

耦合腔行波管电参量对降压收集极特性的影响

张英辉^{*①②} 罗积润^① 郭 炜^① 朱 敏^①

^①(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)

^②(中国科学院研究生院 北京 100049)

摘 要: 该文基于 Orprogr 软件, 在 X 波段模拟设计出耦合腔行波管的期待电性能, 并利用相互作用后的电子注为入口条件, 优化设计出收集效率大于 71.5%、电子注着陆相对均匀的三级降压收集极。在上述条件下, 讨论了电子进入收集极层流性(速度比)、电极形状、电极电压以及收集极内电场分布对电子运动的影响, 从物理上给出了电子注在收集极表面着陆特点的详细分析。

关键词: 耦合腔行波管; 模拟设计; 降压收集极

中图分类号: TN124

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)01-0146-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00182

Influence of the Electrical Parameters on Multistage Depressed Collector Characteristics in a Coupled Cavity TWT

Zhang Ying-hui^{*①②} Luo Ji-run^① Guo Wei^① Zhu Min^①

^①(Key Laboratory of High Power Microwave Sources and Technologies, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In this article, based on a coupled cavity TWT design software, Orprogr code, the simulation design of a X band coupled cavity TWT is performed for realizing the expected electric characteristics. Under the condition of the above-mentioned design results, a depressed collector is designed with the minimum collector efficiency of 71.5% and the electron beam may relatively evenly spreads on the surface of each sub-area of the depressed collector. Then the influence of laminar flow, electrode shape, voltage drop and electrical field on the distribution of the beam is discussed by analyzing the spreading of electron beam on the surface of each sub-area of the depressed collector.

Key words: Coupled cavity TWT; Simulation design; Depressed collector

1 引言

行波管是一种宽频带、大功率、高增益的真空微波器件, 广泛应用于雷达、通信、电子对抗等领域。由于电子注与行波作用, 相互作用效率比较低, 提高射频输出总效率是行波管研究的一个关键技术^[1]。通常提高行波管总效率的方法有以下两种: 一是改进相互作用系统, 尽可能提高电子效率, 该方法受慢波结构和相互作用机理限制; 二是电子能量回收, 包括电子的循环利用和降压收集技术。通常电子注的循环利用仅在少数大型装置上采用, 而降压收集极则是普遍采用的方法^[2]。

目前, 美国、日本、英国、法国、俄罗斯以及我国都已经做成了三到五级的降压收集极, 并将其应用于行波管的研究中, 收集极效率高达70%以上,

大大提高了整管的效率^[3,4]。不过, 对于降压收集极来说, 由于电极电位降低引起的电子返流和大功率条件下的散热问题是行波管收集极研究面临的主要技术难题^[5-7]。

本文基于 Orprogr 软件, 在 X 波段模拟设计出耦合腔行波管的期待电性能, 并利用相互作用后的电子注为入口条件, 模拟设计出能量截获密度尽可能均匀的三级降压收集极, 讨论耦合腔行波管电参量对收集极特性的影响, 对减少电子返流和收集极均匀散热设计提供物理分析。

2 入口条件的获取

对于收集极的模拟设计, 首先要获取合理的入口条件。收集极入口电子注初始条件的获取方法有: 计算法、估算法、测算法、综合法等^[8]。本文采用计算法, 用 Orprogr 软件模拟电子枪和注波相互作用得出收集极的静态和动态入口条件。

电子枪采用无栅枪, 模拟仿真时取 48 个宏电子, 且电子在阴极表面由阴极中心向外依次均匀分布。输出电流强度 $I = 14.34 \text{ A}$, 阴极电压为 0 V , 阳极电压 $U = 48000 \text{ V}$, 导流系数 $p = 1.36 \mu\text{P}$ (导流系数单位), 电子注半径 $b = 1.44 \text{ mm}$, 漂移管半径 $r = 2.3 \text{ mm}$, 电子注半径与漂移管半径之比 $b/r = 1.44/2.3 \approx 0.63$ 。

注-波相互作用计算时, 采用匀强磁场聚焦, 在频段 $8.108 \sim 9.836 \text{ GHz}$ 内, 获得耦合腔行波管增益不小于 39 dB (带内增益差别小于 8 dB)、输出功率大于 127 kW 、电子效率大于 18.5% , 1 dB 带宽约 19.2% 。

在上述条件下, 收集极入口处静态和动态频率为 8.33 GHz 的电子分布如图 1 所示。静态时, 虽然电子注受聚焦磁场约束和电子注自身的相互作用, 电子径向位置仍由中心向边缘依次均匀分布, 具有较好的层流性。动态时, 电子注与波相互作用后, 内外层电子的径向坐标发生波动, 且外层电子的波动程度更大。此时收集极入口处电子注的径向速度与纵向速度的比值曲线如图 2 所示, 由图 2 可知, 电子注的径向速度与纵向速度的比值是无序的, 但从图中结果的总体趋势看, 外部电子径向速度与纵向速度的比值要大于内部电子径向速度与纵向速度的比值, 这是因为外层电子与波的相互作用强度大于内层电子, 导致外层电子的运动方向更多地偏离轴线方向, 电子运动轨迹紊乱。

3 收集极模拟设计

在以上入口条件下, 综合考虑收集极效率、电子回流、二次电子发射以及收集极的热散耗, 计算分析电子注在收集极内的运动轨迹, 经一系列优化后, 模拟设计了如图 3 所示的三级降压收集极。该收集极末级中心有圆锥状电极, 其作用是在收集极内部产生合适的电场以抑制电子的返流^[9]。由于二次电子的发射系数随着入射角度的增加而增加^[10], 故在优化设计收集极电极形状时, 尽可能保证电子以较小的入射角度着陆到收集极电极表面; 另一方面,

由于耦合腔行波管的输出功率较大, 热散耗是一个关键问题, 在优化设计收集极电极形状时, 尽可能保证在工作频段内, 电子在收集极内着陆相对均匀, 具备较好的热散耗能力。本文综合考虑上述因素, 以诺埃电极设置比例^[11]为基础优化设计各级电压。当收集极的收集效率在工作频段内达到 71.5% 以上, 且电子以较小的入射角度相对均匀着陆在收集极表面时, 各级电压设置为: 第 1 级电压 29000 V , 第 2 级电压 16000 V , 第 3 级电压 0 V , 对应于 3 个收集区 I, II, III (见图 3)。表 1 给出了在工作频率范围内 CCTWT 输出特性和降压收集极优化设计结果。从表 1 的数据可知, 在工作频段内, 收集效率可达 71.5% 以上, 在线路效率取 80% 条件下, 耦合腔行波管的总效率在 36.4% 以上。

4 电参量对收集极特性的影响

图 4-图 6 (为仿真图形, 纵坐标中 0 表示轴线位置, 其它值代表距轴线的距离) 分别给出了静态、动态 8.33 GHz 和动态 9.09 GHz (电子效率最大频率点) 降压收集极内电子的运动轨迹分布。从图中可以看出, 静态和动态电子轨迹分布有本质的区别。静态电子注相对均匀地分布在收集极第 III 区表面上, 动态电子注主要发散在收集极的第 I 和第 II 区, 电子效率越高, 落在第 III 区的电子越少。为了了解降压收集极在提高行波管总效率的基础上如何改变电子注的发散状态, 以下详细讨论电子注在收集极内的运动轨迹分布受电子注层流性、收集极的形状、电极电压以及收集极内电场分布的影响。

4.1 电子注层流性的影响

电子注的层流性一般用角度偏差 $\sigma(\alpha)$ 来衡量^[12]。 $\sigma(\alpha)$ 定义为

$$\sigma(\alpha) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(\alpha_k - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \alpha_k \right)^2}$$

式中 $\alpha_k = \tan^{-1}(v_r/v_z)_k$, $(v_r/v_z)_k$ 为第 k 个电子径向速度与纵向速度之比。

基于表 1 的结果, 图 7 给出了不同频率下角度偏差 $\sigma(\alpha)$ 随电子效率的变化曲线, 曲线表明耦合腔

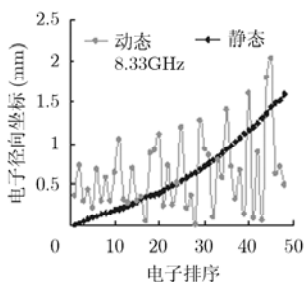


图 1 电子径向分布

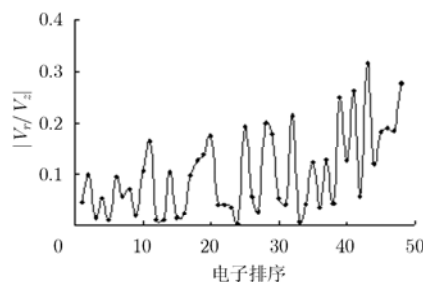


图 2 8.33 GHz 电子径向速度与纵向速度比值

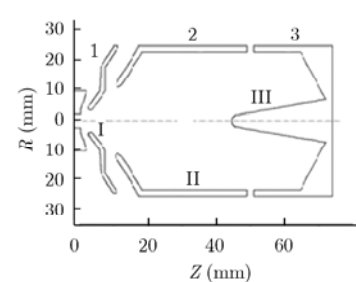


图 3 三级降压收集极模型

表 1 带有三级降压收集极的 CCTWT 在不同频率点的模拟计算结果

频率(GHz)	电子效率(%)	总效率	输出功率(W)	电源提供的功率(W)	收集极截获的功率(W)	收集效率(%)
8.108	18.560	0.364	127657	468853.5	128052.4	72.68
8.333	19.219	0.370	132417	467117.9	129181.1	72.34
8.571	19.974	0.390	138240	464619.9	121639.8	73.81
8.824	20.844	0.399	142828	460748.2	121623.9	73.60
9.091	21.057	0.409	144317	452483.6	115646.8	74.44
9.231	21.034	0.407	143550	454974.4	116967.5	74.29
9.667	19.581	0.369	133679	463684.4	132055.7	71.52
9.836	22.201	0.401	152830	446646.3	126754.4	71.62

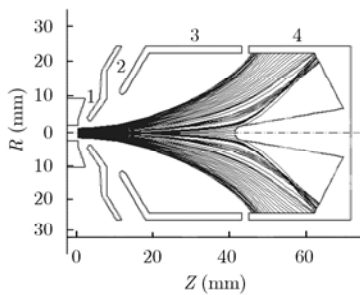


图 4 静态时收集极内电子轨迹分布

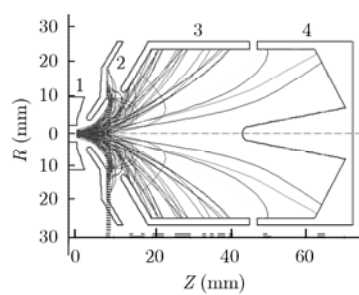


图 5 频率 8.33 GHz 电子运动轨迹

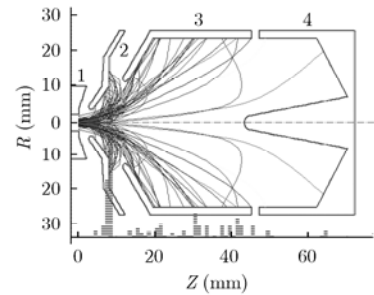


图 6 频率 9.09 GHz 电子运动轨迹

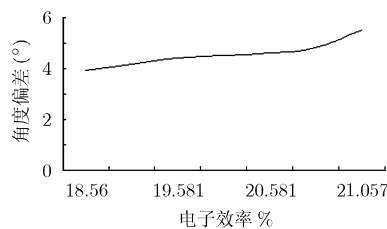


图 7 角度偏差随电子效率变化曲线

行波管电参量变化使电子效率减小时, 电子注角度偏差 $\sigma(\alpha)$ 减小, 在收集极表面着陆点分布相对集中(图 5), 散热困难增加; 电子效率增加时, 电子注角度偏差 $\sigma(\alpha)$ 增加, 层流性变差, 在收集极内运动轨迹交叉穿越紊乱, 着陆点分布相对分散(图 6)。静态时, 电子效率可视为 0, 电子注的层流性好, 故图 4 中电子注相对均匀地着陆在收集极末级, 而图 5, 图 6 中电子注在收集极内的运动轨迹显得更为紊乱。

4.2 电极形状和电极电压的影响

收集极的形状不同, 将影响收集极内的电势分布, 从而电子注在收集极内分布状态(运动轨迹、着陆角度、分布均匀性)不同。电极电压的设置与该电极收集的电子数目的多少密切相关。对于某一个电子, 设进入高频系统时的能量为 eU_0 电子伏特, 离开高频系统时的能量为 eU_s 电子伏特, 则在慢波系统中减少的能量 ΔE 为

$$\Delta E = e\Delta U = e(U_0 - U_s) \quad (1)$$

本文称 $e\Delta U$ 为电子的能量减量。设收集极第 n 级电压为 U_n , 若第 n 级能收集该电子, 它从离开高频系统到被收集极收集的过程中, 必须满足以下能量守恒关系:

$$eU_s = e(U_0 - U_n) + W \quad (2)$$

W 为电子着陆到收集极时损失的能量, 且 $W \geq 0$ 。也就是说只有满足 $eU_s \geq e(U_0 - U_n)$ 的电子才有可能在该电极上着陆, 于是结合式(1)有

$$U_n \geq \Delta U \quad (3)$$

令 $\Delta U = U'_n$, 式(3)可化为

$$U_n \geq U'_n \quad (4)$$

也就是说, 能量减量等于 eU'_n 的电子仅能被电位高于或等于 U'_n 的第 n 级电极收集, 当第 n 级电极电位大于 U'_n 时, 电位越大, 电子着陆点越靠后。当第 n 级电极电位等于 U'_n 时, 电子将在收集极上软着陆, 此时收集极上产生的热量为零, 收集效率最大, 为 100%。当第 n 级电极电位小于 U'_n 时, 电子将在与其能量减量相等的等位面返流, 不能到达该电极。对于本文所设计的降压收集极, 第一级电压 $U_1 = 29000$ V, 第二级电压 $U_2 = 16000$ V, 第三级电压 $U_3 = 0$ V, 理论上能量减量 16000 eV $< eU'_1 \leq 29000$ eV 的电子将会被第一级收集, 能量减量 0 eV $< eU'_2 \leq 16000$ eV 的电子将被第二级收集, 在

相互作用过程中，无能量释放和获得能量的电子即 $eU'_3 \leq 0$ eV 将会被第三级收集。从上述分析可知，如果存在电子能量减量大于 29000 eV，电子将在第一级电压的作用下返流向慢波电路区，可能引起电路的不稳定性。

4.3 收集极内电场的影响

收集极内电场的分布与收集极的形状、电极电压、进入其中的电子注有关。由于电力线与等位线垂直，故电场方向可由等位线的垂线方向确定。在收集极形状及各级电压一定时，无电子注时收集极内等位线分布如图 8 所示，当电子注进入收集极后，静态时收集极内等位线如图 9 所示。由于收集极内等位线关于轴线对称，为了更加直观地比较等位线的变化，将频率为 8.33 GHz 和 9.09 GHz 的等位线在图 10 中给出，图 10 中上半部分为 8.33 GHz 等位线分布，下半部分为 9.09 GHz 等位线分布。图 8-图 10 中相邻两条等位线的电位差约为 4800 V，且电位从收集极入口到末端依次降低。

由图 8-图 10 (为仿真图形，纵坐标中 0 表示轴线位置，其它值代表距轴线的距离) 可知，由于电子注的存在，收集极内部电位下降，等位线前移(即向收集极入口方向移动)。在第 I 收集区前部，由于降压作用，电子更多集中于前部，动态收集极内部电位较低，等位线前移量较大；在第 I 收集区后部和第 II 收集区内，静态收集极内部电位较低，等位线前移距离较大。动态时，在第 I 收集区和第 II 收集区末端，不同频率收集极内部电位差别不大，等位线前移量差别不明显；在第 II 收集区(最末端除外)，当频率改变使电子效率减小时，等位线前移量增大。等位线前移将导致电力线与收集极中心轴的夹角 θ 减小(图 9)，电场轴向分量增加，径向分量减小，亦即电子受到的纵向减速作用增加，径向偏转作用减小。

由于轴向电场强度可由 $E_z = -dU/dz$ 表示，故电场的大小可由收集极内电位线斜率的大小表示。由软件计算收集极前两分区(I、II)轴线电位如图 11 所示(计算表明，距轴线 1 mm、2 mm 处电位曲

线与轴线处差别不大)。图 11 表明，无论在何种条件下，在第 I 收集区和第 II 收集区前部，曲线斜率随距收集极入口的距离的增加而减小，故电场强度随距收集极入口的距离的增加而减小；在第 II 收集区内曲线出现拐点，动态时拐点位置更靠近收集极入口。在第 II 收集区后部，曲线斜率随距收集极入口的距离的增加而增加，电场强度又开始随距收集极入口的距离的增加而增加。在第 I 收集区前部，静态电位曲线斜率与动态的相差不大，即电场强度相差不大；而在第 I 收集区后部和第 II 区前部，静态曲线斜率较大，电场强度较大；在第 II 区后部(最末端除外)，静态曲线斜率较小，电场强度较小。动态时，第 I 收集区前部和后部，不同频率曲线斜率相差不大，电场大小差别不大；在第 I 收集区中部，电子效率越大，斜率越大，电场强度越大。在第 II 收集区内，不同频率曲线的斜率变化不十分明显，但是由于拐点在第 II 收集区，拐点附近电场强度非常小，等位线分布稀疏。

电子在收集极内的运动轨迹由电子初速度和受到的电场力决定。电子初速 V 可正交分解为平行于收集极轴线的速度分量 V_{\parallel} 和垂直于轴线的速度分量 V_{\perp} ，电子在收集极内受到的电场力 $F = q \cdot E = q \cdot (E_0 + E_e)$ (E_0 为电极产生的电场， E_e 为电子本身产生的电场)可正交分解 $F_{\parallel} = F \cdot \cos\theta$ 和 $F_{\perp} = F \cdot \sin\theta$ 。 F_{\parallel} 使电子注在收集极内轴向运动减速， F_{\perp} 将会使电子偏离轴线；两者共同作用决定电子在收集极表面的着陆。

由前文对入口条件的分析可知，静态时，电子注能量大层流性好， V_{\parallel} 很大， V_{\perp} 小。由于收集极区磁场降为零，电子注在 F_{\parallel} 、 F_{\perp} 作用下减速发散。在收集极前两分区内电子注均匀发散，运动轨迹无交叉。在第 3 级锥状电极球面与锥面衔接处附近，电场强度较大，使内层电子受到的电场力 F_{\perp} 令电子发生更大的偏转，故在末级分区内电子注中心处有少量电子运动轨迹与外层电子注轨迹交叉。

动态时，同一频率下，释放能量多的电子 V_{\parallel} 较小，在 F_{\perp} 、 F_{\parallel} 作用下可能为第一级收集， V_{\parallel} 相对小

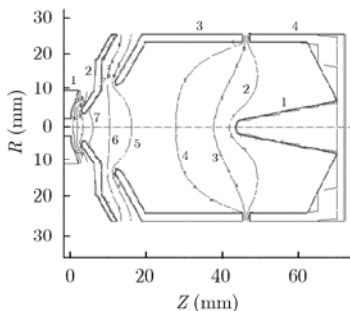


图 8 无电子时收集极内等位线分布

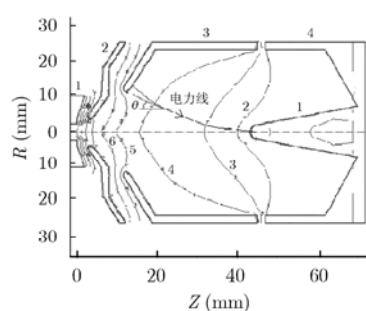


图 9 静态时收集极内等位线分布

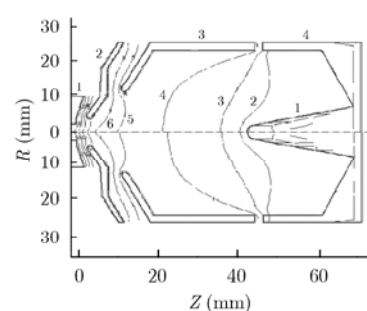


图 10 动态时收集极内等位线分布

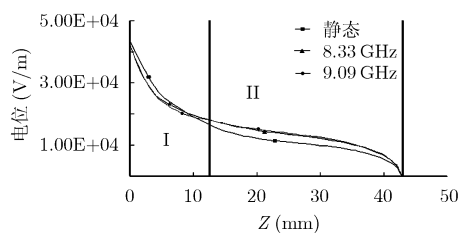


图 11 收集极前两分区轴线电位

且 V_{\perp} 相对大的电子更容易偏转被收集在该电极的前部, V_{\parallel} 相对大且 V_{\perp} 相对小的电子则收集在该电极的后部。释放能量相对少的电子 V_{\parallel} 较大, 这些电子能够进入第 II 收集区。虽然该区域电场强度较小, 电子在第 I 收集区受到的偏转作用使这些电子能够为第 2 级收集, 电子在该电极上的分布类似于第 1 级收集的分析。那些没有释放甚至从波中吸收能量的电子纵向速度大、径向速度小, 能够为第 3 级收集。频率不同时, 电子效率大, 电子注的 $\sigma(\alpha)$ 大, 不同电子径向速度离散差别大, 可能导致电子降落在电极上的位置相对分散; 电子效率小, 电子注的 $\sigma(\alpha)$ 小, 不同电子径向速度离散差别小, 可能导致电子降落在电极上的位置相对集中。在第 II 收集区内电场强度相对弱, 电子发散过程更多可能还是由第一收集区出来的状态决定, 因此电子被第二级收集情况可能类似于第 1 级。

5 结束语

本文基于 Orprogr 软件, 以注-波相互作用后的电子注作为入口条件, 模拟设计出了电子注在收集极表面分布相对均匀、收集极效率大于 71.5% 的三级降压收集极。通过分析电子进入收集极的角度偏差 $\sigma(\alpha)$ 、电极形状、电极电压以及收集极内电场分布对电子运动的影响, 发现电子注进入收集极会使等位线前移, 从而电子受到的纵向减速力增加, 径向偏转力减小。电子效率增大, 等位线前移减小, 电子注的 $\sigma(\alpha)$ 增大, 不同电子径向速度离散差别大, 可能导致电子降落在电极表面上的位置相对分散, 反之, 电子注分布会在收集极表面相对集中。

参考文献

- [1] Keishi Sakamoto, Atsushi Kasugai, and Koji Takahashi, *et al.*. Achievement of robust high-efficiency 1 MW oscillation in the hard-self-excitation region by a 170 GHz continuous-wave gyrotron[J]. *Nature Physics*, 2007, 3(6): 411-414.
- [2] Sun Hai-yan, C Jiao hong-qing, and Luo Ji-run. Influence of Reflections of the Output Port on Beam-wave Interaction in Gyrotron Traveling Wave Amplifier[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2008, 29(18): 657-662.

- [3] Ding M Q, Huang M G, Feng J J, Bai GD, and Yan T C. Ion surface modification for space TWT multistage depressed collectors[J]. *Applied Surface Science*, 2008, 255(5): 2196-2199.
- [4] Liu Ben-tian, Jiao Chong-qing, and Zhang Yan-sheng, *et al.*. Experimental study of a Ku-band gyrotron backward-wave oscillator with a single stage depressed collector[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2007, 35(4): 1065-1069.
- [5] 李延威, 李建清. 空间行波管收集极的热特性分析[J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(3): 399-402.
Li Yan-wei and Li Jian-qing. Thermal performance analysis of space traveling wave tube collector[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(3): 399-402.
- [6] 韩勇, 刘燕文, 丁耀根, 等. 螺旋线行波管慢波系统的综合热分析法[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(12): 3015-3018.
Han Yong, Liu Yan-wen, and Ding Yao-gen, *et al.*. Synthetic analysis method of the heat dissipation capability of slow-wave structure for helix TWT[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(12): 3015-3018.
- [7] Granastein V L, Parker R K, and Armstrong C M. Vacuum electronics at the dawn of the twenty-first century[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1999, 87(5): 702-716.
- [8] Sharma S M, S Arya, and Kumawat NL, *et al.*. Carbon coated electrodes for multistage depressed collector of high efficiency helix TWTs[C]. *Proceedings of International Conference on Microwave-08*, Beijing, 2008: 865-867.
- [9] 郭开周. 行波管研制技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 87.
Guo Kai-zhou. *Traveling Wave Tube Design*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007: 87.
- [10] Huang Tao, Zhong Quan-hu, and Yang Hai, *et al.*. Electron optics simulator: a three-dimensional finite-element electron gun and collector design tool[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2009, 56(1): 140-148.
- [11] 刘盛纲. 微波电子学导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985: 285.
Liu Sheng-gang. *Introduction to Microwave Electronics*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1985: 285.
- [12] Antonsen T M. Advances in modeling of vacuum electronic devices[C]. *9th IEEE International Vacuum Electronics Conference Monterey, CA, APR 22-24, 2008*: 1-2.

张英辉: 男, 1983 年生, 硕士生, 从事高功率毫米波技术与应用的研究。

罗积润: 男, 1957 年生, 研究员, 博士生导师, 从事高功率微波毫米波产生与应用的研究。

郭 炜: 男, 1977 年生, 高级工程师, 从事高功率毫米波技术与应用的研究。

朱 敏: 女, 1976 年生, 副研究员, 从事高功率毫米波技术与应用的研究。