

带螺线盘线圈的 Ku 波段径向渡越时间振荡器模拟研究

陈永东

(四川理工学院物理与电子工程学院,四川 自贡 643000)

摘要:径向渡越时间振荡器(transit-time oscillator, TTO)相较于轴向渡越时间振荡器,其电子束电流密度更低,空间电荷效应更弱,从而其束波转换效率更高,所需要的引导磁场也更低,因此是目前最有潜力的径向高功率微波(HPM)器件之一。传统径向渡越时间振荡器通常采用金属栅网实现对径向传输电子束的引导,但是金属栅网的熔蚀直接限制了器件的工作寿命和重复频率。在利用径向螺线盘线圈产生的磁场满足径向电子束稳定传输的条件下,开展了带螺线盘线圈的 Ku 波段径向渡越时间振荡器的整管粒子(PIC)模拟。在电子束电压 300 kV、电流 20 kA 的模拟条件下,器件实现微波功率为 2.07 GW、频率 14.86 GHz、效率达 34.5% 的输出。

关键词:高功率微波; Ku 波段; 径向渡越时间振荡器; PIC 模拟

中图分类号:TN122

文献标志码:A

引言

在过去的 20 多年里,高功率微波(HPM)系统在峰值功率、脉冲能量以及重复频率等多个指标上取得了长足的进步,但 HPM 系统距离实际应用还面临着诸多技术挑战。在很多应用场景中,HPM 系统被要求安装在狭小的、有限功率供给的移动平台上,这对 HPM 系统的体积、重量、效率等指标提出了非常严苛的要求。发展紧凑、轻便、高效的 HPM 系统成为当前 HPM 研究中的热点问题之一^[1]。为实现 HPM 系统的小型化和轻量化,通常要求 HPM 源工作在较低的二极管电压,引导磁场尽可能低^[2],同时具有较高的束波转换效率等。

相比于轴向渡越时间振荡器(transit-time oscillator, TTO)^[3-6],径向 TTO 的电子束的电流密度更低,空间电荷效应更弱,因此其束波转换效率可能更高,同时所需

要的引导磁场也更低。另外,维持径向电子束传输的工作电压更低。这几方面都有利于 HPM 系统的小型化和轻量化。因此,采用径向电子束的 HPM 源在最近的十余年得到了广泛的关注和深入的研究,径向 TTO 作为传统的轴向 TTO 的变种,是目前最有潜力的径向 HPM 器件之一^[7-12]。与轴向 TTO 类似,径向 TTO 通常采用高熔点的金属栅网^[7-14],如钨等引导强流电子束。在某些场合,金属栅网还扮演微波谐振腔的作用,实现电子束的调制和微波能量的提取。采用金属栅网的 TTO 最大的优点是不需要额外的磁场引导径向电子束传输,但是带栅网的 TTO 也有很多难以克服的缺点。首先,栅网会拦截或散射部分电子,这将影响电子束的数量及品质,导致器件的效率低下;此外,金属栅网在强流电子束的轰击下很容易加热并熔化,这限制了器件的重复频率和工作寿命,同时轰击产生的等离子体还会引起微波脉冲缩短等问

收稿日期:2017-09-13

基金项目:四川省教育厅重点资助项目(16ZA0257)

作者简介:陈永东(1969-),男,讲师,博士,主要从事高功率微波技术方面的研究,(E-mail)yongdongchen1@163.com

题^[12-13]。为克服带栅网 TTO 的上述缺点,设计了一种无栅网的 Ku 波段径向 TTO,利用螺线盘线圈产生所需要的径向磁场对径向发射电子束进行引导,取代金属栅网的作用。粒子模拟显示,器件在电子束电压 300 kV、电流 15 kA 条件下,可以产生功率 2.07 GW、频率 14.86 GHz 的高功率微波,束波转换效率达 34.5%。

1 径向磁场产生

在大部分螺线管线圈的设计中,更关心的是线圈的 B_z 分布,而对 B_r 分布不甚关心^[15]。为产生满足径向电

$$B_r(\rho, z, \theta) = \frac{\mu_0 I_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{(z - z') \cdot \cos(\theta - \varphi) \cdot a}{[(\rho \cos\theta - a \cos\varphi)^2 + (\rho \sin\theta - a \sin\varphi)^2 + (z - z')^2]^{\frac{3}{2}}} d\varphi \quad (2)$$

式中, I_0 是线圈电流, a 为线圈半径, z' 为线圈的轴向位置。

根据式(2),可以给出不同半径的单匝线圈产生的径向磁场分布,由图 1 中“单线圈”曲线分别给出了半径 $a = 5 \text{ cm}, 7 \text{ cm}, 9 \text{ cm}, 11 \text{ cm}$ 的线圈产生的径向磁场沿径

$$B_r(\rho, z, \theta) = \frac{n\mu_0 I_0}{4\pi} \int_{r_1}^{r_2} da \int_0^{2\pi} \frac{(z - z') \cdot \cos(\theta - \varphi) \cdot a}{[(\rho \cos\theta - a \cos\varphi)^2 + (\rho \sin\theta - a \sin\varphi)^2 + (z - z')^2]^{\frac{3}{2}}} d\varphi \quad (3)$$

向的分布。可以看出, B_r 分布与高斯分布类似,并且 B_r 的最大点对应的半径与线圈半径一致。同时,单匝线圈产生的 B_r 沿径向无均匀区,因此仅靠单匝线圈的磁场是无法引导电子束的稳定传输。进一步地,研究了沿径向环绕的多匝螺线盘线圈产生的径向磁场:

子束稳定传输的径向磁场分布,重新推导了线圈的磁场分布。圆柱坐标系下,电流元产生的磁场分布可以表示为:

$$\vec{B}(\rho, z, \theta) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\vec{J}(\vec{R}') dV' \times \vec{r}}{r^3} \quad (1)$$

式中, ρ, z, θ 分别为圆柱坐标系场点的三个坐标变量, μ_0 为真空中的磁导率, \vec{R}' 为电流元上任取的一点即源点, \vec{r} 为源点到场点的矢径。由此,可以给出单匝线圈产生的径向磁场:

向的分布。可以看出, B_r 分布与高斯分布类似,并且 B_r 的最大点对应的半径与线圈半径一致。同时,单匝线圈产生的 B_r 沿径向无均匀区,因此仅靠单匝线圈的磁场是无法引导电子束的稳定传输。进一步地,研究了沿径向环绕的多匝螺线盘线圈产生的径向磁场:

场沿轴向的分布。可以看到,单螺线盘的 B_r 分布沿 z 向是逐渐减小的,而采用双螺线盘线圈的 B_r 分布在两螺线盘之间是近似均匀的。因此为保证电子束的稳定传输,可以采用双螺线盘线圈在电子束通道内产生沿轴向和径向近似均匀的 B_r 分布。

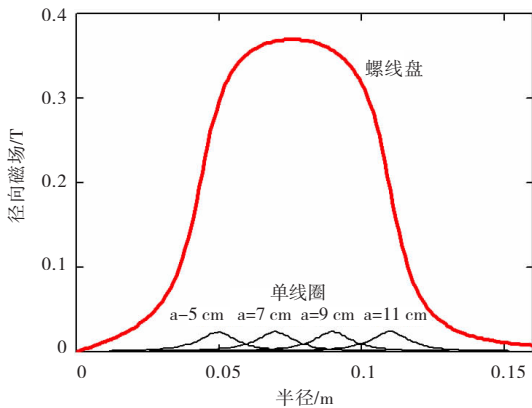


图 1 不同线圈配置下径向磁场沿半径方向的分布

图 2 为单螺线盘和双螺线盘产生的径向磁场分布对比,两单螺线盘分别位于 $z' = 0$ 和 $z' = 22 \text{ mm}$,选取的参考面位于两个螺线盘的中点即 $z = 11 \text{ mm}$ 。可以看到,当参考面选择在两个螺线盘中点时,两个单螺线盘各自的 B_r 分布完全相同,而双螺线盘的径向磁场是单螺线盘的两倍。图 3 是单、双螺线盘线圈产生的径向磁

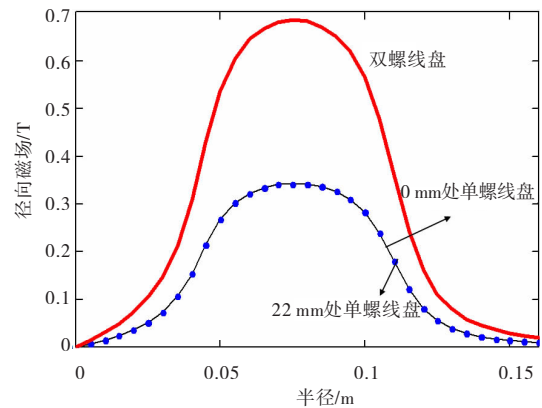


图 2 不同线圈配置下径向磁场沿径向的分布

根据上面的计算结果,可以绕制双螺线盘线圈的模型如图 4 所示。图 5 是根据上述参数在 PIC 软件中建立的双螺线盘线圈模型产生的径向磁场分布。由图 5 可知,径向磁场在电子束通道内的分布均匀,均匀区磁场强度 0.68 T,后续章节中将开展基于该磁场分布的 Ku 波段 TTO 的整管粒子模拟。

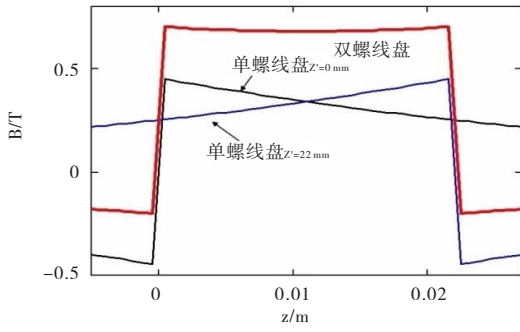


图3 螺线盘线圈径向磁场沿轴向的分布

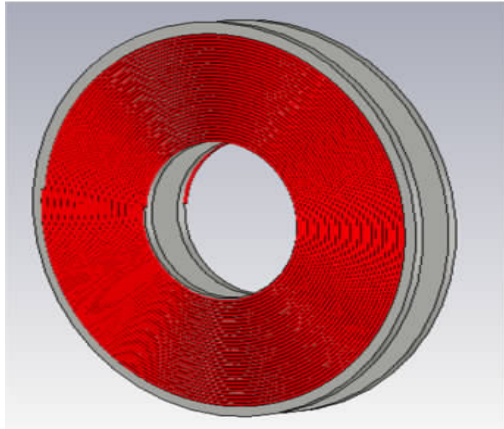


图4 双螺线盘线圈模型

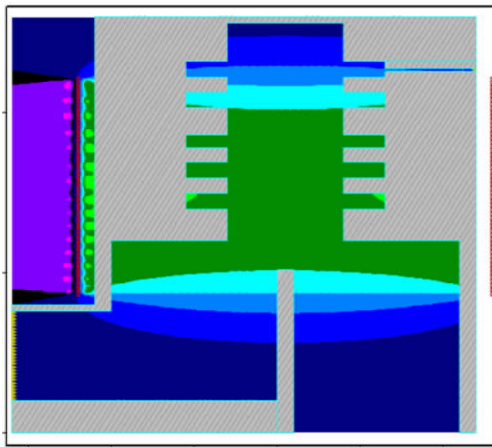


图5 双螺线盘线圈产生的径向磁场分布

2 径向电子束的空间电荷势能

如果忽略电子束沿 z 向的厚度,同时假定电子束的初始半径为 r_b , 初始入射相对论因子为 γ_{inj} , 径向传输线的宽度为 L , 则电子束的空间电荷势能可以表示为^[9]:

$$\varphi(r_b) = \frac{I_0}{4\pi\epsilon_0 v_b} \frac{L}{r_b} \quad (4)$$

式中, v_b 是电子束在径向传输线内的运动速度, I_0 为电

子束电流。由能量守恒,有:

$$\gamma_{inj} = \gamma_0 + \frac{I_0}{I_s \beta_0} \quad (5)$$

式中, $\beta_0 = \frac{v_b}{c}$, I_s 为归一化电流,其定义为:

$$I_s = \frac{4\pi\epsilon_0 m_0 c^3}{e} \frac{r_b}{L} \quad (6)$$

电子束达到空间电荷限制流状态的势能表示为:

$$\varphi_{scl} = (\gamma_{inj} - \gamma_{inj}^+) m_0 c^2 \quad (7)$$

由此,可以给出空间电荷限制电流 I_{scl} :

$$I_{scl} = \frac{4\pi\epsilon_0 m_0 c^3}{e} \frac{r_b}{L} (\gamma_{inj}^+ - 1)^+ \quad (8)$$

联立式(4)和式(5),可以给出电子束在径向传输线内空间电荷势能和空间电荷限制电流。图6是电压300 kV、电流20 kA的电子束在宽0.7 cm的径向传输线内的势能以及空间电荷限制电流沿半径的变化曲线。由图6可知,随着半径的增大,电子束电流密度逐渐减小,由此导致空间电荷势能逐渐减小,可提取的电子束动能逐渐增加,这也是径向TTO拥有较高束波转换效率的原因。图7为径向传输线内直流电子束的电子动能相空间分布,其也印证了理论分析。由图7可知,电子束在通过二极管的加速间隙进入到器件内部以后,随着半径的增加,动能逐渐增大。图6空间电荷限制流曲线可以看出,当阴极半径选择为5.1 cm,相应的空间电荷限制流为30 kA,高于模拟采用的20 kA,不会在二极管区形成虚阴极。

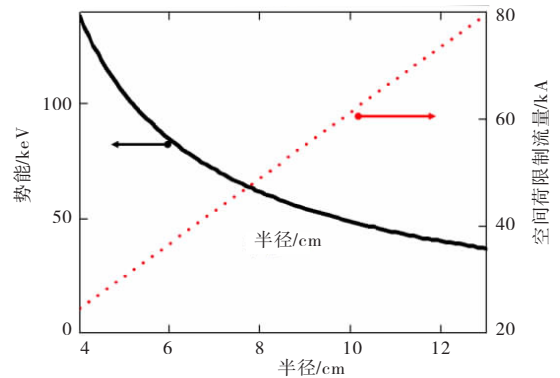


图6 势能和空间电荷限制电流沿半径的变化曲线

3 粒子模拟结果

Ku波段径向TTO的模拟模型如图8所示,器件在结构上分为二极管、高频结构和双螺线盘线圈磁场三部分。其中径向TTO高频结构由三间隙调制腔、漂移管和

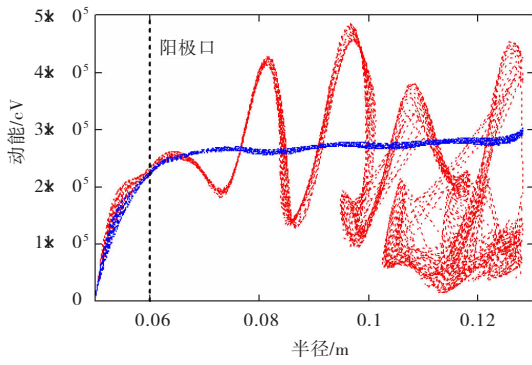


图 7 直流和调制电子束电子动能的相空间分布

双间隙微波提取腔组成。三间隙调制腔工作于纵向 $\frac{2\pi}{3}$ 模式,双间隙提取腔工作于纵向 $\frac{\pi}{2}$ 模式。径向传输线漂移管的半径为 0.7 cm,对工作模式 TM_{01} 的截止频率为 21.4 GHz,高于工作频率 14.86 GHz,可以实现调制腔与提取腔的隔离,同时减少调制腔中微波场向二极管区的泄漏。径向 TTO 工作原理与轴向 TTO 类似:阴极发射的强流电子束通过无箔二极管进入高频结构内,经调制腔内工作模式高频电场调制后,在随后的漂移管内将速度调制转换为密度调制,并在提取腔中实现换能输出。

径向传输电子束的引导磁场由双螺线盘线圈提供。双螺线盘线圈的均匀区径向磁场强度达 0.68 T,阴极表面的磁场强度为 0.54 T。由图 8 径向 TTO 内电子束分布可知,阴极爆炸发射的强流电子束能很好地被双螺线盘线圈产生的磁场约束,无电子轰击管壁。

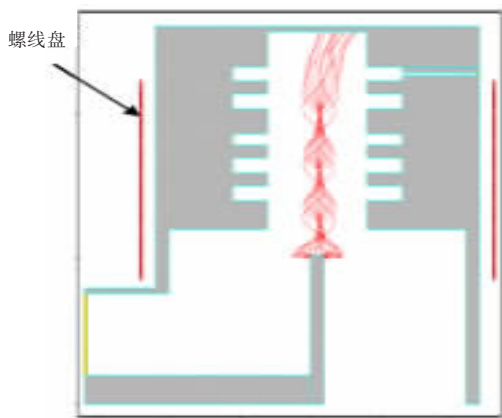


图 8 Ku 波段径向 TTO 模拟模型和电子束分布

图 9 是输出微波功率的射频以及包络波形,图 10 是输出微波电场频谱。在电子束电压 300 kV、电流 15 kA 条件下,器件输出功率 2.07 GW,效率 34.5%,频率 14.86 GHz。

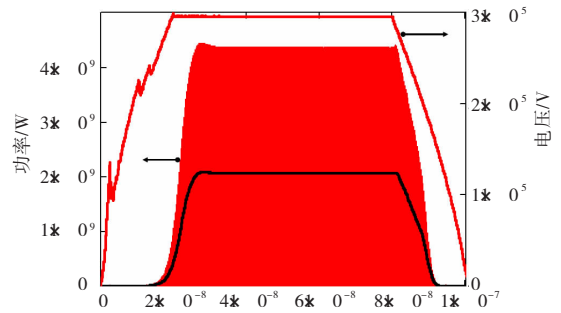


图 9 电子束电压、输出微波功率的射频及包络波形

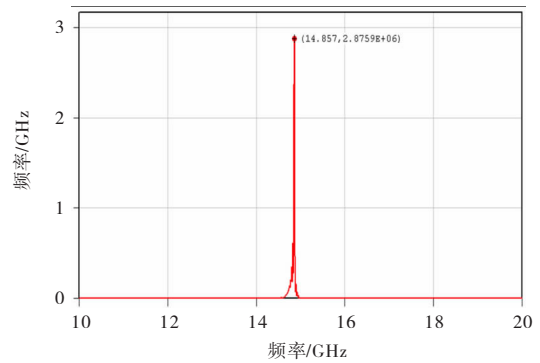


图 9 输出微波电场频谱

4 结束语

本文设计并研究了一种无栅网的 Ku 波段径向 TTO,相比于传统的有栅网 TTO,重复频率和工作寿命有了显著提高。详细研究了径向磁场的产生,并开展了带螺线盘线圈的 Ku 波段径向 TTO 整管粒子模拟。模拟结果显示,器件在电子束电压 300 kV、电流 15 kA 条件下,可以产生功率 2.07 GW、频率 14.86 GHz 的高功率微波,束波转换效率达 34.5%。

参考文献:

[1] BENFORD J, SWEGLE J A, SCHAMLOGLU E. High power microwaves [M]. 2nd Edition. New York: Taylor & Francis, 2006.

[2] LING JP, ZHANG JD, HE JT, et al. A novel Ku-band transit radiation oscillator with external guiding magnetic field [J]. Physics of Plasmas, 2014, 21 (2): 1075-1082.

[3] 令钧溥. Ku 波段低磁场同轴渡越时间振荡器的研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2014.

[4] 练琳. Ku 波段渡越时间振荡器的锁相研究 [D]. 长

- 沙:国防科技大学,2014.
- [5] 何琥.X波段六腔轴渡越时间振荡器的理论和实验研究[D].绵阳:中国工程物理研究院,2003.
- [6] 令钧溥,张建德,贺军涛,等.改进型低阻类膜片同轴渡越时间振荡器[J].强激光与粒子束,2013,25(11):2943-2947.
- [7] 吴中发,王玉芝.径向速调管振荡器的理论设计与数值模拟[J].强激光与粒子束,2000,12(2):211-214.
- [8] 贾云峰,刘永贵,李传胪.径向渡越时间振荡器的数值模拟[J].强激光与离子束,2002,14(1):95-98.
- [9] 李少甫,杨中海.新型高功率径向三腔渡越时间振荡器数值模拟[J].强激光与粒子束,2008,20(2):473-478.
- [10] 臧杰锋,刘庆想,朱静.径向三腔渡越时间振荡器数值模拟[J].强激光与粒子束,2008,20(3):473-476.
- [11] ATMAN M J.Radial acceletron, a new low-impedance HPM source[J].IEEE Transactions on Plasma Science,1996,24(10):964-969.
- [12] DANG F C,ZHANG X P,QI Z M,et al.Simulation investigation of a Ku-band Radial line oscillator operating at low guiding magnetic field[J].Physics of Plasma,2014,21(6):70-81.
- [13] KONG L,LIU Q X,Li X Q,etal.Coaxial foilless diode[J].AIP Advances,2014,4(5):4626-4664.
- [14] CAO YB,HE JT,ZHANG JD,etal.High power microwave generation from the low-impedance transit-time oscillator without foils[J].Physics of Plasmas,2012,19(7):0721061-0721064.
- [15] 王华军,李宏福,温越琼.螺线管中磁场的计算[J].四川轻化工学院学报,1999,12(4):23-25.

Simulation of a Ku-Band Radial Transit-Time Oscillator with Solenoid Plates

CHEN Yongdong

(School of Physics & Electronic Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China)

Abstract: To compare with axial transit time oscillator, for Radial transit time oscillator, the electron beam current density is lower, and the space charge effect is weaker. So the conversion efficiency of beam-wave is higher, and the guiding magnetic field to be needed is lower. Therefore, Radial transit time oscillator is one of the most potential radial HPM devices. The metal foil is usually utilized in the conventional radial transit-time oscillator to replace the role of the external magnetic field on guiding the radial transmitted electron beams. But the evaporation of the metal foil, because of the beam bombardment, directly limits the operating lifetime and repetitive rate of the device. In order to overcome these disadvantages, a Ku-band radial transit-time oscillator with solenoid plates is designed with the aid of PIC software. In the device, radial solenoid plates are introduced to generate a satisfactory magnetic field to maintain the beam quality in transmission. In PIC simulation, when the beam voltage is 300 kV and current is 20 kA, the device can generate 2.07 GW output power at frequency 14.86 GHz, and the efficiency is as good as 34.5%.

Key words: high power microwave; Ku-band; radial transit-time oscillator; PIC simulation