

学校编码: 10384

分类号_____ 密级 _____

学 号: 200336024

UDC _____

厦 门 大 学
硕 士 学 位 论 文

高压瓷介电容滤波器的可靠性研究

Reliabilities of High Voltage Feed Through
Ceramic Capacitors for EMI Applications

苏志国

指导教师姓名: 熊 兆 贤

专 业 名 称: 材 料 学

论文提交日期:

论文答辩日期: 2006 年 8 月 9 日

学位授予日期:

答辩委员会主席: 陈立富 教授

评 阅 人: _____

2006 年 8 月

厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文而产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

本论文实验采用以环氧树脂混合活性硅微粉和活性增韧剂为主剂，采用多种酸酐混合为固化剂，同时添加促进剂降低固化温度的环氧树脂灌封陶瓷电容器，制成高压瓷介电容滤波器（简称滤波器）。滤波器的制作过程经陶瓷烧结、印银、印锡、焊接、清洗等工序制成半成品，然后装配、灌封树脂、固化树脂和性能检测等。本论文探讨灌封环氧树脂中不同增韧剂及其配比、不同酸酐固化剂配比、不同无机填料对滤波器可靠性的影响，同时研究工艺参数对滤波器可靠性的影响，在现有实验条件下优化滤波器的制作工艺。实验表明灌封环氧树脂的力学性能和电学性能对滤波器可靠性的影响较大，增加灌封环氧树脂的柔韧性有助于提高滤波器的冷热冲击性能，添加活性增韧剂能增加灌封环氧树脂的柔韧性，但同时也降低灌封环氧树脂的绝缘电阻和耐湿性；活性硅微粉能提高灌封环氧树脂的悬浮性和柔韧性；采用差示扫描量热法（DSC）和红外光谱分析方法（IR），结合工艺实验，确定了灌封环氧树脂的固化工艺。

实验结果表明采用合适的原材料、化学配比和优化工艺，制作出的瓷介电容滤波器能同时满足冷热冲击、高温负荷、耐湿性等多项可靠性指标要求。

关键词：瓷介电容滤波器； 陶瓷电容器； 灌封环氧树脂

Abstract

Reliabilities of high voltage feed through ceramic capacitors, i.e., filters, are investigated in this paper, which are applied for electromagnetic interface, EMI, of microwave equipments at high-voltage, such as magnetic tube in microwave oven and engineering vehicle working at the frequency of 2450 MHz. The filters are produced by the procedures of ceramic sintering, silver paste printing, tin paste printing, assembly, soldering, cleaning, resin casting and curing, to become a finished product.

The experimental results show that the electric performances of the filters are different if they are cast with different kinds of epoxy resins. The reliabilities of the filters are systematically evaluated with thermal shock, damp heat, and endurance at high temperature. High reliabilities for the filters are obtained with optimal ceramic capacitor, epoxy resins, curing agent, additives and technical procedures. The flexible epoxy resins enhance the performance of heat shock. Additive of CMP-410 increase the flexibility of the epoxy resins, but decrease their volume resistivity in the same time. The mechanical and electrical properties of the epoxy resins cast with HGH are better than that cast with HG. In addition, the humidity performance of the filter is also improved by the addition of HGH. Meanwhile, the technical procedures have also important effects on the reliabilities of the filters.

Finally, the filters with excellent reliable performances are successfully developed.

Keywords: High voltage feed through ceramic capacitor; Epoxy resin; Ceramic capacitor

| | |
|-----------------------------------|-----------|
| 目 录 | |
| 第一章 绪 论 | 1 |
| 1.1 前 言..... | 1 |
| 1.1.1 电容器概况..... | 1 |
| 1.1.2 EMI 滤波器技术概况..... | 1 |
| 1.1.3 电磁干扰陶瓷滤波器概述..... | 3 |
| 1.1.4 磁控管的研究现状和发展..... | 4 |
| 1.2 瓷介电容滤波器的性能特点..... | 7 |
| 1.2.1 瓷介电容滤波器的常规性能..... | 8 |
| 1.2.2 瓷介电容滤波器的可靠性 | 8 |
| 1.3 瓷介电容滤波器可靠性的影响因素..... | 8 |
| 1.3.1 灌封环氧树脂的性能对滤波器可靠性的影响 | 9 |
| 1.3.2 陶瓷电容器对滤波器可靠性的影响 | 10 |
| 1.3.3 工艺参数对滤波器可靠性的影响 | 10 |
| 1.4 瓷介电容滤波器灌封用环氧树脂 | 11 |
| 1.4.1 灌封环氧树脂的概述 | 11 |
| 1.4.2 灌封环氧树脂的主要组成和作用 | 13 |
| 1.4.3 灌封环氧树脂的灌封工艺..... | 14 |
| 1.4.4 灌封环氧树脂的研究现状和发展趋势..... | 14 |
| 1.4.5 灌封环氧树脂的现存问题及解决措施..... | 15 |
| 1.5 粘接的基本原理..... | 17 |
| 1.5.1 固体表面的特征..... | 17 |
| 1.5.2 粘接过程的描述..... | 18 |
| 1.5.3 粘接理论的简况..... | 20 |
| 1.6 本论文研究目的及主要内容..... | 21 |
| 第二章 瓷介电容滤波器的制备工艺和表征测量..... | 22 |
| 2.1 制备瓷介电容滤波器的原材料及其仪器设备..... | 22 |

| | |
|--------------------------------|-----------|
| 2.1.1 制备瓷介电容滤波器的原材料 | 22 |
| 2.1.2 制备瓷介电容滤波器的仪器设备 | 23 |
| 2.2 瓷介电容滤波器的制备工艺 | 23 |
| 2.3 陶瓷电容器的表征和测试 | 25 |
| 2.3.1 陶瓷电容器的显微结构观察方法 | 25 |
| 2.3.2 介电温谱和介电频谱的测试方法 | 25 |
| 2.4 灌封用环氧树脂的表征和测试 | 25 |
| 2.4.1 差示扫描量热法 (DSC) | 25 |
| 2.4.2 红外光谱分析方法 (IR) | 26 |
| 2.4.3 显微结构观察方法 (SEM) | 26 |
| 2.4.4 力学性能测试方法 | 26 |
| 2.4.5 电气性能测试方法 | 26 |
| 2.4.6 邵氏硬度测试方法 | 26 |
| 2.4.7 粘度测试方法 | 26 |
| 2.5 瓷介电容滤波器的测试技术 | 27 |
| 2.5.1 常规性能测试技术 | 27 |
| 2.5.2 可靠性评价方法 | 27 |
| 第三章 不同配比对灌封环氧树脂性能的影响 | 28 |
| 3.1 不同活性增韧剂对灌封环氧树脂性能的影响 | 28 |
| 3.1.1 不同活性增韧剂对灌封环氧树脂力学性能的影响 | 29 |
| 3.1.2 不同活性增韧剂对灌封环氧树脂电气性能的影响 | 29 |
| 3.2 不同含量活性增韧剂对灌封环氧树脂性能的影响 | 31 |
| 3.2.1 不同含量活性增韧剂对灌封环氧树脂力学性能的影响 | 31 |
| 3.2.2 不同含量活性增韧剂对灌封环氧树脂电气性能的影响 | 31 |
| 3.2.3 灌封环氧树脂水煮前后的性能变化 | 33 |
| 3.3 PSPA 和其它酸酐固化剂对灌封环氧树脂性能的影响 | 34 |
| 3.3.1 不同含量 PSPA 对灌封环氧树脂力学性能的影响 | 34 |
| 3.3.2 不同含量 DDSA 对灌封环氧树脂粘度的影响 | 34 |
| 3.4 不同硅微粉对灌封环氧树脂性能的影响 | 35 |

| | |
|---|-----------|
| 3.4.1 普通和活性硅微粉悬浮性能的比较..... | 35 |
| 3.4.2 添加普通和活性硅微粉的灌封环氧树脂力学性能的比较..... | 36 |
| 3.4.3 添加普通和活性硅微粉的灌封环氧树脂耐湿性的比较..... | 37 |
| 3.5 自制与外购灌封环氧树脂的性能比较..... | 38 |
| 3.5.1 自制与外购灌封环氧树脂的力学性能比较..... | 38 |
| 3.5.2 自制与外购灌封环氧树脂的电气性能比较..... | 38 |
| 3.6 自制灌封环氧树脂的固化..... | 40 |
| 3.6.1 自制灌封环氧树脂的 DSC 分析..... | 40 |
| 3.6.2 自制灌封环氧树脂的 IR 分析..... | 42 |
| 3.7 自制灌封环氧树脂的贮存性能..... | 43 |
| 3.8 本章小结..... | 44 |
| 第四章 不同树脂对比对瓷介电容滤波器可靠性的影响 | 45 |
| 4.1 瓷介电容滤波器的性能结果..... | 45 |
| 4.1.1 瓷介电容滤波器的结构..... | 45 |
| 4.1.2 陶瓷电容器的性能..... | 46 |
| 4.1.3 瓷介电容滤波器的性能..... | 47 |
| 4.2 不同活性增韧剂对滤波器可靠性的影响..... | 49 |
| 4.3 活性增韧剂含量对滤波器可靠性的影响..... | 52 |
| 4.4 PSPA 固化剂含量对滤波器可靠性的影响..... | 57 |
| 4.5 普通和活性硅微粉对滤波器可靠性的影响..... | 57 |
| 4.6 分别灌封自制树脂与外购树脂的滤波器性能比较..... | 59 |
| 4.7 灌封自制树脂的滤波器贮存性能..... | 60 |
| 4.8 灌封环氧树脂配比的改变对滤波器可靠性的影响机理初探..... | 62 |
| 4.9 本章小结..... | 63 |
| 第五章 瓷介电容滤波器的工艺参数对滤波器可靠性的影响..... | 64 |
| 5.1 陶瓷电容器的清洗处理对滤波器可靠性的影响..... | 64 |
| 5.2 半成品的预热处理对滤波器可靠性的影响..... | 66 |
| 5.3 半成品灌封树脂后的抽真空处理对滤波器可靠性的影响..... | 66 |

| | |
|------------------------|----|
| 5.4 滤波器可靠性的影响因素综合..... | 67 |
| 5.5 本章小结..... | 68 |
| 结 论..... | 69 |
| 参考文献..... | 70 |
| 致 谢..... | 72 |

厦门大学博硕士论文摘要库

Contents

| | |
|--|-----------|
| Chapter 1 Preface..... | 1 |
| 1.1 Introduction..... | 1 |
| 1.1.1 Introduction to Capacitor..... | 1 |
| 1.1.2 Introduction to EMI Applications..... | 1 |
| 1.1.3 Introduction to Ceramic Capacitor for EMI Applications..... | 3 |
| 1.1.4 Research and Development of Magnetic Tube..... | 4 |
| 1.2 Structure and Performances of the Filter..... | 7 |
| 1.2.1 General Performances of the Filter..... | 8 |
| 1.2.2 Reliable Performances of the Filter..... | 8 |
| 1.3 Factors on Reliabilities of the Filter..... | 8 |
| 1.3.1 Effect of Casting Epoxy Resins on Reliable Performances of the Filter..... | 9 |
| 1.3.2 Effect of Ceramic Capacitor on Reliable Performances of the Filter..... | 10 |
| 1.3.3 Effect of Technical Procedures on Reliable Performances of the Filter..... | 10 |
| 1.4 Epoxy resins for the Casting of the Filter..... | 11 |
| 1.4.1 Introduction of Casting Epoxy Resins..... | 11 |
| 1.4.2 Main Elements and Performances of Casting Epoxy Resins..... | 13 |
| 1.4.3 Casting Technologies of Casting Epoxy Resins..... | 14 |
| 1.4.4 Development Trend of Casting Epoxy Resins..... | 14 |
| 1.4.5 Problems and Settling of Casting Epoxy Resins..... | 15 |
| 1.5 Basic theories of Adherence..... | 17 |
| 1.5.1 Surface character of Ceramic Capacitor..... | 17 |
| 1.5.2 Adhesive Process..... | 18 |
| 1.5.3 Adhesive Theories..... | 20 |
| 1.6 Motivation and Plan of the Thesis..... | 21 |
| | |
| Chapter 2 Preparation and Characterization of the Filter..... | 22 |
| | |
| 2.1 Raw Materials and Instruments..... | 22 |
| 2.1.1 Raw Materials..... | 22 |

| | |
|---|-----------|
| 2.1.2 Preparation and Measurement Instruments of the Filter..... | 23 |
| 2.2 Preparation Procedures of the Filter..... | 23 |
| 2.3 Characterizations and Measurements of Ceramic Capacitor..... | 25 |
| 2.3.1 Microstructure Analysis of Ceramic Capacitor..... | 25 |
| 2.3.2 Temperature Dependence and Frequency Dependence..... | 25 |
| 2.4 Characterizations and Tests of Casting Epoxy Resins..... | 25 |
| 2.4.1 DSC Analysis..... | 25 |
| 2.4.2 IR Analysis..... | 26 |
| 2.4.3 SEM Microstructure Observation..... | 26 |
| 2.4.4 Mechanic Performance Tests..... | 26 |
| 2.4.5 Electric Performance Tests..... | 26 |
| 2.4.6 Hardness Tests..... | 26 |
| 2.4.7 Viscosity Tests..... | 26 |
| 2.5 Evaluations of the Filter..... | 27 |
| 2.5.1 Evaluations of General Performances..... | 27 |
| 2.5.2 Evaluations of Reliable Performances..... | 27 |
| Chapter 3 The Composition and Performances of Casting Epoxy Resins..... | 28 |
| 3.1 Active Toughening Agent and Performances of Casting Epoxy Resins.... | 28 |
| 3.2 Different Proportional Active Toughening Agent and Performances of Casting Epoxy Resins..... | 31 |
| 3.3 Influence of PSPA Agent and other Curing Agent on Performances of Casting Epoxy Resins..... | 34 |
| 3.4 Different kinds of SiO₂ and Performances of Casting Epoxy Resins..... | 35 |
| 3.5 Comparison between Self-producing Casting Epoxy Resins and Outsourcing Casting Epoxy Resins..... | 38 |
| 3.6 Curing of Casting Epoxy Resins..... | 40 |
| 3.7 Aging of Self-producing Casting Epoxy Resins..... | 43 |
| 3.8 Summary of this Chapter..... | 44 |
| Chapter 4 Different Compositional Resins and Reliabilities of the Filter..... | 45 |
| 4.1 Performances of the Filter..... | 45 |
| 4.2 Different Kinds of Active Toughening Agent and Reliabilities | |

| | |
|---|-----------|
| of the Filter..... | 49 |
| 4.3 Different Amount of Active Toughening Agent and Reliabilities of the Filter..... | 52 |
| 4.4 Different Amount of PSPA Agent and Reliable Performances of the Filter..... | 57 |
| 4.5 Different kinds of SiO ₂ and Reliabilities of the Filter..... | 57 |
| 4.6 Different kinds of Casting Epoxy Resins and Reliabilities of the Filter..... | 59 |
| 4.7 Aging of the Filter..... | 60 |
| 4.8 Influence Mechanism of Different Amount of Casting Epoxy Resins on Reliable Performances of the Filter..... | 62 |
| 4.9 Summary of this Chapter..... | 63 |
| Chapter 5 Technical Procedures and Reliable Performances of the Filter..... | 64 |
| 5.1 Cleaning Ceramic Capacitor and Reliable Performances of the Filter..... | 64 |
| 5.2 Preheating Semi-manufactured Goods and Reliable Performances of the Filter..... | 66 |
| 5.3 Vacuum Level and Reliable Performances of the Filter..... | 66 |
| 5.4 Influence Factors on Reliable Performances of the Filter..... | 67 |
| 5.5 Summary of this Chapter..... | 68 |
| Conclusions..... | 69 |
| References..... | 70 |
| Acknowledgements..... | 72 |

第一章 绪论

1.1 前言

1.1.1 电容器概况

电容器是电子设备中大量使用的主要元件之一，无论是在工农业、国防、科学研究，还是在日常生活中，都有着广泛的应用，电容器也是目前使用最广、用量最大且不可取代的电子元件，其产量约占电子元件的 40%。因此，早在十九世纪，人们就开始了对它的研究，先后出现了各种材料作为介质的电容器。例如，低介电容器云母电容器、电解电容器和陶瓷电容器等。在这众多的电容器中，陶瓷电容器占据了越来越重要的地位。陶瓷电容器不仅可以耐高温、耐腐蚀，而且具有较高的介电常数，这对当前集成电路对电容器小型化、高容量的要求是很适宜的^[1]。

陶瓷电容器一般是指介电系数大于 12 的陶瓷电容。对于电容器而言，最主要的电性能参数指标是电容量、电容量的温度系数、损耗角、绝缘电阻以及工作电压等。交流瓷介电容器是通讯、计算机、彩色电视、DVD、各种开关电源及许多电子仪器中不可缺少的电子元件，应用在耦合、跨接及旁路电路中，是陶瓷电容器中技术难度最大、性能要求最严的电容器。耐电压水平是衡量交流陶瓷电容器性能的重要指标，由于此类电容的失效，直接涉及到整机的安全性以及人身安全，因此它被列为需要安全认证的电子元件之一^[2]。

1.1.2 EMI 滤波器技术概况

随着国际上对人体健康保护水平的提高，抑制家用电容的电磁干扰（EMI）的要求越来越高。人类生活在特定的电磁环境中，任何地方均存在电磁干扰。对工业、民用的大部分电力、电子设备而言，雷电是主要的电磁波干扰源；而人为干扰源就来源于那些平均工作频率都在 10kHz 到 1 GHz 之间的微细半导体元件上^[3]。换言之，它是一种由任一电路人为形成电磁现象或自然致发的不良干扰以及整个电子机器性能变劣，或是电子设备整机不能工作所直接或间接产生的一种

干扰。随着电子电路及电子技术在家庭、工业、交通、国防等领域日益广泛的应用，这些人为的电磁波干扰逐渐成为一大环境污染问题。目前，许多电子设备和系统能否在应用现场正常运行，很大程度上取决于自身抗 EMI 的水平。

随着开关电源类数字电路的普及和发展，电子设备辐射和泄漏的电磁波不仅严重干扰其他电子设备的正常工作，导致设备功能紊乱、传输错误、控制失灵，而且威胁着人类的健康与安全，已成为一种无形污染，并不逊色于水、空气、噪声等有形污染的危害。因此，降低电子设备的电磁干扰 (Electromagnetic Interference, 简称为 EMI) 已成为世界电子行业关注的问题。在电子设备及电子产品中，电磁干扰能量可通过辐射性耦合或传导性耦合进行传输。在抗电磁干扰的辐射危害方面，屏蔽是最好的措施。在抑制 EMI 信号的传导干扰方面，EMI 滤波器是极有效的器件。

近年来，随着大功率电力电子器件的发展，电力电子装置在国民经济和国防建设的诸多领域应用越来越广泛，在对电力电子技术的研究中，人们普遍遇到的一个技术难题就是传导干扰问题。传导干扰主要包括设备信号线传导干扰、接地线共地阻抗干扰以及电源线传导干扰，其中电源线传导干扰的抑制非常重要而又最为薄弱。据 IBM 公司的长期观察统计表明：严重威胁电子、电气设备安全可靠工作的起因中，88.5%是来自电源中的电压瞬变和电磁脉冲。同时，由于电源线 EMI 信号具有幅度大、频谱宽的特点，而且其中夹杂大量的瞬态过电压和浪涌大电流，这些因素使电源线传导干扰的抑制较难控制。

电磁干扰 (EMI) 是通过辐射或传输出入于电子设备的各种电信号。这种电信号影响设备的正常运行，甚至使设备内部的元器件遭到破坏。它覆盖整个电磁频率范围，从直流到视频，性质上可以是连续的或间歇的。连续的 EMI 噪声源包括车辆的点火装置，无线电广播，电视发射机，电机，计算机时钟脉冲振荡器超声设备和微波器件等，间歇噪声产生于静电放电、闪电、感应负载 (如焊接机或电机等) 的开与关，射频 (RF) 加热及烧焊设备等。可用两种基本的技术对噪声进行抑制或减弱：屏蔽和滤波。在屏蔽技术中，整个设备被密闭在一个金属或已金属化的塑料壳中，此壳与地联通。在滤波过程中，向已屏蔽设备的进出线 (包括输入/输出信号线和电源线) 进行滤波。滤波和屏蔽常组合采用，以优化线路。滤波效果极大地依赖于实际电源与负载的阻抗，因而应根据电源与负载的阻抗情况来

选择滤波元件和电路。

1.1.3 电磁干扰陶瓷滤波器概述

作为抗电磁干扰的三大技术屏蔽、接地、滤波之一的滤波技术是目前抑制电磁干扰最有效也是最经济的手段^[4]。它是根据信号及噪声频率分布范围，将相应滤去或尽可能衰减噪声，达到提高信噪比，抑制干扰的目的。其运用方式也非常简单，在设备入口处插入抗 EMI 滤波器(EMIF)，滤波器将给予电磁干扰充分的抑制，换言之，它既能抑制电路内部产生的电磁干扰，又能抑制外界传入的电磁干扰^[5]。

滤波器分为单元滤波器

(1) 单元滤波器

电容器的电抗可表示为： $X_C = 1/2\pi fC$ 。随频率增高，电容器表现出其支路越来越低的阻抗通路，许多电信号通过电容器分流至地。

电感器的交流电抗表示为： $X_L = 2\pi fL$ 。感抗(X_L)是串联电阻的交流模拟量，随频率和电感值的增加而增大。

单个电容器或电感器都可用于抗干扰，其衰减程度约为 20dB/+倍频。电源阻抗和负载阻抗都较高的线路，适于采用电容器作滤波元件，电源阻抗及负载阻抗皆低的线路适于采用电感器。

多层陶瓷电容器(独石)由陶瓷与金属层交替的夹层共同烧结而成，相当于多个电容器的并联，因此具有很大的容积率(在一个小的封装内具有较高的电容量)，也是作 EMI 滤波器的理想器件，并且适于表面安装。

(2) 双元滤波器

为更有效地滤波，采用两元件 LC 滤波器。此装置为 L 型滤波器，电路中电容器与电感器垂直联接，其插入损耗约 40dB/+倍频。在 L 型滤波电路中，电容器接线路中的阻抗高端，电感器接阻抗低端。

(3) 三元滤波器

三元滤波器有 π 型与 T 型两种电路形式，都为对称的设计，都提供约 60dB/+倍频的衰减。电路选用时，仍然遵循电容器接高阻抗端；电感器接低阻抗端的原则。

4) 多元滤波器

滤波线路中, 多个元件进行组合时, 每增加一个元件(一元), 滤波器的插入损耗增加 20dB/+倍频。当然, 当电容器的内电感和电阻以及电感器的串联电阻和电容产生自限效应时, 将保持衰减值的上限。衰减程度取决于滤波器元件的复杂程度及各元件值^[6]。

1.1.4 磁控管的研究现状和发展

磁控管的特点是输出的功率大, 效率高, 工作电压低(相对于线形注微波管来说), 体积小, 重量轻, 成本低。磁控管是微波电子管中应用十分广泛的一种大功率器件。在速调管、行波管和其他微波源出现之前, 它是发明最早的微波源, 目前, 它仍然是效率最高的微波电子管。磁控管的发明, 与电话、留声机的发明一样, 是一重大技术进步, 其主要标志就是在第二次世界大战期间雷达上的成功应用。同时, 磁控管的研究和发展导致了多种正交场微波电子器件的出现, 如电压调谐磁控管、泊管、同轴磁控管、M型前向波和后向波磁控管放大器等磁控型微波电子器件, 构成了微波电子器件的一大领域。

磁控管的雏型早在 20 年代初期就已产生, 但是直到 30 年代末和 40 年代初才得到发展。尤其是在第二次世界大战期间, 由于雷达技术上的需求, 磁控管的实验和理论研究工作得到蓬勃开展。为了提高频率稳定度, 在普通磁控管的基础上设计出同轴磁控管, 在更短的波长又发展了反同轴磁控管。电压调谐磁控管(VTM)可实现在很宽的电子调谐范围, 且功率输出的平稳度和效率都超过了 O 型返波管^[7]。

60 年代, 微波半导体器件出现并快速发展, 人们进行大量的研究和努力, 试图制造出大功率的微波半导体器件来取代传统的微波电真空器件, 但频率和功率性能一直未能达到预期的目标。实践证明, 从输出功率、效率和可靠性的观点考虑, 当前的微波半导体器件是难以胜任的。在今后相当长的一段时期内, 磁控管仍将在大功率和高频率应用中继续充当主要角色。

70 年代, 磁控管向着更高功率的方向发展。“相对论腔磁控管(relativistic cavity magnetron)”问世, 并获得了 900 MW 的脉冲输出功率。美国和俄罗斯在此领域处于国际领先水平。

目前, 磁控管的应用范围已从雷达、导弹、导航、电子干扰系统等军用领域

扩展至通信、制导、计量学、防撞雷达、高能粒子加速器、气象雷达、工业加热、医疗、食品工业乃至家庭炉灶等民用领域。

磁控管在民用领域的最为人们所熟知的应用是在家用微波炉上。世界上微波炉磁控管每年的产量在一亿只左右，以日本为例，微波炉磁控管年产值就达 13 亿日元(约 1.1×10^8 \$)。激烈的竞争使得微波炉磁控管技术得到不断发展，寿命大大提高而成本大大降低。用于工业加热的连续波磁控管单管的输出功率不断提高，最大输出功率已达到 100kW^[8]。

近十年来，大功率磁控管以及其他微波管技术的发展。在现代军事电子装备中日益显示出不可取代的作用。早在 1990 年，美国国防部电子器件领导小组的研究报告中提出要从“国家安全的忧虑”考虑发展真空电子器件，因为半导体材料已接近它的极限，而微波真空电子器件在频率和功率方面的增长潜力是显而易见的。当时，美国国防部主持召开的微波管会议的主题就是：面向 21 世纪的器件——微波真空电子器件是重要的军事电子器件。1991 年，美国国防部就投资 3.6×10^8 \$用于发展微波管的 5 年计划，而后，还投资 1.0×10^8 \$给美国海军实验室发展新型微波电真空器件。海湾战争后，美国加速这一计划的实施。斯坦福研究所(SRI)、MIT 林肯实验室、雷锡思公司、乔治亚理工学院(GIT)等 7 家公司和研究机构开始重点研究。这些都说明了微波器件在当今军事部门应用得到高度重视。

目前，有关磁控管的理论研究及应用研究引起了许多学者的广泛兴趣。1995 年 8 月，在美国主办了首届国际交叉场器件的专业研讨会。会议论文内容涉及磁控管与超低噪声交叉场放大器，还报道了磁控管用于注入锁相磁控管阵列，无线电定位，固态油的溶化，微波 CVD 钻石沉积，化学合成，废料销毁以及磁控管在食品工业、橡胶和铸造业的应用研究。磁控管还被应用于放射医疗设备的线性加速器(作为 RF 功率源)。美国利用磁控管制作成放大器阵列，进行试验用空间太阳能卫星(SPS)向地面传输电能研究，并建立了专门的科研机构从事这项研究^[9]。

磁控管在工业、科学和医学(IMS)研究中的应用日益广泛，应用领域不断扩大。研究的重点为应用计算机模拟技术和数值计算方法，进一步实现高效率，低成本和长寿命的最佳设计。通过计算机模拟，不断改进理论预测，使得磁控管的理论更加完善，从而更好地深入了解磁控管的工作原理而进行最佳化可靠设计。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库