



·高功率微波技术·

E 型波导振荡器反转永磁引导系统初步设计*

曾彩萍, 薛宇哲, 杜创洲, 尹磊, 徐彻, 刘庆想

(西南交通大学 物理科学与技术学院, 成都 610031)

摘要: 开展了 E 型波导振荡器永磁引导系统的物理与设计研究。对强流相对论电子束在理想方波形反转引导磁场中的传输条件进行了理论分析, 给出了相对论条件下轴对称复合场中电子束的傍轴轨迹方程和最小引导磁场的计算公式。根据该理论分析, 针对 C 波段 E 型波导振荡器高频相互作用区的结构特点, 设计了反转永磁引导系统, 同时给出了漂移管内各个磁场分量的表达式。该系统由轴径向磁化空心永磁体组合产生反转引导磁场, 永磁体的总质量约为 2.5 kg。采用爆炸发射阴极, 展示了强流相对论电子束在该引导磁场中的传输特性。研究结果显示, 所设计反转永磁引导系统可引导 400 kV、580 A 的环形电子束稳定通过半径为 6 mm 的漂移管, 带入器件, 得到 112.5 MW 的 4.8 GHz 微波输出功率, 效率为 48.49%, 确定了反转永磁引导系统应用于 E 型波导振荡器的技术可能性。

关键词: 反转永磁引导磁场; E 型波导振荡器; 强流相对论环形电子束; 粒子仿真; 能散度

中图分类号: TN128

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230035

Preliminary design of reverse permanent magnet guidance system for E-type waveguide oscillator

Zeng Caiping, Xue Yuzhe, Du Chuangzhou, Yin Lei, Xu Che, Liu Qingxiang

(School of Physics Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The theoretical analysis and simulation on the permanent magnet guidance system of the E-type waveguide oscillator are developed. Firstly, the theoretical analysis of the modified paraxial ray equation, the minimum magnetic field under relativistic conditions and the transmission conditions of an intense relativistic electron beam in ideal reverse guidance magnetic field are presented. Then the reverse permanent magnet guidance system is designed according to the structure characteristics of the high-frequency interaction zone of the C-band E-type waveguide oscillator, and the expression of each magnetic field component is given. The reverse permanent magnet guidance system produces reverse guidance magnetic field by combining axial and radial magnetized cylindrical permanent magnets, and the total weight of the magnets is about 2.5 kg. The transmission characteristics of the intense relativistic electron beam in the guiding magnetic field are shown. The annular intense relativistic electron beam is produced by an explosive emission cathode. The results show that the designed reverse permanent magnet guidance system can guide the annular electron beam, with voltage of 400 kV, current of 580 A, to pass through the drift tube with a radius of 6mm. In addition, the E-type waveguide oscillator can stably generate 4.8 GHz microwave with power of 112.5 MW and efficiency of 48.49%, and the technical possibility of the reverse permanent magnet guidance system applied to the E-type waveguide oscillator is determined.

Key words: reverse permanent magnet guidance magnetic field, E-type waveguide oscillator, annular intense relativistic electron beam, particle simulation, energy divergence

随着高功率微波技术的不断发展, 高功率、高频率、高效率、长脉冲、紧凑化和小型化成为大多数高功率微波源发展的目标。近年来, 由于单管功率极限和微波脉冲缩短现象制约了高功率微波技术的发展, 作为突破这些瓶颈的技术路线之一, 多管功率合成成为高功率微波技术发展的重要方向之一^[1]。E 型波导振荡器具有高功率和高

* 收稿日期: 2023-02-21; 修订日期: 2023-04-20

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2682023CX076); 高功率微波技术创新工作站开放项目

联系方式: 曾彩萍, 1411602492@qq.com。

通信作者: 徐彻, xuche@swjtu.edu.cn。

效率等优点,符合多管功率合成对合成单元特性的要求。

磁聚焦系统是高功率微波器件的重要组成部分,目前,大多数产生磁场的系统消耗的能量和体积比高功率微波本身产生装置大^[2]。在速调管等真空电子器件中常采用均匀磁聚焦系统^[3-5]、周期永磁聚焦系统^[6-8]和周期反转永磁聚焦系统^[9-12]来引导电子束传输。均匀磁聚焦系统引导的电子束直流和高频通过率高,刚度好、噪声低,但体积大,质量大,而且均匀电磁聚焦系统的线包损耗功率较大^[13]。周期永磁聚焦系统体积小,质量小,不消耗功率,杂散磁场小,但刚度差、噪声高,由于受到速调管谐振腔尺寸的限制,很难用于工作频率低的速调管^[14-15]。

周期反转永磁聚焦系统对谐振腔尺寸的限制小,但是其电子束刚度差,电子束的波动不可避免,不容易实现高的直流和高频通过率,同时电子束通过率随电压变化而变化^[16]。本文根据 E 型波导振荡器高频相互作用区的结构特点,探索了永磁包装 E 型波导振荡器的技术可能性,设计了一种有间隙的反转永磁引导系统,分析了强流环形电子束在此引导系统中稳定传输的条件,实现了 C 波段 E 型波导振荡器输出功率百 MW 级。

1 电子束在理想方波形反转引导磁场中传输的理论分析

在轴对称复合场中,非相对论条件下电子轨迹方程中的加速电压 $\sqrt{\varphi}$ (非相对论条件下的加速电压)用 $\sqrt{\varphi_r}$ (相对论条件下的加速电压)代替,就可得到相对论修正下的电子轨迹方程^[17]。考虑电子质量的变化,相对论修正下轴对称复合场中电子束的傍轴轨迹方程为

$$\frac{d^2r}{dz^2} + \frac{\eta B^2(z)r}{8U_r} [1 - K^2] - \frac{I}{4\sqrt{2}\eta\pi\epsilon_0 r U_r^{3/2}} = 0 \quad (1)$$

$$U_r = U \left(1 + \frac{\eta U}{2c^2} \right) \quad (2)$$

$$K = \frac{B_c r_c^2}{B(z)r^2} \quad (3)$$

式中: r 为电子束外半径; η 为电子荷质比(取绝对值); $B(z)$ 为中心轴上磁场分布; U_r 为相对论修正电压; K 为屏蔽系数; I 为电子束电流; ϵ_0 为真空介电常数; U 为电子束电压; c 为光速; B_c 为阴极面上的磁感应强度; r_c 为阴极半径。由式(1)可得,洛伦兹力的径向分量与轴向磁场的平方成正比,理想的方波形磁场峰值与无波动均匀聚焦磁场相等,反转位置和反转数不影响聚束。

此外,还需要考虑强流电子束的自磁场,在无外场时,电子所受总的径向作用力^[18]

$$F_r = F_E + F_B = \frac{eI}{2\pi\epsilon_0 r v} - \frac{eI\beta^2}{2\pi\epsilon_0 r v} \quad (4)$$

式中: F_E 为空间电荷发散力; F_B 为电子束自磁场对电子束的会聚力; e 为电子电荷量(取绝对值); v 为电子轴向运动速度, $\beta = \frac{v}{c}$ 。计算可得,布里渊和浸没流磁场

$$B_{\min} = \sqrt{\frac{I}{\left(\frac{510+U}{510}\right)^2 - 1} \frac{369^2}{r^2} + \frac{B_c^2 r_c^4}{r^4}} \times 10^{-4} \quad (5)$$

式中: r 的单位为 mm, U 的单位为 kV, I 的单位为 A, B_{\min} 的单位为 T。实际应用中,考虑到电子热初速等因素,实现无波动是很困难的。为了保证电子束刚度好,通常来说,磁场值 $B = 1.5B_{\min} \sim 2B_{\min}$ 。

实际的反转引导磁场存在着一定宽度的反转区,当无波动的电子束经过反转区时,反转区磁场的降低使电子束向外发散,反转区越大,产生的束波动越大。在磁场反转区,指向电子束中心轴的电子径向速度可减少空间电荷力引起的电子发散,可使电子束通过反转区后减小或保持原来的波动幅度。因此与一般均匀磁场引导的电子束不同,对于反转磁场引导的电子束应有一定的波动幅度,在此基础上应合理选择磁场峰值和反转位置,否则,很难获得波动匹配^[16]。

2 E 型波导振荡器有间隙的反转永磁引导系统的优化设计

2.1 三维磁场的仿真

综合考虑永磁材料的各项指标,如剩磁 B_r 、矫顽力 H_c 、最大磁能积 $(BH)_{\max}$ 和温度系数等,决定选取牌号为

N48 的钕铁硼材料,其剩磁 B_r 为 1.42 T, 矫顽力 H_c 为 1.13×10^6 A/m, 密度为 7.5 g/cm^3 。背景材料为 normal, 各个方向全设置为开放式边界条件。

图 1 为 E 型波导振荡器高频相互作用区的结构示意图, 基于该结构的高频相互作用区是分离的, 由于可用的轴径向空间有限, 故设计了有间隙的反转永磁引导系统。E 型波导振荡器采用爆炸式发射阴极, 环形发射阴极如图 2 所示。由于在高电压强电场下爆炸发射时, 阴极所产生的电子束质量低, 发射度高, 电子束内部具有极强的空间电荷排斥作用。若阴阳极间无磁场会聚力的作用, 电子束将扩散从而无法稳定过渡到漂移管中, 因此在阴阳极间需要设计过渡区磁场。当阴极发射面上轴向磁场强度 B_z 为 0.31 T 时, 阴极能产生 580 A 的强流相对论环形电子束。E 型波导振荡器的具体参数如表 1 所示。

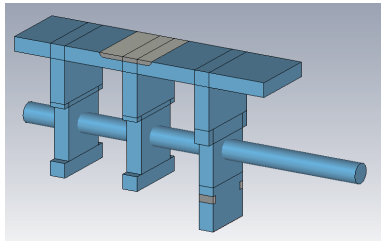


Fig. 1 Schematic of high frequency interaction region of the oscillator

图 1 振荡器高频相互作用区结构示意图

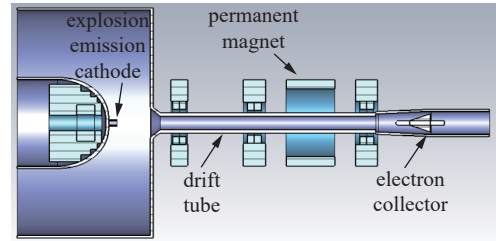


Fig. 2 Partial schematic of the E-type waveguide oscillator

图 2 E 型波导振荡器部分结构示意图

表 1 E 型波导振荡器设计参数

Table 1 Design parameters of the E-type waveguide oscillator

beam voltage/ kV	beam current/ A	inner radius of drifting-tube/mm	outer radius of cathode/mm	beam thickness/ mm	minimum magnetic field/T
400	580	6	3	1	0.16

反转永磁引导系统由轴径向磁化空心永磁圆柱体组合而成, 永磁体与漂移管的中心轴重合, 如图 2 和 3 所示, 图 3 中黑色箭头为永磁体磁化方向。永磁体的总质量约为 2.5 kg, 具体参数如表 2 所示。在圆柱坐标系中, 由麦克斯韦方程得空心圆柱永磁体在与其同轴的漂移管中形成的轴对称磁场的幂级数表达式^[17]为

$$B_r(r, z) = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^{k+1} \frac{B^{(2k+1)}(z)}{k!(k+1)!} \left(\frac{r}{2}\right)^{2k+1} \quad (6)$$

$$B_z(r, z) = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{B^{(2k)}(z)}{(k!)^2} \left(\frac{r}{2}\right)^{2k} \quad (7)$$

式中: $B^{(2k+1)}(z)$ 为 $B(z)$ 对 z 的 $2k+1$ 阶导数。在近轴区, 有

$$B_r(r, z) \approx -\frac{r}{2} \frac{dB(z)}{dz} \quad (8)$$

$$B_z(r, z) \approx B(z) \quad (9)$$

因此, 若反转区长度越小, 电子束所在位置离轴越远, 电子束所在位置的径向磁场越大, 影响电子束的传输。值得注意的是, 反转永磁引导系统的调整应该同电子束轨迹模拟配合进行, 入口条件、反转位置和径向磁场是电子束稳定传输的关键。

如图 3 所示, 为了减小反转区长度, 在径向充磁永磁体内部添加轴向磁化相反的一对永磁体。为了增大平坦

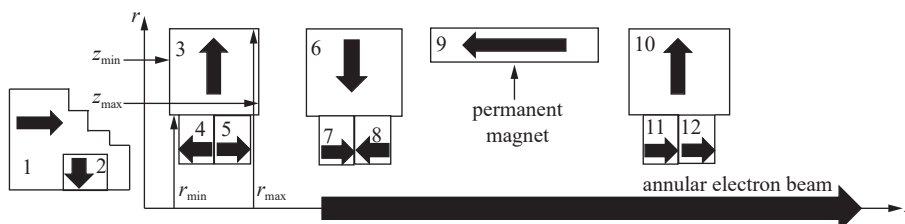


Fig. 3 Magnetic circuit of the E-type waveguide oscillator

图 3 E 型波导振荡器的磁路

表 2 反转永磁引导系统设计参数
Table 2 Design parameters of the reverse permanent magnet guidance system

No.	z_{\min}/mm	z_{\max}/mm	r_{\min}/mm	r_{\max}/mm
permanent magnet 1	-184	-146	7	34
permanent magnet 2	-164	-151	7	16
permanent magnet 3	-96	-84	19	38
permanent magnet 4	-95	-90	12	19
permanent magnet 5	-90	-85	12	19
permanent magnet 6	-44	-28	18	38
permanent magnet 7	-41	-36	11	18
permanent magnet 8	-36	-31	11	18
permanent magnet 9	-13	22	30	38
permanent magnet 10	37	53	19	38
permanent magnet 11	40	45	12	19
permanent magnet 12	45	50	12	19

区长度,在充磁方向相反的径向磁化永磁体之间添加轴向充磁永磁体。图 4 为该反转永磁引导系统的磁场分布图,图 4(b)为 $r = 0, 3, 46 \text{ mm}$ 处 B_r 和 B_z 的分布曲线,实线表示 B_z 的分布,虚线为 B_r , $z = -136 \text{ mm}$ 处为电子束发射面。由图 4 可得,漂移管内,同一轴向位置处,轴向磁场相等,在反转区,半径越大,径向磁场越大,满足式(8)和式(9),并且漂移管内轴向磁场显著增强而外侧明显减弱。

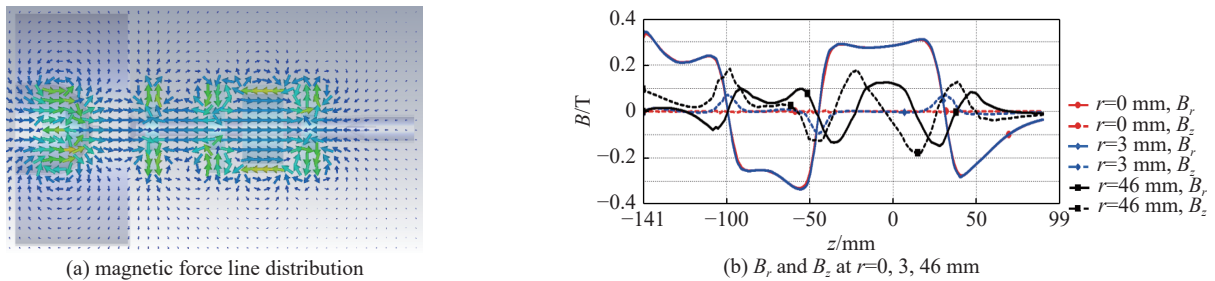


Fig. 4 Magnetic distribution of reverse permanent magnet guidance system

图 4 反转永磁引导系统的磁场分布

2.2 电子轨迹的仿真

图 5 为反转永磁引导系统中爆炸发射电子束传输轨迹图。结果显示:电子束稳定传输,波动相对较小,具有良好的层流特性,在收集极处的发散性也比较好,直流通过率为 100%。图 6 展示了电子束在反转永磁引导系统中的传输特性,根据电子束在 XY 平面上横向速度和纵向速度的分布可以更加直观地判断电子束层流性。

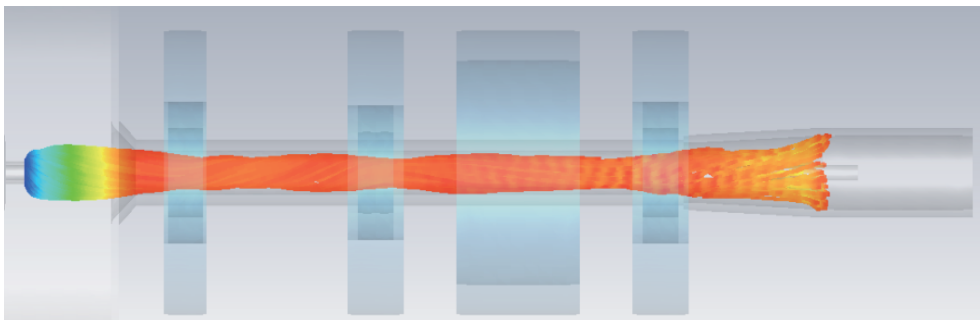


Fig. 5 Trajectory of electron beam in reverse permanent magnet guidance system

图 5 反转永磁引导系统中电子轨迹图

与均匀磁场引导不同,电子束在反转永磁引导系统中径向磁场的作用下轴向速度会发生改变。研究发现,电子束第一次经过反转区,轴向速度会减小,横向速度会变大。当电子束再一次经过反转区,轴向速度会增大,横向速度会减小。通常情况下,径向磁场和电子束波动越小,电子束轴向速度与横向速度之间的转化越小,两次通过反转区后,电子束越能恢复到经过反转区前的状态。过大的径向磁场和电子束波动将直接导致电子回流,因此应调

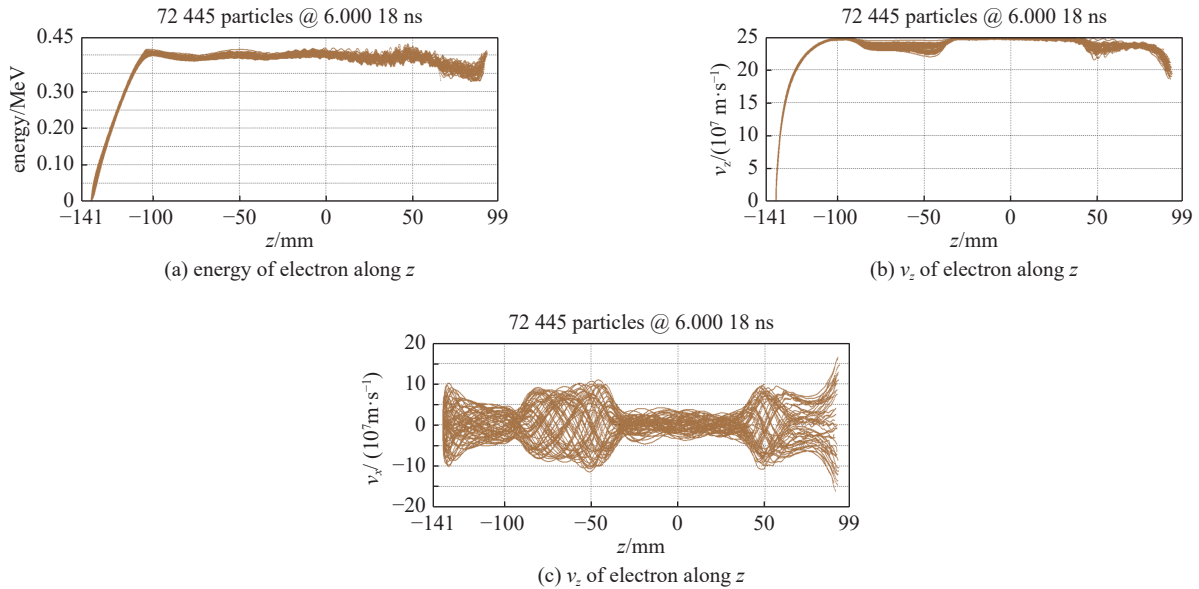


Fig. 6 Transmission characteristics of electron beam in reverse permanent magnet guidance system

图 6 电子束在反转永磁引导系统中的传输特性

整磁场分布, 尽量避免电子束经过反转区时, 尤其是过渡区处, 出现图 7 所示情况。微波转换效率与电子的动能大小有关, 因此将该引导磁场应用于真空电子器件时, 应该根据束波相互作用的位置, 合理设计反转区的位置。

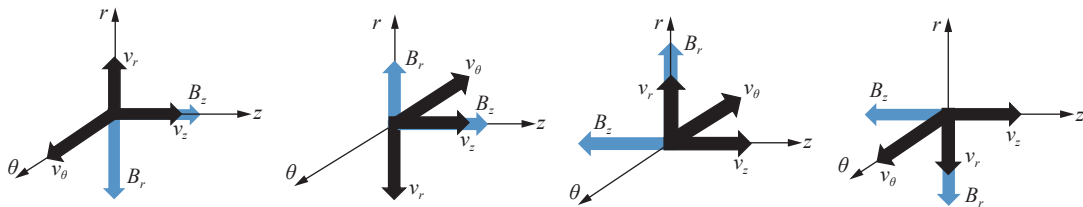


Fig. 7 Magnetic and velocity distribution of reflux electron

图 7 回流电子的磁场和速度分布

2.3 E型波导振荡器的仿真

图 8 为 E 型波导振荡器结构示意图。在三维粒子仿真软件中, 在如图 4 所示反转磁场的引导下, 爆炸发射阴极可发射束流参数为 400 kV, 580 A 的环形电子束。E 型波导振荡器产生 112.5 MW 的微波输出功率, 效率为 48.49%, 功率输出波形如图 9 所示。图 10 是图 9 功率输出下对应的微波输出频谱, 可以观察到, 频谱单一, 有很好的频率选择性。微波输出后, 电子束与高频场交换能量, 速度变慢, 电子束波动匹配被破坏, 注波动增加引起流通率变坏。此外, 电子束在高频电场的作用下群聚, 使得在某些位置处, 电子密度极大, 如图 11 所示, 造成严重的空间电荷发散效应, 导致电子束出现打壁现象。功率输出稳定后, 电子束动态通过率为 30%, 其电子束传输特性如图 12 所示。

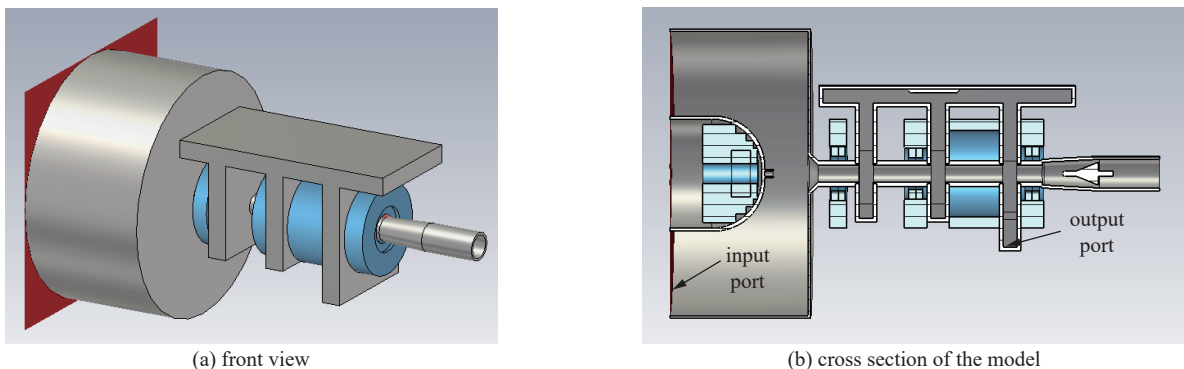


Fig. 8 Schematic of the E-type waveguide oscillator

图 8 E 型波导振荡器结构示意图

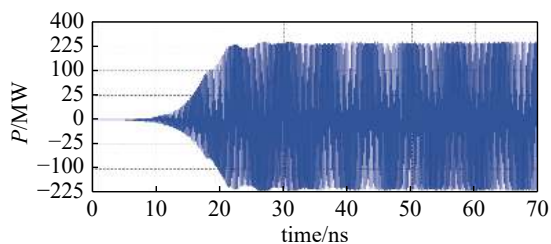


Fig. 9 Output power waveform of the E-type waveguide oscillator

图9 E型波导振荡器的功率输出波形

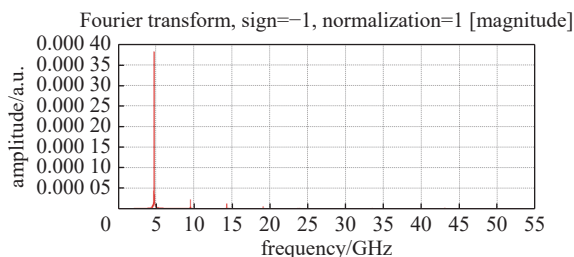


Fig. 10 Frequency spectrum of output wave

图10 输出微波频谱

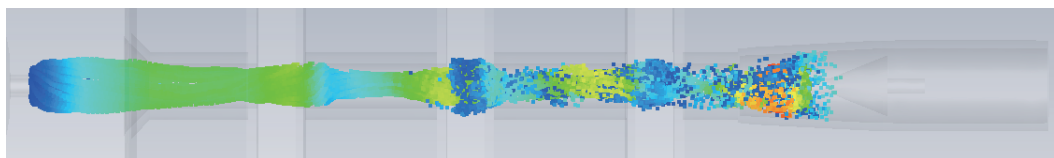


Fig. 11 Trajectory of electron beam in the E-type waveguide oscillator

图11 E型波导振荡器中电子轨迹图

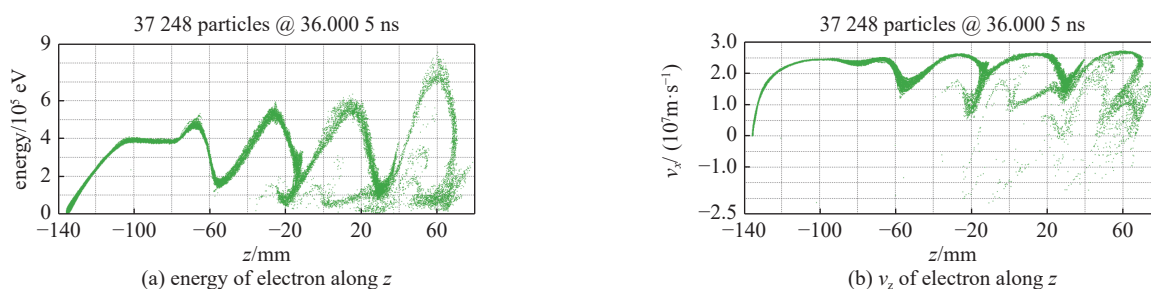


Fig. 12 Transmission characteristics of electron beam in the E-type waveguide oscillator

图12 电子束在E型波导振荡器中的传输特性

3 结论

本文采用物理分析和仿真设计相结合的方法,分析了强流相对论电子束在均匀和理想方波形反转磁场中稳定传输的条件。根据该理论分析,优化设计了有间隙的反转永磁引导系统,分析了反转永磁引导系统的磁场分布特点,展示了强流相对论电子束在反转永磁引导系统中的传输特性。仿真结果显示在束压 400 kV,束流 580 A 的条件下,C波段E型波导振荡器得到了 112.5 MW 的微波功率输出,效率为 48.49%,永磁体的总质量约为 2.5 kg。研究表明,采用反转永磁引导系统引导强流相对论环形电子束是可行的,同时有利于E型波导振荡器的紧凑化、小型化和低损耗,便于多管合成实现GW级输出功率。

参考文献:

- [1] 朱丹妮. X波段高阻抗相对论速调管放大器的仿真设计[D]. 长沙: 国防科技大学, 2013: 1-2. (Zhu Danni. Simulation design of an X-band high-impedance relativistic klystron amplifier [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013: 1-2)
- [2] Barker R J, Schamiloglu E. 高功率微波源与技术[M]. 《高功率微波源与技术》翻译组,译. 北京: 清华大学出版社, 2005. (Barker R J, Schamiloglu E. High-power microwave sources and technologies[M]. Translation Group for 《High Power Microwave Sources and Technologies》, trans. Beijing: Tsinghua University Press, 2005)
- [3] 黄华,甘延青,雷禄容,等. S波段相对论速调管振荡器研究[J]. 物理学报, 2008, 57(3): 1765-1770. (Huang Hua, Gan Yanqing, Lei Lurong, et al. Investigation on an S-band relativistic klystron oscillator[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(3): 1765-1770)
- [4] 李士锋,黄华,段兆云,等. Ka波段GW级同轴扩展相互作用相对论速调管放大器的仿真研究[C]//2016真空电子学会第二十届学术年会论文集(上). 2016: 1-5. (Li Shifeng, Huang Hua, Duan Zhaoyun, et al. Simulation of Ka-band gigawatt coaxial extended interaction relativistic klystron amplifier[C]//20th CVE of Chinese Institute of Electronics. 2016: 1-5)
- [5] 刘振帮,黄华,金晓,等. X波段高功率高增益多注相对论速调管放大器设计[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32: 103004. (Liu Zhenbang, Huang Hua, Jin Xiao, et al. Design of X-band high-power high-gain multiple-beam relativistic klystron amplifier[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32: 103004)
- [6] Sprehn D, Caryotakis G, Eppley K, et al. PPM focused X-band klystron development at the Stanford Linear Accelerator Center[C]//Pulsed RF Sources for Linear Colliders. 1996: 2-9.
- [7] 魏元璋,李士锋,王战亮,等. 同轴相对论速调管周期永磁聚焦系统的初步研究[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30: 063007. (Wei Yuanzhang, Li Shifeng, Wang

- Zhanliang, et al. Periodic permanent focusing magnet of relativistic klystron[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 063007)
- [8] Gilmour Jr A S. 速调管、行波管、磁控管、正交场放大器和回旋管[M]. 丁耀根, 张兆传, 译. 北京: 国防工业出版社, 2012. (Gilmour Jr A S. Klystrons, traveling wave tubes, magnetrons, crossed-field amplifiers, and gyrotrons[M]. Ding Yaogen, Zhang Zhaochuan, trans. Beijing: National Defense Industry Press, 2012)
- [9] Malykhin A V, Nevsky P V, Pasmannik V I, et al. High-power multibeam klystron with reversive magnetic focusing system[C]//Proceedings International University Conference 'Electronics and Radiophysics of Ultra-High Frequencies'. 1999: 56-59.
- [10] Akimov P I, Balabanov A K, Chudin V G, et al. C-band multibeam klystron with reversal focusing system on permanent magnets for electron accelerators[C]//Proceedings of the 10th International Vacuum Electron Sources Conference (IVESC). 2014: 1-2.
- [11] Komarov D A, Yakushkin E P, Paramonov Y N, et al. Development of a C-band high power amplifier Klystron for linear electron accelerators[C]//Proceedings of the 18th International Vacuum Electronics Conference. 2017: 1-2.
- [12] 林嘉文. S波段相对论速调管的永磁包装技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021: 32-64. (Lin Jiawen. Research on permanent magnetic packaging technology of S-band relativistic klystron[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021: 32-64)
- [13] 电子管设计手册编辑委员会. 微波电子管磁路设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984. (Electronic Tube Design Handbook Editorial Committee. Microwave electron tube magnetic circuit design handbook[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1984)
- [14] 丁耀根. 大功率速调管的理论与计算模拟[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008. (Ding Yaogen. Theory and computer simulation of high-power klystron[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008)
- [15] 丁耀根. 大功率速调管的设计制造和应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010. (Ding Yaogen. Design, manufacture and application of high power klystron[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010)
- [16] 丁耀根. 多注速调管电子光学系统的研究[J]. 电子科学学刊, 2000, 22(3): 485-491. (Ding Yaogen. Study on electron optics system of multi-beam klystron[J]. *Journal of Electronics*, 2000, 22(3): 485-491)
- [17] 林秉初, 汪健如. 电子光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002. (Lin Bingchu, Wang Jianru. Electron optics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002)
- [18] 顾若男, 李相强, 孔龙, 等. 强流相对论电子束在PPM系统中的传输特性研究[J]. *信息技术*, 2017(12): 14-17. (Gu Ruonan, Li Xiangqiang, Kong Long, et al. Analysis of transmission characteristics of the intense relativistic electron beam under PPM focusing system[J]. *Information Technology*, 2017(12): 14-17)