

文章编号: 2095-4980(2020)05-0766-05

D 波段行波管三级降压收集极的设计

陈招子^{a,b}, 陈洪斌^a, 马乔生^a, 雷文强^a

(中国工程物理研究院 a.应用电子学研究所, 四川 绵阳 621999; b.研究生院, 北京 100088)

摘要: 效率是行波管(TWT)的重要技术指标, 为提高某一 0.22 THz 折叠波导行波管的效率, 需设计多级降压收集极。对注波相互作用后的电子注信息进行分析, 估算收集极效率最高时的电压设置。利用电磁仿真软件对三级降压收集极电极结构和电压设置进行仿真优化, 得到效率大于 87.5%, 回流电流小于 0.328 9 mA 的轴对称三级降压收集极; 在第二电极入口采用斜口结构进行仿真优化, 得到回流电流小于 0.075 mA 的非轴对称三级降压收集极。结果表明, 采用斜口结构可以有效降低 0.22 THz 行波管多级降压收集极的回流电流。

关键词: 行波管; 非轴对称收集极; 收集极效率; 回流电流

中图分类号: TN124

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019258

Design of three-stage depressed collector for D-band TWT

CHEN Zhaozi^{a,b}, CHEN Hongbin^a, MA Qiaosheng^a, LEI Wenqiang^a

(a.Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China;

b. Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China)

Abstract: Efficiency is one of the important technical parameters of Traveling Wave Tube(TWT). In order to improve the efficiency of a 0.22 THz folded waveguide TWT, it is necessary to design a multistage depressed collector. Firstly, the spent-electron-beam characteristics in the collector entrance are analyzed, and the voltage settings at the highest collection efficiency are predicted. Then the structure and voltage settings of the three-stage depressed collector are optimized by electromagnetic simulation software. The axisymmetric three-stage depressed collector with collector efficiency greater than 87.5% and back streaming current less than 0.328 9 mA is obtained. Finally, an asymmetric three-stage depressed collector with a back streaming current less than 0.075 mA is obtained by using an oblique structure at the entrance of the second electrode. The results show that the back streaming current of 0.22 THz TWT multistage depressed collector can be effectively reduced by using the oblique structure.

Keywords: Traveling Wave Tube(TWT); asymmetric collector; collector efficiency; back streaming current

在微波电子管的大家族中, 用途最为广泛的是行波管。行波管具备大功率、宽带宽和高增益的特点, 广泛用于微波放大^[1]。随着电磁频率的提高, 太赫兹行波管的结构尺寸越来越小, 相互作用效率越来越低^[2-5]。在这种情况下, 通常采用多级降压收集极(Multistage Depressed Collector, MDC)进一步提高行波管的整管效率。MDC 的工作原理是在收集极内形成恰当的电场分布, 对进入收集极的电子按照速度不同进行分类收集^[6]。MDC 的设计离不开电子回流的抑制。电子回流在高频相互作用区会影响管子的高频性能, 甚至引起振荡、烧毁等^[7], 这就要求在设计中尽量降低回流, 进一步提高收集极效率。为降低回流, 国内外学者做了大量研究^[8-13], LATHA 等对四级降压收集极的第一级和其他电极分别采用不同对称轴的非轴对称结构, 计算结果显示某 Ku 波段四级降压收集极效率大于 94%、回流电流为 0 mA; 张晓冉等在四级降压收集极的第四极采用斜口结构, 优化各级间距和入口尺寸后, 收集极效率提高到 74.24%, 回流电流为 0 mA^[6]; 尚新文、申鑫等分析了 MDC 再聚焦区磁场和收集区磁场对收集极效率的影响, 结果表明, 再聚焦区和收集区引入磁场有利于降低回流, 提高收集极效率^[12]。目前 D

收稿日期: 2019-07-22; 修回日期: 2019-09-19

基金项目: 科技部资助课题(2018YFC0115001); 科工局资助课题(JCKY2018212C015)

作者简介: 陈招子(1995-), 女, 硕士, 主要从事太赫兹真空器件方面的研究。email:18302989732@163.com

波段行波管多采用单级降压结构,采用多级降压结构提高整管效率尚未见报道。为提高行波管的效率,本文首先对收集极入口电子注信息进行分析,得到收集极入口功率分布图,利用功率分布图预计收集极效率。然后利用 3 维电磁仿真软件对三级降压收集极仿真计算,完成了回流小于 0.075 mA、效率大于 85.73% 的 0.22 THz 行波管三级降压收集极设计。

1 多级降压收集极效率计算

图 1 和图 2 分别给出了行波管中的功率流和电流分布,可以直接得到收集极效率的表达式。收集极的效率可以定义为:

$$\eta_{\text{coll}} = \frac{P_{\text{rec}}}{P_{\text{coll}}} \quad (1)$$

式中:

$$P_{\text{rec}} = \sum_{i=1}^N |U_0 - U_{ei}| I_{ei} \quad (2)$$

$$P_{\text{coll}} = U_0 I_0 - P_{\text{body}} - P_{\text{RF}} \quad (3)$$

式中: U_0 为慢波系统上的电位; U_{ei} 为收集极各电极电位; I_{ei} 为收集极各电极的电流; P_{body} 为体功率; P_{RF} 为射频输出功率; P_{coll} 为收集极功率。

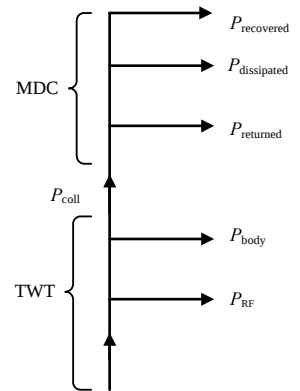


Fig.1 Power distribution in TWT
图 1 行波管中功率流

2 收集极电子注入口条件分析

注波相互作用后的电子注能量分布是 MDC 的设计依据,它决定降压收集极的级数以及电极电位^[6],因此电子注能量分布的分析是 MDC 设计的基础。

注入收集极的电子注初始条件获取方法有:计算法、估算法、测算法和综合法^[14]。本文电子注在收集极入口的初始条件由 CST 仿真软件的 PIC(Particle In Cell)求解器对同步电压为 19.7 kV 的 0.22 THz 折叠行波管整管仿真计算获得。此方法获得该管工作频带内 3 个频点的收集极入口电子注信息,电子注能量分布见图 3,横坐标表示电子能量,纵坐标表示能量在 eVs 点的概率密度。从图 3 可看出,电子能量分布在 $1.77 \times 10^4 \sim 2.033 \times 10^4$ eV 之间,占比最多的能量点从 216 GHz 的 1.87×10^4 eV 降至 222 GHz 的 1.845×10^4 eV。根据行波管原理和图 3 可知,在 222 GHz 频点注波相互作用过程中,电子注交出能量最多,高频输出功率最大。表 1 为不同频点的高频输出功率和半个 RF 周期内进入收集极的宏电子数,在 222 GHz 频点,高频输出功率最大为 23.8 W,表 1 仿真结果与分析结果相同。

表 1 三个频点的高频输出功率和收集极入口宏电子数

f/GHz	output power/W	the number of spent electrons
216	3.0	2 253 600
220	16.7	2 251 246
222	23.8	2 258 173

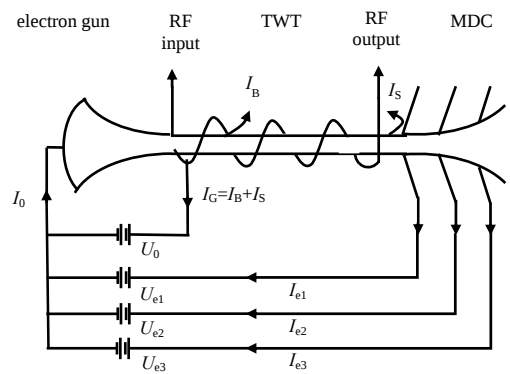


Fig.2 Current distribution in TWT
图 2 行波管中的电流

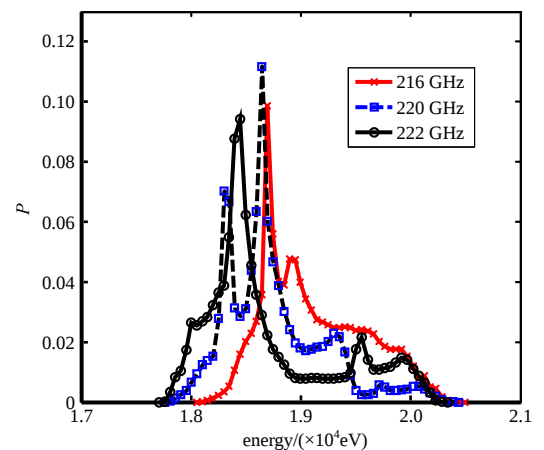


Fig.3 Energy distribution of spent-electron-beam
图 3 收集极入口电子注能量分布

以 222 GHz 频点为例,对图 3 收集极入口电子能量曲线进行处理,得到图 4 的等效电位和归一化电流曲线。在不考虑二次电子的情况下,对于本文设计的轴对称三级降压收集极,可以利用每个电极相对管体的电压乘以归一化电流,得到收集极的归一化回收功率。图 5 阴影部分表示收集极的归一化回收功率,通过阴影面积与归一化电流曲线总面积的比值,可以粗略估算收集极的回收效率^[15]。

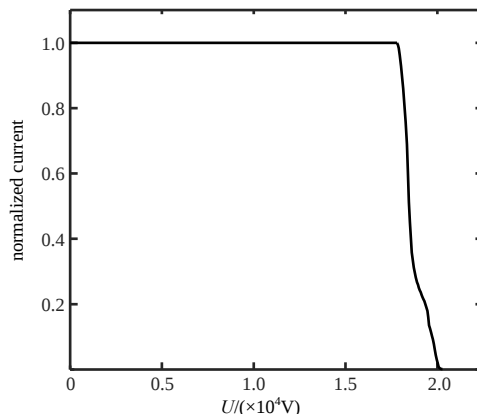


Fig.4 Collector voltages and normalized current
图 4 收集极电压和归一化电流的关系

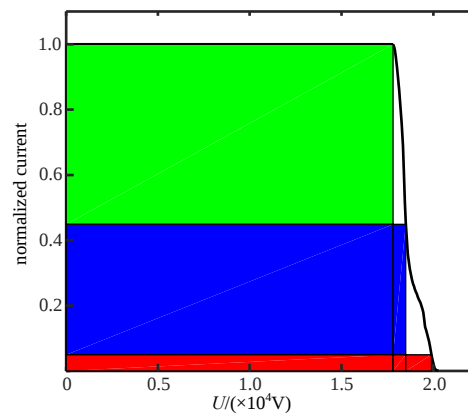


Fig.5 Power recovered by the 3-stage depressed collector
图 5 收集极回收的能量

3 收集极结构设计及仿真优化

从电子注在收集极入口能量分布图可以看出，进入收集极的电子能量较高，并且能量分布集中。根据图 5，理论上将收集极各级电压初步定为-17.6 kV,18.4 kV 和-19.7 kV 时，收集极效率最高。以工作频带内 3 个频点注波相互作用后的电子束分别设为收集极入口条件，采用图 6 的轴对称三级降压收集极结构进行仿真计算。在设计中发现，收集极入口电子注横向能量远小于纵向能量，电子注直径小于 0.2 mm。若各级电压设置为理论计算电压，如果电子在收集极的第一电极和第二电极内部速度降至零，此时电子注直径依然非常小，电子不能在收集极进行回收。速度降为零的电子在电场作用下反向运动，大量电子回到高频相互作用区，将严重影响高频相互作用效率。考虑到高压击穿问题，第一电极设置为-12 kV，对其他电极电压进行仿真优化。结果表明，三级降压收集极各级相对管体电压(管体接地)依次设置为-12 kV，-16 kV 和-17.5 kV 时，回流最小。

以 3 个频点注波相互作用后的电子束分别作为收集极入口条件，各级电压为优化后的电压设置，仿真结果见表 2，可以看出电子几乎全部被第三电极回收。考虑二次电子时，222 GHz 频点电子注轨迹仿真结果见图 7，由图 7 可知，一次电子全部打在第三极上，有二次电子返回相互作用区。

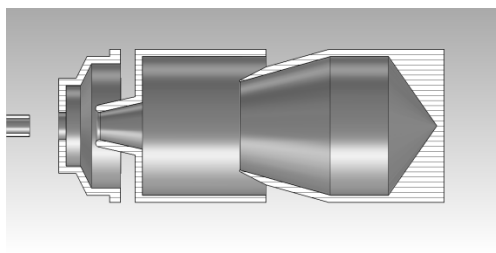


Fig.6 CST model of symmetrical 3-stage depressed collector
图 6 轴对称三级降压收集极模型

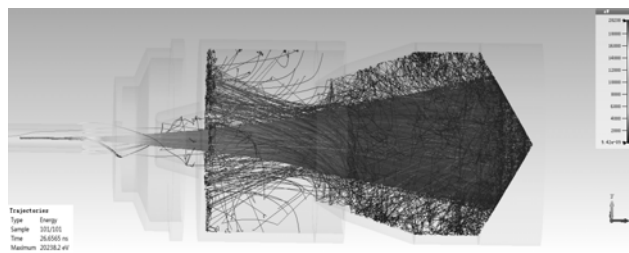


Fig.7 Electron trajectories within the symmetrical MDC considering secondary electrons
图 7 考虑二次电子时轴对称三级降压收集极内的电子注轨迹

表 2 轴对称收集极仿真结果

Table2 Simulation results of axisymmetric collector under the modulated(RF) condition

f/GHz	electrode 1 power/W		electrode 2 power/W		electrode 3 power/W		body power/W		back-streaming power/W		body current/mA		back streaming current/mA	
	only primary	both primary and secondary	only primary	both primary and secondary	only primary	both primary and secondary	only primary	both primary and secondary	only primary	both primary and secondary	only primary	both primary and secondary	only primary	both primary and secondary
216	0	0.377	0	8.935	73.760	87.010	0	5.368 0	0	0.946 3	0	0.055 9	0	0.273
220	0	0.312	0	9.686	58.821	69.214	0	0	0	2.821 0	0	0	0	0.205
222	0	0.223	0	8.675	56.567	65.821	0	0.330 8	0	3.171 0	0	0.018 6	0	0.223

注波相互作用过程中管体功率较小，本文在计算收集极效率时忽略不计。根据式(1)和表 2 仿真结果，计算收集极效率，结果见表 3。不考虑二次电子时，收集极效率大于 91.03%，功率分布图估算结果与仿真计算结果相差不大；考虑二次电子时，收集极效率大于 87.5%，回流小于 0.328 9 mA。

表 3 轴对称结构收集极仿真结果分析
Table3 Theoretical calculation and CST simulation of the symmetrical MDC performance under the modulated(RF) condition

f/GHz	theoretical $\eta_{coll}/\%$		simulation $\eta_{coll}/\%$	
	only primary	both primary and secondary	only primary	both primary and secondary
216	90.84	—	91.03	87.50
220	91.74	—	92.73	89.86
222	92.03	—	92.95	90.26

考虑回流和热耗散能力，第二电极采用图 8 的斜口结构并优化电极电压。优化后收集极各级电压依次设置为 -12 kV, -16.1 kV 和 -17.9 kV。图 9 为静电场等位线图，可以看出，由于第二级采用斜口结构，收集极第二电极入口处产生非轴对称等势线，导致电子在收集极内的运动轨迹发生明显偏转(见图 10)，电子注收集呈后两级收集的趋势。二次电子在进入第一电极时受到非轴对称电场作用，大量二次电子打到第一电极，回到高频相互作用区的电子减少，回流降低。

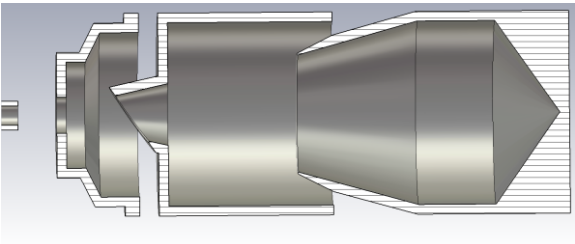


Fig.8 CST model of asymmetrical 3-stage depressed collector
图 8 非轴对称收集极结构

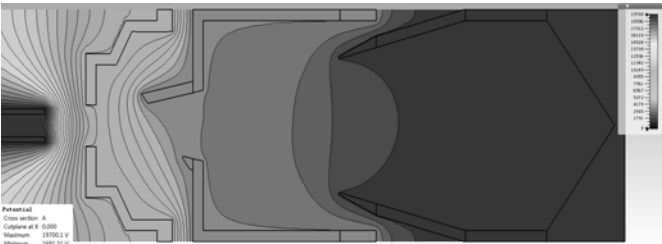


Fig.9 Equipotential line distribution without space charge within the asymmetric MDC implying the asymmetric electric field
图 9 斜口结构静电场等位线

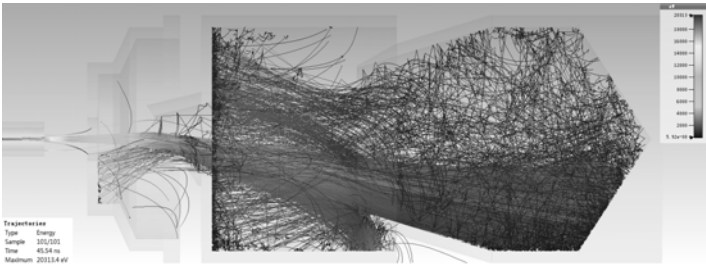


Fig.10 Electron trajectories within the asymmetric MDC considering secondary electrons
图 10 考虑二次电子时非轴对称三级降压收集极内的电子注轨迹

轴对称和非轴对称结构仿真结果对比见表 4。由表 4 可知，优化后的非轴对称结构收集极回到相互作用区的电流小于 0.075 mA。由于第二电极电势高于第三电极，较之着陆在第三电极上，电子着陆在第二电极时减少的动能更少。在轴对称结构中电子全部被第三电极收集，而在非轴对称结构中，因为有部分电子以很高的能量打到第二电极上以热量的形式耗散，收集极回收的能量降低，非轴对称收集极效率降低。

表 4 轴对称结构和非轴对称结构仿真结果分析

Table4 3-stage depressed collector performance of symmetric and asymmetric models						
f/GHz	$\eta_{coll}/\%$		back streaming current/mA		body current/mA	
	symmetric MDC	asymmetric MDC	symmetric MDC	asymmetric MDC	symmetric MDC	asymmetric MDC
216	87.50	85.73	0.055 9	0	0.273	0.075
220	89.86	86.37	0	0	0.205	0.075
222	90.26	86.41	0.018 6	0	0.223	0.056

4 结论

本文将斜口非轴对称结构应用到 D 波段行波管多级降压收集极，利用 CST 仿真软件对 0.22 THz 折叠波导行波管三级降压收集极进行仿真计算。结果表明：回流电流小于 0.075 mA，收集极效率大于 85.73%，电子注呈后两级收集趋势，斜口结构可以有效降低回流电流。

参考文献:

- [1] 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(10):103002-1-103002-5. (LIU Yurong,LIU Bin,WANG Daming. Design of two-stage depressed collector for high-power traveling wave tube[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017,29(10):103002-1-103002-5.)
- [2] 周泉丰,徐翱,阎磊,等. 0.22 THz 折叠波导行波管设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(2):166-170. (ZHOU Quanfeng,XU Ao,YAN Lei,et al. Study of designing 0.22 THz Folded Waveguide Traveling Wave Tubes[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(2):166-170.)
- [3] ZHOU Quanfeng,SONG Rui,LEI Wenqiang,et al. Development of a 0.22 THz folded waveguide travelling wave tube[C]// 2015 IEEE International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Beijing:IEEE, 2015:1-2.
- [4] 宋睿,周泉丰,雷文强,等. 0.22 THz 折叠波导行波管电子光学系统设计与实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2015,27(9):093101-1-093101-5. (SONG Rui,ZHOU Quanfeng,LEI Wenqiang,et al. Design and experiment of electron optical system for 0.22 THz folded waveguide traveling wave tube[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015,27(9):093101-1-093101-5.)
- [5] 雷文强,蒋艺,周泉丰,等. D 波段 7 W 连续波折叠波导行波管的研制[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(2):171-174. (LEI Wenqiang,JIANG Yi,ZHOU Quanfeng,et al. Research for D band 7 W continuous-wave Folded Waveguide Traveling Wave Tube[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(2):171-174.)
- [6] 张晓冉. 三注行波管多级降压收集极研究[D]. 成都:电子科技大学, 2015. (ZHANG Xiaoran. Study of multistage depressed collector of three-beam Travelling Wave Tube[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2015.)
- [7] 陈燕. Ku 波段行波管降压收集极的研制[D]. 成都:电子科技大学, 2012. (CHEN Yan. Research of depressed collector for Ku-band TWT[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2012.)
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] LATHA A M,GUPTA R K,GHOSH S K. The analytical model for multi-stage depressed collectors[C]// IEEE International Vacuum Electronics Conference. Bangalore,India:IEEE, 2011:181-182.
- [11] 申鑫,苏小保,唐康淞,等. 磁聚焦多级降压收集极的设计及优化[J]. 真空电子技术, 2017(1):48-53. (SHEN Xin,SU Xiaobao,TANG Kangsong,et al. Design optimization of multi-stage magnetic focusing depressed collector[J]. Vacuum Electronics, 2017(1):48-53.)
- [12] 尚新文,申鑫,易红霞,等. 多级降压收集极过渡区磁系统的计算及优化[J]. 真空科学与技术学报, 2016,36(10):1123-1130. (SHANG Xinwen,SHEN Xin,YI Hongxia,et al. Simulation and design optimization of magnetic system in transition region of multistage depressed collector[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2016,36(10):1123-1130.)
- [13] HECHTEL J R. A novel electrostatic-focusing depressed collector for linear beam tubes[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1977,24(1):45-52.
- [14] 徐旭,杨军,吕国强,等. 空间行波管多级降压收集极的设计和模拟[J]. 真空电子技术, 2011(1):5-8. (XU Xu,YANG Jun,LYU Guoqiang,et al. Design and simulation of multistage depressed collector for Space Traveling Wave Tube[J]. Vacuum Electronics, 2011(1):5-8.)
- [15] SHRIVASTAV N,SHARMA R K,SRIVASTAVA V. Design of multistage depressed collector for Ka-band 40 W high efficiency helix TWT[C]// 2009 Applied Electromagnetics Conference. Kolkata,India:IEEE, 2009:1-3.