行仿真建模时，只将声子散射的影响考虑进所建模型即可。在低电场情况下，随着电场强度的增加载流子的迁移率会增加。但是，在高电场条件下，载流子漂移速度与电场不再成正比关系，而是在一定电场强度下，载流子迁移率恒定不变。因此，在建立仿真模型时要根据电场的大小有针对性的去选择迁移率模型。

3) 产生复合模型

通过理论研究可知，半导体中的自由电子和空穴在运动时因为碰撞而直接复合消失。从能带论来讲，高能级的电子释放能量后从导带电子越过禁带进入价带与价带中的空穴复合的复合过程，同时低能级的价带电子因激发而跃迁到导带，从而产生电子-空穴对的产生过程。这两种过程对非平衡状态下的半导体电学特性影响很大。在对 AlGaIn/GaN HEMT 器件进行二维数值模拟时 SRH(Shockley-Read-Hall)复合、辐射复合两种复合模型很重要。SRH复合模型是通过单一复合中心的间接复合模型；辐射复合是根据能量守恒定律，电子与空穴进行复合时会以光子形式释放一定的能量，若是导带电子与价带空穴直接复合为

直接复合,若通过复合中心进行复合为间接复合,其中直接复合为辐射复合的主要形式。本文进行数值模拟仿真时主要用了这两种复合模型。

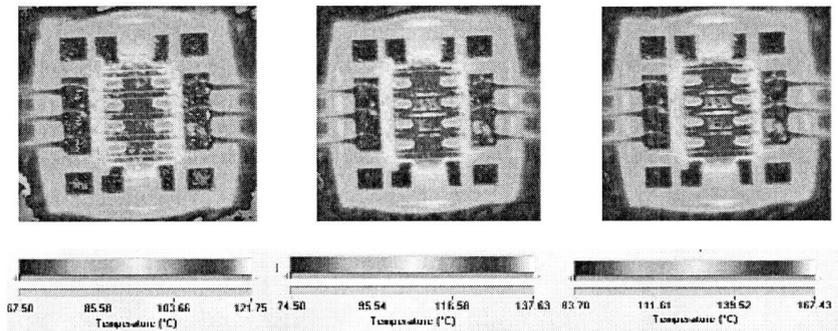
2.3 小尺寸栅极 HEMT 器件结温测量方法

通过上节的讨论,目前,HEMT 器件结温的测量一般采用电学法、红外法或者拉曼法。HEMT 器件属于射频器件,在用电学法测量结温时会产生自激现象,并且通过研究测量发现,较高温度下器件结电压与温度并非线性关系,将会导致结温测量结果不准确。并且采用电学法测量结温,对工作电流及测量电流之间的开关切换速度要求很高,采用防自激电路会影响开关切换速度,从而影响测量结果的准确性,因此电学法不能满足准确测量 HEMT 器件结温的要求。红外法的空间分辨率对 HEMT 器件结温测量结果是一个制约因素,红外法最高空间分辨率为 $3\mu\text{m}$,而 HEMT 器件的栅长(即结温测量单元)一般在 $0.2\mu\text{m}$ — $1\mu\text{m}$ 之间,红外法空间分辨率达不到测量要求,导致测量结温误差较大。红外法也不能满足准确测量 HEMT 器件结温的要求。因此需要找出准确测量 HEMT 器件结温的方法。

针对目前测量方法不能满足准确测量 HEMT 器件结温的问题,本文中利用红外法与模拟相结合测量 HEMT 器件结温。

2.3.1 测量过程

首先,在保证 HEMT 器件不会产生自激的条件下,利用红外热像仪等设备,测量 HEMT 器件在不同空间分辨率、不同功率条件下的结温;其次,利用模拟软件 TCAD 将一个测试条件下(红外空间分辨率 $7\mu\text{m}$,电压 28V ,电流 500mA)的 HEMT 器件红外法测量的结温分布结果作为边界条件,建立仿真模型;再次,利用不同测试条件下(如,不同分辨率,不同电流,不同电压等)的红外法测量的结温分布结果验证模型的准确性,并优化模型;最后,根据结温测量单元的精度需求,利用优化后的模型提取不同栅极中心范围(如 $0.05\mu\text{m}$ - $7\mu\text{m}$)的 HEMT 器件结温。图 2-6 为功率为 14W ,不同平台温度下的红外热像仪图像。



(a) 恒温平台温度 60℃ (b) 恒温平台温度 70℃ (c) 恒温平台温度 80℃

图 2-6 不同平台温度下的红外热像仪图像

Fig 2-6 Infrared image under different platforms temperatures

该方法解决了红外法不能准确测量 HEMT 器件结温的问题，并且消除了红外测试过程中的自激问题，可以得到准确的器件结温。

测量装置包括被测 HEMT 器件、电源、器件夹具、防自激电路、红外热像仪、温度测量计、红外热像仪恒温平台,如图 2-7 为测试示意图;其特征在于:用电源给被测 HEMT 器件加栅源电压以及漏源电压,红外热像仪用来对被测 HEMT 器件进行红外测试,在进行红外测试过程中用温度测量计测量 HEMT 器件壳温;具体测试方法可以概括为:首先,将被测 HEMT 器件通过器件夹具固定在防自激电路上,用导线将防自激电路与电源相连接,将被测 HEMT 器件放在红外热像仪下进行温度测量,用电源加漏源电压 V_{ds} 以及栅源电压 V_{gs} 。通过调节漏源电压 V_{ds} , 栅源电压 V_{gs} , 漏源电流 I_{ds} , 并保持 1-2 分钟,使壳温达到稳态,测量不同功率 1.4W, 2.8W, 5.6W, 8.4W, 11.2W, 14W 下的器件壳温与结温;通过改变红外热像仪的空间分辨率,用 5 倍镜头以及 15 倍镜头,测量在不同分辨率下器件的壳温及结温;之后,根据一个测试条件下即以红外空间分辨率 7 μ m, 电压 28V, 电流 500mA 的 HEMT 器件红外法测量的温度分布结果作为边界条件,基于 HEMT 器件的各项参数利用模拟软件建立仿真模型;所述的各项参数包括栅长, 栅宽, 漏宽, 源宽, 栅极到漏极间距, 栅极到源极间距, SiC 厚度, GaN 厚度, AlGaN 厚度以及各种材料的热容, 热导率;再次,将上述的不同分辨率下测试结果(如漏源电压 $V_{ds}=28V$, 漏源电流 I_{ds} 分别为 100mA, 200mA, 300mA, 400mA 的测量结果;漏源电压 $V_{ds}=28V$, 漏源电流 $I_{ds}=500mA$, 恒温平台温度分别为 60℃, 70℃, 80℃, 90℃, 100℃的测量结果)带入建立的仿真模型中,验证模型的准确性,并对模型进行优化,使各模拟结果与红外测试结果相吻合;

最后,根据结温测量单元的测量精度需求,利用优化后的模型提取栅极中心范围 $0.05\mu\text{m}-7\mu\text{m}$ 下 HEMT 器件的结温。整个测试流程如图 2-8。

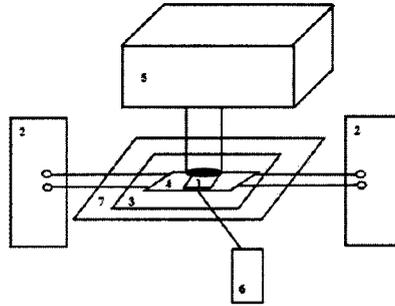


图 2-7 测试装置示意图

Fig 2-7 Schematic diagram of the test

(HEMT 器件 1、电源 2、器件夹具 3、防自激电路 4、红外热像仪 5、温度测量计 6、红外热像仪恒温平台 7)

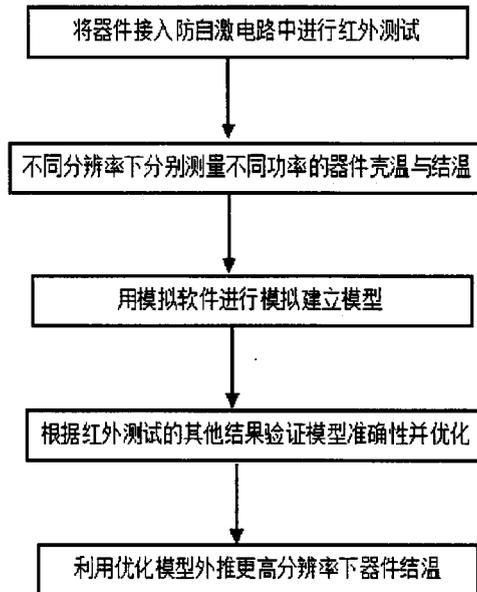


图 2-8 测试流程图

Fig 2-8 Flow chart of the test

为了确保 HEMT 器件的测试结果准确,首先需要保证 HEMT 器件在测试过程中不产生自激现象,具体操作如下:

将 HEMT 器件固定在防自激电路上，确定源极与地良好接触，用电源给器件加栅源电压 V_{gs} 以及漏源电压 V_{ds} ，改变漏源电压 V_{ds} ，观察漏源电流 I_{ds} ，以确定 V_{ds} - I_{ds} 符合 HEMT 器件输出特性的规律，此时可以确定器件的源极与地接触良好，测试过程中工作稳定不会产生自激现象。并且文中所述的亮温测量是将温度测量计的探头固定在被测 HEMT 器件亮的正中央，用于提高亮温的测量精度。

2.3.2 实验结果与讨论

为了确保模拟的正确性，将一个测试条件即以红外空间分辨率 $7\mu\text{m}$ ，电压 28V ，电流 500mA 时的 HEMT 器件红外法测量的结温分布作为边界条件，建立仿真模型；再将其他条件下测量的红外数据代入以上建立的模型中，验证模型准确性并进行优化；最后，利用优化后的模型外推 HEMT 器件栅极中心范围 $0.05\mu\text{m}$ - $7\mu\text{m}$ 下器件的温升。如图 2-9 为 TCAD 模拟栅极附近外推 $7\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$ 、 $3\mu\text{m}$ 、 $2\mu\text{m}$ 、 $1.5\mu\text{m}$ 、 $1\mu\text{m}$ 、 $0.5\mu\text{m}$ 、 $0.2\mu\text{m}$ 、 $0.1\mu\text{m}$ 、 $0.05\mu\text{m}$ 的温度曲线，从图中可以看出栅极中心范围越小器件结温越高，此时得出的器件结温更符合实际温度。

这种方法不仅解决了 HEMT 器件在进行红外测试时出现的自激现象，增加了测试的稳定性及准确性，同时利用本方法建立的仿真模型可以得出小尺寸栅极下的温度分布，解决了目前红外法测量器件温度分布时分辨率不足的问题。

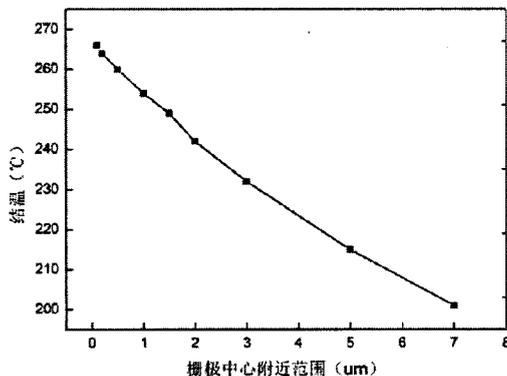


图 2-9 TCAD 模拟不同栅极范围内的器件结温

Fig 2-9 Simulate the Junction temperature within the range of the gate by TCAD

2.4 本章小结

本章主要介绍了测量器件结温的三种方法：红外法、拉曼法以及电学法，简单概括了三种方法的原理以及测量过程，并对其优缺点进行了对比。最后通过对三种方法的比较并结合模拟仿真准确提取出小尺寸栅极 HEMT 器件结温，通过

这种方法可以外推出更符合实际的结温。并为下文中研究加载功率与壳温对 AlGaIn/GaN HEMT 器件热阻的影响做了理论基础。

第3章 不同环境对 GaN 基 HEMT 器件热阻影响的研究

结温是制约器件性能和可靠性的关键因素，通常利用热阻计算器件的工作结温。然而，器件的热阻并不是固定值，它随器件的施加功率、温度环境等工作条件的改变而变化。针对该问题，本文以 CREE 公司的 HEMT 器件为研究对象，利用红外热像测温法与拉曼法对 HEMT 器件进行结温升测量，测量研究了 AlGaIn/GaN HEMT 器件在不同加载功率以及管壳温度下热阻的变化规律。HEMT 器件属于射频器件，在用化学法、红外热像仪、拉曼等测量结温时会产生自激现象，导致结温测量结果不准确，在测量时要保证 HEMT 器件能够稳定工作，因此首先设计针对该 HEMT 器件的防自激振荡电路。本章首先阐述了针对该 AlGaIn/GaN HEMT 器件的防自激振荡电路的设计方法，之后运用红外法以及拉曼法在匹配电路的保护下对 HEMT 器件进行结温测量，最后阐述 HEMT 器件随不同的加载条件以及环境变化时热阻的变化规律。

3.1 防自激电路设计

高频器件在使用过程中，由于信号传输过程中的阻抗不匹配，从而使信号质量变差，最终导致高频器件在工作时产生自激振荡效应，为了能使器件正常工作，要针对该 HEMT 器件设计防自激匹配电路。

3.1.1 阻抗匹配

HEMT 器件属于微波器件，被广泛应用到雷达、航天、通讯等领域^[32]。在使用 HEMT 器件时，由于其经常工作在高频电路中，因此很容易发生自激振荡现象，导致整个电路失效。相对于低频电路，高频电路中的元器件因为特征尺寸很小，工作时输入信号的波长已经可以和元器件尺寸相比拟，从而导致整个电路阻抗不匹配。阻抗匹配是电路设计过程中经常遇到的一种问题，是否匹配直接反映了输入与输出电路之间是否满足特定的功率传输关系。电路在工作状态时，如果信号源的内阻与电路连接之间的传输线特性阻抗大小相等且相位相同，或电路中传输线的特性阻抗与所接负载的阻抗大小相等且相位相同，此时称为整个电路处于阻抗匹配状态，简称为阻抗匹配^[33]。反之，则称为阻抗失配。信号在传输过程中负载阻抗与信号源内阻抗之间要符合一个特定的关系，这样当电路有负载时器件在工作状态下才不容易产生振荡现象。当整个电路输入端阻抗匹配时，传输线上将会有最大的功率传输，相反，若不符合阻抗匹配时，传输线上将得不到最大功率传输，同时可能对整个电路产生危害，此时传输线上将同时出现反射波

和应射波。在电路工作时，会想尽办法去避免阻抗失配现象的出现，因为失配情况下，传输线上反射波的出现，将使传送到传输线终端的功率不能全部被负载所吸收，降低传输效率；而在高功率传输情况下，电压或者电流的波动会使传输线的介质发生质变，从而影响正常工作；而且传输线终端的输入阻抗随着频率发生变化，当输送多频信号时，将由于机、线阻抗不匹配而出现失真现象。信号在传输过程中可能会发生反射现象，因此在频率较高的电路中，信号反射对电路产生的影响必须引起注意。在频率较高的电路中，因为信号波长较短，可以跟传输线长度相比拟时，原信号可能跟反射信号发生叠加改变原信号的状态，造成信号失真，产生不可预测的结果。如果传输线上的特征阻抗跟负载阻抗不相等时，在负载端就会产生反射^[34]。因此要想电路正常工作，阻抗匹配电路的设计成为一个必要的环节，这样不仅可以使器件不发生振荡现象，更可以使整个电路系统处于一个稳定的状态。

本文设计的阻抗匹配电路时，当阻抗不匹配时可以考虑使用串联/并联电容、电感的办法，尤其在调试射频电路时经常用到此种方法。再者，可以考虑在电路中运用电阻的串联/并的方法。通过串联一个合适的电阻来跟传输线进行匹配^[35]。

3.1.2 自激振荡

对于高频以及微波 HEMT 器件，在进行结温测试、功率老化或者运用在其他高频电路中时往往会出现自激振荡现象，从而使器件或者整个电路处于不稳定的工作状态。因此，HEMT 器件在实际应用过程中，无论处于什么样的应用环境下，稳定工作是一个必要的前提。当利用红外法或者拉曼法测量结温升的时候，单独对 HEMT 器件加载功率会发生严重的自激振荡现象，有可能对器件造成永久性毁坏，并且测量出的温升并非真实值，会有较大的偏差，此时需要设计此种 HEMT 器件的防自激匹配电路，以便器件在工作时处于稳定状态。

通过理论研究，当满足振荡条件的时候，振荡就能建立并保持。通常，自激振荡是由器件的输入与输出之间各种寄生反馈引起的。寄生反馈，又可以分为外部反馈和内部反馈两种。外部反馈主要是通过公共电源为内阻、馈线或者元件的寄生耦合以及输入端与输出端的空间电磁场的耦合一起的。内部反馈主要是器件的极间电容产生的。自激振荡按照不同的标准可以分为很多种类。根据频率的不同，分为高频自激振荡和低频自激振荡^[36]。振荡频率远高于正常工作频率的称为高频自激振荡，振荡频率低于器件正常工作的频率称为低频自激振荡，等于器件工作频率的为同频自激振荡。自激振荡一般跟器件的工作频率有关，当工作时的频率越高，器件自身越容易产生自激振荡现象，相反，工作频率越低，越容易发生自激振荡现象^[37]。同时，是否容易发生自激振荡现象跟器件工作时所加

载功率有关，一般所加载功率越小，越不容易发生自激振荡，反之，则发生自激的概率越大。本文实验中，单独测试 HEMT 器件的输入输出特性时，器件会发生严重的自激现象，引起的电流或者电压过冲会导致器件永久性的毁坏。在器件制造工艺过程中所存在的寄生电阻、电容、电感等寄生参数会在器件内部形成一个回路，当给器件进行加载功率时，周围环境中的电磁波会影响整个电路，使电路满足振荡条件引起自激振荡。

给器件加载功率后，电路会因满足振荡条件而产生自激振荡，最终导致整个电路不稳定，甚至损坏器件。自激振荡对电路带来的危害有很多，比如（1）存在自激的情况下器件往往加不上所要求的电压或者电流；（2）其次调节器件所加载的电压时，所对应的电流往往会不受控制，出现过低或者过冲现象，从而导致器件结的击穿而损坏；（3）因为器件自身的自激现象会反馈过来影响直流稳压电源的输出，再次影响器件的正常工作等等。所有因为自激振荡所引起的危害都会对器件以及整个电路造成损坏，必须在测量之前就要引起足够的重视。

在利用红外法或者拉曼法对 HEMT 器件进行结温升测量之前，要考虑器件是否能够正常工作，否则测量出的结果会存在较大偏差。因此此时要设计该器件的防自激电路，以保证器件正常工作。

3.1.3 CREE 公司 HEMT 器件防自激电路设计

GaN HEMT 器件凭借电子饱和速度快、禁带宽度大（3.14eV）、击穿电场强度高特点，在高频大功率应用上显示出卓越的性能，因此，被认为是未来电子通讯和雷达应用的关键器件。然而，当器件工作时内部将产生热量，这样会导致器件的结温随着功率的增加而不断升高，将严重影响器件的可靠性以及使用寿命，因此温升所引起的一系列问题将成为影响器件热性的重要因素。但是在实际测量 HEMT 器件温升过程中，如果直接用电源给器件加载功率，测量其漏源电流会发现，电流会不受漏源电压或者栅源电压的控制，出现突然跳变，或者极其不稳定（CREE 公司 HEMT 器件属于常开型器件，利用 Keithley 2400 给栅极加一个较大电压 V_{gs} ，使器件沟道关闭，利用另外的电源给漏源两极加载电压 V_{ds} ，调节栅极电压 V_{gs} ，观察漏源电流 I_{ds} ，或者利用安捷伦 B1500 测量器件的输入输出特性，观察 HEMT 器件的输入输出特性曲线），此时往往就是因为器件自身的自激振荡引起的。当利用红外热像仪或者拉曼测量 HEMT 器件温升时，若只单独的给器件加载功率，会导致器件无法正常工作，甚至烧毁。

因此，为了在测量结温升过程中器件能够稳定工作，必须要消除器件的自激振荡现象。本文中主要针对 CREE 公司的 GaN HEMT 器件进行防自激电路的设计。如图 3-1 为设计的 HEMT 器件防自激电路。

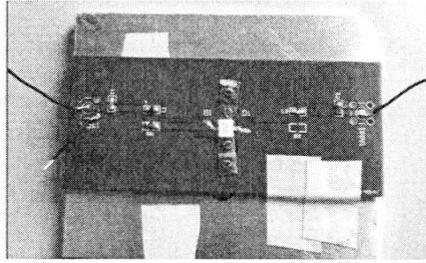


图 3-1 CREE 公司 GaN 基 HEMT 器件防自激振荡电路

Fig 3-1 The anti-self-excitation circuit of GaN HEMT

整个电路中利用电阻、电容、铁氧体磁珠等元器件去抵消器件的内部寄生参数所引起的自激振荡。设计中在栅极处加 RC 网络，将信号源传输过来的信号中的谐波过滤掉，起到滤波作用，同时在栅极处也有 RL 网络，将寄生电流通过电阻 R 消耗掉^[38]。在 RL 网络中用到的是铁氧体磁珠，而并非电感。是因为磁珠可以用来抑制信号传输线、电源连接线上的各种高频噪声以及周围信号干扰，同时具有对静电脉冲进行吸附的能力。并且可以在相当宽的频率范围内保持较高的阻抗，来提高调频滤波效果。在测试的时候用同轴线作为信号传输线，这样可以更好的起到屏蔽作用^[39]。

经过查阅各种资料以及长时间的实验，确定了电阻、电容以及铁氧体磁珠的大小。设计的防自激电路原理图如图 3-2 所示。

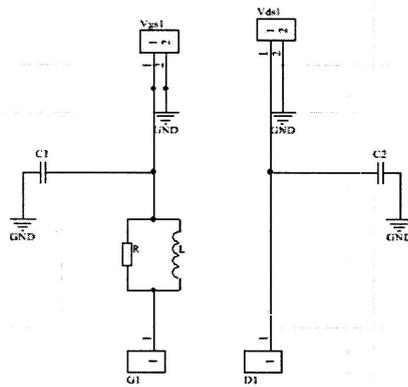


图 3-2 HEMT 器件防自激电路原理图

Fig 3-2 Schematic of anti-self-excitation circuit of AlGaIn/GaN HEMT

制作 PCB 板过程中，传输信号的串扰问题是要考虑的重点问题^[40]。如何抑制 PCB 板中传输信号的串扰，是本文中设计 HEMT 器件防自激电路要考虑的另一问题。传输线上的互感以及互容是在制作 PCB 时产生信号串扰的重要原因。要想避免信号串扰问题（1）可以利用以上提到的同轴线来作为 PCB 板外部信号传输线；（2）可以通过合理设置 PCB 板上的布线间距，布线长度，器件之间的摆放位置等措施来抑制信号串扰，起到防止器件发生自激现象的作用；（3）可以

通过在 PCB 板上传输线两旁增加通地孔，通地孔的间距要有一定的要求，同时地孔的增加可以增大信号的分布电容，使传输线阻抗变大，信号沿变缓；（4）在 PCB 设计中，印制导线拐弯处一般取 135 度钝角。以上方法是抑制 PCB 板信号串扰以及防止器件发生自激现象的有效措施。防自激振荡电路 PCB 板图如图 3-3 所示。

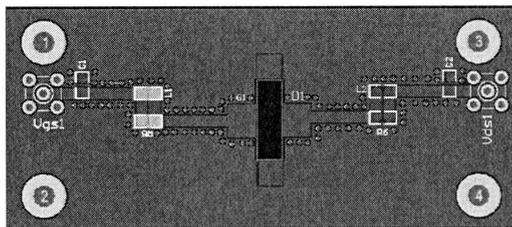


图 3-3 HEMT 器件防自激电路 PCB 板

Fig 3-3 The PCB of Schematic of anti-self-excitation circuit of AlGaIn/GaN HEMT

3.2 红外热像仪法器件结温升测试

3.2.1 测量设备

本节中将对设计 GaN HEMT 器件防自激电路以及测量器件结温升过程中所用的仪器设备做相关介绍。

1) 安捷伦 B1500

随着 CMOS 元器件尺寸的不断缩小，电场强度和电流密度也相应增加，这反而缩短了元件的生命周期。由于这些原因，在 CMOS 元件可靠性测试，像栅极和层间介电性能的劣化、热载流子效应、偏压温度不稳定和互联开路和短路的问题对保证集成电路的生命周期有很大的影响。Agilent B1500 半导体元器件分析仪是新一代的半导体参数分析仪^[41]，如图 3-4 所示，具有评估 CMOS 大规模集成电路可靠性所需要的测量能力。此外，B1500 控制软件 EasyEXPERT 的标准配置里有即用型测量库，涵盖了几乎所有常见的 CMOS 可靠性测试。它包含了多种模块，如中功率 SMU，它是通用型的 SMU，拥有中等的电压和电流源能力以及测量分辨率。中等功率 SMU 最大输出电压为 -100V - +100V，最大输出电流为 -100mA - +100mA。它的最小电流测量分辨率为 10fA，最小电压测量分辨率为 0.5uV；高分辨率 SMU，是为极精密的测量而设计的，最小电流测量分辨率为 1fA；高功率 SMU，相比其他的中功率、高功率 SMU，其拥有扩充了电压和电流源容量。其最大输出电压为 -200V - +200V。最大输出电流为 -1A - +1A，1A 的输出能力用于最重要的可靠性测试；其它的模块如，高电压半导体脉冲发生器单

元 (HV-SPGU), 波形发生器/快速测量单元 (WGFMU), 多频电容测量单元 (MFCMU)。Agilent B1500 半导体元器件分析仪将多种测量和分析功能整合到一起, 可精确并且快速的进行器件特性的测量。本文中在设计 GaN HEMT 器件的防自激振荡电路时用 Agilent B1500 来测量器件的输入输出特性曲线。如图 3-5 所示, 为加匹配电路与不加匹配电路时测得的 HEMT 器件输入输出特性曲线。

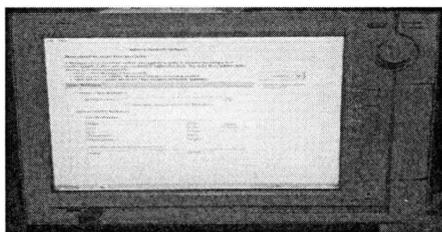
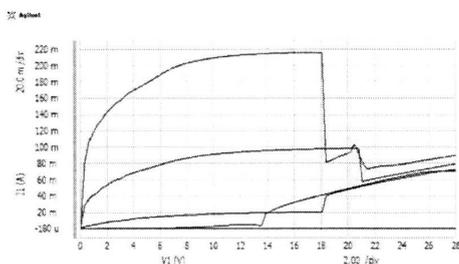


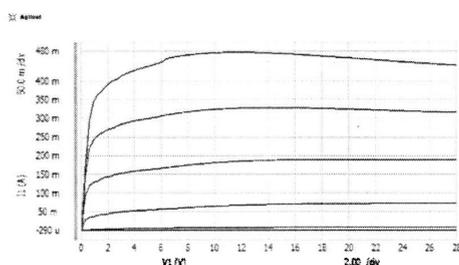
图 3-4 Agilent B1500 半导体元器件分析仪

Fig 3-4 Semiconductor Component Analyzer of Agilent B1500



(a) 不加防自激电路时测得的 HEMT 器件输入输出特性曲线

(a) The input and output characteristic curve of AlGaN/GaN HEMT no anti-self-excitation circuit



(b) 加防自激电路时测得的 HEMT 器件输入输出特性曲线

(b) Input and output characteristic curve of AlGaN/GaN HEMT under anti-self-excitation circuit

图 3-5 HEMT 器件输入输出特性曲线

Fig 3-5 The input and output characteristic curve of AlGaN/GaN HEMT

从图中可以看出, 在加防自激电路后测得的输入输出特性曲线符合理论情况, 只有在器件正常工作时进行结温测试才能得出正确结果。

2) Keithley2400 数字源表

Keithley2400 数字源表是一款集电压源、电流源、电压表、电流表四合一的新型仪器，能够用于快速直流测试，如图 3-6 所示。其内部是由一个高稳定的直流源和一个六位半多功能表构成，六位半电表，可以达到 0.012%的精确度。此表可选用高电压型（1100V）、大电流型（3A）或者大电流脉冲型（10A）电源或者测量。最大输出功率可达到 20W。数字源表内建快速比较器，可以应用在自动化质量管理方面。表的背面有数字 I/O 接口，可以用于跟其他测量仪器进行连接。Keithley2400 数字源表除了可以测量电流、电压、显示电流或电压外，还可以直接测量电阻、功率、百分比、补偿电阻值、电压系数等，是一个应用很广泛的测量仪器。本文实验中，利用 Keithley2400 数字源表给 HEMT 器件加载特定的功率，然后再进行红外热像仪法或者拉曼法的结温升测量。

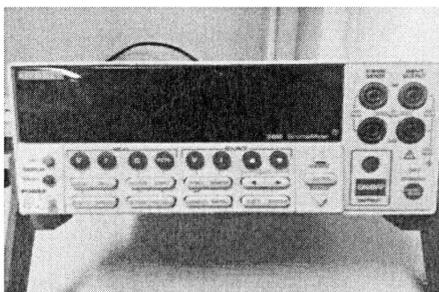


图 3-6 Keithley2400 数字源表

Fig 3-6 Keithley2400 source

3) 红外热像仪

红外热像仪是基于红外线辐射来对物体进行测温的一种仪器。测温过程中，被测物体都会向外界辐射红外电磁波，然后通过红外探测器将红外辐射进行聚焦，以便将能量不同的红外辐射信号转换为相对应的电信号。经过一系列的放大、整合、图像处理、视频处理等过程将被测物体发射出的红外辐射转变成人眼可以观察到的图像^[42,43]其基本原理方框图如图 3-7 所示。

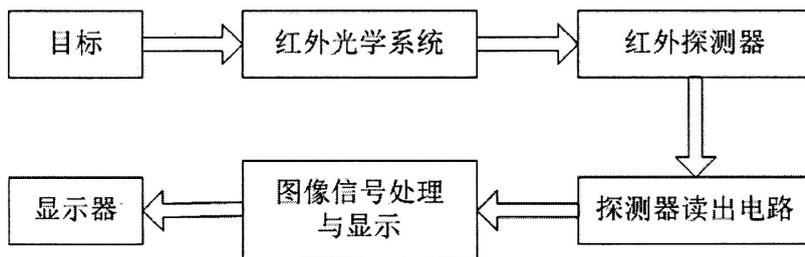


图 3-7 红外热像仪信号传输流程

Fig 3-7 Infrared signal transmission process

通过图 3-8 可以看出，同一事物的可见光图像与红外测试图像不同，红外图像能够根据辐射出的红外线强度将被测物体各个部分区分开来，显示出整个物体的外貌特征，而且红外图可以通过人眼来观察到物体表面温度的分布状况。

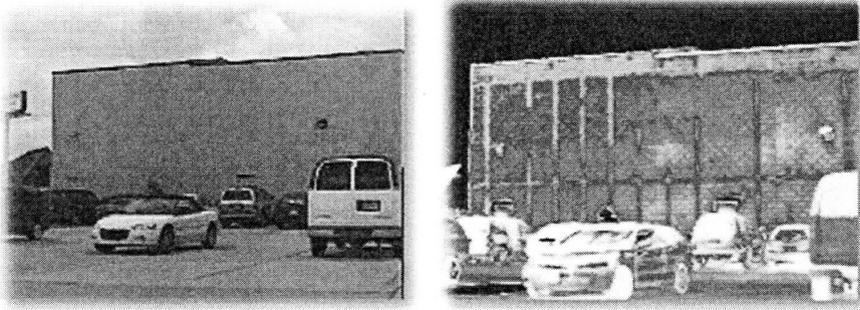


图 3-8 红外热像仪测试图像

Fig 3-8 Infrared test image

红外探测器的分辨率是衡量热像仪探测器优劣的一个重要参数，表示了探测器对焦平面上有多少个单位探测元。本实验中用到的红外热像仪分辨率可达到 $3\mu\text{m}$ ，利用它去测量开帽后的 HEMT 器件结温，最后算出结温升。

4) 拉曼测试仪

光照射在被测样品上时，入射光会发生散射作用。散射光只改变传输方向，而频率与入射光频率相同时，称为瑞利散射；当散射光不只改变方向，同时频率与入射光频率不同时，称为拉曼散射。在拉曼散射中，散射光频率相对于入射光频率减少，称为斯托克斯散射，反之，称为反斯托克斯散射。拉曼光谱仪主要是测定拉曼位移，而拉曼位移取决于分子能级变化，不同的元素其拉曼位移是不同的^[44]。下文中将讲述拉曼测试的详细过程。拉曼测试光谱仪如 3-9 所示。

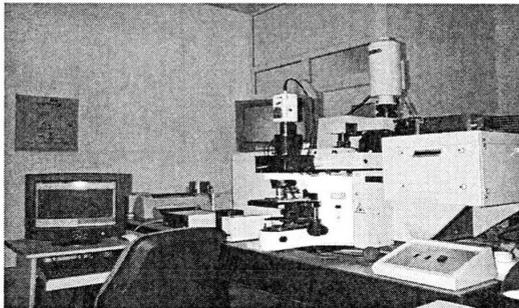


图 3-9 拉曼光谱仪

Fig 3-9 Raman spectroscopy

3.2.2 器件结构

实验过程中我们针对 CREE 公司的 AlGaIn/GaN HEMT 器件作为研究对象，图 3-10 为实验所用的 HEMT 器件外形以及利用光学显微镜观察的器件芯片结构。HEMT 器件是一种电压控制器件，通过栅极电压来控制沟道大小。栅极是由金属-半导体接触形成的肖特基结所构成，通过控制栅极下面的肖特基（Schottky）势垒来控制 AlGaIn/GaN 异质结中的二维电子气（2DEG）浓度而实现对电流的控制。未掺杂的 GaN 层的电子在异质结界面处三角形势阱中形成二维电子气，这些二维电子气与处在 AlGaIn 层中的杂质中心在空间上是分离的，不受电离杂质的影响，从而迁移率很高，因而它有很高的电子饱和速度^[45,46]。

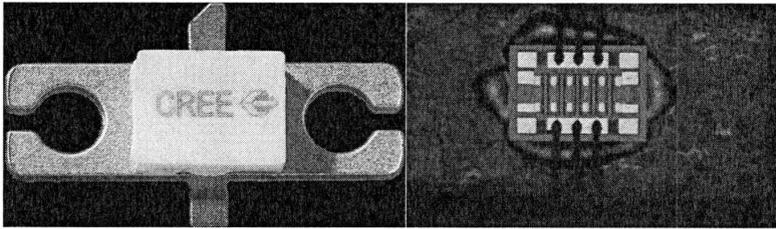


图 3-10 HEMT 器件结构

Fig 3-10 HEMT device structure

3.2.3 红外测试过程

针对 CREE 公司的 GaN/AlGaIn HEMT 器件利用红外热像仪进行有源区温度测试，将开帽后的 HEMT 器件固定在防自激电路上，然后将其放置在红外热像仪的恒温平台上对温度进行精确控制，通过调节漏源电压 V_{ds} ，栅源电压 V_{gs} ，并保持 1-2 分钟，使壳温达到稳态。将漏源电压 V_{ds} 调至 28V，通过改变栅极电压 V_{gs} 来调节漏源电流 I_{ds} 为 100mA，即功率为 2.8W。此时由于器件处于工作状态，内部会有温度变化，通过红外热像仪就可以观察到整个开帽后的 HEMT 器件芯片温度分布。重复同样的步骤，改变栅极电压 V_{gs} ，使漏源电流 I_{ds} 分别为 200mA、300mA、400mA、500mA，即测量功率为 5.6W，8.4W，11.2W，14W 下的器件壳温与有源区温度，再次通过红外热像仪观察芯片的温度分布。红外热像仪镜头分辨率为 7 μ m。

整套实验系统有以下几部分组成：

- 1、红外热像仪以及恒温平台，如图 3-11；
- 2、红外热像仪显示器；
- 3、HEMT 器件以及器件防自激振荡电路；
- 4、为器件加载功率的恒压源 Keithley2400 数字源表；



图 3-11 红外测试装置

Fig 3-11 Test equipment

由于 GaN/AlGaIn HEMT 器件在工作时容易产生自激振荡现象, 如果直接对 HEMT 器件加载功率, 利用红外热像仪进行温度分布测试会导致结果不准确, 因此通过上节的讨论与分析我们设计了防自激振荡电路, 试验中将 HEMT 器件固定在电路板上, 并通过两个电源给器件加载功率, 在防自激电路匹配下利用 Agilent B1500 半导体元器件分析仪测量器件输入输出特性曲线, 漏源电压 V_{ds} 从 0V 到 28V, 栅源电压 V_{gs} 从 -3V 到 -2.2V, 如图 3-12。

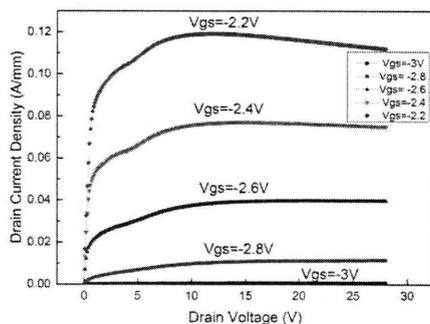


图 3-12 GaN HEMT 器件输入输出特性曲线

Fig 3-12 Input and output characteristic curve of AlGaIn/GaN HEMT

实验要求准确测量器件壳温, 本文将防自激电路与 HEMT 器件水平放置在红外热像仪的恒温平台上, 并通过恒温平台的热偶对壳温进行精确测量, 装置示意图如图 3-13, 为了保证准确测量壳温, 将防自激电路与器件连在一起放置在恒温平台上, 同时用螺钉将防自激电路固定住恒温平台上, 保证器件与恒温平台接触良好, 降低器件与恒温平台之间的接触热阻^[47]。功率为 14W 下的红外测试图像如图 3-14。根据公式 $R_{th} = \Delta T / P = (T_j - T_c) / P$, (P 为器件所加功率, T_j 为结温, T_c 为壳温), 将得到的数据代入公式, 即可得到热阻值。

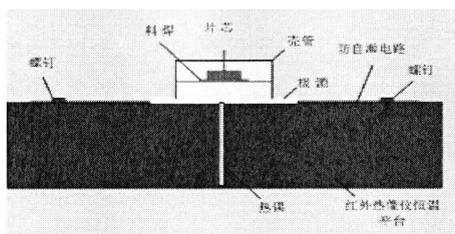


图 3-13 壳温控制装置示意图

Fig 3-13 The case temperature control device

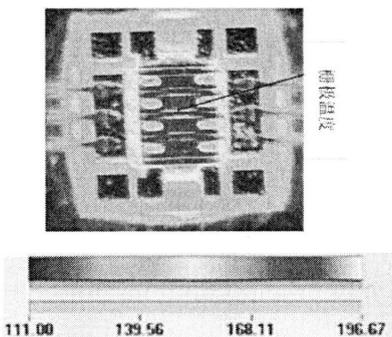
图 3-14 红外法测试的 HEMT 器件温度分布 ($^{\circ}\text{C}$)

Fig 3-14 The temperature distribution measured by infrared image method

3.3 不同壳温对 GaN HEMT 器件热阻影响

随着工艺技术的不断发展,器件的特征尺寸越来越小,当对器件加载功率后,内部会产生热量,随着功率的增加内部热量会不断积累,如果热量超过一定的限度有可能对器件造成不可恢复的损坏^[45]。因此对器件热特性的研究显得尤为重要,而热阻则是体现热特性的一个重要指标,通常会利用热阻去计算器件的工作结温,结温可以看做是制约器件性能以及可靠性的关键因素。一般我们在使用器件过程中,会将器件看做是一个固定不变的值,然而通过诸多学者的大量研究发现,热阻值并非一个定值,它会随着器件的加载功率、所处的环境温度等等条件的不同而发生改变。为了找出 HEMT 器件随着所处条件的不同热阻的变化趋势以及规律,本节中利用红外热像仪法以及拉曼法在不同加载功率以及相同功率下不同壳温测量器件结温升,最后通过计算来确定每个测试点的热阻,利用 origin 画出不同条件下的热阻关系,找出其变化规律。

3.3.1 实验过程

经过上述步骤将 HEMT 器件固定好，利用红外热像仪对开帽的器件进行结温升的测量。首先通过软件设置红外热像仪的恒温平台温度，在特定功率下来改变器件壳温。然后给固定好的 HEMT 器件加载功率，通过一台 Keithley2400 数字源表给器件栅极加载一个比较大的负压 V_{gs} ，比如 -3V，因为实验所用的 HEMT 器件属于常开型器件，若不先给栅极加载一个负压 V_{gs} ，那么器件栅极电压相当于 0V，沟道会处于常开状态，此时若直接加载漏源电压 V_{ds} ，漏源电流会很大，很有可能在漏源电压 V_{ds} 增大的过程中，由于漏源电流 I_{ds} 过大而将器件烧毁。给栅极加载好栅源电压 V_{gs} 后，再用另一台 Keithley2400 数字源表给器件加载漏源电压 V_{ds} ，在加载漏源电压 V_{ds} 过程中要时刻注意漏源电流 I_{ds} 的变化，以免器件出现自激振荡现象将器件烧毁（实验证明因为有匹配电路的保护，不会出现电流突变或者不稳定现象）。将漏源电压 V_{ds} 增大到 28V 后，改变栅源电压 V_{gs} ，因为最开始栅极加载负压（为了将器件沟道关闭），此时增大栅源电压 V_{gs} ，即向正方向调大电压值，调节栅源电压 V_{gs} 过程中同样要时刻注意漏源电流 I_{ds} 的变化，因为栅极电压改变很小的值漏源电流 I_{ds} 就会有较大的变化，当栅源电压 V_{gs} 增大到 -2V 左右时漏源电流 I_{ds} 大约为 500mA。保持一段时间使壳温达到稳态，利用红外热像仪测量器件的芯片温度。重复以上所有步骤，改变红外热像仪平台温度，去改变壳温，再次测量该壳温下的器件芯片温度，最终得到不同壳温下的红外热像仪图像。

3.3.2 实验结果与讨论

实验中将漏源电压 V_{ds} 恒定为 28V，漏源电流 I_{ds} 恒定为 500mA，通过改变恒温平台温度来改变器件壳温，在不同的壳温下进行红外测试，得到不同的红外热像图，并计算出热阻。表 3-1 为测量结果并计算出的热阻值。图 3-15 为利用 origin 画出的不同壳温下热阻的变化规律。

表 3-1 红外热像仪测量结果

Table 3-1 Measurement result by Infrared

壳温 (°C)	结温 (°C)	温差 (°C)	热阻 (°C/W)
83.7	167.4	83.7	5.9785
87.1	171.4	84.3	6.0214
97.3	183.7	86.4	6.1714
104	191.9	87.9	6.2785
111	196.7	85.7	6.1214
121	214.2	93.2	6.6571
126	220.4	94.4	6.7428

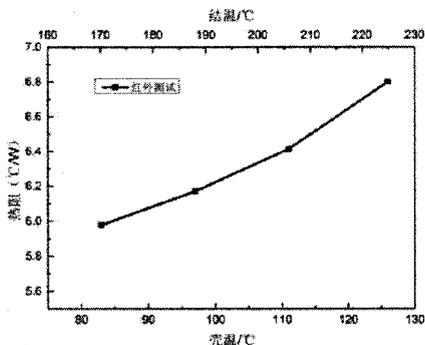


图 3-15 不同壳温下热阻变化趋势

Fig 3-15 The variation trend of thermal resistance under different case temperature

通过图 3-15 可见, 相同功率下热阻值随壳温的升高而增大。红外热像测温法下当器件壳温由 80°C 升高至 130°C 时, 其热阻由 5.9°C/W 变化为 6.8°C/W, 增大 15%。这种现象是因为壳温的升高会使器件材料的导热系数变小, 散热效果变差热阻变高。根据理论研究不同温度区域的分子通过碰撞传递能量这种能量传递在宏观上就表现为热传导^[48], 而非金属材料 SiC 的热传导主要是声子碰撞的结果, 根据微观导热理论, 声子导热系数公式如下:

$$\lambda = \frac{1}{3} c_v \bar{v} \bar{L}$$

c_v 是声子定容热容, \bar{v} 是声子平均速度, \bar{L} 是声子平均自由程。

c_v 以及 \bar{v} 一般近似为常数, 当温度升高时, 声子的振动能量增大, 频率加快, 无机非金属材料中声子的碰撞几率增大, 而声子的平均自由程取决于声子散射, 碰撞几率越大, 散射概率越大, 从而使平均自由时间减小, 声子平均自由程 \bar{L} 变小, 导热系数 λ 变小, 影响器件导热性能使散热效果变差, 热阻变大。并且根据 D.Kotchetkov^[52]等人的研究发现, 当温度从室温达到 125℃ 时 ΔT 为 100℃, GaN 材料的导热系数会降低 20%, 而本文实验中功率为 14W, 壳温从 80℃ 上升至 130℃ 时 ΔT 为 50℃, GaN 材料的导热系数同样会下降, 从而不断影响器件导热性能, 导致热阻变大约 15%。因此对于在大功率或者壳温较高的情况下, 更容易使器件发生老化, 甚至失效, 严重影响器件性能, 因此在实际工作中要保证器件有良好的散热条件。

3.4 不同加载功率对 GaN 基 HEMT 器件热阻影响

3.4.1 实验过程

将 HEMT 器件固定好后, 首先通过软件将红外热像仪的恒温平台温度设置为 70℃ (其他温度也可以通过软件进行调节), 然后给固定好的 HEMT 器件加载功率, 同样利用两台 Keithley2400 数字源表分别给器件的栅源加载负压, 使器件沟道关闭, 给漏源加载正电压 V_{ds} 。通过改变栅源电压 V_{gs} 来改变漏源电流 I_{ds} 。首先通过改变栅源电压使漏源电流 I_{ds} 为 100mA, 即功率为 2.8W。此时在适当的正向漏源电压 V_{ds} 以及负的栅源电压 V_{gs} 的作用下, 沟道处于打开状态, 器件正常工作, 有源区会产生温升, 并保持 1-2 分钟, 使壳温达到稳态。之后开始利用红外热像仪去测量器件芯片温度分布, 其可以直观的看到器件整个表面的温度分布情况, 如图 3-16 是器件加载功率后的芯片温度分布情况。

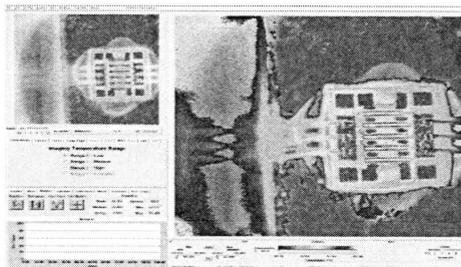


图 3-16 加载功率后芯片温度分布

Fig 3-16 Chip temperature distribution under power

3.4.2 实验结果与讨论

实验中将漏源电压 V_{ds} 恒定为 28V，通过改变栅压 V_{gs} 来改变器件的加载功率，分别得到 I_{ds} 为 100mA，200mA，300mA，400mA，500mA 的红外热像图，并计算出热阻。表 3-2 为经过红外热像仪测试后计算出的热阻值。图 3-17 为利用 origin 画出的不同功率下热阻的变化规律。

表 3-2

Table 3-2

Ids(mA)	功率 (W)	结温 (°C)	温差 (°C)	热阻 (°C/W)
100	2.8	92.6	14.7	5.25
200	5.6	116.6	31.5	5.62
300	8.4	143.3	50.1	5.96
400	11.2	171.8	70.5	6.29
500	14	197.6	92.1	6.57

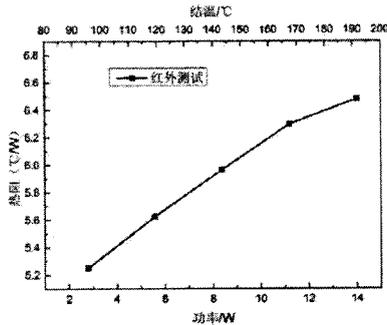


图 3-17 不同功率下热阻变化趋势

Fig 3-17 The variation trend of thermal resistance under different power

通过图 3-17 可以明显看出来 HEMT 器件随着加载功率的增加热阻是不断变大的，红外热像测温法当器件的加载功率从 2.8W 增加至 14W 时，其热阻从 5.3°C/W 变化为 6.5°C/W，增大约 22%。同时根据上节中不同壳温下热阻的变化趋势以及本节中不同功率下器件热阻的变化规律，将两者结合，可以得到热阻随结温的变化趋势如图 3-18 所示，图中前五个点功率从 2.8W 增加到 14W，后三个点 a(a1),b(b1),c(c1)功率均为 14W，从图中可以看出，红外热像仪法结果前五个点斜率与 a 点之后斜率基本相同，可以说明功率的增大引起的壳温以及结温的升高是影响热阻的重要因素。

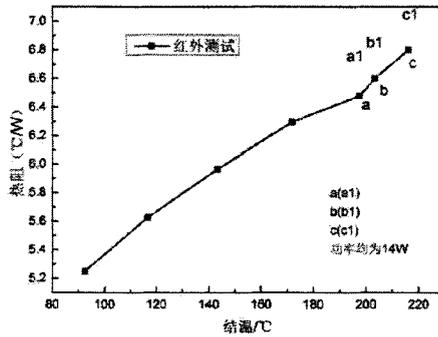


图 3-18 不同结温下不同功率以及相同功率热阻的变化

Fig 3-18 The variation trend of thermal resistance under different junction temperature

根据上一节的讨论，壳温的升高使材料导热系数下降。而本节试验中功率的增大会引起壳温与结温迅速升高，导致器件材料的导热系数下降。并且这种现象呈现出正反馈效应，会影响器件的散热效果，再次使结温集聚不易散出使热阻变大，并且结温每升高 10°C 热阻约变大 $0.12^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ，最终导致器件可靠性下降。由于沟道尺寸小，功率的不断增加，有源区的工作温升甚至会使器件失效，影响器件在实际工作中的应用。

3.5 拉曼法器件温升测试

拉曼法是目前各个研究学者公认的一种有效测量 GaN 基 HEMT 器件温升的技术，它是利用了拉曼光谱波数随着温度的变化而移动的这种关系来测量器件温升的^[49,50]。随着 HEMT 器件特征尺寸的不断变小，温度对器件特性的影响越来越明显，这也是温升测量技术会成为 GaN 基 HEMT 器件热特性的一个研究热点。而拉曼法则是一种有效的方法。本节中通过测量 HEMT 器件拉曼光谱，来测量器件在特定条件下的温升，同时利用测量的结果去证明红外热像仪法测量器件温升并推算出热阻的变化规律的正确性。使用的测量仪器如下：

- 1、Keithley2400 数字源表；
- 2、水冷恒温平台；
- 3、拉曼光谱仪；
- 4、CREE 公司 HEMT 器件以及防自激振荡电路。

1) 温度系数测量

该拉曼光谱仪的激光源是以波长为 514.5nm 的 Ar 离子作为激光器。因为其最小的聚焦直径约为 $1\mu\text{m}$ ，所以此拉曼光谱仪的最高空间分辨率为 $1\mu\text{m}$ 。因为拉

曼光谱仪是通过入射激光与被测半导体发生光反应来测量温升的^[51]。只有入射激光不跟被测器件的材料发生光生载流子效应才不会影响器件的电学特性,这样温升才能测量准确。而 HEMT 器件对波长为 514.5nm 的激光是透明的,所以完全可以用此拉曼设备进行温升测量,不会因为入射激光的照射在器件表面发生光生载流子效应。并且拉曼光谱仪的入射激光功率为 5mW,这个功率可以忽略不计,不会使被测器件产生明显的自升温。

与电学法测量器件温升与热阻的方法一样,在测量温升之前同样需要测量温度系数,与电学法的温度系数不同,拉曼法的温度系数是将拉曼光谱的频率随着温度的变化作为温度系数。因此,我们需要通过拉曼光谱仪测出 GaN 和 SiC 的拉曼光谱,然后根据温度系数计算来得到温升。将 HEMT 器件放置在恒温平台上,通过调节拉曼光谱软件,使拉曼激光聚焦在 GaN/SiC 界面上,测量 GaN 以及 SiC 层的拉曼光谱。通过理论研究发现可以将 GaN 声子频率和 SiC 声子频率作为测量 HEMT 器件温升的温敏参数。在不对器件加载功率的情况下,通过改变恒温平台温度,使其温度为 30℃ 测量 GaN 以及 SiC 层的拉曼光谱,重复相同步骤,改变恒温平台温度分别为 50℃、70℃ 以及 90℃,再次测量 GaN 以及 SiC 层的拉曼光谱,最终利用 origin 将数据进行拟合,得到 GaN 声子频率和 SiC 声子频率与温度的关系,如图 3-19 所示。这样就获得了声子频率与温度之间关系,即拉曼光谱法的温度系数。提取出的温度系数如图中所示,其结果与 Yang 等人所报道的结果相符合。

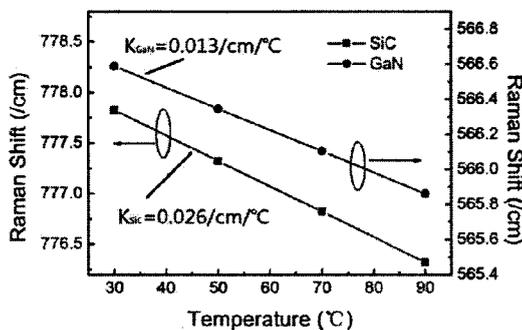


图 3-19 GaN 和 SiC 声子频率与温度关系

Fig 3-19 Phonon frequency and temperature relationship of Ga and SiC

测量温升过程中,加载功率稳定一段时间使漏源电流达到稳定状态后再测量其温度,否则测出的拉曼频移会不准确最终导致计算结果出现误差。

2) 实验结果与讨论

利用拉曼光谱仪测量不同功率下的 GaN 和 SiC 拉曼光谱。实验中将漏源电压 V_{ds} 恒定为 28V,通过改变栅压 V_{gs} 来改变器件的加载功率。在加载功率之前

测量声子频率与温度之间的关系，即温度系数。之后将温度降低到室温稳定一段时间后，再对器件加载功率进行拉曼光谱的测量，以保证器件的电学特性完全恢复，否则会影响测量的结果。通过栅极电压的控制分别得到 I_{ds} 为 100mA, 200mA, 300mA, 400mA, 500mA 拉曼光谱，测量过程中每个功率点要保证漏源电流达到稳定后在利用拉曼光谱仪进行测量。根据器件加载功率前测出的温度系数，以及加载功率后所得到的拉曼光谱计算出热阻。图 3-20 显示了不同功率下测出的 GaN 和 SiC 层拉曼光谱。将 GaN 层峰位处放大后，如图 3-21 可以看出，随着功率的增加，器件内部温度升高，GaN 材料峰位向低波数方向移动。通过加功率前所测得的温度系数，可以外推出加载功率时每个功率点 GaN 材料以及 SiC 材料峰位所对应的温度，再根据热阻公式计算出热阻。

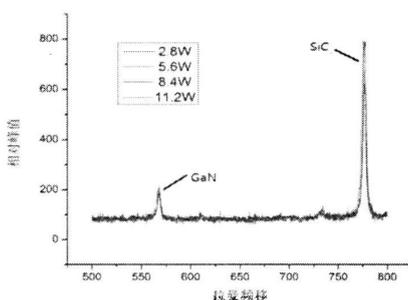
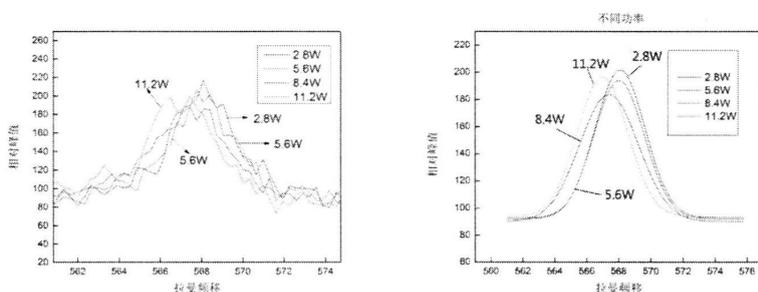


图 3-20 不同功率下 GaN 和 SiC 层拉曼频移

Fig 3-20 Raman shift under different power of GaN and SiC



(a) 不同功率下拉曼原始数据

(b) 不同功率下拉曼拟合数据

(a) original data

(b) Fit data

图 3-21 不同功率下 GaN 材料的峰位移动

Fig 3-21 Peak shift under different power of GaN

表 3-3 为经过不同功率下拉曼光谱仪测试后计算出的热阻值。图 3-22 为红外热像仪法测量并计算得出的热阻值与拉曼光谱法测量之间的对比。拉曼法虽然空间分辨率很高可以达到 $1\mu\text{m}$ ，但是温度分辨率较低，不能够很准确的测量出芯

片的最高温度点，所以通过对比可以看出两种方法得出的热阻虽然之间有误差，但是变化规律比较吻合。这也证明了红外热像仪法测量结果的准确性。

表 3-3 不同功率下拉曼光谱仪测试结果

Table 3-3 The result of Raman test under different power

功率 (W)	拉曼法 (热阻 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	红外法 (热阻 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
2.8	4.9	5.3
5.6	5.4	5.6
8.4	5.8	5.9
11.2	6.1	6.3

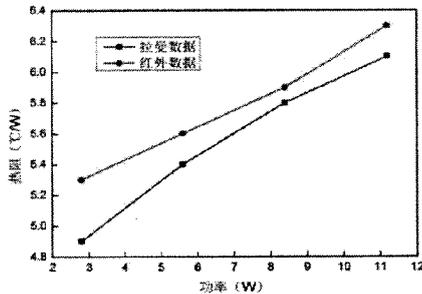


图 3-22 红外法与拉曼法测量结果对比

Fig 3-22 The result compared Infrared and Raman

3.6 本章小结

本章主要讲述了利用红外热像仪法以及拉曼法对 GaN 基 HEMT 器件进行结温升的测量，为了在测量过程中保证器件的正常工作，首先针对该 AlGaN/GaN HEMT 器件设计了防自激振荡电路，在该匹配电路保护下分别用两种方法在不同工作条件下进行结温升测量，并对测量结果进行了分析与讨论。

研究发现：当器件壳温由 80°C 升高至 130°C 时，其热阻由 $5.9^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 变化为 $6.8^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ，增大 15%，其热阻与结温呈正反馈效应；当器件的加载功率从 2.8W 增加至 14W 时，其热阻从 $5.3^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 变化为 $6.5^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ，增大 22%。对其热阻变化机理研究发现：在不同的管壳温度以及不同的加载功率条件下，由于材料导热系数的变化导致其热阻随温度与加载功率变化而变化。最后运用拉曼法对红外热像仪法测量进行证明，通过对比发现两种方法测量结果比较吻合。

第4章 GaN 基 HEMT 器件稳态和瞬态温升模拟

随着集成电路工艺技术的不断发展, 电路中运用的器件特征尺寸已经由超深亚微米向着 nm 级层次逼近。因为特征尺寸的不断缩小以及工艺技术的不断发展, 器件结构已经达到临界尺度。近年来一直在完善小尺寸器件物理特性模拟与分析工具的仿真技术。Sentaurus TCAD 就是一种面向小尺寸器件的物理数值模拟与分析工具。本文中选择使用 Sentaurus TCAD 器件特性仿真工具对 AlGaIn/GaN HEMT 器件热特性进行二维模拟仿真。首先针对 GaN HEMT 器件热阻随功率以及环境温度变化规律的问题, 根据红外热像仪法测量的结果, 利用 Sentaurus TCAD 建立稳态仿真模型, 在相同的试验条件下观察 HEMT 器件在不同壳温及功率下热阻的特性, 进一步验证红外热像测温法的准确性, 对其热阻变化规律进行研究。最后根据稳态模拟模型加载不同脉冲工作条件(相同频率, 不同占空比), 对比温升变化情况。

4.1 CREE 公司 GaN 基 HEMT 器件参数测量以及模型建立

4.1.1 HEMT 器件参数测量

器件物理模型的选择主要是考虑在特定器件尺寸下, 模型所能达到的对其物理过程的描述程度。随着器件尺寸越来越小, 物理机理日益复杂, 模拟计算量及其复杂程度也越来越高。在本文的研究过程中, 对 AlGaIn/GaN HEMT 器件的模拟, 采用了上述物理模型, 并且设定其材料参数、电学参数、数学计算参数。

1) 光学显微镜 OM

光学显微镜 (Optical Microscope) 它可以利用光学的原理, 把平时我们不能看到的微小物体通过放大后, 提供可以观察的信息。一般由载物台、物镜、聚光照明系统以及调焦机构所组成。载物台用来放置被观察的器件。聚光照明系统由灯源以及聚光镜组成, 聚光镜可以使更多的光能量集中在被观察的器件芯片上。如图 4-1 光学显微镜观察的 HEMT 器件芯片结构。从图中可以明显的观察出, 器件为 10 条栅结构。

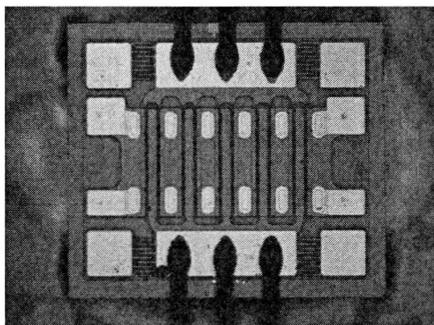
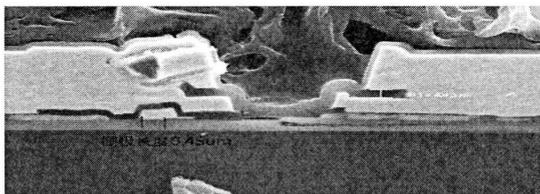


图 4-1 光学显微镜下观察的 HEMT 器件内部结构

Fig 4-1 The internal structure of the device under OM

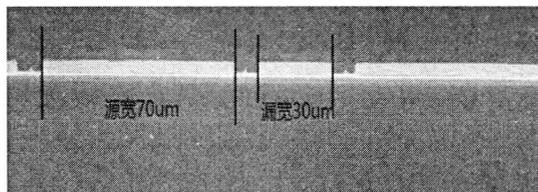
2) 扫描电子显微镜 SEM 介绍

扫描电子显微镜是半导体分析实验室广泛使用的一种器件表面结构分析仪器，它的放大倍数范围宽可以小于 20 万倍，大于 30 万倍，并且观察结果比较直观。并且可以结合能谱仪（EDS）进行亚微米级结构分析。在半导体领域中，扫描电镜基本都是采用了场发射灯丝。它有很大优势，相比于其他的钨灯丝，其发射出的电子束亮度更高，大约可以高 2-3 个数量级，同时分辨率也显著提高。如图 4-2 是通过扫描电子显微镜 SEM 观察的器件芯片内部结构。从图中我们可以观察到栅极、源极和漏极，并且通过软件进行尺度的标定，就可以知道器件栅、源、漏的长度，以及各层材料的厚度。通过图中可知栅长为 $0.45\mu\text{m}$ ，漏宽为 $30\mu\text{m}$ ，源宽为 $70\mu\text{m}$ ，并且可以知道栅、源、漏的位置。



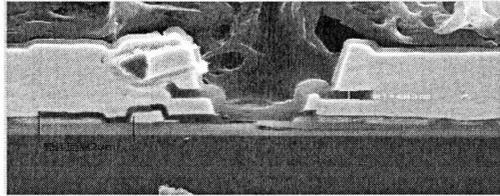
(a) 器件栅极位置及宽度

(a) The position and width of the gate



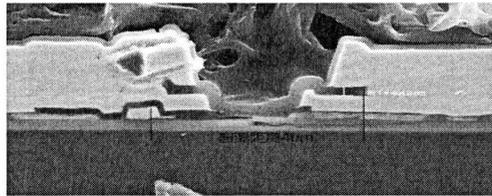
(b) 漏极、源极位置及宽度

(b) The position and width of the source and drain



(c) 栅源距离

(c) The gate-source distance



(d) 栅漏距离

(d) The gate-grain distance

图 4-2 SEM 观察的器件芯片内部结构

Fig 4-2 The internal structure of the device under SEM

3) 能量色散 X 射线光谱仪 EDX

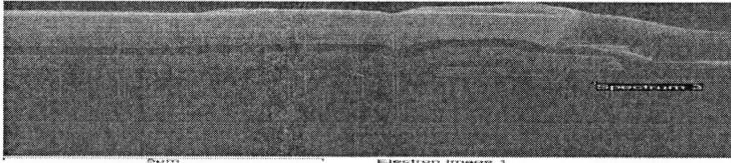
能量色散 X 射线光谱仪 EDX (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy), 凭借着分析被测样品发出的特征 X 射线的波长以及强度实现元素分析的, 根据波长测定被测样品所含的元素, 根据强度去测定元素的相对含量。如图 4-3 分析可知图中标注的位置为某一层。



Element	Weight%	Atomic%
C K	6.45	51.99
Pd L	4.92	4.48
Au M	88.62	43.53
Totals	100.00	

(a) 通过以上分析为栅电极

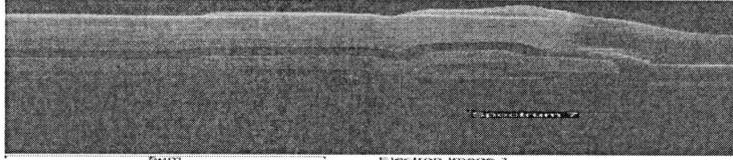
(a) Is the gate electrode through the above analysis



Element	Weight%	Atomic%
C K	6.90	18.46
N K	19.26	44.16
Al K	0.58	0.69
Si K	4.30	4.92
Ga L	68.96	31.77
Totals	100.00	

(b) 通过以上分析为 GaN 层

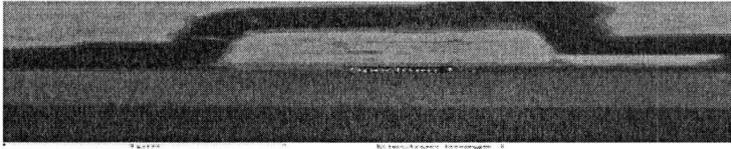
(b) Is the GaN through the above analysis



Element	Weight%	Atomic%
C K	37.90	58.80
Si K	62.10	41.20
Totals	100.00	

(c) 通过以上分析为 SiC 层

(c) Is the SiC through the above analysis



Element	Weight%	Atomic%
C K	4.37	18.74
N K	7.56	27.83
Ni L	27.51	24.17
Ga L	22.16	16.39
Pd L	12.66	6.13
Au M	25.75	6.74
Totals	100.00	

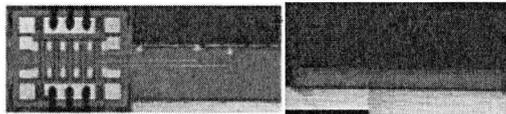
(d) 通过以上分析为栅极

(d) Is the gate through the above analysis

图 4-3 EDX 元素分析

Fig 4-3 Elemental analysis by EDX

通过以上的切片处理得到 GaN HEMT 器件的各项参数，图 4-4 (a)，(b)，(c) 所示分别为 AlGaIn/GaN HEMT 芯片结构，器件剖面图，以及进行切片后高倍分辨率下显微结构。HEMT 器件的各项结构参数分别为：栅长 (0.45um)，栅宽 (350um)，漏宽 (30um)，源宽 (70um)，栅极到漏极间距 (4um)，栅极到源极间距 (2um)，SiC 厚度 (100um)，GaN 厚度 (2um)，AlGaIn 厚度 (25nm)，材料参数见表 4-1 所示。



(a) HEMT 器件芯片结构 (b) 利用 OM 切片观察器件剖面图

(a) Chip structure of AlGaIn/GaN HEMT (b) Observation device profile by OM



(c) HMET 器件显微结构

(c) Microstructure of AlGaIn/GaN HEMT

图 4-4 AlGaIn/GaN HEMT 器件结构图

Fig 4-4 The structure of AlGaIn/GaN HEMT

4.1.2 HEMT 器件仿真模型建立

根据红外热像测温法测量的结果, 利用 Sentaurus TCAD 对 HEMT 器件进行建模, 从最终优化后的模型中提取出器件结温计算热阻, 找出热阻变化规律并与红外测试结果进行对比。为了准确得到器件的特性, 建模过程中要对各材料参数进行设置, 见表 4-1。

表 4-1 材料参数

Table 4-1 Material parameters

材料参数	单位	GaN	AlN	SiC
电子迁移率	$\text{cm}^2/(\text{Vs})$	1000	300	1140
S-R-H 寿命	ns	1	1	1
带隙宽度	eV	3.47	6.2	3.26
相对介电常数	1	9.5	8.5	9.7
电子饱和速率	cm/s	1.5×10^7	1.5×10^7	2×10^7
热导率	W/(Kcm)	2	2.85	3.7
晶格热容	J/(Kcm ³)	3.0	1.94	2.2
热扩散因子	cm ² /s	0.43	1.47	1.67

为了能够更好的进行仿真建模, 首先依据器件结构测试与元素分析手绘器件的结构示意图, 并根据切片观察后的芯片内部结构确定所有栅、源、漏的个数以及排布位置。如图 4-5 所示为器件结构示意图。通过光学显微镜观察的器件芯片结构, 如上图 4-2, 根据结构将栅、源和漏极位置排布顺序确定下来, 如图 4-6。并画出器件模拟时的结构示意图, 如图 4-7 所示。

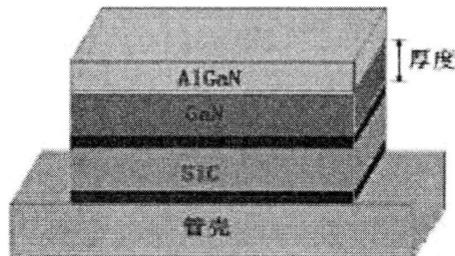


图 4-5 器件结构示意图

Fig 4-5 Schematic diagram of the device



图 4-6 源、栅、漏排布顺序

Fig 4-6 The order of arrangement

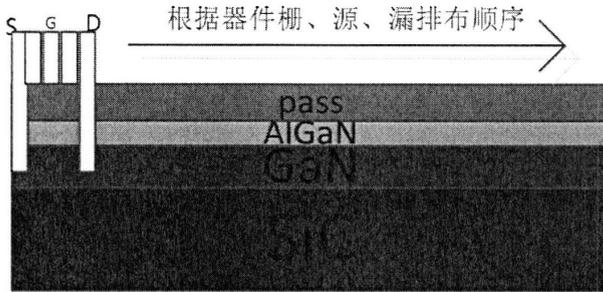


图 4-7 模拟时结构示意图

Fig 4-7 Schematic diagram of the simulation

注：pass 为钝化层，器件为 10 条栅结构。

经过对 CREE 公司 HEMT 器件的结构测量、元素分析、器件材料参数的确定、栅、源、漏位置排布顺序以及模拟时结构示意图的绘制，之后开始利用工艺以及器件仿真工具 Sentiaus TCAD 建立仿真模型。首先根据器件分析结果用该软件所特有的程序建立器件结构，如图形编辑工具 DEVICE，工程保存在 sde_dvs.cmd 文件中。根据各层材料的参数，对建立的器件模型进行浓度掺杂以及参数设定，工程保存在 .par 文件中，如 GaN 材料的参数设定保存在 GaN.par 文件中。整个仿真流程如图 4-8。

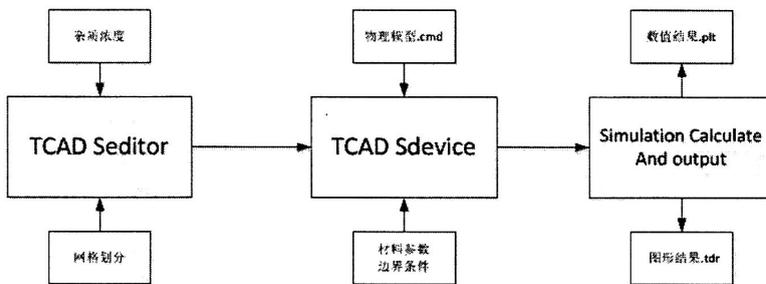


图 4-8 器件仿真流程

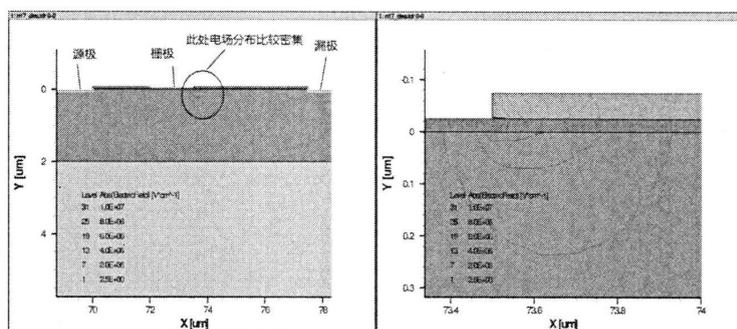
Fig 4-8 The process of device simulation

4.2 GaN 基 HEMT 器件稳态模拟

为了进一步证明红外热像仪法的准确性，我们基于物理的数值模拟仿真对 AlGaIn/GaN HEMT 器件热特性进行二维稳态模拟仿真，以此结果来考察不同壳温以及不同加载功率下热阻的变化趋势。最后与红外热像仪法的测试结果进行对比，通过模拟结果来提高红外法对热阻规律研究的可信度。

4.2.1 稳态模型建立

利用以上参数以及红外热像测温法测量的（如漏源电压 $V_{ds}=28V$ ，漏源电流 $I_{ds}=500mA$ ）温度分布结果作为边界条件，利用模拟软件 Sentaurus TCAD 建立仿真模型 V，通过改变模型的栅源电压 V_{gs} （改变模型中二维电子气浓度从而改变漏源电流 I_{ds} ）来控制漏源电压 V_{ds} 。利用其他不同测试条件下的红外测量的结温分布结果分别建立模型 IV、III、II、I 来验证模型 V 的准确性，验证过程中只改变 V_{gs} （模型中二维电子气）使漏源电流 I_{ds} 分别为 400 mA (IV)、300 mA (III)、200 mA (II)、100 mA (I)，将模拟的中间位置栅极及其附近 $7\mu m$ 的平均温度与红外法测量结果进行对比。图 4-9 是根据红外测试的一个条件（漏源电压 V_{ds} 为 28V，漏源电流 I_{ds} 为 500mA）下，利用 Sentaurus 软件进行模拟绘制出的器件电场强度模拟结果。图 4-10 为绘制出的温度分布图。



(a) 栅极靠近漏极处电场分布 (b) 放大后的电场分布

图 4-9 电场强度模拟

Fig 4-9 Simulation of the electric field

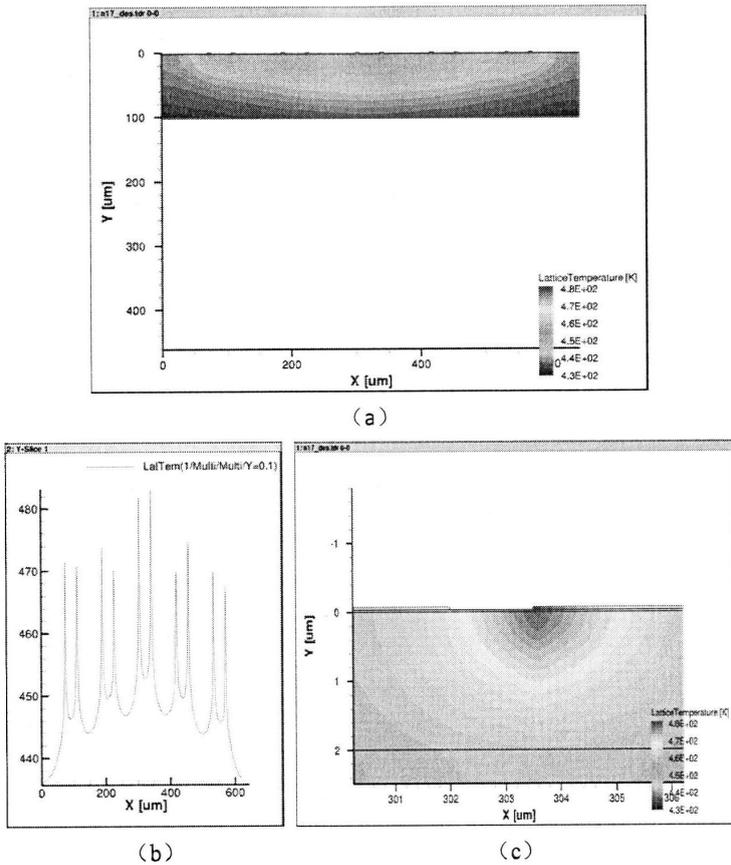


图 4-10 Sentaurus TCAD 建立的 HEMT 器件热仿真模型

Fig 4-10 Optimization model by Sentaurus TCAD

从模拟的电场图中可以明显的观察到电场强度在栅极边缘处靠近漏极一端最大，因为这个位置电压降最大^[10]。从图 4-10 的模拟结果可以看到，越靠近器件中间位置的栅极上温度越高，并且 (c) 中明显观察出，电场强度最大的地方也正是温度最高点，同样出现在栅极靠近漏极一侧，而由于热扩散的原因温度由栅极到源极逐渐降低。

4.2.2 实验结果与讨论

1) 不同管壳温度对热阻的影响

模拟仿真中根据红外热像仪法测试时所加载的条件，同样在仿真模型中进行同样设置进行模拟，并得出模拟结果。红外热像测温法与模拟法的结果对比如图 4-11 所示。

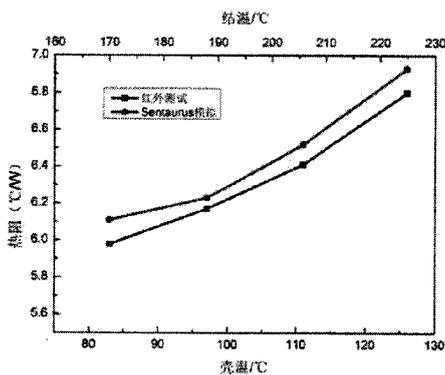


图 4-11 红外热像测温法与模拟法的结果对比

Fig 4-11 Compared infrared image method with simulation

由图 4-11 对比可知, 在相同条件下进行模拟, 热阻变化为 13%, 而红外热像测温法下当器件壳温由 80°C 升高至 130°C 时, 热阻增大 15%。模拟仿真结果与红外热像仪法测试结果比较吻合, 进一步验证了器件热阻会随着壳温的变大而增大这一规律。

2) 不同加载功率对热阻影响

对数值仿真模型设置不同的加载功率, 在不同的加载功率下观察器件结温升的变化, 并推算出热阻的变化规律。图 4-12 为红外热像测温法与模拟法的结果对比。可以看出模拟结果变化趋势与红外测试结果基本一致。并根据实验中不同壳温以及不同功率下热阻的变化结果, 得出两种条件下热阻随结温的变化趋势, 如图 4-12 所示。

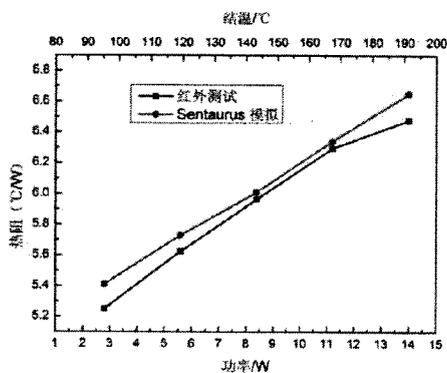


图 4-12 TCAD 模拟与红外热像仪法结果对比

Fig 4-12 Compared infrared image method with simulation

结合图 4-13, 前五个点功率从 2.8W 增加到 14W, 后三个点 a(a1), b(b1), c(c1) 功率均为 14W, 从图中可以看出, 红外法及模拟法结果前五个点斜率与 a 点之后斜

率基本相同,可以说明功率的增大引起的壳温以及结温的升高是影响热阻的重要因素。

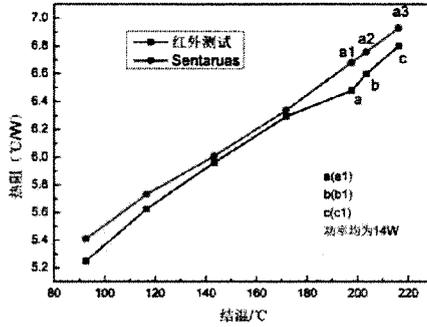


图 4-13 不同结温下不同功率以及相同功率热阻变化

Fig 4-13 The variation trend of thermal resistance under different junction temperature

通过数值模拟的方法观察器件的温升变化,并得出与红外热像仪法比较一致的结果。这种现象的出现都可以归结为壳温以及加载功率的不断增加,会使器件的结温升不断升高,最终导致器件材料导热系数变小,散热效果变差热阻变高。在第三章中红外热像仪法中已做理论解释。正是由于外界条件使器件结温的不断升高,从而使热阻变大,散热效果变差,并出现正反馈效应使器件结温不断积累,最终影响器件各项特性,甚至使器件失效。

3) 不同栅极长度对热阻的影响

以以上的模拟结果为基础,通过改变栅极长度利用 TCAD 进行模拟仿真,得到模拟结果并观察不同栅极长度下 HEMT 器件电流密度、最高结温的变化情况,如图 4-14 所示。

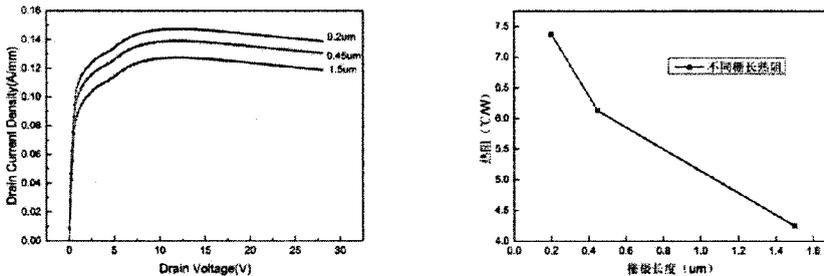


图 4-14 不同栅极长度下器件热特性

Fig 4-14 The thermal characteristics under different gate length

由图 4-14 可以看出, 随着栅极长度的减小器件的峰值温度以及电流密度均会增加, 并且栅极长度越小热阻会越大。随着器件尺寸的变小, 热特性会成为制约器件一系列特性的重要因素, 因此热设计过程中, 除了考虑到集成度问题之外, 器件散热问题将更加重要。

4.3 GaN 基 HEMT 器件瞬态模拟

为了提高瞬态红外设备温度检测能力, 更准确的获得红外热像仪可以观察到的区域范围温度在加载功率的不同时刻温度变化情况, 本文首先利用红外热像仪对 HEMT 器件进行结温升测量, 再利用数值模拟仿真的方法, 在稳态模拟的基础上加载脉冲条件最终得到瞬态模拟结果, 从模拟结果中提取出不同时刻下结温升的变化情况。选取的不同占空比各个时刻点如图 4-15 所示。

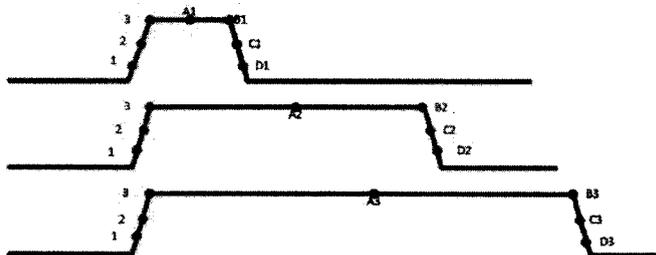
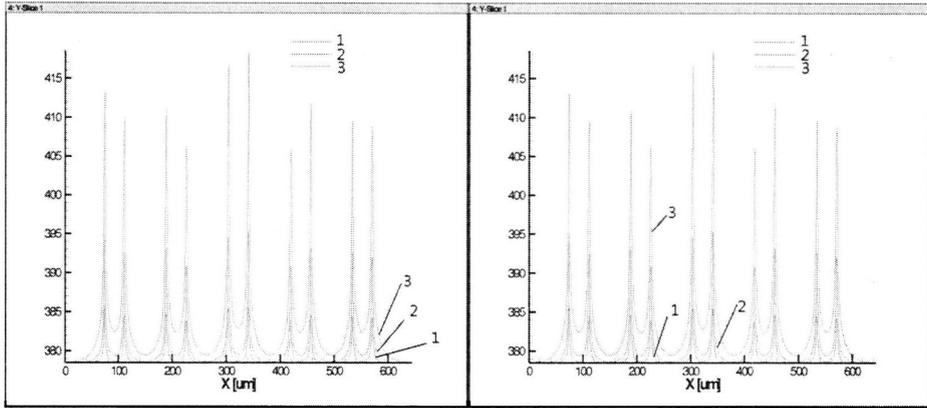


图 4-15 模拟仿真的不同占空比示意图

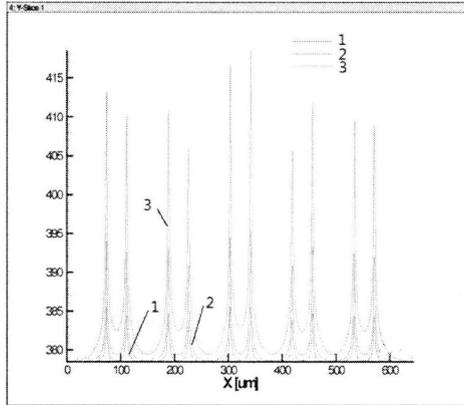
Fig 4-15 The schematic of simulation under different duty cycles

4.3.1 脉冲上升沿过程温升对比

为了获得相同频率不同占空比下 HEMT 器件结温上升过程中变化情况, 根据上文中建立的稳态模型在一定频率下加载不同脉冲的占空比, 从而获得不同工作条件下的热学仿真结果。TCAD 模拟条件如下: 平台温度为 100°C (373.15K), 加载频率为 1kHz , 占空比分别为 10%、30%、50%, 加载漏源电压 V_{ds} 为 28V 、漏源电流 I_{ds} 为 500mA 。HEMT 器件在占空比分别为 10%、30%、50%条件下, 上升过程三个时间点 1、2、3 结温升变比情况如图 4-16 所示。



(a) 占空比 10% (b) 占空比 30%
 (a) 10% duty cycle (b) 30% duty cycle



(c) 占空比 50%
 (c) 50% duty cycle

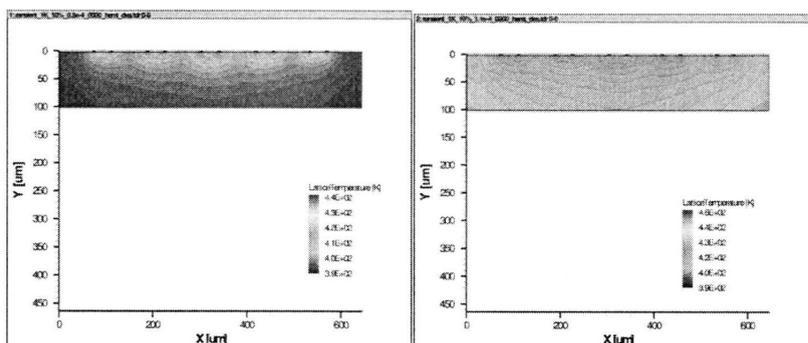
图 4-16 不同占空比下结温上升过程变化对比

Fig 4-16 The rising process change of Junction temperature under different duty cycles

从图 4-16 可以看出，瞬态模拟的器件结温上升过程温度分布线在不同占空比下基本重合，说明了 HEMT 器件在相同频率任何占空比条件下，结温的上升趋势是一致的。

4.3.2 脉冲下降沿过程温升对比

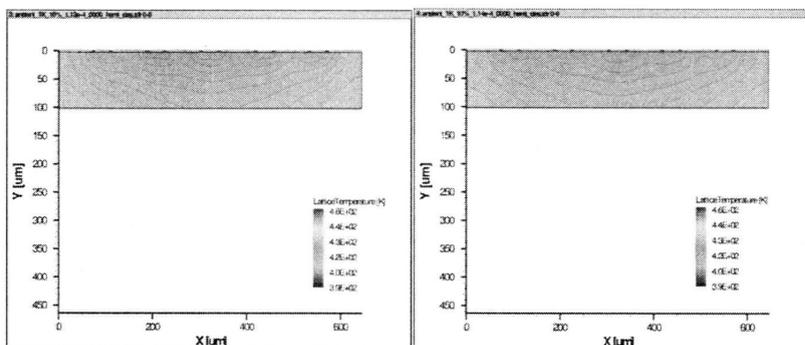
通过上文可知，器件在加载功率下，在一个脉冲周期的上升沿过程中器件的结温上升趋势是一致的。同样方法，通过数值模拟来观察 HEMT 器件结温在下降过程中变化情况。图 4-17 为频率 1KHz, 10%占空比下器件温度的分布图。图 4-18 为 30%占空比下器件温度的分布图。图 4-19 为 50%占空比下器件温度的分布图。



(a) A1 点时刻的 HEMT 器件温升分布图 (b) B1 点时刻的 HEMT 器件温升分布图

(a) The temperature distribution of HEMT device at A1 point

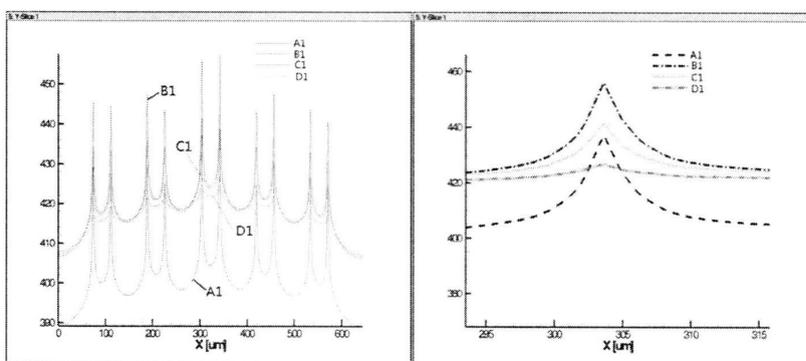
(b) The temperature distribution of HEMT device at B1 point



(c) C1 点时刻的 HEMT 器件温升分布图 (d) D1 点时刻的 HEMT 器件温升分布图

(c) The temperature distribution of HEMT device at C1 point

(d) The temperature distribution of HEMT device at D1 point



(e) 器件表面温度分布线

(e) Surface temperature distribution

图 4-17 频率 1KHz、10%占空比下降沿不同时刻器件温度分布

Fig 4-17 The temperature distribution at different times under 10% duty cycle and 1KHz frequency Conditions

从图 4-17 中 a、b、c、d 可以看出对于多指器件，在每条栅极处温度较高并向周围扩散，在器件边缘处温度最低。对于多栅指 GaN HEMT 器件每条栅相当于一个热源，在加载功率下每条栅上的温度分布，除了自身的耗散功率发热外，还会受到其他栅条的影响，最终观察到的单条栅极温度分布其实为多条栅极之间互相影响而产生的。由于多条栅的存在，器件散热情况跟单条栅器件不同，两条栅间距越小，之间影响越大，越不容易使热量散出，因此可以从图中看出每条栅极处温度高，向周围呈阶梯状分布，越靠近器件边缘处梯度越大。从图 e 中可以看出，B1 点为电应力撤销的时刻，此时温度为最高时刻，C1、D1 温度开始下降。将最高温度栅极处放大后，可知 B1 时刻最高温度比 D1 时刻最高温度高约 28℃。

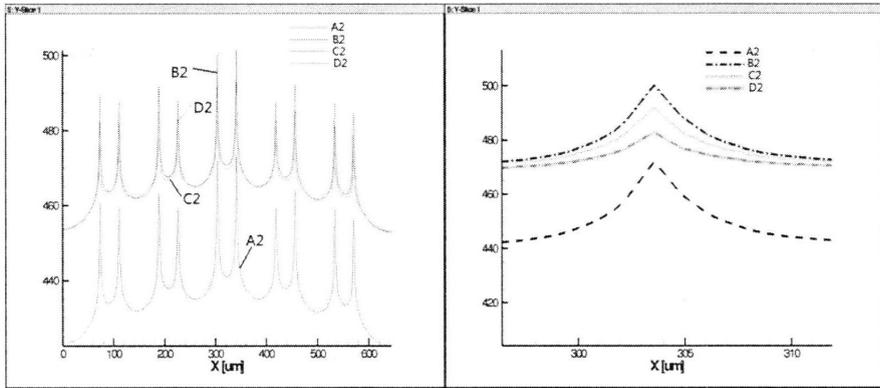


图 4-18 频率 1KHz、30%占空比下下降沿不同时刻器件温度分布

Fig 4-18 The temperature distribution at different times under 30% duty cycle and 1KHz frequency Conditions

从图 4-18 可以看出，器件温度最高点同样在中间栅极上，A2 为电应力加载中间时刻；B2 温度分布线为电应力撤销时刻，最高温度约为 503K；C2、D2 为撤销电应力后温度自然下降时刻，D2 时刻点温度分布线最高温度约为 478K。通过模拟结果可知，B2 时刻最高温度比 D2 时刻最高温度高约 25℃。

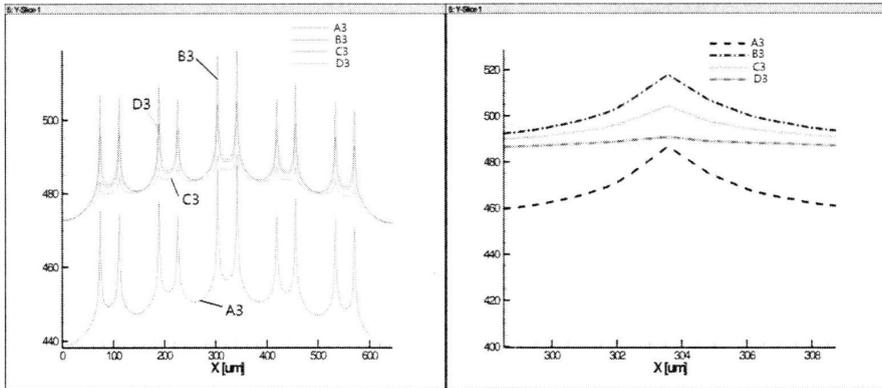


图 4-19 频率 1KHz、50%占空比下下降沿不同时刻器件温度分布

Fig 4-19 The temperature distribution at different times under 50% duty cycle and 1KHz frequency Conditions

从图 4-19 可以看出，随着占空比增大整个器件温升变大，B3 时刻撤销电应力，最高温度约为 517K，C3、D3 时刻下降后 D3 时刻最高温度约 489K，相比 B3 时刻最高温度低大约 28℃。

4.4 本章小结

本章主要讲述了 HEMT 器件稳态和瞬态模拟。通过与红外测试相同条件进行稳态温升模拟，从模拟结果中提取出不同条件下器件结温升，并推算出热阻。通过与红外热像仪测试结果对比进一步证实器件热阻在不同条件下的变化规律，随着加载功率与壳温的增加而变大。在稳态模型的基础上研究了结温升随着 HEMT 器件栅极长度的变化，栅长越小电流密度越大，结温升越高。最后进行瞬态模拟仿真，通过模拟来观察器件在不同脉冲条件下温升变化趋势。

结论

随着器件尺寸的不断缩小,当器件在工作时内部会产生大量热量而引起结温升高,从而影响器件的性能。半导体器件热问题是影响其可靠性的关键因素。因此,对器件热特性的研究一直都是研究学者广泛关注的问题。热阻是体现器件热特性的一个主要指标。本文主要是基于红外热像仪法对 GaN 基 HEMT 器件进行结温升测量,根据测量结果推算出器件热阻,并利用拉曼法进行验证。然后利用 Sentaurus TCAD 在与红外热像仪法相同的条件下对器件进行数值模拟仿真,从模拟结果提取器件结温并与红外热像仪法进行对比。找出热阻的变化规律。本研究主要成果如下几方面:

1. 准确测量 GaN 基 HEMT 器件的结温升方法

目前 GaN 基 HEMT 器件的栅长一般在 $0.2\mu\text{m}$ - $1\mu\text{m}$ 之间,而红外热像仪的空间分辨率最大为 $3\mu\text{m}$,测量出的 HEMT 器件结温为一个平均温度,与实际器件结温相比会出现较大误差。因此,本文中红外热像仪法与物理数值模拟法相结合,利用 Sentaurus TCAD 进行模拟仿真,从模型中提取出 $0.45\mu\text{m}$ 范围内的器件结温,此温度更接近实际温度。

2. CREE 公司 AlGaIn/GaN HEMT 器件防自激振荡电路设计

GaN 基 HEMT 器件属于射频器件,在使用过程中由于信号传输过程阻抗不匹配或者周围其他信号的干扰,导致器件在工作中出现自激振荡效应,这样不仅会使测试结果造成影响,甚至有可能将器件烧毁。因此本文中在进行红外测试以及拉曼测试之前,设计了该器件的防自激振荡电路。设计过程中引入电阻、磁珠、电容等元器件来消除器件内部的寄生参数,同时在设计 PCB 过程中考虑器件的摆放位置、布线规则以及接地孔的影响。

3. 在不同的加载功率以及壳温下对 HEMT 器件的热阻变化规律进行研究

通常情况我们会将热阻看做一个固定不变的值,在进行老化寿命试验时利用固定的热阻值计算器件结温,最后推算出寿命。但是通过研究发现热阻值并非固定不变,它会随着所处环境的变化而发生改变,因此在寿命试验时会错误的估计器件的可靠性,影响器件在实际中的应用。利用红外热像仪在不同加载功率以及壳温条件下观察器件结温的变化,并推算出热阻,发现热阻会随着功率以及壳温的增大而变大,这主要是壳温与结温的升高会使器件材料的导热系数变小,散热效果变差热阻变大。最后利用拉曼法来验证结温测量结果。

4. 利用 Sentaurus TCAD 对 GaN HEMT 器件进行稳态以及瞬态模拟

利用数值模拟的方法在与红外测试相同的条件下对 HEMT 器件进行模拟仿真,通过结果的对比证实了器件热阻会随着加载功率与壳温的增加而变大。之后

通过改变仿真模型中栅极长度来观察器件结温的变化，因为栅极越小，栅极下电阻越大，电压降越高，因此从模拟结果中可以看出栅极长度越小器件的结温升高，并且电流密度也会随之增加，热阻也会变大。最后根据准确的稳态模型进行瞬态模拟仿真。

参考文献

- [1] Zhang G C 2012 Ph. D. Dissertation(Beijing:Beijing University of Technology)(in Chinese)
[张光沉 2012 博士学位论文 (北京:北京工业大学)].
- [2] Kuball M, Riedel G J, Pomeroy J W, et al. Reliability of High-Speed Devices: Probing of Self-Heating with Nanosecond Time-Resolution[J]. GaN, 2007.
- [3] Darwish A M, Bayba A J, Hung H A. Utilizing diode characteristics for GaN HEMT channel temperature prediction[J]. Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, 2008, 56(12): 3188-3192.
- [4] Núñez N, González J R, Vázquez M, et al. Evaluation of the reliability of high concentrator GaAs solar cells by means of temperature accelerated aging tests[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2013, 21(5): 1104-1113.
- [5] Kuball M, Hayes J M, Uren M J, et al. Measurement of temperature in active high-power AlGaIn/GaN HFETs using Raman spectroscopy[J]. Electron Device Letters, IEEE, 2002, 23(1): 7-9.
- [6] Özerli H, Karteri İ, Karataş Ş, et al. The current-voltage and capacitance-voltage characteristics at high temperatures of Au Schottky contact to n-type GaAs[J]. Materials Research Bulletin, 2014, 53: 211-217.
- [7] Ren F, Douglas E A, Pearton S J. GaAs Device Reliability: High Electron Mobility Transistors and Heterojunction Bipolar Transistors[M]//Materials and Reliability Handbook for Semiconductor Optical and Electron Devices. Springer New York, 2013: 455-474.
- [8] Székely V. A new evaluation method of thermal transient measurement results[J]. Microelectronics Journal, 1997, 28(3): 277-292.
- [9] Bosch E G T, Lasance C J M. Accurate measurement of interface thermal resistance by means of a transient method[C]//Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2000. Sixteenth Annual IEEE. IEEE, 2000: 167-173.
- [10] Székely V. Enhancing reliability with thermal transient testing[J]. Microelectronics Reliability, 2002, 42(4): 629-640.
- [11] Feng Shiwei , L Changzhi , Ding Gua ngyu , et al . Study of temperature characteristic of GaAs MESFET forward Schottky junction. Chinese Journal of Semiconductors , 1994 , 15(11) : 747 (in Chinese) [冯士维, 吕长志, 丁广钰, 等. GaAs MESFET 正向肖特基结电压温度特性的研究. 半导体学报,1994,15(11):747
- [12] Ying S P, Fu H K, Tang W F, Hong R C 2014 IEEE Transactions on Electron Devices 61 2843.

- [13] DONG C X,WANG L X 2013 Chinese Journal of Electron Devices 36 755 (in Chinese).[董晨曦, 王立新 2013 电子器件 36 755].
- [14] Yu C H, Luo X D, Zhou W Z, Luo Q Z, Liu P S 2012 Acta Physica Sinica 61 207301 (in Chinese) [余晨辉, 罗向东, 周文政, 罗庆洲, 刘培生 2012 物理学报 61 207301].
- [15] Zhang Y, Feng S, Zhu H, et al. Two-dimensional transient simulations of the self-heating effects in GaN-based HEMTs[J]. Microelectronics Reliability, 2013, 53(5):694-700.
- [16] Gu J, Wang Q, Lu H 2011 Acta Physica Sinica 60 1729 (in Chinese) [顾江, 王强, 鲁宏 2011 物理学报 60 1729].
- [17] Wang X D, Hu W D, Chen X S, et al. Dark current simulation of InP/In 0.53 Ga 0.47 As/InP p-i-n photodiode[J]. Optical & Quantum Electronics, 2008, 40(14-15):1261-1266.
- [18] 晏敏,彭楚武,颜永红,曾云,曾健平;红外测温原理及误差分析[J];湖南大学学报(自然科学版);2004年05期.
- [19] 曹义;程海峰;郑文伟;才鸿年;成绍军;;基于红外热像仪的涂层波段发射率测量[J];红外技术;2007年06期.
- [20]张健,杨立,刘慧开;环境高温物体对红外热像仪测温误差的影响[J];红外技术;2005年05期
- [21]丁硕,刘玉龙,张锐,等.用激光拉曼散射法测量电子线路板中元件的温度.光散射学报.2003.15(2):78-81.
- [22] G. J. Riedel, J. W. Pomeroy, K. P. Hilton, etc. Nanosecond Timescale Thermal Dynamics of AlGaIn/GaN Electronic Devices. IEEE Electron. Dev. Lett. 2008,29(5): 416-417.
- [23] M. Kuball, J. M. Hayes, M. J. Uren, etc. Measurement of Temperature in Active High-Power AlGaIn/GaN HFETs Using Raman Spectroscopy. IEEE Electron.Dev. Lett. 2002, 23(1): 7-9.
- [24] S.Rajasingam,J.W.Pomeroy,M.J.Uren,T.Martin,D.C.Hebert,K.P.Hilton and R.S.Balmer. Micro-Raman Temperature Measurement for Electric Field Assessment in Active AlGaIn–GaN HFETs.IEEE Electron Device Letters.2004 ,25(7):456-458.
- [25] 尹建国;李旺兴;尹中林;夏文堂;周雪娇;拉曼光谱仪及其在过饱和铝酸钠溶液结构表征中的应用[J];内蒙古科技大学学报;2012年03期.
- [26] S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, John Wile and Sons, 1981.
- [27] S. Feng, X. Xie, C. Lu, G. Shen, G. Gao and X. Zhang, The Thermal Characterization of Packaged Semiconductor Device, Proceedings 16th Annual IEEE Semiconductor Temperature Measurement and Management Symposium.2000, 220-226.
- [28] Feng Shiwei , Xie Xuesong ,L üChangzhi , et al . Measurement study on t hermal cha racteristics of semiconductor devices by elect rical met hod. Chinese J our nal of Semiconductors ,1999 ,20 (5) :358 (in Chinese) [冯士维, 谢雪松, 吕长志, 等. 电化学法半导体器件温度特性的研究. 半导体学报,1999 ,20 (5) :358].

- [29] EIA/JEDEC Standard No. 51-1.
- [30] 鲁小妹,吕长志,张小玲等. 基于 ISE 的 AlGaIn/GaN HEMT 的 CV 转移特性模拟[J]. 闽江学院学报, 2007, 27(5): 67-69.
- [31] 张小玲, 谢雪松等. AlGaIn/GaN HEMT 不同结构的直流及温度特性仿真[J]. 半导体技术, 2008, 12,33(S1): 91-93.
- [32] 陈允锋;刘静;陈勇;一种小型化双频段收信天线的分析与设计[J];计算机与数字工程;2011年07期.
- [33] 吴超;吴明赞;李竹;基于 HFSS 的无线传感器网络节点微带天线设计与仿真[J];电子器件;2012年01期.
- [34] Olah J, Gupta S. Power amplifier design using measured load pull data[J]. Microwave Engineering Europe, 2003: 23-30.
- [35] Greene, Matthew R. Tuning matching circuits for transmitter and receiver bands as a function of transmitter metrics. 《Paratek Microwave》 - 2011.
- [36] X Ge, H Zhong, B Qian. Asymmetric-mode competition in a relativistic backward wave oscillator with a coaxial slow-wave structure. Applied Physics Letters》 - 2010.
- [37] Y Wu, Z Xu, X Jin. Suppression of higher mode excitation in a high gain relativistic klystron amplifier. 《Physics of Plasmas》 - 2012 .
- [38] 李静强. AlGaIn/GaN HEMT 器件微波功率特性与内匹配技术研究[J]. 天津: 河北工业大学, 2007.
- [39] 张肇仪等. 微波工程[M], 电子工业出版社, 2006, 3.
- [40] 耿俊. 高速电路 PCB 设计中串扰问题的抑制 北京工业职业技术学院.
- [41] NB Application, B Agilent. Migrating from the Agilent 4155C and 4156C to the Agilent B1500A.
- [42] Pu R, Gong P, Michishita R, et al. Assessment of multi-resolution and multi-sensor data for urban surface temperature retrieval[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 104(2):211-225.
- [43] 李云红,孙晓刚,廉继红. 红外热像测温技术及其应用研究. 《现代电子技术》, 2009, 32(1):112-115.
- [44] M. Kuball, J. M. Hayes, M. J. Uren, etc. Measurement of Temperature in Active High-Power AlGaIn/GaN HFETs Using Raman Spectroscopy. IEEE Electron.Dev. Lett. 202, 23(1): 7-9.
- [45] Q. Kim, B. Stark and S. Kayali. A Novel, High Resolution, Non-Contact Channel Temperature Measurement Technique, Proceedings 36th Annual IEEE Reliability Physics Symposium. 1998, 108-112.

- [46] 胡培峰. AlGaN/GaN HEMTs 工作温升测量技术及相关技术的研究[J]. 北京: 北京工业大学, 2011.
- [47] Fischer A J, Allerman A A, Crawford M H, Bogart K H A, Lee S R, Kaplar R J 2004 *Applied Physics Letters* 84 3394.
- [48] 吴清仁, 文璧璇. SiC 材料导热系数和热膨胀系数与温度关系[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 1996(3).
- [49] Sarua A, Ji H, Kuball M, et al. Integrated micro-Raman/infrared thermography probe for monitoring of self[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2006, 53(10):2438-2447.
- [50] Kuball M, Hayes J M, Uren M J, et al. Measurement of temperature in active high-power AlGaIn/GaN HFETs using Raman spectroscopy[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2002, 23(1):7-9.
- [51] Liu M S, Bursill L A, Praver S, et al. Temperature dependence of Raman scattering in single crystal GaN films[J]. *Applied Physics Letters*, 1999, 74(21):3125-3127.
- [52] Kotchetkov D, Zou J, Balandin A A, Florescu D I 2001 *Applied Physics Letters* 79 4316.

攻读学位期间发表的学术论文

- 1 郭春生, **李世伟**, 任云翔, 高立, 冯士维, 朱慧. 加载功率与壳温对 AlGa_N/Ga_N 高速电子迁移率晶体管器件热阻的影响. *物理学报*. (SCI 已刊出)
- 2 郭春生, 高立, **李世伟**, 冯士维, 任云翔. 一种 HEMT 器件结温的测试方法. 国家发明专利. 专利号: CN201410539936.1. (已过初审)
- 3 郭春生, 王琳, 冯士维, 李睿, 张燕峰, **李世伟**. 一种 VDMOS 器件结温的方法. 国家发明专利. 专利号: 201410079725.4. (已过初审)
- 4 郭春生, 王琳, 冯士维, 李睿, 张燕峰, **李世伟**. 一种实时测量二极管瞬态温升的方法. 国家发明专利. 专利号: 20141017084.8. (已过初审)
- 5 Li Rui, Guo Chun-Sheng, Feng Shi-Wei, Wang Lin, **Li Shi-Wei**, Ren Yun-Xiang, Research on Nondestructive Measurement of Power VDMOS Thermal Contact Resistance. ICRMS2014. (EI会议已录用)
- 6 郭春生, 任云翔, 高立, **李世伟**. AlGa_N/Ga_N HEMT 在不同温度下的退化规律及退化机理. *半导体技术*. (核心已录用)

致谢

首先，对我的导师郭春生老师致以衷心的感谢。在他的悉心指导下完成了本论文的所有工作。郭老师学识渊博，对所有事情精益求精，孜孜以求，他对学生认真负责，要求严格。他先进的科学理念，严谨的教学态度是我在整个研究生阶段受益匪浅。通过郭老师三年来的谆谆教导，培养了我严谨的科学态度，踏实的学习态度，同时锻炼了我独立完成一项科研的能力以及让我领会了科学的思想观念。郭老师利用他宝贵的时间给我解答疑问，并在实验中给我提出极有价值的建议，使我能够顺利的完成实验工作。在他的细心教导下才完成了专利以及小文论的撰写。最终才能够顺利的完成整个大论文。

感谢冯士维老师对我研究课题的宝贵建议以及指导和帮助。感谢冯老师给我们提供了良好的科研平台。在例会报告中，冯老师总能够对我的所做实验提出不足以及改进。冯老师的正直，对科学研究的严谨态度一直对我影响深刻。他的理念只有亲自动手，才能够在实践中成长。

感谢朱慧老师对我小论文的指导。在她的指导下小论文撰写过程中才少走弯路。感谢任云翔同学在我的实验中给予的帮助，才能使我的课题顺利进行。感谢廖之恒师弟在数值模拟仿真时提出的宝贵建议。感谢苏雅师弟的帮助。

感谢与我朝夕相处的马超、陈月圆、杨军伟、龚雪琴让我在研究生阶段能够生活的更加快乐。感谢丁嫣、孟菊师妹对我的关心与帮助。让这个实验室有大家庭的感觉。

特别感谢我的家人，给我良好的学习环境以及学习条件。

最后感谢所有帮助我的人，感谢你们对我的关心。