

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——实验指导书

1 实验目的

通过本实验课程的学习，掌握第三代半导体微波集成电路基本组成、工作原理和优化设计，并在此基础上了解 GaN 半导体器件工作原理、模型表征及功能设计知识，掌握星载第三代微波集成电路建模技术，并能根据工程实际需求，实现星载第三代微波集成电路综合仿真与可靠性设计，从而加深对相关理论知识的理解和对半导体微波集成电路系统的综合设计与开发调试能力，为将来进一步深造学习或工作打好基础。

2 实验系统和实验环境

本实验课程以南京理工大学微电子学院开发研制的“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系统”为基本实验平台，实验内容与底层数据、模型均来源于项目组承担的前沿科研项目及重大工程，具有高度准确性与真实性。

本虚拟实验平台基于最新 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。

3 实验项目

本课程利用虚拟现实技术，多维度层进式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。具体实验项目分为以下四大组成部分：

- (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。

4 实验方法

本虚拟仿真综合采用了观察法、系统认知法、模型法、控制变量法、综合优化法和转换法等实验方法，帮助学生科学有效地完成实验。

(1) 系统认知法

在本项目的“系统总体概述”部分，学生采用系统认知方法，通过点击系统各功能模块，对照系统功能框图学习各模块功能。学生深入学习和掌握实验背景与总体功能、卫星通信链

路组成与功能、星地通信收发系统组成、太空环境特性、高功率放大器组成等。

(2) 模型法

为了让学生理解空间辐射引起的器件退化以及低气压放电原理，本实验采用了模型法，通过动态 3D 模型让学生直观地观测到辐照对半导体器件的影响以及封装引起的低气压漏电过程。

(3) 控制变量实验法

影响卫星通信效果的系统参数非常多，为了让学生弄清楚各个参数对其的影响，理解其物理规律，实验中大量采用了控制变量的实验法。在本实验中确保其他变量不变的前提下，要求学生分别单独设计器件、电路以及封装的各个参数，展现各个参数本身对系统性能及卫星通信效果的影响规律。

(4) 综合优化法

卫星通信性能包含发射功率、线性度、抗辐射及寿命等性能参数，也受到器件、电路及封装的多种参数影响和制约。在实验过程中，为了需要完成卫星通信系统设计，要求学生同时考虑多种性能参数和设计参数间的关联，综合考虑各相关因素的相互协调，才能实现卫星系统的优化设计。

(5) 转换法

卫星通信的电磁波信号看不见摸不着，为了可视化展示设计参数对卫星电磁信号得影响，本实验项目中对卫星通讯效果进行实时可视化展示，通过误码率、实时接收波形图、目标方位信息等形式展现设计结果，供学生进行直观观测和分析。

5 实验要求

- (1) 预习本实验项目的教学指南，学习、并掌握第三代半导体微波集成电路相关基础知识；
- (2) 认真做好虚拟实验中的认知性实验项目，掌握 GaN 晶体管、半导体器件辐照退化、低气压放电等原理，理解了卫星通信链路及系统的组成、卫星器件电路及封装结构和太空辐射环境的特性；
- (2) 针对系统设定的实验任务，计算并输入准确的参数，并通过系统的在线仿真测试，输出测试曲线图，据此分析实验结果，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。

6 实验评价与考核方式

本实验评价注重过程考核，突出形成性评价方式，兼具过程性评价和结果性评价的优点，以培养学生独立思考和解决复杂工程问题的综合能力。具体评价方式如下：

- (1) 通过互动式操作，进行探究式学习，使学生掌握各类参数调整对实验结果的影响，实现实验教学的过程性评价。
- (2) 通过“实验方案列表”和“实验方案评价”等过程报告，使学生明确实验过程中存在的问题和实验改进的方向，及时优化实验操作结果，完成形成性评价。
- (3) 通过最终提交的实验报告完成结果性评价。

依据以上评价方式，实验平台将自动记录学生的整个操作过程及各项实验结果，生成实验报告，并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。

7 实验步骤与操作流程

步骤 1: 打开虚拟仿真链接，登录后进入实验界面首页，如图 1 所示。

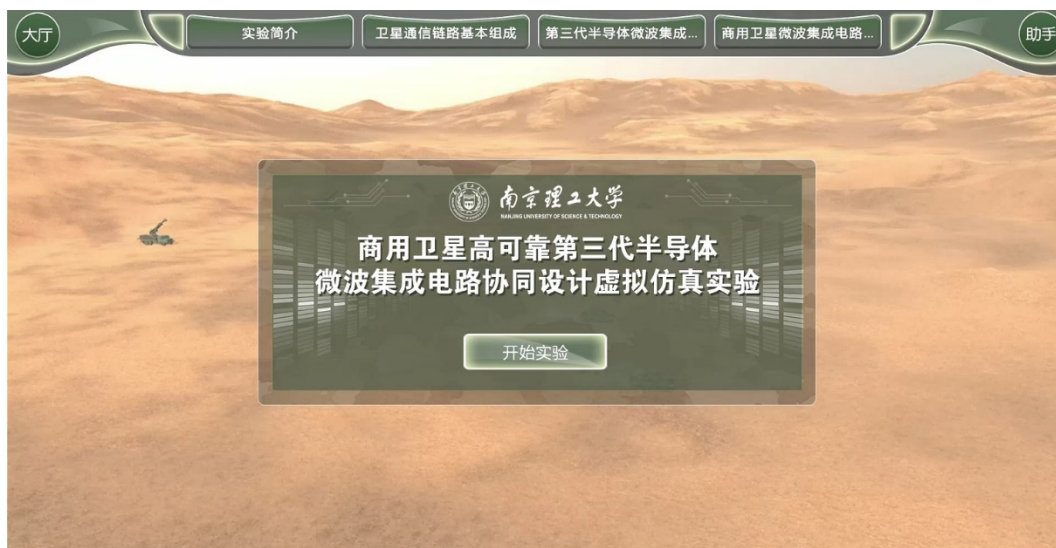


图1 虚拟仿真实验系统首页

步骤 2: 点击【开始实验】按钮，观看一段 3D 动画，了解本虚拟实验的设计背景。同时也可以点击实验界面上端的【实验简介】按钮，详细了解相关的实验背景、实验目的和实验流程。

步骤 3: 在 3D 动画界面点击【跳过】按钮，进入“北斗卫星短报文通信在武器作战系统中的应用”实验环节的学习，实验界面如图 2 所示。



图2 北斗短报文通信在武器作战系统中的应用

注意：该步骤也可以通过点击系统实验界面上端的【卫星通信链路基本组成】按钮，再在下拉菜单中点击【北斗卫星短报文通信在武器作战系统中的应用】按钮加以实现。（系统实验界面上端的其它按钮使用方式相同，以下步骤中不再赘述）

步骤 4: 点击【进入太空环境特性介绍】按钮，了解卫星在太空运行时所处的空间辐照环境，实验界面如图 3 所示。



图 3 太空中的空间辐照环境学习界面

在该步骤中，通过分别点击【辐照引发的性能退化】按钮和【低气压放电击穿】按钮，学习由于恶劣的辐照环境所引发的电子部件的性能退化的相关知识，以及电子部件长时间处于真空环境而导致的气体泄漏所引发的低气压放电击穿的相关知识。

步骤 5: 点击【进入星地通信收发系统】按钮，首先学习并掌握卫星通信链路中发射机系统的组成与工作原理。实验界面如图 4 所示。

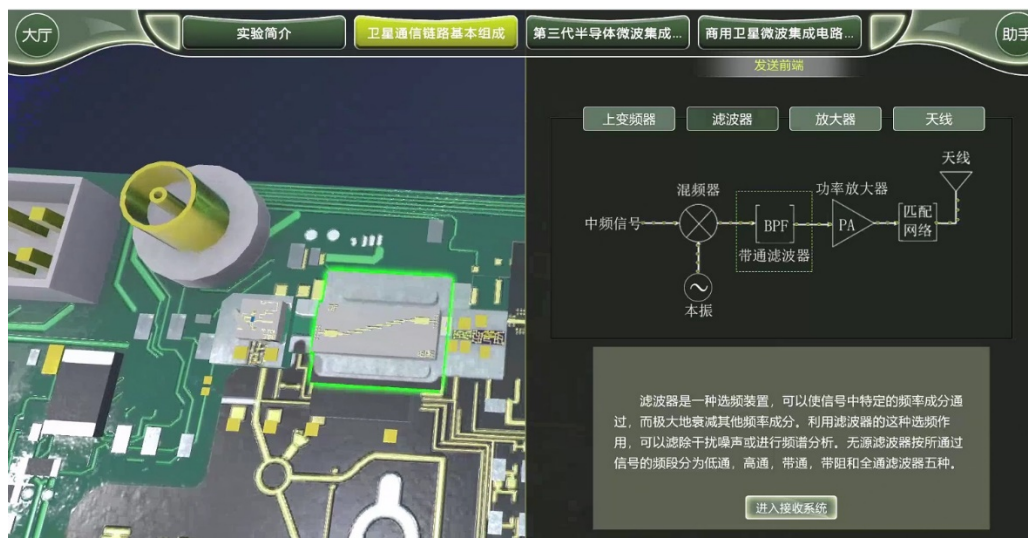


图 4 发射机系统的组成与工作原理实验界面

在该步骤中，通过分别点击【上变频器】、【滤波器】、【放大器】和【天线】按钮，屏幕镜头转换，在实验界面展示相应部件，并介绍各部件。

步骤 6: 点击【进入接收系统】按钮，学习并掌握卫星通信链路中接收机系统的组成与工作原理。实验界面如图 5 所示。

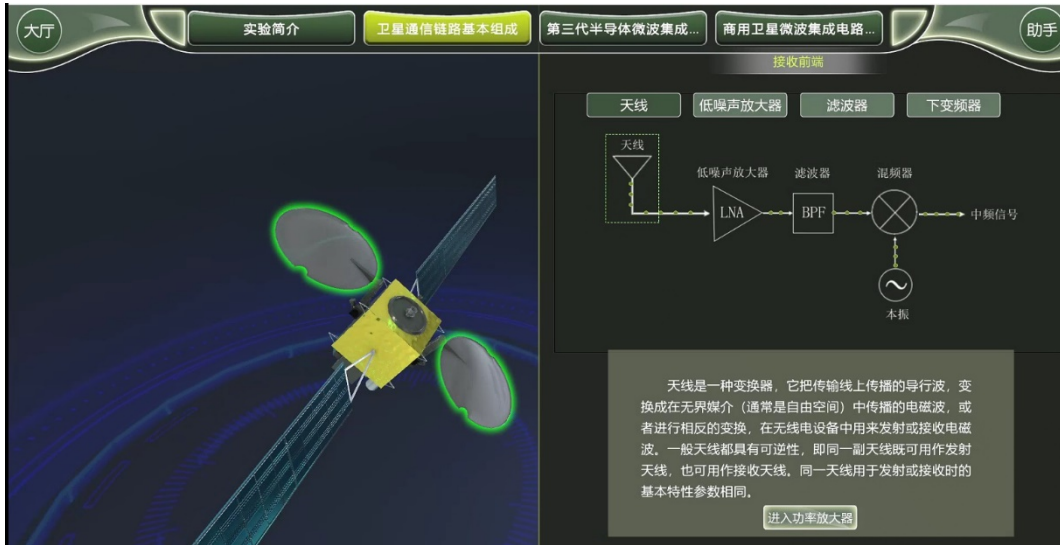


图 5 接收机系统的组成与工作原理实验界面

在该步骤中，通过分别点击【天线】、【低噪声放大器】、【滤波器】和【下变频器】按钮，屏幕镜头转换，在实验界面展示相应部件，并介绍各部件。

步骤 7: 点击【进入功率放大器】按钮，学习并了解功率放大器的电路组成与结构功能。实验界面如图 6 所示。

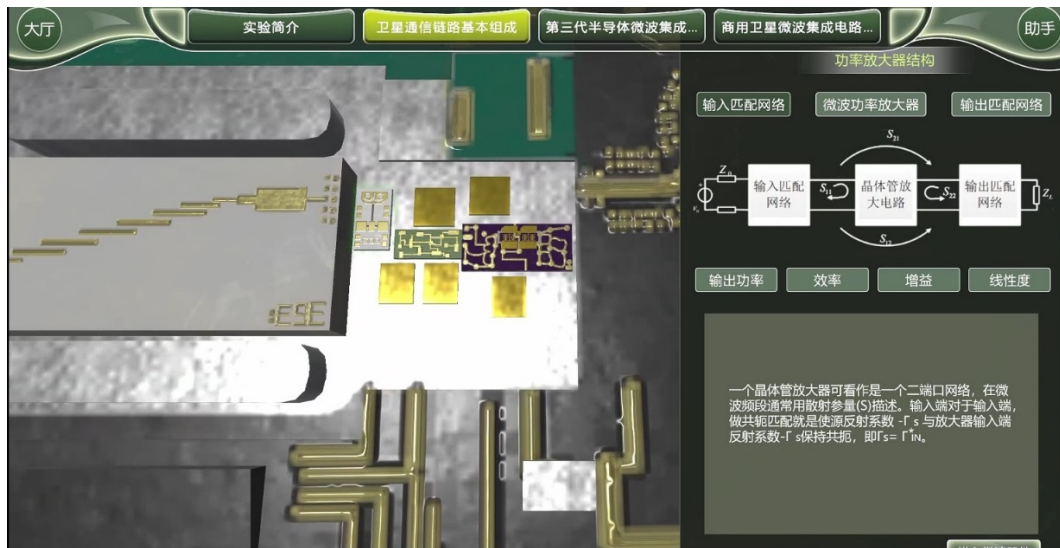


图 6 功率放大器的电路组成与结构功能实验界面

在该步骤中，通过分别点击【输入匹配网络】、【微波功率放大器】和【输出匹配网络】按钮，屏幕镜头转换，在实验界面展示相应部件，并介绍各部件。另外，通过分别点击【输出功率】、【效率】、【增益】和【线性度】按钮，学习并了解功率放大器 4 个重要性能指标的定义、表达式、相互关联性等专业知识。

步骤 8: 点击【进入微波器件】按钮，进行半导体微波器件相关知识的学习。该实验环节分别从【尺寸参数】、【工艺参数】、【半导体封装】三个角度，采用系统认知法和 3D 模型法详细介绍了 GaN 场效应管的结构、工艺和封装的相关专业知识。实验界面如图 7 所示。



图 7 半导体微波器件相关知识的学习实验界面

在该步骤中，通过分别点击【器件参数】、【抗辐照封装】和【低气压击穿保护封装】按钮，屏幕镜头转换，在实验界面展示并介绍第三代半导体微波器件结构、参数及封装性能。

步骤 9: 在完成【半导体封装】相关知识的学习后，点击界面中的【进入下一环节】按钮，进入“第三代半导体微波集成电路建模仿真与设计”实验模块。首先进入“器件参数分析”界面。如图 8 所示。

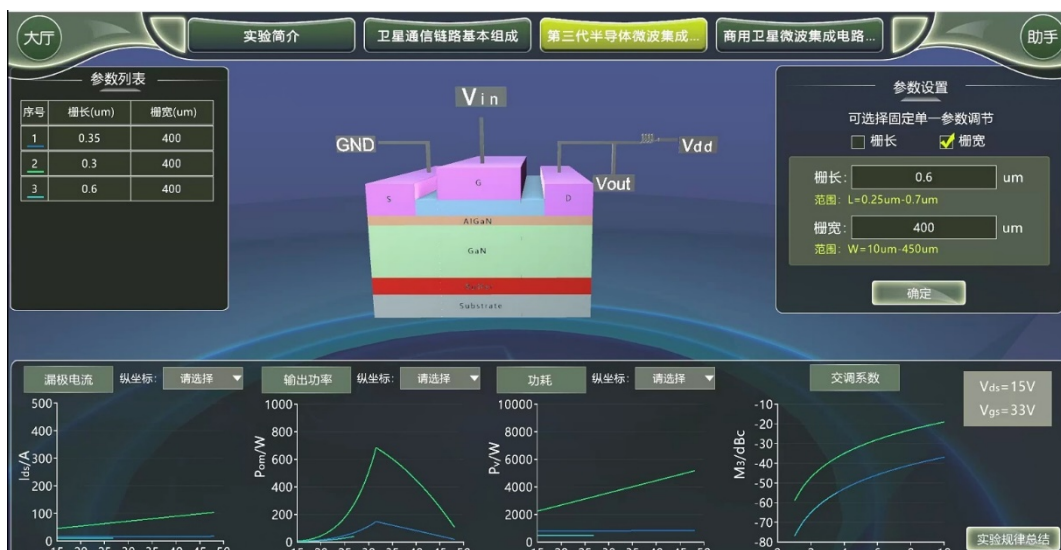


图 8 器件参数分析界面

界面右侧上方为“参数设置”区，在界面所提示的参数取值范围内，在参数要求范围内任意输入 GaN 场效应管的栅长与栅宽，观测器件及电路的性能曲线，掌握微波器件参数对器件及微波电路性能的影响规律。

步骤 10: 点击【实验规律总结】按钮，根据实验的仿真结果，在弹出的对话框中输入尺寸参数对器件及电路性能的影响。完成后点击【进入静态工作点】按钮，提交总结报告，并进入下一实验环节。实验总结对话框如图 9 所示。



图9 实验规律总结对话框

步骤 11: 点击【进入静态工作点】按钮后会进入 GaN 场效应管工作点分析实验环节。该实验环节通过调节 GaN 场效应管的直流偏置电压 V_{gs} 和 V_{ds} ，观察静态工作点对放大器的输出功率、功耗和线性度的影响。实验界面如图 10 所示

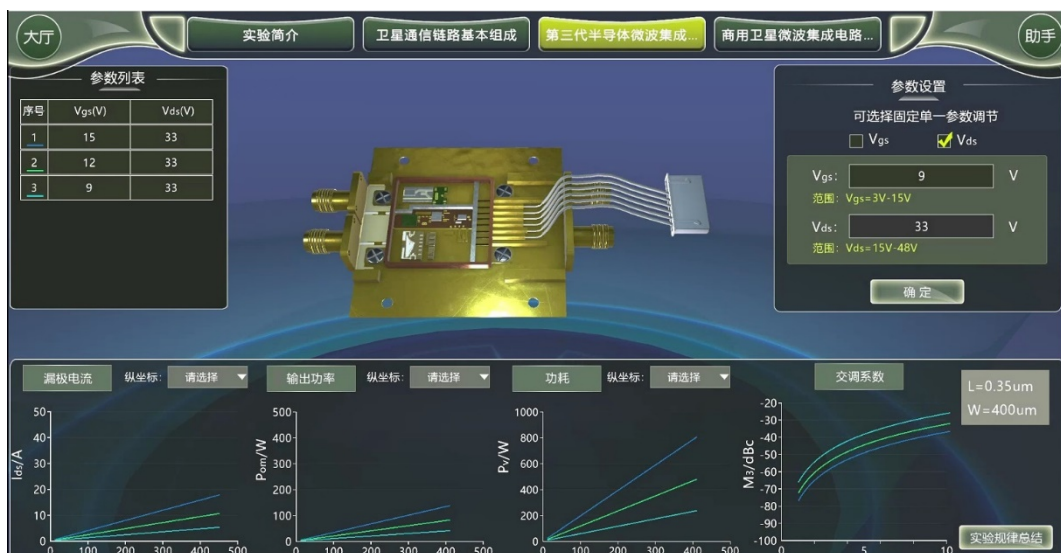


图 10 电路参数分析界面

界面右侧上方为“参数设置”区，在界面所提示的参数取值范围内，任意输入 GaN 场效应管的静态直流偏置电压 V_{gs} 和 V_{ds} ，观测器件及电路的性能曲线，掌握微波电路参数对器件及微波电路性能的影响规律。

步骤 12: 点击【实验规律总结】按钮，在弹出的对话框中输入本环节实验总结，类似于步骤 10 要完成的工作。完成后点击【进入星载环境适应性分析】按钮，提交总结报告，并进入下一实验环节。

步骤 13: 本实验环节通过选择封装材料、设置封装材料的厚度，观察空间辐射环境对 GaN 半导体器件全寿命工作特性的影响。实验界面如图 11 所示。

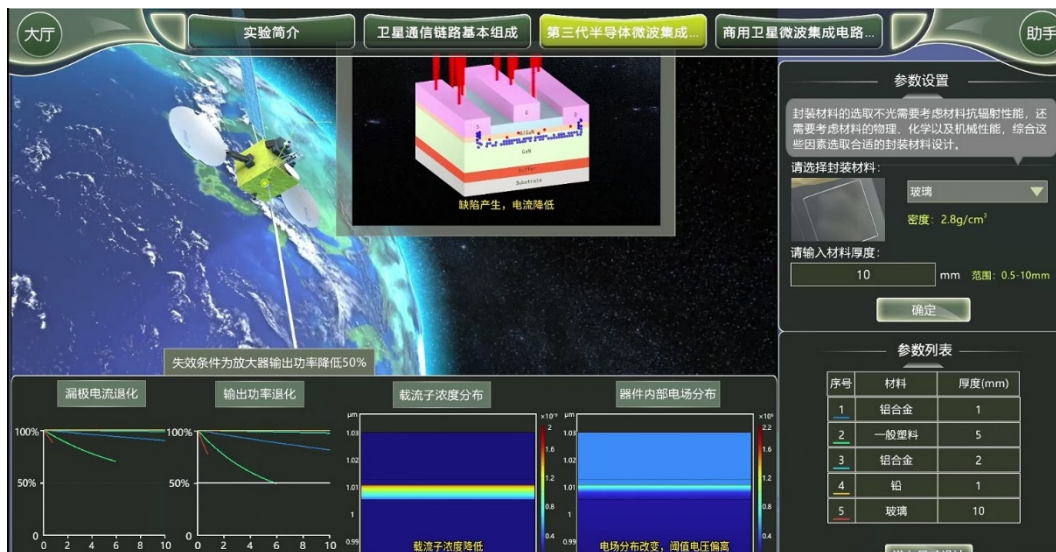


图 11 封装设计对半导体全寿命工作性能影响实验

界面右侧上方为“参数设置”窗口，选择封装材料，并按要求计算设计封装材料的厚度。参数设置并确定后，观测器件及电路的性能曲线，掌握封装材料的设计对星载微波集成电路高可靠工作性能的影响规律。

步骤 14: 点击【进入尺寸设计】按钮，实验观测封装尺寸变化对因气体泄漏导致的低气压放电击穿的影响。实验界面如图 12 所示。

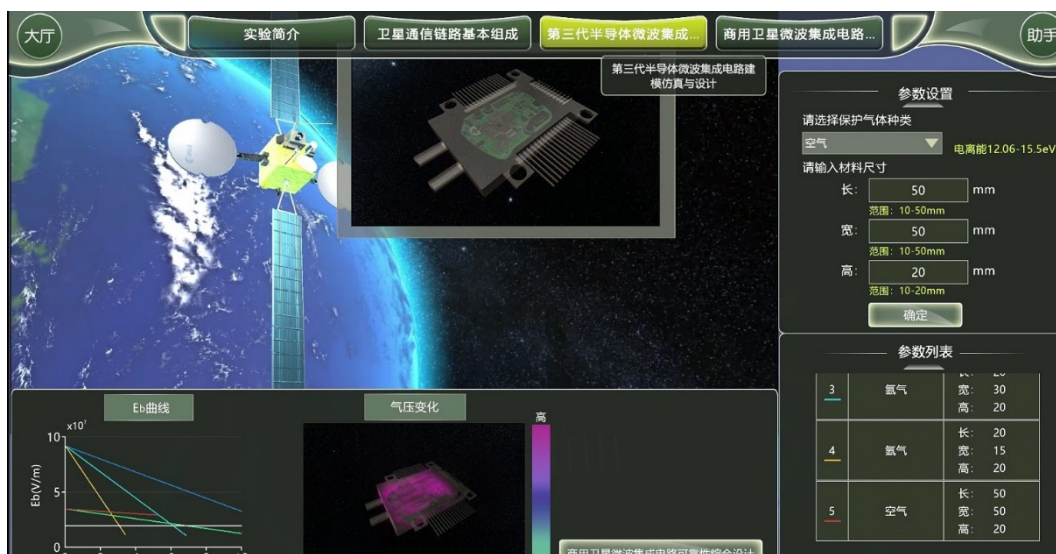


图 12 半导体封装尺寸对可靠性影响实验

实验界面的右侧上方为“参数设置”区，选择保护气体种类，并在界面所提示的参数取值范围内任意输入封装尺寸，观测器件内部气压和半导体集成电路的击穿阈值等参数随使用年限的变化趋势，掌握封装尺寸的设计对星载微波集成电路高可靠工作性能的影响规律。

步骤 15: 点击【商用卫星微波集成电路可靠性综合设计】按钮，首先进入“GaN 功率器件设计”实验环节。实验界面首页如图 13 所示。



图 13 功率设计任务类型选择界面

在实验界面中选择“设计任务类型”。有 2 种类型可供选择：基础版和进阶版，相对于普通版，进阶版设计时需要考虑极端环境带来的额外损耗。实验者选择设计任务类型后点击【确定】按钮进入下一环节。

步骤 16: 根据界面提示的北斗卫星的工作参数、地面接收机参数和通信链路参数等信息，合理计算 GaN 功率放大器的工作目标参数。若在步骤 16 中选择进阶版设计任务类型，则在“通信链路参数”中会包含“极端环境的额外损耗”这一参数，在计算功率放大器的设计功率时必须将其考虑进去。普通版设计任务类型中没有这项参数要求。实验界面如图 14 所示。



图 14 北斗卫星功率放大器功率参数设定界面

参数设定后点击【进入器件设计】按钮，系统自动判别参数的合理性。若目标参数设置不合理，则显示错误提示信息，需重新分析计算出合理的设计目标参数以通过实验系统的评估。三次输入错误后系统会给出正确结果，点击【进入器件设计】按钮，进入下一步骤。

步骤 17: 该实验环节实现 GaN 功率器件的结构与电路参数的设计。实验界面如图 15 所示。

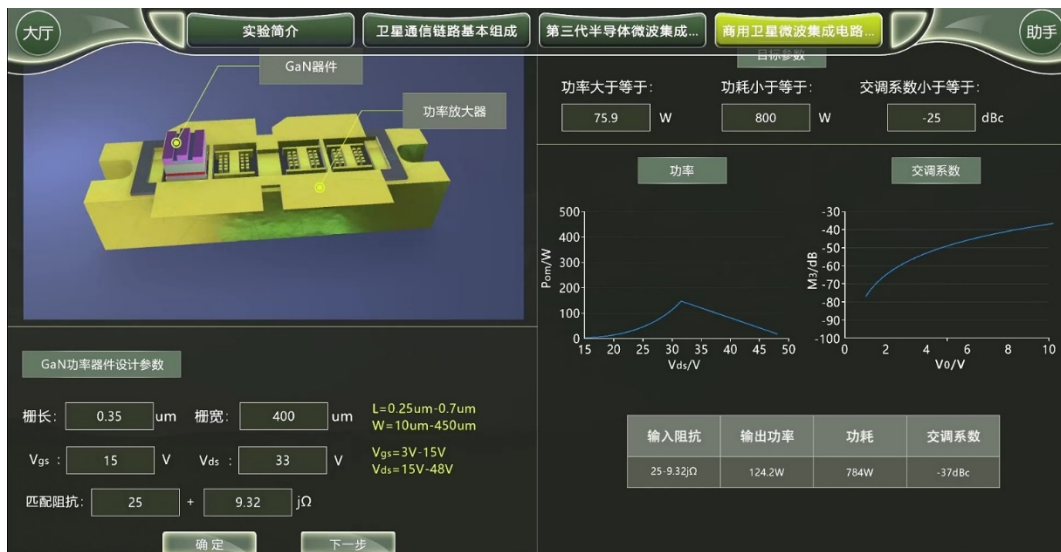


图 15 GaN 功率器件的设计界面

界面的右上方显示已设定的 GaN 功率放大器的工作目标参数，界面的左下方为 GaN 功率器件设计参数的输入区。根据在前一实验环节所掌握的 GaN 晶体管的结构参数、偏置参数、匹配阻抗参数等对 GaN 功率器件的输出功率和交调系数的影响规律，通过不断试探以确定满足设计目标的 GaN 功率器件设计参数。注意，每设置一组设计参数，均需点击【确定】按钮，此时系统通过计算，将 GaN 功率器件的输出功率曲线和交调系数曲线绘制在界面右侧，同时在下方的表格中输出设计结果。若输出的设计结果不满足目标设定，则重复以上工作，直至输出的设计结果满足目标设定，则点击【下一步】按钮，进入下一个实验子环节

步骤 18: 该实验环节根据空间辐照引起的半导体器件性能退化和气体泄漏引起的半导体器件低气压击穿现象，设计满足商用卫星高可靠性需求的半导体封装。实验界面如图 16 所示

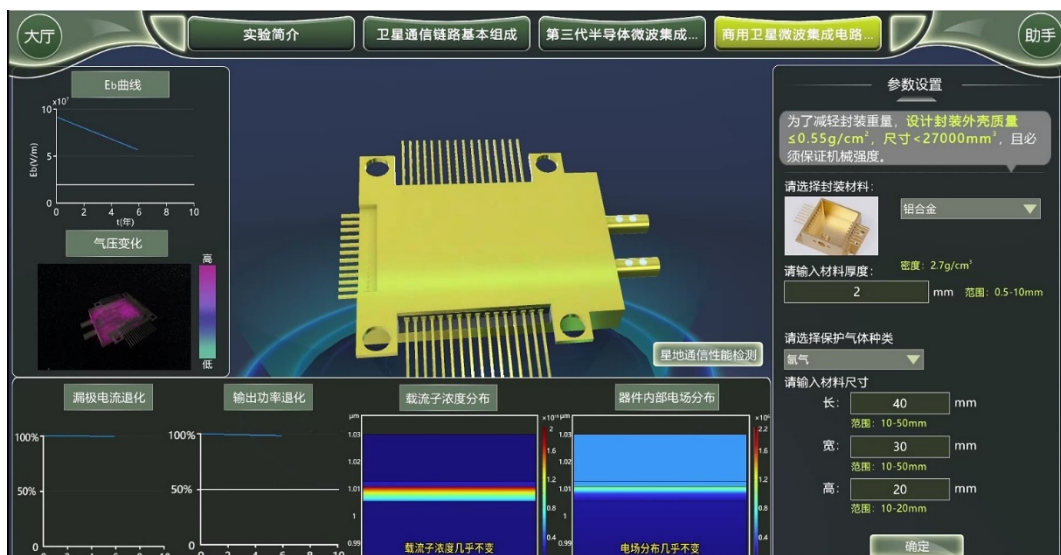


图 16 半导体集成电路封装设计界面

界面右侧为参数设置区。学生们根据在实验环节二中所掌握的星载环境对半导体集成电路长寿命、高可靠性的影响，合理设计半导体封装材料、尺寸和保护气体的种类。全部设计参量设置完毕后，点击【确定】按钮，系统自动测算该星载半导体集成电路的全寿命工作特性的演变，并在界面左侧和下方以曲线图或彩图的形式显示出来。同学们根据曲线图和彩图判断所设计的封装参数是否达到星载系统的低质量、高强度、高可靠性的设计要求。若不

足，则重复以上工作，直至设计方案符合设计要求。在此期间，若点击【重新实验】按钮，则所有设计参数都将删除，返回实验子环节 1，重新实验。

半导体封装设计完成后，点击【进入空间环境】按钮，进行下一步“方案优化”子环节。

步骤 19: 该实验环节是卫星通信性能测试环节，通过误码率、波形图等可视化形式实时呈现卫星通信性能，学生可以直观清晰地了解自己设计结果。实验界面显示如图 17 所示。

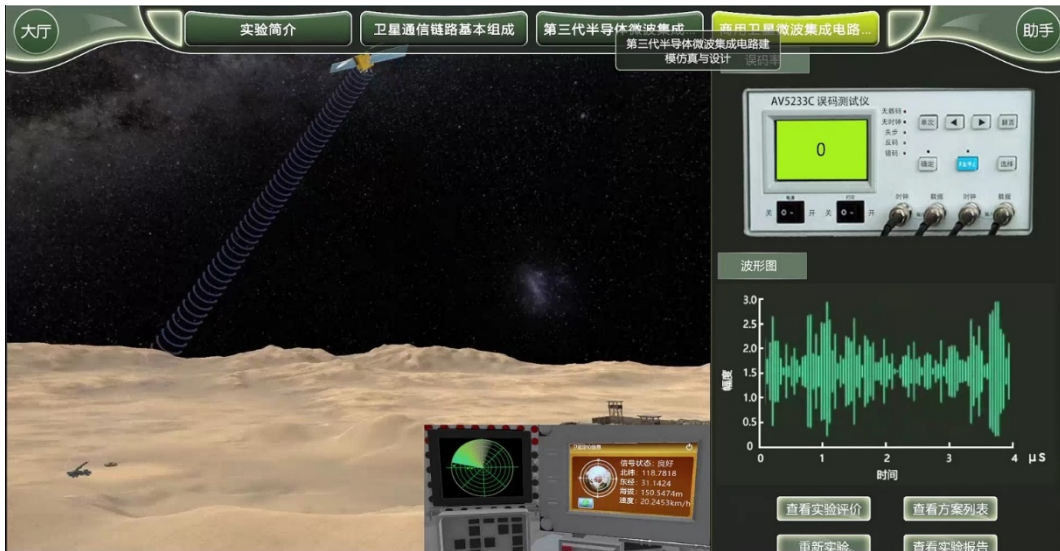


图 17 半导体集成电路误码率与波形图测试结果

动态显示结束后，点击【查看方案列表】，选取相应的方案，点击【方案详情】，弹出设计方案总结与评价对话框，如图 18 所示。



图 18 实验设计方案汇总与评价

该对话框总结显示所有的目标参数、设计参数、测量结果等信息，并且系统根据实验结果对实验者的设计方案给出客观的评价。实验者可以点击【重新实验】按钮，再次根据方案评价结果重新优化相关设计内容，直至获得满意评价结果。最后点击【提交】按钮，完成实验。