

КОНСТРУКЦИОННЫЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 621.9.01:658.512

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТАМАТЕРИАЛОВ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ

© 2023 г. М. С. Спирин^{1,*}, Р. А. Горелов¹, А. Н. Молодченко¹,
И. А. Зайцев¹, А. А. Юрлов¹

¹Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Россия

*E-mail: era_otd2@mil.ru

Поступила в редакцию 10.10.2023 г.

После доработки 10.10.2023 г.

Принята к публикации 10.10.2023 г.

Описана возможность использования метаматериалов в оптико-электронных приборах для создания суперлинз. Рассмотрены методы управления электромагнитными и оптическими волнами, отличающимися метаматериалами от традиционных. Рассмотрена возможность синтеза метаматериалов, способных регулировать передачу, отражение и поглощение волны или управлять направлением луча.

DOI: 10.56304/S2782375X2301014X

ВВЕДЕНИЕ

На данном этапе развития военной техники и вооружения при ведении боевых действий один из важных вопросов заключается в решении задач оптико-электронного противодействия. Своевременная и качественная оценка боевой обстановки — это ключ к успешному выполнению поставленных задач. Таким образом, возможность исключения демаскирующих признаков объектов и повышения точности и качества оптической разведки является актуальной.

По оценкам американских экспертов возрастающее количество электронных средств разведки и систем наведения высокоточного оружия, наземного, морского и воздушного базирования, работающих в оптическом диапазоне электромагнитного спектра, обусловили ситуацию, при которой эффективность боевых действий будет существенно зависеть от превосходства в этой области. Основные объекты оптико-электронного противодействия — разведывательно-обнаружительные средства, обеспечивающие получение данных для принятия решений и применения оружия, включая высокоточное, а также его системы самонаведения [1]. Для успешного решения задач оптико-электронного противодействия необходимо использование оптико-электронных приборов (ОЭП).

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Оптико-электронные приборы — это устройства, где информация о наблюдаемом или исследуемом объекте переносится оптическим излучением (содержится в оптическом сигнале), а ее первичная обработка связана с преобразованием энергии излучения в электрическую энергию.

В состав этих приборов входят оптические и электронные звенья, которые не являются вспомогательными устройствами (например, устройствами термостабилизации, узлами подсветки отсчетных шкал и др.). Обобщенная схема работы ОЭП представлена на рис. 1 [2].

Структура многих современных ОЭП включает в себя большое количество разных по принципу действия и физической природе звеньев — цифровых и аналоговых преобразователей сигналов, электромагнитных и механических узлов, микропроцессоров и др. [2]. В последнее время в ОЭП стали применяться материалы с особыми свойствами — метаматериалы.

Метаматериалы — это вещества, обладающие несуществующими в природе оптическими свойствами. Когда-то существование метаматериалов также считалось невозможным, поскольку их свойства не соответствовали известным на тот момент законам оптики [3]. Метаматериал — это совокупность искусственных структурных элементов, необходимых для получения необычных электромагнитных свойств. Как самостоятельное изделие метаматериал представляет собой композиционный материал, свойства которого (акустические, электрические, магнитные или оптические) определяет структура его элементов, называемых элементарными ячейками, представленными на рис. 2.

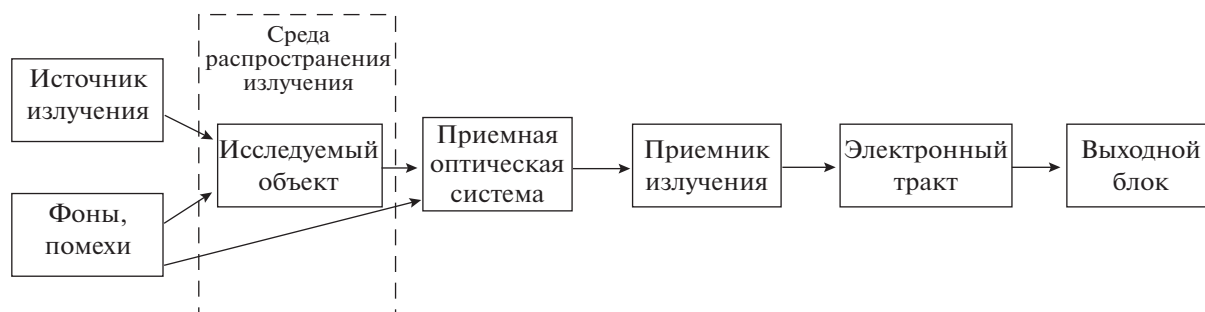


Рис. 1. Обобщенная схема работы оптико-электронных приборов.

Механизм работы метаматериала, представленный на рис. 3, заключается в следующем:

- покрывающий элемент метаматериала, представляющий собой гибридный проводник и диэлектрик, действует как ускоритель для попадающих внутрь него квантов света;

- свет падает на оболочку из метаматериала. Но он не преломляется за пределы оболочки, а проходит внутри нее, огибая предмет вокруг;

- свет покидает оболочку в том же самом направлении, словно никакого предмета не было, поэтому скрытый предмет остается невидимым.

Преимущество метаматериалов перед традиционными аналогами связано с возможностью широкого регулирования свойств электромагнитной волны путем изменения конструкции ячеек.

Ученые используют метаматериалы как средства для контроля электромагнитного излучения. Взаимодействуя с ним, они могут изменять его интенсивность, направление и даже форму импульсов. Материалы, предназначенные для избирательного поглощения отдельных длин волн излучения, как правило, обладают негативной особенностью – они отражают излучение, лежащее вне поглощаемого диапазона, и оставляют позади себя тень. Метаматериалы находят широчайшее применение во всех сферах, где применяется электромагнитное излучение, а именно:

- в радиофизике и астрономии используются специальные покрытия для защиты телескопов либо сенсоров, применяющих длинноволновое излучение;

- в микроэлектронике могут появиться устройства на порядок меньше существующих, более эффективные антенны для мобильных телефонов и др.;

- создание мощных лазеров. Благодаря применению материалов с измененной структурой уже появляются мощные лазеры, которые при меньшей потребляемой энергии выдают на порядок более мощный и разрушительный световой импульс. Промышленные лазеры смогут каче-

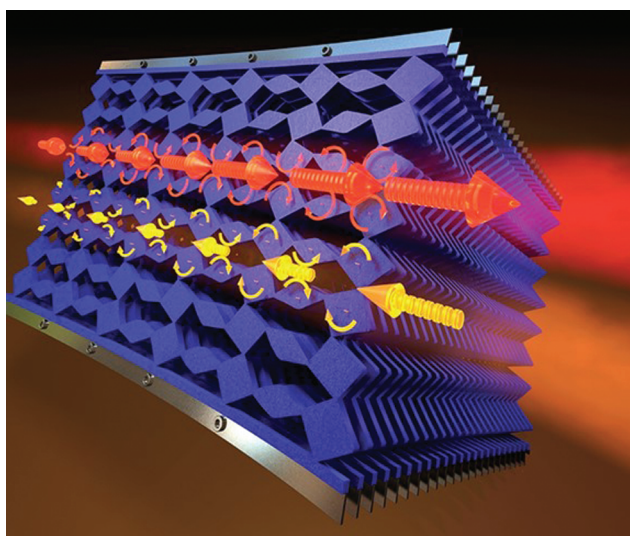


Рис. 2. Иллюстрация электромагнитного метаматериала.

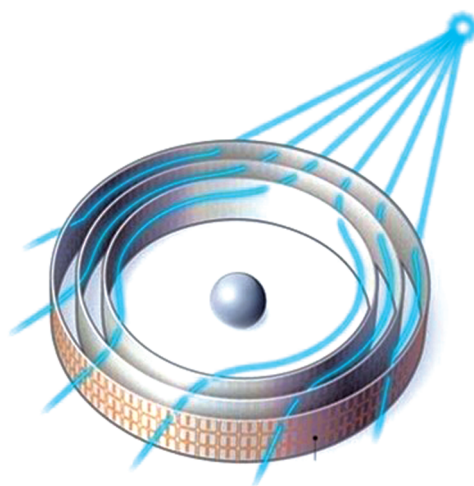


Рис. 3. Механизм работы метаматериала.

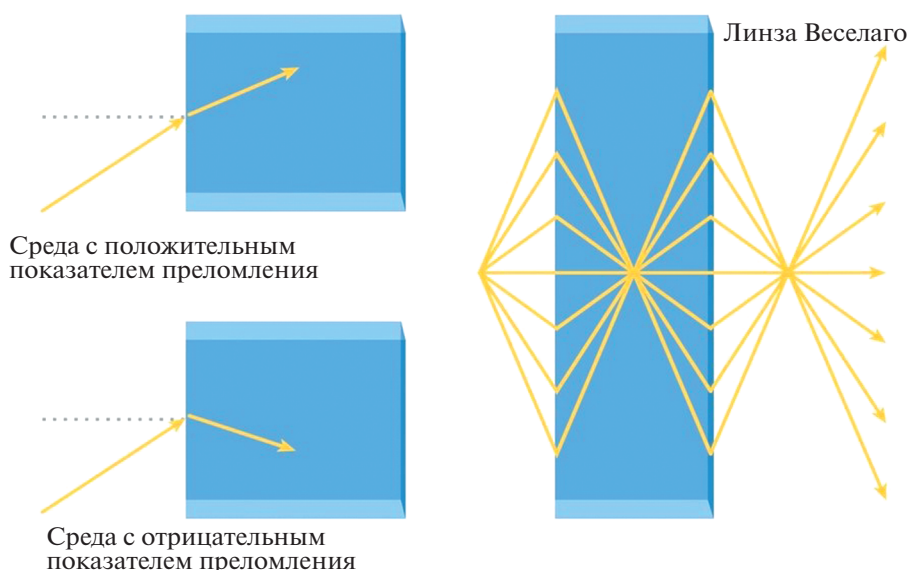


Рис. 4. Отличие суперлинзы от обычной линзы.

ственно разрезать не только металлические материалы толщиной в несколько десятков миллиметров, но и на порядок большей величины;

- создание новых антибликовых материалов. Благодаря их применению можно будет создавать истребители, бомбардировщики, корабли, подводные лодки, танки, робототехнические системы, мобильные установки, которые не будут видны для сенсоров и радаров врага;

- возможность видения через стены. С применением новых искусственных материалов можно создать приборы, позволяющие видеть сквозь стены. Уже сегодня создаются устройства, проявляющие сильный магнитный отклик на излучение терагерцового диапазона;

- создание блеф-стены или несуществующих “копий” военной техники. Метаматериалы позволяют создавать иллюзию присутствия объекта в месте, где его нет. Подобные технологии уже применяются российскими военными для создания множества несуществующих ракет, которые “летят” рядом с настоящей, чтобы обмануть противоракетную оборону противника;

- в оптике дифракционное преломление также находит широкое применение. Так, уже создана суперлинза, позволяющая решить проблему дифракционного предела разрешения стандартной оптики. Слой материала с отрицательным показателем преломления действует как суперлинза, которая может превзойти существующие линзы с положительным преломлением. Такая суперлинза способна создавать изображения с деталями, более мелкими, чем допускает дифракционный предел разрешения, ограничивающий работу всех оптических элементов с положитель-

ным показателем преломления (рис. 4). Хотя большинство экспериментов с метаматериалами выполнено на частотах микроволн, в будущем эти материалы смогут работать и на более коротких, инфракрасных и оптических длинах волн.

Благодаря настраиваемым диэлектрическим свойствам и характеристикам метаматериалы являются объектами с легко изменяющимися заранее заданными параметрами и открывают новые перспективы в понимании материалов.

Такой подход к проектированию новых и перспективных образцов вооружения и военной специальной техники с учетом применения метаматериалов в их конструкции обеспечит существенное преимущество той армии, чей научно-технический прорыв состоится раньше.

Применение суперлинз в ОЭП позволит не только повысить их разрешающую способность и существенно уменьшить габаритно-весовые характеристики, но и просматривать (разведывать) обстановку за преградами и различными несущими конструкциями с безопасной позиции.

Изучение новой области в материаловедении началось с публикации [4], при том что предложение В.Г. Веселаго по аналогичной теме более 30 лет находилось без внимания. За 10 лет работы Дж. Пендри это направление стало прорывной технологией из-за способности метаматериалов к маскировке и манипуляции светом [5–8].

По мере того как технология метаматериалов находит практическое воплощение, расширяются возможности их применения в области телекоммуникаций, зондирования, аэрокосмической промышленности, оптики (терагерцового и инфракрасного диапазонов) и медицинских приборов.

Кроме промышленности метаматериалы обладают большим потенциалом для применения в вооруженных силах. Агентство перспективных оборонных исследовательских проектов (DARPA), Организация Североатлантического альянса (НАТО) и крупные оборонные компании по всему миру уделяют пристальное внимание разработкам в этой области [9, 10]. После первых попыток доказательства концепций по метаматериалам вторая фаза развития этой теории началась с работ [11, 12], где сообщалось о возможности использования метаматериалов в трансформирующей оптике (ТО).

Внедрение такой оптики позволило реализовать метод проектирования метаматериалов, что послужило фундаментом многих исследовательских программ, например маскировочных систем (включая электромагнитную маскировку) и суперлинз [6, 11].

Тем не менее ТО ограничена в некоторых аспектах, одним из которых являются нереалистичные свойства, возникающие после преобразования в пространстве метаматериала. Кроме того, допущение между непрерывными свойствами из теоретической модели и дискретными свойствами из реализации может повлиять на результат при использовании методов, основанных на ТО.

Для устранения недостатков ТО была разработана специальная ТО. В тех случаях, когда ТО и специальная ТО обеспечивают чертеж для проектирования метаматериалов, с помощью метода эквивалентной схемы возможно собрать элементарную ячейку. Данный метод обеспечивает быстрый выбор топологии и оптимизацию микроструктур [12]. Инженерное электромагнитное сообщество это быстро приняло и разработало низкопрофильные антенные системы [7], системы управления лучом, частотно-избирательные поверхности [12], структурированные поверхности, антенны на основе метаматериалов, радиолокационные системы, поглощающие материалы и др.

Другое направление исследований электромагнитных метаматериалов — метод матрицы линий передачи (TLM). С помощью этого метода антенны излучающей волны могут сканировать от обратного до конечного направления.

С помощью метаматериалов ученые смогли повысить разрешающую способность оптических устройств. Так, инженеры Калифорнийского университета в Сан-Диего разработали метаматериал, повышающий разрешение световой микроскопии с 200 до 40 нм.

Энтузиазм по поводу электромагнитных метаматериалов был заразительным в оптическом сообществе, что привело к развитию оптических метаматериалов. Многие идеи относительно гиперлинз и суперлинз реализовали исследователи по всему миру [3–10]. Благодаря прикладываемым

усилиям в области фундаментальных исследований теории и физики метаматериалов функциональные возможности были существенно расширены при гибридизации функциональной материи с метаматериалами. Использование микроэлектромеханической системы (MEMS) постепенно применялось для перенастройки метамолекул для электромагнитных и терагерцовых метаматериалов. Матрицы из золотого метаматериала, изготовленные на полупроводниковых подложках, позволили в 2006 г. управлять излучением с помощью электрических сигналов в режиме реального времени. Поскольку со стороны производства был достигнут масштаб 20–50 нм, стало возможным изготавливать узор из золотых плазменных нанопроволок на диэлектрической мембране, который мог приводиться в действие внешними силами.

Научные успехи в области поведения электромагнитного поля в метаматериалах позволили расширить эту концепцию до акустики, волн на воде, плазмоники и т.д., которые управляются различными механизмами и уравнениями.

В настоящее время метаматериалы изучаются различными исследовательскими группами. Так, виртуальный институт искусственных электромагнитных материалов и метаматериалов, расположенный в Европе, активно “интегрирует, управляет, координирует и контролирует” исследовательские проекты в области метаматериалов, распространяя передовые технологии и передавая новые технологии в промышленность.

В США в 2002 г. при поддержке Национального научного фонда был создан Центр промышленных совместных исследований. Центр возглавляет городской университет Нью-Йорка и сотрудничает с мировыми исследователями в сфере метаматериалов, академическими учреждениями, такими как университет Северной Каролины и промышленными центрами (Raytheon и др.). Текущие исследовательские проекты в центре включают в себя методики быстрого прототипирования и создания настраиваемых метаматериалов, а также разработку алгоритмов моделирования и проектирования активных метаповерхностей и метаматериалов, конформных антенн из метаматериалов и оптических композитных материалов.

На рынке существует реальный спрос на метаматериалы для использования в акустике до терагерцового диапазона и в фотонике. Рынок метаматериалов можно разделить на пять секторов: зондирование, спутниковая связь и телекоммуникации, аэрокосмическая и оборонная промышленность, оптика (терагерцовая и инфракрасная) и медицинское оборудование.

Экзотические свойства метаматериалов и их потенциальное применение в маскировке при-

влекли внимание таких агентств, как DARPA. Еще в 1999 г. DARPA начало сбор информации о метаматериалах. В 2001 г. целью конкурса заявок на участие в университетских исследованиях DARPA было “моделирование, синтез, описание и разработка новых синтетических метаматериалов”. По этому запросу DARPA компания Boeing Phantom Works (сейчас Boeing Research and Development) в 2003 г. построила свой первый трехмерный метаматериал (куб Боинга). DARPA определило метаматериалы как “область воздействия” и с 2000 г. обеспечивает непрерывное финансирование проектов по метаматериалам. Согласно последним новостям финансирование DARPA в этой области увеличилось на 75% в 2020 финансовом году. Помимо DARPA помощник министра обороны США по исследованиям и разработкам назвал метаматериалы одной из шести “прорывных областей фундаментальных исследований”.

С 2006 г. ВМС США выдали более 60 грантов на исследования в области инноваций малого бизнеса и передачи технологий для малого бизнеса, связанных с технологиями метаматериалов для использования в военных целях.

В Европе, начиная с января 2011 г., НАТО провела трехлетний исследовательский проект по метаматериалам.

Технология метаматериалов используется в различных военных устройствах и оборудовании на различных платформах. Характеристики этих метаструктур включают в себя, помимо прочего, легкий вес, электромагнитную совместимость, возможность модернизации и удовлетворение физических требований среды. С помощью метаматериалов можно улучшить характеристики антенных систем, сталкивающихся с помехами физической структуры при распространении электромагнитных сигналов. Крупномасштабные метаматериалы с настраиваемыми электромагнитными свойствами также используются для судовых приложений. Новые свойства этих материалов предоставляют больше возможностей для решения сложных электромагнитных проблем. Благодаря новым процессам производства и сборки метаматериалов, технологии, включая низкопрофильные антенны, экзотические вол-

новоды и метаматериалы большой площади с уменьшенными помехами связи, повышенным поглощением радаров и улучшенным согласованием импеданса, дебютировали на кораблях ВМС США.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрено развитие технологии метаматериалов в академических исследованиях. Способность управлять электромагнитными и оптическими волнами отличает метаматериалы от традиционных материалов. Благодаря возможности настройки метаматериалы смогут регулировать передачу, отражение и поглощение, управлять направлением луча, контролировать теплопроводность и многое другое.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ольгин С.* // Зарубежное военное обозрение. 2017. № 49.
2. *Якушенков Ю.Г.* Основы оптико-электронного приборостроения. Учебник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Логос, 2019.
3. *Фирсова А.А.* Материалы X Международной студенческой научной конференции “Студенческий научный форум”. 2018.
4. *Pendry J.B.* // Phys. Rev. Lett. 2018. V. 85. № 18. P. 3966.
5. *Зарайский С.А., Мотигуллин Р.Р.* // Наука без границ. 2018. № 7 (24). С. 40.
6. *Паняев И.С., Санников Д.Г.* // Компьютерная оптика. 2018. Т. 42. № 5. С. 807.
7. *Хамед Ебрахим А.М., Кисель Н.Н.* // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2019. № 3 (205).
8. *Liu R., Ji C., Mock J.J. et al.* // Science. 2019. V. 323. № 5912. P. 366.
9. *Walser R.M.* // SPIE Proceedings, Complex Mediums II: Beyond Linear Isotropic Dielectrics. San Diego: SPIE Proceedings. 2021. V. 4467. P. 1.
10. *Parazzoli C.G., Greigor R.B., Li K. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2020. V. 90. № 10. P. 107.
11. *Fang N., Lee H., Sun C., Zhang X.* // Science. 2019. V. 308. № 5721. P. 534.
12. *Munk B.A.* Frequency Selective Surfaces: Theory and Design. New York: John Wiley & Sons. Inc, 2019.