

## 冷阴极高阻抗相对论速调管放大器的模拟研究\*

朱丹妮, 张军, 钟辉煌, 戚祖敏

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:**采用粒子模拟软件,建立了冷阴极发射实心束的高阻抗相对论速调管放大器模型。该模型由1个带屏蔽环的二极管,5个简单药盒型谐振腔和1个锥形收集极构成。为了给具有高效率的高阻抗相对论速调管提供实心束,同时实现设备的简单化和紧凑化,采用冷阴极取代传统的热电子枪,不仅易操作而且大大降低能耗和经费。在传统二极管阴极侧面引入屏蔽环,利用屏蔽极大地提高电子束阻抗,同时屏蔽环的位置和形状能明显降低非发射区的场强,并且有效改善阴极端面发射的均匀性。在束波互作用区,通过依次调节末前腔和输出腔的位置并结合引导磁场的大小对输出的微波进行优化,结果表明:在二极管发射电压525kV、电流328A的实心束及外加磁场0.35T的条件下,当注入功率为1kW时,在11.424GHz的中心频率处获得了功率81MW,效率47%,增益49dB的微波。

**关键词:**相对论速调管放大器;高阻抗;冷阴极;粒子模拟

**中图分类号:**TN128 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2015)02-019-05

## Simulation of a high impedance relativistic klystron amplifier with a cold cathode

ZHU Danni, ZHANG Jun, ZHONG Huihuang, QI Zumin

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** A high impedance relativistic klystron amplifier with a cold solid cathode is designed and investigated by 2.5-D particle-in-cell simulations. The model is composed of a diode with a shielding ring, five pill-box cavities and a cone collector. In order to simplify and minimize the cathode structure, a cold cathode is designed and adopted in a high-impedance relativistic klystron amplifier with rather high conversion efficiency. A shielding ring is introduced to achieve the desired high impedance and reduces the surface electric field to avoid unexpected explosive emissions and ensures the emission uniformity. In the beam-wave interaction region, with optimization of the position of the last two cavities and the magnetic field, the performance of the klystron is validated. It reveals that microwaves with a power of 81 MW are generated at a frequency of 11.424GHz when the beam voltage and current are 525kV and 328 A respectively, under a guiding magnetic field of 0.35 T. The corresponding power conversion efficiency is as high as 47%, and the gain reaches 49 dB when the net injection power is 1 kW.

**Key words:** relativistic klystron; high impedance; cold cathode; PIC simulation

相对论速调管放大器(Relativistic Klystron Amplifier, RKA)具有高输出功率以及可控的频率和相位<sup>[1]</sup>,已经发展成为空间相干功率合成的备选器件之一,其中低阻抗RKA得到蓬勃发展。尽管输出功率较高,但这些器件的转换效率普遍偏低<sup>[2-5]</sup>,尤其是在高频段(如X波段)<sup>[6]</sup>。相比之下,高阻抗RKA(>1kΩ)能获得较高的束波转换效率,在粒子加速器、工业供能和等离子体加热等领域都有广泛的应用<sup>[7]</sup>。在过去几十年里,为发展下一代直线碰撞机,国际上着力研制11.424GHz的高阻抗RKA作为射频源(称“热技术”方

案)<sup>[8-9]</sup>,直到2004年被基于超导的“冷技术”路线取代<sup>[10]</sup>。其中一个重要原因是“热技术”耗能太大。作为速调管的核心部件之一,阴极为束波互作用区提供换能的电子束。而传统的高阻抗RKA通常采用热阴极,工作在约1000℃的高温条件下<sup>[11]</sup>。此外需要精心设计的电子枪和相匹配的聚焦系统<sup>[12-14]</sup>。通过电子束测试获得理想的电子束是作为速调管运行良好的前提。而表面爆炸发射的冷阴极在常温下工作,与热阴极相比具有以下优点<sup>[11]</sup>:1. 无需复杂的电子枪结构也不需要单独设计聚焦系统与之匹配;2. 由于发射面

\* 收稿日期:2015-01-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61401485)

作者简介:朱丹妮(1989—),女,湖北黄冈人,博士研究生,E-mail:redgirl1117@163.com;

张军(通信作者),男,研究员,博士,硕士生导师,E-mail:zhangjun@nudt.edu.cn

的电流密度更大,在获得相同电流时阴极尺寸更小,这在高频段具有重要意义。然而,由于爆炸发射是基于量子隧穿效应,在同一工作电压下发射的电流很大,阻抗难以达到  $k\Omega$  级。此外,为避免非发射区表面场强过大,同时保证发射区场强足够大,并且能较均匀地发射电子,在阴极侧面非发射区引入一个屏蔽环。通过屏蔽作用扼制阴极的发射能力,具体表现在它的位置和形状能有效降低非发射区的场强,以及改善发射的均匀性。总之,朱丹妮等提出用冷阴极取代热阴极应用于 X 波段的高阻抗 RKA,有利于实现高阻抗 RKA 高效率的微波输出。

## 1 结构模型

图 1 为冷阴极发射实心束的 X 波段高阻抗相对论速调管放大器模型<sup>[14]</sup>。半径为 3mm 的实心束由二极管发射,经过束波相互作用区后剩余电子打到收集极。与此同时从输入腔的同轴波导注入信号,在输出腔的提取部分输出微波。束波相互作用区主要由五个谐振腔构成,即一个输入腔、两个增益腔、一个末前腔和一个输出腔。该模型采用无鼻锥的简单药盒型谐振腔来代替传统的重入式腔体。在较大的束电压下,增大腔间隙对耦合效果影响较小,而且具有以下优势:一是减小场强,避免射频击穿,提高功率容量;二是结构简单便于加工,对加工精度的要求更低<sup>[15]</sup>。由于电子束在输出腔经过相互作用容易出现散焦,为避免被漂移管过多地截获,同时增大输出腔的功率容量,提高微波输出效率,同样在保证工作频率截止的前提下,设计一个阶跃漂移段,即将末前腔下游的漂移管半径由 4.60mm 增大到 4.80mm。另外,采用细长的锥形收集极能够有效增大收集极内表面,降低对表面耗散功率密度的要求。

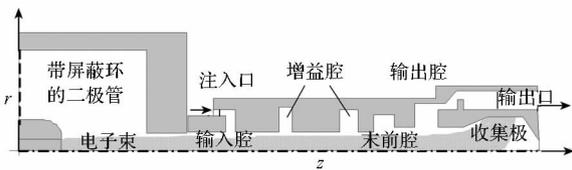


图 1 冷阴极实心束的 X 波段高阻抗相对论速调管放大器模型

Fig. 1 Schematic of an X-band high-impedance RKA with a cold solid beam

## 2 高阻抗二极管的设计

该高阻抗二极管不仅需要阻抗  $R$  达到  $k\Omega$  级,还需满足:一是在阴极侧面即非发射区的表面场

强不能太高,否则会造成大的电流损耗,导致效率下降;二是在阴极端面即发射区的场强要大于爆炸阈值。因此,一方面在非发射区选择发射阈值远远高出发射区的材料,另一方面保证发射区的场强,通常表现为同轴线内表面的径向场(记为  $E_r$ )小于 30 兆伏/米,而发射端面通常为轴向场(记为  $E_z$ )大于几兆伏/米。此外,对实心束而言保证阴极表面爆炸发射的均匀性也极为重要。

图 2 为所设计的高阻抗二极管的结构示意图( $R_c = 3.0\text{mm}$ )。通常采用图中无屏蔽环的二极管产生强流相对论电子束,它由一个柱形阴极和部分与其构成同轴线的阳极组成。当在阴阳极之间外加高压,电子由阴极端面爆炸发射,穿过阳极孔到达漂移区。由于电子束电压对极间距离不敏感,阻抗  $R$  主要由电流决定。而束流和场强主要受到阴阳极的轴向间距  $D_{ac}$  和阳极半径  $R_a$  的影响( $R_c$  保持不变)。基于以上结构模型,采用粒子模拟软件,设置爆炸发射模型对结构参数的影响进行模拟研究。为排除发射阈值对电流的影响,在模拟过程中采用爆炸发射的默认阈值。图 3 给出了阻抗以及发射区场强  $E_z$  和非发射区场强  $E_r$  分别随着轴向间距  $D_{ac}$  和阳极半径  $R_a$  的变化情况。图 3 中表明随着极间距离增大,阻抗小幅度增大,两个区的场强都相应减弱。由于二极管尺寸受限,仅依靠增大极间距离来提高阻抗到  $k\Omega$  级是难以实现的。此外,过大的阳极半径会大大降低外加电磁线圈的利用率,而且发射区场强会因较大的阴阳极间轴向距离而过低。



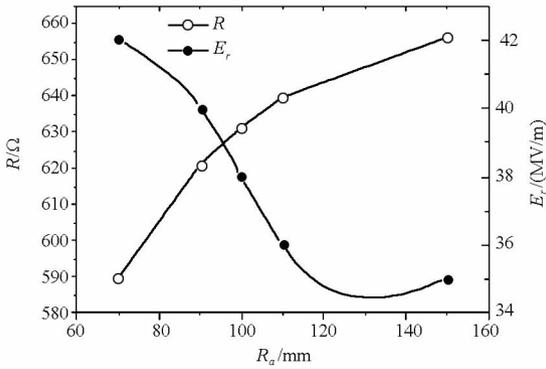
图 2 所设计的高阻抗二极管的结构示意图  
Fig. 2 Geometric structure of the designed diode

为此,如图 2 所示在阴极侧面引入一个屏蔽环来加以改善。通过充分利用静电屏蔽效果抑制阴极的发射能力来提高阻抗。依据同轴线理论非发射区表面场  $E_r$  为

$$E_r = \frac{U_{AK}}{R_{in} \ln(R_a/R_{in})}$$

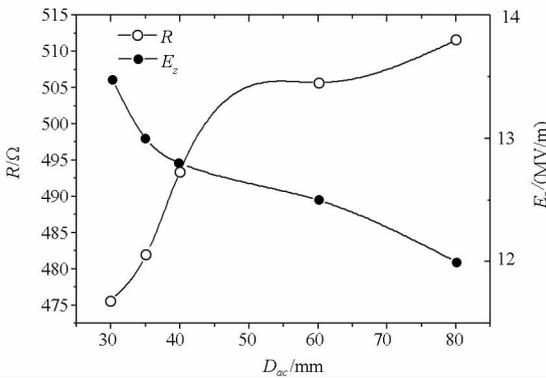
其中  $R_{in}$  表示同轴线内径,  $U_{AK}$  为极间电压。当阳极半径  $R_a$  不变时,由于屏蔽环的引入,同轴线内径  $R_{in}$  由阴极半径  $R_c$  增大到屏蔽环外径  $R_{cr}$ ,这样有效减小表面场  $E_r$ 。同时,非发射区的最大场强出现在阴极端面上方的圆弧表面(该圆弧的半径

为  $r$ )。而采用曲率较大的圆弧面可以有效减弱非发射区的最大场强(记为  $E$ )。



(a) 阳极半径  $R_a$

(a) Radius of anode  $R_a$



(b) 轴向间距  $D_{ac}$

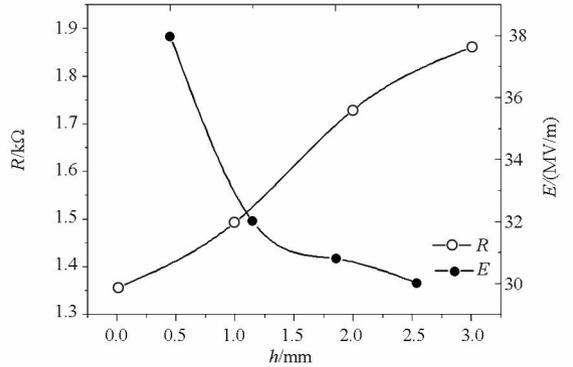
(b) Axial distance  $D_{ac}$

图 3 阻抗以及场强随着极间间距的变化情况

Fig. 3 Beam impedance and electric field as a function of the distance between cathode and anode

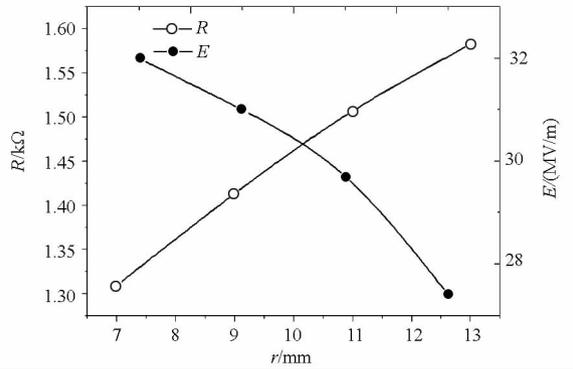
图 4 为二极管阻抗和非发射区的最大场强  $E$  随屏蔽环的高度  $h$  和其圆弧半径  $r$  变化的曲线。与图 3 相比,引入屏蔽环后阻抗显著提高,甚至会超出预期的阻抗 1.6 kΩ。由于基于量子隧穿效应的爆炸发射要克服强场引起表面畸变所产生的势垒,静电屏蔽直接作用于表面场来抑制畸变,降低了隧穿概率,大大减弱了发射电流<sup>[11]</sup>,从而在束压基本不变的情况下获得较高的阻抗。如图 4 所示,在一定范围内增大屏蔽环的高度  $h$  和圆弧半径  $r$  均能提高屏蔽效果,从而增大阻抗,降低场强。结合极间距离和屏蔽环位置、形状的调整,经优化得到表 1 所示的二极管结构参数和结果。当极间电压达到 278kV 时,从表 1 中看出,在合适的尺寸下,获得了预期 1.6 kΩ 的高阻抗。图 5 展示了该二极管内的电场分布。从图 5(a)可知,此时非发射区的最大场强集中在圆弧表面,仅有 29MV/m,低于真空发射的经验阈值 30MV/m。图 5(b)对比了在优化后的尺寸下,有无屏蔽环时电

场沿着发射端面从内到外径向的分布,这是由于加屏蔽环后最大场强的位置远离发射端面,明显提高了发射端面上场分布的均匀性。



(a) 屏蔽环高度  $h$

(a) Altitude of shielding ring  $h$



(b) 屏蔽环弧度半径  $r$

(b) Arc radius of shielding ring  $r$

图 4 阻抗和非发射区的最大场强  $E$  随屏蔽环的高度  $h$  和其圆弧半径  $r$  变化

Fig. 4 Beam impedance and maximum electric field as a function of parameters of shielding ring

表 1 带屏蔽环二极管优化后的参数和结果

Tab. 1 Main parameters and results of optimized diode with a shielding ring

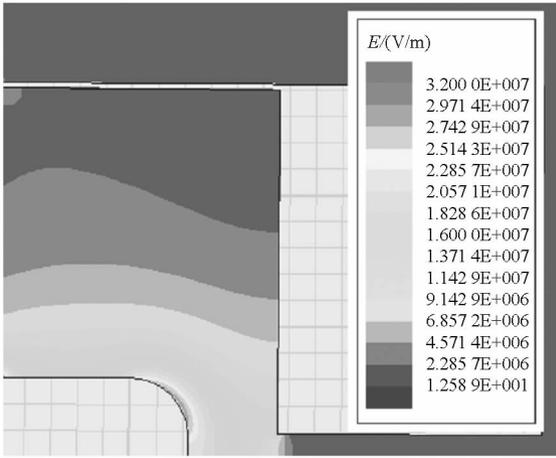
$R_a$ (mm)	$L_c$ (mm)	$D_{ac}$ (mm)	$r$ (mm)	$h$ (mm)	电压 (kV)	电流 (A)	$R$ (kΩ)	$E$ (MV/m)
70	36	17	11	1	525	328	1.6	29

### 3 热腔模拟

为验证以上带屏蔽环的二极管的应用效果,采用粒子模拟将其与一个 X 波段 11.424GHz 的高阻抗 RKA 连接。其热腔模拟条件为:由二极管发射电压 525kV、电流 328A 的 3mm 实心束,外加磁场 0.35T,注入功率为 1kW 的信号。

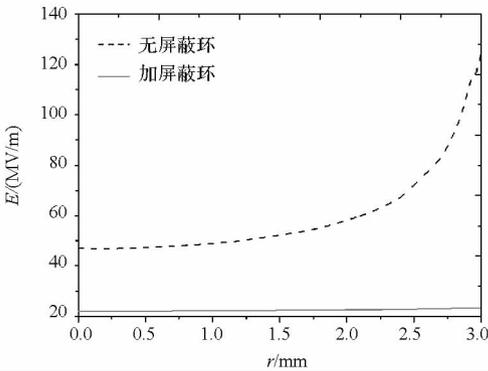
#### 3.1 输入腔

将二极管与一个带同轴注入波导耦合的输入腔连接(如图 1 所示)。1kW 的信号以 TEM 模的



(a) 电场色块图

(a) Contour of electric field



(b) 阴极端面径向电场分布

(b) Radial electric field on end of cathode

图 5 二极管内的电场分布

Fig. 5 Distribution of electric field in the proposed diode

形式注入同轴波导,随后在输入腔内转化为工作在中心频点处的  $TM_{01}$  模。图 6 为仅加入输入腔后基波电流沿着轴向增长的情况,可见在输入腔下游最佳群聚距离为 149mm,调制深度初步达 4.2%。

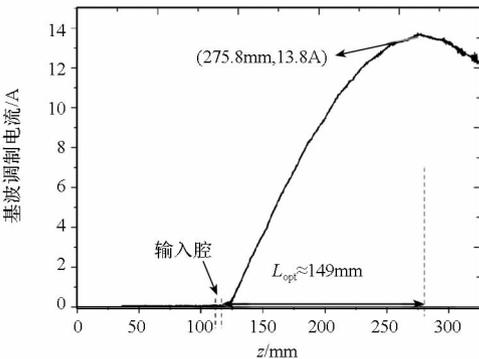


图 6 加入输入腔后基波电流沿着轴向的增长情况

Fig. 6 Axial distribution of fundamental integral current downstream of input cavity

### 3.2 调制与群聚

图 7 描述了在不同位置加末前腔时束波相互作用区基波电流沿着轴向的增长情况。从第一个增益腔开始出现明显的速度调制,随后经下游漂移段逐步转化为密度调制并出现群聚,从图 7 中可看出,电子穿过每个谐振腔后其群聚依次增强。设计中通常从输入腔开始分段模拟,依次观测电子束经过加入腔体下游的基波电流调制曲线,选择基波调制电流峰值即最佳群聚点附近的位置添加后续腔体,直到加入输出腔完成整管设计。其中在末前腔和输出腔上游的最佳群聚距离分别记为  $L_{opt3}, L_{opt4}$ 。当  $L_{opt3} = 97\text{mm}$  时,该位置正是第二个增益腔下游的基波电流峰值点,但从图 7 中对比发现,当将末前腔前移到  $L_{opt3} = 47\text{mm}$  时调制深度才达到最大。从未前腔开始,电子群聚急剧增强,速度的离散程度变得很大,在前一个最佳群聚点附近的不同位置加入末前腔时其基波电流调制开始明显受到速度离散性的影响,需要加以优化。这同样适用于输出腔位置的选择,经优化得到  $L_{opt4} = 21\text{mm}$ 。

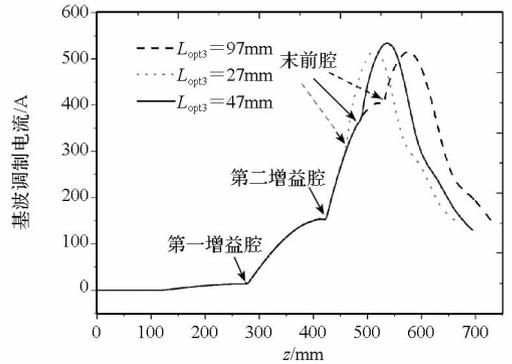


图 7 不同位置加末前腔时束波相互作用区基波电流沿着轴向的增长情况

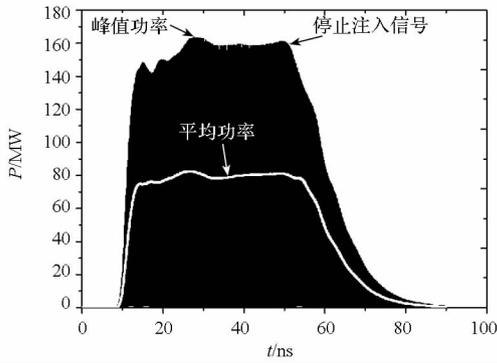
Fig. 7 Fundamental integral current after penult cavity with bunching distance

### 3.3 微波提取

优化导引磁场后在 0.35T 时获得典型的微波输出结果,如图 8 所示。图 8(a) 给出了输出波形在运行 100ns 内的时变情况。从图 8(a) 中看出,输出平均功率约 81MW,效率 47%,增益 49dB。当在 55ns 停止注入信号后,输出的微波逐渐下降到零,这验证了该放大器无自激振荡。图 8(b) 展示了较纯的微波频谱,且器件工作在 11.424GHz 的中心频点处。

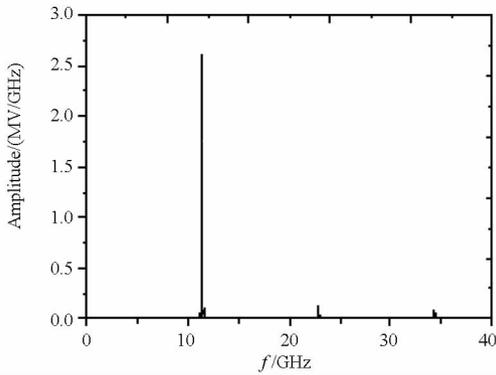
## 4 结论

本文利用粒子模拟软件建立冷阴极发射实心



(a) 输出功率

(a) Plot of output power



(b) 输出频率

(b) Frequency spectrum

图8 典型的微波输出结果

Fig. 8 Typical results of generated microwave

束的 X 波段高阻抗相对论速调管放大器模型。采用冷阴极取代传统的热阴极应用于高阻抗 RKA 中,其结构简单、紧凑,并极大降低能耗和经费。为实现高阻抗并降低非发射区的场强以及改善发射的均匀性,通过引入一个屏蔽环实现了高阻抗 RKA 对二极管的上述要求。将该二极管发射的实心束作用于 X 波段高阻抗 RKA,对其进行整管的模拟研究。经设计和优化,在注入微波 1kW、束压 525kV、束流 328A,外加磁场 0.35T 的条件下,实现 81MW,效率 47%,增益 49dB,频率 11.424GHz 的微波输出。

## 参考文献 (References)

- [1] Friedman M, Krall J, Lau Y Y, et al. Externally modulated intense relativistic electron beams [J]. *Journal of applied physics*, 1988, 64(7): 3353 - 3379.
- [2] 黄华, 王平山, 甘延青, 等. L 波段相对论速调管放大器研究[J]. *强激光与粒子束*, 1998, 10(1): 135 - 139.  
HUANG Hua, WANG Pingshan, GAN Yanqing, et al. Simulation of L-band relativistic klystron amplifier [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, 10(1): 135 - 139. (in Chinese)
- [3] 黄华, 范植开, 孟凡宝, 等. S 波段长脉冲相对论速调管放大器的实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(6): 990

-994.

- HUANG Hua, FAN Zhikai, MENG Fanbao, et al. Experiment investigation of an S-band long pulse relativistic klystron amplifier [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(6): 990 - 994. (in Chinese)
- [4] 张泽海. 改进型 S 波段相对论速调管放大器及其锁相特性研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2012.  
ZHANG Zehai. Investigation of an improved S-band relativistic klystron amplifier and its phase locking property [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)
- [5] 白现臣. 高功率微波源注入 S 波段两腔大间隙速调管放大器的研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2012.  
BAI Xianchen. Investigation of an S-band 2-cavity wide-gap klystron amplifier injected by high power microwave source [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)
- [6] 丁耀根, 阮存军, 沈斌, 等. X 波段同轴腔多注速调管的研究[J]. *电子学报*, 2006, 34(12): 2337 - 2341.  
DING Yaogen, RUAN Cunjun, SHEN Bin, et al. Study of an X-band coaxial cavity multi-beam klystron [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 34(12): 2337 - 2341. (in Chinese)
- [7] 丁耀根, 刘濮鲲, 张兆传, 等. 大功率速调管的技术现状和研究进展[J]. *真空电子技术*, 2010(6): 2 - 6.  
DING Yaogen, LIU Pukun, ZHANG Zhaochuan, et al. The state art and research progresses of high power klystron [J]. *Vacuum Electronics*, 2010(6): 2 - 6. (in Chinese)
- [8] Matsumoto S, Fukuda S, Kazakov S. Development of PPM-focused X-band pulse klystron [C]//Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 30th Linear Accelerator Meeting, 2005.
- [9] Sprehn D, Caryotakis G, Haase A, et al. Latest results in SLAC 75 MW PPM klystrons [R]. SLAC - PUB - 11733, 2005.
- [10] Jean-Eudes A, Jonathan B, Barry B, et al. Executive summary international technology recommendation panel [C]. *Interactions News Wire*, 2004.
- [11] Joe X, Baruch L, John P, et al. Vacuum tube amplifiers [J]. *Microwave Magazine*, 2009, 12.
- [12] 张瑞, 王勇, 谢敬新, 等. 百兆瓦级高功率速调管电子光学系统的研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2009, 29(5): 499 - 503.  
ZHANG Rui, WANG Yong, XIE Jingxin, et al. Design simulation of electron optics system for 100 megawatt klystron [J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2009, 29(5): 499 - 503. (in Chinese)
- [13] 冯海平. X 波段速调管电子光学系统的研究[D]. 成都:电子科技大学, 2012.  
FENG Haiping. The study of electron optics system for X-band klystron [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012. (in Chinese)
- [14] 朱丹妮. X 波段高阻抗相对论速调管放大器的仿真设计[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2013.  
ZHU Danni. Simulation study of an X-band high impedance relativistic klystron amplifier [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013. (in Chinese)
- [15] Shintake T. Nose-cone removed pillbox cavity for high power klystron amplifiers [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1991, 38(4): 917 - 923.