

Сведения о выполненных работах  
в период с 01.07.2017 г. по 30.06.2018 г.

по проекту «**Разработка метода трёхмерной печати на основе ультразвукового управления микрочастицами**»,  
поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 17-79-20051

Руководитель: д-р физ.-мат. наук Суханов Дмитрий Яковлевич

На первом этапе выполнения Проекта разработан метод расчёта распределений поля с узким и широким спектром для удержания и управления левитирующими микрочастицами. Предложено два режима управления частицами. Первый предполагает манипуляцию одиночной частицей, а второй управление группой частиц. Для управления одиночной частицей предложено сфокусировать поле в точке удержания частицы с помощью встречно направленных решёток излучателей. В результате интерференции встречных волн сформируется устойчивое распределение стоячих волн ограниченное областью фокусировки. Рассчитано монохроматическое поле на частоте 40 кГц при интерференции встречных пучков при апертуре решёток излучателей 12 см, дальности фокусировки 18 см. В центре наблюдается максимум скорости акустического поля. Для лучшей локализации вдоль оси применяются широкополосные сигналы, содержащие 3 частотные компоненты спектра в полосе частот от 37 до 43 кГц. Численные расчёты показали локализацию максимума в области протяженностью порядка 6 см. Во втором режиме управления частицами для одновременной левитации и управления множеством частиц предлагается применить встречные решётки излучателей, сфокусированные только по вертикальной оси на область протяжённостью по горизонтали около 15 см. В таком случае, область максимальных значений поля имеет прямоугольный вид в горизонтальной плоскости и локализована по вертикали. С целью повышения амплитуды поля в прямоугольной области левитации предлагается использовать четыре плоские фазированные решётки излучателей, сфокусированные на прямоугольную область в центре с высокой локализацией по вертикальной оси. Подобное распределение поля должно обеспечить левитацию множества частиц в слое. Частицы будут группироваться в периодическую сетку, которую можно сдвигать, регулируя разность фаз между встречными решётками излучателей. Далее предлагается с помощью поля бегущих волн, формируемых фазированной решёткой излучателей расположенной сверху, упорядочивать частицы в требуемом порядке в пределах прямоугольной области левитации частиц.

Для формирования поля левитации разработана оптимальная конфигурация размещения излучающих элементов, обеспечивающая контроль волнового поля, на основе расчёта требуемого амплитудно-фазового распределения в фазированной антенной решётке методом обратного распространения волн. Рассчитана оптимальная решётка из 144 излучателей для формирования вихревого пучка. Синтезирована

оптимальная решётка излучателей из 91 элемента в гексагональной сетке для фокусировки поля на дальности 18 см.

Предложена система акустической левитации для трёхмерной печати на основе фазированных антенных решёток с горизонтальным облучением и фазированной антенной решёткой, расположенной сверху для вертикального облучения области левитации. В данном случае не применяются акустические линии задержки, а фаза управляется цифровым способом, что позволяет излучать узкополосные и широкополосные сигналы.

Разработана модель ультразвукового пинцета в поле стоячих волн на основе двух встречных пучков, каждый из которых обеспечивает субволновую локализацию акустического (ультразвукового) излучения для реализации режима субволнового конфигурирования акустических полей и удержания частиц.

Разработаны концепции построения, принцип функционирования, проведено математическое моделирование нового типа мезоразмерных проницаемых линз сферической, цилиндрической и кубической форм, обеспечивающих локализацию акустического поля в области пространства с размерами, менее классического дифракционного предела. Минимальный размер частицы-линзы равен длине волны используемого излучения.

Проведено исследование распределения акустических полей в неоднородных средах, вблизи поверхности формируемого трёхмерного объекта при наличии взвеси частиц с помощью численного моделирования в среде COMSOL, а также экспериментально. Выяснено, что для обеспечения возможности осаждения левитирующих частиц на поверхность формируемого объекта необходимо создавать ультразвуковое поле излучателями, расположенными сбоку (горизонтальное управление полем). Тогда стоячая волна, препятствующая осаждению частиц, будет минимизирована. Численное моделирование в среде COMSOL поля интерференции встречных пучков, формируемых решётками излучателей над цилиндрическим объектом, показало, что волны фокусируются в область левитации и удерживают частицы, которые при горизонтальном формировании удерживающего поля могут осаждаться на отражающий объект. Снижение точки фокусировки позволит осадить частицу на объект. Натурные эксперименты согласуются с численной моделью и подтверждают возможность осаждения левитирующих частиц на формируемый объект при горизонтальном управлении полем.

Создан алгоритм управления ультразвуковым полем с помощью фазированных решёток для обеспечения манипуляции несколькими частицами одновременно. На основе метода обратного распространения волн предложен оптимальный способ задания амплитудно-фазовых значений сигнала в каждом излучателе.

Предложено на горизонтально излучающие решётки подавать фазовые сдвиги, обеспечивающие фокусировку на горизонтальную плоскость заданной высоты. Перемещение плоскости фокусировки по вертикали позволит осаждать левитирующие частицы на подложку. Для верхней решётки должно задаваться

амплитудно-фазовое распределение, управляющее распределением частиц в двумерной области для перемещения левитирующих частиц в заданные положения.

Разработана система микроконтроллеров, аналого-цифровых преобразователей и усилителей для создания сверхширокополосной решётки ультразвуковых излучателей. Программирование микроконтроллеров для обеспечения передачи потока данных с управляющего компьютера на цифро-аналоговые преобразователи. Разработанная система позволяет управлять 320 каналами сигналов с частотой до 200 кГц.

Разработан лабораторный макет экспериментальной установки на основе двух одинаковых встречно направленных фазированных решёток ультразвуковых излучателей. Применялись излучатели МА40S4S на частоте 40 кГц. Каждая решётка состояла из 91 элемента установленных в гексагональной сетке с шагом 11 мм. Предварительные лабораторные эксперименты по фокусировке акустического поля и воздействия на микрочастицы показали левитацию частиц пенопласта и микрочастиц ABS пластика. Левитация обеспечивалась продолжительное время за счёт действия колебаний давления ультразвуковых волн. Использование встречного излучателя, позволяющего формировать узлы стоячих волн по дальности, обеспечило возможность управления положением частицы по одной оси, за счет регулирования разности фаз прямого и встречного излучателей.

Ссылки на информационные ресурсы:  
«Радиофизики разрабатывают новый метод ультразвуковой 3D-печати»  
[http://www.tsu.ru/news/radiofiziki-razrabatyvayut-novyy-metod-ultrazvukov/?sphrase\\_id=156486](http://www.tsu.ru/news/radiofiziki-razrabatyvayut-novyy-metod-ultrazvukov/?sphrase_id=156486)