

# СТЕНОГРАФИЧЕСКИЕ ОТЧЕТЫ НАУЧНОГО СЕМИНАРА

## САМОВОСПРОИЗВОДЯЩИЕСЯ ЛАЗЕРНЫЕ ПУЧКИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

*Стенограмма научного сообщения на совместном семинаре ИСОИ РАН  
и Института компьютерных исследований СГАУ 28 марта 2006 года*

*Р.В. Скиданов*

*Институт систем обработки изображений РАН*

*Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева*

### **Аннотация**

Рассмотрены самовоспроизводящиеся пучки с особыми свойствами. Расширено понятие самовоспроизведения для световых пучков. Рассмотрены различные приложения самовоспроизводящихся световых пучков с особыми свойствами. Особенно подробно описывается использование самовоспроизводящихся пучков в задачах манипулирования микрообъектами.

Уважаемые коллеги!

Сегодня я хочу представить доклад, систематизирующий длительный период исследований. В моем докладе можно выделить пять основных разделов, которые представлены на слайде 2.

Условия самовоспроизведения для световых пучков, формирование самовоспроизводящихся лазерных пучков с помощью дифракционных оптических элементов (ДОЭ), применение самовоспроизводящихся пучков в оптических информационных системах, рассмотрение сил, действующих на микрочастицы в световых пучках, и оптическое манипулирование микрочастицами с помощью самовоспроизводящихся пучков.

Простейший случай самовоспроизведения светового поля был рассмотрен Тальботом еще в 1836 году (слайд 3). В его экспериментах при освещении белым светом наблюдалось повторение цветных изображений решеток. Выражение для расстояния периодичности было получено Релеем в 1881 году.

Одновременно в моем докладе будет рассмотрено еще одно свойство световых полей – давление света (слайд 4). Впервые формулу для расчета сил светового давления получил Максвелл в 1873 году. Независимо от него ту же формулу получил Бартоли в 1879 году, основываясь на законах термодинамики. В 1898 году Лебедев впервые смог экспериментально измерить силу светового давления. Появление мощных источников когерентного излучения дало сильный толчок к изучению воздействия света на микрообъекты. В 1970 году Эшкин в своих экспериментах добился устойчивого захвата микрообъекта в гауссовом лазерном пучке, в 1996 году это было сделано для вихревого светового пучка в экспериментах. В том же 1996 году было получено устойчивое вращение микрообъекта в световом пучке. В 2001 году впервые была захвачена в световом пучке группа микрообъектов.

Вернемся к свойствам самовоспроизведения световых полей (слайд 5). Для самовоспроизведения светового поля с периодом  $z_T$  его пространственный спектр должен лежать на кольцах Френеля радиуса  $r_n$ : В качестве примера такого поля можно привести суперпозицию мод Бесселя. Если рассматривать классическое определение мод, как результат решения уравнения на собственные функции оператора, то необходимо определить еще мода Гаусса-Лагерра и Гаусса-Эрмита, которые также были использованы в исследованиях (слайд 6).

Моды обычно формируются и распространяются в некой специальной среде, но их также можно сформировать с помощью специального дифракционного оптического элемента – модана (слайд 7).

Моданы позволяют формировать не только одиночные моды, но и суперпозицию этих мод. При этом распределение интенсивности при распространении моды в пространстве может оставаться стабильным или периодически изменяться с заданным периодом (слайд 8).

При соблюдении ряда условий можно наблюдать частный случай периодичности – вращение распределения интенсивности при распространении суперпозиции мод. При этом суперпозиция мод Бесселя вращается с постоянным периодом, а суперпозиция мод Гаусса-Лагерра вращается с переменным периодом при распространении в свободном пространстве (слайд 9).

Суперпозиция мод Гаусса-Эрмита также самовоспроизводится в пространстве с переменным периодом (слайд 10).

Очень важное значение имеет изучение световых полей содержащих угловые гармоники. Эти световые поля могут быть сформированы одним из трех элементов представленных на рисунке. Это либо винтовой фазовый ДОЭ, либо винтовая зонная пластина, либо решетка с развилкой (слайд 11).

На следующем слайде представлен фазовый винтовой ДОЭ и сформированное им световое поле на разных расстояниях (слайд 12).

ДОЭ позволяют формировать не только одиночные световые пучки с угловыми гармониками, но также одновременно несколько световых пучков каждый из которых содержит угловую гармонику. На рисунке представлен такой ДОЭ. Он может формировать одновременно четыре пучка с угловыми гармониками  $-7$ -го,  $3$ -го,  $3$ -го,  $7$ -го порядков (слайд 13).

Световые пучки могут также самовоспроизводиться при распространении внутри оптических волокон (слайд 14). В результате возникает желание использовать ДОЭ формирующие модовые пучки для уплотнения каналов передачи информации по оптическим волокнам. На рисунке представлена схема эксперимента по возбуждению и селекции LP-мод в оптическом волокне. С помощью модана в волокне со ступенчатым профилем показателя преломления была возбуждена LP-мода с номером (1,1). Световое поле на выходе из волокна было подвергнуто анализу с помощью согласованного фильтра, и на месте где располагается мода (1,1), мы получили четко выраженный корреляционный пик (слайд 15).

Еще одна практическое применение световых пучков с угловыми гармониками напрямую связано с наличием у таких пучков орбитального углового момента. Орбитальный угловой момент обычно определяется для частицы имеющей отличную от нуля массу покоя и находящуюся в связанном состоянии, например электрон на электронной оболочке в атоме. Считается, что фотон не может образовывать связанные состояния, т.к. у него отсутствует масса покоя. Но световые пучки с угловыми гармониками можно считать неким аналогом связанного состояния для фотона, с одним единственным отличием, если электронные оболочки в атоме имеют сферическую симметрию, то для фотонов будет связанное состояние с цилиндрической симметрией вокруг оси распространения, и, следовательно, можно определить орбитальный угловой момент как для отдельного фотона, так и для всего пучка (слайд 16).

С помощью ДОЭ можно определять орбитальный угловой момент отдельных фотонов. На рисунке вы можете видеть схему такого эксперимента, в ходе которого на дифракционный элемент, формирующий световые пучки с угловыми гармониками падал пучок света с заранее известной суперпозицией мод Бесселя, а, следовательно, в этом пучке содержатся фотоны с заранее известными орбитальными угловыми моментами. После ДОЭ в Фурье-плоскости наблюдаются корреляционные пики в соответствующих местах (слайд 17).

Вращение суперпозиции мод Бесселя при распространении в свободном пространстве с посто-

янным периодом приводит к мысли использовать этот эффект при измерении смещений. На рисунке показана схема такого эксперимента, при котором определялось смещение непосредственно телекамеры регистрирующей распределение. Смещение измерялось погрешностью  $0,025$  от периода. Учитывая, что величина периода вращения может быть очень малой, этот метод способен занять промежуточное по точности измерения место между механическим и интерферометрическим методами (слайд 18).

Следующее применение самовоспроизводящихся пучков напрямую связано с силой светового давления. Самовоспроизводящиеся пучки позволяют существенно расширить методологию «оптического пинцета» (слайд 19).

Световые пучки по-разному воздействуют на прозрачные микрочастицы. Если частица оптически более плотная чем окружающая среда, то частица будет втягиваться в область с повышенной интенсивностью. И, наоборот, менее плотная микрочастица будет выталкиваться из светового поля (слайд 20).

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 (слайд 21).

В зависимости от видов микрочастиц и световых пучков можно составить примерную таблицу, систематизирующую способы микроманипулирования (слайд 22).

На следующем рисунке представлена примерная схема эксперимента по манипулированию микрообъектами в световом пучке сформированном ДОЭ. Оптически плотная микрочастица должна двигаться вдоль линий максимальной интенсивности светового пучка (слайд 23).

А далее представлена оптическая схема и фотография реальной установки для манипулирования микрообъектами. Первоначально в этой установке использовался один и тот же микрообъектив для фокусировки излучения и наблюдения, что создавало ряд технических трудностей. В частности невозможно было менять область фокусировки. В качестве лазера использовался ЛГН-503 (слайд 24).

В самых первых экспериментах в качестве микрочастиц были использованы клетки дрожжей. На видеоролике показано движение клетки дрожжей в пучке Бесселя пятого порядка. При этом самого пучка не

видно т.к. использован специальный светофильтр, поглощающий в зеленой области спектра (слайд 25).

В следующем эксперименте за счет механического смещения положения фокуса пара полистироловых микрочастиц диаметром по 5 мкм не только вращалась, но и перемещалась вслед за пучком (слайд 26).

На следующем видеоролике показан эксперимент по захвату полистироловых микрочастиц из потока многопорядковым пучком с угловыми гармониками. Всего удалось захватить 4 микрочастицы в нулевом, плюс первом, минус втором и плюс четвертом порядках. При этом не удалось добиться ращения микрочастиц из-за малой мощности лазера (200 мВт) (слайд 27).

В последующих экспериментах была изменена оптическая схема. В частности для фокусировки и наблюдения использовались разные микрообъективы, а в качестве лазера был использован твердотельный лазер с длиной волны 532 нм и мощностью 500 мВт. Это позволило не только захватывать микрочастицы, но и вращать их в световом пучке, используя механизм передачи орбитального углового момента светового поля микрочастицам. При данной схеме появилась возможность одновременно наблюдать пучок и микрочастицы. Результаты экспериментов по вращению представлены в видеороликах (слайд 28).

Световой пучок с угловыми гармониками, использованный в экспериментах имеет угловые гармоники разных знаков, что означает разное направление вращения в них. На следующем видеоролике представлен результат эксперимента, подтверждающий это положение. В пучках с третьей и минус третьей угловыми гармониками группы микрочастиц вращаются в разные стороны (слайд 29).

Для вращения микрочастиц использовались также моды Гаусса-Лагерра, на слайде представлен элемент, формирующий восемь мод Гаусса-Лагерра,

а в видеоролике можно видеть движение микрочастицы в одном из этих пучков (слайд 30).

Для пучков Бесселя используемых при манипулировании микрочастицами было зафиксировано осаждение микрочастиц на дно кюветы, что объясняется относительной стабильностью Бесселева пучка по всей глубине кюветы (100 мкм). Если осуществлять механическое смещение кюветы можно получить ряд из микрочастиц, осажденных на дно (слайд 31).

В качестве областей применения оптического микроманипулирования следует упомянуть микробиологию, микромеханику, а также нанотехнологии (слайд 32).

Подводя итог можно сказать, что ДОЭ позволяют наиболее эффективно реализовывать следующие действия (операции) с микрочастицами:

- вращение проводящих и диэлектрических частиц с помощью лазерных пучков, несущих заданный орбитальный угловой момент (оптический «гаечный ключ»),
- захват проводящих частиц в 3D световую полость (оптическая «бутылка»),
- перемещение прозрачных диэлектрических микрочастиц по заданной 3D траектории (оптический «гид»),
- одновременное однотипное манипулирование несколькими микрочастицами, захваченными вдоль оптической оси Бесселева пучка (оптический «вал»),
- одновременное разнотипное манипулирование несколькими микрочастицами, захваченными в различных точках пространства с помощью многопорядковых ДОЭ (матричный оптический «привод»),
- отклонение движения микрочастиц определенного размера от прямолинейного с помощью светового поля с поперечно-периодической структурой (оптический «сепаратор»).

Спасибо за внимание.

# САМОВОСПРОИЗВОДЯЩИЕСЯ ЛАЗЕРНЫЕ ПУЧКИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

*Сойфер В.А., Котляр В.В., Холина С.Н., Скиданов Р.В.*

ИНСТИТУТ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ РАН

Слайд 1

## ПЛАН ДОКЛАДА

- Введение: эффект Тальбота, условия самовоспроизведения
- Формирование самовоспроизводящихся лазерных пучков с помощью дифракционных оптических элементов (ДОЭ)
- Применение в оптических информационных системах
- Силы действующие на микрочастицы в световых пучках
- Оптическое манипулирование микрочастицами с помощью самовоспроизводящихся пучков
- Заключение

Слайд 2

**ИСОИ СРАН**

## ПЕРИОДИЧЕСКОЕ САМОВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ПОПЕРЕЧНО-ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Длина волны  $\lambda$       Период  $d$

Амплитудная решетка

**Эффект Тальбота**  
 W.H.F. Talbot, *Facts relating to optical sciences* // Phil. Mag., 1836  
 (при освещении белым светом наблюдалось повторение цветных изображений решеток)

$Z_T = 2d^2/\lambda$  - период Тальбота  
 Lord Rayleigh, Phil. Mag., 1881  
 (получено расстояние периодичности)

**самовоспроизведение суперпозиции плоских волн**

$$E(x) = \sum_n C_n \exp\left[\frac{i2\pi nx}{d}\right], \quad d - \text{поперечный период}$$

$Z_T = \frac{2d^2}{\lambda}$   
 полное повторение

$Z_T = \frac{d^2}{2\lambda}$   
 поперечный сдвиг на  $d/2$

$Z_T = \frac{d^2}{4\lambda}$   
 сложение исходного и сдвинутого изображений

$Z_T = \frac{d^2}{2N\lambda}$   
 сложение N сдвинутых копий исходного изображения

Слайд 3

**ИСОИ СРАН**

## СИЛА ДАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

- 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 (М. E Friese. )
- 2001г. - использование ДОЭ для оптического захвата группы микрообъектов(У. Ogura)
- 2004г. -использование многопорядковых ДОЭ для оптического захвата и Вращения микрообъектов (В.А. Соيفер)

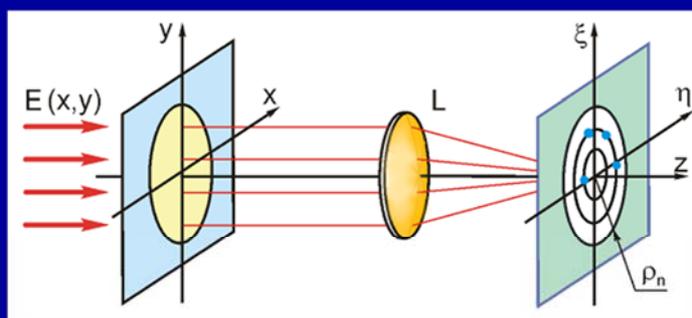
Слайд 4

## УСЛОВИЯ САМОВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Для самовоспроизведения светового поля с периодом  $z_T$  его пространственный спектр должен лежать на кольцах Френеля радиуса  $\rho_n$ :

$$\rho_n = \sqrt{\frac{2n}{\lambda z_T}}$$

Это обратная задача Montgomery W.D. (*J. Opt. Soc. Am.*, 1967)



$$\rho = \sqrt{\xi^2 + \eta^2}$$

Суперпозиция **Бесселевых пучков**:  $E(r, \varphi) = \sum_n J_m(\alpha_n r) \exp(i m \varphi)$ ,

где:  $\alpha_n = \sqrt{k^2 - \pi^2 \lambda^2 \rho_n^4}$ ,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$   $r = \sqrt{x^2 + y^2}$   $\varphi = \arctg \frac{y}{x}$

Слайд 5

## МОДЫ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

$$\hat{P}_p \psi_p = \gamma_p \psi_p \quad \text{уравнение на собственные значения}$$

$$F(\mathbf{x}, z) = \sum F_p \psi_p(z) \psi_p(\mathbf{x}) \quad \text{суперпозиция мод}$$

$$\psi_p(x) = E_{pl} \left( \frac{\sqrt{2}|x|}{\sigma} \right)^l L_p^l \left( \frac{2x^2}{\sigma^2} \right) \exp\left(-\frac{x^2}{\sigma^2}\right) \exp(\pm i l \alpha) \quad \text{моды Гаусса-Лагерра}$$

$$E_{pl} = \frac{2}{\sigma \sqrt{2\pi C_{p+l}^l l!}} \quad \text{константа нормировки}$$

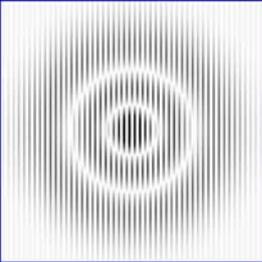
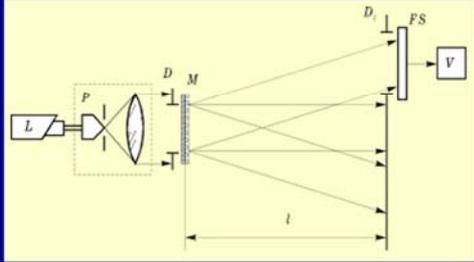
$$\psi_p(x) = E_{pl} H_p \left( \frac{\sqrt{2}x}{\sigma} \right) H_l \left( \frac{\sqrt{2}y}{\sigma} \right) \exp\left(-\frac{x^2}{\sigma^2}\right) \quad \text{моды Гаусса-Эрмита}$$

$$E_{pl} = \frac{1}{\sigma} \sqrt{\frac{2}{2^{p+l} p! l!}} \quad \text{константа нормировки}$$

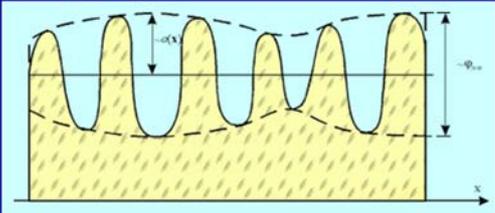
Слайд 6

**ИСОИ СРАН**

## СИНТЕЗИРОВАННЫЕ НА КОМПЬЮТЕРЕ ГОЛОГРАММЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ МОДОВЫХ ПУЧКОВ (моданы)

Кодирование  
на основе несущей  
пространственной частоты



1. Голуб М.А., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Сойфер В.А. *Синтез пространственных фильтров для исследования поперечного модового состава когерентного излучения* // Квантовая электроника, 1982.
2. Bartelt H.O., Lohmann A.W., Freude W., Grau G.K. *Mode analysis of optical fibers using computer-generated matched filters* // Electronic Letters, 1983.

Слайд 7

**ИСОИ СРАН**

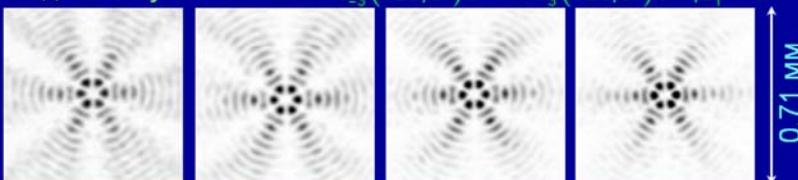
## САМОВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ПУЧКОВ БЕССЕЛЯ $J_m(\alpha_n r) \exp(im\phi)$ (эксперимент)

Суперпозиция **Бесселевых пучков**:  $E(r, \phi) = \sum_n J_m(\alpha_n r) \exp(im\phi)$



Бинарная фаза ДОЭ

**СТАБИЛЬНЫЙ**:  $\alpha_n = \text{const} \forall m$   
2-модовый пучок Бесселя:  $J_{-3}(120,5r)e^{-i3\phi} + J_3(120,5r)e^{i3\phi}, z_T = 0$

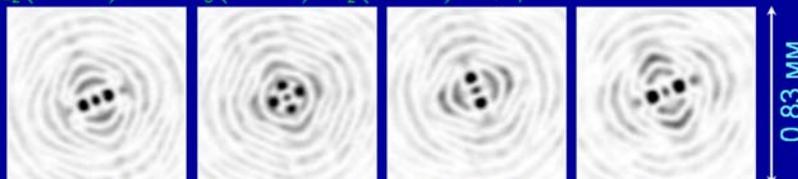


z: 50 мм    60 мм    70 мм    80 мм



Бинарная фаза ДОЭ

**ПЕРИОДИЧЕСКИЙ**:  $\alpha_1(z_T) < \alpha_n < \alpha_1(z_T) \forall m$   
3-модовый пучок Бесселя:  
 $J_{-2}(50,44r)e^{-i2\phi} + J_0(83,27r) + J_2(50,44r)e^{i2\phi}, z_T = 20\text{мм}$



z: 85 мм    90 мм    95 мм    105 мм

1. Котляр В.В., Сойфер В.А., Хонина С.Н. *Квантовая электроника*, 1991
2. Kotlyar V.V., Khonina S.N., Soifer V.A. *Journal of Modern Optics*, 1995
3. Khonina S.N., Kotlyar V.V., Soifer V.A., Lautanen J., Honkanen M., Turunen J. *Optik*, 1999

Слайд 8

## ВРАЩАЮЩИЕСЯ МНОГОМОДОВЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ПУЧКИ (эксперимент)

**вращающийся 2-модовый пучок Бесселя**

$$\frac{m - m'}{n - n'} = A,$$

$$\forall n \neq n', m \neq m'$$

$$z_{об} = A \cdot z_T,$$

$$z_T = \frac{2\pi n}{\sqrt{k^2 - \alpha_n^2}}$$

0,84 мм

Бинарная фаза ДОО z: 160 мм    175 мм    190 мм

Kotlyar V.V., Khonina S.N., Soifer V.A. *Journal of Modern Optics*, 1997

**вращающийся 5-модовый пучок Гаусса-Лагерра**

$$\frac{2(n - n') + |m| - |m'|}{m - m'} = B$$

Расстояние p оборотов:

$$z_p = z_0 \operatorname{tg} \left( \frac{2\pi p}{B} \right),$$

p = 1, 2, ..., B/4

3,36 мм

16-уровневая фаза z: 300 мм    500 мм    700 мм

Котляр В.В., Соифер В.А., Хонина С.Н. *Письма в ЖТФ*, 1997

Траектория переноса энергии

Слайд 9

## САМОВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ МНОГОМОДОВЫХ ПУЧКОВ ГАУССА-ЭРМИТА

(n,m):  
(0,1)  
(1,0)  
(10,11)  
(11,10)

0

12 мм

16 мм

30 мм

36 мм

58 мм

---

(n,m):  
(1,1)  
(5,5)  
(9,9)

0

21 мм

32 мм

50 мм

74 мм

121 мм

**Многомодовый лазерный пучок самовоспроизводится (с точностью до масштаба) с переменным интервалом:**

$$z_{i,p}(z) = \left[ z + z_0 \operatorname{tg} \left( \frac{2\pi i}{p} \right) \right] \cdot \left[ 1 - \frac{z}{z_0} \operatorname{tg} \left( \frac{2\pi i}{p} \right) \right]^{-1}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, p = (m - m') + (n - n'),$$

(m,n) – номера мод

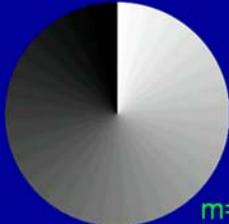
Хонина С.Н., Котляр В.В., Соифер В.А. *Письма в ЖТФ*, 1999

Слайд 10

**ИСОИ СРАН**

## «ВИНТОВЫЕ» ДИФРАКЦИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ (ДОЭ) для формирования вращающихся полей

**Винтовой фазовый ДОЭ**  
 $\exp(im\phi)$

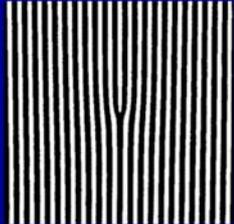


$m=1$

**Винтовая зонная пластина**  
 $\text{sgn}[\cos(m\phi+kr^2)]$



**Решетка с «вилкой»**  
 $\text{sgn}[\cos(m\phi+\alpha x)]$



1. Березный А.Е., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Соифер В.А. *Бессель-оптика* // ДАН, 1984.

2. Khonina S.N., Kotlyar V.V., Shinkaryev M.V., Soifer V.A., Uspleniev G.V., *The phase rotor filter* // J. Modern Optics, 1992

1. Heckenberg N.R. et al. *Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms* // Opt. Lett., 1992

1. Bazhenov V.Yu., Soskin M.S., Vasnetsov M.V. *Screw dislocations in light wavefronts* // J. of Mod. Opt., 1992

11

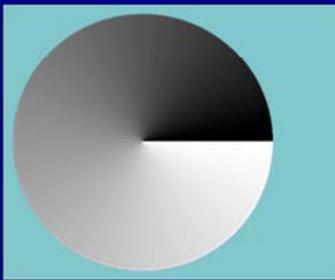
Слайд 11

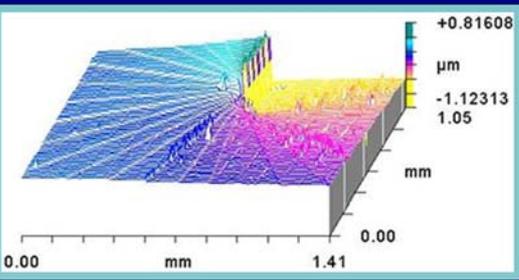
**ИСОИ СРАН**

## ПУЧКИ С УГЛОВЫМИ ГАРМОНИКАМИ

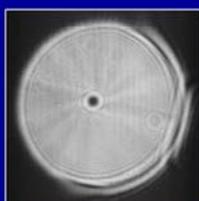
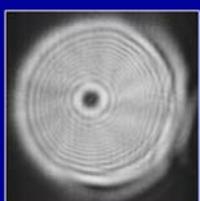
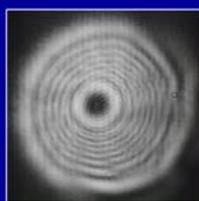
**Березный А.Е., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Соифер В.А.**  
**«Бессель-оптика», ДАН СССР, т.274, № 4, с.802-805 (1984).**

$\exp(im\phi)$





**Спиральная фазовая пластинка первого порядка**

**Дифракция Френеля плоской волны, ограниченной круглой диафрагмой диаметром 2 мм, на спиральной фазовой пластинке**

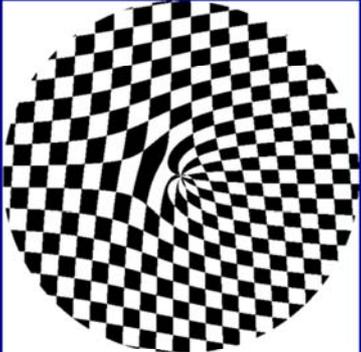
**Z = 10, 40, 80 мм; d = 2,5mm, длина волны - 0,63 мкм**

12

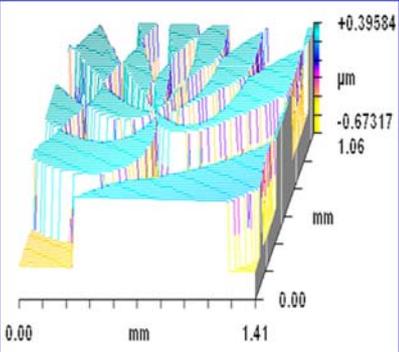
Слайд 12

ИСОИ РАН

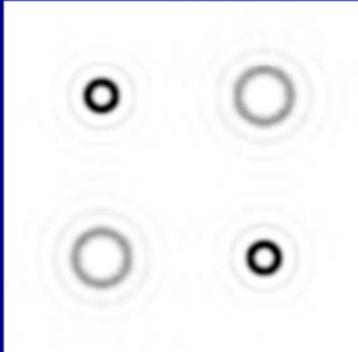
## ДОЭ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ С УГЛОВЫМИ ГАРМОНИКАМИ



Фаза ДОЭ  
 $e^{\pm i3\varphi}; e^{\pm i7\varphi}$



Центральная часть микрорельефа ДОЭ



Распределение интенсивности в зоне дифракции Фраунгофера после ДОЭ

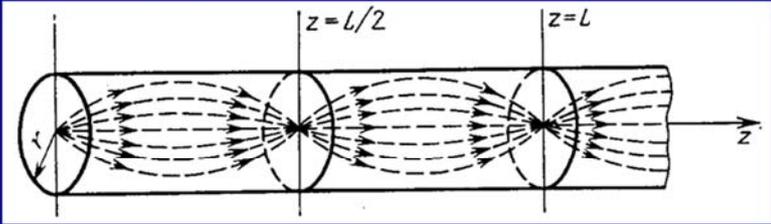
ДОЭ формирует 2 световых кольца с угловыми гармониками 3-го порядка (малые кольца) и 2 световых кольца с угловыми гармониками 7-го порядка (большие кольца).

13

Слайд 13

ИСОИ РАН

## САМОВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ



Микаэлян А.Л. *Применение слоистой среды для фокусировки волн* // ДАН СССР, 1951

Периодический пучок



Вращающиеся пучки



Интенсивность

LP-моды, вычислительный эксперимент  
Хонина С.Н., Волотовский С.Г. "Самовоспроизведение многомодовых лазерных полей в ступенчатых слабонаправляющих оптических волокнах", Известия Самарского научного центра РАН, №6(1), с.53-64 (2004)

Применение: волоконные линии связи; модовое уплотнение каналов связи.

Слайд 14

## ВОЗБУЖДЕНИЕ И СЕЛЕКЦИЯ МОД ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

**ИСОИ СРАН**

Используя свойство пучков Гаусса-Эрмита воспроизводится в свободном пространстве с точностью до масштаба можно возбудить в волокне одновременно до 5-6 LP-мод, а затем на выходе селективировать их с помощью согласованного с этими модами фильтра. Оптическое волокно имеет ступенчатый профиль показателя преломления с диаметром сердцевины 9.3 мкм и диаметром оболочки 125 мкм. Числовая апертура NA 0.3, длина волны отсечки 1270 нм. Длина волокна 1.5 метра. На торцы волокна вклеены стандартные коннекторы типа FC.

Поле на входе в волокно      Поле на выходе из волокна

Слайд 15

## ОРБИТАЛЬНЫЙ УГЛОВОЙ МОМЕНТ (ОУМ) СВЕТОВОГО ПОЛЯ

**ИСОИ СРАН**

$\mathbf{J} = [\mathbf{r} \times m\mathbf{v}]$       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

$\mathbf{p}_\perp = \hbar\mathbf{k}_\perp$       перпендикулярная к направлению распространения составляющая импульса

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

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

$0; e^{\pm i\varphi}; e^{\pm i2\varphi}; e^{\pm i3\varphi} \dots$

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

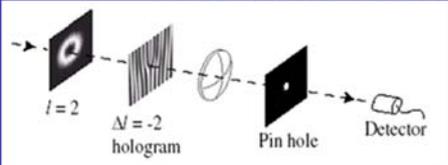
Слайд 16

ИСОИ СРАН

## ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОРБИТАЛЬНОГО УГЛОВОГО МОМЕНТА СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ

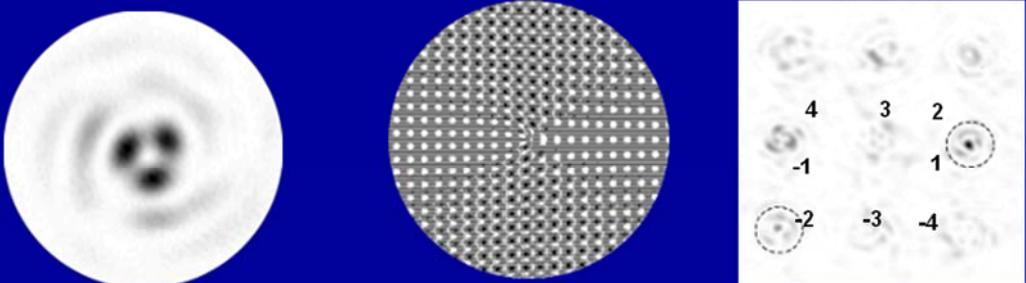
Определение состояний фотона, связанных с порядком орбитального углового момента

Leach J., Padgett M.J., Barnett S.M. et al., *Phys. Rev. Lett.*, 2002



$l=2$   
 $\Delta l = -2$   
hologram  
Pin hole  
Detector

Световой пучок с заранее известным ОУМ попадает на ДОЭ согласованный с угловыми гармониками и в плоскости дифракции Фраунгофера наблюдаются корреляционные пики соответствующих мест



освещающий пучок  
 $J_{-2}(30r)e^{-i2\phi} + 2J_1(20r)e^{i\phi}$

ДОЭ, согласованный с угловыми гармониками

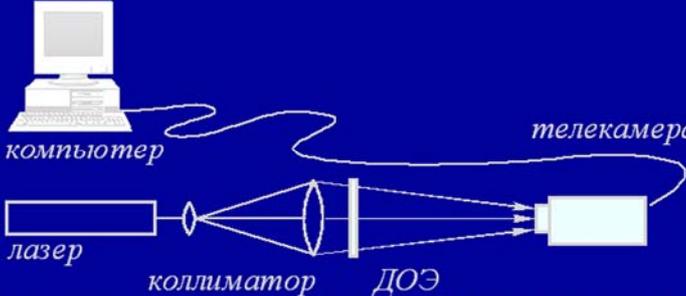
картина интенсивности в спектральной плоскости

Khonina S.N., Kotlyar V.V., Soifer V.A., Paakkonen P., Turunen J. *Measuring the light field orbital angular momentum using DOE // Optical Memory and Neural Networks*, 2001

Слайд 17

ИСОИ СРАН

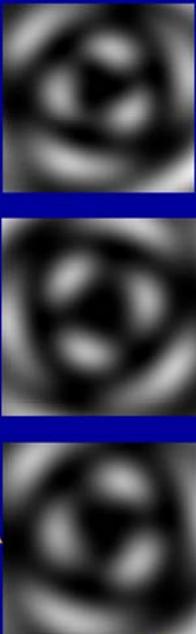
## ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЛИНЕЙНЫХ СМЕЩЕНИЙ



компьютер  
лазер  
коллиматор  
ДОЭ  
телекамера

Оптическая схема для измерения линейного смещения

Измерение малых линейных смещений с пучком, имеющим период пространственного повторения 0,2 мм. Относительная погрешность метода составляет 0,025 от величины периода. Метод позволяет измерять линейные смещения с точностью уступающей только интерферометрическим методам, при этом одновременное использование нескольких элементов с разными периодами пространственного повторения позволяет проводить измерение линейных смещений от десятых долей до сотен миллиметров.



0 мм  
0,1 мм  
0,2 мм

Слайд 18

## СИЛЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ СВЕТА НА ВЕЩЕСТВО (ДАВЛЕНИЕ СВЕТА)

**Сила давления света  $F=W(1+R)/c$**

Формула верна при нормальном падении света на поверхность.

$W$  - количество падающей в секунду энергии  
 $R$  - коэффициент отражения поверхности ( $R=0$  – поглощающая поверхность,  $R=1$  – отражающая поверхность),  
 $c$  – скорость распространения световых луч

Левитация

$P=4 \times 10^{-7}$  Н

$m=0.04$  мг

$mg$

60 Вт

Максвелл, 1873; Бартоли, 1879 (теория)  
 Лебедев, 1898 (эксперимент)

**Оптический «пинцет»**

Оптический «пинцет» предназначен для удерживания прозрачных микрообъектов. Кроме сил светового давления, в методе оптического «пинцета» используются также градиентные силы

[A.Ashkin, J.M.Dziedzic, J.E.Bjorkholm and S.Chu *Optics Letters*, 1986]

Слайд 19

## СИЛЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ СВЕТА НА ВЕЩЕСТВО (градиентные)

Оптически более плотный объект (полистироловый микрочастица) - возникает сила втягивания

Оптически менее плотный объект (пузырек воздуха) - возникает сила выталкивания

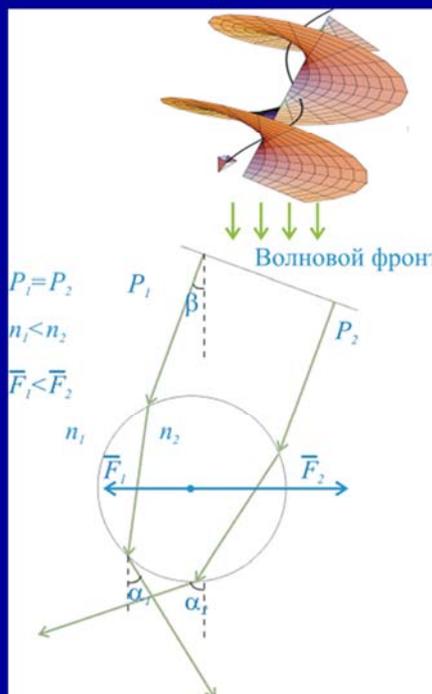
Если световой пучок попадает на прозрачный микрообъект, то возникает градиентная сила вызванная изменением суммарного импульса светового пучка после преломления на микрообъекте. Также будет присутствовать относительно небольшая составляющая силы  $F_3$  направленная по световому пучку, обусловленная наличием френелевского отражения (давление света).

Слайд 20

## 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.



Слайд 21

## ТИПЫ ЧАСТИЦ И СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ ИСОИ СРАН ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ МАНИПУЛИРОВАНИЯ

...	20 - 5 мкм	5 - 1 мкм		1 - 0,01 мкм наночастицы	...	10 <sup>-3</sup> ...10 <sup>-9</sup> мкм атомы, ионы, молекулы
	Прозрачные полюе (градиентные силы выталкивания)	Прозрачные плотные (градиентные силы втягивания)	Двупереломляющие			
	<p><b>3D захват в min интенсивности</b> (Gahagan, 1996, сфокусированный винтовой Гауссов пучок)</p> <p><b>Продольный захват нескольких объектов</b> (Garcés-Chavez, 2002, Бесселев пучок)</p> <p><b>2D захват и вращение</b> (Garcés-Chavez, 2002, винтовой Бесселев пучок) (передача орбитального момента)</p>	<p><b>Ускорение</b> (Ashkin, 1970, Гауссов пучок)</p> <p><b>3D захват в max интенсивности</b> (Ashkin, 1986, сфокусиров. Гауссов пучок)</p> <p><b>2D, 3D захват и перемещение</b> (Reicherter, 1999, Liesener, 2000, динамический транспарант, сфокусированный Гауссов пучок)</p> <p><b>2D, 3D захват и вращение</b> (Paterson, 2001, винтовой сфокусированный Гауссов пучок)</p> <p><b>Продольный захват нескольких объектов</b> (Arit, 2001, Garcés-Chavez, 2002, Бесселев пучок)</p> <p><b>Захват нескольких объектов и их независимое перемещение</b> (Curtis, 2002, Eriksen, 2002, Rodrigo, 2002, динамический транспарант, матрица сфокусированных Гауссовых пучков)</p>	<p><b>3D захват в max интенсивности и вращение</b> (Friese, 1998, 2001, Moothoo-2001, Гауссов пучок с круговой поляризацией)</p>	<p><b>3D захват в min интенсивности и вращение</b> (He, 1995, винтовой Гауссов пучок; Friese, 1996; Simpson, 1997, винтовой Гауссов пучок с круговой поляризацией)</p>	<p><b>3D захват кварцевой частицы 26нм</b> (Ashkin, 1986, сфокусированный Гауссов пучок)</p> <p><b>Захват металлической частицы 36нм</b> (Svoboda, 1994, интерференция двух сфокусированных Гауссовых пучков)</p>	<p><b>Торможение, охлаждение, концентрация</b> (Летохов, Миногин, Балякин, 1968-1990; Ashkin, Bjorkholm, Chu, 1970-1988)</p>

**Лазеры:**

- достаточная мощность : 50 – 200 мВт
- диапазон длин волн : 0,38 – 1,06 мкм

Слайд 22

**ИСОИ СРАН**

## ОПТИЧЕСКИЙ ЗАХВАТ И МАНИПУЛИРОВАНИЕ МИКРООБЪЕКТАМИ

лазер

ДОЭ

микролинза

частица

Фаза ДОЭ

Вращающийся пучок Гаусса-Лагерра

Z=225 mm    Z=295 mm    Z=335 mm    Z=465 mm

2.74 mm

**Применения:**

- захват и манипулирование в нанотехнологиях и биофизике;
- генерация разрядов заданной пространственной структуры в жидкостях и газах;
- бесконтактное измерение расстояний и скорости.

Слайд 23

**ИСОИ СРАН**

## ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ДЛЯ МАНИПУЛИРОВАНИЯ МИКРООБЪЕКТАМИ

Фото оптической установки

Аргонный лазер

ДОЭ

Светофильтр

×16

Кювета с микрочастицами

Осветитель

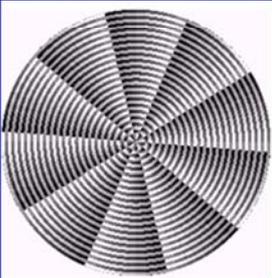
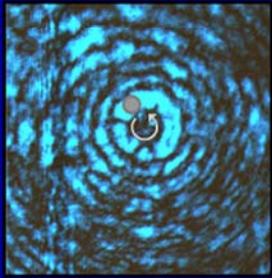
Оптическая схема

Для устойчивого захвата микрочастиц размером 5мкм необходима интенсивность в рабочей области  $> 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>. 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 это лазерное излучение полностью отфильтровывалось.

Слайд 24

ИСОИ СРАН

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

**Вид ДОЭ**

**Вид пучка**

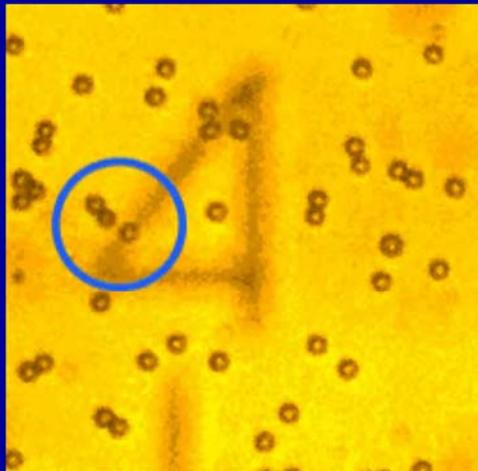
Частица размером 7 мкм движется по первому световому кольцу диаметром 20 мкм.

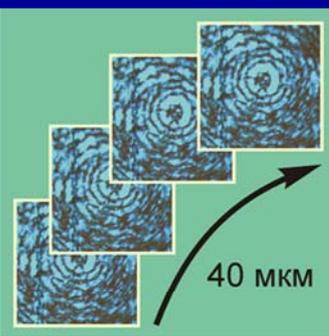
Клетка дрожжей – микрочастица оптически более плотная чем вода, поэтому она была втянута в наиболее яркое кольцо бesselева пучка

Слайд 25

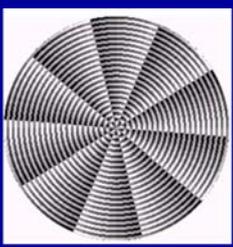
ИСОИ СРАН

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





40 мкм



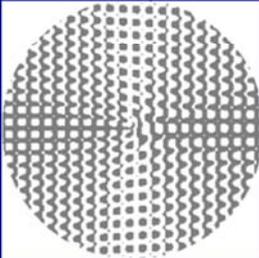
ДОЭ

Траектория движения лазерного пучка обеспечивается механическим поворотом зеркала на 2°

Слайд 26

ИСОИ СРАН

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

		
-2	3	4
	•	
-1	0	1
		
4	3	2

ДОЭ

Вид 9-порядкового пучка и направление вращения в каждом порядке.

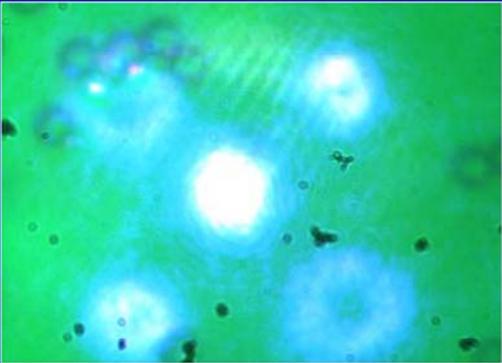
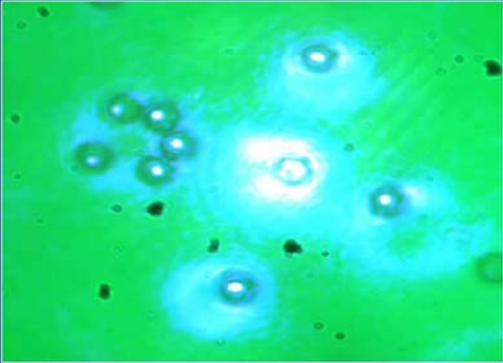
Каждый порядок – угловая гармоника  $\exp(i m \phi)$  с гауссовой амплитудой

27

Слайд 27

ИСОИ СРАН

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

Вращение пяти полистироловых микросфер в световом пучке с угловой гармоникой 7-го порядка



Вращение шести полистироловых микросфер в световом пучке с угловой гармоникой 7-го порядка

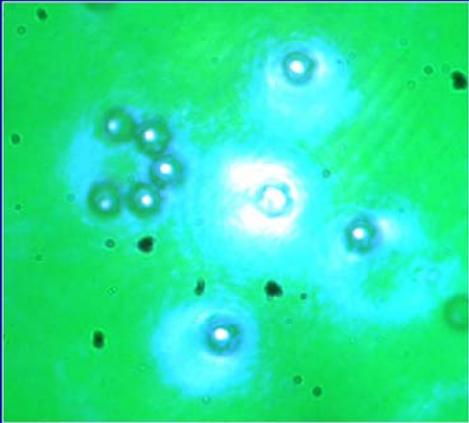
ДОЭ

28

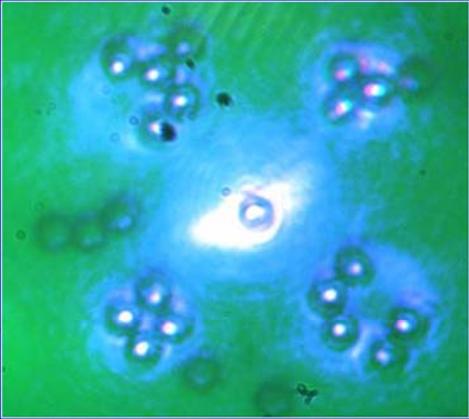
Слайд 28

ИСОИ СРАН

## ОДНОВРЕМЕННЫЙ ЗАХВАТ И ВРАЩЕНИЕ ГРУППЫ МИКРОЧАСТИЦ В РАЗНЫХ ПОРЯДКАХ В СВЕТОВЫХ ПУЧКАХ С УГЛОВЫМИ ГАРМОНИКАМИ



Вращение пяти полистироловых микросфер в световом пучке с угловой гармоникой 7-го порядка и одновременный захват микросфер в других порядках



Вращение нескольких групп полистироловых микросфер в световых пучках с угловыми гармониками 3-го порядка (малые кольца) и 7-го порядка (большие кольца)



ДОЭ

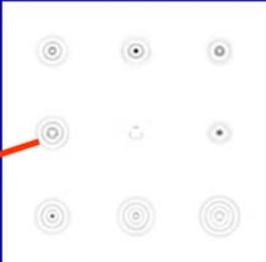
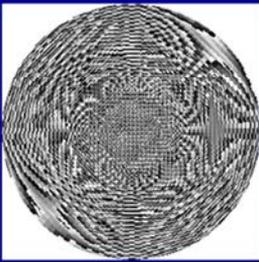
Слайд 29

ИСОИ СРАН

## ЗАХВАТ И ВРАЩЕНИЕ МИКРОСФЕРЫ В ПУЧКЕ ГАУССА-ЛАГЕРРА



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

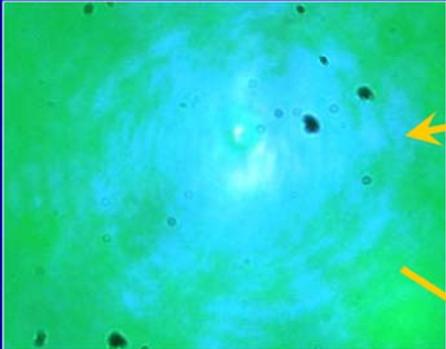
Распределение интенсивности в рабочей области. Стрелка указывает моду, которая была использована в эксперименте

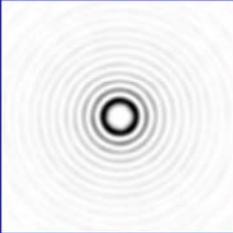
ДОЭ

Слайд 30

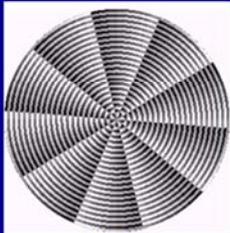
**ИСОИ СРАН**

## ЗАХВАТ И ОСАЖДЕНИЕ ГРУППЫ МИКРОЧАСТИЦ В ПУЧКЕ БЕССЕЛЯ ПЯТОГО ПОРЯДКА ИЗ ВОДНОЙ СУСПЕНЗИИ



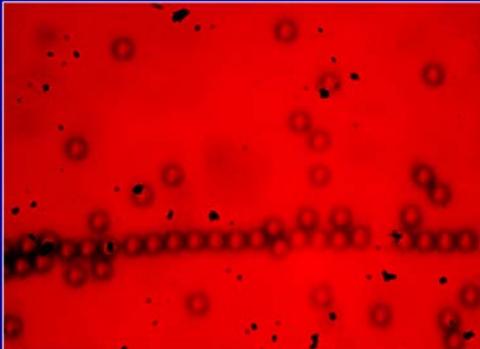


**Пучок**



**ДОЭ**

После фокусировки пучка микросферы начинают движение по кругу, но с осаждением и захватом все большего количества микросфер круговое движение прекращается.

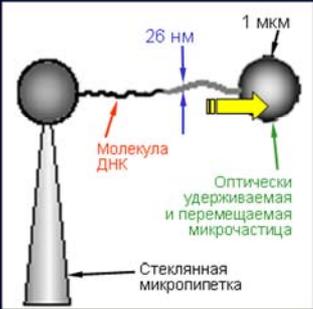


Слайд 31

**ИСОИ СРАН**

## ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО МАНИПУЛИРОВАНИЯ

### Биология

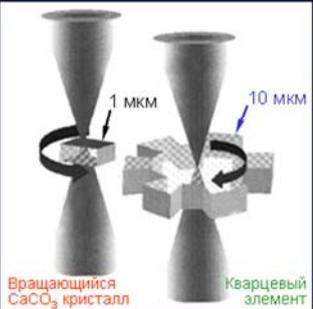


эксперимент по измерению упругих сил молекулы ДНК

Wuite GJ, Smith SB, Young M, Keller D, Bustamante C. // Nature, 2000

Bao X.R., Lee H.J., Quake S.R. // Phys. Rev. Lett., 2003

### Микромеханика



передача в жидкости вращательного момента, полученного двулучепреломляющей частицей от пучка с круговой поляризацией

Friese M.E.J. et al, *Optically driven micromachine elements* // Appl. Phys. Lett., 2001

### Нанотехнологии

Korda P.T., Spalding G.C., and Grier D.G. *Nanofabrication with Holographic Optical Tweezers* // Rev. Sci. Instruments, 2002

Chaumet, P.C., Rahmani A., and Nieto-Vesperinas M., *Optical trapping and manipulation of nano-objects with an apertureless probe* // Physical Review Letters, 2002

Ignatovich F. and Novotny L. *Experimental study of nanoparticle detection by optical gradient forces* // Rev. Sci. Instr., 2003

Sandoghdar V. et al, *Scanning near-field optical studies of photonic devices* // Photonic crystals, Wiley-VCH, Germany, 2004

32

Слайд 32

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**ДОЭ позволяют наиболее эффективно реализовывать следующие действия (операции) с микрочастицами:**

- Вращение проводящих и диэлектрических частиц с помощью лазерных пучков, несущих заданный орбитальный угловой момент (**оптический "гаечный ключ"**)
- Захват проводящих частиц в 3D световую полость (**оптическая "бутылка"**)
- Перемещение прозрачных диэлектрических микрочастиц по заданной 3D траектории (**оптический "гид"**)
- Одновременное однотипное манипулирование несколькими микрочастицами, захваченными вдоль оптической оси Бесселевого пучка (**оптический "вал"**)
- Одновременное разнотипное манипулирование несколькими микрочастицами, захваченными в различных точках пространства с помощью многопорядковых ДОЭ (**матричный оптический "привод"**)
- Отклонение движения микрочастиц определенного размера от прямолинейного с помощью светового поля с поперечно-периодической структурой (**оптический "сепаратор"**)

33



Слайд 33

# Self-reproducing laser beams and their application

*R.V. Skidanov<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>*Image Processing Systems Institute of the RAS,*

<sup>2</sup>*Samara State Aerospace University (SSAU)*

## ***Abstract:***

The article addresses self-reproducing beams with special properties. The concept of self-reproduction for light beams is expanded. Various applications of self-reproducing light beams with special properties are considered. The application of self-reproducing beams for the purposes of micro-objects manipulation is described in detail.

*Keywords:* laserbeams, self-reproducingbeams, micro-objects

*Citation:* Skidanov RV. Self-reproducing laser beams and their application. *Computer Optics* 2006; 29: 4-23.