

·高功率微波技术·

0.34 THz 双注高次模折叠波导行波管高频系统设计*

赵征远^{1,2}, 刘文鑫^{1,2}, 杨龙龙^{1,2}, 欧 粤^{1,2}

(1. 中国科学院大学, 北京 100039; 2. 中国科学院 空天信息创新研究院, 北京 100094)

摘 要: 高频系统是行波管的核心部件, 它会直接影响行波管的工作频率、带宽、增益等性能指标。为了获得更大的输出功率和更高的增益, 对 0.34 THz 双注高次模折叠波导行波管的基本特性进行了研究, 计算了双注折叠波导的色散特性和耦合阻抗, 并与仿真结果进行对比, 结果显示色散特性随频率升高差距增大, 耦合阻抗在高频段匹配较好, 并研究了损耗特性。利用 CST 仿真工作室对双注折叠波导的注波相互作用特性进行了仿真, 实现 41.68 W 输出。为了获得更高的输出, 通过增大直波导高度, 最终使输出功率提高了 52.7%, 达到 63.12 W。最后设计了符合要求的盒型输出窗和模式转换器, 验证了高频系统的传输特性。

关键词: 双电子注折叠波导; 慢波结构; 注波相互作用; 相速渐变; 输出窗; 模式转换器

中图分类号: TN124

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202133.210002

Design of high frequency system of 0.34 THz high order mode two-beam folded waveguide traveling wave tube

Zhao Zhengyuan^{1,2}, Liu Wenxin^{1,2}, Yang Longlong^{1,2}, Ou Yue^{1,2}

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

2. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: High frequency system is the key part of folded-waveguide (FW) traveling-wave tube (TWT), it will directly affect the operating frequency, bandwidth, gain and other indicators of TWT. In order to obtain larger output power and higher gain than a conventional single-beam FWTWT, the basic characteristics of the 0.34 THz high order mode two-beam FWTWT are studied. Firstly, the dispersion characteristics and interaction impedance of two-beam FW are calculated and compared with the results of simulation. The results show that the theory of dispersion characteristics is consistent with the simulation results and the interaction impedance matches well in high frequency band. CST studio suite is used to simulate the beam-wave interaction of the two-beam FW, and the output power is 41.68 W. In order to obtain high output, the height of the straight is increased. And the 63.12 W output is obtained with an increase of 52.7%. High frequency system is constituted by mode converter and output window structure, and good transmission characteristics are obtained within 25 GHz bandwidth. In the operating bandwidth, $|S_{11}|$ is greater than 15 dB, $|S_{21}|$ is less than 4.5 dB.

Key words: two-beam folded-waveguide; slow wave structure; beam wave interaction; phase-velocity taper; output window; mode converter

折叠波导高频结构具有全金属结构、良好的散热性、较大的功率容量、较小的损耗等特点, 在毫米波和太赫兹波段辐射源中得到了广泛的应用^[1]。自从折叠波导的概念提出以来, 美国、韩国、中国等国家折叠波导进行了大量研究。美国格鲁曼(NG)公司研制了在 233 GHz 下工作的折叠波导行波管, 输出功率 79 W, 带宽 28.5 dB^[2]。美国海军实验室研制了中心频率 0.22 THz 的三注折叠波导行波管, 实现了 42 dB 增益和 50 GHz 带宽^[3]。国内主要由中国科学院空天信息创新研究院、电子科技大学、中国工程物理研究院等单位对折叠波导行波管进行研究。中国科学院空天信息创新研究院对折叠波导器件的非线性理论、相速渐变折叠波导、输入输出窗等进行了研究^[4-7], 高鹏

* 收稿日期: 2021-01-04; 修订日期: 2021-03-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFA0210201); 国家自然科学基金项目(U1832193, 61831101)

作者简介: 赵征远(1996—), 男, 在读硕士研究生, 从事太赫兹折叠波导行波管研究。

通信作者: 刘文鑫(1976—), 男, 研究员, 从事太赫兹真空器件研究。

鹏等人^[7]设计了在 0.22 THz 下工作的双注高次模折叠波导行波管, 输出功率 40.8 W、工作效率 2.7%、增益 33.1 dB、带宽 10 GHz, 薛谦忠^[8]等人设计了在 0.22 THz 下工作的三注折叠波导行波管, 输出功率 13.7 W、工作效率 1.7%、增益 31.4 dB、带宽 14 GHz。刘文鑫^[9]在 2020 年研制成功了 G 波段行波管 61 W, 带宽 6 GHz 的信号输出。颜胜美等人^[10-11]也对多注太赫兹器件展开了大量的研究, 设计了在 0.14 THz 下工作的基模高次模折叠波导行波管, 输出功率 22.2 W、工作效率 3.9%、增益 33.4 dB、带宽 25 GHz。

本文采用双电子注提高器件的注功率, 从而提高太赫兹行波管的输出功率。对双电子注折叠波导慢波结构的色散特性、耦合阻抗、损耗特性、注波相互作用特性进行了分析, 确定了 0.34 THz 行波管慢波结构的具体参数, 在电子注电压 23.8 kV、电流 30 mA、输入信号 0.34 THz 的条件下, 得到 41.6 W 的输出功率。通过相速渐变设计, 使输出功率较常规结构提高了 52.7%, 达到 63.12 W, 工作效率为 4.4%, 相同条件下单注折叠波导行波管的工作效率为 2.5%, 双注折叠波导行波管工作效率提高了 1.9%, 验证了采用相速渐变方法设计大功率行波管的优势; 并设计了符合要求的输出窗和模式转换器, 验证了高频系统的传输特性, 为 0.34 THz 双注高次模折叠波导行波管的研制提供了理论指导和设计参考。

1 高频特性

电子束与电磁波在慢波结构(SWS)中进行互作用, 慢波结构设计的好坏将直接影响到行波管的色散特性、耦合阻抗和工作方式。双电子注折叠波导慢波结构如图 1 所示, 参数如表 1 所示, a 是波导宽边, b 是波导窄边, h 是直波导高度, p 是半周期长度, r 是电子注通道半径, d 是电子注通道距离。单注 FWTWT 的工作模是 TE_{10} 模, 这是一种对称模, 其场强最强处是波导宽边的中心。若选取反对称的 TE_{20} 模为工作模, 场强会出现两个最大值, 分别在波导宽边的 $a/4$ 和 $3a/4$ 处, 若在这两个位置设置双电子注, 则可以使双电子注的场强都处于峰值, 进一步提高注波相互作用效率, 场强分布如图 2 所示。

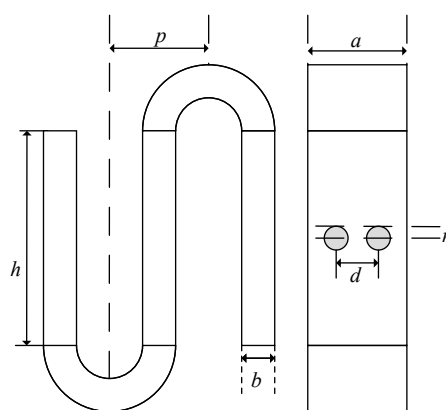


Fig. 1 Geometry for the TWT with two-beams
图 1 双电子注折叠波导结构图

表 1 慢波结构参数
Table 1 Structure parameters of slow wave structure (mm)

a	b	h	p	r	d
1.12	0.10	0.18	0.22	0.07	0.56

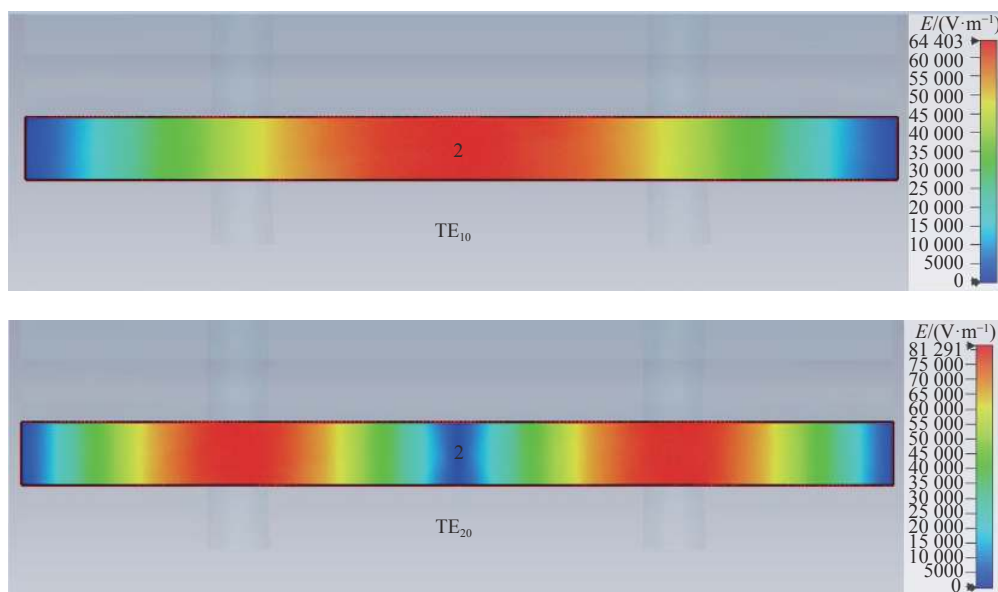


Fig. 2 Field contour plots for the FW
图 2 场强分布图

1.1 色散特性

色散特性关系到折叠波导的带宽、工作电压、工作频率等指标,是慢波结构中非常重要的特性^[12]。电磁波在折叠波导中传输的时候,会产生相位移动和附加相移。相位移动是由电磁波沿着实际路径传输造成的,附加相移是由电路折返造成的^[8]。设相速是 v_{pn} ,可以表示为

$$v_{pn} = \frac{c}{\frac{(h + \pi p/2)}{p} \sqrt{1 - (\lambda/\lambda_c)^2} + \frac{(2n+1)\lambda}{2p}} \quad (1)$$

式中: λ 是波的波长; λ_c 是波的下截止波长; c 是真空中光速。根据上述分析,代入表1的结构参数,通过数值计算,可以得到如图3(a)的结果,图中加入了 CST 和 HFSS 仿真得到的结果作为对比。从图中可以看出,理论与仿真计算得到的下限截止频率相同,随着频率变化,相移差逐渐增大。图3(b)是 TE₁₀ 模和 TE₂₀ 模随相移变化的曲线,在下限截止频率处,低次模的频率是高次模的一半。对比 CST 和 HFSS 仿真得到的结果可以看出,两种仿真结果相近。

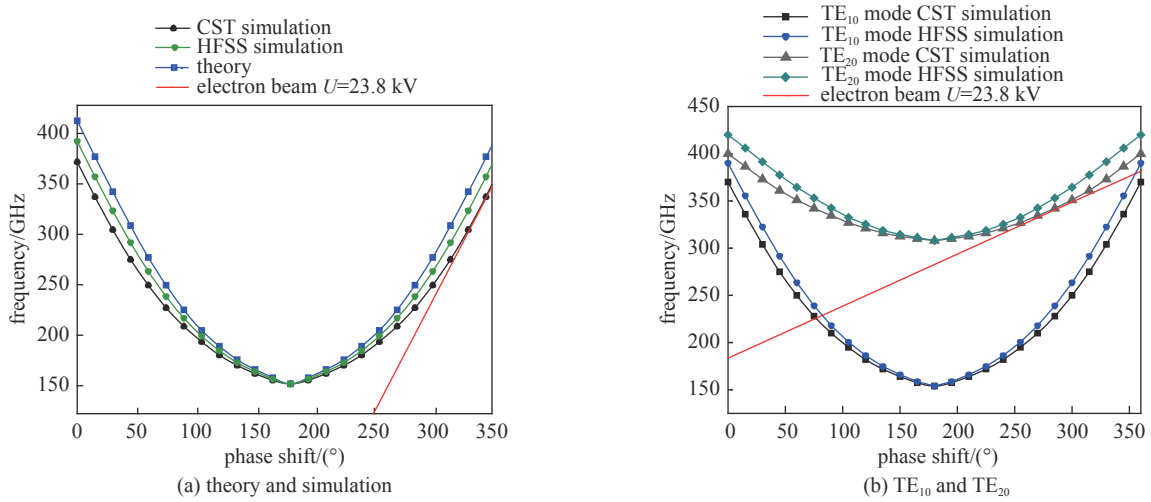


Fig. 3 Dispersion characteristics of FW

图3 折叠波导色散特性对比图

1.2 耦合阻抗

耦合阻抗的大小直接关系到输出功率的大小,它是影响慢波结构的电子效率和放大倍数的重要因素,代表的是电子注和电磁场之间进行交换能量的能力,是衡量慢波结构高频特性的一个重要指标。根据耦合阻抗的定义,在慢波结构的轴线上,第 n 次空间谐波的耦合阻抗定义为^[13]

$$K_n = \frac{|E_{zn}|^2}{2\beta_n^2 P_w} \quad (2)$$

式中: E_{zn} 是 n 次空间谐波的电场轴向分量; β_n 是 n 次空间谐波的相位常数; P_w 是波导中传输 TE₂₀ 模的功率。根据定义式,可以求得第 n 次空间谐波的耦合阻抗为^[14-15]

$$K_n = \frac{\eta}{\sqrt{1 - \omega_c^2/\omega^2}} \frac{2b}{a} \left(\frac{1}{\beta_n p} \frac{\sin(\beta_n b/2)}{\beta_n b/2} \right)^2 \quad (3)$$

式中: η 是自由空间的波阻抗; ω 是电磁波角频率。考虑电子注通道对耦合阻抗的影响后,可以得到第0次空间谐波的耦合阻抗为

$$K_{c0} = \frac{K_0}{I_0^2(\tau r_c)} \quad (4)$$

式中: I_0 为零阶变态贝塞尔函数; r_c 是电子注通道半径。

通过 HFSS 仿真软件也可以得到耦合阻抗。在 HFSS 中建立模型,用本征模求解器扫描不同频率下对应的轴向电场的大小,根据式(5)可以求得第0次空间谐波的电场幅度,代入式(2)可以计算出第0次空间谐波的耦合阻抗。

$$E_{z0} = \frac{1}{p} \left\{ \int_0^p [\text{Re}(E_z) \cos(\beta_0 z) - \text{Im}(E_z) \sin(\beta_0 z)] \right\} + i \left\{ \int_0^p [\text{Re}(E_z) \cos(\beta_0 z) - \text{Im}(E_z) \sin(\beta_0 z)] \right\} \quad (5)$$

结果如图4所示,从图中可见,理论计算的数值都大于HFSS和CST计算结果,而CST和HFSS计算所得的结果相近。在340 GHz,理论计算的耦合阻抗是2 Ω,比仿真的1 Ω结果高一倍,这是由于理论计算的模型过于理想化及低次模的模式竞争,导致误差较大。因此,在理论计算得到大致的范围后,必须用仿真得到更加精确的结果。

1.3 损耗

损耗是慢波结构的重要参量,与色散特性和耦合阻抗一起决定了慢波结构的性能^[16]。在慢波结构中,损耗通常来自两个方面:(1)金属的有限电导率产生的导体损耗;(2)加载介质材料产生的介质损耗。当频率上升到太赫兹波段时,由于现有加工精度的限制和趋肤效应的加剧,导体损耗会随着频率的升高而大幅增加^[17]。因此在选材时,首先选择电导率较高的材料,无氧铜因其较高的电导率和较低的价格,是太赫兹波段较为理想的材料。对于有损介质,趋肤深度与频率的关系为

$$d = \sqrt{2/\omega\mu\gamma} \quad (6)$$

式中: d 为趋肤深度; ω 为角频率; μ 为磁导率; γ 为电导率。

在计算由金属电导率引起的电磁信号传输损耗时,如果考虑加工粗糙度,可以将表面粗糙度代入电导率,以对金属材料电导率进行修正,采用修正后的电导率来计算和仿真电磁信号的传输损耗,电导率的修正公式为^[16-17]

$$\sigma_c = \sigma/k^2 \quad (7)$$

式中: $k = 1 + e^{-1.6(d/2h)}$; k 为修正系数; d 为趋肤深度; h 为表面粗糙度; σ 为波导材料电导率。

对于本文的中心频率340 GHz,根据上述公式(7),可以得到趋肤深度 $d = 0.11 \mu\text{m}$,修正系数 $k = 1.68$, $\sigma_c = 2.05 \times 10^7 \text{ S/m}$ 。

2 结构优化与注波相互作用特性分析

在CST中建模,模型如图5所示,为了防止返波振荡,在折叠波导中设置了两个衰减器,衰减材料的相对介电常数为6.8。设置第一段周期数为20,第二段周期数为19,第三段周期数为18。为了研究双电子注参数对输出的影响,对不同双注电压和双注电流下的输出进行仿真计算,设置左孔的参数不变,改变右孔的电压和电流,结果如图6所示。图6(a)显示了双注电流对输出功率的影响,在双注电流均为30 mA时,可以得到最大的输出功率41.68 W。图6(b)显示了双注电压对输出功率的影响,在双注电压均为23.8 kV时,输出功

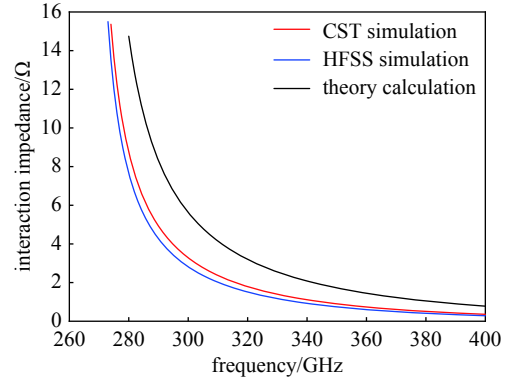


Fig. 4 Interaction impedance

图4 耦合阻抗对比图

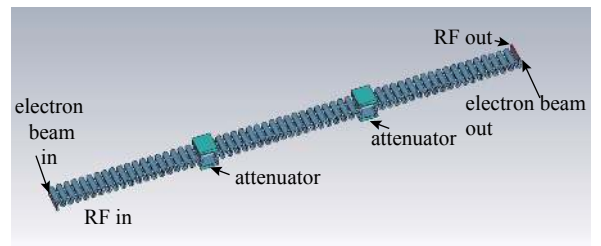


Fig. 5 Model in CST

图5 双注折叠波导 CST 模型图

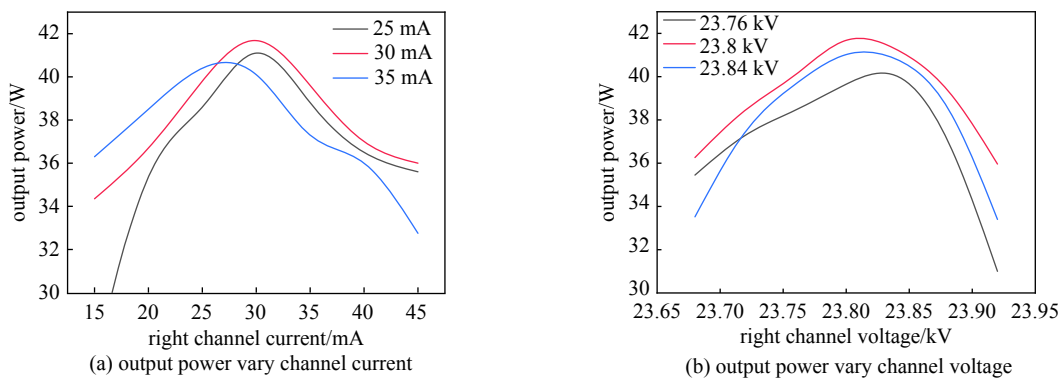


Fig. 6 Output power vary two-beam parameters

图6 双注参数对输出的影响

率最大。通过以上分析,我们确定了双电子注的参数。利用 CST PS 工作室进行仿真分析,设置每个电子注电压为 23.8 kV,每个电子注电流为 30 mA,输入激励为 20 mW,施加 0.5 T 的磁场来约束电子注,使之能良好传输。经过一段时间的仿真后,得到的结果如图 7~11 所示。

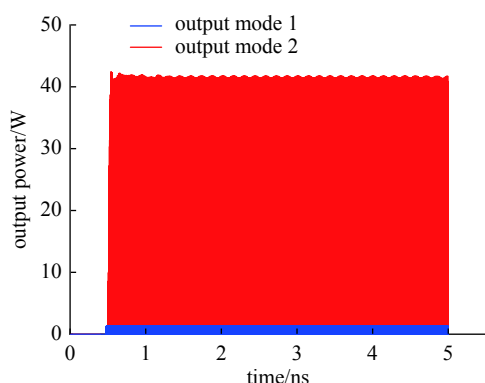


Fig. 7 Output power
图 7 输出功率图

图 7 为输出功率随时间变化情况,由图中可知,工作模的输出信号达到 41.68 W,增益为 33.20 dB,且在短时间的起振之后趋于稳定;模式 1 输出较小,被很好的抑制而不影响工作模。图 8 是信号的频谱图,可以看出,工作模的频谱较纯。图 9 为输出功率随频率变化曲线,从图中可以看出,在 327~352 GHz 频率范围内,输出功率都达到最大输出功率 41.68 W 的一半以上;在 340 GHz 时,增益达到最大,为 33.2 dB。所以此折叠波导行波管的 3 dB 带宽达到了 25 GHz,约为 7.3%。图 10 是折叠波导末端电子轨迹图,从图中可以看出,电子在折叠波导末端发生聚集,能量增大,并且上方电子注与下方电子注有 180° 的相位差,这符合 TE₂₀ 模的工作特点。图 11 是 7 ns 时的电子相空间图,从图中可以看出,能量降低的电子数量多于能量增加的电子数量,这是由于注波相互作用,电子交出能量给电磁波,使电磁波发生放大。

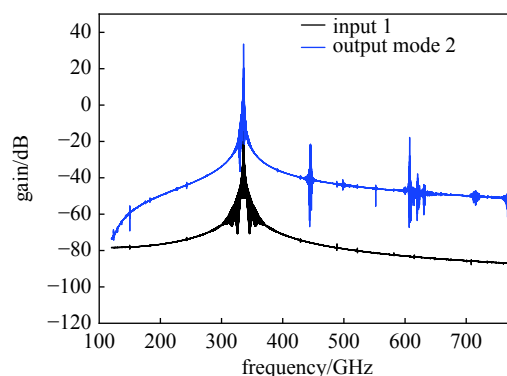


Fig. 8 Spectra of the signal
图 8 频谱图

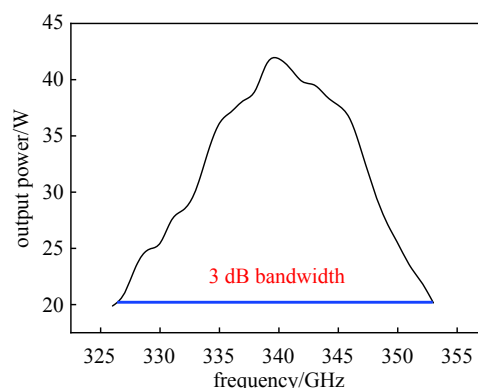


Fig. 9 3 dB bandwidth

图 9 输出功率随频率变化图



Fig. 10 Schematic diagram of the electron trajectories

图 10 电子轨迹图

3 相速渐变

电磁波通过注波相互作用从电子中获得能量,使信号放大,但是电子注和电磁波在进行相互作用一段时间后,电磁波从电子中不断获取能量,电子注能量降低,速度随之降低,小于同步速度,从而失去相速匹配,导致注波相互作用效率降低。为了使电子注速度和电磁波相速度继续保持同步,得到更高的输出功率和增益,我们采用相速渐变的方法降低波的轴向相速,以达到相速匹配。对于 n 次空间谐波,单位周期内产生的相移可以由式(1)表示,由式(1)可以看出增加直波导长度 h ,或减小半周期 p ,都可以使相速减小。

采用阶跃式的方法增加直波导高度,即从第 N 个周期开

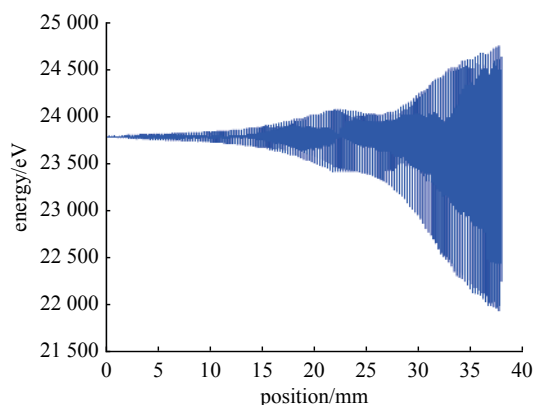


Fig. 11 Electronic energy distribution at 7 ns

图 11 7 ns 时电子相空间图

始,将直波导高度变为 h_1 ,这样就形成了一个二段式的阶跃式渐变折叠波导。图 12(a)是优化 h_1 的结果,从图中可以看出,随着 h_1 的增大,输出功率逐渐变大,说明电磁波相速逐渐减小,与电子的速度接近,达到了相速匹配。且在 h_1 等于 0.19 mm 时输出达到最大。图 12(b)是改变开始相速渐变的周期之后的结果,当从第 29 个周期开始相速渐变时,输出功率达到 63.12 W,与未加相速渐变时的输出功率相比增大了 52.7%。

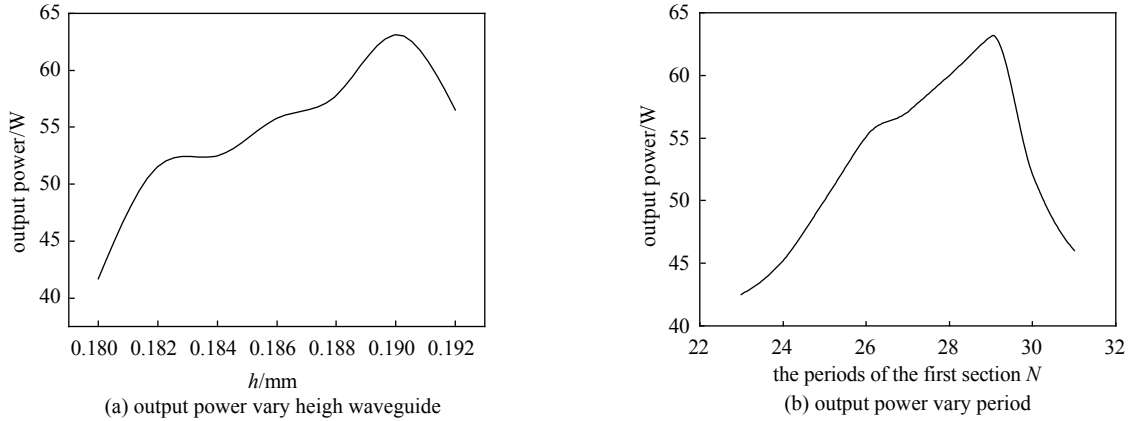


Fig. 12 Output power with phase-velocity taper

图 12 相速渐变的输出功率

图 13 是相速渐变提高输出功率的时候 b 值的变化与输出功率的关系,从图中可以看出,当 $b=0.10$ mm 时,输出功率最大,随着 b 的变大或变小,输出功率都迅速变小。

4 输入输出装置

4.1 盒型窗

输入输出窗的作用是确保行波管内信号的传输和维持管内的高真空环境,它影响着行波管的带宽、使用寿命等指标。在设计输入输出窗时,应使输入输出窗的反射系数 $|S_{11}|$ 尽量大,传输系数 $|S_{21}|$ 接近于 0 dB。输入输出窗的性能很大程度上取决于材料和结构。蓝宝石的机械强度高、化学性能稳定、透射性好,是输出窗的理想材料。盒型窗的结构和焊接工艺简单,工作频带宽,功率容量大,已在多种类型的电真空器件中得到了广泛应用^[6]。本节先通过等效电路法得到盒型窗的初始结构参数,再通过 CST 仿真优化得到满足性能要求的盒型窗结构,优化后的参数如表 2 所示,

r_1 是窗片半径, r_2 是圆波导半径, d_1 是窗片厚度, l_2 是圆波导长度, A_1 是矩形波导宽边, B_1 是矩形波导窄边。盒型窗的模型图和电场分布图如图 14 所示,慢波结构输出的能量由 port1 端口进入输出窗,从 port2 端口输出,从电场分布图看出,电场能量没有明显衰减,可以达到很好的通过性。图 15 为代入表 2 中参数后的 CST 仿真结果,由图 15 可知,工作频带内盒型窗的 $|S_{11}|$ 大于 20 dB, $|S_{21}|$ 接近于 0 dB,满足慢波结构输出端的要求。

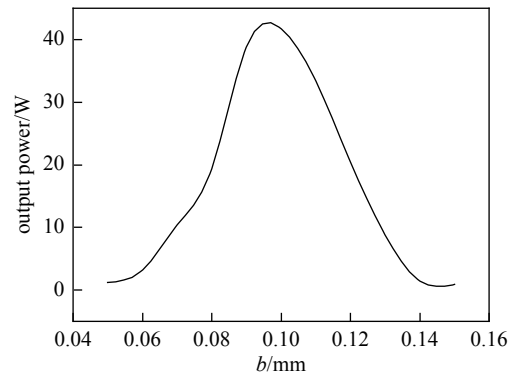


Fig. 13 Output power vary narrow side

图 13 输出功率随窄边变化

表 2 盒型窗结构参数
Table 2 Structure parameters of pill-box window (mm)

r_1	r_2	d_1	l_2	A_1	B_1
1.86	1.06	0.10	1.50	0.711	0.355

4.2 模式转换器

对于高次模折叠波导行波管,在慢波结构中传输的是 TE_{20} 模,而输入输出信号和盒型窗传输的是 TE_{10} 模。因此我们设计了 TE_{20} - TE_{10} 模的模式转换器,采用垂直输入方式的 TE_{20} - TE_{10} 模式转换器结构简单,易加工,能获得较高的效率和带宽^[18],其结构模型和电场分布如图 16 所示,插图为模型的右视图。竖直段传输 TE_{10} 模,截面宽边为输出窗矩形波导宽边 A_1 ,窄边为输出窗矩形波导窄边 B_1 ,长度 L_1 取 2 mm。水平段传输 TE_{20} 模,其截面宽边为慢波结构输出端宽边 a ,窄边为慢波结构输出端窄边 b ,长度 L 取 5 mm。竖直段的窄边与水平段的窄边平齐,且两者

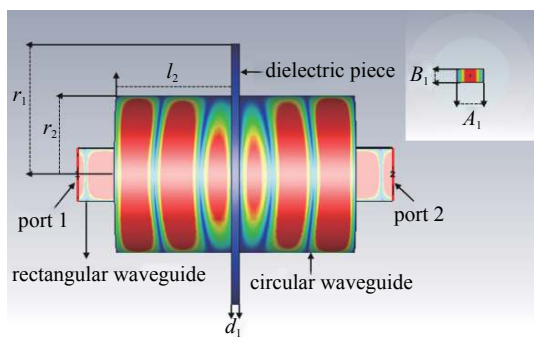


Fig. 14 Model of pill-box window

图 14 盒型窗模型图

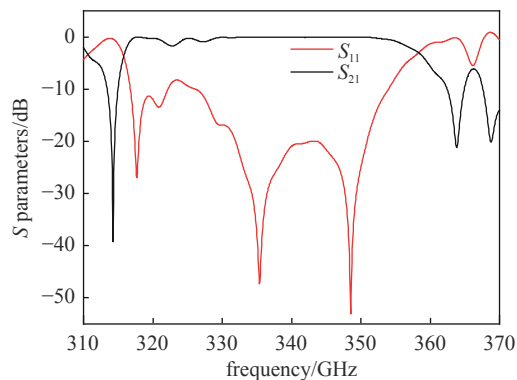


Fig. 15 Parameters of pill-box window

图 15 盒型窗的参数

处于同一条中心线上。当水平段传输 TE_{20} 模时，垂直段通过模式转换，传输 TE_{10} 模，达到 TE_{20} - TE_{10} 模转换的目的。模式转换器的 S 参数如图 17 所示，从图中可见，工作频带内模式转换器的 $|S_{11}|$ 大于 35 dB， $|S_{21}|$ 接近于 0 dB，具有良好的转换效果。

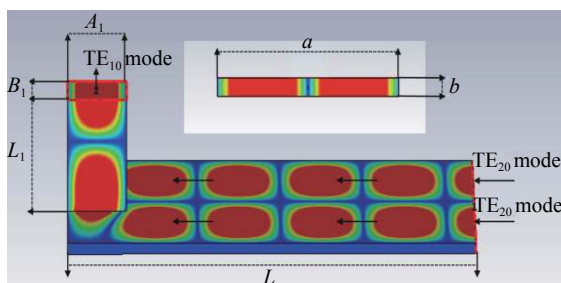


Fig. 16 Mode converter

图 16 模式转换器模型图

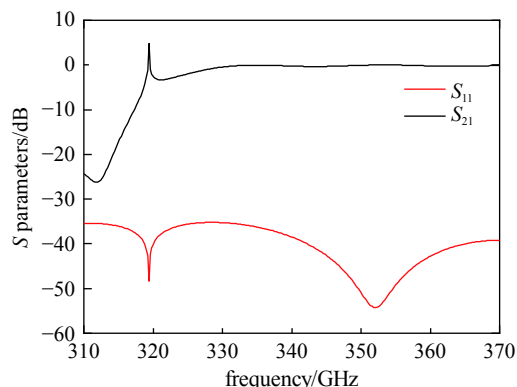


Fig. 17 S parameters of mode converter

图 17 模式转换器的 S 参数

5 高频系统的 S 参数

为了验证整体高频系统的性能，在 CST 中进行建模，如图 18 所示。电磁波通过输入窗的 port1 端口输入，经模式转换器转换成 TE_{20} 模进入慢波结构，在慢波结构中，与电子注进行注波相互作用之后通过模式转换器转换成 TE_{10} 模进入输出窗，从输出窗的 port2 端口输出。慢波结构参数如表 1 所示，输入输出窗参数如表 2 所示，模式转换器水平段长度 L 取 5 mm，垂直段长度 L_1 取 2 mm，双电子注电压 23.8 kV、电流 30 mA、激励 20 mW，施加 0.5 T 的磁场进行约束。计算后得到如图 19 的结果。图 19 是整体高频系统的 S_{11} 和 S_{21} 参数，从图中可见工作频带内 $|S_{11}|$ 大于 15 dB， $|S_{21}|$ 小于 4.5 dB，具有较好的传输特性。

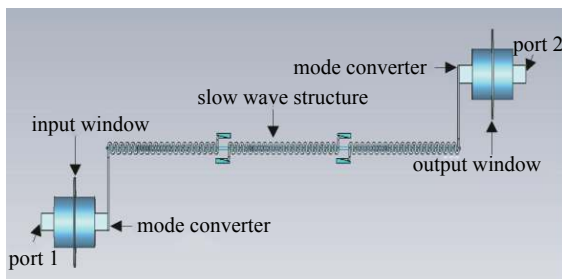


Fig. 18 Mode of high frequency system

图 18 高频系统模型图

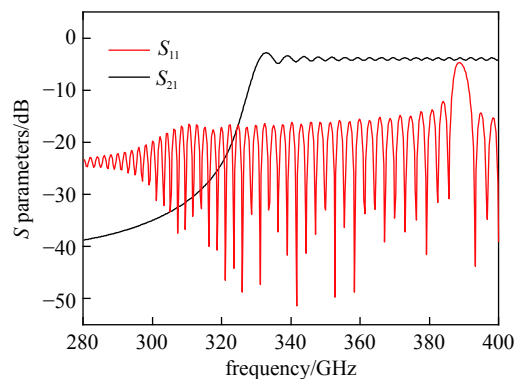


Fig. 19 S parameters of high frequency system

图 19 高频系统的 S 参数

6 结 论

本文对 0.34 THz 双注高次模折叠波导行波管慢波结构进行了研究设计。首先分析了慢波结构的色散特性、耦合阻抗,通过理论和仿真确定了相关参数;其次使用 CST PS 仿真工作室对结构进行了仿真分析,得到 41.68 W 的稳定输出,并使用相速渐变的方法降低电磁波的轴向速度,进一步提高注波相互作用效率和输出功率,使输出功率增大了 52.7%,得到了 63.12 W 的稳定输出;最后设计了符合要求的盒型输出窗和模式转换器,验证了高频系统的传输特性。这些研究和设计,为 0.34 THz 双电子注高次模折叠波导行波管的实际研制提供了方案和支持。

参考文献:

- [1] Siegel P H. Terahertz technology[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, 50(3): 910-928.
- [2] Kreischer K E, Tucek J C, Basten M A, et al. 220 GHz power amplifier testing at northrop grumman[C]//2013 IEEE 14th International Vacuum Electronics Conference. 2013.
- [3] Basten M, Tucek J, Gallagher D, et al. A multiple electron beam array for a 220 GHz amplifier[C]//2009 IEEE International Vacuum Electronics Conference. 2009.
- [4] Li Ke, Liu Wenxin, Wang Yong, et al. A nonlinear analysis of the terahertz serpentine waveguide traveling-wave amplifier[J]. *Physics of Plasmas*, 2015, 22: 043115.
- [5] 高鹏鹏, 刘文鑫, 张兆传. 双电子注高次模折叠波导慢波结构注波相互作用仿真分析[J]. *真空科学与技术学报*, 2018, 38(6): 465-471. (Gao Pengpeng, Liu Wenxin, Zhang Zhaochuan. Simulation of beam-wave interaction of newly-designed two electron beams higher order mode folded waveguide slow wave structure[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2018, 38(6): 465-471)
- [6] 祝方芳, 刘文鑫. 0.22 THz 折叠波导行波管输出窗的仿真设计与实验研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2017, 37(10): 997-1002. (Zhu Fangfang, Liu Wenxin. Design of output window for 0.22 THz folded waveguide travelling wave tube: a simulation and experimental study[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2017, 37(10): 997-1002)
- [7] 高鹏鹏. 太赫兹双电子注折叠波导慢波结构注-波相互作用研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018. (Gao Pengpeng. Research on the beam-wave interaction of terahertz two electron beams folded waveguide slow wave structure[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018)
- [8] 王士龙, 薛谦忠. 220 GHz 三注折叠波导慢波电路的设计与仿真[J]. *真空科学与技术学报*, 2017, 37(2): 206-210. (Wang Shilong, Xue Qianzhong. Design and simulation of 220 GHz three-beam folded waveguide slow-wave circuit[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2017, 37(2): 206-210)
- [9] Liu Wenxin, Zhang Zhiqiang, Liu Weihao, et al. Demonstration of a high-power and wide-bandwidth G-band traveling wave tube with cascade amplification[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2021, 42(4): 593-596.
- [10] 颜胜美. 多注太赫兹折叠波导行波管技术研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2015. (Yan Shengmei. Research on the technology of multistream Terahertz folded Waveguide TWT[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2015)
- [11] 颜胜美, 苏伟, 王亚军, 等. 并行多注 THz 折叠波导行波管的理论分析与数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 083105. (Yan Shengmei, Su Wei, Wang Yajun, et al. Theoretical analysis and numerical simulation of parallel multi-beam THz folded waveguide traveling-wave tube[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 083105)
- [12] 徐翱, 周泉丰, 阎磊, 等. 0.34 THz 折叠波导行波管设计及流通管实验[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2014, 12(2): 153-157. (Xu Ao, Zhou Quanfeng, Yan Lei, et al. Design of 0.34 THz folded Waveguide TWT and runner pipe experiment[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2014, 12(2): 153-157)
- [13] 李科. 基于折叠波导慢波结构的双电子注太赫兹辐射源研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016. (Li Ke. Investigation of the terahertz resource bases on two-beam folded waveguide slow wave structure[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016)
- [14] 高鹏鹏, 张兆传, 刘文鑫, 等. G 波段双注折叠波导行波管的注-波相互作用特性[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2018, 16(4): 571-575. (Gao Pengpeng, Zhang Zhaochuan, Liu Wenxin, et al. Beam-wave interaction characteristics of G-band two-beam folded waveguide traveling wave tube[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2018, 16(4): 571-575)
- [15] 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.
- [16] 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, 944. (Zhang Changqing, Gong Yubin, Wei Yanyu, et al. Investigation on loss characteristics of the sub-millimeter wave folded waveguide slow-wave circuit[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2010, 31(6): 880-884, 944)
- [17] 樊孝年, 邬显平. 螺旋线慢波结构损耗特性研究[J]. *真空电子技术*, 2000(3): 1-9. (Fan Xiaonian, Wu Xianping. The study on the loss characteristics of helical slow wave structure[J]. *Vacuum Electronics*, 2000(3): 1-9)
- [18] 廖华. 太赫兹双注过模折叠波导慢波结构的注-波相互作用研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017. (Liao Hua. Investigation of the interaction of beam-wave based on two-beams overmoded folded waveguide slow wave structure[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017)