

文章编号: 2095-4980(2025)07-0731-05

W 波段平面集成行波管共用平面收集极设计

孙 然, 杨金生, 纪焕丽, 蔡 军, 冯进军

(北京真空电子技术研究所 微波电真空器件国家级重点实验室, 北京 100015)

摘 要: 针对 W 波段 4 路平面集成行波管收集极的应用需求, 通过计算机仿真技术(CST)软件对 4 路阵列电子注共用的平面收集极进行优化设计, 并结合注-波相互作用后的电子注能量分布特性分析, 计算了在不同电压下收集极的效率和返流情况, 最终选定 -11.4 kV 为收集极工作电压, 并分析了工作电压 0 kV 和 -11.4 kV 时的电子轨迹分布。计算了收集极的热损耗功率, 利用 ANSYS 软件分析了收集极工作于 -11.4 kV 时的热分布情况。研究结果表明, 该收集极能够高效率地回收 4 路互作用完成后电子注能量, 收集极工作电压为 -11.4 kV 时效率最高且没有返流, 此时热损耗功率产生的温度变化在可承受范围之内。

关键词: 平面集成行波管; 共用平面收集极; 电子轨迹; 收集极效率; 热分析

中图分类号: TN124

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2024120

Design of a shared planar collector for W-band planar-integrated traveling wave tube

SUN Ran, YANG Jinsheng, JI Huanli, CAI Jun, FENG Jinjun

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vacuum Electronics, Beijing Vacuum Electronics Research Institute, Beijing 100015, China)

Abstract: To meet the application requirements of four beams W-band planar-integrated traveling wave tube collector, a four-electron-beam array shared planar collector is designed by Computer Simulation Technology(CST) software. Firstly, the spent-electron-beam characteristics are analyzed. Then, the efficiency and back streaming current of the collector at different voltages are obtained, and the operating voltage of the collector is determined to be -11.4 kV. The electron trajectories at 0 kV and -11.4 kV operating voltages of the collector are simulated and analyzed. Finally, the thermal loss power of the collector is calculated, and the temperature distribution is simulated by ANSYS software. The results show that the collector can efficiently recover the energy of spent-electron-beam after beam-wave interaction. When the operating voltages of the collector is -11.4 kV, the efficiency is the highest and there is no back streaming current, and the heat dissipation temperature is within the tolerable range.

Keywords: planar-integrated traveling wave tube; shared planar collector; electron trajectory; collector efficiency; thermal analysis

行波管是一种功率放大器件, 具备宽带宽、大功率和高增益的特点, 在雷达、电磁对抗及通信等方面得到广泛应用^[1-4]。如能将行波管应用于有源相控阵系统, 实现多目标、多功能的波束扫描, 将极大提升现有有源相控阵雷达的性能^[5], 因此提出了集成行波管的概念。集成行波管的基本原理是多路独立的高频结构共用一个永磁聚焦系统, 并且共用同一电子枪和收集极, 这样的集成结构更加紧凑, 有望应用于有源相控阵系统^[6]。

在行波管中, 收集极的作用是使注-波相互作用后的电子注减速, 将电子注的剩余能量转化为电源能量, 以提

收稿日期: 2024-03-04; 修回日期: 2024-03-26

引用格式: 孙然, 杨金生, 纪焕丽, 等. W 波段平面集成行波管共用平面收集极设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025, 23(7): 731-735. DOI:10.11805/TKYDA2024120.

Citation format: SUN Ran, YANG Jinsheng, JI Huanli, et al. Design of a shared planar collector for W-band planar-integrated traveling wave tube[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025, 23(7): 731-735. DOI:10.11805/TKYDA2024120.

高整管效率。目前用于平面集成行波管的一维阵列电子注共用收集极相关研究较少,本文针对 W 波段平面集成行波管一维阵列电子注共用收集极的应用需求,对 W 波段行波管一维 4 路电子注共用平面收集极进行了优化设计,并实现了较高收集极效率。

1 收集极电子注入口条件分析

电子注能量分布是收集极设计的依据,准确获取注-波相互作用后的电子注能量分布很重要^[7]。由于集成行波管在各慢波结构内完成注-波相互作用,4 路收集极的初始条件可通过单路慢波系统注-波相互作用后的电子注能量分布仿真结果确定。基于工作电压 12.6 kV、工作电流 34 mA 的 W 波段行波管,利用 CST 仿真软件 PIC 求解器仿真折叠波导行波管相互作用过程,获取相互作用后电子注能量分布特性。在高频结构输出端设置监视器,选取注-波相互作用稳定后的时间点为起始,以中心频率 94 GHz 设置射频信号周期,监测一个射频周期的电子信息,共计 24 804 个电子。该信息包括粒子的位置、质量、电荷量和归一化动量。通过对仿真电子信息进行处理,将归一化动量转换为电子能量,转换公式为^[8]:

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

式中: P_x 、 P_y 、 P_z 分别为电子 x 方向、 y 方向、 z 方向上的动量; c 为真空中的光速; 电子质量 $m_e = 9.11 \times 10^{-31}$ kg; $e = 1.60 \times 10^{-19}$ C。由此绘制电子注能量分布图,如图 1 所示,横坐标代表电子能量,纵坐标代表能量的概率密度。

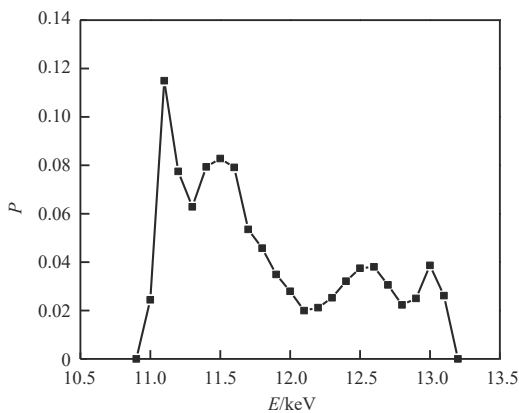


Fig.1 Electron energy distribution in one RF cycle
图 1 一个射频周期内的电子能量分布

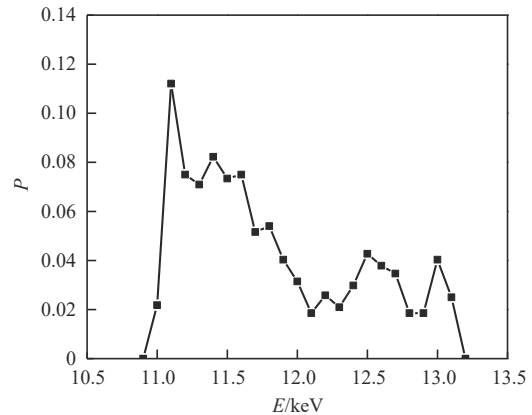


Fig.2 Electron energy distribution after analysis
图 2 处理后的电子能量分布

由图可见,完成注-波相互作用后的电子能量在 11~13.1 keV 之间分布,绝大部分电子的能量小于发射端的电子能量 12.6 keV,这是由于注-波相互作用后大部分电子损失能量,使得输出信号放大,但仍有小部分电子吸收射频场能量,从而使自身加速。部分电子的能量集中在 11.1 keV 附近,因此收集极与管体之间的压差应在 11.1 kV 附近,否则会导致该部分电子因压差过大而返流。

为了利于后续仿真计算,将上述 24 804 个电子数据等间隔分成 20 组,选取电子能量分布与原始数据最接近的组别,将其作为收集极入口的参数输入文件,处理后的电子注能量分布如图 2 所示,共提取 1 241 个宏电子。其能量分布与图 1 中整个射频周期内的电子情况基本一致,表明所选宏电子能代表整个射频周期的电子状态。

2 收集极设计与仿真分析

基于 W 波段 4 路平面集成行波管整体拓扑结构设计,4 路行波管间距为 20 mm。4 路共用收集极采用非对称平面结构,通过单级降压结构尺寸优化确保相互作用后的电子均匀地打在内收集极体上,在维持高效率的同时提升收集极散热性能。最终设计的收集极结构如图 3 所示。

定义收集极回收功率 P_r 与收集极接收功率 P 之比为收集极效率^[9-10],即:

$$\eta_c = \frac{P_r}{P} = \frac{\sum U_{cn} I_{cn}}{P_0 - P_L - P_{out}} \quad (2)$$

式中： U_{cn} 和 I_{cn} 分别为 n 级降压收集极的工作电压和电流； P_0 为输入电子注功率，由行波管工作电压和工作电流确定； P_L 为管体耗散功率； P_{out} 为行波管输出功率，根据注-波互作用仿真结果， P_{out} 为22.37 W。

将上述收集极的入口参数文件导入 CST 仿真软件的 Particle Tracking 求解器中，设置管体电位为零，收集极设为理想导体且设置相应电位参数。在考虑二次电子情况下，扫描收集极工作电压-11~-11.6 kV，忽略管体耗散功率，得到收集极效率和电子返流情况如表1所示。收集极效率随降压幅度的增大而提高，但电子返流现象也更加显著。在没有返流时，收集极电压最高可降至-11.4 kV，此时收集极效率最高，达到95.4%。此外，也仿真了只有1路电子注工作时收集极工作情况，收集极电压仍在-11.4 kV时效率最高且没有返流。

表1 不同工作电压下收集极效率与返流

Table1 Efficiency and reverse current of the collector at different voltages		
collector voltage/kV	collector efficiency/%	reverse current/mA
-11.0	92.1	0
-11.3	94.6	0
-11.4	95.4	0
-11.5	96.0	0.344
-11.6	94.4	3.709

当收集极电压设置为0 V(收集极无降压)时，得到收集极区域电子轨迹分布如图4所示，电子几乎全部打在了收集极末端，电子的动能将转化为热能被直接消耗掉。

当收集极电压设置为-11.4 kV 时，收集极区域电子轨迹分布如图5所示。可以看出，电子进入收集极后在电场作用下减速，能量降低，并因空间电荷力作用快速发散，在横向有明显轨迹交叉。由于收集极与管体之间的压差略大于部分电子的能量，导致这部分电子没有完全进入收集极内部，撞击在收集极入口的内壁上。

互作用后的电子进入内收集极后，受内外收集极压差产生的电场力作用，沉降于内收集极体内表面。通过 CST 软件获取沉降电子的位置坐标，以收集极圆凸台入口为起始点，统计每隔5 mm的内表面上的沉降电子数量，结合电子轨迹数据处理得到的沉降能量，生成如图6所示沉降电子位置分布柱状图。由图可知，位于0~5 mm区间的沉降电子最多，但该区域电子能量较低。10~30 mm区间的沉降电子数量较多，且总能量较高，表明较多具有一定能量的电子打在了收集极前中部分。收集极后半部分沉降电子较少，但末端电子总能量显著升高，因收集极与管体压差无法使部分能量较大的电子完全减速，电子达到末端时仍以较高的能量撞击收集极后壁。

已知收集极接收功率和收集极回收功率，当不考虑管体消耗功率时，收集极未回收的功率全部

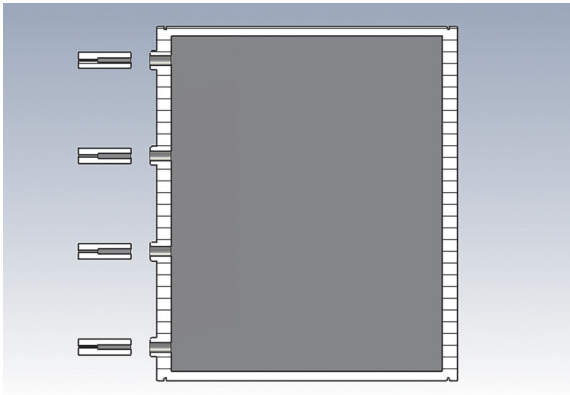


Fig.3 CST model of four beams shared planar collector
图3 4路平面共用收集极模型

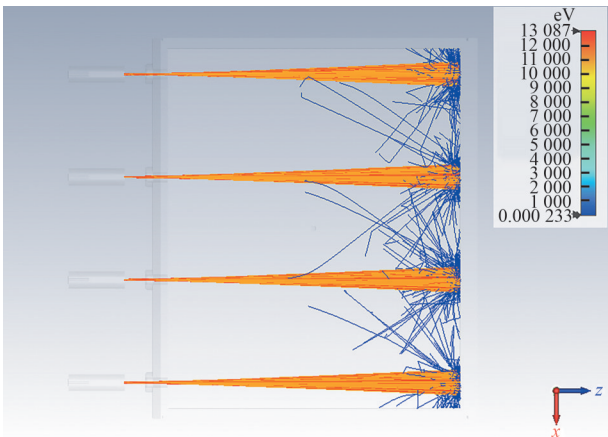


Fig.4 Electron trajectories in collector without voltage drop
图4 收集极电压为0 V时内部电子轨迹分布

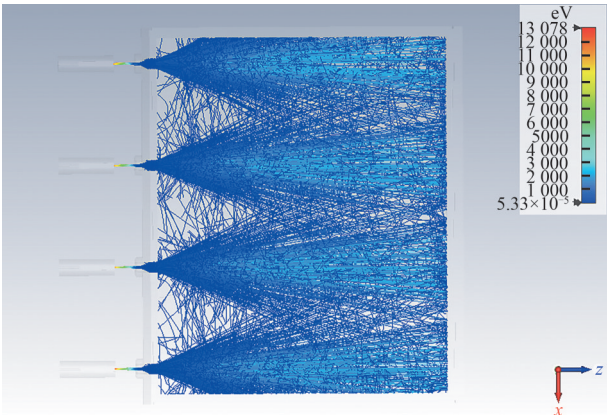


Fig.5 Electron trajectories in collector with 11.4 kV voltage drop
图5 收集极电压为-11.4 kV时内部的电子轨迹

转化为热损耗功率,由此计算得出收集极在工作电压为 -11.4 kV 时的热损耗功率为 73.72 W 。电子注进入收集极后,因空间电荷力作用快速发散,电子不均匀地打在收集极内表面,导致各区域功率密度分布不均,因此,采用非均匀热流密度加载方法对收集极进行稳态热分析更为精确^[11]。根据电子轨迹分布情况将收集极内表面沿 z 轴方向分段,由图6中沉降电子能量与位置的关系计算出每段对应的热损耗功率,再除以对应的内表面面积,得到该段热流密度。设定收集极在自然环境下工作(环境温度 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$),其外表面与空气的自然对流换热系数为 $50\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。基于上述条件计算收集极在 -11.4 kV 工作电压下的温度分布,如图7所示。由于收集极前中段的热耗损功率较大,导致该处的温度较高,最高达到 $133\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。该温度远低于内收集极体材料熔点,且最大热流密度满足行波管工作要求,故该温度在可承受范围之内。

3 结论

本文针对W波段4路平面集成行波管4路电子注共用平面收集极进行了优化设计,基于注-波相互作用后的电子注能量信息,利用CST和ANSYS仿真软件对该收集极效率、返流以及热分布特征进行了仿真分析。研究结果表明该收集极工作时几乎能将4路互作用完的电子注全部回收,当收集极工作电压为 -11.4 kV 时效率最高,达到 95.4% ,且没有返流,此时收集极温度最高达到 $133\text{ }^{\circ}\text{C}$,在可承受范围之内。目前该收集极已在4路平面集成行波管中得到应用,在1%工作比条件下对各路行波管进行分别测试,结果表明:该收集极可保证各路行波管稳定运行。

参考文献:

- [1] FENG Jinjun, CAI Jun, HU Yinfu, et al. Development of W-band folded waveguide pulsed TWTs[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2014,61(6):1721–1725. DOI:10.1109/TED.2014.2307476.
- [2] 潘攀,字张雄,蔡军,等. 用于高速无线通信的毫米波行波管[J]. 电子学报, 2020,48(9):1834–1840. (PAN Pan, ZI Zhangxiong, CAI Jun, et al. Millimeter wave traveling wave tubes for high data rate wireless communication[J]. Acta Electronica Sinica, 2020, 48(9):1834–1840.) DOI:10.3969/j.issn.0372–2112.2020.09.022.
- [3] HAFEZ H A, CHAI X, IBRAHIM A, et al. Intense terahertz radiation and their applications[J]. Journal of Optics, 2016, 18(9): 093004. DOI:10.1088/2040–8978/18/9/093004.
- [4] 冯进军,蔡军,胡银富,等. 近太赫兹频段线性注真空器件的研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(5):684–706. (FENG Jinjun, CAI Jun, HU Yinfu, et al. Research of near-terahertz linear-beam vacuum electronic devices[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(5):684–706.) DOI:10.11805/TKYDA201505.0684.
- [5] 胡银富,冯进军. 用于雷达的新型真空电子器件[J]. 雷达学报, 2016,5(4):350–360. (HU Yinfu, FENG Jinjun. New vacuum electronic devices for radar[J]. Journal of Radars, 2016,5(4):350–360.) DOI:10.12000/JR16078.
- [6] CARTER Armstrong. The vitality of vacuum electronics[J]. IEEE International Vacuum Electronics Conference, 2013,1(2):1–3. DOI:10.1109/IVEC.2013.6571164.
- [7] 李实,冯西贤,唐康淞. 多级降压收集极入口电子速度分布研究与应用[J]. 微波学报, 2010,8(4):475–477. (LI Shi, FENG

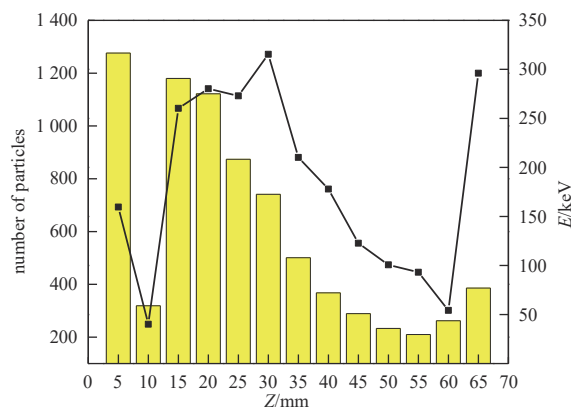


Fig.6 Number and power of electron precipitation
图6 沉降电子的数量及能量随收集极位置变化的关系图

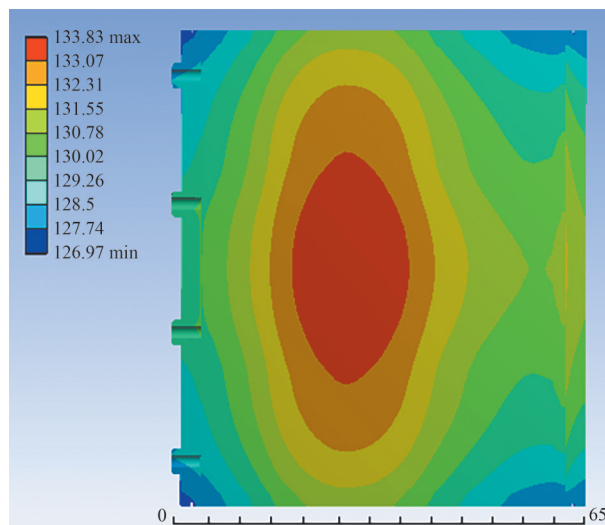


Fig.7 Temperature distribution of collector
图7 收集极温度分布图

- Xixian,TANG Kangsong. Study and application of electron velocity distribution at the entrance of multistage depressed collector[J]. Journal of Microwaves, 2010,8(4):475–477.
- [8] 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(8):083001. (WANG Liuya,DING Haibing. Design of depressed collector for Ka-band extended interaction klystron[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020,32(8):083001.) DOI:10.11884/HPLPB202032.200093.
- [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(10):103002. (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.) DOI:10.11884/HPLPB201729.170144.
- [10] 陈招子,陈洪斌,马乔生,等. D 波段行波管三级降压收集极的设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020,18(5):766–770. (CHEN Zhaozi,CHEN Hongbin,MA Qiaosheng,et al. Design of three-stage depressed collector for D-band TWT[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020,18(5):766–770.) DOI:10.11805/TKYDA2019258.
- [11] 姚列明,杨中海,李斌,等. 行波管收集极的热分析[J]. 强激光与粒子束, 2006,18(1):97–100. (YAO Lieming,YANG Zhonghai, LI Bin,et al. Thermal analysis of TWT collector[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006,18(1):97–100.)

作者简介:

孙 然(1997–), 女, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为短毫米波行波管 .email:ransun_china@163.com.

杨金生(1968–), 男, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向为行波管、磁控管及正交场放大器.

纪焕丽(1988–), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为短毫米波行波管的研制.

蔡 军(1978–), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为短毫米波和太赫兹真空电子器件.

冯进军(1966–), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为短毫米波和太赫兹真空电子器件.

(上接第 730 页)

- [31] HOWARD A,SANDLER M,CHU G,et al. Searching for mobilenetv3[DB/OL]. (2019–11–20)[2023–11–10]. <https://arxiv.org/abs/1905.02244>.
- [32] MA Ningning,ZHANG Xiangyu,ZHENG Haitao,et al. ShuffleNetv2:practical guidelines for efficient CNN architecture design[C]// Proceedings of the European Conference on Computer Vision(ECCV). Cham:Springer, 2018:116–131. DOI:10.1007/978–3–030–01264–9_8.

作者简介:

王淑杰(1998–), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为无损检测 .email:wangsj0516@163.com.

李向东(1976–), 男, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为感测、传感器.

朱东胜(1996–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为无损检测.

徐 丽(1983–), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为嵌入式软件开发、感测技术.

柴 玫(1975–), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为毫米波雷达天线设计与算法.

杨秀蔚(1987–), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为雷达信号处理、太赫兹无损检测.