

Объект исчез

Тигран Оганесян

Ученые доказали возможность создания новых материалов, способных сделать невидимым практически любой предмет. Дальнейшие исследования активно финансируются военными



Иллюстрация - Константин Батынков

У профессионалов и любителей науки произошло смятение чувств. Его вызвала майская публикация в журнале Science, посвященная перспективам создания маскировочных материалов, делающих невидимыми (неразличимыми) скрытые под ними физические объекты.

По мнению авторов двух статей, британца **Джона Пендри** из лондонского Imperial College, американцев **Дэвида Смита** и **Дэвида Шурига** (оба из Университета Дьюка), а также работающего независимо от этой троицы **Ульфа Леонхардта** из шотландского Университета Сент-Эндрюс, первые экспериментальные образцы материалов-невидимок могут быть получены уже в ближайшие несколько лет. Как иронично отметил в одном из своих интервью Ульф Леонхардт, «невидимость стала почти видимой» (в английском оригинале “Invisibility is visibly close”).

Впрочем, здесь необходимо уточнить, что, говоря о материалах-невидимках, Пендри, Смит и Ко имеют в виду далеко не только и даже пока не столько материалы, маскирующие объекты в оптическом диапазоне электромагнитного спектра излучения. В первую

очередь реальным тестам будет подвергнута «непрощупываемость» маскировки в длинноволновой части спектра — радиоволнах и микроволнах: радионевидимки ученые рассчитывают создать примерно через полтора года. Затем по плану дело должно прийти до микро— и инфракрасных волн, и лишь после этого начнутся испытания в части спектра, доступной простому глазу.

В самых общих чертах идея британских и американских физиков заключается в том, что маскируемый объект помещается в некую полость внутри маскировочной оболочки, и световые волны (или любая другая разновидность электромагнитного излучения), ударяясь об эту оболочку, вместо того чтобы попадать далее в спрятанный внутри объект, плавно огибают его и, заново рекомбинируясь, выходят наружу как ни в чем не бывало. Дэвид Смит в этой связи приводит условную аналогию с речным потоком и камнем, помещенным на его пути: «Водные струи, сталкиваясь с камнем, просто растекаются вокруг него и соединяются вместе уже за ним». Но, в отличие от камня и речного потока, человек, наблюдающий за столкновением световых волн с оболочкой-невидимкой, прекрасно видит все прочие предметы, находящиеся непосредственно за скрытым внутри нее объектом, то есть как бы смотрит сквозь объект, никак его не обнаруживая.

Используя уравнения Максвелла, описывающие электромагнитные явления в среде, Пендри и его коллеги сделали необходимые теоретические расчеты физических характеристик

маскировочного материала, способного соответствующим образом изменять направление электромагнитных волн. В частности, ученые пришли к выводу, что этот материал должен быть сконструирован так, чтобы скорость света на некотором удалении от полости была относительно медленной и возрастала при приближении к ней.

Исходя из этого и ряда других полученных расчетных результатов, авторы обеих статей в журнале Science сошлись во мнении, что основой маскировочных покрытий будущего скорее всего станут так называемые метаматериалы, совершенно новый класс искусственно модифицированных композитных материалов, обладающих весьма необычными электромагнитными и оптическими свойствами. Метаматериалы состоят не из атомов и молекул, как обычные вещества, а из особых микроструктур: крошечных, меньше микрона, металлических резонаторов. Причем одно из многих необычных свойств метаматериалов — возможность искусственного варьирования показателя преломления в различных зонах, что в свою очередь и может обеспечить нужный по теории разброс скорости света внутри маскировочной оболочки.

Русские следы

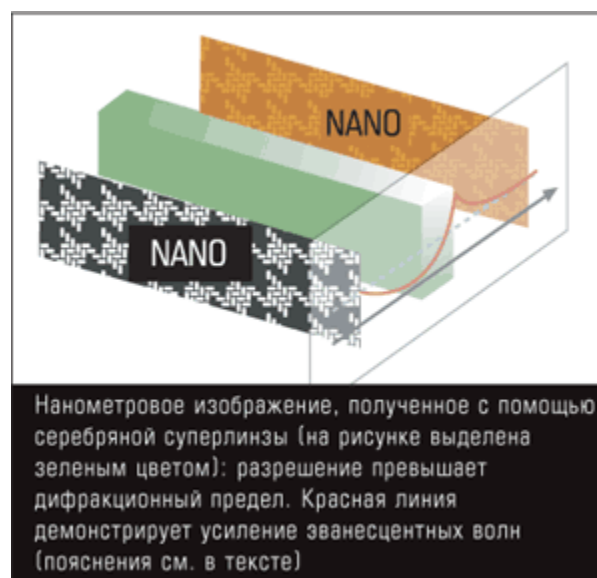
Любопытно, что майская история с материалами-невидимками напрямую связана с советскими и российскими учеными. В 2004 году президиум Российской академии наук присудил доктору физико-математических наук Московского физико-технического института (МФТИ) **Виктору Веселаго** специальную премию им. В. А. Фока за цикл работ «Основы электродинамики сред с отрицательным коэффициентом преломления». Тем самым высшая научная инстанция России наконец официально признала его важнейшую роль в создании теоретического базиса нового направления физических исследований, в последние годы стремительно набирающего обороты во всем мире.

В этом цикле, начатом еще в середине 60-х годов прошлого века, Виктор Веселаго одним из первых заинтересовался необычными

электродинамическими свойствами гипотетических сред, характеризующихся одновременно отрицательными значениями электрической и магнитной проницаемостей, которые и определяют коэффициент преломления. (Справедливости ради, впрочем, следует отметить, что задолго до Веселаго, еще в конце 30-х, на необычные оптические свойства таких сред впервые обратил внимание в ряде своих работ крупнейший советский физик **Леонид Мандельштам**.) Подобные свойства могли быть полностью объяснены и описаны только в том случае, если такие вещества обладают отрицательным значением коэффициента преломления.

Веселаго предсказал, что в материалах с отрицательным коэффициентом преломления определенные оптические явления будут совершенно другими. И самое поразительное из них рефракция — отклонение электромагнитной волны при прохождении границы раздела двух сред. В нормальных условиях волна появляется на противоположной стороне линии, проходящей перпендикулярно этой границе (так называемой нормали к поверхности). Однако если один материал имеет положительный коэффициент преломления, а другой отрицательный, волна будет появляться на той же стороне нормали к поверхности.

В своих работах советский теоретик утверждал, что электродинамика веществ с отрицательным значением n должна представлять несомненный общефизический интерес и вполне логично дополнять куда более привычную нам электродинамику веществ с положительными величинами n . Виктор Веселаго даже придумал для них специфическое название — «материалы-левши» (в англоязычном варианте *left-handed materials*). Однако в то время вещества с отрицательными



значениями в науке еще не были известны, поэтому первоначальная реакция коллег на эти публикации была достаточно скептической.

Более того, все ранние попытки создания веществ с такими свойствами, неоднократно предпринимавшиеся учеными, закончились ничем, и интерес к «левым материалам» в научной среде сравнительно быстро угас.

Отношение ученых к экзотической идее Веселаго резко поменялось в 2000 году. Именно тогда в калифорнийском Университете Сан-Диего **Шелдоном Шульцем** и Дэвидом Смитом (одним из авторов майской публикации 2006 года в Science) был впервые создан искусственный композитный материал (метаматериал), обладающий отрицательными электрической и магнитной проницаемостями в микроволновом диапазоне.

Этот метаматериал представлял собой массив микроскопических медных проволочек и колечек, помещенных в основу из стекловолна. Колечки имели отрицательную магнитную проницаемость, а проволочки — отрицательную электрическую проницаемость, и благодаря этой хитрой комбинации электрических и магнитных резонаторов экспериментаторам удалось добиться столь желанного эффекта — отрицательного показателя преломления n .

Впрочем, эти первые результаты экспериментов Шульца и Смита были встречены многими физиками почти в штыки. Настоящий метаматериальный бум начался лишь спустя почти три года, то есть в 2003-м, когда сразу в нескольких лабораториях наконец удалось повторить важнейшее открытие калифорнийцев.

К текущему моменту количество публикаций на эту тему уже перевалило за тысячу, причем многочисленные зарубежные исследователи безо всяких оговорок признают научный приоритет Виктора Веселаго, дружно упоминая в преамбулах своих статей о его пионерских работах.

Получить же метаматериал с отрицательным преломлением в оптическом волновом диапазоне ученые смогли лишь совсем недавно — в середине прошлого года. Этому успеха добились **Владимир Шалаев** и его коллеги из Университета Пардью (Purdue University), которые разработали весьма прихотливый композит, состоящий из массива микроскопических (нанометрового масштаба) пар параллельных золотых проволочек-нанотрубок. Наконец, нельзя не упомянуть и об открытии в декабре 2005 года совершенно нового типа материалов с отрицательным показателем преломления. Созданный совместными усилиями ученых из австрийского Университета Аугсбурга, американского университета штата Северный Иллинойс и сотрудников Польской академии наук (в числе его ведущих разработчиков значится еще один российский физик, **Андрей Пименов**) материал представляет собой своеобразный «бутерброд» из нескольких слоев-пленок ферромагнитного оксида марганца и оксида меди (кроме того, в нем присутствуют также иттрий и барий). В отсутствие внешнего магнитного поля и при близкой к абсолютному нулю температуре он является сверхпроводником и обладает отрицательной диэлектрической проницаемостью. Изюминка же этого «слоеного пирога» в том, что, если к нему приложить внешнее магнитное поле, становится отрицательной и магнитная проницаемость.

В настоящее время Пименов и его коллеги ведут работу над тем, чтобы существенно уменьшить величину магнитного поля, при которой показатель преломления меняет знак. Другая их интересная идея связана с добавлением в структуру этого материала еще одного слоя вещества, сохраняющего свою намагниченность. Таким образом, ученые рассчитывают достичь требуемого результата и в отсутствие внешнего магнитного поля.

Суперлинзы

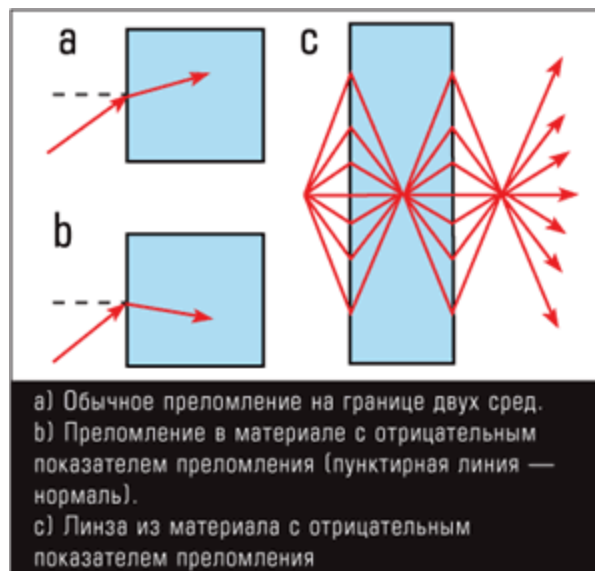
Новейшие эксперименты дают убедительные доказательства того, что метаматериалы с отрицательным коэффициентом преломления имеют большое будущее как в оптике, так и в ряде других областей физики. И одно из самых перспективных направлений их использования, по мнению многих специалистов, связано с разработкой суперлинз, с помощью которых станет возможно получать изображения, не ограниченные так называемым

дифракционным пределом разрешения.

Обычные линзы с положительным коэффициентом преломления собирают и фокусируют световые волны, испускаемые объектом, создавая, таким образом, изображение. Однако объекты — источники электромагнитного излучения испускают также особые слабые волны (эванесцентные волны), которые содержат много дополнительной информации о микроскопической структуре объекта. Измерять эти волны стандартными методами значительно труднее, потому что они экспоненциально затухают по мере удаления от источника и никогда не достигают поверхности изображения. Иными словами, обычное изображение всегда содержит меньше информации, чем источник, из-за дифракционного предела.

Этот дифракционный предел, связанный со всеми оптическими инструментами с положительным коэффициентом преломления, означает, что наилучшее разрешение, которое возможно получить при их помощи, соответствует примерно половине длины набегающей волны света, которая используется для создания изображения.

В 2000 году Джон Пендри высказал теоретическое предположение, что метаматериалы с отрицательным коэффициентом преломления могут эффективно улавливать и перефокусировать слабые затухающие (эванесцентные) волны. В такой «металинзе» электромагнитные волны, достигая ее поверхности, возбуждают коллективное движение поверхностных волн — электрические осцилляции, известные в науке также как поверхностные плазмоны. Этот процесс усиливает и восстанавливает эванесцентные волны. В идеале такая линза может обеспечить создание совершенного изображения, что и подсказало Пендри название «совершенная линза» для пластинки с $n = -1$.



Как и в случае с первыми метаматериалами, полученными Шульцем и Смитом в 2000 году, идея Пендри вызвала у многих коллег большие сомнения и стала причиной очередной оживленной дискуссии. В частности, некоторые оппоненты Пендри настаивали на том, что она входит в очевидное противоречие с базовыми физическими постулатами, такими как закон сохранения энергии и принцип неопределенности. Однако достаточно скоро эти критики были вынуждены признать свою неправоту, причем первое экспериментальное подтверждение идеи Пендри было получено российскими исследователями из Института теоретической и прикладной электродинамики Объединенного института высоких температур РАН (ИТПЭ ОИВТ РАН, Москва).

В беседе с «Экспертом» заместитель директора ИТПЭ ОИВТ РАН по научной работе **Анатолий Федоренко** отметил, что активная работа по электродинамическому моделированию и исследованию резонансных свойств неоднородных сред со сложной структурой велась сотрудниками института фактически с момента его создания в 1987 году. В частности, по словам г-на Федоренко, именно в ИТПЭ впервые в мире были получены композитные материалы как с отрицательной диэлектрической, так и с отрицательной магнитной проницаемостями: «Просто в нашем научном лексиконе вместо столь модного сегодня названия «метаматериалы» раньше использовались другие термины, например «покрытия я на основе искусственных диэлектриков и магнетиков»».

В начале 2003 года был специально поставлен эксперимент с фотопластинкой из «левого материала», которым руководили директор института член-корреспондент РАН **Андрей Лагарьков** и доктор физико-математических наук **Владимир Кисель**. Этот эксперимент убедительно подтвердил принципиальную возможность в реальных условиях получить при помощи метаматериалов изображение источников, расстояние между которыми существенно меньше длины волны: пространственное разрешение изображения составило всего одну десятую

этой длины.

К схожим результатам в том же 2003 году пришла и группа американских исследователей из Калифорнийского университета (Беркли). **Сян Чжан** и его коллеги продемонстрировали, что отрицательным показателем преломления может обладать очень тонкая (толщиной 35 нм) серебряная пленка. Расположив изучаемый предмет и фотопластинку очень близко к пленке, им удалось с помощью ультрафиолетового лазера получить изображение предмета с разрешением в шесть раз меньше длины волны, тем самым с хорошим запасом превзойдя пресловутый дифракционный предел.

В 2005 году группа Чжана поднялась еще на одну ступень и получила при помощи своей линзы изображение малых объектов размером 40 нанометров (для сравнения: обычные оптические микроскопы упираются в 400-нанометровый предел). Как отмечает Сян Чжан, «эти эксперименты доказали, что предложенный новый метод получения изображений действительно может преодолеть оптический дифракционный предел, и, по нашему мнению, у этого метода есть громадный потенциал для революционных преобразований в области многих технологий». К числу таковых сегодня прежде всего следует отнести получение детальных биомедицинских изображений в реальном времени и *in vivo*, а также оптическую литографию для создания электронных схем более высокой плотности.

Военный интерес

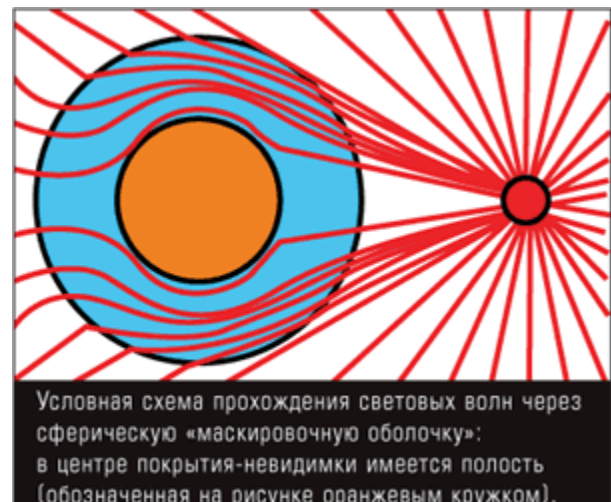
Потенциальные возможности применения уникальных метаматериалов сегодня кажутся многим ученым практически неисчерпаемыми. По сути колоссальный поток теоретических и экспериментальных исследований этих «левых микроструктур» породил к настоящему времени то, что один из авторов майской публикации в журнале Science Дэвид Шуриг называет «новой научной парадигмой конструирования устройств, взаимодействующих с электромагнитными волнами».

И все-таки утверждать наверняка, что с помощью метаматериалов науке удастся в скором времени создать пресловутые материалы-невидимки, пока, наверное, не следует. Так, по словам Анатолия Федоренко, «до практической реализации предложенных Джоном Пендри и его коллегами амбициозных идей еще очень далеко: на текущем этапе наука все еще не вышла за рамки чисто фундаментальных исследований в этой сфере».

Честно признают наличие существенного разрыва между теорией и практикой и сами авторы сенсационных статей. Скажем, гуру-теоретик Пендри отмечает: «Теоретический базис для создания оболочек-невидимок в стиле Гарри Поттера нами почти создан, но инженерно-технические возможности современной науки по конструированию метаматериалов с требуемыми согласно нашим расчетам характеристиками пока не позволяют рассчитывать на быстрое воплощение задуманного».

У многих коллег Пендри и Ко. вызывает большие сомнения и сама возможность создания абсолютно невидимого в оптическом диапазоне покрытия, поскольку согласно оптической теории полностью избавиться от рассеивания или поглощения световых волн нельзя. Отчасти соглашаясь с этими рассуждениями, Ульф Леонхардт тем не менее полагает, что подобные оптические дефекты могут быть сведены к минимуму: «Даже в том случае, если разработанный нами метаматериал будет создавать на пути света легкую дымку, это все равно будет означать наш большой успех».

Другая очевидная проблема будущих покрытий связана с тем, что замаскированные под ними



объекты скорее всего полностью потеряют связь с внешним миром. Скажем, если этим объектом будет человек, он не только окажется невидимым для внешних наблюдателей, но и сам «лишится зрения». Кроме того, материалы-невидимки как бы по определению должны накладывать жесткие ограничения и на подвижность спрятанных внутри объектов. По словам Дэвида Смита, «оболочка из метаматериала не может менять своей формы, подстраиваясь под объект, и если вы, например, попытаетесь подвигать руками или изменить свою позу, то рискуете быстро потерять всю маскировку».

Наконец, есть у всей шумной истории с материалами-невидимками и еще одна, не столь афишируемая в научпоповских СМИ обратная сторона. Речь идет о большом интересе, который проявляют к этим исследованиям чиновники из военных ведомств. Хорошо известно, что работа группы Смита и Шурига уже не первый год частично финансируется из бюджета минобороны США (под выделенные DARPA — агентством передовых исследований при МО США — гранты), жестко заточены под российские военные и основные разработки московского Института теоретической и прикладной электродинамики, где одним из важнейших направлений прикладных исследований является уменьшение радиолокационной заметности объектов спецтехники.

Исходя из этого, рассчитывать, что первые экспериментальные образцы материалов-невидимок будут доступны широкой публике, по всей видимости, не стоит. Более того, без большого риска ошибиться можно предположить, что в случае первых успешных опытов все эти разработки вообще на долгое время исчезнут из поля зрения СМИ.