一种新型 S 波段高平均功率宽带速调管

张兆传* 沈宝丽 于晓娟 张 峰 黄云平
(中国科学院电子学研究所高功率微波源与技术重点实验室 北京 100190)

摘 要：该文介绍了一种新型 S 波段高平均功率宽带速调管的主要设计思想、模拟计算结果和实验结果。文中提出了具有理想高频通过率的高平均功率宽带速调管电子光学系统的验证方法，以及联合使用 2.5D Arsenal-MSN code 和 KLY6 两种软件去除带内功率凹点和改善高频性能的方法。最终的实验测试结果表明，这些方法是有效的。

关键词：速调管；高平均功率；宽带；功率凹点；电子光学系统
中图分类号：TN122 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-5896(2011)07-1727-06
DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01260

A New Type S-band High-average-power Broadband Klystron

Zhang Zhao-chuan Shen Bao-li Yu Xiao-juan Zhang Feng Huang Yun-ping
(*Key Laboratory of High Power Microwave Sources and Technologies*, *Institute of Electronics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190, *China*)

Abstract: This paper presents the design considerations, the simulation results and the test results for a new type S-band high-average-power broadband klystron. In this paper, a method which is used for verifying the quality of an electron-optics-system of a high-average-power broadband klystron is proposed. And then the coordinate method using the 2.5D Arsenal-MSN code and the KLY6 code is also described, which deals with eliminating the potential output-power-sag and optimizing the parameters of the RF-interaction region for broadband klystrons. The further hot-test results prove that both of the methods are effective.

Key words: Klystron; High-average-power; Broadband; Output-power-sag; Electron-optics-system

1 引言

目前，世界上不同研制单位研制和生产的大功率速调管(以下简称速调管)主要应用于武器装备、科学研究和国民经济等军用和民用微波电子系统，如：雷达、电子对抗、通信、电视广播、粒子加速器、可控热核聚变、微波遥感、微波加热、材料处理和制备等系统或装置。为进一步满足现在和未来军用或民用微波电子系统对速调管的需求，进一步提高速调管的功率和效率，进一步展宽带宽和延长寿命仍是速调管方向面临的最为重要、最为迫切的任务[1,2]。

国内目前研制和生产速调管的单位主要是中国科学院电子学研究所(以下简称电子所)和中国电子科技集团公司第十二研究所(以下简称十二所)。在 S 波段，脉冲输出功率大于 800 kW，平均输出功率大于 10 kW 的情况下，电子所先后研制成功了 10%、11%和 12%的宽带速调管[3−5]；2007 年，电子所又研制成功一种 S 波段高平均功率速调管，其绝对带宽为 70 MHz，平均输出功率大于 50 kW[6]。十二所偏重于多注速调管的研制，平均输出功率基本小于 10 kW[7]。

国外研制速调管的公司有：美国的 CPI，法国的 THALES，日本的 TOSHIBA，俄罗斯的 ISTOK 和 TORIY，英国的 TMD 等。查新资料表明，这些公司研制的速调管或是平均功率较低，或是带宽较窄。比如，CPI 公司研制的 S 波段速调管带宽可达 200 MHz，但平均功率仅有 1~3 kW；在速调管峰值输出功率 1.6 MW 的情况下，TOSHIBA 公司研制的速调管带宽达到 200 MHz，平均功率也只有 1~5 kW；ISTOK 公司研制的速调管最大带宽为 50 MHz[8−10]。

由上可见，国内研制的速调管或者带宽较宽，或者平均功率较高，未能做到二者兼顾；国外研制的速调管或者平均功率较低，或者带宽较窄。为满足国内军用或民用微波电子系统对高平均功率宽带速调管更高的需求，2007 年电子所启动了一种 S 波段、200 MHz 带宽、22 kW 高平均功率速调管的研制工作。本文介绍该速调管的总体设计思想、各组件的模拟计算结果和整管实验结果，介绍高电子注通过率电子光学系统的验证方法以及联合使用两种计算分析软件去除带内功率凹点和改善高频性能的方法。

2010-11-19 收到，2011-03-29 改回
*通信作者：张兆传 zczhang@mail.ie.ac.cn

2 总体设计思想

高平均功率速调管稳定工作的前提条件之一是高平均功率状态下的电子注高频散焦小，通过率高。影响宽带速调管稳定工作的因素之一是不同工作频率时电子注的高频通过率不同，有时差别较大，严重时可达 7%～8%。因此，研制该高平均功率宽带速调管的主要技术难点是：在 7.14%相对瞬时带宽范围内的每一个工作频率点上均需获得较高的电子注高频通过率，进而在全频带内实现 22 kW 的高平均功率输出，实现稳定工作。为获得理想的电子注高频通过率，即高质量的电子光学系统，电磁聚焦单注速调管方案成为了研制本速调管的首选方案。鉴于 S 波段 50 kW 高平均功率速调管的电子注直流通过率大于 98%，高频通过率大于 97%，拟以 S 波段 50 kW 高平均功率速调管的电子注光学系统[6]为基础，通过适当增加注-波互作用区的长度(电磁聚焦线包长度)，增加群聚腔的数目，通过参差调谐方式，满足 7.14%相对瞬时带宽对注-波互作用区的要求，进而实现较高的高频通过率，保证速调管安全稳定工作。由于该速调管的平均输出功率为 22 kW，较 S 波段 50 kW 高平均功率速调管低，同时工作电压和工作电流也比之前低，因此，收集极的设计拟以其为基础，适当缩短其长度来实现。同时，选取覆膜浸渍钡钨阴极，TM_{010} 基模工作方式，8 腔群聚段，双间隙重叠模输出回路，大功率宽带盒型输出窗，以及收集极、管体和输出窗的高压水冷结构来保证速调管性能指标的实现和速调管工作的可靠性等。

3 电子光学系统

3.1 电子注参量

以上论述分析了在电子光学系统方面的一些问题及相应的总体考虑。依据该速调管的主要性能指标要求(见表 1)，结合宽带速调管以及 S 波段 50 kW 高平均功率速调管的研制情况，初步选择电子注参量如表 2 所示。

为了满足电压 77.5 kV、最大视频脉冲宽度 80 μs、重复频率 300 Hz 情况下对阴极发射电流密度的要求，阴极选用覆膜浸渍钡钨阴极，阴极半径为 $r_k = 22.3$ mm，阴极平均电流发射密度约为 3 A/cm^2。

表 1 速调管的主要性能指标

工作频段	S波段
脉冲输出功率(MW)	1.1
平均输出功率(kW)	22
相对瞬时带宽(%)	7.14
效率(%)	30
增益(dB)	42

表 2 电子注的主要参数

电子注电压(kV)	77.5
电子注电流(A)	47.5
导流系数(μP)	2.2
电子注半径(mm)	6.75

3.2 聚焦参量[11]

聚焦系统采用电磁聚焦方式。

布里渊磁场为

$$B_b = \frac{830}{b}\cdot P_{er}^{0.3}\cdot P_0^{0.2}\times 10^{-4} = 5.1\times 10^{-2}(\mathrm{T}) \quad (1)$$

式中 P_{er} 为导流系数(P)，b 为电子注半径(cm)，P_0 为电子注功率(W)。

限制流聚焦的电子注刚性好，脉动小，高频通过率高，对电压和磁场等工作条件参数的变化不敏感。一般采用 2～3 倍布里渊磁场就能满足限制流聚焦的要求。选取均匀聚焦区主磁场强度为

$$B = 2.5B_b = 1.28\times 10^{-1}(\mathrm{T}) \quad (2)$$

穿过阴极面的磁通与穿过电子注截面的磁通之比为

$$k = \sqrt{1 - B_b^2 / B^2} = 0.9165 \quad (3)$$

阴极面磁场为

$$B_k = k\cdot B\cdot (b / r_k)^2 = 1.06\times 10^{-2}(\mathrm{T}) \quad (4)$$

3.3 电子注轨迹

以上面计算结果和 S 波段 50 kW 高平均功率速调管电子光学系统[6]为基础，调整电子束与高频互作用区的长度(电磁聚焦线包高度)为 487 mm，运用聚焦系统设计计算软件 CTA、电子光学设计计算软件 E-GUN[12]，计算并优化调整结构参量，获得的聚焦磁场结构及轴向磁场分布如图 1，电子枪区电子轨迹及电场等位线分布如图 2，速调管全电子轨迹如图 3。为检测电子注质量，调节聚焦磁场幅值 15%，即增加或减少 15%的主磁场，电子注最小波动 6.7%，最大波动 9%，电子注层流性基本不变化。

对于高平均功率宽带速调管来说，工作频率不同其高频通过率也会不同，高频通过率低下会影响速调管工作的稳定性，甚至引起速调管损毁。因此，关于本速调管电子光学系统的设计，提出了一个有效的验证方法，即利用 2.5D Arsenal-MSU 设计计算软件[13]，对速调管工作在频带低端($0.964 f_0$)、中心频点(f_0)和频带高端($1.036 f_0$)3 个频率点情况下的高频通过率分别加以计算分析和验证，确保高频通过率均达到 100%，进而保证研制的速调管工作于

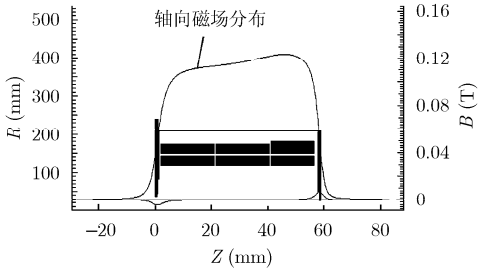


图 1 聚焦磁场结构及轴向磁场分布

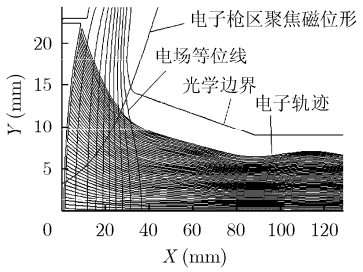


图 2 电子枪区电子轨迹及电场等位线分布

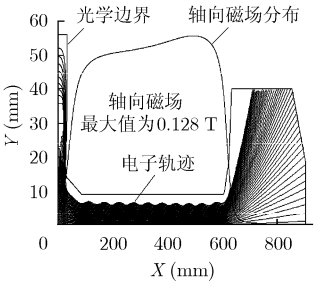


图 3 速调管全电子轨迹

不同频率情况时均具有较高的高频通过率。图 4 为利用 2.5D Arsenal-MSU 设计计算软件计算优化的工作在频带低端($0.964\,f_0$)时的电子轨迹状况。

4　注-波互作用系统

4.1 宽带群聚段

考虑到总体设计要求速调管具有较高的高频通过率，设计电子光学系统时电子注与漂移管的半径比(b/a)取值相对小，会在一定程度上减小谐振腔间隙的径向耦合系数，影响各谐振腔间隙处注-波互作用的效果，降低各谐振腔间隙处的注-波互作用效率，会影响设计计算时整管效率-带宽特性和增益-带宽特性的实现。因此，群聚段谐振腔个数的选择可比同样带宽特性速调管群聚段谐振腔的个数多 1 个。最终方案确定了群聚段采用 8 个重入式谐振腔(含输入腔)和 TM_{010} 基模工作方式。整体高频特性模拟计算前，运用 Azimuth 计算软件对各谐振腔的特性阻抗(R/Q)进行逐一计算和优化，主要是为了保证每个谐振腔均具有较高的特性阻抗。计算过程中，通过对谐振腔参差调谐和对第 2, 3, 4, 5, 6 谐振腔适当加载等手段，实现了宽带群聚段性能。

4.2 宽带输出段

为了扩展高频输出段带宽，采用双间隙重叠模输出回路。首先运用 Azimuth 计算软件计算并优化无耦合情况下单一谐振腔的 R/Q，再运用微波等效电路原理，计算双间隙重叠模输出回路的阻抗-频率特性，如图 5 所示，达到了总体设计对输出间隙阻抗特性的要求。关于输出回路稳定性问题，可用 Nyquist 原理加以验证[14]。本文计算分析了输出回路的稳定性，计算的 Nyquist 图不包含 $1+j_0$ 点，输出回路具有稳定性。此时，双间隙重叠模输出回路两间隙间距离 L 满足 $\beta_e \cdot L = 235\,°$，β_e 为轴向传播常数。

4.3 高频特性模拟

按照速调管参差调谐方法中各群聚腔参量以及漂移长度等通常的布设方法初设各值，如：设定输入腔的有载 Q 值为 60，频率为 $0.980\,f_0$，结合双间隙重叠模输出回路阻抗-频率特性参量(见图 5)，运用 1 维大信号注-波互作用计算软件 KLY6[15]，进行了速调管功率-频率特性、效率-频率特性以及增益-频率特性的设计计算模拟；之后对各群聚腔的参量分布以及腔间漂移长度进行优化，即对各谐振腔的频率、Q 值以及谐振腔间的漂移长度进行优化，优化后的高频性能结果如图 6，具体高频参量分配如表 3。图 6 表明：速调管频带内脉冲输出功率大于 1.45 MW，效率大于 37%，增益大于 45 dB。依据我们在大功率速调管方面的研制经验，扣除研制过程的相关误差 7%～8%，实际研制的速调管性能应能满足主要技术指标要求。

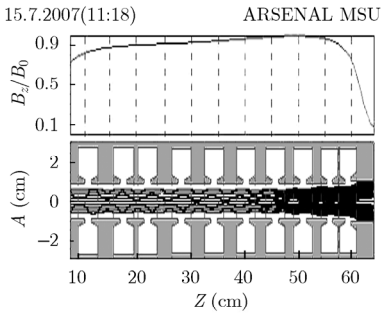


图 4 工作在频带低端($0.964f_0$)时的电子轨迹

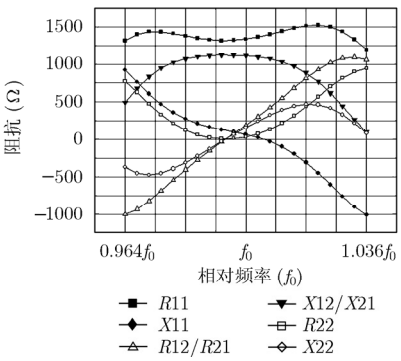


图 5 双间隙重叠模输出回路阻抗-频率特性曲线

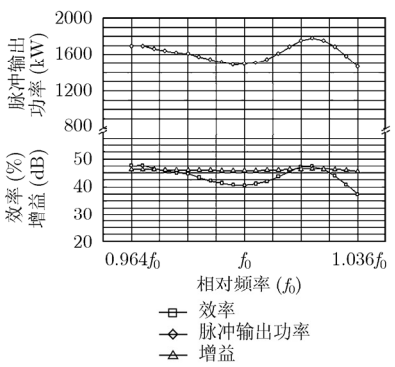


图 6 功率-频率特性、效率-频率特性以及增益-频率特性的计算结果

表 3 高频参量分配

谐振腔	1 腔	2 腔	3 腔	4 腔	5 腔	6 腔	7 腔	8 腔
相对频率	0.982	0.964	0.989	1.013	1.029	1.039	1.045	1.064
Q	60	250	180	70	150	420	2500	2500
R/Q	105	105	105	105	105	105	105	105

5 输出窗和收集极

5.1 输出窗

盒型结构的微波功率输出窗工艺稳定，具有承载高功率微波的能力。依据近年来对高功率微波盒型输出窗失效机理方面的研究结果，对于速调管 22 kW 平均输出微波功率来说，采用大功率宽带盒型输出窗结构是适宜的[16,17]。输出窗片选用 97.6%的 Al_2O_3 陶瓷，窗片直径为 89 mm，厚 3.1 mm,TE_{11} 模工作方式，图 7(a)为盒型窗结构。运用 Isfel3d, HFSS[18,19]电磁仿真软件，模拟计算了输出窗的特性，频带内驻波比小于 1.1, TE_{11} 模式电场良好地平行于窗片表面；调整结构尺寸，尽量减弱带内共生传输模式——TM_{11} 模式的场强，未发现带内存在其它鬼模。另外，在模拟分析过程中，发现距离频带低端带外 40～100 MHz 频率范围内存在 TM_{01} 模式，如图 7(b)所示，不过这并不会影响输出窗的正常工作。为抑制二次电子发射，实际研制过程中在输出窗真空一侧的窗片表面涂覆 TiN，厚度 15 nm。

5.2 收集极

收集极的设计借鉴了 S 波段 50 kW 高平均功率速调管收集极的设计方法与设计过程[6]。结构为双层圆柱形水冷结构，收集极体内表面长度为 215 mm，冷却液流量减至 135 L/min，收集极可安全工作。

6 实验结果

对最初研制的速调管样管进行了性能测试，热测结果发现在相对工作频率 $0.993\,f_0$ 处出现了功率凹点，即在该工作频率下，饱和输出功率为 0.25 MW，且不随激励功率的增加而增加，不随聚焦磁场的适当调节而增加。究其原因，是由于处于工作频带低端的谐振腔在高于其频率的工作点上产生了去群聚现象，影响了速调管的增益-频率特性，对应影响了效率-频率特性和功率-频率特性。克服方法为：(1)将增益凹点移出频带；(2)在增益凹点处加一个谐振腔，补偿增益的下降[20]。本文提出采用 2.5D Arsenal-MSU 计算软件对原设定的高频参量进行重新计算分析和验证，计算分析结果和初步性能测试结果比对如图 8。从图中的计算分析结果不难看出，在工作频率 $0.993\,f_0$ 处确实存在输出功率凹点，与性能测试结果基本一致。

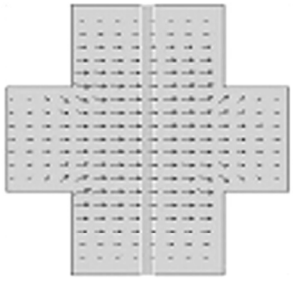
在整管漂移长度不变以及 2,3 腔间的漂移渡越角仍为 37°的情况下，将 3 腔频率调整为 $0.975\,f_0$；结合 2.5D Arsenal-MSU 计算软件和 1 维大信号注-波互作用 KLY6 计算软件，对初始设定的其它高频参量进行进一步调整优化，最终去除了带内功率凹点[21]。调整后的高频参量分配见表 4,1 维大信号计算优化后的功率–频率特性、效率–频率特性和增益–频率特性见图 9。比对图 9 和图 6，中心频率 f_0 附近的输出功率有明显提高，且带内功率起伏变缓。以上过程中，1 维大信号注-波互作用 KLY6 计算软件主要用于计算分析速调管的整体高频性能，2.5D Arsenal-MSU 计算软件主要用于判定带内是否存在功率凹点。该验证方法也可应用于其它宽带速调管的研制过程。

表 4 高频参量分配

谐振腔	1 腔	2 腔	3 腔	4 腔	5 腔	6 腔	7 腔	8 腔
相对频率	0.990	0.964	0.975	1.011	1.030	1.040	1.050	1.059
Q	58	61	68	84	143	416	2500	2500
R/Q	105	105	105	105	105	105	105	105

近期研制的 5 只速调管全部满足性能指标要求，其中 1 只速调管参加了整机联调并通过全性能测试和 24 h 连续加电试验，速调管工作稳定可靠。另外，速调管工作于工作频带内的不同频率点时，其高频通过率均大于 94.5%，且频带内不同频率点时的高频通过率差异不明显，差值不到 2%。图 10(a)

(a) 输出窗



(b) 电场分布

图 7 盒型输出窗结构和带外 TM_{01} 模式电场分布

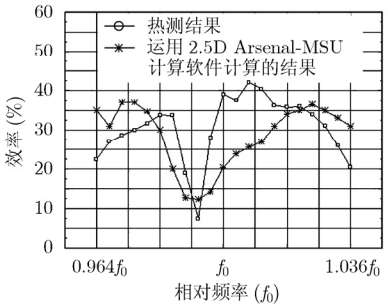


图 8 初步性能测试和计算分析结果

为速调管照片，图 10(b)为速调管实测的脉冲输出功率–频率、效率–频率、饱和增益–频率以及平均输出功率–频率典型特性。速调管长度 1201 mm，重量为 68 kg。

比对图 10(b)和图 9，实测速调管特性与设计计算结果之间仍有明显差异，究其原因，主要来自以下两个方面：一是，目前缺乏速调管 3 维注-波互作用精确模拟专用软件，仍使用简易模型情况下的 1 维大信号注-波互作用计算软件，计算精度、准确性不高；二是在速调管的研制过程中，实测的高频互作用区参量与计算设定的参量之间存在差异，很难做到完全一致，如谐振腔实测频率与设定频率的差异，各漂移长度、间隙长度与设定长度的差异，各谐振腔 R/Q 的真实值与设定值之间的差异，实际的电子注状态与理论计算结果之间的差异等等，均会产生速调管实际特性与理论计算模拟特性的不同。

7　结论

以中国科学院电子学研究所宽带速调管和高平均功率速调管多年的研究成果、研制经验为基础，自主设计并研制成功了一种新型 S 波段高平均功率宽带速调管，使宽带速调管的平均功率由通常的 10 kW 提升至 22 kW 以上；其设计思路和设计过程、有效的电子光学系统验证方法以及去除带内功率凹点和改进整管性能的方法等，对其它类型高平均功率宽带速调管的研制具有参考价值。该高平均功率宽带速调管的研制成功，不仅表明了我国高平均功率微波真空电子器件研制水平的不断提升，也为研制其它类型的高平均功率宽带速调管奠定了技术基础，对进一步满足现在和未来我国军用和民用微波电子系统的需求具有十分重要的意义。

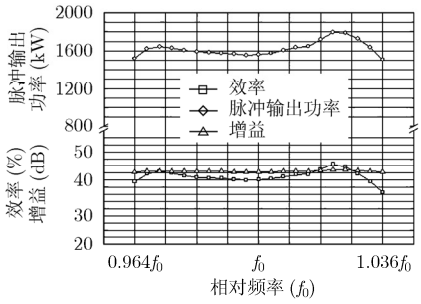
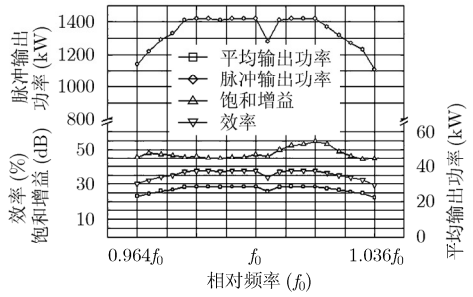


图 9 功率–频率特性、效率–频率特性以及增益–频率特性的计算结果

(a) 速调管照片



(b) 速调管典型特性曲线

图 10 速调管照片及实测结果

参 考 文 献

[1] 黄军. 真空管雷达发射机的现状和发展趋势[J]. 现代雷达, 2010, 32(7): 87–91.
Huang Jun. Status and trends of vacuum electronics tube radar transmitter [J]. *Modern Rader*, 2010, 32(7): 87–91.

[2] 丁耀根, 刘濮鲲, 张兆传, 王勇. 真空电子学和微波器件的发展和技术现状[J]. 微波学报, 2010, 26(增刊): 397–400.
Ding Yao-gen, Liu Pu-kun, Zhang Zhao-chuan, and Wang Yong. The state art and development of vacuum electronics and microwave vacuum electron devices [J]. *Journal of Microwaves*, 2010, 26(Suppl.): 397–400.

[3] Wang Yong, Ding Yao-gen, Liu Pu-kun, Zhang Zhi-qiang, and Zhang Jian. Research progress of S-band broadband klystron in IECAS [C]. Proceeding of 2010 IEEE IVEC, Monterey, California, USA, May 2010: 219–220.

[4] Wang Yong, Ding Yao-gen, and Liu Pu-kun, *et al*.. Development of an S-band klystron with bandwidth of more than 11% [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2006, 34(3): 572–575.

[5] Niu De-lu. An S-Band klystron with advanced features [C]. UHF'99 International University Conference, St. Petersburg, Russia, May 1999: 70–74.

[6] Zhang Zhao-chuan, Ding Yao-gen, and Fan Jun-jie, *et al*.. Development of an S-band 50-kW-average power klystron [J]. *IEEE Transactions on Electron Device*, 2009, 56(5): 891–895.

[7] 沈宝丽, 王勇, 张兆传, 于晓娟, 周小攀, 黄云平. S 波段宽带高平均功率速调管群聚段的研制[J]. 微波学报, 2010, 26(增刊): 488–490.
Shen Bao-li, Wang Yong, Zhang Zhao-chuan, Yu Xiao-juan, Zhou Xiao-pan, and Huang Yun-ping. Investigation on the S-band broadband high average power klystron's bunch structure [J]. *Journal of Microwaves*, 2010, 26(Suppl.): 488–490.

[8] Thales Inc. Pulsed products-S-band. http://www.cpii.com/product.cfm/1/20/152, 2010.

[9] Toshiba Inc. Pulsed klystron. http://www.toshiba-tems.com.cn/electron/eled03.htm, 2010.

[10] Istok Inc. One-beam klystron. http://istok.com.cn/index.asp,

2010.

[11] 电子管设计手册编辑委员会. 大功率速调管设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979. 9: 34–35.
The editorial board for the vacuum tube design manuals. A Design Manual of the High-Power Klystron [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1979.9: 34–35.

[12] Herrmannsfeldt W B. EGUN: an electron optics and gun design program. SLAC-331, Stanford, CA, 1988.

[13] Sandalov A N, Pikunov V M, Rodyakin V E, Faillon G, and Thaler Y. Animation of nonlinear electron-wave interaction in klystron [C]. Proc. Pulse RF Sources for Linear Colliders, Kanagawa, Japan, April 1996: 8–12.

[14] 丁耀根. 大功率速调管的理论与计算模拟[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.12: 337–363.
Ding Yao-gen. Theory and Computer Simulation of High Power Klystron [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.12: 337–363.

[15] Yonezawa H and Okazaki Y. A one-dimentional disk model simulation for klystron design. SLAC-TN-84-5, May 1984.

[16] Zhu Fang, Zhang Zhao-chuan, Luo Ji-run, and Zhang Yu-wen. Investigation of the failure mechanism for an S-band pillbox output window applied in high-average-power klystron [J]. *IEEE Transactions on Electron Device*, 2010, 57(4): 946–951.

[17] 朱方, 张兆传, 罗积润. S 波段盒型输出窗击穿原因的电磁分析[J]. 真空科学与技术学报, 2010, 30(2): 101–105.
Zhu Fang, Zhang Zhao-chuan, and Luo Ji-run. Electromagnetic simulation of breakdown mechanisms of S-band pillbox output windows [J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2010, 30(2): 101–105.

[18] Silaev S. Isoparametric finite element analysis of time-harmonic electromagnetic fields in three dimensions [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1993, A328: 535–541.

[19] Ansoft HFSS 9.0, from Ansoft Corporation, Four Station Square Suite200, Pittsburgh, PA 15219, USA.

[20] 丁耀根. 大功率速调管的设计制造和应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.12: 48–49.
Ding Yao-gen. Design, Manufacture and Application of High Power Klystron [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.12: 48–49.

[21] Randall J P, Perring D, and Nuth V R. Broadband klystrons [J]. *Vacuum*, 1980, 30(11/12): 455–458.

张兆传： 男，1965 年生，研究员，研究方向为高功率微波真空电子器件与技术.