



南京理工大学

NANJING UNIVERSITY OF SCIENCE & TECHNOLOGY

商用卫星高可靠第三代半导体微波集成电路 协同设计虚拟仿真实验





- 实验背景
- 实验平台特色
- 实验设计逻辑
- 实验项目
- 实验核心要素间的逻辑关联
- 实验教学过程设计
- 实验要求与考核方式
- 实验操作流程



实验背景

- 国家十四五规划和二〇三五年远景目标明确提出要“打造全球覆盖、高效运行的通信、导航、遥感空间基础设施体系”
- 高可靠、高性能的微波集成电路设计是卫星有效载荷产业化发展的关键
- 南京理工大学基于现代陆战系统的卫星精确定位需求，将最新科研成果转化为实验教学资源，设计了“商用卫星高可靠第三代半导体微波集成电路协同设计虚拟仿真实验”
- 项目依托南京理工大学微电子学院“近程射频感知芯片与微系统教育部重点实验室”平台
- 通过虚拟仿真形式，有效规避实体实验工艺加工及测试中存在的高成本、高消耗、难以模拟空间极端环境、现象难观测等痛点，允许学生以零试错成本进行自主学习与设计。

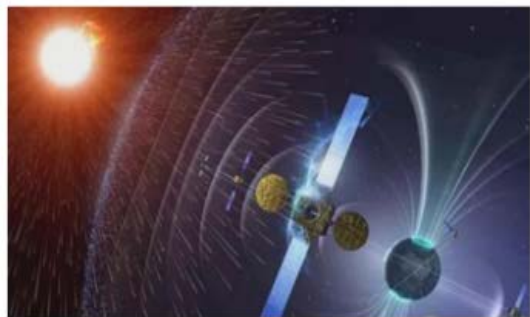
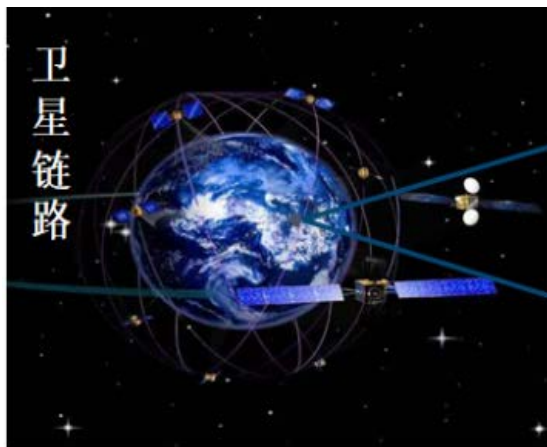


实验平台特色

- 实验内容均来源于项目组承担的前沿科研项目及重大工程，数据真实准确，我校拥有项目全部自主知识产权
- 多维度层进式实验设计方案，引导学生熟悉卫星通信链路基本组成，熟悉第三代半导体微波集成电路建模仿真与设计，熟悉商用卫星集成电路太空环境可靠性设计方法，掌握商用卫星第三代半导体微波集成电路系统综合设计方法
- 实验采用互动式教学与探究式教学相结合，应用观察法、模型法、控制变量法、综合优化法与转换法多维度引导学生自主学习与解决问题
- 实验全流程记录学生实验数据，完成后经系统客观评分，形成实验报告，实现教学全过程质量评控
- 实验平台基于最新HTML5、WebGL技术开发，为确保实验的流畅度，建议在Firefox或Chrome浏览器环境下开展实验



实验设计逻辑



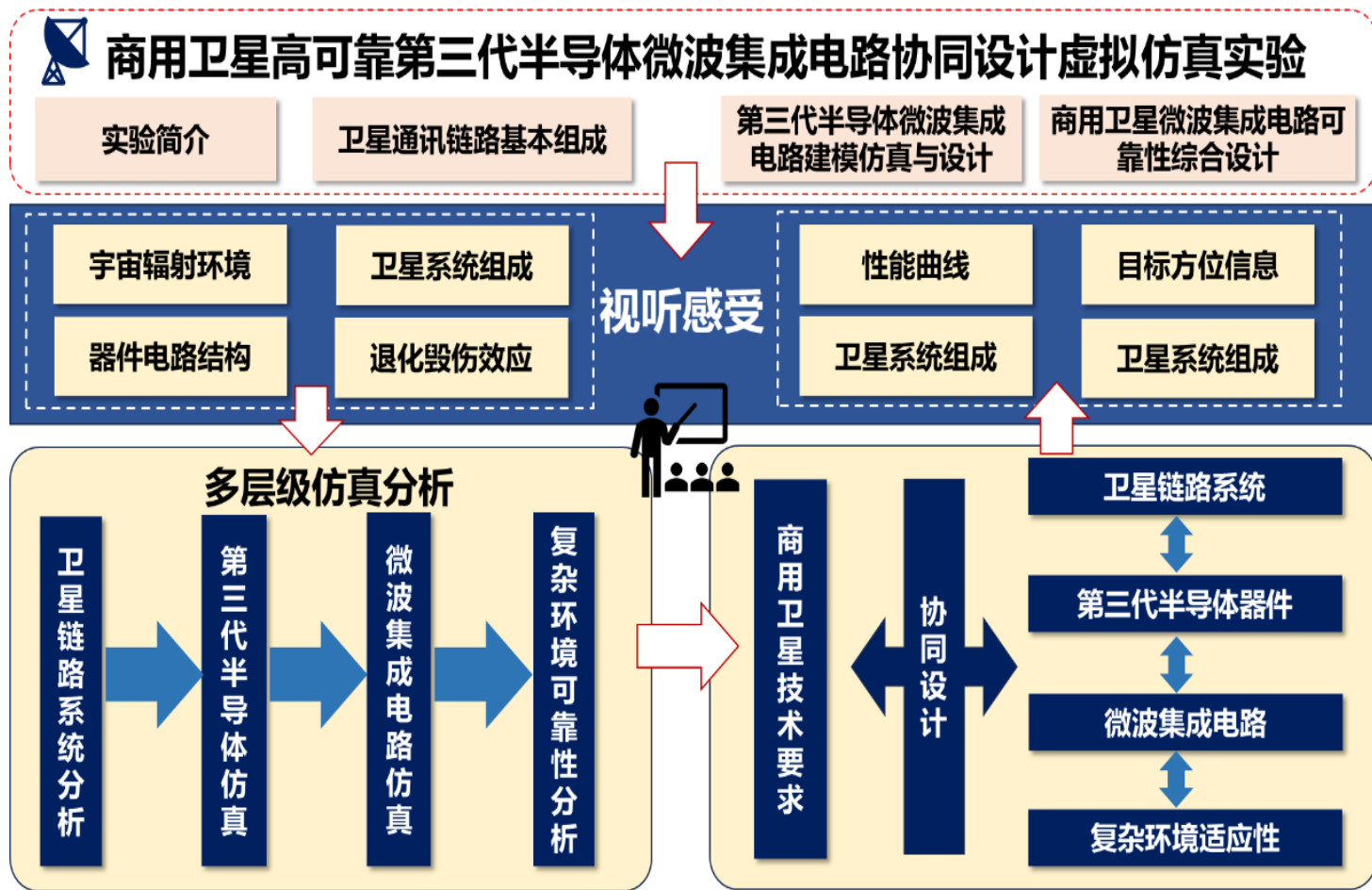


实验项目

1. 使用人机互动方式引导学生熟悉卫星通信链路的基本组成与工作原理，理解第三代半导体微波集成电路器件与电路性能指标计算方法，提高学生对第三代半导体器件与电路的认知能力
2. 在完成认知性学习的基础上，帮助学生熟悉微波集成电路设计的基本原理，掌握第三代半导体器件主要参数、阻抗匹配、及关键模块电路的设计方法，提升学生对商用卫星微波集成电路器件与模块的自主设计能力
3. 在器件/电路参数设计完成的基础上，帮助学生熟悉太空环境中集成电路可靠性设计基本原理，在太空辐照影响及低压击穿等虚拟场景中进行可靠性参数设计，提升学生在商用卫星微波集成电路可靠性方面的自主设计能力
4. 在完成单项设计训练后，通过商用卫星微波集成电路可靠性综合设计，引导学生在特定需求前提下，以指标规划→电路设计→可靠性设计→实现通信功能的步骤，对商用卫星微波集成电路进行整机全流程设计，提升学生对商用卫星第三代半导体微波集成电路整体进行高可靠协同设计的能力

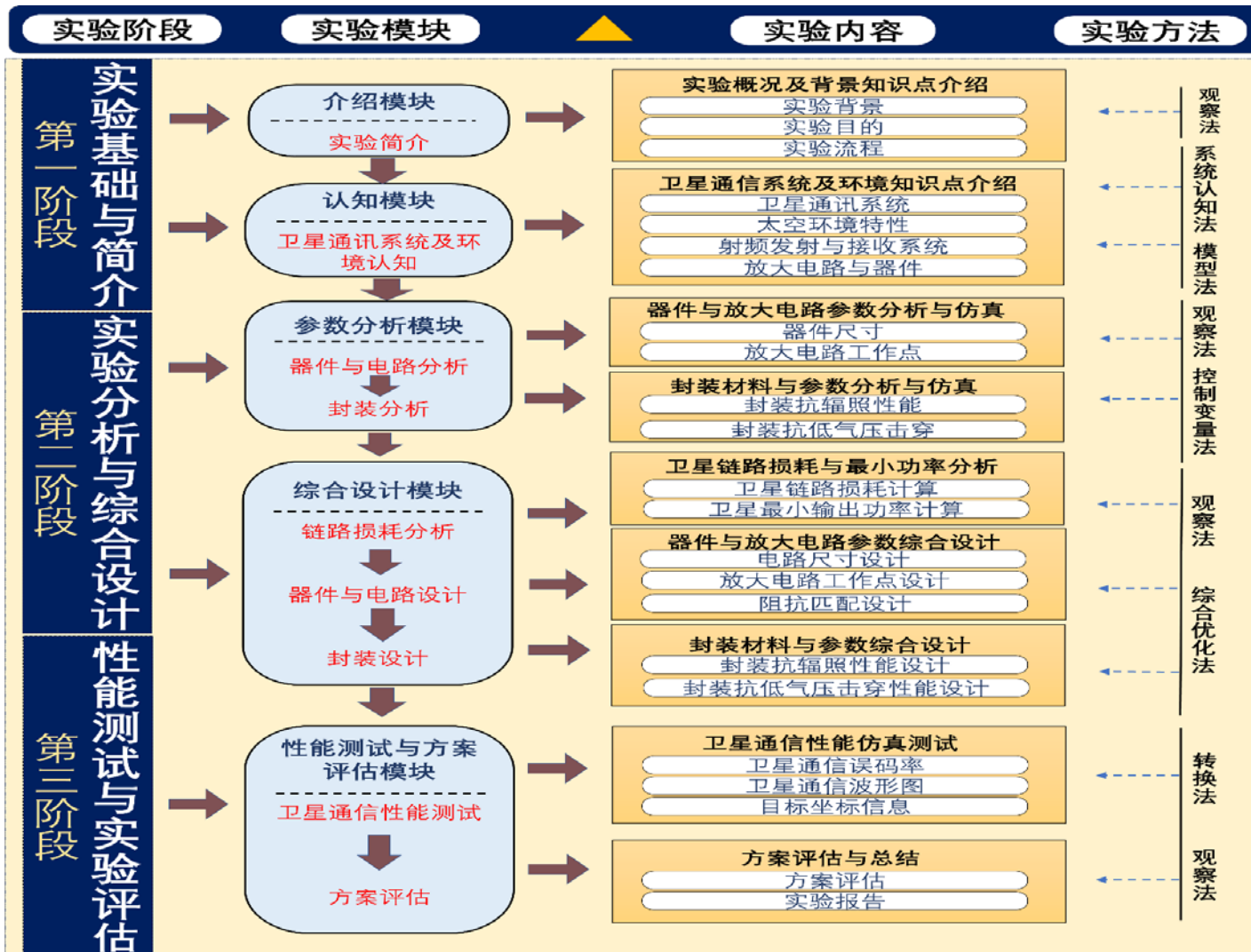


实验核心要素间的逻辑关联





实验教学过程设计





实验要求与考核方式

实验要求：

- ① 学习、并掌握第三代半导体微波集成电路相关基础知识，预习本实验项目的教学指南；
- ② 针对系统发布的实验任务，设置相应的器件参数、封装参数等指标，观察实验现象；
- ③ 通过参数调整，对比分析所设计的参数对器件、封装、系统指标性能的影响；
- ④ 查看实验数据，记录实验现象，分析实验结果，提交实验报告。

考核方式：

- ① 平台将自动记录学生操作过程及各项实验结果，生成实验报告
- ② 参考理论结果客观评分，在学生完成全部试验后，自动生成汇总实验报告，给出实验成绩



实验操作流程（1）

打开虚拟仿真链接，登录后进入实验界面首页





实验操作流程 (2)

点击实验简介，查看实验背景、实验目的、实验流程

The screenshot shows a software interface with a top navigation bar containing buttons for '大厅' (Main Hall), '实验简介' (Experiment Introduction), '卫星通信链路基本组成' (Basic Composition of Satellite Communication Link), '第三代半导体微波集成...' (Third-Generation Semiconductor Microwave Integration...), '商用卫星微波集成电路...' (Commercial Satellite Microwave Integration Circuit...), and '助手' (Assistant). A central window is open, displaying three sub-sections: '实验背景' (Experiment Background), '实验目的' (Experiment Purpose), and '实验流程' (Experiment Procedure). The '实验背景' section contains the following text:

我国国民经济和社会发展十四五规划和二〇三五年远景目标明确提出要“打造全球覆盖、高效运行的通信、导航、遥感空间基础设施体系”，而小型化、高可靠、低成本、高性能的微波集成电路设计又是卫星有效载荷产业化发展的关键。为了应对卫星有效载荷的产品设计研发对小型化、高可靠、低成本、高集成微波集成电路的迫切需求，培养星载第三代半导体微波集成电路设计方面的专业人才，本项目组依托微波集成电路方面的教学和科研，服务国家战略需求，培养星载第三代半导体微波集成电路设计方面的工程精英人才。

由于采用第三代半导体工艺设计应用于商用卫星的微波集成电路，实验属于大型综合训练，设计成本高、消耗高（采用第三代半导体工艺设计集成电路的成本高、发生错误须重新设计流片），部分关键性能试验涉及到空间极端环境（太空辐照环境和低气压条件等）、现象观测难（芯片内部某些节点处的信号、极端环境电路损伤定位难）等问题，采用虚拟仿真实验方法不但可以轻松化解这些难题，还能允许学生在几乎无成本试错的过程中深入理解并掌握商用卫星高可靠第三代半导体微波器件设计理论与方法。

At the bottom of the window, there are buttons for '返回' (Return), '实验简介' (Experiment Introduction), and '下一步' (Next Step). Below the screenshot, a large text overlay reads: **而坦克和火炮能否打得准依赖于对自身和敌方目标的精确定位**



实验操作流程 (3)

了解北斗卫星短报文通信在武器作战系统中的应用

大厅 实验简介 **卫星通信链路基本组成** 第三代半导体微波集成... 商用卫星微波集成电路... 助手

北斗短报文通信

北斗短报文终端机

北斗地面遥控系统

北斗短报文通信服务平台

作战指挥信息系统

地面通信系统

- 坦克
- 火炮
- 步兵战车
- 导弹发射车

北斗卫星短报文通信在武器作战系统中的应用

作战武器通过自带北斗短报文终端机与北斗卫星进行通信，实现自身定位与导航以及共享自身位置信息，或通过与作战指挥信息系统的信息交互获取敌方目标三维坐标信息、我方其它协同作战武器的位置信息等。

进入太空环境特性介绍



实验操作流程（4）

了解太空环境特性

太空环境特性

- 空间辐射环境
- 辐射引发的性能退化
- 低气压放电击穿

空间辐射环境主要由空间带电粒子、空间中性质子分子以及少量的空间X射线、空间射线等组成。这些辐射随纬度、经度、高度、方向和时间等因素的变化而变化，而且还会受太阳粒子事件的影响。在所有航天器故障中，大约40%是由空间环境直接导致的，而在空间环境导致的航天器故障中，有36%源于等离子体环境，34%源于电离辐射环境，10.5%源于热环境，5.3%源于太阳环境。

进入星地通信收发系统



实验操作流程 (5)

学习卫星通信链路中收/发机系统的组成与工作原理

发射机系统

接收机系统



实验操作流程 (6)

学习功率放大器的电路组成、结构功能、相关参数指标

功率放大器结构

输入匹配网络 微波功率放大器 输出匹配网络

输入匹配网络 晶体管放大电路 输出匹配网络

输出功率 效率 增益 线性度

一个晶体管放大器可看作是一个二端口网络，在微波频段通常用散射参量(S)描述。输入端对于输入端，做共轭匹配就是使源反射系数 $-\Gamma_s$ 与放大器输入端反射系数 $-\Gamma_{in}$ 保持共扼，即 $\Gamma_s = \Gamma_{in}^+$ 。

进入微波器件



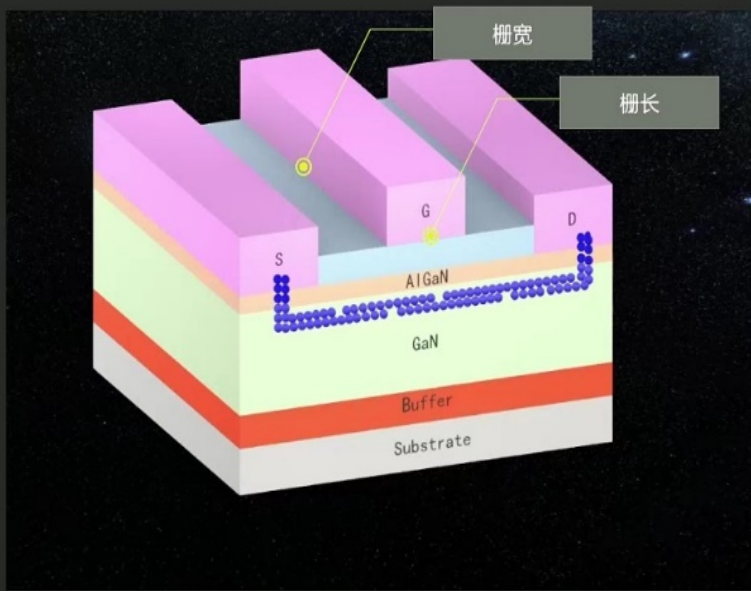
实验操作流程 (7)

学习半导体微波器件相关知识

大厅 实验简介 卫星通信链路基本组成 第三代半导体微波集成... 商用卫星微波集成电路... 助手

半导体微波器件

器件参数 抗辐照封装 低气压击穿保护封装



栅宽

栅长

S G D

AlGaN

GaN

Buffer

Substrate

栅长是指沿沟道方向栅极的长度，栅宽则指栅的宽度，即与栅长垂直方向的栅尺寸。需要注意的是栅长的最小尺寸受工艺水平的限制，最小只能取该工艺所能达到的最小尺寸（通常所说的7nm工艺就是指晶体管的栅长最小不低于7nm）。栅长会影响晶体管的性能，如管子的等。栅宽的大小与晶体管承受的功率相关，功率越大需要的栅宽越大。

第三代场效应晶体管包含众多工艺参数，包括介质层材料、介质层厚度、AlGa_n组分、GaN缓冲层掺杂、外延工艺以及衬底类型，这些工艺参数会影响晶体管二维电子气2DEG迁移率、阈值电压、寄生电容以及噪声等参数，电路设计者较难控制这些工艺参数。



实验操作流程 (8-1)

学习并掌握微波器件参数对器件及微波电路性能的影响规律

大厅
实验简介
卫星通信链路基本组成
第三代半导体微波集成...
商用卫星微波集成电路...
助手

参数列表

序号	栅长(um)	栅宽(um)
1	0.35	400
2	0.3	400

参数设置

可选择固定单一参数调节

栅长 栅宽

栅长: um
范围: L=0.25um-0.7um

栅宽: um
范围: W=10um-450um

确定

出现短沟道效应!
注意观察M3是否小于-25dBc

漏极电流 纵坐标: 请选择

输出功率 纵坐标: 请选择

功耗 纵坐标: 请选择

交调系数

Vds=15V
Vgs=33V

实验规律总结



实验操作流程 (8-2)

学习并掌握微波器件参数对器件及微波电路性能的影响规律

参数列表

序号	栅长(um)	栅宽(um)
1	0.35	400
2	0.3	400
3	0.6	400
4	0.6	200
5	0.6	100

参数设置

可选择固定单一参数调节
 栅长 栅宽

栅长: 0.6 um
范围: =0.25um-0.7um

宽: 100 um
范围: =10um-450um

确定

电路示意图

输入: V_{in} , 输出: V_{out} , 电源: V_{dd} , 地: GND

总结

性能指标与设置

漏极电流 纵坐标: 5
输出功率 纵坐标: 5
交流系数

性能曲线

I_{ds}/A vs. Frequency
 P_{om}/W vs. Frequency
 P_V/W vs. Frequency
 M_3/dBc vs. Frequency

$V_{ds}=15V$
 $V_{gs}=33V$

进入静态工作点

实验规律总结



实验操作流程 (9-1)

学习并掌握微波电路参数对器件及微波电路性能的影响规律

参数列表

序号	Vgs(V)	Vds(V)
1	15	33
2	12	33
3	9	33

参数设置

可选择固定单一参数调节

Vgs Vds

Vgs: 9 V
范围: Vgs=3V-15V

Vds: 33 V
范围: Vds=15V-48V

确定

漏极电流 纵坐标: 请选择 输出功率 纵坐标: 请选择 功耗 纵坐标: 请选择 交调系数

$L=0.35\mu\text{m}$
 $W=400\mu\text{m}$

实验规律总结



实验操作流程 (9-2)

学习并掌握微波电路参数对器件及微波电路性能的影响规律

参数列表

序号	Vgs(V)	Vds(V)
1	15	33
2	12	33
3	9	33
4	9	15
5	9	45

参数设置

可选择固定单一参数调节

Vgs Vds

Vgs: 9 V
范围: Vg = 3V-15V

Vds: 45 V
范围: Vd = 15V-48V

确定

输出电压为: 5V

总结

进入星载环境适应性分析

漏极电流 纵坐标: 请选择

输出功率 纵坐标: 请选择

交调系数

L=0.35um
W=400um

实验规律总结



实验操作流程 (11)

学习半导体封装尺寸对可靠性影响

大厅 实验简介 卫星通信链路基本组成 **第三代半导体微波集成...** 商用卫星微波集成电路... 助手

第三代半导体微波集成电路建模仿真与设计

参数设置

请选择保护气体种类
空气 电离能12.06-15.5eV

请输入材料尺寸

长: 50 mm
范围: 10-50mm

宽: 50 mm
范围: 10-50mm

高: 20 mm
范围: 10-20mm

确定

参数列表

3	氩气	长: 20	宽: 30	高: 20
4	氩气	长: 20	宽: 15	高: 20
5	空气	长: 50	宽: 50	高: 20

Eb曲线

气压变化

商用卫星微波集成电路可靠性综合设计



实验操作流程（12）

进入“GaN功率器件设计”环节，首先选择设计任务类型





实验操作流程 (13)

北斗卫星功率放大器功率设计参数的设定

大厅 实验简介 卫星通信链路基本组成 第三代半导体微波集成... 商用卫星微波集成电路... 助手

北斗卫星工作参数

发射频率	2492 MHz
天线增益	25.4 dB
通道内损耗	3.8 dB

地面接收机参数

最小接收功率	-157 dBW
--------	----------

通信链路参数

卫星离地距离	35786 km
极端环境的额外损耗	6 dB

请根据以上参数信息计算下列参数


设计功放的功率大于等于: W 功耗: 800W 交调系数: -25dBc



实验操作流程 (14)

GaN功率器件的结构与电路参数的设计

大厅
实验简介
卫星通信链路基本组成
第三代半导体微波集成...
商用卫星微波集成电路...
助手



目标参数

功率大于等于: W 功耗小于等于: W 交调系数小于等于: dBc

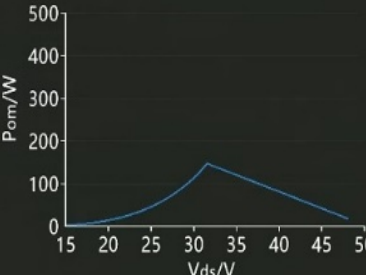
GaN功率器件设计参数

栅长: μm 栅宽: μm $L=0.25\mu\text{m}-0.7\mu\text{m}$
 $W=10\mu\text{m}-450\mu\text{m}$

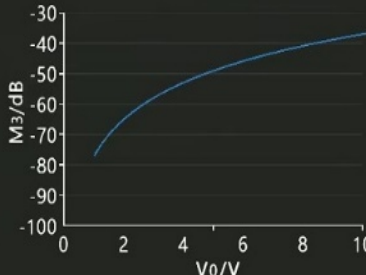
V_{gs} : V V_{ds} : V $V_{gs}=3\text{V}-15\text{V}$
 $V_{ds}=15\text{V}-48\text{V}$

匹配阻抗: + $j\Omega$

功率



交调系数



输入阻抗	输出功率	功耗	交调系数
25-9.32j Ω	124.2W	784W	-37dBc



实验操作流程 (15)

半导体集成电路封装设计

大厅 | 实验简介 | 卫星通信链路基本组成 | 第三代半导体微波集成... | 商用卫星微波集成电路... | 助手

Eb曲线

Y-axis: $E_b(V/m)$ (0 to 10, scale $\times 10^7$)
X-axis: t(年) (0 to 10)

气压变化

Color scale: 低 (Low) to 高 (High)

星地通信性能检测

参数设置

为了减轻封装重量, 设计封装外壳质量 $\leq 0.55g/cm^2$, 尺寸 $< 27000mm^3$, 且必须保证机械强度。

请选择封装材料:

请选择保护气体种类:

请输入材料厚度: mm 密度: $2.7g/cm^3$ 范围: 0.5-10mm

请输入材料尺寸
长: mm 范围: 10-50mm
宽: mm 范围: 10-50mm
高: mm 范围: 10-20mm

漏极电流退化

Y-axis: 0 to 100%
X-axis: t(年) (0 to 10)

输出功率退化

Y-axis: 0 to 100%
X-axis: t(年) (0 to 10)

载流子浓度分布

Y-axis: μm (0.99 to 1.03)
X-axis: $\times 10^{19} \mu m$ (0.4 to 2.0)

载流子浓度几乎不变

器件内部电场分布

Y-axis: $\times 10^6$ (0.4 to 2.2)
X-axis: (0.4 to 2.0)

电场分布几乎不变



实验操作流程 (16)

半导体集成电路误码率与波形图测试

大厅 实验简介 卫星通信链路基本组成 第三代半导体微波集成 商用卫星微波集成电路... 助手

第三代半导体微波集成电路建模仿真与设计 误码率

AV5233C 误码测试仪

无数据
无时钟
失步
反码
锁码

单次 列表
确定 选择

时钟 数据 时钟 数据

关 开 关 开

波形图

幅度

时间 μs

查看实验评价 查看方案列表
重新实验 查看实验报告



实验操作流程 (17-1)

查看实验设计汇总与评价, 提交实验报告, 完成实验

大厅 | 实验简介 | 卫星通信链路基本组成 | 第三代半导体微波集成... | 商用卫星微波集成电路... | 助手

误码率

AN522C 误码测试仪

无数据
无时钟
失步
误码
错码

确定 选择

时钟 数据 时钟 数据

开关 0 开

0

1 2 3 4 μ s

信号状态: 良好
北纬: 118.7813
东经: 31.1427
海拔: 150.5477m
速度: 20.2458km/h

查看实验评价 | 查看方案列表
重新实验 | 查看实验报告

项目评价

卫星通信链路基本组成

北斗卫星短报文通信在武器作战系统中的应用

考核点名称	考核结果	分数
实验背景	该步骤满分4分, 已完成	4
卫星通讯系统认知	该步骤满分1分, 已完成	1
太空环境特性		
考核点名称	考核结果	分数
太空环境特性认知	该步骤满分1.5分, 已完成	1.5
射频发送与接收部分		
考核点名称	考核结果	分数
发射系统认知	该步骤满分2分, 已完成	2
接收系统认知	该步骤满分2分, 已完成	2
功率放大器结构与半导体微波器件		
考核点名称	考核结果	分数
功率放大器组成与功能认知	该步骤满分3.5分, 未完成	3
半导体微波器件与封装认知	该步骤满分1.5分, 已完成	1.5
第三代半导体微波集成电路建模与设计		

提交



实验操作流程 (17-2)

查看实验设计汇总与评价, 提交实验报告, 完成实验

方案列表

方案3

设计参数:	栅长	栅宽	Vgs	Vds	匹配阻抗	封装材料	封装尺寸
	0.25um	10um	12V	15V	请输入+请输入jΩ	铝合金	19mmx20mmx10mm

方案4

设计参数:	栅长	栅宽	Vgs	Vds	匹配阻抗	封装材料	封装尺寸
	0.35um	400um	15V	33V	25+9.32jΩ	铝合金	40mmx30mmx20mm

提交方案

查看实验评价

查看方案列表

重新实验

查看实验报告



实验操作流程 (17-3)

查看实验设计汇总与评价, 提交实验报告, 完成实验

The screenshot displays the 'Experiment Report' window within a software interface. The window is titled '实验报告' and contains the following sections:

- 设计参数:** A table with the following data:

栅长	栅宽	Vgs	Vds	匹配阻抗	封装材料	封装尺寸
0.35 μ m	400 μ m	15V	33V	20+9.32 Ω	铝合金	40mmx30mmx20mm
- 四. 实验评价:** Includes a '误码率' (BER) section with a digital display showing '0' and a '得分: 31/37' (Score: 31/37).
- 波形图:** A graph showing a signal waveform over time (0 to 4 μ s).
- 功率曲线:** A graph showing power (P_{out}/W) versus V_{ds}/V, with a peak around 30V.
- 交调系数曲线:** A graph showing modulation coefficient (M₁/dB) versus V_{ds}/V, showing a decreasing trend.

At the bottom of the report window, there is a red dashed box around a '提交' (Submit) button. To the right of the report window, there is a control panel with buttons for '无锁码', '无时钟', '无码步', '反码', '锁码', '确定', '选择', and '取消'. Below this panel, there is a large waveform graph and a '时间' (Time) axis ranging from 2 to 4 μ s. At the bottom right of the interface, there are buttons for '查看实验评价', '查看方案列表', '重新实验', and '查看实验报告'.