



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 115440552 B

(45) 授权公告日 2024.09.03

(21) 申请号 202211120999.4

(51) Int.Cl.

(22) 申请日 2022.09.15

H01J 23/24 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

H01J 23/38 (2006.01)

申请公布号 CN 115440552 A

H01J 25/34 (2006.01)

(43) 申请公布日 2022.12.06

(56) 对比文件

(73) 专利权人 电子科技大学

Shengkun Jiang. Metamaterial-inspired
0.22 THz traveling-wave tubes with double
sheet beams. IEEE Transactions on Electron
Devices. 2023, 第70卷(第3期), 1306–1311.

地址 611731 四川省成都市高新区(西区)
西源大道2006号

审查员 郑勇

(72) 发明人 段兆云 江胜坤 吕志方 董济博

陈旭媛 唐涛 王战亮 巩华荣

官玉彬

(74) 专利代理机构 电子科技大学专利中心

权利要求书1页 说明书5页 附图4页

51203

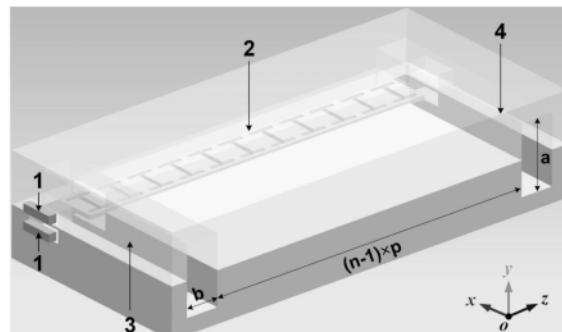
专利代理人 吴姗霖

(54) 发明名称

一种基于超构材料的双带状电子注太赫兹行波管

(57) 摘要

本发明的目的在于提供一种基于超构材料的双带状电子注太赫兹行波管，属于真空电子器件领域。该行波管通过设计具有独特的“I”型谐振环超构材料的慢波结构，利用该超构材料局域电场增强的特点，使其在电子注通道中具有非常高的耦合阻抗；同时，该超构材料具有平板型特征，当其加载于矩形波导中央时，使得超构材料慢波结构具备双带状电子注通道，进而引入双带状电子注来扩大注波互作用区域，提高注波互作用，因而能够实现小型化、高功率和高增益的太赫兹行波管。



1. 一种基于超构材料的双带状电子注太赫兹行波管,包括阴极、超构材料慢波结构、输入装置、输出装置和条形板;

所述条形板为长方体金属块,其左侧固定设置输入装置,右侧固定设置输出装置,前侧固定设置超构材料慢波结构;其中,所述输入装置和输出装置均为矩形耦合波导,其一端为信号输入端或信号输出端,另一端两个侧壁上均设置通孔,作为电子注通道,阴极设置于输入装置的电子注通道入口处;

其特征在于,所述超构材料慢波结构包括矩形波导和设置于矩形波导内的n个沿电子注传输方向依次排列的超构材料单元,并将矩形波导内部空间平均划分为上下两个电子注通道;所述超构材料单元包括水平截面为矩形的金属环和两个相同尺寸的矩形金属块,两个矩形金属块的长边与矩形金属环内侧相对的两个长边固定连接,且不与矩形金属环内侧的两个短边连接,超构材料单元内部中央形成了一个“I”型谐振间隙,且整个超构材料单元关于两个矩形金属块的长边中心点连线呈轴对称;

第一个超构材料单元和最后一个超构材料单元均有一半位于输入装置和输出装置的矩形耦合波导内;阴极为双阴极,关于超构材料单元结构所在平面上下对称设置,用于发射双带状电子注。

2. 如权利要求1所述的双带状电子注太赫兹行波管,其特征在于,双带状电子注太赫兹行波管还包括聚焦磁装置,用于为双带状电子注提供均匀磁场,维持电子注的稳定传输。

3. 如权利要求1所述的双带状电子注太赫兹行波管,其特征在于,所述超构材料慢波结构的材料为高电导率材料。

4. 如权利要求3所述的双带状电子注太赫兹行波管,其特征在于,高电导率材料为无氧铜、金或银。

5. 如权利要求1所述的双带状电子注太赫兹行波管,其特征在于,矩形金属环的长边长度为w,宽边长度为超构材料慢波结构的周期p,矩形金属环的环宽度为d;两个矩形金属块之间距离为g,且矩形金属块的宽边与未相连的矩形金属环的宽边的间距也为g;矩形金属环和矩形金属块的厚度均为t;超构材料慢波结构中的矩形波导的长度为l,高度为h,宽度为w;且 $l = (n-1)p$ 。

6. 如权利要求1-5任一权利要求所述的双带状电子注太赫兹行波管,其特征在于,双带状电子注太赫兹行波管的工作过程为:待放大的高频场从输入装置的信号输入端馈入到矩形耦合波导,与第一个超构材料单元电耦合进入到超构材料慢波结构;阴极产生双带状电子注,首先穿过电子注通道入口,经矩形耦合波导后进入超构材料慢波结构的电子注传输区域,互作用后的电子注由电子注输出通道进入收集极;高频场与电子注互作用后,从超构材料慢波结构最后一个超构材料单元耦合到输出装置的矩形耦合波导,再通过信号输出端输出至外接匹配负载。

一种基于超构材料的双带状电子注太赫兹行波管

技术领域

[0001] 本发明属于真空电子器件领域,具体涉及一种基于超构材料的双带状电子注太赫兹行波管。

背景技术

[0002] 太赫兹波是指频率为0.1-10THz的电磁波,在宽带通信、高分辨率成像雷达、医疗诊断、安检等领域具有极其重要的应用前景。然而,由于太赫兹辐射源缺乏,太赫兹科技的广泛应用受到极大制约。

[0003] 真空电子器件具有高功率、高增益、高效率以及宽带宽的优点,是当前所有可行的太赫兹辐射源中极为引人注目的一种。作为真空电子器件典型代表之一的太赫兹行波管由于能够同时兼顾功率、增益以及带宽等优势,因而得到了广泛而深入的研究。近年来,随着科研工作者的不断努力,大量的太赫兹行波管先后被成功研制,并证实了相较固态电子器件有显著的高功率、高效率等优势。现有技术中太赫兹行波管所采用的慢波结构主要是折叠波导、矩形栅和交错双栅及其变形;同时,伴随着电子注技术的蓬勃发展,带状电子注获得了更多的关注。与圆形注行波管相比,带状电子注行波管具有更大的互作用区域,在相同的注电流密度下,采用更大横向尺寸的带状电子注可以显著提高注电流,进而提升行波管的性能。例如,2017年,带状电子注应用于太赫兹行波管的可行性首次在美国UC-Davis得到证实。A.Baig等人采用交错双栅慢波结构,研制出世界上第一支单带状电子注太赫兹行波管,在0.2THz测得最大输出功率107W(A.Baig et al., "Performance of a Nano-CNC Machined 220-GHz Traveling Wave Tube Amplifier," IEEE Transactions on Electron Devices, vol.64, no.5, pp.2390-2397, May 2017.)。尽管带状电子注的注电流密度高达438A/cm²,且采用了总长度~4cm的交错双栅慢波结构,但这支太赫兹行波管的最大增益仅为33dB。究其原因,主要是因为其慢波结构的耦合阻抗低、单电子注通道互作用区域小限制了注波互作用的能量交换。此外,该研究中采用的交错双栅慢波结构长度较长,不利于太赫兹行波管小型化。

[0004] 为了克服传统太赫兹慢波结构耦合阻抗低、电子注通道狭小以及常规太赫兹行波管不够小型化的缺点,发展新型高耦合阻抗且拥有大电子注通道的慢波结构极为重要。全金属超构材料作为一种亚波长电磁结构,具有显著的局域电场增强的特点,同时其亚波长特性能够极大缩短慢波结构的纵向长度和横向尺寸。2017年,X.Tang等人基于超构材料提出的S波段双频切伦科夫振荡器,电子效率达到52%,是常规S波段返波管电子效率的两倍以上(X.Tang et al., "Dual Band Metamaterial Cherenkov Oscillator With a Waveguide Coupler", IEE E Transactions on Electron Devices, vol.64, no.5, pp.2376-2382, May 2017.),表明利用超构材料作为慢波结构的新型真空电子器件具有高电子效率的优点。然而,X.Tang等人提出的超构材料单元结构为非“T”型结构,其工作是基于返波特性工作的振荡器,不是基于前向波特性工作的超构材料行波管,且工作频段为S波段,并未实现太赫兹频段的拓展。此外,基于超构材料慢波结构的返波振荡器是通过电子注

电压调谐来改变工作频率；而行波管作为一种放大器，不需要电子注电压调谐，是固定电子注电压，因而用于返波振荡器的超构材料慢波结构不太适用于行波管。

[0005] 因此，如何基于超构材料设计行波管，使其能够工作在太赫兹频段，且具有高耦合阻抗、高输出功率、高增益等优异性能，就成为研究方向之一。

发明内容

[0006] 针对背景技术所存在的问题，本发明的目的在于提供一种基于超构材料的双带状电子注太赫兹行波管。该行波管通过设计具有独特的“*I*”型谐振环超构材料的慢波结构，利用该超构材料局域电场增强的特点，使其在电子注通道中具有非常高的耦合阻抗；同时，该超构材料具有平板型特征，当其加载于矩形波导中央时，使得超构材料慢波结构具备双带状电子注通道，进而引入双带状电子注来扩大注波互作用区域，提高注波互作用，因而能够实现小型化、高功率和高增益的太赫兹行波管。

[0007] 为实现上述目的，本发明的技术方案如下：

[0008] 一种基于超构材料的双带状电子注太赫兹行波管，包括阴极、超构材料慢波结构、输入装置、输出装置和条形板；

[0009] 所述条形板为长方体金属块，其左侧固定设置输入装置，右侧固定设置输出装置，前侧固定设置超构材料慢波结构；其中，所述输入装置和输出装置均为矩形耦合波导，其一端为信号输入端或信号输出端，另一端两个侧壁上均设置通孔，作为电子注通道，阴极设置于输入装置的电子注通道入口处；

[0010] 其特征在于，所述超构材料慢波结构包括矩形波导和设置于矩形波导内的n个沿电子注传输方向依次排列的超构材料单元，并将矩形波导内部空间平均划分为上下两个电子注通道；所述超构材料单元包括水平截面为矩形的金属环和两个相同尺寸的矩形金属块，两个矩形金属块的长边与矩形金属环内侧相对的两个长边固定连接，且不与矩形金属环内侧的两个短边连接，超构材料单元内部中央形成了一个“*I*”型谐振间隙，且整个超构材料单元关于两个矩形金属块的长边中心点连线呈轴对称；

[0011] 第一个超构材料单元和最后一个超构材料单元均有一半位于输入装置和输出装置的矩形耦合波导内；阴极为双阴极，关于超构材料单元结构所在平面上下对称设置，用于发射双带状电子注。

[0012] 进一步地，双带状电子注太赫兹行波管还包括聚焦磁装置，用于为双带状电子注提供均匀磁场，维持电子注的稳定传输。

[0013] 进一步地，所述超构材料慢波结构的材料为高电导率材料，优选为无氧铜、金、银等。

[0014] 进一步地，矩形金属环的长边长度为w，宽边长度为超构材料慢波结构的周期p，矩形金属环的环宽度为d；两个矩形金属块之间距离为g，且矩形金属块的宽边与未相连的矩形金属环的宽边的间距也为g；矩形金属环和矩形金属块的厚度均为t。

[0015] 进一步地，所述超构材料慢波结构中的矩形波导的长度为l，高度为h，宽度为w；且 $l = (n-1)p$ 。

[0016] 进一步地，所述双带状电子注太赫兹行波管的工作过程为：待放大的高频场从输入装置的信号输入端3-2馈入到矩形耦合波导3-1，与第一个超构材料单元电耦合进入到超

构材料慢波结构2；阴极1产生双带状电子注，首先穿过电子注通道入口3-3，经矩形耦合波导3-1后进入超构材料慢波结构的电子注传输区域，互作用后的电子注由电子注输出通道4-3进入收集极；高频场与电子注互作用后，从超构材料慢波结构最后一个超构材料单元耦合到输出装置的矩形耦合波导4-1，再通过信号输出端4-2输出至外接匹配负载。

[0017] 本发明的机理为：

[0018] 当超构材料行波管中的带状电子注的速度和高频场的相速度同步时，带状电子注可以和高频场发生有效互作用，处于高频场正半周的电子被减速，处于高频场下半周的电子被加速，这样均匀分布的电子产生了速度调制。加速的电子开始追赶减速的电子，速度调制快速转变为密度调制，带状电子注不再均匀分布；此时，带状电子注产生群聚，群聚中心和中心两边的电子逐渐移入减速场区域，被加速的电子个数明显少于被减速的电子个数，电子交出的能量就多于获得的能量，出现了电子注与高频场之间的净能量交换，高频场的幅值因此得到放大。

[0019] 本发明设计的超构材料单元加载于矩形波导内形成慢波结构，由于超构材料单元的“*I*”型谐振间隙包括中间谐振间隙和双侧间隙，其中，双侧间隙壁支持高频电流流经慢波单元边缘使得慢波结构单元之间在工作频带内具有较好的电磁耦合，确保了太赫兹波可在慢波结构中的有效传输；中间谐振间隙集中了太赫兹波的纵向电场，保证了太赫兹波与带状注的注-波互作用。与其他超构材料慢波结构不同，本发明超构材料单元的“*I*”型谐振间隙的双侧间隙与中间间隙垂直，双侧间隙中的电场几乎只有横向分量，不会参与电子注互作用；而非“*I*”型超构材料，在与中间间隙平行位置处还会有其他纵向电场的分布，会对太赫兹行波管中注-波互作用不利。因此，本发明的行波管能工作于太赫兹频段，且具有更大的注波互作用区域和更高的耦合阻抗，最终提升了行波管的功率和增益。

[0020] 综上所述，由于采用了上述技术方案，本发明的有益效果是：

[0021] 1. 本发明太赫兹行波管通过将超构材料单元结构周期地加载于空矩形波导中构成的新型全金属超构材料慢波结构，利用超构材料的亚波长特性，使得超构材料慢波结构要比常规慢波结构具有更短的纵向长度，仅为29.2mm，因而本发明超构材料太赫兹行波管具有小型化优点。

[0022] 2. 本发明超构材料单元具有“*I*”型谐振缝隙，在电子注传输方向具有较强的电场，比同频段传统慢波结构的耦合阻抗更高，有利于高频场获取电子注的能量，实现高功率输出。在0.21-0.225THz，电子注通道内的平均耦合阻抗超过5Ω，远高于常规慢波结构，约为常规慢波结构耦合阻抗的3倍。

[0023] 3. 本发明超构材料慢波结构的双电子注通道、大互作用区域，在同等电流密度情况下，有利于提升单位长度的注波互作用强度，从而达到提升太赫兹行波管输出功率和增益的目的。饱和情形下的最大输出功率达到400W，最大饱和增益为36dB。

附图说明

[0024] 图1为本发明基于超构材料的双带状电子注太赫兹行波管的整体结构示意图。

[0025] 图2为本发明基于超构材料的双带状电子注太赫兹行波管的内部结构示意图。

[0026] 图3为本发明超构材料单元的结构示意图。

[0027] 图4为本发明超构材料慢波结构的色散曲线图。

- [0028] 图5为本发明超构材料慢波结构xoz面的电场分布图。
- [0029] 图6为本发明超构材料慢波结构的耦合阻抗随频率变化曲线。
- [0030] 图7为本发明基于超构材料的双带状电子注太赫兹行波管的S参数曲线。
- [0031] 图8为本发明基于超构材料的双带状电子注太赫兹行波管饱和输出功率和增益随频率的变化曲线。
- [0032] 图中:1为阴极,2为超构材料慢波结构,2-1为超构材料单元,2-2为超构材料“*I*”型谐振间隙,2-3为矩形金属块,2-4为矩形金属环,2-5为矩形波导,3为输入装置,3-1为矩形耦合波导,3-2为信号输入端,3-3为电子注通道入口,4为输出装置,4-1为矩形耦合波导,4-2为信号输出端,4-3为电子注通道出口,5为条形板。

具体实施方式

[0033] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚,下面结合实施方式和附图,对本发明作进一步地详细描述。

[0034] 一种基于超构材料的双带状电子注太赫兹行波管,其整体结构示意图如图1所示,包括阴极1、超构材料慢波结构2、输入装置3、输出装置4、收集极(图中未示出)和条形板5;

[0035] 行波管的内部结构示意图如图2所示,条形板5为长方体金属块,其左侧固定设置输入装置3,右侧固定设置输出装置4,前侧固定设置超构材料慢波结构2;其中,输入装置3为矩形耦合波导3-1,其一端为信号输入端3-2,另一端相对的两个侧壁上均设置通孔,远离慢波结构一侧的通孔为电子注通道入口3-3,阴极1设置于电子注通道入口3-3处;输出装置4为矩形耦合波导4-1,其一端为信号输出端4-2,另一端相对的两个侧壁上均设置通孔,远离慢波结构一侧的通孔为电子注通道出口4-3,收集极设置于电子注通道出口4-3处;

[0036] 所述超构材料慢波结构2包括矩形波导2-5和设置于矩形波导2-5内的n个沿电子注传输方向依次排列的超构材料单元2-1,并将矩形波导内部空间平均划分为上下两个电子注通道。第一个超构材料单元和最后一个超构材料单元均有一半位于输入装置和输出装置的矩形耦合波导内;阴极1为双阴极,关于超构材料单元2-1所在平面上下对称设置,用于发射双带状电子注。

[0037] 单个超构材料单元2-1设置于慢波结构中的结构示意图如图3所示,包括水平截面(xoz平面)为矩形的金属环2-4和两个相同尺寸的矩形金属块2-3,两个矩形金属块2-3的长边与矩形金属环2-4内侧相对的两个长边固定连接,且不与矩形金属环内侧的两个短边连接,超构材料单元2-1内部中央形成了一个“*I*”型谐振间隙2-2,且整个超构材料单元关于两个矩形金属块的长边中心点连线呈轴对称;矩形金属环2-4的长边长度为w,宽边长度为慢波结构的周期p,矩形金属环的环宽度为d;两个矩形金属块2-3之间距离为g,且矩形金属块的宽边与未相连的矩形金属环的宽边的间距也为g;矩形金属环2-3和矩形金属块2-4的厚度均为t。

[0038] 超构材料慢波结构中的矩形波导的长度(沿电子注传输方向)为l,高度为h,宽度为w;且l=(n-1)p。

[0039] 实施例1

[0040] 本实施方式以工作频率范围为0.2THz-0.24THz的超构材料双带状电子注行波管为例。

[0041] 在本实施方式中,输入装置3与输出装置4结构一致,其矩形耦合波导的尺寸取决于行波管馈入信号的下截止频率 f_c ,只有高于 f_c 信号才能通过矩形耦合波导耦合到慢波结构中,进而与电子注互作用。

[0042] 下截止频率与矩形耦合波导的长边a和短边b有关,计算公式如下:

$$[0043] f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} + \frac{\pi^2}{b^2}}$$

[0044] 其中, ϵ_0 为真空中介电常数, μ_0 为真空中磁导率。

[0045] 行波管中结构参数取值如下:a=0.82mm,b=0.4mm,p=0.4mm,t=0.05mm,d=0.05mm,g=0.05mm,w=0.5mm,h=0.42mm,n=71;电子注通道3-3与4-3的矩形孔尺寸均为0.45mm×0.15mm。

[0046] 超构材料慢波结构2、输入装置3、输出装置4的材料均为高导无氧铜TU1,考虑到实际制作的超构材料慢波结构会有一定的表面粗糙度,从而导致损耗增加,故高导无氧铜TU1的等效电导率采用典型的 $2.2 \times 10^7 \text{ S/m}$ 。

[0047] 对行波管使用三维电磁仿真软件模拟计算,其中,本发明超构材料慢波结构的色散曲线图如图4所示,xoz面的电场分布图如图5所示,耦合阻抗随频率变化曲线如图6所示;双带状电子注太赫兹行波管的S参数曲线如图7所示,行波管饱和输出功率和增益随频率的变化曲线如图8所示。

[0048] 从图4中可以看出,色散曲线与38.5kV工作电压线在0.208THz(图中 f_1)相交,并且电压线与色散曲线在交点之上的一段近似平行,表明超构材料行波管在该工作电压下具有一定的同步带宽。从图5中可以看出,电场集中在“T”型谐振间隙中,并且在该区域的最大纵向电场 E_z 高达 $6.358 \times 10^{11} \text{ V/m}$,显示出了超构材料局域电场增强的特点。进一步,计算了本发明超构材料慢波结构在电子注通道区域的平均耦合阻抗随频率变化图,如图6所示,在工作频率0.21-0.226THz,平均耦合阻抗超过5Ω。

[0049] 图7为本发明包含71个超构材料单元的行波管S参数曲线图,在频率为0.215THz-0.2214THz范围,传输系数 S_{21} 介于-13.2dB~-18dB,反射系数 S_{11} 低于-18dB,表明双带状电子注通道的输入装置和输出装置均能够与具有“T”型谐振间隙的超构材料单元的慢波结构匹配良好,从而具备实现超构材料行波管稳定工作的能力。

[0050] 同时,对超构材料行波管进行了注波互作用的仿真计算,优化的注电压、注电流、均匀聚焦磁场分别为38.5kV、0.15A×2、0.8T。当输入功率为100mW,饱和输出功率和增益随工作频率的变化曲线,如图8所示,根据该曲线,易知3dB带宽位于0.213THz至0.2184THz,达到5.4GHz。特别地,在0.2169THz频率处,饱和输出功率可达400W,饱和增益约为36dB,沿着29.2mm行波管的饱和单位长度增益达到12.33dB/cm。

[0051] 以上所述,仅为本发明的具体实施方式,本说明书中所公开的任一特征,除非特别叙述,均可被其他等效或具有类似目的的替代特征加以替换;所公开的所有特征、或所有方法或过程中的步骤,除了互相排斥的特征和/或步骤以外,均可以任何方式组合。

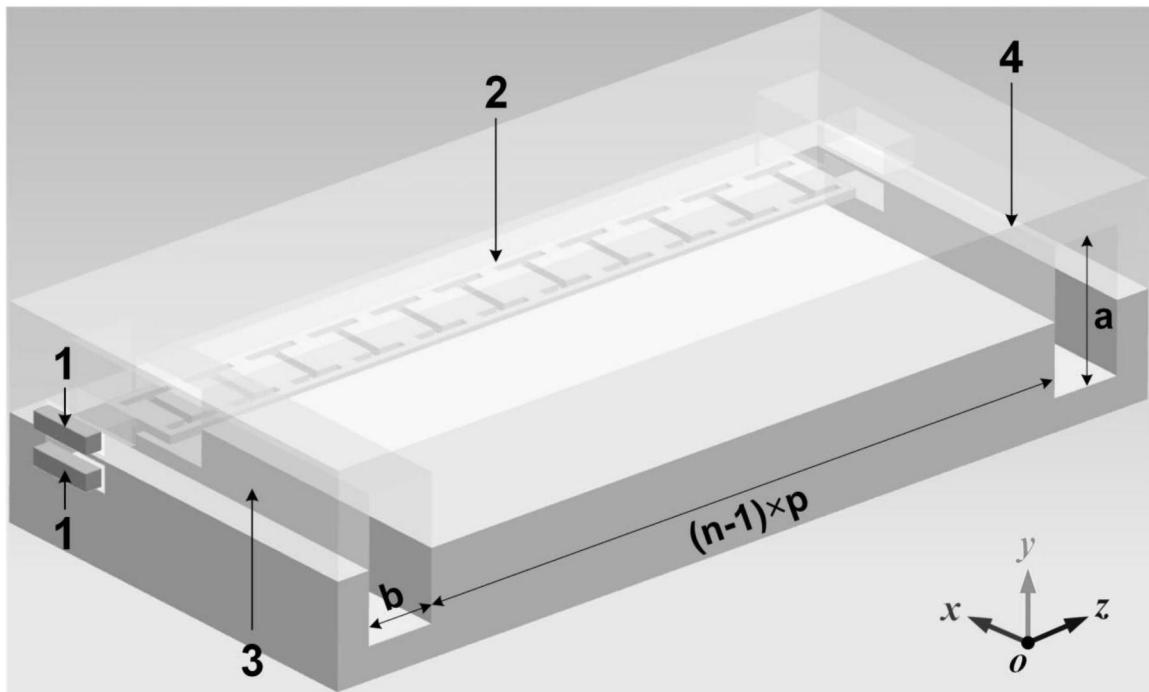


图1

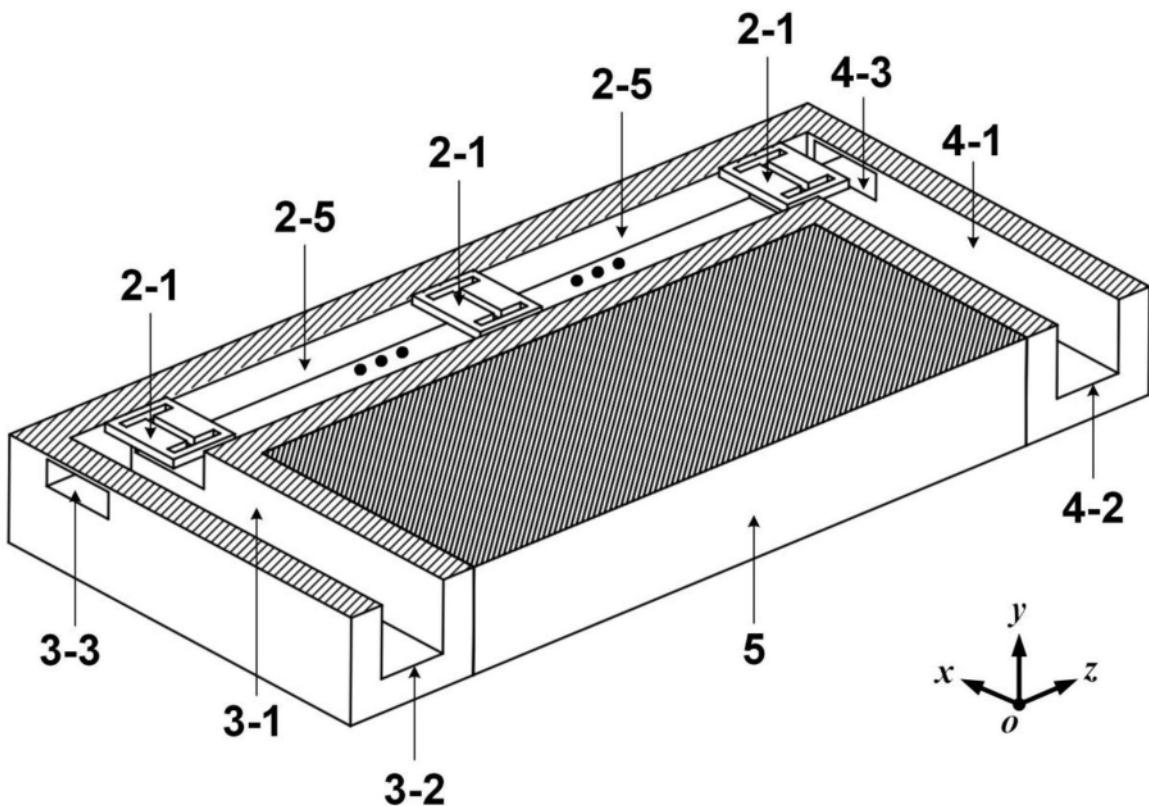


图2

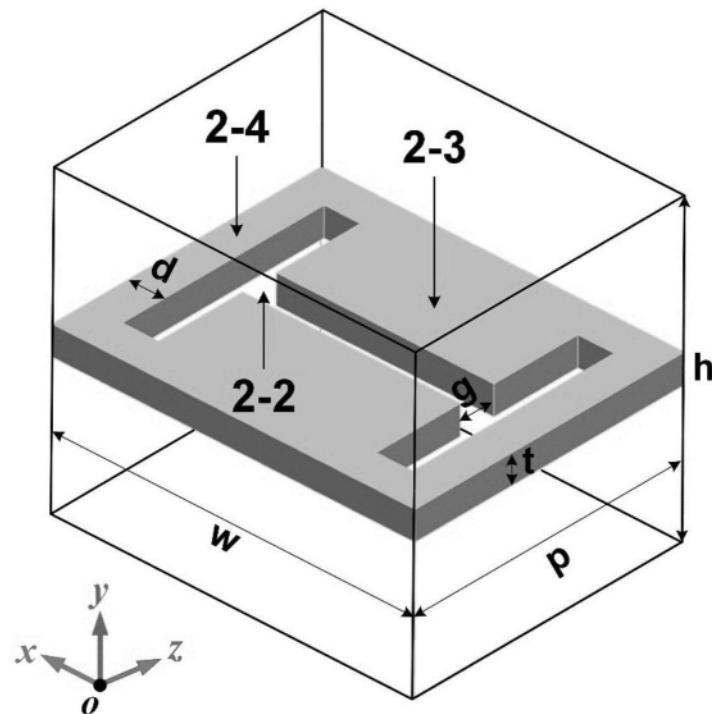


图3

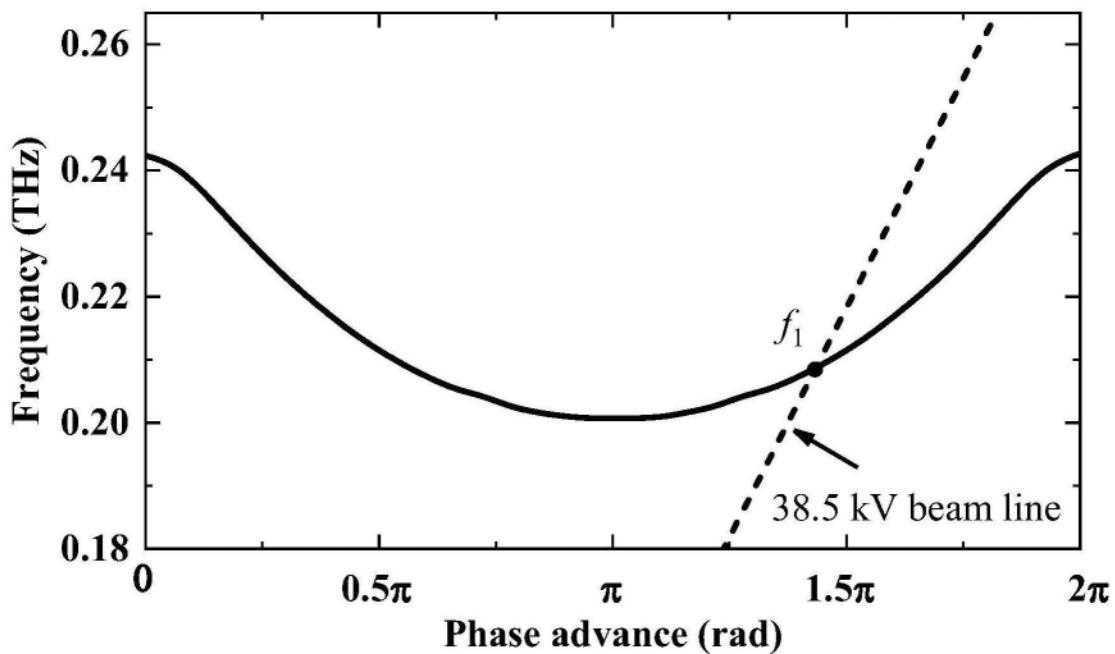


图4

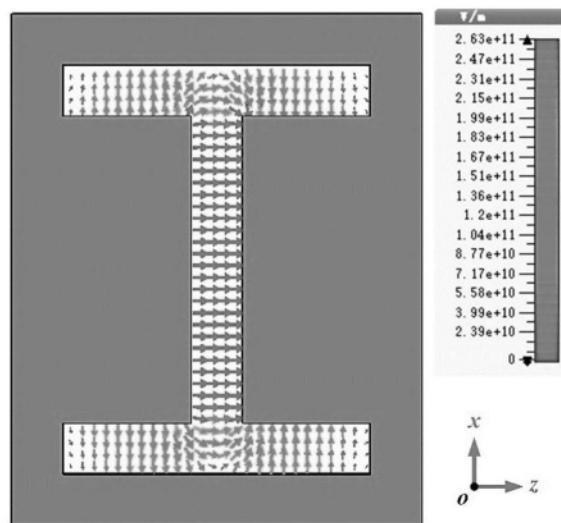


图5

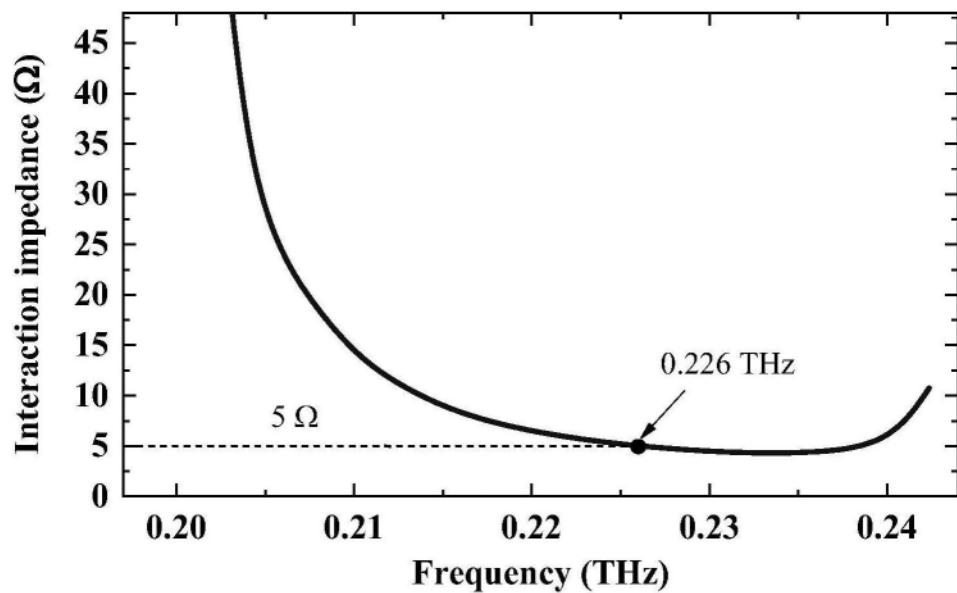


图6

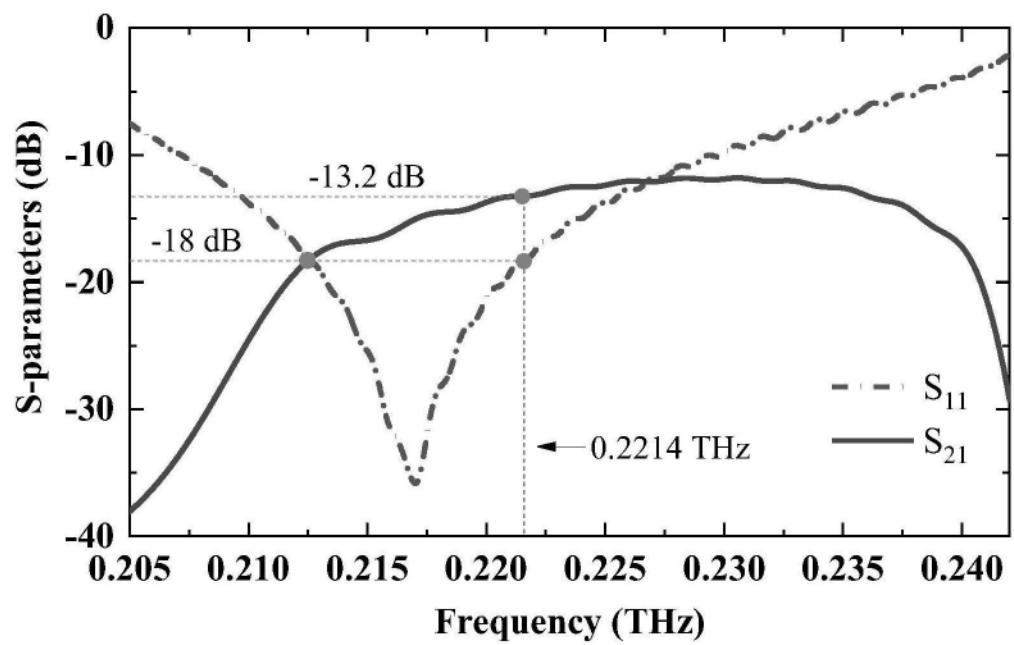


图7

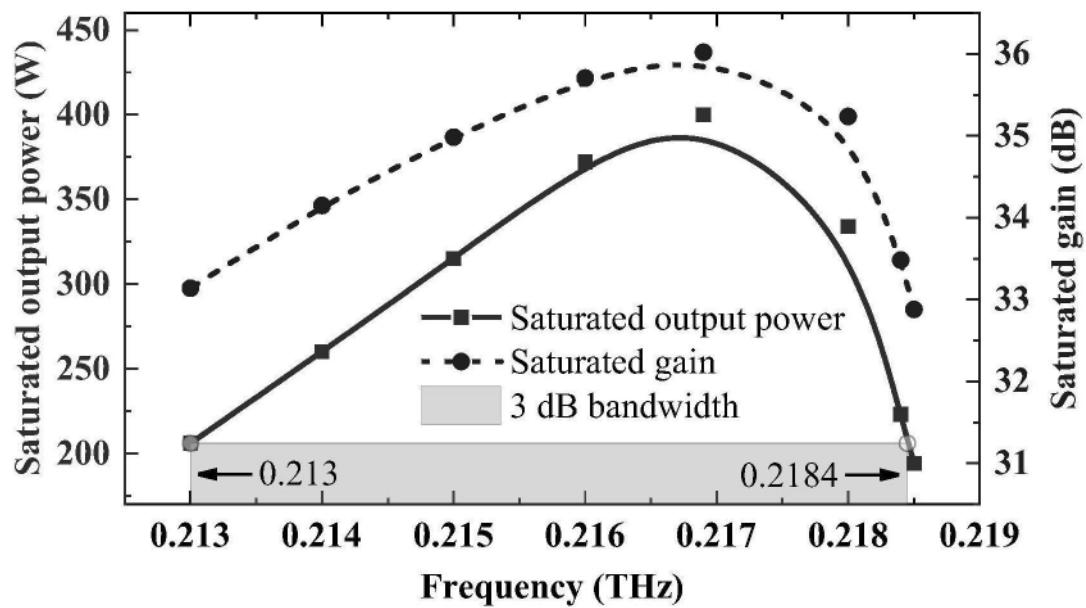


图8