

# 相对论速调管放大器的相位特性研究\*

黄华<sup>†</sup> 郭焱华 金晓 何琥 雷禄容 罗雄 常安碧 李正红

(中国工程物理研究院, 应用电子学研究所微波技术研究中心, 绵阳 621900)

(2010年2月8日收到; 2010年5月11日收到修改稿)

理论分析了影响相对论速调管放大器(RKA)输出微波相位的相关因素,同时采用粒子模拟程序分析了RKA输出微波相位随电压、束流、电子束尺寸、电子束前沿和延迟时间等电子束参数以及腔体和漂移管长度等几何参数的变化,另外还开展了RKA相位特性的初步实验研究. 研究表明,电压、束流和电子束尺寸的改变,会造成RKA相移的改变,引导磁场、电子束前沿和延迟时间以及注入微波功率在适当范围内改变不会造成明显的RKA相移改变. RKA的相位灵敏度为 $2.6^\circ$ ,相位抖动小于 $20^\circ$ .

**关键词:** 相对论速调管放大器, 相位特性, 功率合成, 高功率微波

**PACS:** 52.35.-g, 52.35.Mw

## 1. 引言

在高功率微波(HPM)器件研究中,由于受微波器件理论、工艺和加速器工程限制,单个HPM器件的理论输出最大微波功率约 $10\text{ GW}^{[1]}$ ,而HPM有效应用需要的微波功率远比 $10\text{ GW}$ 大<sup>[2]</sup>,因此,采用功率合成产生下一代超高功率HPM将是必由之路. 采用 $n$ 台HPM源进行空间相干功率合成可使空间目标位置的功率密度最大增大 $n^2$ 倍,功率密度相当于增大了 $20\log n/\text{dB}$ . 而且,随着电子束参数的提高,HPM器件的效率会下降,加速器体积会变得非常笨重而庞大;而采用中等强流相对论电子束驱动HPM器件可以获得较高的效率,有利于加速器 and 器件的小型化,从而便于HPM应用系统的模块化研制. 在HPM器件中,输出微波幅度和相位稳定的相对论速调管放大器(relativistic klystron amplifier, RKA)是功率合成的首选器件<sup>[3-5]</sup>,注入锁定的振荡器也可以作为功率合成的一个备选微波器件<sup>[6,7]</sup>. 文献[8]主要分析和模拟了电压波动对RKA相位的影响,本文比较全面地分析影响RKA输出微波相位的各种主要因素,以便确定RKA的相位稳定性,随后开展了相应的实验研究.

## 2. RKA 相位特性的理论分析

首先考虑电子束电压 $V_0$ 改变对RKA输出与输入微波相位差(简称为相移)抖动的影响关系. 电压的改变会造成电子在RKA漂移管中运动速度的改变,进而造成电子从RKA输入腔漂移移动到输出腔间隙时间的改变,从而造成RKA相移( $\Delta\phi = \omega \cdot \Delta t$ )的改变. 相位改变随电压改变的关系为

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} L \left( \left( 1 - \left( \frac{510}{510 + V_0} \right)^2 \right)^{-1/2} - \left( 1 - \left( \frac{510}{510 + V_0 + \Delta V} \right)^2 \right)^{-1/2} \right), \quad (1)$$

式中 $\lambda$ 为微波信号波长, $L$ 为输入腔间隙到输出腔间隙的距离. 根据S波段RKA参数<sup>[4]</sup>,可以大致计算出电压波动造成RKA相位改变为 $\Delta\phi = 0.398 \cdot \Delta V$ 度/kV,所以,该RKA的电压相位灵敏度为 $2.6^\circ$ (电压变化1%时RKA相位的改变). 显然,RKA比普通大功率速调管的电压相位灵敏度减少了4倍以上,这主要是因为RKA器件的长度 $L$ 比普通速调管短,电子运动速度接近光速,电压的改变对电子速度的改变没有普通速调管灵敏.

进一步分析RKA中间腔谐振频率和漂移距离对RKA输出微波相位的影响. 假设电子束在输入

\* 国家高技术研究发展计划资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: hhua0457@163.com

腔调制间隙  $z=0$  处的边界条件为  $\tilde{I}_{10}=0, \tilde{V}_{10}=V_{10} \exp(j\omega t)$ , 则根据空间电荷波理论<sup>[9,10]</sup> 可得在中间腔间隙  $z=z_1$  处的调制电流和动电压为

$$\begin{aligned} I_1 &= j \frac{M_1 V_{10}}{Z} \sin(\alpha\mu\theta_1), \\ V_1 &= M_1 V_{10} [\cos(\alpha\mu\theta_1) + j\zeta \sin(\alpha\mu\theta_1)], \\ \theta_1 &= \omega\delta z_1 / \beta_0 c, \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $M_1 = M_{c1} |\cos\phi_1|$ ,  $\phi_1 = \alpha\mu\delta\omega D_1 / v_0$ ,  $M_{c1}$  为输入腔间隙电压耦合系数,  $|\cos\phi_1|$  为空间电荷修正项.

假定中间腔分流阻抗为  $R_s$ , 中间腔固有谐振频率为  $\omega_0$ , 无载品质因数为  $Q_0$ , 则由中间腔的等效电路得中间腔阻抗  $Z_c$  为

$$\begin{aligned} Z_c &= \frac{R_s}{1 + j2Q_0\sigma} = R_s \cos\phi e^{j\phi}; \\ \phi &= -\arctg(2\sigma Q_0), \sigma = \frac{\omega - \omega_0}{\omega}, \end{aligned} \quad (3)$$

则强流相对论电子束经过中间腔间隙时产生的群聚电流和动电压演变为

$$\begin{pmatrix} I_{20} \\ V_{20} \end{pmatrix} = B \begin{pmatrix} I_1 \\ V_1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

式中  $B = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ Z_c & 1 \end{pmatrix}$  称为作用间隙矩阵, 即有

$$\begin{aligned} V_{20} &= M_1 M_2 V_{10} \{ \cos(\alpha\mu\theta_1) + j[R_s/Z + \zeta] \\ &\quad \times \sin(\alpha\mu\theta_1) \}. \end{aligned} \quad (5)$$

在随后的电子束漂移过程中, 电子束继续群聚, 在位于输出腔间隙  $z=z_2$  处的群聚束流和动电压为

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \tilde{I}_2 \\ \tilde{V}_2 \end{pmatrix} &= (A(\theta_2)) \begin{pmatrix} I_{20} \\ V_{20} \end{pmatrix} \exp(j\omega t - \theta_2), \\ \theta_2 &= \frac{\omega\delta(z_2 - z_1)}{\beta_0 c}, \end{aligned} \quad (6)$$

式中

$$(A(\theta)) = \begin{pmatrix} \cos(\alpha\mu\theta) - j\zeta \sin(\alpha\mu\theta) & j \frac{1}{Z} \sin(\alpha\mu\theta) \\ jZ(1 - \zeta^2) \sin(\alpha\mu\theta) & \cos(\alpha\mu\theta) + j\zeta \sin(\alpha\mu\theta) \end{pmatrix}$$

为漂移矩阵,

$$\begin{aligned} Z &= m_0 c^2 \gamma_0^3 \beta_0^2 \alpha\mu / |e| I_0 \\ &= R_0 / (-\zeta), \end{aligned}$$

$$R_0 = 60 [\ln(r_w/r_b) / \beta_0].$$

RKA 输出腔激励的微波功率<sup>[10]</sup> 为

$$P_{out} = \gamma^2 G_0 (R/Q) M_3 P_0 \frac{Q_{ex}^2}{2Q_L (1 + 4Q_{ex}^2 \delta^2)}, \quad (7)$$

式中  $\gamma = I_1 / I_0$  为束流基波调制深度,  $G_0 = I_0 / V_0$  为束流直流电导,  $R/Q$  为输出腔特性阻抗,  $M_3$  为输出腔的间隙耦合系数,  $P_0$  为电子束功率,  $Q_{ex}$  和  $Q_L$  分别为输出腔的外观品质因素和负载品质因素,  $2\delta = 2(\omega - \omega_0) / \omega_0$  为相对频差,  $\omega_0$  为输出腔的谐振频率,  $\omega$  为工作频率. 从(2), (3), (6)和(7)式可以看出, 中间腔和输出腔的谐振频率  $\omega_0$ 、谐振腔之间的漂移距离  $\Delta z$ 、电子的运动速度  $\beta$  直接影响调制束流的强度和相位, 进而影响输出微波的功率和相位.

### 3. RKA 相位特性的模拟

采用 Karat 粒子程序模拟 RKA 相位特性中, 通过改变 RKA 运行的电子束电压、束流、电压波形的触发时间和前沿时间、电子束的尺寸、腔体参数和群聚参数等, 监测 RKA 输出同轴线中某一点固定电场的相位变化情况, 以确定 RKA 的相位变化情况.

#### 3.1. RKA 相移与电子束参数的变化关系

##### 3.1.1. RKA 相移与电子束延迟时间和前沿时间的变化关系

采用 KARAT 程序模拟 S 波段 RKA 的输出微波相位与电子束发射时间(即注入微波与电子束的同步时间)、电压前沿时间、电压波动(保持束流阻抗不变)和束流发射波动(包括纹波系数和波形顶降的影响)、环形电子束尺寸、注入微波幅度和引导磁场强度等参数的变化情况. 在 KARAT 程序模拟中, 先注入微波到输入腔, 微波注入输入腔幅度达到稳态的时间为 6 ns, 微波电场的变化周期时间为 0.35 ns, 因此, 在模拟 RKA 相位随电压触发抖动时, 电压触发延迟时间最小为 6 ns, 最小时间间隔为 0.1 ns, 以便确定电压同步在不同注入微波相位时 RKA 输出微波相位的变化情况. 其中, 电子束基本参数为电压 650 kV、电流 7 kA、电子束厚度 2 mm、引导磁场强度 1T、注入微波频率 2.85 GHz. 从 6—20 ns 改变电子束的触发时间, 其余参数保持不变, 监测输出微波相位的变化情况, 结果如图 1 所示. 从图 1 可以看出, 电子束触发延迟时间的改变, 对 RKA 相位的影响没有明显变化趋势, 只是有 20° 左右的波动, 这种波动与波形畸变和监测有关. 理论分析表明, RKA 输出微波相位与电子束和微波种子

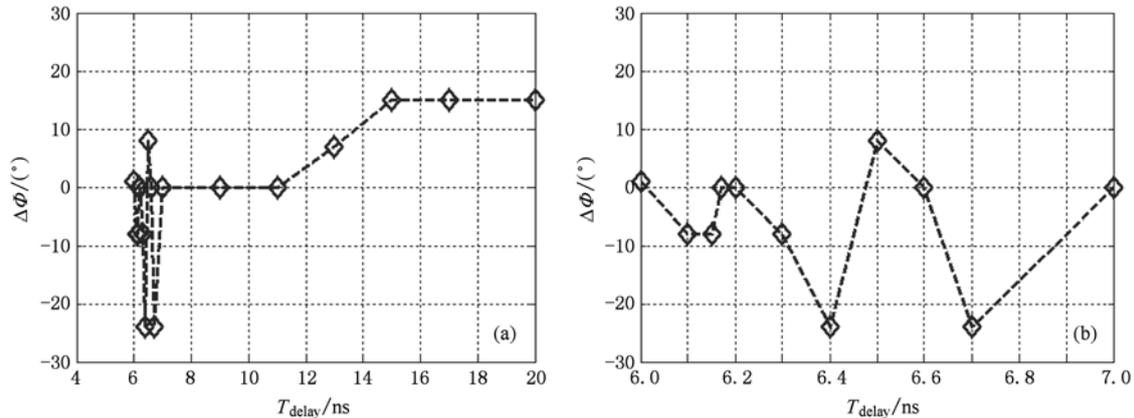


图1 RKA相移随电压和束流波形的延迟时间变化曲线 (a)延迟时间从6 ns到20 ns变化;(b)延迟时间从6 ns到7 ns变化

源的同步相位没有关系,主要由微波种子源相位决定.

固定电压和束流的幅度不变,从5 ns到40 ns改变电压的前沿时间,模拟RKA的输出微波电场相位改变,模拟结果如图2所示.从图2可以看出,电压前沿时间的改变,不会明显造成RKA相移的变化,只会造成相移约20°的波动.显然,RKA输出微波的相位由注入微波相位决定,与电子束同步时间和前沿时间没有决定的关系.

### 3.1.2. RKA相移与电压和束流幅度的变化关系

保持电子束阻抗(92 Ω)不变,改变电子束的电压和束流的幅度大小,模拟RKA相移改变结果如图3(a)所示;保持电子束电压不变,模拟阴极发射束流不稳定造成RKA相移改变结果如图3(b)所示.由图3可以看出,在电子束阻抗固定不变条件下,电压增大会造成RKA相移减小,相位变化灵敏度约-2.6°;而电压固定不变时,束流增大,会造成RKA相移增大,相位变化灵敏度为+2.5°.显然,模拟结果与理论分析结果符合很好.从束波相互作用过程可以理解:电压增大,电子运动速度加快,电子穿过相同的器件长度所花时间缩短,相移 $\omega\Delta t$ 自然减小;在保持电压固定,束流增大,电子势能增大,动能减小,电子运动速度降低,电子穿过相同的器件长度所花时间加长,相移 $\omega\Delta t$ 自然增大.为了使由电压和束流改变造成相移改变控制在15°内,加速器电压和束流发射的离散度(相对变化)应小于6%.

另外,采用粒子模拟程序还模拟了电压和束流波形平顶上具有一个三角形尖峰和顶降时造成RKA相位的改变情况.三角形顶峰波形的宽度为30 ns,输出微波波形和束流波形如图4所示,顶峰

幅值为10%  $V_0$ .模拟结果发现,10%的三角形尖峰造成了RKA相移减小约29°,5%的三角形尖峰造成了RKA相移减小约17°.模拟结果说明,电压和束流波形的波动会造成RKA相移的改变.

### 3.1.3. RKA相位与电子束尺寸的变化关系

固定电子束中心位置,电子束厚度从1.0 mm到3.0 mm变化,相位减小小于20°,相位变化灵敏度约-10°/mm.固定电子束厚度,改变电子束与管壁距离,管壁距离从0.5 mm到3.5 mm变化,相位增大小于30°,相位变化灵敏度约+10°/mm.引导磁场从8.0 kGs到10 kGs(1 Gs =  $10^{-4}$  T)变化,RKA相位基本不变.注入微波在线性工作区变化时,RKA相移也基本上不改变.

### 3.2. RKA相移与几何参数的变化关系

采用KARAT粒子模拟程序分析S波段RKA相移随RKA中间腔和输出腔的间隙渡越角、腔长以及输入腔与中间腔、中间腔与输出腔之间的漂移管长度等参数的变化趋势.模拟结果发现,中间腔腔长的变化对RKA相移变化比较敏感,腔长从2.3 cm到2.9 cm变化,RKA相移增大155°,相位灵敏度为+26°/mm,输出腔腔长造成RKA的相移变化灵敏度为8°/mm.这主要是因为中间腔长度改变后,其谐振频率发生改变,中间腔谐振频率改变会改变中间腔的阻抗,进而改变束流的群聚效率和群聚束流的相位,与前面的理论分析一致.输出腔与中间腔之间的漂移距离对RKA相移影响相对敏感一些,约+11°/cm,中间腔与输入腔之间的漂移距离影响敏感度约9°/cm.模拟发现,中间腔和输出腔的间隙渡越角对RKA相移影响不敏感,它主要影响输出微

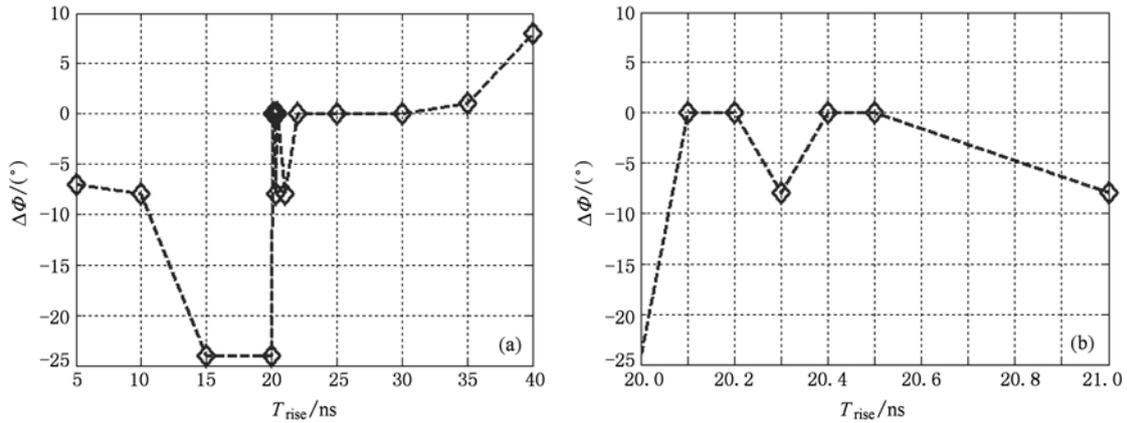


图2 RKA 相移随电压束流波形的上升时间变化曲线 (a) 上升时间从 5 ns 到 40 ns 变化; (b) 上升时间从 20 ns 到 21 ns 变化

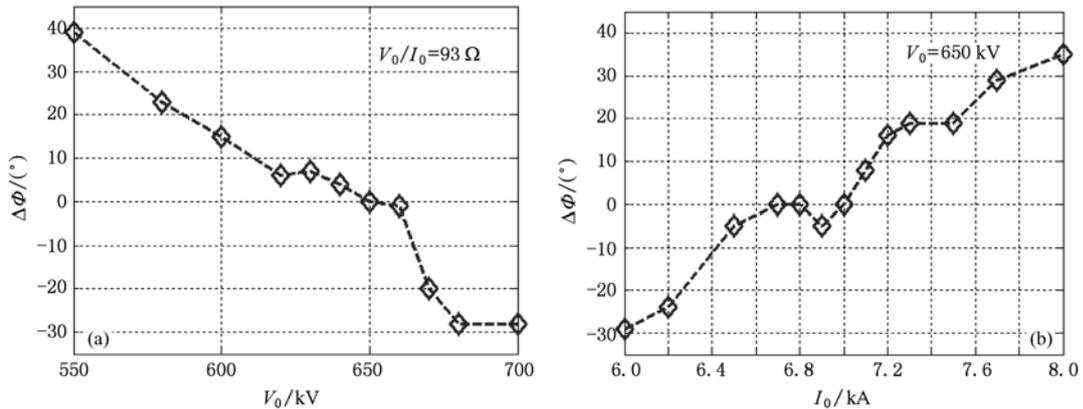


图3 RKA 相移随电压(a)和束流(b)的变化曲线

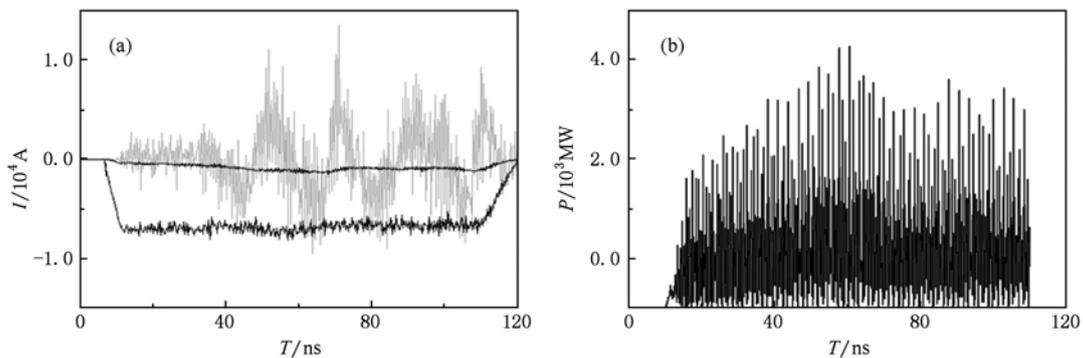


图4 电压束流波形尖峰扰动时的输出微波波形 (a) 束流波形, (b) 输出微波波形

波的强度.

#### 4. RKA 相移的实验测试

采用螺旋线型加速器产生的长脉冲电子束驱动 RKA, 开展了 RKA 相位特性的实验研究<sup>[11]</sup>. 把

注入 RKA 的微波种子源信号和经过 RKA 放大后的微波信号经过取样后, 采用鉴相器测试了 RKA 辐射微波与输入微波信号相位差随二极管电压、束流、同步时间、注入微波幅度的变化关系, 测试原理和测试系统详见文献[11], 结果见图 5 和图 6 所示. 根据鉴相器测试波形获得的数据分析了电压波形

平顶变化对输出微波脉冲主体部分的相位变化情况,结果如图 5(b) 所示. 从图 5 可以看出,在电压

主脉冲平顶 70 ns 内波动幅度约 12.5%, 对应的相位波动约  $\pm 20^\circ$ , 与粒子模拟分析基本一致.

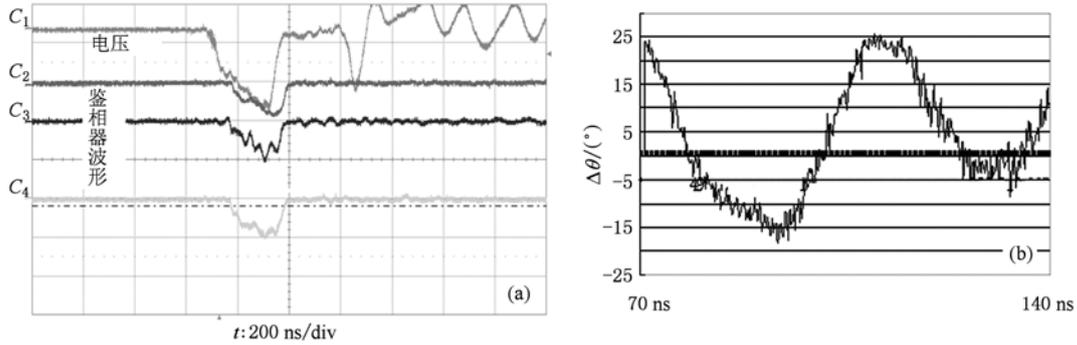


图 5 电压波形与鉴相器输出波形(a)和主体脉冲内相移变化波形(b)

从图 6 中看出,随电压升高, RKA 相移减小, RKA 输出微波波形相位特性某一时刻的相位灵敏度小于  $-1.5^\circ$ , 该结果与粒子模拟单一电压或束流变化结果相比,相移减小,这主要是因为实验中电压和束流同时增大,电压增大造成相移减小,束流

增大造成相移增大,因而两者综合变化结果造成相移变化减小. 从图 6 和测试结果可以看出,电子束与微波源的同步时间的改变以及注入微波功率的改变不会造成 RKA 相移有明显的变化趋势,只有几度的相位变化波动.

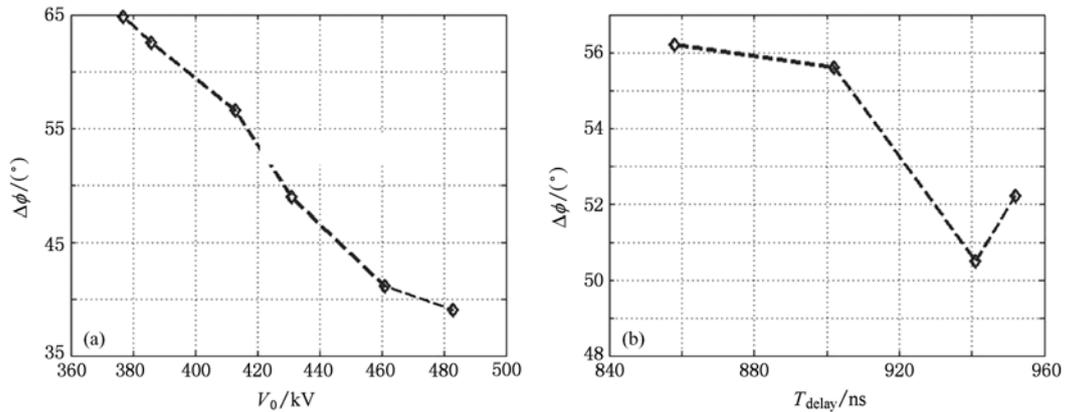


图 6 长脉冲 RKA 相移随电压(a)和同步时间(b)的实验测试变化曲线

RKA 相移随长脉冲加速器主开关放电稳定性的抖动特性测试结果如表 1 所示,可以看出单次运行时造成 RKA 的相位抖动小于  $20^\circ$ . 这说明,该长脉冲加速器输出电压具有较高的稳定性.

表 1 长脉冲 RKA 微波相移的抖动测试参数

No.	$V_0/\text{kV}$	$I_0/\text{kA}$	$\Delta\theta/(\text{°})$
1	376.9	1.8	149.4
2	401.7	2.0	148.5
3	386.9	1.8	152.3
4	391.8	2.0	151.8
5	386.9	1.8	159.3
平均	$388.1 \pm 14$	$1.9 \pm 0.1$	$152.3 \pm 7$

## 5. 结 论

本文理论分析了相对论速调管放大器输出微波相位变化的相关因素,同时采用粒子模拟程序分析了 RKA 相移随电压、束流、电子束尺寸、电子束前沿和延迟时间等电子束参数以及腔体长度、渡越角和漂移管距离等几何参数的变化,并开展了相应的实验研究. 研究表明,电压、束流和束流尺寸的改变,会造成 RKA 相移的改变,电子束前沿时间和延迟时间、引导磁场和注入微波在适当范围内的改变不会明显造成 RKA 相移的改变. 腔体长度和漂移距离的改变

会造成 RKA 相移的改变,腔体渡越角的改变不会影响 RKA 的相移. 为了使 RKA 输出微波相位稳定,应

尽量使加速器输出电压稳定、阴极束流发射大小和形状稳定. 数值分析结果与实验结果相符合.

- [1] Ding W 2004 *High Power Microwave Technology* **12** 1 (in Chinese) [丁武 2004 高功率微波技术 **12** 1]
- [2] Benford J, Swegle J A, Schamiloğlu E 2006 *High Power Microwave* (Ver. 2) (Arech House: CRC Press) P10
- [3] Huang H, Fan Z K, Tan J, Ma Q S, Gan Y Q, Chang A B 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1129 (in Chinese) [黄华、范植开、谭杰、马乔生、甘延青 2004 物理学报 **52** 1129]
- [4] Huang H, Fan Z K, Meng F B, Tan J, Luo G Y, Lei L R 2006 *High Power Laser and Particle Beams* **18** 990 (in Chinese) [黄华、范植开、孟凡宝、谭杰、罗光耀、雷禄容 2006 强激光与粒子束 **18** 990]
- [5] Serlin V, Friedman M 1994 *IEEE Trans. Plas. Sci.* **22** 692
- [6] Hendrichs K J, Hayworth M D, Englert T, Shiffler D, Baca G, Coleman P D, Bowers L, Lemke R W, Spencer T A, Arman M J 1998 *IEEE Trans. on Plas. Sci.* **26** 320
- [7] Huang H, Luo X, Luo G Y, Zhang B Z, Lei L Y, Jin X, Tan J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1907 (in Chinese) [黄华、罗雄、罗光耀、张北镇、雷禄容、金晓、谭杰 2010 物理学报 **59** 1907]
- [8] Yang Z P, Bian Q Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6142 (in Chinese) [杨振萍、边清泉 2009 物理学报 **58** 6142]
- [9] Huang H, Chang A B, Tan J, Ma Q S, Gan Y Q 2001 *Journal of University of Electronic Science and Technology of China* **30** 53 (in Chinese) [黄华、常安碧、谭杰、马乔生、甘延青 2001 电子科技大学学报 **30** 53]
- [10] Xie J L, Zhao Y X 1960 *Bunching Theory of Klystron* (Beijing: Science and Technology press) p153 (in Chinese) [谢家麟、赵永祥 1960 速调管群聚理论 (北京: 科学技术出版社) 第 153 页]
- [11] Guo Y H, Huang H, Luo X, Zhang B Z. 2009 *High Power Laser and Particle Beams* **21** 733 (in Chinese) [郭焱华、黄华、罗雄、张北镇 2009 强激光与粒子束 **21** 733]

## Phase investigation on relativistic klystron amplifier\*

Huang Hua<sup>†</sup> Guo Yan-Hua Jin Xiao He Hu Lei Lu-Rong Luo Xiong Chang An-Bi Li Zheng-Hong  
(Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China)

(Received 8 February 2010; revised manuscript received 11 May 2010)

### Abstract

The relevant facts to phase of relativistic klystron amplifier (RKA) are analyzed in this paper. The output microwave phase of RKA relevant to voltage, current, size, rising time and delay time of electron beams is simulated by PIC. It is found that the phase shift of RKA is changed with the voltage, current and size of electron beams. On the contrast, the leading magnetic field, rising time and delay time of electron beams do not change the phase shift of RKA obviously. The phase of RKA is investigated in experiment too. The phase sensitivity of RKA is about 2.6 degrees; the phase shaking of RKA is less than 20 degrees. The experimental results are content well with the simulations.

**Keywords:** relativistic klystron amplifier, phase characteristic, power synthesis, high power microwave

**PACS:** 52.35.-g, 52.35.Mw

\* Project supported by the National High Technology Development Program of China.

<sup>†</sup> E-mail: hhua0457@163.com.