



X波段高重频长脉冲高功率多注相对论速调管放大器的设计与实验研究

刘振帮 黄华 金晓 王腾飏 李士锋

Design and experiment of X-band high-repetition rate high-power multi-beam relativistic klystron amplifier

Liu Zhen-Bang Huang Hua Jin Xiao Wang Teng-Fang Li Shi-Feng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 218401 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20201013

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201013>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

锁频锁相的高功率微波器件技术研究

Review on high power microwave device with locked frequency and phase

物理学报. 2018, 67(8): 088402 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172684>

W波段带状注扩展相互作用速调管放大器的理论与数值模拟

Theoretical analysis and simulation of W-band sheet beam extended interaction klystron amplifier

物理学报. 2019, 68(24): 248401 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190907>

X波段高效率速调型相对论返波管研究

Investigation of an X band high efficiency klystron-like relativistic backward wave oscillator

物理学报. 2020, 69(16): 164102 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200434>

W波段分布作用速调管的设计和实验研究

Design and experimental analysis of W-band extended interaction klystron amplifier

物理学报. 2019, 68(8): 084101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182194>

强流相对论多注电子束在空心圆柱波导中的漂移

Angular drift of the high current relativistic multi-beam in the hollow cylindrical waveguide

物理学报. 2017, 66(4): 044102 <https://doi.org/10.7498/aps.66.044102>

S波段低磁场高效率相对论返波管振荡器研究

S-band high-efficiency relativistic backward waveoscillator with low magnetic field

物理学报. 2019, 68(19): 194101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182155>

X 波段高重频长脉冲高功率多注相对论速调管放大器的设计与实验研究*

刘振帮[†] 黄华 金晓 王腾钊 李士锋

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 高功率微波技术重点实验室, 绵阳 621900)

(2020 年 6 月 28 日收到; 2020 年 7 月 7 日收到修改稿)

多注相对论速调管放大器向工程化和实用化方向发展, 需要进一步提高其工作重频和使用寿命. 针对高功率多注相对论速调管放大器在输出腔间隙电子束换能后, 会出现电子返流轰击输出腔表面, 以及输出腔间隙电场过高产生射频击穿导致输出腔表面出现烧蚀的问题, 本文分析了强流相对论电子束在器件中的返流过程, 在此基础上设计了四间隙扩展相互作用提取结构以避免电子返流和降低间隙电场, 并提高器件工作寿命. 同时针对高工作频段高过模器件中常规水冷却通道会影响输出微波模式的问题, 设计了同轴 TEM 模-扇形 TE₁₀ 模-同轴 TEM 模-圆波导 TM₀₁ 模的模式变换结构, 模式转换效率大于 99.9%, 避免了收集极水冷却通道对输出微波模式的影响, 以提高器件工作重频. 在重频 45 Hz 工作条件下, 实验实现 X 波段长脉冲 GW 级高功率微波稳定输出, 器件累计运行约 10000 次, 输出微波参数无明显下降.

关键词: 相对论速调管放大器, X 波段, 长脉冲, 高重频

PACS: 84.40.Fe, 41.20.-q, 41.20.jb, 52.59.Ye

DOI: 10.7498/aps.69.20201013

1 引言

相对论速调管放大器 (relativistic klystron amplifier, RKA) 具有功率高、效率高、相位和幅度稳定等优点, 并且具有宽带的潜力, 是一类非常重要的高功率微波器件, 在雷达、通信系统、高能加速器等领域有非常广泛的发展和应[1-8]. 应用需求的发展要求进一步提高速调管放大器的工作频率和输出功率, 而常规结构圆波导漂移管的 RKA 由于受几何尺寸、空间电荷力及高压击穿等物理因素的制约, 器件的输出功率和工作频率受到限制. 美国海军实验室的 Friedman 等学者得到常规结构 RKA 输出功率 P 与工作频率 f 关系的半经验公式为 $P \propto 1/f^{-N}$, $N \approx 2$ [9], 因此常规结构 RKA 在 X 波段难以实现 GW 级的高功率微波输出[10-12].

项目组发展并设计了过模同轴多注 RKA[13-16], 基于多电子注技术的过模多注 RKA, 可在较低的工作电压和引导磁场下获得较高的电子束电流及导流系数, 突破了常规结构 RKA 的物理限制, 明显提高了器件的工作频率和输出微波功率, 实验实现多注 RKA 在 X 波段 GW 级微波功率锁频锁相放大输出, 器件系统结构示意图如图 1 所示. 在实际使用中, 需要进一步提高多注 RKA 的工作重频和寿命, 以满足工程化和实用化的需求. 实验中多注 RKA 的功率转换效率约为 35%, 剩余的大部分电子能量会累积到末端的收集极上, 收集极散热设计不当, 高重频工作时会导致严重烧蚀, 产生大量等离子体和二次电子, 从而影响器件重频工作稳定性. 为了提高多注 RKA 的稳定性和工作寿命, 需要避免相对论电子束在工作过程中轰击器件的高频结构表面. 电子束轰击高频结构主要发生在输出

* 高功率微波技术重点实验室基金 (批准号: 6142605180203) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: liu9559@yeah.net

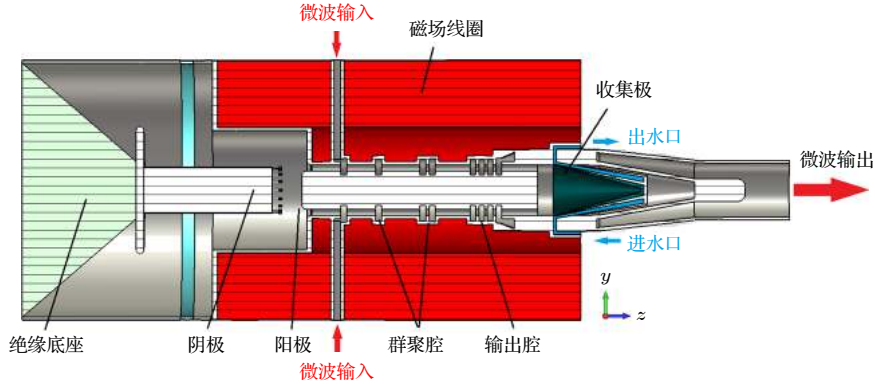


图 1 X 波段多注 RKA 结构示意图

Fig. 1. Structure diagram of X band multi-beam RKA.

腔, 输出腔设计不当时, 会产生返流电子轰击结构表面, 同时输出腔间隙电场过高会出现射频击穿, 使得腔体表面被烧蚀. 为此本文分析了强流相对论电子束在器件中传输时出现电子返流的过程. 在此基础上设计了四间隙扩展相互作用同轴提取结构以避免电子返流, 以及降低间隙电场强度和微波提取效率. 同时针对在高工作频段下常规水冷却通道会影响输出微波模式的问题, 设计了同轴 TEM 模-扇形 TE₁₀ 模-同轴 TEM 模-圆波导 TM₀₁ 模的模式变换结构, 模式转换效率大于 99.9%, 避免了收集极水冷却通道对输出微波模式的影响. 在长脉冲加速器平台上开展了验证实验研究, 在重频 45 Hz 工作条件下, 实验实现 X 波段长脉冲 GW 级高功率微波稳定输出, 器件累计运行约 10000 次, 输出微波参数无明显下降.

2 强流电子束在同轴结构中传输产生返流的过程分析

强流电子束在器件中传输出现返流主要发生在输出腔间隙处, 由于电子束在输出腔间隙将动能转换为微波能量输出, 动能减少. 同时输出腔间隙径向尺寸相比于电子束传输通道存在跳变, 使得该处电子束势能增加, 动能减少. 在输出间隙处, 当电子减速过多, 则会出现电子返流, 该过程与产生虚阴极过程相似.

强流相对论电子束在同轴结构中传输时, 由于空间电荷效应的影响. 电子束在横截面上会产生电位降, 使得电子束的动能会有一部分转换为势能, 强流电子束在同轴结构中传输如图 2 所示.

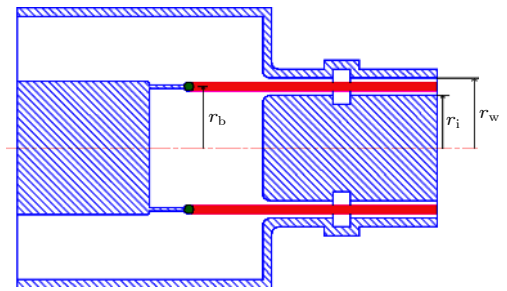


图 2 强流电子束在同轴结构中传输

Fig. 2. Intense electron beam is transmitted in the coaxial structure.

电子束位置的势能 E_p 为^[17]

$$E_p = |e\phi(r_b)| = \frac{|eI_0|}{2\pi\epsilon_0 v_0} \left(\frac{1}{\ln \frac{r_b}{r_i}} + \frac{1}{\ln \frac{r_w}{r_b}} \right)^{-1}, \quad (1)$$

式中, e 为电子的电荷量, $\phi(r_b)$ 为电子的电势, I_0 为电子束电流, ϵ_0 为真空中的介电常数, v_0 为电子的运动速度, r_b 为电子束离器件中心的距离, r_i 为同轴结构的内半径, r_w 为同轴结构的外半径.

根据能量守恒定律, 同轴结构中电子束横截面上电子的动能 E_k 与势能 E_p 之和应该等于电子束的注入总能量 E_0 .

$$E_0 = E_k + E_p,$$

$$|eU_0| = (\gamma_0 - 1)m_e c^2 + |e\phi(r_b)|,$$

$$\gamma_0 = [1 - (v_0/c)^2]^{-1/2}, \quad (2)$$

式中, U_0 为二极管电压, γ_0 为相对论因子, m_e 为电子质量, c 为真空中的光速. 设定电子束的电压 U_0 为 700 kV, 电子束离器件中心的距离 r_b 为 35 mm, 同轴结构内半径 r_i 为 30 mm, 同轴结构外半径 r_w 为 40 mm. 在不同的电子束电流 I_0 情况

下,由(1)式和(2)式结合器件尺寸,图1所示同轴输入腔、中间腔1、中间腔2和输出腔的内外半径分别约为46 mm/25.5 mm,45 mm/26 mm,45 mm/26 mm,45 mm/26 mm(输出腔最后一间隙径向尺寸为49 mm/26 mm),可得到直流电子束在器件同轴结构中传输时,其势能与总能量的比值 E_p/E_0 的变化如图3所示。

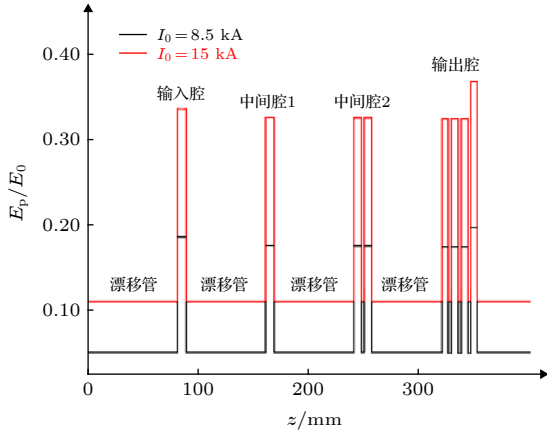


图3 直流电子束在器件中传输时 E_p/E_0 的变化
Fig. 3. Changes of E_p/E_0 when the electron beam is transmitted in the device.

由图3可以看出,对于固定半径的电子束,当同轴结构内外边界与电子束的径向距离增大时,电子束的势能会增大,即在谐振腔间隙处形成了一个势阱,电子束穿过谐振腔间隙时动能会减小.而且电子的势能随束流强度增大而增大,这说明空间电荷效应随束流强度增大而增大.当输入腔注入微波,电子束在器件中传输时会产生群聚,一般在输出腔间隙处电子束群聚达到最大,空间电荷效应引起的势阱作用也达到最强.在电流为15 kA时,输出腔间隙处 E_p/E_0 的最大值约为35%.同时群聚

电子束在输出腔间隙发生换能,电子束被减速,其部分动能会转换为微波能量输出,处于减速电场的低动能电子可能反向运动,即在高频作用间隙形成了虚阴极,出现电子返流。

3 输出腔结构优化设计

由于器件中电场强度最大位置在输出腔间隙处,要实现器件稳定工作,输出腔间隙电场强度需要低于击穿阈值,以避免射频击穿导致脉冲缩短和输出腔结构表面烧蚀.为了抑制电子返流,同轴输出腔内外边界与电子束的径向距离需要减小,以减小群聚电子束在输出腔间隙处的势阱.提高器件的过模比(器件漂移管直径与工作波长 λ 的比值,本文中多注速调管按照 $2r_w/\lambda$ 计算),有利于降低间隙的电场强度和降低电子束的空间电荷效应,因此将X波段多注RKA的过模比由原先的1.3提高为约2.5.同时对输出腔结构进行改进设计,设计了四间隙扩展相互作用输出腔结构以降低间隙电场强度.输出结构采用 π 模工作模式,相邻间隙的轴向电场方向相反.设计四间隙 π 模工作输出腔的电子负载电导为负值,使得工作模式易于被电子束激励,同时每个间隙长度 L_{gap} 满足 $\beta_e L_{gap} < \pi$,其中 $\beta_e = 2\pi f/v_0$, f 为工作频率.电子束通过输出腔间隙时能够产生较好的换能,以提高功率转换效率.并且多间隙过模结构有利于减小输出腔内外边界与电子束的径向距离(相比于常规结构可减小约10%),减小电子束在输出腔间隙处产生的势阱,以避免电子返流。

粒子模拟仿真电子束电压为700 kV,束流为8.5 kA,轴向引导磁感应强度为0.8 T,在该参数下

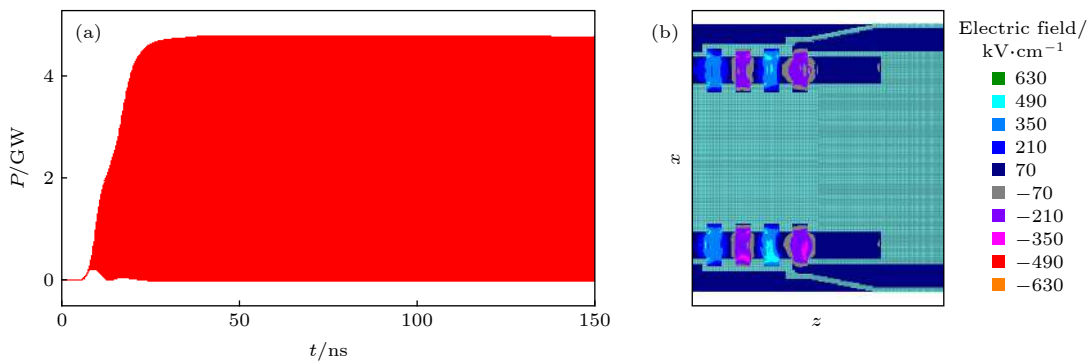


图4 输出微波与间隙电场分布 (a) 输出微波波形; (b) 输出腔电场分布

Fig. 4. Distribution of output microwave and gap electric field: (a) Output microwave waveform; (b) electric field distribution of the output cavity.

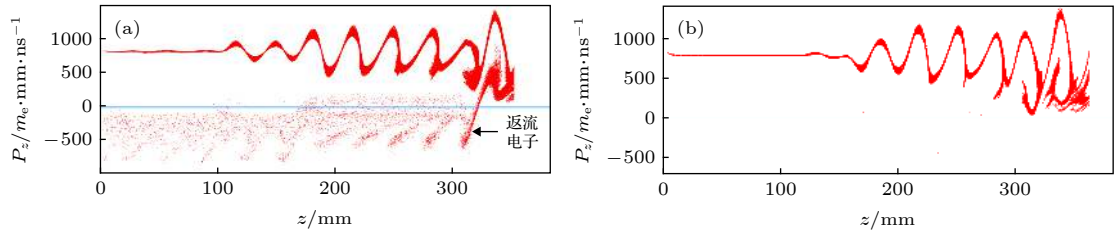


图 5 改进设计前后电子束相空间图 (a) 改进设计前; (b) 改进设计后

Fig. 5. Electron beam phase space diagram: (a) Before the improved design; (b) improved design.

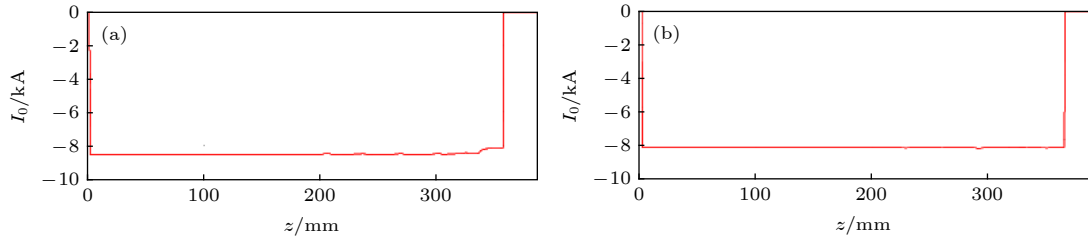


图 6 改进设计前后电子束电流随轴向传输距离的变化 (a) 改进设计前; (b) 改进设计后

Fig. 6. Changes of electron beam current with axial transmission distance: (a) Before the improved design; (b) improved design.

早期设计的双间隙输出腔输出微波功率约为 2 GW, 转换效率约为 34%, 双间隙输出腔结构最大电场强度约为 1.3 MV/cm, 大于击穿阈值. 改进设计后粒子仿真四间隙扩展相互作用输出腔输出微波功率约为 2.4 GW, 转换效率为 40%. 此时输出间隙结构的轴向电场 E_z 分布如图 4(b) 所示, 间隙最大电场强度小于 700 kV/cm, 低于 X 波段的经验击穿阈值 800 kV/cm.

粒子模拟仿真改进设计前后的电子束相空间图和电子束电流随轴向传输距离的变化如图 5 和图 6 所示.

返流电子为图 5 中轴向动量小于零的电子 (图中蓝色线下方的电子). 由图 5 和图 6 可知, 改进设计后粒子仿真结果显示, 抑制了电子束在输出腔间隙返流和束流损失, 有利于提高器件的工作稳定性和工作寿命.

4 水冷却收集极的优化设计

实际的器件实验中, 电子束功率约为 6 GW, 群聚电子束通过输出腔换能后, 仍有约 4 GW 的剩余功率, 电子束脉宽约为 150 ns, 在重频 45 Hz 工作条件下, 收集极处电子束的平均功率约为 27 kW. 高重频工作条件下, 电子束平均功率较大, 为了增大器件持续工作时间, 需要及时将热量导出, 应采用具有外部水冷却结构的收集极 [18,19]. 同

时电子束峰值功率很高, 需要结合磁场位形进行设计使电子束在收集极处散开, 增大电子束轰击收集极面积, 避免过度烧蚀产生大量等离子体. X 波段相对论速调管微波输出为轴向提取结构, 微波通道为过模结构以保证功率容量, 收集极在微波通道内部, 而水冷却通道尺寸较大, 器件工作在较高频段时, 引入该通道会产生较大的微波反射, 并导致输出微波模式产生变化, 因此对水冷却通道结构进行改进设计. 设计了同轴 TEM 模-扇形 TE_{10} 模-同轴 TEM 模-圆波导 TM_{01} 模的模式变换结构. 扇形波导的数目为 12 个, 以保证微波在扇形波导中的传输模式为基模 TE_{10} 模, 相邻两个扇形波导之间最大的间隙角度 $\theta_1 = 8^\circ$, 对应间隙距离约为 7 mm, 相应间隙的长度 $L_1 = 12$ mm, 可以提供水路传输的通道 (设计水路通道为直径 5 mm). 模式变换结构的电场分布与微波传输参数如图 7 和图 8 所示.

图 7(a) 为模式变换器纵向剖面结构与电场分布图, 图 7(b) 为扇形波导处的横向剖面结构与电场分布图. 由图 8 可知在频率 9.35—9.45 GHz 范围内, 输出微波的模式转换效率大于 99.9%. 仿真计算中设定微波馈入端口的功率为 0.5 W, 模式变换结构中最大电场强度为 627 V/m, 计算得到当输出微波功率为 3 GW 时, 对应最大电场强度约为 486 kV/cm, 低于击穿阈值, 设计的模式变换结构具有较高的功率容量.

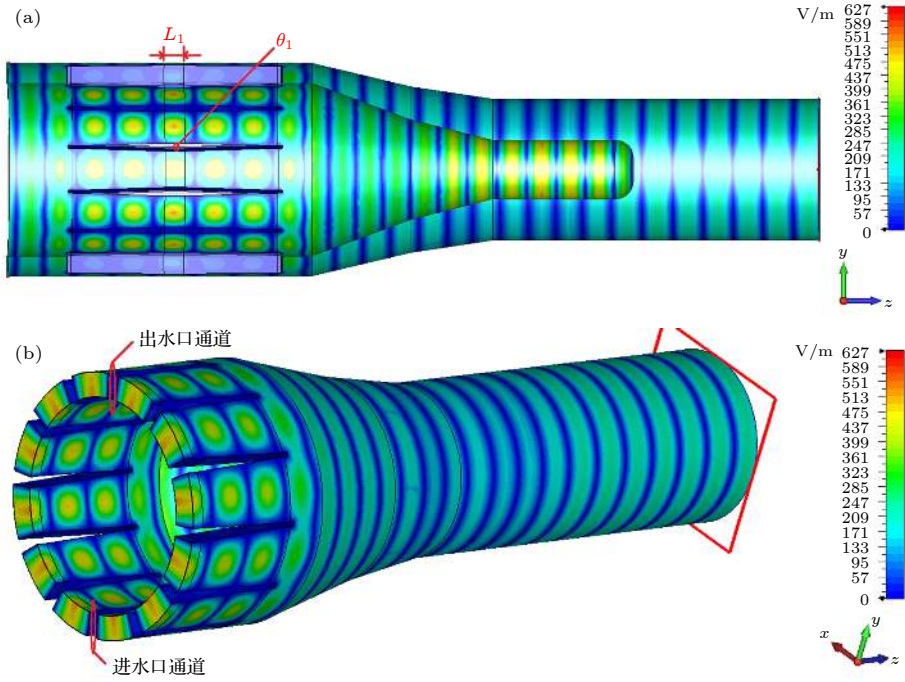


图 7 模式变换结构的电场分布 (a) 纵向剖面; (b) 横向剖面

Fig. 7. Electric field distribution of the mode transform structure: (a) Lengthwise section; (b) transverse section.

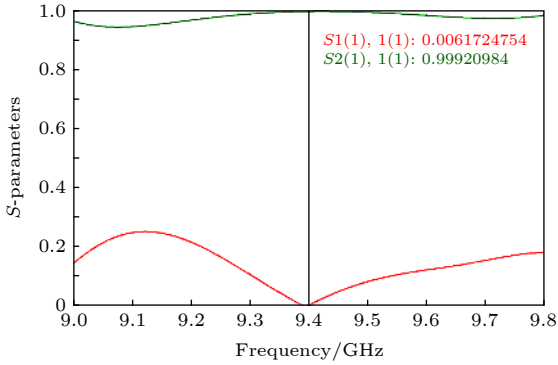


图 8 模式变换结构的 S 参数曲线

Fig. 8. The S parameter curve of mode transformation structure.

5 重频长脉冲实验研究

在长脉冲加速器平台开展 X 波段多注 RKA 器件高重频实验研究, 器件实验示意图如图 1 所示. 收集极设计了水冷却散热结构, 并且结合实际磁场位形对收集极的位置进行优化设计, 收集极处于磁场开始变弱的边缘位置, 换能后的电子束在收集极处散开^[20], 尽量增大电子束轰击收集极的面积, 以避免高重频工作时收集极烧蚀. 重频 45 Hz 工作时, 加速器产生电子束电压与电流波形如图 9 所示.

电子束电压为 700 kV, 电流为 8.5 kA, 重频

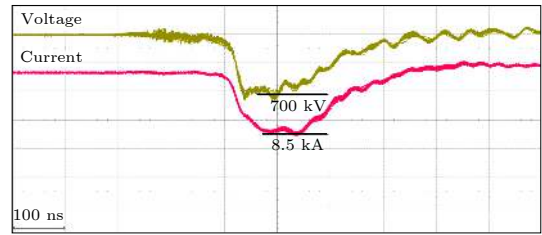


图 9 重频 45 Hz 电子束重叠波形

Fig. 9. Overlapping waveform of electron beam at 45 Hz.

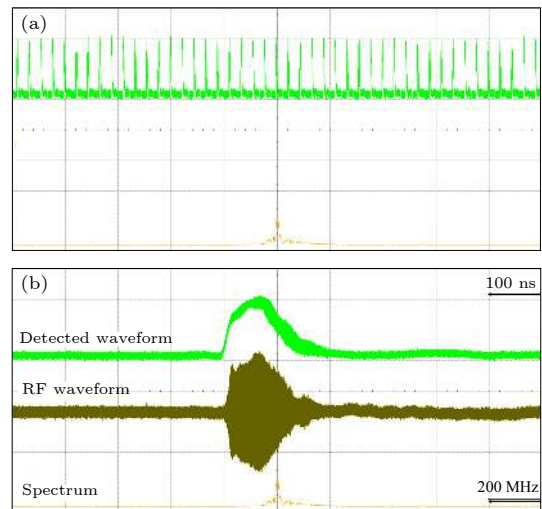


图 10 重频 45 Hz 微波序列与重叠波形 (a) 序列波形; (b) 重叠波形

Fig. 10. Microwave sequence and overlapped waveform at 45 Hz: (a) Sequence waveform; (b) overlapping waveform.

45 Hz 工作情况下, 加速器稳定工作. 在轴向引导磁感应强度 0.8 T 的情况下, 输出微波序列与重叠波形如图 10 所示.

由图 10 可知, 在重频 45 Hz 工作情况下, 输出微波稳定性较好, 微波功率大于 1 GW, 输出微波脉宽约为 110 ns, 输出微波频率为 9.4 GHz, 与输入微波频率相一致. 改进设计后, 器件累计运行约 10000 次, 输出微波参数无明显降低.

6 结 论

为了提高 X 波段长脉冲多注 RKA 高重频工作稳定性和工作寿命, 对强流相对论电子束在器件中的返流过程进行了分析, 在此基础上设计了四间隙扩展互作用微波提取结构以避免电子返流, 以及降低间隙电场强度和提提高微波提取效率. 同时针对高工作频段过模输出结构, 常规水冷却通道会影响输出微波模式的问题设计了同轴 TEM 模-扇形 TE₁₀ 模-同轴 TEM 模-圆波导 TM₀₁ 模的模式变换结构, 模式转换效率大于 99.9%, 避免了收集极水冷却通道对输出微波模式的影响. 实验实现 X 波段多注 RKA 在重频 45 Hz 情况下稳定工作, 输出微波功率大于 1 GW, 微波脉宽约 110 ns, 器件累计运行约 10000 次, 输出微波参数无明显降低. 提高了 X 波段多注 RKA 重频工作稳定性和寿命, 为 X 波段多注 RKA 的实际工程应用奠定了技术基础.

参考文献

- [1] Jerrold S L, Bruce D H 1994 *Appl. Phys. Lett.* **65** 2133
- [2] Huang H, Wu Y, Liu Z B, Yuan H, He H, Li L L, Li Z H, Jin X, Ma H G 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 088402 (in Chinese) [黄华, 吴洋, 刘振帮, 袁欢, 何晓, 李乐乐, 李正红, 金晓, 马弘舸 2018 物理学报 **67** 088402]
- [3] Thomas H, Adam B, Rasheda B, Heinz B, Mark C, Edward E, Deepika G, Armand S, Brad S, Lou Z 2010 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **38** 1264
- [4] Ding Y G, Shen B, Cao J, Zhang Y Q, Ruan C J, Gu H H, Zhang D, Wang C Y, Cao M 2009 *IEEE Trans. Electron Dev.* **56** 870
- [5] Wu Y, Xu Z, Zhou L, Li W J, Tang C X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 224101 (in Chinese) [吴洋, 许州, 周霖, 李文君, 唐传祥 2012 物理学报 **61** 224101]
- [6] Li R J, Ruan C J, Zhang H F 2018 *Phys. Plasmas* **25** 033107
- [7] Wei Y Z, Li S F, Wang Z L, Huang H, Liu Z B, He H, Gong Y B 2018 *High Power Laser and Particle Beams* **30** 063007 (in Chinese) [魏元璋, 李士锋, 王战亮, 黄华, 刘振帮, 何晓, 宫玉彬 2018 强激光与粒子束 **30** 063007]
- [8] Zhang C Q, Ruan C J, Wang S Z, Yang X D 2015 *J. Infrared Millimeter Waves* **34** 307 (in Chinese) [张长青, 阮存军, 王树忠, 杨修东 2015 红外与毫米波学报 **34** 307]
- [9] Friedman M, Pasour J, Smithe D 1997 *Appl. Phys. Lett.* **71** 3724
- [10] Edward B A, Andrew N D, Mikhail I F, Nikolay G K, Nikolay F K, Mikhail I P, Alexander V S, Edl S, Eugeny I S, Vladimir V Y 2002 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **30** 1041
- [11] Zhang W, Ju J C, Zhang J, Zhou Y X, Zhong H H 2019 *Phys. Plasmas* **26** 053102
- [12] Qi Z M, Zhang J, Zhang Q, Zhong H H, Xu L R, Yang L 2016 *IEEE Electron Device Lett.* **37** 782
- [13] Liu Z B, Jin X, Huang H, Chen H B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 128401 (in Chinese) [刘振帮, 金晓, 黄华, 陈怀璧 2012 物理学报 **61** 128401]
- [14] Liu Z B, Huang H, Jin X, Yuan H, Ge Y, He H, Lei L R 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 018401 (in Chinese) [刘振帮, 黄华, 金晓, 袁欢, 戈弋, 何晓, 雷禄容 2015 物理学报 **64** 018401]
- [15] Liu Z B, Huang H, Jin X, Lei L R, Zhu L, Li L L, Li S F, Yan W K, He H 2016 *Phys. Plasmas* **23** 093110
- [16] Wang G P, Jin X, Huang H, Liu Z B 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 044102 (in Chinese) [王淦平, 金晓, 黄华, 刘振帮 2017 物理学报 **66** 044102]
- [17] Carlsten B E, Faehl R J, Fazio M V, Haynes W B, Stringfield R M 1994 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **22** 719
- [18] Peng G L, Liang Y Q 2016 *High Power Laser and Particle Beams* **28** 053003 (in Chinese) [彭国良, 梁玉钦 2016 强激光与粒子束 **28** 053003]
- [19] Xue M, Ding Y G, Wang R 2018 *Vacuum Electron.* **8** 43 (in Chinese) [薛明, 丁耀根, 王勇 2018 真空电子技术 **8** 43]
- [20] Dai H Y, Xiao Y B, Wang T Q, Zhang S F 2001 *J. Hunan Univ.* **28** 6 (in Chinese) [戴宏毅, 肖亚斌, 王同权, 张树发 2001 湖南大学学报 **28** 6]

Design and experiment of X-band high-repetition rate high-power multi-beam relativistic klystron amplifier*

Liu Zhen-Bang[†] Huang Hua Jin Xiao Wang Teng-Fang Li Shi-Feng

(*Science and Technology on High Power Microwave Laboratory, Institute of Applied Electronics,*

China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 28 June 2020; revised manuscript received 7 July 2020)

Abstract

The relativistic klystron amplifier (RKA) is a very important kind of high power microwave device, which has the advantages of high power, high efficiency, stable output phase and amplitude. The development of multi-injection RKA toward engineering and practical application needs to further improve operating frequency and output power of klystron amplifier, while the RKA of conventional circular waveguide drift tubes is restricted by the physical factors such as geometric size, space charge force and high-voltage breakdown. The multi-beam RKA based on the technology of multiple electron beams can work at low voltage and guiding magnetic field, and can also possess high electron beam current and diversion coefficient. The physical limitation of conventional structure RKA is overcome, and the working frequency and the output power are improved. In the experiment, the X-band GW level power of microwave is obtained. The multi-beam RKA needs to further improve its working frequency and working life. In the experiment, the power conversion efficiency of multi-beam RKA is about 35%, and most of the remaining electron energy will accumulate on the collection pole at the end. If the heat dissipation of the collector is not designed appropriately, the collection will be seriously ablated when working at high heavy frequency. Thus a large quantity of plasma and secondary electrons are generated, which affects the stability of the device. To solve the problem of electron reflux bombarding the output cavity after electron beam exchanging energy in the gap of output cavity, the reflux process of relativistic electron beam in the device is analyzed in this paper. On this basis, a coaxial extraction structure with four-gap extension interaction is designed to avoid electron reflux and reduce the gap electric field, thus improving the working life of the device. At the same time, in order to solve the problem that the conventional water cooling channel can affect the output microwave mode in a high-frequency over-mode device, a mode transformation structure of coaxial TEM mode-fan-shaped TE_{10} mode-coaxial TEM mode-circular waveguide TM_{01} mode is designed. The mode conversion efficiency is greater than 99.9%, and the influence of collecting polar water cooling channel on the output microwave mode is avoided. The stable operation of multi-beam RKA in the X-band with a repetition rate of 45 Hz is realized experimentally, while the output power is over 1 GW and the microwave pulse width is over 100 ns. At present, the multi-beam RKA runs about 10000 times in total, and the output microwave parameters do not decrease significantly.

Keywords: relativistic klystron amplifier, X-band, long pulse, high repetition rate

PACS: 84.40.Fe, 41.20.-q, 41.20.jb, 52.59.Ye

DOI: [10.7498/aps.69.20201013](https://doi.org/10.7498/aps.69.20201013)

* Project supported by the Science Foundation of the High Power Microwave Laboratory, China (Grant No. 6142605180203).

[†] Corresponding author. E-mail: liu9559@yeah.net