

## НАНОФОТОНИКА – МАНИПУЛИРОВАНИЕ СВЕТОМ С ПОМОЩЬЮ НАНОСТРУКТУР

Стенограмма доклада на семинаре по компьютерной оптике и обработке изображений

*В.В. Котляр<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>*Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия,*

<sup>2</sup>*Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия*

### *Аннотация*

Приводятся некоторые интересные результаты по нанофотонике, полученные в 2004-2008 годах ведущими научными группами. Показаны различные варианты локализации света в наноразмерных областях с помощью проволочных наносветоводов, нанорезонаторов, фотонных кристаллов. Свет при этом может быть заключен в область, размер которой в 10-15 раз меньше длины волны в вакууме.

*Ключевые слова:* нанофотоника, проволочные и щелевые световоды, фотонные кристаллы, зеркала и решетки Брегга, фотонно-кристаллические резонаторы, медленный свет, лазеры на фотонных кристаллах, метаматериалы, микроскопия ближнего поля.

Нанофотоника (НФ) – наука о свойствах светового поля, локализованного в наноразмерной области. Эта наука зародилась в 90-х годах XX-века, и уже сейчас по НФ имеется несколько монографий, в США и Европе выходят два научных журнала по НФ (слайд 2). Ежегодно проводятся международные конференции. Десятки научных групп в мире занимаются исследованиями по НФ. Лучших результатов добились следующие из них: группа по НФ из Корнельского университета (США), группа под руководством М. Нотоми из Токийского технологического института, группа по НФ из исследовательского центра ИВМ (США) и группа по фотонным кристаллам из университета города Сент-Эндрюс (Шотландия). Рассмотрим далее последние результаты исследований этих научных групп.

Если изготовить одномодовый проволочный волновод из полупроводника или металла, внутри которого имеется наноразмерный канал в виде щели (пустой или заполненный диэлектриком), то при некоторых условиях почти вся энергия световой моды может быть сосредоточена внутри этой щели. На слайде 3 показаны примеры локализации света в узкой щели внутри проволочного волновода из кремния и золота. Размер щели составляет 15-ую часть длины волны света (размер щели – 100 нм, длина волны света в вакууме – 1550 нм). На слайде 3 приведены результаты моделирования и фотография изготовленного проволочного одномодового световода из кремния (со щелью – 100 нм) на подложке из плавленного кварца (сечение световода имело размер около 600 нм).

Особенности распространения света в волноводах, созданных в результате нарушения периодической микроstructures двумерных фотонных кристаллов (ФК), объясняются с помощью фотонной запрещенной зоны (ФЗЗ). ФЗЗ – это полоса частот (или длин волн), которые не проходят через ФК. Нарушение периодичности микроstructures ФК приводит к появлению «разрешенного состояния» в ФЗЗ. На слайде 4 приведены фотографии синтезированных ФК и их ФЗЗ. Ширина такой ФЗЗ около 27 нм. Если осветить ФК-волновод с помощью короткого светового импульса с центральной длиной волны, лежащей на краю ФЗЗ, то такой импульс света может распространяться с групповой скоростью

в 90 раз (и более) медленнее, чем скорость света в вакууме. Хотя скорость света в материале волновода обычно в 2-3 раза меньше скорости света в вакууме. Это связано с аномально большой дисперсией групповой скорости для импульса света, центральная длина волны которого лежит на краю ФЗЗ. Такой свет называют медленным.

С помощью ФК удалось реализовать сверхмалые резонаторы (около 1 мкм), которые обладают очень высокой добротностью (более  $10^4$ ). Зеркалами у таких резонаторов являются зеркала Брегга, состоящие из 2-3-х отверстий ФК. В таком резонаторе стоячая волна содержит всего несколько периодов, то есть 1-2 длины волны в материале волновода. Для двух длин волн, отличающихся всего на 20 нм, такой резонатор будет либо закрыт (не пропускает свет), либо открыт (пропускает 90% света). На слайде 5 показаны результаты моделирования по локализации света в нанорезонаторе.

Светом, локализованным в наноразмерном объеме, можно управлять. Например, на основе одномодового проволочного световода можно синтезировать оптический ключ. Это аналогично тому, как ток электронов, текущий в проволочном проводнике, можно остановить, разорвав цепь ключом. На слайде 6 показан пример реальной структуры кремниевого проволочного световода с сечением  $550 \times 220$  нм на подложке из плавленного кварца. Между кремнием и кварцем тонкая (35 нм) золотая пленка, к которой подведены контакты. При подаче импульса напряжения внутрь световода инжектируются электроны (и дырки), которые незначительно меняют показатель преломления (на величину около  $10^{-4}$ ). Этого достаточно, чтобы свет с данной длиной волны уже не мог распространяться в таком световоде.

Проволочный кремниевый волновод (размер сечения около 500 нм) в виде окружности с радиусом в несколько микрон является кольцевым резонатором. Возбудить моду, вращающуюся по окружности, можно с помощью другого проволочного световода, расположенного вблизи от кольцевого резонатора (на расстоянии около 200 нм). При определенной длине волны, коэффициент связи между световодом и резонатором будет достаточным для возбуждения бегущей моды. Причем, мода резонатора сделает несколько десятков полных оборотов (суще-

стает определенное время жизни моды в кольцевом резонаторе) и опять «перейдет» (туннелирует) в проволочный световод. Таким способом можно реализовать задержку светового импульса на 500 пс. На слайде 7 показаны синтезированные на подложке из плавленого кварца ультракомпактные оптические буферы (линии задержки) в виде одного кремниевого ведущего световода и множества кольцевых резонаторов (проволочных световодов в виде окружности). Причем резонаторы могут быть связаны либо друг с другом, либо со световодом.

При синтезе двумерных фотонно-кристаллических волноводов возникает проблема травления в многослойной структуре (подложка, световедущая часть, верхняя внешняя оболочка) множества отверстий с высоким аспектом (отношение длины отверстия к его диаметру). Например, для выполнения качественного ФК (с низкими потерями) для длины волны света 1,3 мкм требуется травление дырочек диаметром около 100-250 нм глубиной 5 мкм (аспект – 35). На слайде 8 показан управляемый резонатор длиной 7 мкм (толщина волновода 1 мкм), зеркала Брегга которого имеют всего по два отверстия. Подача на контакты напряжения всего 3 вольта вызывает согласно эффекту Штарка изменение показателя преломления материала в третьем знаке после запятой. Это приводит к смещению максимума пропускания резонатора на 2 нм в область меньших длин волн (голубой сдвиг).

ФК-волноводы и резонаторы можно использовать для создания нанолазеров. На слайде 9 показан первый ФК-лазер. Свет накачки распространяется в планарном волноводе, далее проходит через ФК-волновод, созданный из материала, который обогащен квантовыми точками (это наноразмерные частицы, размещенные на стенках множества отверстий в ФК), резонатор (длиной 5 мкм) на Брегговских зеркалах выделяет только две моды. При токе возбуждения 100 мА происходит генерация на длине волны 1260 нм мощностью 6 мВт. При этом, несмотря на малую апертуру волновода лазера (всего 1 мкм), излучение имеет высокую степень направленности.

При распространении света через двумерный ФК (без волновода), при определенной длине волны, не попадающей в ФЗЗ, возникает эффект самоколлимации (слайд 10, внизу). В этом случае свет распространяется через ФК почти без потерь и расходимости. Например, для длины волны 1,55 мкм для наблюдения эффекта автоколлимации требуется, чтобы в материале  $n\text{P}/\text{GaInAsP}$  с показателем преломления  $n = 3,25$  были проделаны отверстия диаметром 449 нм с периодом 450 нм.

С помощью ФК можно также синтезировать миниатюрный (20x20 мкм) расщепитель ТЕ- и ТМ-поляризаций (слайд 10, вверху). Для этого в двумерном ФК с числом заполнения (отношение диаметра отверстий к периоду решетки отверстий) 0,3 надо синтезировать под углом 45 градусов к распространяющемуся излучению участок ФК с числом заполнения 0,5. Это приведет к тому, что ТЕ-волна будет отражаться как от зеркала, от ФК с числом 0,5, а ТЕ-волна будет проходить не отклоняясь через ФК с числом 0,5. Так получается из-за того, что ФЗЗ

для ТЕ- и ТМ-волн сдвинуты относительно друг друга, и поэтому ФК с числом заполнения 0,5 не пропускает ТЕ-волну и пропускает ТМ-волну.

Если решетку Брегга в планарном волноводе сделать наклонной, то свет в таком волноводе будет частично отражаться и выходить из волновода (слайд 11). Например, рассмотрим волновод толщиной 522 нм из пленки  $\text{InGaAsP}$ , напыленной на подложку из  $\text{InP}$ , и прикрытый пленкой из  $\text{InP}$  толщиной 300 нм. Тогда решетка Брегга под углом 45 градусов, имеющая следующие параметры: 20 периодов решетки имеют размер около 10 мкм, ширина щели – 150 нм, глубина щели – 1,5 мкм, период – 490 нм, будет иметь расчетный коэффициент связи 59%. То есть теоретически 59% энергии моды будет выходить из волновода с помощью такой решетки Брегга. Такая решетка была синтезирована с помощью травления образца пучком ионов в газовой среде, причем образец был помещен на предметный столик, наклоненный к оси ионного пучка под углом 45 градусов. В эксперименте коэффициент связи оказался 20%.

С помощью наклонной решетки Брегга можно изготовить не только устройства для ввода (вывода) излучения в волноводы, но и миниатюрный (длиной 1,5 мкм) вращатель поляризации на 90 градусов. Для этого нужно наклонную решетку протравить таким образом, чтобы свет падал не на плоские грани решетки, а на ее торцы. На слайде 12 показан ступенчатый планарный волновод в том же материале, что и на предыдущем слайде, но свет проходит между слоями решетки (глубина щелей решетки – 3 мкм, ширина щелей – 250 нм, период решетки – 650 нм, размер плоскости решетки вдоль распространения света – 1,5 мкм). Волноводная мода до решетки имела ТЕ-поляризацию.

Свет, падая на торцы решетки, будет распространяться между ее плоскостями с разными фазовыми скоростями для двух направлений вектора линейной поляризации: параллельного и перпендикулярного плоскостям решетки. Поэтому вектор входной ТЕ-поляризации вращается по мере распространения света между слоями решетки. И при определенной длине решетки (в нашем случае – 1,5 мкм для длины волны 1,3 мкм) на ее выходе с эффективностью 95% появится свет с ТМ-поляризацией.

На слайде 13 предпринята попытка качественно объяснить феномен медленного света, который порождается фотонными кристаллами. Замедление света в световоде с микроструктурированной оболочкой происходит в результате когерентного или некогерентного рассеяния (переотражения) света на микронеоднородностях оболочки.

Если использовать свет с длиной волны, лежащей на краю ФЗЗ, то, как видно из дисперсионной диаграммы (зависимость циклической частоты света от проекции волнового числа на оптическую ось), для двух близких частот света (набор частот короткого лазерного импульса) волновые числа могут сильно отличаться в ФК. Это означает, что разные хроматические составляющие временного импульса света будут распространяться с разными групповыми скоростями. Проще говоря, какая-то часть хро-

матических гармоник будет распространяться через ФК, а другая часть гармоник не будет, поэтому световой импульс будет сжат (сжатый свет). Причем, чем больше дисперсия групповой скорости для монохроматических составляющих лазерного импульса, тем больше степень его сжатия.

С помощью ФК можно реализовать компактные и маломощные переключатели оптических каналов. На слайде 14 приведен пример такого ФК-переключателя размером  $9 \times 9$  мкм. Два световых канала (два волоконных световода шириной по 1 мкм) сближаются до малого расстояния между ними (около 1 мкм). В области сближения световодов имеется зона фотонного кристалла, у которого в области между световодами размер отверстий плавно изменяется. Период решетки ФК – 430 нм, размер штатных отверстий – 146 нм, а размер отверстий в зоне между световодами меняется от 126 нм до 167 нм. Длина волны – 1,575 нм. Переключение каналов происходит из-за термооптического эффекта. Дополнительным инфракрасным полупроводниковым лазером нагревают ФК до температуры 45 градусов за 2-3 секунды, что приводит к изменению показателя преломления в третьем знаке после запятой, а также к смещению края Ф33 и, как следствие, к переключению каналов.

Фотонно-кристаллические структуры можно синтезировать не только травлением отверстий в материале подложки, но и, наоборот, травлением материала подложки и формированием решетки наностолбиков (или точнее наноконусов). На слайде 15 показан пример ФК, состоящего из решетки наноконусов из фоторезиста высотой около 24 мкм, диаметр у основания 3,4 мкм, а у вершины от 360 нм до 700 нм. Формируют такую структуру с помощью литографии следующим образом. На стеклянную подложку с тонкой пленкой хрома записывают шаблон – двумерную решетку круглых отверстий диаметром 2-3 мкм. Потом сверху на пленку хрома наносят слой 25-30 мкм фоторезиста SU-8. Далее через стекло и шаблон из хрома экспонируют фоторезист с помощью ультрафиолетового излучения. И окончательно – производится травление и вымывание неэкспонированного резиста. Остается только решетка конусов из резиста, которая может быть использована как ФК.

С помощью многослойных периодических структур можно создавать ФК, которые обладают комплексным показателем преломления, реальная часть которого может быть положительной или отрицательной и меньше единицы по модулю. Такие необычные материалы называют метаматериалами. Совсем недавно были синтезированы такие материалы для оптической длины волны. На слайде 16 описывается метаматериал, реальная часть показателя преломления которого на длине волны 780 нм равна (-0,6).

Это ФК, состоящий из трех слоев металл-диэлектрик-металл ( $40 \times 10 \times 40$  нм), одним периодом которого является структура типа несимметричного «креста» с трапециевидными перекладинами (размах креста – 300 нм, толщина перекладин – 102 нм и 68 нм). Свет преломляется в таком метаматериале

так, что его волновой вектор остается по ту же сторону от нормали к поверхности (в плоскости падения), что и волновой вектор падающей волны.

Чтобы увидеть объекты с размером меньшим длины волны видимого участка спектра, используют сканирующие микроскопы ближнего поля (слайд 17). С этой целью можно, например, усовершенствовать стандартный атомно-силовой микроскоп, если на конце иглы кантиливера приклеить флуоресцентную микрочастицу (диаметром 300 нм).

Тогда, освещая пропускающий объект (например, щель размером 350 нм в тонкой металлической пленке) светом с длиной волны, возбуждающей флуоресцентную частицу (например, 975 нм), частица излучает уже видимый свет с длиной волны 550 нм. Частица находится вблизи исследуемого объекта на расстоянии 1-2 мкм. Разрешение такого микроскопа составляет около 100 нм.

Дифракционные решетки, которым уже более 200 лет, до сих пор играют важную роль в современной оптике. Из вышесказанного ясно, что фотонные кристаллы и метаматериалы – это примеры субволновых дифракционных решеток. На слайде 18 приведен свежий пример использования субволновой дифракционной решетки в качестве разделителя поляризаций. Не поляризованный свет, падая на такую решетку, разделяется: отражается s-поляризация (электрический вектор вдоль штрихов решетки) и проходит р-поляризация (электрический вектор поперек штрихов решетки). Оптимизированная для такого случая структура решетки следующая: длина волны – 1,55 мкм, период – 140 нм, глубина канавок – 700 нм, канавки заполнены золотом на высоту 365 нм, сверху решетки имеется слой плавленного кварца толщиной 520 нм.

Нанотехнологии используются также при создании наноприемников светового излучения. В отличие от сканирующего микроскопа ближнего поля, речь идет о сканирующем фотоприемнике ближнего поля с разрешением 25 нм. На слайде 19 показано устройство такого приемника и принцип его работы. На подложку из кремния наносят слой плавленного кварца, на него – монослой полимера и еще выше – тонкий (300А) слой золота. С помощью литографии (травлением) формируют два сходящихся золотых контакта с разрывом около 25 нм. В пространство между контактами заливается каплями диаметром 5 нм селенид кадмия или селенид цинка. Такие капли выступают в роли квантовых точек, так как являются наночастицами, содержащими небольшое число молекул вещества и несущими малый электрический заряд, который меняется квантовым (счетным, дискретным) образом. Сканируя таким фотоприемником поперек выхода световода, можно с разрешением 25 нм зарегистрировать распределение интенсивности света (длина волны – 405 нм).

Далее приведены некоторые результаты, полученные в лаборатории лазерных измерений ИСОИ РАН, по моделированию распространения света через микрообъекты с нанонеоднородностями. На слайде 20 показан результат моделирования прохождения ТЕ-волны через двумерную фотонно-

кристаллическую линзу Микаэляна. Линза Микаэляна – это градиентная цилиндрическая линза, показатель преломления у которой спадает от оптической оси к периферии как функция гиперболического секанса. Такая линза в идеальном случае собирает все лучи, параллельные оптической оси (или перпендикулярные плоскостям линзы) в точку на оси на выходной поверхности линзы.

ФК-линза – это плоскопараллельная пластина, в которой имеются периодически расположенные отверстия с увеличивающимся диаметром от оптической оси к периферии. Показанная на слайде линза имеет диаметр пятна по полуспаду интенсивности –  $0,42\lambda$ . В скалярном случае для фокального пятна, интенсивность которого описывается  $\text{sinc}$ -функцией, ширина фокального пятна по полуспаду равна  $0,48\lambda/NA$ , где  $NA$  – числовая апертура линзы. В случае ФК-линзы  $NA=0,67$ , поэтому ширина пятна по полуспаду равна  $0,29 \lambda/NA$ . Это в 1,7 раза меньше, чем в скалярном случае.

Фотонные кристаллы могут быть сформированы не только с помощью системы периодически расположенных отверстий, но и в виде композитного материала, то есть с помощью системы периодически расположенных нановключений другого материала.

Рассмотрим дифракцию света на диэлектрическом цилиндре, внутри которого периодически расположены металлические наностержни. Диэлектрическая проницаемость цилиндра – 2,25, а диэлектрическая проницаемость стержней из серебра равна  $9,49+i1,483$ . Стержни имеют диаметр 5 нм, период решетки стержней определяет их концентрацию внутри стеклянного цилиндра. Радиус цилиндра равен длине волны света – 0,5 мкм. На слайде 21 показаны картины дифракции плоской ТЕ-волны на серебряном цилиндре (слева), стеклянном цилиндре (в центре) и композитном цилиндре с концентрацией стержней около 11% (справа). При такой концентрации металлических наностержней реальная часть эффективной диэлектрической проницаемости равна единице, что приводит к минимальной дифракции света.

Чтобы собирать заданные структуры из наностержней, требуется разработать методики для оптической манипуляции ими. На слайде 22 показаны результаты эксперимента по оптической манипуляции полупроводниковыми нановолокнами длиной 50 мкм и диаметром 50 нм с помощью двух сфокусированных встречных лазерных пучков. Однако захватывать и вращать нановолокна можно также с помощью одного вихревого лазерного пучка, сформированного ДОО и имеющего в своем поперечном сечении световое кольцо. Захваченное нановолокно ориентируется по диаметру светового кольца и вращается в поперечной плоскости вблизи фокальной плоскости. Так, вихревой пучок света с длиной волны 532 нм (мощность источника – 500 мВт), сфокусированный в кольцо диаметром 6,5 мкм, может захватить стеклянное нановолокно длиной 10 мкм и диаметром 100 нм.

На выходе из фотонно-кристаллического световода с размером световедущей части всего 300 нм

возникает почти точечный источник, излучающий свет в большом телесном угле. Чтобы эффективно использовать или зарегистрировать это излучение, требуется существенно сократить его расходимость. Возникает задача коллимации излучения, которое появляется на выходе ФК-волноводов (слайд 23). Так, для двумерного ФК-волновода, состоящего из набора диэлектрических наностержней диаметром 114 нм и с показателем преломления 3,38 (кремний), с периодом решетки 228 нм, размером световода около 300 нм, для длины волны 633 нм, достаточно устранить всего два стержня на выходе, чтобы почти сколлимировать световой поток.

Трехмерные ФК-световоды имеют диэлектрический стержень и оболочку из периодически расположенных отверстий. Такие ФК-световоды обладают многими интересными свойствами. Например, они обладают способностью генерировать световой суперконтинуум. В этом случае на вход световода поступает короткий импульс лазера на длине волны, например, 532 нм, а на выходе световода появляется белый свет. На слайде 24 показан результат эксперимента по генерации суперконтинуума с помощью ФК-световода. Диаметр сердечника – 3,1 мкм, длина световода – 60 мм, диаметр сердечника, сжатого в центральной части световода, – 0,5 мкм, длительность импульса – 0,6 нс, пиковая мощность – 1 кВт. В широкой части световода – большая дисперсия групповой скорости, в узкой части – очень маленькая. При переходе от большой дисперсии к маленькой короткий импульс света «разлагается в спектр» и появляются импульсы с другой центральной частотой (почти из всего видимого спектра). При переходе от узкой части к широкой хроматические гармоники складываются, образуя импульс белого света.

Характеристики лазерных мод, распространяющихся в ФК-световодах, зависят от таких параметров, как диаметр сердечника, размер отверстий оболочки, период решетки отверстий и порядок их расположения, материал световода и т.д. Поэтому, в отличие от обычных волокон с однородной оболочкой, ФК-волокна имеют много степеней свободы, которыми можно управлять, чтобы менять модовый состав лазерного излучения. Поэтому до сих пор развиваются методы расчета мод в ФК-световодах. На слайде 25 показаны результаты расчета поперечных электромагнитных составляющих для основной моды ФК-световода: для длины волны 633 нм период равен 1 мкм, а диаметр отверстий – 0,94 мкм. Основная мода, как и несколько следующих мод ФК-световодов, распространяются на 90% в сердечнике. В оболочке распространяется только очень малая часть энергии от любой моды световода.

В заключении (слайд 26) можно перечислить некоторые направления нанопотоники, которые в настоящее время интенсивно развиваются. Это проволочные или щелевые световоды, фотонные кристаллы, субволновые решетки, метаматериалы, микроскопия ближнего поля, оптическое манипулирование микро- и наночастицами, нанолитография.

# Нанопотоника – манипулирование светом с помощью наноструктур

## В.В. Котляр

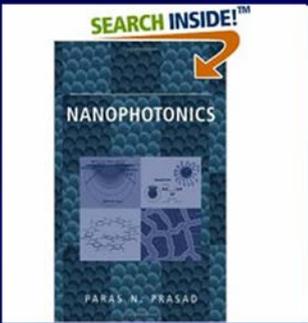
НТС ИСОИ РАН 12.02.2008 г.

1

Слайд 1

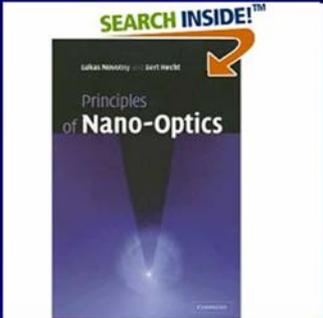
## Введение

2004



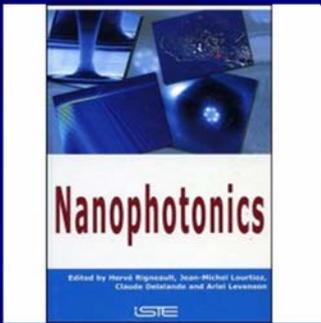
Paras N. Prasad

2006

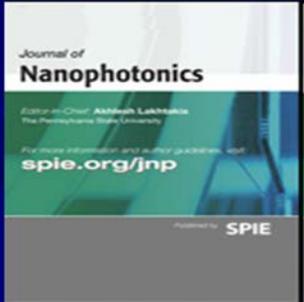


Lukas Novotny, Bert Hecht

2008



Herve Rigneault, Jean-Michel Lourtioz  
Claude Delalande, Juan Ariel Levenson



Editor-in-Chief  
Akhlesh Lakhtakia

С 2007



Editors:  
H. Benisty,  
T.F. Krauss,  
E. Ozbay,  
C.M. Soukoulis

С 2003

2

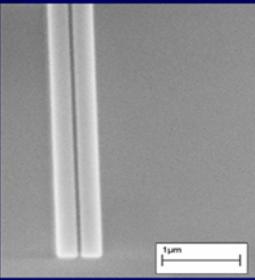
Слайд 2

Нановолноводы,  
проволочные  
волноводы

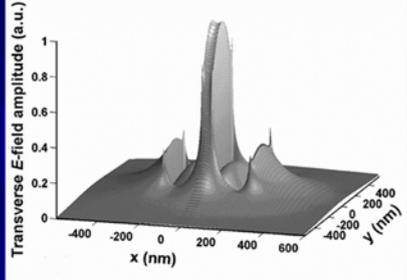
## Slot-Waveguide for Strong Confinement of Light in Low-Index Materials

**CORNELL NANOPHOTONICS GROUP**

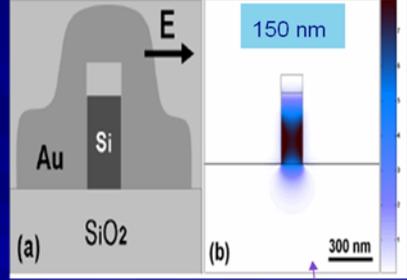
ECE Department · Cornell University · Phillips Hall · Ithaca NY 14853 · (607) 255-7877 · Contact Prof. Michal Lipson



Щелевой волновод:  
две кремневые ступеньки на плавленом кварце, разделенные щелью



Амплитуда E-поля моды  
Высота и ширина ступенек – 247 нм и 220 нм,  $n=3.48$ ,  $\Lambda=1.55$  мкм, ширина щели – 100 нм



Щелевой металлический волновод  
Видно, что свет заключен и содержится в области размером около  $\lambda/15$

Opt. Lett., **31**, 213 (2006)

Q. Xu, V. R. Almeida and M. Lipson, Experimental demonstration of guiding and confining light in nanometer-size low-refractive-index material, Opt. Lett., V. 29, No. 14, 1626 (2004).

3

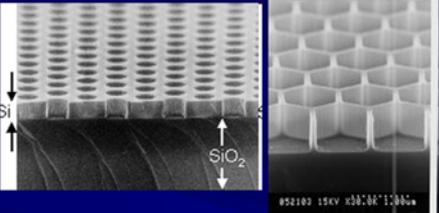
Слайд 3

Фотонные кристаллы

## Photonic Crystals

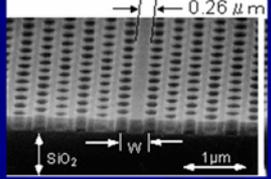
**Photonic Nanostructure Research Group**

M. Notomi

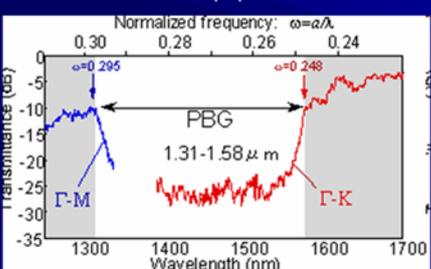


Кремниевый 2D фотонный кристалл (ФК) на плавленом кварце SiO<sub>2</sub>

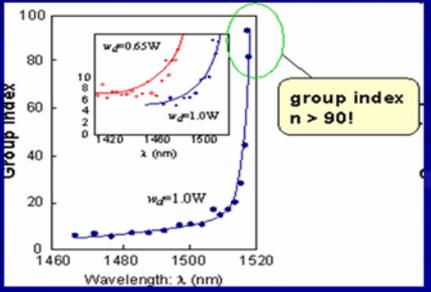
M. Notomi, A. Shinya, S. Mitsugi, E. Kuramochi, H-Y. Ryu, "Waveguides, resonators, and their coupled elements in photonic crystal slabs", Opt. Express 12, p. 1551-1561 (2004).



Одномодовый волновод на основе двумерного фотонного кристалла



Запрещенная зона 2D ФК



Дисперсия групповой скорости в таком ФК может быть очень большой, а скорость света – в 90 раз меньше  $c$

4

Слайд 4

Нанорезонаторы

# Nanocavity

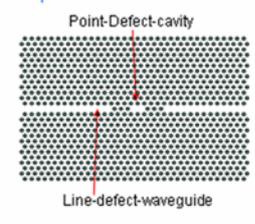
$$Q = \frac{L_{\omega}}{c(1-r^{opt})} = \frac{2\pi L}{\lambda(1-r^{opt})}$$

добротность

## Resonant tunneling cavity with high-Q and high-transmittance

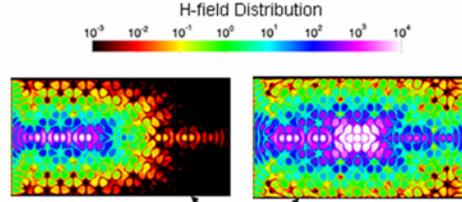
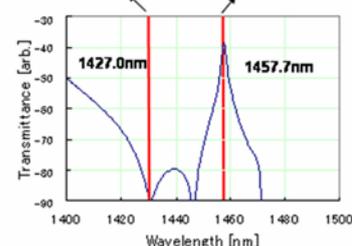
A resonant tunneling cavity as a high-Q and high-transmittance wavelength filter will be applied to, for instance, an optical switch in an all-optical system which consist of an integrated PhC circuit...

Schema of point-defect resonant-tunneling cavity



Target:  $Q > 10^4$   
Transmittance > 90%

H-field Distribution

T. Tanabe, A. Shinya, E. Kuramochi, S. Kondo, H. Taniyama, and M. Notomi, "Single point defect photonic crystal nanocavity with ultrahigh quality factor achieved by using hexapole mode" Applied Physics Letters, Vol. 91, No. 2, 021110, (2007).

5

Слайд 5

Управляемые нановолноводы

# Ultra-compact optical modulator



## Silicon Integrated Nanophotonics

Yu. Vlasov

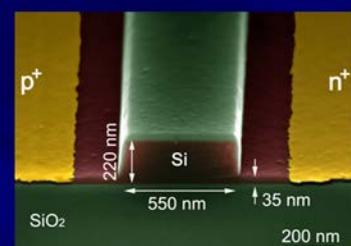
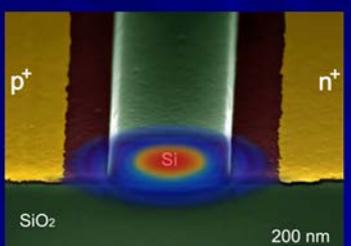
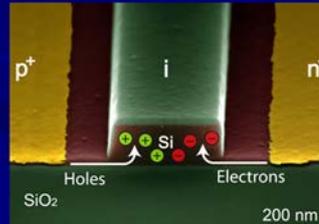


Схема кремниевого нановолновода с золотыми контактами на плавном кварце



Световая мода почти вся содержится в нановолноводе



При подаче электрического импульса на контакты внутрь волновода инжектируются заряды и меняют его показатель преломления – свет перестает распространяться.

"Ultra-compact high order ring resonator filters using submicron silicon photonic wires for on-chip optical interconnects", F.Xia, M.Rooks, L. Sekaric, and Y. Vlasov, Opt. Express, 15, 11934 (2007)

6

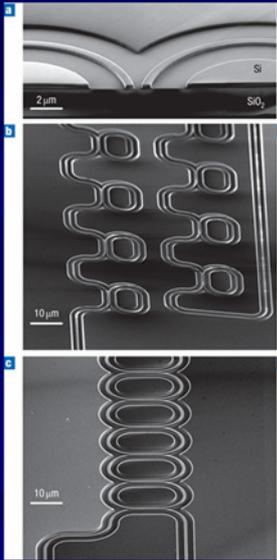
Слайд 6



## Ultracompact optical buffers on a silicon chip

Проволочные нановолноводы

Nature Photonics 1, 65 - 71 (2006)



Срез подводящего волновода и кольцевого резонатора, радиус резонатора 6 мкм (зазор между ними – 200 нм)

Каскад из нескольких кольцевых резонаторов (до 100), все они соединены общим подводящим волноводом, каждый задерживает свет на 500 пс

Линия задержки из связанных кольцевых резонаторов (зазор между соседними резонаторами – 200 нм).

photonic-wire waveguides (проволочные нановолноводы)

7

Слайд 7

## ФК-фильтры

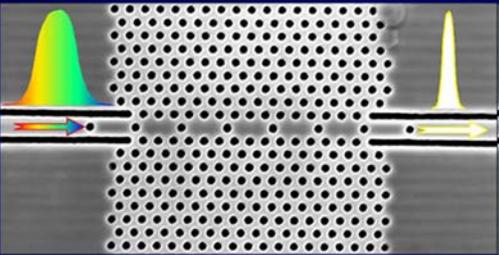
## Tunable Photonic Crystals

Microphotonics and Photonics Crystals Research Group

St. Andrews University,  
T. Krauss

Материал – InP ( $n=3.2$ )/InGaAsP ( $n=3.4$ )

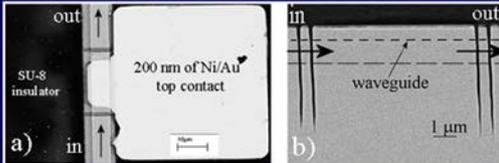
Диаметр отверстий – 100-250 нм, аспект-35:1

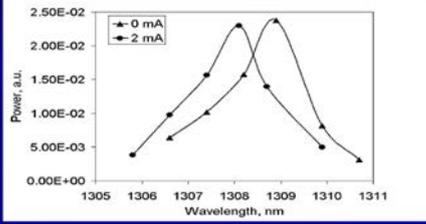


Лазер с переменной частотой от 1250-1365 нм

Глубокое ионное травление в газовой среде

Аномальная дисперсия достигнута с помощью точечных дефектов в волноводе – импульс сжимается





Изменение показателя преломления за счет эффекта Штарка, напряжение поля - 3 в, смещение пика пропускания на 2 нм.

M. V. Kotlyar, L. O'Faolain, A. B. Krysa and T. F. Krauss, "Electrically tunable Multiquantum-Well InGaAsP/InGaAsP microphotonic filter," IEEE Phot. Technol. Lett., vol. 17, pp. 837-839, 2005.

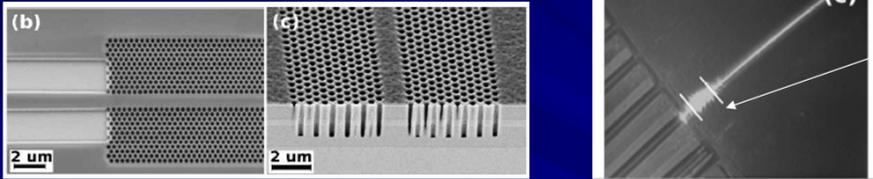
8

Слайд 8

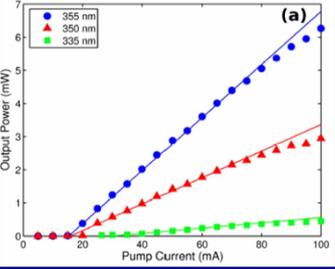
**ФК-лазеры  
на квантовых  
точках**

## Photonic crystal laser with mode selective mirrors

GaAs/InGaAs quantum-dot material ( $n=3.2$ )



$a/\lambda=0.22$ , диаметр дырок 0.3a, волновод из 3-х линий, период  $a=345$  nm,



Низкий порог -15 мА

Бреговские зеркала

излучение на основной и четвертой моде, секция усиления (квантовые точки) – длиной 5 мкм, длина волны излучения – 1260 нм, ширина спектра – 20нм.

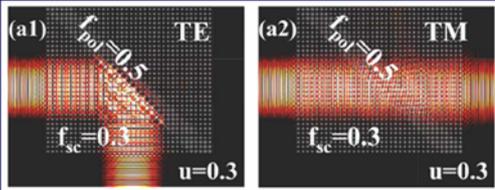
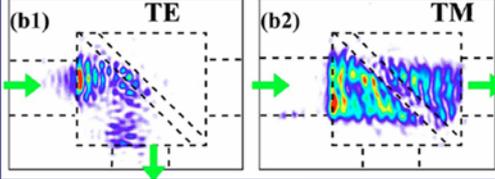
S. A. Moore, L. O'Faolain, T. P. White and T. F. Krauss  
"Photonic crystal laser with mode selective mirrors"  
Optics Express Vol 16, No. 2 / 1365 21 Jan 2008

9

Слайд 9

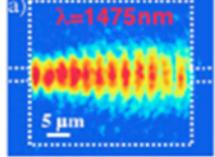
## Self-collimating photonic crystal polarization beam splitter

**ФК-делители поляризации**

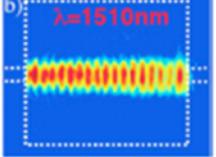



Zabelin, L. A. Dunbar, N. Le Thomas, M. V. Kotlyar, L. O'Faolain, and R. Houdré, T. F. Krauss, Optics Letters, vol. 32, No. 5, March 2007

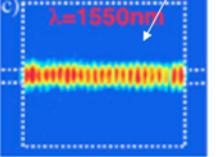
ФК на GaInAsP/InP с показателем преломления  $n=3.25$ , фактор заполнения в коллиматоре  $-a/d=0.3$ , а в поворотном зеркале  $-a/d=0.5$ , постоянная решетки  $d=450$  нм, длина волны в диапазоне - 1.47–1.66 мкм.



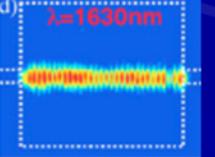
$\lambda=1475\text{nm}$



$\lambda=1510\text{nm}$



$\lambda=1550\text{nm}$



$\lambda=1630\text{nm}$

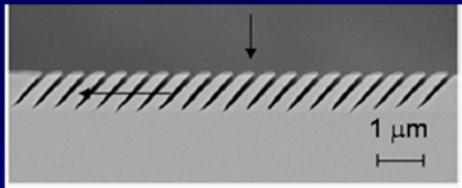
Эффект самоколлимации света в фотонном кристалле для  $a/\lambda=0.29$  для длины волны 1550 нм.

10

Слайд 10

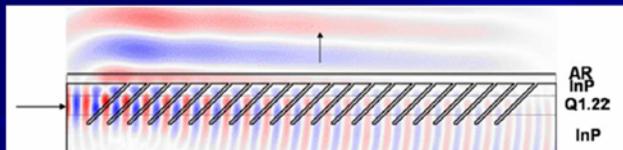
## Compact Slanted Grating Couplers Between Optical Fiber and Waveguides

Наклонная решетка Брегга для ввода-вывода излучения



Теоретический коэффициент связи – 59%, экспериментальный – 20%.

The layer structure consists of an InP substrate, a 522-nm InGaAsP layer  $\lambda=1.22$  мкм, and a 300-nm InP top-cladding.



Frederik Van Laere, Maria V. Kotlyar, Dirk Taillaert, Dries Van Thourhout, Thomas F. Krauss and Roel Baets, IEEE Photonics Technology Letters, 19 (5-8): 396-398, March-April 2007

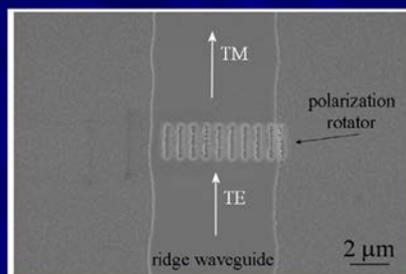
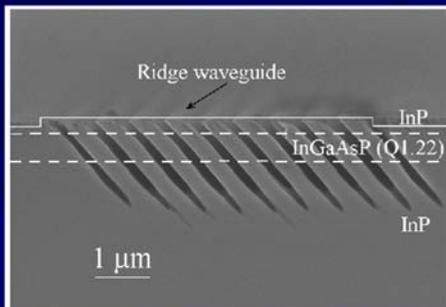
Ширина щелей – 150 нм, глубина 1.5 мкм, всего 20 щелей наклонной решетки с периодом 490 нм, угол наклона – 45 град.

11

Слайд 11

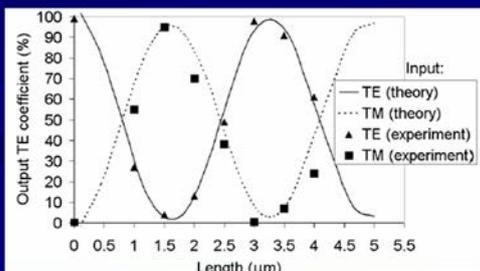
## Compact polarization converter

ФК-вращатель поляризации



Ширина щелей – 250 нм, период -650 нм, глубина – 3мкм,

Управляемый лазер в диапазоне длин волн – 1250-1360 мкм, длина конвектора – 1.5 мкм, ширина краевого волновода – 5 мкм



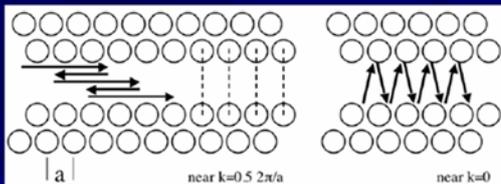
Эффективность конверсии -95%

M. V. Kotlyar, L. Bolla, M. Midrio, L. O'Faolain, and T. F. Krauss, Optics Express, vol. 13, pp.5040-5045, 2005.

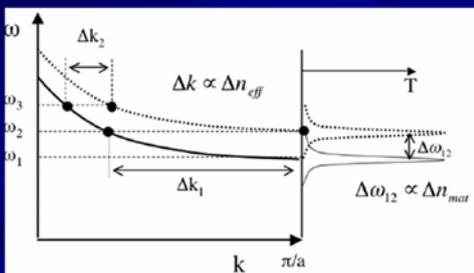
12

Слайд 12

# Slow light in photonic crystal waveguides

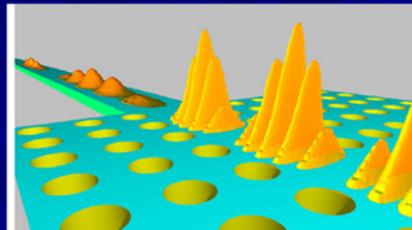


Механизмы образования медленного света в ФК: когерентное рассеяние и переотражение



Дисперсионная диаграмма: слабый наклон кривой – это для медленного света, резкий наклон – для режима быстрого света

## Медленный свет в ФК



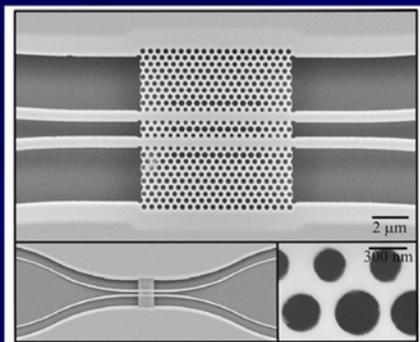
Групповая скорость в ФК может быть в 100 раз меньше фазовой (то есть скорости света в вакууме), но так как показатель в ФК около 2, то замедление света будет в  $S=50$  раз, ширина гауссового импульса  $I=I_0 \exp[-(Sx)(Sx)]$ .

T.F. Krauss, J. of Physics D-Applied Physics 40 (9): 2666-2670, May 2007

13

Слайд 13

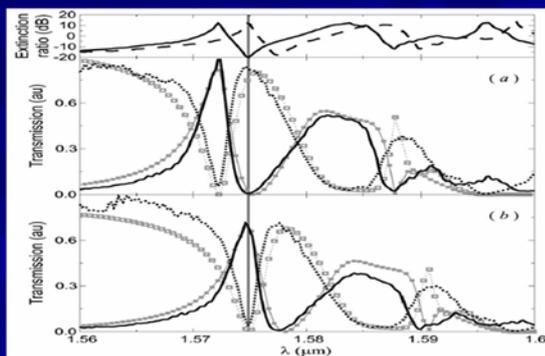
# Ultracompact and low-power optical switch based on silicon photonic crystals



Размеры ФК – 9x9 мкм, радиус дырок - 0.34a, период решетки a=430 нм, но между волноводами радиус у центральной линии дырок больше - 0.39a, а у соседней линии меньше - 0.30a,

Daryl M. Beggs, Thomas P. White, Liam O'Faolain, and Thomas F. Krauss  
January 15, 2008 / Vol. 33, No. 2 / OPTICS LETTERS

## ФК-переключатель каналов длиной 5 мкм



Переключение каналов основано на термооптическом эффекте, который создается инфракрасным полупроводниковым лазером (показатель преломления меняется в 3 знака): канал 1 (а) и канал 2 (б), сплошная кривая (23 град) пунктирная кривая (45 град)

14

Слайд 14

## High aspect ratio SU-8 micro-/nanotip array

(a) Cr pattern as a surface mask

(b) Backside exposure on SU-8  
UV  $\lambda=365\text{nm}$

(c) Development

Legend:  glass     Chrome (Cr)  
 uncured SU-8     cured SU-8

(d) SEM image showing the array of tips.

(e) SEM image showing a single tip with a diameter of 697.00 nm.

Решетка наноконусов из фоторезиста с высоким аспектом

Набор микроконусов с высоким аспектом (30) у основания диаметр 3 мкм, высота 24 мкм, у вершины диаметр 700 нм (и меньше – 360 нм).

Seok Woo Lee and Seung S. Lee  
OPTICS LETTERS / Vol. 33, No. 1 / January 1, 2008

15

Слайд 15

## Negative-index metamaterial at 780 nm wavelength

(a) 3D view of the periodic structure.

(b) Cross-section of the structure with parameters  $a, w, t, s$ .

(c) SEM image of the structure with scale bars of 100 nm and 1  $\mu\text{m}$ .

Периодическая структура из трех слоев МДМ (Ag–MgF<sub>2</sub>–Ag,  $n=1.38$ ) толщиной на стекле с размерами:  $a=300\text{nm}$ ,  $Wx=102\text{ nm}$ ,  $Wy=68\text{ nm}$ ,  $e=8\text{ nm}$ ,  $t=40\text{ nm}$

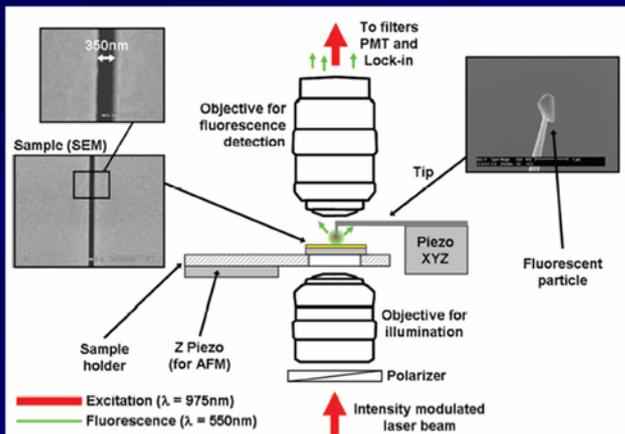
Реальная часть показателя преломления на длине волны 780 нм (край видимого спектра) равна  $(-0.6)$

G. Dolling and M. Wegener, January 1, 2007 / Vol. 32, No. 1 / OPTICS LETTERS

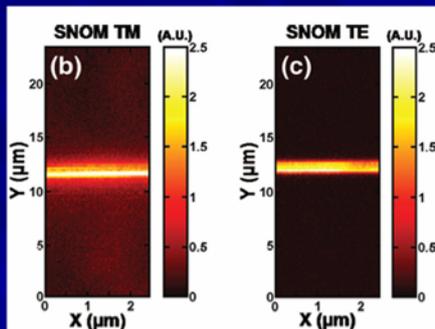
16

Слайд 16

## Near-field scattered by a single nanoslit in a metal film



Оптический сканирующий микроскоп ближнего поля



Щель шириной 350 нм (и длиной -20 мкм) в тонкой (100 нм) пленке золота, напыленного на тонкую пленку хрома (5 нм). Стандартный атомно-силовой микроскоп, на конце иглы которого наклеена флуоресцентная микрочастица (диаметр 300 нм). Измерялось поле на расстоянии 2 мкм от щели.

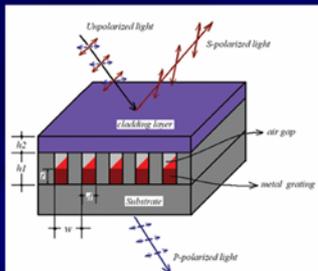
Флуоресцентное изображение нанощели в металлической пленке

Lionel Aigouy, Philippe Lalanne, Haitao Liu, Gwenaëlle Julie, Veronique Mathet, and Michel Mortier, 20 December 2007 Vol. 46, No. 36 APPLIED OPTICS

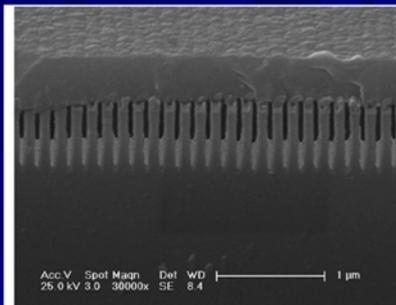
17

Слайд 17

## Embedded metal-wire nanograting and its application in an optical polarization beam splitter

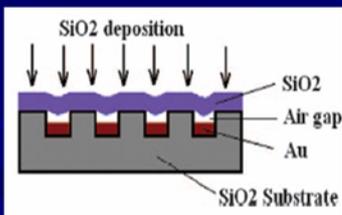


Субволновая решетка для разделения s- и p- поляризаций

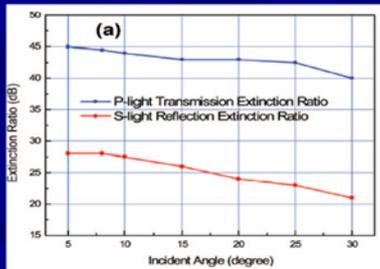


Нанорешетки

Параметры: период -140 нм, глубина канавок - 700 нм, канавки заполнены золотом на 365 нм, сверху оболочка из SiO<sub>2</sub> толщиной 520 нм. Длина волны - 1550 нм.



Нанорешетка в плавленном кварце, заполненная частично золотом



Dingli Wang, Wen Liu, Qingming Xiao, Jing Shi 20 January 2008 Vol. 47, No. 3 P.312 APPLIED OPTICS

18

Слайд 18

## Near-field photodetection with high spatial resolution by nanocrystal quantum dots

Квантовые точки, нанокристаллы

M. Hegg, L. Y. Lin  
10 December 2007, Vol. 15, No. 25 / OPTICS EXPRESS p. 17163

Фотоприемник ближнего поля на квантовых точках (CdSe): толщина плавленого кварца – 1 мкм, PMTMS- полимер, монослой, слой золота – 300 А

Зазор между электродами – 25 нм, толщина электродов – 50 нм, квантовые точки получались в виде капель из раствора CdSe/ZnSe и имели диаметр 5.2 нм, длина волны -405 нм, фотоприемник дает 80 fA при освещении его 62 pW, отклик приемника – 2.7 mA/W

Комбинация волновода и фотоприемника

Нанотайперы
19

Слайд 19

## Фотонно-кристаллические линзы

ИСОИ РАН

Remigius Zengerle and Phuong Chi Hoang  
Vol. 24, No. 4, P. 997 (2007) / J. Opt. Soc. Am. B

Нанооптика

Высота линзы – 4 мкм, ширина – 3 мкм, длина волны - 1.55 мкм, показатель преломления -1.5, период наноструктуры – 0.25 мкм, фокус- 3.3 мкм, при моделировании FDTD-методом выбиралась дискретность –  $\lambda/100$ , эффективность – 70% по сравнению с градиентной линзой, диаметр фокального пятна составил 0.8 $\lambda$  или 0.29  $\lambda/NA$ , где NA- числовая апертура линзы.

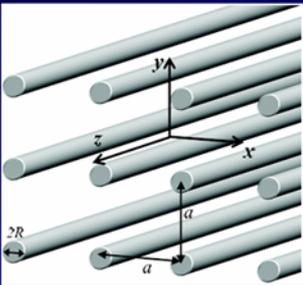
Триандафилов Я.Р., Котляр В.В. «Фотонно-кристаллическая линза Микаэляна», Компьютерная оптика, ИСОИ РАН, Самара, т.31, № 3, с.27-31 (2007).

20

Слайд 20

## Металлические наностержни

ИСОИ РАН

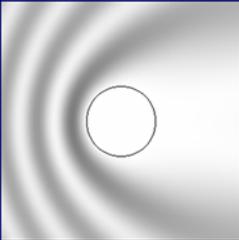
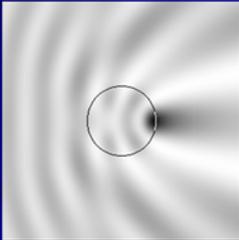
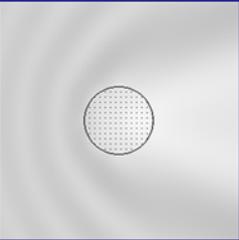


Металлические наностержни периодически размещены, радиус их много меньше  $\lambda$ ,

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

M. Silveirinha, Phys. Rev. E 73, 046612 (2006)

Д.В. Нестеренко,  
В.В. Котляр  
Компьютерная оптика,  
т.32, № 1 (2008)

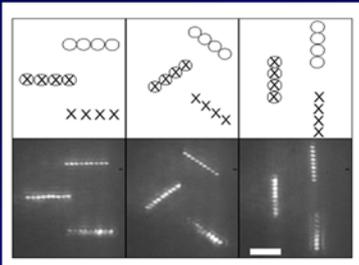
Дифракция ТЕ-волны на металлическом диэлектрическом микроцилиндре и на микроцилиндре с наностержнями (диаметром 5 нм)

21

Слайд 21

## Оптическое манипулирование нановолокнами

ИСОИ РАН



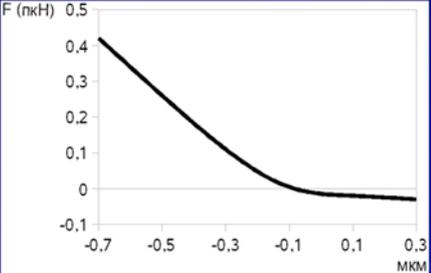
Horst, A.I. Campbell, L. K. van Vugt, D. A. M. Vanmaekelbergh, M. Dogterom, A. van Blaaderen "Manipulating metal-oxide nanowires using counter-propagating optical line tweezers" J. Opt. Soc. Am. A – 2007. Vol. 15, n. 18, p.11629-11639

Оптический захват и вращение полупроводниковых нановолокон длиной до 20 мкм диаметром 50-100 нм путем фокусировки двух встречных пучков.

Оптическая схема



Вихревой пучок ( $d=6.5\mu\text{m}$ )



Скиданов Р.В. и др.  
Компьютерная оптика, 32,  
№ 1 (2008)

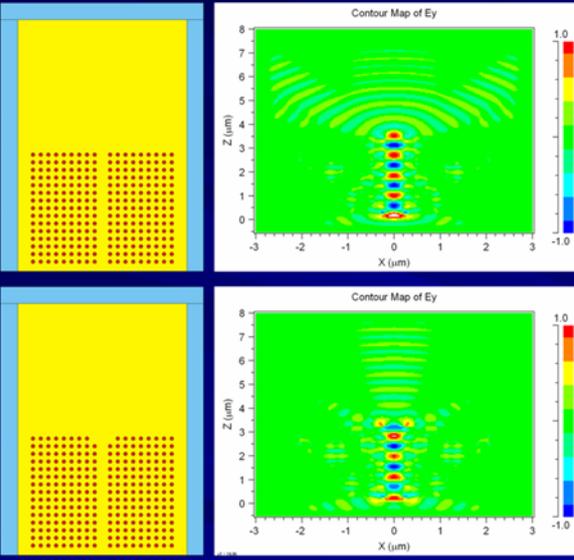
Нормированная сила, действующая вдоль оптической оси на нановолокно (диаметром 100 нм и длиной 10 мкм), лежащее поперек оси, при его осевом смещении (показатель преломления - 1.5, длина волны - 532 нм, мощность лазера - 500 мВт)

22

Слайд 22

## Photonic-crystal collimator

Dielectric nano-rods in air



FDTD-methods from FullWAVE 3.0

IPSI RAS

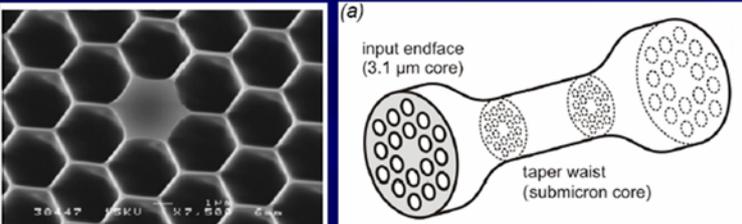
W.R. Frei, D.A. Tortorelli, H.T. Johnson,  
"Geometry projection method for optimizing  
photonic nanostructures",  
Opt. Lett. 32, 77-79 (2007)

Wave length:  $\lambda=633$  nm  
Rods diameter:  $d=114$  nm  
Grating period:  $a=228$  nm  
Refractive index:  $n=3,38$

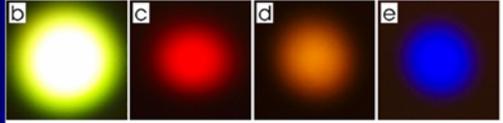
23

Слайд 23

## Supercontinuum generation in submicron fibre waveguides

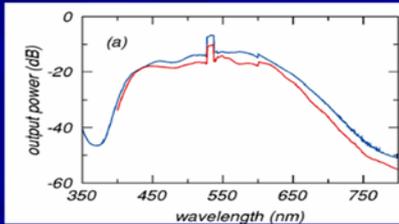


ФК-световод из плавленного кварца, диаметр сердечника 3.1 мкм, длиной 60 мм, после тейпирования (сжатия) диаметр - 0.5 мкм, возбуждающая длина волны - 532 нм, длительность импульса – 0,6 нс, повторяемость 6,3 КГц, пиковая мощность – 1 кВт.



Белое (супер-континуум) распределение интенсивности на выходе ФК-световода со сжатием. Красный, оранжевый и синий пучки – получены из белого с помощью узкополосных фильтров. Сжатием ФК-световода добиваются нулевой дисперсии.

S. G. Leon-Saval, T. A. Birks,  
W. J. Wadsworth,  
P. St.J. Russell, Optics Express,  
Vol. 12, Issue 13, pp. 2864-2869  
(2004)



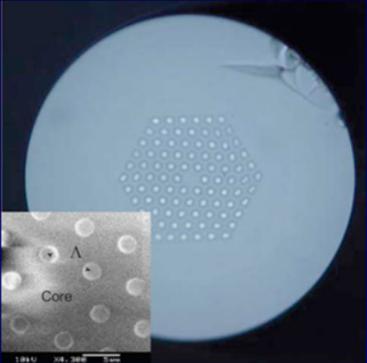
Спектр излучения на выходе ФК-световода со сжатием

24

Слайд 24

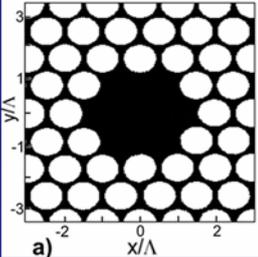
## Фотонно-кристаллические волокна

ИСОИ РАН

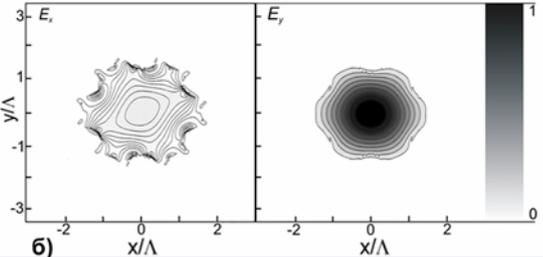


G. Ren, P. Shum, L. Zhang, and X. Yu,  
"Low-loss all-solid photonic bangap fiber", Opt. Lett.,  
V. 32, No 9, pp 1023-1025, 2007

Расчет разностным методом поперечных мод ФК-волокна  $E_x$  и  $E_y$ : показатель преломления - 1.46, отношение длины волны к периоду решетки отверстий - 0.6, отношение диаметра отверстий к периоду - 0.94, сетка отсчетов - 204x228, дискретность поля - 0.03 от периода. Эффективный показатель преломления для основной моды - 1.45



**а)**



**б)**

Котляр В.В.,  
Шуюпова Я.О.  
Известия СНЦ РАН,  
Т.9, № 3, с.592-597  
(2007)

25

Слайд 25

## Заключение

К нанопотонике можно отнести такие области знаний:

- Нановолноводы, проволочные волноводы
- Фотонно-кристаллические волноводы, суперконтинуум
- Нанорешетки и субволновые решетки из наностержней или нанотрубок
- Фотонные кристаллы: ФК-лизы, ФК-волноводы, ФК-фильтры, ФК-лазеры на квантовых точках, ФК-резонаторы, медленный и быстрый свет
- Нанорезонаторы, нанолазеры, нанотейперы
- Оптическая манипуляция наночастицами
- Метаматериалы
- Наномикроскопия, сканирующая микроскопия ближнего поля
- Нелинейные наноразмерные эффекты: солитоны, поляритоны, плазмоны
- Нанолитография и наноимпринтинг технология

26

Слайд 26

## NANOPHOTONICS - THE MANIPULATION OF LIGHT BY NANOSTRUCTURES

Shorthand record of the presentation at seminar

V.V. Kotlyar<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>*Samara State Aerospace University, Samara, Russia*

### ***Abstract***

Some interesting results in nanophotonics achieved by top-level research groups over the period of 2004 –2008 are reviewed. Different ways to confine light to nanoscale regions using wire optical nanowaveguides, nano-resonators, and photonic crystals are presented. Notably, light can be confined to a volume 10 – 15 times smaller in size than the wavelength of light in vacuum.

***Key words:*** nanophotonics, wire optical waveguides and slotted optical waveguides, photonic crystals, Bragg's mirrors and gratings, photonic-crystal resonators, slow light, photonic crystal lasers, metamaterials, near-field microscopy.

***Citation:*** Kotlyar VV. Nanophotonics - the manipulation of light by nanostructures. *Computer Optics* 2008; 32(2): 119-35.