

强激光与粒子束

High Power Laser and Particle Beams

S波段6 MeV紧凑型电子回旋加速器仿真设计与模拟研究

董自强 裴士伦 张通 邵琢瑕 王琳 陆亚林

Simulation design of an S-band 6 MeV compact microtron

Dong Ziqiang, Pei Shilun, Zhang Tong, Shao Zhuoxia, Wang Lin, Lu Yalin

引用本文:

董自强, 裴士伦, 张通, 邵琢瑕, 王琳, 陆亚林. S波段6 MeV紧凑型电子回旋加速器仿真设计与模拟研究[J]. *强激光与粒子束*, 2025, 37: 044006. doi: 10.11884/HPLPB202537.240343

Dong Ziqiang, Pei Shilun, Zhang Tong, Shao Zhuoxia, Wang Lin, Lu Yalin. Simulation design of an S-band 6 MeV compact microtron[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2025, 37: 044006. doi: 10.11884/HPLPB202537.240343

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11884/HPLPB202537.240343>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

可调电子束注入器调配调谐结构的设计及分析

Design and analysis of a tunable coupler for application to adjustable beam injectors

强激光与粒子束. 2022, 34: 044006-1-044006-7 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202234.210430>

单谐振腔束团长度监测器耦合结构设计与仿真

Design and simulation of the coupler of single resonant cavity bunch length monitor

强激光与粒子束. 2022, 34: 044002-1-044002-7 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202234.210261>

基于Geant4的回旋加速器束流动力学计算

Beam dynamics calculation of cyclotron based on Geant4

强激光与粒子束. 2022, 34: 074002-1-074002-6 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202234.210458>

医用重离子回旋加速器径向探针系统

Radial probe detector system in the cyclotron of Heavy Ion Medical Machine

强激光与粒子束. 2023, 35: 104004-1-104004-8 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202335.220311>

兰州重离子回旋加速器主场电源改造

Reform of main power supply of the Lanzhou heavy ion cyclotron

强激光与粒子束. 2022, 34: 064003-1-064003-6 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202234.210454>

230 MeV超导回旋加速器磁场调节棒驱动系统研制

Development of Trim-rod driving system for CYCIAE-230 superconducting cyclotron

强激光与粒子束. 2021, 33: 034005-1-034005-6 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202133.200285>



·粒子束及加速器技术·

S 波段 6 MeV 紧凑型电子回旋加速器仿真设计与模拟研究*

董自强^{1,3}, 裴士伦⁴, 张 通^{1,3}, 邵琢瑕^{1,3}, 王 琳², 陆亚林^{1,3}

(1. 中国科学技术大学合肥微尺度物质科学国家研究中心, 合肥 230026; 2. 中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 合肥 230026; 3. 中国科学技术大学先进光子科学技术安徽省实验室, 合肥 230026; 4. 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘 要: 安徽省先进光子源实验室正在研制一台 S 波段 6 MeV 紧凑型电子回旋加速器, 可以用于驱动紧凑型微焦点 X 射线源或用于驱动紧凑型太赫兹自由电子激光。为了得到更紧凑的加速器设计, 利用 CST 电磁工作室对电子回旋加速器二型谐振腔进行了设计与计算, 谐振腔工作频率为 2998.2 MHz, 在谐振腔间隙可获得 1 MV 以上的加速电压, 使电子单圈能量增益可达 0.9 MeV 左右。同时, 利用 CST 粒子工作室对内嵌式热阴极谐振腔的电子产生与加速过程进行了仿真计算, 研究了微波功率幅度、磁场强度、热阴极发射位置、束流通道对电子回旋加速器的影响, 完成了考虑束流负载情况下的耦合器设计, 得到了稳态运行时的谐振腔工作参数。仿真结果表明, 束流负载到达稳态时, 在热阴极发射能力为 20 A/cm² 的情况下, 可引出流强为 24 mA, 束流能量为 6.02 MeV, 能散约为 0.64%, 束流横向均方根尺寸为 3.3 mm×1.8 mm。

关键词: 电子回旋加速器; 谐振腔; 束流仿真; 束流负载效应; 耦合度

中图分类号: TN248.6

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202537.240343

Simulation design of an S-band 6 MeV compact microtron

Dong Ziqiang^{1,3}, Pei Shilun⁴, Zhang Tong^{1,3}, Shao Zhuoxia^{1,3}, Wang Lin², Lu Yalin^{1,3}

(1. Hefei National Laboratory for Physical Sciences at Microscale, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

3. Anhui Laboratory of Advanced Photon Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

4. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: The Anhui Laboratory of Advanced Photon Science and Technology has been developing a 6 MeV compact microtron, which can be used to drive compact microfocus X-ray sources or compact terahertz free electron lasers. To achieve a more compact accelerator design, the CST Electromagnetic suite was used to design and calculate the second type RF cavity of the microtron. The frequency of the RF cavity is 2998.2 MHz, and an accelerating voltage of over 1 MV can be obtained in the RF cavity gap. The electron energy gain can reach about 0.9 MeV per pass. At the same time, CST Particle Studio was used to simulate the electron generation and acceleration process in the ultra-high frequency cavity with thermionic cathode. The effects of microwave power amplitude, magnetic field strength, cathode emission position, and beam channel on the microtron were studied. The coupler design considering beam loading was also completed, and the operating parameters of the RF cavity during steady-state operation were obtained. The simulation results show that when the beam loading reaches steady state, with a cathode emission capacity of 20 A/cm², a current of 24 mA can be induced, a beam energy of 6 MeV, an energy spread of 0.64%, and a transverse RMS size of 3.3 mm × 1.8 mm can be obtained.

Key words: microtron, RF cavity, beam simulation, beam loading, coupling coefficient

* 收稿日期: 2024-09-25; 修订日期: 2025-02-15

基金项目: 中国科学院科研仪器设备研制项目 (ZDZBGCH2021001)

联系方式: 董自强, dzq1992@ustc.edu.cn。

通信作者: 邵琢瑕, std@ustc.edu.cn。

高能微焦点 X 射线源是基于电子加速器轰击金属微靶产生韧致辐射 X 射线的装置,具有光子能量高、焦点尺寸小的特点,能够广泛用于无损检测、精密分析、半导体元件检测、生物成像等领域。电子回旋加速器是一种改变倍频系数来保证电子谐振加速的粒子加速器,可以为微焦点 X 射线源提供打靶用的电子束流。相较于基于热阴极电子枪的直线加速器,电子回旋加速器具有束流能散低、谐振腔腔耗小、结构简单、造价便宜、束流能量变化范围大等特点^[1-3],在核技术应用和科研领域有广泛发展潜力。韩国原子能研究院研发的太赫兹自由电子激光装置选用具有 12 轨道的高流强、紧凑型电子回旋加速器驱动^[4-6],能够安装于数十平方米的实验室级别的场地内,可稳定提供数十瓦宏脉冲功率。电子束流从回旋加速器引出后也可以直接轰击靶材,提供伽马射线进行核物理实验或中子射线进行核材料检测^[7]。电子回旋加速器还具有建造成本低,运行维护方便等特点,结合永磁铁技术和全固态功率源技术,可进一步减小装置规模和提高运行稳定性,是实现实验室级紧凑型低能加速器的优选方案。

安徽省先进光子科学技术实验室致力于研制基于电子加速器的微焦点 X 射线源装置。在该装置中,电子束流经磁铁引导后轰击金属微靶,进而产生韧致辐射 X 射线。为获取低能散电子束流、缩小装置规模并降低建造成本,实验室选用经典电子回旋加速器作为 X 射线装置的电子束源系统。本文设计和研究了一种 S 波段电子回旋加速器,采用速调管作为微波功率源,借助三维电磁场计算软件 CST,设计并仿真了内嵌式热阴极谐振腔,获取了谐振腔的基本工作参数。同时,对电子回旋加速器的束流动力学进行了仿真,深入研究了束流负载影响下的驻波腔参数与束流特性,有效提高了加速器的俘获效率。

1 经典电子回旋加速器理论

经典电子回旋加速器主要由热阴极、谐振腔、二极磁铁、磁屏蔽管组成。阴极经灯丝加热后产生电子,电子束流被谐振腔内的电磁场从阴极表面拉出并加速^[8]。整个谐振腔安装于真空室内,由上下两块磁铁覆盖,电子束流在二极磁铁作用下做回旋运动,束流每次经过谐振腔后获得能量,回旋轨道半径变大,不同轨道之间内切于一点,切点位于谐振腔内。在经典电子回旋加速器中束流满足谐振加速的条件有两个^[4]。

(1) 第一圈电子的回旋周期 T_{s1} 需满足

$$T_{s1} = k_{s1} T_r = \frac{2\pi\epsilon_{s1}}{ec^2B} = \frac{2\pi}{ec^2B} (\epsilon_0 + W_i + \Delta W_{s1}) \quad (1)$$

式中: T_r 是微波周期; k_{s1} 为正整数,表示满足谐振关系的电子第一圈回旋周期是微波周期的整数倍; ϵ_{s1} 是电子第一圈的总能量; c 是光速; e 是元电荷; B 为主磁铁磁感应强度; ϵ_0 为电子静止能量; W_i 为电子注入动能; ΔW_{s1} 为电子第一圈的能量增长。

(2) 第 N 圈电子的回旋周期 T_{sN} 需满足

$$T_{sN} = k_{sN} T_r = [k_{s1} + (N-1)\Delta k_s] T_r = \frac{2\pi\epsilon_{sN}}{ec^2B} \quad (2)$$

式中: ϵ_{sN} 为电子在第 N 圈的总能量, k_{sN} 为正整数,表示满足谐振关系的电子第一圈回旋周期是微波周期的整数倍。每转一圈电子的回旋周期增加量满足

$$\Delta T_s = \Delta k_s T_r = \frac{2\pi\Delta\epsilon_s}{ec^2B} = \frac{2\pi}{c^2B} V_s \quad (3)$$

式中: Δk_s 为正整数,表示相邻圈的回旋周期增量为整数倍; $\Delta\epsilon_s$ 表示每转一圈的动能增量; V_s 为电子每次加速的有效加速电压。进一步改写式(3)为

$$\Omega = \frac{B}{B_0} \quad (4)$$

$$B_0 = \frac{2\pi\epsilon_0}{ec^2T_r} \quad (5)$$

式中: Ω 是描述电子在电子回旋加速器中的加速常数,是反映电子能量增益的重要工作参数; B_0 在高频腔工作频率为 2998 MHz 时,约为 0.107 T。

满足谐振加速条件的束流会多次经过谐振腔,达到指定引出能量后,从与最后一圈轨道顶点相切的磁屏蔽管引出。磁屏蔽管选用软铁制成,一般是具有一定壁厚的管道,管道内径略大于束流尺寸,能够将主磁场屏蔽,束流在磁屏蔽管内沿中心轴线前进,直至打靶或进入传输线。经典电子回旋加速器原理如图 1 所示。

2 S 波段驻波腔设计

热阴极驻波腔是电子回旋加速器的关键元件之一, 阴极内嵌于驻波腔内壁, 经灯丝电流加热后产生热电子。电子注入驻波腔内有两种模式^[5], 如图 2 所示: 一型驻波腔具备两个束流通道, 电子自阴极发射后, 于磁场的作用下穿过出射孔, 开启第一圈加速进程, 其结构较为简易, 驻波腔体的功耗偏低, 然而腔间电压相对不高; 二型驻波腔则设有三个束流通道, 电子从阴极发射并在磁场影响下, 会依序途经辅助孔、入射孔与出射孔, 与一型驻波腔相比, 电子能够获取更高的注入动能^[9]。结合式(3)可知, 更高的注入动能意味着能够施加更强的磁场强度, 从而实现更高的电子单圈能量增益, 换言之, 二型驻波腔可承载更高的腔间电压。基于此, 本文选定二型驻波腔作为经典电子回旋加速器的加速结构, 以此来提升束流能量增益, 提高磁铁的利用率, 进而达成更为紧凑的装置尺寸。

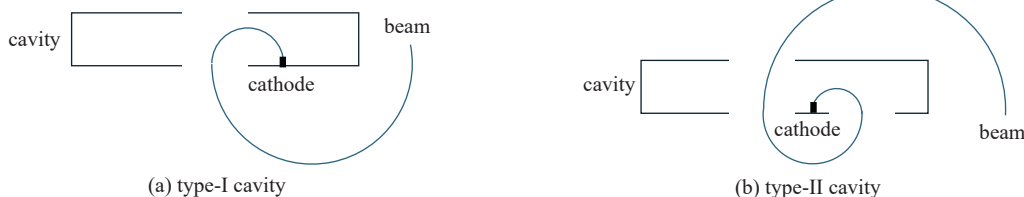


Fig. 2 Different injection schemes for cavity of microtron

图 2 电子回旋加速器驻波腔类型

紧凑型电子回旋加速器的束流设计能量为 6 MeV, 驻波腔设计选用 pill-box 圆柱形腔体, 工作于 S 波段, 设计工作频率为 2998.2 MHz, 设计腔间电压大于 1 MV。阴极选用定制的覆膜钽钨阴极组件, 发射能力为 20 A/cm², 直径为 3 mm, 阴极组件内嵌于驻波腔内壁, 位于束流通道附近。在计算软件 CST 中, 对 S 波段驻波腔进行了三维建模, 其模型如图 3 所示, 共有三个矩形束流通道。微波功率经传输波导和耦合孔馈入到驻波腔内, 从而建立起时谐电磁场。从阴极产生的电子束流被电磁场拉出后通过辅助孔, 在电子回旋加速器主磁铁引导下, 再次由入射孔进入驻波腔间隙。经电场加速后, 电子束流穿过出射孔。在外加磁场偏转引导下, 束流多次通过驻波腔以获得能量, 电子轨道半径也逐渐增大。由于束流在第一圈的动力学特征, 驻波腔的结构与轴对称存在偏差^[7], 驻波腔的关键尺寸如表 1 所示。

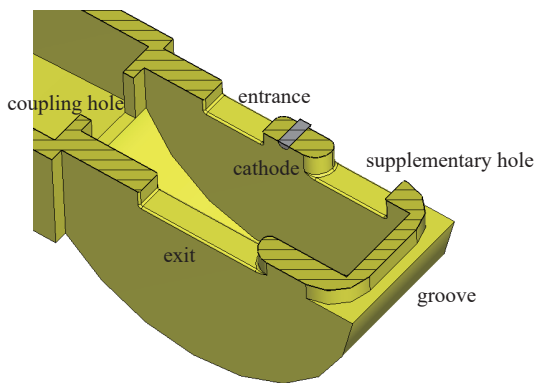


Fig. 3 Three dimensional model of S-band cavity

图 3 S 波段二型驻波腔三维模型

表 1 S 波段驻波腔尺寸

Table 1 Size of S-band type-II cavity

radius/mm	gap/mm	cathode position/mm	supplementary/mm	entrance/mm	exit/mm
37.991	23	3	12 × 18	7.8 × 16	9.2 × 30.2

驻波腔采用无氧铜材料, 利用计算软件 CST 电磁工作室进行仿真后, 腔内电场分布如图 4 所示。微波功率在驻波腔内建立起工作模式为 TM₀₁₀ 的电磁场, 谐振频率为 2998.2 MHz, 驻波腔内储能为 1 J 时电场在中心轴上的分布如图 5 所示, 腔内电场梯度为 50 MV/m 左右, 腔间电压约为 1.15 MV, 阴极表面电场梯度最高为 54 MV/m。驻波腔主要计算结果如表 2 所示, 其中 Q_0 为无载品质因数。

驻波腔采用 S 波段速调管进行驱动, 由速调管来提供所需微波的频率与功率。电子回旋加速器的微波系统,

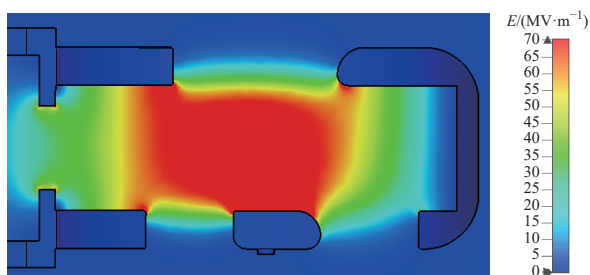


Fig. 4 Electric field distribution in type-II cavity

图 4 二型驻波腔内电场分布

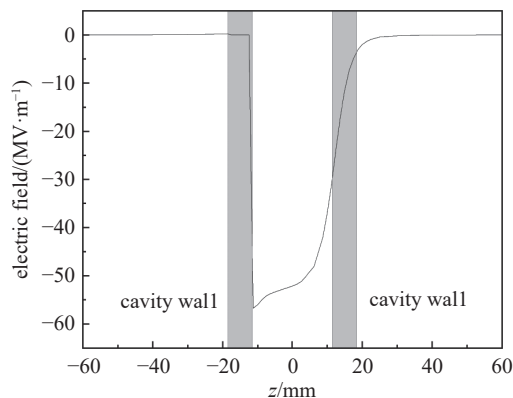


Fig. 5 Electric field distribution on the central axis of a type-II cavity

图 5 二型驻波腔中心轴线上电场分布

表 2 驻波腔主要工作参数

Table 2 Parameters of type-II cavity

material	RF frequency/ MHz	gap voltage/ MV	Q_0	shunt impedance/ M Ω	average power loss (duty factor: 0.1%)/W
oxygen free copper	2998.2	1.27	11 181	2.68	643

如图 6 所示, 速调管通过波导系统将微波功率耦合到驻波腔内, 波导系统包括了具有吸收负载的环形器、定向耦合器和陶瓷窗口。环形器可以有效隔离反射信号, 提供稳定的运行环境。定向耦合器允许对输入信号和反射信号进行观测。速调管与高频腔各配有一个陶瓷窗, 它们之间的波导系统采用 SF₆ 充气方案, 避免高功率微波传输时频繁产生打火现象。

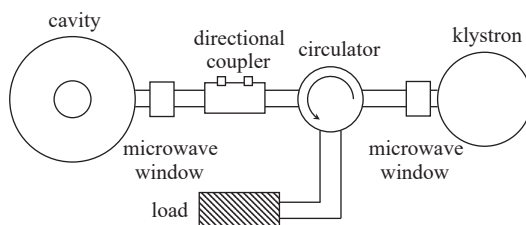


Fig. 6 Schematic of the compact microtron RF system

图 6 电子回旋加速器微波系统示意图

3 束流动力学计算

在电子回旋加速器中, 从阴极产生的电子束流, 在时谐电磁场一半周期内发射, 在另一半周期内被抑制。根据束流引出能量和单圈能量增益, 可以确定电子回旋加速器的轨道数。紧凑型电子回旋加速器的设计引出能量为 6 MeV, 设计单圈能量增益为 1 MeV 左右, 因此有 6 圈轨道。不同轨道的电子束流都会在驻波腔内被加速, 因此需要考虑束流负载对驻波腔的影响。当驻波腔工作在失谐状态时, 能够抵消因束流在腔壁产生的感生电流而造成的腔间电压失配影响^[10-11]。

在 CST 粒子工作室中, 导入仿真得到的驻波腔电磁场空间分布, 利用 PIC 求解器对束流动力学进行了研究和计算。设定阴极组件直径为 3 mm, 发射能力为 20 A/cm², 发射流强约为 1.4 A。根据加速常数 $\Omega=B/B_0$, 初步设定垂直于束流轨道平面的理想磁场为 0.209 T, 后续会根据实际计算得到的束流能量调整磁场大小。首先对驻波腔的束流通道进行优化, 计算结果如图 7 所示。束流通道除了允许束流通过外, 还具有对束流进行水平聚焦的作用^[12-13]。电子在驻波腔入口受到聚焦力, 在出口受到散焦力, 但由于电子在出口处的能量大于入口处, 因此整体呈现聚焦作用。除此之外, 由于束流首圈能量不高, 轨道半径小, 需在驻波腔的外壁顶部留下沟槽, 以使束流首圈能够顺利通过而不损失在驻波腔外壁上。

在电子回旋加速器中, 功率源输出功率除了一部分损失在功率馈送通路上, 其余功率用于驻波腔内建立电磁场和被通过谐振腔间隙的束流带走, 少部分功率反射回功率源。输入耦合孔的作用是将外部功率馈入高频腔内, 耦合度受经过

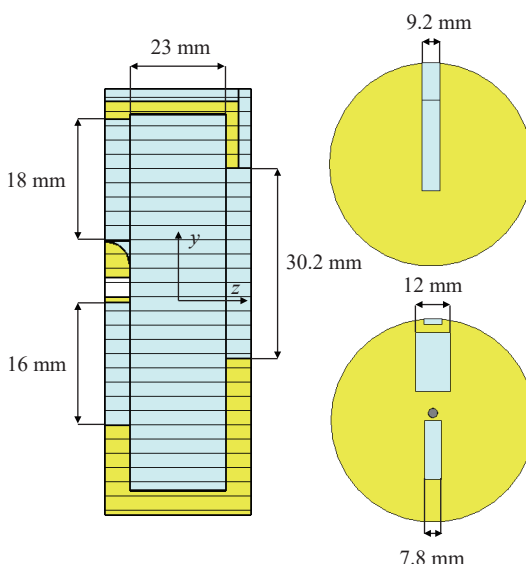


Fig. 7 Slits size of S-band cavity

图 7 驻波腔主要束流通道尺寸及位置

高频腔的束流流强影响。图 8 是驻波腔输入耦合器 3D 模型, 其中 L_1 、 L_2 和 L_3 是耦合孔尺寸。

最佳耦合度 β 的计算公式为

$$\beta = 1 + \frac{P_b}{P_c} = 1 + \frac{P_{\text{loss}} + P_e}{P_c} \quad (6)$$

式中: P_b 是电子束流功率, P_c 是驻波腔腔体功耗。在电子回旋加速器中, 束流损失功率也占了很大比例, 因此在耦合度计算中电子束流功率 P_b 可以分为损失束流功率 P_{loss} 和最后的引出束流功率 P_e 。在电子束流加速过程中, 不满足共振条件的束流不会一次性丢失, 束流流强会逐圈下降, 损失束流功率和引出束流功率也会变化, 加速效率亦会影响束流功率^[11], 因此驻波腔耦合器优化设计需要配合束流仿真计算进行。

利用 PIC 求解器对电子回旋与加速过程进行建模与仿真, 对耦合孔和驻波腔迭代优化后, 驻波腔谐振频率为 2998.2 MHz, 耦合系数确定约为 2.24, 如图 9 所示。端口处入射功率与反射功率变化如图 10 所示, 微波功率通过耦合孔进入驻波腔内建立空间电磁场, 随着微波在驻波腔内不断反射和叠加, 端口处反射功率逐渐减小, 符合驻波腔内功率变化规律, 此时最小反射功率约为 786 W。

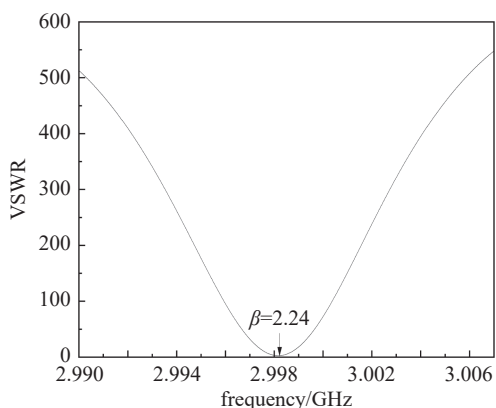


Fig. 9 Coupling coefficient curve

图 9 耦合度曲线

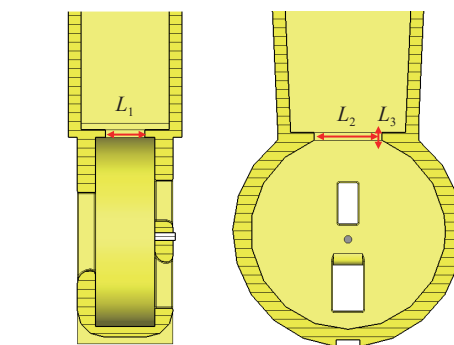


Fig. 8 3D model of coupler

图 8 驻波腔耦合器 3D 模型

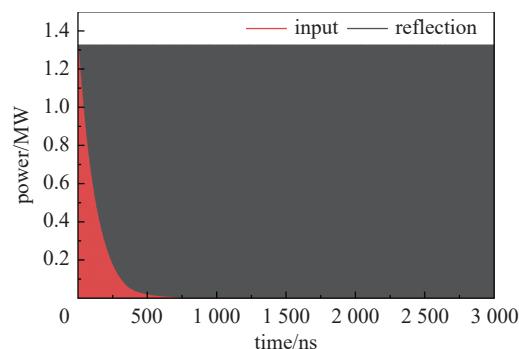


Fig. 10 Input power and output power

图 10 入射功率与反射功率

在经典电子回旋加速器中, 二型驻波腔可以工作在更高的加速常数 Ω 下, 一般选择范围是 1.7~2.1。在电子回旋加速器中相位稳定性条件意味着束流能量被限制在一个很小的范围内^[2], 因此束流具有低能散特点。在模拟计算过程中, 可预先根据束流引出能量确定束流被加速的次数, 亦即束流轨道圈数; 然后根据束流单圈能量增益和加速常数 Ω 推算得到主磁场值; 最后在给定热阴极发射能力、束流轨道数和主磁场大小下, 不断优化高频腔电压、驻波腔耦合系数、束流通道位置及大小等参数, 实现多圈加速相位匹配和考虑束流负载下的稳态运行参数。基于驻波腔模型, 利用 PIC 求解器对一定时长内的束流动力学进行仿真研究。电子束团在三维空间中运动分布如图 11 所示, 在恒定磁场作用下, 不同能量束团具有不同的轨道半径。束流经过驻波腔后, 单圈能量平均增益为 0.9 MeV 左右, 加速常数 Ω 约为 1.8, 第六轨道上引出束流能量约为 6.02 MeV, 束流能量分布如图 12 所示, 能量分布近乎于高斯分布, 束流能量半高全宽约为 39 keV, 束流能散约为 0.64%, 达到设计目标。驻波腔在开始时运行在失谐状态下, 随着电子束团增多, 束流镜像电流产生的束流负载电压与功率源电压合成后相对于束流具有合适的相位, 最终束流运行达到稳态。在计算软件 CST 中, 于引出位置磁屏蔽管入口处添加束流流强监视器, 统计 0.01 ns 内通过监视器的电荷量, 计算得到瞬时流强随时间的变化, 如图 13 所示。计算结果显示约 1 μ s 后引出流



Fig. 11 3D result of electron beam dynamics in space

图 11 三维空间中电子束流分布

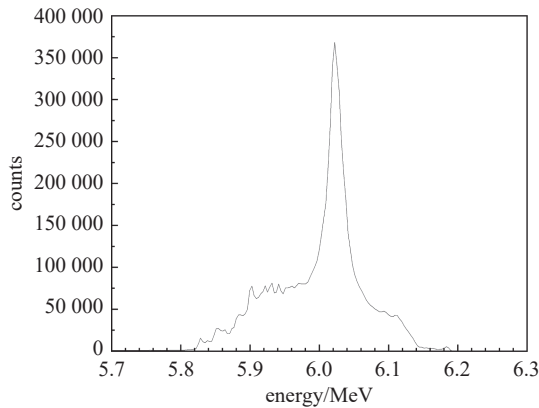


Fig. 12 Energy distribution of extracted beam

图 12 引出束流能量分布

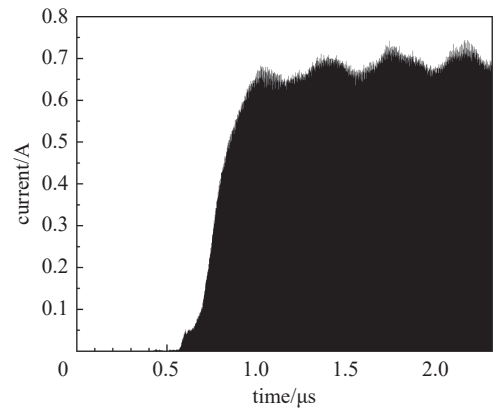


Fig. 13 Beam current vs time

图 13 3 μs 内引出束流强度随时间变化

强达到平衡,此时引出束流 RMS 尺寸 $\Delta x \approx 3.3$ mm, $\Delta y \approx 1.8$ mm,束流水平发射度约为 $38 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$,垂直方向发射度约为 $3 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$,对计算时长内通过束流监视器的流强进行积分后除以计算时长,可得束流峰值流强约为 24 mA。根据计算得到的束流尺寸,用于电子束引出的磁屏蔽管内径设计为 10 mm。最终本文计算得到的 S 波段电子回旋加速器高频腔束流参数如表 3 所示。基于电子回旋加速器的微焦点 X 射线源,其电子回旋加速器内的高频腔束流通道呈矩形结构,致使束流在水平方向的发射度大于垂直方向。在国际上已建成的微焦点 X 射线源中^[14-15],其束流能量为 6 MeV,束流发射度约为 $50 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$,能散处于 1% 以下。由此可见,本文所开展的设计工作基本能够满足相关要求。

表 3 S 波段电子回旋加速器束流参数

Table 3 Beam parameters of the S-band microtron

energy/ MeV	cathode current density/(A·cm ⁻²)	peak current/ mA	energy gain per turn/MeV	emittance/ ($\pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$)	energy spread/%	pulse frequency/Hz	pulse width/ μs
6	20	24	0.9	38(H)/3.8(V)	0.64	100	10

4 结 论

本文通过计算软件 CST 对 S 波段紧凑型电子回旋加速器进行了物理设计,完成了关键元件驻波腔设计与仿真,对束流动力学进行了计算,研究了束流负载影响下的驻波腔工作参数。计算结果显示,功率源输入信号频率为 2998 MHz 时,考虑束流负载后的驻波腔谐振频率为 2998.2 MHz。当选用覆膜钨钨材料作为阴极时,阴极发射流强为 1.4 A,最终确定驻波腔耦合系数约为 2.24,达到稳态时束流强度约为 24 mA,引出束流能量为 6.02 MeV,能散约为 0.64%,引出位置处电子束流 RMS 尺寸约为 $3.3 \text{mm} \times 1.8 \text{mm}$ 。目前驻波腔正在加工中,紧凑型电子回旋加速器装置正在研制与加工中。为了达到更高的束流功率,未来计划联合研制发射能力更高的单晶六硼化镧,进一步提高紧凑型电子回旋加速器的应用潜力。

致 谢 感谢中国电子科技集团有限公司第十二研究所万知之、蓝清宏在热阴极组件研制给予的指导和帮助。感谢中国科学技术大学国家同步辐射实验室给予的软件计算支持。

参考文献:

- [1] 陈佳洱. 加速器物理基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 2012. (Chen Jiaer. Fundamentals of accelerator physics[M]. Beijing: Peking University Press, 2012)
- [2] Tsipenyuk Y M. Microtron: development and applications[M]. London: CRC Press, 2001.
- [3] Borisov M, Ermakov A, Khankin V, et al. Racetrack microtron—pushing the limits[J]. *Symmetry*, 2021, 13: 2244.
- [4] Kazakevich G M, Pavlov V M, Kuznetsov G I, et al. Internal injection for a microtron driving a terahertz free electron laser[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 102: 034507.
- [5] Kazakevich G M, Jeong Y U, Lee B C, et al. Variable-energy microtron-injector for a compact wide-band FIR free electron laser[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2003, 507(1/2): 146-149.
- [6] Kazakevich G M, Pavlov V M, Kuznetsov G I, et al. Optimization of the injection system for microtron-based terahertz FEL[C]//Proceedings of the 28th International Free Electron Laser Conference (FEL 2006). 2006: 403-406.
- [7] Abrams R J, Cummings M A C, Johnson R P, et al. Compact, microtron-based gamma source[C]//7th International Particle Accelerator Conference. 2016:

3522-3524.

- [8] Sviatoslavsky I N. The microtron[M]. Kapitša S P, Melekhin V N, trans. London: Harwood Academic Publishers, 1978.
- [9] Lidbjörk P. Microtrons[C]//CAS - CERN accelerator school: 5th General Accelerator Physics Course. 1994: 971-981.
- [10] Kazakevich G M, Pavlov V M, Jeong Y U, et al. Magnetron-driven microtron injector of a terahertz free electron laser[J]. *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams*, 2009, 12: 040701.
- [11] Abrams R J. I. Final report for DOE SBIR phase I project DE-SC0013795 microtron-based compact, portable gamma-ray source[R]. Batavia: Muons Inc. , 2017.
- [12] Bashmakov Y A, Dyubkov V S, Lozeev Y Y. Numerical simulation of longitudinal and transversal electron dynamics in classical microtron[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1238: 012071.
- [13] Bashmakov Y A, Dyubkov V S, Lozeev Y Y. Numerical simulation of electrons dynamics in a microtron on 6–10 MeV[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, 941: 012090.
- [14] Yamada H, Hasegawa D, Yamada T, et al. Tabletop synchrotron light source[J]. *Comprehensive Biomedical Physics*, 2014, 8: 43-65.
- [15] Hasegawa D, Yamada H, Kleev A I, et al. The portable synchrotron MIRRORCLE-6X[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2004, 716(1): 116-119.