

**ОПТИЧЕСКАЯ МИКРОМАНИПУЛЯЦИЯ**

© 2008 Р.В. Скиданов

Институт систем обработки изображений РАН

Рассмотрена история развития тематики манипуляции микрообъектами в световых пучках. Представлены результаты экспериментов по вращению микрообъектов в световых пучках.

*Оптическая микроманипуляция, ДОЭ, пучки Бесселя, вихревые пучки, дифракционная оптика*

Тема моей лекции “Оптическая микроманипуляция” (слайд 1).

Для того, чтобы определить, что это такое, давайте обратимся к истории. То, что свет, как и любая другая электромагнитная волна, должен оказывать давление на предметы, было показано ещё в работах Максвелла, а также независимо от него Бартоли, который получил такие же выводы, основываясь на термодинамических представлениях (слайд 2).

Затем Лебедеву удалось экспериментально подтвердить их выводы. После этого следует достаточно большой перерыв (более 70 лет), в течение которого почти не было заметных работ, посвящённых давлению света. Новый толчок развитию данной тематики дало изобретение лазера. Появилась возможность создавать световые поля с высокой интенсивностью в микрообластях, что позволило использовать силы светового давления для перемещения объектов размером несколько микрометров. В дальнейшем эта тематика бурно развивается (слайд 2). Давайте рассмотрим причины возникновения светового давления (слайд 3).

Световой пучок имеет импульс, который изменяется после взаимодействия с объектом. В зависимости от характера объекта свет может от него отражаться или поглощаться, либо частично отражаться, частично поглощаться. Рассмотрим два крайних случая, когда предмет все отражает и все поглощает. Как видите, давление света на полностью отражающий объект вдвое больше, чем на объект, полностью поглощающий. Давление на любой объект с коэффициентом

отражения меньше 1 будет находиться в этом интервале (слайд 4).

На следующем слайде представлена экспериментальная установка опыта Лебедева (слайд 5). В вакууме помещалась кварцевая нить, на которую наклеивались лепестки из материалов, полностью отражающих свет (светлые кружки) и полностью поглощающих свет (на рисунке темные кружки). На образец направлялся пучок света от электрической дуги. Величина передаваемого импульса (давления) определялась по углу скручивания нити, который измерялся с помощью простой оптической системы. Если известна жёсткость нити на закручивание, то можно найти вращающий момент, а, следовательно, и силу. Результаты опытов П.Н. Лебедева оказались в согласии с выводами теории Максвелла. В том случае, если предмет прозрачный и почти не отражает и не поглощает свет, возникают так называемые градиентные силы. Данные силы возникают в результате преломления светового пучка прозрачным объектом. На слайде представлены различные варианты действия градиентных сил (слайд 6).

На рис. 1 оптически более плотный, чем окружающая среда, объект втягивается в область высокой интенсивности света. На рис. 2 оптически менее плотный, чем окружающая среда, объект выталкивается из области высокой интенсивности света. На рис. 3 показана возможность трёхмерного захвата оптически плотного объекта при сильной фокусировке светового пучка. Существуют особые световые пучки, в которых фотоны обладают орбитальным угловым моментом.

Так как фотон не имеет массы покоя, то его связанное состояние растянуто вдоль оси распространения (слайд 7).

Используя такие пучки, можно осуществить вращение микрообъекта. В этом случае орбитальный угловой момент светового пучка как бы передается микрообъекту (слайд 8).

Для формирования таких пучков и вращения микрообъектов с их помощью была разработана экспериментальная установка (слайд 9), собранная на базе обычного оптического микроскопа. С помощью дифракционного оптического элемента (ДОЭ), представленного на слайде, можно сформировать пучок Бесселя, который также обладает орбитальным угловым моментом (слайд 10). На следующем слайде представлен ролик с захватом и вращением клетки дрожжей в таком пучке. Также этим пучком была захвачена пара полистироловых микрочастиц, которые не только вращались, но и перемещались вслед за пучком (слайд 12).

Пучки с орбитальным угловым моментом можно создавать группами и захватывать и вращать микрообъекты в каждом пучке (слайды 13, 14). К сожалению, при формировании восьми таких пучков получить вращение не удалось, т.к. в каждом пучке слишком мало энергии для вращения. Поэтому в последующих экспериментах использовался ДОЭ, формирующий четыре пучка (слайд 15). В четырёх пучках удалось получить не только захват, но и вращение микрообъектов (слайды 16, 17, 18).

При этом процедура периодической дефокусировки позволяет существенно ускорить вращение микрообъектов в таком пучке (слайд 19). Вращение микрообъектов возможно и в пучках более сложной формы, например, в пучках Гаусса-Лагерра (слайд

20). При этом чем больший орбитальный угловой момент имеют фотоны в световом пучке, тем быстрее вращаются микрообъекты. Так, на представленных роликах можно видеть круговое движение микрообъектов в пучке Бесселя десятого порядка. Хорошо видно, что скорость этого движения существенно выше, чем при движении микрообъектов в пучках с меньшим номером порядка (слайд 21).

Пучки с высоким орбитальным угловым моментом позволяют осуществлять вращение микрообъектов по окружности больших радиусов, при этом можно двойным аксионом сформировать двойное кольцо, которое позволит вращать не только прозрачные, но и непрозрачные микрообъекты (слайд 22).

Чтобы точно сравнить движение микрообъектов в разных пучках, желательно иметь инструмент для автоматического определения скорости движения. Для этого изображение обрабатывается, а затем строится корреляционная функция с изображением эталонного микрообъекта. Затем координаты микрообъекта определяются максимумами корреляционных пиков (слайд 23).

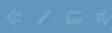
Это помогло определить среднюю скорость движения микрообъектов в разных пучках (слайды 24, 25). Световые пучки можно формировать не только с помощью ДОЭ, но и с помощью динамических модуляторов света. Оптическая схема для работы с таким модулятором представлена на слайде (слайд 26).

К сожалению, малая дифракционная эффективность динамического модулятора света не позволила осуществить вращение. Как видно на следующем слайде, удалось осуществить только захват микрообъектов без вращения (слайд 27).



# ОПТИЧЕСКАЯ МИКРОМАНИПУЛЯЦИЯ

**Скиданов Р.В.**



Слайд 1



## ОПТИЧЕСКОЕ МАНИПУЛИРОВАНИЕ

- 1873г. - расчет светового давления в рамках электродинамики (Дж. Максвелл)
- 1879г. - расчет светового давления в рамках термодинамики (А. Бартоли)
- 1898г. - опыты по измерению светового давления (П.Н. Лебедев)
- 1970г. - захват микрообъектов в лазерных пучках (А. Эшкин )
- 1996г. - захват микрообъектов в вихревых световых пучках (К. Т.Gahagan)
- 1996г. - вращение микрообъекта в вихревых световых пучках, полученных с помощью амплитудных голограмм (M. E Friese)
- 2001г. - использование ДОЭ для оптического захвата группы микрообъектов (Y.Ogura)
- 2004г. - использование многопорядковых ДОЭ для оптического захвата и вращения микрообъектов (В.А. Соيفер)



2

Слайд 2

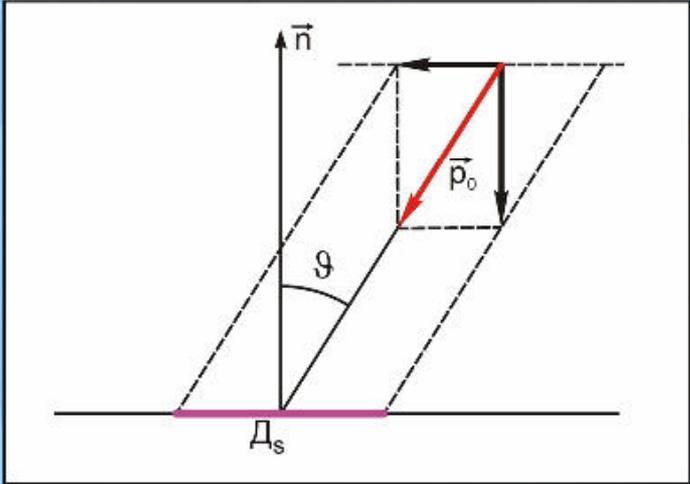



## ДАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН (СВЕТА)

$\rho$  - коэффициент отражения

$\vartheta$  - угол падения

$$P = \frac{F}{\Delta S} = \frac{\Delta p}{\Delta t \Delta S}$$



Слайд 3




## ДАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН (СВЕТА)

### Отражение

$$\Delta p = 2p_i \cos \vartheta \cdot \Delta s \cdot c \Delta t \cos \vartheta \cdot \rho$$

$$P_r = \frac{\Delta p}{\Delta t \Delta S} = 2c\rho \cdot p_i \cos^2 \vartheta = 2\rho \cdot w \cos^2 \vartheta$$

### Поглощение

$$\Delta p = p_i \cos \vartheta \cdot \Delta s \cdot c \Delta t \cos \vartheta \cdot (1 - \rho)$$

$$P_a = \frac{\Delta p}{\Delta t \Delta S} = c(1 - \rho) \cdot p_i \cos^2 \vartheta = (1 - \rho) \cdot w \cos^2 \vartheta$$

$$P = P_r + P_a = (1 + \rho) \cdot w \cos \vartheta$$

$\rho = 1 \quad \longrightarrow \quad P = 2w$

$\rho = 0 \quad \longrightarrow \quad P = w$

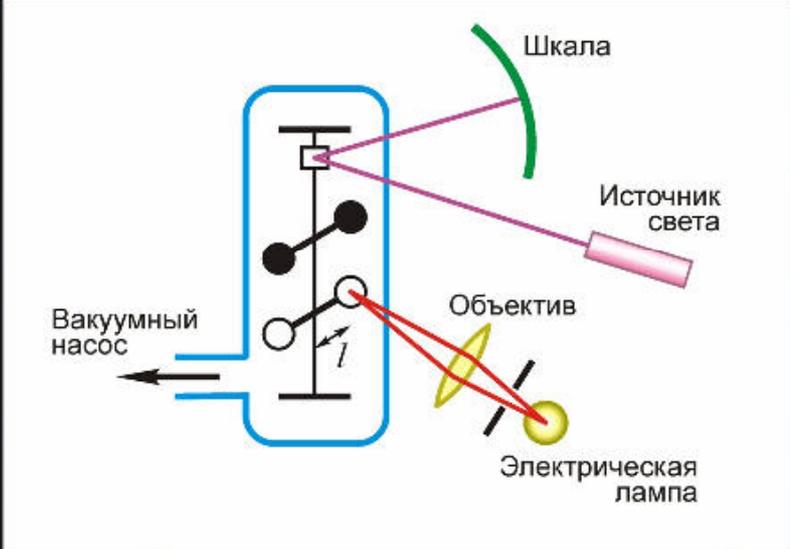
Слайд 4




## ОПЫТЫ П.Н. ЛЕБЕДЕВА

$$M = -k\alpha$$

$$F = \frac{M}{l}$$

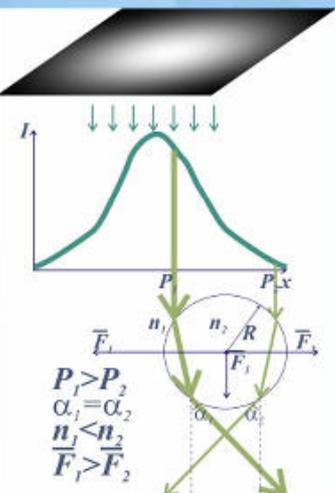


= / < >
5

Слайд 5

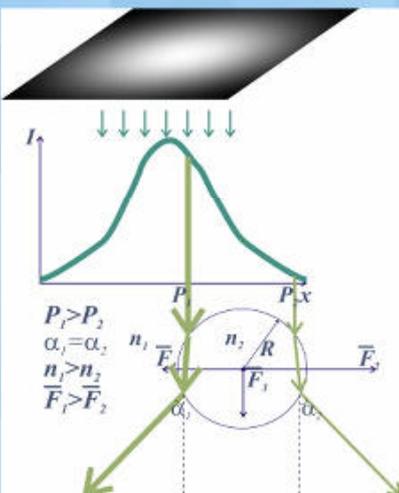



## ГРАДИЕНТНЫЕ СИЛЫ (ГЕОМЕТРООПТИЧЕСКОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ)



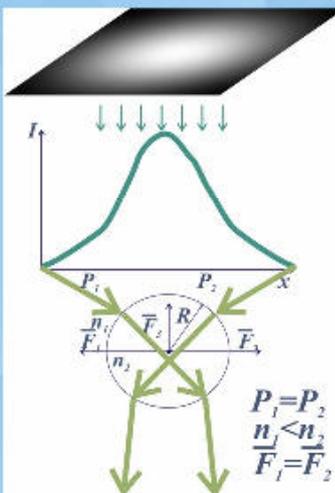
$P_1 > P_2$   
 $\alpha_1 = \alpha_2$   
 $n_1 < n_2$   
 $F_1 > F_2$

1



$P_1 > P_2$   
 $\alpha_1 = \alpha_2$   
 $n_1 > n_2$   
 $F_1 > F_2$

2



$P_1 = P_2$   
 $n_1 < n_2$   
 $F_1 = F_2$

3

= / < >
6

Слайд 6





## ОРБИТАЛЬНЫЙ УГЛОВОЙ МОМЕНТ (ОУМ) СВЕТОВОГО ПОЛЯ

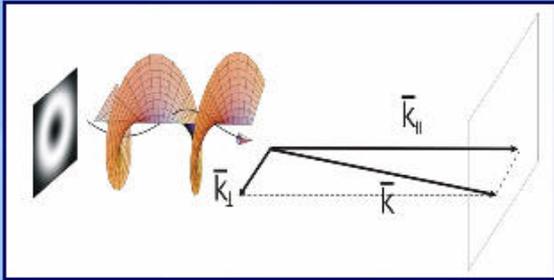
$\mathbf{J} = [\mathbf{r} \times m\mathbf{v}]$  момент количества движения (может быть определен также и для фотонов, как для частиц, обладающих ненулевым импульсом)

$\mathbf{J} = [\mathbf{r} \times \mathbf{S}] = \left[ \mathbf{r} \times \left\{ \frac{c}{8\pi} \text{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}] \right\} \right]$  аналог орбитального углового момента для электромагнитного поля

$\mathbf{p} = \hbar \mathbf{k}$  Импульс отдельного фотона  
 перпендикулярная к направлению распространения составляющая импульса

$\mathbf{p}_\perp = \hbar \mathbf{k}_\perp$

$\mathbf{J} = [\mathbf{r} \times \mathbf{p}_\perp]$  ОУМ отдельного фотона



$|\mathbf{J}| = 0; \hbar; 2\hbar; 3\hbar \dots$  ОУМ отдельного фотона принимает дискретные значения, соответствующие угловым гармоникам

$0; e^{-i\phi}; e^{-i2\phi}; e^{-i3\phi} \dots$

$[\mathbf{J}] = L^2 MT^{-1} \quad (M^2 \text{ кг } c^{-1})$  размерность орбитального углового момента

Слайд 7



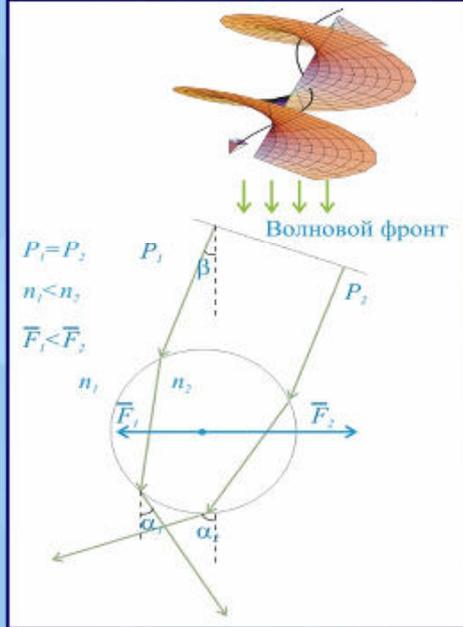


## ПЕРЕДАЧА ОРБИТАЛЬНОГО МОМЕНТА СВЕТОВОГО ПУЧКА МИКРОЧАСТИЦЕ

Если микрообъект оптически более плотный, чем окружающая среда, попадает в световой пучок с градиентом фазы (например, световой пучок с угловой гармоникой), то градиентная сила будет направлена против градиента фазы. Эта сила вызывает круговое движение в световых пучках с орбитальным моментом. Происходит передача орбитального момента светового пучка микрочастице.

При этом энергетическая эффективность этой передачи невысока. В механическую энергию движения микрочастиц переходит не более  $10^{-19}$  от общей энергии светового пучка.

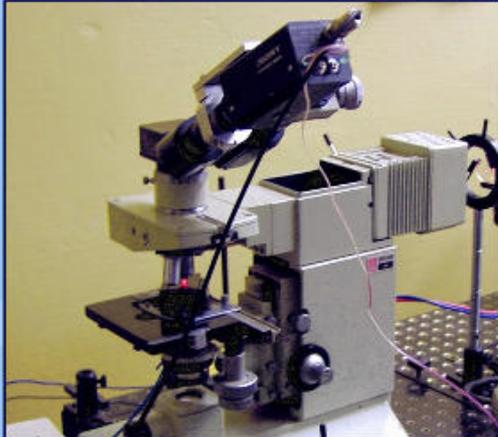
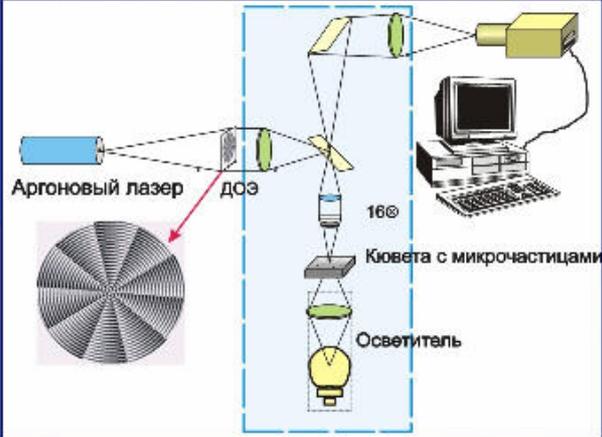
Garcés-Chavez V. et al. Transfer of orbital angular momentum to an optically trapped low-index particle // Phys. Rev. 2002. V. 66, P. 063402.



Слайд 8

ИСОИ СРАН

## ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ДЛЯ МАНИПУЛИРОВАНИЯ ПУЧКАМИ БЕССЕЛЯ

Для устойчивого захвата микрочастиц размером 5мкм в эксперименте используется аргонный лазер с длиной волны 0,51 мкм и мощностью 200 мВт, для фокусировки излучения используется оптическая система микроскопа Биолам-М, для поглощения лазерного излучения перед телекамерой устанавливался светофильтр, поглощающий световое излучение с длиной волны в диапазоне от 490 нм до 525 нм, что позволило наблюдать движение микрочастиц, при этом лазерное излучение полностью отфильтровывалось.

9

Слайд 9

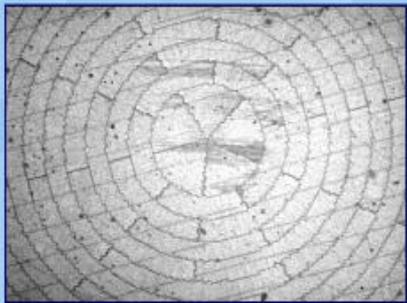
ИСОИ СРАН

## ДОЭ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКА БЕССЕЛЯ ПЯТОГО ПОРЯДКА

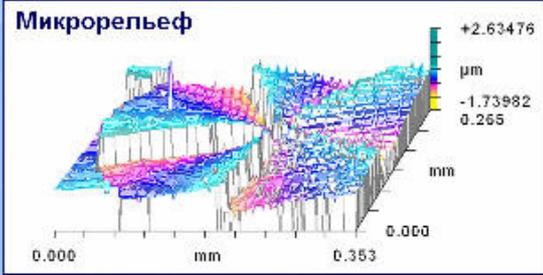
Оптимальный ДОЭ для создания узкого кольца в Фурье-плоскости



ДОЭ



вид центральной части микрорельефа



**Микрорельеф**

0.000 mm      0.353 mm

+2.63476 μm  
-1.73982 μm  
0.265 μm

$$\tau(r, \phi) = \text{sgn}(J_5(\alpha r)) \exp(i5\phi)$$

$\alpha$  - параметр функции Бесселя

Fedotowsky and K. Lehovec  
Optimal Design for Annual Imaging // Applied Optics. 1974.  
V. 13, № 12. P. 2919-2923.

10

Слайд 10

CFAY ИСОИ РАН

### ВРАЩЕНИЕ КЛЕТКИ ДРОЖЖЕЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА С МОДОЙ БЕССЕЛЯ 5-го ПОРЯДКА



Вид ДОЭ Вид пучка

Частица размером 7 мкм движется по первому световому кольцу диаметром 20 мкм.

Клетка дрожжей – микрочастица оптически более плотная, чем вода, поэтому она была втянута в наиболее яркое кольцо бesselева пучка

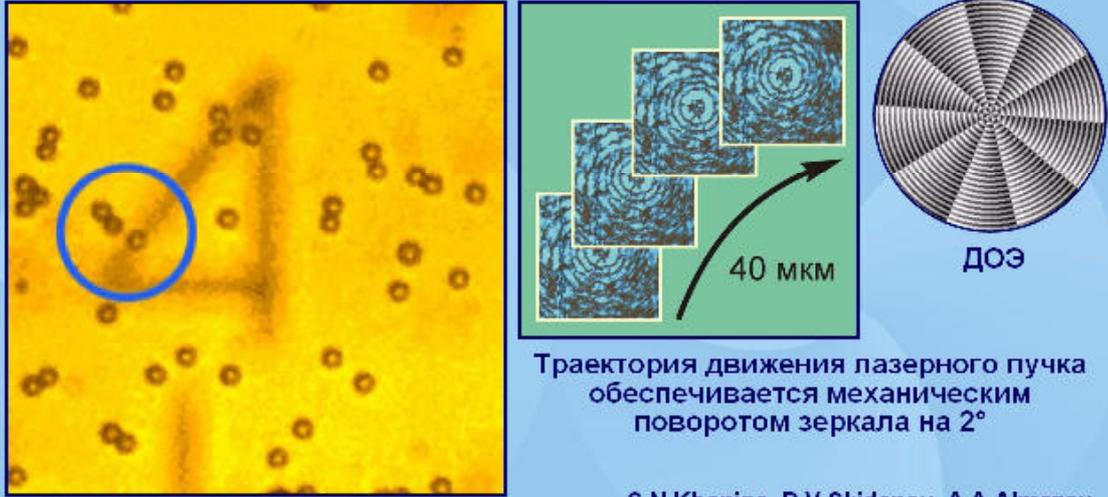
S. N. Khonina, V. V. Kotlyar, R. V. Skidanov, V. A. Soifer, K. Jefimovs, J. Simonen, J. Turunen "Rotation of microparticles with Bessel beams generated by diffractive elements", J. Mod. Opt., v.51, N 14, p.2167-2184 (2004).

11

Слайд 11

CFAY ИСОИ РАН

### ВРАЩЕНИЕ И ПОСТУПАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ ПАРЫ 5-мкм ПОЛИСТИРОЛОВЫХ МИКРОЧАСТИЦ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА С МОДОЙ БЕССЕЛЯ 5-го ПОРЯДКА



ДОЭ

40 мкм

Траектория движения лазерного пучка обеспечивается механическим поворотом зеркала на 2°

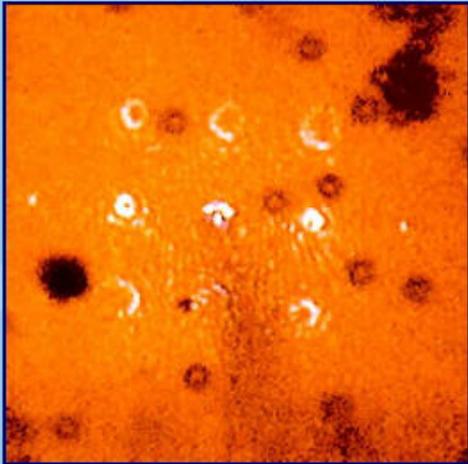
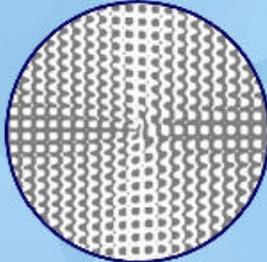
S.N.Khonina, R.V.Skidanov, A.A.Almazov, V.V.Kotlyar, V.A.Soifer, A.V.Volkov <DOE for optical micromanipulation>, Proceedings of SPIE, v.5447, p.304-311 (2004)

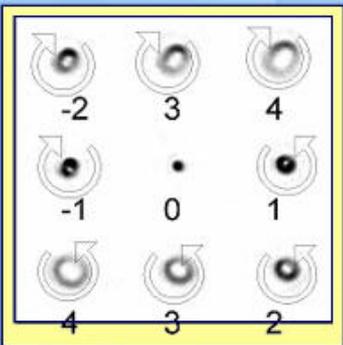
12

Слайд 12

ИСОИ С РАН

## ОДНОВРЕМЕННЫЙ ЗАХВАТ ПОЛИСТИРОЛОВЫХ ЧАСТИЦ (5 МКМ) В НЕСКОЛЬКИХ ПОРЯДКАХ



ДОЭ

Вид 9-порядкового пучка и направление вращения в каждом порядке

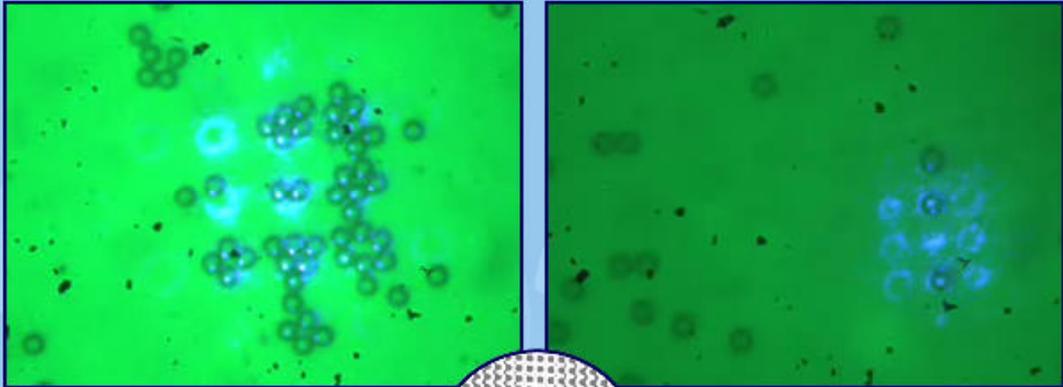
Каждый порядок – угловая гармоника  $e^{i m \varphi}$  с гауссовой амплитудой

13

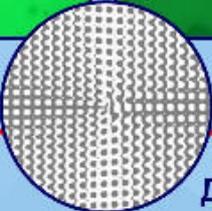
Слайд 13

ИСОИ С РАН

## ОДНОВРЕМЕННЫЙ ЗАХВАТ ГРУППЫ МИКРОЧАСТИЦ В СВЕТОВЫХ ПУЧКАХ С УГЛОВЫМИ ГАРМОНИКАМИ



$f = 18\text{мм}$



$f = 13\text{мм}$

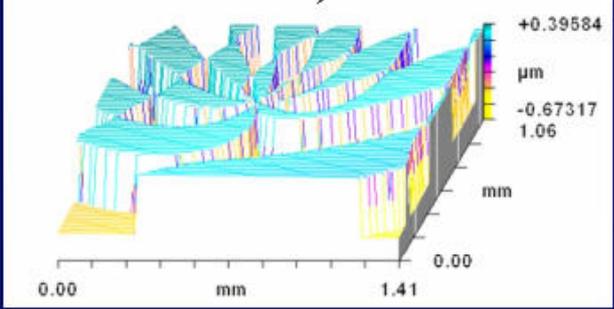
ДОЭ

14

Слайд 14

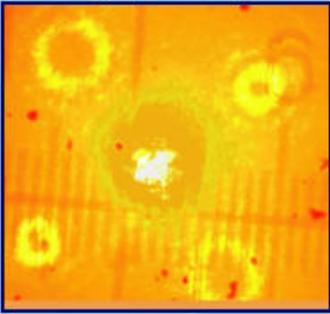



## ДОЭ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКА С ЧЕТЫРЬМА УГЛОВЫМИ ГАРМОНИКАМИ

**ДОЭ**

Бинарный ДОЭ, изготовленный методом фотолитографии, формирует световой пучок с угловыми гармониками + 3-го (малые кольца) и + 7-го порядков (большие кольца)



Распределение интенсивности в рабочей области

15

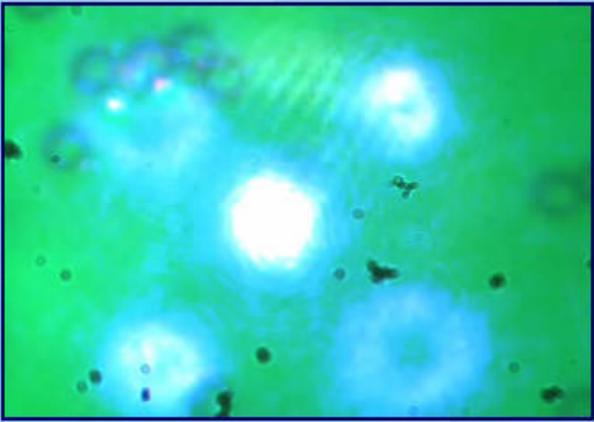
Слайд 15




## ОДНОВРЕМЕННЫЙ ЗАХВАТ И ВРАЩЕНИЕ ПЯТИ МИКРОЧАСТИЦ В СВЕТОВЫХ ПУЧКАХ С УГЛОВЫМИ ГАРМОНИКАМИ

**Параметры эксперимента:**

Диаметр светового кольца	–	10 мкм
Диаметр микрочастицы	–	5 мкм
Мощность пучка	–	40-50 мВт
Показатель преломления микрочастицы	–	1,56
Показатель преломления жидкой среды	–	1,33
Длина волны	–	0,532 мкм

16

Skidanov R.V., Khonina S.N., Kotlyar V.V., Soifer V.A.  
Optical microparticle trapping and rotating using multi-order DOE  
Proc. Of the ICO Topical Meeting on Optoinformatics Information Photonics' 2006 4-7 Sep. 2006, Saint-Peterburg, Russia, p. 466-468.

Слайд 16

ИСОИ С РАН

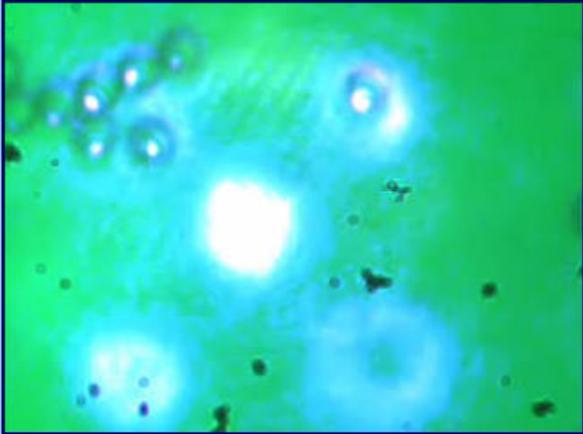
## ОДНОВРЕМЕННЫЙ ЗАХВАТ И ВРАЩЕНИЕ ШЕСТИ МИКРОЧАСТИЦ В СВЕТОВЫХ ПУЧКАХ С УГЛОВЫМИ ГАРМОНИКАМИ

Параметры эксперимента:

Диаметр светового кольца	-	10 мкм
Диаметр микрочастицы	-	5 мкм
Мощность пучка	-	40-50 мВт
Показатель преломления микрочастицы	-	1,56
Показатель преломления жидкой среды	-	1,33
Длина волны	-	0,532 мкм



ДОЭ



17

Слайд 17

ИСОИ С РАН

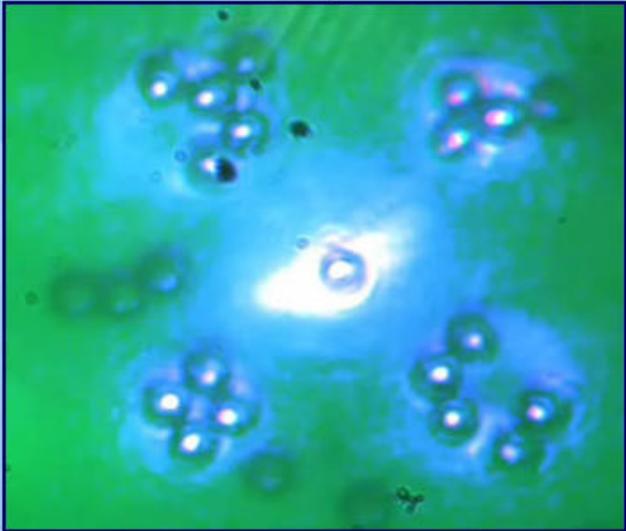
## ОДНОВРЕМЕННЫЙ ЗАХВАТ И ВРАЩЕНИЕ ГРУПП МИКРОЧАСТИЦ В РАЗНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ ПОРЯДКАХ

Параметры эксперимента:

Диаметр светового кольца	-	10 мкм
Диаметр микрочастицы	-	5 мкм
Мощность пучка	-	40-50 мВт
Показатель преломления микрочастицы	-	1,56
Показатель преломления жидкой среды	-	1,33
Длина волны	-	0,532 мкм



ДОЭ



18

Слайд 18



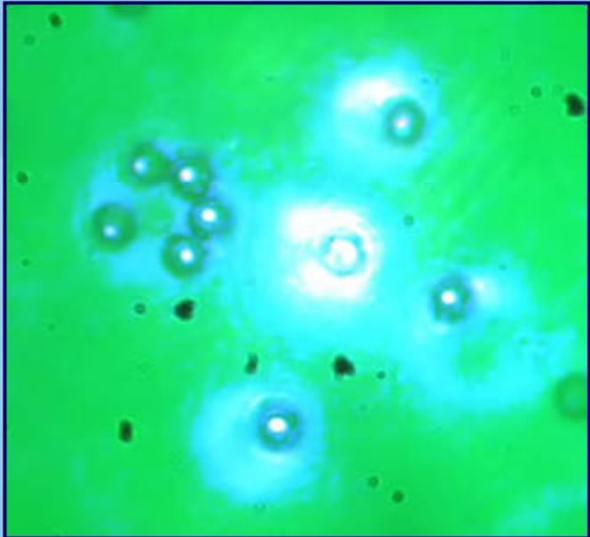

## ОДНОВРЕМЕННЫЙ ЗАХВАТ И ВРАЩЕНИЕ ПЯТИ МИКРОЧАСТИЦ С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ДЕФОКУСИРОВКОЙ

**Параметры эксперимента:**

- Диаметр светового кольца — 10 мкм
- Диаметр микрочастицы — 5 мкм
- Мощность пучка — 40-50 мВт
- Показатель преломления микрочастицы — 1,56
- Показатель преломления жидкой среды — 1,33
- Длина волны — 0,532 мкм



ДООЭ

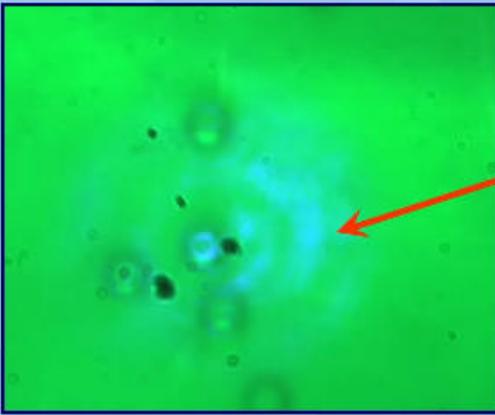


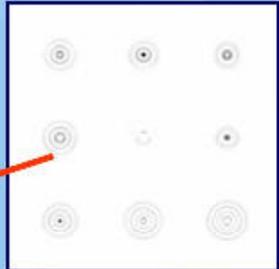
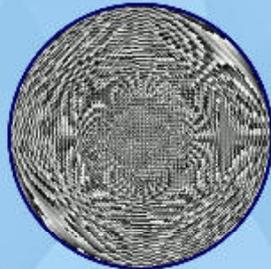
19

Слайд 19




## ЗАХВАТ И ВРАЩЕНИЕ МИКРОСФЕРЫ В ПУЧКЕ ГАУССА-ЛАГЕРРА



ДООЭ

Распределение интенсивности в рабочей области. Стрелка указывает моду, которая была использована в эксперименте

При формировании моды Гаусса-Лагерра использовался ДООЭ, формирующий одновременно 9 мод Гаусса-Лагерра. Движение микрочастицы осуществляется очень медленно. Для получения представленного видеосфрагмента использовался каждый пятый кадр

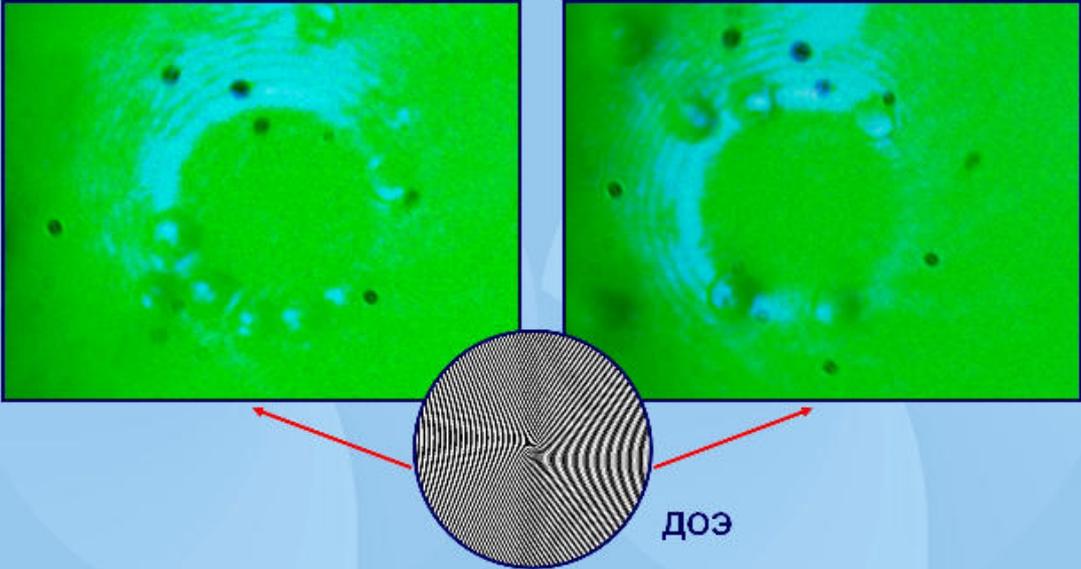
- Мощность пучка — 40-50 мВт
- Показатель преломления микрочастицы — 1,56
- Показатель преломления жидкой среды — 1,33
- Длина волны — 0,532 мкм

20

Слайд 20

CFAV ИСОИ С РАН

### ЗАХВАТ И ВРАЩЕНИЕ ГРУППЫ МИКРОЧАСТИЦ В ПУЧКЕ БЕССЕЛЯ ДЕСЯТОГО ПОРЯДКА

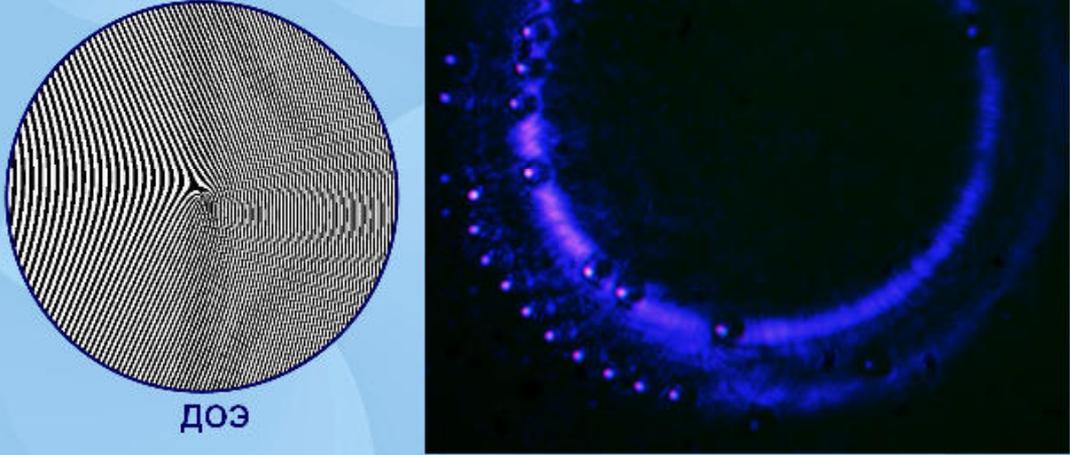


21

Слайд 21

CFAV ИСОИ С РАН

### ЗАХВАТ И ДВИЖЕНИЕ ГРУППЫ МИКРОЧАСТИЦ В ПУЧКЕ, СФОРМИРОВАННОМ ДВОЙНЫМ АКЦИКОНОМ



ДОЭ

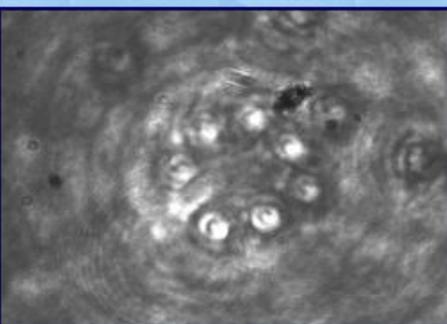
Группа микрочастиц вовлекается в круговое движение по двум световым кольцам

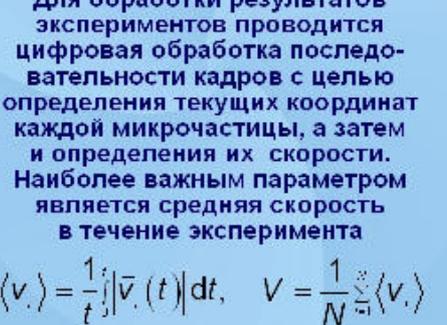
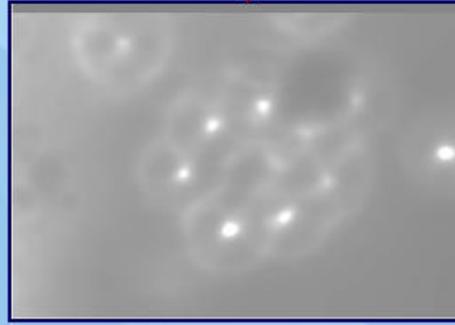
22

Слайд 22




## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ



Для обработки результатов экспериментов проводится цифровая обработка последовательности кадров с целью определения текущих координат каждой микрочастицы, а затем и определения их скорости. Наиболее важным параметром является средняя скорость в течение эксперимента

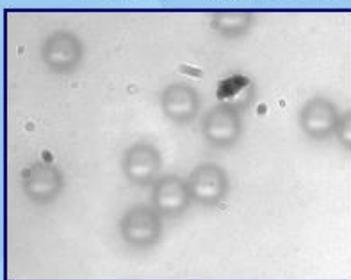
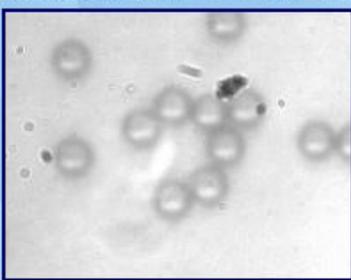
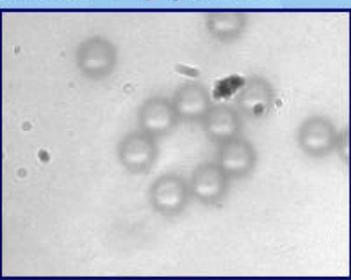
$$\langle v_i \rangle = \frac{1}{t} \int_0^t |\vec{v}_i(t)| dt, \quad V = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \langle v_i \rangle$$

23

Слайд 23




## СРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ МИКРОЧАСТИЦ В ПУЧКАХ БЕССЕЛЯ РАЗНЫХ ПОРЯДКОВ

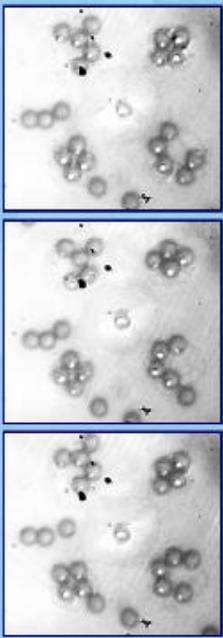
Пучок	Мощность пучка в рабочей плоскости (мВт) (с учетом потерь)	Средняя интенсивность на самом ярком кольце (Вт/м <sup>2</sup> )	Диаметр самого яркого кольца (мкм)	Средняя скорость движения микрочастиц (мкм/с)
БП 5-го порядка	230	$27 \cdot 10^7$	18	$1,3 \pm 0,1$
БП 10-го порядка	100	$8 \cdot 10^7$	37	$2,9 \pm 0,3$

24

Слайд 24

ИСОИ С РАН

## СРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ МИКРОЧАСТИЦ В ПУЧКАХ С УГЛОВЫМИ ГАРМОНИКАМИ РАЗНЫХ ПОРЯДКОВ



Порядок оптического вихря	Мощность пучка в рабочей плоскости (мВт) (с учетом потерь)	Средняя интенсивность на самом ярком кольце ( $\text{Вт}/\text{м}^2 \times 10^8$ )	Диаметр кольца (мкм)	Средняя скорость движения микрочастиц (мкм/с)
3	50	3,2	9	$0,8 \pm 0,4$
7	50	2,1	13	$1,5 \pm 0,2$
30	40	0,9	27	$1,7 \pm 0,3$
31	40	0,9	28	$1,4 \pm 0,2$

25

Слайд 25

ИСОИ С РАН

## ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ДЛЯ МАНИПУЛИРОВАНИЯ МИКРОЧАСТИЦАМИ С ПОМОЩЬЮ ПРОСТРАНСТВЕННОГО МОДУЛЯТОРА СВЕТА



ДОЭ



Оптическая схема

26

Слайд 26



Слайд 27

## OPTICAL MICROMANIPULATION

© 2008 R.V. Skidanov

Image Processing Systems Institute of the RAS

Historical outlook into the development of the research of manipulation of microobjects in light beams is given. Experimental results on microparticle rotation in the light beams are discussed.

*Optical micromanipulation, DOE, Bessel beams, vortical beams, diffractive optics*

### Информация об авторе

**Скиданов Роман Васильевич**, Учреждение Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник. Область научных интересов: дифракционная оптика, оптическая манипуляция микрообъектами.

**Skidanov Roman Vasilyevich**, Establishment of the Russian Academy of Sciences Image Processing Systems Institute of the RAS of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russia. He holds the degree of Doctor in Physics & Mathematics. The senior scientific employee. Research interests are in the field of diffractive optics, optical micromanipulation