(19)国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 117877458 A
(43)申请公布日 2024.04.12

(21)申请号 202410051847.6

(22)申请日 2024.01.15

(71)申请人 华南师范大学
地址 510006 广东省广州市番禺区外环西路378号

(72)发明人 顾敏 陈亚辉 刘冬梅

(74)专利代理机构 广东南北知识产权代理事务所(普通合伙) 44918
专利代理师 梁嘉朗

(51)Int.Cl.
G10K 11/30(2006.01)

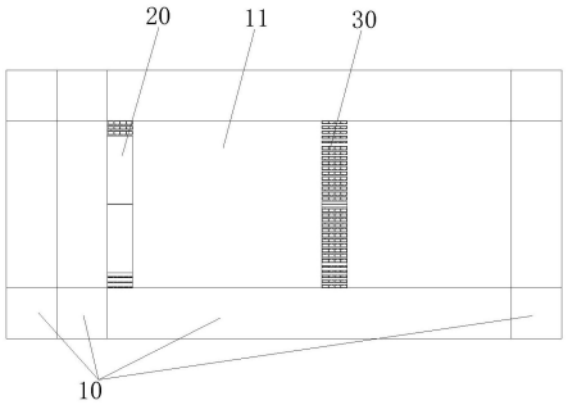
权利要求书1页 说明书6页 附图13页

(54)发明名称

一种基于旋转多普勒效应的超分辨声涡旋聚焦装置

(57)摘要

本发明涉及声学超分辨聚焦技术领域,具体公开一种基于旋转多普勒效应的超分辨声涡旋聚焦装置,包括PML完美匹配层、平面声波涡旋转换器和聚焦透镜;所述PML完美匹配层具有介质域;所述平面声波涡旋转换器设置在所述介质域内;所述聚焦透镜设置在所述介质域内;该基于旋转多普勒效应的超分辨声涡旋聚焦装置能通过旋转多普勒效应,使得装置产生的涡旋聚焦声斑的半高全宽进一步缩小,进一步增强超分辨的效果。



CN 117877458 A

1.一种基于旋转多普勒效应的超分辨声涡旋聚焦装置,其特征在于,包括:

PML完美匹配层,具有介质域;

设置在所述介质域内的平面声波涡旋转换器;以及

设置在所述介质域内的聚焦透镜。

2.根据权利要求1所述的一种基于旋转多普勒效应的超分辨声涡旋聚焦装置,其特征在于,所述平面声波涡旋转换器和聚焦透镜的中轴线重合。

3.根据权利要求1所述的一种基于旋转多普勒效应的超分辨声涡旋聚焦装置,其特征在于,所述平面声波涡旋转换器包含有多个第一扇形构件;

多个所述第一扇形构件依次拼接并构成圆柱形。

4.根据权利要求3所述的一种基于旋转多普勒效应的超分辨声涡旋聚焦装置,其特征在于,所述聚焦透镜包含有多个第二扇形构件;

多个所述第二扇形构件依次拼接并构成圆柱形。

5.根据权利要求4所述的一种基于旋转多普勒效应的超分辨声涡旋聚焦装置,其特征在于,所述第一扇形构件和第二扇形构件均包含有:

中心实体;

同心扇区;以及

隔板,配置为与所述中心实体和同心扇区连接;

其中,所述同心扇区为由四个亥姆霍兹谐振腔和一个法布里-珀罗谐振腔耦合而成的超材料结构单元。

6.根据权利要求1所述的一种基于旋转多普勒效应的超分辨声涡旋聚焦装置,其特征在于,所述介质域为空气域。

7.根据权利要求5所述的一种基于旋转多普勒效应的超分辨声涡旋聚焦装置,其特征在于,所述超材料结构单元的长度配置为最初入射声波波长的一半。

8.根据权利要求7所述的一种基于旋转多普勒效应的超分辨声涡旋聚焦装置,其特征在于,所述超材料结构单元的宽度配置为最初入射声波波长的十分之一。

9.根据权利要求1所述的一种基于旋转多普勒效应的超分辨声涡旋聚焦装置,其特征在于,所述平面声波涡旋转换器和聚焦透镜的间距为375mm;

所述平面声波涡旋转换器的半径与聚焦透镜的半径相同;

所述平面声波涡旋转换器的厚度与聚焦透镜的厚度相同。

10.根据权利要求5所述的一种基于旋转多普勒效应的超分辨声涡旋聚焦装置,其特征在于,所述平面声波涡旋转换器具有八组第一扇形构件,每组所述第一扇形构件的圆心角均为45°,每组所述第一扇形构件具有三组同心扇区;

所述聚焦透镜具有四组第二扇形构件,每组所述第二扇形构件的圆心角均为90°,每组所述第二扇形构件具有十六组同心扇区。

一种基于旋转多普勒效应的超分辨声涡旋聚焦装置

技术领域

[0001] 本发明涉及声学超分辨聚焦技术领域,具体涉及一种基于旋转多普勒效应的超分辨声涡旋聚焦装置。

背景技术

[0002] 传统声学聚焦在空间分辨率上遵守瑞利判据和阿贝衍射理论,即存在空间分辨率无法突破衍射极限。如何对方法以及对聚焦器件进行结构层面优化设计,突破声学衍射极限限制,实现声场的超分辨聚焦,是困扰声学聚焦领域研究的重要难题。通过调控携带物体亚波长细节特征的倏逝波,可以将聚焦斑点尺寸减小至瑞利极限以下,从而实现超分辨聚焦,现有的超分辨聚焦技术基本分为通过设计负折射率超材料平面透镜(光学或声学超透镜)重建倏逝波和采用极端各向异性(椭圆或者双曲色散)的共振超材料,将倏逝波转为传播波。

[0003] 现有的装置中,如果想要超分辨聚焦性能进一步加强,不可避免地需要调整涡旋聚焦装置的结构尺寸,以Helmholtz谐振腔型涡旋聚焦装置为例,Helmholtz谐振腔型涡旋聚焦装置为了强化声学超分辨涡旋聚焦的效果,即聚焦声斑的半高全宽(FWHM)进一步缩小,可以结合二元相位调制,调整谐振腔的宽度。结构尺寸调整设计繁琐,还需要进一步的结构优化设计。因此探索在不改变原有声学涡旋聚焦装置结构尺寸的情况下使得声学超分辨的效果进一步加强的装置十分必要。

发明内容

[0004] 本发明要解决的技术问题是提供一种基于旋转多普勒效应的超分辨声涡旋聚焦装置,其可以在通过装置实现超分辨聚焦的基础上,通过旋转多普勒效应进一步增强超分辨聚焦效果。

[0005] 为解决上述问题,本发明采用如下技术方案:

[0006] 一种基于旋转多普勒效应的超分辨声涡旋聚焦装置,包括PML完美匹配层、平面声波涡旋转换器和聚焦透镜;所述PML完美匹配层具有介质域;所述平面声波涡旋转换器设置在所述介质域内;所述聚焦透镜设置在所述介质域内。

[0007] 本公开至少一实施例提供的基于旋转多普勒效应的超分辨声涡旋聚焦装置中,所述平面声波涡旋转换器和聚焦透镜的中轴线重合。

[0008] 本公开至少一实施例提供的基于旋转多普勒效应的超分辨声涡旋聚焦装置中,所述平面声波涡旋转换器包含有多个第一扇形构件。

[0009] 多个第一扇形构件依次拼接并构成圆柱形。

[0010] 本公开至少一实施例提供的基于旋转多普勒效应的超分辨声涡旋聚焦装置中,所述聚焦透镜包含有多个第二扇形构件。

[0011] 多个第二扇形构件依次拼接并构成圆柱形。

[0012] 本公开至少一实施例提供的基于旋转多普勒效应的超分辨声涡旋聚焦装置中,所

述第一扇形构件和第二扇形构件均包含有:中心实体、同心扇区和隔板;

[0013] 所述隔板配置为与所述中心实体和同心扇区连接。

[0014] 所述同心扇区为由四个亥姆霍兹谐振腔和一个法布里-珀罗谐振腔耦合而成的超材料结构单元。

[0015] 本公开至少一实施例提供的基于旋转多普勒效应的超分辨声涡旋聚焦装置中,所述介质域为空气域。

[0016] 本公开至少一实施例提供的基于旋转多普勒效应的超分辨声涡旋聚焦装置中,所述超材料结构单元的长度配置为最初入射声波波长的一半。

[0017] 本公开至少一实施例提供的基于旋转多普勒效应的超分辨声涡旋聚焦装置中,所述超材料结构单元的宽度配置为最初入射声波波长的十分之一。

[0018] 本公开至少一实施例提供的基于旋转多普勒效应的超分辨声涡旋聚焦装置中,所述平面声波涡旋转换器和聚焦透镜的间距为375mm。

[0019] 所述平面声波涡旋转换器的半径与聚焦透镜的半径相同。

[0020] 所述平面声波涡旋转换器的厚度与聚焦透镜的厚度相同。

[0021] 本公开至少一实施例提供的基于旋转多普勒效应的超分辨声涡旋聚焦装置中,所述平面声波涡旋转换器具有八组第一扇形构件,每组所述第一扇形构件的圆心角均为45°,每组所述第一扇形构件具有三组同心扇区;

[0022] 所述聚焦透镜具有四组第二扇形构件,每组所述第二扇形构件的圆心角均为90°,每组所述第二扇形构件具有十六组同心扇区。

[0023] 本发明的有益效果为:

[0024] 1.将旋转多普勒效应与超分辨聚焦相结合,在不改变原有装置结构尺寸的前提下,通过频移来产生旋转多普勒效应,使得装置产生的涡旋聚焦声斑的半高全宽进一步缩小,进一步增强超分辨的效果。

[0025] 2.通过无源的方式产生涡旋聚焦声波,避免了复杂的声学换能器阵列设计,其中平面声波涡旋转换器只在部分范围内分布四个亥姆霍兹共振腔和一个法布里-珀罗谐振腔组合,极大简化了转换器整体结构;同时,通过结构调整,可是实现多种高阶涡旋的生成。

[0026] 3.根据涡旋相位公式和聚焦相位公式离散出转换器和聚焦透镜每组结构对应的相位,将每环超材料单元中直管宽度和相位匹配,通过小范围内调整超材料单元的腔宽和直管宽度,可以实现在轴向不同位置的涡旋聚焦,转换器和聚焦透镜的厚度和半径保持不变,流程简单。

[0027] 4.结构紧凑,占用空间小,制造成本低,可应用于声学成像、探测、通信等领域。

附图说明

[0028] 为了更清楚地说明本发明实施例中的技术方案,下面将对实施例描述中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0029] 图1为基于旋转多普勒效应的超分辨声涡旋聚焦装置的部件分布示意图。

[0030] 图2为平面声波涡旋转换器的视图。

[0031] 图3为聚焦透镜的立体图。

[0032] 图4为图2中A处的放大图。

[0033] 图5为第二扇形构件的视图。

[0034] 图6为平面声波涡旋转换器的剖面图。

[0035] 图7为平面声波涡旋转换器的局部剖面图。

[0036] 图8为亥姆霍兹共振腔和法布里-珀罗谐振腔的分布示意图。

[0037] 图9为图8中B处的放大图。

[0038] 图10为超材料单元结构产生的相位延迟随法布里-珀罗谐振直管宽度h1的变化曲线图。

[0039] 图11为转换产生的涡旋声压绝对值图。

[0040] 图12为转换产生的涡旋相位图。

[0041] 图13为聚焦透镜的聚焦声压绝对值图。

[0042] 图14是激发频率为3430Hz时,涡旋聚焦声压绝对值切面图。

[0043] 图15是激发频率为3430Hz时,截取焦平面的声压绝对值线图。

[0044] 图16是激发频率为3429Hz时,涡旋聚焦声压绝对值切面图。

[0045] 图17是激发频率为3429Hz时,截取焦平面的声压绝对值线图。

[0046] 图18是激发频率为3428Hz时,涡旋聚焦声压绝对值切面图。

[0047] 图19是激发频率为3428Hz时,截取焦平面的声压绝对值线图。

[0048] 图中:

[0049] 10、PML完美匹配层;11、介质域;

[0050] 20、平面声波涡旋转换器;21、第一扇形构件;211、中心实体;212、同心扇区;213、隔板;2121、亥姆霍兹共振腔;2122、法布里-珀罗谐振腔;

[0051] 30、聚焦透镜;31、第二扇形构件。

具体实施方式

[0052] 下面将结合实施例中的附图,对实施例中的技术方案进行清晰、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是一部分实施例,而不是全部的实施例。

[0053] 实施例

[0054] 如图1至5所示,一种基于旋转多普勒效应的超分辨声涡旋聚焦装置,包括PML完美匹配层10、平面声波涡旋转换器20和聚焦透镜30;PML完美匹配层具有介质域11;平面声波涡旋转换器20设置在介质域11内,聚焦透镜30同样设置在介质域11内。

[0055] 在本实施例中,平面声波涡旋转换器20和聚焦透镜30的中轴线重合。

[0056] 在本实施例中,平面声波涡旋转换器20包含有多个第一扇形构件21,多个第一扇形构件21依次拼接并构成圆柱形。

[0057] 聚焦透镜30包含有多个第二扇形构件31,多个第二扇形构件31依次拼接并构成圆柱形。

[0058] 进一步的,第一扇形构件21和第二扇形构件31均包含有中心实体211、同心扇区212和隔板213;隔板213配置为与中心实体211和同心扇区212连接。

[0059] 具体地,同心扇区212为由四个亥姆霍兹谐振腔和一个法布里-珀罗谐振腔耦合而

成的超材料结构单元。

[0060] 具体地,平面声波涡旋转换器20具有八组第一扇形构件21,每组第一扇形构件21的圆心角均为45°,每组第一扇形构件21具有三组同心扇区212;

[0061] 具体地,聚焦透镜30具有四组第二扇形构件31,每组第二扇形构件31的圆心角均为90°,每组第二扇形构件31具有十六组同心扇区。

[0062] 在本实施例中,介质域11为空气域。

[0063] 在本实施例中,超材料结构单元的长度配置为最初入射声波波长的一半,超材料结构单元的宽度配置为最初入射声波波长的十分之一。

[0064] 在本实施例中,平面声波涡旋转换器20和聚焦透镜30的间距为375mm,平面声波涡旋转换器20的半径与聚焦透镜30的半径相同,平面声波涡旋转换器20的厚度与聚焦透镜30的厚度相同。

[0065] 具体地,平面声波涡旋转换器20的半径为165mm,平面声波涡旋转换器20的厚度为50mm。

[0066] 具体地,聚焦透镜30的半径为165mm,聚焦透镜30的厚度为50mm。

[0067] 具体地,隔板的长度为165mm,隔板的宽度为50mm,隔板的厚度皆为1mm。

[0068] 下面将公开实施例中基于旋转多普勒效应的超分辨声聚焦透镜的设计方法,以进一步阐述本发明的原理。

[0069] 如图2、6和7所示,平面声波涡旋转换器20由八个第一扇形构件组成,每个第一扇形构件由中心实体211、同心扇区212和隔板213构成,每个同心扇区由圆心角为45°的四个亥姆霍兹共振腔2121和一个法布里-珀罗谐振腔2122组合构成。

[0070] 如图3所示,聚焦透镜30与平面声波涡旋转换器20的结构相似,聚焦透镜30由四个第二扇形构件31组成,每个第二扇形构件31由中心实体211、同心扇区212和隔板213构成,每个同心扇区由圆心角为90°的四个亥姆霍兹共振腔和一个法布里-珀罗谐振腔组合构成。

[0071] 如图7所示,四个亥姆霍兹共振腔2121和一个法布里-珀罗谐振腔2122组合构成的超材料结构单元平面图。

[0072] 如图10所示,四个亥姆霍兹共振腔和一个法布里-珀罗谐振腔组合构成的超材料结构单元产生的延迟相位会随着法布里-珀罗谐振腔宽度的宽度h1的变化产生变化,根据所需的相位延迟找到对应法布里-珀罗谐振腔宽度的宽度h1。

[0073] 基于旋转多普勒效应的超分辨声涡旋聚焦装置的具体设计步骤如下:

[0074] (1)根据声学共振原理,通过亚波长共振结构调控声场相位分布,进而将平面声波转换为携带有轨道角动量的涡旋声波,携带轨道角动量的涡旋场的典型特点表现为沿角度方向螺旋分布的相位,该螺旋分布的相位为:

[0075] $\Phi(m,\theta)=e^{im\theta}$;

[0076] 其中,m表示拓扑荷数,θ表示角度。这里的m取为1,θ为0-2π。通过Matlab对螺旋相位公式进行离散,为了提高离散的精细度,沿角向等分为8份。

[0077] (2)根据透镜的聚焦补偿相位分布公式对四个扇形构件所需的补偿相位进行离散,聚焦补偿相位分布公式如下:

[0078] $$\Phi(r,f)=k(-\sqrt{f^2+r^2}+f)$$

[0079] 其中,k表示波数,f表示焦距,r表示透镜的半径。最初入射声波的频率为3430Hz,入射声速为343m/s,最初入射声波波长λ为100mm,k为62.83,r为165mm,焦距f取130mm。将聚焦补偿相位分布公式和相关参数值输入Matlab,在透镜的半径方向上等距离散相位,每个离散出来的相位覆盖10mm(最初入射声波波长的十分之一)的空间长度。

[0080] (3)如图8和9所示,超材料结构单元的尺寸和最初入射声波波长相关,w=λ/2,h=λ/10,w_1=0.11λ,w_2=0.015λ,w_3=0.1125λ,h_2=0.01λ。以法布里-珀罗谐振直管宽度h_1为变量,同时h_3也会随着h_1的变化而变化。具体地,w=50mm,h=10mm,w_1=11mm,w_2=1.5mm,w_3=11.25mm,h_2=1mm。

[0081] (4)如图10所示,通过Comsol软件可以计算出四个亥姆霍兹共振腔和一个法布里-珀罗谐振腔组合产生的相位延迟随法布里-珀罗谐振腔宽度h1的变化曲线。

[0082] (5)根据相位和尺寸的匹配情况,建立平面声波涡旋转换器20的三维模型,为了简化平面声波涡旋转换器20的结构,只在半径为135mm-165mm的范围内分布由四个亥姆霍兹共振腔和一个法布里-珀罗谐振腔组合而成的同心扇区,半径为0-135mm的范围内分布实体扇区,隔板的厚度为1mm,隔板用于相邻扇区的分离和连接。将平面声波涡旋转换器20的三维模型放入自由空间内仿真模拟,产生的涡旋效果如图11和12所示。同时发现,涡旋声波随着传播距离的增加最内层涡旋声波的半径逐渐增大。

[0083] (6)根据相位和尺寸的匹配情况,建立聚焦透镜30的三维模型,中心实体圆柱的半径为5mm,每个扇区包含厚度为1mm的隔板,将焦距为130mm时设计的聚焦透镜30放入自由空间内仿真模拟,平面声波垂直打入聚焦透镜结构,对透射区域的声压场进行分析,如图13所示,在距离透镜130mm的位置产生了聚焦。

[0084] (7)将平面声波涡旋转换器20和聚焦透镜30组合放入自由空间内,平面声波涡旋转换器20和聚焦透镜30的间距为375mm,当间距为375mm时,平面声波涡旋转换器20产生的最内层涡旋半径恰好等于165mm。

[0085] (8)当激发频率为3430Hz时,此时未产生旋转多普勒效应,涡旋聚焦声压绝对值图如图14所示,本装置衍射极限为:

[0086] $FWHM_{lim}$=0.55λ/NA;

[0087] 其中,NA为数值孔径,NA=sin($\tan^{-1}$(D/(2f)),D为聚焦透镜的直径,经计算得衍射极限为0.7002λ,此时FWHM为0.272412λ,如图15所示,已实现超分辨聚焦。

[0088] (9)采用改变激发频率的方法使得透镜“旋转”,当激发频率减小1Hz,即激发频率为3429Hz时,等价于使装置在声波激发频率为3430Hz时,透镜以每分钟60转的速度反向旋转,旋转多普勒效应得以体现,此时的涡旋聚焦声压绝对值图如图16所示;截取焦平面的声压绝对值线图,如图17所示,此时涡旋聚焦的半峰全宽(FWHM)为0.27221λ,小于0.272412λ,超分辨效果进一步加强。

[0089] (10)采用改变激发频率的方法使得透镜“旋转”,当激发频率减小2Hz,即激发频率为3428Hz时,等价于使透镜在涡旋声波激发频率为3430Hz时,透镜以每分钟120转的速度旋转,旋转多普勒效应得以体现,此时的涡旋聚焦声压绝对值图如图18所示;截取焦平面的声压绝对值线图,如图19所示,此时涡旋聚焦的半峰全宽(FWHM)为0.272228λ,小于0.272412λ,超分辨效果同样进一步加强。

[0090] 尽管上面已经示出和描述了本申请的实施例,但本发明的保护范围并不局限于

此,任何不经过创造性劳动想到的变化或替换,都应涵盖在本发明的保护范围之内;除非明确说明,否则本文中使用的任何元件、动作或指令都不应解释为关键或必要的。

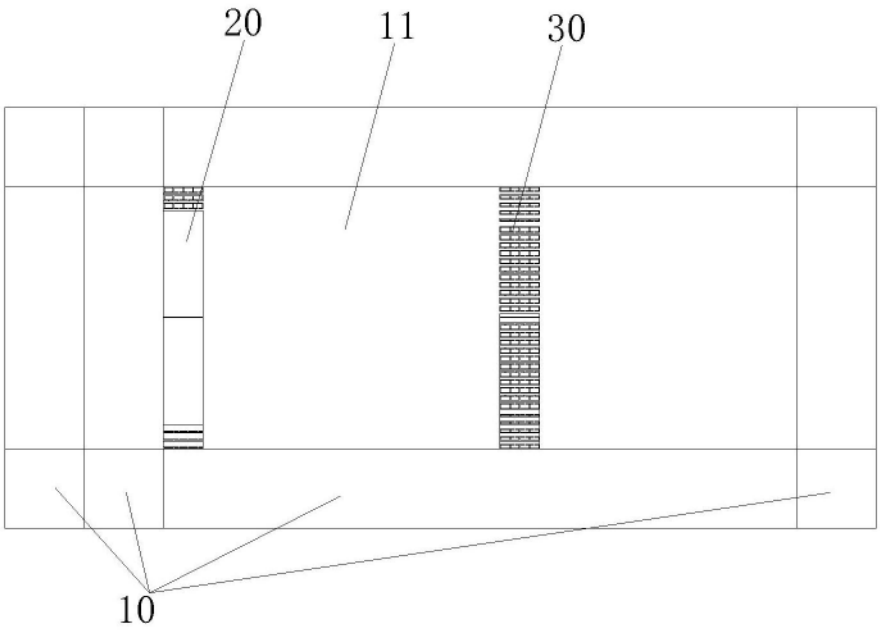


图1

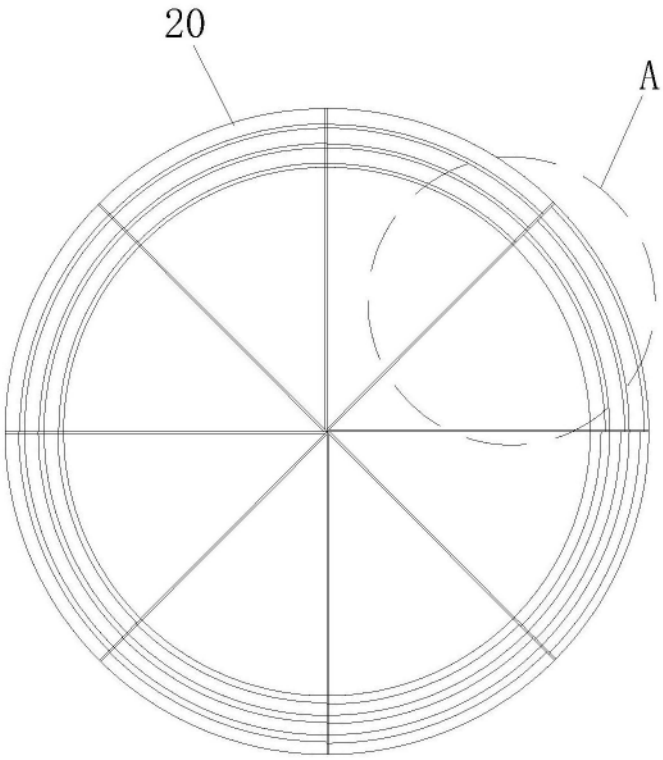


图2

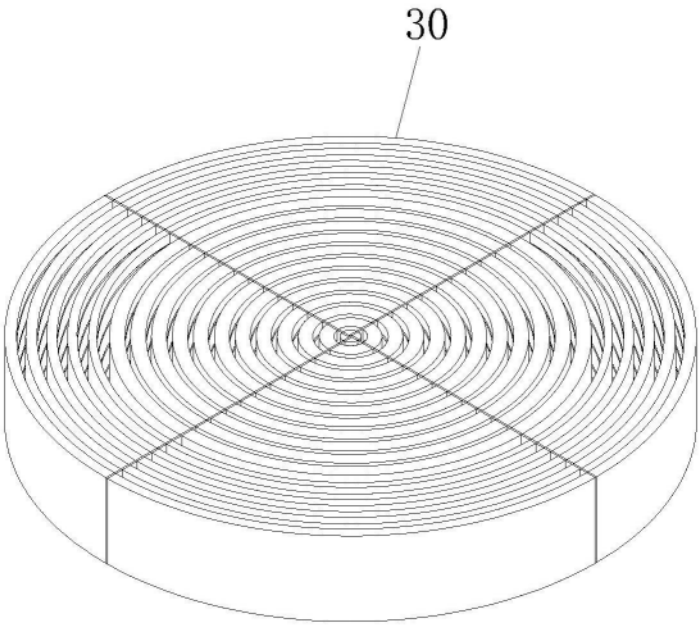


图3

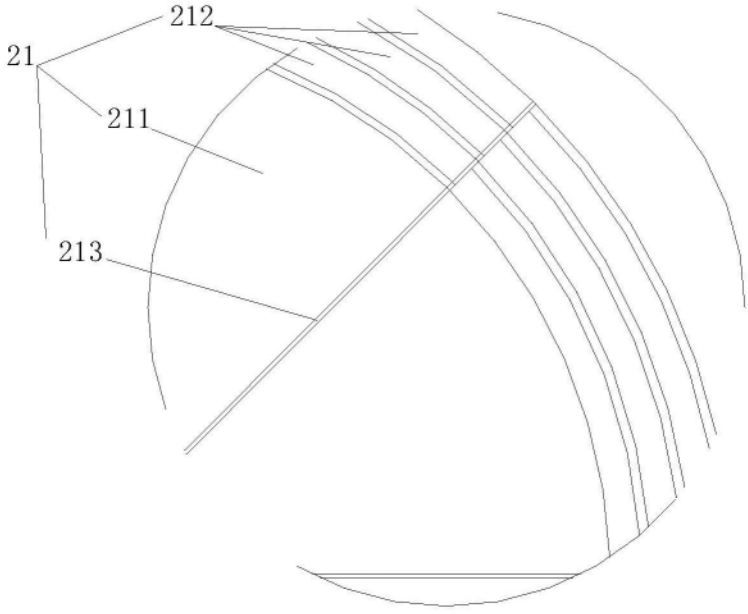


图4

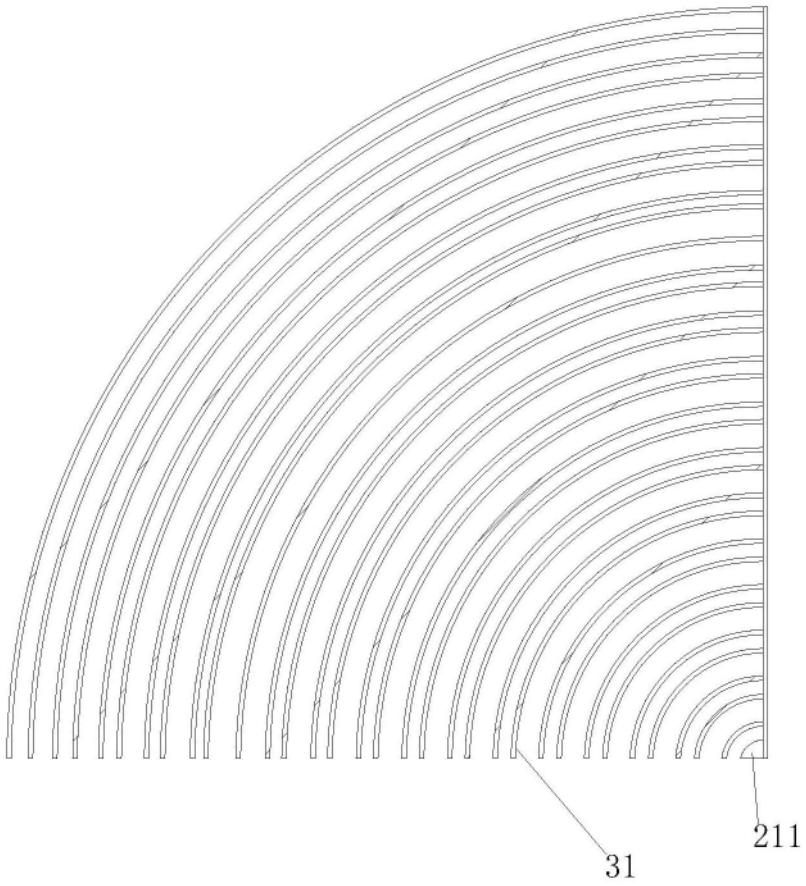


图5

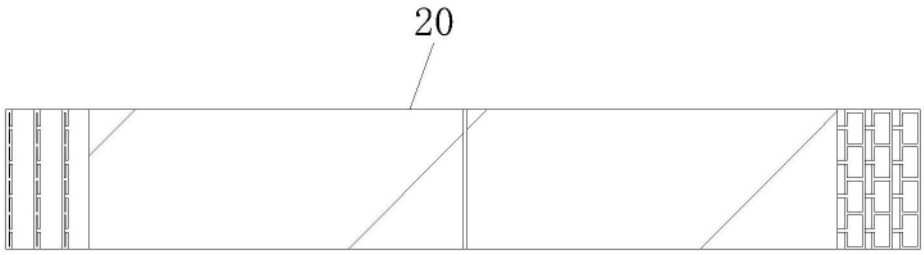


图6

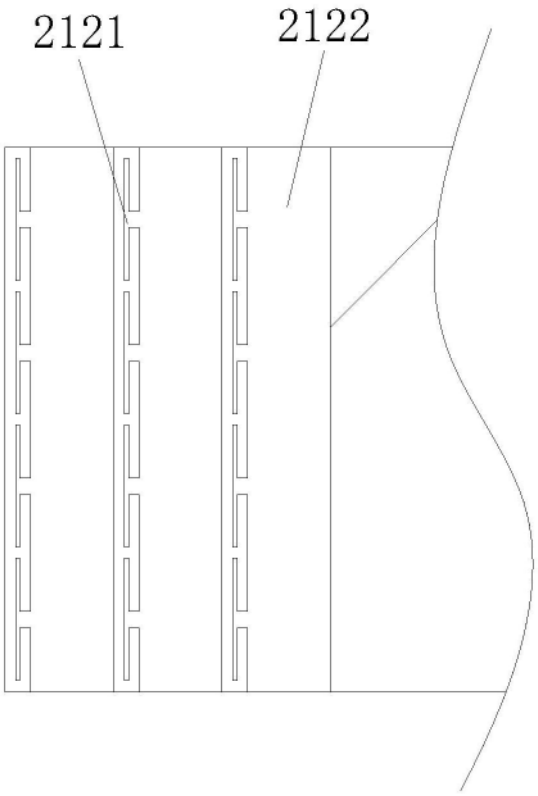


图7

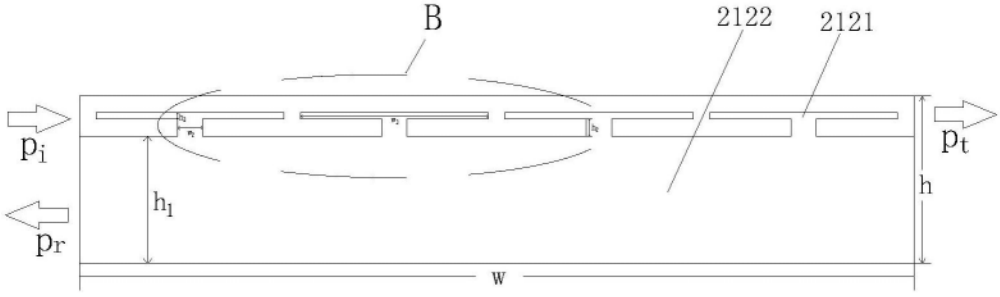


图8

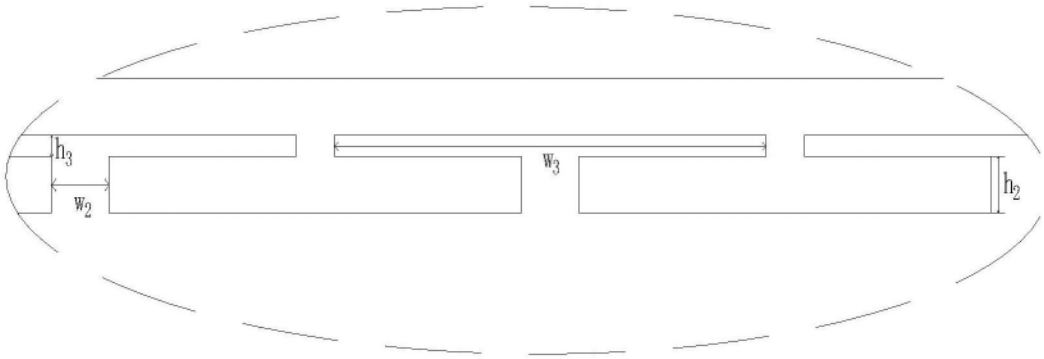


图9

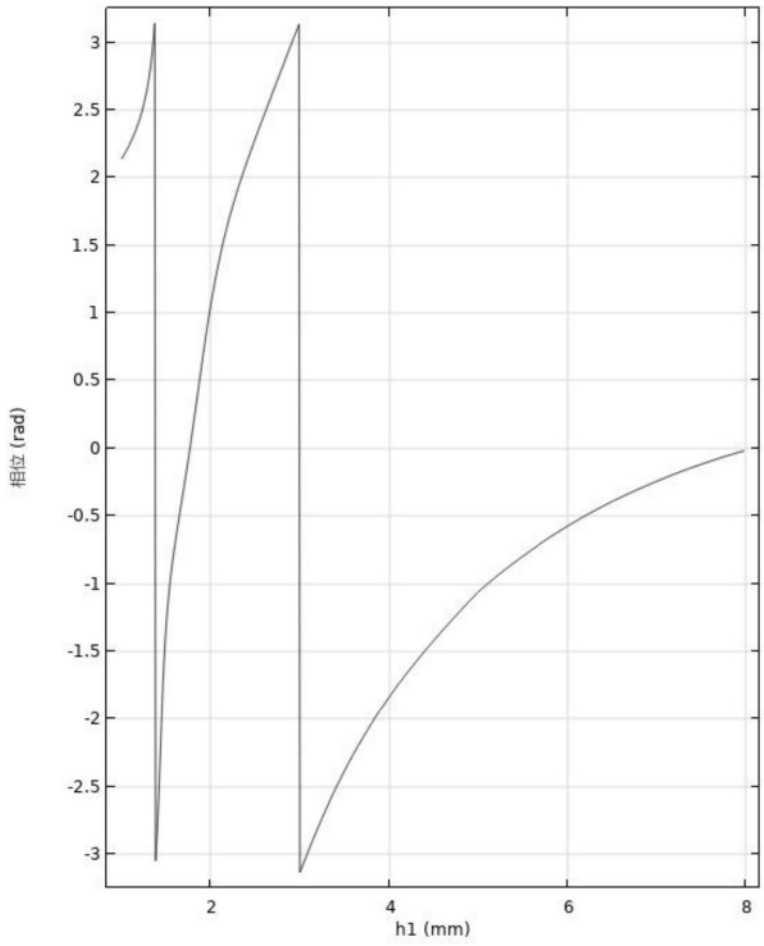


图10

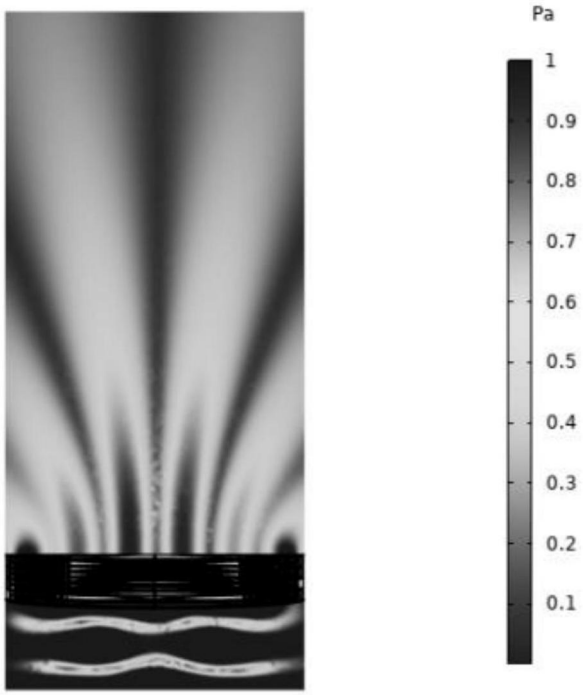


图11

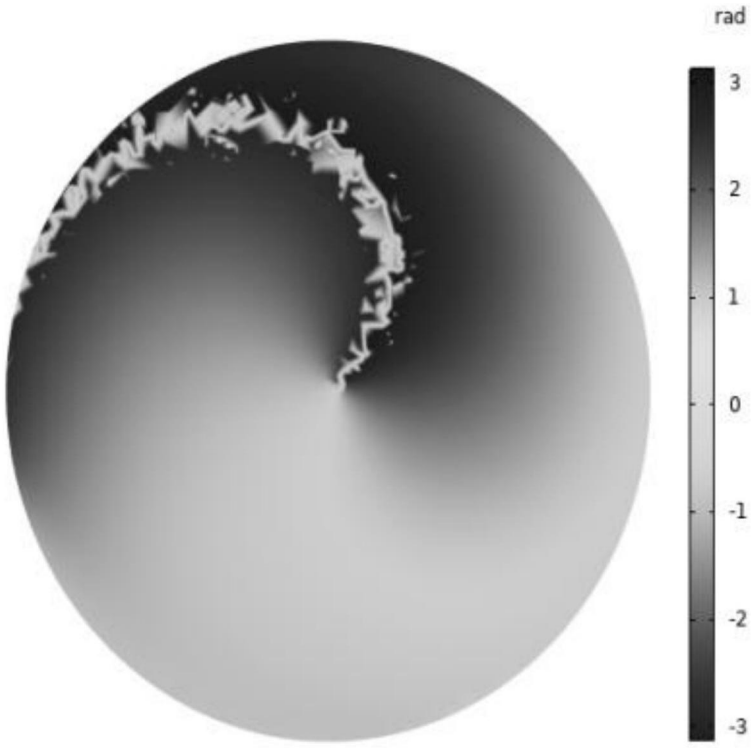


图12

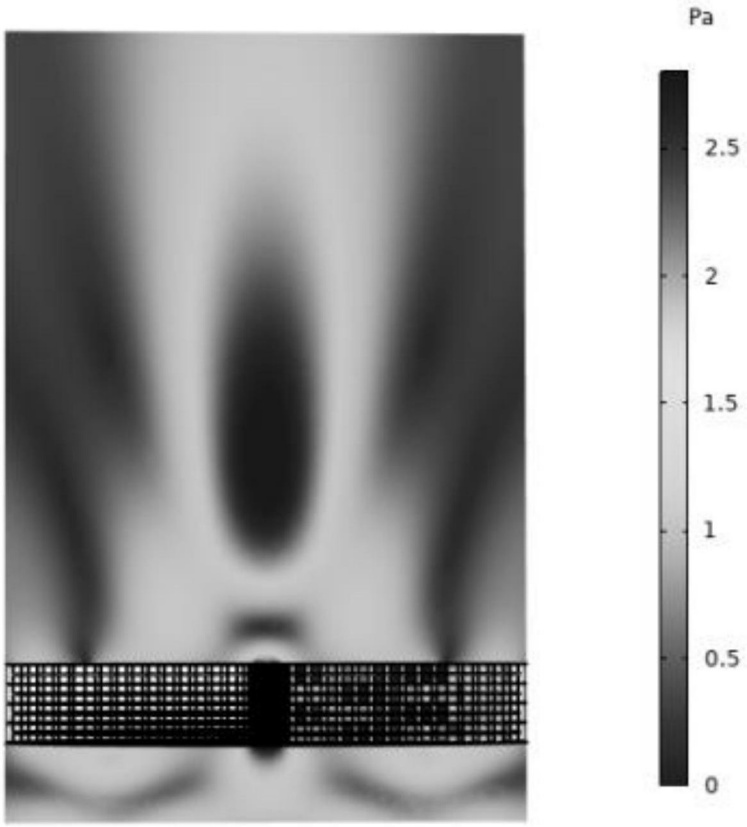


图13

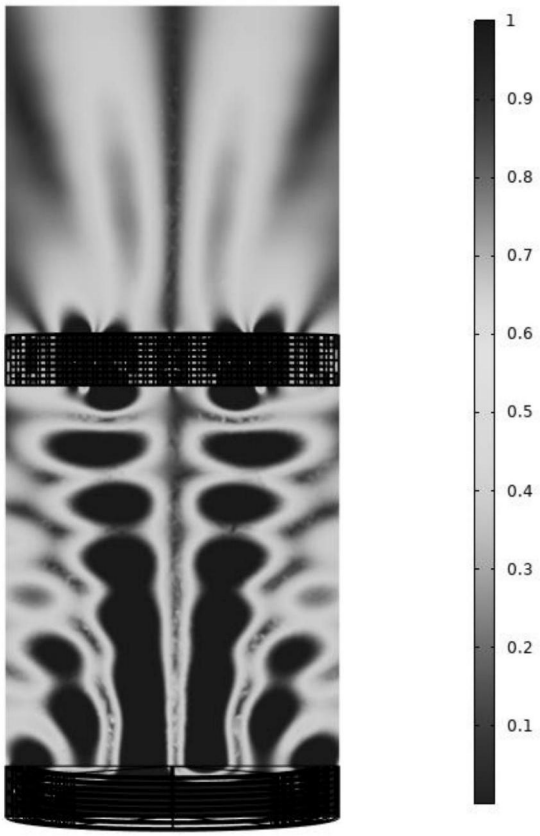


图14

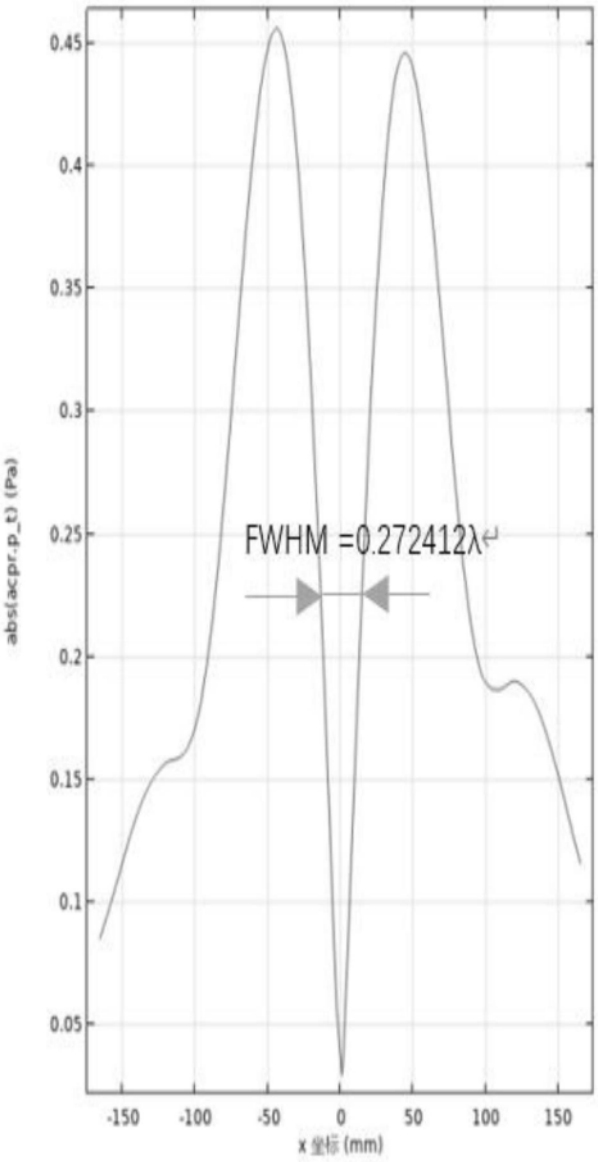

FWHM =0.272412λ
abs(acpr.p_t) (Pa)
x 坐标 (mm)
0.45
0.4
0.35
0.3
0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
-150
-100
-50
0
50
100
150

图15

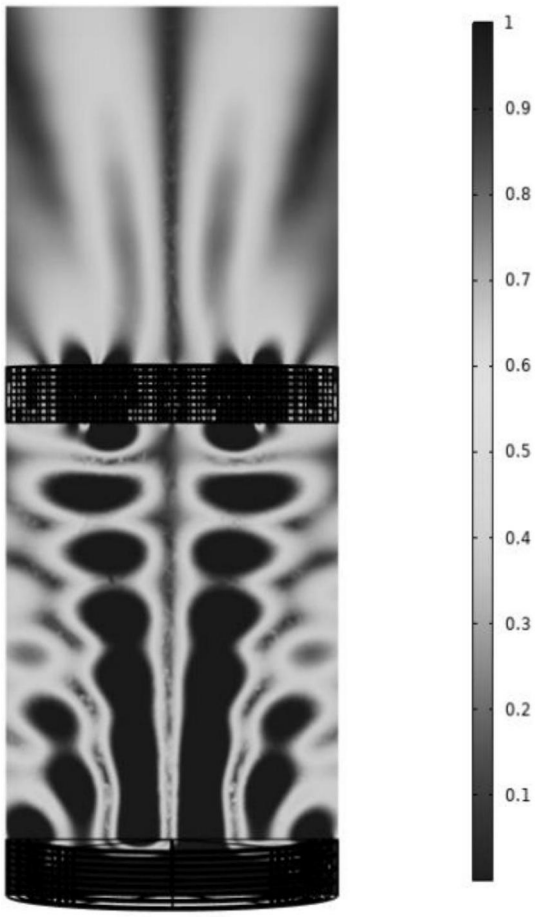


图16

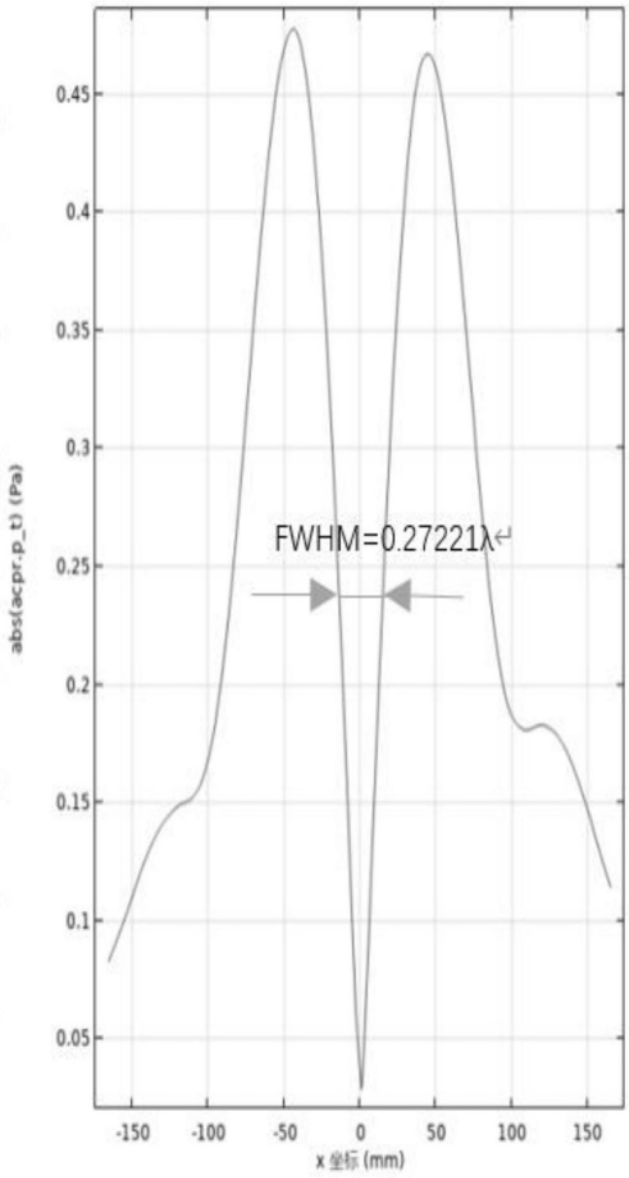

FWHM=0.27221λ
abs(acpr.p_t) (Pa)
x 坐标 (mm)
0.45
0.4
0.35
0.3
0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
-150
-100
-50
0
50
100
150

图17

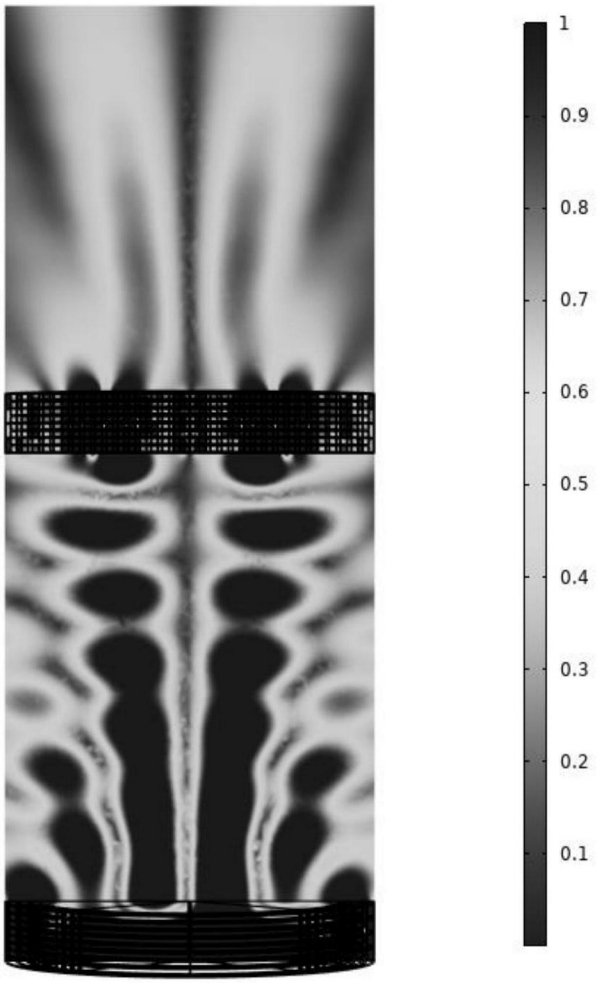


图18

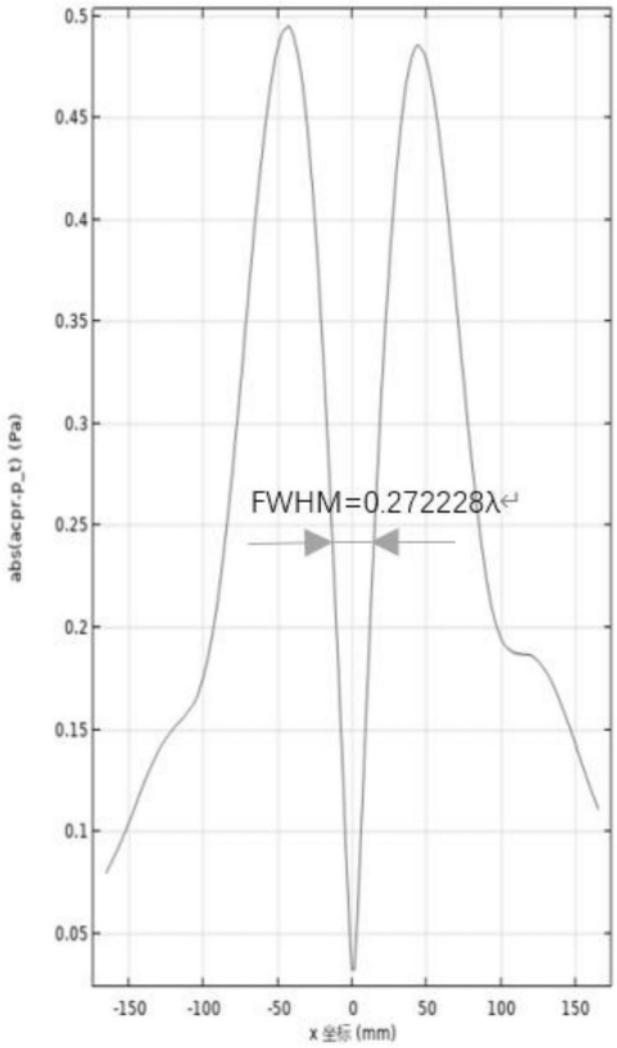

FWHM=0.272228λ
abs(acpr.p_t) (Pa)
x 坐标 (mm)
0.5
0.45
0.4
0.35
0.3
0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
-150
-100
-50
0
50
100
150

图19