

# ПОВОРАЧИВАЯ СВЕТ НАЗАД

## МАТЕРИАЛЫ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ ПОКАЗАТЕЛЕМ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

**В**зяв обычные материалы, можно (благодаря использованию их в необычной конструкции) получить новые материалы, называемые метаматериалами, которые заставляют световой поток поворачиваться или преломляться назад. Ученые, после многих лет поиска и испытаний в надежде получить новые материалы, ищут возможность обеспечить нужные свойства у метаматериалов, которые, как выяснилось, обладают отрицательным показателем преломления. Об истории создания метаматериалов и исследовании их интересных и уникальных свойств рассказывает в своей статье [1] один из их первооткрывателей Костас Сукулис (Costas Soukoulis).

### ВВЕДЕНИЕ

Когда свет падает на некоторые специально изготовленные материалы, объединенные общим названием "метаматериалы", он резко поворачивается налево. Этот отрицательный поворот преломленного света в направлении, противоположном тому, в котором он распространяется в обычных материалах, дал право ученым называть эти уникальные синтетические материалы "левовращающими" материалами (LHM) или *материалами с отрицательным показателем преломления (NIM)*.

Впервые такие материалы были продемонстрированы в 2000 году. Метаматериалы привлекли к себе большое внимание ученых благодаря широкому спектру потенциальных приложений. Ученые, например, продемонстрировали возможность создания *плоских суперлинз*, которые могли бы работать в области видимого света. Эти линзы позволяют добиться сверхвысокого разрешения по сравнению с обычной оптикой и обеспечивают формирование значительно более подробных изображений, чем позволяет используемая длина волны света.

Свойства метаматериалов дают возможность использовать их в многообещающих приложениях в военном деле и в системах безопасности. Материалы типа NIM позволяют легко согласовать импедансы. Они демонстрируют свойства, характерные для свободного пространства (воздушной среды), в результате не происходит обычного отражения лучей, падающих на них под любыми углами. Это значит, что самолет, покрытый в соответствии с технологией "Стелс" таким метаматериалом, может остаться незамеченным. Несколько исследовательских групп используют метаматериалы для создания и демонстрации NIM в микроволновом диапазоне частот.

### ПРЕДЫСТОРИЯ

Концепция NIM была впервые выдвинута около сорока лет тому назад русским ученым Виктором Веселаго [2]. Он предположил возможность существования материалов, для которых как диэлектрическая, так и магнитная проницаемость

отрицательны. Эта идея, однако, была встречена физиками скептически. Реализация материалов типа NIM казалась невероятной, учитывая естественную трудность, связанную с нахождением таких материалов, которые имели бы перекрывающиеся электрические и магнитные резонансы. Фундаментальные процессы, вызывающие нарастание электрического и магнитного откликов в материале, естественно возникают в различных частотных диапазонах, что и делает их перекрытие маловероятным.

Однако, используя искусственно структурированные метаматериалы, где макроскопические включения замещают атомы и молекулы обычного материала, ученые могут обойти это ограничение. Метаматериалы можно спроектировать так, чтобы электрический и магнитный резонансы можно было бы отдельно настроить на появление в диапазонах от нижней части радиочастотного до видимого ЭМ-спектра.

Полученные впоследствии теоретические и экспериментальные подтверждения дают повод утверждать, что отрицательный показатель преломления (ОПП) действительно возможен. На практике разработка материалов с ОПП в микроволновом диапазоне ведется так активно, что ученые и инженеры все чаще берутся за реализацию микроволновых приложений. В отличие от них, исследователи, занимающиеся NIM в диапазоне более высоких частот, пока еще находятся на ранней стадии решения вопроса о производстве таких материалов и получении от них нужных характеристик.

## ПОИСКИ

В 1996 и 1998 годах John Pendry (Джон Пендри) предположил, что периодическая структура, составленная из бесконечно тонких проводников так, чтобы формировалась простая кубическая решетка, будет вести себя как решетка металла, находящаяся под действием ЭМ-излучения. В типичном примере использовались проводники диаметром несколько десятков микрон, расположенные на расстоянии нескольких миллиметров и облучаемые полем гигагерцевой частоты. В 1999 году Пендри предложил использовать искусственный материал, состоящий из так называемых *расщепленных кольцевых резонаторов* (SRR), который продемонстрировал в определенной полосе отрицательные значения  $\epsilon$ , несмотря на то, что был сделан из немагнитных материалов.

В 2000 году Smith (Смит) и его коллеги [3] представили первый NIM, который состоял из перемежающихся слоев массива SRR и тонких проводников. В том же году Пендри [4] предложил идею плоской *совершенной линзы* (perfect lens), реализуемой на основе метаматериала, который имел ОПП  $n=-1$ . Он вычислил, что среда с ОПП может быть использована для создания совершенной линзы, которая будет фокусировать изображение с разрешением, не ограничиваемым длиной волны света.

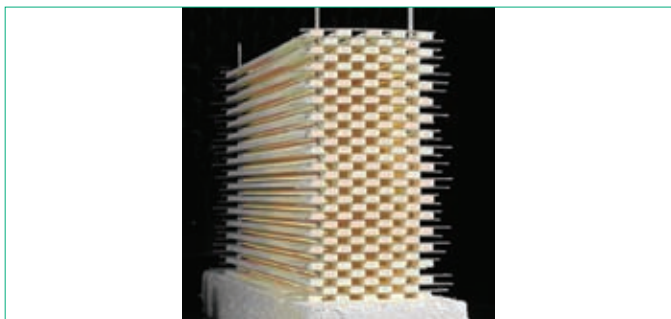
Линза с ОПП может фокусировать не только распространяющиеся лучи, но и более тонкие детали ближних областей ЭМ-полей, которые бесконечно малы и не распространяются как лучи. Хотя многие исследователи первоначально отвергли возможность существования совершенных линз, Пендри и Смит были больше озабочены подтверждением своей концепции и выяснением ее ограничений, проводя численное моделирование и эксперименты.

В 2001 году Смит и его коллеги экспериментально показали, что клиновидный метаматериал позволяет получить ОПП. Дальнейшие эксперименты и моделирование, которые были проведены другой группой (состоящей из компаний, лабораторий и университетов: Boeing, MIT, Northeastern, Ames и Bilkent), подтвердили существование материалов с ОПП. В 2002 Смит вместе с автором статьи и сотрудниками [5] разработали специальную процедуру восстановления для получения эффективных  $\epsilon$  и  $\mu$  у метаматериалов путем введения *гомогенной эффективной среды* (НЕМ). Нами было найдено, что восстановленные частотно-зависимые  $\epsilon$  и  $\mu$  полностью совместимы с аналитическими выражениями, предсказанными с помощью расчетов, учитывающих показатели эффективной среды. Важно то, что удалось показать, что среда, составленная из проводников, демонстрирует наличие частотной области, в которой отрицательна вещественная часть  $\epsilon$ , а SRR создают частотную область, в которой отрицательна вещественная часть  $\mu$ .

В составной структуре на частотах, где обе вещественные части  $\epsilon$  и  $\mu$  одновременно отрицательны, вещественная часть показателя преломления тоже является однозначно отрицательной. Эта техника полностью применима к определению характеристик экспериментальных образцов метаматериалов в тех случаях, когда известны параметры рассеяния.

В 2003 году совместно с Fotinou (Фотейнопулу) и Economou (Эконому) автор провел машинное моделирование специально спроектированных фотонных кристаллов (ФК) с ОПП [6]. Эта работа показала, что ОПП не нарушает причинность и не изменяет скорость света. В том же году исследователи из Лаборатории в Амесе (Ames, США), Университета в Билкенте (Bilkent, Турция) и Лаборатории FORTH Института электронных структур и лазеров (IESL, Крит, Греция) продемонстрировали наличие ОПП в фотонных кристаллах в микроволновом режиме (рис.1), при котором наблюдалось субволновое разрешение, имеющее порядок  $\lambda/3$ . В 2004 году эти группы изготовили материал с ОПП, который имел минимальное затухание для сигнала 4 ГГц на уровне -0,3 дБ/см.

Исследователи в Амесе и на Крите установили, что SRR имеют резонансный электрический отклик в дополнение к наблюдавшемуся ранее магнитному отклику. Электрический отклик при этом срезается, как в проволоке, и может быть



**Рис.1** Фотонный кристалл, имеющий ОПП, равное -1, и обеспечивающий субволновое разрешение

высоких частотах, а тем более в оптическом диапазоне. Успех в конструировании метаматериалов для микроволнового диапазона сопровождался желанием создать альтернативную технологию суперлинз. Это подогревает интерес физиков в разработке метаматериалов с ОПП для видимого светового диапазона.

Работая в этом направлении, исследовательские команды Сукулиса и Озбаи (Ozbay) выясняли возможность получения ОПП для кристаллов с фотонной запрещенной зоной – искусственных материалов, которые могут передавать сигнал в световом диапазоне ЭМ-спектра и потому имеют альтернативные (с NIM) области, отличающиеся показателями преломления. Следует, однако, быть очень внимательным и отличать поведение света, характерное для LHM-эффекта, от поведения, характерного для эффекта рассеяния Брэгга, который тоже может давать ОПП.

Автор и его коллеги из Лаборатории в Амесе и Лаборатории FORTH провели расчеты и разработали первую программу компьютерного моделирования, которая дает возможность получения ОПП на примере двумерного ФК типа LHM.

Такой ФК (как образец метаматериала), спроектированный и протестированный автором и Озбаи, состоит из квадратного массива алюминиевых стержней. При тестировании мы нацеливали луч ЭМ-энергии микроволнового диапазона на массив стержней для демонстрации ОПП и наличия свойств суперлинзы. С помощью моделирования был выяснен еще один важный факт: ОПП не возникает немедленно. Падающая на массив стержней ЭМ-волна временно задерживается и захватывается в ловушку на границе между воздухом и фотонным кристаллом с ОПП, прежде чем она фактически начинает двигаться в отрицательном направлении.

Объясняя физику явления, мы придерживаемся мнения, что внешние лучи в задержанном пучке распространяются быстрее, чем скорость света, учитывая действие механизма ловушки. Проведенные расчеты и моделирование, однако, подтверждают, что скорость света не нарушается фактом появления ОПП. В то время, как большинство экспериментов с ФК были проведены в микроволновом диапазоне, те же структуры, смасштабированные для работы в области оптических частот (рис.2), должны продемонстрировать значительно меньшие потери, чем NIM, структура которых базируется на металлических элементах. Тем не менее, до сих пор только небольшому числу исследователей удалось экспериментально продемонстрировать наличие ОПП в фотонных кристаллах в близкой инфракрасной области.

## НАПРАВЛЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ – ОСВОЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ЧАСТОТ

Исследователи только начали осваивать приложения для метаматериалов с ОПП в области микроволновых частот, а их довольно много. Несмотря на то, что эта работа идет пол-

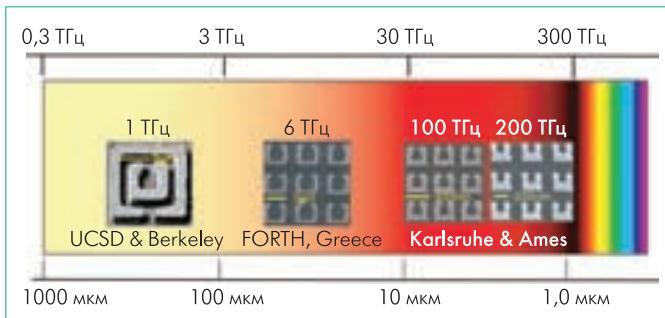
продемонстрирован, если закрыть зазоры SRR, что приводит к разрушению магнитного отклика. В процессе этих экспериментов по изучению электрического отклика материала с ОПП удалось установить очень простой критерий для идентификации того, будет ли экспериментальный пик передачи соответствовать левовращающему (LHM) или правовращающему (RHM) типам материалов. Этот критерий был использован исследователями в Университете Билкента и другими группами, а его справедливость была подтверждена в Амесе и на Крите.

Ученые в Амесе, Билкенте и на Крите продолжили теоретические и экспериментальные работы в 2004 году, изучая характеристики передачи решетки с SRR при различных вариантах поляризации ЭМ-поля. По их наблюдениям, магнитный резонанс системы SRR может быть связан не только с внешним магнитным полем, но и с внешним электрическим полем  $E$ . Это происходит тогда, когда падающее электрическое поле  $E$  параллельно расщепленной стороне SRR и проявляется как провал в спектре. Причиной провала является резонанс  $\epsilon$ , возникающий благодаря ненулевой средней поляризации, внесенной резонансными циркулярными токами, возбужденными полем  $E$ .

В 2005 году исследователи в Амесе и на Крите, а также группа Смита, выдвинули теорию *периодической эффективной среды*, которая была, по сути, значительным улучшением подхода НЕМ. Эта теория объяснила и разрешила проблемы, связанные с НЕМ, такие как отрицательное произведение  $\text{Im}(\epsilon) \cdot \text{Im}(\mu)$ . Источником всех этих проблем были сильные резонансы. Длина волны внутри NIM в некоторых случаях сравнима с периодичностью среды. Поэтому попытка аккуратно описать такие случаи с помощью подхода, основанного на использовании НЕМ, оказывается неудачной.

## ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

Использование ФК представляет собой еще один вариант в достижении отрицательного показателя преломления. В отличие от NIM, фотонные кристаллы можно полностью изготовить из диэлектрика. Они могут, в принципе, обеспечить получение меньших потерь, чем металлические NIM, особенно на



**Рис.2** Прогресс в области освоения метаматериалами все более высоких частот был стремительным. Уже в 2004 году появились модели на частоты 1, 6 и 100 ТГц, а в 2005 году – на 200 ТГц

ным ходом, некоторые физики фокусируют свое внимание на область оптических частот. Мы с сотрудниками университета в Карлсруэ (Karlsruhe, Германия) считаем себя лидерами в этом направлении.

Сообщество исследователей материалов типа NIM преуспело в изготовлении и демонстрации магнитных откликов структур с SRR, работающих на частотах 2 и 6 ТГц (Амес и Крит); и 100 и 200 ТГц (Амес и Университет в Карлсруэ). В большинстве терагерцевых экспериментов использовались образцы с одним слоем SRR на подложке, и передача  $T$  измерялась только в направлении распространения, перпендикулярном плоскости SRR, пользуясь связью электрического поля с магнитным резонансом SRR благодаря асимметрии. Однако этот подход не позволяет управлять формированием отрицательной магнитной проницаемости.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ С ОПП

Теперь, когда ученые смоделировали ожидаемое поведение материалов с ОПП, исследователи занимаются конструированием метаматериалов и ФК для наблюдения за ОПП. Ли Цанг (Lei Zhang) – ассистент Лаборатории в Амесе, провела многие из этих экспериментов под руководством Гари Таттла (Gary Tuttle) – доцента той же лаборатории, работающего в Исследовательском центре микроэлектроники университета штата Айова (США).

Цанг провела серию экспериментов с металлическими структурами, которые были сформированы в соответствии с результатами моделирования, проведенного автором. Ее эксперименты подтвердили теоретические выводы автора для микроволновой области ЭМ-спектра. В этой области метаматериалы демонстрируют свойства, связанные с ОПП: отрицательную диэлектрическую проницаемость, отрицательную магнитную проницаемость, и ОПП – их комбинация может существовать только в искусственно созданных устройствах.

Эксперименты Цанг с ФК подтвердили предсказания теоретиков: ОПП и возможность формирования суперлинз можно наблюдать для ФК в микроволновом диапазоне. Следующий шаг – адаптировать технологию к другим диа-

### СЛОВАРЬ

**HEM** – Homogeneous Effective Medium – *гомогенная эффективная среда* – тип метаматериала, разработанный в 2002 г. Smith и Soukoulis.

**LHM** – Left-Handed Material – *материал с отрицательным показателем преломления* (то же, что и NIM); *левоповорачивающий материал* – материал, поворачивающий свет резко влево.

**NIM** – Negative Index Material – *материал с отрицательным показателем преломления* – искусственный материал, действительная часть комплексного показателя преломления которого  $< 0$  (оба параметра:  $\epsilon$  и  $\mu$  – отрицательны).

**RHM** – Right-Handed Material – *материал с положительным показателем преломления*; *правоповорачивающий материал* – материал, поворачивающий свет вправо.

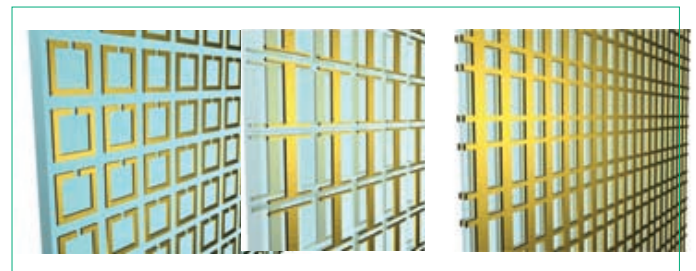
**SRR** – Split Ring Resonator – *расщепленный кольцевой резонатор* – элемент искусственного немагнитного материала, состоящего из массива SRR, демонстрирует в определенной полосе отрицательные значения  $\mu$ .

**UCSD** – University of California at San Diego – Калифорнийский университет, Сан-Диего (США).

пазонам ЭМ-спектра с прицелом на спектр видимого света. Однако для достижения этого потребуются изготовить фотонные структуры для исключительно малых длин волн. Цанг считает, что это возможно, хотя и в отдаленной перспективе. Сейчас она будет рада создать успешный образец материала с ОПП, работающего в инфракрасной области ЭМ-спектра.

### РЕАЛЬНОСТИ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Пока не было получено ни одного сообщения о материале с ОПП, наблюдаемом в терагерцевом диапазоне. Одна из причин в том, что очень трудно измерять как передачу  $T$ , так и отражение  $R$  вдоль направления, параллельного плоскости SRR, при существующей топологии SRR и непрерывных проводниках (рис.3). Следовательно, нужно улучшить и упростить дизайн, чтобы его можно было легко реализовать и экспериментально охарактеризовать, особенно в ИК- и оптическом диапазонах ЭМ-спектра. Такой дизайн предлагает расширение пар проводников конечной длины.



**Рис.3** Структуры метаматериалов, получаемых с помощью обычной плоской литографии. Слева – структура с расщепленными резонаторами (SRR), пригодна для плоской литографии и имеет магнитный отклик, перпендикулярный этой плоскости, хотя его и трудно обнаружить при обычных измерениях; те же структуры, которые приведены в центре и справа, допускают многоруковневую обработку и используются для изготовления метаматериалов с отрицательными электрической  $\epsilon$  и магнитной  $\mu$  проницаемостями и вертикальным направлением оси ОПП



Недавние теоретические работы, направленные на то, чтобы добиться магнитного отклика от металлических элементов, показали, что пары проводников конечной длины (то есть просто коротких проводников) не могут сами по себе заменить SRR. Однако они могут напрямую привести к возникновению ОПП, не используя дополнительные металлические проводники. Недавние эксперименты показали возможность получения ОПП в терагерцевом диапазоне при использовании коротких проводников.

Вероятно, что в них ОПП был получен благодаря наличию больших мнимых частей  $\epsilon$  и  $\mu$ , которые ведут к доминантной мнимой части ОПП  $n$ , а следовательно, к быстрому затуханию ЭМ-волн, что делает такие типы метаматериалов непрacticными.

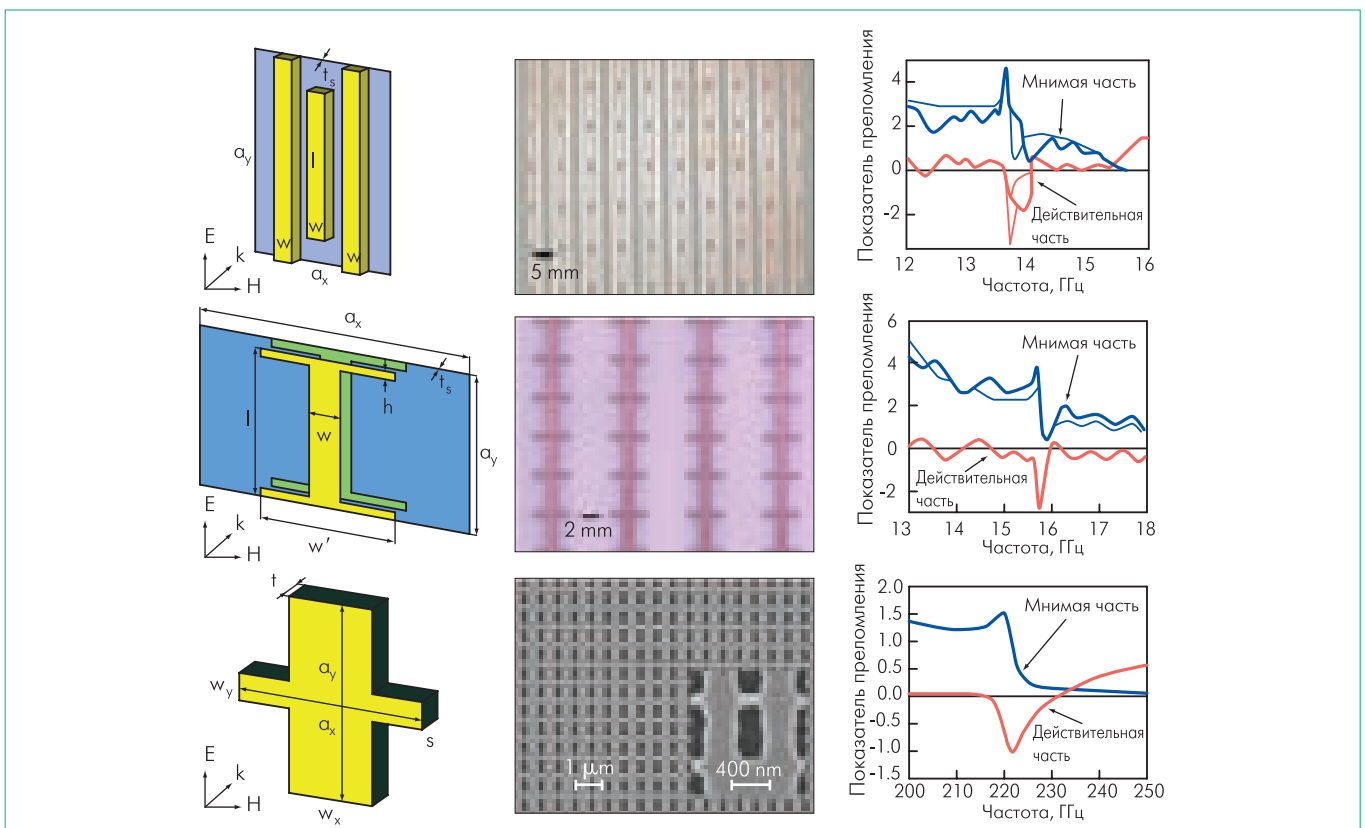
В проведенных недавно в Амесе исследованиях уже использовали новый дизайн металлических структур с короткими парами проводников для получения ОПП в микроволновом и терагерцевом диапазонах. Основная структура отдельных ячеек этих NIM была построена из проводников различной формы (рис.4).

Пара коротких параллельных проводников, которая обеспечивает отрицательный магнитный и электрический отклики, заменяет обычные SRR. Она представляет собой два металлических отрезка проволоки, разделенные диэлектрическим слоем толщиной  $t_s$ . Под действием ЭМ-волны с характерным

волновым вектором и поляризацией эта пара приобретает не только магнитный резонанс, приводящий в результате к отрицательному  $\mu$ , но и одновременно электрический резонанс со свойственным ему отрицательным  $\epsilon$ .

Магнитный резонанс происходит от антипараллельного тока в паре проводников с зарядами противоположного знака, накапливающимися на соответствующих концах; электрический резонанс возникает благодаря возбуждению параллельного тока в паре проводников с зарядами того же самого знака, накопленными на концах обоих проводников. При измерениях передачи ЭМ-волны падают нормально к поверхности образца. Организация эксперимента в этом случае значительно проще, чем при использовании обычных SRR и проводников, когда падающая ЭМ-волна должна распространяться параллельно поверхности образца. При обычной ориентации SRR практически невозможно осуществить такой тип измерений в терагерцевом диапазоне, так как производятся только однослойные образцы. Используя передачу и отражение от одного слоя, мы можем выделить эффективный показатель преломления, который мог бы иметь место, если бы можно было изготовить многослойный образец на основе однослойной структуры в качестве базового элемента.

Полученные результаты показывают жизнеспособность идеи использования пар коротких проводников для реализации NIM. Кроме того, формирование таких пар со значи-



**Рис.4** Типы используемых структур на основе проволочных пар. Слева схематически представлен вид трех типов отдельных ячеек на основе проволочных пар. В центре приведены фотографии образцов, изготовленных из проволочных пар. Справа измеренные (толстые линии) и расчетные (тонкие линии) значения вещественных и мнимых частей показателя преломления

тельно отличающимися геометриями может привести к материалам с ОПП. Простота изготовления структуры с парами проводников может ускорить разработку NIM, работающих в области оптических длин волн. В недавней неопубликованной пока работе исследователи в Карлсруэ и в Амесе изготовили метаматериал с ОПП в диапазоне 1,4 мкм и параметрами  $\text{Re}(n) = -1,0$  и  $\text{Im}(n) = 0,30$ . Этот материал имеет наибольшую из известных по публикациям рабочую частоту и обладает минимальной мнимой частью.

## ЧТО ДАЛЬШЕ?

Усилия исследователей (включая и наших) в последние годы заключались в разработке методов и средств, с помощью которых можно спроектировать, изготовить и исследовать характеристики метаматериалов, имеющих ОПП. Факт возникновения ОПП был многократно продемонстрирован в фиксируемых условиях проведения экспериментов. Исследователи также показали, что разрешение при формировании изображений для материалов с ОПП лежит за пределами, определяемыми дифракцией. Можно констатировать, что за последние четыре года (благодаря работе нескольких групп ученых) исследования материалов с ОПП вышли на новый качественный уровень. Сейчас мы стараемся продвинуть эту технологию и методы настолько, чтобы разработанные новые материалы привели к развитию новых полезных приложений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Costas M. Soukoulis.** Banding Back Light. The Science of Negative Index Materials. – OPN, June, 2006, p.16–21.
2. **Веселого В.В.** – Успехи физических наук, 1968, №10, с.509.
3. **Smith D.R.** et al. — Phys. Review Letters, 2000, 84, p.4184.
4. **Pendry J.B.** — Phys. Review Letters, 2000, 85, p.3966.
5. **Smith D.R.** et al. — Phys. Review B, 2002, 65, p.195104.
6. **Foteinopoulou S.** et al. — Phys. Review Letters, 2003, 90, p.107402.
7. **Parazzoli C.G.** et al. — Phys. Review Letters, 2003, 90, p.107401.
8. **Aydin R.** et al. Optics Letters, 2004, 29, p.2623.
9. **Katsarakis N.** et al. Appl. Phys. Letters, 2004, 84, p.2943.
10. **Koschny Th.** et al. Phys. Review Letters, 2004, 93, p.107402.
11. **Smith D.R., J.V.Pendry.** — Phys. Today, 2004, 57 (6), p.37.
12. **Enkrich C.** et al. — Phys. Review Letters, 2005, 95, p.203901.
13. **Katsarakis N.** et al. — Optics Letters, 2005, 30, p.1348.
14. **Koschny Th.** et al. — Phys. Review B, 2005, 71, p.245105.
15. **Shalaev V.M.** et al. — Optics Letters, 2005, 30, p.3356.
16. **Ramakrishna S.A.** — Rep. Prog. Phys. 2005, 68, p.449.
17. **Zhang S.** et al. — Phys. Review Letters, 2005, 95, p.137404.
18. **Zhou J.** et al. — Phys. Review B, 2006, 73, p.041101.

## ОБ АВТОРЕ

**Костас Сукулис (Costas M. Soukoulis)** – сотрудник Лаборатории в Амесе, профессор кафедры физики и астрономии Гос. университета штата Айова в Амесе (США), сотрудник Лаборатории FORTH Института электронных структур и лазеров (IESL) в Гераклионе (Heraklion, Крит, Греция).



## Метаматериалы приближаются к диапазону видимого света

Метаматериалы с отрицательным показателем преломления (ОПП), описанные в статье Костаса Сукулиса [1], достигли предельных длин волн порядка 1400 нм (инфракрасная область) в своем движении к красной границе области видимого света.

Очередной прорыв в этой области, как сообщает источник [2], сделала группа ученых из университета Purdue University (США), руководимых профессором Владимиром Шалаевым (Vladimir Shalaev). Они создали образец листового (два параллельных листа серебра, разделенные тонким слоем окиси алюминия), сетчатого метаматериала (аналогичного тому, что показан на рис.4 – средний рисунок в нижнем ряду работы [1]). Он имеет в плоскости систему овальных отверстий (120 нм в поперечнике, расстояние между отверстиями 300 нм) и обладает ОПП -1,1 в диапазоне длин волн 799–818 нм (ближняя инфракрасная область).

В.Шалаев считает, что скоро ему удастся создать подобную структуру, которая будет иметь ОПП в видимой красной области света. Недостатком нового материала он считает довольно большое поглощение света, что делает его непригодным для создания так называемой "плоской линзы". Однако из него можно будет изготовить "гиперлинзу", разрешающая способность которой будет выше так называемого "дифракционного предела", определяемого длиной волны.

Дополнительную информацию о метаматериалах и гиперлинзах, кроме [1], можно почерпнуть в работах [3, 4].

1. Костас Сукулис. Поворачивая свет назад. Материалы с отрицательным показателем преломления. – Наст. номер, с.10–15.

2. Double-negative metamaterial edges towards the visible. – PhysicsWeb, 16.03.2007.

3. Жаров А.А. Метаматематика. Прорыв в оптике и нанофотонике. – [www.nano.nnov.ru/documents/seminar/Seminar.30.Zharov.pdf](http://www.nano.nnov.ru/documents/seminar/Seminar.30.Zharov.pdf).

4. Z.Jacob, L.Alekseyev, E.Narimanov. Hyperlens: Far-field imaging beyond the diffraction limit. – Optics Express, 2006, Vol.14, Issue 18, p.8247.

См. также материал на странице 23.