

УДК 537.82

DOI: 10.17223/00213411/63/2/68

*Д.Я. СУХАНОВ, Ф.С. ЕМЕЛЬЯНОВ***ОБЪЁМНАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ ЛЕВИТАЦИЯ ЧАСТИЦ В ПОЛЕ ФАЗИРОВАННЫХ РЕШЁТОК УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ\***

Рассматривается возможность поддержания стабильной объёмной левитации множества частиц в ультразвуковом поле при многостороннем облучении монохроматическими ультразвуковыми волнами в воздухе. Левитация частиц обеспечивается при их помещении в поле стоячих волн определённой конфигурации. Управление частицами в горизонтальной плоскости осуществляется за счёт изменения фазовых соотношений излучающих решёток. Теоретически и экспериментально показана возможность применения монохроматического поля для поддержания стабильной левитации частиц в объёме. Разработана многоканальная система управления фазированными решётками ультразвуковых излучателей на основе однобитного цифроаналогового преобразователя для применения в установке ультразвуковой левитации в воздухе.

*Ключевые слова:* акустическая левитация, фазированные решётки, левитация множества частиц.

**Введение**

Левитация частиц в воздухе под действием ультразвукового поля [1] позволяет реализовать акустический пинцет для бесконтактной манипуляции [2]. В ряде случаев необходимо обеспечить одновременную левитацию и управление упорядоченным множеством частиц. Например, такой режим левитации и управления частицами имеет перспективы применения в технологии трёхмерной печати. Наиболее универсальным способом управления полем, поддерживающим акустическую левитацию, является применение фазированных решёток излучателей [2–4]. Акустическая левитация возможна не только для сферических частиц, но и для частиц произвольной формы [5]. Разработаны фазированные решётки с цифровым управлением амплитуды и фазы сигналов [3, 4]. Применение цифроаналоговых преобразователей (ЦАП) позволяет задавать сигналы произвольной формы для каждого излучающего элемента решётки. Благодаря фокусировке полей от множества излучателей обеспечивается высокая амплитуда поля в заданной области пространства. Акустическая левитация в воздухе поддерживается в максимумах акустической скорости или узлах давления стоячей волны [1]. Как правило, каждый элемент в фазированной решётке управляется независимо, что приводит к необходимости параллельного управления большим количеством каналов. Для ряда приложений нет необходимости задавать каждому элементу независимый сигнал управления. Если требуется управление только фазой сигнала, то число возможных вариаций сигналов можно существенно ограничить. Например, если задавать фазу сигнала с шагом  $2\pi/64$ , то существует всего 64 возможных вариаций сигналов, и достаточно применить всего 64 канала независимых генераторов сигналов для управления неограниченным количеством излучателей.

В работе [3] предлагается применение упорядоченной левитирующей группы частиц с целью формирования взвешенного в воздухе плоского экрана для проецирования изображений. Левитация частиц в плоском слое обеспечивается за счёт создания стоячих волн при интерференции встречных волн от фазированных решёток, сфокусированных на горизонтальную линию. В результате частицы левитируют в узлах давления и размещаются в плоскую прямоугольную сетку с шагом в половину длины волны. Исследователи из Бристольского университета [2] разработали систему для управления отдельными частицами в ультразвуковом поле за счёт формирования поля в виде так называемого акустического пинцета. При таком подходе невозможно обеспечить массовую объёмную левитацию частиц из-за ограничений области фокусировки акустического пинцета.

В данной работе исследуется возможность обеспечения одновременной левитации множества частиц в ультразвуковом поле в объёме с шагом порядка длины волны за счёт специальной конфигурации поля интерференции, формируемого фазированными решётками. Ультразвуковое поле объёмной левитации позволит захватывать частицы в любой точке облучаемого объёма без их от-

\* Научное исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 17-79-20051.

Уважаемые читатели!

Доступ к полнотекстовой версии журнала  
**«Известия высших учебных заведений. Физика»**  
осуществляется на платформе  
Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU  
на платной основе:

<https://www.elibrary.ru/contents.asp?titleid=7725>