

大功率速调管自激振荡实验研究

王言山 李大治 张少平 李永贵

(中国科学院高能物理研究所 北京 100080)

摘要 利用北京自由电子激光装置中的微波系统,进行了大功率速调管自激振荡的实验研究.通过调节速调管在振荡模式工作时的反馈回路参数,对速调管自激振荡输出功率、频率和频率稳定性、建立时间等性能进行了测量,实验结果说明大功率速调管振荡工作模式可以满足作为电子直线加速器微波功率源的要求.

关键词 速调管 自激振荡 电子直线加速器 微波

1 引言

速调管自30年代发明以来,由于它具有提高功率的极大潜力和高增益等优点^[1].在电子直线加速器和储存环中得到广泛应用^[2].在储存环中,大多数的连续波速调管工作在UHF波段,功率可以达到1MW以上,效率达到70%.在S波段电子直线加速器中,速调管的功率输出从几个兆瓦到200MW以上^[1-4],加速电子从5MeV正朝着1TeV迈进.对需要高平均功率的工业加速器而言,可延长宏脉冲宽度和提高重复频率来满足使用的要求.本文拟开拓长脉冲大功率速调管在工业加速器的应用.

大功率速调管一般工作于它激模式,本文对一个4MW速调管进行了自激振荡模式的实验研究^[5,6],从而使某些应用的单节电子直线加速器可以省去晶体振荡信号源和放大器系列.实验结果说明,这种工作模式可以用于工业加速器系统,以降低成本,简化结构.

2 工作原理

从电子线路理论中,我们知道,在自激振荡的过程中,经过放大后的信号经耦合作为输入信号.这样,可以用下列公式来表示:

$$P_{out} = A(\beta^n A_1 A_2 \cdots A_n) P_{noise}, \quad (1)$$

这里 A_1, A_2, \cdots, A_n 分别为速调管从小信号到大信号到饱和的放大倍数, $A_1 \geq A_2 \geq \cdots \geq$

A_n , n 为从白噪声到饱和功率所需的放大次数, A 为速调管饱和的放大倍数, β 为耦合系数, P_{noise} 是速调管白噪声功率, P_{out} 为饱和输出功率, 公式(1)满足饱和振荡条件^[7]:

$$A\beta \geq 1, \quad (2)$$

微波技术同低频电子线路不同的是, 速调管的渡越时间、波导传输时间和同轴元件传输时间是微波波长的数倍, 因此必须考虑相位同步. 只有在合适的相位上才能产生出所需的自激信号^[7]:

$$f\tau_{\text{kT}} + f(\tau_w + \tau_c) = N. \quad (3)$$

这里 N 为整数, f 为速调管的自激振荡频率. τ_{kT} 为速调管的渡越时间和延迟时间, τ_w 为信号在波导中的传输时间, τ_c 为信号在同轴元件中传输的时间. 由于速调管工作在脉冲条件下, 所以每个脉冲都有一个建立时间 τ , 速调管饱和功率建立后在一个脉冲内输出平整的波形. 这里

$$\tau = n(\tau_{\text{kT}} + \tau_w + \tau_c). \quad (4)$$

3 实验原理

图 1 为速调管供电的是高压脉冲调制器, 它的输出电压为 0—130kV 可调. 速调管输出的微波信号首先通过耦合度为 23dB 的定向耦合器 1, 再与波导谐振腔、移相器、衰减器一起构成反馈回路. 监测信号从耦合度为 50dB 的定向耦合器 2 引出, 通过分功率器,

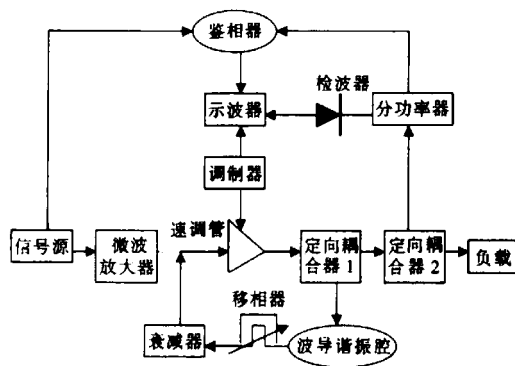


图 1 速调管自激振荡实验原理图

一路经检波器到示波器来观测振幅; 另一路通过鉴相器后到示波器, 以便观测频率, 实验参数见表 1. 北京自由电子激光微波功率系统的信号源是晶振经过倍频锁相后的微波功率源, 具有单一频率, 稳定性为 $3 \times 10^{-8}/\text{h}$, 低相位噪声等特点, 可以为鉴相器提供标准信号. 如果去掉反馈回路, 并使用微波放大器, 就可以做速调管它激实验, 以便我们进行比较.

表 1 实验中有关器件的主要参数

移相器	移相范围: 0° — 360° ; 1.1dB 衰减
波导谐振腔 1	中心频率: 2856MHz; $Q_L = 1500$, $Q_0 = 13500$; 1.5dB 衰减
波导谐振腔 2	中心频率: 2856MHz; $Q_L = 3400$, $Q_0 = 13500$; 6.8dB 衰减
信号源	频率: 2856MHz
定向耦合器 1	耦合度 23dB
定向耦合器 2	耦合度 50dB
衰减器	7.7dB 衰减
导线	7dB 衰减
调制器	0—130kV, 稳定性: 0.1%
速调管	增益: 41.5dB

4 实验结果与讨论

4.1 速调管输出功率

在自由电子激光的微波系统中,我们采用相幅检测的直接手段^[5,6,8]. 这里我们可以将速调管自激输出功率电平与它激输出功率电平进行直接比较. 通过实验,我们发现这两种方法得到的输出电平完全一致,这表明速调管自激与它激工作模式输出功率的大小和纹波是相同的. 其功率输出波型和频率测量波型如图 2(a)所示. 这时, $A = 41.5\text{dB}$, $\beta = -40.3\text{dB}$, 满足公式(2)的自激振荡条件.

测量功率稳定性: $\frac{\Delta P}{P} = 1\%$, 与速调管工作在放大状态一致^[6].

4.2 频率、频率稳定性

我们采用差频方法直接测量频率的稳定性^[9], 由于北京自由电子激光的晶体振荡微波功率源的日稳定度为 10^{-7} 量级, 小时稳定度为 10^{-8} 量级. 可以作为测量频率的标准源. 原理图如图 1 所示.

$$f_{\text{H}} = f_{\text{I}} - f_0, \quad (5)$$

f_{I} 为速调管的自激振荡频率, f_0 为标准的频率, f_{H} 为示波器显示的频率, 即频差. 频率稳定度的定义为

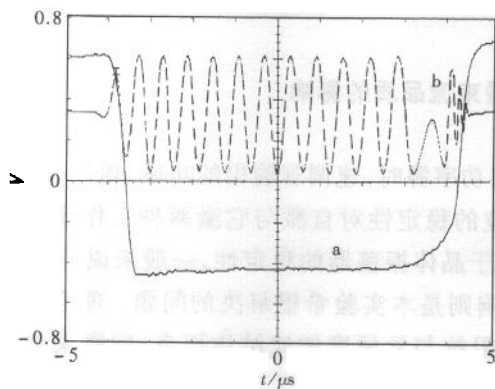


图3 频差 f_{H} (b)随着速调管调制高压变化与时间波形

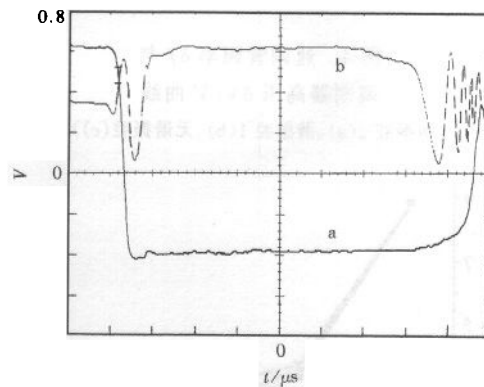


图2 速调管自激振荡输出功率 P (a)和频差 f_{H} (b)与时间波形

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{f_{\text{I max}} - f_{\text{I min}}}{f_0} = \frac{f_{\text{H max}} - f_{\text{H min}}}{f_0}. \quad (6)$$

$f_{\text{I max}} - f_{\text{I min}}$ 为速调管的自激振荡频率的最大偏差, $f_{\text{H max}} - f_{\text{H min}}$ 为示波器显示频率的最大偏差, 测量结果如图 2(b)所示, 中心频率 $f_{\text{I}} = 2856\text{MHz}$, $\left(\frac{\Delta f}{f}\right)_{\text{小时}} = 1.8 \times 10^{-5}$. 图 3 表示自激振荡频率随着调制器高压的变化, 测量结果为: 调制器高压变化 1%, 频率变化 120kHz, 即频率稳定度为 4.2×10^{-5} .

图 4 比较了反馈回路参数不同的效应, 由图可见, 在反馈回路中串接谐振腔时, 因失谐时, 相频特性变化^[10], 故起了稳频作

用,减少了频率对电压的敏感性.

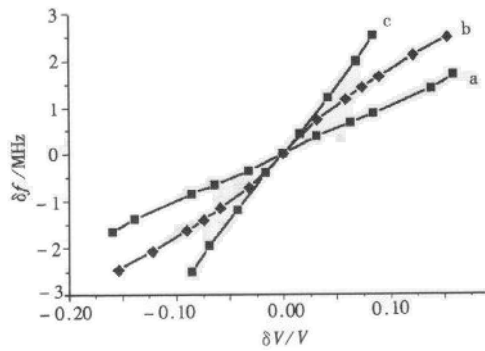


图 4 速调管频率 δf 与调制器高压 $\delta V/V$ 曲线 (谐振腔 2(a)、谐振腔 1(b)、无谐振腔(c))

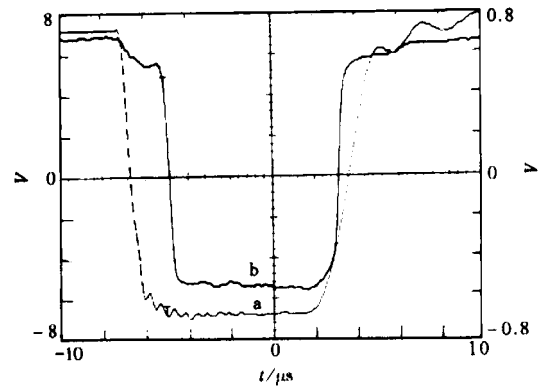


图 5 速调管调制器高压 $V(a)$ 与功率 $P(b)$ 与时间波形

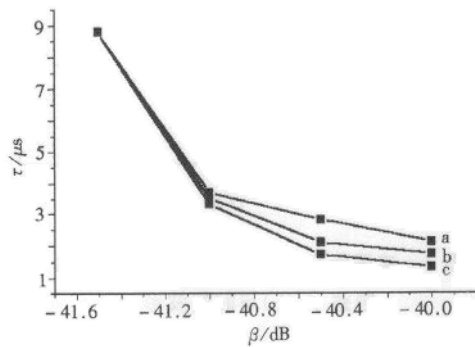


图 6 脉冲建立时间 τ 与耦合系数 β 的关系曲线 (谐振腔 2(a)、谐振腔 1(b)、无谐振腔(c))

4.3 脉冲建立时间

实验证明,当有谐振腔时比无谐振腔工作时建立时间延迟,这主要由谐振腔的 Q 值决定的,公式(4)中:无谐振腔, $\tau = 1.3\mu s$; 谐振腔 1, $\tau = 1.7\mu s$ (如图 5 所示); 谐振腔 2, $\tau = 2.1\mu s$. 我们通过测量和计算得知:公式(4)中, $n \approx 32$.

同时实验中也可以观察到:如图 6 所示,当 β 减少, τ 减少; β 增加, τ 增加.

4.4 速调管的自激振荡信号对电子直线加速器束流品质的影响

大功率速调管用做电子直线加速器的微波功率源时,速调管输出的功率、相位、频率的稳定性直接影响加速电子的性能、功率及相位的稳定性对自激与它激两种工作模式没有区别,但频率稳定性的影响则不同,它激决定于晶体振荡器的稳定性,一般来说为 10^{-8} 每小时量级,而自激工作模式频率稳定性的影响则是本实验希望解决的问题. 理论分析表明^[11]:它对加速器工作是关键的一环. 对常阻抗与常梯度加速结构而言,频率偏差影响能量为

$$\Delta u/u = (Q\Delta f/f)^2 [(2\zeta(\zeta + 2)/(\exp(\zeta) - 1)) - 4] \quad (7)$$

$$\Delta u/u = (Q\Delta f/f)^2 [2\zeta \exp(-2\zeta)(\zeta + 1)/(1 - \exp(-2\zeta)) - 1] \quad (8)$$

(7)式为常阻抗加速结构,(8)式为常梯度加速结构, $\Delta u/u$ 为电子束能散度, Q 为加速结构的品质因数, ζ 为加速结构的填充时间. 由上二式可见,频率变化对能散度影响很大.

如出 $Q = 13000$, $\zeta = 0.6\mu\text{s}$. 对本实验结果电子束能散度 $\Delta u/u \approx 1\%$. 对工业用加速器电子束能散度的要求为 $\Delta u/u \leq 5\%$, $\Delta f/f \leq 5 \times 10^{-5}$, 即采用速调管自激振荡作工业用电子直线加速器的功率源是可满足要求的.

5 结束语

速调管的自激振荡方法仅仅适应于长脉冲工作的条件下, 由于工业用加速器对平均功率的要求, 生产出长脉冲高重复次数的速调管势成必然. 这方面国外已经进行实验工作, 国内中国科学院电子学研究所、中国科学院高能物理研究所等准备联合开发, 具有广泛的应用前景.

本文的研究成果可用于一种新型、高效电子直线加速器的预制研究^[12]. 这种加速器可简化结构、降低造价, 对电子直线加速器在各有关领域的应用推广可起很大的促进作用.

感谢谢家麟院士对本文开题的建议和工作的指导, 感谢北京自由电子激光室的其他工作人员为本实验提供的帮助.

参考文献(References)

- 1 XIE Jia-Lin, ZHAO Yong-Xiang. The Modulation Theory of Klystron. Beijing: Science Press, 1996. 127—128 (in Chinese)
(谢家麟, 赵永翔. 速调管群聚理论. 北京: 科学出版社, 1996, 127—128)
- 2 Wangler T P. Principle of RF Linear Accelerators. New York: A Wiley-Interscience Publication, 1988. 152—155
- 3 Loew G A, Allen M A, Cassel R L et al. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1985, 32(5), 2748—2750
- 4 Chorora S, Hameister J, Jarylkapov S. Performance of An S-band Klystron at an Output Power of 200MW, In: 19th International Linear Accelerator Conference, 1998
- 5 XIE Jia-Lin, ZHUANG Jie-Jia, HUANG Yong-Zhang et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1994, 18: 572 (in Chinese)
(谢家麟, 庄杰佳, 黄永章等. 高能物理与核物理, 1994, 18: 572)
- 6 WANG Yan-Shan, LI Yong-Gui, CHANG Xiang-Yun et al. The New Microwave System of BFEL. In: PEI Yuan-Ji, WANG Xiang-Xi (eds.). Proceedings of the Second National Symposium on Particle Accelerator Technology, 1998. 391—393 (in Chinese)
(王言山, 李永贵, 杨祥云等. 北京自由电子激光装置新的微波系统. 见: 裴元吉, 王相薰主编. 第二届全国加速器技术学术交流会论文集. 1998. 391—393)
- 7 WANG Hong-Ming. Electrical Technology and Electronic Technology. Beijing: Tsinghua University Press. 1999. 183—185 (in Chinese)
(王鸿明. 电工技术与电子技术. 北京: 清华大学出版社, 1999. 183—185)
- 8 Fox R D, Schwarz H D. IEEE Transactions on Nuclear Science. 1983. 33:(4): 2264—2266
- 9 WU Guo-Ji. Microwave Electronic Circuits. Xi-An: Northwestern Polytechnic University Press, 1994. 19—22 (in Chinese)
(武国机. 微波电子线路. 西安: 西北工业大学出版社. 1994. 19—22)
- 10 TONG Shi-Bai. Fundamental Analog Electronic Technology. Beijing: Higher Education Press. 1996: 539—542 (in Chinese)

(童诗白. 模拟电子技术基础. 北京:高等教育出版社,1996. 539—542)

11 Lapostolle P M, Septier A L. Linear Accelerators. Amsterdam: North-Holland Publishing Company. 1970. 322

12 XIE Jia-Lin. A New Type Electronic LINAC. Chinese Patent No. : ZL98207144.2 (in Chinese)

(谢家麟. 新型电子直线加速器. 国家专利:ZL98207144.2)

Experiment Study on Self-amplified High-Power Klystron

WANG Yan-Shan LI Da-Zhi ZHANG Shao-Ping LI Yong-Gui

(*Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

Abstract The experiment study on self-amplified high-power klystron is carried out in the microwave system of BFEL. The performance of the self-amplified klystron including output power, frequency, frequency stability, buildup time etc. is measured by modulating its feedback parameters. The experiment results show that the self-amplified klystron can be used as one of the microwave sources in electron LINAC for the industrial application.

Key words klystron, self-amplified, LINAC, microwave