【光电工程 / Optoelectronic Engineering】

太赫兹行波管非对称降压收集极设计

欧 粤^{1,2}, 刘文鑫^{1,2}, 赵征远¹, 杨龙龙¹, 王伟龙¹, 张兆传¹

1) 中国科学院空天信息创新研究院高功率微波源与技术重点实验室, 北京 100049;

2) 中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049

摘 要: 多级降压收集极是太赫兹行波管中回收废电子注的重要部件, 对整管工作效率有重要影响. 为提升整管工作效率, 提出一种非轴对称结构的太赫兹频段行波管降压收集极的设计方案. 通过研究注波相互作用后的废电子注能量特性, 设计了轴对称太赫兹频段行波管降压收集极结构, 再采用非轴对称结构进行优化. 三维粒子模拟计算结果显示, 在考虑二次电子发射的情况下, 采用三级轴对称降压收集极的太赫兹行波管, 最佳回收效率为 79.30%, 粒子回流率为 3.12%, 整管工作效率为 4.47%; 而当采用三级非轴对称结构降压收集极时, 太赫兹行波管的回收效率升至 89.50%, 粒子回流率降至 0.53%, 整管工作效率为 8.38%. 采用非对称结构设计的降压收集极可有效提高太赫兹行波管的整管工作效率.

关键词: 电子技术; 真空电子学; 行波管; 电子能量; 非对称降压收集极; 回收效率; 回流率; 多级降压收集极

中图分类号: TN12

文献标志码: A

doi: 10.3724/SP.J.1249.2021.03245

Design of an asymmetric multi-stage depressed collector for terahertz traveling wave tubes

OU Yue^{1,2}, LIU Wenxin^{1,2}, ZHAO Zhengyuan¹, YANG Longlong¹
WANG Weilong¹, and ZHANG Zhaochuan¹

1) Key Laboratory of High-Power Microwave Sources and Technologies, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China

2) School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy Sciences, Beijing 100049, P. R. China

Abstract: The multi-stage depressed collector (MDC) plays an important role in the terahertz traveling wave tube (TWT) for recovering spent electron beam, which has significant impact on its working total efficiency. For the purpose of improving the efficiency of the whole tube, the design scheme method of a depressed collector with non-axisymmetric structure in terahertz TWT is proposed. The axisymmetric depressed collector for terahertz TWT is designed by analyzing the energy characteristics of spent electron beam after beam-wave interaction, and then on-axisymmetric structure is used for optimization. The results of three-dimensional particle simulation (PIC) show that for the TWT with the three-stage axisymmetric MDC, the optimal recovery efficiency is 79.30%, electron reflux

Received: 2020-12-24; **Accepted:** 2021-03-01

Foundation: National Key R & D Program of China (2017YFA0701003); National Natural Science Foundation of China (11675181, U1832193)

Corresponding author: Research fellow LIU Wenxin. E-mail: lwenxin@mail.ie.ac.cn

Citation: OU Yue, LIU Wenxin, ZHAO Zhengyuan, et al. Design of an asymmetric multi-stage depressed collector for terahertz traveling wave tubes [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2021, 38(3): 245-251. (in Chinese)

<http://journal.szu.edu.cn>

rate is 3.12%, and the working efficiency is 4.47% when considering the secondary electron emission. For the TWT with the three-stage non-axisymmetric MDC, the recovery efficiency increases to 89.50%, the particle reflux rate decreases to 0.53%, and the whole tube working efficiency reaches 8.38%. The working efficiency of the whole tube can be increased effectively by taking the asymmetric structure.

Key words: electronic technology; vacuum electronics; travelling wave tubes; electron energy; asymmetric depressed collector; recovery efficiency; reflux rate; multistage depressed collector

太赫兹 (terahertz, THz, $1 \text{ THz} = 1 \times 10^{12} \text{ Hz}$) 波指频率在 $0.3 \sim 10.0 \text{ THz}$ 的电磁波, 其波谱介于毫米波和红外光之间^[1-3], 在高数据率通信、高分辨率成像、医学诊断和材料研究等领域的研究工作中有重要意义. 太赫兹技术发展的基础是研制高功率、低成本且在室温下稳定的辐射源, 其中基于真空电子学的太赫兹源器件, 如行波管, 因在太赫兹频段具有宽频带和大功率的特点, 被广泛使用^[4-7].

多级降压收集极是行波管中回收废电子注的重要部件, 慢波结构相互作用结束后的电子注仍具有很高的能量, 因此, 为提升整管工作效率, 需对降压收集极进行细致全面的设计. 祝方芳^[8]通过研究注波相互作用结束后的废电子能量特性, 有效缩小了降压收集极每级电压设置范围, 加快了设计流程; 刘宇荣等^[9]通过详尽分析行波管输出端电子轨迹, 合理优化了两级降压收集极结构; 为直观地说明降压收集极热特性, XU 等^[10]采用有限元方法获取了温度分布, 并比较了不同参数对其热分布的影响. 现有的大部分研究都是基于轴对称结构下的收集级模型, 并未对结构本身提出新的思路, 因此性能提升有限. 本研究通过对轴对称收集级结构进行分析研究, 提出一种新型非轴对称降压收集级结构. 仿真结果显示, 该结构能有效提升收集极的回收效率, 同时降低粒子回流率.

1 废电子注能量特性分析

在设计降压收集极前, 先研究太赫兹行波管慢波结构输出端的废电子注特性及能量分布. 首先, 在慢波结构输出端放置监测面, 当整管进入稳定工作状态后, 废电子注的电流将会随时间呈周期性变化, 该周期与射频周期一致, 因此, 可用一个射频周期的电子数据代表废电子注的信息. 选取输出功率稳定后的一个时间点作为起始点, 提取出一个射频周期的电子数据. 三维全波电磁场仿真软件 CST (computer simulation technology) 计算的文件中包含了监测面上每一时刻下不同的粒子状态, 文件类型为分区信息表 (partition information table, PIT) 文件. 表 1 给出了部分废电子的信息. 其中, x 、 y 和 z 分别为电子在对应轴上的坐标; $P_i (i = x, y, z)$ 为电子在 i 方向上的归一化分量, 表达式为

$$P_i = \frac{\gamma m_e v_i}{m_e c} = \frac{\gamma v_i}{c} = \gamma \beta_i \quad (1)$$

其中, 电子质量 $m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$; $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$; v_i 为 i 方向上的速度; c 为真空中的光速;

$$\beta_i = v_i/c; \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta_i^2}}.$$

表 1 PIT 文件中部分废电子信息
Table 1 Information of part of spent electrons in PIT

$x/\mu\text{m}$	$y/\mu\text{m}$	z/mm	$10^4 \times P_x$	$10^4 \times P_y$	P_z	$10^{-18} \times \text{宏粒子}^{1)} \text{ 电荷量/C}$	仿真时间/ns
33.6	-20.1	57.7	2.75	1.66	0.292	-7.61	1.20
34.1	-19.7	57.7	2.82	2.13	0.292	-7.61	1.20
-33.9	19.2	57.7	-2.28	-1.27	0.292	-7.92	1.20
34.5	-19.3	57.7	2.89	2.59	0.292	-7.61	1.20
-34.3	18.8	57.7	-2.34	-1.68	0.292	-7.92	1.20
34.9	-19.0	57.7	2.98	3.05	0.292	-7.61	1.20

¹⁾ 宏粒子是 CST 模拟计算时提出的等效概念, 可视作多个电子的集合, 其荷质比与电子相同.

通过对文件中的粒子信息进行处理, 得到粒子的径向分布, 如图 1 (a). 根据式(1)得到粒子径向距离 r 与粒子径向速度 v_r 的关系 ($v_r = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$), 如图 1 (b).

图 1 径向粒子特性

Fig. 1 Radial particle properties

由图 1 可见, 大部分粒子径向分布在 $-0.04 \sim 0.04$ mm, 随着粒子径向距离增大, 部分粒子的径向速度随之增大. 粒子能量分布需要重点关注, 运动电子携带的能量 E (单位: eV) 与归一化动量 P 的换算公式^[11-13]为

$$E = (\sqrt{P^2 + 1} - 1)m_e \frac{c^2}{e} = (\sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 + 1} - 1)m_e \frac{c^2}{e} \quad (2)$$

采用式(2)计算出一个射频周期内携带不同能量的粒子数目, 并绘制出粒子分布的直方图如图 2. 从图 2 可见, 输出端绝大部分电子所携带的能量小于输入端电子能量 23.8 keV, 这是因为慢波结构中的注波相互作用让大部分电子把自身能量交给了需要放大的高频信号, 能量减少, 但仍有少部分吸收场

图 2 一个射频周期内不同能量粒子分布直方图

Fig. 2 Histogram of particle energy distribution in one radio frequency

能量, 令自身加速.

由图 2 可知, 降压收集极的第一级与管体之间的压差绝对值要不大于 21.25 kV, 否则部分粒子会因压差过大直接回流. 结合工程经验, 若将管体电位视为 0, 则后两级的电压设置范围应在 $-23.8 \sim -21.5$ kV 范围内, 以确保绝大部分粒子能被降压收集极回收.

2 轴对称降压收集极的设计

多级降压收集极通常采用对称结构, 在粒子模拟计算 (particle-in-cell, PIC) 中, 收集极内壁设为理想导体, 阴极电位设为负高压, 管体置零, 电压相对于管体进行测量. 在 CST 软件中, 轴对称降压收集极结构如图 3. 图中各电极不同的颜色代表各级施加上的电压. 降压收集极的设计优化, 重点关注电子回流率和回收效率两个指标.

电子回流率定义为回流电子数目与进入收集极的电子总数之比, 在进行仿真计算时, 需要在降压收集极入口处设置粒子监测面, 监测 1 个射频周期

图 3 轴对称降压收集极结构图

Fig. 3 Structure diagram of symmetrical collector

内通过监测面上的电子总数 N_{mo} . 进入收集极的电子总数 N_{sum} 可由 CST 软件中的一维模拟结果中获取. 因此, 电子回流率为

$$\eta_{back} = \frac{N_{mo} - N_{sum}}{N_{sum}} \times 100\% \quad (3)$$

当回流至互作用区的电子总数减少, N_{mo} 也会减少, 此时, 若进入收集极的电子数量在一个射频周期内保持恒定, 则回流率会降低.

此外, 在设计收集极时需要考虑二次电子发射, 当具有一定能量的电子撞击金属表面时会激发二次电子. 降压收集极的制作材料为无氧铜, 其二次电子发射系数的最大值 $\delta_{max} \approx 1.3$, 激发的部分二次电子可能会重新进入互作用区, 扰乱前级注波互作用. 因此, 为减少二次电子发射带来的不良影响, 在仿真模拟时需合理考虑各电极几何形状.

优化过程中的另一个重要指标回收效率 η_c , 定义为降压收集极回收的总功率 P_r 与相互作用后的电子注功率 P_{sp} 之比, 即

$$\eta_c = \frac{P_r}{P_{sp}} = \frac{P_r}{P_r + P_h} \quad (4)$$

其中, P_{sp} 遵循能量守恒定律, 其自身能量转化为两部分, 一部分被降压收集极回收, 即 P_r , 另一部分因粒子击打降压收集极内壁产热, 转化为耗散的热功率 P_h .

相互作用后的 P_{sp} 可由输入电子注功率 P_{ea} 进行表征, 即

$$P_{sp} = P_{ea} (1 - \eta_s) \quad (5)$$

其中, η_s 为慢波结构电子效率; P_{ea} 由输入电压及输入电流确定. 本研究设输入电子注电压为 23.8 kV, 工作电流为 25 mA, η_s 近似取 3%^[13]. 因此, 理论计算得到 $P_{sp} \approx 580$ W.

整管效率为

$$\eta_{all} = \frac{P_{out}}{P_{ea} - P_r} \quad (6)$$

其中, P_{out} 为信号输出功率, 本研究设 $P_{out} = 6$ W. η_{all} 需不小于 6%.

收集极回收的功率与收集极电位相关, 通过提供给收集极多个低于互作用区的电位, 使得电子进入收集极后在电场力的作用下减速, 降低了轰击到收集极上的电子速度, 令产生的热损耗减小, 提高了回收效率, 同时减小了整管的散热压力. 采用三

级降压收集极回收的总功率为

$$P_r = I_1 V_1 + I_2 V_2 + I_3 V_3 \quad (7)$$

其中, I_1 、 I_2 和 I_3 为每级收集极所收集的电流; V_1 、 V_2 和 V_3 为收集极每级电压. 采用 3 级降压收集极的

图 4 三级降压收集极回收功率示意

Fig. 4 Recovery power of three-stage depressed collector

因此, 根据回收效率与回流率, 调节模型尺寸以及每一级的电压等参数, 便可获得满足设计需求的降压收集极. 图 5 给出一个沿轴 I 对称的三级降压极仿真模型的结构示意图. 其中, 三级降压收集极各级长度 L_1 、 L_2 和 L_3 分别为 22.78、26.57、31.23 mm; 半径 R_1 、 R_2 和 R_3 分别为 0.63、3.12 和 5.09 mm; 相邻两电极的距离 D_1 和 D_2 分别为 14.00 和 15.00 mm.

图 5 轴对称降压收集极结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of symmetric depressed collector

根据回收效率与回流率两个指标, 对上述降压收集极电压参数进行优化, 考虑到高压击穿问题, 第一电极的电压设为 -20.85 kV, 并依次对其他电极电压进行模拟和优化. 结果表明, 当后两电极相对管体电压分别设为 -21.50 kV 和 -22.10 kV 时, 回流电流最小, 记录此时不考虑二次电子发射的情况. 将内壁材料由理想导体 (perfect electric conductor, PEC) 设为无氧铜后, 考虑二次电子发射的收集

极电子轨迹图如图 6, 图中轨迹的颜色代表粒子携带的能量. 由图 6 可见, 二次电子主要被第二和第三级回收, 但有第一级激发的二次电子返流到互作用区, 回流率增大.

图 6 考虑二次电子发射的轴对称降压收集极粒子轨迹
Fig. 6 Particle trajectory with secondary electron emission in symmetric MDC

表 2 记录了是否考虑二次电子两种情况下最优仿真结果. 由表 2 可获取互作用后电子注功率 P_{sp} ($P_{sp} = P_r + P_h$) 分别为 576.86 W 和 576.77 W, 这与前文推算的理论结果相近, 说明仿真结果可靠. 从轴对称结构的粒子模拟计算结果可知, 绝大多数电子轰击第三电极, 这对第三电极散热能力提出了较高的要求. 当考虑二次电子发射时, 部分二次电子会返回到互作用区, 回流率增至 3.12%, 大于设计要求的 2%, 同时回收效率降至 79.30%, 小于设计要求的 85%, 因此轴对称结构的降压收集极不满足设计需求.

表 2 轴对称三级降压收集极粒子仿真模拟结果							
Table 2 Particle simulation of symmetric MDC							
组别	P_h/W	P_r/W	$\eta_c/\%$	$N_{mo}/\text{个}$	$N_{sum}/\text{个}$	$\eta_{back}/\%$	$\eta_{all}/\%$
未考虑							
二次电子	89.48	484.8	84.40	13 580	13 569	0.02	5.03
考虑							
二次电子	105.26	468.2	79.30	14 816	14 368	3.12	4.47

电子回流率的上升可从轴对称结构自身电场分布(图 7)中找出原因. 该降压收集极沿 z 轴对称, 激发的部分电子将会沿着电场线方向不加阻拦的回流至前端. 因此, 为降低回流率, 通过阅读相关文献并结合工程实际^[14-15], 本研究采用非轴对称结构的三级降压收集极, 在实现较高回收效率的同时降低电子回流率, 保证系统稳定工作.

图 7 轴对称降压收集极电势分布
Fig. 7 Potential distribution of symmetrical MDC

3 非对称降压收集极的设计

非对称降压收集极较轴对称结构最大的区别在于第二级的设计, 通过调节对称轴 I 与对称轴 II 之间的相对距离 M_1 , 实现非对称的电场分布. 其结构示意图如图 8. 其中, M_1 的初始参数设置为 3.72 mm, 其余结构参数初始值与轴对称情况相同.

图 8 非轴对称降压收集极结构示意图
Fig. 8 Structural diagram of asymmetric MDC

在 CST 中建立仿真模型, 按照前述流程, 先对各级电压进行分析设计. 对第一电极电压调优后设为 -21.00 kV, 再依次对其他电极电压进行模拟优化. 结果表明, 二级和三级降压收集极中相对管体电压分别设为 -21.58 kV 和 -22.10 kV 时, 回流电流最小. 记录此时的 M_1 值, 并设置内壁材料为无氧铜, 可得到考虑二次电子发射情况下的相关轨迹与指标.

非对称降压收集极结构可通过调节 M_1 值来优化电子回流率. 固定其他参数, 采用步进扫描 M_1 参数的方式, 获取不同尺寸下回流率和回收效率等指标, 整理数据并将部分结果记录于表 4.

由表 3 可知, 当 $M_1 = 5.72$ mm 时, $\eta_c = 89.50\%$, $\eta_{back} = 0.53\%$, $\eta_{all} = 8.38\%$, 各指标均好

于对称结构的降压收集极的。图 9 为此参数下绘制的电子轨迹图指标。由图 9 可见, 激发的二次电子绝大部分被第二和第三级回收, 第一级激发的电子也因为结构合理, 无过多的电子回流至前端。

表 3 不同级间距离下相应指标

Table 3 Results among different margins

M_1/mm	$\eta_c/\%$	$\eta_{\text{back}}/\%$	$\eta_{\text{all}}/\%$
0.13	81.87	1.94	4.77
2.45	84.34	1.64	5.13
4.08	86.94	0.85	6.45
5.72	89.50	0.53	8.38
7.35	87.65	1.52	7.28
8.17	84.38	1.77	5.15

图 9 考虑二次电子发射的非对称降压收集极电子轨迹图

Fig. 9 Electron trajectory considering secondary electron emission in asymmetric MDC

整理非对称结构下的最优参数, 并记录是否考虑二次电子发射时的仿真数据, 结果见表 4。由表 4 可见, 优化后非对称降压收集极结构的 $\eta_c > 85\%$, $\eta_{\text{back}} < 2\%$, 满足设计需求。

表 4 非轴对称三级降压收集极粒子模拟结果

Table 4 Particle simulation of asymmetric three-stage depressed collector

组别	P_h/W	P_r/W	$\eta_c/\%$	$N_{\text{mo}}/\text{个}$	$N_{\text{sum}}/\text{个}$	$\eta_{\text{back}}/\%$	$\eta_{\text{all}}/\%$
未考虑							
二次电子	58.46	518.4	90.42	13 580	13 569	0.02	8.84
考虑							
二次电子	64.57	512.2	89.50	14 383	14 308	0.53	8.38

图 10 是非对称结构下该收集极的电势分布图。由图 10 可见, 由于第二级采用非对称结构, 电势

线发生了变化, 在非轴对称电场的影响下, 电子在收集极内的运动轨迹发生明显偏转, 呈两级收集趋势, 因此降压收集极回收效率提升, 同时电势线改变了电子回流轨迹, 回流至互作用区的电子减少。

图 10 非对称性降压收集极电势分布图

Fig. 10 Potential distribution of asymmetrical MDC

在获取每一级热损耗功率后, 需要考虑稳态条件下降压收集极的温度分布。本研究使用在行波管设计中得到广泛应用的 ANSYS 有限元热仿真软件^[16-17]来求解温度分布。带入相关热参数后, 得到相应的热仿真结果如图 11。由图 11 可见, 非对称降压收集极的温度范围为 $92.3 \sim 340.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 处于正常容限范围内。仿真顺利通过 ANSYS 的结构分析, 表明结构设计合理, 具有实际参考价值。

图 11 ANSYS 稳态热分析温度分布图

Fig. 11 Temperature distribution of MDC in ANSYS

结 语

本研究从废电子注能量信息出发, 利用电磁仿真软件 CST 对降压收集极进行仿真设计, 并对相关电压参数进行调优及结构优化。提出非轴对称降压收集极结构, 在考虑二次电子发射的情况下, 收集极回收效率为 89.50% , 回流率为 0.53% , 整管工作效率从 4.47% 升至 8.38% 。ANSYS 软件稳态热仿真结果显示, 非轴对称降压收集极的温度范围分

布合理。综上所述, 非对称降压收集极满足设计需求, 可为后续整管结构优化提供参考。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2017YFA0701003); 国家自然科学基金项目 (11675181, U1832193)

作者简介: 欧 粤 (1996—), 中国科学院大学硕士研究生。研究方向: 行波管降压收集极设计。E-mail: ouyue18@mailsucas.ac.cn

引 文: 欧 粤, 刘文鑫, 赵征远, 等. 太赫兹行波管非对称降压收集极设计[J]. 深圳大学学报理工版, 2021, 38(3): 245-251.

参考文献 / References:

- [1] HE Jingwen, WANG Sen, ZHANG Yan. Terahertz beam shaping with metasurface [C]// International Conference on Infrared, Millimeter-wave, and Terahertz Technology. Beijing: SPIE, 2016: 1003019.
- [2] ZHANG Xicheng, SHKURINOV A, ZHANG Yan. Extreme terahertz science [J]. Nature Photonics, 2017, 11(1): 16-18.
- [3] 洪 伟, 余 超, 陈继新, 等. 毫米波与太赫兹技术 [J]. 中国科学: 信息科学, 2016, 46(8): 1086-1107.
HONG Wei, YU Chao, CHEN Jixin, et al. Millimeter wave and terahertz technology [J]. Scientia in China: Information Sciences, 2016, 46(8): 1086-1107. (in Chinese)
- [4] RALEIGH M, LU Quanyong, BANDYOPADHYAY N, et al. Quantum cascade lasers: from tool to product [J]. Optics Express, 2015, 23(7): 8462-8475.
- [5] HAFEZ H A, CHAI Xin, IBRAHIM A, et al. Intense terahertz radiation and their applications [J]. Journal of Optics, 2016, 18(9): 093004.
- [6] HUNG C L, YANG D C. A 0.2-THz second-harmonic coaxial-waveguide gyrotron traveling-wave-tube amplifier [C]// The 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. Copenhagen: IEEE, 2016. doi: 10.1109/IRMMW-THz.2016.7758523.
- [7] 宫玉彬, 周 庆, 田瀚文, 等. 基于电子学的太赫兹辐射源 [J]. 深圳大学学报理工版, 2019, 36(2): 111-127.
GONG Yubin, ZHOU Qing, TIAN Hanwen, et al. Terahertz radiation sources based on electronics [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2019, 36(2): 111-127. (in Chinese)
- [8] 祝方芳. 太赫兹行波管输出窗和收集极的设计与热分析 [D]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 2019.
ZHU Fangfang. Design and thermal analysis of output window and collector of terahertz TWT [D]. Beijing: Institute of electronics, Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
- [9] 刘宇荣, 刘 斌, 王大明. 大功率行波管两级降压收集极的设计 [J]. 强激光与粒子束, 2017, 29: 103002.
LIU Yurong, LIU Bin, WANG Daming. Design of two stage depressed collector for high power TWT [J]. High Power Laser and Particle Beam, 2017, 29: 103002. (in Chinese)
- [10] XU Li, XIE Peng, YANG Siyi, et al. Accurate and fast thermal analysis of multistage depressed collectors for traveling-wave tubes using finite-element method [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2020, 67(2): 690-696.
- [11] DING Haibing, TANG Liang, SONG Yihao, et al. Design of a Ka-band CW extended interaction klystron [C]// International Vacuum Electronics Conference. Monterey, USA: IEEE, 2018: 187-188.
- [12] 王柳亚, 丁海兵. Ka 波段分布作用速调管降压收集极设计 [J]. 强激光与粒子束, 2020, 32: 083001.
WANG Liuya, DING Haibing. Design of Ka band distributed action klystron buck collector [J]. High Power Laser and Particle Beam, 2020, 32: 083001. (in Chinese)
- [13] GILMOUR A S. Klystron, traveling wave tubes, magnetrons, crossed-field amplifiers, and gyrotrons [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [14] LATHA A M, GHOSH S K. An asymmetric highly efficient multistage depressed collector for space TWTs [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2016, 63(5): 2139-2144.
- [15] LATHA A M, GHOSH S K. Design and development of a novel, compact, and light-weight multistage depressed collector for space TWTs [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2016, 63(1): 481-485.
- [16] OU Yue, LIU Wenxin, YANG Longlong, et al. Thermal analysis of electron gun for terahertz traveling wave tubes based on L-BFGS algorithm [C]// IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO). Hangzhou, China: IEEE, 2020: 1-4.
- [17] MADENCI E, GUVEN I. The finite element method and applications in engineering using ANSYS? [M]. Boston, USA: Springer, 2006.

【中文责编: 英 子; 英文责编: 溯 心】