

## Метаматериалы – Окно в Будущее

Академик (ЕАН, РААСН и РИА) Олег Л. Фиговский

В СССР, а сегодня и в России во всех университетах присутствуют факультеты науки о материалах (Materials Science), причём часто сугубо секторальные (Материалы для машиностроения, Авиационные материалы, Строительные материалы ...). Факультеты “Materials Science” имеются и в университетах всего мира, но их значительно меньше, чем факультетов “Materials Engineering”, ибо произошёл диалектический переход от изучения свойств материалов к созданию новых, в том числе не существовавших в природе. Согласно Википедии: Метаматериал (от греческого слова meta, означающего "за пределами", и латинского слова materia, означающего "материя" или "материал") - любой материал, созданный для того, чтобы иметь свойство, которое не встречается в природных материалах. Метаматериалы – это композитные материалы, обладающие уникальными электрофизическими, радиофизическими и оптическими свойствами, отсутствующими в природных материалах. Благодаря искусственному преобразованию структуры, модифицированный объект приобретает совершенно новые свойства, которых нет у материалов природного происхождения. Исследования по созданию метаматериалов ведутся в мире очень интенсивно и я хочу остановиться на разработках последнего года.

Так американские физики Heedong Goh и Andrea Alù спроектировали компактный оптический аналоговый вычислитель, который практически мгновенно решает дифференциальные и интегральные уравнения. В его основе лежит метаматериал с субволновым распределением диэлектрической проницаемости, а решение кодируется в рассеянной на нем волне. Классические компьютеры неразрывно ассоциируются с цифровой электроникой. Цифровой подход основан на представлении информации в виде единиц и нулей и ее обработке с помощью битовых операций. Такой подход естественен при сложении или вычитании целых и даже рациональных чисел. Он же применяется и при обработке аналоговых сигналов, которые представляют собой функции одной или нескольких переменных. В этом случае необходимо производить аналогово-цифровые преобразования.

Вместе с тем существует другой подход, основанный на использовании аналоговых компьютеров. В нем обработка аналоговой информации производится вычислителем напрямую. Благодаря этому аналоговый подход обладает преимуществом в скорости при работе с функциями, например, дифференцировании, интегрировании или решении дифференциальных уравнений. Строго говоря, первые вычислительные машины были именно аналоговыми, в частности, механическими (например, антикитерский механизм). Их ключевым недостатком стало отсутствие универсальности, и, в конце концов, во второй половине XX века аналоговые компьютеры уступили своё место цифровым устройствам, чья вычислительная мощность на тот момент росла согласно закону Мура.

В наши дни закон Мура сильно замедлился. В поисках способов ускорения вычислений физики и инженеры все чаще стали смотреть в сторону аналоговых компьютеров. Этому способствует бурный прогресс в области создания материалов, по-новому взаимодействующих со светом. Например, мы уже рассказывали, как ученые создали оптические и терагерцовые аналоговые нейронные сети. Ключевым недостатком этих технологий стал их большой размер, что не позволяет реализовать их на чипе. Для решения этой проблемы Андреа Алу (Andrea Alù) с коллегой из Городского университета Нью-Йорка предложили использовать метаматериалы. С помощью численных симуляций они показали, что сконструированные на их основе микрометровые аналоговые

вычислители способны почти мгновенно решать дифференциальные и интегродифференциальные уравнения с высокой точностью и устойчивостью, если облучать их светом определенной частоты.

Некоторые математические операции проще проводить в одну сторону, чем в другую. Типичный пример — это дифференцирование или интегрирование. На практике мы чаще всего сталкиваемся с необходимостью восстановить исходные данные по набору наблюдаемых данных, произведя вычисления в «сложную» сторону. Решение таких обратных задач занимает важное место в целом ряде прикладных наук. Применение оптического аналогового вычислителя к этой проблеме основано на представлении входных и выходных решений в виде разложения по импульсам. Вычислитель проектируется таким образом, чтобы связать эти коэффициенты согласно некоторому оператору, который содержит в себе всю информацию о задаче. Для реализации на практике невозможно сохранить бесконечность такого разложения: его приближенность должна быть сбалансирована с требуемой точностью восстановления.

Авторы предложили использовать в качестве входных и выходных данных электромагнитные волны, которые рассеиваются вычислителем, представляющим собой структуру, чья диэлектрическая проницаемость зависит от координаты некоторым заранее настроенным образом. Их задачей было описать профиль этой структуры в зависимости от того, какое уравнение вычислитель будет решать. Для демонстрации работоспособности этого принципа, физики ограничились двумерным представлением. Оно предполагает, что все волны имеют цилиндрический волновой фронт, а диэлектрическая проницаемость зависит только от двух координат. Выбрав поляризацию волн, перпендикулярную плоскости, авторы свели электромагнитную задачу к скалярной. В этом случае входные и выходные данные имели вид одномерных функций полярного угла.

Исследователи раскладывали рассеянные и падающие волны по функциям Ханкеля первого и второго рода, соответственно. Это позволило описывать данные в виде столбцов, а само математическое преобразование в виде матрицы. Для того чтобы сопоставить этой матрице некоторое распределение диэлектрической проницаемости, физики решали задачу оптимизации для целевой функции, собранной из ошибок преобразования для всех компонент разложения. В качестве примера физики спроектировали вычислитель, который решает дифференциальное уравнение второго порядка, а также интегральное уравнение Фредгольма второго рода. В их модели рабочая частота волн, раскладываемых по пяти гармоникам, составила 135 терагерц, радиус структуры был равен одному микрометру, а информация считывалась с радиуса, равного 1,6 микрометра. В результате вычислений они восстанавливали пространственный профиль для диэлектрических проницаемостей, равный 1 и 12. Работоспособность профиля авторы проверяли методом конечных элементов, сравнивая волны на выходе с точным решением уравнений.

Исследователи из университета Северной Каролины (Yanbin Li, Qiuting Zhang, Yaoye Hong и Jie Yin) нашли новый подход к производству метаматериалов, которые можно использовать для создания сложных динамических структур. Новые 3D-метаматериалы можно использовать как легкие строительные материалы для домов или компоненты для модульной робототехники. Новый подход к производству метаматериалов основан на принципах киригами. Киригами — это разновидность оригами, в котором бумагу не только складывают, но и режут.

В киригами используют двумерные материалы, такие как бумага, однако авторы новой работы использовали трехмерные, которые разрезаны на соединенные кубы. В зависимости от того, как кубы соединены друг с другом, эти строительные блоки можно сложить в более чем 300 тыс. различных конструкций. Во время эксперимента исследователи создали более десятка реконфигурируемых строительных блоков: каждый

состоял из восьми соединенных бумажных кубиков, который можно переделать в восемь различных форм.

В зависимости от направления сплошных стенок куба, открытых сторон блока и его позиции в целой структуре, он будет вести себя по-разному. Благодаря этому пользователь может настраивать механические свойства каждого блока. Например, один строительный блок можно сложить в конструкцию, которую можно легко сжать, или, наоборот, придать ему форму, которая выдерживает значительную нагрузку.

Японские учёные продемонстрировали возможность эффективного управления оптическими характеристиками капли жидкого металла с помощью низкого напряжения. В эксперименте линза из сплава индия и галлия меняла поверхность с зеркальной на матовую и обратно за несколько секунд, что потенциально может помочь изготавливать оптические компоненты с переключаемыми свойствами. Жидкие металлы могут обладать высокой отражающей способностью, из них можно сделать зеркало или линзу. Такие оптические компоненты обладают определенным преимуществом по сравнению с традиционными твердыми. Например, им легче придавать сложную форму, а также такое зеркало может быть деталью полностью мягкого устройства. Наконец, такой поверхностью проще управлять, нежели твердой. Серьезным препятствием внедрению жидкометаллических оптических компонентов служит способность воздуха (или воды) окислять металл. В результате на поверхности образуется матовая пленка, которую нужно каким-то образом удалять.

Группа ученых под руководством Кейсукэ Накакубо (Keisuke Nakakubo) из Университета Кюсю предложила способ динамического контроля отражающих и рассеивающих свойств жидкометаллической линзы с помощью электричества. В качестве рабочего материала исследователи выбрали сплав галлия с индием, который остается жидким при комнатной температуре и при этом не токсичен. Опытную установку сконфигурировали следующим образом. Металл с помощью шприца налили внутрь медной шайбы так, чтоб он слегка выпирал из ее отверстия. Эту конструкцию залили электролитом на основе сульфата натрия, отличающегося химической нейтральностью. Перед этим шайбу покрыли фото-отверждаемой смолой-изолятором, чтобы ток шел только между жидким металлом и электролитом. Наконец, электрод от генератора переменного тока подсоединили шайбе, а нулевой провод опустили в электролит.

Для контроля изменения оптической поверхности исследователи освещали жидкий металл лазером и следили за отражением. Выяснилось, что при среднем напряжении между фазой и нулем около  $-0,8$  вольт оксидная пленка исчезает, и линза становится гладкой и зеркальной. При изменении среднего напряжения до  $+0,8$  вольт поверхность покрывалась бежевым матовым слоем, рассеивающим свет. Полный переход поверхности из глянцевой в матовую происходит менее чем за четверть секунды, а обратно — за восемь, поскольку металл стремится окислиться и сам по себе, без электричества. Первоначально оксидная пленка остается гладкой и тонкой, но затем утолщается и сморщивается. Исследователи считают, что электрический метод управления оптическими свойствами капли жидкого металла проще, надежнее и быстрее, чем с помощью химических реагентов или механических устройств, что ускорит внедрение жидких зеркал.

Ученые из Европы и Австралии создали уникальную технологию, которая позволяет ясно видеть в темноте. На обычные очки наносится ультратонкая пленка. Исследователи из Австралийского национального университета вместе с учеными из Италии, Великобритании, Германии, Франции и Болгарии создали революционную технологию — пленку на основе кристаллов нанометрового размера. Она может превращать невидимый для человеческого глаза инфракрасный свет в видимое изображение. Напомним,

инфракрасное излучение — электромагнитное излучение, занимающее спектральную область между красным концом видимого света и микроволновым радиоизлучением. Оптические свойства веществ в инфракрасном излучении значительно отличаются от их свойств в видимом излучении.

Авторы разработки уверяют, что им удалось «сделать невидимое — видимым». Пленка, которая состоит из нанокристаллов, в сотни раз тоньше человеческого волоса. Она наносится на линзы обычных очков и действует как фильтр, который позволяет видеть в темноте. Новая технология для управления светом использует свойства метаповерхности сверхтонких пленок. Она заключается в том, что ее оптические свойства варьируются в каждой отдельной точке. Авторы разработки отмечают, что им первым удалось преобразовать ИК-свет в видимое изображение на ультратонком экране. Кроме того, новейшая технология очень легкая, дешевая и простая для массового производства. Именно это делает ее перспективной альтернативой современным приборам ночного видения, которые стоят недешево и не всегда удобны.

Ученые продемонстрировали оптические устройства, которые манипулируют состоянием поляризации света с беспрецедентной степенью контроля. В течение многих лет исследователи из Гарвардской школы инженерии и прикладных наук им. Джона А. Полсона (SEAS) создавали метаповерхности для управления светом в зависимости от состояния его поляризации. Новое исследование способствовало развитию поляризационных технологий, но технология метаповерхностей оказалась более мощной, чем предполагали сами исследователи. Теперь исследователи раскрыли скрытый потенциал в этих метаповерхностях и в новой статье продемонстрировали оптические устройства, которые манипулируют состоянием поляризации света с беспрецедентной степенью контроля.

«Это исследование показывает, что возможность переключения между голографическими изображениями не должна ограничиваться только двумя состояниями поляризации, — сказал Федерико Капассо, автор статьи, профессор прикладной физики и старший научный сотрудник по электротехнике в SEAS. — Наша новая метаповерхность может кодировать неограниченное количество голографических изображений или управлять светом практически в бесконечном количестве направлений на основе очень большого количества состояний поляризации». Исследование демонстрирует новый способ управления поляризованным светом с помощью метаповерхностей. Этот новый подход, при котором исследователи могут создавать голографическое изображение с настраиваемой поляризацией отклика по всему изображению, может найти применение в различных областях, включая получение изображений, работу микроскопов, дисплеев и даже астрономию.

«Этот прогресс является общим и может быть применен практически к любой оптической системе, использующей поляризованный свет, — сказал Ноа Рубин, научный сотрудник SEAS и первый автор статьи. — В частности, это предполагает, что метаповерхности могут использоваться в новых типах лазерных систем, выходной свет которых может быть спроектирован на основе состояния поляризации света, или, возможно, даже в системах телескопов, где аналогичные типы оптики уже используются для помощи в обнаружении экзопланет, подобных Земле». «Голография всегда была популярным методом записи и отображения информации, — сказал Аун Заиди, аспирант SEAS и соавтор статьи. — Мы взяли фундаментальный принцип голографии и обобщили его таким образом, чтобы значительно расширить информационные возможности этой довольно старой техники».

Исследователи из Школы прикладной и инженерной физики Корнельского университета и Технологического института Samsung Melissa Bosch, Maxim R. Shcherbakov, Kanghee Won, Hong-Seok Lee создали объектив-линзу из метаматериала, которая может фокусироваться с помощью напряжения, а не механического перемещения ее компонентов.

Металлические линзы — это плоские массивы наноантенн или резонаторов толщиной менее микрона: они действуют как фокусирующие устройства. Новая разработка от Samsung и исследователей из Корнельского университета, включала в себя слияние металлического элемента, также была использована технология жидких кристаллов для адаптации локального фазового отклика металлического элемента. Это позволило исследователям в ручном формате поменять фокус металлических элементов, изменяя напряжение, подаваемое на устройство.

Эта комбинация сработала так, как мы надеялись и предсказывали. Наша идея привело к созданию ультратонкого, электрически перестраиваемого объектива, а также общее фокусное расстояние сместилось на 20%, — текст исследования. Исследователи Samsung надеются разработать технологию для использования в очках дополненной реальности. Также авторы видят в будущем много возможностей для использования разработки: замена оптических линз на спутниках, космических аппаратах, беспилотных летательных аппаратах, очках ночного видения, эндоскопах и других приложениях, где нужно экономить площадь и вес.

Активные метаповерхности, оптические свойства которых можно регулировать после изготовления, за последние годы стали исследуемой областью. Однако на сегодняшний день предпринимаемые усилия все еще сталкиваются с серьезными ограничениями производительности в диапазоне настройки, оптическом качестве и эффективности, особенно для немеханических устройств.

Инженеры из Массачусетского технологического института (Mikhail Y. Shalaginov и др.) разработали адаптивные «металинзы», которые смогут обеспечить более эффективную фокусировку объективов камер, микроскопов, телескопов и прочих систем визуализации без использования громоздких приводных механизмов. Прозрачные стёкла с двумя преломляющими свет полированными поверхностями лежат в основе большинства оптических систем на протяжении многих столетий. Степень вогнутости или выпуклости поверхностей линз позволяет видеть всевозможные объекты, начиная от крошечной клетки и заканчивая далёкой-далёкой галактикой. Впрочем, для получения чёткого изображения объектов любых масштабов приходится прибегать к физическому перемещению линзы при помощи дополнительных механизмов, которые занимают немало места и утяжеляют устройства, будь то камера, микроскоп или телескоп.

Исследователи выгравировали поверхность материала крошечными структурами с точным рисунком, которые работают вместе как метаповерхность, уникальным образом преломляя или отражая свет. При изменении свойств материала соответственно изменяется и оптическая функция метаповерхности. В этом случае, когда материал имеет комнатную температуру, метаповерхность фокусирует свет для создания четкого изображения объекта на определенном расстоянии. После нагрева материала его атомная структура изменяется, и в ответ метаповерхность перенаправляет свет, чтобы сфокусироваться на более удаленном объекте. Таким образом, новая активная металинза может настраивать фокус без необходимости использования громоздких механических элементов.

Ученые из Европы и Австралии (*Rocio Camacho-Morales, Davide Rocco, Lei Xu, Valerio Flavio Gili, Nikolay Dimitrov, Lyubomir Stoyanov, Zhonghua Ma, Andrei Komar, Mykhaylo Lysevych, Fouad Karouta, Alexander A. Dreischuh, Hark Hoe H. Tan, Giuseppe Leo, Costantino De Angelis, Chennupati Jagadish, Andrey E. Miroshnichenko, Mohsen Rahmani, Dragomir N. Neshev*) создали уникальную технологию, которая позволяет ясно видеть в темноте. На обычные очки наносится ультратонкая пленка. Исследователи из Австралийского национального университета вместе с учеными из Италии, Великобритании, Германии, Франции и Болгарии создали революционную технологию — пленку на основе кристаллов нанометрового размера. Она может превращать невидимый для человеческого глаза инфракрасный свет в видимое изображение.

Напомним, инфракрасное излучение — электромагнитное излучение, занимающее спектральную область между красным концом видимого света и микроволновым радиоизлучением. Оптические свойства веществ в инфракрасном излучении значительно отличаются от их свойств в видимом излучении. Авторы разработки уверяют, что им удалось «сделать невидимое — видимым». Пленка, которая состоит из нанокристаллов, в сотни раз тоньше человеческого волоса. Она наносится на линзы обычных очков и действует как фильтр, который позволяет видеть в темноте.

Новая технология для управления светом использует свойства метаповерхности сверхтонких пленок. Она заключается в том, что ее оптические свойства варьируются в каждой отдельной точке. Авторы разработки отмечают, что им первым удалось преобразовать ИК-свет в видимое изображение на ультратонком экране. Кроме того, новейшая технология очень легкая, дешевая и простая для массового производства. Именно это делает ее перспективной альтернативой современным приборам ночного видения, которые стоят недешево и не всегда удобны.

Исследователи из Пенсильванского университета и ВВС США создали мягкий механический метаматериал, который осознает, что на него воздействуют, а также реагирует с помощью запрограммированных реакций. Мы создали мягкий механический метаматериал с гибкими проводящими полимерными сетями. В нашей статье мы рассказываем о том, как можно программировать материалы, — Райан Харн, доцент по развитию карьеры Джеймса Ф. Уилла, штат Пенсильвания.

Человеческие мыслительные процессы основаны на законах, отмечает Харн, которые похожи на булеву логику из математики. Этот подход использует двоичные знаки для обработки информации. Мягкие материалы, созданные авторами новой работы, мыслят подобным образом: они используют реконфигурацию проводящих полимерных сетей. Используя входное низкое напряжение для материалов, авторы создали метод реакции на происходящее вокруг для метаматериала. Тип логики, который использует Харн и его команда, выходит за рамки чисто механической логики, где используют двоичную комбинацию бистабильных переключателей. Для того, чтобы обработать все логические элементы, нужно совместить электрическую полимерную сеть с мягким, деформируемым материалом. Сочетание электрических и механических сигналов позволяет материалу двигаться в нужном направлении.

Одним из уникальных свойств некоторых видов метаматериалов является то, что они способны эффективно преломить падающий свет таким образом, что объекты, покрытые слоем такого метаматериала, становятся полностью невидимыми. Ещё не так давно существование метаматериалов считалось невозможным, поскольку, как казалось, они нарушают законы оптики. Но в 2006 г. исследователи из Университета Дьюка в Дарэме (штат Северная Каролина) и Имперского колледжа в Лондоне успешно опровергли это

общепринятое мнение и при помощи метаматериалов сделали объект невидимым для *микроволнового излучения*

При создании метаматериалов в вещество внедряются крошечные имплантаты, которые вынуждают электромагнитные волны выбирать нестандартные пути. Отсюда, и приставка к «метаматериалам» -«мета», что означает «вне», то есть установку в основной материал каких-либо дополнительных элементов.

Возможность отрицательного преломления заставила физиков пересмотреть практически всю область электромагнетизма. И когда этот круг идей будет полностью понят, основные оптические явления, такие как преломление и дифракционный предел разрешения, придется пересмотреть с учетом новых неожиданных поворотов, связанных с материалами, дающими отрицательное преломление. Волшебство метаматериалов и магию отрицательного преломления все-таки необходимо «конвертировать» в прикладную технологию. Такой шаг потребует совершенствования конструкции метаматериалов и производства их по разумной цене. Сейчас в этой области действует множество исследовательских групп, энергично разрабатывающих способы решения проблемы