



Владимир  
РАЗУМОВ

# Что такое нанофотоника?

## Новые возможности использования света

**Нанофотоника** - одно из направлений в области нанотехнологий, связанное с созданием новых оптических материалов и функциональных устройств, построенных на основе различных наноразмерных структур (агрегатов, кластеров, наночастиц и т.д.). Приставка "нано-" обозначает диапазон размеров частиц и структур, с которыми имеет дело это научное направление.

Сам термин "фотоника" был предложен очень давно известным советским ученым академиком Александром Николаевичем Терениным (1896 - 1967), специалистом в области фотохимии. Этим словом он обозначил область науки, изучающую совокупность взаимосвязанных фотофизических и фотохимических процессов, происходящих при поглощении света веществом.

### Современное состояние нанофотоники

Исследования в области нанофотоники - науки, нацеленной на создание оптических наноструктурированных материалов и функциональных устройств на их основе для эффективного управления фотонами, очень популярны в современном мире. Ежегодно проходят десятки международных конференций, посвященных этой тематике. Недавно в Черноголовке прошла конференция по нанофотонике, о которой уже писала "ЧГ". Две предыдущие конференции с международным участием проводились в 2009 году в Санкт-Петербурге и в 2007-м - в Черноголовке.

Если сравнить квант света фотон с электроном, то оказывается, что длина его волны на порядки больше длины волны электрона. Казалось бы - раз фотоны больше, значит, и управлять ими легче. Однако это совсем не так. Мы научились более уверенно управлять электронами, размеры которых лежат в пределах 0,1 нанометра, чем фотонами, размеры которых достигают сотен нанометров. Ученым еще предстоит изучить некоторые тонкости управления фотонами, и только тогда использование света в различных устройствах значительно расширится, появятся новые фотонные устройства. Современное состояние развития нанофотоники можно сравнить с состояни-

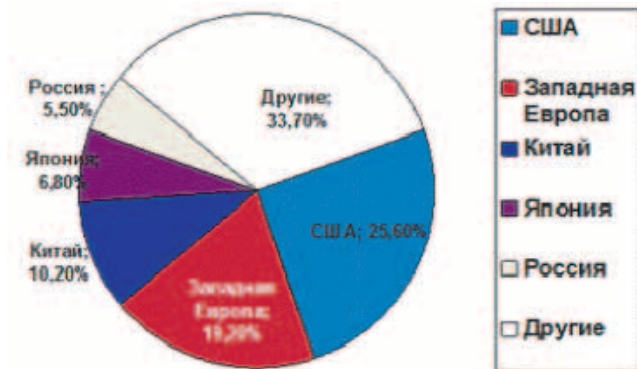
ем развития микроэлектроники до того, как был изобретен транзистор. Тем не менее уже сегодня новые материалы и устройства нанофотоники находят самое широкое применение. Во-первых, это всевозможные устройства отображения информации - дисплеи мобильных телефонов, персональных компьютеров и телевизоров. Во-вторых, это оптические запоминающие устройства - CD- и DVD-оптические диски, а также системы передачи информации по оптоволоконным линиям. Это то, что уже прочно заняло свое место в нашей повседневной жизни и непрерывно совершенствуется. Например, если сейчас объём информации оптического диска порядка 1 Гигабайта, то в ближайшее время это будет уже 10-100 Гигабайт. Экспериментальные образцы таких дисков фирмы уже имеют.

Стремительный прогресс намечается также и в оптоволоконных линиях передачи информации. Это в первую очередь связано с созданием новых нелинейных оптических сред, наноструктурированных оптических волокон и фотонных кристаллов.

### Сфера энергетики

Другая достаточно широкая сфера применения нанофотоники, которая пока ещё находится в стадии прикладных поисковых исследований, - это энергетика. Я имею в виду системы преобразования световой энергии в электрическую - это солнечные батареи, и электрическую энергию - в световую. Это электролюминесцентные материалы и устройства, а также системы химического запасаения световой энергии, например, получение водорода путём фоторазложения воды.

Если вдуматься, то нетрудно понять, что все источники энергии, которые мы используем сегодня (исключая атомную энергию, т.е. ту, что производят атомные электростанции, работа-



Общее потребление электроэнергии  
(2 ТераВт =  $2 \times 10^6$  МВт)

ющие на радиоактивных изотопах урана), так или иначе связаны с солнечной энергией. Ведь уголь, нефть, торф и природный газ в конце концов произошли в результате процессов фотосинтеза, происходивших на Земле миллионы лет.

С другой стороны, мощность солнечного излучения вблизи поверхности Земли достаточно велика, на каждый квадратный метр приходится более одного киловатта.

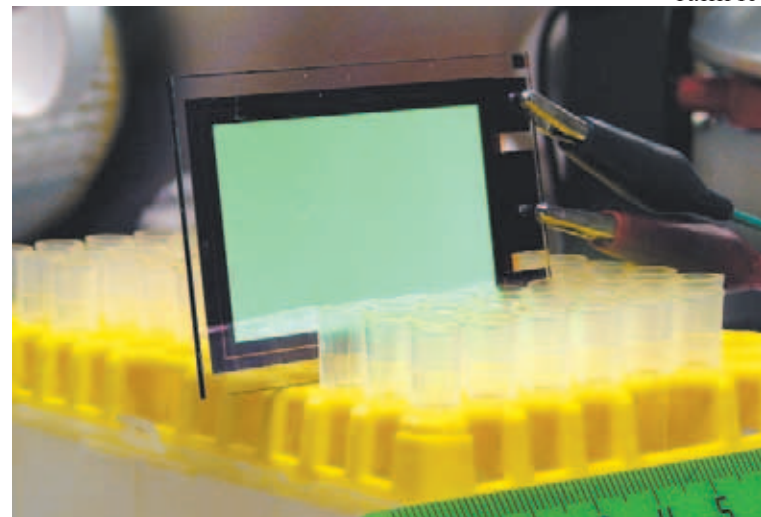
Потребности человека в энергии все время возрастают. Если сегодня мощность всех электростанций на Земле составляет величину порядка 2 Тераватт, то, по оценкам экспертов, к 2050 году общее потребление энергии на Земле во всех ее видах станет такой, что для ее получения суммарная мощность всех ее источников достигнет 15 Тераватт. К 2100 году потребление энергии удвоится. Где же взять столько энергии? Если допустить, что человечество полностью перейдет на атомную энергетику, то для получения 15 Тераватт нужно в течение 45 лет каждый день вводить в строй по одному атомному энергоблоку мощностью 1 Гигаватт.

Есть и другая сторона этого вопроса. Если вся живая природа, растения и животные с целью сохранения своего вида выбирают стратегию адаптации - то есть приспосабливаются к окружающей среде, ограничивают своё потребление, то человек поступает наоборот: не хочет ограничивать свои потребности, изменяет окружающую среду. А это в конце концов может привести к его исчезновению как вида. Поэтому с этой точки зрения, кроме поисковых способов получения энергии, необходимо задуматься и об ее экономном потреблении. Это мы теперь называем проблемой энер-

госбережения. Вот только один пример.

Примерно около 15% всей электроэнергии, вырабатываемой на земном шаре, используется для преобразования в свет. Эффективность этого преобразования привычными для нас лампами накаливания составляет несколько процентов. Несколько выше КПД у газоразрядных ламп. Совершенно другой принцип заложен в светодиодах - фактически это прямое преобразование в полупроводнике энергии носителей тока (электронов и дырок) в свет, которое происходит в результате их рекомбинации. Поэтому и КПД здесь намного

больше. Мы уже пользуемся в быту этими светодиодами и хорошо знаем, что светодиодный фонарик работает намного дольше от той же батарейки, чем обычный, да и светит он намного ярче. С одной стороны, совершенно очевидно, что за этими преобразователями - будущее, но с другой стороны - есть проблема в их высокой себестоимости, ведь они изготавливаются из дорогостоящих неорганических полупроводников. Если такие светодиоды использовать в карманном фонарике, то это может оказаться рентабельным,



Лабораторный образец электролюминесцентной панели

цессе их эксплуатации. Их главный враг - кислород и влажность. Нужно решить проблему их защиты от воды и кислорода и найти способы стабилизации их характеристик. Конечно, это удорожает технологию. Возникает вопрос: что же тогда лучше - неорганика? А может, есть компромисс - не нужно, чтобы лампа была чересчур долговечной, может быть, достаточно сделать ее настолько дешевой, чтобы не жаль было заменять хотя бы раз в год, как лампы накаливания, которые мы регулярно выбрасываем?

Такой же вопрос возникает при разработке солнечных батарей. Несмотря на всю заманчивость прямого преобразования солнечной энергии в электрическую, стоимость последней оказывается намного выше той, которую получаем от тепловых, атомных и гидроэлектростанций. Ответ на вопрос, нужно ли переходить на органические солнечные батареи, - предмет серьезной научной дискуссии. С одной стороны, кремниевые батареи долговечны, имеют больший по сравнению с органическими батареями коэффициент преобразования световой энергии в электрическую - 20% (у органических пока до последнего времени он составлял величину не более 5-6%). С другой - расчетная стоимость одного кВт/часа энергии с кремниевых батарей в 10 раз выше, чем одного кВт/часа, полученного с электростанции. Такая система может быть рентабельной, например, в горах, когда рядом нет линии электропередач, но зачем она нужна, если рядом розетка? Как изыск? Другое дело - органические солнечные

батареи. Стоимость, которую уже сейчас мы можем в них заложить, даже при 3-4% коэффициенте преобразования световой энергии в электрическую, возможно позволяет говорить о рентабельности их использования даже в домашних условиях. Повесил на стену такую панель из полимерного материала - и днем

можно накапливать энергию! Недавно в апреле этого года в журнале Science появилось сообщение, что для органической солнечной батареи удалось достигнуть 9-10%-ного коэффициента преобразования света в электроэнергию.

### Новые оптоволоконные линии

Еще одна очень перспективная область нанофотоники связана с использованием света в системах передачи информации по оптоволоконным линиям. Глав-



Демонстрационный лабораторный образец органической солнечной батареи, разработанный в ИПХФ РАН, которая приводит в действие настенные часы

ная проблема здесь - повышение плотности передачи информации. Дело в том, что световой пакет в процессе его движения по оптоволокну уширяется за счёт так называемого дифракционного расплывания оптического сигнала, бегущего по волокну. Преодолеть дифракционное расплывание можно в нелинейном оптическом материале. Для этого надо создать другое оптоволокну, которое будет фокусировать оптический сигнал, при этом световой сигнал представляет собой бегущий по оптоволокну солитон. Это одна из интереснейших проблем нанофотоники - создание новых оптических сред, в которых можно реализовать нелинейности. Одной из таких сред являются наноструктурированные оптические волокна и фотонные кристаллы.

### Фотонные кристаллы

Про фотонные кристаллы уже много написано в научно-популярной литературе: что это какие-то фантастические кристаллы, которые способны не отражать и не поглощать свет, а преломлять его совершенно чудесным образом, так что свет может огибать оптический материал, оставляя предметы, которые находятся за ним, невидимыми! Действительно, это одно из са-

ликвал в журнале "Успехи физических наук" статью под названием "Электродинамика веществ с отрицательными значениями диэлектрической и магнитной постоянной", в которой обсуждался вопрос о том, какими свойствами могло бы обладать вещество с отрицательным коэффициентом преломления света. К этой идее в то время отнеслись более чем скептически. И вот через 40 лет такие материалы имитируют с помощью фотонных кристаллов. Получается материал-невидимка, прямо как у Герберта Уэллса.

Как работает фотонный кристалл? Это регулярная решетка, образованная благодаря тому, что материал имеет коэффициент преломления света, периодически изменяющийся в пространстве. Это могут быть регулярно расположенные шарики, волокна и т.д.

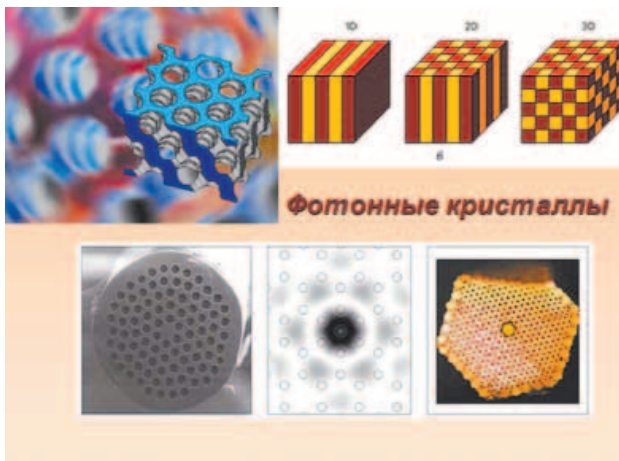
Фотонный кристалл есть оптический аналог полупроводника, в том смысле, что его регулярная структура для световой волны создаёт разрешенные и запрещенные зоны, также как атомарная решетка кристалла создаёт разрешенные и запрещенные зоны для движения электронов. Меняя структуру фотонного кристалла, мы можем управлять фотонами.

### Что такое хемочип?

Отдельная область нанофотоники - это новые интегрированные сенсорно-диагностические системы для контроля окружающей среды, состояния человека и его взаимодействия с окружающей средой. Опытные образцы таких приборов уже созданы и демонстрируются на выставках научных разработок. Основу их составляют специальные оптические сенсорные элементы на основе наноструктур, которые называют хемочипами, с помощью кото-

ров, посаженных на наноструктурированную подложку. Эти молекулы меняют свои оптические характеристики при взаимодействии с анализируемыми газами, а на основании этих изменений специальная компьютерная программа делает выводы о составе смеси. Газовые анализаторы предыдущего поколения были селективно настроены на какое-то одно вещество. В данном случае используется совершенно другой подход к диагностике. Мы идем за природой. Собака чувствует человека по запаху. Значит, все существующее имеет запах, в котором содержится не только индивидуальный портрет человека, но и портрет его физического состояния, наличие у него каких-либо заболеваний. Да и сам принцип системы обоняния состоит в том, что в ней нет

Еще одно интересное направление развития нанофотоники связано с медицинской диагностикой - оптическая томография. В настоящее время разрабатывается несколько различных систем для оптического томографа. Одна из них - оптическая когерентная томография работает следующим образом.



клеток, селективно настроенных на определенные запахи, - все клетки одновременно реагируют на все, что их окружает, но по-разному, а далее сигнал обрабатывается по принципу нейронной сети. Хемочип можно сравнить с искусственным носом.

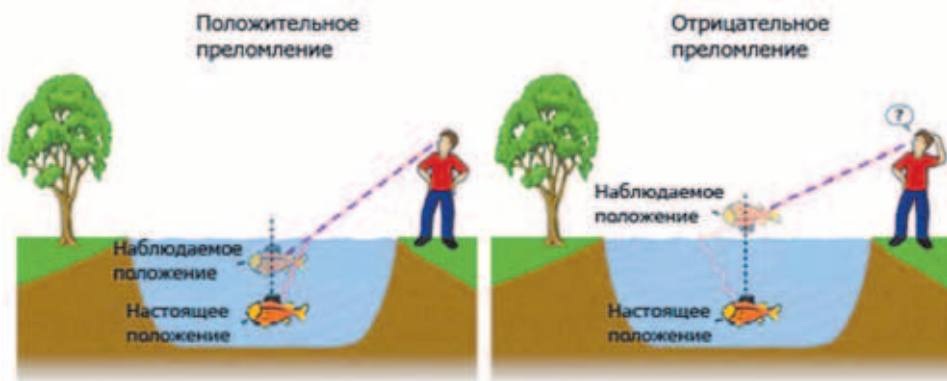
Европейское сообщество поддерживает ряд программ в области биомедицинской диагностики. Один из примеров - это создание интегрированной диагностической системы состояния человека. Что она из себя представляет? Это пластиковый браслет на руке человека, в который вмонтирован оптический хемочип, контролирующий газовую среду выделений (вместо анализа крови), с помощью которого контролируется состояние его здо-

из органических материалов), с помощью которой вся информация передается на мобильный телефон или в поликлинику. В этой системе нет батарей, она автономно питается с помощью устройства, которое преобразует свет и человеческое тепло в электрическую энергию.

### Оптическая томография - в помощь медицине

Фемтосекундный лазер испускает очень короткий импульс света, который проходит через ткани (в красной и ближней ИК-области спектра биологическая ткань почти прозрачна) и где-то отражается. Время, за которое свет пробегает и отражается от какой-то точки объекта, фиксирует компьютер. Это позволяет создать по временам пробега и отражения объемную картинку ткани. Есть и другие варианты реализации оптического томографа - флуоресцентная диффузионная томография и оптическая проекционная томография. Например, такие томографы разрабатываются в Институте прикладной физики РАН (г. Нижний Новгород). Для использования оптической томографии нужны агенты, которые будут создавать контраст тканей. Созданием таких контрастирующих веществ занимается много научных групп.

В заключение я бы хотел отметить, что все, о чем говорилось в этой статье, - это реальный современный уровень исследований и разработок в области нанофотоники. Однако грядущий качественно новый уровень нанофотоники связан с созданием оптических логических устройств, оптоэлектронных процессоров и компьютеров - с архитектурой, подобной мозгу человека, стереоскопической системой визуализации информации, подобной зрительному процессу.



Если вода имела бы отрицательный коэффициент преломления света, то предмет, находящийся в воде, мы наблюдали бы парящим над поверхностью озера

мых удивительных явлений, которое можно реализовать с помощью фотонных кристаллов. Около 40 лет назад профессор В.Г. Веселаго опубли-

ных производится анализ состава различных газовых смесей. Такой сенсорный элемент может состоять из нескольких молекул-индикато-

ровья. Кроме того, в этом браслете - устройства для измерения температуры, кровяного давления и электронная схема (тоже полностью

## Новости из институтов НЦ РАН

### ИПХФ:

### Новое об органических фотохромах

С 6 по 8 октября в Подмоскowie прошел Российско-французский симпозиум, посвященный последним результатам исследований органических фотохромов.

Его организаторами выступили Российская академия наук, Российский фонд фундаментальных исследований, Институт проблем химической физики, Центр фотохимии РАН.

Свои доклады здесь представили более 50 ученых, в том числе более 20 представителей научных учреждений Франции.

Были затронуты такие направления, как: фундаментальные, экспериментальные и теоретические исследования фотохромных систем, наноструктурные и супрамолекулярные фотохромные системы; дизайн и синтез новых термостойких фотохромных органических соединений; органические фотохромные системы для оптической памяти и обработки оптической информации и др.

Интерес к фотохромным соединениям связан с возможностями их широкого практического применения в информационных технологиях, молекулярной электронике, элементах оптической памяти, системах аккумуляции солнечной энергии.

### ИПХФ:

### Подготовка научных кадров

Привлечение талантливой молодежи к творческой научной работе всегда было одной из приоритетных задач ИПХФ РАН. Ежегодно в очную аспирантуру Института принимаются от 15 до 20 человек.

Конкурс проводится два раза в год: весной (прием документов - до 15 марта) и осенью (до 28 августа). Согласно лицензии, Институт имеет право на ведение послевузовской подготовки, то есть аспирантуры, по 7 научным специальностям.

В этом году в аспирантуру поступили 12 человек (11 - на очную форму обучения, 1 - на заочную форму), у трех из них были дипломы с отличием. 8 аспирантов выполняли дипломные и магистерские работы в лабораториях Института. Практически у всех аспирантов были научные публикации.

На специальность "Химическая физика" поступило 4 человека, на "Физическую химию" - 6. На специальность "Биохимия" и "Вычислительная математика" - по 1 человеку.

В этом году в аспирантуру ИПХФ РАН будут обучаться: 3 выпускника Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, 2 выпускника Ивановского государственного университета и по одному представителю - от Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева, Российского геологоразведочного университета им. Орджоникидзе, Московской государственной академии тонкой химической технологии им. М.В. Ломоносова, Ивановского государственного химико-технологического университета, Оренбургского и Югорского государственных университетов.

Что касается наших выпускников, то в 2011-м аспирантуру Института окончили 10 человек. Всего в текущем году было выполнено и защищено 38 дипломных работ (3 магистра, 7 бакалавров, 28 специалистов).

На 1 октября 2011 г. в аспирантуру ИПХФ РАН числится 39 человек: 37 аспирантов очной формы обучения и 2 - заочной.

Подготовила Елена ПЫЛАЕВА

### ИЭМ:

- 22 сентября в Доме Правительства Московской области состоялось вручение дипломов Совета по грантам Президента РФ для поддержки молодых российских ученых сотрудникам ИЭМ РАН: к.х.н. Д.А. Чарееву и к.г.-м.н. А.В. Спивак.