

分类号_____

学号 M200972904_____

学校代码 10487_____

密级_____

华中科技大学

硕士学位论文

高功率射频板条 CO₂ 激光器
的电磁辐射研究

学位申请人： 张 本

学 科 专 业： 光电信息工程

指 导 教 师： 秦应雄 副教授

答 辩 日 期： 2012.01.04

**A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering**

**Study on Electromagnetic Radiation of High
Power Radiofrequency Slab CO₂ Laser**

Candidate: Zhang Ben

**Major: Optoelectronic Information
Engineering**

Supervisor: Asso. Prof. Qin Yingxiong

Huazhong University of Science & Technology

Wuhan 430074, P. R. China

December, 2011

独创性声明

本人声明所呈交的学位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，除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权华中科技大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐， 在 _____ 年解密后适用本授权书。

本论文属于 不保密 ☐。

（请在以上方框内打“√”）

学位论文作者签名：

指导教师签名：

日期： 年 月 日

日期： 年 月

摘要

高功率射频板条 CO₂ 激光器的射频电源工作时所产生的射频电磁波会泄露到空气中形成空间射频辐射，也会在其发生电路中传导形成传导干扰。本文对高功率射频板条 CO₂ 激光器的电磁辐射进行了系统的研究。

(1) 通过分析高功率射频板条 CO₂ 激光器和射频电源的基本结构和工作原理，探讨了空间射频辐射和传导干扰的来源。选择 TES-92 电磁辐射检测仪，采用“简易点测法”对板条激光器进行电磁辐射检测。检测位置有小孔、缝隙、激光器周围空间。检测结果：近场空间的电磁辐射强度在 2W/m^2 左右，小孔和局部缝隙则超过了 99.99W/m^2 。

(2) 抑制电磁辐射最为有效的方法是屏蔽和接地。使用厚度为 3.8mm 的铜壳体将其屏蔽，空间电磁辐射强度下降到 0.15W/m^2 ；激光头透视窗口采用铜网进行屏蔽，屏蔽后的电磁辐射强度下降到 5W/m^2 左右；激光器工作电路板受到射频辐射的强烈干扰，使用厚度为 2.8mm 的铝壳体进行防护；射频板条激光器整机使用厚度达 5mm 的钢板进行屏蔽，最终电磁辐射值为 0.04W/m^2 。

(3) 抑制传导干扰的最佳方法是滤波。传导干扰路径包括屏极高压供电电路、灯丝大电流供电电路、栅极脉冲调制信号驱动电路。根据三个电路的具体参数，分别设计了衰减抑制比达 55dB、40dB、30dB 的 LC 低通滤波器，滤波器件则采用穿心电容、Ni-Zn 铁氧体、空心线圈电感。

最终，通过电磁屏蔽和滤波技术，有效解决了高功率射频板条 CO₂ 激光器存在的射频空间辐射和传导干扰问题，对高功率射频板条 CO₂ 激光器的工程化和产业化具有重要的应用意义。

关键词：射频板条 CO₂ 激光器 射频电源 电磁辐射 电磁屏蔽
传导干扰 射频低通滤波器

ABSTRACT

When RF power supply of high power RF excited slab CO₂ laser works, it also brings RF electromagnetic radiation because of the leakage of RF electromagnetic wave into the air and forms conductive interference in the power circuit. The electromagnetic radiation of high power RF excited slab CO₂ laser is systematically researched in this thesis.

(1) The space RF electromagnetic radiation and conductive interference was discussed on the basis of analysis of the principle and basic structure of high power RF excited slab CO₂ laser. TES-92 electromagnetic radiation detector was selected to detect electromagnetic radiation of slab laser by the method of “simple point measurement” in the area of holes, cracks, etc. Test results implied that the intensity of electromagnetic radiation in near-field in space was 2W/m², and around holes and cracks was more than 99.99W/m².

(2) Shielding and grounding was the most effective method to prevent electromagnetic radiation. A copper shell 3.8mm thick, could low the space electromagnetic radiation down to 0.15W/m² by the way of shielding high power RF power supply. After shielding the perspective window in the laser head with a copper network, electromagnetic radiation intensity was 5W/m². The circuit board of, which was interfered by strong radiation, could be protected by an aluminum shell 2.8mm thick; the final value of electromagnetic radiation was 0.04W/m² when covered the whole body of RF slab laser with a steel plate 5mm thick.

(3) Filtering was the best way to suppress conductive interference. The path of conductive interference included the high voltage power supply circuit, filament-current supply circuit, the gate pulse modulated signal drive circuit. The attenuation rejection ratio of 55dB, 40dB, 30dB of LC low-pass filters was designed according to specific parameters of three circuits, using the feed through capacitor, Ni-Zn ferrite and air-wound coil.

Eventually, the electromagnetic radiation and conductive interference of high power RF excited slab CO₂ laser was effectively resolved by shielding and filtering techniques. It has an important significance for the industrial engineering of high-power RF slab CO₂ lasers.

华 中 科 技 大 学 硕 士 学 位 论 文

Key words: Radio frequency excited slab CO₂ laser Radio frequency power supply
Electromagnetic radiation Electromagnetic shielding
Conductive interference Radio frequency low-pass filter

华中科技大学硕士学位论文

目 录

摘 要	(I)
ABSTRACT	(II)
绪论	
1.1 高功率射频板条 CO ₂ 激光器	(1)
1.2 射频电磁辐射污染	(4)
1.3 本文的主要内容和意义	(5)
2 激光射频电源的电磁辐射	
2.1 射频板条 CO ₂ 激光器的基本结构	(7)
2.2 激光射频电源的工作原理	(8)
2.3 激光射频电源的电磁辐射干扰分析	(9)
2.4 本章小结	(11)
3 射频电磁辐射检测	
3.1 射频辐射的检测方法	(12)
3.2 电磁辐射的测量	(13)
3.3 本章小结	(18)
4 射频电磁辐射的屏蔽	
4.1 射频电磁屏蔽原理	(19)
4.2 高功率射频电源的电磁屏蔽	(20)

华中科技大学硕士学位论文

4.3	透视窗口的电磁屏蔽	(23)
4.4	电路板的防护	(23)
4.5	整机屏蔽	(24)
4.6	射频防辐射服	(26)
4.7	本章小结	(26)
5	射频低通滤波器的设计	
5.1	射频低通滤波器的设计与仿真	(28)
5.2	射频滤波电容器的选择	(33)
5.3	射频滤波电感的设计	(36)
5.4	铁氧体磁芯实验	(41)
5.5	本章小结	(46)
6	总结和展望	
6.1	总结	(47)
6.2	展望	(47)
	致谢	(49)
	参考文献	(50)

绪论

射频激励技术是高功率射频板条 CO₂ 激光器上的核心技术。射频电源作为板条激光器的激励源，潜在的射频电磁波泄露问题值得注意。本章主要综述了高功率射频板条 CO₂ 激光器国内外的发展现状，尤其是射频电源的主要类型及特点，并综述了射频电磁辐射污染的危害。

1.1 高功率射频板条 CO₂ 激光器

射频板条 CO₂ 激光器由于射频激励技术的独特应用，使其具有非常好的优点从而被广泛应用于工业加工。

1.1.1 射频板条 CO₂ 激光器的特点和发展

射频板条 CO₂ 激光器的出现满足了新世纪 CO₂ 气体激光器发展的需求^[1]，它具有一系列的优点^[2]：射频电磁波可以通过频率可达 100kHz 的脉冲信号进行调制，从而使板条激光器能够工作既可以工作在脉冲模式，同时也可以工作在连续模式；射频激励气体放电只有几百伏、具有正向伏安特性、可持续放电，有利于提高器件寿命；可实现大面积均匀放电激励，因此可按增益面积比例缩放以提高器件的输出功率，使大功率激光器件体积大为缩小。

正是因为拥有如此独特的优点，使得射频激励 CO₂ 激光器技术得到了长足的发展^[3~11]：射频激励放电结构逐渐由封离波导结构，到全金属结构，再到波导阵列技术，最后到扩散冷却二维波导阵列结构，“大面积放大技术”的出现，谐振腔结构则逐渐发展到环形非稳腔。由此可见，不变的是射频激励技术与激光器相结合的应用，不断改变的是与射频激励相匹配的放电结构和谐振腔结构在不断涌现。经过二十几年的发展，国外高功率射频激励板条 CO₂ 激光器技术已经非常成熟，均采用单波导、单扩散冷却板条放电结构，实现了大规模产业化，中小功率射频板条 CO₂ 激光器被美国垄断，千瓦级射频板条激光器被德国所垄断。德国 ROFIN 公司是世界领先的激光器生产制造商，它所生产的 DC 系列扩散冷却板条 CO₂ 激光器在全球具有领先地位，如图 1-1 所示，输出功率范围可达 1000W~8000W，满足各种工业加工的需要。ROFIN 的 DC 系列是现在高功率

射频板条CO₂激光器的典型代表。



图1-1 ROFIN公司的DC系列板条CO₂激光器

国内对高功率射频激励板条 CO₂ 激光器技术的研究起步较晚，一些国内的知名高校和研究所进行了前瞻性的研究，并取得了很大的进步^[12~15]。但是由于射频板条激光器的关键技术过多且技术难度过大，高功率射频电源技术、阻抗匹配网络技术、全金属扩散冷却波导阵列的设计及其镀膜技术、非稳谐振腔的设计以及外光路整形技术等，导致国内现在仍然没有射频板条激光器的相关产品。

1.1.2 激光射频电源概述

射频电源是一种能够产生单一频率的射频电磁波的电源，主要应用于和等离子体相关的某些方面，目前主流射频电源输出的电磁波频率主要有 13.56MHz、40.86MHz、81.36MHz 三种。按照核心工作元件，射频电源可以分为两类：全固态射频电源和电子管射频电源^[16]。前者核心器件是 RF-MOSFET 晶体管，后者的核心器件是电子管（真空管）。全固态射频电源工作电压低、体积小、重量轻、耐冲击震动、易于整机小型化，但是频率和功率很难提高，稳定性和抗辐射性差，其输出功率不高于 10kW，主要应用在中小功率的射频激光器中。相对的，电子管射频电源工作电压高、体积大、发热量大、寿命相对比较低，但是其稳定性很高，输出功率很大、可达数百千瓦，所以被应用在高功率射频板条 CO₂ 激光器中。

国外生产射频电源的公司主要有 COMDEL 和 Advanced Energy 公司，前者主要生产大功率的全固态射频电源，如图 1-2 所示，后者则主要生产小功率的全固态射频电源，如图 1-3 所示，两家公司均采用能够阻抗自动调谐的匹配网络，如图 1-4 和图 1-5

所示。



图 1-2 CB 系列高频射频电源



图 1-3 CESAR 射频电源



图 1-4 自动调谐阻抗匹配器



图 1-5 数字阻抗匹配网络

国内生产射频电源的公司主要有，辽宁聚智科技发展有限公司、北京北广科技股份有限公司、深圳轩腾科技发展有限公司和苏州奥米格机电科技有限公司。其中北广科技公司生产的激光射频电源已经达到 36kW，它生产的 30kW 电子管射频电源内部结构如图 1-6 所示。



图 1-6 30kW 射频电源内部结构

由于射频电磁波的反射不匹配会影响射频电源的工作效率以及寿命,为了将射频电源产生的射频功率最大效率的传输出去,必须依靠阻抗匹配网络^[17]。阻抗匹配网络主要是由电感、电容等电抗元件组成,为了实现放电极板负载的阻抗变换,使其与射频电源之间的阻抗匹配,从而消除负载面上的电磁反射,使射频能量最大效率地传输到负载。

1.2 射频电磁辐射污染

高功率电子管激光射频电源的射频电磁波泄露成为一个潜在的问题。电磁辐射的危害已经越来越引起人们的关注^[18~22]。在射频波段,射频能量会引起热效应^[23~25]: 高能量的射频电磁波会造成人体组织的严重热损伤,这种副作用会因电磁波的频率和功率密度的不同而不同,甚至还会因为电磁波的偏振不同而不同。当电磁波频率接近人体的自然共振频率时,射频能量被更有效率地吸收,引起最大热效应。对于成年人,如果身体是接触大地的,这个频率通常是35MHz,如果身体是远离地面的,这个频率大约是70MHz。同时,身体部位可能引起共振,成人的头,共振频率大约是400MHz,而婴儿的小脑袋要达到700MHz才会共振。当频率增加超过共振时,通常很少发生射频热效应。然而,在频率达到1GHz时,在身体表面的纵向共振将会发生。

另一方面,在有限的时间、空间和有限的频谱资源下,随着电气、电子设备的不断增多,空间电磁环境的恶化日益严重。同空间中电子设备密集度急剧增加,引发设备之间干扰或不兼容的可能性越来越大,即EMI(Electro Magnetic Interference)电磁干扰(射频干扰(RFI)是一类特别的电磁干扰)问题越来越严重,使电磁波辐射产生源满足EMC(Electro Magnetic Compatibility)电磁兼容性标准变得越来越重要^[26]。EMI分传导干扰和辐射干扰两种。传导干扰主要是电子设备产生的干扰信号通过导电介质或公共电源线互相产生干扰;辐射干扰是指电子设备产生的干扰信号通过空间耦合把干扰信号传给另一个电网络或电子设备。对于传导型干扰和辐射型干扰分别有不同的抑制方法,传导干扰主要采用滤波技术,辐射干扰则利用金属壳体或箱体进行屏蔽,即电磁屏蔽。

现在有许多国际的、国家的文件都规定了电磁辐射标准^[27]。虽然全世界正规的相

关文件的内容不同，但是基本上都使用基本限值和导出限值来给出电磁辐射限值。基本限值是指判定人体对电磁场产生生理反应的基本量。导出限值是指可以产生与基本限值相应的电场、磁场和功率通量密度的值。国际上有两大主流电磁辐射标准，一个是ICNIRP 标准，另一个是美国的IEEE标准。不同的标准在不同的国家和地区使用。目前国内使用的电磁辐射标准是GB8702-88《电磁辐射防护规定》，它在30MHz~3GHz之间的公众导出限值是 0.4W/m^2 。所以，射频板条激光器应该满足这个标准。针对EMI，为了防止一些电子产品产生的电磁干扰影响或破坏其它电子设备的正常工作，各国政府或一些国际组织都相继提出或制定了一些对电子产品产生电磁干扰有关规章或标准，符合这些规章或标准的产品就可称为具有电磁兼容性 EMC(Electromagnetic Compatibility)。

1.3 本文的主要内容和意义

本文的研究内容来源于国家“十一.五”科技支撑计划课题，“高功率、高光束质量CO₂气体激光器研究开发”。本文的研究目的是对高功率CO₂气体激光器潜在的两种电磁辐射干扰，空间电磁辐射和传导干扰进行分析和检测，然后根据检测的结果采取相应的抑制措施，使射频板条CO₂激光器满足电磁辐射安全标准以及电磁兼容标准。所以本文的结构和内容总结如下：

(1) 研究和分析高功率射频板条 CO₂ 激光器以及高功率射频电源的基本结构和工作原理，得出电磁波辐射存在的潜在可能性；

(2) 根据实际研究的需要以及相关电磁辐射检测规定，选择合适的电磁辐射检测仪器以及正确的检测方法；

(3) 检测板条激光器周围空间的电磁辐射强度，以及特别太容易泄露电磁波的小孔和缝隙周围的电磁辐射强度，还有容易受电磁辐射干扰的电路板周围的电磁辐射强度；

(4) 根据电磁辐射检测出来的数据，选取合理的屏蔽材料进行电磁辐射屏蔽抑制；

(5) 针对传导干扰，最有效的抑制措施是在干扰存在的电路中插入滤波器。对于滤波器的设计要根据实际的射频电源的电路参数，选择合适的滤波器结构和正确的滤波器件。并且要对电路滤波器件进行实验，检测其性能是否符合电路滤波要求。

华 中 科 技 大 学 硕 士 学 位 论 文

检测高功率射频板条 CO₂ 激光器电磁辐射并采取相应的电磁屏蔽以及滤波技术，为提高板条激光器的质量和安全品质具有重大的现实意义：保证研究人员、激光器操作人员以及周围工作人员的身体健康；保证板条激光器稳定正常运行。

2 激光射频电源的电磁辐射

高功率射频电源在激励板条激光器工作的同时，也带来了射频电磁辐射污染。本章重点分析了板条激光器的基本结构和射频电源的工作原理，探讨了射频电磁辐射污染的两个主要来源：泄露到空气中的射频电磁波，以及在射频发生电路中共导的射频电磁波。

2.1 射频板条 CO₂ 激光器的基本结构

支撑计划课题项目研究设计的高功率射频扩散冷却板条CO₂激光器，如图2-1所示，整机采用紧凑的层式结构，上层是背靠背的激光头和射频激励电源，两者通过平板电容器构成的阻抗匹配网络连接在一起，下层是高压直流电源电路。激光头内是具有全金属结构的放电极板和非稳谐振腔，注入到激光头内的射频电磁波通过极板实现稳定均匀的大面积辉光放电，同时放电极板采用扩散水冷实现电离气体的冷却，激光通过非稳腔和外光路整形后输出，高压直流电源包括软启动、变压器、整流器、滤波器等。

人机交互控制操作台，可以实时监控板条激光器的工作情况，同时还可以对板条激光器进行相应的控制。监控板条激光器的水冷是否正常，板条激光器的工作参数如屏极电压、屏极电流、腔压等；控制激光头自动抽气和充气，控制射频电源打开高压，控制激光器打开光闸。



图2-1 高功率射频激励扩散冷却板条CO₂激光器

射频激励扩散冷却板条CO₂激光器的基本工作原理^[16]：射频电源产生频率为81.36MHz的射频电磁波，通过阻抗匹配网络实现射频电源阻抗和激光头内放电极板和工作气体阻抗的匹配，将射频能量最大效率地注入到激光头内的扩散冷却极板上，并且均匀的分布在上面，两个极板上的高功率密度的射频电磁波对CO₂气体电离放电，最后用非稳谐振腔和外光路整形输出激光。

2.2 激光射频电源的工作原理

板条激光器的激励源实际上是一个射频发生器，它的核心器件是电子管，有三个极，分别是屏极（阳极）、栅极、灯丝（阴极），电子管同时工作在共栅极放大状态和电容三点式振荡状态^[28]，并且通过引入正反馈实现了射频电源的自激式振荡，如图 2-2 所示^[29]。

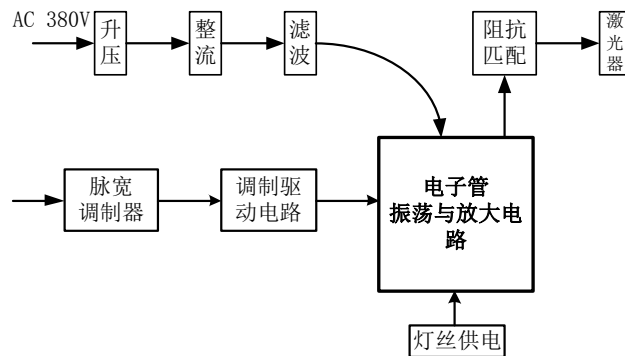


图 2-2 射频电源电路结构原理图

要维持射频电源的自激振荡，电子管同时工作在功率放大状态和振荡状态，必须为真空管提供合适的工作条件：阴极额定工作电压是 7.2V，灯丝额定电流在 150A 左右，从而保持灯丝被持续加热而发射电子；屏极额定电压为 10000V 直流高压，收集灯丝发射的电子，形成屏极电流；栅极接入脉冲信号发生器以及调制驱动电路，即脉宽调制器 PWM，使射频电源工作于脉冲方式实现功率的连续可调。对于三个电路的实现，灯丝加热电路采用一个 380V AC 转 7.2V AC 的功率变压器；屏极直流高压，380V AC 经过软启动、电源升压变压器、整流器、滤波器得到 10000V 直流高压；栅极功率控制电路由脉冲发生器和调制驱动电路两部分组成，脉冲发生器可以产生频率和占空比可调的方波电压信号，方波信号频率为 50kHz，驱动电路的作用是放大方波信号提高控

制电路的带负载能力，栅极电压为负 218V DC。

射频电源的基本工作原理：接通电源后，LC 选频网络将 81.36MHz 的噪声信号筛选出来，被工作在共栅极功率放大状态的电子管放大，将一部分被放大的 81.36MHz 射频电磁波引入到电子管的阴极，即引入了正反馈，使电子管的共栅极放大器工作在饱和状态，从而在屏极连续稳定地输出高功率的频率为 81.36MHz 余弦信号。

2.3 激光射频电源的电磁辐射干扰分析

射频板条 CO₂ 激光器的激励源是射频电磁波发生器，频率为 81.36MHz 的射频电磁波可以通过其发生电路的感性元件和容性元件被发射到空气中，也可以在其发生电路中传播，射频电磁波的发射和传导是射频电源产生电磁辐射干扰产生的主要原因。

2.3.1 射频电磁辐射干扰的来源

频率 81.36MHz 电磁波的发生电路中有许多感性元件和容性元件，以及其它电路元件的寄生电容和寄生电感，当然容性元件和感性元件也有寄生电感或寄生电容，81.36MHz 射频电磁波发生器在保持自激振荡的时候，其容性元件和感性元件将会发射电磁波，造成射频电磁波的泄露形成射频电磁辐射。所以，板条 CO₂ 激光器工作时，射频电源产生的高功率密度的射频电磁波激励工作气体电离的同时，必然会有一部分的射频电磁波会通过振荡电路和放大电路泄露出来，在射频电源周围空气中形成空间电磁辐射。

射频电磁波不仅可以被容性元件和感性元件发射到空气中传播，更容易在电路中传播。射频电磁波在电路中通过导线、各个元件的相互连接，以及寄生电容和寄生电感的耦合进行传播。电子管的自激式振荡的实现依赖于电子管三个电路所提供的必要条件，射频电磁波会很容易的在这些和电子管相连接的电路中共导，对这些电路造成干扰，即传导干扰。屏极直流高压电路和阴极灯丝大电流供电电路都属于电源供电电路，栅极脉宽调制电路属于信号传导电路，三个电路在为射频电源提供有用的工作电压、工作电流、控制信号的同时，射频电磁波反过来通过电源线或者信号线将射频干扰噪声带入到大地、外部工作电路中，影响其它器件的正常工作。另一方面，屏极直

流高压电源线、阴极灯丝供电电源线存在很强的干扰噪声，如果进入到射频发生电路，会影响射频电源的正常工作。干扰是双向的，所以必须设计合适的低通滤波器抑制外部噪声进入射频电源。

2.3.2 射频电磁辐射的泄露位置

就像射频电源在激励板条激光器的同时也带来射频电磁辐射污染一样，射频板条激光器的某些设计在带来一些实用功能的同时，也不可避免的产生了电磁辐射的泄露。

三个激光头透视窗口，如图 2-3 所示，是一种安置在激光头上的透明有机塑料板。工作人员可以通过三个窗口观察几乎整个激光头内气体的放电情况，从而能够直观地了解激光器实时的工作情况，例如放电极板是否完全放满、辉光亮度、辉光颜色等。由于透视窗口是透明的塑料材料，无法屏蔽射频电磁波，必然会有射频电磁波穿过透视窗口泄露到空气中，所以检测其周围的电磁辐射强度并采取相应的屏蔽措施是必须的。



图 2-3 激光头透视窗口

由于射频电源的射频发生电路会发射 81.36MHz 的射频电磁波，所以在设计射频电源的时候就优先考虑到采用金属壳体将整个射频电源屏蔽起来，而不是将输出功率达到千瓦级的射频电源裸漏在空气中。使用屏蔽壳体的另外一个重要的原因是高压安全，将金属壳体接地之后，可以有效地隔离高压电路。虽然应用金属屏蔽壳体将整个射频电源包裹起来，但是屏蔽金属壳体并不是百分之百密封的，为了方便地安装和拆卸射频电源元器件，必须开放屏蔽壳体的一侧，然后用一个封盖来密封。开放一侧之后，必然造成封盖和壳体接触处存在缝隙，如图 2-4、2-5 所示，导致射频电磁波通过封盖四周的缝隙泄露出来。反过来讲，如果金属屏蔽壳体采用全密封的结构，那么就不会有电磁辐射泄露，也不需要检测射频电磁辐射，射频电源的电磁辐射干扰就只有传导干扰，正是由于缝隙的电磁辐射泄露的缘故，所以需要检测电磁波强度以便查看密封性能是否良好，进一步是否需要改善密封的方法。



图 2-4 射频电源左侧缝隙



图 2-5 射频电源右侧缝隙

2.4 本章小结

本章简单介绍了高功率射频板条 CO_2 激光器的基本结构和工作原理，详细分析了板条激光器射频电源的电路结构和工作原理，在此基础上分析并得出了高功率射频电源产生电磁辐射干扰的原因，一方面是射频发生电路的容性元件和感性元件发射射频电磁波，另一方面是射频电磁波在其发生电路中传导，最终引起了空间电磁辐射污染和电路传导干扰。另外，通过分析知道射频电源的金属屏蔽壳体密封盖四周的缝隙以及激光头的透视窗口容易引起射频电磁波的泄露，为下面进行板条激光器的电磁辐射的检测做好准备。

3 射频电磁辐射检测

射频电磁波可以通过封盖四周的缝隙泄露到空气中形成射频电磁辐射。本章重点分析了射频电磁辐射的检测方法，详细研究了板条激光器不同位置的射频电磁辐射的检测。

3.1 射频辐射的检测方法

实验室检测射频电磁辐射的目的：科学研究，改善和提高射频电源和板条激光器的整机性能，保护研究人员免受射频电磁波的危害。除了科学研究的需要之外，还应该参考已有的电磁辐射检测的相关规范，选择适合自己的检测仪器和检测方法。

《环境电磁波卫生标准——环境电磁波检测规范》中详细地陈述了关于电磁辐射测量方式、测量位置、测量仪器的规定和要求：测量方式可根据实际的不同需求于目的，进行“点测”、“面测”或者“简易测量”；测量仪器，在辐射源周围的测量，应选用灵敏度 $\leq 1\text{V/m}$ ，或 $\leq 1\mu\text{W/cm}^2$ ，精度 $\leq |2\text{dB}|$ 的场强仪。

参考《环境电磁波卫生标准——环境电磁波测量规范》的说明和要求，结合实际的测试目的和板条激光器所在环境的局限性，最终决定采用手持式电磁辐射测试计（是一种各向同性探头的宽频段场强仪）对 CO_2 板条激光器周围空间的电磁辐射进行“简易点测”——对高功率射频电源周围空间的离散点进行射频电磁辐射强度的检测的方法。“点测”具有许多的优点：各向同性探头的宽频段场强仪容易采购且价格便宜，检测非常方便灵活，可重复性测量，可对具体位置的电磁辐射进行准确测量。可见，“简易点测”法非常适合用于实验室科学研究的需要，重复性地测量某一个点或者某个局部位位置电磁辐射强度。

根据实际的市场调研，比较不同市面上的手持式射频辐射测试计的性能和价格，最终选择泰世电子公司生产的 TES-92 电磁辐射检测仪，如图 3-1 所示，它是台湾泰仕公司生产的专门用于检测电磁辐射的手持式测试仪器，具体特点和规格：测试频率范围 50MHz 至 3.5GHz，等方向性电磁场测量，无方向性测量使用 3 轴测量感应棒，高动态范围使用 3 通道数位处理；显示 LCD4 位数，反应时间约一秒钟，显示解析度

0.1mV/m、0.1 μ A/m、0.01 μ W/m²，测量单位 mV/m、V/m、 μ A/m、mA/m、 μ W/m²、mW/m²、W/m²。



图 3-1 TES-92 电磁辐射检测仪

根据 TES-92 电磁辐射检测仪的特点和规格可知，它满足检测高功率射频电源的空间电磁辐射的实际要求：50MHz~3.5 GHz 频率范围适合 81.36MHz，精度 $\pm 1.0\text{dB}$ 满足精度 $\leq |2\text{dB}|$ 要求，能够实现 XYZ 三轴等方性测量，反应时间迅速，可以测量电场强度、磁场强度、电磁场强度，测量数值量程自动转换，依据不同需求测量电磁波的瞬时值、最大值、平均值、最大平均值。

3.2 电磁辐射的测量

需要进行电磁辐射检测的位置除了第 2 章提到的两个容易引起电磁辐射泄露的位置，射频电源金属屏蔽壳体封盖的四周缝隙和激光头透视窗口，还有其它的位置也必须考虑在内。第一是板条激光器周围的最大空间，整体了解板条激光器电磁辐射泄露的程度，确切地知道站在什么位置或多远的距离是安全的；第二是容易受电磁干扰影响的板条激光器工作电路板的周围空间。对于所有这些位置进行“简易点测”，但是不同位置使用的具体检测方法不尽相同。对于空间电磁辐射的检测方法是把激光器射频电源看作一个辐射源，把激光器一侧的长度和高度作为一个参考面（如图 2-3 所示），在垂直于参考面的方向，每隔一个“单位长度”选取一个平行面，然后从左至右、从上至下的顺序，测量这个面内每一个“单位长度 \times 单位长度”处的电磁辐射场强强度，场强计量参数取 MAX 值（最大值）。其它位置的检测方法则很容易解决，下面将详细叙述。

3.2.1 激光头透视窗口的电磁辐射检测

检测条件：激光头内气压 154.6hPa，占空比保持在 70%，激光器工作情况，屏极电压 9.80kV，屏极电流 1.95A，输出激光功率 1.71kW。

透视窗口从左至右（如图 2-3 所示）等距离选取透视窗口的三个点进行检测，测试结果如表 3-1 所示，MAX 值、单位： W/m^2 。

表 3-1 激光头透视窗口的场强

	左	中	右
第一个窗口	>99.99	>99.99	>99.99
第二个窗口	>99.99	>99.99	89.99
第三个窗口	>99.99	>99.99	70.76

可见，透视窗口的电磁波泄露非常严重，几乎每个窗口的电磁辐射强度都超出了电磁辐射检测仪的量程， $>99.99 \text{ W/m}^2$ 。

3.2.2 电路板周围电磁辐射场强检测

板条激光器要安全正常地运转，需要很多检测电路和控制电路，这些电路板能否不受干扰地正常的工作直接关系到板条激光器的稳定运行，所以必须保证这些电路板免受电磁辐射的干扰。

检测条件没有改变。检测电路板周围空间 2×4 ，8 个点的 MAX 值，测试结果如表 3-2 所示，单位： W/m^2 。

表 3-2 PCB 板周围空间的电磁辐射强度分布

距离电路板 0m 面			
>99.99	>99.99	0.522	0.733
>99.99	>99.99	0.102	1.133
距离电路板 0.10m 面			
>99.99	>99.99	>99.99	2.193
2.008	>99.99	1.002	3.115

可见，电路板周围空间的电磁辐射强度很大，激光器的检测和控制电路板正受到射频电磁辐射的严重干扰。

3.2.3 封盖两侧缝隙电磁波场强检测

检测条件：激光头内气压 154.9hPa，占空比 70%。激光器的工作情况，屏极电压 9.70kV，屏极电流 1.83A，输出激光功率 1.55kW。从上至下，每隔 20cm 测量一个点，检测结果如表 3-3 所示，MAX 值、单位： W/m^2 。

表 3-3 射频电源封盖两侧缝隙电磁辐射强度分布

距离（自上而下）	左侧	右侧
0m	4.623	0.395
0.20m	2.825	1.228
0.40m	>99.99	>99.99

可以看出，虽然已经使用铍铜弹片密封射频电源箱，但是封盖两侧缝隙的电磁辐射强度仍然很高，电磁波泄露非常严重，特别是两侧底部位置尤其突出。需要进一步地观察并且分析其中的主要原因。

3.2.4 板条激光器周围空间电磁辐射检测

检测条件，激光头内气压 154.9hPa，占空比 70%。激光器的工作情况，屏极电压 9.70kV，屏极电流 1.83A，输出激光功率 1.55kW。检测结果如表 3-4 至表 3-11 所示，MAX 值、单位： W/m^2 。

(1) 射频电源侧的电磁波场强空间分布

表 3-4 距离射频电源 40cm 面内电磁波场强分布

<div>水平距离 垂直距离</div>	0 m	0.40 m	0.80 m	1.20 m	1.60 m
0 m	2.701	0.704	1.067	0.185	0.439
0.40 m	1.087	>99.99	4.055	1.029	2.298
0.80 m	0.377	1.506	0.749	2.422	0.360
1.00 m	0.114	0.380	0.375	0.619	0.362

华中科技大学硕士学位论文

表 3-5 距离射频电源 40cm 面内电磁波场强分布

水平距离 垂直距离	0 m	0.40 m	0.80 m	1.20 m	1.60 m
0 m	3.399	1.521	1.911	3.026	1.290
0.40 m	0.959	1.191	3.010	1.162	2.155
0.80 m	0.660	1.358	1.557	2.074	1.278
1.00 m	0.207	0.235	1.406	1.826	0.959

表 3-6 距离射频电源 60cm 面内电磁波场强分布

水平距离 垂直距离	0 m	0.40 m	0.80 m	1.20 m	1.60 m
0 m	2.038	0.589	1.572	1.098	1.782
0.40 m	1.275	1.090	2.488	1.948	1.979
0.80 m	1.085	1.423	1.500	2.002	1.168
1.00 m	0.243	0.323	0.725	2. 224	1.033

表 3-7 距离射频电源 80cm 面内电磁波场强分布

水平距离 垂直距离	0 m	0.40 m	0.80 m	1.20 m	1.60 m
0 m	2.216	2.253	0.742	2.853	2.333
0.40 m	1.385	1.217	2.199	2.164	2.246
0.80 m	2.739	2.085	2.225	1.892	2.394
1.00 m	0.968	1.535	2.028	2.394	1.548

(2) 激光头一侧外部空间电磁辐射场强分布

表 3-8 距离激光头面 30cm 面内电磁波场强分布

水平距离 垂直距离	0 m	0.40 m	0.80 m	1.20 m	1.60 m
0 m	1.854	1.399	1.783	1.270	1.491
0.40 m	0.655	2.017	2.393	1.153	1.700
0.80 m	0.298	1.383	0.628	0.827	0.133

华中科技大学硕士学位论文

表 3-9 距离激光头面 60cm 面内电磁波场强分布

水平距离 垂直距离	0 m	0.40 m	0.80 m	1.20 m	1.60 m
0 m	2.080	2.053	2.022	0.657	0.546
0.40 m	1.958	2.129	0.647	0.454	0.483
0.80 m	0.316	2.167	0.395	0.462	0.263

表 3-10 距离激光头面 90cm 面内电磁波场强分布

水平距离 垂直距离	0 m	0.40 m	0.80 m	1.20 m	1.60 m
0 m	2.004	2.090	0.841	0.841	0.254
0.40 m	2.195	1.992	0.494	0.683	0.518
0.80 m	1.648	2.194	0.481	1.070	0.547

表 3-11 距离激光头面 120cm 面内电磁波场强分布

水平距离 垂直距离	0 m	0.40 m	0.80 m	1.20 m	1.60 m
0 m	1.812	1.892	0.658	0.045	0.021
0.40 m	1.434	1.953	0.410	0.244	0.357
0.80 m	1.276	2.111	0.923	0.277	0.058

数据分析:

可以看出, 电磁波场强空间分布不具有规律性, 但是总体上来看, 距离射频电源越远电磁辐射强度就会越小。原因分析: 电磁波的频率是 81.36MHz, 对应的波长长度是 3.59m, 由于激光器所在实验室的空间有限, 只能检测到电磁波近场(一个波长长度之内距离的电磁场)范围内的电磁辐射强度分布情况, 所以我们只测得了距离辐射源 80cm 内的电磁辐射场强空间分布。虽然只是近场范围内的数据, 但是它们已经提供了足够的信息, 射频电源近场范围内的电磁辐射强度大约在 $2\text{W}/\text{m}^2$, 射频电源附近的射频电磁辐射强度是最高的, 工作人员尽量不要站在射频电源一侧。与射频电源侧向比较, 激光头一侧的射频辐射强度要小一些, 这很可能是距离导致的, 因为激光头一侧的数据是距离射频电源较远一些测得的。

3.3 本章小结

从研究、设计、改善、提高射频板条激光器整机性能出发，通过使用 TES-92 电磁辐射检测仪测量射频板条激光器周围空间的电磁辐射强度，对激光头透视窗口周围空间，板条激光器的电路板周围空间，射频电源铜壳体封盖两侧，板条激光器周围空间进行了“简易点测”。测量结果表明，几乎所有被测量的位置都有严重的电磁辐射泄露或干扰：激光头的透视窗口泄露最为严重，超过了 TES-92 的量程；其次是射频电源屏蔽壳体的封盖泄露严重，底部位置超过了 TES-92 的量程；电路板周围空间的电磁辐射强度超过了 99.99W/m^2 ；板条激光器周围空间的电磁辐射强度大约在几 W/m^2 的量级，即大约 $200\mu\text{W/cm}^2$ 的量级，大于安全值 $40\mu\text{W/cm}^2$ 。

4 射频电磁辐射的屏蔽

电磁辐射检测结果表明,板条激光器泄露到空气中的射频电磁辐射远远超过电磁辐射标准的公众导出限值,对电子设备造成了强烈的干扰。本章重点分析了射频辐射的屏蔽原理,详细讲述了如何通过使用各种金属壳体,屏蔽射频电磁波,提高整机的性能。

4.1 射频电磁屏蔽原理

高功率射频电源发生频率为 81.36MHz 的电磁波,对应波长是 3.5m,属于超高频或超短波范围,所以如何防止电磁波的泄露是在设计射频电源时就应该考虑的因素,电磁屏蔽是最有效地抑制电磁波泄露的措施。

屏蔽是利用由金属制成的壳、盒、板等箱体,对电磁波的反射和吸收来屏蔽辐射干扰源所产生的电场和磁场分量,达到将电磁波有效地限制在某一区域内的一种方法^[30]。电磁辐射的屏蔽并不是简单地使用金属壳体就可以达到屏蔽效果的,由于辐射源分为近场的电场源、磁场源和远场的平面波,有许多要素会影响金属壳体的屏蔽效能,所以金属箱体的屏蔽性能依据辐射源的不同,在材料选择、结构形状和对小孔、缝隙泄露控制等方面都有所不同。在设计具有满足实际需要的屏蔽性能的金属箱体时,应该首先明确辐射源的频率范围,再根据各个频段的典型泄露结构,确定控制要素,进而选择恰当的屏蔽材料,设计屏蔽壳体。

金属屏蔽体的泄漏耦合结构与控制要素,与所要抑制的电磁波的频率密切相关,频率达到 80MHz 的射频电磁波主要通过金属壳体的小孔、缝隙和接地泄露,因此需要控制的主要因素是合理的选择壳体材料并且使其良好接地。

通过金属箱体屏蔽电磁波的物理机理可知,屏蔽体应该选用导电性高、透磁性高的材料,如铜、铝、黄铜、钢等。其中铜材质的屏蔽效果最好,对射频电磁波的屏蔽效果达 80%~88%,铜、铝、黄铜的磁场强度屏蔽效果均达 90%以上。另外,电磁波的频率越高,屏蔽效果就会越好。

屏蔽效能的定义是没有屏蔽时入射或放射电磁波与在同一地点经屏蔽后反射或透

射电磁波比值，即屏蔽材料对电磁信号的衰减值，单位 dB。电磁波传播到屏蔽材料的表面时，通常按照三种不同机理进行衰减：入射表面的反射衰减用 A 表示，未被反射而进入屏蔽壳体的电磁波材料的吸收衰减，用 R 表示，在屏蔽体内部的因多次反射造成的衰减，用 B 表示，如图 4-1 所示。即，屏蔽效能= A+R+B，计算公式如表 4-1 所示 [31]。

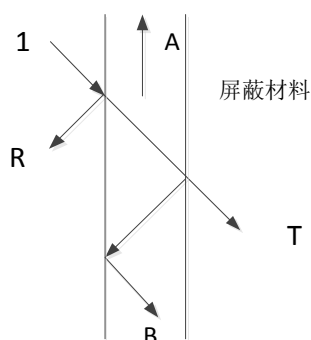


图 4-1 屏蔽对入射波衰减示意

表 4-1 屏蔽效能计算公式

损耗类别	计算公式
吸收损耗/dB	$A = 0.131t\sqrt{f_{MHz} \cdot \mu_r \cdot \sigma_r}$
反射损耗/dB	$R = 168 - 10\lg\left(\frac{f \cdot \mu_r}{\sigma_r}\right)$
内部多重反射损耗/dB	$B = 20\lg\left[1 - \left(\frac{Z_m - Z_n}{Z_m + Z_n}\right)^2 \times 10^{0.1A} (\cos 0.23A - j \sin 0.23A)\right]$

注：t 屏蔽材料厚度 (m)；f 频率 (Hz)； μ_r -屏蔽材料的磁导率相对于真空磁导率的比值； σ_r -屏蔽材料相对于理想铜材料的电导率； Z_m -屏蔽金属的电磁波阻抗 (Ω)； Z_n -空气的电磁波阻抗 (Ω)。

4.2 高功率射频电源的电磁屏蔽

采用金属壳体将高功率射频电源发射屏蔽起来，防止其发射的射频电磁波泄露到空气中去。进一步的，还必须通过测量空间电磁辐射强度来检测封盖的密封性是否良

好，从而分析电磁辐射泄露严重的原因，提高封盖的密封性，即提高金属壳体的屏蔽效能。

4.2.1 铜壳体的屏蔽效能

板条激光器的高功率射频电源发生电路可以通过点感性器件发射电磁波，如果将整个射频电源裸漏在空间中，其发射的射频电磁波将会对工作人员的健康构成潜在的威胁，对周围电子设备造成巨大的干扰，所以应该采用金属密封壳体将整个射频电源屏蔽起来，防止电磁辐射的泄露。铜材料对射频电磁波的屏蔽效果最好，因此，设计一个铜板（厚度为 3.8mm）壳体将整个射频电源包裹在其中，并将铜壳体进行良好的接地。采用“封闭式铜壳体地”具有以下优点：

(1) 射频电源的电路设计过程中可以很方便的找到接地点，穿心电容可以方便地直接安装在铜板上；

(2) 良好接地的铜板壳可以有效地抑制射频电磁波的泄漏，起到良好的屏蔽射频电磁波的效果。

射频电源铜壳体的屏蔽效能 $=A+R+B$ ，根据屏蔽效能计算公式分别计算吸收损耗和反射损耗^[32]：

$$A = 0.131t\sqrt{f_{MHz} \cdot \mu_r \cdot \delta_r} = 0.131 \times 3.8 \times \sqrt{81.36 \times 1 \times 1} \approx 4.49dB \quad (4-1)$$

$$R = 168 - 10\lg\left(\frac{f \cdot \mu_r}{\delta_r}\right) = 168 - 10\lg\left(\frac{81.36 \times 10^6 \times 1}{1}\right) \approx 108.9 \quad (4-2)$$

由于 A 比较大，占主导地位，多次反射因子 B 基本上可以忽略。所以，铜板壳体的屏蔽效能等于吸收损耗和反射损耗的加和，即 $4.49dB+108.9dB=113.39dB$ 。这是在铜壳体完全封闭的理想情况下的屏蔽效能，实际上屏蔽壳体的一侧有一个封盖，封盖的缝隙会泄露射频电磁波，所以实际的屏蔽效能要低于 113.39dB，它取决于屏蔽壳体和封盖的密封情况，以及铜壳体是否良好接地。另外，需要注意的是铜板是很容易被氧化的，所以在铜板上涂抹一些复合材料防治铜板氧化，从而延长铜板外壳对射频电磁波的屏蔽效能^[33]。

由铜板围成的箱体有一个侧盖，必须保证侧盖与箱体的密封，使用铍铜弹片进行

密封。铍铜弹片是用铍铜合金制成的指形弹片，可用在存在 EMI/RFT 或 ESD 问题的范围很广的电子设备中。铍铜弹片能在多种环境中良好的工作，多种选择镀层，可确保与其它接触面的相容性。它不会燃烧，也不会受射线或紫外线的影响。因此在计算机、军事导航系统和商用电子设备中都使用铍铜弹片等为 EMI 屏蔽。

4.2.2 屏蔽效能的改善

第三章电磁辐射测量结果表明铜壳体封盖的密封效果不好，分析其中的原因，本来封盖外表面被涂上一层透明的材料，起绝缘和防氧化的作用，却导致封盖与箱体接触的地方是绝缘层的接触而不是金属的接触，使电源箱体不再是一个整体，封盖被绝缘层隔离，所以电磁波很容易从缝隙中泄露出来。次要原因：靠近封盖左侧底部位置，10000 V 直流高压要经过两级低通滤波器（由线圈电感器和穿心电容器组成）连接至电子管屏极，电子管屏极电压是 10000 V 直流高压和射频电磁波的叠加，所以在安置穿心电容的地方电磁辐射强度特别大。

针对封盖和箱体相接触的地方，进行去绝缘层处理，使箱体变成一个金属密封箱体，从而有效地防止电磁波的泄露。再次对缝隙周围空间进行射频电磁辐射检测，检测条件：激光头内气压 155.0hPa，占空比 70%。激光器的工作情况，屏极电压 9.78kV，屏极电流 1.89A，输出激光功率 1.69kW。检测结果如表 4-2 所示。

表 4-2 去绝缘层后，射频电源两侧电磁辐射情况

距离（自上而下）	左侧	右侧
0	150.46	140.06
0.20m	190.88	149.44
0.40m	264.32	150.76

很明显，经过去绝缘层之后，电磁辐射泄露明显减少，电磁辐射的强度较之前降低了 95%左右。由于初步制作屏蔽铜板壳体时的失误，未考虑到绝缘层会将封盖和壳体隔离成两部分，结果导致电磁辐射泄露严重。根据电磁辐射检测结果，分析原因，将屏蔽壳体去绝缘层后，电磁辐射泄露明显降低。

4.3 透视窗口的电磁屏蔽

根据第三章电磁辐射的检测结果，激光头的透视窗口的电磁辐射泄露非常严重，必须采取相应的屏蔽措施。屏蔽材料的选择必须满足两个条件，一是放置屏蔽后，不影响通过透视窗口观察谐振腔内放电的情况；二是屏蔽效果要好，要能够有效地屏蔽掉电磁波。铜网可以满足第一个条件，但是具体屏蔽效能如何，还是要进行检测实验才行。检测条件没有改变，从左至右等距离选取透视窗口的三个点进行检测，检测结果如表 4-3 所示，MAX 值、单位： mW/m^2 。

表 4-3 激光头透视窗口的场强

	左	中	右
第一个窗口	3.087	2.692	3.180
第二个窗口	5.671	5.965	8.157
第三个窗口	8.815	10.390	10.45

使用铜丝网之后，电磁辐射的强度明显降低了，电磁辐射强度降低了约 90%~97%。虽然添加了防护网，但是透视窗口的电磁辐射场强仍然远远超过人体的安全值，所以工作人员观察放电情况时不要近距离的直视透视窗口，应该斜视且保持足够的距离。另外，还可以采用其它的屏蔽措施来抑制透视窗口的电磁辐射泄露，通过减小透视窗口的尺寸，使用具有屏蔽效果的透明的屏蔽材料替换现在的透视窗口。

4.4 电路板的防护

由于电路板受到射频电源泄露电磁辐射的强烈干扰，必须将电路板与外界隔离起来。采用厚度为 2.8mm 的铝箱体将工作电路板屏蔽起来。铝板不仅价格便宜，而且铝箱体完全可以把外界的电磁波与电路板隔离开来，达到足够好的屏蔽效果。

电路板防屏蔽铝壳体的屏蔽效能，根据式 4-3 和 4-4 求解吸收损耗 A 和反射损耗 R。

$$A = 0.131t \sqrt{f_{\text{MHz}} \cdot \mu_r \cdot \delta_r} = 0.131 \times 3.8 \times \sqrt{81.36 \times 1 \times 0.61} \approx 2.58 \text{dB} \quad (4-3)$$

$$R = 168 - 10 \lg \left(\frac{f \cdot \mu_r}{\delta_r} \right) = 168 - 10 \lg \left(\frac{81.36 \times 10^6 \times 1}{0.61} \right) \approx 86.7 \quad (4-4)$$

所以铝板屏蔽壳体的屏蔽效能等于 $A + R = 2.58\text{dB} + 86.75\text{dB} = 89.33\text{dB}$ 。考虑到实际的铝壳体有一个侧盖，所以实际的屏蔽效能不能达到理想的 86.75dB，但是因为只是将外部空间的射频电磁辐射屏蔽在铝壳体的外部，因此足够保证电路板免受电磁辐射的干扰。

4.5 整机屏蔽

射频电源使用铜壳体屏蔽，空间电磁辐射强度降低到 $100\text{mW}/\text{m}^2 \sim 200\text{mW}/\text{m}^2$ 的量级，已经满足《电磁辐射防护规定》在 30MHz~3GHz 之间的公众导出限值 $0.4\text{W}/\text{m}^2$ 。但是这是在占空比只有 70% 的时候测得的数据，板条激光器用于实际加工应该工作在占空比 100% 的状态。

4.5.1 射频电源侧的空间电磁辐射场强空间分布

取垂直距离的单位长度为 40cm，面的单位长度为 40cm×40cm。检测条件：激光头内气压 154.6hPa，占空比 60%，激光器工作情况，屏极电压 9.78kV，屏极电流 1.73A，输出激光功率 1.54kW。检测结果如表 4-4 至表 4-6 所示，MAX 值、单位： mW/m^2 。

表 4-4 垂直距离 0cm 面内电磁波场强分布

水平距离 垂直距离	0 m	0.40 m	0.80 m	1.20 m	1.60 m
0m	67	12	6	3	15
0.40m	160	41	18	5	112
0.80m	157	52	506	183	220

表 4-5 垂直距离 40cm 面内电磁波场强分布

水平距离 垂直距离	0 m	0.40 m	0.80 m	1.20 m	1.60 m
0m	45	121	161	45	15
0.40m	37	73	298	133	42
0.80m	12	38	82	58	43

表 4-6 垂直距离 80cm 面内电磁波场强分布

水平距离 垂直距离	0 m	0.40 m	0.80 m	1.20 m	1.60 m
0m	24.11	52.15	69.11	71.32	55.23
0.40m	7.416	11.20	84.12	118.1	39.90
0.80m	37.94	106.1	178.0	64.44	71.05

4.5.2 激光头侧射频辐射场强空间分布

检测条件没有改变。取垂直距离单位长度为 40cm，面内单位长度为 40cm×40cm。
检测结果如表 4-7 至 4-10 所示，MAX 值、单位： mW/m^2 。

表 4-7 垂直距离 0cm 面内电磁波场强分布

水平距离 垂直距离	0 m	0.40 m	0.80 m	1.20 m	1.60 m
0m	0.060	0.127	0.062	0.186	0.067
0.40m	0.035	0.155	0.101	0.080	0.027
0.80m	0.840	0.395	0.198	0.315	0.179

表 4-8 垂直距离 30cm 面内电磁波场强分布

水平距离 垂直距离	0 m	0.40 m	0.80 m	1.20 m	1.60 m
0m	0.031	0.193	0.152	0.181	0.082
0.40m	0.105	0.128	0.155	0.145	0.136
0.80m	0.038	0.156	0.109	0.154	0.080

表 4-9 垂直距离 60cm 面内电磁波场强分布

水平距离 垂直距离	0 m	0.40 m	0.80 m	1.20 m	1.60 m
0m	0.008	0.166	0.133	0.191	0.054
0.40m	0.018	0.081	0.086	0.110	0.036
0.80m	0.074	0.132	0.204	0.060	0.089

表 4-10 垂直距离 90cm 面内电磁波场强分布

水平距离 垂直距离	0 m	0.40 m	0.80 m	1.20 m	1.60 m
0m	0.027	0.014	0.097	0.168	0.143
0.40m	0.013	0.030	0.085	0.112	0.042
0.80m	0.043	0.140	0.103	0.080	0.036

可见，使用钢板之后，射频辐射屏蔽强度下降到 $100\mu\text{W}/\text{m}^2$ 的量级，用钢板外壳将整个激光器屏蔽起来，可以有效地减少电磁辐射的泄露，并且使得电磁辐射强度远远低于人体的安全值。

4.6 射频防辐射服

防辐射服，是专门为研究人员设计的屏蔽电磁干扰保护人体免受电磁辐射危害的金属纤维混合织物制成的衣服。防辐射服主流面料有金属纤维混纺面料，屏蔽值只有 30dB，全银纤维针织面料，屏蔽值达到 70dB 以上，半银纤维混纺面料，屏蔽值达到 50dB-60dB。

板条激光器研究人员的防辐射服，选择了上海优加公司生产的优加防静电防辐射工作服三层大褂，外层面料为纯棉防静电材料，整个衣服里层全部使用防辐射面料：大褂后面配有调节腰带，防护严密，中间层为金属化材料，屏蔽值高达到 60dB 以上，内层为网格纱，设计为可脱卸形式，方便清洗。是目前屏蔽效果最好的产品。

4.7 本章小结

根据第三章射频电磁辐射检测结果，审查射频电源铜屏蔽体电磁屏蔽的效果，分析电磁辐射泄露严重的原因，经过屏蔽壳体封盖的去绝缘层之后，重新检测射频辐射强度，电磁辐射屏蔽效能大幅度提高。对于激光头的透视窗口，在保证可视化的前提下，选择普通铜网来屏蔽从透视窗口泄露出来的射频电磁波，虽然铜网的屏蔽效率达到了 0.97，但是电磁辐射强度依然超过人体的安全值。板条激光器工作电路板用一个带有侧盖的厚度为 2.8mm 的铝壳体屏蔽起来，屏蔽效能可达 89dB，保证了电路板的正常工作。虽然占空比在 60%时，射频电源铜壳体的屏蔽效能到达 108dB，使得板条激

光器周围空间的射频电磁辐射强度低于 0.4W/m^2 ，但是无法保证板条激光器工作在占空比 100% 时仍然满足低于安全值，所以采用一个钢屏蔽体将整个射频电源屏蔽起来，经过电磁辐射检测，射频电源外部几乎没有任何的电磁辐射。值得注意的是，板条激光器的研究人员在工作时必须穿戴防辐射服，防辐射服可以保护研究人员在打开激光器两侧顶盖时免受射频电磁波的危害。

5 射频低通滤波器的设计

射频低通滤波器可以有效地抑制射频电源中的宽频带噪声。本章重点讲述了射频电源中三个电路的低通滤波器的参数设计及其滤波器件的选择和制作，另外还对铁氧体磁芯进行了相关的性能测试实验。

5.1 射频低通滤波器的设计与仿真

射频电源中的低通滤波器应该根据实际电路的需求，选择合适的衰减抑制比和截止频率，最终设计归一化的低通滤波器。

5.1.1 滤波原理

滤波是抑制传导方式的电磁骚扰的最为有效的措施。滤波实际上是频域处理技术，即在线路中插入一种网络，该网络的转移阻抗是频率的函数，它使有用的频谱分量（如信号和有功功率）能够顺利通过，而限制无用的频谱分量（如噪声、信号的谐波及边带）的通过^[34~35]。

实际滤波器可以是电感、电容的单独使用，也可能是电感、电容及电阻混合使用，所以从结构上来分有 C 型、T 型、L 型、 π 型甚至更复杂的多级滤波电路形式。实际应用中应尽量采用结构简单的滤波器。这是因为按照网络理论，复杂电路结构形式的滤波器往往存在多个零点和多个极点，使用不当则易降低设备的工作稳定性。

L 型滤波器是最为常用的一种滤波器，它有两种基本结构^[36]，如图 5-1 所示。射频电源选用第二种结构的 L 型滤波器，因为它特别适用于将穿心电容安装在接地金属壳体壁、电感安装在金属壳体内部的最为有效地抑制噪声的方法。

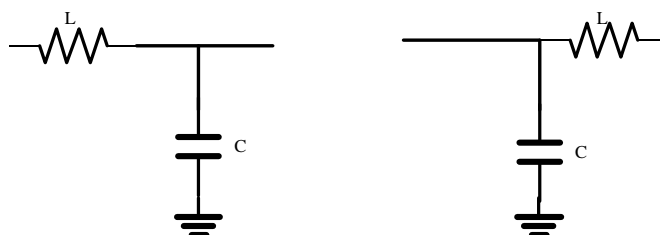


图 5-1 L 型滤波器

5.1.2 低通滤波器的设计

射频电源工作时，电子管屏极电压是 10000V DC 与 81.36MHz 的射频电磁波的叠加，另外，直流高压中还存在频率远远低于 81.36MHz 但不能忽视的高次谐波噪声信号。所以应该采用两级级联结构的低通滤波器来抑制不同波段的干扰信号，保证直流高压中没有干扰噪声。电子管灯丝加热电路只用一个 380V 转 7.2V 变压器，所以滤波器不需要和屏极那样复杂，只用一级低通滤波器抑制射频噪声就足够了。栅极 PWM 波控制电路的脉冲调制信号频率是 50kHz，射频电源工作时在栅极端存在 81.36MHz 的射频电磁波，所以栅极电路的滤波器应该选用带阻滤波器，让 50kHz 脉冲调制信号通过的同时，滤掉射频电源产生射频电磁波干扰，但是实际上由于 81.36MHz 远大于 50kHz，所以栅极滤波器仍然可以用一个低通滤波器来替代。

使用归一化法来设计低通滤波器：第一步，归一化；第二步，确定响应曲线；第三，确定极点所需数目 N；第四步，制作一个归一化滤波器^[37~38]。

(1) 屏极直流高压供电电路两级级联低通滤波器。第一级 f_{3dB} 设为 50MHz，在频率为 81.36MHz 的时有 15dB 衰减，根据式 5-1 求解归一化频率 A_{s1} 。

$$A_{s1} = f_{65dB} / f_{3dB} = 81.36MHz / 50MHz \approx 2 \quad (5-1)$$

根据归一化频率的衰减图可知在归一化频率等于 2 时 N=2 可以达到 15dB 的要求，根据巴特沃思滤波器元件参数表可知 $g_1 = g_2 = 1.4142$ ，然后根据式 5-2 和式 5-3 求解实际电容值 C_1 和电感值 L_1 。

$$C_1 = g_1 / [2\pi f_{3dB} R_L] = 1.4142 / [2 \times 3.14 \times (50MHz) \times (50\Omega)] \approx 0.1nF \quad (5-2)$$

$$L_1 = (R_L \times g_2) / 2\pi f_{3dB} = [(50\Omega) \times (1.4142)] / [2 \times 3.14 \times (50MHz)] \approx 0.2\mu H \quad (5-3)$$

第二级 f_{3dB} 设为 4MHz，在频率为 50MHz 的时有 40dB 衰减，根据式 5-4 求解归一化频率 A_{s2} 。

$$A_{s2} = f_{65dB} / f_{3dB} = 50MHz / 4MHz \approx 13 \quad (5-4)$$

根据归一化频率的衰减图可知在归一化频率等于 13 时 N=2 可以达到 40dB 的要求，根据巴特沃思滤波器元件参数表可知 $g_1 = g_2 = 1.4142$ ，然后根据式 5-5 和 5-6 求解实际的

电容值 C_2 和电感值 L_2 。

$$C_2 = g_1 / [2\pi f_{3dB} R_L] = 1.4142 / [2 \times 3.14 \times (4\text{MHz}) \times (50\Omega)] \approx 1.0\text{nF} \quad (5-5)$$

$$L_2 = (R_L \times g_2) / 2\pi f_{3dB} = [(50\Omega) \times (1.4142)] / [2 \times 3.14 \times (4\text{MHz})] \approx 3.0\mu\text{H} \quad (5-6)$$

(2) 栅极电路低通滤波器: f_{3dB} 设为 7.0MHz, 在频率为 81.36MHz 的时有 40dB 衰减, 根据式 5-7 求解归一化频率 A_{s3} 。

$$A_{s3} = f_{65dB} / f_{3dB} = 81.36\text{MHz} / 7\text{MHz} \approx 11.6 \quad (5-7)$$

根据巴特沃思滤波器元件参数表可知 $g_1 = g_2 = 1.4142$, 然后根据式 5-8 和 5-9 求解实际的电容值 C_3 和电感值 L_3 。

$$C_3 = g_1 / [2\pi f_{3dB} R_L] = 1.4142 / [2 \times 3.14 \times (7\text{MHz}) \times (50\Omega)] \approx 0.6\text{nF} \quad (5-8)$$

$$L_3 = (R_L \times g_2) / 2\pi f_{3dB} = [(50\Omega) \times (1.4142)] / [2 \times 3.14 \times (7\text{MHz})] \approx 1.6\mu\text{H} \quad (5-9)$$

(3) 灯丝供电电路低通滤波器: f_{3dB} 设为 20.0MHz, 在频率为 81.36MHz 有 30dB 衰减, 根据式 5-10 求解归一化频率 A_{s4} 。

$$A_{s4} = f_{65dB} / f_{3dB} = 81.36\text{MHz} / 20\text{MHz} \approx 4.0 \quad (5-10)$$

根据巴特沃思滤波器元件参数表可知 $g_1 = g_2 = 1.4142$, 根据式 5-11 和 5-12 求解实际的电容值和电感值。

$$C_4 = g_1 / [2\pi f_{3dB} R_L] = 1.4142 / [2 \times 3.14 \times (20\text{MHz}) \times (50\Omega)] \approx 0.23\text{nF} \quad (5-11)$$

$$L_4 = (R_L \times g_2) / 2\pi f_{3dB} = [(50\Omega) \times (1.4142)] / [2 \times 3.14 \times (20\text{MHz})] \approx 0.56\mu\text{H} \quad (5-12)$$

虽然计算出了滤波器的电容值和电感值, 但是并没有考虑实际电路应该满足的工作电压、工作电流等条件。特别是滤波电容器的选择, 射频低通滤波器的电容选用穿心电容 (5.2 节将会详细讲述), 要保证电容器具有很小的电容值且必须满足耐高压的条件, 对于实际穿心电容的要求比较苛刻, 所以通过调整电容值的大小来满足实际滤波的要求, 同时又能在高压电路中正常的工作。

屏极两级级联低通滤波器如图 5-2 所示, 两个滤波电容的值均选为 1nF; 栅极低通滤波器如图 5-3 所示, 其滤波电容的值也选择为 1nF; 灯丝阴极低通滤波器如图 5-4 所

示，其滤波电容的值近似为 1nF 。

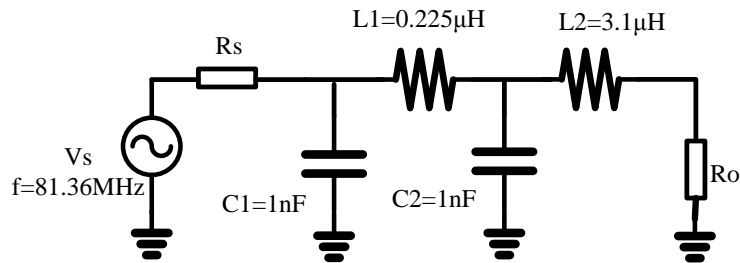


图 5-2 屏极高压供电电路低通滤波器

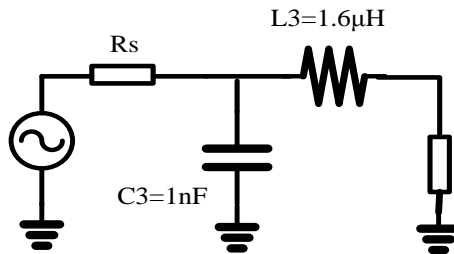


图 5-3 栅极驱动调制电路低通滤波器

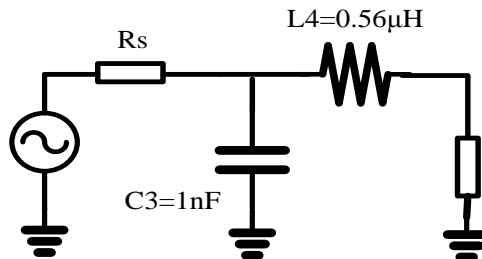


图 5-4 灯丝供电电路低通滤波器

5.1.3 低通滤波器的仿真

根据已经设计好的射频低通滤波器的实际参数进行建模仿真。在仿真软件中选用的元器件均是没有任何寄生电感和寄生电容的理想元器件，所以是对实际射频低通滤波器理想工作情况的仿真。虽然是理想工作情况的仿真，但是仍然可以对实际滤波器的工作情况提供很好的认识和指导。使用 Multisim11 仿真软件对三个低通滤波器分别进行仿真，源电阻 R_s 为 50 欧姆，负载电阻 R_o 取值为 50 欧姆，示波器红线通道检测输入信号的幅值和频率，绿线通道检测经滤波后的输出信号。可通过式 5-13 求得衰减抑制比 S ，单位 dB。

$$S = 20\lg\left(\frac{V_{in}}{V_{out}}\right) \quad (5-13)$$

(1) 如图 5-5 所示，是屏极高压供电电路的仿真电路及仿真结果，根据右侧的仿真结果可知，噪声信号经过滤波器前后的峰值大小分别是 1.414V 和 28.28μV，根据衰减比公式，可以计算出衰减比等于 $20\lg(1.414/28.28 \times 10^{-6}) \approx 94dB$ 。

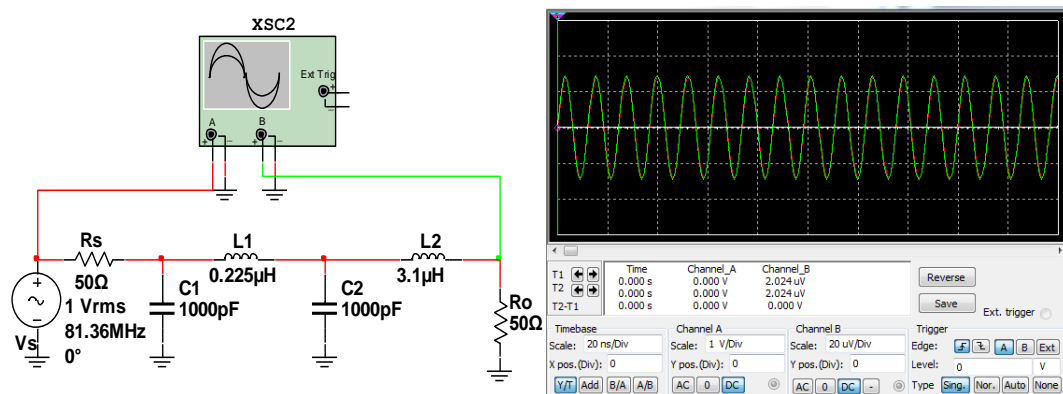


图 5-5 屏极电路低通滤波仿真电路与仿真结果

(2) 阴极灯丝供电电路的仿真电路及仿真结果，如图 5-6 所示，根据右侧的仿真结果可知，噪声信号经过滤波器前后的峰值大小分别是 1.414V 和 10mV，可以计算出衰减比等于 $20\lg(1.414/10 \times 10^{-3}) \approx 43dB$ 。

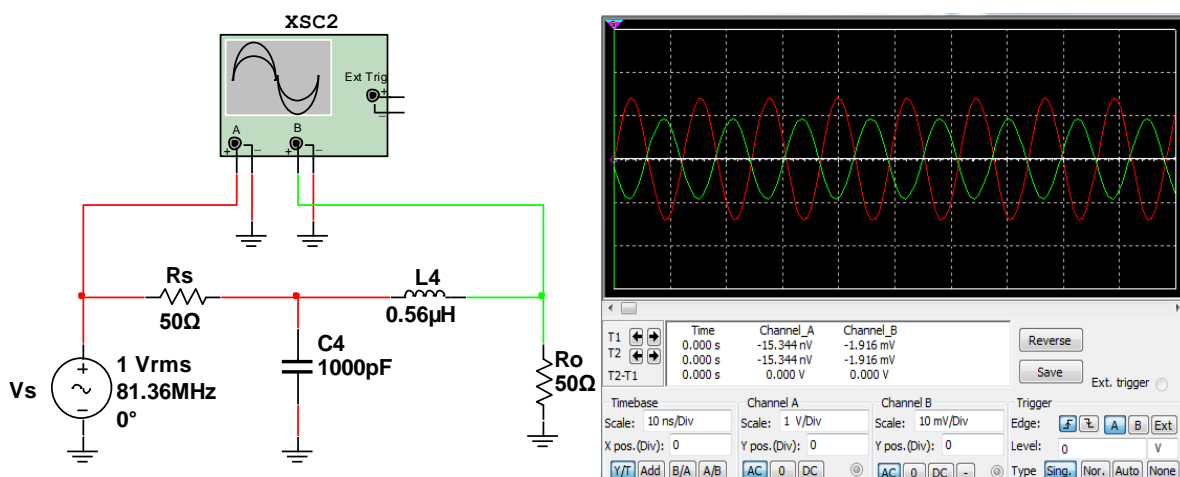


图 5-6 灯丝供电电路低通滤波电路仿真电路与仿真结果

(3) 栅极 PWM 调制电路低通滤波器的仿真电路及仿真结果，如图 5-7 所示，根据右侧的仿真结果可知，噪声信号经过滤波器前后的峰值大小分别是 1.414V 和 2.6mV，

可以计算出衰减比等于 $20\lg(1.414/2.6 \times 10^{-3}) \approx 55\text{dB}$

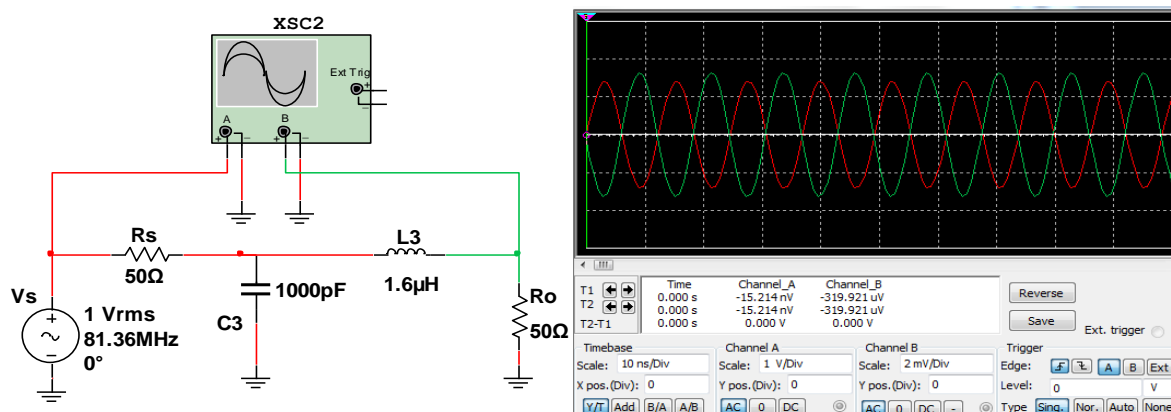


图 5-7 栅极 PWM 调制电路低通滤波仿真电路与仿真结果

补充 PWM 信号通过低通滤波器的仿真，其仿真电路和仿真结果如图 5-8 所示，由仿真波形可以看出 50kHz 的 PWM 信号波形没有失真，只是因为电阻分压的原因幅值衰减了一半。

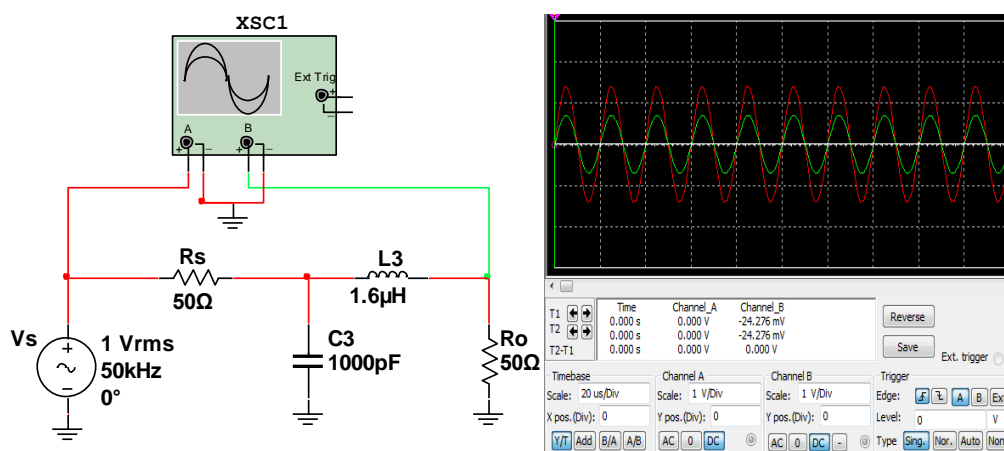


图 5-8 PWM 信号通过栅极低通滤波器仿真电路和仿真结果

5.2 射频滤波电容器的选择

射频滤波电路对电容器的要求具有特殊的条件和限制，一是不能因为寄生电感过大而在 80MHz 波段引起串联谐振，二是要满足插入电路的基本条件。

5.2.1 穿心电容的特点

射频电源需要低通滤波器抑制几十至几百 MHz 的噪声，按照传统方式和传统元器

件构造的滤波器不能成为射频滤波器，这是由于两个原因：

- (1) 旁路电容寄生电感较大，容易形成串联谐振，导致电容器在较高的频率并不具有较低的阻抗，起不到旁路的作用；
- (2) 滤波器输入端和输出端之间的杂散电容导致高频干扰信号耦合，使滤波器对高频干扰失去作用。

解决这两个问题的方法是用穿心电容作为旁路电容，穿心电容实质上是一种三端电容，一个电极与芯线相联，另一个电极与外壳相联。使用时，一个电极通过焊接或螺装的方式直接安装在金属面板上，需要滤波的信号线连接到芯线两端^[39]。穿心电容的滤波范围可以达到数 GHz 以上，而且，穿心电容的工作电流和工作电压也可以很高。之所以具有这样的特性，是因为影响滤波器高频特性的两个因素全部得到了解决：

- (1) 接地电感小。因此，在高频时，能够提供很好的旁路作用；
- (2) 输入输出没有耦合：用于安装穿心电容的金属板起到了隔离板的作用，使滤波器的输入端和输出端得到了有效隔离，避免了高频时的耦合现象。

通常所讲的穿心电容器是一种 C 型结构的馈通滤波器。馈通滤波器（也叫 feed through filter 穿越式 EMI 滤波器）还有其它的类型结构，L 形（一个穿心电容加一个电感）、T 形（两个电感加一个穿心电容）、 π 形（两个穿心电容加一个电感）等，都是将穿心电容与电感组合在一起构成的，所以穿心电容器是射频抗干扰滤波器的核心器件^[40]。但是值得注意的是，穿心电容和电感一起使用时，必须将穿心电容安置在电源金属屏蔽箱体壁上，而电感则放置在电源的内部，这样的结构设计的优点是，用穿心电容隔离大部分的噪声信号，再用电感来滤波。

5.2.2 穿心电容的选择

屏极直流高压供电电路的穿心电容，第一级穿心电容选择了 TDK 公司生产的 FD-20AU 穿心电容，如图 5-9 所示，第二级穿心电容选择了 VISHAY 公司生产的 DB 050180，如图 5-10 所示，参数如表 5-1 所示。耐压值均是 20kV，是因为屏极直流电源的电压值是 10000V，而电子管屏极电压是 10000V 直流高压和峰峰值等于 9kV 的射频余弦电磁波的叠加，两者均小于 20kV，满足电路的实际参数。



图 5-9 FD-20AU 穿心电容



图 5-10 DB 050180 穿心电容

表 5-1 屏极两级低通滤波器穿心电容参数

	电容值 pF	耐压值 kV _P	耐功率值 kVA _r	耐电流值 A _{RMS}
FD-20AU	1000±10%	20	60	30
DB 050180	1000±20%	20	70	50

灯丝供电电路选择了 VISHAY 公司生产 HR 30 系列的 R 6000 型号的穿心电容, 如图 5-11 所示, 它的基本参数是, 耐压值 2.8kV_p, 电容值 1000pF (-20+50%)。这种穿心电容又叫做叠层穿心电容, 其中心圆孔的直径达到 12mm, 可以穿过非常粗的导线, 用来通大电流, 所以这种穿心电容是专门设计为有大电流通过又必须滤掉高频噪声的场合。R 6000 满足通 140A 交流电流的要求, 同时 5pF 的电容值又可以滤出射频噪声。



图 5-11 R 6000 穿心电容

栅极接入射频电源处的穿心电容, 选择了 VISHAY 公司生产的 DB 016060, 如图 5-12 所示, 其参数如表 5-2 所示。耐压值 3kV, 而栅极调制驱动电路的偏置电压是-218V, 3kV 远远大于这个值, 满足实际电路要求。



图 5-12 DB 016060 穿心电容

表 5-2 VISHAY DB016060 参数

	电容值 pF	耐压值 kV _P	耐功率值 kVA _r	耐电流值 A _{RMS}
DB 016060	1000±20%	3	7.5	5

5.3 射频滤波电感的设计

可以被应用在射频滤波电路的电感主要有空芯线圈和铁氧体材料两类^[40]。空芯线圈也称为圆形螺旋线圈（round helical coil）或中空线圈（air-wound coil）；铁氧体材料绕上几匝线圈便构成了一个电感。

5.3.1 空心线圈电感

普通线圈式电感器，具有同样体积和匝数的开路磁芯电感比空气芯电感有大得多的电感量和 Q 值，闭路磁芯情况会更好。电感器的一个重要特性是产生杂散磁场和对杂散磁场敏感。空气芯或开路磁芯电感器最容易引起干扰，因为其磁通从电感器扩展到相当大的距离。就对磁场的敏感度而言，磁芯电感器比空气芯电感器敏感得多，而开路磁芯是最敏感的，因为磁芯（低磁阻通路）集中了外部磁场并引起更多的磁通流过线圈。

空心线圈种类有最简单的单回路线圈（用于超高频），也有绕在非磁性芯子的大线圈。空心电感用于要求高品质因数的高品质的高频电路中，因为它不会产生损耗与失真，而磁性电感由于磁滞和涡流的存在会产生比较大的损耗和失真。由于无磁芯，电感值较小。主要应用于射频。单层线圈电感具有几个突出优点，制作简单方便、价格便宜、结构灵活多变，可根据实际具体要求进行合理的设计。屏极两级滤波电路的电

感器就选用单层线圈电感，灯丝阴极加热电路的电感器也选用单层线圈电感。

在电磁学教科书中，空芯线圈中的电感量按式 5-14 计算^[41]。空芯线圈示意图如图 5-13 所示。

$$L = \frac{\mu_0 \cdot n^2 \cdot \pi \cdot a^2}{b} K_N \quad (5-14)$$

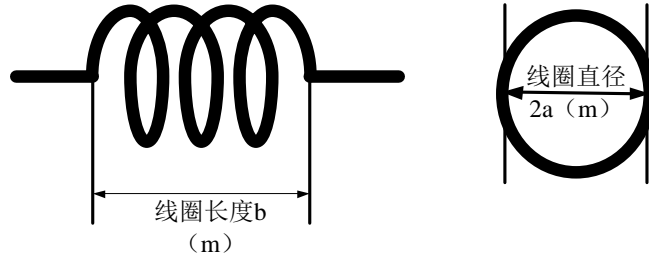


图 5-13 空芯线圈示意图

(1) $2a \leq b$ 的场合

$$L = \frac{\pi \mu_0 n^2 a^2}{b} \left[\frac{1 + 0.338 \left(\frac{4a^2}{b^2} \right) + 0.017 \left(\frac{4a^2}{b^2} \right)^2}{1 + 0.259 \left(\frac{4a}{b^2} \right)} - \frac{8a}{3\pi b} \right] \quad (5-15)$$

(2) $2a > b$ 的场合

$$L = \mu_0 n^2 a \left\{ \left[\ln \left(\frac{8a}{b} \right) - 0.5 \right] \times \frac{1 + 0.338 \left(\frac{b^2}{4a^2} \right) + 0.017 \left(\frac{b^2}{4a^2} \right)^2}{1 + 0.259 \left(\frac{4a}{b^2} \right)} + 0.094 \left(\frac{b^2}{4a^2} \right) + 0.001 \left(\frac{b^2}{4a^2} \right)^2 \right\} \quad (5-16)$$

$$K_N = \frac{\left(\frac{b\sqrt{4.0a^2 - b^2}}{a^2} \right) \left[F(k) - E(k) \right] \left(\frac{4\sqrt{0.4a^2 - b^2}}{b} \right) E(k) - \frac{b}{3.14}}{3.14} \quad (5-17)$$

其中， $k = 2.0a / \sqrt{4.0a^2 - b^2}$

式中， $F(k)$ 为第一类完全椭圆积分； $E(k)$ 为第二类完全椭圆积分； b 为线圈长度； $2a$ 为线圈直径； N 为线圈匝数； μ_0 为真空导磁率。 K_N 为长冈系数。实际设计空芯线圈时，一般采用式 5-2 和式 5-3 中所给出的公式可直接得到的电感量的计算公式。但实际应用中，这个公式过于复杂，可以将其简化。

式 5-14 可以简化为：

$$L = \frac{0.01 \times 2a \times N^2}{b/2a + 0.44} \quad (5-18)$$

其中：电感量 L 单位，微亨；线圈直径 $2a$ 单位，cm；线圈长度 b 单位，cm；线圈匝数 N 单位，匝。

计算空心线圈的匝数。由于射频电源的外部接地壳的可见有限，导致空心线圈电感的尺寸要按照射频电源箱内部空间的大小来设计，屏极滤波线圈电感、灯丝阴极滤波线圈电感的尺寸如表 5-3 所示。

表 5-3 线圈电感的尺寸

线圈电感	线圈直径	线圈长度	导线直径
屏极初级线圈电感 L_1	18mm	8mm	2mm
屏极次级线圈电感 L_2	460mcm	780mm	4mm
栅极线圈电感 L_4	350mm	370mm	6mm

根据式 5-18 依次计算每个线圈电感的匝数：

$$N_1 = \sqrt{\frac{b/2a + 0.44}{0.01 \times 2a} L_1} = \sqrt{\frac{1.0/1.8 + 0.44}{0.01 \times 1.8} \times 0.22} \approx 3.4 \quad (5-19)$$

$$N_2 = \sqrt{\frac{b/2a + 0.44}{0.01 \times 2a} L_2} = \sqrt{\frac{7.8/4.6 + 0.44}{0.01 \times 4.6} \times 3.0} \approx 12 \quad (5-20)$$

$$N_4 = \sqrt{\frac{b/2a + 0.44}{0.01 \times 2a} L_4} = \sqrt{\frac{3.7/3.5 + 0.44}{0.01 \times 3.5} \times 0.56} \approx 5 \quad (5-21)$$

最终所设计的屏极初级线圈电感如图 5-14 所示，屏极次级线圈电感如图 5-15 所示，灯丝阴极线圈电感如图 5-16 所示。



图 5-14 屏极初级滤波电感



图 5-15 屏极次级滤波电感



图 5-16 灯丝阴极滤波电感

5.3.2 铁氧体材料

铁氧体材料特性参数主要包括静特性、初始导磁率、居里温度、损耗、电阻率等方面^[42~44]，是选择合适的射频铁氧体必须考虑的因素。主流铁氧体材料有 Ni-Zn 铁氧体和 Mn-Zn 铁氧体。

(1) 软磁铁氧体的损耗

软磁铁氧体材料的损耗主要由涡流损耗、磁滞损耗、剩余损耗三种损耗组成。

(2) 电感因数 A_L

电感因数定义为具有一定形状和尺寸的磁芯上每一匝线圈产生的电感量，表达式如 5-21 所示。

$$A_L = \frac{L}{N^2} \quad (5-22)$$

式中 L 为装有磁芯的线圈的电感量 (H)， N 为线圈匝数。电感因数单位是 nH/T^2 。

(3) 电阻率

Mn-Zn 铁氧体电阻率是 $10^{-3}\Omega\cdot m$ ，Ni-Zn 铁氧体的电阻率是 $30\Omega\cdot m$ 。由于在晶体中有一个绝缘层，使得电阻率变大，实际 Mn-Zn 铁氧体和 Ni-Zn 铁氧体的电阻率分别是： $0.1\sim 10\Omega\cdot m$ ， $10^4\sim 10^6\Omega\cdot m$ 。另外，铁氧体的电阻率并不是固定不变的，很容易受温度和工作频率的影响，当温度达到 $100^\circ C$ ，Mn-Zn 铁氧体的电阻率下降到 $1\Omega\cdot m$ ，Ni-Zn 铁氧体的电阻率在 $10^5\Omega\cdot m$ ；频率达到 100MHz 时，Mn-Zn 铁氧体的电阻率只有 $0.01\Omega\cdot m$ ，Ni-Zn 铁氧体则下降到 $10^3\Omega\cdot m$ ^[45~49]。

5.3.3 磁芯选择

(1) 磁芯材料的选择

软磁铁氧体特点是高频损耗非常大。当导线穿过铁氧体磁芯时，所构成的电感阻抗虽然在形式上是随着频率的升高而增加，但在不同频率上，其机理是完全不同的。低频：阻抗由电感的感抗构成。在低频，磁芯的磁导率较高，因此电感量较大，并且这时磁芯的损耗较小，整个器件是一个低损耗、高 Q 特性的电感，这种电感容易造成谐振。高频：阻抗由电阻成分构成。随着频率的升高，磁芯的磁导率降低，导致电感

的电感量减小，感抗成分减少。但是，这时磁芯的损耗增加，电阻成分增加，导致总的电阻增加。当高频信号通过铁氧体时，电磁能量以热的形式耗散掉。

Ni-Zn 铁氧体在射频波段由于其特性具有明显的优势^[40~42]。栅极电路的直流偏置电流达到 2.3A，需要抑制的噪声频率接近 100MHz，并且靠近电子管灯丝温度会比较高，在这样高温、高频的环境中铁氧体的损耗非常大并以热量的形式耗散掉，这种耗散主要是涡流损耗。材料的电阻率成为能否被应用在栅极电路的关键参数，Mn-Zn 铁氧体在栅极电路中的电阻率下降到 $0.01\Omega\cdot m$ ，Ni-Zn 铁氧体的电阻率则保持在 $10^3\Omega\cdot m$ ^[43]。所以，必须选择 Ni-Zn 铁氧体作为栅极电路的滤波电感，Mn-Zn 铁氧体很快就会因为电阻率过低持续高温加热而烧坏。

(2) 磁芯结构的选择

铁氧体磁芯的结构有很多种，不同的结构有着不同的用途，电路中做滤波用途的磁芯一般选择环形磁芯，因为环形磁芯易于缠绕导线，也方便安装，且价格便宜。

(3) 磁芯尺寸和线圈匝数的选择

为限流电感器选择磁芯时，必须考虑到两个设计参数：直流偏置电感与直流电流。可通过按下述步骤来选择磁芯尺寸和绕组匝数。

1) 计算产品的 LI^2 ，其中：L 是直流偏置下的电感值（单位 mH ），I 是直流电流（单位 A）

2) 在磁芯选型图上找到相应的 LI^2 值。按照该坐标，选中第一个磁芯尺寸，它位于磁导率对角线的上方。这时可选用的最小磁芯尺寸。

3) 磁导率线按标配磁芯磁导率进行分段。选择电感因子和直流偏置性能搭配最均衡的磁导率值。

4) 已知电感、磁芯尺寸和磁导率。可按以下步骤计算绕组匝数：

选定磁芯尺寸和绕组匝数是否达到下述设计要求：直流偏置的最小电感值为 $8.5\mu H$ ；直流电流值为 2.3A

$$1) \quad LI^2 = 8.5 \times 10^{-3} \times 2.3^2 \approx 0.045 mH \cdot A^2$$

2) 通过 MPP 的 LI^2 图，水平轴上的数值选定为 $0.045 mH \cdot A^2$ 。按照对应的纵坐标，

即可知道 TN36/23/15 满足上述要求的最佳选择。

3) 通过磁芯数据, 可发现该磁芯的电感因子 A_L 为 $170 \pm 25\% \text{ nH/T}^2$ 。该磁芯的最小 A_L 值为 127.5 nH/T^2 。

4) 为在空载条件下得到 $8.5 \mu\text{H}$, 匝数应为 5, 如图 5-17 所示。



图 5-17 TN36/23/15-Ni-Zn 铁氧体线绕电感

但是 4C65 的导磁率会随着频率的升高而降低, 当工作频率达到 80 MHz 时, 其导磁率由 125 下降到 40, 如图 5-18 所示, 相应的 A_L 值也会下降, 由 $8.5 \mu\text{H}$ 下降到大约 $2 \mu\text{H}$ 左右。

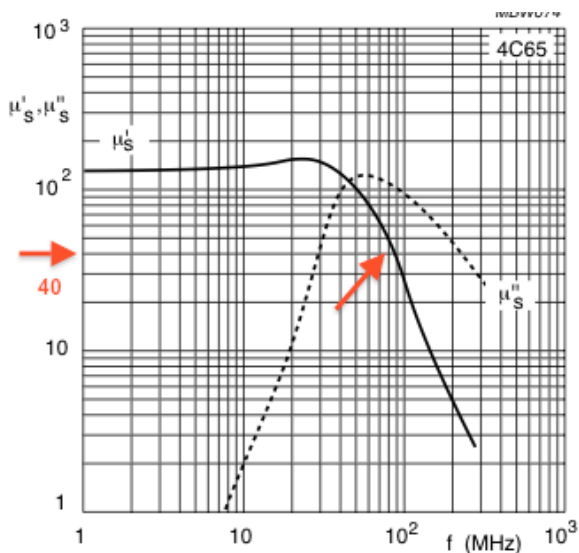


图 5-18 4C65 材料的导磁率随频率的变化

5.4 铁氧体磁芯实验

射频电源中的滤波器件安装好之后, 穿心电容和线圈电感都很容易满足电路的需

要而发挥良好的滤波作用，但是栅极调制电路的铁氧体磁芯在插入到电路之后则需要考虑多种因素。所以对栅极铁氧体磁芯进行相关的性能测试实验非常重要。

5.4.1 滤波器的安装

使用射频滤波器时最重要的是要保证滤波器良好接地，使用穿越式滤波器时要确保滤波器与屏蔽机箱有良好的接触。滤波器的安装方法和工艺同样直接影响到滤波器的使用效果。安装时，一般应遵循以下原则：

- (1) 选择适当的安装位置，一般地说电源滤波器应安装在设备或屏蔽壳体的入口处；
- (2) 必要的情况下，应对滤波器加以屏蔽，其壳体与滤波器的地线相连。若设备具有金属外壳，则要求滤波器壳体与设备金属外壳良好搭接，并尽可能靠近设备壳体的接地点；
- (3) 滤波器内部的各种引线（包括地线）及外部引线都应尽量短，以免在线上耦合干扰，尤其要避免非屏蔽引线过长且暴露在强的电磁场中；
- (4) 避免滤波器内部各电感、电容之间的不恰当耦合；
- (5) 避免滤波器外部引线之间的耦合，一般要求其输入、输出两组引线不在同一侧引出，必要时在两组引线之间再加入屏蔽隔离层。

5.4.2 铁氧体磁芯实验

保持穿心电容和线圈电感稳定工作不需要考虑许多外界条件的限制，因此不需要对它们进行性能测试。但是栅极 PWM 调制驱动电路中的磁芯电感，除了需要考虑耐电流值、耐电压值，还必须考虑温度、损耗、PWM 信号不失真等。铁氧体的温度不能超过材料的居里温度；滤波效果包含两个方面，消耗射频电磁波的同时不失真地通过频率为 50kHz 的 PWM 调制信号；损耗的大小直接关系到温度的高低，在电阻率一定的情况下，损耗受频率的大小和直流偏置电流的大小影响。所以，测试铁氧体在电路中的温度和滤波特性至关重要。

栅极调制驱动电路中选用的是原 Philips 公司生产的 4C65 材料的 Ni-Zn 铁氧体磁环，尺寸 36mm×23mm×14mm，分别对应外径、内径、高度，居里温度为 350°C。将其

放在实际电路中时，考虑到加大散热面积，在保持电感量不变的前提下尽可能地减少绕线匝数，所以将两个磁环同轴叠加粘合在一起使用，绕上 5 匝线圈，用 MASTECH MY6243 数字电容/电感表测量它的电感值，为 $9\mu\text{H}$ ，比理论值 $8.5\mu\text{H}$ 略大一些。将绕有 5 匝线圈的 TN36/23/15-4C65 铁氧体磁环放置在滤波电路中，开启板条激光器，观察栅极电路的波形。

(1) 测试 TN36/23/15-4C65 的滤波效果和温度特性

激光头内气压 157.0hPa ，连续增加占空比，激光器工作情况如表 5-4 所示，激光功率单位 kW。

表 5-4 激光输出功率和占空比的关系

占空比	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	85%
激光功率	0.48	0.80	0.97	1.24	1.43	1.58	1.70	1.83	1.86

可以看出激光器能够稳定地工作，随着栅极调制信号占空比的增加，激光功率表现出良好的递增效果。用示波器观察栅极电流大小，图 5-19 至图 5-23 是不同占空比时对应的栅极电流波形。

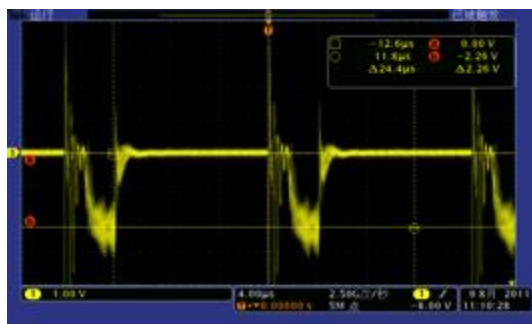


图 5-19 占空比 10%，栅极电流的波形

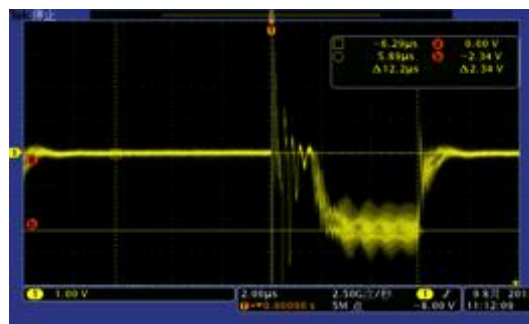


图 5-20 占空比 30%，栅极电流的波形

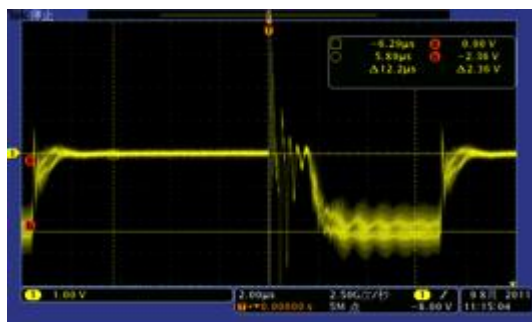


图 5-21 占空比 50%，栅极电流的波形

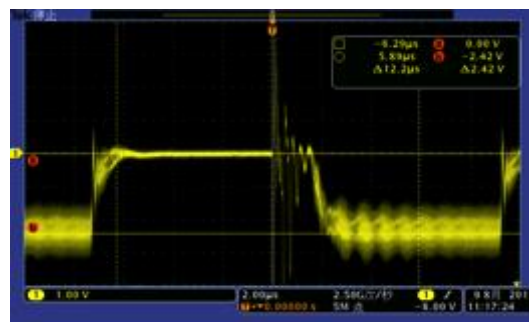


图 5-22 占空比 70%，栅极电流的波形

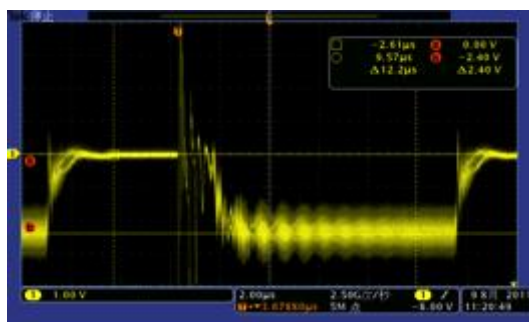


图 5-23 占空比 85%，栅极电流的波形

通过观察栅极电流波形可知，不论是低占空比还是高占空比，绕 5 匝线圈的 TN36/23/15-4C65 铁氧体磁环滤波效果都非常理想。不仅有效地滤掉了射频噪声信号，而且让频率为 50kHz 的 PWM 信号无衰减的通过。

测试 TN36/23/15-4C65 的温度特性。保持 PWM 调制信号的占空比在 80%，板条激光器工作连续工作一个小时之后，关闭激光器及时取下磁芯电感，测量磁芯的表面温度，大约在 70°C，可以用手触摸并不会感觉到烫。

对 TN36/23/15-4C65 的滤波特性和温度特性的实验结果说明 TN36/23/15-4C65 铁氧体磁环在栅极电路中良好工作，温度特性良好，滤波特性良好。

(2) 对比实验

北京七星电子公司生产的 TN36/23/15-R8H 锰锌铁氧体磁环，绕 2 匝线圈。

表 5-5 激光输出功率和占空比的关系

占空比	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	85%
激光功率(kW)	0.38	0.63	0.83	1.15	1.43	1.61	1.68	1.80	1.86

用示波器观察栅极电流大小，图 5-24 至 5-28 是不同占空比时对应的栅极电流波形。

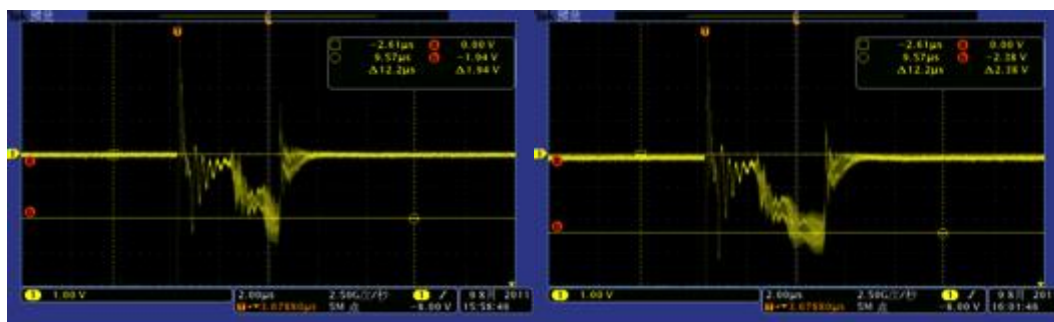


图 5-24 占空比 20%时，栅极电流的波形

图 5-25 占空比 30%，栅极电流的波形

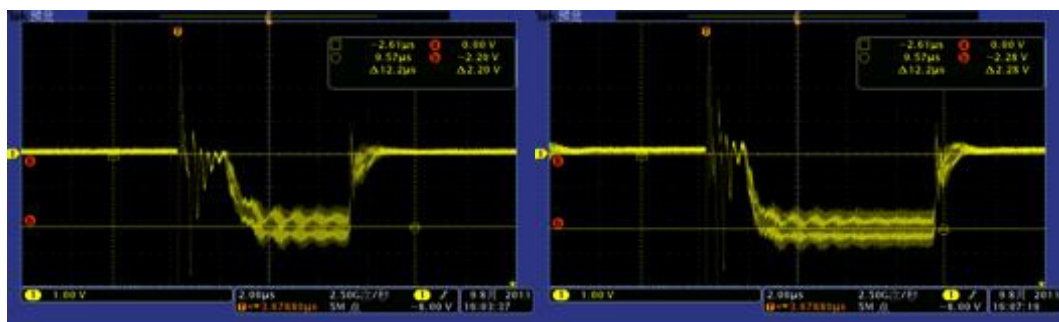


图 5-26 占空比 50%，栅极电流的波形

图 5-27 占空比 70%，栅极电流的波形

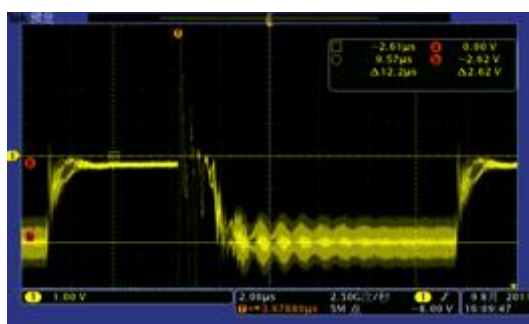


图 5-28 占空比 85%时，栅极电流的波形

TN36/23/15-R8H 铁氧体绕 5 匝线圈时，由于电感值过大，对 PWM 波阻抗过大，导致栅极调制信号被严重衰减，因此激光器维持时放电不均匀。绕 3 匝线圈的 TN36/23/15-R8H 铁氧体与绕 5 匝的 TN36/23/15-Ni-Zn 铁氧体相比较：低占空比($<50\%$)时，栅极电流幅值明显要小，因此输出光功率明显降低，比较图 3-和图 3-可以明显看出，输出功率下降了 150W 左右；信号失真方面，低占空比时，信号的下降沿失真比严重，说明 TN36/23/15-R8H 铁氧体磁芯在吸收 81.36MHz 射频电磁波的同时，将相当一部分的 PWM 调制信号也滤掉了。

测试 TN36/23/15-R8H 的温度特性。保持占空比 50%，激光器持续工作，激光输出功率随时间的变化如表 5-6 所示，测试 TN36/23/15-R8H 磁芯的温度性能。

表 5-6 连续工作 35 分钟，激光器输出功率随时间的变化

时间（分钟）	0	5	10	15	20	25	30	35
激光功率(kW)	1.44	1.43	1.42	1.41	1.41	1.41	1.41	1.40

激光器连续工作 35 分钟之后，取下绕有 2 匝线圈的 TN36/23/15-R8H 铁氧体磁芯，发现磁芯的温度非常高，根本无法用手去触摸，观察磁芯表面发现局部已经被烧成黑

色,要经过相当长的一段时间才能完全冷却下来。由于工作频率达到 81.36MHz, Mn-Zn 铁氧体的电阻率急剧下降,导致涡流损耗过大,正如前面分析的结果, Mn-Zn 铁氧体的确不能作为射频电源的滤波器件使用。

5.5 本章小结

由于射频电源中存在传导干扰,射频电源的射频噪声会通过电源线、信号线传入到大地,大地中的其它噪声也可能通过电源线进入到射频电源中,前者传导干扰会影响其它电力电子设备的工作,后者将影响射频电源的正常工作,所以抑制这两种可能存在的传导干扰是满足电磁兼容要求、保证电力电子设备正常工作的必要条件,抑制传导干扰的最有效的措施就是在相应的电路中插入滤波器。射频电源中的滤波器设计,采用最常用的 L 型低通滤波器,它由一个电容器和一个电感器组成。普通电容器由于寄生电感很大容易引起自谐振,所以常用的电容器无法作为射频滤波器件。对于射频电源中的屏极应该采用两级级联的 L 型滤波器,因为屏极直流高压电路中不仅存在射频电源产生的射频电磁波噪声,而且还存在直流高压产生电路所引起的高次谐波噪声。射频电源中的电容器应该具有接地电感小以及没有输入输出耦合的特点,所以在射频电源中选用穿心电容,根据射频电源发生器的具体电路参数选择相应的穿心电容滤波器,屏极两级滤波器分别是 TDK 公司的 FD-20AU, VISHAY 公司的 DB 050180,电容值均是 1000pF,耐压值均是 20kV。栅极穿心电容, VISHAY 公司的 DB 016060。灯丝阴极穿心电容, VISHAY 公司的 R 6000,耐电流值 150A。

6 总结和展望

本文主要对高功率射频板条 CO₂ 激光器存在的空间射频辐射和射频电源电路中存在的传导干扰进行了相关的详细研究。

6.1 总结

通过分析板条激光器结构和原理，得出了射频电磁辐射污染的存在的潜在可能性和主要来源。进一步针对射频电磁辐射和传导干扰分别进行了相应的屏蔽措施和抑制措施。

采用“简易点测”法对板条激光器的周围空间，容易引起射频电磁波泄露的射频电源封盖周围缝隙以及激光头透视窗口进行了射频电磁辐射检测。检测结果表明射频板条激光器存在严重的电磁辐射泄露，进一步分析其中的原因，通过去铜板的绝缘层之后，射频电源的射频电磁波的泄露大大降低，射频辐射强度在 200mW/m^2 左右。另外，针对激光头透视窗口的射频电磁波泄露，采用铜网进行屏蔽，屏蔽效能达到 70dB；为了保护工作电路板的免受射频辐射的干扰，用厚度为 2.8mm 铝壳体将它们屏蔽起来。对于板条激光器整机的屏蔽，设计了两个对称的钢板将整个板条激光器包裹起来，最终实现了板条激光器 0 辐射的标准。

针对射频电路中存在的射频传导干扰，设计低通滤波器进行抑制，而射频滤波器件则选择穿心电容、线圈电感、Ni-Zn 铁氧体磁芯。屏极高压宫殿电路插入两级级联的低通滤波器，其衰减值可达 80dB，

6.2 展望

虽然本文针对高功率射频板条 CO₂ 激光器的电磁辐射污染进行了详细的研究，但是仍然存在许多值得提高和改进的地方。

- (1) 详细地检测板条激光器空间电磁辐射的场强分布，并将分布图形化、形象化；
- (2) 将激光头的透视窗口的尺寸尽可能地减小，并将塑料板改为防辐射玻璃，从而达到减少射频电磁波的泄露；

- (3) 使用阻抗分析仪准确测量线圈电感的静态电感值及相关参数以及频率达到 80MHz 左右时的电感值及相关参数；
- (4) 使用阻抗分析仪检测检测缠绕 5 匝线圈的 Ni-Zn 铁氧体磁芯的电感值及相关参数，以及频率在 80MHz 左右时的电感值及相关参数；
- (5) 检测射频电源中屏极高压供电电路、灯丝供电电路、PWM 信号电路中的噪声频率及其幅值；

致谢

本论文的理论方向、实验研究和撰写工作均是在导师秦应雄副教授无私与耐心地指导下完成的。秦老师对于科研的热情、一丝不苟的工作态度深深地感染着我、鼓舞着我，激励我不断向前迈进、超越自我，努力干好自己分内的事。与秦老师相处的两年时间里，秦老师是我良师益友，不仅是学习和工作上的导师，也是我生活中的朋友，给予我无微不至关心和帮助，在即将毕业之际谨向秦老师致以衷心的感谢和崇高的敬意。

本论文的研究工作、实验工作得到了唐霞辉教授、柳娟老师、彭浩老师的大力支持和指导，论文中的绝大部分实验是在他们耐心地指导下完成的。在此，对于老师们所付出的努力、关心、教诲和教导，向各位老师表达我最真诚的感谢和敬意，祝福老师们永远身体健康、家庭美满幸福。

另外，就读硕士研究生期间，和实验室的师兄师姐师弟师妹们相处非常愉快，感谢你们这两年来在学习、工作和生活上的帮助和关心。感谢杨宝刚、黎庆光、王炜、李文芳和我一起进行实验工作，感谢邓老师、朱老师、方老师等对我实验研究的支持和指导。

最后，感谢我的家人，没有你们的无私的关心和资助，我根本无法取得今天的成绩。希望你们永远健康。

参考文献

- [1] Laakmann, Katherine D. Waveguide gas laser with high frequency transverse discharge excitation. U.S.Pat, 1979, NO.4, 169,251
- [2] 黄建军等. 容性耦合射频 (CCRF) 放电等离子体特性实验研究. 真空科学与技术, 2002, 22(6): 408~411
- [3] D. G. Youmans. Phase Locking of Adjacent Channel Leaky Waveguide CO₂ Laser. Appl. Phys. Lett, 1984, 44(4): 365~367
- [4] D. R. Hall, H. J. Baker. Area scaling boosts CO₂-laser performance. Laser Focus World, 1989, 10:77~82
- [5] K. M. Abramski, A. D. Colley, H. J. Baker. Power scaling of large-area transverse radio frequency discharge CO₂ laser. Appl. Phys. Lett, 1989, 54(19): 1833~1835
- [6] James L. Hobart, J. Michael Yarborough, Joseph Dallarosa. RF Excited CO₂ Slab Waveguide laser. United States Patent, 1992, 5,140,606: 1~14
- [7] D. Ehrlichmann, U. Habich, H. D. Plum et all. Annular resonators for diffusion cooled CO₂ lasers. CLEO'94 Amsterdam, Netherlands, 1994. 400~401
- [8] Meferd. RF excited CO₂ slab waveguide laser. U. S. A, Pat. 5, 283, 797, 1994. 1~10
- [9] R. Abram, D. R. Hall. 2-Dimensional Waveguide CO₂ laser Arrays and Beam Reforming. GCL/HPL'96, Edinburgh U. K, 1996. 25~30
- [10] Kobayashi S, Murata T, Terai K et all. 1 kW slab CO₂ laser excited by a self-excited RF generator. Proceedings of the SPIE, 1997, 3092:92~95
- [11] Mineev AP, Nefedov SM, Pashinin PP. RF-excited unstable-resonator planar CO₂ laser on a metal electrodeless-waveguide structure. QUANTUM ELECTRONICS, 2006, 36(7): 356~663
- [12] Xin Jianguo, Wei Guanghui. Technological Development and Prospect of RF Transversely Excited Diffusively Cooled CO₂ Lasers. CHINESE JOURNAL OF LASERS, 1994, 23(21): 269~273

- [13] Jinguo Xin, Shuna Yao, Ning Su et all. RF excited diffusively cooled all-metal slab waveguide CO₂ laser. Chinese Optics Letters, 2005, 3(2): 83~84
- [14] Ning Su, Shuna Yao, Yanhong Zhong et all. Parameter study of RF excited diffusively cooled all-metal slab waveguide CO₂ laser. Chinese Optics Letters, 2005, 3(6): 336~338
- [15] 孙正和, 王静, 付石友等. 双通道共电极双波长高同步射频波导 CO₂ 激光器. 光电子-激光, 2009, 20(8): 997~999
- [16] 谭明磊. 高功率 CO₂ 激光器射频电源分析和设计: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学图书馆, 2008
- [17] R. Ludwig, P. Bretchko. RF Circuit Design:Theory and Applications. (First Edition). 北京: 电子工业出版社, 2011. 59~60
- [18] 姚耿东, 姜槐. 关于电磁辐射危害的研究现状与展望. 环境与健康杂志, 2000, 17(5): 259~260
- [19] 姚智兵, 蒋昊等. 电磁辐射的危害及防护. 中国社会医学杂志, 2007, 03
- [20] 杨红萍. 电磁辐射的危害与防护. 科技信息, 2007, (33): 367
- [21] 肖鹏远, 焦晓宁. 电磁屏蔽原理及其电磁屏蔽材料制造方法的研究. 非织造布, 2010, (05)
- [22] 朱慧君. 射频电磁辐射对人体健康的危害. 环境导报, 1996, (4)
- [23] 刘江. 射频电磁场危害及其预防控制. 卫生研究, 2002, 31(5): 402~404
- [24] American Radio Relay League. RF Radiation and Electromagnetic Field Safety. ARRL HandBook for Radio Amateurs, 1997
- [25] 李贵山, 杨建平等. 电磁干扰(EMID 和射频干扰(RFID 及其抑制措施研究. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(4): 36~44
- [26] 朱文立. 电磁兼容标准及其检测技术. 电子质量, 2003, (7)
- [27] 马文华. 电磁辐射标准跟踪研究. 电信工程技术与标准化, 2007, 30~31
- [28] 李洵. 射频 CO₂ 激光器射频激励源研究: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学图书馆, 2007

- [29] 柳娟. 大功率射频 CO₂ 激光器激励特性研究: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学图书馆, 2009
- [30] 曲泽超, 张玲玲. 电子设备的电磁屏蔽设计与技术探讨. 工程技术, 2002: 348~349, 351
- [31] 林鸿宾, 陆万顺. 电磁屏蔽原理及电磁屏蔽玻璃. 玻璃, 2008, (3): 39~42
- [32] 电磁屏蔽材料(三). 电子材料与电子技术. 2007, 3: 37~40
- [33] 崔升, 沈晓冬等. 电磁屏蔽和吸波材料的研究进展. 电子元件与材料. 2005, 24(1): 57~61
- [34] 樊文琪. EMI 抑制滤波器的基本理论及应用. 中国电磁兼容标准暨质量认证技术研讨会. 2000
- [35] 舒艳萍, 陈为. 开关电源中有源滤波器技术. 江苏电器, 2005, NO.1: 5~9
- [36] 尹成. 9KHz-1GHz 频段高插损电源滤波器的研制:[硕士学位论文]. 北京交通大学图书馆, 2007
- [37] Bowick Christopher. RF Circuit Design. (Second Edition). Newnes, 2007
- [38] Paul Scherz 著. 实用电子元器件与电路基础. (第二版). 夏建生等(译). 北京: 电子工业出版社, 2010
- [39] 杨继深. EMC 教室. 安全与电磁兼容, 2002, 3: 41~42
- [40] Stevenson R.A. Isolated ground ceramic feed-through capacitor-EMI filter. 18th Capacitor and Resistor Technology Symposium, 1998: 101~107
- [41] 森容二著. LC 滤波器设计与制作.(第一版). 薛培鼎(译). 北京: 科学出版社, 2006
- [42] 李凤辉. 高频宽带电磁干扰抑制材料: [硕士学位论文]. 北京: 北京工业大学图书馆, 2009
- [43] 韩志全. 软磁铁氧体研究国内外近期动态. 磁性材料及器件, 2010, 41(2): 1~15
- [44] 黄爱萍. Mn-Zn 铁氧体损耗、磁导率和阻抗特性及制备技术研究: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学图书馆, 2006
- [45] 曾敏, 冯利荣等. 射频宽带 LTN2B Ni-Zn 铁氧体材料的研制与特性. 磁性材料及器件, 2009, 40(6): 57~59

- [46] 杜巍. 高频高 QNi-Zn 铁氧体材料及其器件应用研究: [硕士论文]. 成都: 电子科技大学图书馆, 2008
- [47] 吴琼,肖小飞等. Ni-Zn 铁氧体高频复数磁导率与磁环尺寸的相关性研究. 计量学报, 2010, 31 (5) Muhlstroh R. Permeability of biased Ni-Zn ferrites in the frequency range of 50-800 MHz IEEE Transactions on Magnetics, 1969, 5(3): 632~633
- [48] Alam MI. High permeability ferrite technology and applications. Asian Journal of Physics, 1997, 6(1-2): 212~216
- [49] Kondo, K. Chiba, T. Yamada, S. Analysis of power loss in Ni-Zn ferrites. Journal of Applied Physics, 2000, 6229~6231