



Оптические метаматериалы – реальность сегодняшнего и рутина завтрашнего дня

Часть 1. Сравнение концепций метаматериалов и композитов с заданными свойствами

Н. Н. Щитов, nschitov@mail.ru, ФГУП ВНИИА им. Н. Л. Духова, Москва

Проведено сравнение концепций метаматериалов, в частности оптических, и композитных материалов с заданными свойствами, структура которых рассчитывается с помощью аппарата теории оптимального управления (ТОУ). Показаны их общие положения, а также коренные отличия. Обозначены «естественные ниши» обеих концепций, взаимодополняющие аспекты и пределы применимости. Кратко обсуждены и принципиальные проблемы расчетных предсказаний, обусловленные отсутствием полной теории взаимодействия излучения с веществом.

Ключевые слова: метаматериалы, метачастицы, теория оптимального управления, сверхрешетки

Статья поступила: 07.10.2019. Принята к публикации: 28.10.2019.

Optical Metamaterials – The Reality of Today and the Routine of Tomorrow

Part 1. Comparison of the metamaterials and pre-specified properties' composites concepts.

N. N. Schitov, nschitov@mail.ru, All-Russia Research Institute of Automatics named after
N. L. Dukhov (VNIIA). State Atomic Energy Corporation ROSATOM, Moscow

Comparison of the two concepts – metamaterials, in particular optical, and pre-specified properties' composites which structure is calculated by means of the optimal control theory (OCT) is made. Their general theses, as well as fundamental differences, are shown. The «natural niches» of both concepts, complementary aspects and limits of applicability are indicated. The fundamental problems of computational predictions due to the lack of the radiation – matter interaction complete theory are briefly discussed too.

Keywords: Metamaterials, metaparticles, Optimal Control Theory, Superlattices

Received: 07.10.2019. Accepted: 28.10.2019.



1. ВВЕДЕНИЕ. НЕМНОГО ИСТОРИИ

В цикле статей [1-3] был поставлен отнюдь не риторический вопрос: «Метаматериалы – миф или реальность?» Причем речь шла именно об оптических метаматериалах, хотя сам по себе термин «метаматериалы», введенный в научный тезаурус Р. М. Вальсером (R. M. Walser) в 2000 году [4], охватывает гораздо больший класс материалов. Однако постепенно именно оптики или, точнее, ученые, занимающиеся изучением взаимодействия излучения с веществом, «присвоили себе» это красивое слово, отсчитывая эру метаматериалов от работ Лэмба, Манделъштама и других, в частности, советских ученых [5]. Вот и А. Л. Потапов, автор [1-3], использует следующее определение: «...концепция создания в оптической области спектра материалов с обратным показателем преломления – метаматериалов...» Правда, в сноске он оговаривается, что: «Термин «метаматериал» можно применять ко многим современным композитным материалам...»

Примером подобного «присвоения» служит недавно прошедший (16-21.09.2019) в Италии, в Риме, XIII Международный конгресс «Metamaterials'2019» (избранные доклады должны быть опубликованы в специальном выпуске онлайн журнала «Photonics» издательства MDPI (Multidisciplinary Digital Publishing Institute) «Metamaterials for advanced photonic and plasmonic applications – Selected papers from Metamaterials'2019»). Предыдущие два конгресса состоялись в 2017 году в Марселе (Франция) и в 2018 году в Эспу (Финляндия). А следующий намечен к проведению в Нью-Йорке (28.09-03.10.2020). В названии этих научных форумов значились «метаматериалы», но в этом году при сохранении термина в эмблеме в официальном названии фигурируют уже «искусственные материалы для новых волновых явлений» (artificial materials for novel wave phenomena). Сами организаторы конференции считают началом ее истории два события: Bi-isotropics'93 Workshop on Novel Microwave Materials (Helsinki University of Technology) и Bianisotropics'93 (Gomel) – Seminar on Electrodynamics of Chiral and Bianisotropic Media. Как легко видеть, в начале 90-х годов прошлого века никаких «метаматериалов» и в помине не было. Более того, название «Бианизотропные материалы» сохранялось в названиях конференций еще довольно долго: 1997, 1998, 2000, 2002, 2004 и 2006 годы. Наряду с этим в 1994-1996 годы использовался термин «киральные материалы»: Chiral'94 – 3rd International Workshop on Chiral, Bi-isotropic and Bianisotropic Media, Chiral'95 –

International Conference on the Electromagnetic Effects of Chirality and its Application и Chiral'96 – NATO Advanced Research Workshop. И только в 2003, три года спустя инаугурационной лекции Р. М. Вальсера, в названии конференции появляется термин «метаматериалы», причем с отдельным упоминанием электромагнитных материалов: 1st Workshop on «Metamaterials and Special Materials for Electromagnetic and TLC Applications» 2003, Florence, Italy. Заметим, что наряду со «специальными электромагнитными материалами» в названии присутствуют и материалы для тонкоплочной хроматографии (TLC). Интересно, что с таким названием конференция проводилась только в Италии трижды – два последних раза в Риме (2004 и 2006 годы). Наконец, с 2007 года конференции проводятся под логотипом «метаматериалы», хотя и с несколько разными расшифровками. В частности, если в 2017 году речь шла об «Engineered Material Platforms for Novel Wave Phenomena», то в 2018 и 2019 – уже об «Artificial Materials for Novel Wave Phenomena».

Может показаться, что эта «игра слов» не имеет принципиального значения, но в описанном кратко историческом контексте она знаменует определенное завершение процесса отнесения термина исключительно к новым волновым явлениям. Такая «узурпация» термина отчасти спровоцирована самим Вальсером, использовавшим в названии [4] прилагательное «электромагнитные», хотя и подчеркнувшим в тексте, что это лишь подмножество всех метаматериалов. Кроме того, и в качестве поясняющего термин примера так же взяты оптические метаматериалы: «У метаматериалов новые свойства являются скорее следствием их структуры, а не свойств исходных природных материалов. Поэтому понятие «метаматериал» также указывает либо на обладание свойствами (например, сильной пространственной дисперсией, противонаправленностью фазовой и групповой скоростей и отрицательным преломлением волн), недоступными для исходных материалов, из которых создан метаматериал, либо на то, что свойства метаматериала (например, многофункциональность) превосходят свойства обычного материала».

Таким образом, в настоящее время понятие, с одной стороны, (ненамеренно) сужено, а с другой, – расширено на область очень широкого круга явлений, далеко выходящих за рамки как классического материаловедения, так и концепции Вальсера. Сегодня приставка «мета» становится почти таким же изрядно поднадоевшим клише,



Рис. 1. Домашняя страница конференции Metamaterials'19



Рис. 2. Домашняя страница конференции Metamaterials'18

как и ранее «нано», «супер», «мега», а еще раньше «микро». Все они в разное время выполняли исключительно «представительские функции», обеспечивая их пользователям, заслуженно или не вполне, место «на острие науки». Может быть, поэтому в 2019-м году организаторы конференции, осознанно или нет, скромно переместили термин в логотип конференции, хотя еще годом ранее он служил названием (рис. 1 и 2).

В итоге теперь при упоминании «метаматериалов» в интерпретации Вальсера говорят об «умных» или «продвинутых» (smart or advanced) материалах, включающих как подмножество и электромагнитные материалы. Так что вопрос, вынесенный в заглавие [1-3], в широком смысле за прошедшие два года потерял актуальность и действительно стал почти риторическим, если бы не принципиальные физические причины, заставившие автора его задать. Точно так же и автор настоящей статьи при ее написании исходил из принципиально важного места, которое занимают волновые процессы в реакциях и поведении *всех материалов*, не только электромагнитных. Именно поэтому отмеченная выше «узурпация» во многом закономерна.

2. МЕТАМАТЕРИАЛЫ И МАТЕРИАЛЫ С ЗАДАНЫМИ СВОЙСТВАМИ

2.1. Метаматериалы

На самом деле идея метаматериалов явилась логическим развитием идеи композитных материалов, т. е. материалов, составленных из принципиально различных по своим свойствам веществ, напри-

мер, бетон или слоистые композиты. У самого Вальсера это родство прямо постулировано на рис. 3 и 4, в которых проведено сравнение обычных композитов и метаматериалов. В пояснении к таблице Вальсер пишет о том, что 1-е правило призвано исключить естественные композиты (дерево, гранит), т. к. формирование их структуры не контролируется человеком, и, соответственно, правила 3 и 4 не могут быть подтверждены. Те же соображения относятся и к «кинетическим» структурам, например, образующимся в результате спинодальных распадов. Второе правило не нуждается в пояснении. Правило (3A) является изначальной целью синтеза макроскопического композита. Правило (4A) исключает композиты, в которых после сборки возникают нелокальные или реактивные связи, нарушающие условие равенства свойства композита сумме взвешенных на объемные доли свойств составляющих. Это правило было изначальным справедливо для механических композитов, но дополнение, выделенное курсивом, обобщает его применимость для электромагнитных и других типов композитов.

Метаматериалы Вальсера естественно эволюционировали из обычных композитов точно так же, как электроника отдельных функциональных элементов – ламп, транзисторов, емкостей и индуктивностей – логически эволюционировала по мере развития твердотельной технологии сначала в микро, а затем уже и в нанoeлектронике. Соответственно и СВЧ-техника, по мере развития понимания особенностей взаимодействия электромагнитного излучения с твердотельными

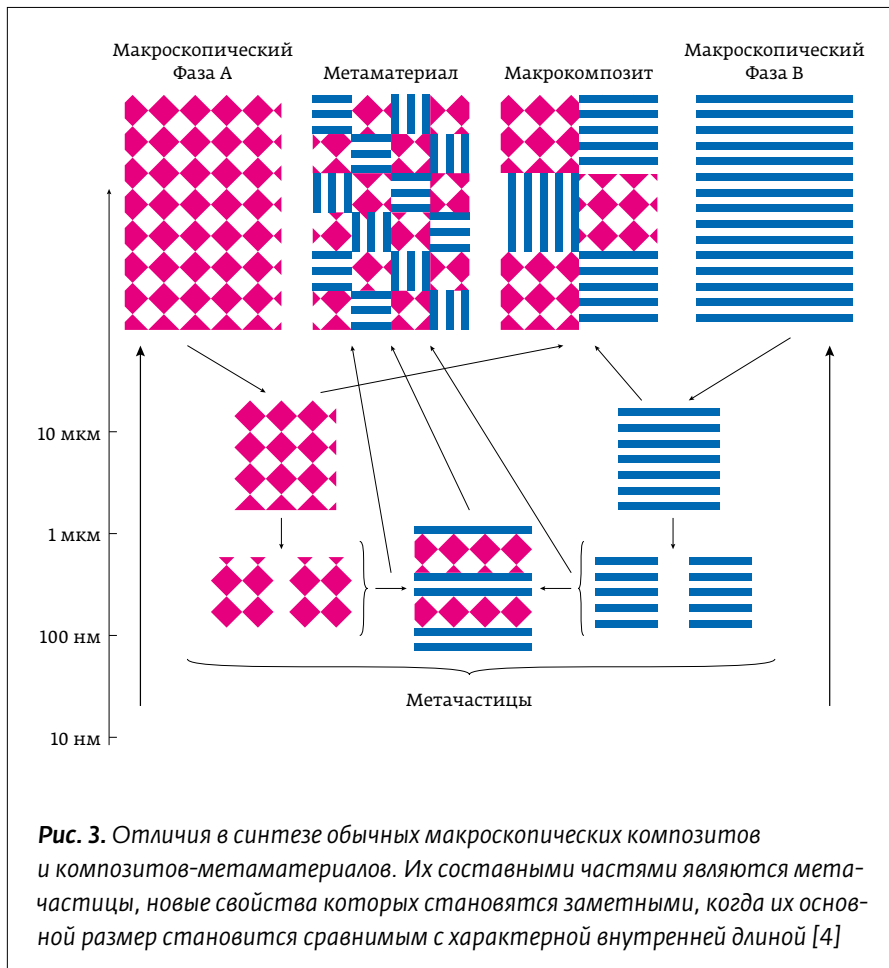


Рис. 3. Отличия в синтезе обычных макроскопических композитов и композитов-метаматериалов. Их составными частями являются метачастицы, новые свойства которых становятся заметными, когда их основной размер становится сравнимым с характерной внутренней длиной [4]

аналогами этих функциональных элементов – спиралей, разрезанных колец, Ω -включений, эволюционировала к тому, что мы теперь называем электромагнитными метаматериалами [5, 6]. Несколько иначе обстоят дела в оптике, где наряду с «леворучими» материалами (Left Hand Materials – LHM), обладающими необычными, неизвестными ранее свойствами, к метаматериалам причисляют и «фотонные кристаллы». Но они являются не более чем 3D-обобщением известных с 19-го века интерференционных фильтров и зеркал, есте-

ственным образом вытекающим из зонной теории твердого тела (автор работ [1-3] называет их NIM – Negative Index Materials). При этом в примерах, приведенных в работе [4] (рис. 4), вообще нет ни материала Веселаго, ни линзы Пендри, практическую реализацию которых ставит под сомнение А. Л. Потапов. Хотя в [4], во введении Вальсер и относит LHM к метаматериалам, как уже выше было отмечено.

Как бы то ни было, а в идеологии метаматериалов отчетливо прослеживаются две идеи – прагматическая и эвристическая – и их синтез. Первая состоит в получении некоего результата, недостижимого с использованием обычных материалов, при их комплексировании в один – разработка материалов со свойствами, сочетающимися и превосходящими достоинства составляющих. Вторая же основана на попытке создать материал, в котором проявятся необычные, пока только теоретически возможные,

свойства, например, отрицательный показатель преломления.

В самом деле, автор [4] пишет: «Метаматериалы названы так, чтобы выявить и подчеркнуть их назначение, которое состоит в достижении свойств *вне пределов обычных композитов*. Святым Граалем* разработки обычных композитов является достижение оптимальной комбинации свойств составляющих без требования их реакции.

* Конечной целью, к которой следует стремиться.

Правило	Обычный композит должен:	Правило	Композит-метаматериал должен:
1	изготавливаться человеком;	1	изготавливаться человеком;
2	иметь трехмерную комбинацию составляющих;	2	иметь трехмерную комбинацию составляющих;
3А	иметь новые свойства, недостижимые хотя бы одной из составляющих;	3Б	либо иметь новые или расширенные свойства благодаря его метачастицам;
4А	иметь два химически различных материала с различными интерфейсами между ними (иметь только локальные взаимодействия)	4Б	и/или иметь локальные и/или нелокальные взаимодействия между составляющими

Рис. 4. Сравнение правил проектирования для обычных композитов и композитов-метаматериалов [4]



Успех измеряется тем, насколько близко свойства композита соответствуют средним объемным свойствам его составляющих». Это утверждение не совсем верно, т.к. и в обычных композитах чаще всего достигаются свойства, не являющиеся средними составляющих по объему, и именно необходимая реакция на определенную нагрузку служит критерием успеха при разработке композита. Все же продолжим цитировать [4], чтобы до конца понять его мысль. Во введении [4] выделено курсивом следующее положение: «Ключевой особенностью синтеза метаматериала, описанного в разделе 1.3, является использование искусственной периодической ячеистой архитектуры с ячейками, содержащими метачастицы пониженной размерности, свойства которых специально отобраны для достижения оптимальной комбинации реакций, недостижимых у макроскопических составляющих». И далее уже обычным шрифтом: «Метаматериалы могут в принципе быть синтезированы для любого применения, общая потребность в этом обсуждается в Разделе 2. Два примера синтеза метаматериалов обсуждаются в разделах 2.1 и 2.2*. Электромагнитные метаматериалы, которым уделено особое внимание в данной работе, обсуждаются в разделе 3». Как видим, действительно, метаматериалы изначально мыслились как инновация, основанная на фундаментальной роли структуры для всех материалов вообще, а не только электромагнитных. При этом инновация предполагалась в виде эвристического обобщения результатов решения прямых задач, в которых рассчитаны реакции материала или отдельного макроскопического объекта на внешние воздействия.

Таким образом, основные понятия концепции метаматериалов, определенные в терминах формализованного описания поведения материала (прямые задачи), это:

1. *Воздействие* – $F(z, t)$ – падающая волна, нагрузка на границе, тепловой поток и т.д. – правая часть или граничное условие (функция времени) в соответствующем уравнении, например, в одномерном волновом со скоростью $v(z)$, зависящей от координаты:

$$\frac{1}{v^2(z)} \frac{\partial^2 A(z,t)}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 A(z,t)}{\partial z^2} = F(z,t) = \int_0^\infty \tilde{F}(z,\omega) \exp(-i\omega t) d\omega,$$

в частности при $z = 0, L$.

* В разделе 2.1 описаны материалы для термоэлектрических преобразователей (ТЭП), а в 2.2 – высокочастотные магнитные метаматериалы.

2. *Реакция (отклик)* – решение данного уравнения при заданных зависимостях параметров материала от координаты в самом материале или на границе (ax).
3. *Резонанс* – резко нелинейное и даже аномальное поведение какого-либо из параметров материала вблизи резонансной частоты – например, отрицательные значения относительной магнитной проницаемости материала $\mu(\omega)$ вблизи резонансной частоты ω_0 .

Последнее понятие является ключевым для электромагнитных материалов. В частности, в [5] отмечается: «Новые свойства метаматериалов обусловлены резонансным взаимодействием электромагнитной волны, распространяющейся в гетерогенной среде, наполненной включениями, имеющими специальную форму, обеспечивающую резонансное возбуждение токов во включениях. Резонансное взаимодействие носит непотенциальный характер, что, наряду с интерференционными коллективными процессами, приводит к возникновению новых эффектов».

Эффективность разработки метаматериала оценивается с помощью критерия, называемого Figure Of Merit (FOM). Критерий, как правило, является функцией двух характеристик (свойств) материала. В частности, для материала, используемого в термоэлектрических преобразователях (пример наиболее характерного материала с двумя «противоположными» реакциями), константа Зеебека Z и коэффициент теплопроводности k являются критерием FOM: $Z = S^2 \sigma_e \cdot k^{-1}$, где S – термоэдс, σ_e – электрическая проводимость. Этот критерий, умноженный на температуру, называют ZT-произведением (в советской и русской научной литературе произведение называют «параметром Иоффе», «термоэлектрической добротностью», хотя последний термин может относиться только к Z). Такковы основные понятия или термины концепции метаматериалов.

2.2. Материалы с заданными свойствами

В [7–13] автором настоящей статьи была последовательно развита концепция разработки композитных материалов (КМ) с заданными свойствами на основе теории оптимального управления (ТОУ) [14]. Главное отличие этой концепции от концепции метаматериалов состоит в попытке решения обратных задач, поставленных на классе решения прямых. При этом аппарат ТОУ – это фактически один из разделов вариационного исчисления, а критерием качества (или FOM) служит некий функционал (интеграл), аналогичный



тем, что фигурируют в известных вариационных принципах. Самый простой пример, относящийся к оптике, – это принцип Ферма. Если прямая задача заключается в нахождении оптического пути луча при заданном пространственном распределении показателя преломления, то обратная задача может быть поставлена следующим образом: каким должно быть пространственное распределение показателя преломления, чтобы свет, исходящий из некоторой поверхности (источник), распространялся по другой, заранее определенной поверхности или в объеме, ограниченном семейством поверхностей? В этом случае критерием качества может служить интеграл Гильберта [15]. Решение этой обратной задачи может дать ответ на вопрос о возможности создания «шапки-невидимки», которую Потапов ставит под сомнение [1], при использовании материалов *только* с положительным показателем преломления или же необходимы отрицательные значения.

В последнее время ТОУ все шире используется в различных областях науки и техники и особенно в экономике, однако для решения задач оптимизации материалов ее методы используются крайне скудно. Можно привести лишь единичные примеры, касающиеся скорее оптимизации устройства в целом, а не материала, являющегося ключевым для данного устройства, – например, термоэлектрического преобразователя [16], описанного в разделе 2.1 [4].

На самом же деле ТОУ позволяет сравнительно просто не только объяснить возникновение «естественных» КМ с упорядоченной структурой («кинетические» КМ по Вальсеру), но и рассчитывать геометрические параметры подобных «искусственных» структур для различных применений, и не только геометрические, но и временные, а также многие другие. В частности, «социоэкономические», на которые ссылается автор [4] в разделе 1.2, где описывает причины – «мотивацию» – возникновения концепции метаматериалов. При этом он предлагает «очистить» ФОМ от социоэкономических показателей, таких как цена, надежность и т.д. А ТОУ в большинстве своих применений как раз и оперирует подобными показателями, выступающими зачастую критериями качества. Что не мешает рассматривать и комбинированные критерии, включающие как цену, так и функциональные характеристики. Естественные КМ своим происхождением обязаны упорядочению, происходящему в процессе минимизации фундаментальных функционалов –

свободной энергии и т.д. Искусственные – минимизируют функционалы, заданные разработчиками новых материалов. При этом параметры материалов, например, все тот же показатель преломления, в прямой задаче заданные как функция точки пространственно-временного континуума в явном виде, в обратных задачах являются управляющими параметрами или просто *управлениями*, которые и должны быть найдены в результате решения. Чтобы как-то отличать обе концепции, назовем материалы, разработанные на основе ТОУ, *оптиматериалами* (кратко – *оптиматами* – не путать с партией Луция Корнелия Суллы в Древнем Риме!) Ясно, что оптиматы являются лишь подмножеством всех метаматериалов, но зато они будут лучшими в смысле заданного разработчиками критерия качества.

Несмотря на то, что феноменологический подход, использованный в концепции оптиматов, казалось бы, не предполагает достижения новых, необычных свойств, формальное отсутствие ограничений на значения управляющих параметров, да и сам их выбор, такие свойства все же не отменяет. Самые простые примеры – это все то же интерференционное зеркало или фильтр, а также лазер с распределенной обратной связью (РОС-лазер). Постановка задачи ТОУ для этих известных оптических элементов и устройств звучит так: каким должен быть закон изменения по координате комплексного показателя преломления с заданными предельными значениями, чтобы обеспечить: а) скорейшее затухание падающей волны; б) прохождение без искажений волны определенной частоты при подавлении волн других частот и в) генерацию лазерного излучения на заданной длине волны. Решением является кусочно-постоянный закон изменения с почти Брэгговской (удвоенной) пространственной частотой (волновым вектором), причем достижение цели осуществляется тем лучше, чем большая (до определенного предела! [13]) амплитуда изменения показателя преломления.

Итак, главное, что объединяет обе концепции, – это структура, которая в [7–13] рассчитывается путем решения задачи оптимального управления (обратной) на классе решений соответствующей (прямой) задачи определения реакции материала на внешнее воздействие. Основная же идея концепции оптиматов может быть сформулирована следующим образом: «Вместо решения множества прямых задач в попытке найти эвристически лучшее решение, необходимо решать обратные задачи на классе решений прямых».



3. КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ КОНЦЕПЦИЙ

Как уже отмечено выше, ключевые положения, или идеи, концепции метаматериалов, – это *метачастицы пониженной размерности с несколькими реакциями на внешнее воздействие* в отличие от обычных КМ, составленных из блоков компонентов А и В с размерами более 1 мкм, сохраняющих все характерные свойства компонентов. Таким образом, нельзя не отметить некоторого противоречия: с одной стороны, предполагается, что компоненты метаматериалов (метачастицы) имеют субмикронные размеры, а с другой, – кольца, проволоки и т.д. Последние, правда, меньше длины волны в СВЧ диапазоне, но существенно больше даже микрометров. Поэтому правильнее было бы говорить о том, что именно *внешнее воздействие* задает характерные размеры структуры, как и в концепции оптиматов.

Впрочем, лучше привести определение самого Вальсера, данное в разделе 1.3 [4]: «Метаматериалы определяются как искусственные трехмерные макроскопические композиты, имеющие трехмерную периодическую ячеистую структуру, разработанную для производства оптимальной комбинации, не известной в природе, двух или более реакций на конкретное воздействие. Каждая ячейка содержит *метачастицы*, макроскопические составляющие пониженной размерности, которые позволяют изолировать и по отдельности максимизировать каждый компонент воздействия. Архитектура метаматериалов выбрана для стратегической рекомбинации локальных квазистатических откликов, или комбинации, или изоляции специфических нелокальных откликов».

Это определение нуждается в поясняющих примерах. В частности, следует пояснить, что имеется в виду под «локальными» и «нелокальными» реакциями, а также реакциями «пониженной размерности». «Низкоразмерная реакция» достигается уменьшением одного или нескольких размеров L макроскопического материала до характерного размера L_c , при котором интересующая реакция может быть изменена. Если R и R' – это реакции макроскопического материала и метачастицы на локальное воздействие E , то низкоразмерное свойство метачастицы R' может быть найдено из формальных равенств $R = P_\infty \cdot E$ и $R' = P' \cdot E$. При этом $R' = R \cdot f(L/L_c)$, $P' = P_\infty \cdot f(L/L_c)$. В качестве примера «низкоразмерной реакции» Вальсер приводит удельное сопротивление ρ , которое зависит от толщины металлической пленки (t), в сравнении с длиной свободного пробега электрона (l). Из-за рассеяния

на границах сопротивление зависит от толщины пленки как $\rho = 3\rho_0 k \log(l/k)$, где $k = t/L \ll 1$.

Примеры материалов с нелокальными реакциями – фотонные кристаллы, а также «структуры с квантовыми стенками» – сверхрешетки. Тем самым имеется в виду необходимость существования некоторого объема для проявления специфической реакции – образование зонной структуры в фотонном кристалле по отношению к свету или появление дополнительных «минизон» в структурах с квантовым конфайнментом (ограничением). Именно подобные задачи названы в концепции оптиматов *резонансными*, а все эффекты образования зонной структуры суть следствие особенностей параметрического резонанса [13]. В основе лежит уравнение Хилла, к которому относятся и уравнение Шредингера для частицы в поле с периодическим изменением потенциала, и волновое уравнение в среде с периодическим изменением показателя преломления.

Локальные же реакции предполагают лишь наличие границы, отделяющей метаматериал от области внешнего воздействия. «Реакция пониженной размерности» возникает при создании упорядоченной неоднородности в материале меньшей, нежели в обычном материале 3D размерности. Это могут быть сверхрешетки – 2D, «квантовые проволоки» – 1D и «нульмерные» квантовые точки. Нужная реакция возможна при уменьшении одного и более размеров L соответствующей неоднородности до характерной величины L_c , определяющей реакцию.

Опуская дальнейшие положения концепции метаматериалов, изложенные в [4], еще раз отметим главное, что сближает ее с концепцией оптиматов – это (в одномерном варианте) сверхрешетки с максимальной вариацией *некоторых параметров* альтернирующих слоев. В самом деле, после изложения аппарата ТОУ применительно к разработке материалов и приведения примеров решения некоторых задач в [7-13] сделаны следующие выводы:

1. Многослойные структуры, в частности сверхрешетки, являются принципиально новым классом материалов, оптимизирующих различные свойства твердых тел, с точки зрения функционального назначения, аргументом заданного разработчиком (по-видимому, впервые подобное утверждение применительно к полупроводниковым сверхрешеткам было использовано в [17]).
2. ТОУ позволяет *при правильном задании критерия качества* (это FOM в терминах ТОУ) получать

кусочно-постоянные решения, соответствующие упомянутому выше априорному заданию.

3. Конкретный состав, соответствующий полученному решению, может быть различным, что значительно облегчает выбор технологии изготовления разработанной структуры.
4. Оптимальное управление осуществляется тем лучше, чем сильнее различаются значения управляющей переменной (например, решточной теплопроводности, как в материале ТЭП) в сопряженных слоях структуры (но не всегда – уточнено в [13]).

Важно, однако, выявить и отличия в основаниях этих концепций. Первое и главное из них состоит в том, что концепция оптиматов не предполагает изначально какой-либо определенной структуры КМ. Она может оказаться совсем не описываемой кусочно-постоянными функциями – например, наногradientные структуры [8] – ср. GRIN линзы из [18]. Более того, решением задачи ТОУ с учетом ограничений на управляющие параметры может быть и постоянный состав с максимальным или минимальным значением этих параметров. Это во многом зависит от задания критерия качества. С другой стороны, для расчета структуры нет необходимости использовать какие-либо эвристические соображения, как в концепции метаматериалов, а достаточно лишь иметь адекватное описание реакции материала на то или иное воздействие в виде системы уравнений. Возможность существования необычных свойств, например отрицательных диэлектрической и магнитной восприимчивостей материала, стимулирует постановку новых обратных задач ТОУ. В приведенном примере это может быть задача о минимизации коэффициента отражения, отличающаяся от задач, рассмотренных в [7–13] об интерференционном фильтре или зеркале, лишь допущением о расширении диапазона возможных значений ϵ и μ на отрицательную область.

В свою очередь, эвристическая разработка метаматериалов не ограничена необходимостью адекватного описания проблемы в виде системы уравнений, а позволяет обобщать решения прямых задач для любых придуманных разработчиками структур. Например, линза Микаэляна (линза, фокусирующая излучение точечного источника, расположенного в торце цилиндра, см. рис. 5) вряд ли может быть получена в результате решения обратной задачи при сравнительно простой постановке [20]. Особенно имея в виду трудность постановки многомерных задач, в которых форма объема неизвестна.

Еще одно принципиальное отличие метаматериалов от оптиматов состоит в разной интерпретации понятия «свойство». Если в [4] «свойство» и количественная характеристика одной из констант среды – показателя преломления – это почти синонимы, то для оптиматов тот же показатель преломления выступает в роли управляющего параметра, а свойство (например, выделение области спектра – интерференционный фильтр) количественно характеризуется критерием качества – см. ниже.

На самом деле различие легко преодолевается, если для характеристики среды может быть выписана явная зависимость от других, фундаментальных или микроскопических констант/функций подобно тому, как может быть выписана явная зависимость диэлектрической проницаемости от плотности электронов. В этом случае уже эти функции будут играть роль управляющих параметров, а сам по себе феноменологический коэффициент, например коэффициент диффузии (точнее, некая его интегральная характеристика), будет критерием качества. Именно такой подход и доминирует в концепции метаматериалов – «теория эффективной среды». Автор [4] замечает: «В настоящее время теория эффективной среды (effective media theory – ЕМТ) используется для определения синтеза большинства электромагнитных композитов.

Допущения ЕМТ совместимы с правилами макроскопических композитов, за исключением того, что приближение «локального поля» нарушает правило ЗА (наличие только локальных реакций – прим. автора). Приближение «локального поля» явилось оригинальной идеей Клаузиуса и Моссотти устранения необходимости решения самосогласованной задачи многих тел для расчета

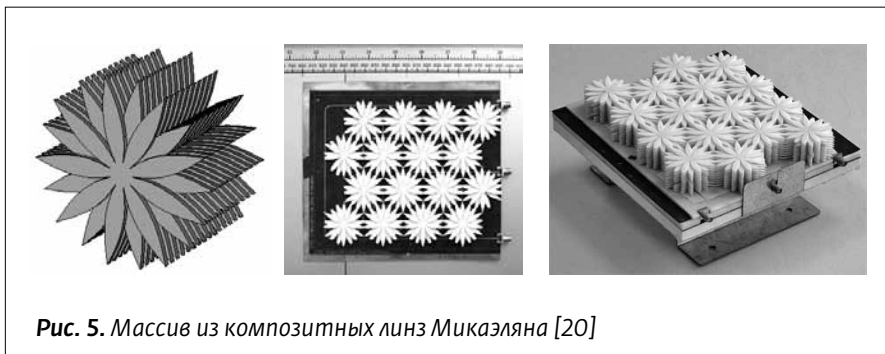


Рис. 5. Массив из композитных линз Микаэляна [20]



диэлектрической постоянной решетки диполей». Наиболее общей формой ЕМТ является уравнение Лорентц-Лоренца. Другие часто используемые формы ЕМТ (Bruggeman, Maxwell-Garnett, etc.) могут быть выведены из него в частных случаях.

В простейшей постановке (аналогичной задаче быстрогодействия в ТОУ) критерий качества (интеграл по объему материала от некоторой функции $f_0(r, u_i)$, где r, u_i – это координата в объеме материала и управляющие параметры) представляет собой толщину структуры ($f_0=1$), т.е. свойство – реакция материала на данное воздействие – достигается тем лучше, чем меньшая толщина КМ необходима для одной и той же реакции. Например, чем меньше толщина многослойной структуры, обеспечивающей необходимый коэффициент отражения интерференционного зеркала. Критерием качества может быть и любая другая величина, в том числе такая же, как и у Вальсера (отсутствие интегрирования по объему является частным случаем общей постановки задачи в ТОУ – задачи Больца и Майера). Вальсер в явном виде трактует ФОМ как КПД: «Использование материала в качестве датчика, передатчика, источника и т.д. включает обратимые и необратимые процессы, так что ФОМ материала всегда может быть интерпретирован в терминах термодинамических требований». Тем самым понятие оптимата формально значительно шире понятия «метаматериал», однако физический аспект задачи в определении Вальсера становится понятнее.

Наконец, вернемся к утверждению о принципиальной важности волновых процессов для любых задач материаловедения. В [11] введено понятие энергии неоднородности или просто неоднородности, равной половине суммы квадратов градиентов термодинамических переменных состояния. Констатировано, что теорема Пригожина о минимуме производства энтропии в отсутствие «химических членов» сводится к утверждению о минимальности интеграла по рассматриваемому объему от неоднородности. Другими словами [11, см. стр.14]: «Тогда общий вариационный принцип, описывающий стационарное состояние сплошной среды, может быть назван принципом минимума неоднородности (минимизации квадратов градиентов». Уравнением Эйлера этой вариационной задачи является уравнение Лапласа, т.е. однородное уравнение диффузии или теплопроводности. При обобщении этого принципа на пространственно-временной континуум и введении мнимого времени принцип преобразуется в требование минимальности квадрата 4-х градиента, уравнением Эйлера для которого и будет волновое уравнение. При этом в случае

постановки задачи ТОУ естественным управляющим параметром будет скорость распространения взаимодействия, зависящая от одного (диэлектрическая постоянная среды – для света) или нескольких (модуль упругости и модуль сдвига – для акустики) характеристик среды.

Итак, минимизация квадрата 4-х градиента электрического и магнитного поля приводит к волновому уравнению как уравнению Эйлера данной вариационной задачи. Характеристическим уравнением волнового уравнения является равенство нулю квадрата 4-х градиента характеристической поверхности, а уравнение эйконала [15, примечание на стр. 119]: «...можно считать так же характеристическим уравнением волновых уравнений ... для E и H . Оно дает строгое описание разрывов решений этих уравнений. ... Уравнение эйконала можно рассматривать так же, как уравнение Гамильтона – Якоби для вариационной задачи $\delta \int n ds = 0$, впервые поставленной применительно к оптике Ферма».

В задачах ТОУ уравнения состояния и сопряженные могут быть записаны в виде «канонических уравнений», содержащих в правых частях соответствующие частные производные «оптимального» гамильтониана. Принцип максимума Понтрягина требует, помимо максимальности этого гамильтониана, еще и равенства его нулю. Это равенство суть уравнение Гамильтона-Якоби [19, см. стр. 366]. Очень важно, что многомерные задачи, на которые ТОУ пока не обобщена (в [10, 11] дан незаконченный набросок такого обобщения), могут решаться методом характеристик, т.е. сведением задачи к системе ОДУ (обыкновенных дифференциальных уравнений) в случае, если эти задачи представлены уравнениями с частными производными 1-го порядка как уравнение эйконала.

В продолжении статьи будут приведены примеры постановки и решения обратных задач для оптических материалов, а также представлен краткий обзор докладов конференции «Metamaterials'19», доказывающий реальность оптических метаматериалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Потапов А. Л.** Метаматериалы – миф или реальность? Часть 1. *Фотоника*. 2017; 1: 108–125.
2. **Потапов А. Л.** Метаматериалы – миф или реальность? Часть 2. *Фотоника*. 2017; 2: 62–79.
3. **Потапов А. Л.** Метаматериалы – миф или реальность? Часть 3. *Фотоника*. 2017; 3: 106–118.
4. **Walser R. M.** Electromagnetic Metamaterials. Inaugural Lecture. Proceedings of SPIE. *Complex Mediums II beyond Linear Isotropic Dielectrics*. San Diego. 2001; 4467:1–15.
5. **Гуляев Ю. В., Лагарьков А. Н., Никитов С. А.** Метаматериалы: фундаментальные исследования и перспективы применения. *Вестник РАН*. 2008; 78(5): 438–457.
6. **Вендик И. Б., Вендик О. Г.** Метаматериалы и их применения в технике

- сверхвысоких частот. *Журнал технической физики*. 2013; 83(1); 3–28.
- Щитов Н. Н.** Многослойные структуры – материалы с заданными оптимальными свойствами. II *Всероссийская научно-техническая конференция «Быстро-закаленные материалы и покрытия»*. Сборник трудов. – М.: «МАТИ» – РГТУ им. К. Э. Циолковского. 2003; 103–109.
 - Лозован А. А., Щитов Н. Н.** Оптимизация процесса разработки вакуумных наногradient-ных покрытий. *Технология машиностроения*. 2007; 9: 36–40.
 - Погребняк А. Д., Лозован А. А., Щитов Н. Н., Кирик Г. В., Стадник А. Д., Братушка С. Н.** Структура и свойства нанокomпозитных, гибридных и полимерных покрытий. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ». 2011.
 - Лозован А. А., Щитов Н. Н.** Применение теории оптимального управления при разработке композиционных материалов. *Избранные задачи современного материаловедения: кластеры, покрытия, порошки, композиты, неразъемные соединения* / Под ред. Лозована А. А. – М.: Пробел-2000. 2014.
 - Лозован А. А., Щитов Н. Н.** Оптимизация параметров функциональных покрытий. *Актуальные задачи инженерии поверхности* / Под ред. Лозована А. А. – М.: Пробел-2000. 2016.
 - Schitov N. N.** The Experiment-Calculated Method of the Ordered Structure Coatings Optimal Parameters Determination. *Journal of Materials Science and Engineering*. 2017; A 7 (7–8): 216–227.
 - Schitov N. N.** The Optics and Optimal Control Theory Interpretation of the Parametric Resonance. *American Journal of Physics and Applications*. 2019; 7(3): 68–78.
 - Понtryгин Л. С., Болтынский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Мищенко Е. Ф.** *Математическая теория оптимальных процессов*. – М.: Наука. 1983.
 - Борн М., Вольф Э.** *Основы оптики*. – М.: Наука, 1973.
 - Струтинский М. Н.** Компьютерные технологии в термоэлектричестве. *Термоэлектричество*. 2009; 4: 32–48.
 - Романов Ю. А.** Периодические полупроводниковые структуры из сверхтонких слоев. *Физика и техника полупроводников*. 1971; 5(7):1434–1444.
 - Вольпян О. Д., Кузьмичев А. И.** *Отрицательное преломление волн. Введение в физику и технологию электромагнитных метаматериалов* / Под ред. Г. М. Зверева. – К.-М.: Аверс, 2012.
 - Корн Г., Корн Т.** *Справочник по математике для научных работников и инженеров*. – М.: Наука. 1974.
 - Александрин А. М., Саломатов Ю. П.** Широкополосная антенная решетка с использованием структур из искусственного неоднородного диэлектрика. *Доклады ТУСУРа*. 2012; 2 (26)-1: 7–10.
 - Photonics Russia*. 2017; 3: 106–118.
 - Wolser R. M.** Electromagnetic Metamaterials. Inaugural Lecture. Proceedings of SPIE. *Complex Mediums II beyond Linear Isotropic Dielectrics*. San Diego. 2001; 4467:1–15.
 - Gulyaev YU.V., Lagar'kov A.N., Nikitov S. A.** Metamaterialy: fundamental'nye issledovaniya i perspektivy primeneniya. *Vestnik RAS*. 2008; 78(5): 438–457.
 - Vendik I. B., Vendik O. G.** Metamaterialy i ih primeneniya v tekhnike sverhvysokih chastot. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2013; 83(1); 3–28.
 - Schitov N. N.** Многослойные структуры – материалы с заданными оптимальными свойствами. II *Всероссийская научно-техническая конференция «Быстро-закаленные материалы и покрытия»*. Сборник трудов. – М.: «МАТИ» – РГТУ им. К. Э. Циолковского. 2003; 103–109.
 - Lozovan A. A., Schitov N. N.** Optimizaciya processa razrabotki vakuumnykh nanogradient-nykh pokrytij. *Tekhnologiya mashinostroeniya*. 2007; 9: 36–40.
 - Pogrebnyak A. D., Lozovan A. A., Schitov N. N., Kirik G. V., Stadnik A. D., Bratushka S. N.** *Struktura i svoystva nanokompozitnykh, gibridnykh i polimernykh pokrytij*. – М.: Knizhnyj dom «LIBROKOM». 2011.
 - Lozovan A. A., Schitov N. N.** Primenenie teorii optimal'nogo upravleniya pri razrabotke kompozitsionnykh materialov. *Izbrannye zadachi sovremennogo materialovedeniya: klavtery, pokrytiya, poroshki, kompozity, neraz'emnye soedineniya* / Pod red. Lozovana A. A. – М.: Probел-2000. 2014.
 - Lozovan A. A., Schitov N. N.** Optimizaciya parametrov funktsional'nykh pokrytij. *Aktual'nye zadachi inzhenerii poverhnosti* / Pod red. Lozovana A. A. – М.: Probел-2000. 2016.
 - Schitov N. N.** The Experiment-Calculated Method of the Ordered Structure Coatings Optimal Parameters Determination. *Journal of Materials Science and Engineering*. 2017; A 7 (7–8): 216–227.
 - Schitov N. N.** The Optics and Optimal Control Theory Interpretation of the Parametric Resonance. *American Journal of Physics and Applications*. 2019; 7(3): 68–78.
 - Pontryagin L. S., Boltyanskij V. G., Gamkrelidze R. V., Mishchenko E. F.** *Matematicheskaya teoriya optimal'nykh processov*. – М.: Nauka. 1983.
 - Born M., Wolf E.** *Principles of Optics (4-th. ed.)*. Pergamon Press. 1970.
 - Strutinskij M. N.** Komp'yuternye tekhnologii v termoelektrichestve. *Termoelektrichestvo*. 2009; 4: 32–48.
 - Romanov YU. A.** Periodicheskie poluprovodnikovye struktury iz sverhtonkikh sloev. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*. 1971; 5(7):1434–1444.
 - Vol'p'yan O.D., Kuz'michev A. I.** *Otricatel'noe prelomlenie voln. Vvedeniye v fiziku i tekhnologiyu elektromagnitnykh metamaterialov* / Pod red. G. M. Zvereva. – К.-М.: Avers, 2012.
 - Corn G., Corn T.** *Mathematics handbook (for science officers and engineers) in Russian*. – М.: Nauka. 1974.
 - Aleksandrin A. M., Salomatov Yu. P.** Shirokopolosnaya antennaya reshetka s ispol'zovaniem struktur iz iskusstvennogo neodnorodnogo dielektrika. *Doklady TUSURA*. 2012; 2 (26)-1: 7–10.

REFERENCE

- Potapov A. L.** Metamaterials: myth or reality? «Reverse» refractive index Part 1. *Photonics Russia*. 2017; 1: 108–125.
- Potapov A. L.** Metamaterials: myth or reality? «Reverse» refractive index Part 2. *Photonics Russia*. 2017; 2: 62–79.
- Potapov A. L.** Metamaterials: myth or reality? «Reverse» refractive index Part 3.



Вакуумное оборудование для оптики и микроэлектроники



Проектирование и производство вакуумных напылительных установок «под ключ»



Програмное обеспечение и автоматизация

Изготовление технологических устройств



Izovac

Разработка и изготовление тонкопленочных изделий

Разработка технологий формирования тонких пленок

Оптические элементы

Напылительный сервис

Сложные и уникальные покрытия

ООО «Изовак», ул. М. Богдановича, 155-907, 220040, Минск, Беларусь, тел.: +375 17 293 18 42, факс: +375 17 2931845

www.izovac.com
www.izovac-coatings.com