

基于热声相控阵列的声聚焦效应

刘宸 孙宏祥 袁寿其 夏建平 钱姣

Acoustic focusing by thermoacoustic phased array

Liu Chen Sun Hong-Xiang Yuan Shou-Qi Xia Jian-Ping Qian Jiao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 154302 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.154302

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.154302>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I15>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

流体-镀层基底界面波的传播特性

Propagation properties of interface waves at fluid-coated solid interface

物理学报.2017, 66(8): 084302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.084302>

气泡线性振动对含气泡水饱和和多孔介质声传播的影响

Effect of linear bubble vibration on wave propagation in unsaturated porous medium containing air bubbles

物理学报.2016, 65(23): 234301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.234301>

量子热声微循环的优化性能

Optimization of the performance of quantum thermoacoustic micro-cycle

物理学报.2016, 65(16): 164303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.164303>

超声场下刚性界面附近溃灭空化气泡的速度分析

Velocity analysis for collapsing cavitation bubble near a rigid wall under an ultrasound field

物理学报.2016, 65(4): 044304 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.044304>

基于温度梯度分布的宽频带声聚焦效应

Broadband acoustic focusing effect based on temperature gradient distribution

物理学报.2016, 65(4): 044303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.044303>

## 基于热声相控阵列的声聚焦效应\*

刘宸<sup>1)</sup> 孙宏祥<sup>1)2)†</sup> 袁寿其<sup>1)‡</sup> 夏建平<sup>1)</sup> 钱姣<sup>1)</sup>

1) (江苏大学理学院, 流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

2) (中国科学院声学研究所, 声场声信息国家重点实验室, 北京 100190)

(2017年4月24日收到; 2017年5月16日收到修改稿)

研究基于热声相控阵列的宽频带声聚焦效应. 设计新型热声相位控制单元, 通过改变单元的空气温度控制声波波速, 实现声波透射与反射相位延迟覆盖  $2\pi$  区间. 设计四种不同类型的热声相控阵列聚焦透镜, 采用 8 种或 2 种热声相位控制单元分别实现了透射与反射声聚焦效应. 与其他类型的声聚焦透镜相比, 热声相控阵列聚焦透镜具有宽频带、高聚焦性能、设计方案简单等优点.

关键词: 声聚焦, 热声, 相位控制, 温度

PACS: 43.35.+d, 43.25.+y

DOI: 10.7498/aps.66.154302

## 1 引言

声聚焦效应在声成像、超声医学治疗及无损检测等领域具有广泛的应用前景<sup>[1-4]</sup>, 已成为国际上声学领域的研究热点. 随着声子晶体与声超构材料的飞速发展, 利用两种结构的负折射机理已实现了多种不同类型的声聚焦透镜. 通过逐渐改变声子晶体的晶格大小<sup>[5-7]</sup>、杨氏模量<sup>[6]</sup>、单元形状<sup>[8]</sup>及栅格常数<sup>[9]</sup>, 获得梯度分布的声折射率, 可以设计多种梯度声聚焦透镜. 然而, 由于声子晶体的单元尺寸与波长相近, 在低频区域中, 聚焦透镜的尺寸较大. 声超构材料的单元尺寸较小, 且具有较大的负折射率, 可以设计出小尺寸超薄的声聚焦透镜, 相关的超构材料基本单元主要有: 赫姆霍兹谐振腔<sup>[10]</sup>、十字形结构<sup>[11]</sup>、蜷曲空间结构<sup>[12-15]</sup>、阻抗匹配型多组分结构<sup>[16,17]</sup>等, 通过排列不同大小的单元结构, 获得梯度分布的声折射率, 进而实现声聚焦效应. 然而, 基于声超构材料的聚焦效应与单元结构的共振效应密切相关, 因此, 声聚焦效应仅出现在单元共振频率附近很窄的频带中, 甚至为单

频. 在此基础上, 利用金属柱状结构的位移本征模式可以实现完美的声聚焦效应<sup>[2,18,19]</sup>, 并在海底信号探测<sup>[2]</sup>、医学超声治疗<sup>[2]</sup>及声保密通讯<sup>[18]</sup>等领域有一定的应用前景, 但与声超构材料类似, 其聚焦效应仅出现在一系列本征频率上.

在上述聚焦透镜的基础上, 近年来, 声学超构表面已拓展应用到声聚焦领域, 研究人员先后设计出反射<sup>[20,21]</sup>与透射<sup>[22,23]</sup>声聚焦透镜、可绕过障碍物的艾里束声聚焦透镜<sup>[24]</sup>、基于五模单元的声聚焦透镜<sup>[25]</sup>及两元相位的声聚焦透镜<sup>[26]</sup>等. 声学超构表面满足广义的斯涅耳定律<sup>[27]</sup>, 可以对声波进行非连续的相位调制, 实现对声波传播路径的任意操控, 并具有平面超薄结构与易于集成等优点, 极大地推动了声聚焦领域的发展. 但超构表面的声聚焦性能取决于非连续分布的不同单元结构, 且超构表面单元至少由两种介质构成, 从而极易引起声阻抗不匹配, 工作频带较窄.

利用梯度温度场可以在单一介质中获得梯度分布的折射率, 从而在有效解决声阻抗匹配及声能量损耗问题的基础上, 实现声波传播路径的任意操控, 并获得一系列宽带声学反常现象, 如声

\* 国家自然科学基金(批准号: 11404147)、国家自然科学基金重大项目(批准号: 51239005)、江苏省自然科学基金(批准号: BK20140519)和江苏高校“青蓝工程”资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jsdxshx@ujs.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: Shouqiy@ujs.edu.cn

聚焦<sup>[28-30]</sup>、声隐身<sup>[31]</sup>、声吸收体<sup>[32]</sup>及声单向传输<sup>[33]</sup>等。然而,在上述的热声器件中,要获得梯度分布的温度场,需要将多个热源按照一定的规律分布在空间中,从而造成热声器件空间尺寸较大,且形状不规则,较难集成。因此,设计宽频带平面超薄的热声器件已成为该领域亟需解决的关键问题。

本文采用有限元数值方法,基于空气声速与温度的关系,设计宽频带热声相位控制单元,在此基础上,采用8种或2种热声相位控制单元设计四种不同类型的声聚焦透镜,分别实现了透射与反射声聚焦效应。与其他类型的聚焦透镜相比,热声相控阵列聚焦透镜具有宽频带、高聚焦性能、设计方案简单等优点,研究结果为设计宽频带热声相控阵列器件及新型声聚焦透镜提供理论依据与实验参考。

## 2 基本理论与数值模型

### 2.1 热声基本理论

设空气为理想流体介质,且满足理想气体状态方程,空气的声速及密度与温度 $T$ 之间的关系如下<sup>[30]</sup>:

$$c = \sqrt{\gamma RT/M}, \quad (1)$$

$$\rho = p_0 M / (RT), \quad (2)$$

式中 $\gamma = 1.4$ 为空气热容比, $M = 28.97 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$ 为空气摩尔质量, $R = 8.31 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$

为普适气体常量, $p_0 = 101.325 \text{ kPa}$ 为温度 $273 \text{ K}$ 的大气压。

### 2.2 热声相位控制单元

#### 2.2.1 透射单元

图1(a)中黄色区域为热声相位控制透射单元,单元的空气温度为 $T$ ,长度与厚度分别为 $l$ 和 $h$ ;单元的上下两侧蓝色实线为刚性隔热边界,厚度为 $d$ ,左右两侧红色虚线为隔热薄膜,隔热薄膜对声透射性能没有影响;外界空气为恒温,温度为 $T_0$ ,声波从左侧入射,透过单元到达右侧。根据(1)与(2)式,单元的空气声速 $c$ 和密度 $\rho$ 与温度 $T$ 密切相关,改变温度 $T$ ,可以获得不同的声波相位延迟,从而实现对声波传播路径的控制。本文采用有限元多物理场耦合软件COMSOL Multiphysics数值模拟各种声波性能。在数值模型中, $l, h$ 及 $d$ 分别设置为 $10, 1$ 及 $0.05 \text{ cm}$ , $T_0$ 为 $300 \text{ K}$ ,空气的热传导系数 $k = -0.00227583562 + (1.15480022 \times 10^{-4}) \times T - (7.90252856 \times 10^{-8}) \times T^2 + (4.11702505 \times 10^{-11}) \times T^3 - (4.11702505 \times 10^{-15}) \times T^4 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ,定压比热容 $C_p = 1047.63657 - (0.372589265) \times T + (9.45304214 \times 10^{-4}) \times T^2 - (6.02409443 \times 10^{-7}) \times T^3 + (1.2858961 \times 10^{-10}) \times T^4 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ ,声速与密度分别通过(1)与(2)式得到。

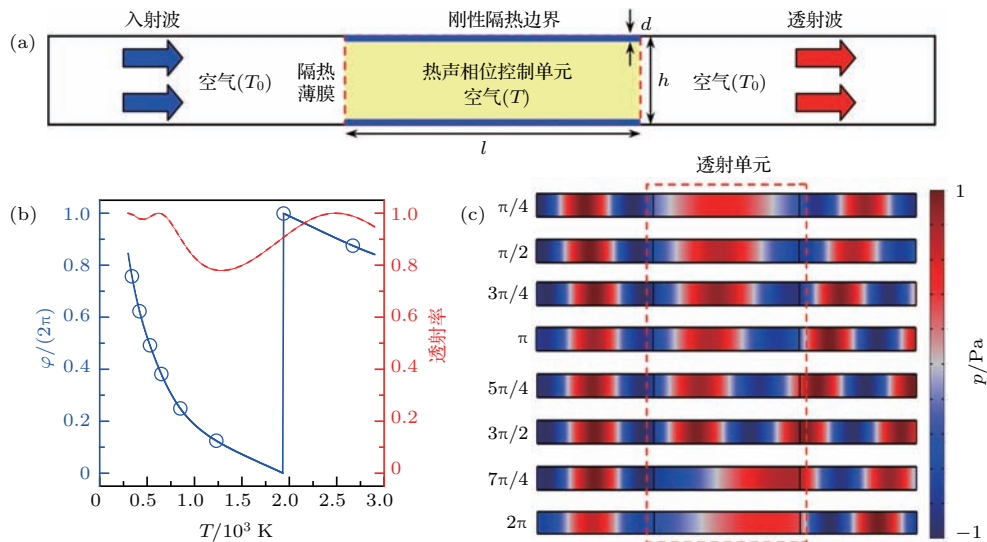


图1 (网刊彩色) (a) 热声相位控制透射单元; (b) 不同温度单元的透射相位延迟与透射率; (c) 频率为 $5.0 \text{ kHz}$ 的声波通过8种不同温度透射单元产生的声压空间分布

Fig. 1. (color online) (a) Transmitted units of thermoacoustic phase manipulation; (b) transmitted phase delay and transmittance of units with different temperatures; (c) spatial distributions of pressure field through eight transmitted units with different temperatures at  $5.0 \text{ kHz}$ .

图 1(b) 为不同温度单元的声透射率(红虚线)与透射相位延迟(蓝实线), 可以看出, 改变单元中空气温度  $T$ , 可以获得覆盖  $2\pi$  区间的透射相位延迟, 且具有较高的透射率(大于 0.8). 为了显示单元的透射相位延迟, 在图 1(b) 蓝实线上选取间隔为  $\pi/4$  的 8 个点(蓝色空心点), 温度分别为 340, 420, 530, 650, 850, 1230, 1940 及 2670 K, 对应的相位延迟分别为  $3\pi/2, 5\pi/4, \pi, 3\pi/4, \pi/2, \pi/4, 2\pi$  及  $7\pi/4$ . 8 种不同温度透射单元的声压空间分布如图 1(c), 可以看出, 声波通过热声相位控制单元, 透射波会产生相位延迟.

### 2.2.2 反射单元

如图 2(a), 热声相位控制反射单元上、下及左侧蓝色实线为刚性隔热边界, 右侧红色虚线为隔热

薄膜, 声波从右侧垂直入射, 通过单元到达刚性隔热边界, 发生反射, 再次通过单元返回到外界, 单元的结构参数  $l, h$  及  $d$  与图 1(a) 相同.

不同温度单元的反射相位延迟如图 2(b), 可以看出, 改变温度  $T$ , 同样可以得到覆盖  $2\pi$  区间的反射相位延迟. 与图 1(b) 相比, 反射相位延迟曲线发生明显改变, 这主要由于声波在单元中的反射波程是透射波程的 2 倍. 在蓝色实线上选取间隔为  $\pi/4$  的 8 个点(蓝色空心点), 其温度分别为 590, 630, 690, 760, 890, 1170, 1680 及 2070 K, 对应的相位延迟分别为  $2\pi, 7\pi/4, 3\pi/2, 5\pi/4, \pi, 3\pi/4, \pi/2$  及  $\pi/4$ . 图 2(c) 为 8 种不同温度反射单元的声压空间分布, 可以看出, 声波通过热声相位控制单元, 反射波同样会产生相位延迟.

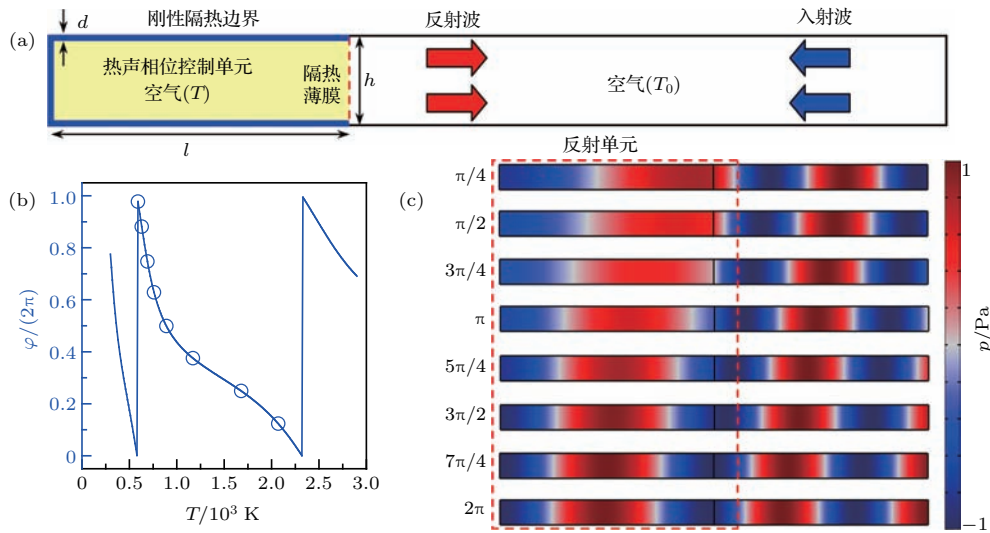


图 2 (网刊彩色) (a) 热声相位控制反射单元; (b) 不同温度单元的反射相位延迟分布; (c) 频率为 5.0 kHz 的声波通过 8 种不同温度反射单元产生的声压空间分布  
 Fig. 2. (color online) (a) Reflected units of thermoacoustic phase manipulation; (b) reflected phase delay of units with different temperatures; (c) spatial distributions of pressure field through eight reflected units with different temperatures at 5.0 kHz.

### 2.3 声聚焦透镜设计

根据广义斯涅耳定律<sup>[27]</sup>, 声波的折射角  $\theta_t$  表示为

$$\frac{1}{k_0} \frac{d\varphi(y)}{dy} = \sin \theta_t - \sin \theta_i, \quad (3)$$

式中  $k_0 = 2\pi f/c_0$  为温度 300 K 的声波波数, 其中,  $c_0$  为声波波速,  $f$  为声波频率;  $\theta_i$  和  $\theta_t$  分别为声波的入射角与折射角;  $\varphi(y)$  为声波通过相控阵列产生的相位延迟.

对于焦距为  $b$  的声聚焦透镜, 当声波沿轴向 ( $x$

方向) 垂直入射时, 其  $y$  方向的相位分布  $\varphi(y)$  表示如下<sup>[20]</sup>:

$$\varphi(y) = -k_0 \sqrt{y^2 + b^2}. \quad (4)$$

## 3 数值结果与讨论

### 3.1 基于 8 种相位单元的透射声聚焦

根据 (4) 式, 令  $y = 80$  cm,  $b = 30$  cm,  $f = 5.0$  kHz 及  $c_0 = 343$  m/s, 可以理论计算聚焦透镜  $y$  方向的相位分布, 如图 3 蓝色实线. 利用 8 种相位



覆盖  $2\pi$  范围的单元, 排列在  $y$  方向上, 如图 3 红色空心点, 即可设计出热声聚焦透镜.

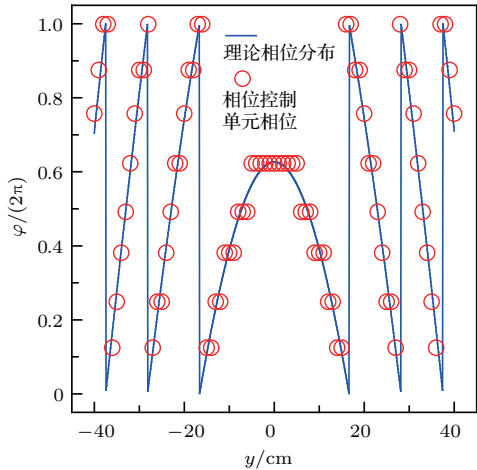


图 3 (网刊彩色) 声聚焦透镜的理论相位分布与基于 8 种相位单元的排列分布

Fig. 3. (color online) Theoretical phase distribution of acoustic focusing lens and arrangement distribution of eight types of phase units.

图 4 显示了声波透过聚焦透镜产生的声能量密度  $|p|^2$  空间分布, 聚焦透镜由图 1 (b) 中 8 种透射单元设计而成. 可以看出, 声波透过聚焦透镜, 在其右侧产生良好的声聚焦效应. 为了表征声聚焦透镜的性能, 分别计算经过焦点的横向与纵向 (图 4 中线 I 与 II) 的声能量密度分布, 同时给出自由空间中相应的声能量密度进行比较, 如图 5. 可以看出, 聚焦透镜在水平与垂直方向上表现出良好的声聚焦性能, 焦点的中心位置为 (50.6 cm, 0), 焦距为 30.6 cm, 与理论给定的焦距 30 cm 符合得很好, 焦点中心的声能量密度约为自由空间的 18 倍.

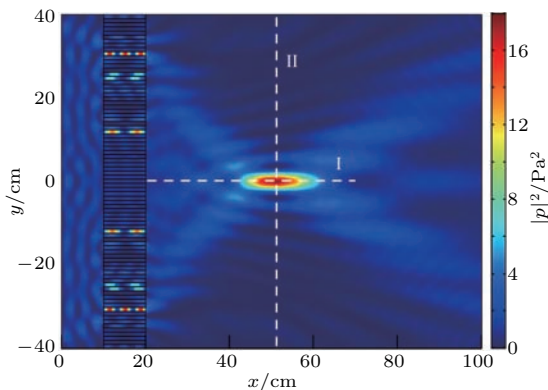


图 4 (网刊彩色) 基于 8 种相位单元, 频率为 5.0 kHz 的声波通过聚焦透镜产生的透射声能量密度  $|p|^2$  空间分布

Fig. 4. (color online) Spatial distribution of transmitted acoustic intensity field  $|p|^2$  through focusing lens at 5.0 kHz for eight phase units.

图 6 为不同频率声波通过聚焦透镜产生的声能量密度空间分布, 聚焦透镜的单元排列与图 4 相同. 可以看出, 热声相控阵列聚焦透镜的工作频带较宽, 在 4—15 kHz 范围, 聚焦透镜均出现明显的声聚焦效应. 随着频率增大, 焦点尺寸明显减小, 焦点位置向右缓慢平移, 且焦点中心的声能量密度逐渐增大, 说明本文所提出的热声相控阵列聚焦透镜具有一定的工作带宽, 在工作带宽范围中能够保持很好的工作性能.

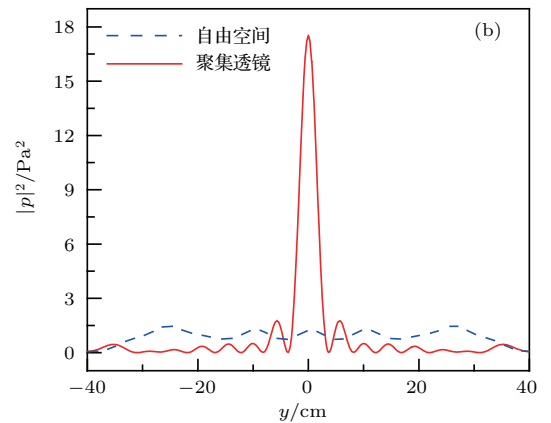
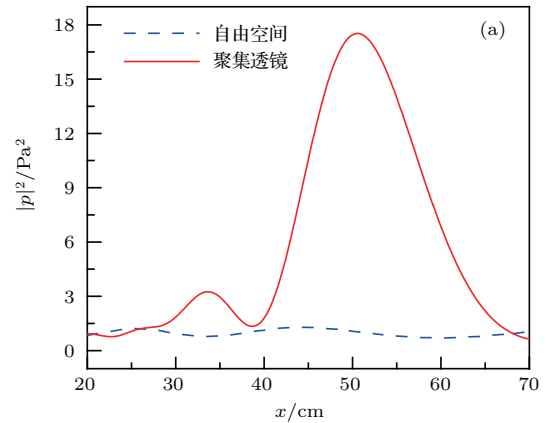


图 5 (网刊彩色) 基于 8 种相位单元, 经过焦点在 (a)  $x$  方向与 (b)  $y$  方向的透射声能量密度分布

Fig. 5. (color online) Distributions of transmitted acoustic intensity field through focal spot at (a)  $x$  and (b)  $y$  directions for eight phase units.

### 3.2 基于 8 种相位单元的反射声聚焦

图 7 为声波通过聚焦透镜反射产生的声能量密度空间分布, 聚焦透镜由图 2 (b) 中 8 种反射单元设计而成. 可以看出, 声波在聚焦透镜左侧发生反射, 返回到透镜右侧, 产生良好的声聚焦效应. 图 8 为经过焦点的横向与纵向 (图 7 中线 I 与 II) 的声能量密度分布, 可以看出, 焦点的中心位置为 (38.6 cm, 0), 焦距为 28.6 cm, 与理论给定的焦距  $b = 30$  cm 接近, 焦点中心的声能量密度约为自由

空间的21倍,与图4相比,焦点中心的声能量密度更大,这主要由于硬声场边界的声反射率为100%,明显高于图1(b)中的声透射率,说明热声相控阵列反射聚焦透镜同样具有良好的声聚焦性能。

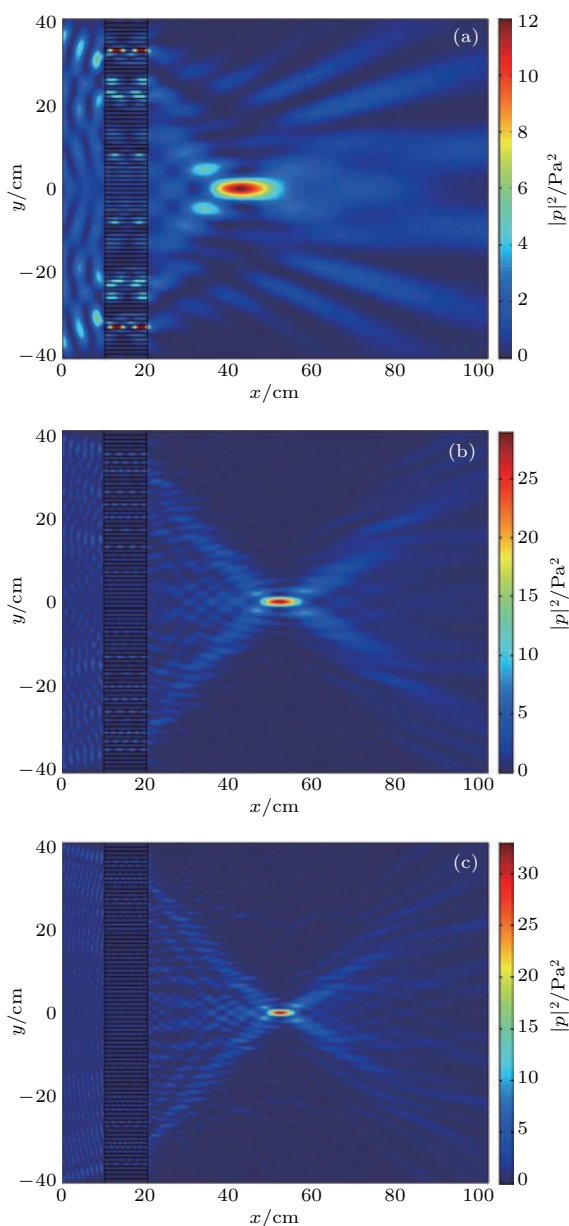


图6 (网刊彩色) 基于8种相位单元,频率分别为(a) 4.0 kHz, (b) 10.0 kHz, (c) 15.0 kHz的声波通过聚焦透镜产生的透射声能量密度空间分布

Fig. 6. (color online) Spatial distributions of acoustic intensity field through focusing lens at (a) 4.0 kHz, (b) 10.0 kHz, and (c) 15.0 kHz for eight phase units.

### 3.3 基于2种相位单元的透射声聚焦

在上述研究结果的基础上,为了简化透镜的设计方案,提高透镜的鲁棒性,采用两种不同相位延

迟的单元设计两元相位聚焦透镜,如图9,红色空心点为设计声聚焦透镜的两种不同相位延迟单元的排列分布。

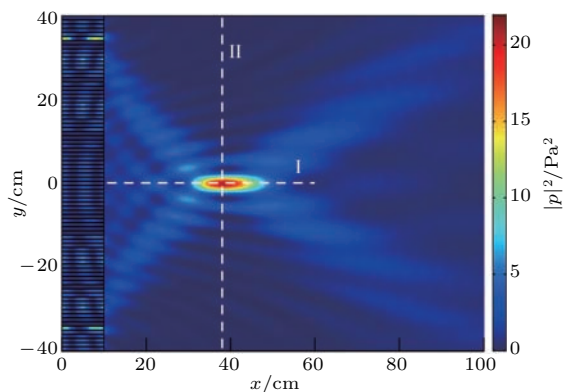


图7 (网刊彩色) 基于8种相位单元,频率为5.0 kHz的声波通过聚焦透镜产生的反射声能量密度空间分布

Fig. 7. (color online) Spatial distribution of reflected acoustic intensity field through focusing lens at 5.0 kHz for eight phase units.

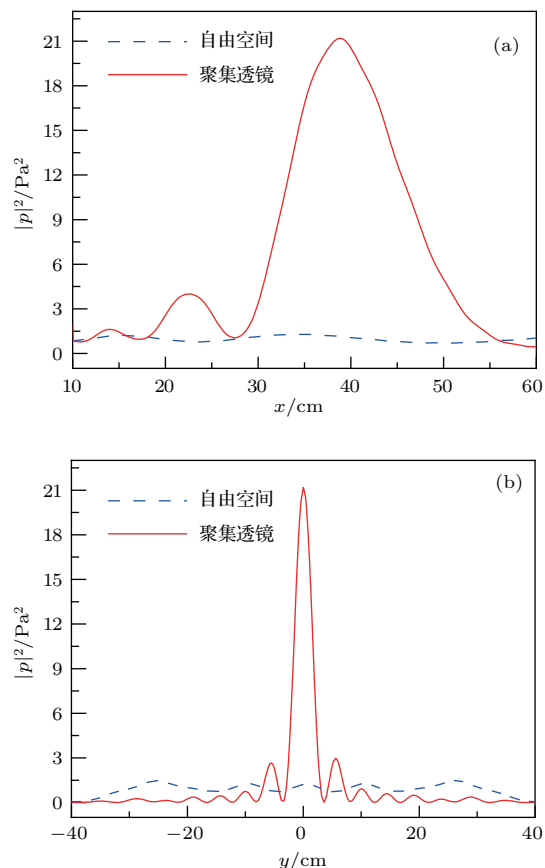


图8 (网刊彩色) 基于8种相位单元,经过焦点在(a) x方向与(b) y方向的反射声能量密度分布

Fig. 8. (color online) Distributions of reflected acoustic intensity field through focal spot at (a) x and (b) y directions for eight phase units.

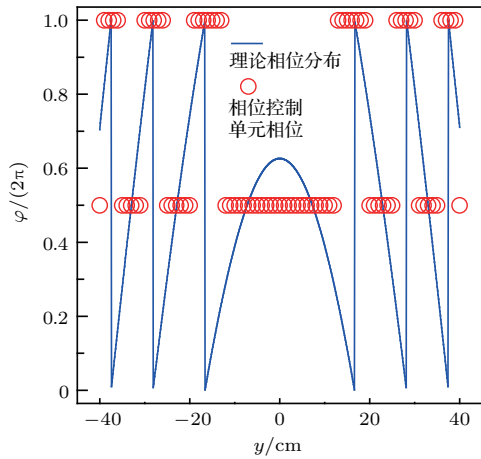


图9 (网刊彩色) 声聚焦透镜的理论相位分布曲线与基于2种相位单元的排列分布  
 Fig. 9. (color online) Theoretical phase distribution of acoustic focusing lens and arrangement distribution of two types of phase units.

下面采用图1(c)中相位延迟为0和 $\pi$ 的两种透射单元设计聚焦透镜. 图10为声波通过两元透射相位聚焦透镜产生的声能量密度空间分布. 与图3相似, 声波可以透过聚焦透镜, 实现良好的声聚焦效应. 图11为图10中线I与II上的声能量密度分布, 可以看出, 两元透射相位聚焦透镜具有良好的声聚焦性能, 焦点中心的声能量密度最大值约为 $11.0 \text{ Pa}^2$ , 与图4相比较, 焦点位置几乎不变, 焦点中心的声能量密度减小, 这主要由于不同相位单元的种类减少. 然而, 该透镜仅采用两种不同相位的单元, 设计方案更简单, 鲁棒性更高.

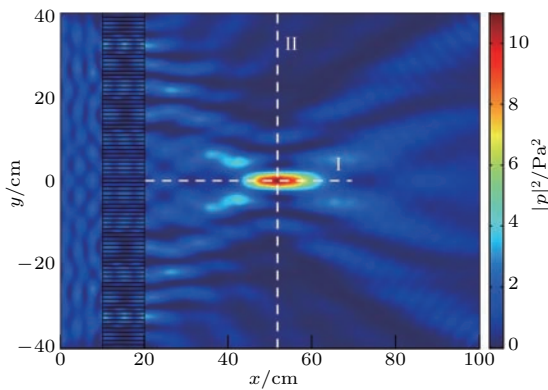


图10 (网刊彩色) 基于2种相位单元, 频率为5.0 kHz的声波通过聚焦透镜产生的透射声能量密度空间分布  
 Fig. 10. (color online) Spatial distribution of transmitted acoustic intensity field through focusing lens at 5.0 kHz for two phase units.

### 3.4 基于2种相位单元的反射声聚焦

此外, 同样可以采用2种反射相位单元设计声聚焦透镜. 为了验证方案的可行性, 利用图2(c)

中相位延迟为0和 $\pi$ 的两种反射单元设计声聚焦透镜, 对应的声能量密度空间分布如图12, 同样, 两元反射相位聚焦透镜具有良好的声聚焦性能. 图13为图12中线I与II上的声能量密度分布, 可以看出, 与图11类似, 焦点中心的声能量密度最大值约为 $11.0 \text{ Pa}^2$ , 与图7相比较, 焦点位置几乎不变, 焦点中心的声能量密度减小.

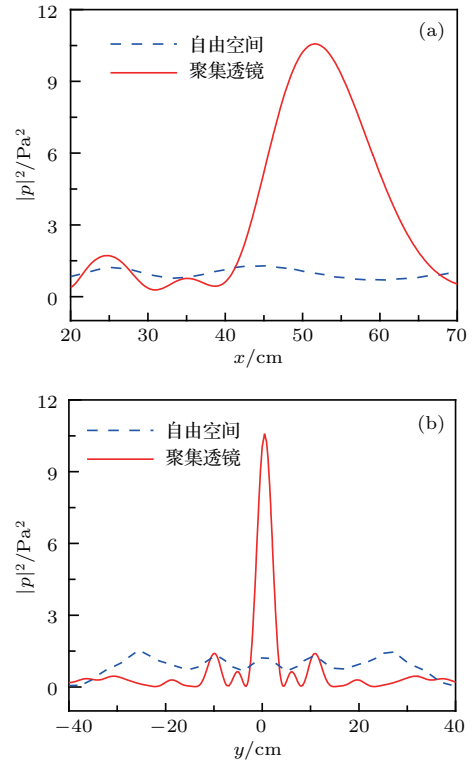


图11 (网刊彩色) 基于2种相位单元, 经过焦点在(a)  $x$ 方向与(b)  $y$ 方向的透射声能量密度分布  
 Fig. 11. (color online) Distributions of transmitted acoustic intensity field through focal spot at (a)  $x$  and (b)  $y$  directions for two phase units.

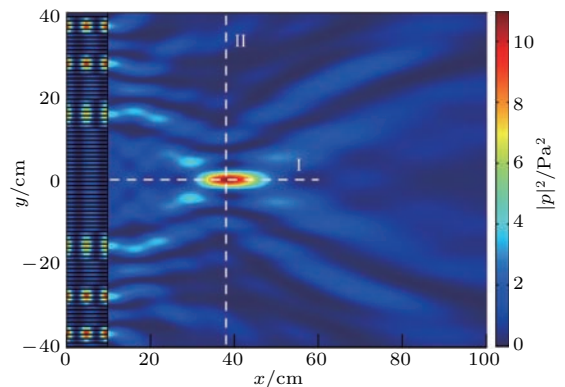


图12 (网刊彩色) 基于2种相位单元, 频率为5.0 kHz的声波通过聚焦透镜产生的反射声能量密度空间分布  
 Fig. 12. (color online) Spatial distribution of reflected acoustic intensity field through focusing lens at 5.0 kHz for two phase units.

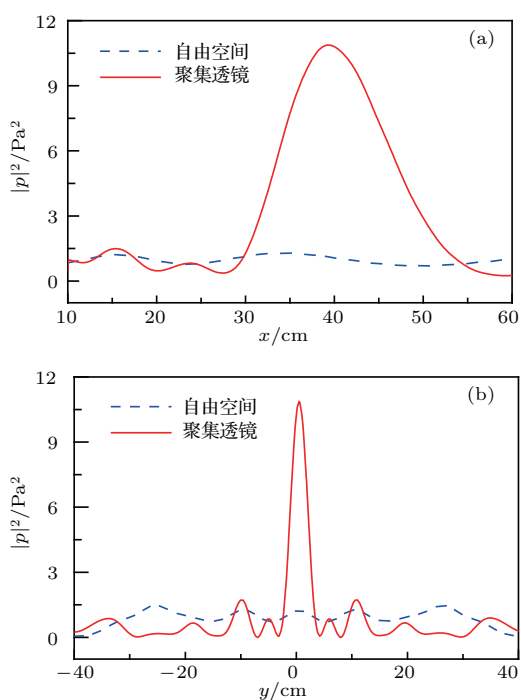


图 13 (网刊彩色) 基于 2 种相位单元, 经过焦点在 (a)  $x$  方向与 (b)  $y$  方向的反射声能量密度分布

Fig. 13. (color online) Distributions of reflected acoustic intensity field through focal spot at (a)  $x$  and (b)  $y$  directions for two phase units.

## 4 结 论

本文基于空气的声速与温度关系, 采用隔热薄膜与刚性隔热边界包裹不同温度的空气设计新型热声相位控制单元, 实现了声波的透射与反射相位延迟覆盖整个  $2\pi$  区间. 在此基础上, 基于热声相位控制单元设计四种不同类型的声聚焦透镜, 采用 8 种或 2 种热声相位控制单元分别实现了透射与反射声聚焦效应. 结果表明: 热声相控阵列透镜在 4.0—15.0 kHz 范围, 具有良好的聚焦性能; 此外, 基于 8 种相位单元的透镜, 焦点中心的声能量密度更大, 基于 2 种相位单元的透镜, 设计方案更简单, 鲁棒性更高. 与其他类型的聚焦透镜相比, 热声相控阵列聚焦透镜具有宽频带、高聚焦性能、设计方案简单等优点, 研究结果可为设计宽频带热声相控阵列器件及新型声聚焦透镜提供理论依据与实验参考.

## 参考文献

[1] Zhao J J, Ye H P, Huang K, Chen Z N, Li B W, Qiu C W 2014 *Sci. Rep.* **4** 6257  
 [2] Gu Y, Cheng Y, Liu X J 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 133503  
 [3] Xia J P, Sun H X 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 063505

[4] Zheng L, Guo J Z 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 044305 (in Chinese) [郑莉, 郭建中 2016 物理学报 **65** 044305]  
 [5] Deng K, Ding Y Q, He Z J, Zhao H P, Shi J, Liu Z Y 2009 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** 185505  
 [6] Lin S C S, Huang T J, Sun J H, Wu T T 2009 *Phys. Rev. B* **79** 094302  
 [7] Martin T P, Layman C N, Moore K M, Orris G J 2012 *Phys. Rev. B* **85** 161103  
 [8] Torrent D, Sánchez-Dehesa J 2007 *New J. Phys.* **9** 323  
 [9] Peng S S, He Z J, Jia H, Zhang A Q, Qiu C Y, Ke M Z, Liu Z Y 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 263502  
 [10] Zhang S, Yin L L, Fang N 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 194301  
 [11] Zigoneanu L, Popa B I, Cummer S A 2011 *Phys. Rev. B* **84** 024305  
 [12] Li Y, Liang B, Tao X, Zhu X F, Zou X Y, Cheng J C 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 233508  
 [13] Wang W Q, Xie Y B, Konneker A, Popa B I, Cummer S A 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 101904  
 [14] Yuan B G, Cheng Y, Liu X J 2015 *Appl. Phys. Express* **8** 027301  
 [15] Lu G X, Ding E L, Wang Y Y, Ping X Y, Cui J, Liu X Z, Liu X J 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 123507  
 [16] Mei J, Wu Y 2014 *New J. Phys.* **16** 123007  
 [17] Jahdali R A, Wu Y 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 031902  
 [18] Xia J P, Sun H X, Cheng Q, Xu Z, Chen H, Yuan S Q, Zhang S Y, Ge Y, Guan Y J 2016 *Appl. Phys. Express* **9** 057301  
 [19] Guan Y J, Sun H X, Liu S S, Yuan S Q, Xia J P, Ge Y 2016 *Chin. Phys. B* **25** 104302  
 [20] Li Y, Liang B, Gu Z M, Zou X Y, Cheng J C 2013 *Sci. Rep.* **3** 2546  
 [21] Zhu Y F, Zou X Y, Li R Q, Jiang X, Tu J, Liang B, Cheng J C 2015 *Sci. Rep.* **5** 10966  
 [22] Tang K, Qiu C Y, Ke M Z, Lu J Y, Ye Y T, Liu Z Y 2014 *Sci. Rep.* **4** 6517  
 [23] Wang X P, Wan L L, Chen T N, Song A L, Wang F 2016 *J. Appl. Phys.* **120** 014902  
 [24] Gao H, Gu Z M, Liang B, Zou X Y, Yang J, Yang J, Cheng J C 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 073501  
 [25] Tian Y, Wei Q, Cheng Y, Xu Z, Liu X J 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 221906  
 [26] Fan X D, Zhu Y F, Liang B, Yang J, Cheng J C 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 243501  
 [27] Yu N, Genevet P, Kats M A, Aieta F, Tetienne J P, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **334** 333  
 [28] Dehesa J S, Angelov M I, Cervera F, Cai L W 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 204102  
 [29] Ge Y, Sun H X, Liu C, Qian J, Yuan S Q, Xia J P, Guan Y J, Zhang S Y 2016 *Appl. Phys. Express* **9** 066701  
 [30] Liu C, Sun H X, Yuan S Q, Xia J P 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 044303 (in Chinese) [刘宸, 孙宏祥, 袁寿其, 夏建平 2016 物理学报 **65** 044303]  
 [31] Garcia-Chocano V M, Torrent D, Sanchez-Dehesa J 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 084103  
 [32] Qian F, Zhao P, Quan L, Liu X Z, Gong X F 2014 *Europhys. Lett.* **107** 34009  
 [33] Guan Y J, Sun H X, Xia J P, Yuan S Q 2017 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50** 165102



# Acoustic focusing by thermoacoustic phased array\*

Liu Chen<sup>1)</sup> Sun Hong-Xiang<sup>1)2)†</sup> Yuan Shou-Qi<sup>1)‡</sup> Xia Jian-Ping<sup>1)</sup> Qian Jiao<sup>1)</sup>

1) (*Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Faculty of Science, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China*)

2) (*State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

( Received 24 April 2017; revised manuscript received 16 May 2017 )

## Abstract

Broadband acoustic focusing effect based on a thermoacoustic phased array is studied. In this work, according to the relationship between the sound velocity and the temperature, a new type of a thermoacoustic phase control unit is designed by using air with different temperatures surrounded by rigid insulated boundaries and thermal insulation films. The acoustic wave velocity could be adjusted by changing the temperature of air in the unit, and the transmitted and reflected acoustic phase delays can cover the whole  $2\pi$  interval. On the basis of this thermoacoustic phased array, we design four different types of acoustic focusing lenses. By using eight or two kinds of such units, we realize the transmitted and reflected acoustic focusing effect, respectively. The results show that the thermoacoustic phased array lens has a good focusing performance in a frequency range of 4.0–15.0 kHz. In addition, the center intensity of the focal spot is much greater in the focusing lens with eight phase units, and the design method is simpler and more robust in the focusing lens with two phase units. Compared with other types of focusing lenses, the proposed focusing lens based on the thermoacoustic phased array has the advantages of broad bandwidth, high focusing performance and simple designed method. The results provide a theoretical basis and experimental reference for designing the broadband thermoacoustic phased array devices and new types of acoustic focusing lenses.

**Keywords:** acoustic focusing, thermoacoustic, phase manipulation, temperature

**PACS:** 43.35.+d, 43.25.+y

**DOI:** [10.7498/aps.66.154302](https://doi.org/10.7498/aps.66.154302)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11404147), the Major Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51239005), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province of China (Grant No. BK20140519), and the Jiangsu Qing Lan Project, China.

† Corresponding author. E-mail: [jsdxshx@ujs.edu.cn](mailto:jsdxshx@ujs.edu.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [Shouqiy@ujs.edu.cn](mailto:Shouqiy@ujs.edu.cn)