



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106267592 B

(45)授权公告日 2019.02.12

(21)申请号 201610693237.1

(22)申请日 2016.08.18

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 106267592 A

(43)申请公布日 2017.01.04

(73)专利权人 浙江大学创新技术研究院有限公司

地址 310030 浙江省杭州市西湖区西湖科技园西园四路二号

(72)发明人 黄品同 章东 林洲 陈俊波

(74)专利代理机构 南京知识律师事务所 32207
代理人 蒋海军

(51)Int.Cl.
A61N 7/00(2006.01)

(56)对比文件

CN 101190436 A,2008.06.04,
CN 201855795 U,2011.06.08,
KR 20130055972 A,2013.05.29,
CN 204050694 U,2014.12.31,
US 2015192674 A1,2015.07.09,

KR 101418356 B,2014.07.10,
李全义,董琦,黄曦,曾德平,李发琪,毛彦欣,张德俊.凹球面双频聚焦超声声场的线性声学分析.《压电与声光》.2009,全文.

霍彦明,吴敏,宋文章,叶兆雄,王智彪.开口凹球面聚焦声场分析.《声学技术》.2003,全文.

审查员 王珂

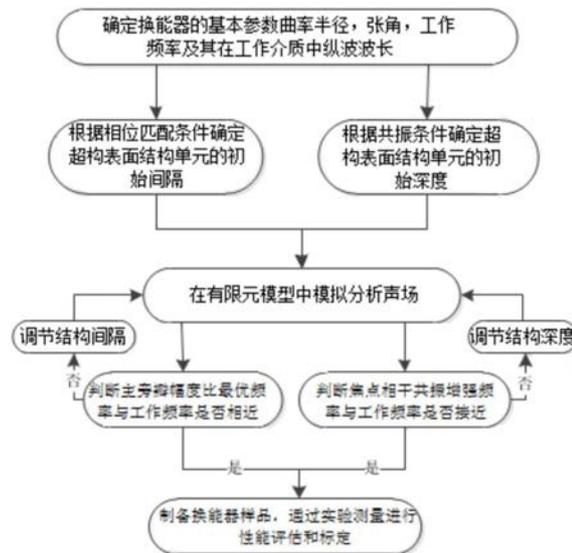
权利要求书1页 说明书6页 附图4页

(54)发明名称

一种具有超构表面的凹面聚焦换能器设计方法

(57)摘要

本发明公开了一种具有超构表面的凹面聚焦换能器设计方法,属于超声聚焦技术领域。本发明通过在传统的凹面聚焦换能器的表面上构建超构表面结构,利用超构表面结构的空腔共振模式增强聚焦换能器的辐射效率,同时利用超构表面结构所支持的声表面倏逝波在空间上满足相位匹配条件时,引起相干衍射增强效应,实现对聚焦性能的改善,属于超声聚焦领域的创新,超构表面满足广义的反射与折射斯涅尔定律,能够实现对相位的非连续调制,凹面聚焦换能器的超构表面,通过周期波纹结构对声表面倏逝波的调制,能够在特定频率范围调控声场分布,从而提高主旁瓣比。



1. 一种具有超构表面的凹面聚焦换能器设计方法,其步骤为:

步骤一、确定所需设计的凹面聚焦换能器的基本参数,所述基本参数包括曲率半径 r ,换能器张角 θ ,工作频率 f_0 ,及声波在传输介质中的波长 λ_0 ,并在所述凹面聚焦换能器上添加周期性波纹结构的超构表面;

步骤二、确定波纹结构的初始参数,具体包括:波纹结构的周期弧长间隔 L_0 ,波纹结构的深度 h_0 以及波纹结构的宽度 d_0 ;

步骤三、将步骤二确定的波纹结构初始参数 L_0 和 h_0 代入有限元模型中计算分析主旁瓣幅度比值随频率的变化关系,在有限元计算模型中循环调节波纹结构的深度 h 和周期间隔 L ,使换能器的工作频率满足预期要求,获得修正后的结构参数;

步骤四、根据所得的波纹结构修正后结构参数,制备具有超构表面结构的凹面聚焦换能器。

2. 根据权利要求1所述的一种具有超构表面的凹面聚焦换能器设计方法,其特征在于:步骤二中通过相位匹配条件 $f_0=c/L$,获得在工作频率下波纹结构的周期弧长间隔 L_0 ,通过声表面倏逝波激发条件,空腔共振模式 $f_0=(2n+1)c/4h$,获得在工作频率下波纹结构的深度 h_0 ,波纹结构的宽度 d_0 需满足 $d_0<L_0/2$ 。

3. 根据权利要求1或2所述的一种具有超构表面的凹面聚焦换能器设计方法,其特征在于:步骤三中判断:1) 主旁瓣幅度比最大值频率 f_1 与工作频率 f_0 的差距是否满足预期要求,如不满足预期要求则相应调整 L_0 ,继续代入有限元模型中计算分析;2) 焦点处声压增益随频率变化的曲线峰值频率 f_p 与工作频率 f_0 差距是否满足预期要求,如不满足则相应调整 h_0 ,继续代入有限元模型中计算分析;有限元模拟结果同时满足以上两点要求时,即可获得修正后的结构参数。

4. 根据权利要求3所述的一种具有超构表面的凹面聚焦换能器设计方法,其特征在于:步骤三判断主旁瓣幅度比最大值频率 f_1 与工作频率 f_0 的差值需满足的预期要求为 $|f_1-f_0|/f_0<2\%$ 。

5. 根据权利要求4所述的一种具有超构表面的凹面聚焦换能器设计方法,其特征在于:步骤三中主旁瓣幅度比最大值频率 f_1 与工作频率 f_0 的差距不满足预期要求时,将 L_0 调整为 $(f_0/f_1)L_0$ 。

6. 根据权利要求4所述的一种具有超构表面的凹面聚焦换能器设计方法,其特征在于:步骤三判断焦点处声压增益随频率变化的曲线峰值频率 f_p 与工作频率 f_0 的差值需满足的预期要求为 $|f_p-f_0|/f_0<2\%$ 。

7. 根据权利要求6所述的一种具有超构表面的凹面聚焦换能器设计方法,其特征在于:步骤三中焦点处声压增益随频率变化的曲线峰值频率 f_p 与工作频率 f_0 的差值不满足预期要求时,将 h_0 调整为 $(2f_0-f_p)h_0/f_0$ 。

一种具有超构表面的凹面聚焦换能器设计方法

技术领域

[0001] 本发明属于超声聚焦技术领域,涉及一种具有超构表面的凹面聚焦换能器设计方法,更具体地说,是通过超构表面结构的空腔共振和相干衍射增强效应提高辐射效率,优化聚焦声场,实现提高聚焦增益和主旁瓣比的聚焦方法。

背景技术

[0002] 聚焦换能器是医学超声应用中的一种重要器件,常见的有球面自聚焦换能器和声透镜聚焦换能器。球面自聚焦换能器通过将压电陶瓷制作为凹面,利用凹面辐射面直接聚焦,聚焦效果较好。高强度聚焦超声(HIFU)技术是一种新型的无损创伤治疗技术,对体内的肿瘤组织具有很好的治疗效果。聚焦换能器是HIFU技术中的核心元件,HIFU通常使用聚焦换能器来获得聚焦声场。HIFU要求在靶向区域获得足够大的声能量,同时不损害靶向区域的周围组织。生物组织中的实验结果表明生物组织在60度下0.1s即发生热坏死的迹象。因此研究更高性能的聚焦换能器是HIFU治疗的一个关键问题。球面自聚焦换能器由于客观工艺条件限制,大张角凹面聚焦换能器通常尺寸较小激发能量受限,难以在靶向区域获得足够的能量形成组织损伤,同时由于衍射效应的存在,传统的聚焦换能器所形成的焦点的主旁瓣比相对较低,在超声治疗时会对靶向目标周围的区域带来潜在的危险。

[0003] 近年来声人工结构的研究取得了诸多进展,其中声超构表面作为一种薄层超构材料,满足广义的反射与折射斯涅尔定律,能够实现对声波的非连续相位调制。超构表面能够实现许多传统的相位调制器件所不能实现的特殊效应。声超构表面既能够调控表面相位梯度实现声异常透射和反射,也能够实现传播波与声表面倏逝波之间的转化[Nat. commun. 5, 5553 (2014)]。也有学者提出利用压电换能器实现主动式的声超构表面改善声波的聚焦性能[srep4, 6257]。超构表面中的周期波纹结构在空腔共振模式下能够在结构表面产生大量的声表面倏逝波,当声波频率满足相位匹配条件时会引起相干透射增强[Phys. Rev. Lett. 99 174301 (2007), Appl. Phys. Lett. 101, 104103 (2012)]声表面倏逝波能够有效的耦合至辐射波,从而实现辐射效率的提高。通过改变波纹结构的深度和间隔就能够调控声表面倏逝波的相位使之在特定频率满足相位匹配条件,从而调控声场影响远场辐射的衍射图案。超构表面的研究带来许多新的声学效应以及潜在的声学器件与应用。

[0004] 超构表面的性质对于聚焦换能器聚焦性能的改善有着潜在的应用,然而目前声超构表面的研究还处于比较浅显的应用,大部分研究其透射,反射的性质,曲面形态下的声超构表面由于其物理模型更加复杂,目前相关的研究工作较少。

[0005] 经检索,中国专利申请号201510816714.4,申请日为2015年11月23日,发明创造名称为:一种聚焦声透镜的设计方法,该申请案通过传统聚焦声透镜的声辐射面构建声学人工结构,即在传统聚焦声透镜的声辐射面设置周期性分布的同心环状凹槽结构,并采用有限元模拟计算对凹槽的结构参数进行优化设计,从而能够在特定频率范围内抑制声焦点处径向旁瓣的幅度,同时提高声能的聚焦增益。该申请案相比于现有的声透镜聚焦装置,能够有效降低径向旁瓣幅度,提高聚焦增益,减小焦点位置的偏移。但该申请案是属于声透镜

设计,因声透镜的曲率导致其在声透镜发射界面上存在声程差,继而导致声波有效辐射面的初始相位和透射率都有着较大的不同,使得其只能适用于小张角的情形,在大张角的情形下会出现多焦点等缺陷;且该申请案的物理机制是通过声准直效应将衍射的能量集中到焦点区域从而降低旁瓣幅度,提高聚焦增益,因而该申请案只能适用于平面换能器,而不能适用于凹面聚焦换能器,在应用上有其局限性。

发明内容

[0006] 1.发明要解决的技术问题

[0007] 本发明鉴于大张角凹面聚焦换能器通常由于尺寸较小,焦点处所获得的声能量较小,在超声治疗时难以形成损伤;同时焦点主旁瓣幅度比不高,在进行超声治疗时会对治疗区域的周边组织造成潜在的损伤,提供了一种具有超构表面的凹面聚焦换能器设计方法;通过使用本发明设计的具有超构表面的凹面聚焦换能器,能够通过激发空腔共振模式产生声表面倏逝波并使其在辐射面上满足相位匹配条件引发相干衍射增强效应,提高辐射效率,进而实现对焦点径向主旁瓣幅度比的提高,从而提高超声成像和超声治疗的准确性和安全性。

[0008] 2.技术方案

[0009] 为达到上述目的,本发明提供的技术方案为:

[0010] 本发明的一种具有超构表面的凹面聚焦换能器设计方法,其步骤为:

[0011] 步骤一、确定所需设计的凹面聚焦换能器的基本参数,并在所述凹面聚焦换能器上添加周期性波纹结构的超构表面;

[0012] 步骤二、确定波纹结构的初始参数,具体包括:波纹结构的周期弧长间隔 L_0 ,波纹结构的深度 h_0 以及波纹结构的宽度 d_0 ;

[0013] 步骤三、将步骤二确定的波纹结构初始参数 L_0 和 h_0 代入有限元模型中计算分析主旁瓣幅度比值随频率的变化关系,在有限元计算模型中循环调节波纹结构的深度 h 和周期间隔 L ,使换能器的工作频率满足预期要求,获得修正后的结构参数;

[0014] 步骤四、根据所得的波纹结构修正后结构参数,制备具有超构表面结构的凹面聚焦换能器。

[0015] 更进一步地,步骤一中确定的凹面聚焦换能器基本参数包括曲率半径 r ,换能器张角 θ ,工作频率 f_0 ,及声波在传输介质中的波长 λ_0 。

[0016] 更进一步地,步骤二中通过相位匹配条件 $f_0=c/L$,获得在工作频率下波纹结构的周期弧长间隔 L_0 ,通过声表面倏逝波激发条件,空腔共振模式 $f_0=(2n+1)c/4h$,获得在工作频率下波纹结构的深度 h_0 ,波纹结构的宽度 d_0 需满足 $d_0<L_0/2$ 。

[0017] 更进一步地,步骤三中判断:1)主旁瓣幅度比最大值频率 f_1 与工作频率 f_0 的差距是否满足预期要求,如不满足预期要求则相应调整 L_0 ,继续代入有限元模型中计算分析;2)焦点处声压增益随频率变化的曲线峰值频率与工作频率 f_0 差距是否满足预期要求,如不满足则相应调整 h_0 ,继续代入有限元模型中计算分析;有限元模拟结果同时满足以上两点要求时,即可获得修正后的结构参数。

[0018] 更进一步地,步骤三判断主旁瓣幅度比最大值频率 f_1 与工作频率 f_0 的差值需满足的预期要求为 $|f_1-f_0|/f_0<2\%$ 。

[0019] 更进一步地,步骤三中主旁瓣幅度比最大值频率 f_1 与工作频率 f_0 的差距不满足预期要求时,将 L_0 调整为 $(f_0/f_1)L_0$ 。

[0020] 更进一步地,步骤三判断焦点处声压增益随频率变化的曲线峰值频率 f_p 与工作频率 f_0 的差值需满足的预期要求为 $|f_p-f_0|/f_0<2\%$ 。

[0021] 更进一步地,步骤三中焦点处声压增益随频率变化的曲线峰值频率 f_p 与工作频率 f_0 的差值不满足预期要求时,将 h_0 调整为 $(2f_0-f_p)h_0/f_0$ 。

[0022] 3.有益效果

[0023] 采用本发明提供的技术方案,与已有的公知技术相比,具有如下显著效果:

[0024] (1)本发明的一种具有超构表面的凹面聚焦换能器设计方法,在传统的凹面聚焦换能器表面构建超构表面结构,利用超构表面结构的空腔共振模式增强聚焦换能器的辐射效率,同时利用超构表面结构所支持的声表面倏逝波在空间上满足相位匹配条件时,引起相干衍射增强效应,实现对聚焦性能的改善,属于超声聚焦领域的创新,超构表面由具有周期分布的波纹结构构成,属于周期调制结构,能够实现一些传统相位调制器件(例如透镜)所不能实现的特殊效应,比如异常反射和折射,对相位的非连续调制,超薄超透镜,自由空间行波与倏逝波的转化等,且超构表面结构具有成本低,损耗小易于集成等优点;

[0025] (2)本发明的一种具有超构表面的凹面聚焦换能器设计方法,鉴于采用曲面形式的波纹结构超构表面,必须考虑曲面对声波的影响,且本发明只有一个界面需要额外考虑透射相位变化的影响,通过对边界条件进行修正,得到适合的透射系数,并进一步通过有限元模拟获得具体的结构参数;通过有限元对波纹结构的参数优化设计,能够在目标频率实现空腔共振,提高辐射效率,并在换能器表面通过相位匹配引入相干衍射增强,实现聚焦性能的改善;

[0026] (3)本发明的一种具有超构表面的凹面聚焦换能器设计方法,其最终设计得到的聚焦换能器,能够提高焦点的声压增益,同时提高聚焦声场的焦点处的主旁瓣幅度比,大大减少了超声成像中的斑点和伪影现象以及超声治疗中对目标区域周围组织的潜在损伤,有利于提高超声成像的对比度;

[0027] (4)本发明的一种具有超构表面的凹面聚焦换能器设计方法,其最终设计得到的聚焦换能器,在相同的换能器尺寸下,在焦点处能够获得更多的声能量,对组织形成损伤,从而减少治疗时间,有利于提高超声治疗的效率;

[0028] (5)本发明的一种具有超构表面的凹面聚焦换能器设计方法,其设计方案不需要对聚焦换能器的制作工艺作较大改变,只需要在聚焦换能器的表面加工周期波纹结构,具有加工难度低,稳定性好,易于实现的优点。

附图说明

[0029] 图1为本发明的具有超构表面结构的凹面聚焦换能器的设计流程图;

[0030] 图2中的(a)为传统的凹面聚焦换能器的示意图;

[0031] 图2中的(b)为具有超构表面结构的凹面聚焦换能器的示意图;

[0032] 图2中的(c)为具有超构表面结构的凹面聚焦换能器的实际样品立体示意图;

[0033] 图3为传统凹面聚焦换能器和具有超构表面的凹面聚焦换能器焦点声压幅度随频率的变化图;

[0034] 图4为传统凹面聚焦换能器和具有超构表面的凹面聚焦换能器焦点声压幅度径向分布图；

[0035] 图5为分别利用传统凹面聚焦换能器和具有超构表面结构的凹面聚焦换能器聚焦时焦点处的径向主旁瓣幅度比随频率变化的对比图；

[0036] 图6为使用具有超构表面结构的凹面聚焦换能器的实验样品在焦点处径向主旁瓣幅度比随频率的变化的实验测量结果图；

[0037] 图7为传统凹面聚焦换能器和具有超构表面的凹面聚焦换能器聚焦时焦点温度随时间变化的数值模拟结果图；

[0038] 图8为使用具有超构表面结构的凹面聚焦换能器聚焦在仿体中所得到的焦点中心温度和损伤面积随时间变化的测量结果图。

具体实施方式

[0039] 为进一步了解本发明的内容,结合附图和实施例对本发明作详细描述。

[0040] 实施例1

[0041] 结合图1,本实施例鉴于大张角凹面聚焦换能器通常由于尺寸较小,焦点处所获得的声能量较小,在超声治疗时难以形成损伤;同时焦点主旁瓣幅度比不高,在进行超声治疗时会对治疗区域的周边组织造成潜在的损伤,提供了一种具有超构表面的凹面聚焦换能器设计方法,其具体步骤为:

[0042] 步骤一、确定所需要设计的凹面聚焦换能器的基本参数,包括曲率半径 r ,换能器张角 θ ,工作频率 f_0 ,及其在传输介质中的波长 λ_0 。本实施例以曲率半径为50mm,张角为 90° 的凹面聚焦换能器为例,传播介质为水,其密度和纵波声速分别为 1000kg/m^3 和 1500m/s ,根据聚焦换能器的设计工作频率 $f_0=1\text{MHz}$,计算出声波在传播介质(水)中的波长 $\lambda_0=c/f_0=1.5\text{mm}$, c 为声波在传播介质中的纵波声速。在传统凹面聚焦换能器的凹面上设置超构表面结构,其表现形式为具有周期分布的波纹结构。

[0043] 如图2中的(a)和(b)所示,分别为传统凹面聚焦换能器与本实施例所设计的具有超构表面结构的凹面聚焦换能器的示意图。其中, L 为沿凹面分布的结构单元的周期间隔长度, d 为结构单元的宽度, h 为凹槽的深度, r 为凹面的半径, θ 为凹面的张角。本实施例利用超构表面结构的空腔共振模式增强聚焦换能器的辐射效率,同时利用超构表面结构所支持的声表面倏逝波在空间上满足相位匹配条件时,引起相干衍射增强效应,实现对聚焦性能的改善,属于超声聚焦领域的创新,超构表面由具有周期分布的波纹结构构成,属于周期调制结构,能够实现一些传统相位调制器件(例如透镜)所不能实现的特殊效应,比如异常反射和折射,对相位的非连续调制,超薄超透镜,自由空间行波与倏逝波的转化等,且超构表面结构具有成本低,损耗小易于集成等优点。

[0044] 步骤二、确定波纹结构的初始参数,通过相位匹配条件 $f_0=c/L$,获得波纹结构的理想周期弧长间隔 L_0 ,可得 $L_0=1.5\text{mm}$;通过声表面倏逝波激发条件---空腔共振模式 $f_0=(2n+1)c/4h$, n 为空腔共振模式的阶数,此处选择基频共振 $n=1$,获得波纹结构的深度 h_0 ,可得 $h_0=1.125\text{mm}$, d_0 只需满足小于 $L_0/2$ 即可,故取为 $d_0=0.53\text{mm}$ 。

[0045] 因此,本实施例中设计 $L_0=1.5\text{mm}$, $h_0=1.125\text{mm}$, $d_0=0.53\text{mm}$ 。

[0046] 步骤三、将获得的波纹结构初始参数 L_0 和 h_0 代入有限元模型中计算分析主旁瓣幅

度比值随频率的变化关系,并判断:1)主旁瓣幅度比最大值频率 f_1 与工作频率 f_0 的差值是否满足 $|f_1-f_0|/f_0 < 2\%$,频率 f_1 表征实际满足相位匹配的频率,如不满足预期要求则将 L_0 调整为 $(f_0/f_1)L_0$,继续代入有限元模型中计算分析;由于受到结构形状的影响,实际相位匹配条件所对应的频率会有所偏移,需要通过实际模拟结果来进一步修正;2)焦点处声压增益随频率变化的曲线峰值频率 f_p 与工作频率 f_0 差距是否满足预期要求: $|f_p-f_0|/f_0 < 2\%$,如不满足则相应调整 h_0 为 $(2f_0-f_p)h_0/f_0$,继续代入有限元模型中计算分析;焦点处声压增益随频率的变化曲线能够间接表征声表面倏逝波的激发效率和耦合效率,当工作频率位于曲线峰值处即为最高激发和耦合效率,可以用于判断是否满足激发声表面倏逝波的条件。有限元模拟结果同时满足以上两点要求时,即可获得修正后的结构参数 L_1 和 h_1 , d_1 保持不变, $d_1=d_0$ 。

[0047] 图3给出了传统凹面聚焦换能器和具有超构表面的凹面聚焦换能器焦点声压幅度随频率的变化,从图3中可以看出,本实施例的聚焦换能器在工作频率 f_0 范围内能够有效提高辐射效率,提高聚焦增益。

[0048] 步骤四、根据所得到的波纹结构宽度 d_1 ,深度 h_1 和周期间隔 L_1 ,制备具有超构表面结构的凹面聚焦换能器。

[0049] 本实施例的设计方案不需要对聚焦换能器的制作工艺作较大改变,只需要在聚焦换能器的表面加工周期波纹结构,加工难度低,稳定性好,易于实现。且本实施例在传统的凹面聚焦换能器表面构建超构表面结构,超构表面结构有膜结构、空间盘绕结构、共振腔结构等多种表现形式,需要根据具体应用场景的几何尺寸限制,厚度限制,应力限制等要求选择合适的结构形式,例如,厚度控制严格,则选择膜结构和空间盘绕结构;对辐射效率要求较高则可选择膜结构,对结构坚固有要求则可选择共振腔结构。本实施例选择波纹结构的超构表面,由于该波纹结构的超构表面最终要应用于凹面聚焦换能器,如何将平面的超构表面转化为曲面的形式是本实施例的一个难点。过去的研究中,通常是利用小张角近似条件来避免这一难点,但在凹面聚焦换能器的应用中,小张角近似条件不再适用,必须考虑曲面对声波的影响。同时与传统的超构表面设计所面对的声波通过中间层的情况不同,本实施例中只有一个界面需要额外考虑透射相位变化的影响,其物理模型需要做大幅度修正。针对上述问题,本实施例通过对边界条件进行修正,得到适合的透射系数,并进一步通过有限元模拟获得具体的结构参数;通过有限元对波纹结构的参数优化设计,能够在目标频率实现空腔共振,提高辐射效率,并在换能器表面通过相位匹配引入相干衍射增强,实现聚焦性能的改善。通过采用本实施例的设计方法得到的聚焦换能器,能够提高焦点的声压增益,同时提高聚焦声场的焦点处的主旁瓣幅度比,大大减少了超声成像中的斑点和伪影现象以及超声治疗中对目标区域周围组织的潜在损伤,有利于提高超声成像的对比度和超声治疗的效率。

[0050] 背景技术中提到的一种聚焦声透镜的设计方法(下称对比方案),通过在传统聚焦声透镜的声辐射面设置周期性分布的同心环状凹槽结构,并采用有限元模拟计算对凹槽的结构参数进行优化设计,从而在特定频率范围内抑制声焦点处径向旁瓣的幅度,同时提高声能的聚焦增益。该发明人针对聚焦声透镜的设计(对比方案),与本实施例提供方案有本质区别,首先对比方案属于声透镜设计,但因声透镜的曲率导致其在声透镜发射界面上存在声程差,继而导致声波有效辐射面的初始相位和透射率都有着较大的不同,使得对比方案只能适用于小张角的情形,在大张角的情形下会出现多焦点等缺陷。本实施例由于辐射

面与换能器压电基元完全平行,因而不存在由声程差导致的透射率不同等不利情况,因而理论上可以应用于无限大张角的情形;两种方案的物理机制也有着本质的不同,对比方案的物理机制是通过声准直效应将衍射的能量集中到焦点区域从而降低旁瓣幅度,提高聚焦增益,而本实施例是通过将空腔共振模式下激发的声表面倏逝波通过相位匹配的相干衍射增强效应耦合至辐射波中,从而提高辐射效率,进而实现提高焦点的主旁瓣幅度比等。因此,对比方案只能适用于平面换能器,不适用于本实施例所描述的凹面聚焦换能器。

[0051] 为了证明本实施例所得到的具有超构表面结构的凹面聚焦换能器的聚焦效果,按照上述步骤制备了一只具有超构表面结构的凹面聚焦换能器的实际样品,其参数为波纹结构,宽度为0.53mm,深度为1mm,周期间隔为1.49mm。图2中的(c)为制作样品的立体示意图。将实验样品浸没水槽中(长60cm,宽45cm,高40cm)进行实验。将一只针式水听器(美国ONDA公司,型号HNC-0400)装配在三维移动控制系统上进行声压扫描测量,信号由一台数字示波器进行采集和数字化。

[0052] 图4给出了采用传统凹面聚焦换能器和本实施例的具有超构表面结构的凹面聚焦换能器在焦点的径向分布,从图4中可以看出在相位匹配时相干衍射增强作用下,本实施例的聚焦换能器能够提高焦点的声压幅值,同时保持旁瓣声压幅值不变,从而达到提高主旁瓣比,改善聚焦性能的目标。

[0053] 图5为采用传统凹面聚焦换能器和本实施例的具有超构表面结构的凹面聚焦换能器在焦点处径向主旁瓣幅度比随频率的变化,其中,实线为利用传统凹面聚焦换能器的有限元模拟结果,虚线为利用本实施例的具有超构表面结构的凹面聚焦换能器的有限元模拟结果,由图5可以看出本实施例的聚焦声透镜相比传统声透镜,可在970kHz到1010kHz范围内有效提高焦点处的径向主旁瓣比。

[0054] 图6为使用本实施例的具有超构表面结构的凹面聚焦换能器的实验样品在焦点处径向主旁瓣幅度比随频率的变化的实验测量结果,由图6可以看出,在1010kHz附近焦点径向的主旁瓣比得到了提高。

[0055] 图7为采用传统凹面聚焦换能器和本实施例的具有超构表面结构的凹面聚焦换能器聚焦时焦点处温度随时间的变化。在相同的换能器尺寸和驱动能量下,使用本实施例的聚焦换能器能够在焦点处获得更高的温度以实现损伤。

[0056] 图8为使用本实施例的具有超构表面结构的凹面聚焦换能器的实验样品在仿体中的焦点中心温度和损伤面积随时间的变化。从图8中可以看出使用本实施例的聚焦换能器,能够成功在组织中形成损伤。

[0057] 以上示意性的对本发明及其实施方式进行了描述,该描述没有限制性,附图中所示的也只是本发明的实施方式之一,实际的结构并不局限于此。所以,如果本领域的普通技术人员受其启示,在不脱离本发明创造宗旨的情况下,不经创造性的设计出与该技术方案相似的结构方式及实施例,均应属于本发明的保护范围。

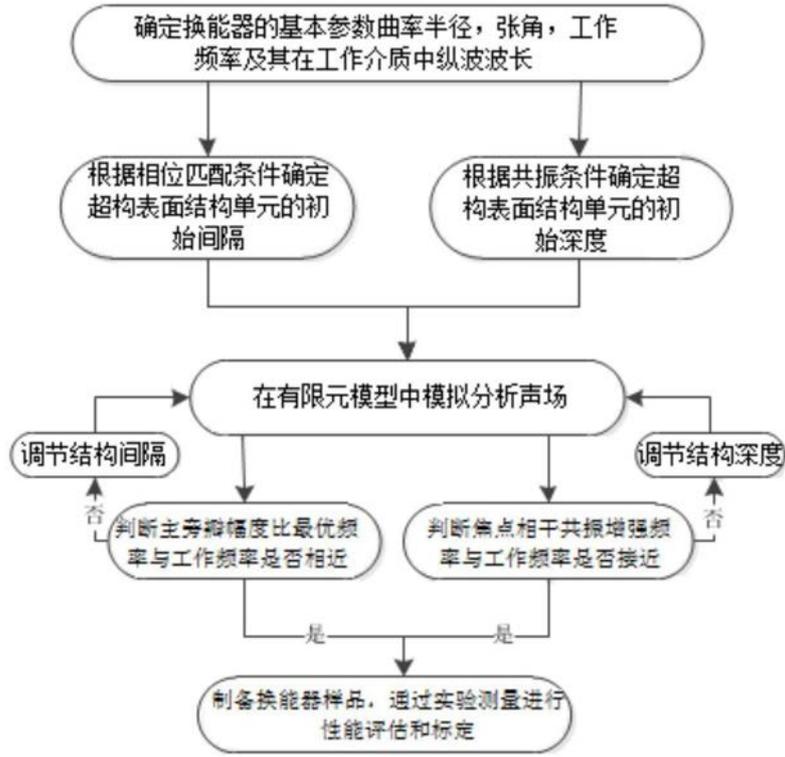


图1

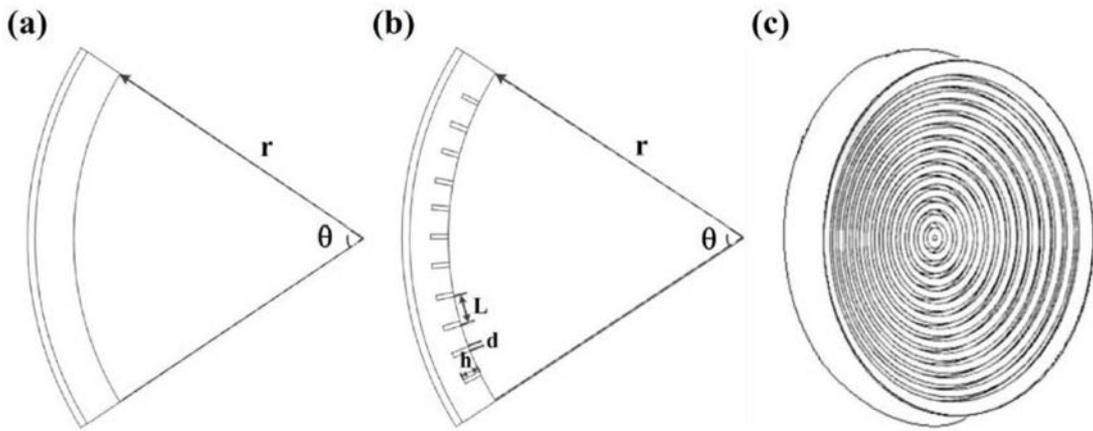


图2

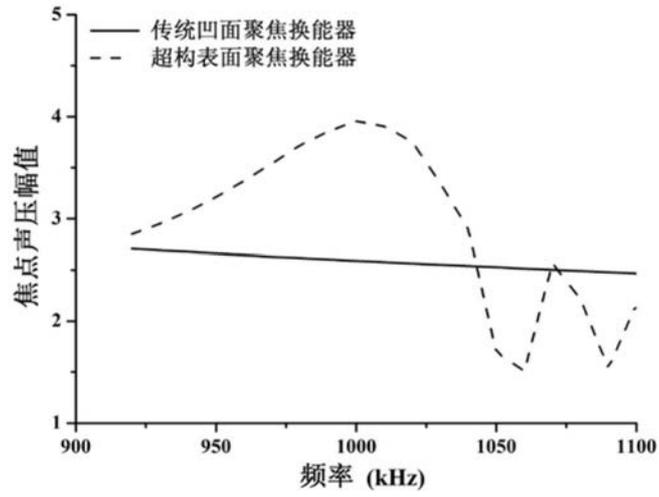


图3

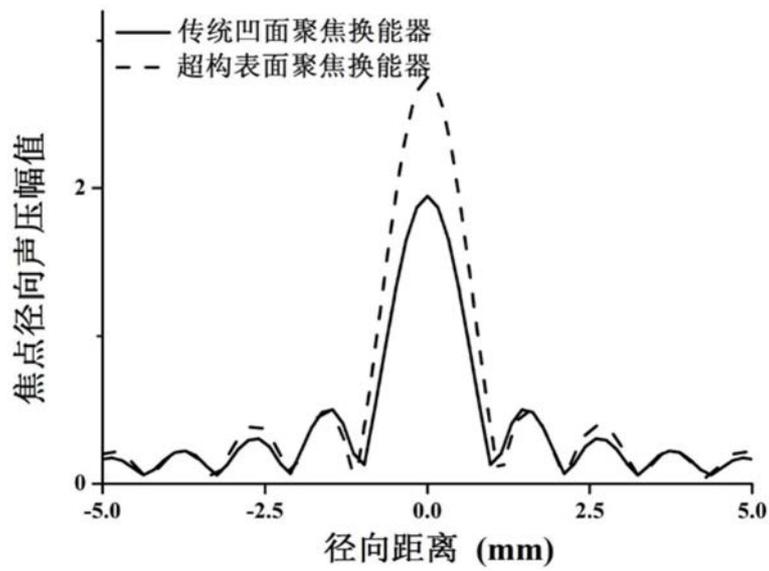


图4

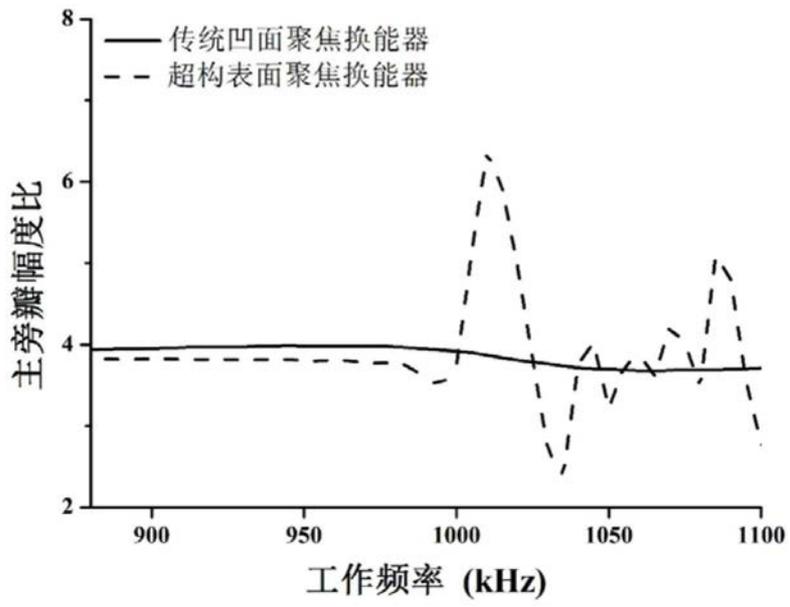


图5

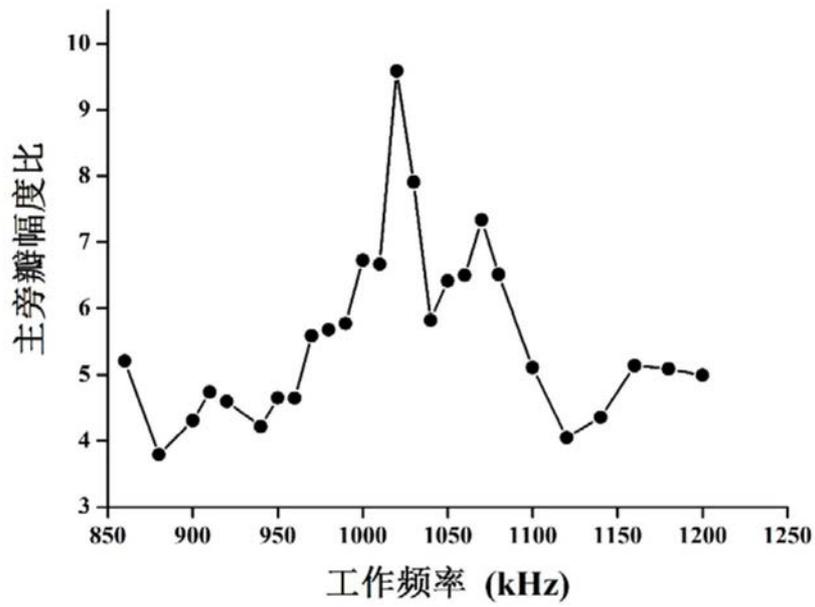


图6

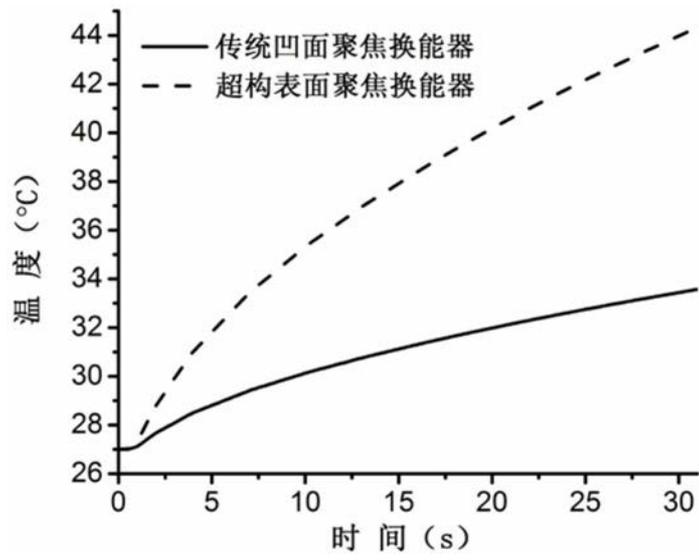


图7

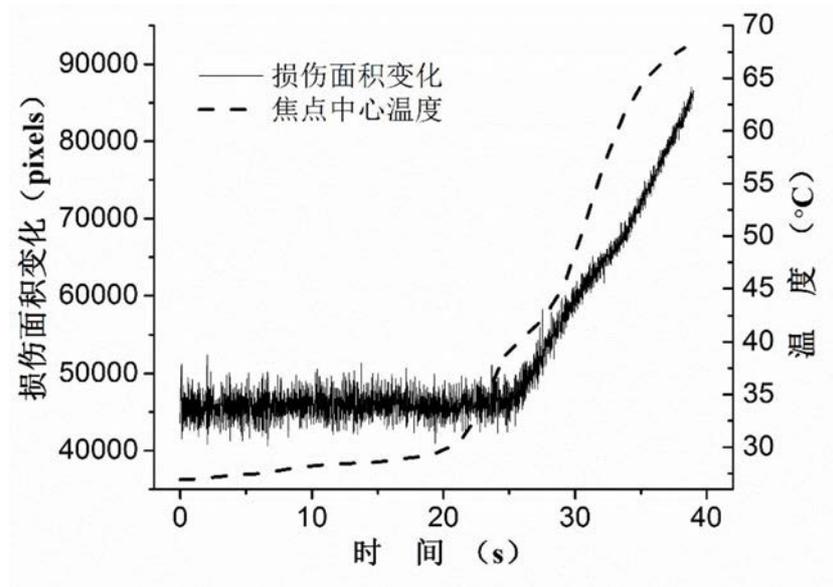


图8