

L 波段相对论速调管束流实验研究¹

黄 华 王平山 吴中发* 甘延青 陈洪斌
吴尚清* 王文斗 雷方燕 谭 杰 郑建国

(中国工程物理研究院应用电子学研究所 强辐射重点实验室 成都 610003)

*(北京应用物理与计算数学研究所 北京 8009 信箱 100088)

摘 要 介绍在 L 波段强流相对论速调管研究中, 强流相对论短脉冲空心电子束的产生、传输、束流调制及其诊断等方面的初步实验研究情况。在直线感应加速器上, 利用 $\phi 66\text{mm}$ 、壁厚 3mm 的石墨空心阴极, 加上约 5kGs 的准直流引导磁场, 引出了约 500kV、4.5kA、脉宽 100ns、 $\phi 54.5\text{mm}$ 、厚度 4.5mm 的空心电子束。注入 500kW 的微波调制, 束流经过输入腔后, 得到了约 6% 的最大基波电流调制深度, 经过中间腔后, 得到了约 23% 的基波电流调制深度。

关键词 相对论速调管放大器, 强流空心束, 束流调制, 束流诊断

中图分类号 TN122, TN128

1 引言

近年来, 由于脉冲功率技术的发展, 促进了多种高功率微波 (HPM) 器件的发展。产生 HPM 的机制很多, 其中, 利用纵向电子束运动中密度调制产生 HPM 的器件——相对论速调管放大器 (RKA), 由于它具有高功率、高效率、相位稳定等优势, 它的发展得到重视, 并取得了很大进展^[1-4]。RKA 是从群聚的电子束中提取微波, 群聚电流^[1]可表示为

$$I = GN_b n_b^2, \quad (1)$$

式中 N_b 为单位时间内群聚的电子数, n_b 为群聚束中电子的总数目, G 为群聚形状因子。由 (1) 式可知, 为了提取更高的微波, 一个重要的手段是增大 n_b , 即利用强流相对论电子束 (IREBs), 特别是很薄的空心电子束。同时, 由于强流的空间电荷效应和静电绝缘效应, 缩短了群聚距离, 提高了谐振腔间隙的射频击穿电平, 从而使提高微波输出功率成为可能。因此, 我们采用了薄的空心电子束。本文介绍在结构如图 1 的 L 波段强流 RKA 研究中, 进行关于 IREBs 的产生、传输、束流调制及其诊断等方面的实验研究情况。

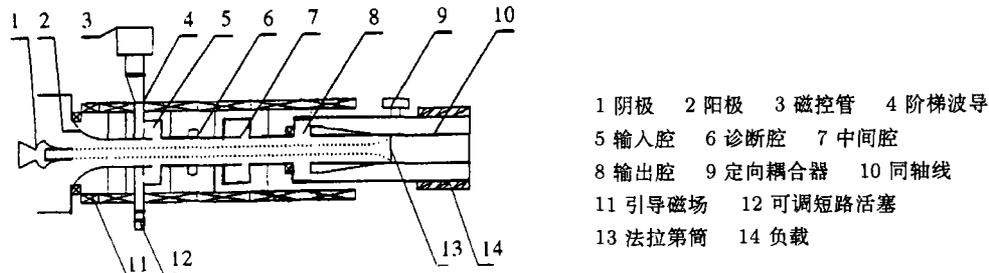


图 1 L-波段 RKA 结构示意图

¹ 1997-04-24 收到, 1998-03-23 定稿
国家 863 计划激光技术领域资助项目

2 IREBs 的产生和传输

通过数值模拟, 采用了如图 2(a) 所示的石墨无箔二极管结构, 模拟和实验结果表明, 采用如图 2(a) 的二极管结构, 加上约 5kGs 的引导磁场, 引入漂移管的束流可达 500kV、4.5kA, 束流波形如图 3, 束流形状如图 2(b), 束直径约 54.5mm、厚度 4.5mm。

当束流在 $\phi 73\text{mm}$ 的漂移管中传输时, 束流自身的空间电荷力使束流径向扩散。为了使电子在漂移管内纵向稳定传输, 必须加纵向的引导磁场。根据电子的径向运动方程^[5]和实验参数, 可算出束流传输的最小引导磁场为 4.88kGs。为此, 建立了 3 ~ 8kGs 的脉冲引导磁场, 磁场脉冲宽度为 5ms。根据计算涡流的 EDDYC 程序^[6], 脉冲引导磁场会在漂移管中产生涡流, 对磁场的峰值、时间波形、磁场纵向分布的均匀性等会产生影响, 但在整个 RKA 系统采用无磁不锈钢后, 同时管壁、法兰尽量薄, 涡流的影响可以减小到比较理想的程度。实验测试了当引导磁场为 4.9kGs 时, 束流传输 51cm 后的情况, 束流传输效率大于 95%, 束流的形状如图 (2b), 能符合实验要求。

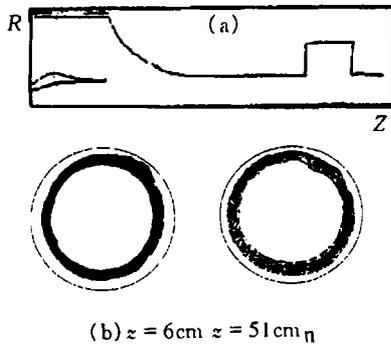


图 2 (a) 二极管结构 (b) 束斑

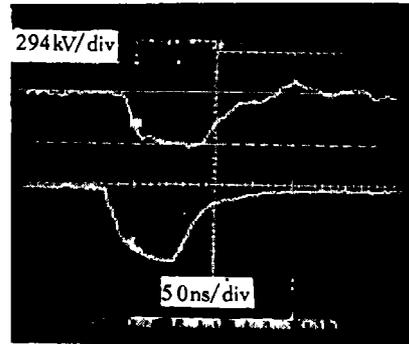


图 3 电子束波形
(上: 电压, 下: 束流, No.67)

3 IREBs 的调制

3.1 理论分析简述 电子束经过输入腔间隙时, 受到加在间隙上驻波场的速度调制, 随后在漂移管中群聚而进行密度调制, 由于此时基波电流 $I_1 \ll I_0$ (直流电流), 电子束的群聚过程可用空间电荷波理论分析^[1,7], 在距离输入腔间隙中心后 z_1 处的基波电流为

$$I_1 = j(V_{10}/Z) \sin(\alpha u \theta_1), \quad \theta_1 = \omega \delta z_1 / (\beta_0 c). \quad (2)$$

当已调制的电子束经过中间腔间隙时, 受到更强的驻波场作用, 随后在漂移管中群聚。此时, $I_1 \sim I_0$, 束流调制过程中的直流空间电荷效应变得非常重要, 根据自洽的非线性理论分析得 n 次谐波电流成分为

$$I_n(z) = 2I_0 J_n(n\bar{V}) \sin \bar{z}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (3)$$

式中 J_n 是 n 阶贝塞尔函数, $\bar{V} = (eV_1/(m_0c^2))\delta / (\gamma_0^2\beta_0\alpha^{1/2})$, $\bar{z} = (\omega z/c)\alpha^{1/2}/(\beta_0^2\gamma_0)$ 。分析表明, 由于 IREBs 的强直流空间电荷效应, 使谐波电流增大, 束流最佳群聚距离缩短; 同时, 由于 IREBs 的自身电场, 增强了束流的调制。这些方面与普通速调管有较大差别。利用上述理论只能进行近似的分析, 应用上还得主要通过实验来判定 IREBs 的调制情况。

3.2 IREBs 调制的诊断 在漂移管下游 15cm 处插入 $(1/4)\lambda$ 的同轴谐振输入腔, 中心谐振频率为 1.3GHz, 有载 Q 值为 19, 输入腔通过一环形耦合孔与 L 波段磁控管微波源

相接,腔的谐振频率和耦合度可以通过调节加载的短路活塞进行适当的调节^[8]。在 1.3GHz, 858kW 输入微波功率作用下,可算出输入腔间隙高频电压约 43kV。用插入在漂移管壁上的磁探针监测束流经过作用间隙后的基波调制电流。分析表明,磁探针感应到的电压与基波调制电流的幅度和基波频率的乘积成正比。利用磁探针,监测了 IREBs 经过输入腔间隙后,基波调制电流沿纵向的变化,波形用 Tek7104 示波器显示,结果如图 4。在 $z=31\text{cm}$, 得到了约 270A 的基波调制电流,基波调制深度为 6%, 在此位置插入中间腔间隙。

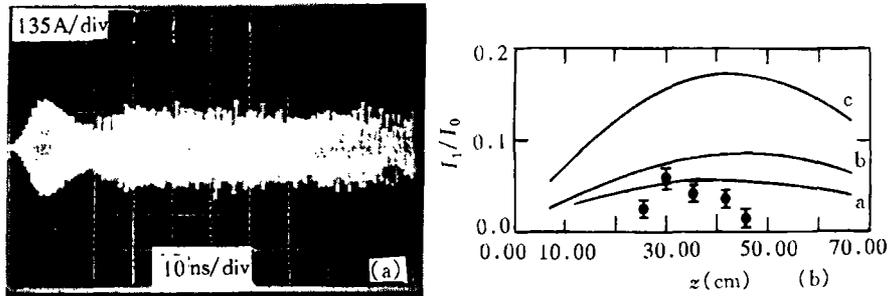


图 4 束流经过输入腔后的基波调制 (a) 调制电流波形 ($z=35\text{cm}$, No.441)
(b) 调制电流随纵向距离的变化 (a: $V_{\text{gap}}=50\text{kV}$, b: $V_{\text{gap}}=75\text{kV}$,
c: $V_{\text{gap}}=100\text{kV}$, 实线为数值模拟结果, 点为实验结果)

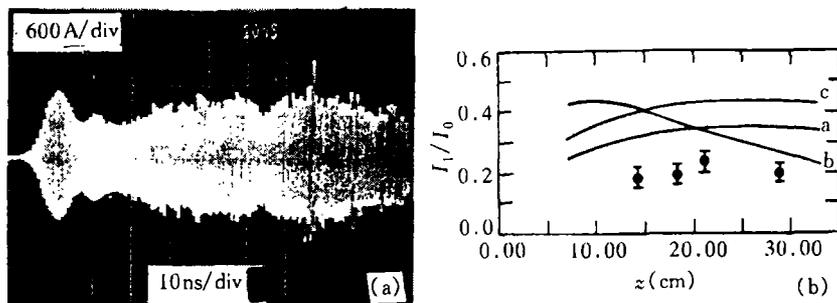


图 5 束流经过中间腔间隙后的基波调制 (a) 调制电流波形 ($z=21\text{cm}$, No.458)
(b) 调制电流随纵向距离的变化 (a,b,c 和点的含义同图 4)

中间腔为腔长 $1/4\lambda$ 的同轴谐振腔。为了使中间腔呈感性,增强束流的群聚效率,腔谐振频率选为 1356MHz, Q_0 为 824。利用磁探针,监测了束流经过中间腔间隙后,基波调制电流沿纵向的变化,结果如图 5。距中间腔间隙后 25cm 左右,得到了大于 1000A 的基波调制电流,调制深度 23%。在此位置放置输出腔间隙,在输出腔后的负载里,得到了 536MW 的最大微波峰值功率,波形如图 6。由图 4,5 可以看出,模拟与实验结果有差别,其中主要原因是两者参数不完全一致,研究还不够完善,有待进一步的深入。

4 结 语

本文介绍了 L 波段 RKA 研究中,强流相对论短脉冲空心电子束的产生、传输、束流调制及其诊断等方面的初步实验研究结果。在 LIA 上,利用石墨空心阴极,引出了约 500kV、4.5kA、脉宽 100ns、 $\phi 54.5\text{mm}$ 、厚度 4.5mm 的空心电子束。注入 858kW 的微波调制,

IREBs 经过输入腔后, 得到了约 6% 的基波电流调制深度, 经过中间腔后, 得到了大于 23% 的基波电流调制深度, 从输出腔得到了 536MW 的输出微波。

致谢 对张之福副研究员的关心和帮助以及谢敏、叶毅、王霞的大力协作实验表示感谢。

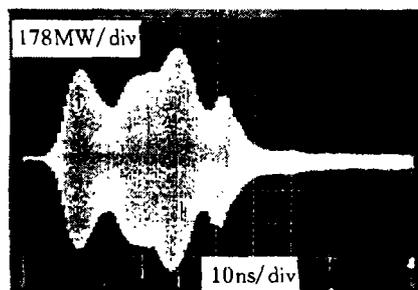


图 6 输出微波 (No.512)

参 考 文 献

- [1] Friedman M, Krall J, *et al.* Externally modulated intense relativistic electron beams. *J. Appl. Phys.* 1988, 64(7): 3353-3379.
- [2] Friedman M, Serlin V. Present and development of high power RKA. *SPIE Intense microwave and particle beams 1992(1629)*:1-7.
- [3] Fazio M V, Haynes W B, Carlsten B E. A 500MW $1\mu\text{s}$ pulse length high current relativistic klystron. *IEEE Trans. on Plasma Science*, 1994, 22(5): 740-749.
- [4] 黄 华, 王平山, 甘延青, 等. L 波段相对论速调管放大器初步研究. *强激光与粒子束*, 1998, 10(1): 135-139.
- [5] R.B. 米勒著, 刘锡三, 等译. *强流带电粒子束物理学导论*. 北京: 原子能出版社, 1990: 21-25.
- [6] 吴中发, 王玉芝, 黄益新. 脉冲磁场中波导涡流影响的数值模拟. *强激光与粒子束*, 1997, 9(2): 265-270.
- [7] 谢家麟, 赵永祥著. *速调管群聚理论*, 北京: 科学技术出版社, 1960, 82-124.
- [8] 黄 华, 王平山, 甘延青, 等. L 波段相对论速调管输入腔研究. *强激光与粒子束*, 1997, 9(4): 573-577.

STUDY ON CURRENT OF L-BAND RELATIVISTIC KLYSTRON AMPLIFIERS

Huang Hua Wang Pingshan Wu Zhongfa* Gan Yanqing Chen Hongbin
Wu Shangqing* Wang Wendou Lei Fangyan Tan Jie Zheng Jianguo

(CAEP Institute of Applied Electronics, P. O. Box 527 (55), Chengdu 610003)

*(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088)

Abstract Emission, translation, modulation and diagnosis of short pulse intense relativistic hollow electron beams (IREBs) of a L-band relativistic klystron amplifier are described in this paper. The hollow electron beams about 500kV, 4.5kA, diameter 54.5mm, thickness 4.5mm are obtained, and 6% of beam current modulation is gotten after the electron beams get through the input cavity gap, as well as 23% of beam current modulation is gotten after the electron beams get through the idler cavity gap.

Key words Relativistic klystron amplifiers, Intense relativistic hollow electron beams, Electron beam modulation, Electron beam diagnosis

黄 华: 男, 1970 年生, 硕士生, 主要从事高功率微波器件的研究工作.

王平山: 男, 1965 年生, 博士生, 主要从事高功率微波器件的研究工作.

吴中发: 男, 1940 年生, 研究员, 主要从事粒子模拟研究工作.