

# W 波段折叠波导慢波结构设计及三维注波互作用模拟

蔡 军, 冯进军, 廖复疆, 黄明光, 鄢显平

(中国电子科技集团公司第 12 研究所大功率微波电真空器件技术国防科技重点实验室, 北京 100016)

**摘 要:** 本文综合分析了折叠波导的几何尺寸和电子束参数, 运用电磁场软件 MAFIA 的粒子模拟程序对三维折叠波导慢波结构进行了模拟. 模型中, 电磁波通过波导模式导入; 为了克服较大空间电荷效应造成的电子注发散, 使用了纵向聚焦磁场. 基于三维互作用模型得到了 W 波段折叠波导的模拟结果, 该结果可以对折叠波导慢波结构的三维互作用性能进行预测和分析.

**关键词:** 折叠波导; 慢波结构; MAFIA; 三维互作用模拟; 行波管

**中图分类号:** TN124      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2006) 12A-2342-05

## Design and Three-Dimensional Beam/Circuit Interaction Simulation of W-Band Folded Waveguide SWS

CAI Jun, FENG Jir jun, LIAO Fur jiang, HUANG Ming guang, WU Xiarr ping

(Vacuum Electronics National Laboratory, Beijing Vacuum Electronics Research Institute, Beijing 100016, China)

**Abstract:** The geometrical and beam parameters were specified by synthetical analysis in the paper. Using MAFIA PIC code, 3-D Folded Waveguide Slow Wave Structure was simulated. In the model, electromagnetic wave was introduced by waveguide mode; axial constant magnetic field was added to confine electron beam to avoid divergence caused by space charge effect. Based on interaction model, simulation results of W-band Folded Waveguide were derived, which could be the criterion of predicting and analyzing interaction circuit characteristics.

**Key words:** folded waveguide; slow wave structure; MAFIA; 3D interaction simulations; TWT

### 1 引言

真空电子器件从诞生以来, 已经有百年的历史, 技术基本成熟, 已经成为国防装备和国民经济各部门中一类重要的电子器件. 虽然半导体器件逐步取代了低频段和中小功率的微波管, 但真空电子器件在频率和功率方面的前景和潜力是显而易见的. 其中行波管放大器在许多领域的应用不可缺少, 例如雷达、卫星通信和电子对抗系统等<sup>[1]</sup>. 真空电子器件的频率正在逐渐扩展到毫米波(30GHz~300GHz)频段<sup>[2]</sup>, 在毫米波雷达、卫星通信、电子战和精确制导技术等应用中要求更高的频率和更宽的带宽, 这为毫米波真空电子器件的发展带来新的挑战与机遇. 对于真空电子器件, 高频率意味着更小的相互作用电路尺寸, 传统的常用慢波结构一般通过机械加工和手工装配. 在毫米波频段, 一般的螺旋线行波管存在功率输出和散热能力不足等问题. 传统耦合腔行波管虽然可获得高功率输出, 但带宽受到限制. 折叠波导慢波电路在毫米波功率容量较大,

同时具有较宽的带宽, 其优点还包括全金属结构、输能结构简单、刚性好以及良好的散热能力等<sup>[3]</sup>, 尤其与微机电系统技术(MEMS)的兼容可以实现微小尺寸折叠波导电路可靠、精确、高重复性的加工制造. 微加工技术制作的微小尺寸射频电路能够避免机械加工造成的粗糙度、不规则性和相应的高频损耗等问题<sup>[4]</sup>. 目前, 应用最新的微加工技术, 以折叠波导慢波结构为基础的微型真空电子器件( $\mu$ VED), 作为毫米波或亚毫米波源的小型器件已经成为真空电子学中重要的研究领域之一<sup>[5]</sup>, 作为一个新兴的研究领域, 目前的工作大都集中于理论分析、模拟研究以及工艺制造上.

电磁软件 MAFIA 的 TS3 模块是三维粒子程序, 在直角坐标系中它可以时域求解自治的麦克斯韦方程和运动方程, 自动考虑电荷运动所产生的场、空间电荷效应以及磁场力, 模拟精度得到了真空电子学领域实验的验证<sup>[5-7]</sup>. 本文首先对 W 波段折叠波导的几何参数和电子注参数进行了综合设计, 然后利用 MAFIA 建立了 W 波段折叠波导的三维互作用模型, 对

模型注波相互作用进行了三维仿真, 模拟的结果将指导电路的设计、优化和实际的工艺。

## 2 综合设计

折叠波导的几何结构如图 1 所示, 其中  $a$  和  $b$  分别为折叠波导的宽边和窄边长,  $p = 2 \times R_{avg}$  表示半几何周期长,  $l_0$  和  $l_1$  分别为直波导和弯曲波导的长度,  $r_c$  为电子注通道半径。

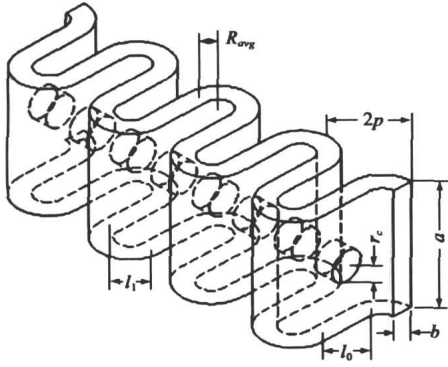


图 1 折叠波导示意图以及几何参数

折叠波导的冷参数特性的模拟是折叠波导几何参数和电子注参数综合设计的基础。利用 MAFIA 模拟了 W 波段折叠波导慢波结构的冷特性参数, 主要包括色散特性和轴线耦合阻抗。由于它们都是在后处理模块依据原始公式计算得到, 所以模拟方法对于其它的周期性慢波结构具有很好的通用性。如图 2 所示, MAFIA 冷参数的模拟值与相应理论值具有较好的一致性<sup>[8]</sup>。

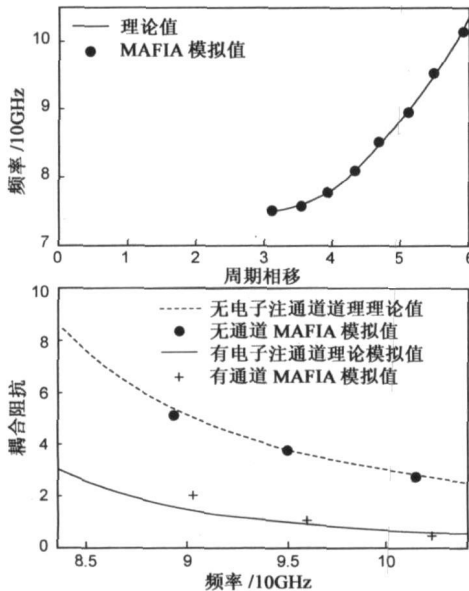


图 2 色散曲线和耦合阻抗模拟值与理论值比较

虽然三维的模型更接近于物理本质, 但是分析常常受到计算时间和内存空间的限制, 尤其在器件设计的初期, 需要快速获取计算结果, 可以采用简化的模型。设计初期可以使用参数化的模型进行综合设计。折叠波导的综合设计主要考虑了皮尔斯小信号理论(没有考虑慢波电路的衰减)、截止频率、耦合阻抗、同步条件等因素, 使用 MATLAB 软件编制了相应的综

合设计程序。综合设计的流程如图 3 所示。

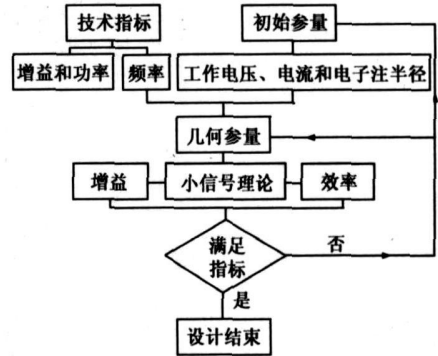


图 3 综合设计流程图

综合初步设计的几何参数结果如表 1 所示, 当工作电压、工作电流分别为 17kV 和 150mA, 相互作用区长度为四十九个几何周期时, 根据小信号参量近似估算相互作用效率为 4.58%, 相应的饱和功率为 117W。这

表 1 综合设计的几何参量

几何参数	$a$	$b$	$l_0^+$	$l_1$	$p$	$r_c$
尺寸/mm	2.0	0.3	1.9	0.7	0.24	

些参数将作为后续 MAFIA 三维注波相互作用模拟的初

## 3 MAFIA 三维相互作用模拟

### 3.1 MAFIA 模拟步骤及计算参数的选取

利用 MAFIA 按照综合设计的折叠波导几何尺寸分别建立十一个几何周期(图 4)、十六个几何周期、二十四几何周期和四十八个几何周期三维相互作用模型。



图 4 十一个周期折叠波导慢波电路三维相互作用几何模型

折叠波导慢波电路中, 与电子注相关参数的选取同样依照上述的综合设计。电子注与初始电磁场, 轴向聚焦磁场被同时加载。在入口处电子注近似为均匀发射, 无角向能量, 轴向能量均匀分布的情况; 在电磁场输入输出边界面, 端口加载了 TE<sub>10</sub> 波导模式, 并且近似为与足够长的矩形波导连接; 聚焦磁场为轴向的均匀磁场, 在模拟中聚焦磁场按上述综合设计选取为布里渊磁场的 1.5 倍<sup>[9]</sup>。

在 MAFIA TS3 模块中, 数值计算参数, 包括网格数目、宏粒子数目和监控时间范围的选取十分重要, 参数的设置应当平衡计算消耗(计算时间和计算内存空间)以及计算精度的关系。下面将分别对各参数进行讨论。

图 5 给出了选取不同网格数目时, 宏粒子数目对计算机精度的影响(二十四几何周期, 输入功率为 0.1W)。

如图 5 所示, 随着网格数目的不断增加, 计算结果逐渐趋于稳定, 但是计算时间则随着网格增加而增大。宏粒子数目参数的选取对计算精度的影响比较复杂, 在网格数目较小时宏粒子数目对结果精度有较大影响, 但是增大网格使计算结果

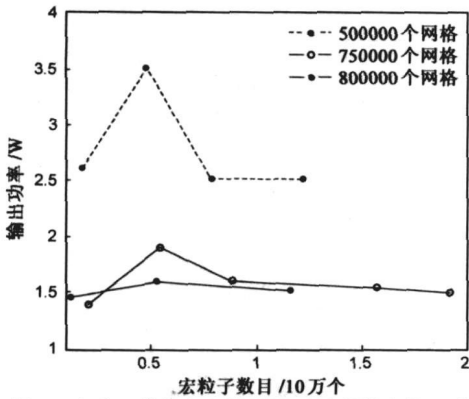


图 5 宏粒子数目与网格划分对计算精度的影响

比较稳定后, 宏粒子数目对输出结果影响减小。

宏粒子数目对于计算时间具有较大的影响, 在十一个几何周期模型中, 网格为  $1e5$  时在  $1 \times 10^{-9}$  秒内对电场强度进行监控所需的时间情况由下面表格给出 (Pentium4 2.60GHz CPU、256MB 内存)。

表 2 宏粒子数目对计算时间的影响

宏粒子数目	291597	5e5	1e6	2e6
计算时间/秒	1891	3900	7348	14307

监控时间的选取首先应当保证输出已经达到稳定, 但是过长的时间将造成没有意义的计算时间消耗。十一个几何周期模型时, 中心频率 94GHz, 输入功率为 0.1W 时, 图 6 给出了输出端口中心位置电场强度随时间变化的情况及其快速傅立叶分析。在输出端口中心位置电场强度要经过约  $1.8 \times 10^{-10}$  秒传输时间后出现微波激励, 之后是稳定前的振荡过程, 最终在约  $6 \times 10^{-10}$  秒后电场趋于稳定。对电场的快速傅立叶分析中可以看出, 输出信号的频率仍然集中在中心频率处, 因此十一个几何周期模型监控时间选择为  $1 \times 10^{-9}$  秒。

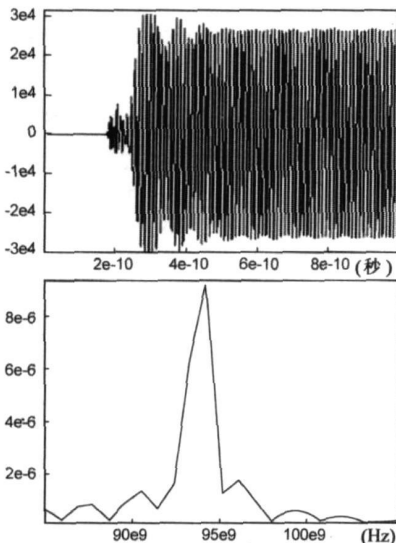


图 6 输出端口中心电场强度随时间变化图及其傅立叶变化

本文三维互作用模拟中, 各参数的选取均经过了上述分析的优化。

### 3.2 三维互作用小信号增益模拟

在 W 波段选取了几个频率点, 在等激励条件下 (输入功率为 0.1W), 模拟计算输出波导端口的微波功率, 最后分别得到十一个几何周期、十六个几何周期和二十四几何周期三维互作用模型的增益随频率变化的曲线, 如图 7 所示, 将 MAFIA 增益模拟值和皮尔斯小信号理论值进行比较后发现, 在输入功率较小、互作用尺寸较短的条件下三维互作用模拟值和皮尔斯小信号理论符合的较好。

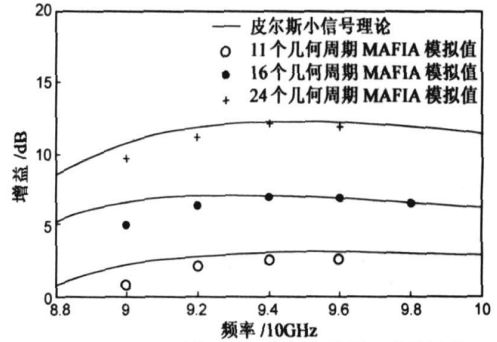


图 7 MAFIA 增益模拟值与小信号理论值比较

表 3 给出了中心频率处, MAFIA 增益模拟值与小信号理论值的相对误差情况。

表 3 中心频率 MAFIA 增益模拟值与小信号理论值的比较

几何周期	十一		十六		二十四	
	数值	误差	数值	误差	数值	误差
MAFIA 模拟值	2.55	17.74%	6.81	3.68%	12.04	1.79%
小信号理论值	3.1	—	7.07	—	12.26	—

### 3.3 三维注波互作用分析

对于四十八个几何周期的折叠波导行波管模型进行全面的模拟, 为了提高模拟的速度使用了 DELL 450 工作站。图 8 是初步综合设计后四十八个几何周期中心频率的功率特征曲线以及相应的增益图。

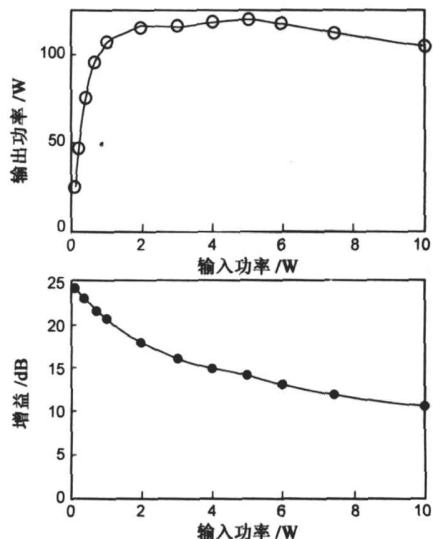


图 8 功率特征曲线以及相应的增益图

图 8 中, 输入功率小时增益大于输入功率大时增益, 在小

信号区域增益保持不变, 随后增益随输入功率的增大而减小。功率曲线中输出功率在经过一段线性增长以后逐渐过渡至饱和, 此时群聚中心处于行波场的拒斥场到加速场的交界位置, 饱和功率为 120W, 此时电子效率为 4.71%, 工作电压和工作电流分别为 17kV 和 150mA, 此时利用小信号参量估算互作用效率为 4.5%。当输入功率进一步增加, 群聚中心进入行波场加速区, 结果电子注从高频场中取得能量造成输出功率降低。在使用 MAFIA 对行波管的饱和特性的模拟过程中, 发现功率特征曲线对应的增益曲线趋势与实际情况有一些差异。虽然从整体上表明了整个的饱和过程, 但是还需要进一步深入研究, 以便做出合理的解释。

图 9 给出了四十八个几何周期折叠波导行波管慢波结构输出段部分在  $1.5 \times 10^{-9}$  秒时刻二维电子注与电磁场互作用的情况, 此时输入功率为 3W, 能够明显的观察到宏粒子的群聚现象, 插图为输出端口二维电场情况, 箭头的幅值以及方向分别代表了电场的强度与方向, 经过放大后输出端口 TE<sub>10</sub> 模式电场分布保持的仍然很好, 对输出端口电场进行的快速傅立叶分析表明, 输出端口电场的频率和输出信号的频率一致, 且频谱很好。

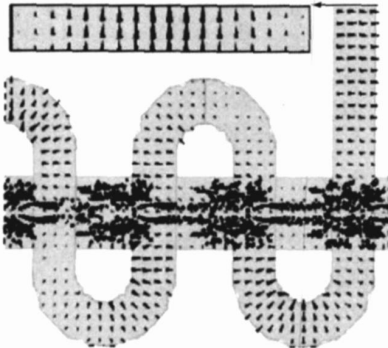


图 9 四十八几何周期模型输出段电子波束互作用图

在初步综合设计中, 曾经使用了小信号参量近似估计了输出功率设计指标, 由于小信号参量对效率分析的限制, 这种估计只能对初步设计起辅助作用。虽然能够快速得到计算结果, 但是不能保证很高的精度。因此, 输出功率、工作增益、带宽等大信号参数的精确模拟需要使用大信号理论进行数值分析。

图 10 给出的最大小信号增益电压优化曲线, 模拟对应等激励条件, 输入功率均为 0.4W, 工作电流为 150mA。

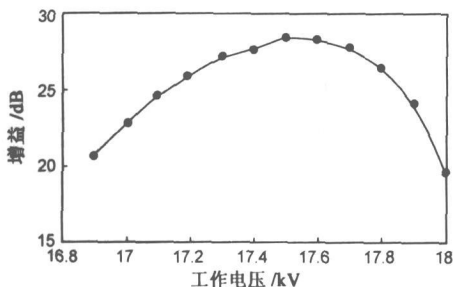


图 10 最大小信号增益电压优化曲线

以下计算均选取了最大小信号增益对应的工作电压

17.5kV, 工作电流为 150mA。图 11 给出了频率为 92GHz、94GHz 和 96GHz 时的功率特征曲线图。

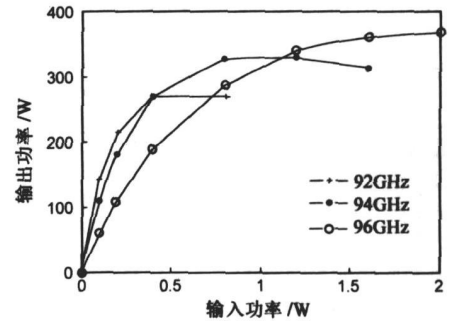


图 11 不同频率的功率特征曲线

不同频率曲线中, 达到饱和和输出功率对应的输入功率不同, 在输入功率等于 0.4W 时, 92GHz 功率特征曲线已经达到饱和, 94GHz 输入功率提高到 0.8W 时输出功率达到饱和, 而 96GHz 直到输入功率提高到 1.6W 时, 输出功率才达到饱和。92GHz、94GHz 和 96GHz 的饱和功率分别为 271W、329W 和 366W。经过工作电压的优化后, 中心频率饱和和输出功率提高到 329W, 此时对应的互作用效率达到了 12.2%。分析大信号模拟结果时, 发现 MAFIA 的互作用效率模拟值大于理论分析结果, 分析后认为可能是由于考虑到计算时间因素, MAFIA 计算参数的选取对计算精度产生了一些影响, 另外利用小信号参量近似估算互作用效率和实际难免会有一些误差, 差异存在的具体原因以及长相互作用区的计算参数的优化工作将在后续工作中开展。

图 11 中大信号模拟结果显示, 低频率的饱和功率小于高频率时的饱和功率, 这是因为工作电压的选择依据为获得中心频率的最大小信号增益。如果希望提高低频率时的输出功率值, 降低高频率输出功率值, 需要增加工作电压。随着工作电压的提高, 中心频率的饱和输出功率逐渐增大, 而小信号增益逐渐减小。直到电压增加到 17.65kV, 中心频率的饱和输出功率达到最大值。另外, 在模拟过程中忽略了损耗, 而折叠波导慢波结构的高频损耗随着频率的升高而升高, 这也是模拟中高频段输出功率较高的原因之一。

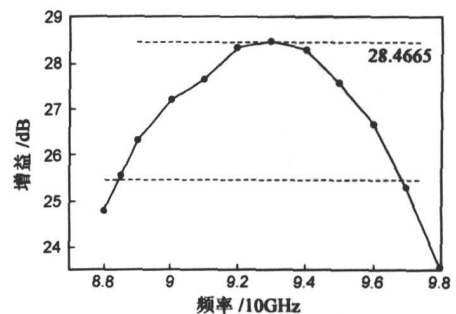


图 12 3dB 瞬时带宽图

在工作电压为 17.5kV、工作电流为 150mA、输入功率等于 0.4W 的时候, 图 12 给出了瞬时带宽随频率的变化曲线。图中 3dB 的瞬时带宽约为 9%, 覆盖了从约 88.5GHz~97GHz 的频率范围。折叠波导慢波结构的色散特性决定了对于一定的工

作电压,只有在一定频率范围内电磁波才满足同步条件,即使相速随频率变化不大,由于在低频端沿慢波结构的导波波数减小,而在高频端电磁场耦合阻抗很小以及损耗较大,这些都导致增益下降.在实际中,由于输入/输出耦合器匹配以及管内反射等原因,增益曲线远非光滑,而是带有不规则的波动,实际工作带宽要比模拟带宽窄.

为了能够为实际制管提供更有用的仿真工具,下一步将进行包括切管的折叠波导行波管的设计和三维注波互作用模拟.

#### 4 结论

本文对 W 波段折叠波导慢波结构的几何结构和电子注参数进行了综合优化设计,利用 MAFIA 建立了全三维折叠波导互作用模型.模拟中,数值计算参数需要在计算消耗和计算精度之间进行优化.文中分别模拟了十一、十六和二十四几何周期折叠波导的增益,与小信号理论符合的较好.最后模拟了四十八几何周期折叠波导输入输出功率特征曲线,在选取优化后的工作电压和工作电流的条件下,模拟显示在 94GHz 饱和输出功率为 120W,对应的电子效率为 4.71%.在初步设计的基础上进行了工作电压优化,具有最大小信号增益的工作电压为 17.5kV.对于不同频率分别得到了功率特征曲线,结果显示 92GHz、94GHz 和 96GHz 的饱和输出功率分别为 271W、329W 和 366W,达到饱和状态所需的输入功率分别为 0.4W、0.8W 和 1.6W;在等激励条件下,当输入功率为 0.4W 时,瞬时带宽达到 9%,覆盖了从约 88.5GHz 到 97GHz 的频率范围,在 93GHz 得到最大输出功率为 281W.三维互作用模型的建立与发展是行波管整管三维模拟的重要组成部分,对提高器件性能起着关键的辅助作用,同时也为整管的三维设计奠定了基础.

#### 参考文献:

- [1] 廖复疆,吴固基.真空电子技术—信息装备的心脏[M].北京:国防工业出版社,1999.8-15.
- [2] George Caryotakis. Trends in microwave tube technology and markets past and future[A]. IVEC Tech Dig[C]. Seoul, Korea, May 2003. 1.
- [3] G Dohler, D Gagne, D Gallagher, R Moats. Serpentine waveguide TWT[A]. IEDM Tech Gig[C]. 1987. 485-488.

- [4] J H Booske. New opportunities in vacuum electronics through the application of microfabrication technologies [A]. IVEC Tech Dig[C]. California, USA, April 2002: 11-12.
- [5] Sudeep Bhattacharjee, J H Booske, Carol L Kory, et al. Folded waveguide traveling wave tube sources for terahertz radiation [J]. IEEE Trans on Plasma Science, 2004, 32(3): 1002-1014.
- [6] Carol L Kory. Investigation of full three dimensional helical RF field effects on TWT bea/ circuit interaction[J]. IEEE Trans on EDs, 2001, 48(8): 1718-1726.
- [7] John H Booske, Mark C Converse, Carol L Kory, et al. Accurate parameteric modeling of folded waveguide circuits for millimeter wave tubes[J]. IEEE Trans on EDs, 2005, 52(5): 685-694.
- [8] Jun Cai, Jinjun Feng, Bingyan Li, Fujiang Liao. Analysis of W-band folded waveguide slow-wave structure[A]. MAPE2005 [C]. 2005. 740-743.
- [9] 中小功率行波管设计手册[M].北京:北京电子管设计手册编委会,1976.210-212.

#### 作者简介:



蔡 军 男,1978 年出生于河北省唐山市,2006 年获山东大学无线电物理博士学位.现主要从事毫米波行波管的研究.  
E-mail: caijun@sdu.edu.cn

冯进军 男,1966 年出生,研究员,博士生导师,目前为大功率微波电真空器件技术国防科技重点实验室副主任,进行真空微电子、微波管 CAD、大功率微波电真空器件技术、微型真空电子器件技术的研究工作.先后主持了多项军事电子基金项目、预先研究项目和国家自然科学基金项目,已在国内外期刊和学术会议上发表论文 60 余篇.

廖复疆 男,研究员,1937 年 12 月生于江西,主要从事真空电子学和真空微电子器件研究.他是中国电子学会理事、IEEE 高级会员、IEEE 电子器件学会北京分部主席.出版“真空电子学”专著并发表有关微波电子学、真空微电子学、光控微波等方面的论文 100 余篇.