

W 波段多种槽加载折叠波导行波管的研究

彭 博^{*①②} 何 俊^① 黄明光^① 郝保良^① 刘濮鲲^①

^①(中国科学院电子学研究所高功率微波技术国防科技创新实验室 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100190)

摘 要: 该文提出了 3 种槽加载折叠波导行波管慢波结构: 三角形、梯形和燕尾形槽加载折叠波导。分析比较了不同槽形状对慢波结构的色散特性和耦合阻抗的影响。利用粒子模拟的方法对 W 波段 4 种槽加载折叠波导行波管的非线性注-波相互作用进行了研究; 在相同的电子注参数和输入功率的条件下, 对输出功率、电子效率和增益等参量进行了比较。在多种槽加载结构中, 梯形槽加载折叠波导输出功率(255 W)和增益(37.1 dB)最大, 电子效率最高(10.7%); 燕尾形槽加载折叠波导达到饱和所需要的互作用电路最短(64.2 mm); 三角形槽加载折叠波导的 3 dB 带宽最宽。

关键词: 行波管; 槽加载折叠波导; 高频特性; 注-波相互作用; 粒子模拟

中图分类号: TN124

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)07-1760-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.01219

Investigation of W-band Diverse-shaped Groove-loaded Folded Waveguide Traveling-wave Tubes

Peng Bo^{①②} He Jun^① Huang Ming-guang^① Hao Bao-liang^① Liu Pu-kun^①

^①(Key Laboratory of Science and Technology Innovation for High Power Microwave, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Three novel groove-loaded Folded Waveguide Slow-Wave Structures (FWSWS), which include triangle groove-loaded, trapezoid groove-loaded and swallow-tailed groove-loaded FWSWS, are analyzed for the purpose of improving beam-wave interaction. The high-frequency characteristics, including dispersion properties and interaction impedance, are investigated by numerical simulation, and the nonlinear large-signal performances of these Traveling Wave Tubes (TWTs), including output power, gain and electron efficiency, are also analyzed and compared by a 3-D particle-in-cell code MAGIC3D. Within the same beam parameters and input power, it is concluded from the comparison that: among these FWSWSs, the trapezoid groove-loaded FWSWS has the highest output power (255 W), saturated gain (37.1 dB), and electron efficiency (10.7%); The swallow-tailed groove-loaded FWSWS owns the shortest circuit length to obtain the saturated gain of which is 64.2 mm; the triangle groove-loaded FWSWS has the widest bandwidth.

Key words: Traveling Wave Tube (TWT); Groove-loaded folded waveguide; High frequency characteristics; Beam-wave interaction; Particle-in-cell simulation

1 引言

现代行波管已经成为雷达、电子对抗、卫星通信、导航、遥感等电子设备的重要微波电子器件。慢波结构作为行波管注-波相互作用以激励微波能量的部件, 是行波管的核心, 其性能直接决定着行波管的技术水平^[1]。折叠波导是一种新型的全金属慢波线, 其主要特点是功率容量大、宽带性能良好、机械强度高、散热好、加工比较容易以及输入输出耦

合结构相对简单^[2,3]。同时, 由于可以采用微细加工技术来制造, 折叠波导行波管在毫米波段具有很好的发展前景^[4-7]。但是常规折叠波导的低耦合阻抗限制了其输出功率, 由于每个周期增益较小, 电路长度相对来说会比较长。

为了解决常规折叠波导耦合阻抗过低导致输出功率较低的缺点, 脊加载折叠波导^[7]、变周期慢波系统^[8]、矩形槽加载折叠波导^[9]等慢波结构被相继提出。其中, 矩形槽加载折叠波导通过在折叠波导慢波结构中加载矩形槽, 增加慢波结构中相互作用区域的电场强度, 有效地提高折叠波导慢波结构的耦合

阻抗值, 为提高折叠波导行波管的增益值提供有效途径。本文在矩形槽加载折叠波导的基础上, 对槽的形状进行改变, 提出了 3 种新型的折叠波导慢波结构: 三角形、梯形和燕尾形槽加载折叠波导。

本文采用 3 维电磁仿真软件 Ansoft HFSS^[10]对 W 波段三角形、矩形、梯形和燕尾形槽加载折叠波导的高频特性进行了模拟, 比较不同槽形状对色散特性和耦合阻抗的影响。在高频特性模拟分析的基础上, 利用 3 维粒子模拟软件 MAGIC 3D^[11]建立了 4 种槽加载结构的注-波相互作用模型, 并对行波管中的高频场与电子注能量交换过程进行了模拟, 比较分析了 4 种结构行波管的输出功率, 电子效率和增益等参量。

2 多种槽加载折叠波导慢波结构高频特性的研究

慢波结构的高频特性对行波管的功率、效率与频带等特性都有着重要的作用。色散特性表征了波的相速与频率的关系, 耦合阻抗体现了注-波相互作用的强度。Ansoft HFSS 是一款基于电磁场有限元方法的 3 维电磁仿真软件, 可分析仿真任意 3 维无源结构的高频电磁场, 已经被应用于折叠波导慢波结构的高频特性设计和研究, 具有准确和高效的优点^[12,13]。本文采用 Ansoft HFSS 电磁模拟软件对多种槽加载折叠波导慢波结构的高频特性进行模拟。

图 1 是三角形槽加载折叠波导慢波结构示意图, 该结构是在常规折叠波导的每个弯曲处加上一个三角形槽, 使得电磁波能够存在于槽中。基波 TE₁₀ 模在曲折的慢波线里行进从而“变慢”, 电子注在通过矩形波导宽边中央的通道中直行, 在交汇处与变慢了电磁波进行相互作用, 从而实现电子注与高频场的能量交换。本文中, 三角形槽加载折叠波导的结构尺寸如下: 波导宽边长度 a 为 2 mm, 波导窄边长度 b 为 0.3 mm, 直波导高度 h 为 0.6 mm, 三角形上槽宽度 d_t 为 0.1 mm, 矩形槽高度 w 为 0.8 mm, 电子注通道半径 r_c 为 0.25 mm, 相互作用周期 p 为 0.6 mm。在三角形槽加载结构的基础上, 对比建立了矩形槽加载、燕尾形槽加载和梯形槽加载折叠波导的模型, 如图 2 所示, 各种槽结构的尺寸参数如表 1 所示。

2.1 色散特性

作为慢波结构高频特性的重要参量之一, 色散特性反映了电子与电磁波的相互作用同步条件, 其强弱主要取决于慢波系统的结构形状和尺寸。本文建立了矩形、三角形、梯形和燕尾形槽加载折叠波导的 3 维模型, 采用本征模求解方法, 设置准周期边

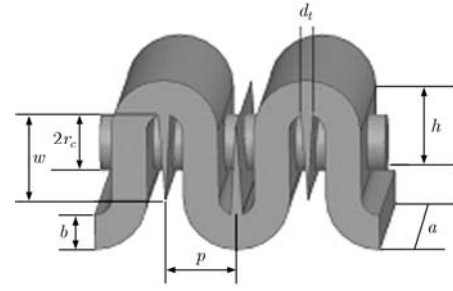


图 1 三角形槽加载折叠波导慢波结构

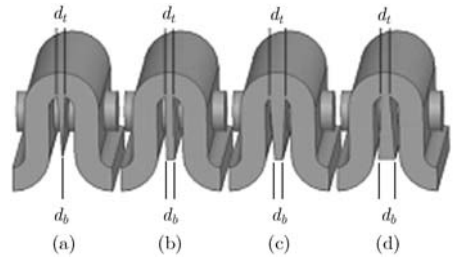


图 2 三角形(a)、矩形(b)、燕尾形(c)、梯形(d)加载折叠波导

表 1 4 种折叠波导模型物理尺寸

物理量(单位)	三角形	矩形	燕尾形	梯形
上槽宽度 d_t (mm)	0.1	0.1	0.2	0.1
下槽宽度 d_b (mm)	0.0	0.1	0.1	0.2

界条件, 通过参数扫描的途径获得不同相移对应的工作频率, 从而得到频率-相移色散曲线。归一化相速度随频率变化曲线为

$$\frac{v_p}{c} = \frac{\omega}{\beta c} = \frac{\omega \cdot p}{\beta \cdot p c} = \frac{2\pi f \cdot p}{\Delta\phi \cdot c} \quad (1)$$

其中 ω 是电磁波的角速度, f 为电磁波的频率, β 是电磁波的相位常数, c 为光速, p 为周期长度, $\Delta\phi$ 为相位差。

图 3 是通过 Ansoft HFSS 软件仿真计算出的三角形槽加载折叠波导的色散特性。定义 75.5 GHz~114.6 GHz 为模式 1, 121 GHz~138 GHz 为模式 2。模式 1 和模式 2 之间存在大约 7.4 GHz 的禁带, 故在模式 1 下工作时不会引起返波振荡和带边振荡。矩形、燕尾形和梯形槽加载结构的色散同三角形槽加载结构类似。

图 4 和图 5 是相同槽宽度和槽深度条件下 4 种槽加载折叠波导慢波结构的色散特性比较, 曲线 A、B、C、D 分别是三角形、燕尾形、矩形和梯形加载折叠波导慢波结构的色散特性。从图 4 可知, 4 种槽加载结构的低截止频率相同; 但是随着槽形状从三角形依次变化到梯形, 高截止频率从 114.5 GHz 依次降低至 97.3 GHz, 慢波结构的通频带宽从 38.7

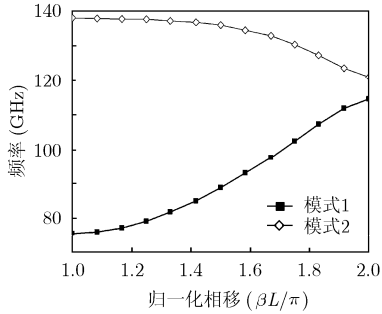


图3 三角形槽加载结构色散特性

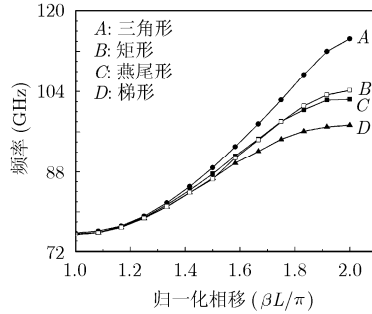


图4 4种结构的色散特性对比

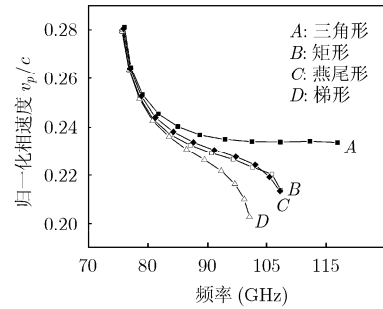


图5 4种结构的归一化相速度

GHz 逐渐减小至 21.8 GHz。此现象的产生是因为槽加载会使一部分传播波被反射,在低频段的相速高,其波长比槽宽度更长,波反射所引起的相位叠加可以忽略,因此对波的传播影响不大,而随着频率增加,波长减小并接近于 p ,反射波会与前向波叠加,最终将形成全反射,于是波的传播便会被阻断。从图 5 可看出,在低频率段,4 种槽加载折叠波导慢波结构的归一化相速度差异较小;随着工作频率升高,槽形状对归一化相速度的影响变大,当槽形状从三角形(A)依次变化到梯形(D)时,归一化相速度在逐渐减小,相速随频率变化的曲线越来越陡。对于 4 种槽加载结构而言,在接近电子注通道的注-波相互作用最强处,梯形槽加载结构的宽度最大,燕尾形次之,矩形再次之,三角形最小。随着频率上升,传播波长逐渐减小并最先接近于梯形槽加载结构的槽宽度,最后达到三角形槽加载结构的槽宽度,因而梯形槽加载结构的上截止频率最低,色散最强烈;三角形槽加载结构的上截止频率最高,色散最平坦。

2.2 耦合阻抗

在行波管中,耦合阻抗是对系统内给定传输功率情况下电场对电子注作用强弱的度量,它决定了电磁慢波与电子注之间的耦合状况,是描述慢波系统的另一个重要参量。由于在折叠波导慢波结构中,参与注-波相互作用的电场模式是基波 TE_{10} 模,故此处只研究基波的耦合阻抗大小。按照 Pierce 的定义,慢波结构中基波的耦合阻抗^[14]表达式为

$$k_{c0} = \frac{|E_{z0}|^2}{2\beta_0^2 P_w} \quad (2)$$

式中 $E_{z0} = \frac{1}{p} \int_0^p E_z(z) e^{j\beta_0 z} dz$ 为基波轴向电场幅值,

p 为周期长度, β_0 是基波的传播常数, P_w 为电磁波沿折叠波导传输时的总功率。在行波管中,具有较强色散的慢波系统能得到较高的耦合阻抗^[15]。因此根据 4 种槽结构的色散特性比较,可以推测槽加载结构耦合阻抗由大到小依次为梯形、燕尾形、矩

形和三角形。本文利用 Ansoft HFSS 软件,采用直接场提取法,利用场计算器提取出慢波结构中电子注通道中心处的电场分量,代入耦合阻抗定义式进行计算,可获得不同槽结构加载折叠波导慢波结构的耦合阻抗曲线,如图 6 所示。

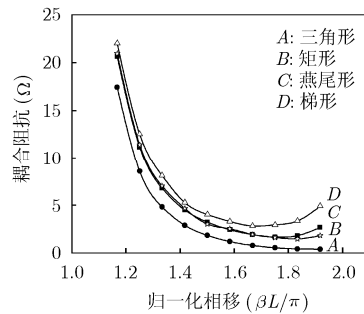


图6 4种槽加载结构折叠波导慢波结构的耦合阻抗

由图 6 可以看出,槽形状对耦合阻抗的影响较大,槽形状从三角形(A)到梯形(D),耦合阻抗逐渐增大。另外发现在高频段耦合阻抗又开始上升,曲线出现两端上翘的趋势。此现象是因为槽结构的存在使一部分电磁波在传播过程中发生了反射,改变了场分布,增大了相互作用区域的电场强度继而提高了耦合阻抗。

由上述分析可知,梯形槽加载折叠波导的耦合阻抗最大,轴向电场和注-波相互作用最强,输出功率将会最高,而工作带宽最小;三角形槽加载折叠波导耦合阻抗最小,轴向电场和注-波相互作用最弱,输出功率将会最小,但由于其色散最为平坦,故而工作带宽将会最大。

3 非线性注-波相互作用模拟分析

注-波相互作用的非线性模拟过程中包含了电子注的非线性群聚、超越现象的影响,可以获得比线性分析更准确的增益、效率以及宽带信息。本文采用 MAGIC3D 软件建立多种槽加载折叠波导注-波相互作用的 3 维模型,并分析电子注与高频场的能量交换过程。

3.1 非线性注-波相互作用模型及模拟结果分析

以三角形槽加载折叠波导行波管为例, 来介绍非线性注-波相互作用模型, 并对主要模拟结果进行分析。如图 7 所示, 电磁场从输入端馈入并沿着波导慢波线以行波的形式传输, 与此同时, 电子注由电子注通道内的发射基片产生。当电子注经过电子注通道和慢波结构的交汇处时, 会受到沿波导传输的 TE_{10} 模的横向电场作用, 电子注中的电子会受到加速或减速的力, 产生注-波相互作用。

在行波管中, 由于存在内部反馈通道, 而输入端和输出端又不容易达到完全匹配, 因此输出端因失配产生的反射功率将沿慢波线反相传输至输入端, 这个反向功率在输入端又会发生反射, 变成正向传输的功率, 当反馈信号强度比输入信号强度大并两者相位相差 2π 的整数倍时, 这种反射会稳定维持下去, 形成自激振荡。为了抑制自激振荡, 在行波管中设置集中衰减器来消除反射。考虑到减少衰减器本身产生的反射和保证在频带内获得较好的匹配等因素, 集中衰减器的形状如图 7 中所示, 将两端做成衰减量渐变的过渡段, 衰减材料的相对介电常数为 9.5, 体电导率为 50 S/m 。建模时, 采用无氧铜(电导率为 $\sigma = 5.8 \times 10^7 \text{ } \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)作为慢波材料, 并对金属表面的趋肤深度和表面损耗进行了模拟计算。注-波相互作用模型的设计参数如表 2 所示。

图 8 是利用 MAGIC3D 软件模拟中心频率为 87 GHz 的 RF 信号在输入功率为 50 mW 时电子轴向

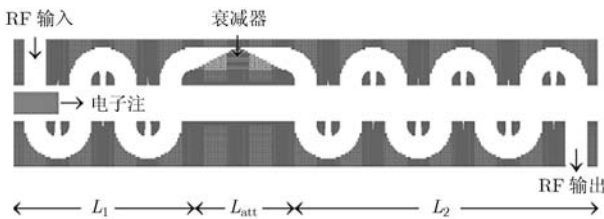


图 7 注-波相互作用的 MAGIC 模型

表 2 W 波段三角形槽加载折叠波导设计参数

物理量(单位)	数值
电子注电压 $U(\text{kV})$	15.8
电子注电流 $I(\text{A})$	0.15
电子注半径 $r_i(\text{mm})$	0.15
衰减器长度 $L_{att}(\text{mm})$	6.0
第 1 部分长度 $L_1(\text{mm})$	22.8
第 2 部分长度 $L_2(\text{mm})$	43.8
相互作用周期长度 $p(\text{mm})$	0.6

速度沿 z 轴的分布情况。在电子行进过程中, 电子注速度调制越来越明显, 发生群聚现象, 出现密度调制。在慢波结构中, 电子注直流速度略大于行波的速度, 从总体上来看, 电子的能量转移到高频场中。从图 8 中可知, 在输出端(72.6 mm 附近), 处于减速场区的电子明显要多于处于加速场区的电子, 电子注速度从 $7.5 \times 10^7 \text{ m/s}$ 降低到了 $6.9 \times 10^7 \text{ m/s}$, 这说明电子注转移到高频场的能量多于从高频场获得的能量, 电子注的一部分动能转化为电磁波的能量。

高频场功率幅值沿 z 轴的变化情况如图 9 所示。在经过了注-波相互作用并不强烈的 L_1 段和吸收微波功率的衰减器段 (L_{att}) 后, 调制后的电子注在 L_2 段继续进行注-波相互作用, RF 功率重新增长, 并在 60 mm 处开始迅速攀升直至互作用电路末端达到饱和, 输出功率为 190 W。图 10 和图 11 分别是输出功率幅值和输出端口处高频电场幅值随时间变化曲线。从图 10 中可看出, 从 1.8 ns 开始, 输出功率开始逐渐趋于稳定, 直至 12 ns, 输出功率稳定在 190 W 左右; 图 11 表明当注-波相互作用进行到 1.8 ns 左右时, 电场幅值已经趋于稳定, 能量交换开始稳定。图 12 是对高频电场进行傅里叶变换后得到的电场能量频谱图, 在 0-200 GHz 的范围内, 只有单频点 87 GHz, 这说明该行波管中没发生振荡。

3.2 4 种槽加载折叠波导行波管注-波相互作用模拟结果的比较

为了分析不同槽结构对注-波相互作用所带来的影响, 我们在三角形槽加载折叠波导相互作用模拟的基础上, 进一步建立了另外 3 种结构加载的注-波相互作用 3 维模型。在相同的电子注参数和输入功率的条件下, 对不同槽结构加载的对非线性相互作用过程进行了模拟。

在注-波相互作用的粒子模拟中, 第 1 段的电子注群聚状态会对后面的注-波相互作用有非常重要的影响。由于在集中衰减器长度内的电磁波已被吸收, 实际上不存在电子注与波的相互作用。此时, 电子注将在空间电荷力的影响下使群聚变差, 从而对行波管增益、效率有所影响, 而且群聚减弱的程度取决于慢波结构输入段形成的群聚强度。如图 6 所示, 这几种结构的耦合阻抗各不相同, 在相同相互作用长度上, 电子注和电磁场的能量耦合强度是不相同的, 电子注到达衰减器位置时的群聚状态也各不相同。为了避免上述情况, 我们在选取第 1 段慢波线长度时, 保证各种不同折叠波导结构的第 1 段相互作用长度具有相同的增益, 从而使得电子注在进入衰减器区域时具有相同的群聚状态。在本文中, 由于折叠波导行波管的增益在 30-40 dB 之间, 我们选择行波

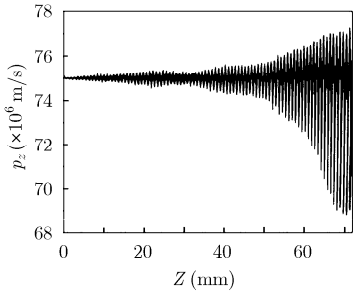


图 8 电子轴向动量沿 z 轴的分布

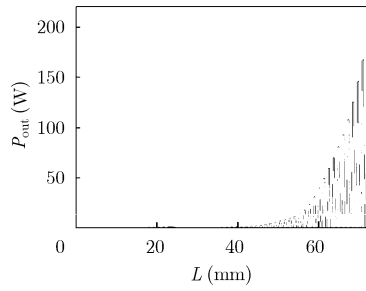


图 9 功率幅值沿 z 轴的分布

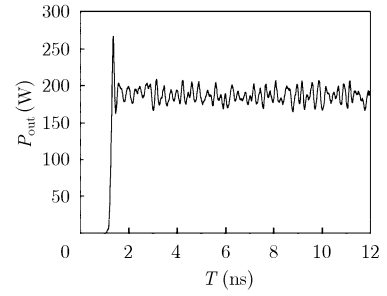


图 10 输出功率随时间的变化

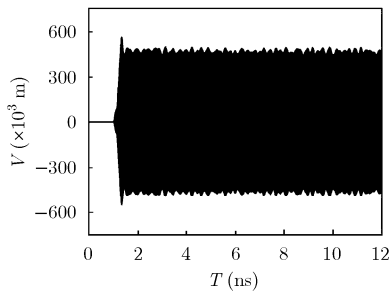


图 11 电场幅值随时间变化情况

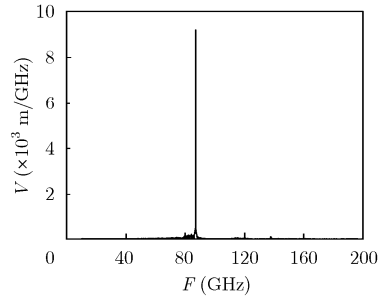


图 12 电场能量的频谱

管增益为 12 dB 所对应的慢波线，作为第 1 段相互作用线路。经过集中衰减器后，选取 4 种结构各自达到最大输出功率时的长度作为第 2 段相互作用线路。矩形、梯形和燕尾形槽加载折叠波导的设计参数如表 3 所示。

表 3 3 种槽加载折叠波导设计参数

物理量(单位)	矩形	梯形	燕尾形
相互作用周期长度 p (mm)	0.6	0.6	0.6
衰减器长度 L_{att} (mm)	6	6	6
第 1 部分长度 L_1 (mm)	21.6	24	20.4
第 2 部分长度 L_2 (mm)	39.0	37.8	37.8

图 13 是三角形(A)、矩形(B)、燕尾形(C)、梯形(D)加载折叠波导输出功率随相互作用距离的变化对比。从图中可知，梯形(D)输出功率 255 W 最大，燕尾形(C)以 225 W 次之，矩形(B)、三角形(A)饱和输出功率依次为 210 W 和 190 W。这与图 5 给出的 4 种结构耦合阻抗变化规律是一致的，梯形结构具有最高的耦合阻抗，其相互作用区域的电场强度最强，能够从电子注获得最多的能量，因此该结构的输出功率在各种结构中是最高的；而其他 3 种结构的耦合阻抗从 A 到 D 依次减小，输出功率依次递减。燕尾形(C)输出功率在 64.2 mm 处最先达到饱和，梯形(D)和矩形(B)功率达到饱和时的轴向距离相差不大，分别是 67.8 mm 和 66.6 mm，三角形(A)达

到饱和功率需要的相互作用距离最长，为 72.6 mm。

图 14 给出了 4 种槽加载折叠波导输出功率随频率变化的情况。槽形状对输出功率峰值的影响与图 13 所体现的变化规律是相同的：随着槽结构从三角形(A)变化到梯形(D)，功率的峰值在逐渐提高。特别地，梯形结构的功率峰值在三角形结构的基础上提高了 34.2%。此外，最大输出功率值所对应的工作频率点也随着槽结构的不同而发生变化：三角形结构(A)的中心频率点高于其他 3 种结构。

4 种槽加载折叠波导的增益和电子效率如图 15 和图 16 所示。从图 15 可知，梯形(D)增益最大，在 84 GHz 达到 37.1 dB，3 dB 带宽从 81 GHz 到 84.6 GHz；燕尾形(C)和矩形(B)分别在 84 GHz 和 86 GHz 获得饱和增益 36.5 dB 和 36.2 dB，3 dB 带宽分别为 80.8–85.1 GHz 和 82–87.2 GHz；三角形(A)饱和增益最小，在 87 GHz 处获得 35.8 dB，3 dB 带宽从 83.2 GHz 到 88.7 GHz。图 16 给出了 4 种槽加载折叠波导的电子效率随频率的变化。梯形(D)的电子效率最大，可达到 10.7%；燕尾形(C)和矩形(B)依次为 9.4%和 8.86%；三角形(A)最小，电子效率为 8.01%。不同槽结构对增益和电子效率的影响规律是：由梯形向燕尾形、矩形直至三角形递减，这与槽结构对耦合阻抗的影响是相一致的。另一方面，4 种结构的增益带宽由三角形向矩形、燕尾形直至梯形逐渐减小，这是由 4 种结构的色散特性来决定的。三角形槽结构的色散最弱，归一化相速曲线最为

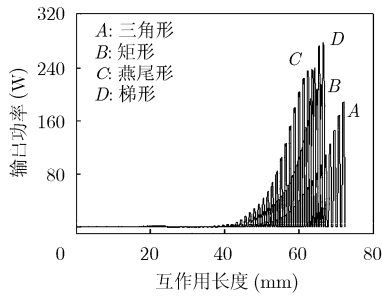


图 13 不同槽加载折叠波导输出功率随相互作用距离变化

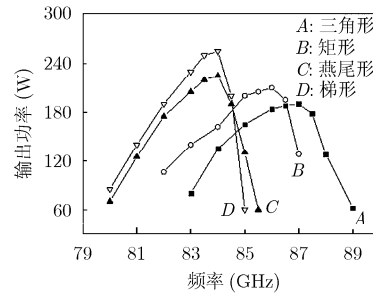


图 14 4 种模型不同频点输出功率

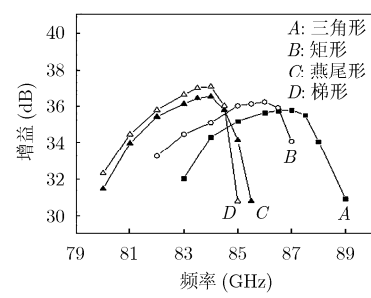


图 15 4 种模型不同频点增益对比

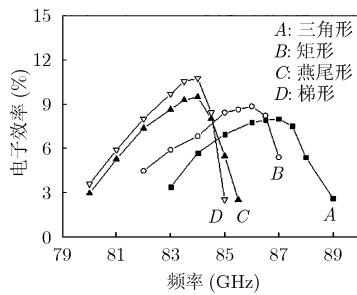


图 16 4 种模型不同频点电子效率对比

平坦, 因此能够在最宽的频率范围内保持注-波同步条件, 实现高频场与电子注的能量交换。而梯形槽结构的色散最强, 满足注-波同步条件的频带范围是最小的, 因此该结构的 3 dB 增益带宽在多种结构中最窄的。

4 结论

三角形槽加载折叠波导耦合阻抗最小, 但色散最为平坦; 梯形槽加载折叠波导耦合阻抗最大, 但色散最强; 燕尾形和矩形槽加载波导耦合阻抗介于三角形槽和梯形槽之间, 差别不大。利用 3 维 PIC 粒子模拟软件进行了矩形、三角形、燕尾形和梯形槽加载折叠波导行波管冷腔特性和热腔大信号注-波相互作用过程的 3 维定量分析, 获得了如下指标: 在相同输入条件下, 梯形槽加载折叠波导输出功率 (255 W) 和增益 (37.1 dB) 最大, 电子效率最高 (10.7%); 燕尾形槽加载折叠波导达到饱和所需要的相互作用电路最短 (64.2 mm); 三角形槽加载折叠波导的 3 dB 带宽最宽, 从 83.2 GHz 到 87.8 GHz。设计中所用的仿真模型结构完整, 对实际制管具有较大的指导意义。

参考文献

[1] 王文祥, 魏彦玉, 宫玉彬, 等. 应用于高功率行波管的一种新型慢波结构的研究[J]. 红外与毫米波学报, 2003, 24(7): 1469-1484.
Wang Wen-xiang, Wei Yan-yu, Gong Yu-bin, et al.

Investigation of a novel slow-wave structure on high power TWT[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2003, 24(7): 1469-1484.

[2] 冯进军, 胡银富, 蔡军, 等. W 波段行波管发展评述[J]. 真空电子技术, 2010, 2(5): 27-32.

Feng Jin-jun, Hu Yin-fu, Cai Jun, et al. The development appraisal of W-band TWT[J]. *Vacuum Electronics*, 2010, 2(5): 27-32.

[3] 蔡军, 冯进军, 廖复疆, 等. W 波段折叠波导慢波结构设计及三维注波相互作用模拟[J]. 电子学报, 2006, 34(12): 2342-2346.

Cai Jun, Feng Jin-jun, Liao Fu-jiang, et al. Design and three-dimensional beam/circuit interaction simulation of W-band folded waveguide SWS[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 34(12): 2342-2346.

[4] Booske J H, Converse M C, Kory C L, et al. Accurate parametric modeling of folded waveguide circuits for millimeter-wave traveling wave tubes [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2005, 52(5): 685-694.

[5] 高鹏, Booske J H, 杨中海, 等. 太赫兹折叠波导行波管再生反馈振荡器非线性理论与模拟[J]. 物理学报, 2010, 59(12): 8484-8489.

Gao Peng, Booske J H, Yang Zhong-hai, et al. Physics and simulation of terahertz folded waveguide traveling wave tube regenerative feedback oscillators[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(12): 8484-8489.

[6] 何俊, 魏彦玉, 宫玉彬, 等. 脊加载曲折波导行波管注波相互作用的线性理论分析[J]. 物理学报, 2010, 59(9): 6659-6665.

He Jun, Wei Yan-yu, Gong Yu-bin, et al. Linear theory of the beam-wave interaction in a ridge-loaded folded slow-wave structure [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(9): 6659-6665.

[7] 何俊, 魏彦玉, 宫玉彬, 等. Ka波段曲折双脊波导行波管的研究[J]. 物理学报, 2010, 59(4): 2843-2849.

He Jun, Wei Yan-yu, Gong Yu-bin, et al. A Ka-band folded double-ridged waveguide traveling-wave tube [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(4): 2843-2849.

[8] 徐翱, 王文祥, 魏彦玉, 等. 变周期慢波系统内同步问题的研究[J]. 物理学报, 2009, 58(5): 3592-3596.

Xu Ao, Wang Wen-xiang, Wei Yan-yu, et al. Analysis of synchronization in the varying-period slow-wave structures

- [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(5): 3592-3596.
- [9] Liao Ming-liang and Wei Yan-yu. A rectangular groove-loaded folded waveguide for millimeter-wave traveling-wave tubes [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2010, 38(7): 1574-1578.
- [10] 李明洋. HFSS 电磁仿真设计应用详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
- [11] Ludeking L, Smithe D, and Bettenhausen M. MAGIC User's Manual[M]. Newington: VA, MRC, 1999.
- [12] He Jun, Wei Yan-yu, *et al.*. Investigation of a ridge-loaded folded-waveguide slow-wave system for the millimeter-wave traveling-wave tube[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2010, 38(7): 1556-1562.
- [13] 张长青, 宫玉彬, 魏彦玉, 等. 亚毫米波折叠波导慢波结构的损耗特性研究[J]. 半导体光电, 2010, 31(6): 880-884.
- Zhang Chang-qing, Gong Yu-bin, Wei Yan-yu, *et al.*. Investigation on loss characteristics of the sub-millimeter wave folded waveguide slow-wave circuit [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2010, 31(6): 880-884.
- [14] Pierce J R. Travelling-Wave Tube Principium [M]. NJ, Van Nostrand, 1950: 231-259.
- [15] 王文祥. 微波工程技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 375-376.
- 彭 博: 男, 1987 年生, 硕士生, 研究方向为大功率微波器件.
- 何 俊: 男, 1983 年生, 博士, 从事大功率微波器件的研究.
- 黄明光: 男, 1965 年生, 研究员, 主要从事大功率微波器件的研究.