

Институт систем обработки изображений РАН

ИСОИ  РАН

Самарский государственный аэрокосмический университет
им. академика С.П. Королева



ДИФРАКЦИОННАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ ОПТИКА

В.А. Сойфер
член-корреспондент РАН

Лекция в МФТИ, Долгопрудный, 2 июля 2010 г.

СОДЕРЖАНИЕ

- Введение

Часть I. Основы дифракционной компьютерной оптики (ДКО)

- Дифракционные оптические элементы (ДОЭ)
- Компенсаторы волнового фронта
- Фокусаторы лазерного излучения
- Компьютерный синтез ДОЭ
- Селекция мод лазерного излучения
- Бессель-оптика и вихревые лазерные пучки
- Решение уравнений Максвелла



А.М. Прохоров
(1916-2002)



И.Н. Сисакян
(1938-1995)

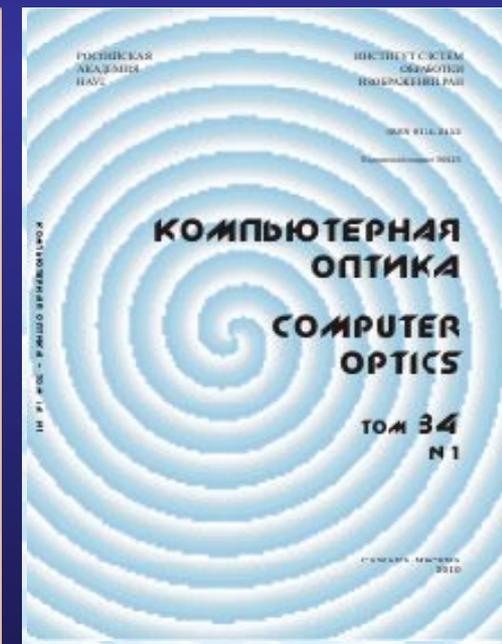
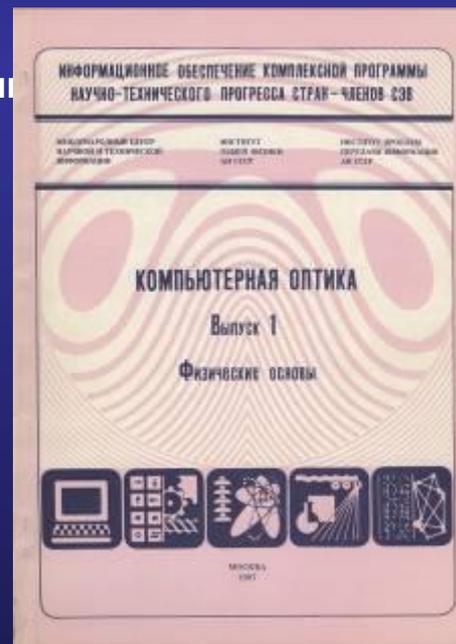
Часть II. ДКО и нанофотоника

- Оптический захват и микроманипулирование
- Фотонно-кристаллические структуры
- Управление магнитооптическими гетеронаноструктурами

Часть III. Дифракционные гетероструктуры в наноплазмонике

- Формирование интерференционных картин поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ)
- Фокусировка ПЭВ с помощью ДОЭ

- Заключение

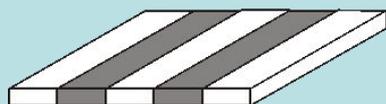


Часть I. Дифракционная компьютерная оптика

ДИФРАКЦИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ (ДОЭ)

Основные идеи: использование явления дифракции; сведения фазы к интервалу $[0, 2\pi)$; квантование фазы

Дифракционная решетка Фраунгофера

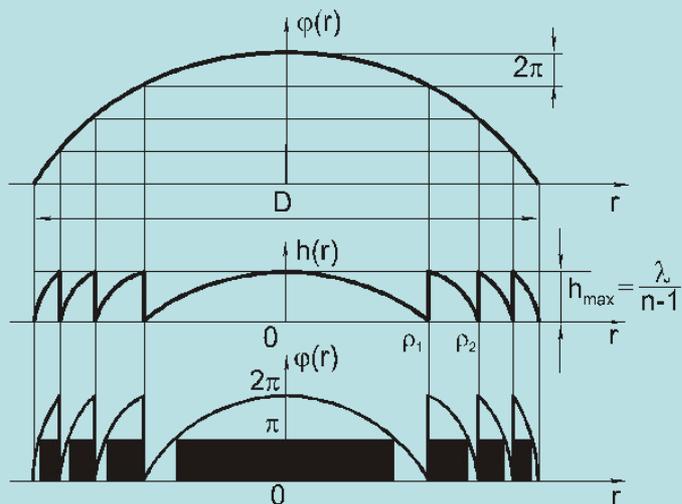


Амплитудная маска



Фазовый микрорельеф

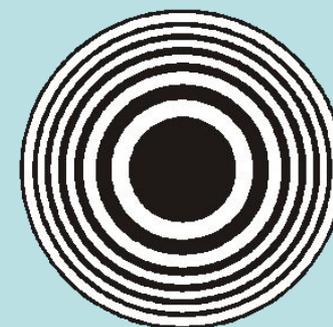
Линза Френеля



Базовые характеристики ДОЭ:

- длина волны λ ;
- границы зон;
- профиль зон.

Зонная пластинка Релея-Сорэ



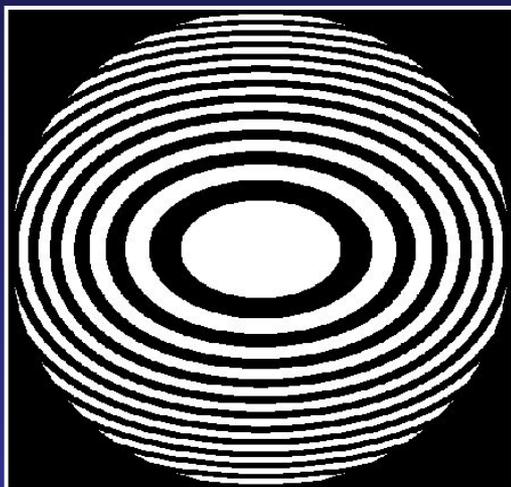
Амплитудная маска



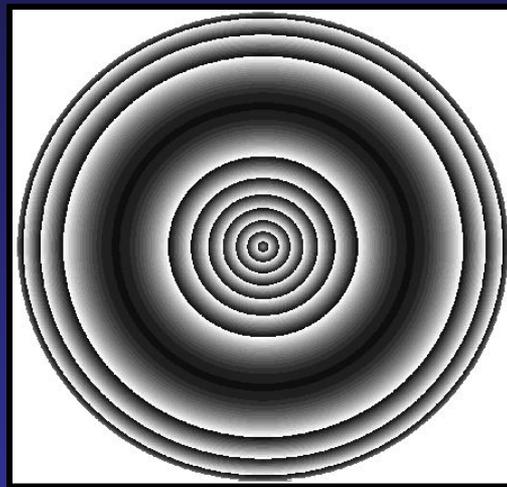
Фазовый микрорельеф

Оптические элементы: Бронзовое зеркало — Древний Восток, 3000 лет до н.э.
 Стеклоанное зеркало, линза — Рим, 1 век н.э. Очки — Италия, 13 век.
 Дифракционная решетка — Германия, Фраунгофер (1819г.), Зонная пластинка — конец 19 века, Франция.

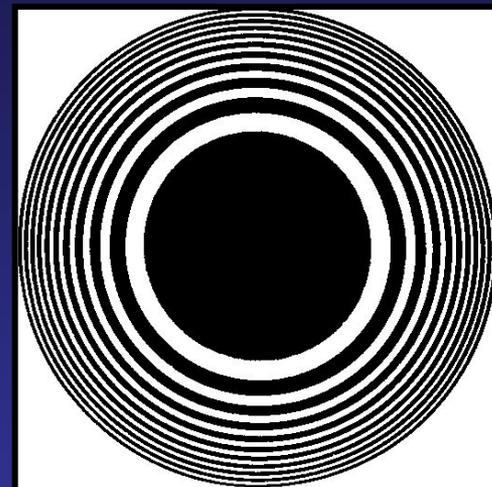
ПЕРВЫЕ ФОКУСАТОРЫ



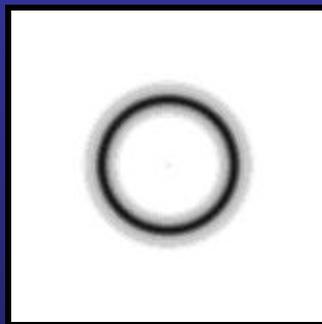
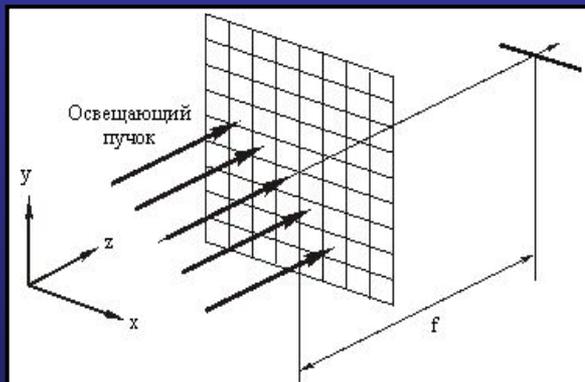
Фокусатор в поперечный отрезок $\lambda=10.6$ мкм



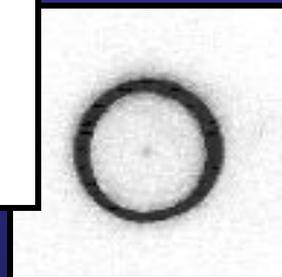
Фокусатор в кольцо $\lambda=10.6$ мкм



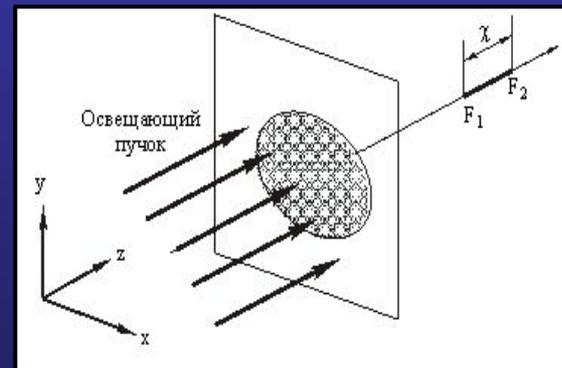
Фокусатор в соосный отрезок $\lambda=0.63$ мкм



теория

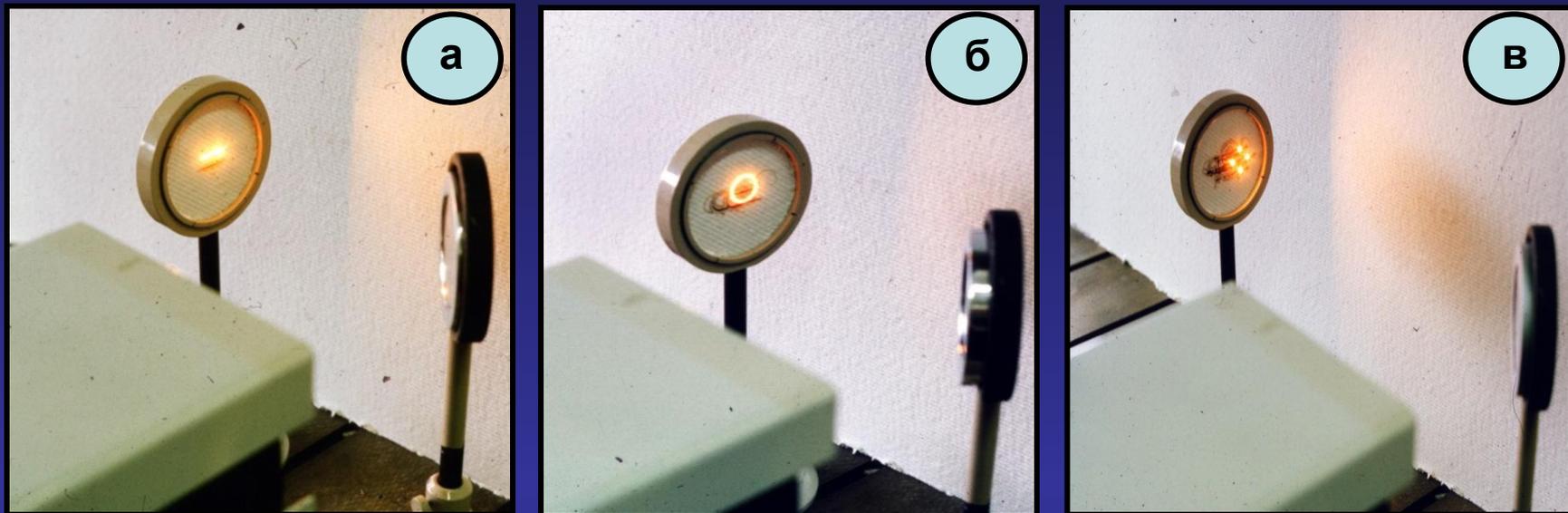


эксперимент



Голуб М.А., Карпеев С.В., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Сойфер В.А. «Фокусировка излучения в заданную область с помощью синтезированных на ЭВМ голограмм», Письма в ЖТФ, т.7, вып.10, с.618-623 (1981)

ФОКУСАТОРЫ ДЛЯ CO₂-ЛАЗЕРА

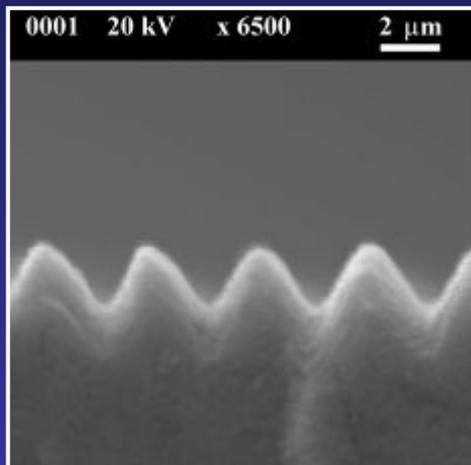


Распределение интенсивности излучения CO₂-лазера, сформированные фокусаторами: в поперечный отрезок (а), в кольцо (б) и четыре точки (в)

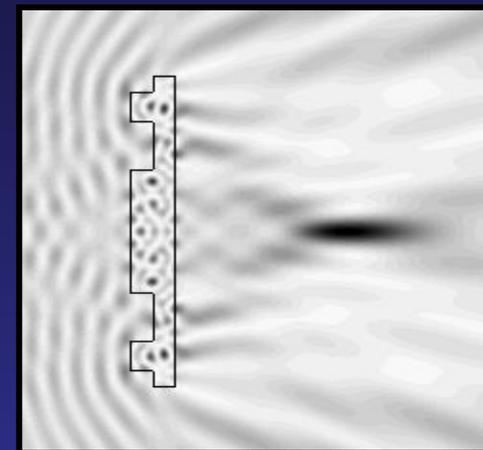
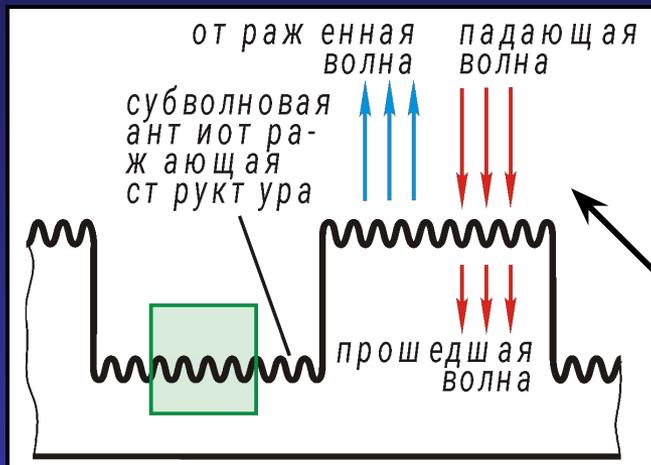
Фокусаторы нашли применение в лазерных технологических установках мощностью до 100 кВт, в устройствах считывания информации из оптической памяти, матричных устройствах ввода излучения в волокно, научных приборах и медицинских установках

Голуб М.А., Дегтярева В.П., Климов А.Н., Попов В.В., Прохоров А.М., Е.В. Сисакян, И.Н. Сисакян, В.А. Соيفер «Машинный синтез фокусирующих элементов для CO₂-лазера», Письма в ЖТФ, т.8, вып.8, с.449-451 (1982)

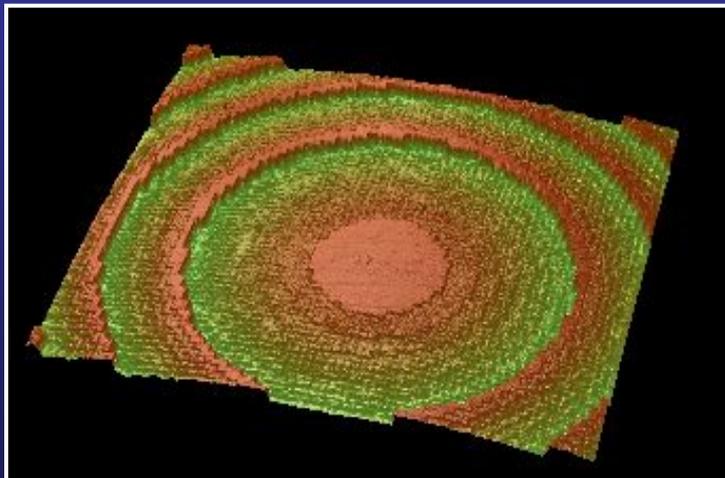
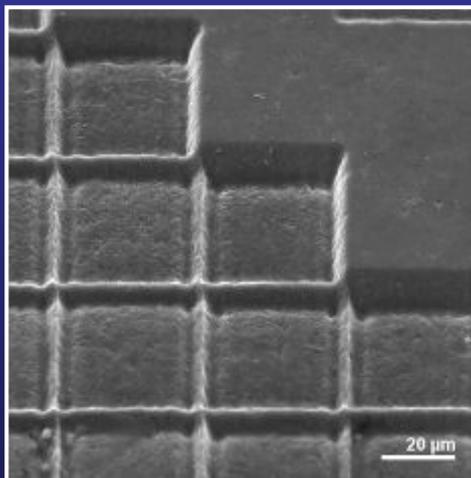
ФОКУСАТОРЫ НА АЛМАЗНЫХ ПЛЕНКАХ



Фрагменты рельефа фокусатора



Расчет параметров субволнового микрорельефа выполнялся с помощью решения уравнений Максвелла



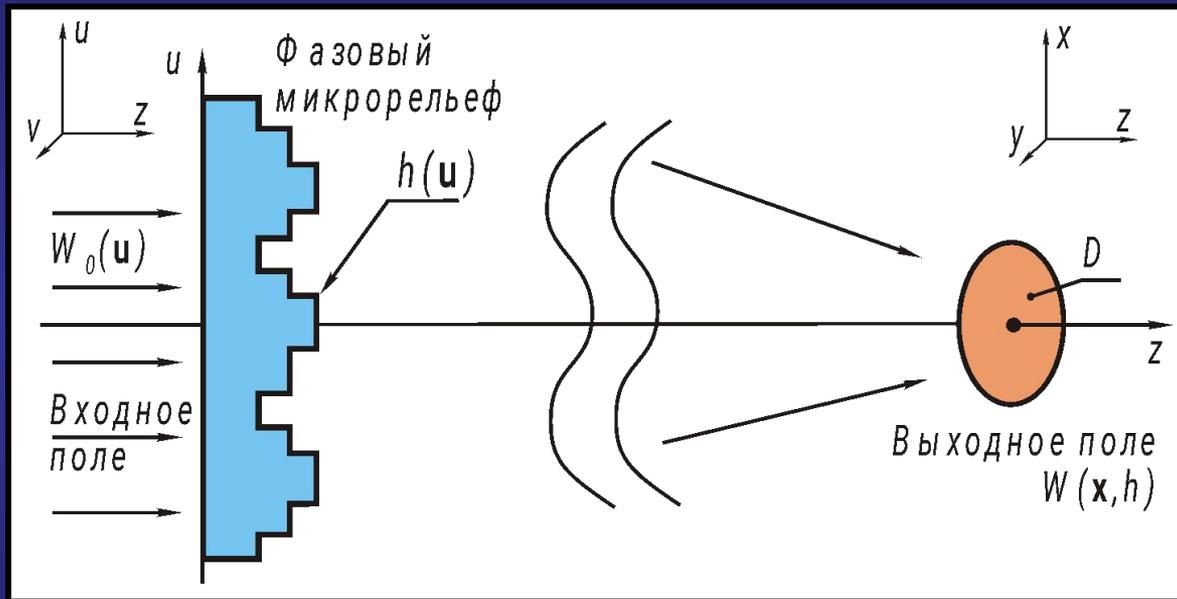
Длина волны: $\lambda = 10,6$ мкм
 Мощность: 2.1 кВт
 Фокальная область:
 точка, отрезок, кольцо
 Энергетическая
 эффективность: 90%

Конов В.И., Прохоров А.М.,
 Павельев В.С., Соيفер В.А.
 Квант. электр., 29(1)9-10(1999)

Показатель преломления пленки = 2,4; толщина пленки = 1 мм

КОМПЬЮТЕРНЫЙ СИНТЕЗ ДОЭ

Основная идея: решение обратной задачи теории дифракции с целью нахождения границ зон ДОЭ и его микрорельефа.



Условия:

Задана интенсивность

$$I(\mathbf{x}) = |W(\mathbf{x}; h)|^2$$

Задана фаза

$$\phi(\mathbf{x}) = \arg(W(\mathbf{x}; h))$$

Заданы модуль и фаза

$$W(\mathbf{x})$$

$$\min_{h(\mathbf{u}) \in H} \varepsilon(h) = \min_{h(\mathbf{u}) \in H} \left\| |W(\mathbf{x}; h)|^2 - I(\mathbf{x}) \right\|_{\mathbf{x} \in D}$$

Функция рельефа $h(u)$ ищется из условия минимума функционала

АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА ДОЭ

Методы цифровой голографии: кодирование амплитудно фазовой функции с помощью фазовой функции.

(J.P. Kirk, A.L. Jones, J. Opt. Soc. Am. 61(8) 1023 (1971))

Итеративные алгоритмы расчета ДОЭ, связанные с минимизацией целевых функций. Присутствует эффект стагнации.

(R.W. Gerchberg, W.O. Saxton, Optik 35 (1972), 237-242)

Градиентные алгоритмы оптимизации для расчета фазы ДОЭ. Могут быть использованы и в строгой теории дифракции.

(V. Soifer, V. Kotlyar, L. Doskolovich "Iterative methods for diffractive optical elements computation, Taylor & Francis, London, 1997)

- Интерактивная оптимизация:
80% эффективность, 4% ошибка

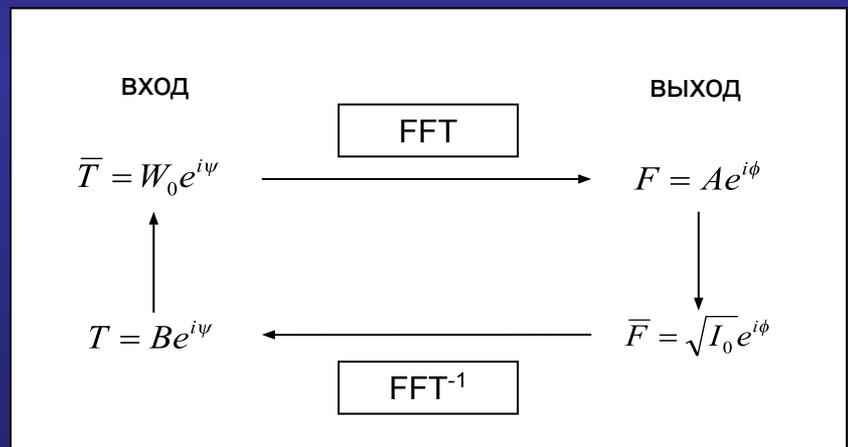
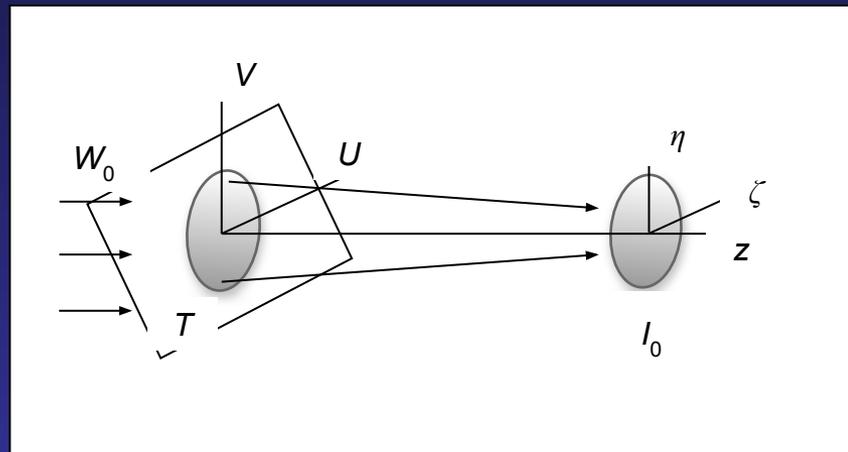
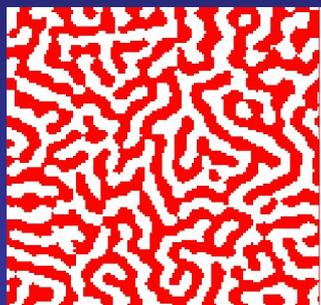


Схема итеративного алгоритма Герчберга-Секстона

W_0 - амплитуда освещающего пучка, T - комплексная функция пропускания ДОЭ, I_0 - заданное распределение интенсивности в выходной плоскости, A, ϕ - амплитуда и фаза в выходной плоскости, рассчитанные на n -ой итерации, B, ψ - амплитуда и фаза в плоскости ДОЭ, рассчитанные на n -ой итерации, F - комплексная амплитуда в выходной плоскости

ИТЕРАТИВНЫЙ РАСЧЕТ БИНАРНЫХ И КВАНТОВАННЫХ ДОЭ, ФОКУСИРУЮЩИХ СВЕТ В ЗАДАННЫЕ ОБЛАСТИ

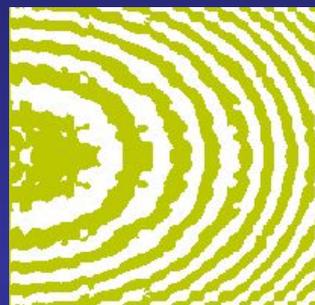
Бинарные ДОЭ легко изготавливаются с помощью технологии оптической фотолитографии, имеют высокую дифракционную эффективность (~75%) и небольшую ошибку (1-5 %).



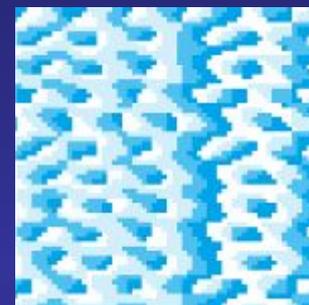
Бинарная фаза ДОЭ, фокусирующего в кольцо



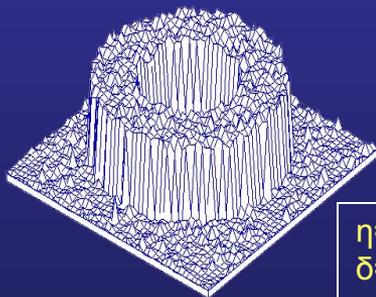
Бинарная фаза ДОЭ, фокусирующего в букву H



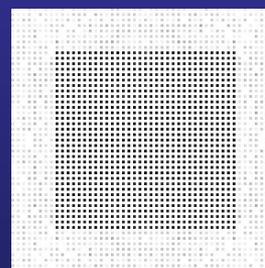
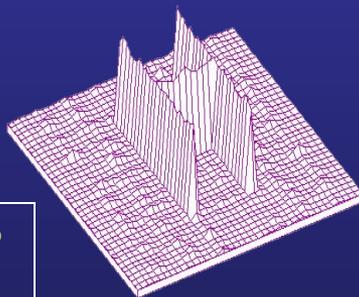
Бинарная фаза одного периода решетки с 33x33 порядками



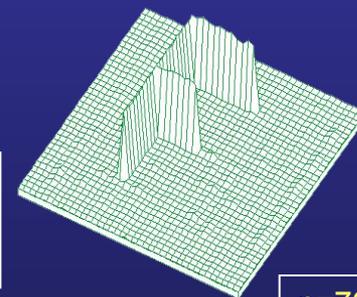
4-х уровневая фаза ДОЭ, фокусирующего в букву "F"



$\eta=73\%$
 $\delta=3\%$



$\eta=75\%$
 $\delta=5\%$



$\eta=70\%$
 $\delta=2\%$

Распределения интенсивности в фокальной плоскости

ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ДОЭ

Технологические этапы синтеза ДОЭ

Исследование качества материалов и подложек



Вычисление и запись фотомаски



Формирование защитного покрытия



Травление микрорельефа



Совмещение



Измерение параметров микрорельефа

Электронно-лучевая литография

- Генератор изображений Leica LION LV1 (разрешение 40 нм, изображение 10x10мм)
- Электронный микроскоп «Supra 25» с литографической приставкой XENOS (разрешение 100 нм, изображение 0,5x0,5 мм)



CLWS-200 (разрешение 800 нм, изображение 2000x200мм)

Оптическая литография

Оптический генератор изображений

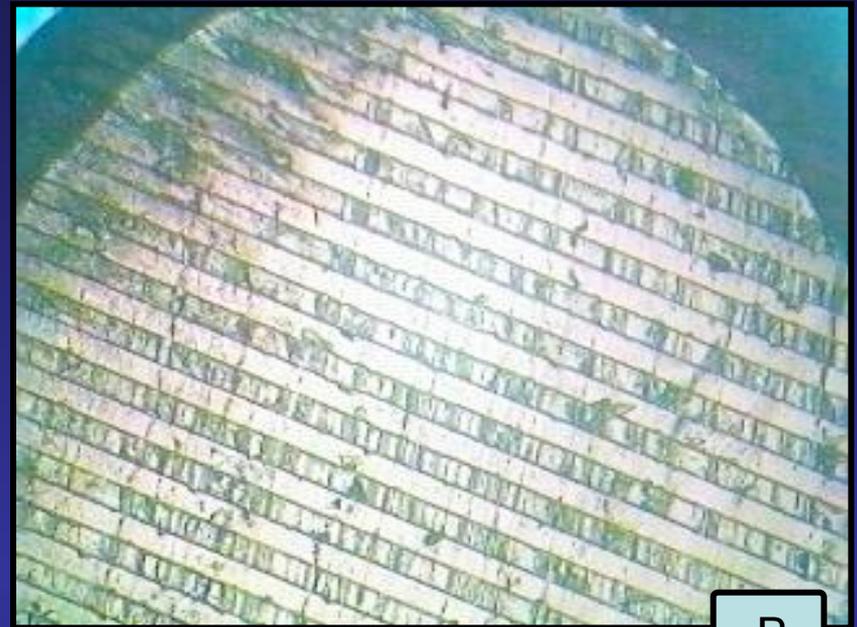
АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ РЕЛЬЕФА ДОЭ



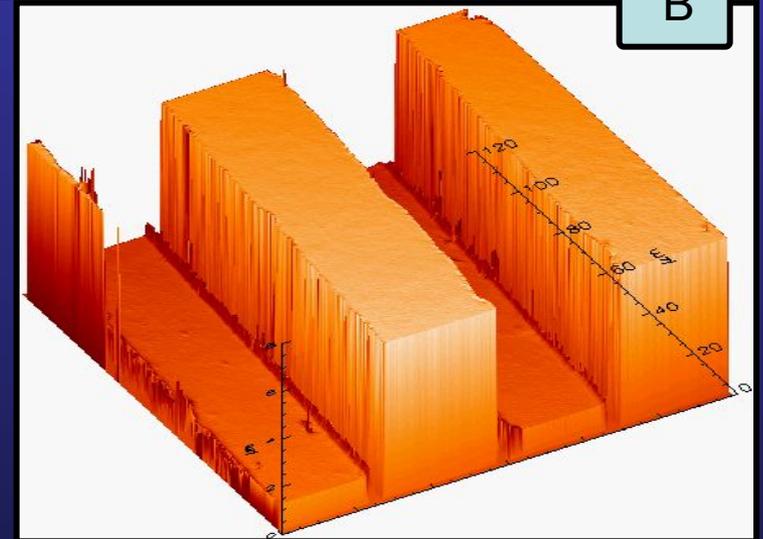
A

A – автоматический интерферометр NewView-5000 фирмы Zygo (США) способный визуализировать рельеф ДОЭ диаметром 200 мм x 200 мм с поперечным разрешением 1 мкм и с разрешением по высоте 1 нм.

B – бинарная дифракционная решетка на торце многомодового волокна и профиль рельефа ее небольшого участка. Период решетки – 60 мкм, диаметр волокна – 1000 мкм.



B



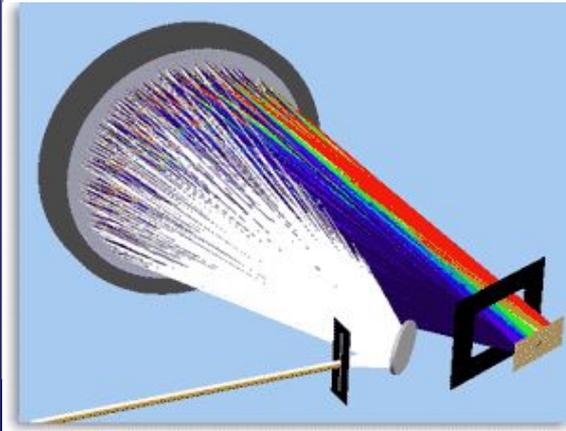
ФОРМИРОВАНИЕ И СЕЛЕКЦИЯ МОД ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Моды - собственные функции оператора распространения светового излучения (базисы Гаусса-Эрмита, Гаусса-Лагерра, Бесселя и др.)

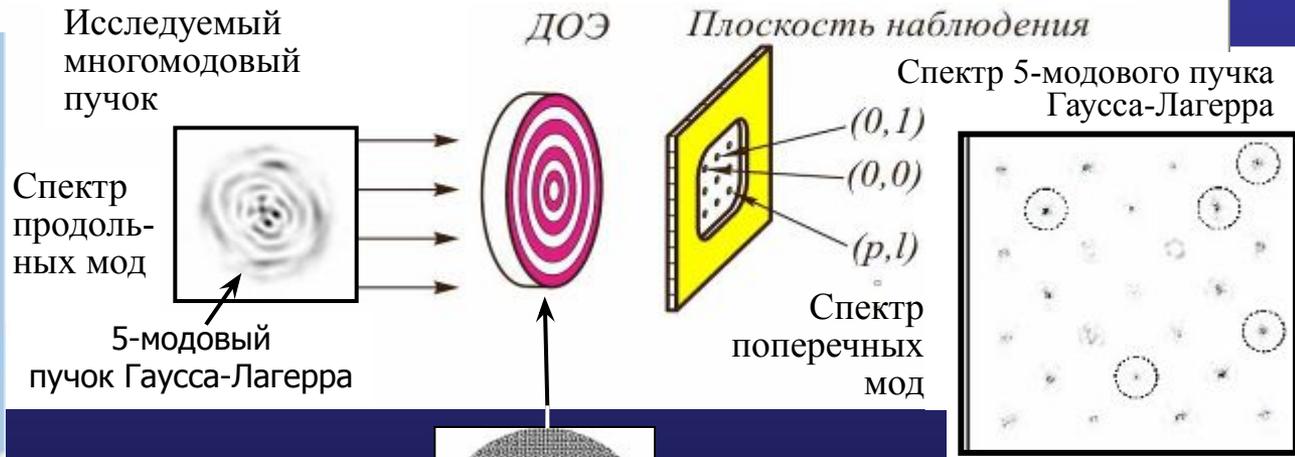


$$\xi(u, v) = \sum_{(p,e) \in D} \xi_{p,e} \Psi_{p,e}(u, v)$$

Дифракционная решетка



СЕЛЕКЦИЯ МОД С ПОМОЩЬЮ МОДАНОВ

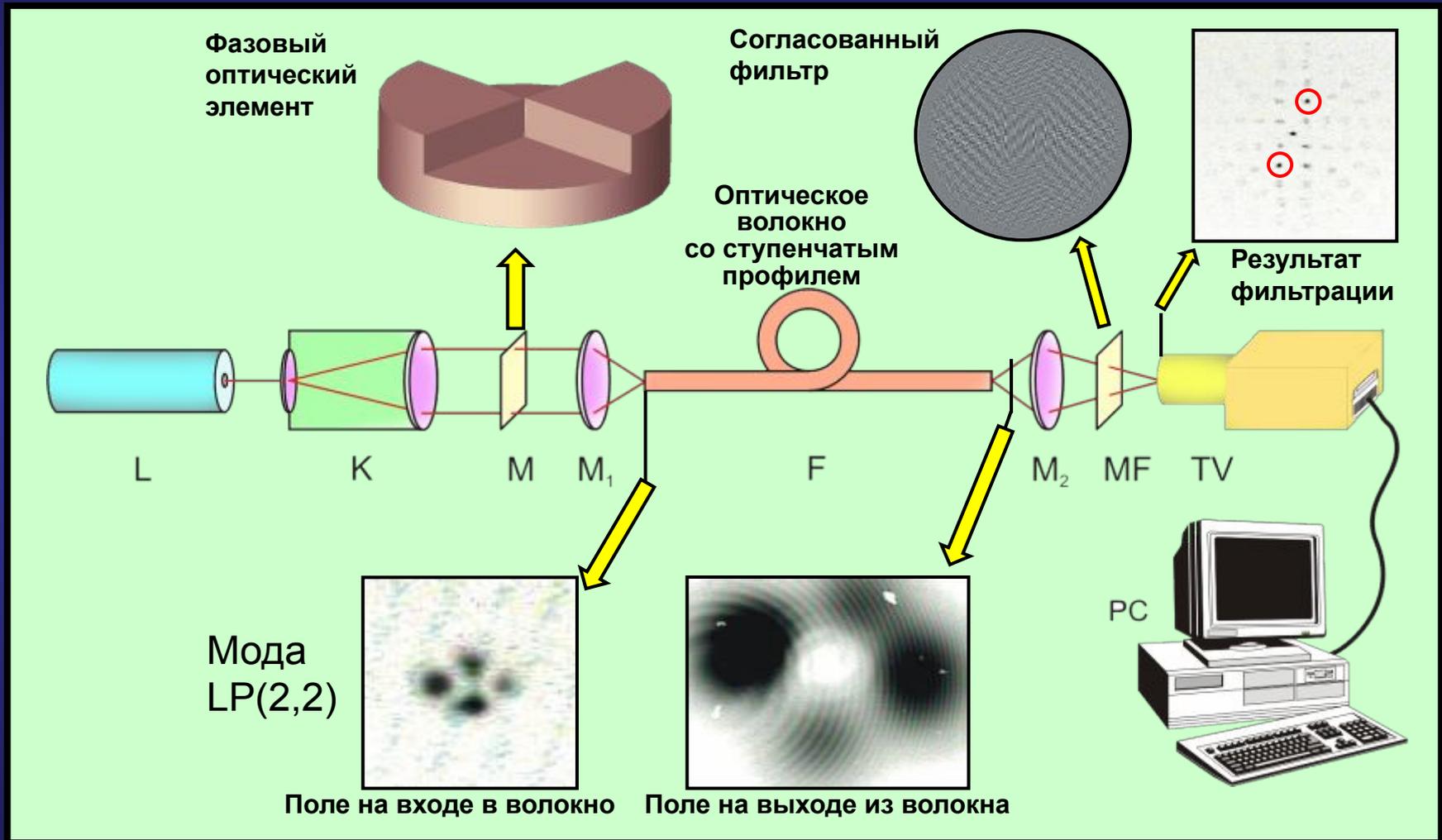


Голуб М.А., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Сойфер В.А. «Синтез пространственных фильтров для исследования поперечного модового состава когерентного излучения», Квантовая электроника т.9, № 9, с.1866-1868 (1982).

V. Soifer, M. Golub "Laser beam mode selection by computer generated holograms", CRC Press, Boca Raton, 1994

ВОЗБУЖДЕНИЕ И СЕЛЕКЦИЯ МОД ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

(повышение плотности и безопасности передачи данных)



Использовалось маломодовое волокно Corning Glass SMF 28
диаметром 8,3 мкм и длиной 20 м

БЕССЕЛЬ-ОПТИКА И СИНГУЛЯРНАЯ ОПТИКА

$\exp(im\varphi)$ - функция фазы терпит m разрывов первого рода, m – порядок ДОЭ

**Винтовой
фазовый ДОЭ**

$$\exp(im\varphi)$$



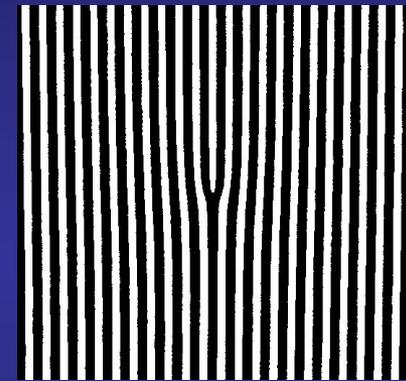
**Винтовая
зонная пластина**

$$\text{sgn}[\cos(m\varphi + kr^2)]$$



**Решетка
с «вилкой»**

$$\text{sgn}[\cos(m\varphi + \alpha x)]$$

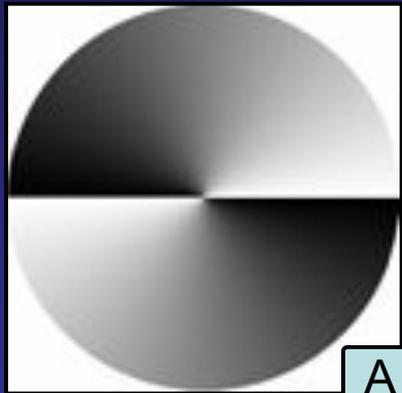


1. Березный А.Е., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Сойфер В.А. *Бессель-оптика* // ДАН, 1984.
2. Khonina S.N., Kotlyar V.V., Shinkaryev M.V., Soifer V.A., Uspleniev G.V., *The phase rotor filter* // J. Modern Optics, 1992

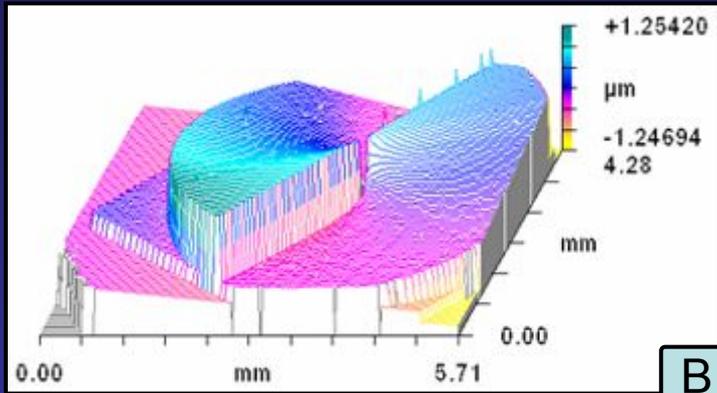
1. Heckenberg N.R. et al. *Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms* // Opt. Lett., 1992

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

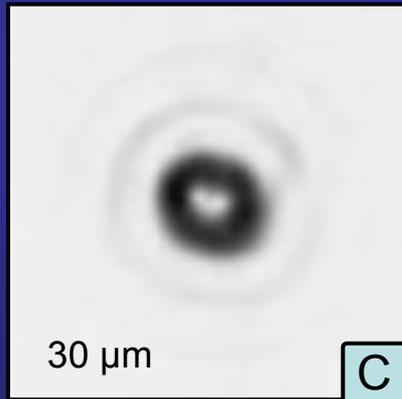
ФОРМИРОВАТЕЛИ ОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ



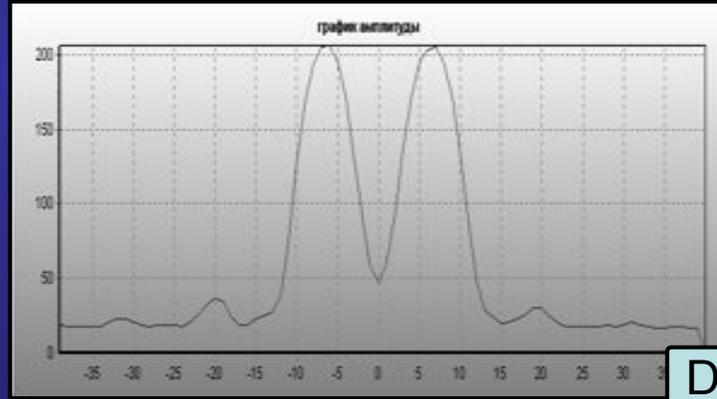
A



B



C



D

A – спиральная фазовая пластинка (СФП) 2-го порядка ($m=2$).

B – центральный фрагмент микрорельефа СФП (x200) для длины волны 633 нм.

C – вихревой пучок в фокусе линзы ($f=100$ мм).

D – радиальный профиль интенсивности пучка

Kotlyar V.V., Almazov A.A., Khonina S.N., Soifer V.A., Elfstrom H., Turunen J. "Generation of phase singularity through diffracting a plane or Gaussian beam by a spiral phase plate", J. Opt. Soc. Am. A, v.22, no.5, p.849-861 (2005).

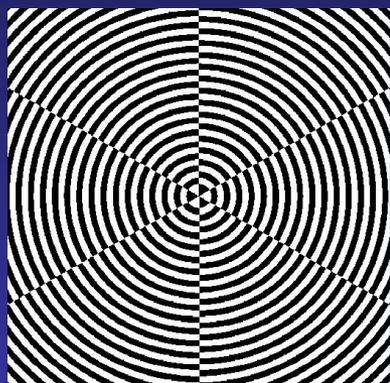
Угловые гармоники используются при описании мод Бесселя :

$$E(r, \varphi) = \sum_{n,m} C_{mn} J_m(\alpha_n r) \exp(im\varphi), \quad \varphi = \arctg \frac{y}{x}$$

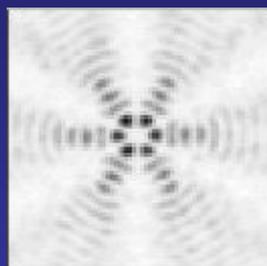
ФАЗОВЫЕ ФОРМИРОВАТЕЛИ БЕЗДИФРАКЦИОННЫХ ПУЧКОВ (МОДЫ БЕССЕЛЯ)

Стабильный двухмодовый пучок Бесселя
(эксперимент)

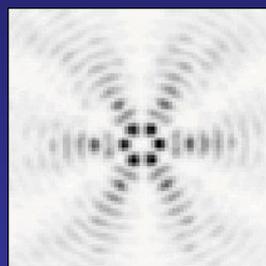
$$\xi(r, \varphi) = J_{-3}(120,5r)e^{-3i\varphi} + J_3(120,5r)e^{3i\varphi}$$



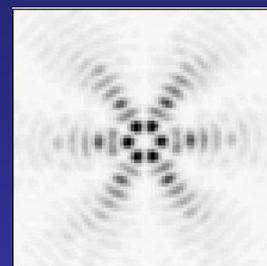
Бинарная фаза ДОО



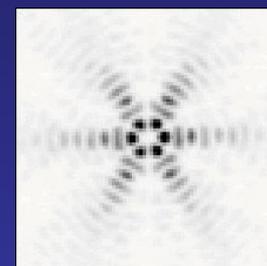
Z=50 mm



Z=60 mm



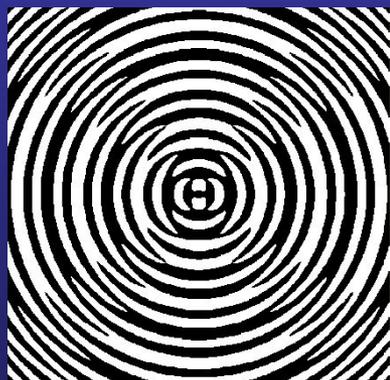
Z=70 mm



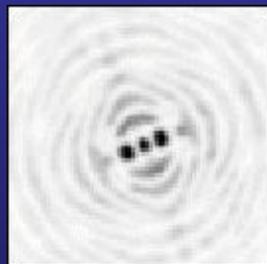
Z=80 mm

0.71 mm

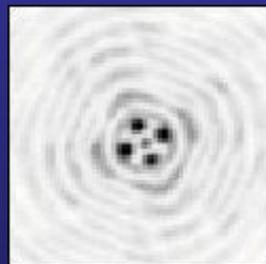
Периодически повторяющийся
трехмодовый пучок Бесселя (эксперимент)



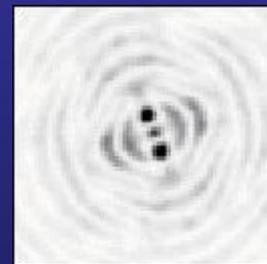
Бинарная фаза ДОО



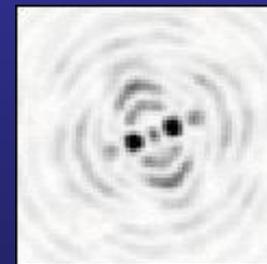
Z=85 mm



Z=90 mm



Z=95 mm

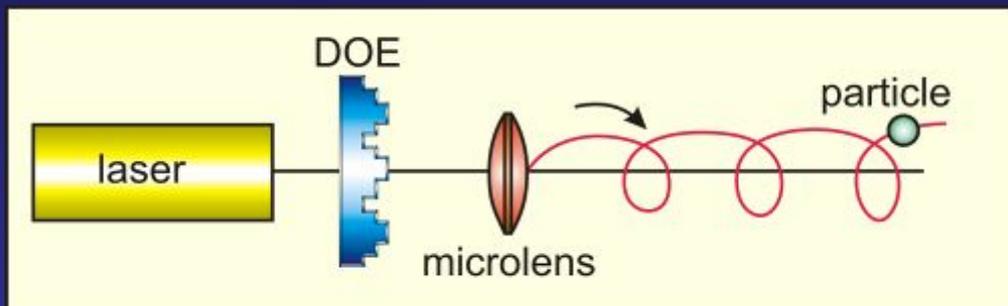


Z=105 mm

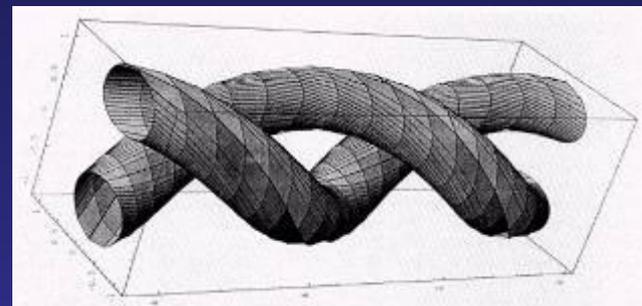
0.83 mm

$$\xi(r, \varphi) = J_{-2}(50,44r)e^{-2i\varphi} + J_0(83,27r) + J_2(50,44r)e^{2i\varphi}$$

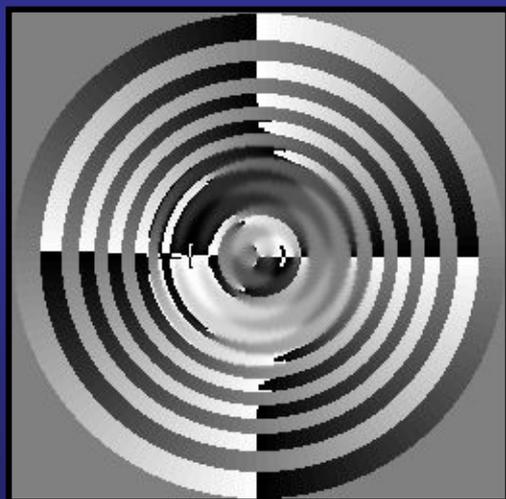
ФОРМИРОВАНИЕ ИНВАРИАНТНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ С ПОМОЩЬЮ ДОЭ



Движение частицы по спирали в пучке

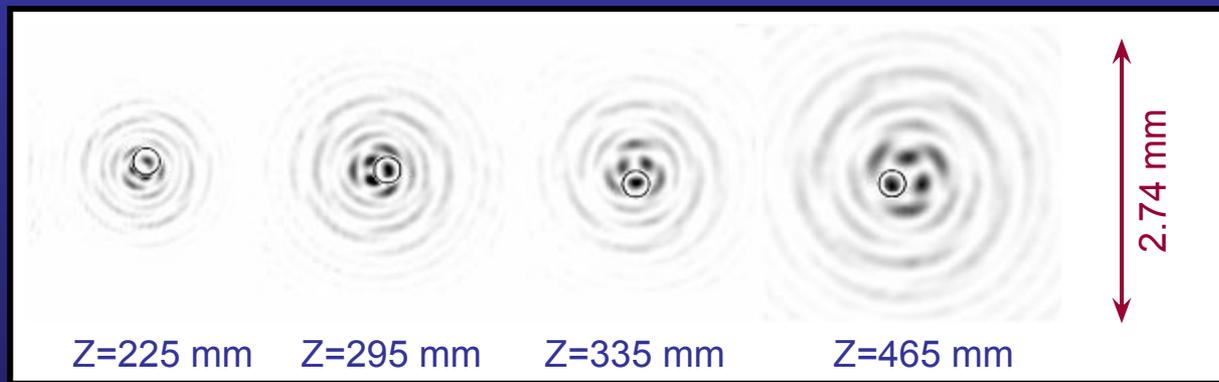


Лучевые трубки в пучке с угловым орбитальным моментом



Фаза ДОЭ

Вращающийся двухмодовый пучок Лагерра-Гаусса (эксперимент)



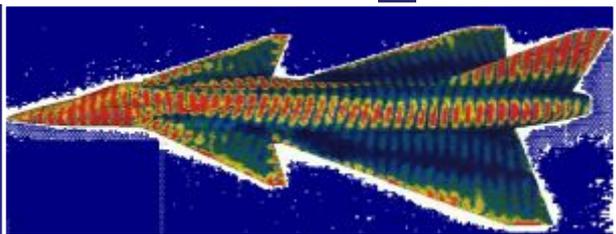
Применение:

- оптический захват и вращение микрочастиц;
- формирование лазерного пробоя с заданной пространственной структурой в газах и жидкостях;
- оптоволоконная связь; бесконтактные измерения

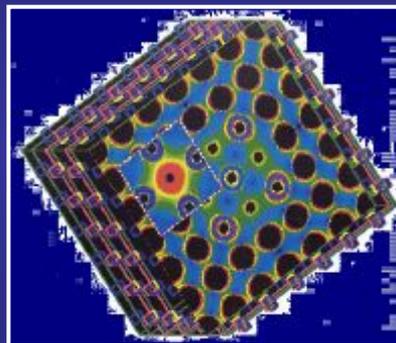
$$\xi(r, \varphi) = r e^{-r^2} \left[L_1^1(2r^2) e^{-i\varphi} + \sqrt{2} r L_{16}^2(2r^2) e^{2i\varphi} \right]$$

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ МАКСВЕЛЛА (ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ)

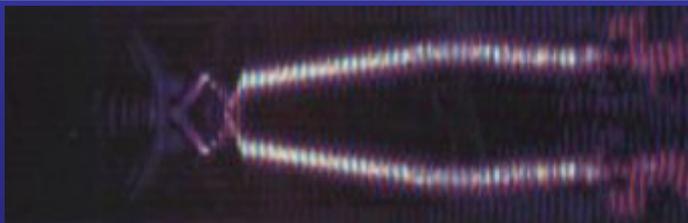
Уравнения Максвелла (УМ) являются математическим базисом решения задач оптики и других разделов электромагнетизма. Наиболее распространенным методом решения УМ является метод конечных разностей: Finite-Difference Time-Domain (FDTD)



В радиолокации – *Stealth*-технологии
K.R. Umashankar and A. Taflove, 1983



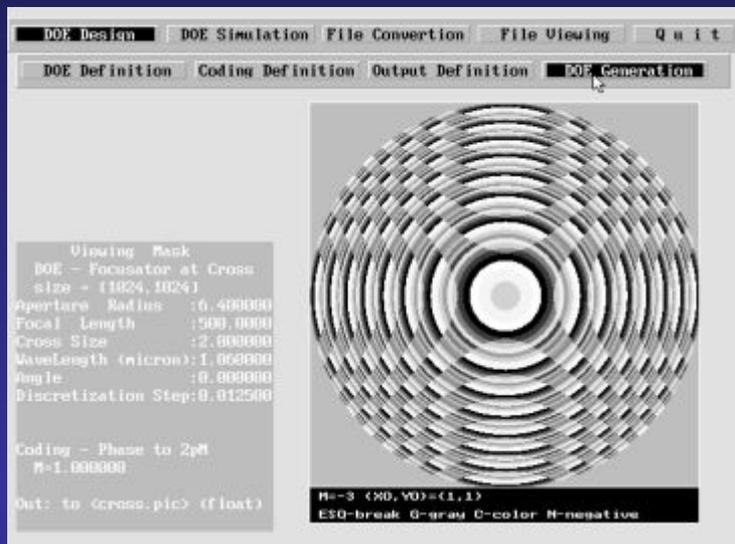
Моделирование фотонных кристаллов, многослойных фильтров, разделителей пучка, лазерных резонаторов



Изучение солитонов в нелинейной оптике
P.M. Goorjian and A. Taflove, 1992

Применение FDTD в микрооптике: дифракция на сферической линзе (R.W. Ziolkowski, 1994), цилиндрической линзе в волноводе (Д.Л. Головашкин, В.А. Сойфер, 1997), диэлектрической решетке (H. Ichikawa, 1998), радиально-симметричном ДОЭ (D.W. Prather, 1999), 3D ДОЭ (D.W. Prather, 2000), металлическом шаре (J.T. Krug, 2002), объемной диэлектрической решетке (E. Glytsis, 2002), фотонных кристаллах (W. Jaing, 2006), фотонно-кристаллических волноводах (J.J. Hu, 2007), фотонно-кристаллических линзах (V. Kotlyar, 2008)

ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ РАСЧЕТА И МОДЕЛИРОВАНИЯ ДОЭ

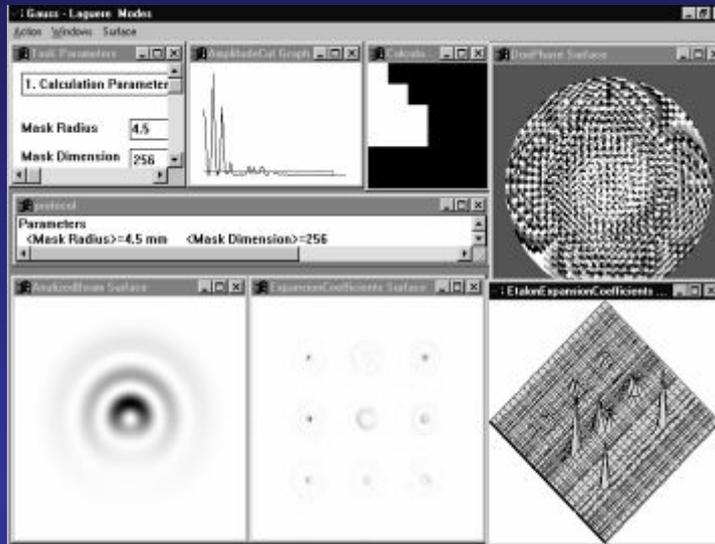


“QUICK-DOE” – программные средства для неитеративного расчета фазы ДОЭ

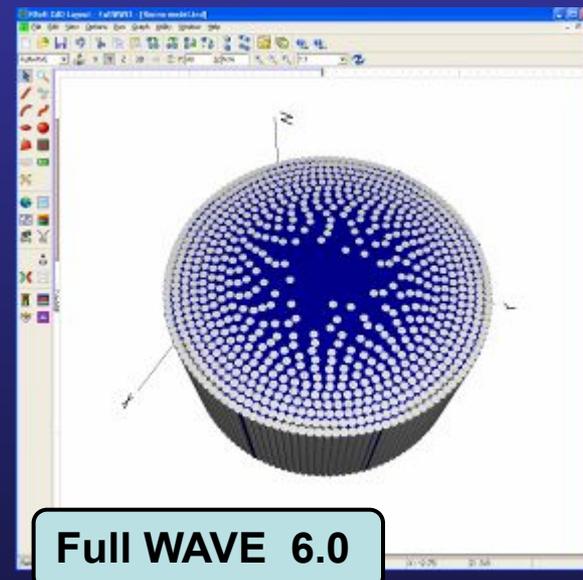
Коммерческие программные средства:

- **Full WAVE 6.0** (RSoft Design, US)
- **FIMMWAVE 4.6** (Photon Design, Oxford, UK)
- **OlympiOs 5.2** (Alcatel Optronics, Netherlands)

Позволяют моделировать распространение и дифракцию света с помощью строгого (FDTD-метод) и приближенного (BeamProp-метод) решения уравнений Максвелла

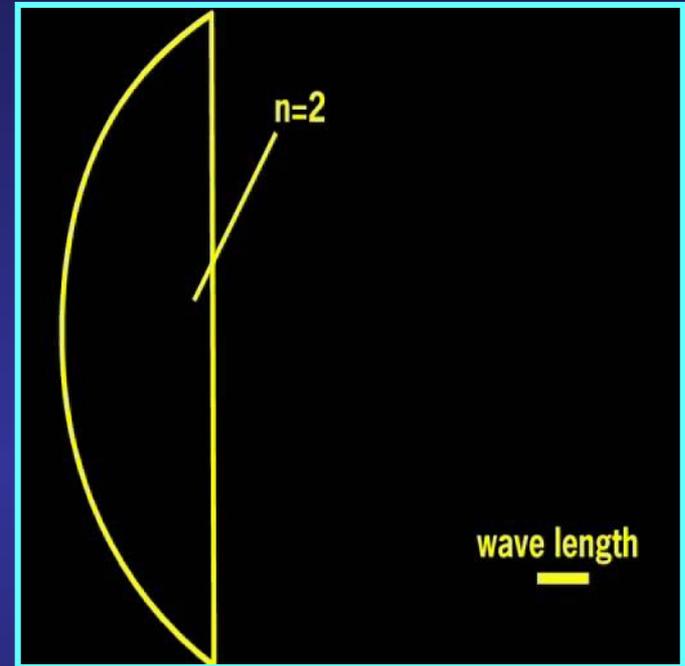
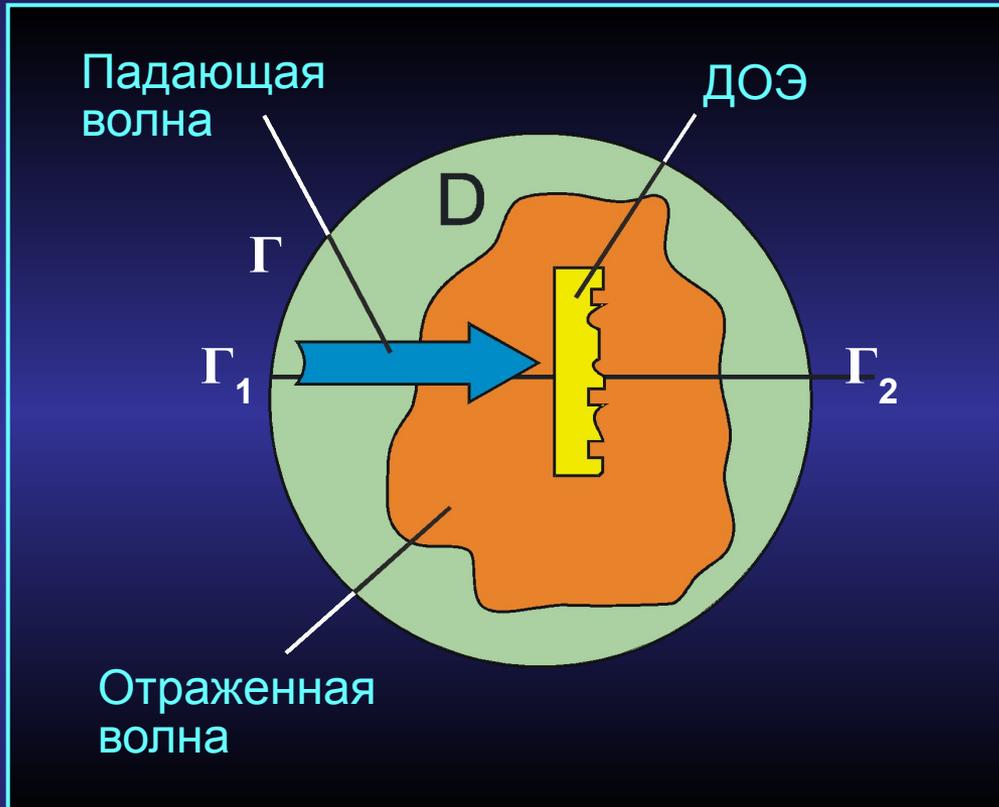


“ITER-MODE” – программные средства итеративного расчета ДОЭ, формирующих моды Лагерра-Гаусса и Эрмита-Гаусса



Full WAVE 6.0

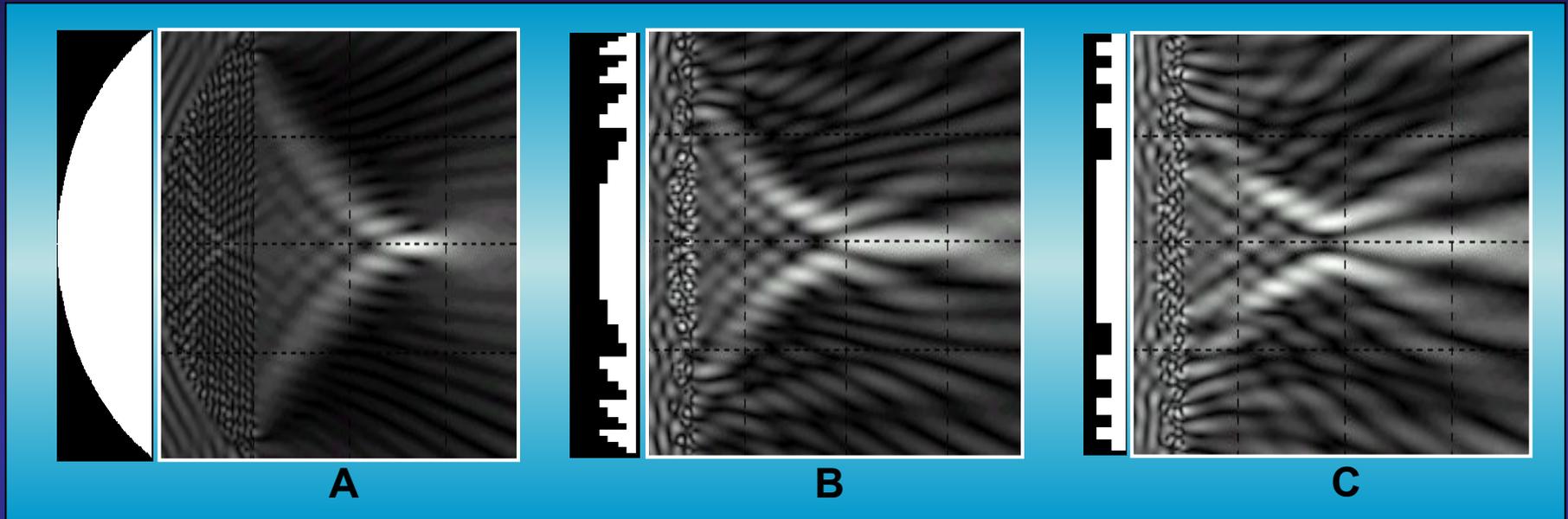
РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ МАКСВЕЛЛА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ



Дифракция плоской волны
TE-поляризации на микролинзе:
диаметр - 12 длин волн,
показатель преломления - 2

Вывод: решение временной задачи позволяет в деталях наблюдать распространение электромагнитной волны через объект

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ СВЕТА ЧЕРЕЗ МИКРОЛИНЗЫ



Дифракционные картины для TE-волны, падающей на цилиндрические линзы:
А – рефракционную, **В** – 4-х уровневую дифракционную, **С** – бинарную.

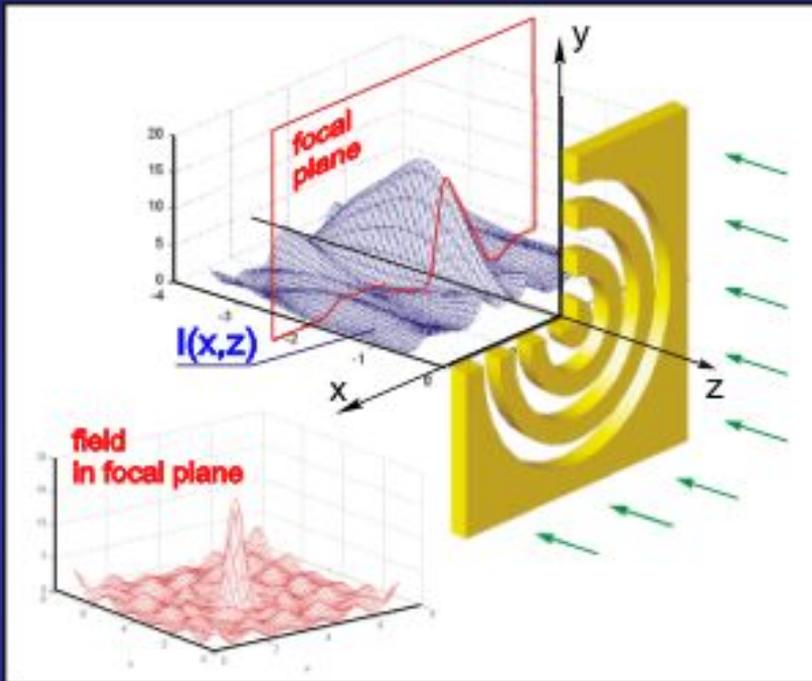
Диаметр линзы = 16 длин волн, показатель преломления = 2, фокусное расстояние = 8 длин волн

Метод расчета: модификация FDTD-метода, путем использования неявной безусловно устойчивой разностной схемы (Головашкин Д.Л., Сойфер В.А. «Анализ прохождения электромагнитного излучения через дифракционную линзу», Автометрия, №66 119-121 (1999))

Вывод: метод позволяет изучать линзы с высокой числовой апертурой и разным числом уровней градаций рельефа

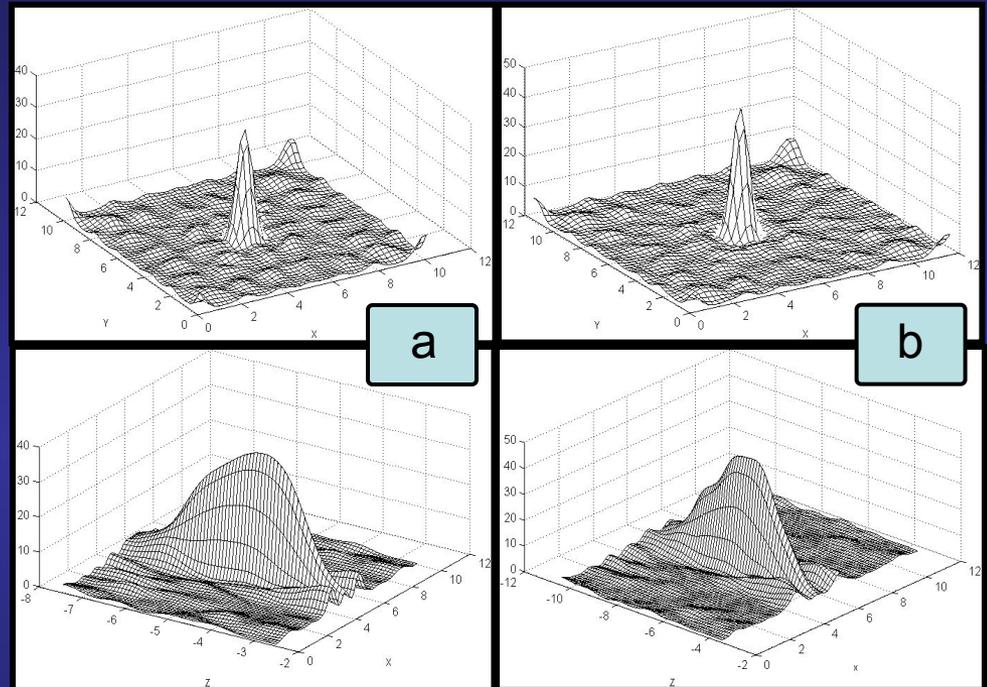
РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОЗ В РАМКАХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ТЕОРИИ

Метод расчета: метод Фурье-мод (Rigorous Coupled Wave Analysis)



Расчет и моделирование бинарных микролинз

Ограничение метода:
монохроматичность излучения



Распределение интенсивности вблизи фокуса бинарной микролинзы:
в плоскости фокуса (верхний ряд) и плоскости XOZ (нижний ряд).

Радиусы линз и их фокусные расстояния:

$$R = f = 5\lambda \text{ (a)}; R = 5,6\lambda, f = 7\lambda \text{ (b)},$$

где $\lambda = 0,55 \text{ мкм}$ – длина волны, $n = 1,5$.

ЧАСТЬ II. ДКО и нанофотоника

РАЗРЕШЕНИЕ УСТРОЙСТВ ЗАПИСИ СИНТЕЗИРОВАННОГО ОПТИЧЕСКОГО МИКРОРЕЛЬЕФА

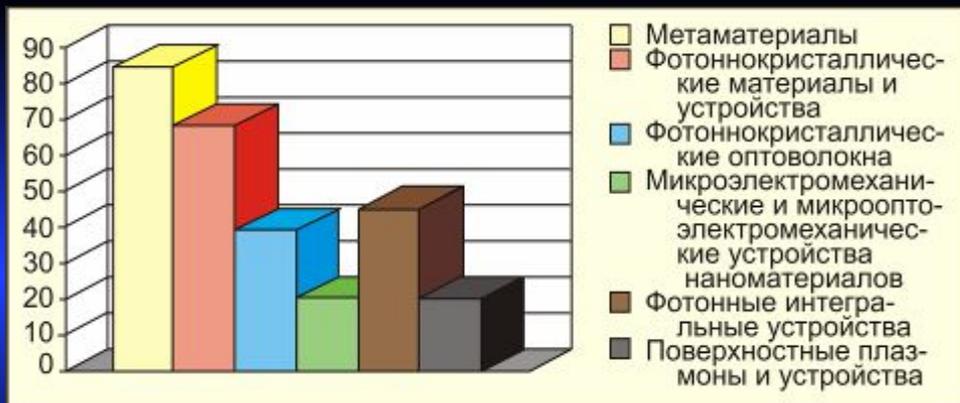
№ п/п	Тип оптического элемента и год создания	Тип устройства	Разрешение устройства записи	Математический аппарат
1	Цифровые голограммы (1975 г.)	Графопостроители	50-100 мкм	Преобразование Фурье (БПФ)
2	Фокусаторы, моданы и другие элементы компьютерной оптики (1985 г.)	Фотопостроители	10-25 мкм	Геометрооптический. Уравнение эйконала
3	ДОЭ с синтезированным микрорельефом (1995 г.)	Лазерные устройства записи	0,5-1 мкм*	Уравнение Гельмгольца. Интеграл Кирхгофа
4	Устройства нанофотоники (2010 г.)	Электронные литографы	10-50 нм	Уравнения Максвелла

* Заметим, что ДОЭ с линейными и круговыми зонами микрорельефа записываются в настоящее время с помощью делительных машин и других устройств записи с разрешением 50 нм.

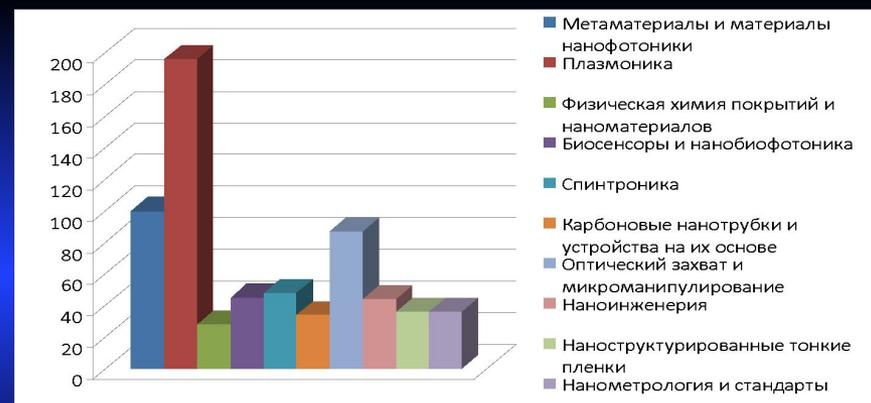
Электронный микроскоп LEO 1530 SEM
с литографической приставкой RATH ELPHY
(разрешение 50 нм)



ДИФРАКЦИОННАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ ОПТИКА И НАНОФОТОНИКА



Международная конференция по фотонике (Photonics Europe), Брюссель, Бельгия, 2010

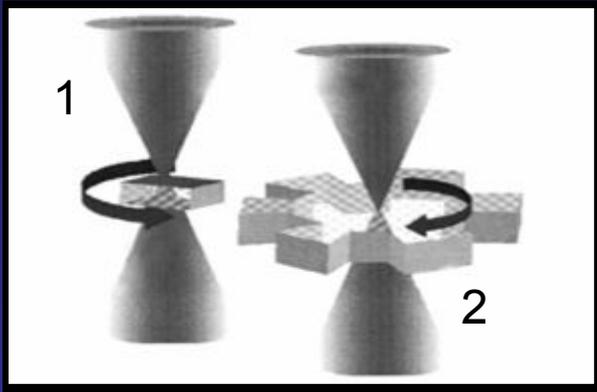


Международная конференция по оптике и фотонике (Optics & Photonics), Сан-Диего, США, 2009

Нанофотоника изучает поведение света в наноразмерной области и обеспечивает проектирование оптических устройств в наномасштабе (Wikipedia)

Прогресс во многих областях нанофотоники существенно зависит от прогресса в развитии дифракционной компьютерной оптики:
 метаматериалы; фотонные кристаллы; плазмоника;
 оптический захват и микроманипулирование; наномоделирование.

ПРИМЕНЕНИЕ ДОЭ В МИКРОМЕХАНИКЕ



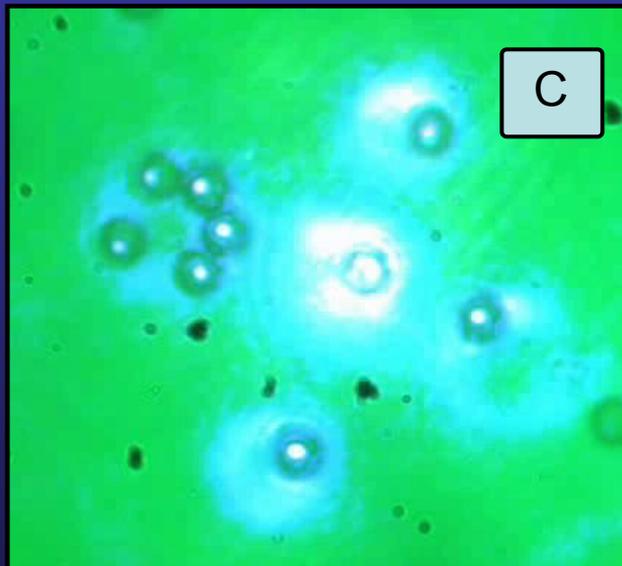
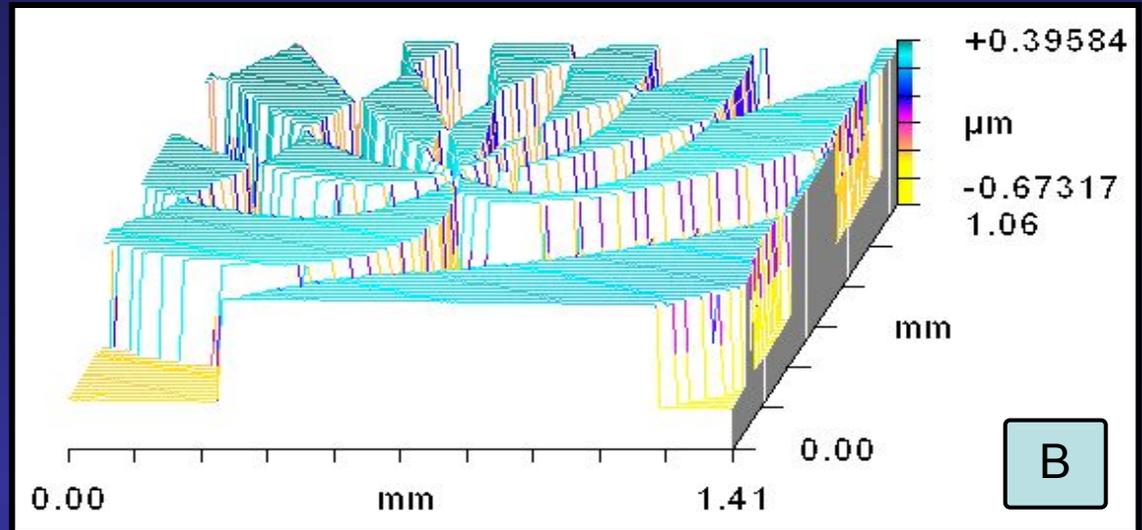
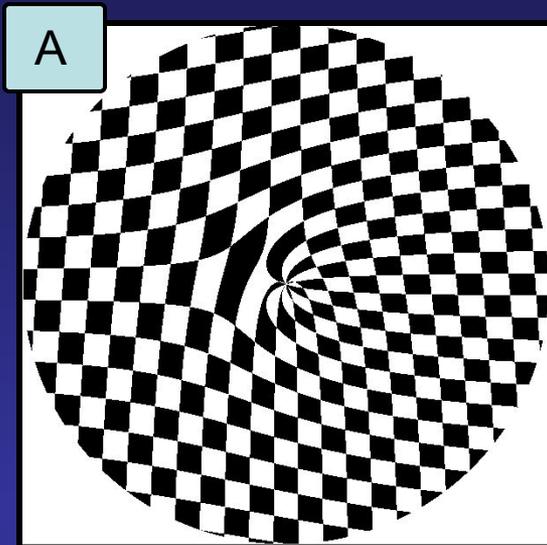
ДОЭ могут быть использованы не только для информационных оптических систем, но и для механических применений.

В этом случае энергия лазерного пучка преобразуется в механическую энергию движения микрочастицы или микродетали

Преобразование спинового углового момента лазерного пучка с круговой поляризацией во вращающийся момент частицы с двойным лучепреломлением (1 мкм CaCO_2) (1), далее во вращающийся момент жидкости и потом во вращающийся момент шестеренки (10 мкм , плавленый кварц) (2).

- 1873г.- расчет светового давления в рамках электродинамике (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 (Р.В. Скиданов, В.А. Соيفер)
- 2008г.- оптическая сортировка микрочастиц по размерам (К. Dholakia)
- 2010г.- захват микрочастицы с помощью возбужденной микро антенны (К. Dholakia)

МАНИПУЛЯЦИЯ МИКРОЧАСТИЦАМИ С ПОМОЩЬЮ МНОГОПОРЯДКОВЫХ ДОЭ

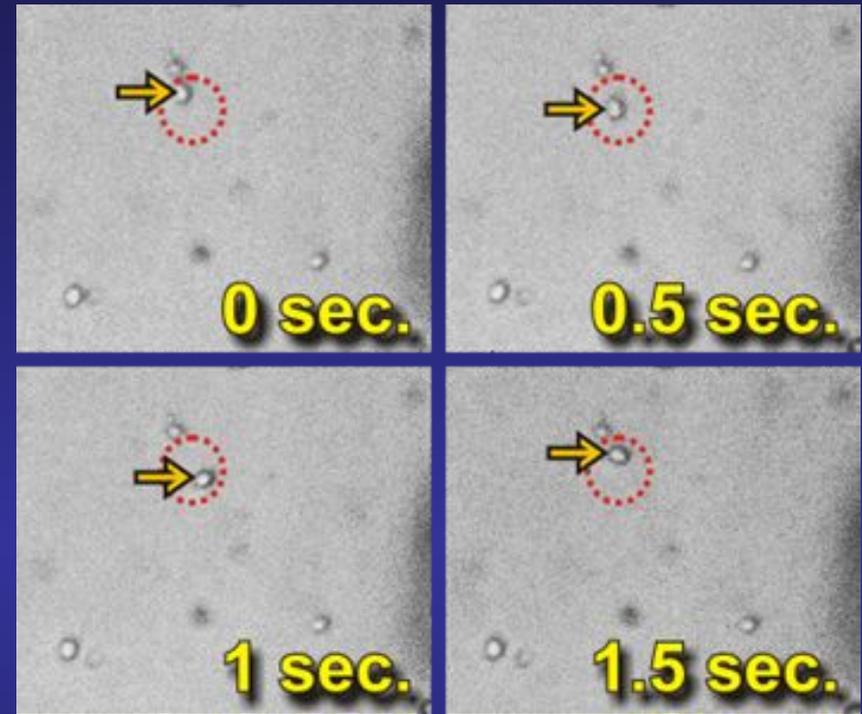
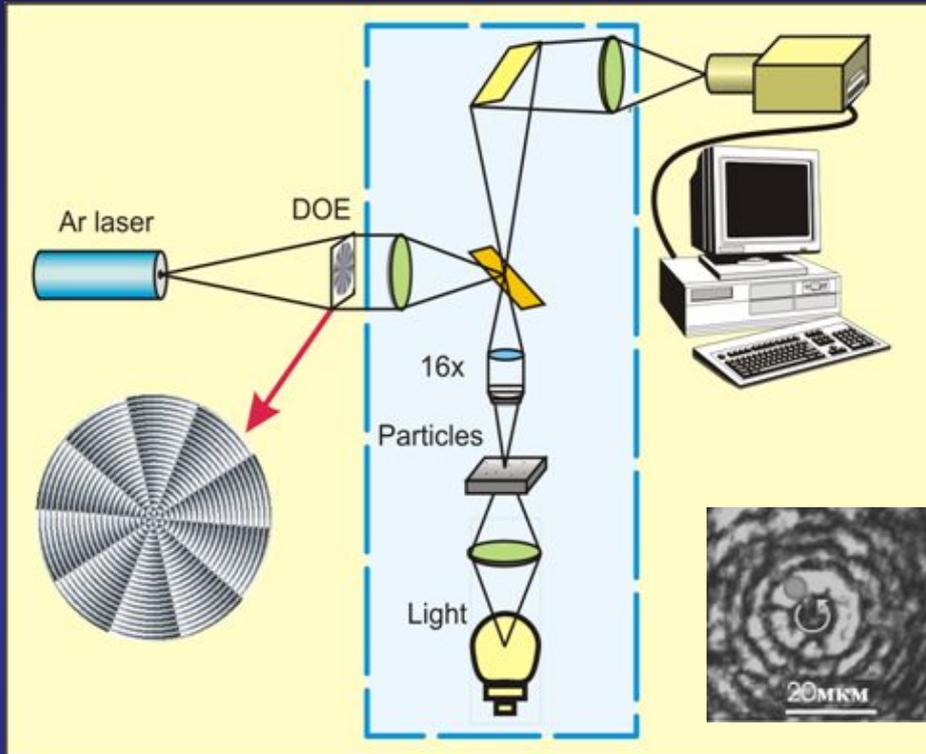


A – бинарная фаза оптического элемента, который преобразует гауссовый лазерный пучок в 5 кольцевых пучков с «вихревой» фазой.

B – центральная часть микрорельефа этого оптического элемента.

C – полистироловые шарики диаметром 5 микрон (показатель преломления – 1,49) захватываются и вращаются в «вихревых» лазерных пучках (длина волны – 532 нанометра).

ОПТИЧЕСКАЯ МАНИПУЛЯЦИЯ МИКРООБЪЕКТАМИ С ПОМОЩЬЮ ДОЭ



Оптическая схема для вращения микрочастиц с помощью вихревого аксикона: аргонный лазер мощностью 200мВт и с длиной волны 514 нм

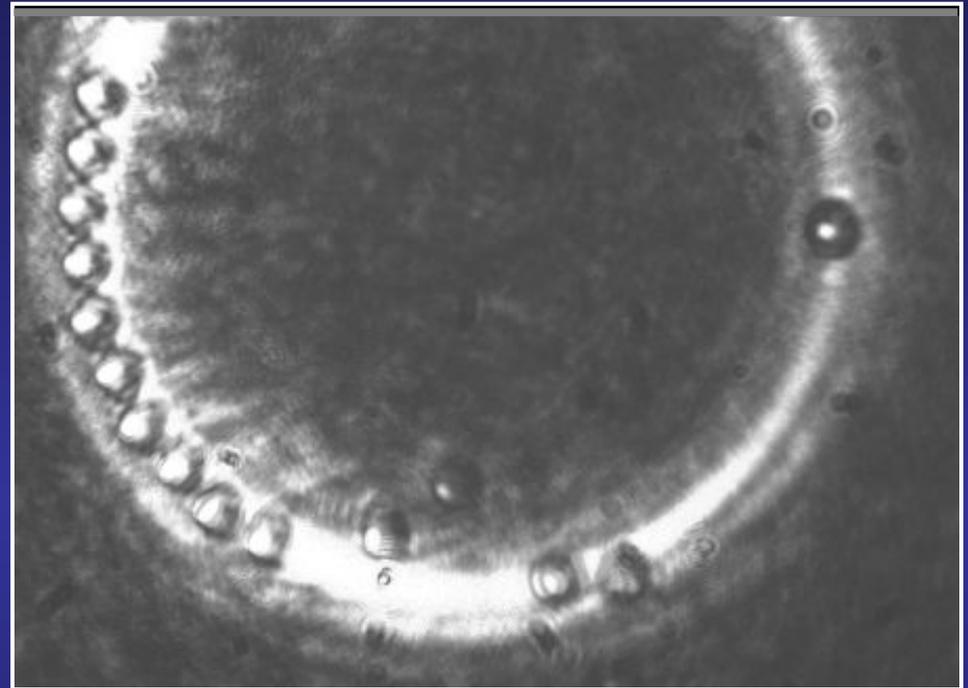
Вращение полистироловых шариков диаметром 5 мкм в воде с помощью пучка Бесселя 5-го порядка (диаметр окружности вращения 17 мкм)

- 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)
- Хонина С.Н., Скиданов Р.В., Моисеев О.Ю. «Формирование лазерных пучков Эйри с помощью бинарно-кодированных дифракционных оптических элементов для манипулирования микрочастицами», Компьютерная оптика, 33, № 2, с.162-174 (2009)

Оптический захват и микроманипулирование МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ПИНЦЕТ

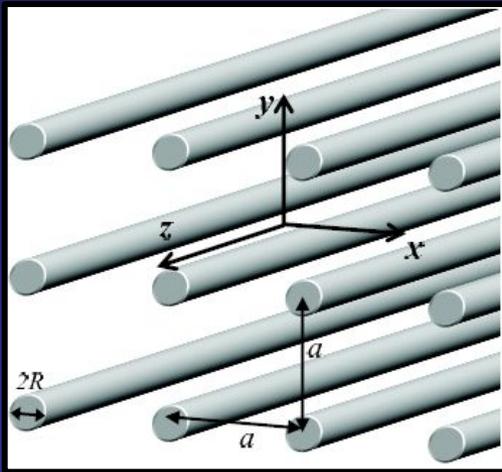


Лазерный микроманипулятор
на основе оптического микроскопа
и динамического
жидкокристаллического
микродисплея



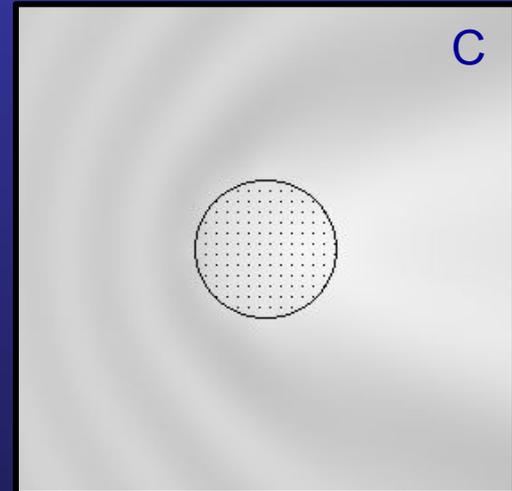
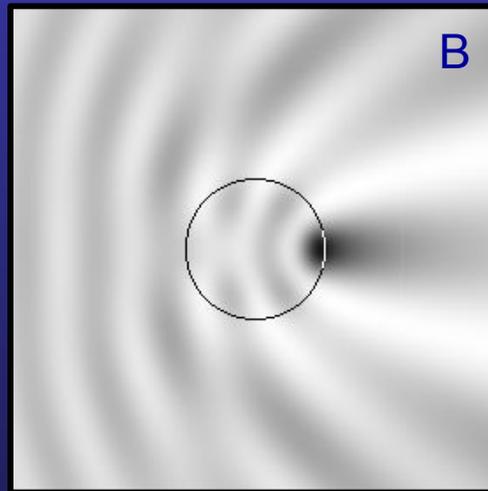
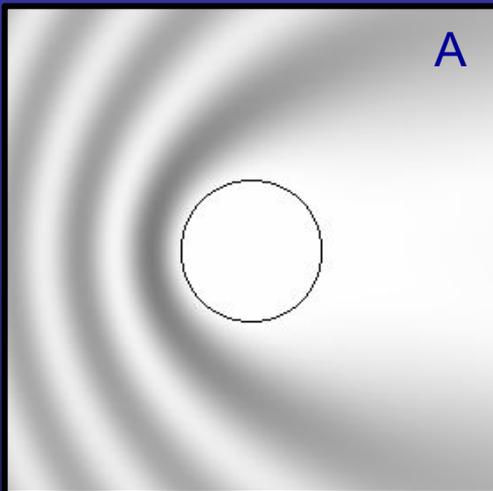
Полистироловые микрошарики
диаметром 5 мкм, вращаются
по световому кольцу вихревого
лазерного пучка, сформированного
с помощью ДОЭ (скорость вращения
примерно 2 мкм/с, лазер
мощностью 500 мВт, длина волны 532 нм,
радиус светового кольца 35 мкм)

Фотонно-кристаллические структуры МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ НАНОСТЕРЖНИ



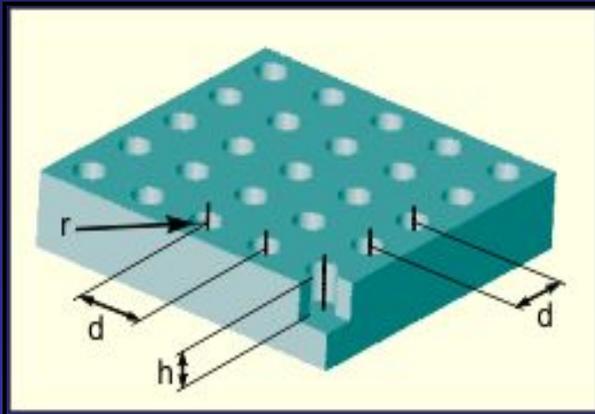
Диэлектрический цилиндр ($\epsilon = 2,25$) с диаметром 1 мкм, заполнен стержнями из серебра ($\epsilon = -9,49 + 1,483i$) диаметром 5 нм, освещается светом с длиной волны – 0,5 мкм.

Выбором величины периода решетки стержней, можно добиться единичного значения реальной части диэлектрической проницаемости и обеспечить минимальную дифракцию света на цилиндре

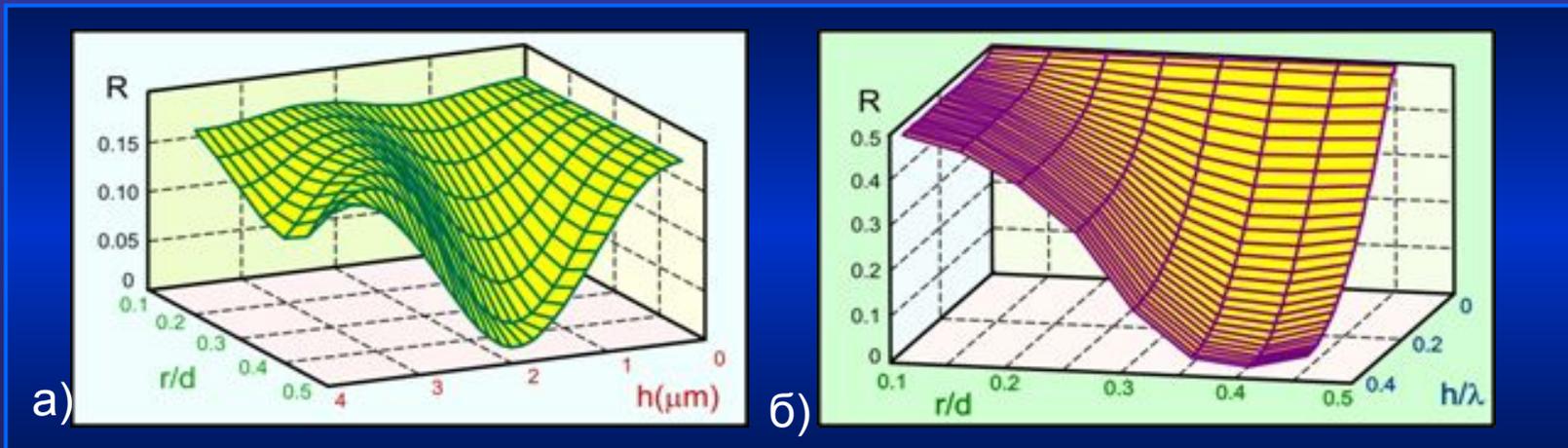


дифракция TE волны на металлическом (A), диэлектрическом микро-цилиндре (B) и на микро-цилиндре с металлическими нано-стержнями диаметром 5 нм (C)

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ДВУМЕРНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СУБВОЛНОВЫХ СТРУКТУР

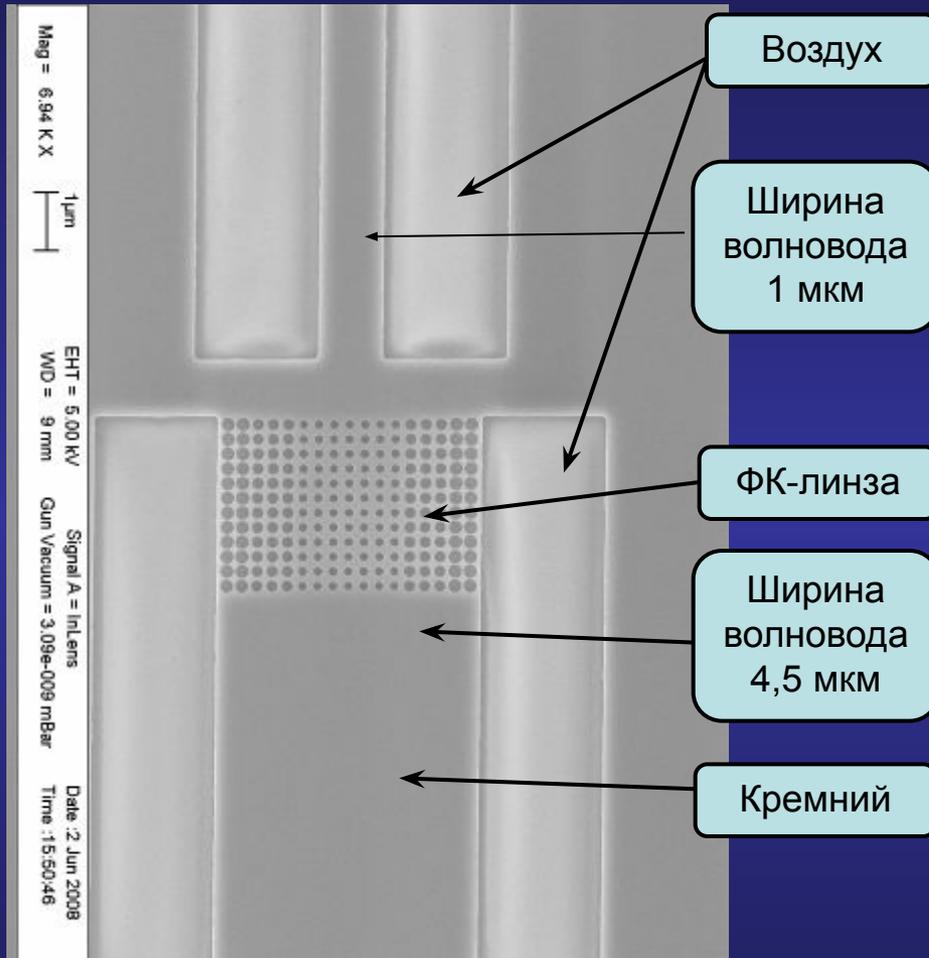


Пример расчета субволновой бинарной антиотражающей структуры: коэффициент отражения R как функция параметров рельефа h и r для субволновой ZnSe-решетки при $d=0.85\lambda$, $\lambda = 10.6$ мкм, $\varepsilon=5.76$ (а) и вольфрамовой решетки: период $d = 0,85 \lambda$, длина волны $\lambda = 0,55$ мкм, диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 4,8 + 19,11i$ (б).

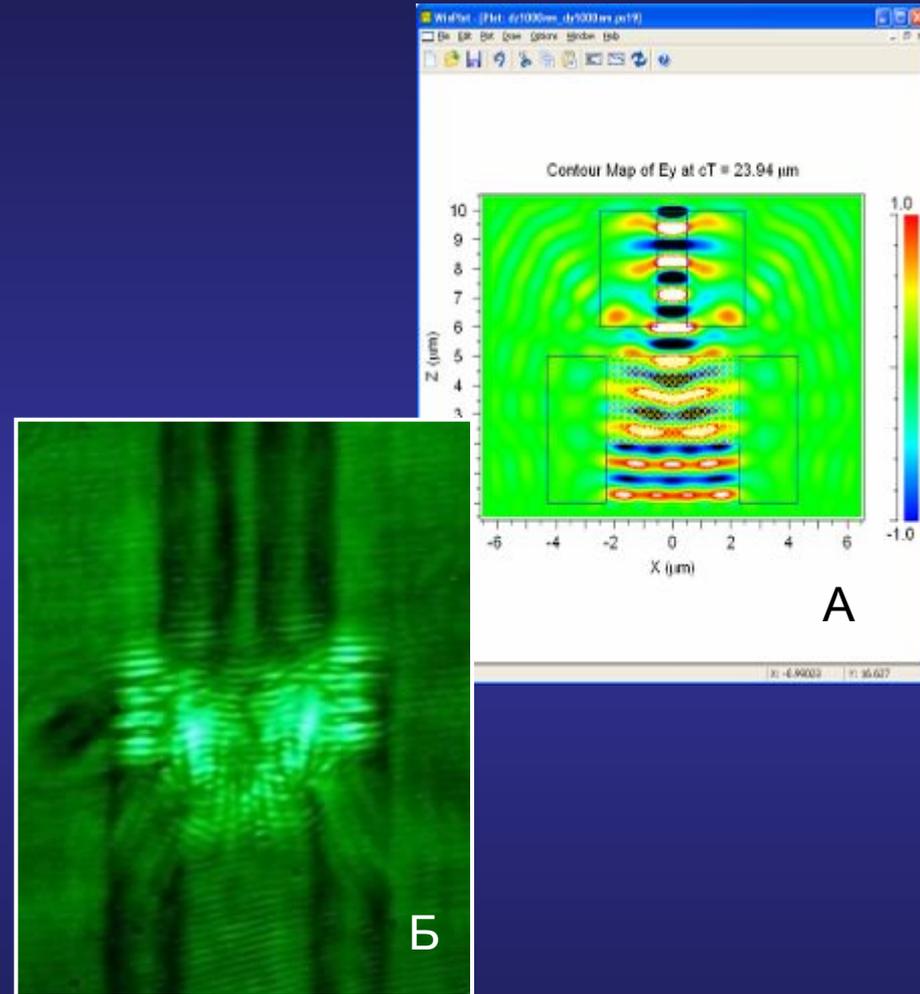


Из графиков видно, что при определенных параметрах коэффициент отражения R равен нулю. Причем для вольфрама коэффициент отражения без решетки был равен 0.5, а для ZnSe – 0.15 (при нормальном падении света).

ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ ЛИНЗА В ВОЛНОВОДЕ



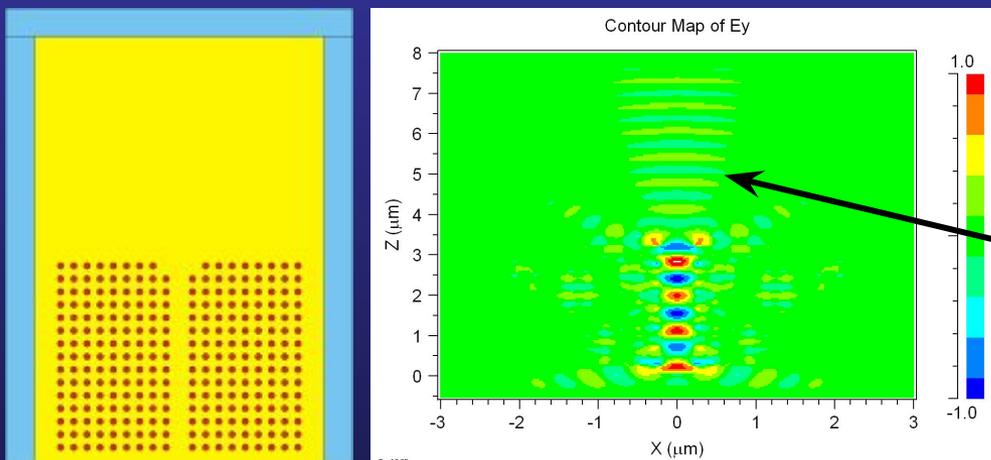
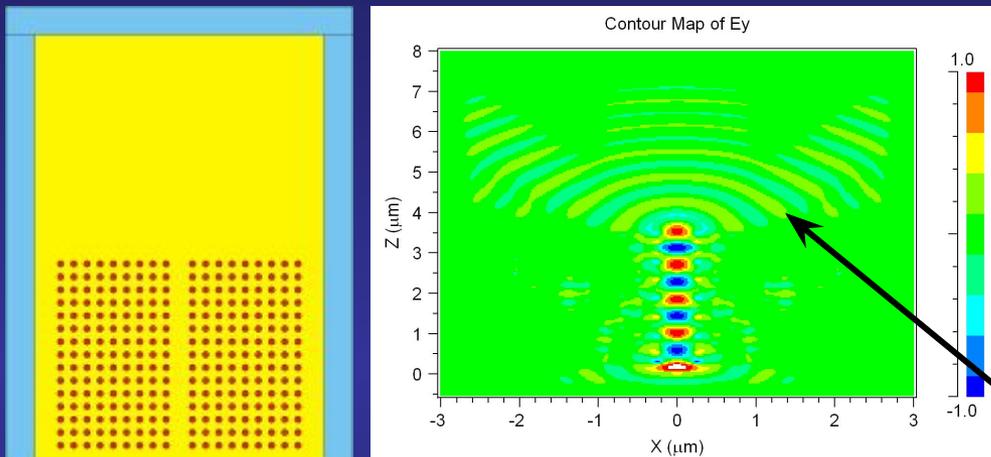
Вид сверху (в СЭМ) 2D ФК-линза и волноводы в пленке кремния ($n=2,83$) для длины волны 1,55 мкм. Диаметр отверстий линзы варьируется от 160 нм до 200 нм.



Моделирование (А) и эксперимент (Б) по прохождению света через два волновода разной толщины, связанных ФК-линзой

Фотонно-кристаллические структуры ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ КОЛЛИМАТОР

Диэлектрические наностержни в воздухе
(фотонно-кристаллический волновод)



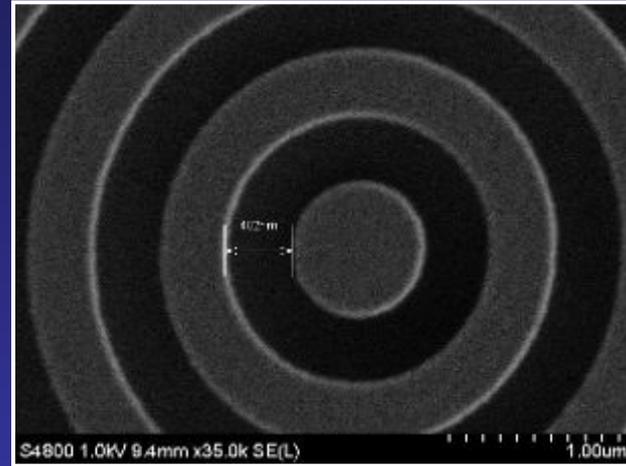
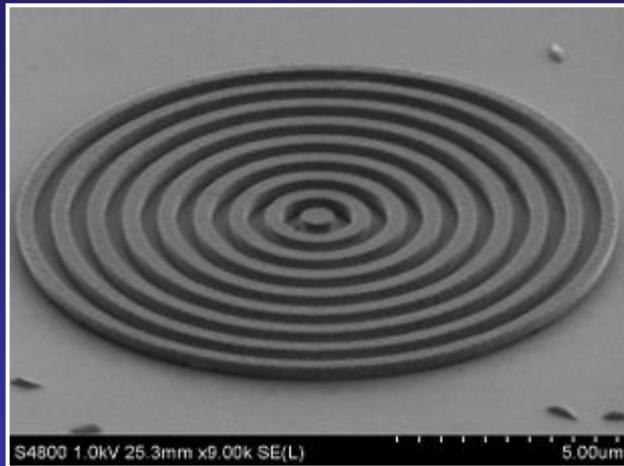
Длина волны: $\lambda=633$ нм
Диаметр стержней: $d=114$ нм
Период решетки: $a=228$ нм
Показатель преломления кремния: $n=3,38$
Ширина ФК-волновода: 342 нм

Полный угол расходимости излучения на выходе из волновода 140 градусов

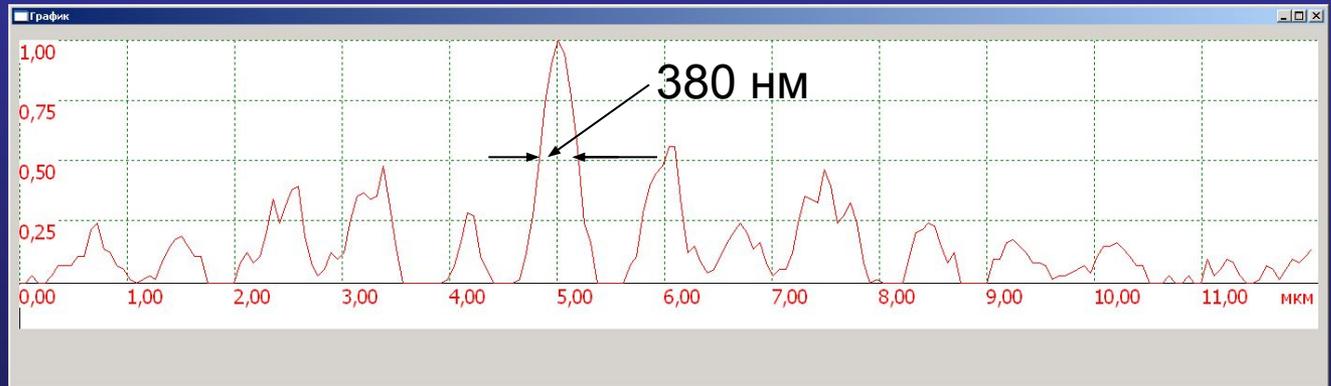
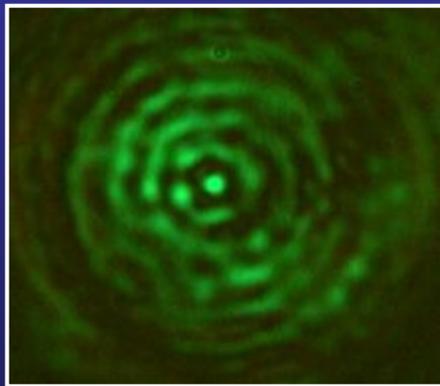
Устранение двух стержней на выходе волновода приводит к уменьшению расходимости до 30 градусов

FDTD-метод, реализованный
в программе FullWAVE 6.0

Фотонно-кристаллические структуры ОСТРАЯ ФОКУСИРОВКА СВЕТА В БЛИЖНЕМ ПОЛЕ МИКРОАКСИКОНА

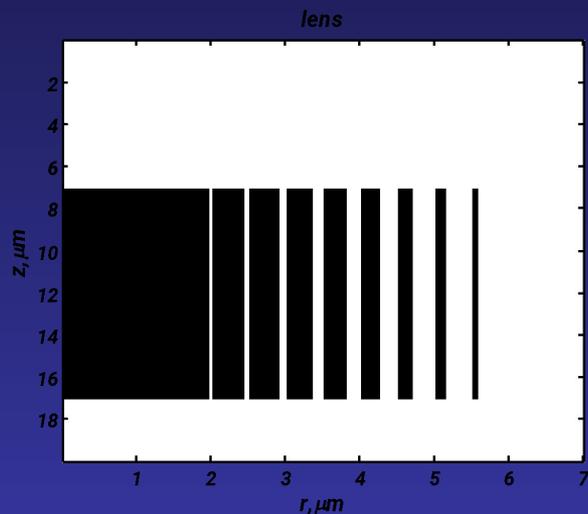


Бинарный микроаксикон с периодом 800 нм и высотой рельефа 465 нм, изготовленный по технологии электронной литографии на резисте ZEP520A на стекле

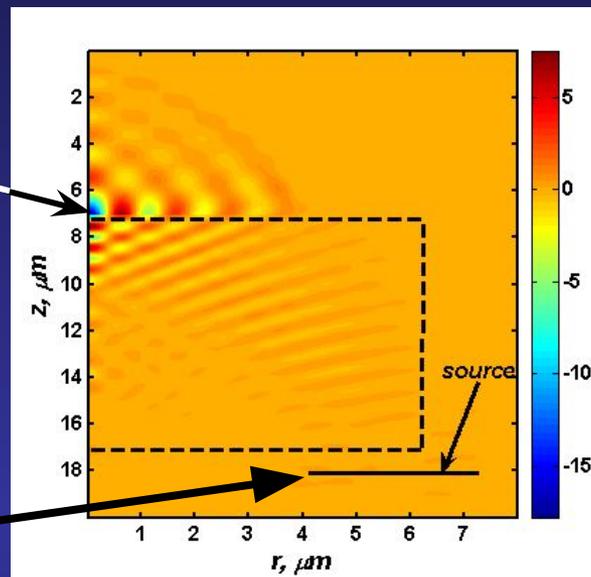


Картина дифракции в ближнем поле (на расстоянии 3 мкм аксикона) для линейно поляризованного лазерного света с длиной волны 532 нм. Диаметр центрально пятна по полуспаду интенсивности равен 380 нм, что составляет 0,7 от длины волны.

ОСТРАЯ ФОКУСИРОВКА СВЕТА С ПОМОЩЬЮ БИНАРНОЙ МИКРОЛИНЗЫ МИКАЭЛЯНА



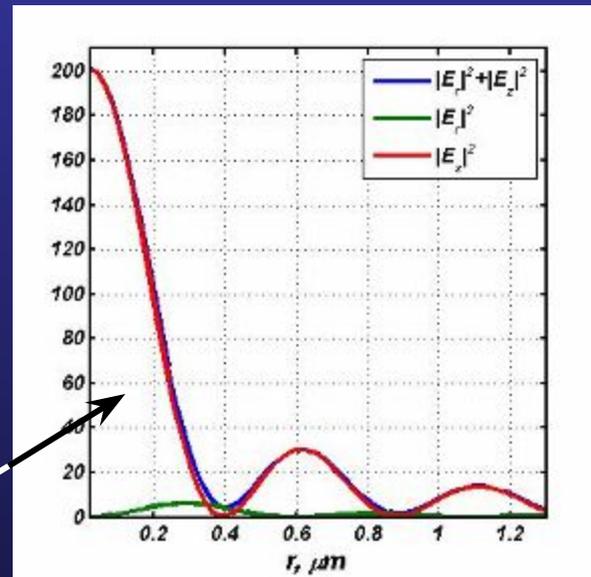
Распределение интенсивности: фокус находится сразу за поверхностью линзы (длина волны $\lambda=1$ мкм)



кольцевой пучок света

Радиальное сечение 3D бинарной линзы (радиус апертуры=6 мкм, толщина=10 мкм, $n=1,5$) фокусирующей кольцевой гауссовый пучок радиальной поляризации в фокальное пятно диаметром $FWHM=0,4\lambda$ и площадью $HMA=0,126(\lambda \times \lambda)$, где $FWHM$ - full width of half maximum, HMA – half maximum area.

Заметим, что дифракционный предел, определяемый диском Эйри $2J_1(x)/x$, имеет диаметр $FWHM=0,51\lambda$ и площадь $HMA=0,204(\lambda \times \lambda)$.

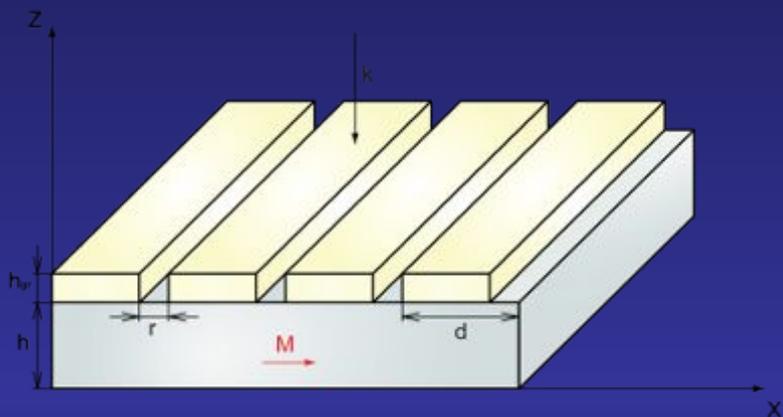


Радиальное распределение интенсивности в фокусе

Управление магнитооптическими гетеронаноструктурами

РЕЗОНАНСНЫЕ МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ

(совм. результат с ИОФ РАН и МГУ)

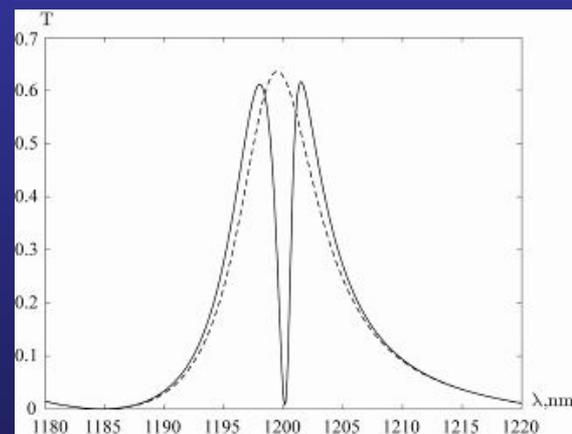
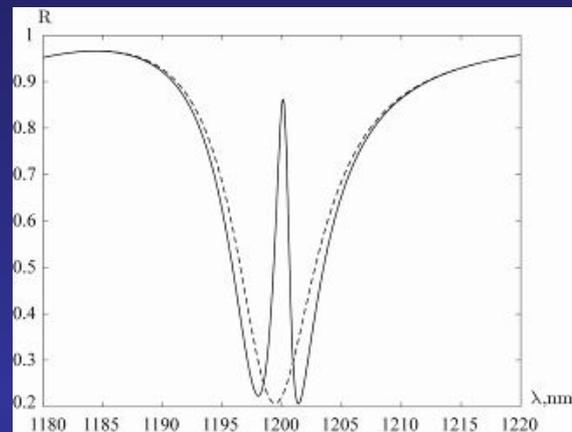


Структура состоит из дифракционной решётки (Au) и намагниченного в плоскости диэлектрического слоя (редкоземельный феррит-гранат). Характерные размеры $r, h_{gr} \sim 50$ нм.

Эффект состоит в резонансной зависимости пропускания (отражения) структуры от величины намагниченности.

Практические применения: транспаранты и датчики, основанные на модуляции интенсивности (поляризации) света при изменении внешнего магнитного поля.

1. *Optics Letters*, 2009, 34 (4), pp. 398-400.
2. *Физика твердого тела*, 2009, 51(8), с. 1562-1567.



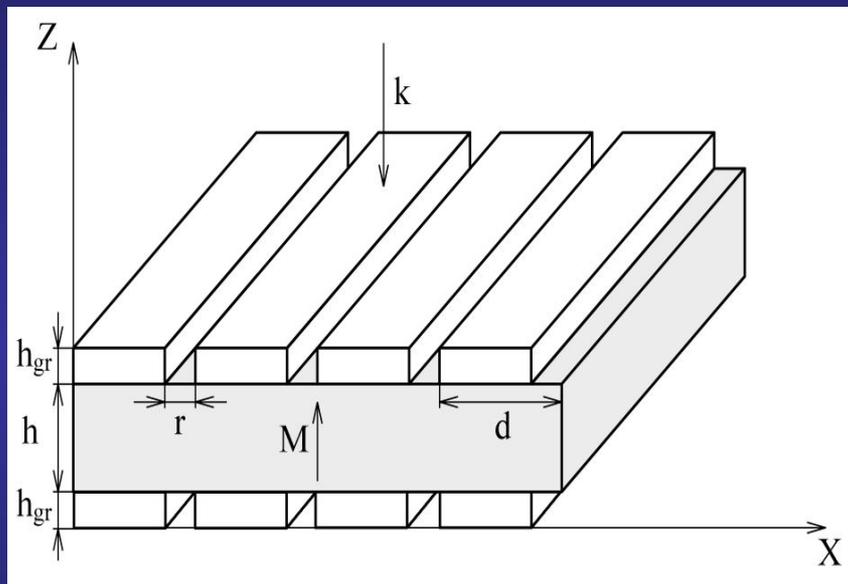
Спектры отражения $R(\lambda)$ и пропускания $T(\lambda)$ при намагниченном слое (сплошная линия) и при отсутствии намагниченности (пунктир)

Управление магнитооптическими гетеронаноструктурами

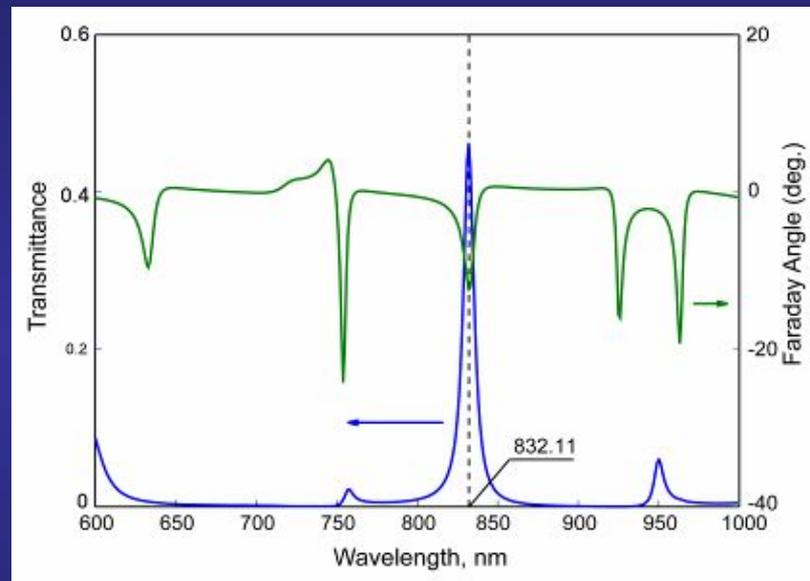
ЭКСТРАОРДИНАРНОЕ ВРАЩЕНИЕ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ В МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ

(совм. результат с ИОФ РАН и МГУ)

Эффект состоит в резонансном вращении плоскости поляризации в структурах, состоящих из перфорированных металлических и однородных слоев намагниченных в полярной геометрии.



Структура состоит из 2-х дифракционных решёток (Au) и намагниченного диэлектрического слоя (редкоземельный феррит-гранат).
Характерные размеры r , $h_{gr} \sim 100$ нм.



Спектры пропускания и угла Фарадея.

При $\lambda = 832$ нм имеется острый пик пропускания ($>45\%$), совмещенный с резонансом угла Фарадея (-13°). Угол Фарадея в 17 раз больше, чем для однородного магнитного слоя такой же толщины (830 нм).

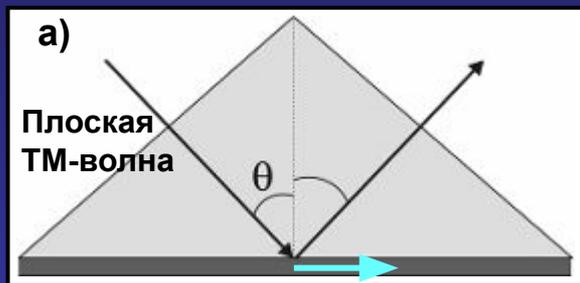
Практические применения: датчики, модуляция поляризации света.

1. Physical Review Letters, 2007, 98, pp. 077401(4).
2. Компьютерная оптика, 2007, 31(1), с. 4-8.

Дифракционные гетероструктуры в наноплазмонике

ВОЗБУЖДЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН (ПАЗМОНОВ)

Поверхностная электромагнитная волна (ПЭВ) или поверхностный плазмон – электромагнитная волна, распространяющаяся параллельно границе металл-диэлектрик (среды должны иметь различные знаки диэлектрической проницаемости).



Константа распространения ПЭВ

$$k_{sp} = k_0 \sqrt{\epsilon_2 \epsilon_3 / (\epsilon_2 + \epsilon_3)}$$

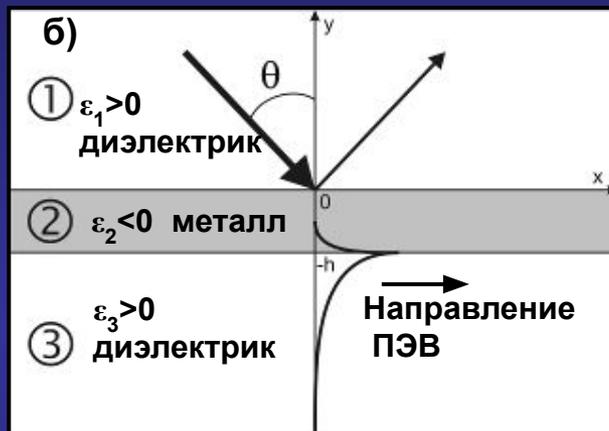
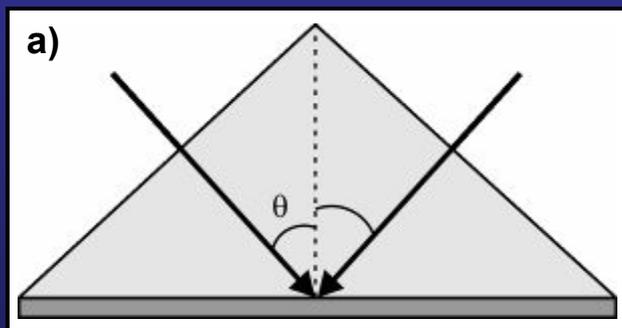


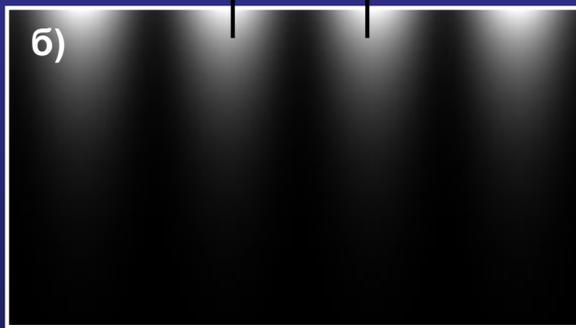
Схема возбуждения ПЭВ (а) и эквивалентная модель трехслойной среды (б).

Условие возбуждения

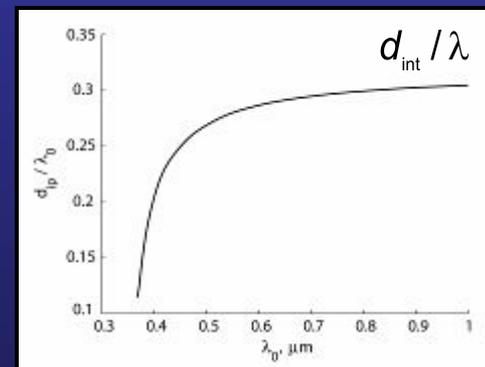
$$k_0 \sqrt{\epsilon_1} \sin \theta = \text{Re}(k_{sp})$$



а) Возбуждение 2-х ПЭВ



б) Формируемая интерференционная картина (ИК)
Доля энергии ПЭВ >90%

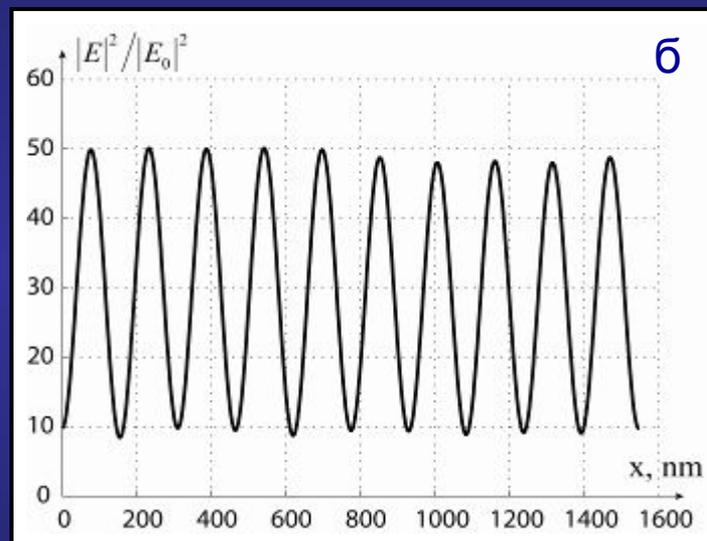
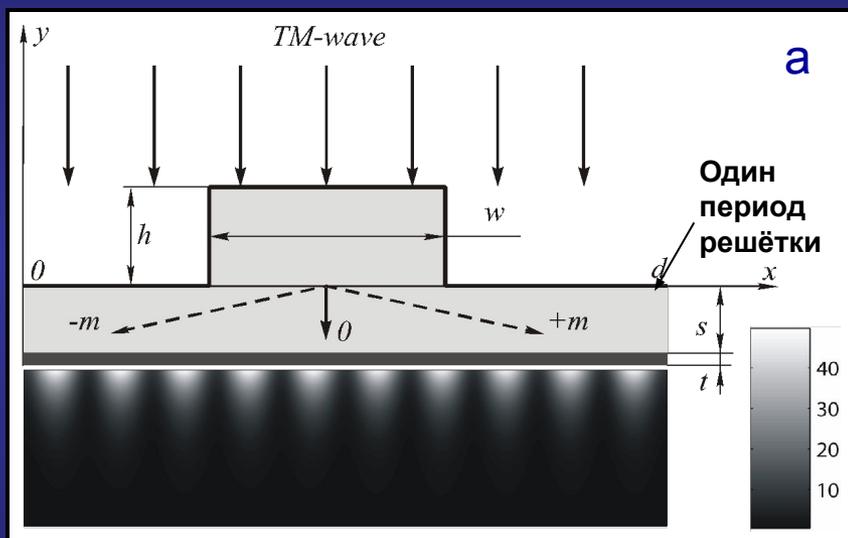


Отношение периода ИК к длине волны для границы «Ag – диэлектрик ($\epsilon=2,56$)»

Дифракционные гетероструктуры в наноплазмонике

ФОРМИРОВАНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ КАРТИН ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Система состоит из дифракционной решетки с металлической пленкой на подложке. Решетка возбуждает порядками $-m$, $+m$ на нижней поверхности пленки две ПЭВ противоположных направлений, которые формируют интерференционную картину с периодом $d/2m$, d – период решетки.

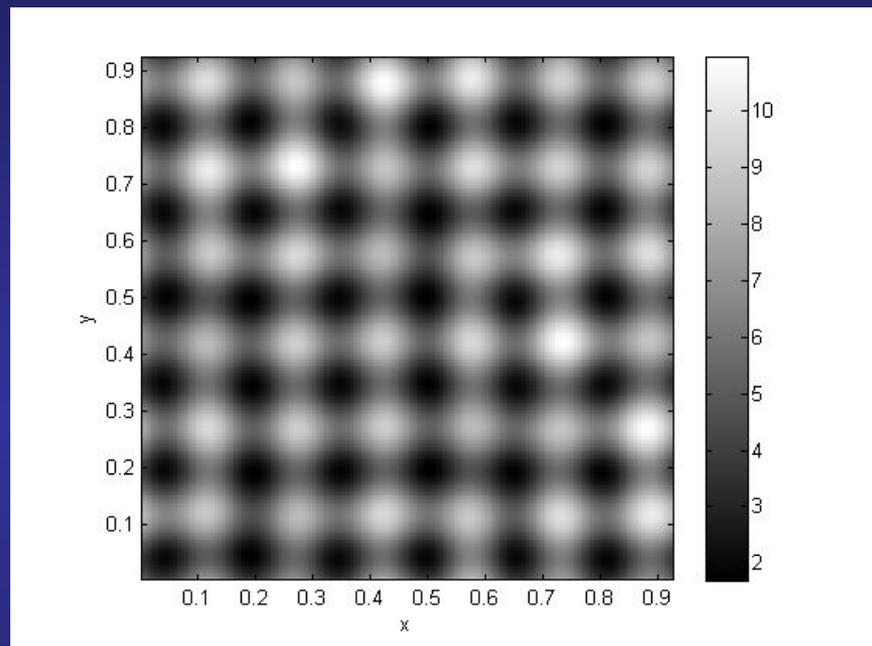


- а)** Интерференционная картина (ИК), сформированная под Ag слоем дифракционными порядками $-5, +5$ при параметрах: $\lambda = 550$ нм, $d = 1540$ нм, $h = 440$ нм, $w = 770$ нм, $\epsilon_{Ag} = -12,9 + 0,45i$, $\epsilon_{gr} = \epsilon_{sub} = 2,56$.
Период ИК $d_{int} = 154$ нм, размер ИК по оси Y – 360 нм.
- б)** Интенсивность ИК на нижней границе пленки, нормированная на интенсивность падающей ТМ-волны. Коэффициент усиления поля в пиках ИК близок к 50.

1. J. Opt. A: Pure Appl. Opt., 2007, 9, pp. 854-857.
2. J. Opt. A: Pure Appl. Opt., 2008, 10, pp. 095204-209.

Дифракционные гетероструктуры в наноплазмонике

ФОРМИРОВАНИЕ ДВУМЕРНЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ КАРТИН ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН



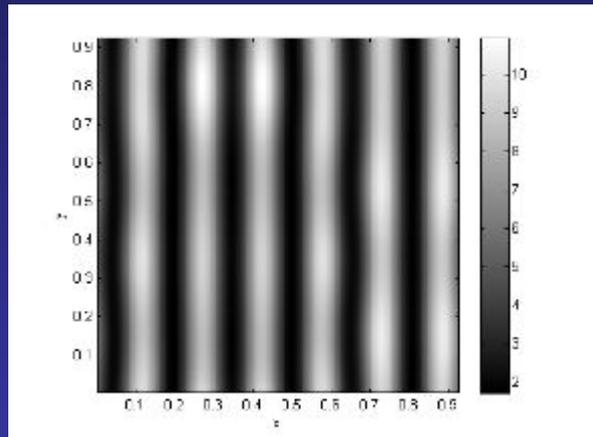
а) Трехмерная диэлектрическая бинарная дифракционная решетка ($d = 923$ нм, $\varepsilon = 2.56$, площадь квадратного отверстия – $0.26d \times 0.26d$) с Ag- пленкой ($h = 70$ нм). Структура предполагается расположенной на резисте ($\varepsilon = 2.56$).

б) Интерференционная картина, формируемая на нижней границе Ag-пленки и резиста в пределах периода при длине волны 550 нм.

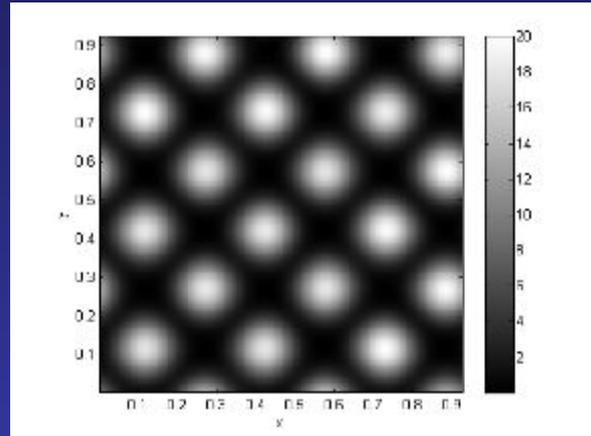
Интерференционная картина (ИК) формируется ПЭВ, возбужденными порядками $(-3,0)$, $(+3,0)$, $(0,-3)$, $(0,+3)$. Период ИК $d_{\text{int}} = 154$ нм в 6 раз меньше периода решетки. Интенсивность в максимумах ИК на порядок больше интенсивности падающей на решетку волны.

Дифракционные гетероструктуры в наноплазмонике

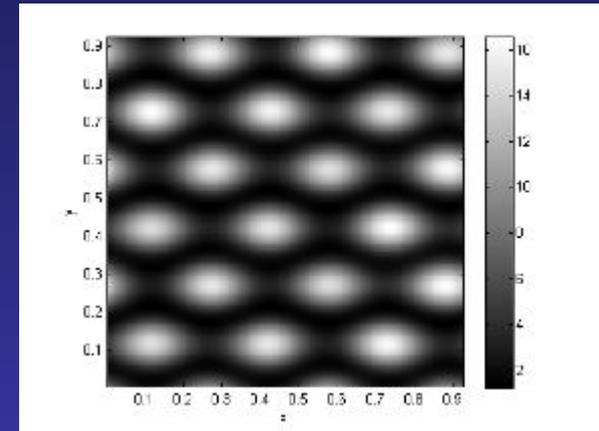
УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ КАРТИНЫ ЗА СЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПАДАЮЩЕЙ ВОЛНЫ



Линейная ТМ-
поляризация

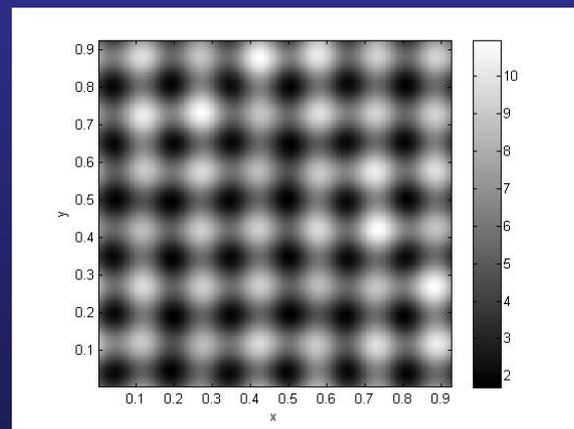


Линейная поляризация
(50% TE & 50% TM)

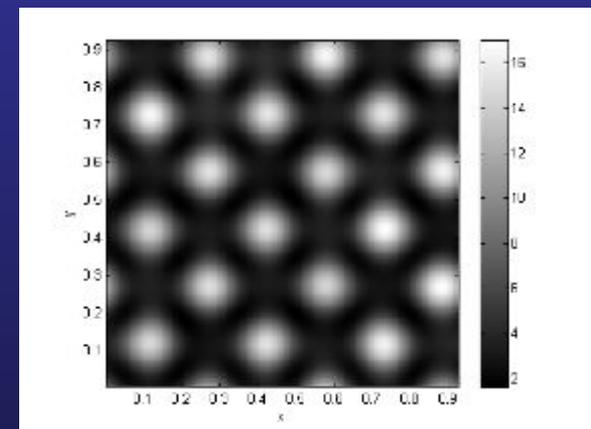


Линейная поляризация
(10% TE & 90% TM)

Интерференционные картины (ИК), формируемые на нижней границе Ag-пленки в пределах периода, при различных поляризациях падающей волны (ИК формируются 4 ПЭВ).



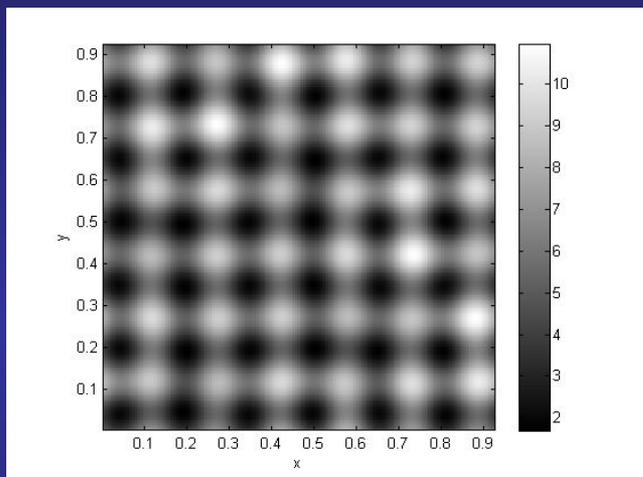
Круговая поляризация



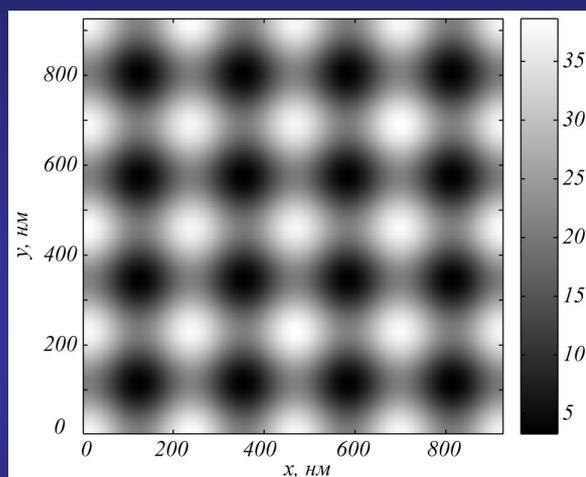
Эллиптическая поляризация

Дифракционные гетероструктуры в наноплазмонике

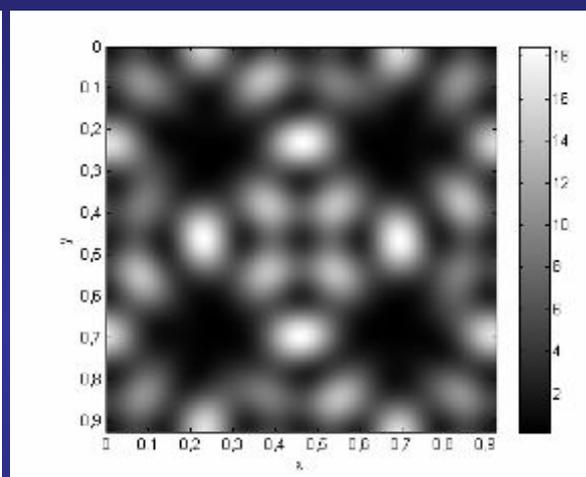
УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ КАРТИНЫ ЗА СЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ПАДАЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ



$\lambda = 550$ нм
(4 ПЭВ, период ИК-154нм)



$\lambda = 774$ нм
(4 ПЭВ, период ИК-308 нм)

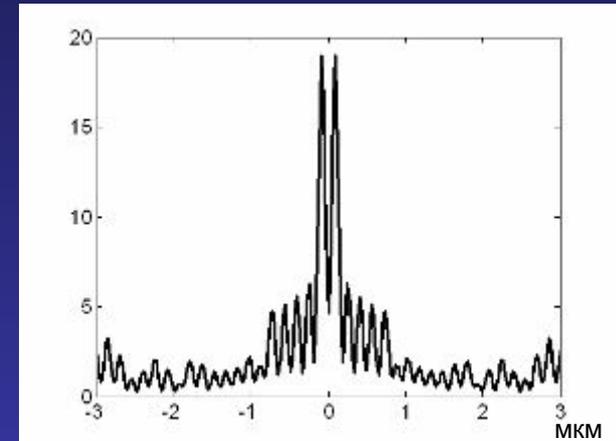
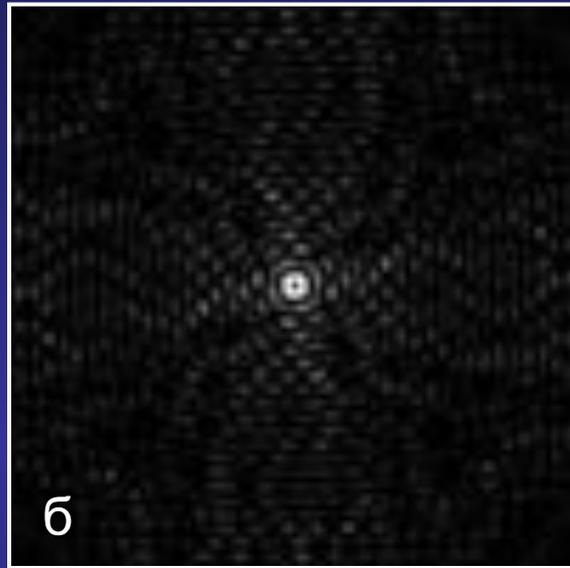
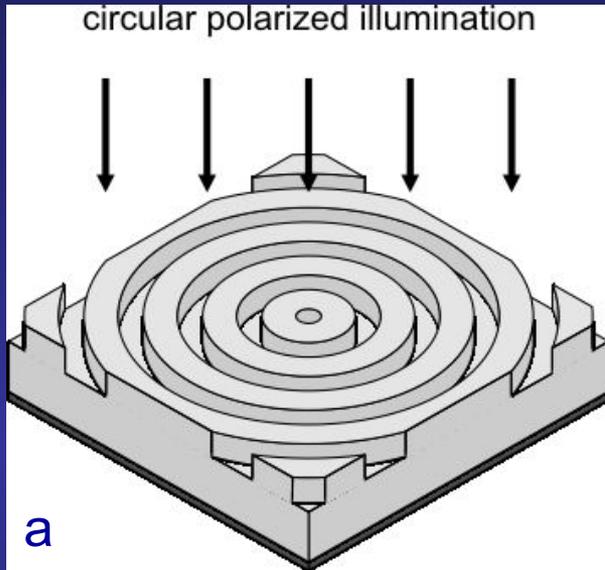


$\lambda = 532$ нм
(8 ПЭВ)

Интерференционные картины (ИК), формируемые на нижней границе Ag-пленки в пределах периода, при различных длинах волн.

Поляризация падающей волны – круговая.

ЛИНЗА ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН с фокусом на поверхности металлического слоя



а) Линза состоит из дифракционного аксикона с металлической пленкой на подложке. Аксикон возбуждает радиальные ПЭВ, собирающиеся в центре на поверхности металлической пленки.

б) Интенсивность поля на поверхности Ag пленки ($\epsilon = -12,9 + 0,45i$), рассчитанная при параметрах: $\lambda = 550$ нм, период аксикона - 310 нм, диаметр аксикона - 6,2 мкм, высота колец - 550 нм, ширина колец - 170 нм, диэл. проницаемости материала аксикона - 2,56.

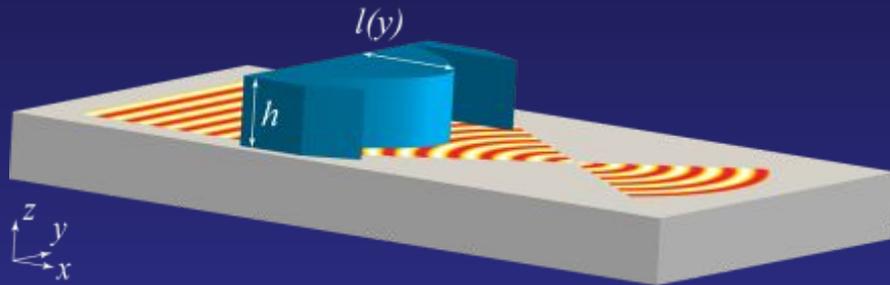
в) Распределение интенсивности по радиусу.

Диаметр кольцевого «фокального пятна» - 310 нм. Максимум интенсивности в «фокусе» в 19 раз выше интенсивности падающей волны.

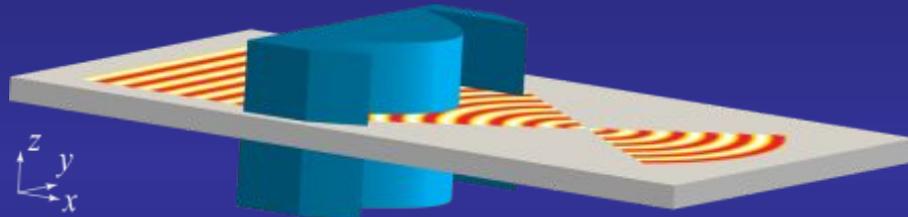
В центре фокуса - темное пятно диаметром $\sim \lambda/10$. Темное пятно вызвано разным знаком компонент E_z для ПЭВ, приходящих в фокус в противоположных направлениях.

Достигается субволновая фокусировка.

ФОКУСИРОВКА ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН С ПОМОЩЬЮ ДООЭ



ДООЭ выполнен в виде диэлектрической дифракционной структуры расположенной на границе распространения ПЭВ.

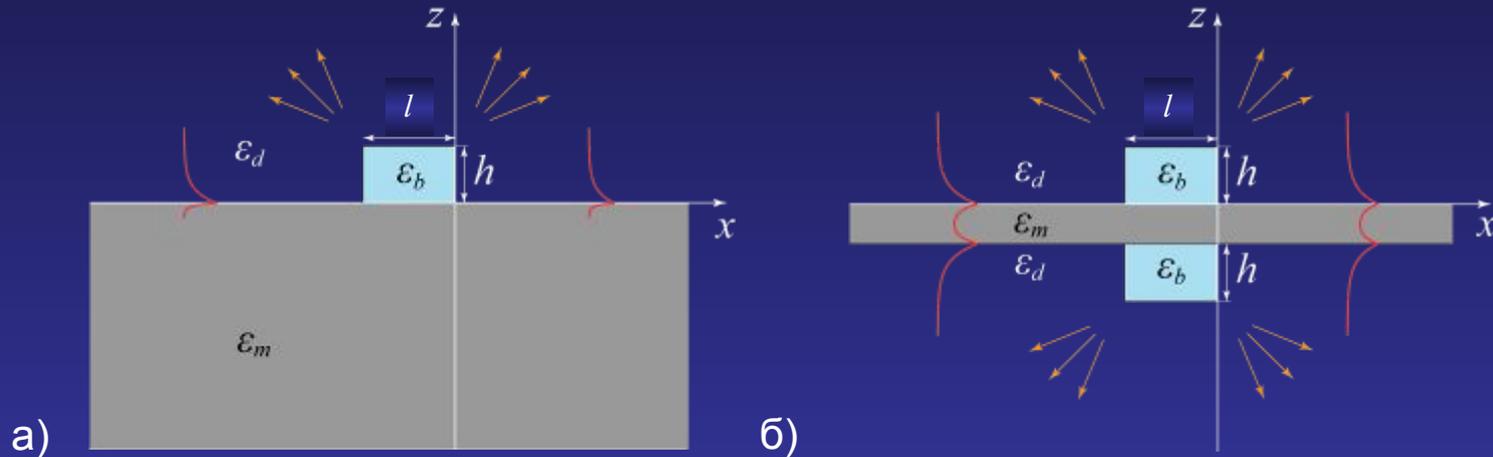


ДООЭ выполнен в виде симметричной дифракционной структуры, расположенной на обеих сторонах плазмонного волновода (тонкой металлической пленки).

Модель дифракции ПЭВ: Расчет ЭМ поля непосредственно за ДООЭ основан на строгом решении базовой задачи дифракции ПЭВ на диэлектрической ступеньке. Длина l и высота h ступеньки совпадают с длиной и высотой микрорельефа ДООЭ в рассматриваемой точке. Для описания дальнейшего распространения и дифракции ПЭВ используется интеграл Кирхгофа для ПЭВ.

Метод расчета ДООЭ: Расчет основан на модуляции фазы ПЭВ за счет изменения высоты и длины дифракционного микрорельефа. Функция фазовой модуляции рассчитывается с использованием методов скалярной теории дифракции.

БАЗОВАЯ ЗАДАЧА ДИФРАКЦИИ И ИНТЕГРАЛ КИРХГОФА



Геометрия прохождения ПЭВ через диэлектрическую ступеньку, расположенную на границе раздела (а) и по обеим сторонам металлической пленки (б)

($\epsilon_m, \epsilon_d, \epsilon_b$ – диэлектрические проницаемости металла, диэлектрика и материала ступеньки).

Решение базовой задачи проводится по методу Фурье-мод для аperiodических структур (E. Silberstein, P. Lalanne, J. Hugonin, Q. Cao, *JOSA A*, 2001).

В результате многократного решения базовой задачи рассчитывается поле $H(y)$ на выходе ДОО при $x=0$. Необходимая дискретизация (число решений базовой задачи) определяется размером минимальной зоны функции фазовой модуляции). Последующее распространение поля определяется через расчет интеграла Кирхгофа для ПЭВ:

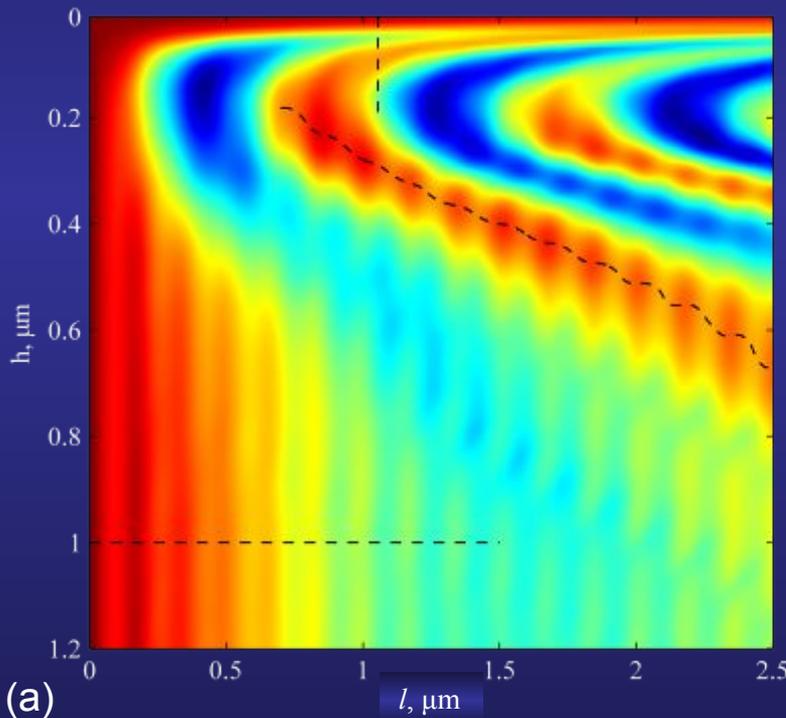
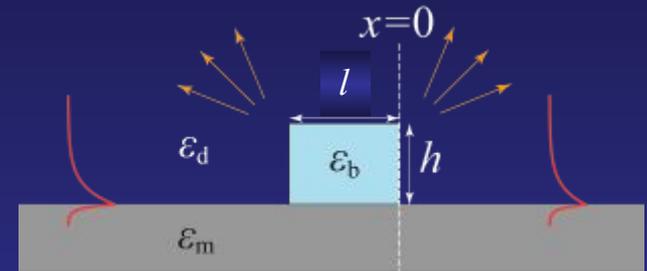
$$H(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(u) G(x, y-u) du, \quad G(x, y) = \frac{ik_{SPP}x}{2\sqrt{x^2 + y^2}} H_1^1\left(k_{SPP}\sqrt{x^2 + y^2}\right),$$

где k_{SPP} – константа распространения ПЭВ границы раздела или мет. пленки.

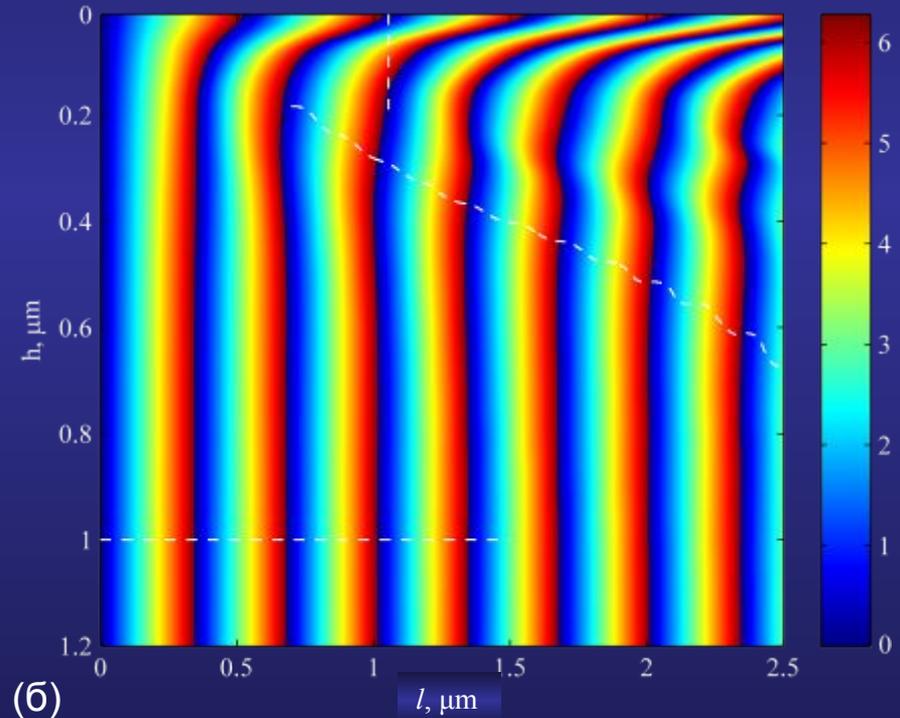
Дифракция ПЭВ на диэлектрической ступеньке

Механизмы фазовой модуляции ПЭВ:

- Изменение длины ступеньки при фиксированной высоте;
При $h > 500$ нм $\phi(h, l) \approx k_{\text{SPP},b} l$;
- Изменение высоты ступеньки при фиксированной длине;
- Совместное изменение высоты и длины ступеньки.



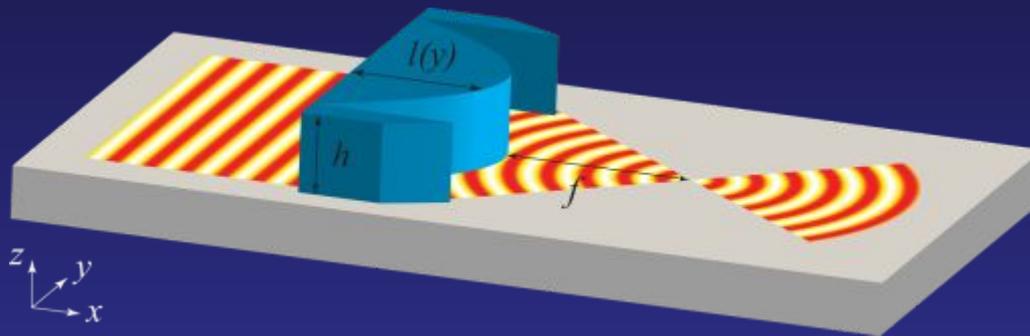
(а)



(б)

Зависимости амплитуды (а) и фазы (б) ПЭВ на выходе диэлектрической ступеньки ($x=0$), от длины и высоты ступеньки при $\lambda_0=550$ нм, $\varepsilon_m=-13.68+0.44i$ (Ag), $\varepsilon_d=1$ ($\lambda_{\text{SPP}}=529.5$ нм), $\varepsilon_b=2.25$.

ЛИНЗЫ ПЭВ : модуляция за счет изменения длины микрорельефа



Фазовая функция

$$\varphi(y) = -\text{Re}(k_{SPP}) \sqrt{f^2 + y^2} + \varphi_0$$

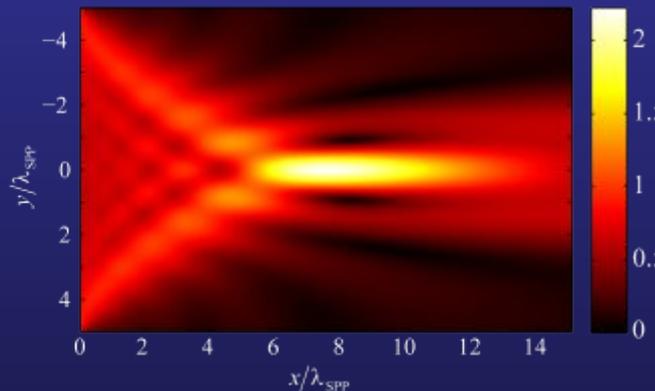
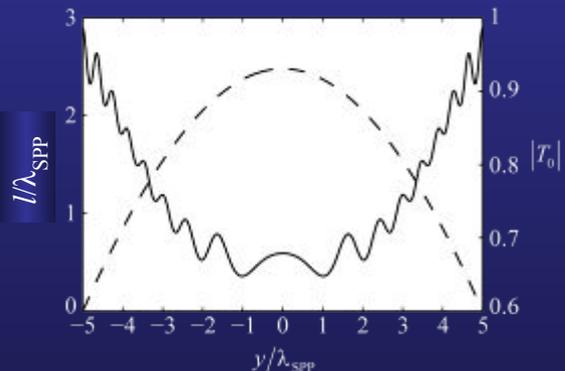
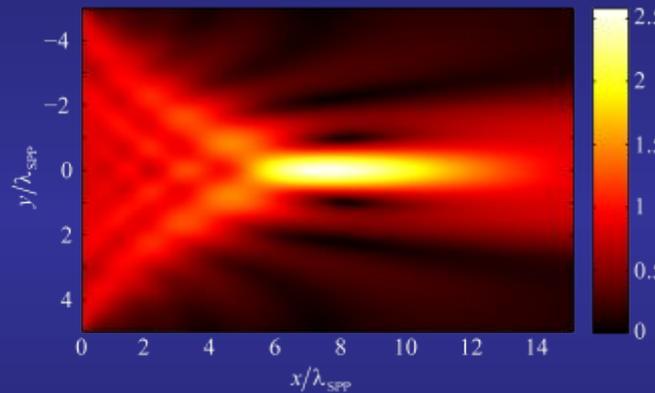
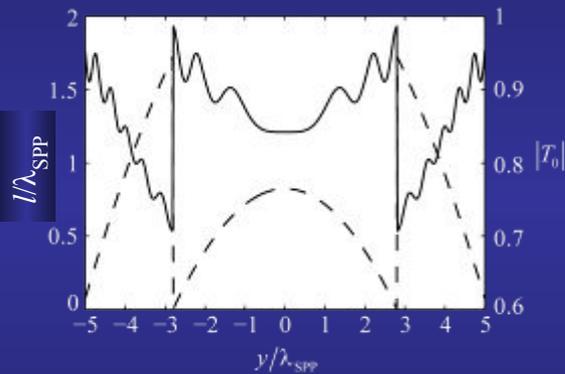
Длина микрорельефа

$$l(y) = \frac{\varphi(y)}{\text{Re}(k_{SPP,b}) - \text{Re}(k_{SPP})}$$

Параметры: $h=1000$ nm,
 $2a=10\lambda_{SPP}$, $f=8\lambda_{SPP}$.

Дифракционная линза:
 эффективность - 68.5%,
 $l_{\max}=923$ nm.

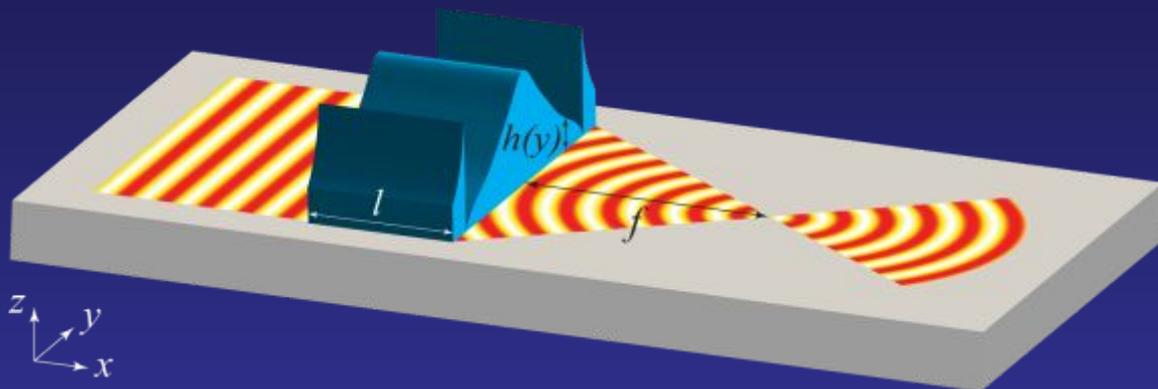
Параболическая линза:
 эффективность - 53.5%,
 $l_{\max}=1312$ nm.



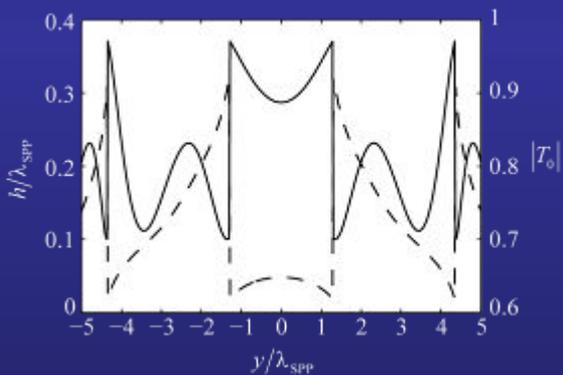
Длина микрорельефа (штриховая линия) и функция пропускания

Сформированные распределения модуля ТМ компоненты маг. поля

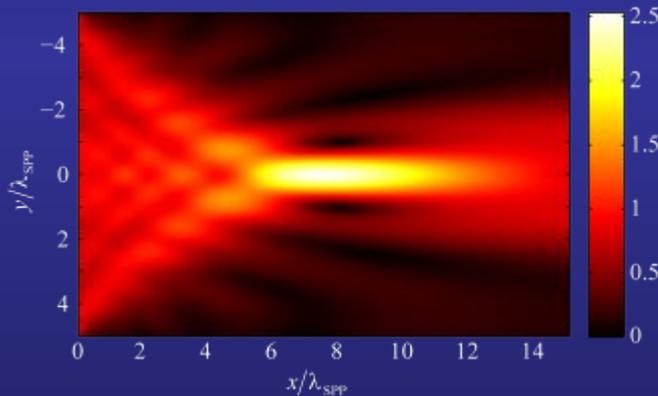
ЛИНЗА ДЛЯ ПЭВ: модуляция за счет изменения высоты микрорельефа



Параметры: $l=1055$ нм,
 $2a=10\lambda_{\text{SPP}}$, $f=8\lambda_{\text{SPP}}$.



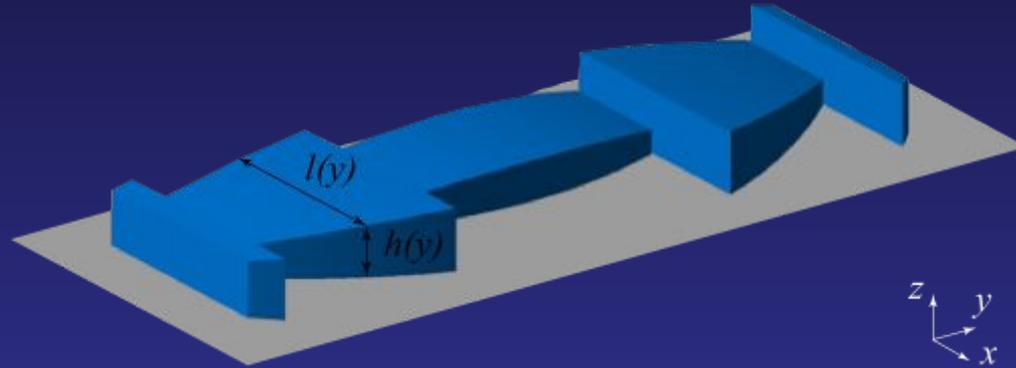
Длина микрорельефа (штриховая линия) и функция пропускания



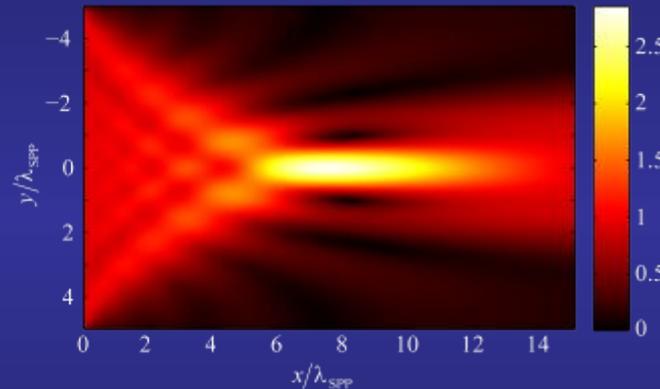
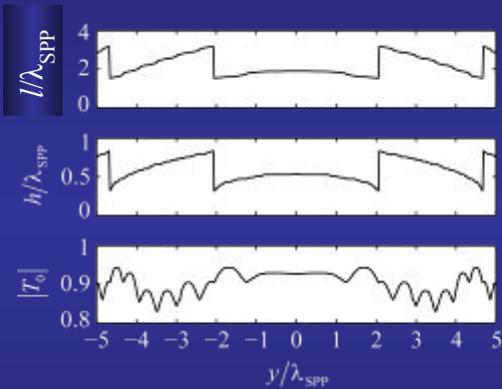
Сформированные распределения модуля ТМ компоненты маг. поля

Эффективность: 63.9%,
 $h_{\text{min}}=10$ нм,
 $h_{\text{max}}=180$ нм.

ЛИНЗЫ ДЛЯ ПЭВ: изменяющиеся длина и высота микрорельефа

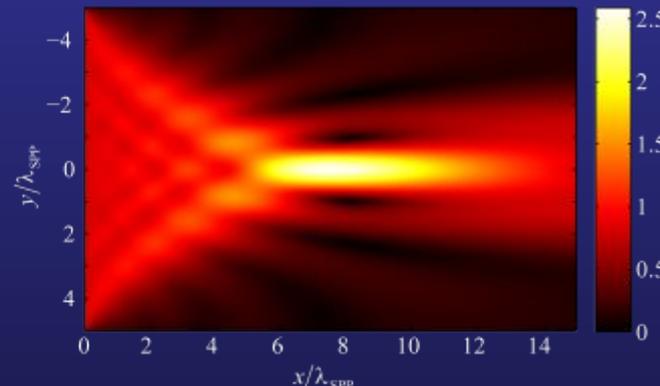
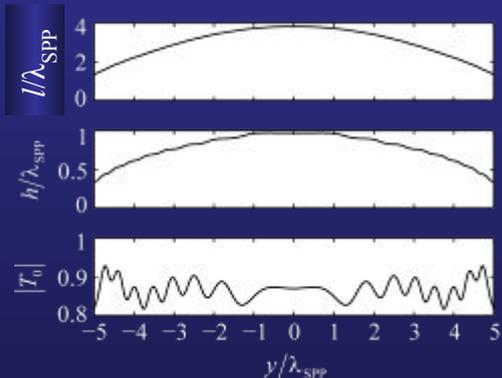


Параметры: $2a=10\lambda_{\text{SPP}}$,
 $f=8\lambda_{\text{SPP}}$.



ДОЭ

Эффективность: 79.4%,
 $l_{\min}=816$ нм, $l_{\max}=1675$ нм,
 $h_{\min}=169$ нм, $h_{\max}=440$ нм.



«Толстая линза»

Эффективность: 70.8%,
 $l_{\min}=700$ нм, $l_{\max}=2021$ нм,
 $h_{\min}=182$ нм, $h_{\max}=513$ нм.

Длина, высота микрорельефа
и функция пропускания

Сформированные распределения
модуля ТМ компоненты маг. поля

Многофокусные линзы ПЭВ: модуляция за счет изменения длины

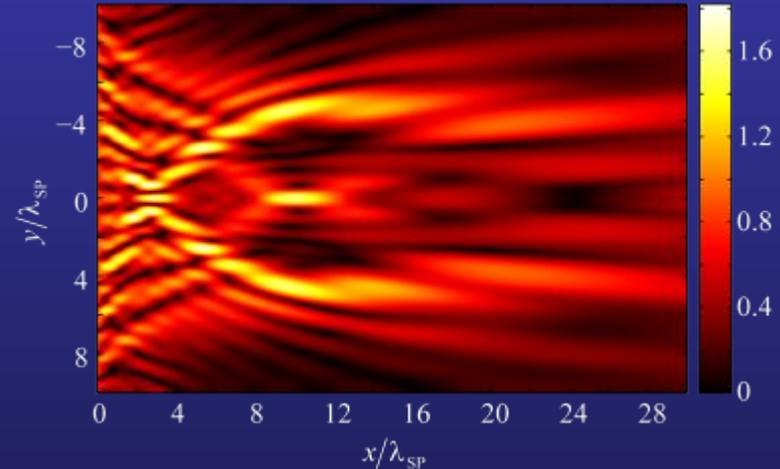
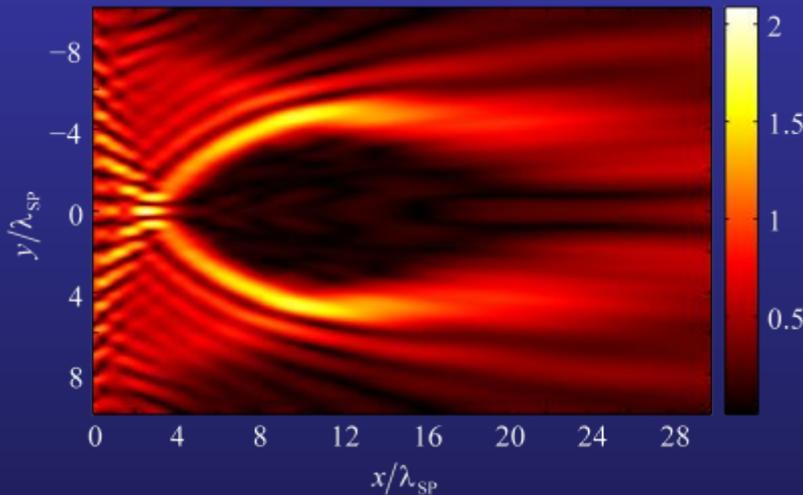
Функция фазовой модуляции соответствует суперпозиции фазовой функции линзы и N -порядковой дифракционной решетки:

$$\varphi(y) = \text{mod}_{2\pi} \left(-\text{Re}(k_{\text{SPP}}) \sqrt{y^2 + f^2} + \varphi_{\text{gr},N}(y) \right)$$

Фазовые функции дифракционных решеток с 2-мя и 3-мя основными порядками:

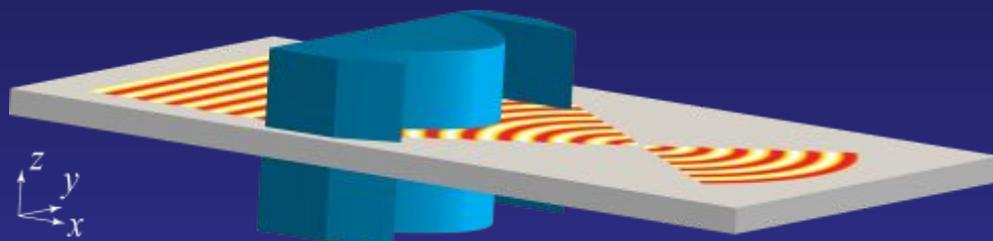
$$\varphi_{\text{gr},2}(y) = \begin{cases} 0, & y \in [0, d/2), \\ \pi, & y \in [d/2, d), \end{cases} \quad \varphi_{\text{gr},3}(y) = \begin{cases} 0, & y \in [0, d/2), \\ 2\arctg(\pi/2), & y \in [d/2, d), \end{cases}$$

Длина микрорельефа:
$$l(y) = \frac{\varphi(y)}{\text{Re}(k_{\text{SPP},b}) - \text{Re}(k_{\text{SPP}})}$$



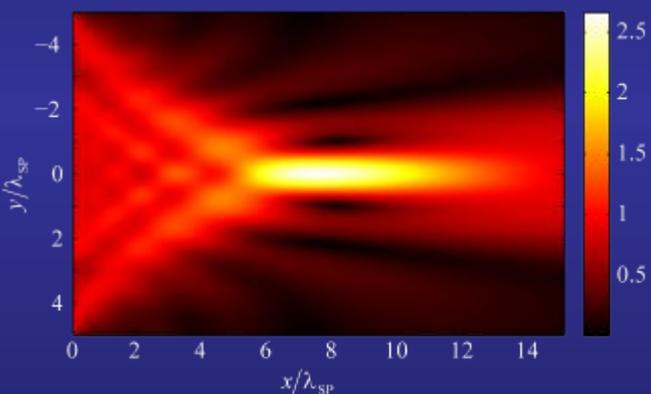
Распределения модуля ТМ-компоненты магнитного поля для двухфокусной и трехфокусной линз при параметрах: $h=1000$ нм, $2a=20\lambda_{\text{SPP}}$, $f=10\lambda_{\text{SPP}}$, $d=2.5\lambda_{\text{SPP}}$.

Линзы для ПЭВ, распространяющихся в металлической пленке: модуляция за счет изменения длины микрорельефа

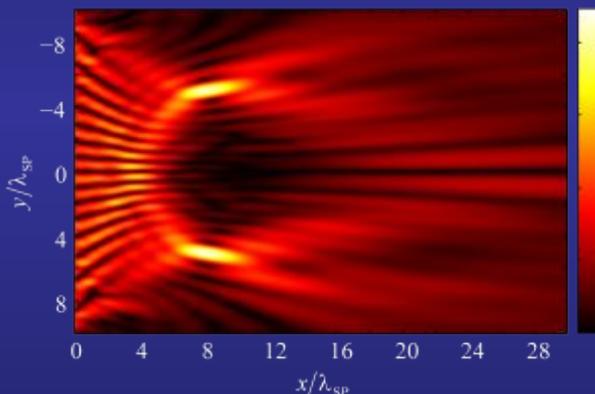


Длина микрорельефа

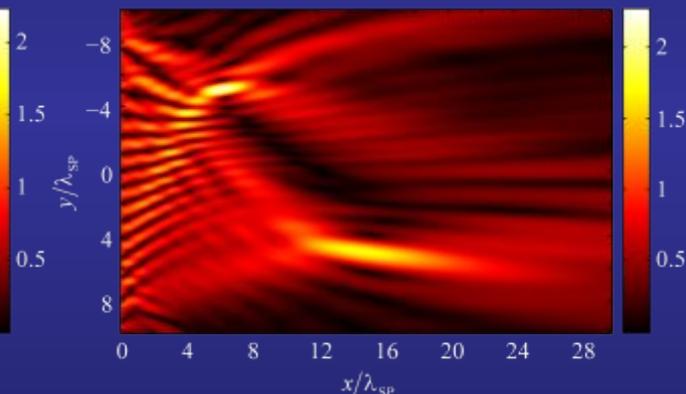
$$l(y) = \frac{\varphi(y)}{\operatorname{Re}(k_{\text{LRSP},b}) - \operatorname{Re}(k_{\text{LRSP}})}$$



Распределение модуля ТМ компоненты маг. поля для линзы ($h=1000 \text{ nm}$, $2a=10\lambda_{\text{LRSP}}$, $f=8\lambda_{\text{LRSP}}$)



Сформированные распределения модуля ТМ компоненты маг. поля для двухфокусных линз ($h=1000 \text{ nm}$, $2a=10\lambda_{\text{LRSP}}$)



$$\varphi(y) = \operatorname{mod}_{2\pi} \left[\left(\varphi_1(y) + \varphi_2(y) \right) / 2 + \Phi \left[\operatorname{mod}_{2\pi} \left(\left(\varphi_1(y) - \varphi_2(y) \right) / 2 \right) \right] \right],$$

$$\varphi_i(y) = -\operatorname{Re}(k_{\text{LRSP}}) \sqrt{(y - y_i)^2 + f_i^2}, \quad i = 1, 2, \quad \Phi(\xi) = \begin{cases} 0, & \xi \in [0, \pi), \\ \pi, & \xi \in [\pi, 2\pi). \end{cases}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 30 лет назад школой академика А.М. Прохорова было создано и активно развивается новое научное направление – **Дифракционная компьютерная оптика (ДКО)**.

Она изучает и создает новые типы дифракционных оптических элементов (ДОЭ):

фокусаторы, компенсаторы, моданы, элементы Бессель-оптики и др.

- ДОЭ нашли широкое применение в современных оптических устройствах: **цифровых камерах; устройствах оптической памяти; проекторах; мобильных телефонах; мониторах.**

- В последние годы ДКО изучает оптические наноструктуры и явления, характерные для **Нанопластики:**

- **оптический захват и микроманипулирование,**
- **фотонные кристаллы и квазикристаллы,**
- **фотонно-кристаллические линзы,**
- **дифракционные гетеронаноструктуры,**
- **дифракционные гетероструктуры наноплазмоники,**
- **фокусировку поверхностных плазмонов;**
- **острую фокусировку лазерного света.**

