

平面超材料对曲折线慢波结构行波管效率改善和杂模抑制的影响

李周琦^{1,2}, 文政^{1,2}, 张志强^{1*}, 罗积润^{1,2}

(1. 中国科学院空天信息创新研究院高功率微波源与技术重点实验室, 北京 101407;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对U型曲折线慢波结构带状注波管杂模抑制和相互作用效率提高等面临的挑战, 提出了一种开口菱形超材料结构。在综合考虑电路单元谐振性能、与U型曲折线慢波结构之间的协调配合以及电路实现可行性和结构简单等因素, 通过电路设计和数值模拟优化等具体措施相结合, 探讨这种超材料对增强注波相互作用表面电场和抑制电路振荡的效果。在Ka波段优化的结果表明, 这种超材料在抑制杂波和改善注波相互作用效率方面效果明显, 对此类行波管稳定性提高具有重要意义。

关键词: 超材料; 曲折线慢波结构; 注波相互作用; 杂模抑制

中图分类号: O46

文献标识码: A

Effect of a planar metamaterial on the efficiency improvement and parasitic oscillations suppression of a meander-line slow wave traveling wave tube

LI Zhou-Qi-Jun^{1,2}, WEN Zheng^{1,2}, ZHANG Zhi-Qiang^{1*}, LUO Ji-Run^{1,2}

(1. Key Laboratory of High power Microwave Sources and Technologies, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 101407, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: An open rhombus metamaterial structure is proposed to suppress the parasitic mode oscillations and improve the beam-wave interaction efficiency of a U-shaped meander-line slow wave traveling wave tube. The effect of the metamaterial on the surface E-field enhancement of the beam-wave interaction and the suppression of the parasitic oscillations were discussed through the combination of the circuit design with the numerical simulation optimization by considering the resonant performance of the metamaterial unit, the coordination of the matamaterial with the slow wave structure, the realizability and simplicity of the circuit structure. The simulated results of a Ka-band U-shaped meander-line slow wave traveling wave tube show that this metamaterial is effective in suppressing the parasitic oscillations and improving beam-wave interaction efficiency, which is of great significance of improving the stability of this kind of traveling wave tube.

Key words: metamaterial, meander-line slow wave structure, beam-wave interaction efficiency, parasitic oscillation suppression

引言

行波管是一种宽带大功率真空微波器件, 在通信、雷达和电子对抗等领域具有广泛应用^[1]。曲折线平面慢波结构(ML-SWS)行波管结合带状电子

注, 在降低电压、缩小体积、减轻重量、简化制备工艺和向高频率/大功率发展等方面都具有独特优势^[1]。

由于高增益和慢波结构周期性的特征, 返波与

收稿日期: 2022-06-06, 修回日期: 2022-07-17

Received date: 2022-06-06, revised date: 2022-07-17

基金项目: 中国科学院重点实验室项目资助(E23D13010D)

Foundation items: Support Key Laboratory of Chinese Academy of Sciences Funding(E23D13010D)

作者简介(Biography): 李周琦(1997-), 女, 辽宁沈阳人, 职称, 硕士学位, 主要研究领域为高功率真空电子器件、微波超材料应用, Email: lzhqj97@163.com

*通讯作者(Corresponding author): Email: zhangzq@aircas.ac.cn

自激振荡始终是维持行波管稳定与可靠性面临的主要问题。传统抑制振荡的方法是通过衰减或截断以增益降低和噪声增强的代价换取稳定性^[2],但由此带来了电压升高和体积重量增加的不利因素。超材料(Metamaterial)能够通过人工设计出自然材料不具备而实际应用需求的特殊性质^[3-5],将其与平面化的曲折线慢波结构有机结合,可能对改善行波管特性有某些作用。例如,文献[6]和[7]分别在介质基板内镶嵌与介质厚度等高的金属圆柱和加载相互连接的双矩形环金属层,通过增强慢波结构电场以提升注波互作用效率。文献[8]和[9]利用多环嵌套超材料的表面结构,有效抑制了电路中的返波振荡,不过,这种超材料的表面金属结构相对复杂。

目前,相关超材料在行波管中的应用相对有限。本文在分析超材料与慢波结构结合后可能产生的作用的基础上,通过比较各种已被采用的超材料结构和应用效果,提出一种相对简单的超材料结构。在Ka波段,利用这种超材料结构与曲折线慢波结构相结合,通过不断改变各种几何和电参数,利用CST电磁仿真软件^[10]进行注波互作用分析和优化,尝试同时在注波互作用效率和杂模抑制两个方面改善平面慢波结构行波管的性能。

1 曲折线基本电路及特性

图1是本文讨论的U型曲折线慢波结构(U-ML-SWS),该结构采用铜制微带线印制于介质基板上,制备后放置在矩形波导内。曲折线的单个周期长度为 gap ,微带线宽度为 b ,厚度为 d ,曲折线的直线部分长为 l ,弯曲部分为内外径相差 b 的半圆弧,利用半圆弧连接相邻的平行线。通过计算可得平行线间衔接处半圆的外径半径为 $(1/4)gap+(1/2)b$,内径半径为 $(1/4)gap-(1/2)b$ 。表1给出了一种Ka波段曲折线慢波结构的几何参量。曲折线的材料设置为无氧铜,电导率为 3.5×10^7 S/m,介质基底为氮化硼,相对介电常数为4,损耗角正切为 $\tan \delta = 0.00025$,曲折线周期数为70个。令输入、输出端口分别为端口1和2,本文图中出现的o1或o2分别表示从端口1或2输出的信号。

为了使后续加载超材料对慢波结构性能的影响更明显,并且整体慢波结构厚度合理,基于对各参数进行扫描仿真,确定介质基板厚度 h 为0.03 mm。但由于介质基底较薄,信号通道变窄,可能引起信号传输参数 S_{21} 变差。通过对该结构的信号进行匹配

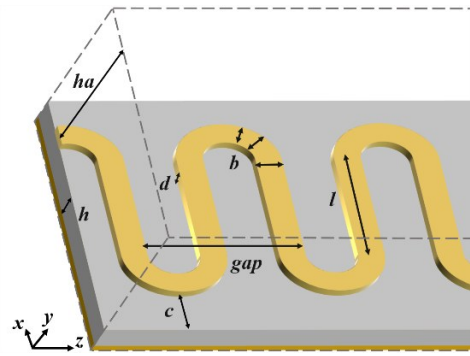


图1 U型曲折线慢波结构参数示意图

Fig. 1 The schematic diagram of the structural parameters of the U-ML-SWS

表1 慢波结构尺寸参数

Table 1 SWS size parameters

变量	值(mm)
gap	0.24
l	0.82
b	0.026
d	0.017
h	0.03

优化,得到Ka波段高频特性最优时的合理结构参数。S参数由图2给出。在频率小于33 GHz时, S_{21} 大于-5.5 dB, S_{11} 小于-32 dB。基于慢波结构中第 n 次空间谐波耦合阻抗的表达式^[11]式(1):

$$K_{cn} = \frac{|E_{zn}|^2}{2\beta_n^2 P_{\Sigma}} \quad (1)$$

利用CST软件计算耦合阻抗。其中 E_{zn} 为第 n 次空间谐波的纵向电场分量, β_n^2 为第 n 次谐波的传播常数, P_{Σ} 为整个金属腔内电磁波功率的总和。得到距离曲折线表面0.07 mm的高度算得耦合阻抗如图3所示,在频率小于32.5 GHz时,耦合阻抗大于 10Ω 。

根据色散曲线计算得出的同步电压,通过对电子注电压进行参数扫描,取信号输出稳定情况下增益最高时的电子注电压,得到工作频率为28 GHz时电子注合适的工作电压为2500 V,此时对应的电子注速度为 $0.098c$,对应图4。由图中电压线与第2、3、4个模式的返波线交点可知,该结构在P1(52 GHz),P2(105 GHz),P3(120 GHz)左右时可能出现返波。

在输入信号为28 GHz,输入功率0.32 W的条件下,设置电子注电流0.2 A,与曲折线表面之间的距离为 h_2 ,当 $h_2=0.055$ mm,外加均匀约束磁场0.55 T

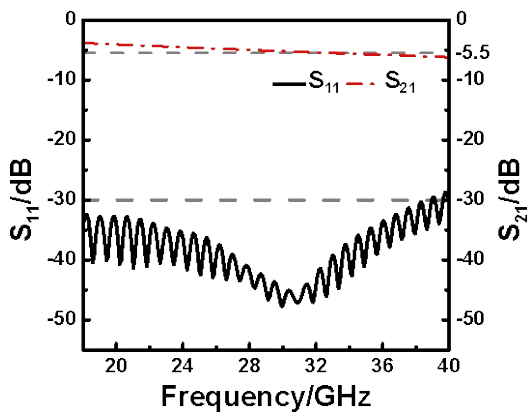


图2 曲折线慢波结构的S参数曲线图
Fig. 2 S parameter of the optimized ML-SWS

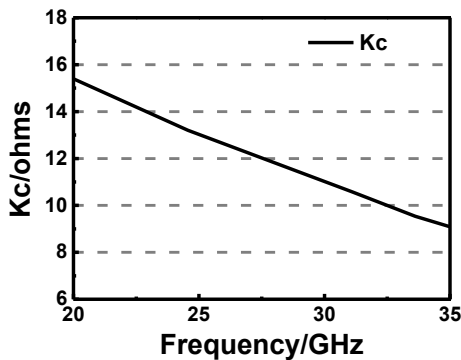


图3 曲折线慢波结构的耦合阻抗曲线图
Fig. 3 Coupling impedance of the optimized ML-SWS

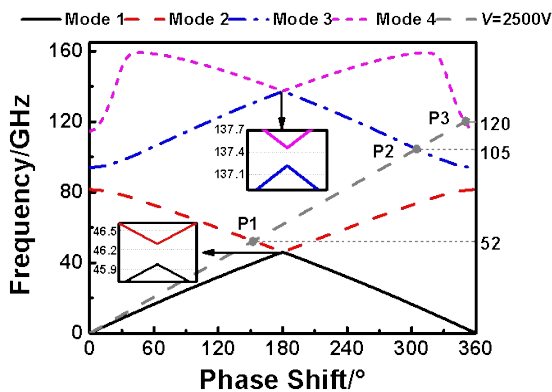


图4 2500 V 注电压线与慢波结构色散图
Fig. 4 Dispersion and 2500 V beam voltage line diagram of the ML-SWS

时,电子通过率约为 80.3%,整个相互作用过程较为稳定。此时电子产生了明显的群聚,并且在慢波结构最后几个周期产生了电子超越现象,注波相互作用比较充分。但输出信号增益仅 18.09 dB,注波相互作用效率仅为 4.06%,且由图 5 的频谱可知,二次谐波输出功率仅与基波相差 23.8 dB。

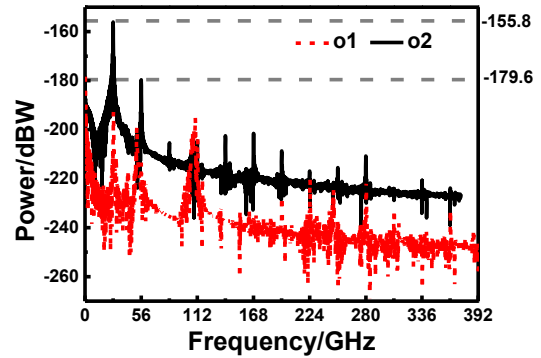


图5 输入信号 28 GHz 时输出信号频域图
Fig. 5 Frequency domain diagram of output signal with input signal of 28 GHz

对输入信号进行频率扫描,发现当慢波结构工作在 31 GHz 时,输出信号出现了返波,输出信号的频谱由图 6 给出。从输入端口输出的信号(o1)在 107 GHz 频点处的功率比工作频点输出信号低 30 dB,而由其产生的反射振荡的正向输出功率仅比工作频点功率低 18 dB。结合图 4 的色散图可以看出,107 GHz 的杂谱对应着电压线与模式三的交点 P2,而 54 GHz 与 121 GHz 的杂谱分别对应点 P1 与 P3。同时还有因反射引起的各种杂谱振荡,这会对输入信号放大工作的稳定性产生影响。

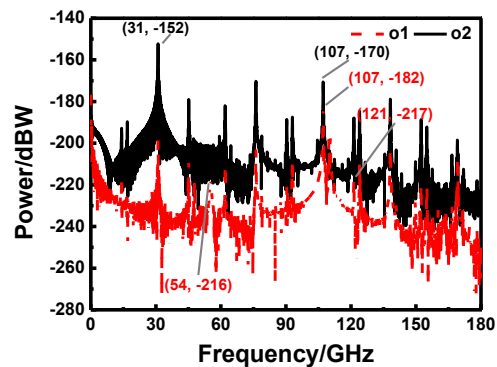


图6 输入信号为 31 GHz 时的输出信号频域图
Fig. 6 Frequency domain diagram of output signal under 31 GHz input signal

2 超材料的设计与仿真

从结果和分析得知,上文提到的 U-ML-SWS 还存在以下问题:其一、输入信号注波相互作用效率很低,其二、杂模振荡会影响工作稳定性(包括谐波、返波和各种反射振荡)。超材料的设计原则是通过平面化无源谐振电路设计其每一个单元,并将这些单元按一定规律周期分布,结合这些周期分布电路之间的相互耦合作用,形成不同频率范围的带通或

带阻特性,以完成对杂模信号抑制和输入信号放大的改善作用。针对前面 U-ML-SWS 存在的问题,对超材料的作用主要有两方面要求,其一是增强注波耦合;其二是抑制振荡,特别是二次谐波和 107 GHz 返波以及相关的反射振荡。

考虑到可放置超材料的区域,即 U-ML-SWS 的微带线区域下方,尺寸十分有限,因此在设计超材料时需要尽可能在有限的物理空间实现较大的电尺寸效果。一般有两种实现方式:一是增加单个超材料单元的金属结构复杂度,二是利用单元间的电耦合或磁耦合形成并联谐振回路。目前研究较多的超材料单元一般采用第一种方式拓宽作用频带,比如各类互补型开口环。互补环状结构由两个大小不同、开口方向相反的环形组成,可以保证超材料平面至少具有两个不同的吸收峰。由于互补或者多环结构对加工以及制造真空环境的技术要求较高,为了在保证结构简单的同时使单元间的耦合较强,本文考虑用开口菱形环作为超材料单元。相比于较为常用的开口圆形与矩形结构,该形状组成的周期阵列在单元之间可以通过金属直角的电容耦合,实现带宽的展宽和工作频段的选择。

在综合考虑电路单元谐振性能、与 U-ML-SWS 之间的协调配合、抑制振荡和增强注波耦合以及电路实现可行性和结构简单等因素后,通过电路设计和数值模拟优化等具体措施的相互结合,本文提出一种开口菱形超材料结构单元,模型如图 7 所示。通过开口的电容和微带线的电感形成 LC 谐振单元,再通过这些单元的周期性分布实现带通或带阻的频率特性。本节将针对上一节讨论的 Ka 波段 U-ML-SWS 出现的效率低和振荡等问题,利用这种开口菱形超材料单元的周期组合,探讨该结构对增强相互作用表面电场和抑制电路振荡的效果。通过对结构和几何尺寸的优化以及与 U-ML-SWS 的合理结合,发现该结构存在改善电子效率和抑制振荡的可能性。表 2 给出达到电路改善时超材料结构的几何参数,下面将介绍对这种结构分析后获得的改善效果。

2.1 超材料对慢波结构纵向场的作用

超材料在部分工作频点下可以等效为理想磁导体(PMC)^[12]。对于正常入射的平面波,理想电导体(PEC)具有 180° 的反射相位,而 PMC 的反射相位为 0。反射相位定义为反射电场在反射表面的相位。正是由于超材料具有特殊的反射相位特征,可

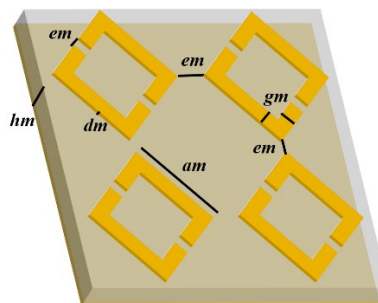


图 7 超材料结构图

Fig. 7 Structure of the metamaterial

表 2 超材料尺寸参数

Table 2 Metamaterial size parameters

变量	值(mm)
am	$3\sqrt{2}/20$
gm	$3\sqrt{2}/40 - 0.07$
em	0.02
dm	0.01
hm	0.16

以使反射的电场对反射表面的入射电场进行正向的叠加^[13],这可能有助于增强在平面超材料上方传输信号的纵向电场^[14]。

为了研究平面超材料对曲折线金属上方纵向电场的增强作用,对未加超材料与加载超材料的曲折线慢波结构进行了对比仿真,其中相同传输信号在慢波线建立的电场分布分别对应图 8(a)与(b) (此处用的慢波线结构参数为上文设计的曲折线慢波结构)。两张图的电场强度同样都在 $0 \sim 2 \times 10^5$ V/m 的度量范围,图中的虚线为间距 0.03 mm 的等高线,可以明显看出图 8(b)集中在介质基板内部的电场相对于图 8(a)有所减弱,多个场强大于等于 2×10^5 V/m 的区域降至 1×10^5 V/m,而微带线上方处在真空中的电场则有所增强,并且范围向上延伸。以图中对应着 6×10^4 V/m 的场强位置做比较,从集中在介质基板上方的 0.03~0.06 mm 范围内延伸至 0.03~0.12 mm,并且当高度大于 0.12 mm 时,仍存在 4×10^4 V/m 左右的电场。由于增厚 U-ML-SWS 的介质基底会衰减曲折线上的电磁波能量,而加载超材料后曲折线上方的场强均没有明显减弱,因此,可以说此超材料具有增强纵向场的作用。正是由于电场的延伸,曲折线上方电场在远离慢波结构表面的方向上的衰减趋势有所减缓,使得与电子注耦合的场强增大。这种延伸也使得注波相互作用效率对电

子注与曲折线间的距离变化的敏感度降低。

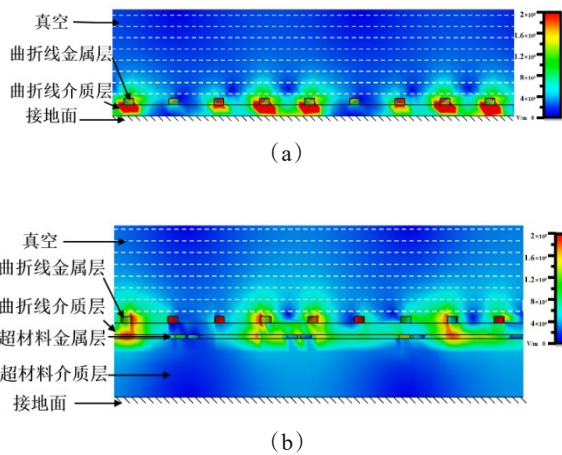


图8 输入信号在慢波结构中形成的电场图 (a)未加载超材料 (b)加载超材料

Fig. 8 E-field diagram of input signal in SWS (a) metamaterials unloaded (b) metamaterials loaded

2.2 超材料对杂波的抑制作用

由于本文提出的平面超材料结构是由一系列具有谐振特性的电路单元周期组合而成,因此具有频率带通和带阻作用。为了抑制上文设计的慢波结构中出现的返波与其它杂波,加载的超材料需要具备对特定频段范围杂波的抑制或吸收作用。通过直接在平面超材料上方加载一根沿 z 方向的微带线,得到该微带线传输信号时的 S 参数,从而可以计算出平面超材料对微带线上电磁波的抑制或吸收作用。为了定量描述对波的抑制或吸收作用,定义吸收率为^[15]:

$$A = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \quad (2)$$

如图9,将放置在平面超材料上方 z 方向的微带线由中心沿 x 轴移动 m 的距离,单位为毫米(mm)。通过仿真不同 m 值下的 S 参数,利用式(2)来计算超材料对不同位置处微带线的吸波效果。图中标出了 x 轴方向上,单个超材料的长度0.32 mm。

图10给出了 m 分别等于0.1、0.2以及0.42 mm时超材料对电磁波的吸收率。由吸收曲线可以得出,当频率小于35 GHz(也就是工作频段)时,平面超材料对信号的衰减小于8%,在频率小于90 GHz的范围内,吸收曲线均比较平坦。造成这部分信号衰减的主要原因是由于介质基板以及非理想金属导致的正常材料损耗。对比三条曲线吸收峰的值可以得出,当微带线距离平面超材料边界越近,超

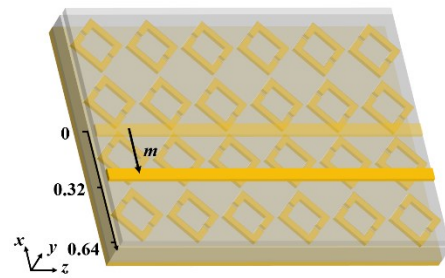


图9 平面超材料吸波特性仿真模型图

Fig. 9 Simulation model of planar metamaterial absorption property

材料对信号的吸收效果越好。这是由于整个结构放置于矩形波导内部的缘故,靠近边界即靠近金属,微带线本来集中在介质中的电场能量开始向金属边界集中,使得电磁波由于金属壁导致的损耗增加,并且频率越高,这种损耗越大。

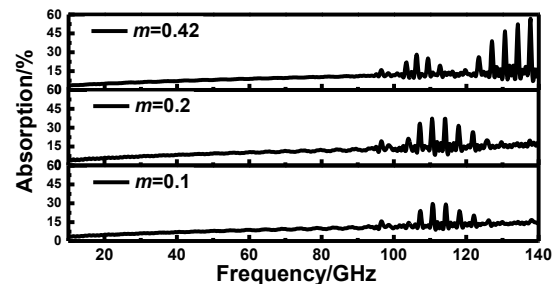


图10 平面超材料不同位置处的吸收率

Fig. 10 Absorption rate of planar metamaterial at different positions

结合图9与10可知,当 m 相差整数倍的超材料单元长度,即相差0.32 mm时(曲线 $m=0.1$ 与0.42 mm),吸收峰的频率范围产生了变化。说明当微带线沿着 x 轴移动,处在不同的超材料单元范围内时,由于超材料参与的耦合不同会体现出不一样的吸波特性。综合图10的三条吸收曲线的特点可知,此开口菱形平面周期超材料在95~140 GHz范围内对平行于其表面沿 z 轴延伸的微带线上的杂波有一定抑制作用。U-ML-SWS会因其周期性沿 x 轴和 z 轴方向延伸,因此开口菱形平面周期超材料有可能可以用来抑制U-ML-SWS中这个频率范围附近的杂波。

3 加载超材料的新慢波结构仿真与对比分析

将上文设计的超材料加载于U-ML-SWS的下方。由于所设计的超材料单元尺寸被慢波结构宽

度等因素限制,无法做到曲折线周期与超材料单元一一对应。经过选择和优化得到在曲折线宽度 x 轴方向需要匹配 4 个单元的超材料,曲折线 x 轴方向的结构中点对应四个单元的中点;曲折线周期延伸方向 z 轴则需要 3 个超材料单元匹配 4 个曲折线周期,新结构单个周期的模型如图 11 所示。不过,为适应超材料单元与 U-ML-SW 单元之间的周期匹配,U-ML-SWS 由 70 个周期减少为 68 个周期,对应 17 个新结构周期。

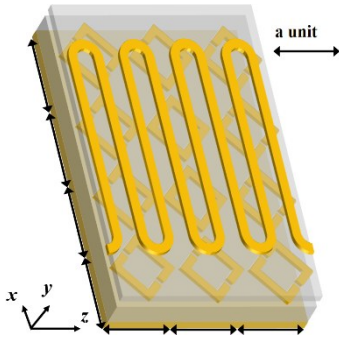


图 11 新慢波结构单个周期模型图

Fig. 11 Single period model of the new SWS

由于慢波结构整体变得更为复杂,新慢波结构每个周期对应原先四个曲折线周期,因此高频特性也会发生改变。周期长度的增长可能会导致电磁波的相速度增大,相应的同步电压也会增加,各个传输模式覆盖的频率范围大幅度缩减。新结构的色散图由图 12 给出,其中基模覆盖的频率范围为 0~18.65 GHz。模式二覆盖频率范围 18.75~31.05 GHz。为了使新慢波结构的工作频段与旧结构类似,选择让新结构工作在第二个模式。S 参数由图 13 给出。

在电子注电流保持为 0.2 A,输入信号为 28 GHz,输入功率保持 0.32 W 不变时,在色散图计算出的同步电压的基础上进行参数扫描,得出合适的

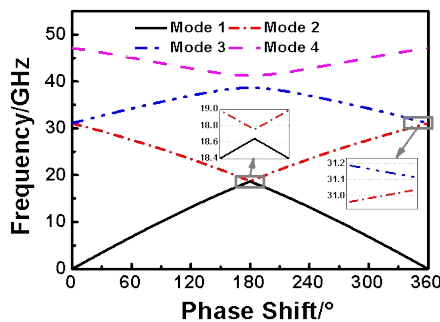


图 12 新慢波结构色散图

Fig. 12 Dispersion of the new SWS

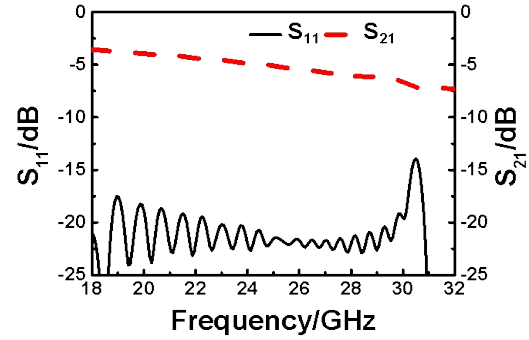


图 13 新慢波结构 S 参数曲线图

Fig. 13 S parameter of the new SWS

工作电压为 3200 V,相应的约束磁场为 0.5 T。当电子注与慢波结构间的距离 $h_2=0.068$ mm 时,在整个工作频段内,杂波与基波之间的功率差相差至少 30 dB。图 14 为工作在 28 GHz 时的输出信号频谱。可以看到,杂波中功率最高的频点为二次谐波点,且该频点处的输出信号功率与基波相差了 34.2 dB。此时信号放大增益能达到 23.29 dB,输出功率为 68.33 W,且相互作用效率提升至 10.63%。

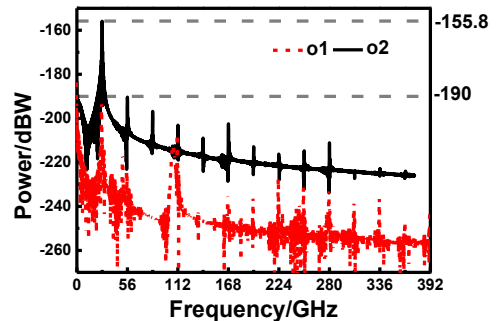


图 14 $h_2=0.068$ mm 时输出信号频谱图

Fig. 14 Frequency domain diagram when $h_2=0.068$ mm

为了进一步验证在曲折线下方加载设计的平面超材料可以抑制返波的产生这一观点,在保持电子注与慢波结构条件不变的情况下对整个工作频段,也就是此慢波结构的模式二,进行了扫频,结果显示在全频带范围内均未产生与基波功率差距小于 30 dB 的返波。因此,可以说设计的平面超材料在 95 GHz 至 140 GHz 对杂波有良好的抑制效果,超材料的加载对于处在该波段内的 U-ML-SWS 的返波、谐波和反射振荡都有明显的抑制作用。此结构在工作频带的输出功率以及增益由图 15 给出。其最佳工作频点为 28 GHz, -3 dB 带宽为 7.1 GHz (23.6~30.7 GHz)。

对于行波管而言,相互作用的电子注电流越大,

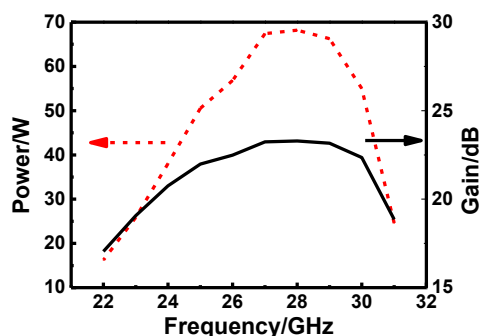


图 15 新慢波结构输出功率及增益随频率变化关系图

Fig. 15 Relationship of output power and gain with frequency of the new SWS

信号被放大的同时越容易产生杂波。因此在保证其他条件不变的情况下逐步提升了电子注电流,发现饱和工作电流为 0.55 A,此时的最大输出功率为 123.8 W,而输出信号仍然保持稳定,注波互作用效率为 7.02%。输出功率随电流变化关系图由图 16 给出。

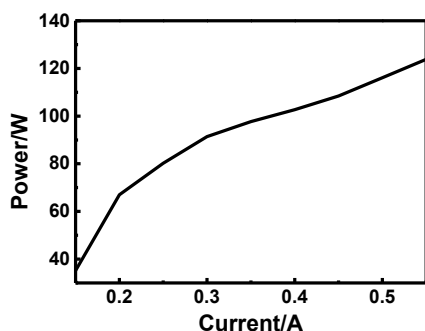


图 16 新慢波结构输出功率随电子注电流变化关系图

Fig. 16 Relationship of output power with beam current of the new SWS

4 结语

本文在综合 LC 谐振性能和结构简单的基础上,提出一种开口菱形平面周期超材料结构,与 U-ML-SWS 结合组成带状注行波管模型。利用这种模型在 Ka 波段进行注波互作用优化模拟,结果表明,相比不加载超材料,整个工作频带内各种杂波均得到了有效抑制,并且明显提升了输出功率和效率。

Reference

[1] LUO Ji-Run, FENG Jin-Jun, Gong Yu-Bin. A Review of Microwave Vacuum Devices in China: Theory and Device Development Including High-Power Klystrons, Spaceborne TWTs, and Gyro-TWTs [J]. *IEEE Microwave Magazine*,

2021, **22**(4): 18–33.

- [2] YANG Jing, ZHU Zhi-Zhen, SUN Bei-Yun, et al. The Shielding Effectiveness of Insulating Material with Metal on Both Side for HEMP [J]. *Journal of Microwaves* (杨静, 朱志臻, 孙蓓云, 等. 双面金属涂敷材料对高空电磁脉冲的屏蔽. *微波学报*), 2016, **32**(6): 27–30, 65..
- [3] VESELAGO, VIKTOR G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J], *Physics-Uspeski*, 1968, **10**(4): 509–514.
- [4] CHEN Hou-Tong, O'HARA J, AZAD A, et al. Experimental demonstration of frequency-agile terahertz metamaterials [J]. *Nature Photonics*, 2008, **2**(5): 295–298.
- [5] PENDRY J, HOLDEN A, STEWART W, et al. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures [J], 2001, **87**(25): 4773–4776.
- [6] FENG Cheng. Reserch on Microstrip Meander Line Traceling Wave Tube Based on Periodical Metallic Rods [D]. Southeast University, (冯程. 基于周期金属圆柱的微波曲折线行波管研究. 东南大学), 2018.
- [7] BAI Ning-Feng, SHEN Meng, SUN Xiao-Han. Investigation of Microstrip Meander-Line Traveling-Wave Tube Using EBG Ground Plane [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2015, **62**(5): 1622–1627.
- [8] BAI Ning-Feng, FENG Cheng, LIU Yun-Tao, et al. Integrated Microstrip Meander Line Traveling Wave Tube Based on Metamaterial Absorber [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2017, **64**(7): 2949–2954.
- [9] LIU Yun-Tao. Metamaterial Absorber Designing and its Application in Planar TWT [D]. Southeast University, (刘运滔. 人造周期材料衰减器设计及其在平面行波管中的应用. 东南大学), 2017.
- [10] 3DEXPERIENCE Company. CST STUDIO SUITE [EB/OL]. <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>.
- [11] REN Da-Peng, FENG Jin-Jun. Design and Simulation of Slow Wave Structure for a W Band Clinotron [J]. *Vacuum Electronics*, (任大鹏, 冯进军. W 波段斜注管高频结构的设计和注波互作用模拟. *真空电子技术*), 2011, (6): 21–25.
- [12] SIEVENPIPER D, ZHANG Li-Jun, BROAS R, et al. High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, **47**(11): 2059–2074.
- [13] YANG Fan, RAHMAT-SAMII Y. Reflection phase characterizations of the EBG ground plane for low profile wire antenna applications [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2003, **51**(10): 2691–2703.
- [14] LIU Ya-Ning, GUO Yu, WANG Su-Ling. Research on Reflection Phase Characterizations of High-Impedance Surface [J]. *Microcomputer Applications* (刘亚宁, 郭宇, 王素玲. 高阻抗表面的反射特性研究. *微型电脑应用*), 2013, (12): 27–30..
- [15] SINGH A, ABEGAONKAR M, KOUL S. Penta Band Polarization Insensitive Metamaterial Absorber for EMI/EMC Reduction and Defense Applications [C]. 2017 IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMaRC), 2017: 1–5.