

# 新型回旋速调管放大器链式群聚腔的模拟与设计\*

徐寿喜 刘濮鲲

(中国科学院电子学研究所, 北京 100080)

**摘要** 对新型回旋速调管放大器的链式群聚腔—TE模簇腔进行研究, 通过三维电磁模拟对其进行分析和计算, 讨论了损耗介质对群聚腔 $Q$ 值的影响, 以及内外腔耦合孔数量对谐振特性的影响. 模拟计算结果和冷测实验吻合得很好. 最后, 为正在研制中的Ka波段三次谐波倍增回旋速调管放大器设计了一种链式群聚腔.

**关键词** 回旋速调管放大器, 谐波倍增, 群聚腔, 三维模拟.

## SIMULATION AND DESIGN OF A NOVEL CHAIN BUNCHING CAVITY FOR GYROKLYSTRON AMPLIFIER\*

XU Shou-Xi LIU Pu-Kun

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** A novel chain bunching cavity of gyrokystron amplifier, which is the clustered-cavity with TE mode, is studied. Analysis and calculations have been done by using three-dimensional electromagnetic code. The effect of loss medium on  $Q$  factor of bunching cavity is discussed, and the influence of the number of coupling-holes on resonance characteristic is also analyzed. Simulation results are in good agreement with cold-test experiment. Finally, a chain bunching cavity is designed for the developing Ka-band frequency-tripling gyrokystron amplifier.

**Key words** gyrokystron amplifier, harmonic multiplying, bunching cavity, three-dimensional simulation.

### 引言

回旋速调管放大器是一种具有重要发展前景的高功率相干毫米波源, 其结构与多腔速调管类似, 但工作机理却有很大的不同. 回旋速调管是一种快波器件, 以电子回旋谐振受激辐射机理为基础, 同时又利用了普通速调管的多腔群聚效应. 它采用了磁控注入式电子枪, 电子注的角向群聚和换能机制与回旋振荡管类似. 互作用系统是2个或多个分离的谐振腔, 其间是微波截止的电子漂移区, 外加一轴向磁场. 第一个腔输入微波信号, 对电子注产生横向速度调制与初始角向群聚, 接着穿过截止漂移区继续角向群聚, 以后进入输出腔通过注一波相互作用换能, 然后通过输出窗输出被放大的微波信号. 输出腔前可加中间谐振腔以加强群聚和提高增益. 与回旋振荡

管一样, 回旋速调管采用了过模腔, 可增加功率容量, 而其工作频率则由外加轴向磁场来决定.

由于回旋速调管的功率大、效率和增益高、磁场装置紧凑, 有一定带宽, 而且性能比较稳定, 在高性能毫米波雷达、下一代直线对撞机、通讯、受控核聚变、材料处理等方面具有广阔的应用前景, 因而在国际上倍受重视<sup>[1-3]</sup>. 目前, 回旋速调管的研究无论是在功率、效率, 还是在增益、带宽等方面都取得了可喜的进展. 在Ka波段, 3腔回旋速调管获得了225kW的峰值功率、0.82%的带宽和30dB的增益<sup>[4]</sup>; 2腔回旋速调管获得了750kW的峰值功率、5kW的平均功率、24%的效率和0.6%的带宽<sup>[5]</sup>. 在W波段, 4腔回旋速调管获得了118kW的峰值功率、10kW平均功率、0.64%的带宽和30%的效率<sup>[6]</sup>. X波段强相对论性回旋速调管获得了27MW

\* 国家杰出青年科学基金(60125104)、中科院支撑技术预研项目(422010302)和人事部留学回国人员科技活动择优(重点)资助项目

稿件收到日期 2002 - 12 - 02, 修改稿收到日期 2003 - 05 - 21

\* The project supported by National Science Fund for Distinguished Young Scholars of China (No. 60125104), Preliminary Research Project for Supporting Technology from Chinese Academy of Sciences (No. 422010302), Scientific Research Grant from Advanced Programs of State Personnel Ministry for the Returned Overseas Chinese Scholars.

Received 2002 - 12 - 02, revised 2003 - 05 - 21

的峰值功率,32%的效率<sup>[7]</sup>.现在回旋速调管放大器正逐渐走出实验室,进入国防和商业应用.美国海军研究实验室(NRL)研制的一种新型高功率毫米波雷达系统 WARLOC 就是利用了峰值功率 100kW,平均功率 10kW 的回旋速调管放大器作为发射机功率源<sup>[8]</sup>.俄罗斯则利用 2 只峰值功率 500kW、频率 34GHz 的回旋速调管作为发射机功率源研制成功了距离分辨率达到 1cm 的毫米波相控阵雷达<sup>[9]</sup>.

对冷腔体高频场的分析是研究腔体内电子注一波相互作用的基础,腔体的初步尺寸也是由冷腔体计算所得,因此,冷腔体分析对于回旋速调管的研究至关重要.利用参差调谐技术,Symons 等人首次将 TM 模簇腔 (clustered-cavity) 应用于常规速调管以拓展带宽<sup>[10]</sup>.他们在文献[11]中指出在不改变腔体尺寸的情况下,速调管的带宽可以增加一倍,并且从理论上计算了在兆瓦级的速调管中可以获得 30% 的带宽,而强相对论性速调管(1~2MV,1GW)可以获得跟普通速调管同样的增益-带宽积.后来,美国马里兰大学的 Guo 等人<sup>[12]</sup>则将 TE 模簇腔应用于回旋管放大器中.采用这种链式群聚腔的回旋速调管放大器与传统的回旋速调管放大器相比,主要有以下几个优点:(1)在效率不变的前提下,可以缩短腔体的尺寸,使管子做得更紧凑,降低磁铁重量;(2)在漂移管长度不变的情况下,可以降低输入功率,提高增益;(3)可以拓展带宽. Ka 波段的两腔回旋速调管采用簇腔,其带宽从 0.35% 提高到 1.2%,而增益不变<sup>[13]</sup>.文献[12]报道的中间腔采用簇腔的称作 gyrotrotatron(1-2-2)的回旋管放大器, Ku 波段输入, Ka 波段输出,可产生 500kW 的峰值功率和 5% 的带宽.由此可见,利用簇腔可大大提高回旋速调管的性能.因此,本文就针对新型回旋速调管放大器采用的链式群聚腔一簇腔来进行模拟和分析,并为正在研制中的 Ka 波段三次谐波倍增回旋速调管放大器设计一种群聚腔.

### 1 链式群聚腔高频场的分析与计算

中国科学院电子学研究所正在进行的 34GHz 二次谐波回旋管放大器实验已获得了 60kW 的稳定输出,其中的链式群聚腔一簇腔如图 1 所示<sup>[14]</sup>,其结构由 4 个单元组成,工作模式为 TE<sub>03</sub> 模.其中一个单元的实物照片如图 2 所示.每个单元实际上是一个圆柱腔,在恰当的位置放置了一开了耦合孔的、很薄的圆柱形钢片,将圆柱腔分为内腔和外腔.图 1 中的 R1、R2 分别为内腔的内半径和外半径,R3 为外腔的半径,D 为每个单元的长度.该种结构,既很好地利用了高次模式的高功率容量的优点,又减少了高次模式所带来的模式竞争问题.

众所周知,回旋管由于工作机理的原因一般采用 TE 模式.圆柱形谐振腔 TE<sub>mnp</sub> 模的场分布为<sup>[15]</sup>

$$\begin{cases} E_r = \frac{j\omega\mu_0}{k_c^2 r} H_0 J_m(k_c r) \sin(m\varphi) \sin(\beta z), \\ E_\varphi = \frac{j\omega\mu_0}{k_c} H_0 J_m'(k_c r) \cos(m\varphi) \sin(\beta z), \\ H_z = H_0 J_m(k_c r) \cos(m\varphi) \sin(\beta z), \\ H_r = \frac{\beta}{k_c} H_0 J_m'(k_c r) \cos(m\varphi) \cos(\beta z), \\ H_\varphi = -\frac{m\beta}{k_c^2 r} H_0 J_m(k_c r) \sin(m\varphi) \cos(\beta z). \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中  $k_c = q_{mn}/a$ ,  $a$  为腔体半径,  $q_{mn}$  是  $m$  阶贝塞尔函数的导数  $J_m'$  的第  $n$  个根;  $\omega_0$  为真空中的角频率;  $\mu_0$  为真空中的磁导率;  $\beta = p\pi/l$ ;  $m$  为任意正整数,表示场沿  $\varphi$  方向变化的周期数;  $n$  表示场沿径向所具有的零点个数,  $p$  表示场沿  $z$  方向所具有的最大值数,均为非零的正整数.当  $m=0$  时,  $E_r = H_\varphi = 0$ , 这时电场只有  $E_\varphi$  分量.

簇腔的每个单元两端开口,相邻单元之间接截止波导(对工作模式而言).对于 TE<sub>031</sub> 模,

$$E_\varphi \propto J_1\left(\frac{10.173}{a}r\right) \sin\left(\frac{\pi}{l}z + \theta\right), \quad (2)$$

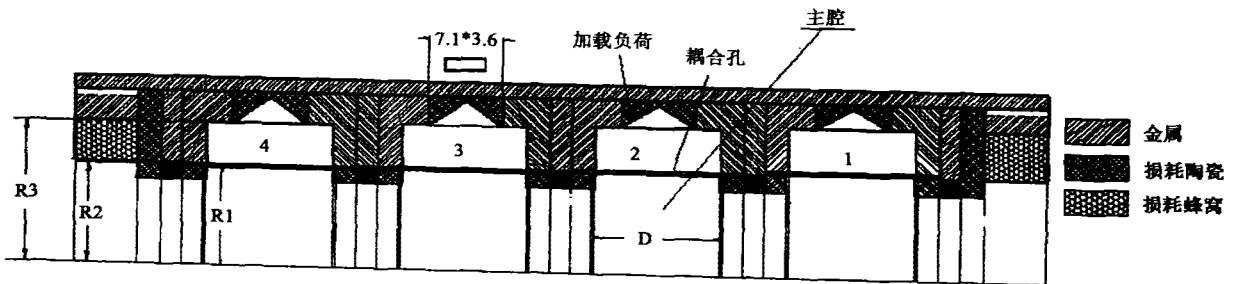


图 1 TE 模簇腔的示意图  
Fig. 1 Construction of the TE mode clustered-cavity



图2 簇腔的一个单元  
Fig.2 A subunit of clustered-cavity

式(2)中  $\theta$  为腔体两端开孔引起的附加反射相移. 当  $r \approx 0.6896a$  时,  $E_\varphi \propto J_1(7.016) = 0$ . 当圆柱形钢片放在此处时,对  $TE_{03}$  模的场结构影响很小. 同时,由于钢片上的耦合孔切断了  $\varphi$  方向的电流,使得竞争模式  $TM_{131}$ 、 $TE_{221}$  和  $TM_{610}$  均被滤掉.

我们采用三维高频结构模拟软件 HFSS 对上述簇腔进行模拟,所得到的各单元的  $TE_{03}$  模频率如表 1 所列. 由表 1 可见,簇腔的 4 个单元的谐振频率略有差异,这是展宽放大器带宽所必需的.

图 3 是利用 HFSS 模拟的簇腔中  $TE_{03}$  模的场分布图,图 4 是电场强度沿轴向的变化(横坐标  $z$  代表轴向长度,纵坐标  $|E|$  代表归一化的电场强度). 理想谐振腔的  $Q$  值很高,这对于回旋管的带宽极为不利. 为了增加带宽,同时又要保证整管能在高增益下稳定工作,就必须降低腔体的  $Q$  值. 为此,需在腔内加入损耗材料,一般要将  $Q$  值降低到 100 左右. 图 5 给出了腔内加入损耗介质时,腔体的  $Q$  值随介质损耗角正切的变化曲线. 图 6 则给出了腔体  $Q$  值与介

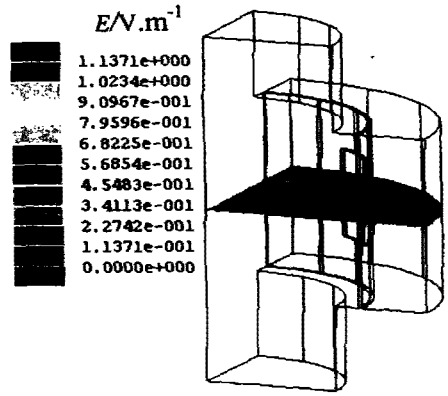


图3 1/4 簇腔的电场分布  
Fig.3 Distribution of the electric field in a quarter clustered-cavity

质厚度的关系曲线. 从图 5 和图 6 可以看出,介质的损耗角正切值和厚度对于腔体  $Q$  值的影响很大. 因此,对于由 2 种以上材料合成的损耗材料必须严格控制比例和厚度. 表 2 是腔体加入损耗介质后的冷测实验结果.

在以上讨论中,我们在内外腔之间的小钢片上均匀开了 4 个耦合孔. 为研究耦合孔数量对腔体谐振特性的影响,还模拟了在钢片上对称地开 8 个孔的情况,结果列在表 3 和图 7 中. 其中,  $f_1$  和  $Q_1$  对应开 4 个耦合孔时腔体的频率和  $Q$  值,  $f_2$  和  $Q_2$  对应开 8 个孔时腔体的频率和  $Q$  值.

从表 3 可以看出,与开 4 个耦合孔时的情况相比,开 8 个耦合孔后频率的变化很小,而  $Q$  值却变小了. 这主要是因为耦合孔个数增加以后,外腔的场强变得更加均匀,而不再集中在耦合孔附近,从而使得损耗变大,引起  $Q$  值下降. 这一点似乎与冷测实验的结果不太吻合,因为冷测结果是 8 耦合孔腔的

表 1 簇腔的尺寸和谐振频率

Table 1 Dimensions and calculated frequencies of the clustered-cavity

单元	R1 (mm)	R2 (mm)	R3 (mm)	D (mm)	频率 $f$ (GHz)
1	10.57	10.82	15.33	12	33.8
2	10.40	10.65	15.08	12	34.2
3	10.26	10.51	14.88	12	34.6
4	10.10	10.35	14.65	12	35.0

表 2 冷测结果

Table 1 Cold-test results

单元	1	2	3	4
冷测频率/GHz	33.6	34.0	34.4	34.8
$Q$ 值	88	111	137	95

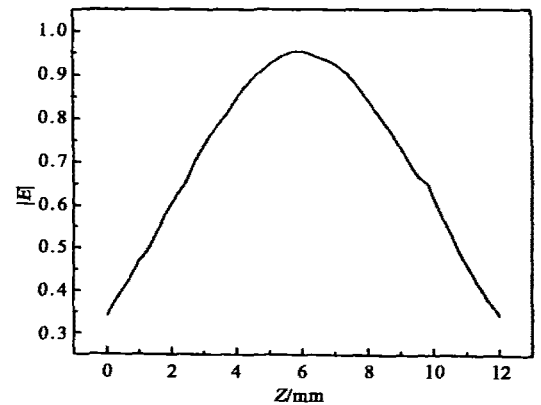


图4 腔内的驻波分布  
Fig.4 Distributing of the standing waves in the clustered-cavity

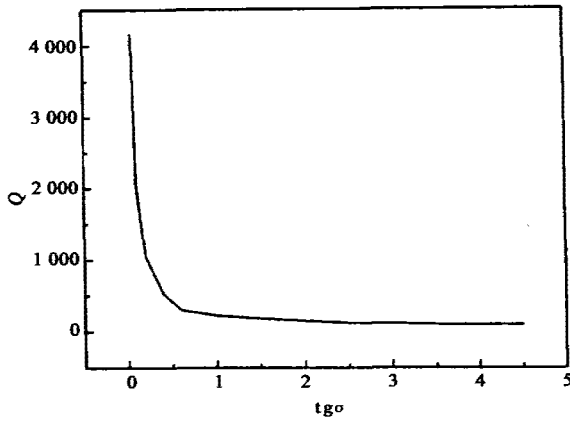


图5 腔体 Q 值与介质损耗角正切的关系  
Fig. 5 Q factor versus dielectric loss tangent

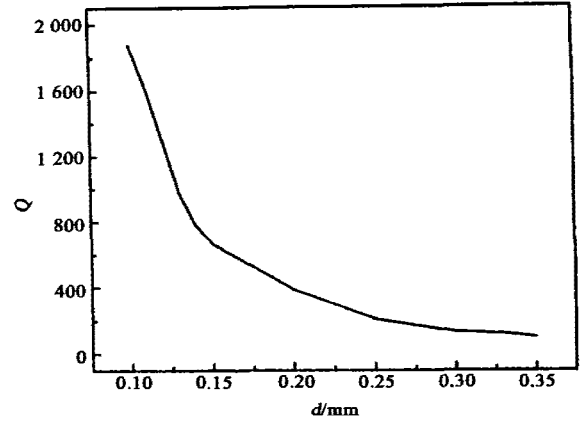


图6 腔体 Q 值与介质厚度的关系  
Fig. 6 Q factor versus loss dielectric thickness

表3 耦合孔为4个和8个时的腔体频率和 Q 值的比较  
Table 3 Comparison of the frequencies and Q factors for 4 and 8 holes, respectively

单元	频率 $f_1$ (GHz)	频率 $f_2$ (GHz)	$\Delta f/f_1$ (%)	$Q_1$	$Q_2$	$\Delta Q/Q_1$ (%)
1	33.8	33.9	0.30	102.0	77.9	23.6
2	34.2	34.3	0.29	101.2	76.8	24.1
3	34.6	34.7	0.29	99.3	76.4	23.1
4	35.0	35.1	0.29	101.1	76.5	24.3

Q 值增大. 我们认为, 这可能主要是因为 2 次冷测实验中采用的损耗介质的成分和厚度不一致, 而前面已经指出, 损耗材料的成分和厚度对于腔体 Q 值的影响很大的.

## 2 三次谐波倍增回旋速调管放大器群聚腔的设计

近年来, 谐波倍增回旋管放大器的研究工作比较活跃, 美国、日本和韩国都先后开展了这方面的研

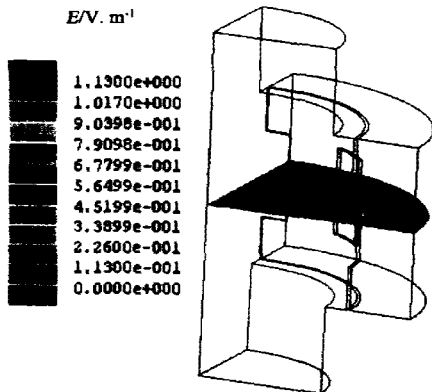


图7 开8孔以后 1/4 簇腔的电场分布  
Fig. 7 Distribution of the electric field in a quarter clustered-cavity with 8 holes

究<sup>[16-19]</sup>. 采用谐波倍增工作方式的主要优点: 一是可以工作在电子回旋频率的谐波, 从而降低磁场; 二是使得采用低频率、低功率的驱动源成为可能. 从实用、紧凑的角度出发, 我们在下一步的工作中拟采用三次谐波倍增机制. X 波段输入, 输入腔工作在基波, 工作模式为  $TE_{01}$ ; 中间腔和输出腔工作在三次谐波, 工作模式为  $TE_{03}$  模, 输出 35GHz. 中间腔采用前面所述的簇腔. 电子束由磁控注入式电子枪产生, 输入信号通过耦合器输入到腔体, 使电子束速度受到调制, 在电子束电流中存在各次谐波分量. 电子束在漂移管继续角向群聚. 簇腔的谐振频率正好与三次谐波分量的频率吻合, 从而在腔体内激励起频率为输入信号的 3 倍, 也即 Ka 波段的  $TE_{03}$  模的电磁波. 携带了输入信号的相位信息的 Ka 波段的电磁波在群聚腔中继续调制电子束, 最后通过漂移管和输出腔, 产生被放大的输出信号. 由于采用三次谐波, 工作磁场降低为基波的 1/3, 即 0.4 特斯拉左右, 使永磁包装成为可能, 整管可以做得紧凑. 图 8 是我们设计的三次谐波倍增回旋速调管放大器的结构示意图. 采用的簇腔结构如图 1 所示, 其尺寸、频率和 Q 值见表 4 所列.

表4 三次谐波倍增回旋速调管簇腔的尺寸和频率  
Table 4 Dimensions and frequencies of the clustered-cavity for the 3<sup>rd</sup> harmonic multiplying gyrokystron

单元	R1 (mm)	R2 (mm)	R3 (mm)	D (mm)	频率 $f$ (GHz)	Q 值
1	10.27	10.52	14.89	12	34.7	94.8
2	10.10	10.35	14.65	12	35.2	101.6
3	9.97	10.22	14.45	12	35.5	101.9
4	9.81	10.06	14.23	12	36.0	94.6

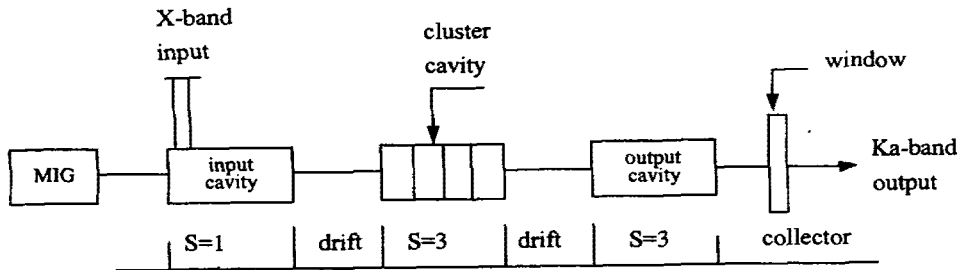


图 8 三次谐波倍增回旋速调管放大器示意图

Fig. 8 Schematic of the 3<sup>rd</sup> harmonic multiplying gyrokystron

### 3 结论

本文研究了一种新型回旋速调管放大器的链式群聚腔—TE 模簇腔,通过三维电磁模拟对其进行了分析和计算,讨论了损耗介质对群聚腔  $Q$  值的影响,以及内外腔耦合孔数量对谐振特性的影响.同时,也将模拟计算结果与冷测实验结果进行了比较.最后为正在研制中的 Ka 波段三次谐波倍增回旋速调管放大器设计了一种链式群聚腔.这些工作对于新型回旋速调管放大器的研制具有一定的参考价值.我们今后的工作将围绕着在输入、群聚和输出腔中三次谐波的注一波互作用的 PIC 粒子模拟和研究来展开.

**致谢** 作者感谢美国马里兰大学郭和忠先生的热情指导和中科院电子所微波器件与技术研究发展中心郭炜工程师在腔体冷测实验数据方面提供的帮助.

### REFERENCES

- [1] Granatstein V L, Lawson W. Gyro-amplifiers as candidate RF drivers for TeV linear colliders. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 1996, **24**(3): 648—663
- [2] Neilson J M, Ies R L, Read M. Development update of a 10MW, 91GHz Gyrokystron. *Third IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. Dig.*, USA; Monterey, California, 2002, 89—90
- [3] Liu P K, Xu S X, Liang X F. Proposals for a novel Ka-band frequency-tripling gyrokystron amplifier. *27<sup>th</sup> Int. Conf. IR&MM Waves*, USA; San Diego, 2002, W4. 5
- [4] Calame J P, Garven M, Choi J J. Experimental studies of bandwidth and power production in a three-cavity, 35GHz gyrokystron amplifier. *Phys. Plasma*, 1999, **6**: 285—297
- [5] Antokov I I, Zasytkin E V, Sokolov E V. 35GHz radar gyrokystron. In: *Proc. 18th Int. Conf. IR&MM Waves*. Washington; Bellingham, Society of Photo-Optical Engineering, 1993, 338—339
- [6] Blank M, Danly B G, Levush B. Experiment investigation of W-Band (93 GHz) gyrokystron amplifiers. *IEEE Trans. Plasma Science*, 1998, **26**(3): 409—415
- [7] Lawson W, Calame J P, Hogan B P. Performance characteristics of a high-power X-Band two-cavity gyrokystron. *IEEE Trans. Plasma Science*, 1992, **20**(3): 216—223
- [8] Ngo M T, Danly B G, Myers R. High-power millimeter-wave transmitter for the NRL WARLOC radar. *Third IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. Dig.*, USA; Monterey, California, 2002, 363—364
- [9] Tolkachev A A, Makota V A, Pavlova M P. A large-apertured radar phased array antenna of Ka band. *Proc. 28<sup>th</sup> Moscow Int. Conf. Antenna Theory and Technology*. Russia; Moscow, 1998
- [10] Symons R S. An experimental cluster-cavity. *Technical Digest, 1986 International Electron Devices Meeting*, Piscataway, NJ.; IEEE Press, 1986, 204
- [11] Symons R S, Vaughan J R M. The linear theory of the cluster-cavity<sup>TM</sup> klystron. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 1994, **22**(5): 713—718
- [12] Guo H, Miao Y Y, Rodgers J. A new triplet gyrotron amplifier, the gyrotriotron. *Third IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. Dig.*, USA; Monterey, California, 2002; 119—120
- [13] Granatstein Victor L. MURI 99 on innovative vacuum electronics DoD (AFOSR) MURI 99 MVE Review. Monterey, USA; California, 2000
- [14] Miao Y Y, Guo H, Granatstein V L. TE clustered-cavity and extended interaction cavity wideband gyro-amplifiers. *Record of Pulsed Power Plasma Science.*, IEEE Conference, USA; Las Vegas Nevada, 2001; 514
- [15] ZHANG Ke-Qian. *Microwave and Opticwaveguide Technology*. Beijing: Defense and Industrial press(张克潜.微波与光波导技术.北京:国防工业出版社), 1994; 260
- [16] Saraph G P, Lawson W, Castel M. 100-150MW designs of two-and three-cavity gyrokystron amplifiers operating at the fundamental and second harmonics in X-band and Ku-bands. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 1996, **24**(3): 671—677
- [17] Yovchev I G, Lawson W G, Nusinovich G S. Present status of 17. 1GHz four-cavity frequency-doubling coaxial gyrokystron design. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2000, **28**(3): 523—528
- [18] Walter M T, Nusinovich G S, Granatstein V L. Design of a frequency-doubling, 35GHz, 1MW gyrokystron. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2000, **28**(3): 688—693
- [19] Baik C W, Kim D H. Experimental study on Ka-band harmonic-multiplying two-stage tapered gyro-twt. *Third IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. Dig.*, USA; Monterey, California, 2002, 365—366