

# BOPPPS模型在研究生实验课程高功率微波测量中的应用研究

党方超, 孙云飞

国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2021年8月8日; 录用日期: 2021年10月6日; 发布日期: 2021年10月13日

---

## 摘要

文章将BOPPPS教学模型引入到研究生实验课程高功率微波测量的教学实践中, 首先阐述了高功率微波测量实验课程的教学内容, 然后从导入、目的、前测、参与式学习、后测、总结六个方面进行实验课堂教学设计, 通过互动式学习提高学员的学习热情与主动性。实践表明, 通过BOPPPS教学模型的引入, 学员的学习目标更加明确, 学习参与度更高, 主动性更强, 能更好地引导学生发散思维, 教学质量得到显著提高。

## 关键词

BOPPPS教学模型, 高功率微波, 微波测量

---

# The Application Research of the BOPPPS Instructional Model in High Power Microwave Measurement of the Graduate Experimental Course

Fangchao Dang, Yunfei Sun

College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha Hunan

Received: Aug. 8<sup>th</sup>, 2021; accepted: Oct. 6<sup>th</sup>, 2021; published: Oct. 13<sup>th</sup>, 2021

---

## Abstract

This paper introduces the BOPPPS instructional model into the teaching practice of the high power microwave measurement in the graduate experimental course. Firstly, the teaching content of high

power microwave measurement experimental course is described. Then, six pedagogical steps, including Bridge-in, Objective, Pre-assessment, participatory learning, Post-assessment and summary, are carefully designed. The enthusiasm and initiative of the students are improved through the interactive learning. The teaching practice shows that by introducing BOPPPS teaching model, the learning goal of the students is clearer, the learning participation is much enhanced, and the initiative is highly strengthened. Besides, it is also beneficial for the divergent thinking of students and the teaching quality has been greatly improved by introducing the BOPPPS instructional model.

## Keywords

BOPPPS Instructional Model, High Power Microwave, Microwave Measurement

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

高功率微波(High Power Microwave, HPM)通常是指功率大于 100 MW, 频率处于 1~300 GHz 之间的电磁波[1]。高功率微波在受控热核聚变、等离子体加热、空间功率传送、高功率雷达与定向能军事等领域具有广泛的应用前景[2]。作为高功率微波系统的最核心部件, 高功率微波源基于强流相对论电子束与高频结构本征模之间的能量交换而产生微波。目前, 高功率微波源的发展已取得了丰硕成果, 国际上涌现出一系列高功率微波源, 且大多已获得 GW 量级的输出微波[3] [4] [5], 其中输出功率最高者为美国海军实验室研制的 L 波段相对论速调管放大器, 实验输出功率高达 15 GW, 脉宽为 50~100 ns。

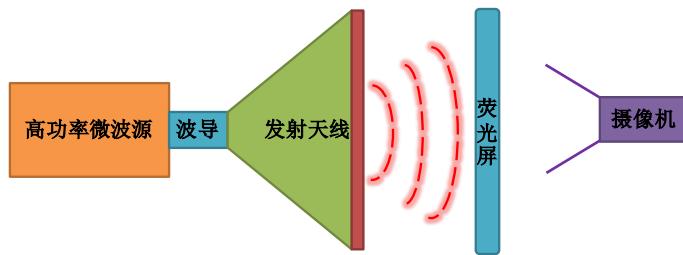
高功率微波领域的核心技术之一是输出微波参数的测量。当微波功率较低时, 传统的测量手段是采用功率计等仪器对微波功率进行直接测量, 当功率提高时, 一般采用衰减器、功率计组成的测量链路(有时也包含检波器), 首先通过衰减器对输出功率进行衰减, 然后通过功率计进行测量。然而, 这些方法均不适用于 GW 级高功率微波领域, 当微波功率达到 GW 量级时, 将绝大多数的衰减器、检波器发生射频击穿现象, 致使测量设备损坏, 在高功率微波器件研究的早期, 微波功率的准确测量一直是该领域的难点技术之一。目前, 随着测量技术的发展以及对高功率微波的认识加深, 高功率微波的测量精度已经明显提高, 其已纳入物理电子学专业研究生的实验课程。

BOPPPS 模型源于加拿大教师技能培训体系 ISW (Instructional Skills Workshop), 最初由温哥华大学的道格拉斯·克尔根据加拿大不列颠哥伦比亚省对教师资格认证的需要于 1976 年创建[6] [7] [8]。此学习模式能够很好地实现有效教学设计, 强调学生参与及反馈, 以学生为中心, 已经受到全球众多名校的青睐, 被证实能够促进学生积极参与课堂学习。本文将 BOPPPS 教学模型应用于研究生实验课程高功率微波测量, 以提高学员学习的积极性与主动性, 引导学生发散思维, 提高教学质量。

## 2. 高功率微波测量教学内容

### 2.1. 模式测量

通过荧光灯阵成像法与远场测量法对微波模式进行测量。荧光灯阵成像法是将荧光灯管阵列置于器件发射天线正前方并与天线口面相平行, 将摄像机放在屏蔽箱内, 利用荧光灯管阵在高功率微波辐射下, 其管内部惰性气体发生辉光放电的原理, 通过辉光的具体分布对辐射模式进行直观判定(如图 1 所示)。



**Figure 1.** Experimental setup of the microwave mode measurement by using the screen array imaging method

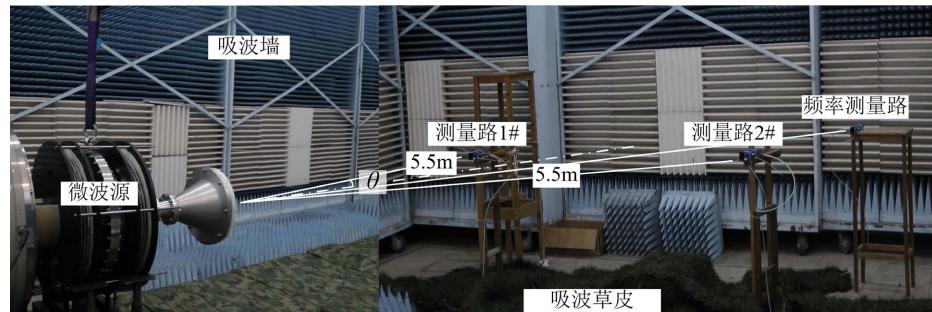
**图 1.** 荧光灯阵成像法测量微波模式的实验布局

远场测量法是指在器件天线辐射远场区域内，用天线接收辐射微波功率，依次经过耦合、衰减、检波等环节，构成测量链路，最终通过示波器对波形进行采集以测量微波参数，如图 2 所示。由于接收天线测量的仅是辐射微波的一小部分，因此可以大幅降低测量链路中的接收功率，从而避免射频击穿风险。将采用两个接收喇叭通过多次测量得到器件辐射功率的空间分布(见图 3)，微波实验过程中，固定一个接收天线(图中测量路 1#)在器件的最大辐射方向，另一接收天线(测量路 2#)则在实验中分别置于不同角度，然后将每次实验中接收天线 2#所测量到的微波功率密度用固定天线 1#所测量到的功率密度归一化，即可获得器件辐射微波归一化功率密度空间分布，即远场功率密度方向图，通过远场功率密度方向图即可以判断微波模式。



**Figure 2.** Composition of measurement link in far field measurement method

**图 2.** 远场测量法的测量链路组成



**Figure 3.** Experimental setup of the far field measurement method

**图 3.** 远场测量法的实验布局

## 2.2. 频率测量

采用高性能示波器直接对产生的微波频率进行测量。随着计算机软硬件技术的发展，示波器对采集的信号准确率逐渐提高。如图 4 所示为微波频率测量环节示意图，高功率微波经天线接收，并由固定衰减器衰减后直接通过微波电缆馈入示波器，示波器对信号进行 Fourier 分析，得到微波频率分布，同时可对微波信号进行时间 - 频谱分析。



**Figure 4.** Composition of frequency measurement link

**图 4.** 频率测量链路组成

### 2.3. 功率测量

在应用上述远场测量法测量、确定微波模式以后，采用球带积分法可以计算器件辐射微波功率  $P_{out}$ ，计算公式为

$$P_{out} = \sum_{i=1}^{N-1} \pi L^2 (p_i + p_{i+1}) \cdot (\cos \theta_i - \cos \theta_{i+1}) \quad (1)$$

其中， $L$  为接收天线 2#与辐射口中心的距离(单位 m)， $N$  为接收天线 2#的测量位置数， $\theta_i$  为辐射天线口面轴线与接收天线第  $i$  个测量位置之间的夹角， $p_i$  为第  $i$  个测量获得的微波功率密度(单位  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )， $p_i$  计算公式为

$$p_i = \frac{P_{hi}}{S_{eff}} \quad (2)$$

其中  $P_{hi}$  为接收天线第  $i$  次接收到的微波功率(单位 W)， $P_{hi}$  由示波器采集的检波信号幅值结合固定衰减器、晶体检波器、微波电缆等测量器件的衰减值计算； $S_{eff}$  为接收天线的有效面积(单位  $\text{m}^2$ )， $S_{eff}$  与增益  $G_a$  的关系为

$$S_{eff} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_a \quad (3)$$

最终可由公式(1)计算得到微波源的输出总功率。

## 3. BOPPPS 模型教学环节设计

高功率微波测量实验课程总共 90 分钟，理论讲解与实验操作为 40 分钟，剩余 50 分钟为学员实操环节。本文将分别从导入、目的、前测、参与式学习、后测、总结六个环节对高功率微波测量实验课程进行教学设计。

### 3.1. 引入

引入指进入课程内容前的引言或铺垫，是为了获得关注，建立与课堂学习的关联，帮助学生关注将要在课上出现的内容。为了挑起学员的学习兴趣，从高功率微波作为新概念定向能武器这一军事应用为导入，通过一小段视频展示国际上高功率微波武器的作战威力与作战效能，让学员首先了解到高功率微波重要应用。视频结束后，要求学员列举高功率微波武器的参数特点，比如输出功率、工作频率、微波脉宽等，强调这些参数是高功率微波系统的核心参数，决定武器系统的性能指标。然后，通过提问让学员思考常规低功率的微波参数是图和测量的，列举传统微波参数的测量方法。最后，启发学员思考，传统的微波参数测量方法如果直接应用到高功率微波领域会存在哪些问题。

高功率微波武器是一种新概念定向能武器，是高功率微波的一个重要应用方面，这一部分通过国际高功率微波武器的短视频将引起学员的较大的学习欲望与兴趣，将学员的注意力紧紧锁定在课堂；同时，通过启发学员对常规微波测量方法的思考，逐渐过渡到本课堂的学习内容，然后再次启发学员常规微波测量方法是否可以直接应用到高功率微波领域的思考，使学员存在疑问，带着求知欲望进行学习。

### 3.2. 目标

目标环节主要是让学员明确本次课程的学习目的，学习完成后达到什么样的目标。这次实验课程的主要包含两层：

- 1) 掌握高功率微波参数，包括辐射模式、微波频率、输出功率参数的实验测量步骤与测量方法。

2) 根据已有的高功率微波装置, 能够自己测量系统的输出微波功率和频率。

在正式开始学习内容之前, 明确本次课程的学习目标, 让学员围绕目标来学习, 聚焦核心问题, 提到学习效率。

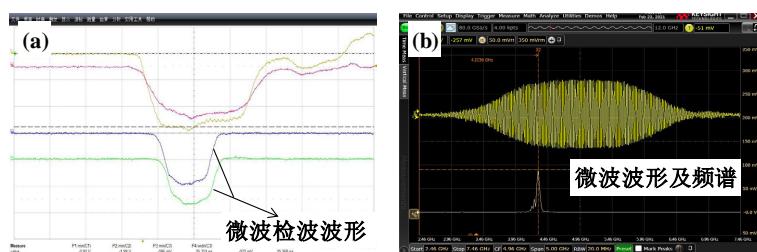
### 3.3. 前测

前测环节主要是了解学员预备知识掌握的情况, 学习本课程时可能面临的困难, 这时可以考虑采用提问或者小卡片的方式, 根据学员预备知识情况, 适时调整后续讲课难度与宽度。在这个环节, 也可以提前布置几道预习作业, 并在课堂上了解大家的预习效果。比如“高功率微波器件通常的输出功率范围是多少”、“高功率微波都有哪些应用”、“高功率微波器件都有哪些种类”。通过开放性的问题, 达到测试学生前期准备情况的目的。也可以针对实验中的具体操作进行提问, 如“测量链路中元器件的衰减值如何标定”, “接收天线应该如何摆放”等等, 从而检测学生解决实际问题的能力。

### 3.4. 参与式学习

参与式学习是 BOPPPS 教学模型的核心环节, 这一环节中, 老师将根据学员的掌握情况, 采用不同的方法让学员参与其中, 学员与老师之间、学员与学员之间进行充分的思想交流, 充分体现以学生为中心的教学思想。在高功率微波测量实验课中, 作为参与式学习的话题较多, 例如, 各个测量元器件的标定功能与标定方法、荧光屏发光图案代表的模式种类、多个衰减器连接的顺序、两路测量的角度分布等等。在讨论中, 充分启发学员对高功率微波每个测量环节的思考, 鼓励批判性思维, 鼓励学员提出更为合理精确的测量思路。

图 5 显示了以学员为主测量得到的微波频谱以及两路微波的检波波形, 通过学员自身的参与式学习加深对知识点的理解, 提高学习的主动性。



**Figure 5. Measured waveform and spectrum of the high power microwave**

**图 5. 测量得到的微波检波波形及频谱**

### 3.5. 后侧

后侧环节的主要目的是检验学员对本次课学习内容的掌握情况, 是检验学习效果的重要环节。合理的后侧设计不仅能够让学员对自己的学习状态和学习效果有准确而清醒的认识, 而且可以帮助老师改进教学内容与教学设计, 为后续教学提供指导。

对于高功率微波测量实验课程, 最好的后侧设计之一是让学员自己利用仪器设备对高功率微波器件输出微波的参数进行现场测量, 通过现场测量检验学员对测量步骤、测量方法以及测量细节的掌握情况, 为节约时间同时不失后侧目的, 可以采用分组的形式, 多个学员为一组, 协同合作, 完成测量过程。同时, 老师针对学员测量环节中的问题进行指导和纠正, 使学员再次加深理解。

此外, 后侧环节也可以采用提问的方式, 老师可以准备如下几个问题:

- 1) 两路测量角度的间隔与分布对微波功率测量的精度有何影响?

- 2) 如何微波源输出微波的模式不单一，远场方向图将会如何变化？
- 3) 同轴微波电缆的长度是否会对功率测量有影响？

### 3.6. 总结

实验完成后，首先总结本次实验课程的主要内容，其次，根据学员参与式学习以及后侧环节的学习情况，对容易引发的理解误区进行强调与纠正，最后，布置实验报告，让学员自己进行总结，增强学生们的总结归纳能力。

## 4. 总结

高功率微波测量是物理电子学专业的研究生实验课程，将 BOPPPS 模型引入到该课程的教学实践中，一方面可以让学员充分参与到学习讨论中，激发学员主动思考能力，培养学员的发散性思维，提高学员学习的热情与积极性，另一方面，通过后侧环节，有利于学员对自身学习效果的检验，老师也可以根据学员掌握知识的情况改进教学设计，有利于提高后续课程的学习效果。引入 BOPPPS 模型的高功率微波测量实验课已开课两次，时间表明，相比传统教学方式，BOPPPS 模型的引入显著提高了学员对学习知识的渴望以及学习的主动性和学习效果，后续将不断改进教学设计，进一步提高教学质量。

## 参考文献

- [1] Barker, R.J. and Schamiloglu, E. (2001) High-Power Microwave Sources and Technologies. Wiley-IEEE Press, Hoboken, 1-8. <https://doi.org/10.1109/9780470544877>
- [2] James Benford, John A. Swegle, Edi Schamiloglu. 高功率微波[M]. 第 2 版. 江伟华, 张弛, 译. 北京: 国防工业出版社, 2008: 2-12.
- [3] 周传明, 刘国治, 刘永贵, 等. 高功率微波[M]. 北京: 原子能出版社, 2007: 68-124.
- [4] Gold, S.H. and Nusinovich, G.S. (1997) Review of High-Power Microwave Source Research. *Review of Scientific Instruments*, **68**, 3945-.3974. <https://doi.org/10.1063/1.1148382>
- [5] Chang, C., Liu, G.Z., Tang, C.X., et al. (2011) Review of Recent Theories and Experiments for Improving High Power Microwave Window Breakdown Thresholds. *Phys. Plasmas*, **18**, Article ID: 055702. <https://doi.org/10.1063/1.3560599>
- [6] 朱莉, 高向军, 张厚, 王亚伟. BOPPPS 教学模式下“微波技术与天线”课程改革探索[J]. 创新教育研究, 2020, 8(6): 896-902. <https://doi.org/10.12677/CES.2020.86148>
- [7] 吴昌东, 江桦, 陈永强. BOPPPS 教学法在 MOOC 教学设计中的研究与应用[J]. 实验技术与管理, 2019(2): 218-222.
- [8] 曹丹平, 印兴耀. 加拿大 BOPPPS 教学模式及其对高等教育改革的启示[J]. 实验室研究与探索, 2016, 35(2): 196-200.