

ВРАЩЕНИЕ МИКРОТУБИНЫ НЕКОЛЬЦЕВЫМ СВЕТОВЫМ ПУЧКОМ, СФОРМИРОВАННЫМ ВИХРЕВЫМ АКЦИКОНОМ

С.В. Ганчевская, Р.В. Скиданов

Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия,
Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия

Рассмотрена возможность использования сложного вихревого светового пучка с топологическими зарядами 2 и 5 для вращения микромеханического элемента (микротурбины). Представлены результаты натурального эксперимента по оптическому вращению микротурбины специальной формы. Проведена оценка момента силы, действующей на микротурбину.

Ключевые слова: микротурбина, оптическое вращение, световой пучок.

Введение

Световой пучок с орбитальным моментом можно формировать при помощи дифракционных оптических элементов для микромеханического компонента заданной формы, чтобы оптимизировать процесс преобразования световой энергии в механическую. Такие пучки широко использовались для вращения микрообъектов с характерными размерами 0,1-10 мкм, что подтверждается многочисленными публикациями. Например, в [1] продемонстрирована оптически управляемая микромеханическая система с винтом Архимеда в качестве механического привода в виде центральной сферы, и трех лопастей, которые были изготовлены методом двухфотонной полимеризации. Лазерный пучок фокусируется на микросистеме, микровинт попадает в ловушку в точке фокусировки и одновременно вращается. В этой работе исследуется зависимость скорости вращения микророторов с лопастями и без них, равные 1.9 $\text{min}^{-1}/\text{mW}$ и 13.5 $\text{min}^{-1}/\text{mW}$ соответственно. В работе [2] также исследована зависимость скорости вращения от толщины лопасти и центральной части винта. Однако, надо заметить, что основной механизм увеличения скорости вращения микрообъектов – увеличение мощности светового пучка, но трехмерные структуры на основе полимеров не обладают достаточной лучевой стойкостью. Для преодоления этой проблемы в [3] разработаны металлизированные, крестообразные роторы (диаметр 40 μm) для микроприводов путем сканирования лазерного луча с низким энергопотреблением. Проведен анализ светового давления, оказываемого на лопасть, показано, что наклонная лопасть может генерировать больший вращающий момент, чем горизонтальная лопасть за счет отражения падающего Гауссова пучка. В работе [4] также разработана металлизированная микротурбина (диаметр 60 μm , высота 6 μm), которая эффективно использовалась для создания движения потоков жидкости. Также на основе технологии двухфотонной полимеризации предпринимались усилия по миниатюризации дифракционного оптического элемента (ДОЭ) для формирования вихревых световых пучков [5]. В результате ДОЭ для формирования вихревого пучка по масштабу был сопоставим с вращаемыми микрообъектами (диаметр 9 μm , при разрешении 0.3 μm).

Однако работ, посвященных использованию вихревых световых пучков для работы с микрообъектами в разреженных средах (воздух или вакуум), очень мало, что связано с наличием значительных трудностей технического характера при проведении экспериментов. Поэтому перспективно разработать систему, в которой световые пучки и микромеханические элементы будут рассчитаны друг под друга и оптимизированы под работу в воздухе или в вакууме. Большинство работ, посвященных использованию давления света в качестве оптического привода, рассматривает конструкцию такого привода в виде некоей системы фокусировки уже сформированного светового пучка. Но с использованием дифракционных оптических элементов может быть реализована система, в которой к рабочему микромеханическому элементу будет подаваться световой пучок с орбитальным угловым моментом, который будет сформирован с учетом формы микрообъекта так, чтобы передача вращающего момента происходила за счет сил светового давления при отражении света от поверхности. Таким образом, можно минимизировать поглощение света микрообъектом, а, следовательно, его тепловое действие.

Одним из путей минимизации теплового воздействия является распределение световой мощности пучка по максимальной площади. Такие вихревые пучки есть, например, пучки Бесселя [6]. Однако пучки Бесселя не слишком подходят, т.к. интенсивность в кольцах резко убывает с ростом их номера. Чтобы обеспечить примерную равномерность распределения интенсивности проще всего использовать суперпозицию вихревых пучков, которая за счет постепенного роста топологического заряда обеспечит изменение размера вихревого пучка [7].

1. Формирование пучка

Для вращения микротурбины было решено использовать один из пучков, представленных в работе [7]. Для выбора светового пучка мы руководствовались следующими соображениями:

- наклон волнового фронта в каждой точке пучка должен быть перпендикулярен поверхности лопатки изготовленной микротурбины;
- пучок должен удовлетворять условию равномерности распределения интенсивности по полярному углу [8].

На рис. 1 показаны фазовая функция ДОЭ (рис.1а), а также формируемое им распределение интенсивности (рис.1б) и фаза пучка (рис.1в).

Изначально такой пучок предполагалось использовать для перемещения микротурбин из непрозрачного материала, однако, как будет показано ниже пучок успешно вращает прозрачные микротурбины.

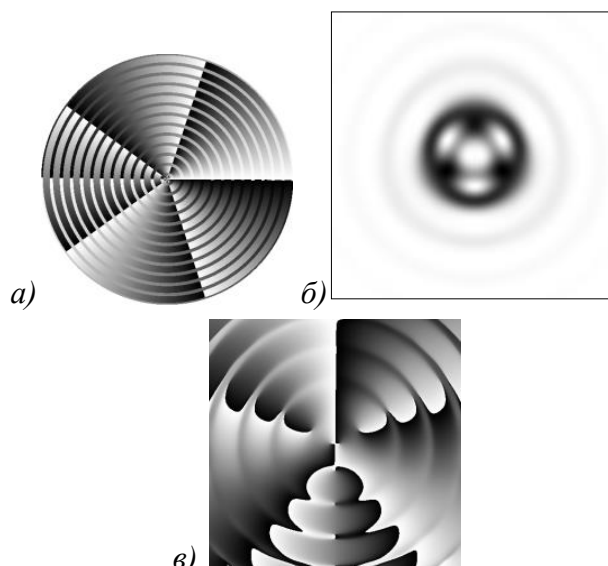


Рис. 1. Фазовая функция ДОЭ (а), распределение интенсивности в дальней зоне дифракции (б), фаза пучка (в).

2. Эксперимент

Для проведения эксперимента по вращению были изготовлены микрообъекты специальной формы (микротурбины). Для этого была использована станция круговой лазерной записи. Для формирования сложных вихревых пучков и их фокусировки на микротурбинах была использована оптическая установка, схема которой приведена на рис. 2.

В качестве источника излучения использовался лазер с длиной волны 532 нм и переменной мощностью 4 Вт. Пучок расширялся приблизительно до 2,3 мм в диаметре при помощи коллиматора и затем обрезался с помощью апертуры до 2 мм, чтобы точно покрыть рельеф ДОЭ. Для фокусировки и формирования изображения использовались микрообъективы 16х. Микротурбины помещались в кювету с водой, в которую добавлялась поваренная соль, чтобы увеличить плотность жидкости. Т.к. плотность резиста, из которого были изготовлены микротурбины около 1200 кг/м^3 , что существенно выше плотности воды, добавка соли обеспечивает уменьшение веса микротурбины, и, следовательно, уменьшение силы трения.

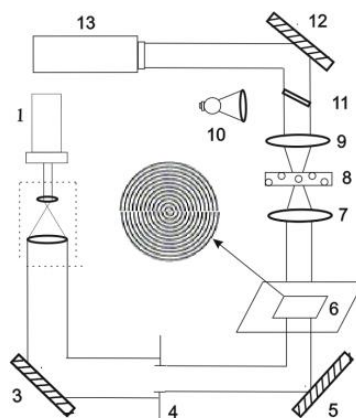


Рис. 2. Оптическая схема установки по вращению микротурбин. В оптической схеме введены обозначения: 1 – лазер с длиной волны 532 нм и максимальной мощностью 4 Вт; 2 - коллиматор; 3, 5, 12 – поворотные зеркала; 4 – диафрагма; 6 – аксикон; 7 – фокусирующий микрообъектив ($\times 16$); 8 – подложка с микротурбинами; 9 – изображающий микрообъектив ($\times 16$); 10 – подсветка; 11 – полупрозрачное поворотное зеркало; 13 - ПЗС-камера.

Рабочая область подсвечивалась белым светом от лампы накаливания. Съемка осуществлялась ПЗС камерой, перед которой помещался спектральный световой фильтр.

На рисунке 3 показаны этапы вращения микротурбины.

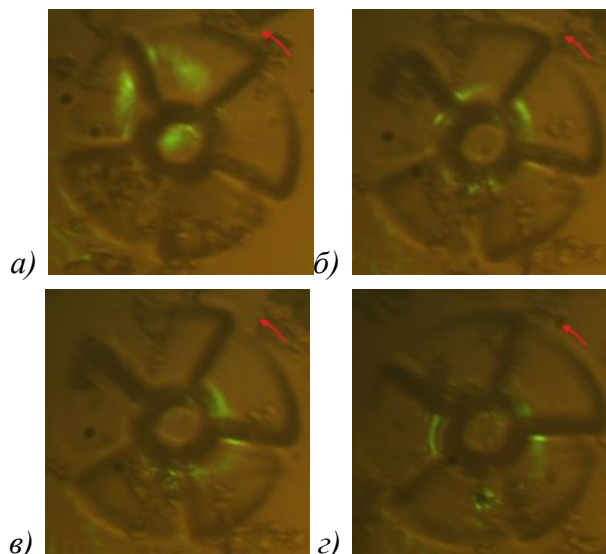


Рис.3. Стадии движения полимерной микротурбины с интервалом 2с в пучке с топологическими зарядами 5, 2, 5

Из рисунка 3 видно, что осуществляется поворот микротурбины диаметром 100 мкм сфокусированным световым пучком. Рассчитаем угловую скорость микротурбины и момент сил трения, действующих на нее, используя первый и последний кадр. Найдем координаты лопасти в положении перед началом вращения и после ее поворота. Для расчета моменты сил трения воспользуемся формулой для момента действующих на диск конечного радиуса сил трения [9]:

$$M = -1,94 \cdot R^4 \cdot \rho \sqrt{\nu \Omega^3}, \quad (1)$$

где R – радиус микротурбины, ρ – плотность воды, ν – коэффициент вязкости при 20 С, Ω – угловая скорость.

Угловая скорость микротурбины составила $0,056 \text{ с}^{-1}$, а момент сил трения, действующих на нее – $2,87 \text{ фН} \cdot \text{м}$. Это дает возможность оценки суммарной силы действующей со стороны светового пучка на микротурбину – около 100 пкН .

Заключение

Составной вихревой пучок с топологическими зарядами 2 и 5, несмотря на некольцевую структуру, позволяет вращать микротурбину, согласованную по форме с его волновым фронтом. Для успешного проведения экспериментов со столь крупными объектами как микротурбина (диаметр 100мкм) необходимо снижать их вес за счет увеличения плотности окружающей жидкости. Момент силы, воздействующий на микротурбину, составил около 3 фН , что является довольно высоким значением при используемых в эксперименте параметрах оптической схемы.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 14-19-00114).

Литература

1. Liu, Yi-J. Optically Driven Mobile Integrated Micro-Tools for a Lab-on-a-Chip / Yi-J. Liu, Yi-H. Lee, Yu-Sh. Lin, Ch. Tsou, P. L. Baldeck, Ch.-L. Lin // *Actuators*. – 2013. – V. 2(2). – P. 19-26.
2. Lina, Ch.-L. Rotational Efficiency of Photo-Driven Archimedes Screws for Micropumps / Ch.-L. Lina, Yu-Sh. Lina, P. Baldeck // *Micromachines*. – 2015. – V. 6. – P. 674-683.
3. Ikegami1, T. Development of Optically-Driven Metallic Microrotors Using Two-Photon Microfabrication / T. Ikegami1, R. Ozawa1, M. P. Stocker, J. T. Fourkas, S. Maruo // *JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering*. – 2013. – V. 8(1). – P. 6-10.
4. Ikegami1, T. Active micromixer using a metallized microturbine driven by an ultra-low power laser / T. Ikegami1, R. Ozawa1, M. P. Stocker, J. T. Fourkas, S. Maruo // *16th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences*. – 2012. – T.5. – P. 139.
5. Knoener, G. Integrated optomechanical microelements / G. Knoener, S. Parkin, T. A. Nieminen, V.L.Y. Loke, N.R. Heckenberg, H. Rubinsztein-Dunlop // *Optics Express*. – 2007. – V. 15(9). – P. 5521-5530.
6. Скиданов, Р.В. Формирование пучков Бесселя вихревыми аксиконами / Р.В. Скиданов, С.В. Ганчевская // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 3. – С. 463-468.
7. Скиданов, Р.В. Дифракционные оптические элементы для формирования комбинаций вихревых пучков в задаче манипулирования микрообъектами / Р.В. Скиданов, С.В. Ганчевская // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 1. – С. 65-71.
8. Морозов, А.А. Сложные вихревые пучки для вращения микромеханических элементов / А.А. Морозов, Р.В. Скиданов // *Компьютерная оптика*. – 2013. – Т. 37, № 1. – С. 68-75.
9. Гидродинамика. / Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. – Изд. 3-е, перераб. – М.: Наука, 1986. – 736 с.