

文章编号: 2095-4980(2022)05-0419-05

E 波段 81~86 GHz 行波管放大器研制

谢青梅, 刘世硕, 陈焯飞, 吴玉娟, 高文雷, 字张雄, 蔡 军, 冯进军

(中国电子科技集团公司第十二研究所 微波电真空器件国家重点实验室, 北京 100015)

摘 要: 介绍了一种面向高速无线通信应用的 E 波段连续波行波管放大器(TWTA)。该放大器将 E 波段折叠波导行波管和小型化高压电源集成于一体, 外部仅需低压供电, 使用便捷。放大器主要性能指标包括: 工作频率 81~86 GHz, 饱和输出功率 >80 W, 小信号增益 >38 dB, 总效率 >22%, 外形尺寸为 38 cm × 20 cm × 6.3 cm, 可满足机载使用环境, 具有大功率、宽带、高效率、小型化及高可靠的优点。

关键词: E 波段; 通信; 行波管放大器

中图分类号: TN124^{+.2}

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021050

Development of E-band 81~86 GHz Traveling Wave Tube Amplifier

XIE Qingmei, LIU Shishuo, CHEN Zhaofei, WU Yujuan, GAO Wenlei,
ZI Zhangxiong, CAI Jun, FENG Jinjun

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

Abstract: An E-band continuous wave Traveling Wave Tube Amplifier(TWTA) for communication is presented. The TWTA integrates the E-band folded waveguide traveling wave tube with the miniaturized high-voltage power supply. It can be powered by low voltage supply in the outer part. The main properties of TWTA include operating frequency 81~86 GHz, saturated output power >80 W, small signal gain >38 dB, total efficiency >22%, size of 38 cm × 20 cm × 6.3 cm and airborne environmental adaptability. The TWTA bears the advantages of high power, high efficiency, miniaturization, and high reliability.

Keywords: E-band; communication; Traveling Wave Tube Amplifier

高速无线通信技术蓬勃发展, 用户对数据传输速率的需求急剧增长(第 5 代(5th Generation, 5G)移动通信峰值传输速率将达到 20 Gbps), 根据香农定理, 增加带宽是提高通信速率最根本的途径, 传统微波频段受带宽限制, 难以支撑高速率需求, 而毫米波频段存在丰富的带宽资源, 可以实现 10 Gbps 以上的传输速率^[1]。E 波段覆盖 60~90 GHz, 其中 71~76 GHz、81~86 GHz 两个子频带是 ITU 规定的通信用频段, 是最先有可能实现通信应用的短毫米波频段^[2]。E 波段行波管具有大功率、高效率的突出优势, 在未来高速无线通信领域具有重要的应用前景。本文介绍了微波电真空器件国家重点实验室研发的一种通信用 E 波段行波管放大器, 该放大器将 E 波段行波管和高压电源集成在一起, 发挥行波管大功率、高效率优势的同时具有良好的使用便捷性。本文对放大器技术方案及性能指标进行了详细阐述。

1 TWTA 技术方案

TWTA 主要组成包括 E 波段行波管和小型化集成电源(Integrated Electronic Power Component, IEPC), 如图 1 所示, 行波管提供宽带、高功率射频(Radio Frequency, RF)输出, 集成电源将外部提供的低压转换为行波管所需的各极高压, 通过控制信号实现高压电源的启动与关断, 并为整个模块提供控制保护^[3]。

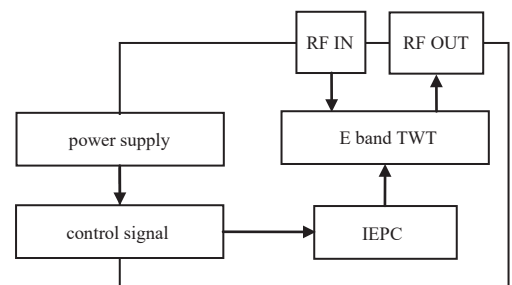


Fig.1 Schematic of TWTA
图 1 TWTA 组成示意图

1.1 E 波段行波管

E 波段行波管主要组成包括电子枪、聚焦系统、慢波结构及收集极，采用如下技术方案：

1) 电子光学系统：电子枪产生高能电子注，由聚焦系统维持其在细长通道内低脉动传输。采用聚焦极控制的皮尔斯电子枪获得层流性良好的电子注。采用周期永磁 (Periodic Permanent Magnet, PPM) 聚焦，选用 2:17 型烧结钕钐磁钢以得到高的磁性能和较低的温度系数，磁场强度为 1.5~1.8 倍布利渊磁场。电子光学系统仿真结果如图 2 所示，电子注实现了良好聚焦，脉动低，仿真流通率为 100%，实测动态流通率可达 97.5% 以上。

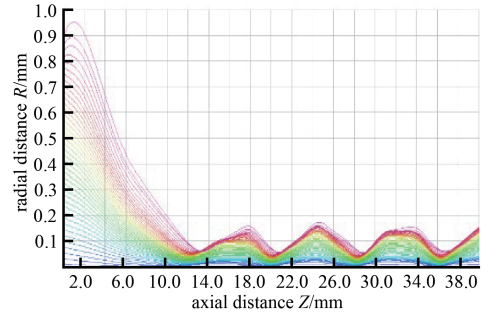


Fig.2 Simulation of electronic optical system
图2 电子光学系统仿真结果

2) 慢波系统：作为电子注和电磁波交换能量的核心场所，采用全金属折叠波导慢波结构，具备功率容量大及加工可实现性好等优点。冷特性设计上，为充分利用下截止频率附近耦合阻抗高的优势，将中心频率相移取为 1.35π ，通过优化结构参数，获得较为平坦的色散曲线和较高的耦合阻抗。此外，设计的同步电压远离上截止频率，从而避开止带振荡，色散特性如图 3 所示。相互作用计算时，利用微波管模拟器套装优化相速跳变方案，着重提高电子效率的同时兼顾副特性指标，设计结果显示，81~86 GHz 范围内输出功率大于 100 W，电子效率大于 6%，各频点输入输出功率转换曲线如图 4 所示，线性区范围较大。最后通过 CST 进行精确注-波相互作用模拟，确认设计方案^[4]。

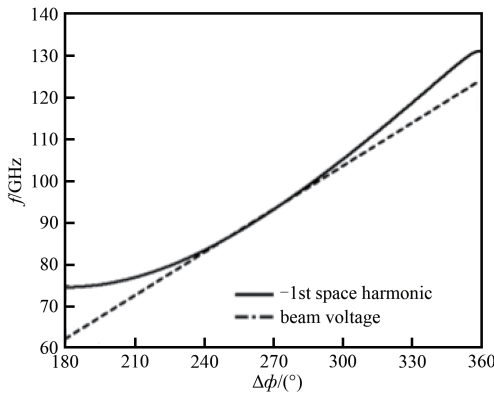


Fig.3 Dispersion curve of Slow Wave Structure(SWS)
图3 色散特性

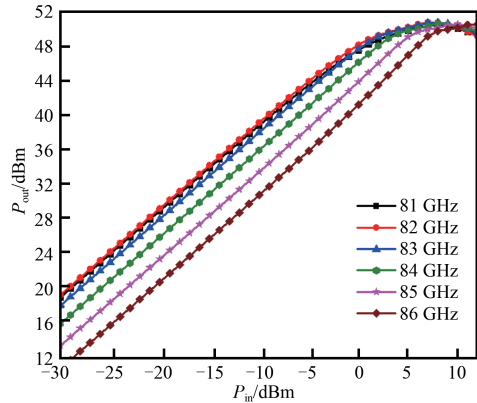


Fig.4 Transfer curves
图4 转换曲线

3) 输能系统：采用成熟的金刚石盒型输能窗，可在宽频带内实现良好匹配和低损耗传输，81~86 GHz 频带内实测驻波比优于 1.2，传输损耗小于 0.5 dB，射频接口为标准 WR10 波导。

4) 收集极：利用 MTSS 软件开展了两级收集极设计，两个电极电位的降压幅度分别达到了 80%、86%，这类用于短毫米波行波管的收集极具有降压幅度大的特点，称为深度降压。利用深度降压最大程度提高回收的电子能量，同时采取非轴对称电极有效抑制了返流，收集极效率达到 90% 左右，如图 5 所示，有利于提升总效率并降低行波管热耗。

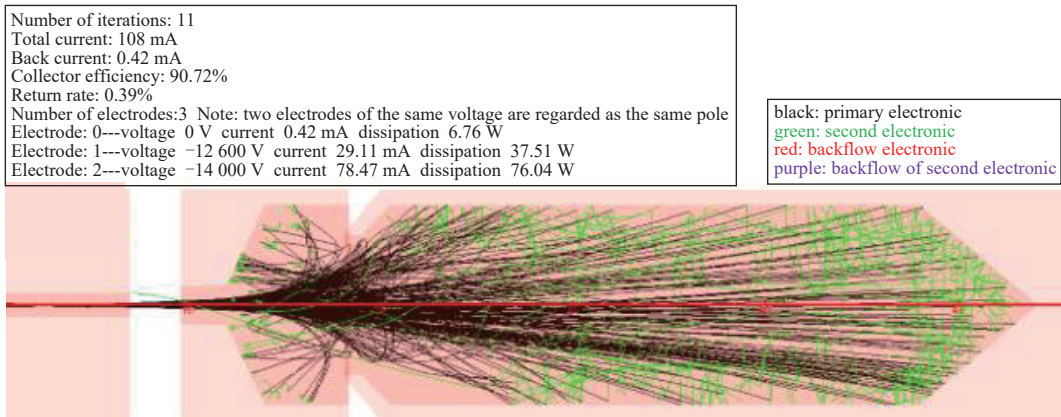


Fig.5 Electron trajectory of multistage depressed collector (@86 GHz)
图5 收集极 MTSS 电子轨迹仿真结果(@86 GHz)

1.2 小型化集成电源

集成电源用于提供行波管各极电压，包括阴极电压、收集极电压、灯丝电压和聚焦极电压等。各电源采用独立模块结构设计，便于通用性及维修性。集成电源主功率电路采用全桥拓扑结构，原理框图如图 6 所示。

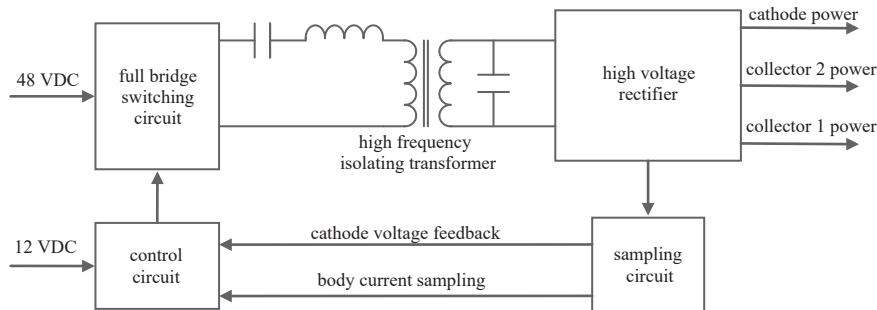


Fig.6 Block diagram of IEPC's main power circuit
图 6 集成电源主功率电路框图

主功率电源采用软开关技术，可以大幅减少开关管的功耗，提高转换效率，降低噪声的产生。采用高性能变压器磁芯制作高频隔离变压器，可以提高开关频率，缩小变压器体积，易实现小型化，同时可减少绕组匝数，有利于改善变压器的分布电容，提高变压器的性能。高压整流部分采用多倍压串联馈电技术，该技术可以大幅度减小变压器初级、次级匝比，减少次级匝数，从而减小变压器尺寸以及分布电容等寄生参数，适用于高电压低电流的场合，是实现电源小型化设计的关键技术。通信应用对射频信号频谱要求较高，杂散是其中重要指标之一，杂散与阴极电源的稳定度和纹波有着密切关系，阴极电压纹波小，则射频输出信号频谱的杂散也小。采用有源滤波技术，有效降低阴极电压纹波，将纹波电压从 10 V 降至 2 V 以内。

1.3 放大器可靠性分析优化

考虑到 E 波段 TWTA 未来潜在的应用场景，利用 Ansys 有限元分析软件开展热力学仿真，对 TWTA 的环境适应性进行分析验证。热分析中，集成电源热耗功率低，散热压力较小，而行波管射频输出大于 80 W，两级降压收集极总功耗仍可达 230 W，散热问题突出，因此将行波管作为热学仿真的重点。优化前温度分布仿真结果如图 7 所示，输能窗及收集极处形成了局部高温中心。通过采取增加高导热介质、辅助强迫风冷等措施，能够有效降低接触热阻，提高热导率。Ansys 热分析优化时，重新设置了材料的接触热阻、热导率等参数，得到如图 8 的优化后行波管温度分布云图，可见收集极最高温从 95.8 °C 降至 64.3 °C，输能窗最高温从 114 °C 降至 57 °C，行波管散热性能得到较大改善。

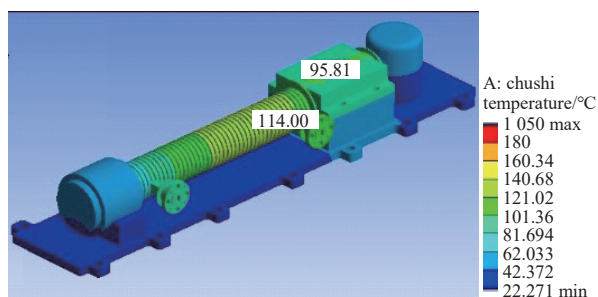


Fig.7 Temperature field distribution before optimization
图 7 优化前温度分布云图

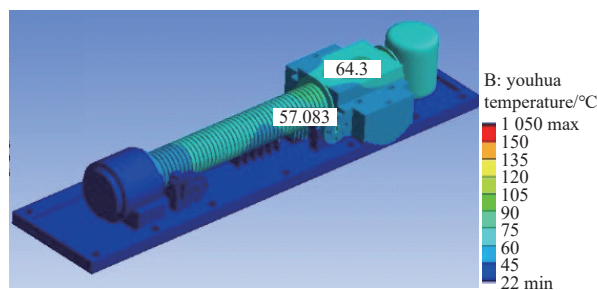


Fig.8 Temperature field distribution after optimization
图 8 优化后温度分布云图

此外，针对机载使用环境，对放大器进行了模态和随机振动仿真，验证其力学可靠性。模态分析结果显示 TWTA 前 6 阶模态固有频率均高于 2 000 Hz，在典型机载条件规定的 10~2 000 Hz 频率激励下不会产生谐振。在模态分析的基础上加载功率谱密度作为振动载荷进行随机振动分析，作为核心部件的电子枪及慢波结构的最大形变量仅 0.015 mm，放大器整体最大形变位于外壳，形变量仅 0.025 mm，不会对放大器电性能造成影响，结构强度满足机载环境使用需求。目前，同类型放大器结构已通过机载环境试验，印证了 E 波段 TWTA 的机载可靠性。

2 TWTA 性能指标

目前已完成 E 波段 TWTA 的集成及测试工作, 实物如图 9 所示, 外形尺寸为 $38\text{ cm}\times 20\text{ cm}\times 6.3\text{ cm}$, 质量 6.5 kg , 接口包括直流电源供电口 J30J21ZKP 及输入/输出 WR10 射频接口。

图 10~12 给出了 E 波段 TWTA 主特性指标的测试结果, 包括输出功率、小信号增益、直流功耗及效率。由图中可以看出, $81\sim 86\text{ GHz}$ 频带内, TWTA 饱和输出功率达到 80 W 以上, 小信号增益大于 38 dB , 功耗小于 372 W , 总效率达到 22% 以上。



Fig.9 Physical map of E-band TWTA
图 9 E 波段 TWTA 实物图

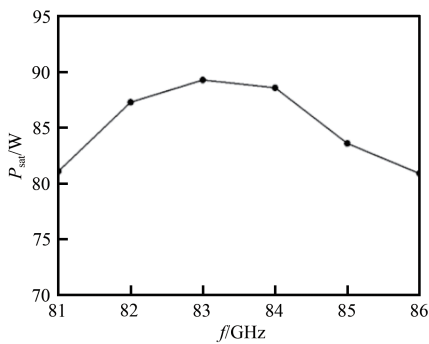


Fig.10 Saturated output vs. frequency
图 10 输出功率-频率曲线

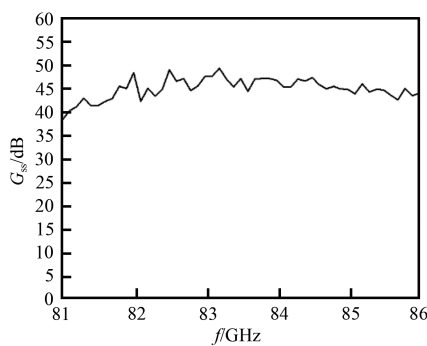


Fig.11 Small signal gain vs. frequency
图 11 小信号增益-频率曲线

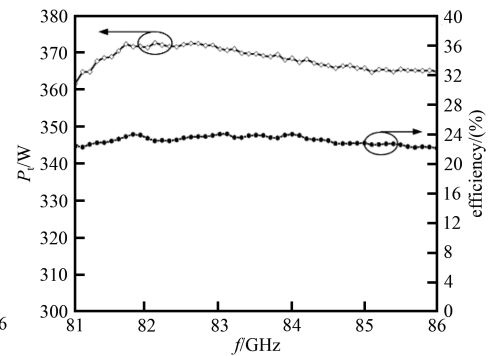


Fig.12 DC supply and efficiency vs. frequency
图 12 直流功耗及效率-频率曲线

TWTA 在信号放大过程中容易产生非线性失真, 从而导致通信质量降低。调制阶数越高, 对功放的线性度要求也越高, E 波段 TWTA 面向高速无线通信应用, 应具备良好的线性水平。衡量线性度的指标主要包括: 调幅/调幅 (AM/AM)、调幅/调相转换 (AM/PM) 和三阶互调 (Third-order Intermodulation, IMD3) 等。基于此, 对 E 波段 TWTA 副特性也展开了测试。通过各频点 AM/AM 曲线获取相应的 -1 dB 压缩点输出功率 (P_{-1}), 图 13 所示的 P_{-1} 设计和实测曲线具备相同的趋势, 均随频率升高而增大, 设计值偏大是由于慢波结构损耗设置值偏小造成的, 频带内的实测 P_{-1} 大于 26 W 。图 14 给出了 TWTA 在输入回退 9 dB 条件下的 IMD3 设计与测试曲线, 频带内三阶互调实测优于 -17 dBc , 设计与测试结果符合较好。

测试及老炼过程中, 对 E 波段 TWTA 进行红外热成像测量, 图 15 显示出热量最为集中的收集极最高温度为 $63.6\text{ }^\circ\text{C}$, 与图 8 所示仿真结果符合较好, TWTA 整体工作温度处于安全范围。E 波段 TWTA 能够满足连续波长长时间工作的需求, 表现出良好的稳定性。

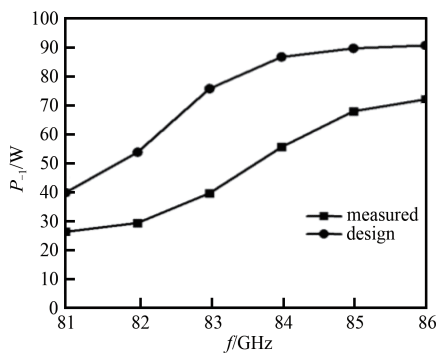


Fig.13 Output vs. frequency for -1 dB compressed
图 13 在 -1 dB 压缩点的输出功率-频率

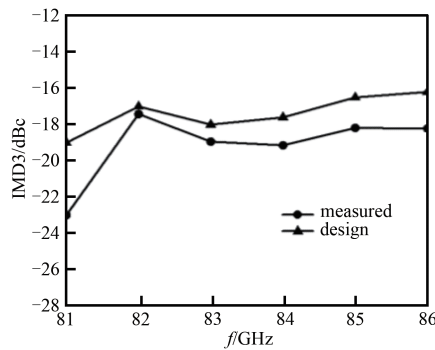


Fig.14 IMD3 vs. frequency
图 14 三阶互调-频率曲线

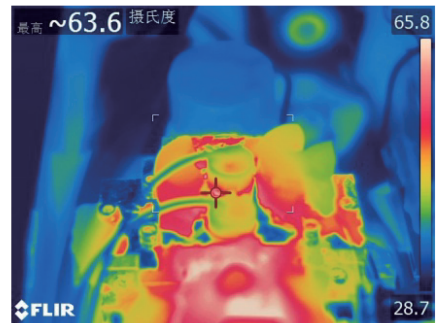


Fig.15 Thermal imaging of TWTA
图 15 TWTA 热成像结果

该 TWTA 与国外代表最高水平的 L3 公司 E 波段微波功率模块 (MPM)^[5] 主要指标对比如表 1 所示, 总体处于同一水平。

已与合作单位联合开展基于上述 E 波段 TWTA 的无线通信试验, 室内测试中采用 QPSK, 16QAM, 64QAM 三种调制信号, 分别实现了 3.3 Gbps , 6.6 Gbps 及 10 Gbps 的传输速率, 同等信噪比下折算的等效传输距离不小于 10 km , 初步验证了基于 TWTA 的 E 波段高速无线通信的可行性。

表 1 E 波段 TWTA 与国外同类产品的主要指标对比
Table 1 Indexes comparison between TWTA and L-3 MPM

parameters	BVERI	L-3
frequency/GHz	81~86	81~86
saturation output/W	≥80	≥100
efficiency	22%~24%	20%~35%
IMD3 (IBO 9 dB)/dBc	-17	—
supply voltage	270 VDC	28 VDC
power consumption @max/W	372	500
duty cycle	CW	CW
size	38 cm×20 cm×6.3 cm	37.6 cm×23.1 cm×8 cm
mass/kg	6.5	8
environmental adaptability	airborne	airborne

3 结论

本文介绍了一种面向通信应用的 E 波段行波管放大器，工作频率 81~86 GHz，可提供 80W 以上的饱和输出功率，26 W 以上的 -1 dB 压缩点输出功率，总效率大于 22%，三阶互调小于 -17 dBc(输入回退 9 dB 时)，外形尺寸 38 cm×20 cm×6.3 cm，质量 6.5 kg。目前，基于该 TWTA 的 E 波段无线通信已完成初步试验，下一步将根据试验结果进行性能提升，以满足未来高速无线通信系统对核心功率源的需求。

参考文献：

- [1] COLOMBO C, CIRIGLIANO M. Next-generation access network: a wireless network using E-band radio frequency(71~86 GHz) to provide wideband connectivity[J]. Bell Labs Technical Journal, 2011, 16(1): 187-205.
- [2] SUNDEEP R, THEODORE S, ERKIP E, et al. Millimeter-wave cellular wireless networks: potentials and challenges[J]. Proceedings of the IEEE, 2014, 102(3): 366-385.
- [3] 张志伟, 王斌, 王凤岩. 浅谈 MPM 发展趋势[J]. 电子信息对抗技术, 2018, 33(1): 69-72. (ZHANG Zhiwei, WANG Bin, WANG Fengyan. Brief discussion on MPM development trend[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2018, 33(1): 69-72.)
- [4] ZI Z, LIU S, XIE Q, et al. A 70 W 81~86 GHz E-band CW travelling wave tube[C]// 2019 International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Busan, Korea(South): [s.n.], 2019: 1-2.
- [5] KOWALCZYK R, ZUBYK A, MEADOWS C, et al. High efficiency E-band MPM for communications application[C]// 2016 IEEE International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Monterey, CA, USA: IEEE, 2016: 1-2.

作者简介：

谢青梅(1992-), 女, 安徽省桐城市人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为 E 波段行波管放大器研制 .email: xqmbit@sina.cn.

陈焯飞(1995-), 男, 北京市人, 学士, 工程师, 主要研究方向为行波管放大器研制.

高文雷(1986-), 男, 北京市人, 学士, 工程师, 主要研究方向为行波管功率放大器、集成电源研制.

蔡军(1978-), 男, 河北省唐山市人, 博士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为 W 波段行波管和太赫兹真空电子器件研制.

刘世硕(1989-), 男, 江苏省连云港市人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为 E 波段折叠波导行波管研制.

吴玉娟(1992-), 女, 山东省莱芜市人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为 E 波段行波管研制.

字张雄(1976-), 男, 云南省大理市人, 硕士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为大功率行波管、短毫米波行波管研究.

冯进军(1966-), 男, 山西省运城市人, 博士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为真空电子学、微波电子学、等离子体电子学、MEMS 技术、太赫兹真空电子学、高频集成真空电子学等.