



·粒子束及加速器技术·

## 325 MHz 微波栅控高压型热阴极电子枪的设计研究

夏乾旭<sup>1,2</sup>, 赵全堂<sup>1,2</sup>, 宗 阳<sup>1</sup>, 曹树春<sup>1,2</sup>, 李中平<sup>1,2</sup>, 申晓康<sup>1,2</sup>, 张子民<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000; 2. 中国科学院大学核科学与技术学院, 北京 100049)

**摘 要:** 高重复频率、高平均流强的电子枪具有十分广泛的应用。设计了一台束团重复频率为 325 MHz 在 CW 模式工作的微波栅控高压型热阴极电子枪, 并详细论述了该类型微波栅控电子枪的实验原理。在该类型电子枪的设计中, 首先需要利用仿真模拟软件 EGUN、POISSON (Poisson Superfish)、GPT (General Particle Tracer) 完成 300 kV 直流高压电子枪的结构设计, 并进行束流动力学验证计算。为将微波馈入该直流电子枪的阴栅极之间, 进行了该微波栅控电子枪的供电系统设计, 完成了从射频功率源到同轴热阴极的阻抗匹配方案, 设计了一种 325 MHz 双模式同轴供电器件, 并进行了验证与分析。

**关键词:** 微波栅控电子枪; 阻抗匹配; 束流动力学; 稳态高压平台

中图分类号: TL53

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202133.200310

### Design of 325 MHz RF grid-controlled high voltage thermionic cathode electron gun

Xia Qianxu<sup>1,2</sup>, Zhao Quantang<sup>1,2</sup>, Zong Yang<sup>1</sup>, Cao Shuchun<sup>1,2</sup>, Li Zhongping<sup>1,2</sup>, Shen Xiaokang<sup>1,2</sup>, Zhang Zimin<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The electron gun with high repetition rate and high average current has a very wide range of applications. This paper presents the design of a microwave grid-controlled high-voltage thermionic electron gun working in CW mode with a bunch repetition rate of 325 MHz and elaborates the experimental principles of this kind of electron guns. Firstly, simulation software EGUN, POISSON (Poisson Superfish) and GPT (General Particle Tracer) are used to accomplish the structure design of a 300 kV high-voltage DC electron gun and beam dynamics verification. Secondly, to feed the microwave into the gap between the cathode and the grid of the electron gun efficiently, design of a power supply with a scheme of impedance matching from the radio frequency power source to the cathode is completed. Accordingly, a 325 MHz dual-mode coaxial power supply device is designed, and its feasibility is verified and analyzed.

**Key words:** RF grid-controlled electron gun; impedance matching; beam dynamics; steady state high voltage platform

高平均流强、高功率且稳定运行的超导电子直线加速器在医学和辐射等领域具有非常重要的应用<sup>[1-2]</sup>。医用同位素原子序数较高, 如钼-99 等通常利用反应堆法进行制备, 早期应用于生产医用同位素的加速器束流流强与能量偏低, 导致同位素生产效率极低, 经济效益差, 无法投入工业生产。近年来随着超导技术的不断发展, 超导电子直线加速器有了长足的进步, 该类型加速器的束流能量较高, 使得利用加速器大规模生产医用同位素成为可能<sup>[3]</sup>。

超导电子直线加速器常见电子源为光阴极电子枪<sup>[4-5]</sup>, 该类型电子枪束流品质较高, 其重复频率随激光技术的进步不断提升, 因为材料本身原因其平均束流流强偏低, 光阴极微波电子枪的结构决定该类型加速腔不支持 CW 模式工作, 真空度和束团反轰缩短了光阴极的工作寿命<sup>[6]</sup>, 在相关生产应用中受到各种限制。生产经济高效的

\* 收稿日期: 2020-11-16; 修订日期: 2021-03-15

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFE0104900)

作者简介: 夏乾旭 (1996—), 男, 硕士研究生, 从事微波栅控电子枪设计方面的研究; 1206158607@qq.com。

通信作者: 张子民 (1972—), 男, 博士, 从事电子加速器设计方面的研究; zzm@impcas.ac.cn。

医用同位素需要 mA 量级的平均流强和 MW 量级的束流功率来打靶产生大量光子,从而使得高原子序数的原子核光致裂变<sup>[7]</sup>。在其他领域,如红外自由电子激光要求更高的平均束流强度以产生更高的激光亮度<sup>[8]</sup>。在辐照加工射频加速器领域如 Rhodotron,同样需要能产生高频束团的电子注入器<sup>[9]</sup>。

场致发射阴极同样面临工作寿命短的缺点<sup>[10]</sup>,相较于光阴极,热阴极具有工作寿命长、稳定性好、技术成熟的特点<sup>[11]</sup>,在上述提到的各种应用领域中,高重频的热阴极电子枪相对光阴极微波电子枪有绝对优势,能满足上述加速腔的各项要求。根据调研,将传统热阴极电子枪调制成脉冲结构有很多方式,如日本 KEK(High Energy Accelerator Research Organization)在 500 kV 高压直流热阴极电子枪的束流管道输出端加载了 476 MHz 高频调制腔,将束流调制出脉冲时间结构<sup>[12]</sup>;日本 SXFEL(Soft X-ray Free-Electron Lasers)50 kV 直流栅控电子枪采用 MOSFET 开关控制栅极电压,重复频率为 1~30 Hz 脉冲信号长度为 1  $\mu$ s,束流经栅极电压信号调制后由后续的栅极与阳极之间的高频微波电场进行加速<sup>[13]</sup>,该类型直流栅控热阴极电子枪束团频率与栅控直流电源质量直接相关,其频率最高为几十到几百 Hz;韩国 Seoul National University<sup>[14-15]</sup>研制的 50 kV 微波栅控热阴极电子枪采用谐振腔的注入方式,将频率为 2856 MHz 的微波注入同轴热阴极的阴极和栅极之间,利用调制栅控负偏压引出特定相位的电子束团,束团频率为 2856 MHz,高频束团经栅网出射后由栅极与阳极之间的静电场完成加速引出,该微波的重复频率为 30 Hz,束流平均流强为 2.7  $\mu$ A,能量为 50 keV;俄罗斯 BINP 设计制作的微波栅控热阴极电子枪,其微波频率为 116.3 MHz,微波重复频率为 50 Hz<sup>[16]</sup>,该机构设计了在更低频段支持 CW 模式运行的 90 MHz 微波栅控电子枪,其平均束流强度为 100 mA,能量根据阴极端设置的不同高压约为 100~400 keV<sup>[17]</sup>。微波栅控电子枪相较于直流栅控电子枪能提供更高的束团频率,其束团频率与微波频率直接相关,在 CW 工作模式下,能产生更高的平均流强。综合考虑,微波栅控热阴极电子枪是产生高重频强流电子束的最佳选择,本文计划为一台用于医用同位素生产的 325 MHz 超导直线加速器设计一种 325 MHz 的微波栅控热阴极高压型电子枪作为电子源。

## 1 微波栅控电子枪工作原理

微波栅控高压型热阴极电子枪电极部分主要由同轴热阴极与阳极构成,同轴热阴极由栅网、阴极和灯丝组成,彼此间电位独立。如图 1 所示:灯丝电源将热阴极加热到 1200  $^{\circ}$ C 左右,使热阴极表面的部分电子获得足够的逸出能量。这部分电子被栅网负偏压  $U_b$  形成的静电场抑制在阴极表面,同时 325 MHz 射频功率源将微波馈入到阴栅极之间,当微波电场与栅压电场同向时,两者同时抑制自由电子的发射;当微波电场与栅压电场反向时,仅当微波电场  $E_{rf}$  大于栅压负值  $-E_b$  时,在该特定相位区间叠加的电场方向指向阴极,电子从栅网中逸出,束流经过该变化电场的调制获得时间结构,由后续栅极与阳极之间 300 kV 电位差形成的静电场继续加速。

由时间-相位图进行分析,如图 2 所示:设栅极偏压形成电场为:  $E_b = -a$ ,微波电场为:  $E_{rf} = b \sin \varphi_x$ ,当:  $E_{rf} > -E_b$ ,即  $b \sin \varphi_x > a$  时,阴极与栅极间电场方向指向阴极,电子从栅网逸出,电子束流被调制成与微波频率相同的高频电子束团。设满足该条件的相位宽度为  $\varphi_0$ ,设置不同的栅压与微波功率可以调节电子逸出的相位宽度,从而得到不同的束团长度。

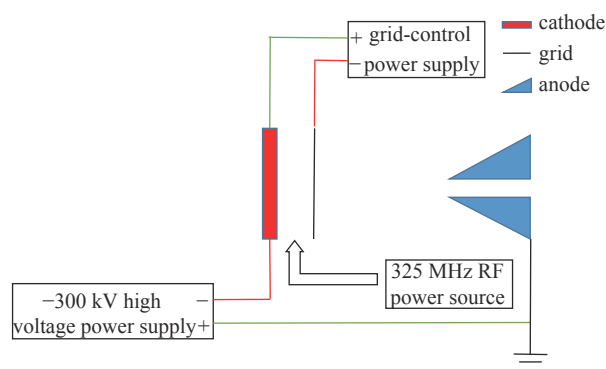


Fig. 1 Principle of grid-controlled high voltage thermionic cathode electron gun

图 1 微波栅控热阴极高压型电子枪原理示意图

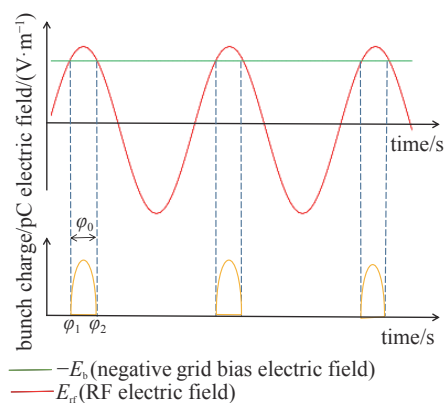


Fig. 2 Diagram of phase that electron beam can escape

图 2 束团出射相位图

本文设计了一台微波频率为 325 MHz、在 CW 模式工作、加速电压为 300 kV 的微波栅控高压型热阴极电子枪,其参数要求如表 1 所示。

表 1 电子枪设计参数  
Table 1 Parameters of electron gun

voltage/kV	frequency/MHz	working mode	beam current/mA	beam transverse emittance/(mm·mrad)	energy spread/%
-300	325	CW	5	<5	<0.5

## 2 栅控电子枪结构设计

### 2.1 直流电子枪结构设计

高频电子束团的加速静电场在栅极和阳极之间,阴栅极间隙非常窄,该区间束流能量变化忽略不计。在设计直流电子枪<sup>[18]</sup>时通过调整聚焦极长度和倾角的大小、阳极形状与阳极宽度、真空室半径、栅阳极间距等来调整束流品质。电子枪结构如图 3 所示:阴极电压为-300 kV,阳极处于地电位,阴阳极间距 12 cm。阴极采用日本 NJRC 公司生产的同轴热阴极 NJK2221A,该阴极栅网透过率极高,允许沉积的能量可达 1W,支持 CW 模式工作。该阴极半径为 0.4 cm,阳极孔半径设置为 0.5 cm,束流强度设置为 200 mA。利用电子枪仿真软件 EGUN 进行模拟计算,考虑空间电荷效应,该结构产生的束斑半径为 0.291 cm,归一化束流发射度为  $1.015 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ ,满足设计要求。在距离阴极 55 cm 处,利用 EGUN 计算了束流的径向密度分布,如图 4 所示:该结构产生的束流密度沿径向近似均匀分布,是一种稳定的传输模式。

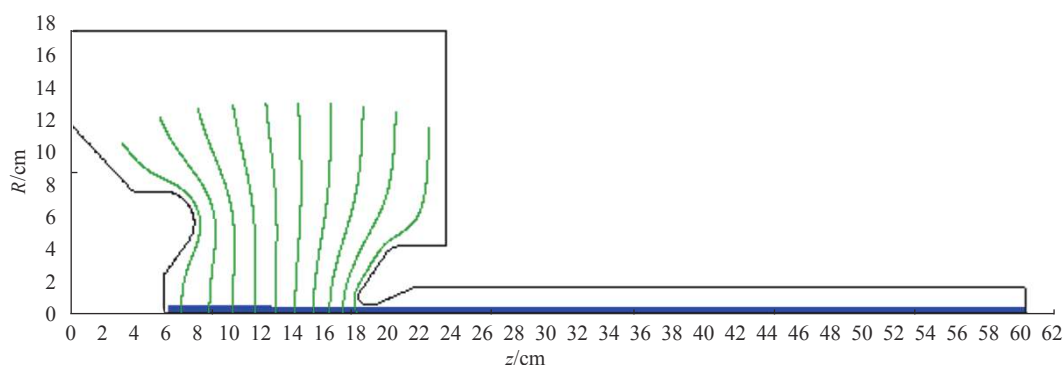


Fig. 3 Beam of the -300 kV DC electron gun simulated by EGUN

图 3 EGUN 模拟-300 kV 直流电子枪束流结果图

### 2.2 直流电子枪表面峰值场强

直流电子枪结构设计除考虑束流品质外,还需要考虑该电子枪表面场强过高造成的击穿效应。利用电场仿真计算软件 Poisson(PoissonSuperfish)计算该电子枪内部电场分布,从而对电子枪结构设计提供优化方案,根据计算结果,电场峰值集中在阴极与阳极的表面。经结构优化后的阴极表面电场强度低于 5 MV/m,阳极表面电场强度低于 7.5 MV/m,满足工程加工要求。

### 2.3 高重频电子束流的束流动力学研究

利用束流动力学仿真计算软件 GPT(General Particle Tracer),验证该电子枪产生的束流在 325 MHz 微波与栅控负偏压的混合调制下,由栅极出射后经静电场加速产生的电子束团满足设计要求。根据表 1 中的设计要求,单束团电荷量为 6.154 pC,参考荷兰 FELIX 的方案<sup>[5]</sup>,设定电子可以逸出的相位宽度为  $0.1927\pi$ 。经计算束团半径随轴向长度变化如图 5 所示:横轴为栅控电子枪轴向长度,起点为阴极所在位置;纵轴为束团内的电子与中心电子的标准差,该数值变化反映束流半径的变化趋势。由图 5 可得束腰位置在距离阴极约 75 cm 处。

在距离阴极表面 55 cm 处计划装配 FCT 测量该电子束团的时间结构,在该位置电子纵向能量沿轴向分布如图 6 所示:横坐标为电子枪轴向距阴极表面距离  $z$ ;纵坐标为电子的速度与光速的比值,表征能量的大小,考虑空间电荷效应下利用 GPT 计算得出该电子束团长度约为 6.89 cm,能散低于 0.116%,满足设计要求。在距离阴极表面 55 cm 处束团的横向发射度如图 7 所示,计算表明束团在该位置仍处于收敛状态。利用 GPT 计算电子束团均方根发射度随时间的变化曲线,如图 8 所示:横轴表示电子束团经历的时间,表征该束团的位置;纵轴为均方根发射度,在

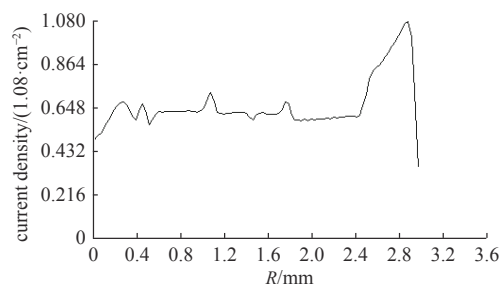


Fig. 4 Radial beam current distribution at 55 cm from anode

图 4 距阴极 55 cm 处沿径向束流密度分布图

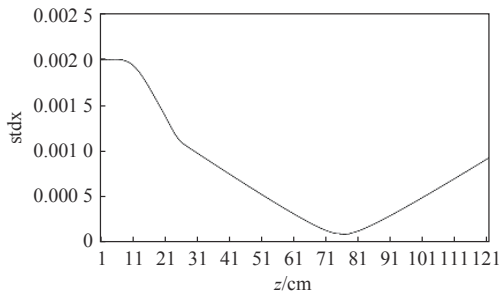


Fig. 5 Diagram of bunch radius variation

图 5 束团半径变化示意图

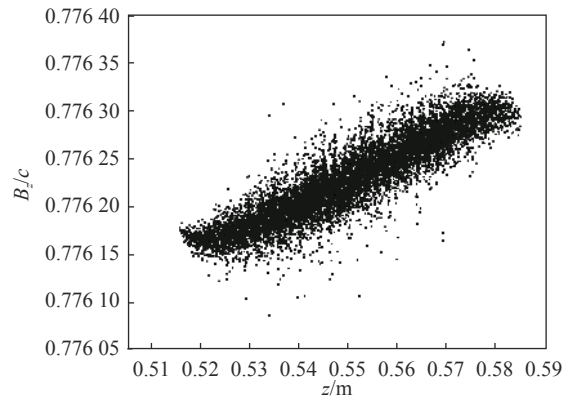


Fig. 6 Longitudinal energy distribution at  $z=55$  cm

图 6 距阴极 55 cm 处束团能量分散图

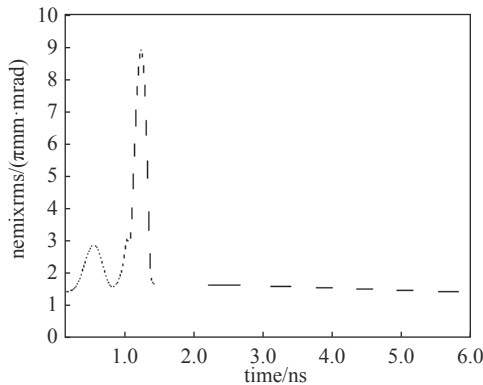


Fig. 7 Root mean square emittance change with time

图 7 均方根发射度随时间变化曲线图

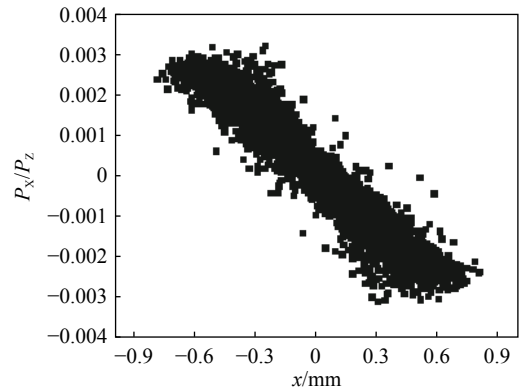


Fig. 8 Transverse phase space distribution at  $z=55$  cm

图 8 距阴极 55 cm 处束团横向相空间分布图

$z=55$  cm 处该值换算为归一化发射度为  $1.19 \pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ , 与 EGUN 计算结果相差不大, 满足设计要求, 验证了 EGUN 的计算结果, 证明该直流电子枪结构设计合理, 产生束流品质较高。

### 3 微波栅控电子枪实验设计

为验证该电子枪是否具有微波栅控功能, 需要完成实验设计。该实验设计分为供电系统设计、阻抗匹配设计与具体的供电器件工程设计。

#### 3.1 微波栅控电子枪供电系统设计

该电子枪的供电方式较为特殊, 根据同轴热阴极 NJK2221A 结构图显示<sup>[10]</sup>, 该阴极共有三层同轴结构, 分别是栅极 G、阴极 K 与灯丝 H。其中 G 在最外层与 NJK2221A 外壳等电位; K 在第二层, 与 G 绝缘; H 在芯层, 一端保持独立电位, 另一端与 K 所在同轴导体短接。实验设计要求 G 与 H 加载的直流电压均可调。该装置实验电气系统连接示意图如图 9 所示: 阳极接地, 阴极 K 连接  $-300$  kV 电源, 通过隔离变压器分别给直流稳压电源和  $325$  MHz 射频功率源供电。

实验计划采用同轴线将微波馈入阴栅极之间, 该同轴结构接口与同轴热阴极底座封闭接合, 传输微波的同时将直流电压接入阴极内部需要合理的方案。该同轴热阴极非标准  $50 \Omega$  器件, 不满足匹配条件, 需设计特定的同轴传输结构完成阻抗匹配, 使微波高效率地从  $325$  MHz 射频功率源馈入阴栅极, 后续将完成该部分设计。

#### 3.2 微波栅控电子枪系统微波传输阻抗匹配设计

日本 NJRC 公司生产的同轴热阴极 NJK2221A<sup>[10]</sup> 的阴极其栅极 G 与同轴底座外径直接相连, 阴极 K 直接与同轴底座的内径相连, 灯丝 H 与同轴底座内径的内芯相连, 三者电位互相独立。低传输效率条件下微波传输器件会发热严重, 为高效率地将微波馈入阴栅极, 需要设计一段特殊的同轴匹配器件分别连接  $325$  MHz 微波功率源与同轴热阴极。设同轴器件内径为  $d$ , 外径为  $D$ , 介质介电常数为  $\epsilon_r$ , 其阻抗为:  $Z_0 = (60/\sqrt{\epsilon_r})\ln(D/d)$ , 影响阻抗值  $Z_0$  的

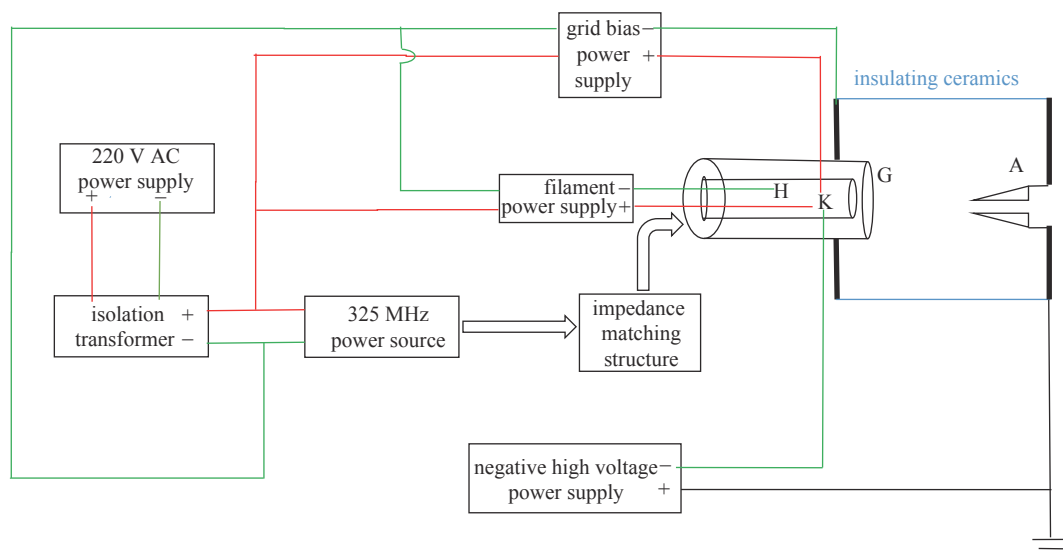


Fig. 9 Diagram of circuit connection

图9 电路连接示意图

直接参数为  $d$ ,  $D$  和  $\epsilon_r$ 。  $Z_0$  代表单位长度阻抗值, 改变同轴结构长度可改变终端的阻抗系数。

由日本 NJRC 公司给出的测评数据, 阴极跨导约为 0.01 S, 跨导与极间电阻的关系为  $g = \mu/R_0$ , 其中,  $\mu$  为增益系数, 通常情况下取 1, 计算可得极间阻抗  $R_0$ , 约为 100  $\Omega$ , 阴极面积  $S=0.5 \text{ m}^2$ , 阴栅极间隔  $l=160 \mu\text{m}$ ,  $C_0$  为极间电容, 根据公式  $C_0 = \epsilon_r S/l$ , 计算可得极间电容为 2.767 pF, 该结构不易产生寄生电感, 该参数可忽略不计, 电容与电阻串联, 根据已知的电容和电阻参数可计算阴极的阻抗参数  $Z_1 = R_0 + j\omega L_0 - 1/j\omega C_0$ , 计算可得阴极阻抗  $Z_1 = 100 - 177j$ 。

同轴热阴极自带 27.7 mm 的同轴底座<sup>[10]</sup>, 内径 8 mm, 外径 18 mm, 对应阻抗为 48.6  $\Omega$ , 与阴极串联, 对应在同轴热阴极接口处的端口阻抗为 34.249–106.905j。为获得最大传输效率需采用共轭匹配的方法, 制作一个阻抗系数为 34.249+106.905j 的同轴器件。考虑到加工问题, 采用外径  $D$  不变, 改变内径  $d$  以及填充介质改变  $\epsilon_r$  的方法, 对阻抗进行调节。参考该同轴热阴极结构图<sup>[10]</sup>, 设计该器件的外径为 24 mm。

利用史密斯圆图制定阻抗匹配方案。如图 10 所示: 1 端口为阴极阻抗所在的位置, 1 到 2 端口为阴极自身的 27.7 mm 同轴结构底座; 2 端口对应同轴热阴极底座接口处阻抗为 34.249–106.905j; 2 到 5 端口的三段同轴器件内径均为 12 mm, 将复合阻抗匹配到不含虚部的实阻抗; 2 到 3 端口无填充介质, 对应阻抗为 41.6  $\Omega$ ; 3 到 4 端口填充聚四氟乙烯以固定位置, 对应阻抗为 28.7  $\Omega$ ; 4 到 5 端口无填充介质, 设计了可伸缩的模块, 由限位螺丝固定位置, 调谐范围为  $\pm 15 \text{ mm}$ , 从而应对装配上的误差与温度变化; 5 端口阻抗为 2.9525  $\Omega$ ; 5 到 6 端口填充聚四氟乙烯, 内径为 17.9 mm, 对应阻抗为 12.2  $\Omega$ , 长度为 159.136 mm, 起  $\lambda/4$  波长匹配节的作用将阻抗匹配至接近 50  $\Omega$ ; 6 端口对应阻抗系数为 50.033  $\Omega$ , 完成阻抗匹配。

### 3.3 双模式同轴供电器件工程设计

根据史密斯圆图给出的解决方案进行工程设计, 该同轴阻抗匹配结构在传输微波同时, 需要传递栅极和灯丝的直流偏压。因此设计两个端口, 按史密斯圆图给出数据完成双模式同轴供电器件工程设计(该器件以下简称“同轴器件”)。根据接线方式要求, 同轴器件外径设计为 24 mm, 厚 3 mm, 接口处采用瓣形喇叭口方便安装固定。

如图 11 所示: 2 端口前的瓣形喇叭口插入同轴热阴极的底座; 2 到 6 端口为同轴匹配节; 10 端口可注入微波, 是标准的 N 型母头接口; 6 到 10 端口结构对应阻抗为 50  $\Omega$ ; 7, 8, 9 端口间电位独立, 由磁环进行隔断, 该位置重叠的导体部分刚好将后半部分封闭, 微波在该方向截止。同轴热阴极的阴栅极分别连接同轴器件的内外导体, 7 端

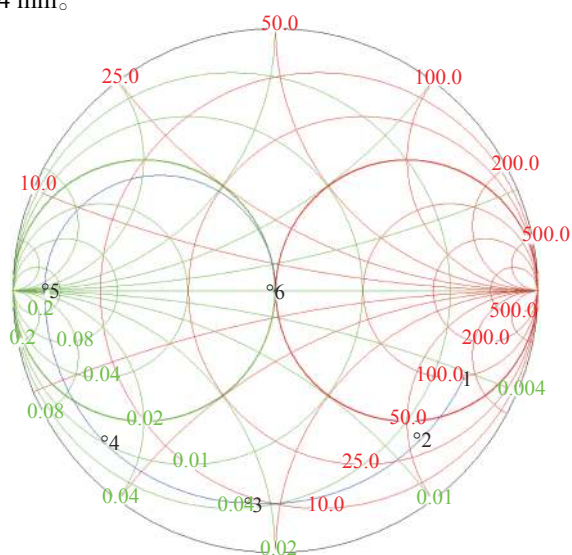


Fig. 10 Path (blue line) of impedance matching in Smith chart

图10 阻抗匹配史密斯圆图

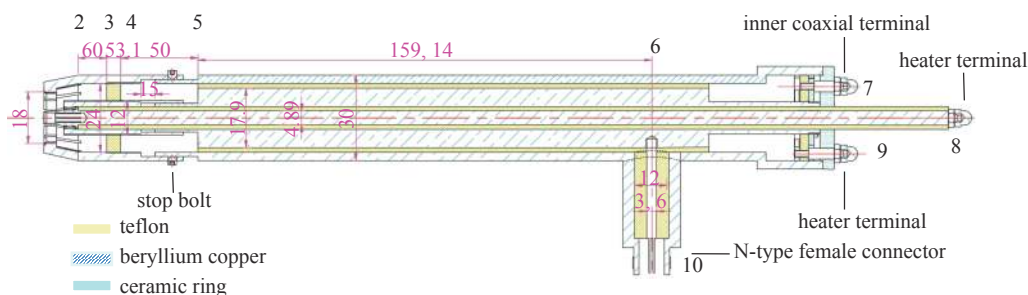


Fig. 11 Size of dual mode coaxial power supply device

图 11 双模式同轴供电器件尺寸图

口接线柱对应阴极电位, 9 端口对应栅极电位, 8 端口对应灯丝电位。三层同轴结构之间由聚四氟乙烯进行隔离, 具有独立的电位差。由于 7 端口和 9 端口之间的电位差, 该电压信号会沿导体传导至 10 端口, 为防止直流信号沿同轴线损坏 325 MHz 射频功率源, 需要在 10 端口接全内置式直流阻断器将直流电压信号隔离。该同轴器件导体材料选用高导电率、高热传递系数的铍铜, 且该器件传输效率较高, 在 CW 模式工作时能有效避免热量的累积; 填充介质选用介电系数稳定的聚四氟乙烯, 磁环选用稳定性较高的烧结陶瓷。为了考虑工程实现的可能性以及结构的稳定性, 在尺寸上做了一些调整, 但仍能保持较高的传输效率, 该设计为窄带匹配, 仅针对 325 MHz 工作频率, 设计过程对其他频率的栅控电子枪具有借鉴意义。

### 3.4 双模式同轴供电器件性能模拟测试

将设计修改后的双模式同轴供电器件结构数据导入高频微波模拟软件中进行计算, 考虑工程加工要求和实现难度以及器件本身结构的支撑与固定, 在尺寸上的修改具有非常大的局限性和不确定性, 在考虑多方面因素以后, 将确定下来的结构导入三维电磁仿真软件进行计算。考虑器件材料本身的传输损耗, 设置 2 端口处端口阻抗为  $34.249-106.905j$ , 替代同轴热阴极。器件的 10 端口为输入端口, 2 端口为输出端口, 对 10 端口进行微波馈入模拟计算。经计算得出 10 端口反射系数随频率变化如图 12 所示, 由图 12 可得在 325 MHz 处  $S_{11}$  可以取到极小值, 表明在这个频率区间, 同轴器件能有效抑制 325 MHz 临近频率模式的激发。对同轴器件 2 端口的传输系数进行模拟计算, 其传输系数随频率变化如图 13 所示, 由图 13 可得在 325 MHz 处  $S_{21}$  可以取到极大值  $S_{21} = -1.601$  dB, 对应传输效率为 69%, 基本达到设计要求。综上, 经三维电磁仿真模拟软件计算可得, 该同轴器件在 325 MHz 微波传输过程中与同轴热阴极配合良好, 传输效率较高。

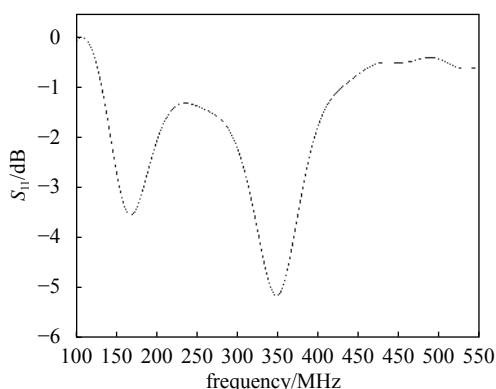


Fig. 12 Reflection coefficient varies with frequency

图 12 输入端口反射系数随频率变化图

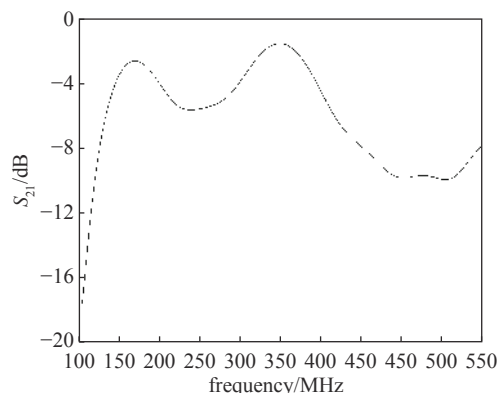


Fig. 13 Transmission coefficient varies with frequency

图 13 传输系数随频率变化图

## 4 结论

本文详细讲述了 325 MHz 微波栅控高压型热阴极电子枪的实验原理和实现途径, 对电子枪直流部分电极结构进行了设计和优化, 在避免其表面电场过高的情况下, 获得了品质较高的高频束团。给出了供电系统方案, 设计出一种双模式同轴供电器件满足该类型电子枪对直流和微波同时供电的需求, 并验证了该结构与同轴热阴极配合良好, 具有较高的传输效率。

## 参考文献：

- [1] 高峰, 林力, 刘宇昊, 等. 医用同位素生产现状及技术展望[J]. *同位素*, 2016, 29(2): 116-120. (Gao Feng, Lin Li, Liu Yuhao, et al. Production situation and technology prospect of medical isotopes[J]. *Journal of Isotopes*, 2016, 29(2): 116-120)
- [2] Martins M N, Silva T F. Electron accelerators: History, applications, and perspectives[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2014, 95: 78-85.
- [3] Nagai Y. Medical isotope production using accelerator neutrons[C]//11th International Topical Meeting on Nuclear Applications of Accelerators. 2013: 47-49.
- [4] 金晓, 黎明, 许州, 等. 中国工程物理研究院远红外自由电子激光实验研究[J]. *高能物理与核物理*, 2006, 30(s1): 96-98. (Jin Xiao, Li Ming, Xu Zhou, et al. Experiment study on the CAEP FIR-FEL[J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2006, 30(s1): 96-98)
- [5] Xu Hanxun, Shi Jiaru, Du Yingchao, et al. Development of an L-band photocathode RF gun at Tsinghua University[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2021, 985: 164675.
- [6] 邓文娟. GaAs阵列光电阴极的结构设计与制备研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018. (Deng Wenjuan. Research on structure design and preparation of GaAs wire-array photocathode[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018)
- [7] Bylinskii I, Ames F, Baartman R, et al. An electron linac photo-fission driver for the rare isotope program at TRIUMF[C]//Proceedings of the 23rd Particle Accelerator Conference. Vancouver, Canada, 2009.
- [8] Ortega J M, Glotin F, Prazeres R. Extension in far-infrared of the CLIO free-electron laser[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2006, 49(1-2): 133-138.
- [9] Jongen Y, Abs M, Genin F, et al. The Rhodotron, a new 10 MeV, 100 kW, CW metric wave electron accelerator[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 1993, 79(1-4): 865-870.
- [10] 易春蓉. 基于碳纳米管及其复合阴极的场致发射器件的制备与性能[D]. 上海: 华东师范大学, 2020. (Yi Chunrong. Preparation and performance of field-emission devices based on carbon nanotubes and their composite cathodes[D]. Shanghai: East China Normal University, 2020)
- [11] 沈春英, 丘泰, 李晓云. 高性能浸渍型阴极材料研究进展[J]. *材料导报*, 2005, 19(3): 25-27. (Shen Chunying, Qiu Tai, Li Xiaoyun. Advances in dispenser cathodes materials with high properties[J]. *Materials Review*, 2005, 19(3): 25-27)
- [12] Shintake T, Tanaka T, Hara T, et al. Status of SPring-8 compact SASE source FEL project[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2003, 507(1/2): 382-387.
- [13] Asaka T, Inagaki T, Magome T, et al. Low-emittance radio-frequency electron gun using a gridded thermionic cathode[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2020, 23: 063401.
- [14] Park S J, Oh J S, Bak J S, et al. 2.856-GHz modulation of conventional triode electron gun[J]. arXiv preprint physics/0008035, 2000).
- [15] Park S J, Hwang W H, Cho M H, et al. Design of coaxial resonant cavity for triode RF gun[C]//KEK Proceedings. National Laboratory for High Energy Physics, 1998: 746-748.
- [16] Auslender V L, Batazova M A, Kuznetsov G I, et al. Triode RF gun for linear electron accelerators[C]//The 3rd Asian Particle Accelerator Conference APAC. 2004: 273-275.
- [17] Volkov V N, Arbuzov V, Kenzhebulatov E, et al. Latest results of CW 100 mA electron RF gun for Novosibirsk ERL based FEL[C]//Proceedings of the 29th Linear Accelerator Conference(LINAC'18). Beijing, China: JACOW Publishing, 2019: 598-600.
- [18] 周方洁. 行波管电子枪热初速的理论及分析[D]. 成都: 电子科技大学, 2018. (Zhou Fangjie. Theory and analysis of thermal initial velocity of traveling wave tube electron gun[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2018)