

MULTIPHYSICS SIMULATION

При поддержке
COMSOL

IEEE
SPECTRUM

СЕНТЯБРЬ 2016

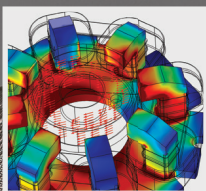


KONICA MINOLTA
МОДЕЛИРУЕТ
ПОВЕРХНОСТНЫЕ
ПЛАЗМОНЫ ДЛЯ
УВЕЛИЧЕНИЯ ЯРКОСТИ
СВЕТОДИОДОВ

СТР. 24



GRAFTECH
ИСПОЛЬЗУЕТ
ГРАФИТ ДЛЯ
ОХЛАЖДЕНИЯ
ЭЛЕКТРОНИКИ
СТР. 3



ST. JUDE MEDICAL
РАЗРАБАТЫВАЕТ
БЕСПРОВОДНЫЕ
ИМПЛАНТЫ НОВОГО
ПОКОЛЕНИЯ
СТР. 7

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ — ОСНОВА КАЖДОЙ РАЗРАБОТКИ

Автор **ДЖЕЙМС А. ВИК (JAMES A. VICK)**, ИЗДАТЕЛЬ, IEEE SPECTRUM

СКОРОСТЬ РАЗВИТИЯ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ и появления новых продуктов в наши дни удивительна. Предприятия внедряют инновационные процессы разработки, чтобы обогнать своих конкурентов. Многие компании полагаются на математические модели и численное моделирование при проектировании продуктов, стремясь сделать модели максимально близкими к реальности как можно раньше в цикле разработки продукта. Это предоставляет множество преимуществ, в том числе ускорение вывода продукта на рынок и повышение его качества.

В этом выпуске журнала «Мультифизическое моделирование», спонсируемого компанией COMSOL, мы рассказываем, как компании пользуются численным моделированием. На страницах этого выпуска представлены решения множества прикладных задач: плазмонные нанополоски, центробежные сердечные насосы, технологии 5G для интернета вещей и акустическая маскировка.

Особенный интерес представляет расширение возможностей моделирования для всех сотрудников компании с помощью специализированных и удобных в использовании приложений. Статья от компании GrafTech, лидера в производстве графитовых деталей для промышленности, дает полное представление об этом новом направлении. Команда исследователей компании разработала детальную модель графитовых рассеивателей тепла, используемых для терморегулирования смартфонов, а затем превратила свою модель в приложение, которое группа сбыта использует при создании спецификаций проектов для своих клиентов. Приложение, моделирующее рассеиватель тепла, и другие подобные приложения позволяют оценить правильность и характеристики различных проектов и при этом не требуют опыта в моделировании, помогая специалистам делиться своими знаниями с коллегами, сотрудниками и даже клиентами.

Из этого выпуска журнала «Мультифизическое моделирование» вы узнаете, почему средства численного анализа стали эффективным инструментом во многих отраслях промышленности. ☺

Электронная почта: jv.ieeemedia@ieee.org

ОБЛОЖКА. Это новаторское устройство на основе органических светодиодов под названием Whisper Wind стало результатом сотрудничества художника по свету Инго Маурера (Ingo Maurer) и компании Konica Minolta. Лампа состоит из 25 гибких панелей из органических светодиодов, закрепленных на двусторонней стальной ветвистой конструкции с магнитами, которая также служит проводником питания. Статья на стр. 24 подробно рассказывает о моделировании органических светодиодов. Изображение предоставлено Инго Маурером.



СОДЕРЖАНИЕ

3 ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ УГЛЕРОДА И ГРАФИТА ДЛЯ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ

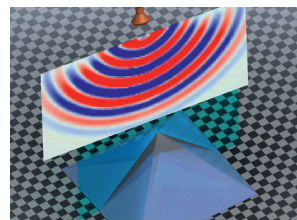
— GrafTech International, США

7 УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И БЕЗОПАСНОСТИ ИМПЛАНТИРУЕМОГО МЕДИЦИНСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ МЕТОДАМИ МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

— St. Jude Medical, США

10 ЛЕГКАЯ, ПРОЧНАЯ И БЕЗДЕФЕКТНАЯ СВАРКА ЛАЗЕРНЫМ ЛУЧОМ: СОВЕРШЕНСТВО ВАРИАНТА ПРОЦЕССА ДЛЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

— ArcelorMittal, Франция

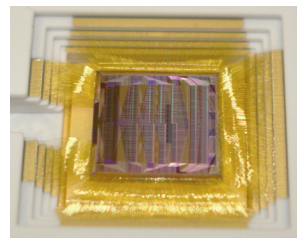


13 УПРАВЛЕНИЕ ЗВУКОМ: КАК МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОМОГАЕТ В ПЕРЕДОВЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ

— Университет Дьюка, США

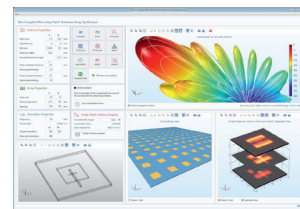
16 ВИРТУАЛЬНАЯ НАСТРОЙКА АВТОМОБИЛЬНОЙ АУДИОСИСТЕМЫ

— HARMAN, Франция



18 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ФОТОННЫХ КОММУТАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ РАСТУЩЕГО СЕТЕВОГО ТРАФИКА

— Huawei, Канада

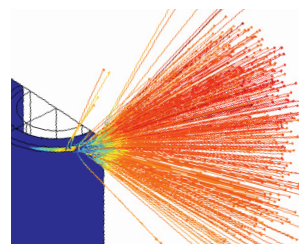


22 НАШЕ ВИДЕНИЕ БУДУЩЕГО СТАНДАРТА 5G: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАБИРАЕТ СКОРОСТЬ

— COMSOL, США

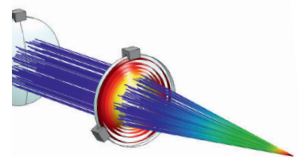
24 ДА БУДЕТ СВЕТ: СВЕТОЛЕ БУДУЩЕГО ОРГАНИЧЕСКИХ СВЕТОДИОДОВ

— Konica Minolta, США



27 ОТ НАНОАНТЕНН ДО СПУТНИКОВ ДЛЯ ДАЛЬНЕГО КОСМОСА: ЭФФЕКТИВНАЯ ВЫРАБОТКА ЭНЕРГИИ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ

— Итальянский технологический институт, Италия



30 МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ ОСВЕЩАЕТ ДОРОГУ В БУДУЩЕ

— COMSOL, США

32 ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ НАНОФОТОНИКА: ОТ ОПТИЧЕСКИХ «ЧЕРНЫХ ДЫР» ДО ПЛАЗМОННОГО ПИНЦЕТА

— Университет Пердью, США

ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ УГЛЕРОДА И ГРАФИТА ДЛЯ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ

Компания GrafTech International применяет углерод и графит в производстве самых различных продуктов, от промышленных индукционных печей до потребительской электроники. Численный анализ играет ключевую роль в разработке и оптимизации процессов для всех прикладных задач, позволяет улучшать эксплуатационные характеристики, приводит к сокращению энергопотребления и материальных расходов.

Автор: ДЖЕННИФЕР СЕГУИ (JENNIFER SEGUI)

ПОДОБРАТЬ И РАЗРАБОТАТЬ

наилучшие материалы для конкретной прикладной задачи терморегулирования может быть довольно сложно — инженерам-конструкторам приходится выбирать из бесчисленных предложений поставщиков, и им зачастую не хватает информации для принятия обоснованного решения.

Исследователи и инженеры компании GrafTech International стремятся досконально знать все особенности своей продукции, чтобы предоставить своим клиентам информацию, необходимую для выбора подходящих решений на основе углерода и графита.

«Чтобы лучше понимать особенности наших продуктов и их поведение в задачах терморегулирования, мы применяем численное моделирование в сочетании с физическими испытаниями, — объясняет Ричард Бейерли (Richard Beyerle), ведущий исследователь в группе инноваций и технологий GrafTech. — Современные вычислительные инструменты, которые мы разрабатываем, полезны также нашим инженерам отдела продаж, выездным специалистам и клиентам: они могут сравнить эксплуатационные характеристики виртуальных прототипов наших продуктов, прежде чем переходить к физической реализации и испытаниям».

Пример такого инструмента — компьютерного приложения — показан на рис. 1. В основе этого приложения — математическая модель, с которой можно работать посредством удобного интерфейса.

Численное и, в частности, мультифизическое моделирование

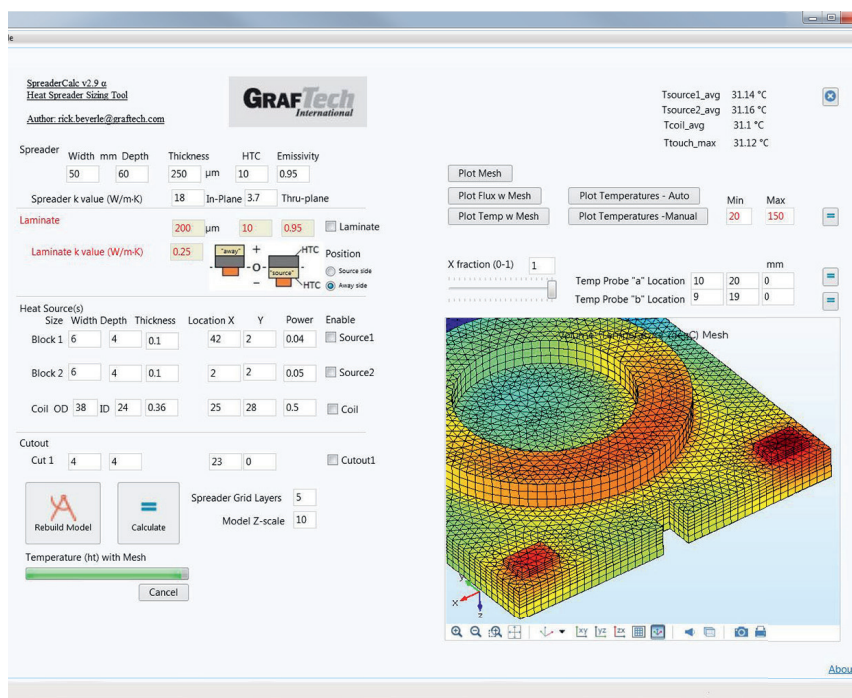


РИС. 1. Приложение для моделирования предоставляет простой в использовании интерфейс математической модели, лежащей в основе приложения, и дает возможности выполнения анализа широкому кругу пользователей. Это приложение позволяет сравнивать теплопередачу различных видов графитовой фольги, которая используется для рассеивания тепла в потребительской электронике. Изображение предоставлено GrafTech International

в группе инноваций и технологий используют все. «Практически для всех наших продуктов и приложений применялось мультифизическое моделирование», — говорит Райан Пол (Ryan Paul), менеджер по инновациям и технологиям в GrafTech. Бейерли, Пол и ведущий исследователь Натаниэл

Мэй (Nathanael May) используют мультифизическое моделирование, чтобы лучше понимать электрические, механические и теплофизические свойства углерода и графита, а также для разработки и оптимизации технологических процессов в ряде промышленных приложений.

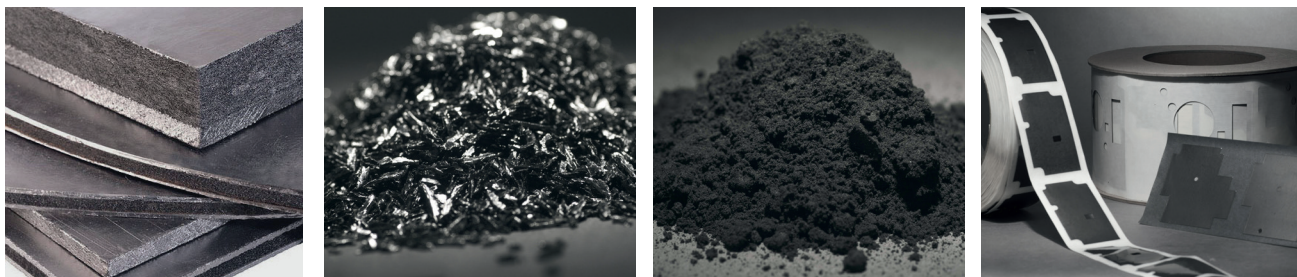


РИС. 2. Современные материалы, разрабатываемые и производимые компанией GrafTech, включают в себя жесткие композитные листы, развернутые чешуйки, порошки и гибкую графитовую фольгу, а также множество других заказных решений. Изображение предоставлено GrafTech International

“ [Приложения для моделирования], которые мы используем на стадии проектирования, полезны также нашим инженерам отдела продаж, выездным специалистами и клиентам: пользователи могут сравнить эксплуатационные характеристики виртуальных прототипов наших продуктов.

— РИЧАРД БЕЙЕРЛИ,
ВЕДУЩИЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬ,
GRAFTECH INTERNATIONAL

» УЗНАТЬ ВСЕ ОБ УГЛЕРОДЕ И ГРАФИТЕ

СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, производимые компанией GrafTech из углерода и графита, поставляются в различной форме: жесткие листы, нетканые материалы, порошки, гибкая фольга и элементы конструкции с заказной механической обработкой, часть из которых показана на рис. 2. На рис. 3 сравниваются аморфный углерод и графит, которые состоят из одного и того же химического элемента — углерода. В сравнении с аморфным углеродом графит обладает более упорядоченной структурой из множества плоских слоев. Каждый слой графита содержит шестиугольную решетку ковалентных связей между атомами углерода.

Такая структура графита обеспечивает превосходную электро- и теплопроводность в плоскости слоя, особенно в сравнении

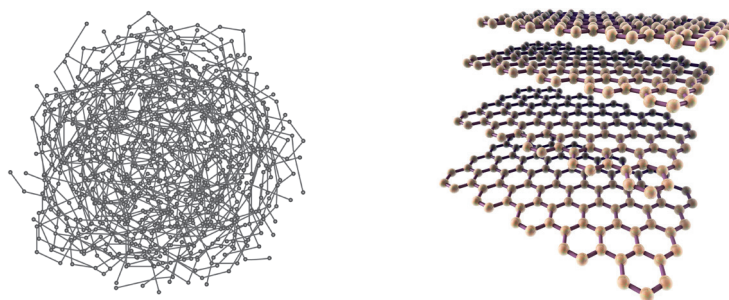


РИС. 3. По сравнению с аморфным углеродом (слева) графит обладает высокоупорядоченной структурой из отдельных слоев графена (справа)

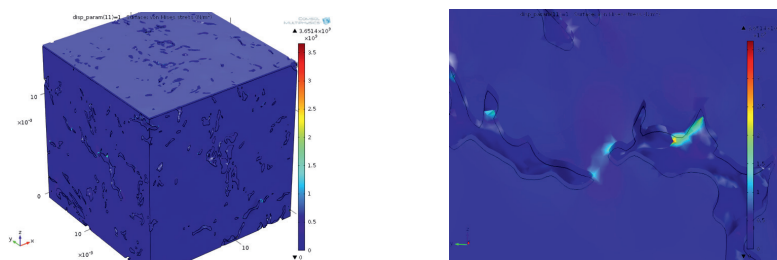


РИС. 4. Реконструкция графита, показывающая пористую структуру материала, создана с помощью компьютерной томографии и импортирована в программное обеспечение COMSOL® для моделирования. Проверенная с ее помощью модель используется для изучения влияния пористой структуры на упругие свойства синтетического графита. Изображение предоставлено GrafTech International

с аморфным углеродом. Графит также необычайно прочен: одиночный слой графита, называемый также графеном, — самый прочный из известных материалов. Однако слабые ван-дер-ваальсовы связи между слоями графита приводят к низкой электро- и теплопроводности между слоями, что и объясняет высокую анизотропию свойств графита. Слои также могут скользить друг относительно друга, что обуславливает относительную мягкость материала в массе. Тем не менее, многие формы графита выдерживают температуры выше 3000 °С в неокисляющей атмосфере.

Чтобы уникальные теплофизические свойства графита нашли свое применение в прикладных задачах терморегулирования, необходимо лучше понимать общие свойства материала. Для этих целей в GrafTech используют сочетание физических исследований и моделирования в программном обеспечении COMSOL Multiphysics®, что показано на рис. 4.

«При разработке важно моделировать поведение графита в условиях динамических тепловых, механических и электрических нагрузок с учетом температурной зависимости свойств материала, — объясняет



РИС. 5. Гибкие рассеиватели тепла из графитовой фольги обеспечивают рассеивание тепла с электронных компонентов благодаря высокой проводимости в плоскости, в то же время защищая чувствительные к нагреванию области, расположенные ниже, благодаря малой проводимости между плоскостями. Изображение предоставлено GrafTech International

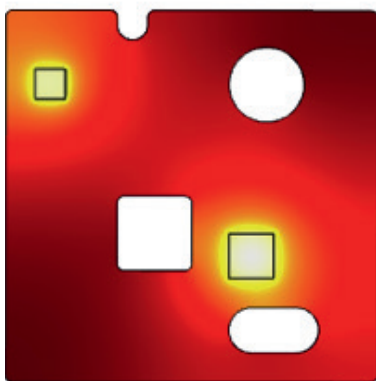
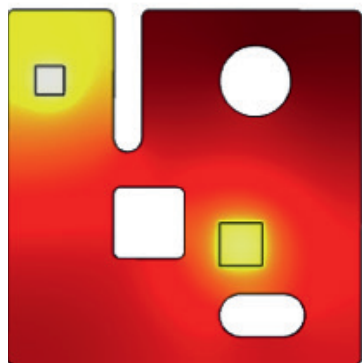


РИС. 6. GrafTech использует приложение для моделирования, которое оценивает рассеивание тепла в графитовом рассеивателе тепла, учитывая размеры и положение источников тепла и размеры вырезов. Изображения предоставлены GrafTech International

Пол. — Моделируя графит и варианты его применения, мы исследуем его гораздо быстрее, углубляя наше понимание физических механизмов и теории, которое мы не смогли бы получить из одних только экспериментальных данных».

» МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРАФИТОВОЙ ФОЛЬГИ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ для одной прикладной задачи

— терморегулирования электронных компонентов — компания GrafTech разрабатывает и производит тонкую гибкую графитовую фольгу. Из такой фольги выполнены, например, рассеиватели тепла SPREADERSHIELD™, которые применяются в смартфонах, планшетах и экранах. Рис. 5 показывает, как графитовые рассеиватели тепла охлаждают электронные компоненты и устройства, позволяя им работать при более низких температурах,

«**Моделируя графит и его варианты применения, мы изучаем его гораздо быстрее, углубляя наше понимание физических процессов и теории, которое мы не смогли бы получить из одних только экспериментальных данных.**

— **РАЙАН ПОЛ, МЕНЕДЖЕР ПО ИННОВАЦИЯМ И ТЕХНОЛОГИЯМ, GRAFTECH INTERNATIONAL**

удлиняя срок службы и улучшая эксплуатационные характеристики.

Рассеиватели тепла из графитовой фольги выпускаются с разными характеристиками: толщиной, электро- и теплопроводностью, контактным сопротивлением и покрытиями. «Сложно найти баланс между желаемыми теплофизическими свойствами и ценой, — говорит Бейерли. — Численное моделирование — это отличный способ оценить, насколько хорошо будет работать графитовая фольга для охлаждения электронных компонентов того или иного устройства. Численное моделирование помогает нам находить самое экономически выгодное для клиентов решение, не теряя в качестве».

Чтобы оценить анизотропную теплопередачу и свойства гибкой графитовой фольги в различных задачах терморегулирования для электроники, Бейерли разрабатывает математические модели и приложения для моделирования в программном обеспечении COMSOL Multiphysics®. Одно из специализированных приложений дает возможность пользователю оценить работу графитовых рассеивателей тепла с типичными для портативной электроники размерами, например, для сотовых телефонов. Это приложение уже было показано на рис. 1.

В приложении имеется возможность менять положение и размер источников тепла, щелей и других отверстий, указывать мощность источника тепла, отображать сетку конечных элементов и результаты моделирования. В качестве примера, на рис. 6 показано, как изменение длины щели влияет на рассеивание тепла от близко расположенного источника.

Чтобы убедиться в корректности приложения для моделирования, важно проверить математическую модель, лежащую в его основе. Бейерли уделяет особое внимание точному моделированию анизотропной теплопередачи в плоских и изогнутых слоях графитовых рассеивателей тепла. Если моделирование в данном случае будет неточным, то результаты для графита с его

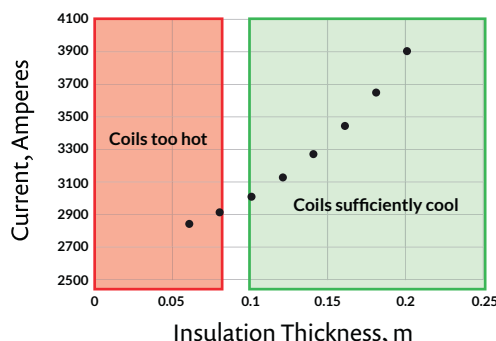
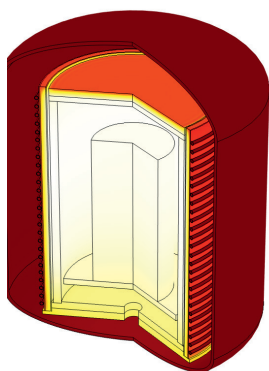


РИС. 7. Слева: распределение температуры — показаны результаты моделирования печи с охлаждаемыми водой индукционными катушками. Справа: результаты показывают оптимальную толщину графитового слоя для охлаждения катушек. Изображения предоставлены GrafTech International

уникальными свойствами могут оказаться такими же, как и для обычного металла. В программном обеспечении COMSOL® легко создать пользовательскую систему координат для моделирования анизотропных свойств материалов, в том числе для изогнутых и разветвленных деталей.

Приложение позволяет быстро, менее чем за 12 секунд, запустить расчет задачи, благодаря чему его можно использовать как демонстрационный инструмент при продажах. Установив COMSOL Server™, Бейерли может загружать приложения на локальные вычислительные мощности GrafTech, предоставляя коллегам и клиентам возможность удаленного запуска приложений из COMSOL Client для операционной системы Windows® или из веб-браузера.

» ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ И РАБОТЫ ПЕЧИ

НЕСМОТЯ НА МНОГОЧИСЛЕННЫЕ ПРАКТИЧЕСКИЕ ДОСТОИНСТВА применения графита, анизотропные и сильно зависящие от температуры свойства многих уникальных сортов материалов, которые производит компания GrafTech могут представлять сложность для точного моделирования — но Бейерли, Пол и их коллега Натаниэл Мэй, ведущий исследователь группы инноваций и технологий, готовы работать над этой сложной задачей.

«Наличие множества уникальных сортов материалов означает, что нам необходимо выполнять лабораторные исследования и составлять базы данных о свойствах материалов для использования в наших моделях, — объясняет Мэй. — В конечном

“ *Виртуальное прототипирование с помощью математических моделей очень помогают убедить наших клиентов: мы можем продемонстрировать, что наши решения тщательно продуманы.*

— **НАТАНИЕЛ МЭЙ, ВЕДУЩИЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬ, GRAFTECH INTERNATIONAL**

итоге, мы будем вознаграждены за наш труд. Виртуальное прототипирование с помощью математических моделей очень полезно для убеждения наших клиентов: мы можем продемонстрировать, что наши решения тщательно взвешены».

Один из крупных проектов Мэя направлен на создание сложной мультифизической модели с использованием COMSOL Multiphysics. «Я, в основном, создаю двухмерные и трехмерные модели высокотемпературных печей, например, индукционных и вакуумных, а также печей для выращивания высококачественных кристаллов», — говорит Мэй.

На рис. 7 показан пример индукционной печи, смоделированной Мэем, а также результаты оптимизации конструкции

с помощью численного моделирования. Моделирование использовалось для оптимизации толщины изоляционного слоя GRAFSHIELD™ из графита с углеродными связями, этот слой не позволил бы температуре в индукционных катушках с водяным охлаждением подниматься выше 100 °С. Кроме этого, чем тоньше изоляционный слой, тем меньший ток требуется для поддержания температуры печи.

» НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ УГЛЕРОДА И ГРАФИТА

МОДЕЛИРОВАНИЕ играет большую роль в получении новых знаний об уникальных решениях на основе углерода и графита, которые производит компания GrafTech. Бейерли, Пол и Мэй, которые отлично разбираются и в экспериментальных методах, и в компьютерном моделировании, совмещают эти области, чтобы получать информацию о свойствах изделий GrafTech в конкретных приложениях.

Разрабатывая и развертывая специализированные приложения — что можно сделать только в программном обеспечении COMSOL Multiphysics® — компания GrafTech упрощает доступ к возможностям для моделирования прикладных задач терморегулирования. При этом приложения для моделирования не только помогают открыть новые возможности углерода и графита, но и предлагают доступ к численному моделированию для всех, кто в этом заинтересован, от коллег до потенциальных клиентов. ©



Ричард Бейерли — ведущий исследователь в группе инноваций и технологий GrafTech International

УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И БЕЗОПАСНОСТИ ИМПЛАНТИРУЕМОГО МЕДИЦИНСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ МЕТОДАМИ МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Компания St. Jude Medical разрабатывает желудочковые аппараты вспомогательного кровообращения, улучшающие качество жизни больных сердечной недостаточностью. В процессе разработки осуществляется численное моделирование, чтобы охарактеризовать различные сопутствующие аспекты конструкции: от температурных эффектов и гидродинамики до переноса энергии.

Автор: САРА ФИЛДС (SARAH FIELDS)

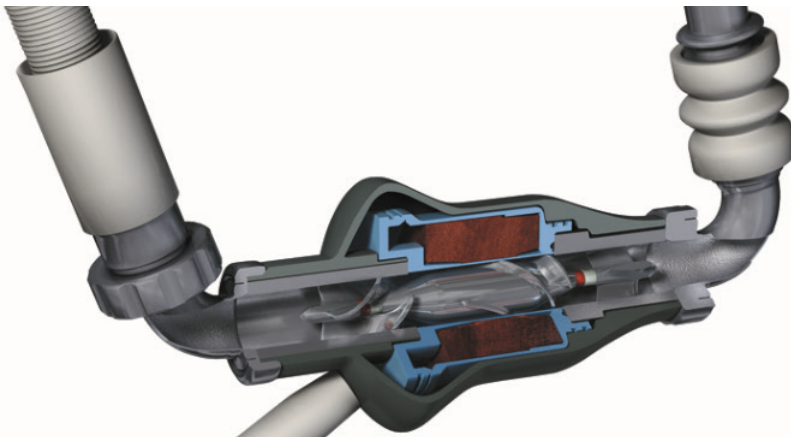


РИС. 1. Устройство вспомогательного кровообращения левого желудочка (LVAD) обеспечивает циркуляцию насыщенной кислородом крови по организму. Изображение предоставлено компанией St. Jude Medical

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА, призванного частично или полностью заменить сердце, до сих пор представляется чрезвычайно сложной задачей. При разработке возникают масштабные проблемы, начиная с подачи энергии к устройству и заканчивая предотвращением нарушения нормальных биологических функций. Исследователи компании St. Jude Medical используют методы мультифизического моделирования при разработке устройств вспомогательного кровообращения левого желудочка (LVAD) — современных средств улучшения прогноза и повышения качества жизни больных с сердечной недостаточностью.

Обычно эта патология, в первую очередь, поражает левую половину сердца, поскольку левый желудочек прокачивает обогащенную кислородом кровь через все тело, выполняя намного более тяжелую работу, чем правый желудочек, прокачивающий кровь через легкие. Для механической поддержки циркуляции больным с левожелудочковой недостаточностью часто устанавливают устройство вспомогательного кровообращения левого желудочка (см. рис. 1), поддерживающий циркуляцию крови механическим способом. Желудочковые устройства вспомогательного кровообращения являются одними

из наиболее сложных имплантируемых людям устройств. LVAD должно обеспечивать циркуляцию крови по всему организму человека и поддерживать его жизнедеятельность, не вызывая отторжения внутренней средой организма. Компания Thoratec, в настоящее время — подразделение St. Jude Medical, после многолетних клинических исследований вывела эти аппараты на мировой рынок в 2010 г.

» РАЗРАБОТКА МОЩНОГО, ЭФФЕКТИВНОГО И ГЕМОСОВМЕСТИМОГО НАСОСА ПРИ РАЗРАБОТКЕ УСТРОЙСТВА

ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО КРОВООБРАЩЕНИЯ ЛЕВОГО ЖЕЛУДОЧКА необходимо учесть множество факторов. Аппарат должен быть достаточно миниатюрным для соединения с сердцем, изготовлен из биологически совместимых материалов и иметь геометрию, допускающую пребывание внутри организма без отторжения. Необходимо учесть гидродинамику, энергоснабжение и отвод тепла. Поскольку в каждой области разработки необходимо учесть множество взаимодействующих физических эффектов, ключевую важность имеет мультифизическое моделирование.

Фредди Хансен (Freddy Hansen), старший инженер научно-исследовательского отдела компании St. Jude Medical, используя свои знания в физико-математическом моделировании, определяет характеристики сложных имплантируемых медицинских устройств, таких как LVAD, перед проведением экспериментальных исследований.

С 2011 г. Хансен использует программное обеспечение COMSOL Multiphysics®, создав за это время свыше 230 моделей для решения широкого спектра проблем разработки, связанных с уникальными физическими характеристиками насосов искусственного кровообращения.

«Каждый день я использую COMSOL Multiphysics для разных задач: от разработки примеров для проверки концепции до создания достаточно сложных моделей, включающих детальную геометрию, полученную из САПР, и помогающих решать связанные междисциплинарные физические задачи. Чтобы получить все нужные данные из некоторых сложных моделей, с ними приходится работать месяцами».

При выводе на рынок каждого нового поколения LVAD в них вносятся изменения, направленные на повышение безопасности и улучшение качества жизни больных. Научно-исследовательская работа в компании St. Jude Medical сосредоточена на улучшении биосовместимости, гемосовместимости и иммуносовместимости,



РИС. 2. Внешнее оборудование LVAD. Изображение предоставлено компанией St. Jude Medical

с тем чтобы устройство не вызывало нежелательного иммунного ответа и не нарушало работу других систем организма.

Геометрия и габариты устройства в значительной степени определяют его общую эффективность. При имплантации LVAD хирург соединяет один из его концов с левым желудочком, другой — с восходящей аортой (см. рис. 2). Более миниатюрные устройства удобнее и в меньшей степени воздействуют на окружающие органы и ткани. Моделирование позволяет оценить последствия изменения размеров и геометрии в ходе разработки LVAD еще до создания физического прототипа.

» ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ LVAD ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ БИОСОВМЕСТИМОСТИ

МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНО ИСПОЛЬЗУЕТСЯ при разработке центробежного насоса LVAD. Одной из задач, возникающих при

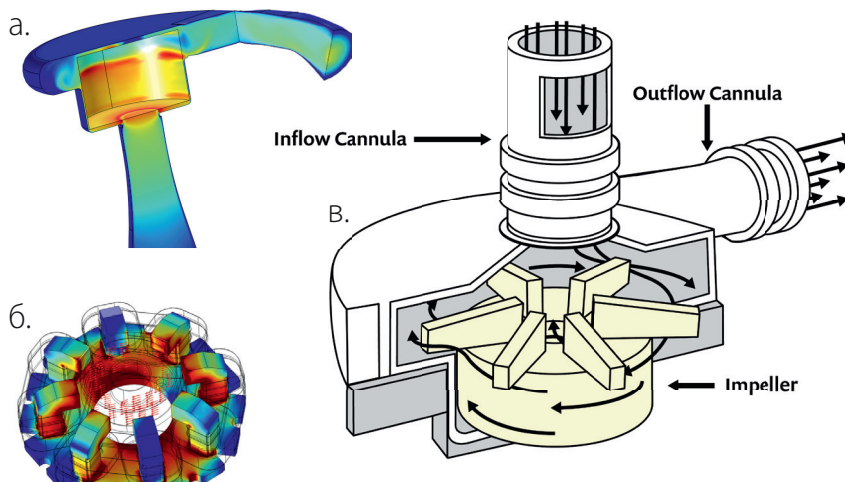


РИС. 3. (а) Трехмерная модель течения жидкости в камере насоса, построенная с помощью методов вычислительной гидродинамики. (б) Визуализация ротора на магнитной подушке, не нуждающегося в шариковых подшипниках и прочих компонентах, геометрия которых может стимулировать свертывание крови. Показаны величина и направление магнитного поля ротора, а также величина магнитного поля статора. (в) Схема центробежного насоса LVAD

проектировании этих устройств, является предотвращение свертывания крови внутри и вблизи насоса. Для этого был разработан ротор на магнитной подвеске, не требующий использования шариковых подшипников и других компонентов, геометрия которых может стимулировать свертывание крови. С помощью технологии моделирования вращающихся механизмов (интерфейс Rotating Machinery), входящей в программное обеспечение COMSOL Multiphysics, Хансен моделировал и ротор с магнитной подвеской, и турбулентный поток жидкости.

Ротор с постоянным магнитом приводится в движение обмоткой статора. Обмотка создает крутящий момент ротора

и активно управляет положением его оси. Вертикальное положение (левитация) ротора обеспечивается напряженностью магнитного поля и не нуждается в активном управлении. Кровь поступает в ротор в осевом направлении и перенаправляется радиально — в спиральную камеру или коллектор жидкости (см. рис. 3). Часть крови по наружному краю ротора поступает обратно на его вход, за счет чего кровь постоянно перемешивается, не оставляя зон, где она могла бы застаиваться и образовывать сгустки.

Другим значимым достижением стала разработка насосной системы с пульсирующим, а не постоянным потоком, что позволяет лучше воспроизводить работу сердца. Пульсирующий поток способствует перемешиванию крови, предотвращает ее свертывание и, как считается, оказывает положительное физиологическое действие на кровеносные сосуды всего организма.

» БЕСПРОВОДНОЕ ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ ПОЛНОСТЬЮ ИМПЛАНТИРУЕМОГО LVAD

СОВРЕМЕННЫЕ LVAD ТРЕБУЮТ ПИТАНИЯ от внешних батарей, расположенных в блоке управления снаружи тела, посредством кабеля из биосовместимых материалов. Возможно ли отказаться от использования этого кабеля?

Хансен изучил возможность передачи энергии посредством магнитного резонанса. Магнитный резонанс возникает

“ Каждый день я использую COMSOL Multiphysics для разных задач: от разработки примеров для проверки концепции до создания достаточно сложных моделей, включающих детальную геометрию, полученную из САПР, и помогающих решать связанные междисциплинарные физические задачи. Чтобы получить все нужные данные из некоторых сложных моделей, с ними приходится работать месяцами.

— ФРЕДДИ ХАНСЕН, СТАРШИЙ ИНЖЕНЕР НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ОТДЕЛА КОМПАНИИ ST. JUDE MEDICAL

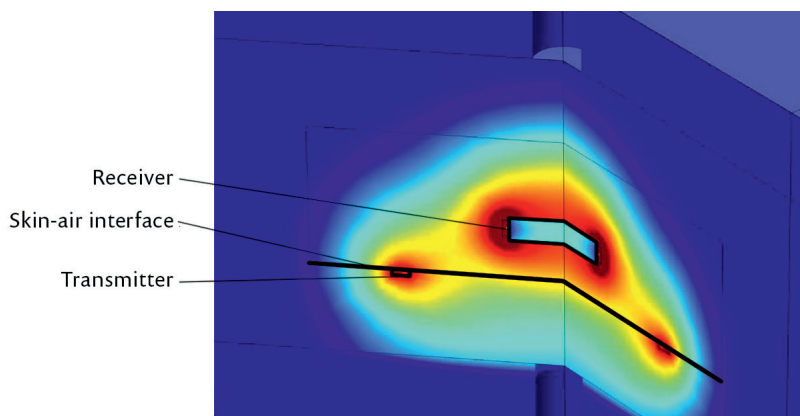


РИС. 4. Модель нагрева тела, вызванного передачей энергии путем магнитного резонанса. Результаты демонстрируют распределение энерговыделения в тканях и окружающем воздухе

между двумя объектами, имеющими одинаковую или почти одинаковую резонансную частоту и осуществляющими обмен энергией через колебания их магнитных полей. Таким образом можно передавать энергию от источника питания на устройство даже через биологические среды, например, ткани организма.

Полностью имплантируемая система устройства вспомогательного кровообращения левого желудочка (FILVAS) позволила бы снизить риск инфицирования и улучшить качество жизни пациента за счет устранения кабеля. Это позволило бы пациенту принимать душ или плавать, не беспокоясь о кабеле.

Для оценки осуществимости беспроводной передачи энергии к LVAD и определения возможной передаваемой мощности при использовании катушек разумных размеров Хансен совместил трехмерную модель магнитного поля с моделью электрического контура. Это позволило определить эффективность работы и величину потерь энергии, а также оптимальную конструкцию схемы и параметры ее компонентов.

Он провел оценку ключевых компонентов, таких как провода обмоток трансформатора из различных материалов, а также изучил возможность смещения катушки при ходьбе, беге и других действиях, выполняемых пациентом; также он оценил влияние близко расположенных магнитов и металлических предметов.

Инженеры должны гарантировать отсутствие влияния имплантата на температуру тела и работу биологических систем. Беспроводная передача энергии сопровождается возникновением слабых токов в тканях, окружающих катушки. Хансен моделировал нагрев тканей под воздействием

индуктивных токов в сочетании с моделями теплового выделения в самом имплантате (обмоток магнитов, электроники и батарей), после чего использовал коэффициент теплопроводности, определенный в ходе знаменитого эксперимента в Кливлендской клинике, для расчета повышения температуры тканей, окружающих имплантат (см. рис. 4).

» ЗАЩИТА ЖИЗНЕННО ВАЖНЫХ БАТАРЕЙ

ПАЦИЕНТЫ ВИНУЖДЕНЫ ПОСТОЯННО ЖИТЬ со своими LVAD, а это значит, что внешний блок управления аппарата должен быть устойчив к износу и защищен от случайных падений на пол. Чтобы гарантировать сохранение работоспособности блока управления (с жизненно важными батареями внутри) даже после того, как пациент бросит его на пол, Хансен разработал процедуру анализа ударной нагрузки для оценки устойчивости блока к внешним воздействиям (рис. 5).

Он также проанализировал края и поверхности деформированной оболочки и рамы конструкции на скручивание для проверки целостности блока управления. Анализ подтвердил, что блок сохраняет возможность подачи жизненно важного электропитания на LVAD даже после значительной ударной нагрузки.

» НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ В БУДУЩЕМ ПРЕДОСТАВИТ ПАЦИЕНТАМ УЛУЧШЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

МУЛЬТИФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДОКАЗАЛ СВОЮ ВАЖНОСТЬ при разработке устройств, частично или полностью заменяющих сердце. Хансен использует

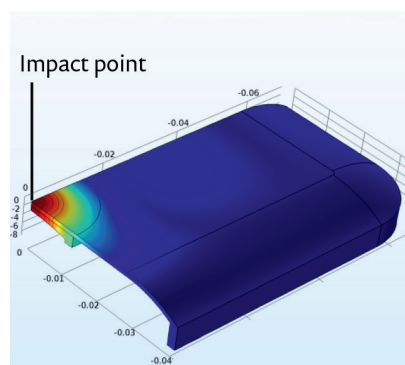


РИС. 5. Моделирование столкновения стального шара и блока управления LVAD для оценки устойчивости блока к внешним воздействиям. При визуализации видно смещение по вертикальной оси

экспериментальные методы вместе с математическим моделированием для понимания физики работы желудочковых устройств вспомогательного кровообращения, улучшения их биосовместимости и повышения общего удобства для пациента.

Последние инновации в области механических насосов, включая миниатюризацию, увеличение гемосовместимости, работу в режиме пульсирующего потока и возможность беспроводной передачи энергии, весьма перспективны для медицины будущего. ©



ФРЕДДИ ХАНСЕН получил диплом о высшем образовании первой ступени в области инженерной физики в Техническом университете Чалмерса (Гетеборг,

Швеция), затем получил докторскую степень и ставку временного научного сотрудника в Калифорнийском технологическом институте, специализируясь на физике плазмы, связанной с плазменными силовыми установками космических аппаратов. Последующие 9 лет работал в Ливерморской национальной лаборатории им. Э. Лоуренса в области гидродинамики, астрофизики и ядерного синтеза. Автор более 40 научных статей и 6 патентов, по которым принято или ожидается решение о выдаче; соавтор популярного учебника физики для колледжей. В настоящее время работает в компании St. Jude Medical над созданием искусственных сердец, используя свой опыт в электромагнетизме и гидродинамике.

ЛЕГКАЯ, ПРОЧНАЯ И БЕЗДЕФЕКТНАЯ СВАРКА ЛАЗЕРНЫМ ЛУЧОМ — СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЛЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Снижая выбросы, повышая безопасность и удерживая на низком уровне цены, производители автомобилей сталкиваются со сложными задачами, связанными с недавним ростом популярности экологичного транспорта. Инженеры компании ArcelorMittal оптимизируют расход материалов для конструкции автомобилей, соответствующей стандартам безопасности и защиты окружающей среды.

Автор: ЛЕКСИ КАРВЕР (LEXI CARVER)

БЕЗОПАСНОСТЬ. ВЛИЯНИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ. Экономически эффективная конструкция. Число факторов, которые производители автомобилей должны учитывать при разработке новых моделей, потрясает воображение. Если учесть, что стандарты безопасности меняются со временем, а выбросы загрязняющих веществ и цены должны постоянно снижаться, важным фактором, влияющим на все эти аспекты, становится конструкция и масса машины.

Производители автомобилей используют сваренные лазером заготовки, которые состоят из металлических листов разной толщины и сортов, чтобы снизить объем материала, идущего на различные части автомобиля, такие как шасси и кузов (см. рис. 1). Помимо прочего, эти заготовки должны отвечать требованиям аварийной безопасности.

Представляем ArcelorMittal, компанию, которая производит прочную высококачественную сталь. С помощью численного моделирования в компании оптимизируют процесс сварки лазерным лучом своих заготовок для получения лучших сочетаний сортов металла и толщины слоев, которые обеспечат должное качество при малой массе детали.

» СООТВЕТСТВИЕ ТРЕБОВАНИЯМ АВАРИЙНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И НОРМАТИВАМ ВЫБРОСОВ

«МЫ ОПТИМИЗИРУЕМ РАСПОЛОЖЕНИЕ СТАЛИ, чтобы определенные зоны автомобиля были тоньше и легче, но остались такими же прочными благодаря применению высокопрочных и закаленных под давлением сталей. В конечном итоге мы хотим добиться превосходного качества сварки, отвечающего требованиям

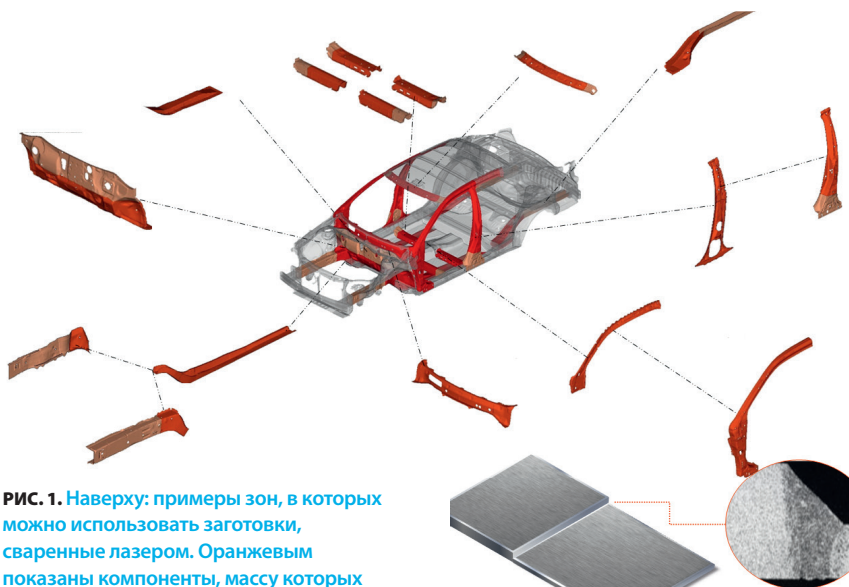


РИС. 1. Наверху: примеры зон, в которых можно использовать заготовки, сваренные лазером. Оранжевым показаны компоненты, массу которых можно снизить благодаря правильно спроектированным заготовкам, например, центральная стойка, боковые элементы, туннель и рамы дверей. Внизу: сваренная лазером заготовка и увеличенная часть, показывающая стыковой сварной шов

аварийной безопасности», — говорит доктор Садок Гаед (Sadok Gaied), который руководит командой в компании ArcelorMittal, работающей над моделированием сварки. Для того, чтобы сварной шов считался безопасным, он не должен трескаться, ломаться или обнаруживать иные дефекты при испытании.

Компания ArcelorMittal пользуется сваркой лазерным лучом: создавая точечный источник

тепла, специалисты превращают твердую сталь в расплавленный металл и получают глубокие и узкие сварные швы (см. рис. 2). «Мощный лазер вырабатывает столько энергии, что часть металла испаряется. Когда сталь плавится, ее плотность резко снижается, материал становится более подвижным, создавая пары высокого давления. При этом появляется узкое отверстие в точке воздействия

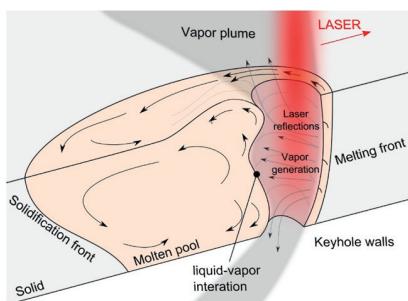


РИС. 2. Создание проплавного отверстия и расплавленная область во время сварки лазерным лучом. По мере того, как отверстие перемещается вместе с лазером вдоль шва между двух листов, расплавленная сталь заполняет окружающую область

лазера, — объясняет Гаед. — После этого окружающая отверстие сталь плавится, образуя область расплава. Когда расплав остывает, он соединяет два листа металла».

«Большая часть механических неисправностей возникает из-за дефектов швов, которые соединяют разные материалы. Если шов дефектен, в материале могут появиться слишком высокие напряжения». Неверные параметры процесса сварки могут также создавать неустойчивости, полости в сварном шве, неполные провары и подрезы, делающие соединение менее прочным. Примеры различных дефектов сварки показаны на рис. 3.

«Чтобы предсказать появление дефектов в разных условиях сварки, мы с помощью

“ Мы можем виртуально проверить, как условия работы влияют на частоту появления дефектов, а также предсказать гидродинамические, теплофизические и окончательные геометрические характеристики шва.

— САДОК ГАЕД, РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА, КОМПАНИЯ ARCELORMITTAL

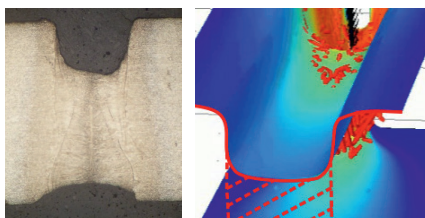
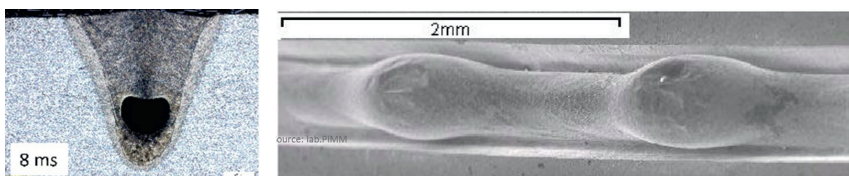


РИС. 3. Вверху: отверстие из-за ненадлежащей осадки расплавленного металла (слева) и пористая структура шва, обусловленная сложными гидродинамическими явлениями (справа). Внизу: подрезы в форме желобков вверху и внизу шва, вызванные выбросами расплавленной стали, оставляют зазор между двумя листами (слева). Результаты моделирования показывают распределение жидкости вокруг проплавного отверстия и предсказанный подрез в геометрии шва (справа)

численного моделирования анализируем влияние различных параметров, например мощности лазера, — продолжает Гаед. — Так мы можем виртуально проверить, как условия работы влияют на частоту появления дефектов, а также предсказать гидродинамические, теплофизические и окончательные геометрические характеристики шва».

» КАК ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ФАКТОРЫ ВЛИЯЮТ НА КАЧЕСТВО СВАРКИ

ПРОБЛЕМЫ КРОУТСЯ В МНОГОЧИСЛЕННЫХ ФАКТОРАХ, влияющих на качество сварного шва: мощность лазера, отражение лазерного пучка от материала, скорость сварки и длина волны лазера меняют условия вокруг проплавного отверстия — теплопередачу, фазовые переходы и течение жидкости. В частности, угол наклона проплавного отверстия и форма расплавленной области влияют на течение жидкости, обусловленное фазовым переходом и тепловой нагрузкой.

«Гидродинамические, теплофизические и электрические свойства здесь тесно переплетаются, — говорит Гаед. — Чтобы избежать дефектов, очень важно знать, что происходит со швом. Нам пришлось совместно исследовать все физические явления, чтобы отслеживать поток жидкости в проплавном отверстии и вокруг него, и понимать, как он влияет на прочность шва».

Команда Гаеда работала вместе с Микаэлем Куртуа (Mickaël Courtois), Мюриел Карен (Muriel Carin) и Филиппом

ле Массон (Philippe Le Masson) из университета Южной Бретани и использовала программное обеспечение COMSOL Multiphysics® для анализа распределения температуры в расплавленной и твердой стали, угла наклона проплавного отверстия и потока жидкости, изменяющихся в процессе сварки. Они объединили несколько исследований в одной расчетной модели COMSOL®, начиная с электромагнитной модели, определяющей свойства отражения и поглощения в материале в зависимости от угла отражения лазерного пучка (см. рис. 4).

Они также исследовали разные уровни мощности, длины волны лазера и скорости сварки, чтобы предсказать форму проплавного отверстия при разных рабочих условиях. Эта модель описывала теплопередачу и фазовый переход в процессе плавления металла, позволяя команде исследователей анализировать испарение, гидродинамику границы «жидкость — пар» и рост расплавленной области (см. рис. 5).

» МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ЯВЛЕНИЙ ДАЕТ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О РЕЗУЛЬТАТАХ СВАРКИ

ЧТОБЫ ПРЕДСКАЗАТЬ КОНЕЧНУЮ ФОРМУ соединения, команда Гаеда и команда из университета Южной Бретани моделировали глубину провара шва в зависимости от скорости сварки, мощности лазера и размера проплавного отверстия, основываясь на своих предыдущих результатах.

Для качественного шва требуется полный провар листа. Неполный провар может возникать при недостаточной

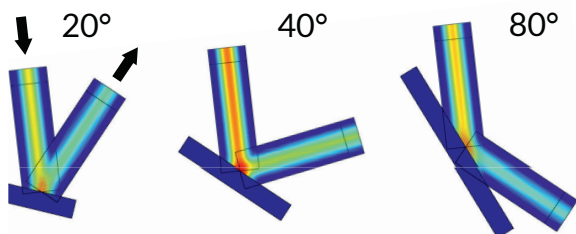


РИС. 4. Моделирование отражения лазера в программном обеспечении COMSOL®. Результаты отображают интенсивность электрического поля для разных углов отражения, от которых зависит количество поглощенной энергии

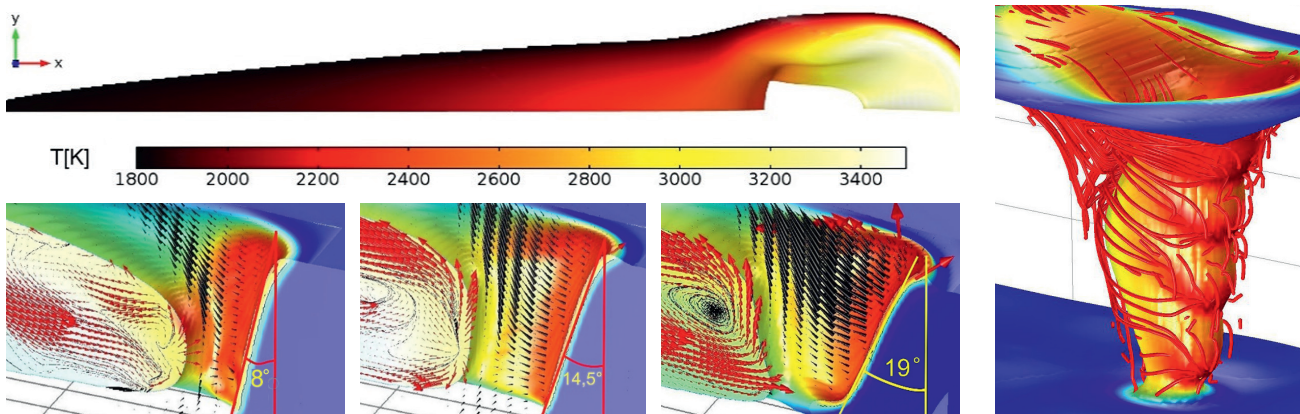


РИС. 5. Вверху слева: поле температуры в расплавленной стали, протекающей вокруг проплавного отверстия. Внизу слева: результаты показывают капиллярный наклон (угол наклона проплавного отверстия) для разных скоростей сварки, поле температуры в окружающем металле и поле потока жидкости в расплаве и отверстии (стрелочные графики). Справа: трехмерное изображение потока жидкости непосредственно вокруг проплавного отверстия в процессе его образования [1]

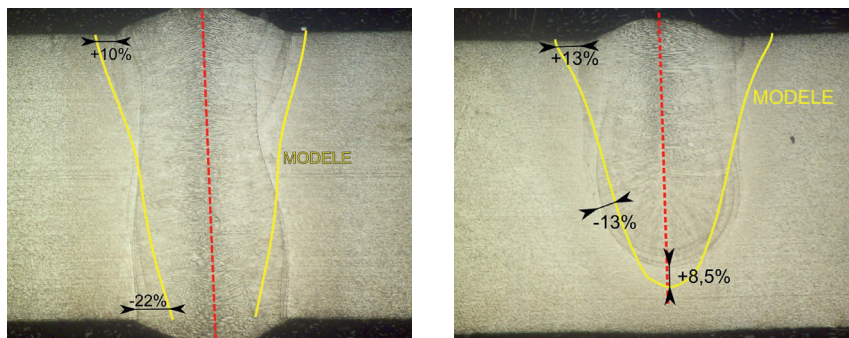


РИС. 6. Сравнение результатов COMSOL (желтая кривая) и экспериментально полученной глубины провара и формы дефекта шва. Глубина провара для сварки со скоростью 6 м/мин. (слева) и 8 м/мин. (справа) лазером мощностью 4 кВт. Более медленная сварка обеспечивает полный провар, что указывает на достаточную плотность передаваемой энергии. Более быстрая сварка обеспечивает лишь частичный провар. Это означает, что для получения высококачественного шва энергии недостаточно [2]

плотности энергии, малой мощности или высокой скорости. Он может вызывать подрезы, когда между двумя заготовками остается зазор (см. рис. 6).

» УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЕ МЕТОДЫ СВАРКИ СНИЖАЮТ ВЫБРОСЫ И УВЕЛИЧИВАЮТ БЕЗОПАСНОСТЬ

ЧТОБЫ ПРЕДЛОЖИТЬ СВОИМ КЛИЕНТАМ ЛУЧШИЕ ЗАГОТОВКИ

для сварки лазерным лучом — из слоев нужной толщины и подходящих сортов стали, соответствующих требованиям аварийной безопасности, ограничениям по весу и стоимости — требуется выбрать верное сочетание параметров процесса сварки. Основываясь на своих моделях, команда Гаеда помогает определить условия сварки для бездефектных швов.

«Понимание взаимосвязанных физических явлений и расчет одной объединяющей их модели, а не нескольких параллельных исследований, принесло нам немало пользы, — заключает Гаед, — Мы помогаем производителям автомобилей снизить массу машины, гарантируя, что наши сварные швы имеют высокое качество и обеспечивают безопасность водителей и пассажиров». ©



Слева направо: Садок Гаед из ArcelorMittal; Филипп ле Массон, Микаэль Куртуа и Мюриел Карен из Университета Южной Бретани

“ Мы помогаем производителям автомобилей снизить массу машины, гарантируя, что наши сварные швы имеют высокое качество и обеспечивают безопасность водителей и пассажиров.

— САДОК ГАЕД, РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА, КОМПАНИЯ ARCELORMITTAL

Литература

¹ M. Courtois, M. Carin, P. Le Masson, S. Gaied, M. Balabane. Guidelines in the experimental validation of a 3D heat and fluid flow model of keyhole laser welding. *Journal of Physics D: Applied Physics* (2016), 49 (15)

² M. Courtois, M. Carin, P. Le Masson, S. Gaied, M. Balabane. A new approach to compute multi-reflections of laser beam in a keyhole for heat transfer and fluid flow modeling in laser welding. *Journal of Physics D: Applied Physics* (2013), 46 (50)

УПРАВЛЕНИЕ ЗВУКОМ: КАК МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОМОГАЕТ В ПЕРЕДОВЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ

Исследования конструкций из метаматериалов с возможностью акустической маскировки завораживают и обещают множество вариантов применения в разных областях: от потребительской аудиотехники до ультразвуковой диагностики. Исследователи используют математические модели для разработки акустических материалов, сочетая трансформационную акустику и сильно анизотропные структуры.

Авторы: **ДЖЕММА ЧЕРЧ (GEMMA CHURCH)** И **ВАЛЕРИО МАРРА (VALERIO MARRA)**

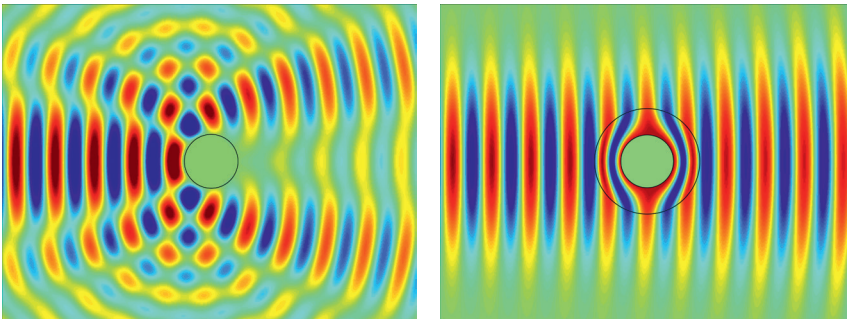


РИС. 1. Управление рассеянием звуковых волн на объекте. Слева: картина рассеяния падающей слева волны на жестком объекте очевидна: волна отражается почти зеркально, объект отбрасывает глубокую тень, часть энергии волны излучается во всех направлениях. Справа: идеальная маскировочная оболочка объекта сводит к нулю и отражение, и тень, а волна огибает объект из метаматериала практически без потерь

МЕТАМАТЕРИАЛЫ — ЭТО ИСКУССТВЕННО СОЗДАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ со свойствами, не встречающимися в природе, например, нулевым или даже отрицательным показателем преломления. Они позволяют создавать самые современные приборы с новыми функциональными возможностями, такие как суперлинзы и звукопоглощающие материалы. Недавние работы исследователей были направлены на произвольное манипулирование звуковыми волнами с помощью метаматериалов, в том числе возможность сделать объект акустически необнаружимым.

Эти исследования увенчались успехом. С помощью всего лишь нескольких перфорированных листов пластика и огромной работы по математическому

и численному моделированию инженеры из университета Дьюка создали первую в мире установку для трехмерной акустической маскировки. Это устройство плавно изгибает звуковые волны вокруг объекта, перенаправляет их в тень и создает впечатление, что волны проходят прямо через окружающую среду.

Акустическая «невидимость» — всего лишь один пример применения широкой научной дисциплины под названием «трансформационная акустика», которая применяет тщательно спроектированные материалы для почти произвольного управления звуковыми волнами. Этот технологический прорыв нашел множество вариантов применения — от повседневных до фантастических.

» РАЗРАБОТКА ТИХИХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ

УНИВЕРСИТЕТ ДЬЮКА ВМЕСТЕ

С МАССАЧУСЕТСКИМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ИНСТИТУТОМ, Калифорнийским университетом в Беркли, Ратгерским университетом и Техаским университетом в Остине участвует в пятилетней исследовательской программе, спонсируемой научно-исследовательским управлением ВМС США; ее целью является разработка новых эффективных акустических метаматериалов, которые могут быть созданы в реальности. Стив Каммер (Steve Cummer), профессор электротехники и вычислительной техники в университете Дьюка, говорит: «Математические модели — это отправная точка. Разработки акустических метаматериалов оптимизируют с помощью численных моделей, от которых мы переходим к современным технологиям производства и физическим испытаниям».

Одно из направлений текущих исследований нашей группы — разработка конструкций из акустических метаматериалов, применимых в средах на водной основе (например, в человеческом теле) и произвольно управляющих падающими звуковыми волнами. Устройства акустической маскировки (рис. 1) оказались хорошей испытательной моделью для демонстрации возможностей произвольного управления звуковыми волнами с помощью трансформационной акустики. Разработка материалов для водных сред стала открытием в области исследования метаматериалов, которые начинались с электромагнитной маскировки и трансформационной оптики

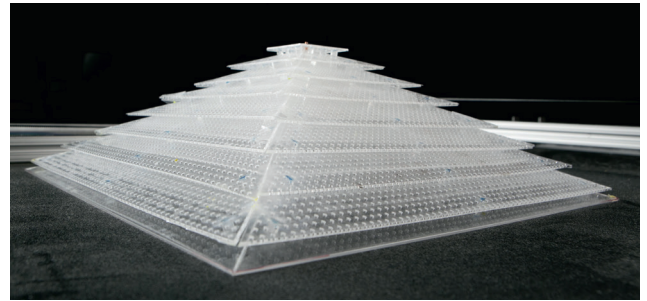
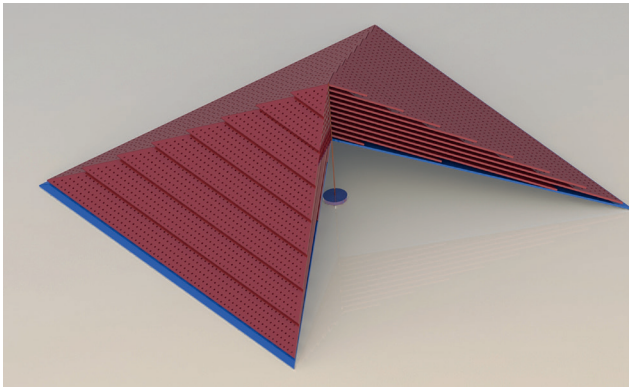


РИС. 2. Схема (слева) и физическое воплощение (справа) пирамидальной трехмерной акустической маскировочной оболочки

и развились в акустическую маскировку и трансформации в двухмерных и трехмерных структурах в воздушной среде.

Программное обеспечение COMSOL Multiphysics® было важнейшей частью каждого этапа исследований, начиная с самых первых шагов в электромагнитной маскировке. Каммер: «В первой статье, в которой мы показали модели электромагнитной маскировки с помощью материалов с реальными электромагнитными параметрами, мы использовали программное обеспечение COMSOL®, поскольку это единственный инструмент для электромагнитных расчетов, который мог учитывать электромагнитные параметры материалов с произвольной анизотропией».

Решение проблемы акустики ученые начали с расчета требуемых свойств материалов. Каммер поясняет: «Чтобы произвольным образом управлять звуком с помощью трансформационной акустики, мы сначала проводим преобразование координат, описывающее, как требуется изогнуть, повернуть или деформировать поле звуковой волны в конкретном устройстве. После определения этого преобразования координат можно рассчитать, какие эффективные свойства материала требуются для данной конкретной трансформации звуковой волны».

Полученный набор параметров материала почти всегда анизотропен, то есть материал ведет в себя по-разному в зависимости от направления. Чтобы работать с такими материалами, исследователи должны иметь возможность менять уравнения, описывающие физику модели. «В COMSOL достаточно легко манипулировать свойствами материалов и лежащими в их основе динамическими уравнениями. Это очень важно, потому что мы могли добавить анизотропию к модели и сразу же моделировать те материалы, которые мы изучали методами трансформационной акустики», — говорит Каммер.

“ В COMSOL достаточно легко манипулировать свойствами материалов и лежащими в их основе динамическими уравнениями.

— СТИВ КАММЕР, ФАКУЛЬТЕТ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ, УНИВЕРСИТЕТ ДЬЮКА

Полученные реальные конструкции работали очень успешно и, по словам Каммера, «удивительно хорошо» соответствовали моделям. «Эталонным подходом в публикациях о метаматериалах для проверки правильности работы конструкции и получаемых физических эффектов сейчас считается измерение полного звукового поля, создаваемого акустическим метаматериалом, и его сравнение с моделью», — добавляет он.

Программное обеспечение COMSOL Multiphysics® позволяет стабильно достигать таких результатов, даже когда в исследовании вкрадываются человеческие ошибки. Так, в одном из прошлых проектов было рассчитано и создано устройство для двухмерной акустической маскировки, включавшее в себя оболочку с рядом мелких отверстий, однако результаты экспериментов не соответствовали

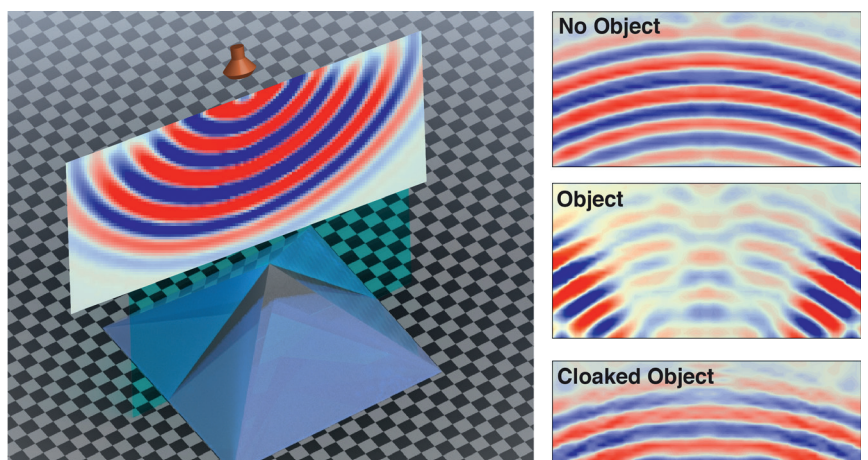


РИС. 3. Слева: для испытаний оболочки из метаматериала создается звуковой импульс в трех различных конфигурациях, а отраженный импульс измеряется сканирующим микрофоном. Справа: отраженный от испытательного объекта звуковой импульс сильно отличается от импульса в отсутствие объекта. Когда на объект помещается маскировочная оболочка, отраженный импульс почти совпадает с импульсом в отсутствие объекта, что говорит о «невидимости» для звуковых волн

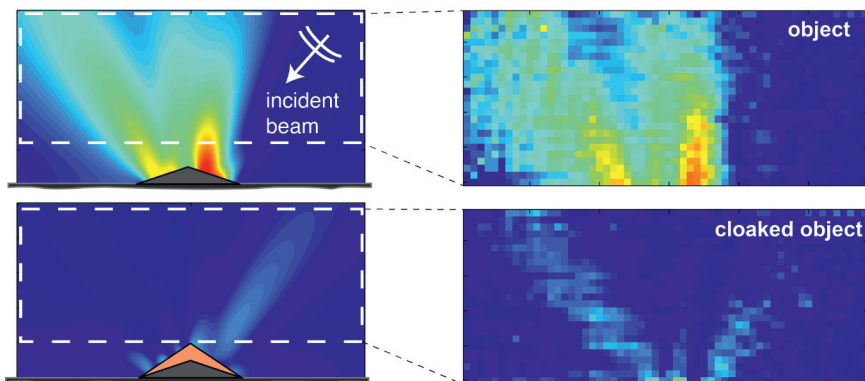


РИС. 4. Хорошее соответствие результатов моделирования (слева) и измерений (справа) рассеянных акустических полей не только демонстрирует уровень акустической маскировки объекта, но и подтверждает, что COMSOL точно предсказывает свойства изготовленного устройства

рассчетным. Группа была в замешательстве и не могла найти причину несоответствий. Затем они поняли, что отверстия в конструкции были неверного размера из-за путаницы при ее изготовлении.

Каммер говорит: «Эффективность COMSOL была жизненно важна для нашей работы, потому что мы могли провести численное моделирование как идеальных параметров, так и конструкции, которую мы действительно могли создать, чтобы подтвердить, что они ведут себя одинаково».

» ПРОИЗВОДСТВО И ТЕСТИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ

ПРИ РАЗРАБОТКЕ СРЕДСТВ ТРЕХМЕРНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ МАСКИРОВКИ ученые пользовались той же базовой структурой перфорированной пластины пирамидальной формы (рис. 2), под которой объект скрывается от звуковых волн. Такая структура может, на первый взгляд, показаться сравнительно простой, но желаемую трансформацию звуковых волн определяет множество факторов, включая диаметр отверстий, расстояние между пластинами и угол наклона пластин. Сочетание всех этих параметров и создает акустическую анизотропию структуры, необходимую для ее правильной работы.

Такая пирамидальная структура была первым устройством для трехмерной акустической маскировки в мире, и лабораторные измерения подтвердили, что она перенаправляет звуковые волны, создавая иллюзию, что ни самой структуры, ни объектов за ней не существует (рис. 3). Устройство работает во всех

трех измерениях независимо от того, откуда падают звуковые волны и где находится наблюдатель, и может в будущем применяться для маскировки от сонаров и в архитектурной акустике.

Учитывая требуемую толщину оболочек из акустического метаматериала, второе применение кажется более привлекательным — устройства акустической маскировки можно использовать для оптимизации акустики концертного зала или, например, для звукоподавления в шумном ресторане. Каммер говорит: «Материал для маскировки — это не волшебная краска, которую можно нанести на что угодно. Вообще говоря, такую идею было бы невозможно реализовать на практике».

Помимо этапа разработки, моделирование также использовалось для расчета количественных характеристик подобных оболочек из метаматериалов, включая подробный анализ рассеяния на маскирующей двумерной оболочке (рис. 4). Такой анализ не только показывает, какая часть рассеянного поля поглощается оболочкой — COMSOL может точно рассчитать величину ослабления за счет поглощения с учетом всех компромиссных решений, связанных с изготовлением акустического метаматериала.

» ИЗ ВОЗДУХА В ВОДУ: ДРУГАЯ СРЕДА, НОВЫЕ ЗАДАЧИ

В ПОСЛЕДНЕЕ ВРЕМЯ МНОГО ВНИМАНИЯ УДЕЛЯЕТСЯ акустическим метаматериалам, способным работать в водной среде, например, под водой или в человеческом организме. Мультифизическое моделирование здесь выступает как основной инструмент разработки,

позволяющий перенести ранее разработанные структуры и выполнять моделирование для проверки их характеристик в водной среде. Переход из воздуха в воду не так прост, как кажется.

Проблема в том, что механические свойства воздуха кардинально отличаются от свойств воды. Каммер объясняет: «В воздушной среде мы можем создавать акустические метаматериалы на основе пластика или любого другого твердого материала, который может действовать как абсолютно жесткая конструкция, управляющая звуковым полем. При этом не так важно, из какого именно материала она изготовлена».

Однако вода по своей удельной плотности и жесткости на сжатие не сильно отличается от твердых материалов. «Если звуковые волны падают на твердую структуру в воде, многое зависит от механических свойств этой структуры. Чтобы получить нужные свойства, требуется контролировать взаимодействие энергии звуковой волны с твердым телом, а для этого нам необходимы новые методы для применения на этапе разработки», — добавляет он.

«Очень важно учитывать взаимосвязь между акустикой и механикой конструкций, особенно когда мы работаем с конструкциями в воде и нельзя пренебречь механической реакцией твердого материала, служащего основой для метаматериала. В акустических расчетах в воздухе нам достаточно считать твердый материал бесконечно жестким, что является простым и эффективным с точки зрения вычислений, но для материала в воде важно учесть взаимодействие жидкости и конструкции. Всё это легко сделать в COMSOL».

Переход от исследований к коммерчески успешным акустическим метаматериалам далеко не прост и требует налаживания надежного и точного производства таких материалов. Каммер делает вывод: «На следующем этапе создания любого акустического метаматериала требуется его соответствие определенным количественным показателям. Это усложняет процесс разработки, но COMSOL создан именно для этой задачи. Благодаря COMSOL можно гораздо быстрее вносить изменения в проект и умело пользоваться оптимизацией для выявления степеней свободы конструкции, которыми можно манипулировать для получения желаемых численных параметров. Это важное звено при переходе от прототипов для проверки концепции к реализуемым на практике и применимым в реальном мире конструкциям». ©

ВИРТУАЛЬНАЯ НАСТРОЙКА АВТОМОБИЛЬНОЙ АУДИОСИСТЕМЫ

Специалисты компании HARMAN используют физические эксперименты в сочетании с математическим и численным моделированием, чтобы улучшить процесс разработки самой современной информационно-развлекательной электроники для автомобилей.

Автор: **ЛЕКСИ КАРВЕР (LEXI CARVER)**

СОВРЕМЕННЫЕ АВТОМОБИЛИ оснащены информационно-развлекательными системами со множеством функций: от подключения смартфонов до интерактивных дисплеев и видеозэкранов. Компания HARMAN — лидер рынка в этой области — снабжает более 80% автомобилей премиум-класса по всему миру высококачественными аудиосистемами.

Для каждой модели автомобиля требуется своя уникальная конфигурация, и специалисты по акустике и моделированию компании HARMAN учитывают это в процессе разработки различных компонентов и автомобильной акустики. На качество звука влияют все детали: расположение и направление динамиков, их монтаж и геометрия окружения водителя, например, двери машины.

Команда специалистов пользуется физическими экспериментами в сочетании с численным анализом, чтобы ускорить разработку продукта, испытывая свои системы виртуально еще до создания настоящих прототипов. Это экономит время на физические испытания, заменяя прослушивание виртуальными тестами, так что команда может приступить к созданию своих



РИС. 1. Поиск оптимального места для динамика в салоне автомобиля

продуктов еще до того, как будет закончено проектирование автомобиля.

«Мы приступаем к работе на ранних этапах разработки автомобиля, когда проектировщик еще не определился с требованиями к аудиосистеме, — объясняет Михаэль Штраусс (Michael Strauss), старший менеджер отдела виртуальной разработки продуктов и инструментов компании HARMAN. — В другом случае нам могут быть известны только основные детали, такие как размер и объем салона автомобиля. Тем не менее, часто нам нужно представить концепцию уже через несколько дней, и тогда выполнить требования заказчика и создать высококачественную аудиосистему может быть сложно».

» МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТЫ: ОБЪЕДИНЕНИЕ ПОДХОДОВ ДЛЯ УДОВЛЕТВОРЕНИЯ ТРЕБОВАНИЙ КЛИЕНТА

ЧТОБЫ КЛИЕНТ ПОЛУЧИЛ БЫСТРЫЙ И ТОЧНЫЙ ОТВЕТ, инженеры компании HARMAN прибегают к математическому моделированию в программном обеспечении COMSOL Multiphysics®. «Нам требовались возможности моделирования механических, акустических и электрических явлений в одной интегрированной среде, и мы хотели найти программу, которая снизила бы затраты труда и времени на создание и обновление наших собственных инструментов», — говорит Франсуа Мальбо (François Malbos), старший инженер-акустик в компании HARMAN.

«Мультифизический подход — одна из самых важных составляющих процесса виртуальной разработки, — говорит Михал Богдански (Michał Bogdanski), руководитель

проекта в отделе виртуальной разработки продуктов HARMAN. — Мы можем изучить, как акустические свойства динамика взаимосвязаны с любой деталью автомобиля, например, жесткостью автомобильной двери, и предоставить инструкции для разработки нашему клиенту».

В одном из случаев они и измерили, и смоделировали уровни давления звука, создаваемого динамиком в салоне автомобиля Mercedes-Benz ML (см. рис. 1), чтобы проверить свои численные модели и в дальнейшем пользоваться ими для оптимизации акустического оборудования. «Модели салона автомобиля — одни из самых сложных для проведения расчетов, поскольку они охватывают множество различных областей физики», — объясняет Штраусс. К счастью, программное обеспечение COMSOL® позволяет связывать акустические, механические и электрические явления в системе.

Для поддержки работы компании команда Штраусса создала библиотеку проверенных моделей и известных решений, позволяющую предсказывать характеристики целого ряда конфигураций динамиков. «Мы можем предложить самые разные варианты, от высокоуровневого анализа трендов до подробного анализа эксплуатационных характеристик конкретной подсистемы», — продолжает он.

» АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ДИНАМИКОВ АВТОМОБИЛЯ В ОДНОМ ИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ ИНЖЕНЕРЫ КОМПАНИИ HARMAN

использовали COMSOL, чтобы создать модель салонной аудиосистемы и оптимизировать акустику динамиков для лучшей передачи низкочастотных звуковых волн. Они создали набор тестов для проверки модели. После проверки модель позволила бы команде HARMAN

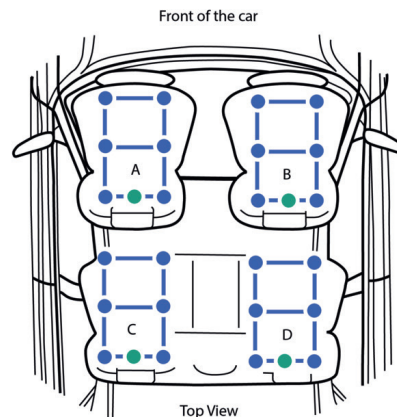


РИС. 2. Вид сверху на массивы микрофонов, размещенные в четырех местах



РИС. 3. Трехмерное сканирование салона автомобиля, выполненное компанией HARMAN

подобрать наилучшую конфигурацию динамиков для данного автомобиля.

В проверочных испытаниях динамик монтировали на жесткий каркас вблизи водительского сиденья автомобиля.

Четыре набора микрофонных массивов измеряли средние уровни давления звука в различных местах (см. рис. 2).

Для частот ниже 1 кГц динамик был представлен в виде жесткого плоского поршня, связанного с упрощенной моделью с сосредоточенными параметрами. Эта модель учитывала напряжение на клеммах звуковой катушки, жесткость подвеса и поверхности мембраны динамика. Геометрия была создана на основе ручного трехмерного сканирования (см. рис. 3). С помощью алгоритма предварительной обработки, реализованного в ПО MATLAB®, и продукта расширения для COMSOL® под названием LiveLink™ for MATLAB®, создающего двунаправленную связь между программами, команда преобразовала набор точек, полученных при сканировании, в сетку поверхности салона автомобиля (см. рис. 4) и создала оптимизированную сетку для изучения волн звукового давления.

С помощью моделирования было проанализировано взаимодействие звуковых волн, генерируемых динамиком, с материалами лобового стекла, пола, сидений, подголовников, руля и других деталей автомобиля — крыши, дверей и приборных панелей, каждая из которых имела свои поглощающие свойства.

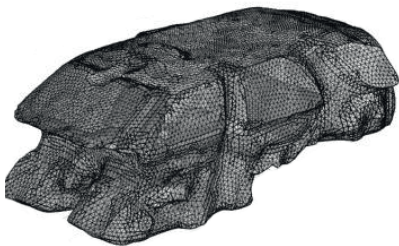


РИС. 4. Сетка поверхности салона автомобиля

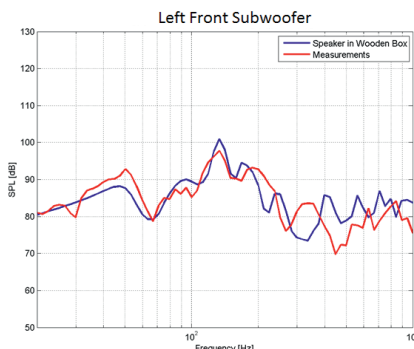
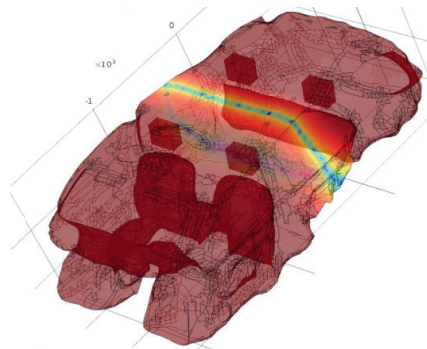


РИС. 5. Уровни звукового давления для одного массива микрофонов (слева) и по всему салону (справа)



» ОПТИМИЗАЦИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

КРОМЕ УЧЕТА МНОЖЕСТВА РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

команда также рассчитала движение и ускорение мембраны динамика на основе объема корпуса с помощью Livelink™ for MATLAB® и разработала специализированные скрипты для MATLAB®, чтобы упростить предварительную и последующую обработку.

«Все полностью оптимизировано и автоматизировано, так что нам не нужно рассчитывать ускорение для каждого случая; когда заканчивается расчет одной модели, запускается следующая, — объясняет Богдански. — Так мы можем быть уверены, что весь процесс будет простым и безошибочным; мы только запускаем скрипты».

Команда также оптимизировала зависящие от частоты коэффициенты поглощения, необходимые для достижения хорошей корреляции между экспериментальным и рассчитанным звуковым давлением. После этого стало возможным рассчитать уровни звукового давления на каждом массиве микрофонов (см. рис. 5).

» НОВЫЕ ШАГИ В ВИРТУАЛЬНОЙ НАСТРОЙКЕ

С ПОМОЩЬЮ СВОИХ ПРОВЕРЕННЫХ МОДЕЛЕЙ компания HARMAN может начать разрабатывать аудиосистему еще до того, как закончится проектирование автомобиля. Только когда автомобиль уже готов для тест-драйва, в него устанавливается аудиосистема для точной подстройки звука. Сейчас идет работа над системой воспроизведения, которая «на основе результатов моделирования и обработки сигналов позволит прослушать, оценить

и сравнить любые оптимизированные аудиосистемы, включающие динамики низких, средних и высоких частот, — говорит Мальбо. — Виртуальные изменения в конструкции делаются куда быстрее, чем перестройка физического прототипа». Прослушивания показывают, что научный подход может успешно заменить живого слушателя.

Возможность оценить аудиосистему, основываясь лишь на моделировании, повышает качество и скорость разработки продуктов в компании HARMAN, уменьшает время, необходимое для ответа клиенту, и снижает стоимость внесения изменений в конструкцию, предоставляя инженерам большую свободу проектирования.

«Преимущество моделирования заключается в том, что системный инженер может сесть за стол, надеть наушники и начать настраивать систему без самого автомобиля. С помощью моделирования мы можем оценить, оптимизировать и рассчитать характеристики предлагаемой аудиосистемы, даже если она еще не существует физически», — говорит Штраусс. ☺



Отдел виртуальной разработки продуктов и инструментов компании HARMAN в составе Франсуа Мальбо, Майкла Штраусса и Михала Богдански

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ФОТОННЫХ КОММУТАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ РАСТУЩЕГО СЕТЕВОГО ТРАФИКА

Компания Huawei Technologies Canada в настоящее время ведет разработку термооптических кремниевых коммутационных устройств для высокопроизводительных вычислительных систем и средств связи. Оптимизация конструкции посредством численного анализа нацелена на сокращение энергопотребления и максимальное увеличение скорости коммутации.

Автор: **ДЖЕННИФЕР СЕГУИ (JENNIFER SEGUI)**

СПЕЦИАЛИСТЫ ПРЕДВИДЕЛИ ПОЯВЛЕНИЕ ПОЛНОСТЬЮ ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ МНОГЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯ НАЗАД, так как они обладают значительным потенциалом высокоскоростной передачи данных, что жизненно необходимо в условиях постоянного увеличения требований к производительности сетей. Фотонные коммутационные устройства уже получили широкое распространение в городской инфраструктуре и сетях для передачи данных на большие расстояния, в то время как эксперименты в центрах обработки данных и высокопроизводительных вычислениях еще продолжаются. Компания Huawei

Technologies Canada радикально улучшает особо важные оптические компоненты (такие как фотонные коммутационные устройства) путем использования кремниевой оптики (SiPh). Оптические сети используют световые волны для передачи данных, например, для совершения

телефонного звонка, выполнения поискового запроса, обработки электронной почты. Для маршрутизации данных в различных узлах сети оптический сигнал обычно преобразуется обратно в электрический, коммутируется, после чего снова преобразуется в оптический, как показано на рис. 1. Преобразование сигнала требует громоздкого оборудования, потребляющего значительное количество электроэнергии. При этом добавляется задержка на преобразование каждого отдельного пакета. Использование фотонных коммутирующих устройств, напротив, не требует преобразования сигнала. Именно поэтому такие устройства зачастую оказываются быстрее, меньше и экономичнее.

Существующие фотонные коммутационные устройства, однако, являются громоздкими и дорогими, более того, они изготавливаются из множества собираемых вручную компонентов. Для того, чтобы изменить эту ситуацию, специалисты компании Huawei разрабатывают схемы, используя технологию интегральной кремниевой оптики. Оптические схемы изготавливаются на предприятиях, выпускающих микросхемы КМОП, и содержат кремниевые волноводы диаметром порядка 0,5 мкм. Это стало возможным благодаря тому, что кремний обладает прозрачностью на длине волн передачи сигнала.

Специалисты компании Huawei занимаются прототипированием одних из наиболее сложных кремниевых оптических схем в мире, полагаясь в своей работе на интегрированную среду проектирования. Численные физические модели высокой точности проходят процесс тонкой настройки во время повторяющихся циклов прототипирования, в то время как программный комплекс проектирования оптических схем обеспечивает безошибочное создание конструкции микросхемы. Обеспечение надлежащих тепловых характеристик кремниевое термооптического коммутирующего устройства является ключевым компонентом данного рабочего процесса.

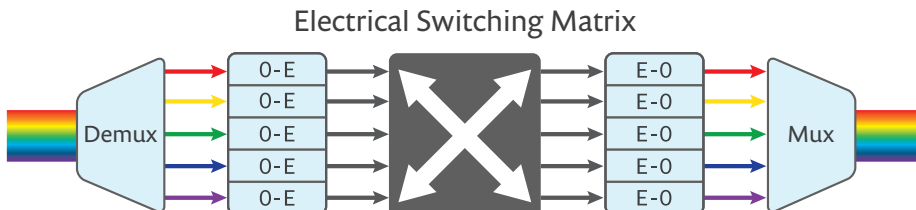


РИС. 1. Оптоволоконно и коммутационные устройства могут одновременно пропускать световые волны одной или нескольких различных длин. Вверху: оптический сигнал преобразуется в электрический для дальнейшей маршрутизации, затем электрический сигнал преобразуется обратно в оптический перед отправкой по другому оптоволокну. Внизу: полностью фотонное коммутационное устройство не требует дополнительных этапов преобразования оптического сигнала в электрический и обратно

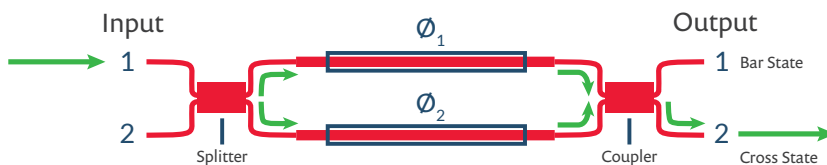
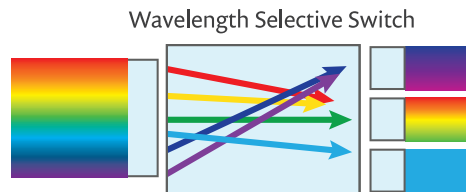


РИС. 2. В интерферометре Маха-Цендера свет, попадающий на входной волновод, разделяется между двумя плечами, где происходит фазовый сдвиг волн в соответствии с оптическими характеристиками каждого плеча. В точке выхода сопряженные волны подвергаются усиливающей и гасящей интерференции, представляющей состояния перекрестного и прямого пропускания фотонного коммутационного устройства. Путь, отмеченный зеленым цветом, обозначает обычное состояние коммутационного устройства

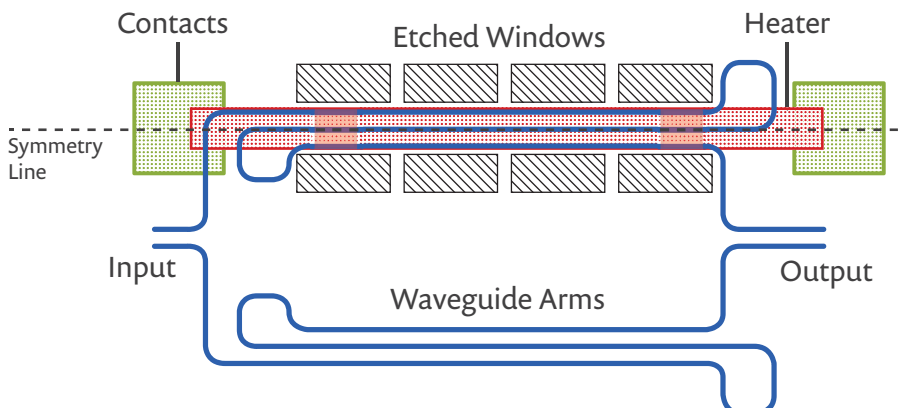
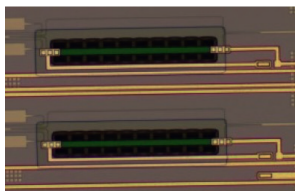


РИС. 3. Диаграмма термооптического устройства сдвига фазы Маха-Цендера, оснащенного теплоизолирующим каналом (наверху), в котором резистивный нагреватель (розовый), размещенный над одним из волноводов (синий), используется для изменения коэффициента преломления, вызывающего фазовый сдвиг в распространяющейся световой волне. На фотографии внизу представлен изготовленный нагреваемый волновод



» МАРШРУТИЗАЦИЯ ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ ТЕРМООПТИЧЕСКИХ КОММУТИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ФАЗОВОГО СДВИГА

ТЕРМООПТИЧЕСКОЕ КОММУТИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО, находящееся в разработке, представляет собой кремниевый фотонный интерферометр Маха-Цендера с состояниями перекрестного и прямого пропускания. В обычных условиях интерферометр, представленный на рис. 2, находится в состоянии перекрестного пропускания. Световая волна, попадающая на вход устройства (например, вход 1), разделяется и проходит по обоим плечам. После этого свет с обоих плеч интерферирует в устройстве сопряжения на выходе. Из-за относительной фазы света, полученного с обоих плеч, весь он покидает устройство через выход 2.

Фазовый сдвиг, вызванный тепловым воздействием, обеспечивает возможность изменения состояния коммутационного устройства. Для переключения термооптического интерферометра Маха-Цендера в состояние прямого пропускания одно из его плеч нагревается. Это приводит к изменению коэффициента преломления волновода, создавая фазовый сдвиг на π в световой волне, распространяющейся

в этом плече. В результате интерференции свет покидает устройство через выход 1, передавая данные в другом направлении. Объединив большое количество таких коммутационных ячеек на одной микросхеме, мы можем создать большую коммутационную матрицу.

Реализованная компанией Huawei конструкция коммутационного устройства Маха-Цендера представлена на рис. 3. Световая волна попадает в устройство и разделяется между двумя изогнутыми плечами волноводов (линии синего цвета). Над одним из волноводов размещен резистивный нагревательный элемент (область с розовой штриховкой), изготовленный из нитрида титана. Подача напряжения на электрические контакты приводит к тому, что нагревательный элемент увеличивает температуру расположенного под ним волновода для создания фазового сдвига на π , изменяя его состояние коммутационного устройства. Благодаря тому, что волновод сложен втрое, длина участка взаимодействия между нагревательным элементом и волноводом увеличена, соответственно, и эффективность увеличивается в три раза.

Подогреваемое плечо волновода термооптического коммутационного устройства, показанного на рис. 3, представляет

собой подвесную конструкцию. Наружный материал покрытия при этом вытравливается, образуя теплоизолирующий канал. Вид в разрезе волновода с теплоизолирующим каналом и без него представлен на рис. 4. Теплоизолирующий канал препятствует передаче тепла находящейся под волноводом подложке, позволяя нагревательному элементу повышать температуру волновода в 23 раза более эффективно и используя при этом на 96 процентов меньше энергии.

» АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ

ТРЕБОВАНИЯ К ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЮ, скорости коммутации и размерам устройства, а также правила производственного проектирования теплоизолирующих

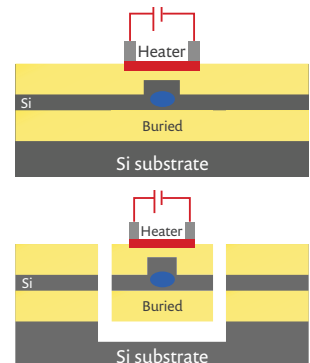


РИС. 4. Поперечный разрез нагреваемого волновода в термооптическом коммутационном устройстве Маха-Цендера без теплоизолирующего канала (вверху) и с ним (внизу). Канал изолирует волновод и нагревательный элемент, сокращая паразитную теплопередачу в окружающий материал

каналов, вместе создали значительные проблемы в области оптимизации, необходимой для создания термооптических коммутационных устройств Маха-Цендера. Для итогового определения подходящей конструкции были использованы имеющиеся в программном обеспечении COMSOL Multiphysics® средства анализа тепловых характеристик, обеспечивающие надежные способы количественной оценки новых конструкций перед выполнением физического прототипирования.

«Наши разработки становятся все более крупномасштабными и требуют тщательной оптимизации, учитывающей каждый милливатт энергопотребления» — говорит Дритан Село (Dritan Celso), старший инженер-исследователь компании Huawei.

«**Наши разработки становятся все более крупномасштабными и требуют тщательной оптимизации, учитывающей каждый милливатт энергопотребления.**

— ДРИТАН СЕЛО, СТАРШИЙ ИНЖЕНЕР-ИССЛЕДОВАТЕЛЬ, HUAWEI

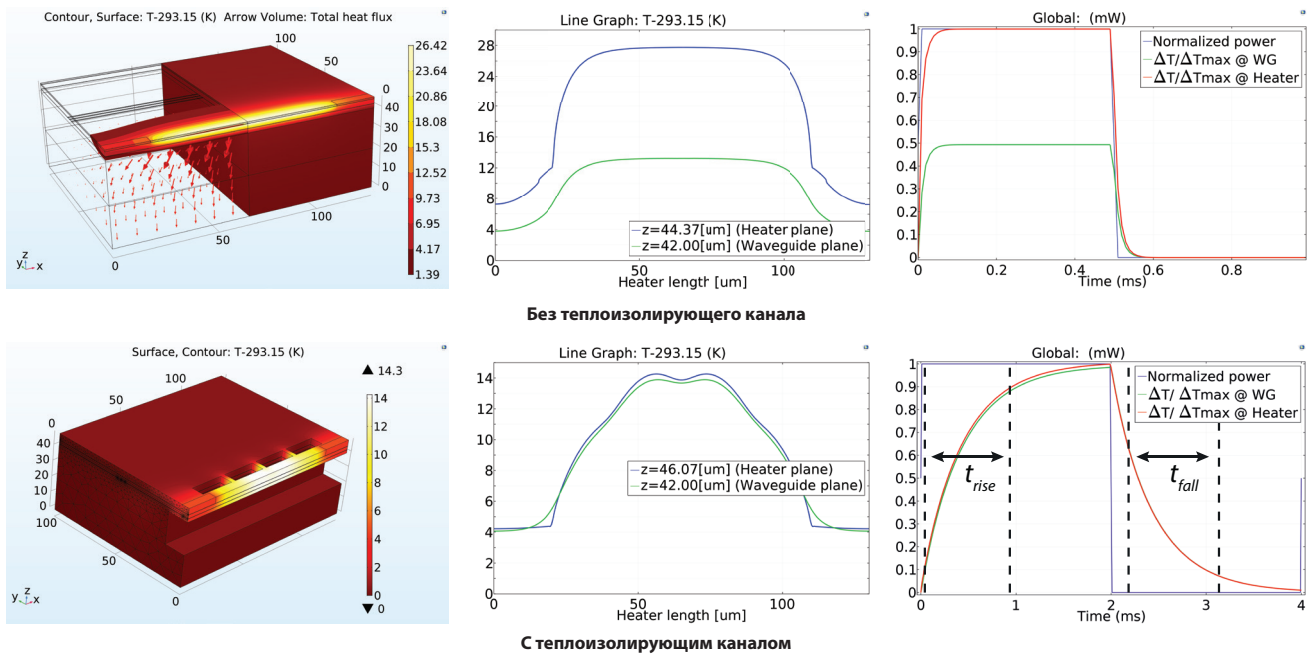


РИС. 5. Созданная в программном обеспечении COMSOL Multiphysics® модель термооптического коммутационного устройства без теплоизолирующего канала (вверху) и с ним (внизу). На графиках представлено распределение температур в стационарном состоянии (слева), разность температур нагревательного элемента и волновода (в центре) и результаты анализа переходных состояний, показывающие временные затраты на нагрев волновода до необходимой температуры (справа)

Именно поэтому программное обеспечение COMSOL® было включено в интегрированную среду для разработки полупроводниковых оптических устройств.

Анализ тепловых характеристик, например, используется для вычисления эксплуатационных характеристик различных термооптических конструкций как с теплоизолирующим каналом, так и без него. Учитывать наличие канала необходимо, так как это предполагает дополнительные этапы процесса производства. Более того, использование теплоизолирующего канала может улучшить энергоэффективность устройства, но при этом ухудшается скорость коммутации. Таким образом, геометрия устройства с каналом пригодна только для некоторых приложений.

Геометрические параметры устройства, представленные на рис. 3, были реализованы в программном обеспечении COMSOL®, как с теплоизолирующим каналом, так и без него. Для сокращения временных

затрат на вычисления для анализа тепловых характеристик стационарного состояния каждого варианта конструкции была использована симметрия (показанная штриховой линией черного цвета на рис. 3). Получившаяся в результате геометрия модели представлена на рис. 5 слева. Длина утопленных в расположенное поверх кремниевой подложки кварцевое стекло волноводов составляет несколько сотен микрометров. Характеристики материалов для каждой области модели были выбраны из тех вариантов, что уже присутствуют в ПО. Поскольку кремниевые оптические структуры обладают высокими характеристическими отношениями (1000:1), алгоритмы построения сетки, имеющиеся в COMSOL Multiphysics®, имели определяющее значение для быстрого и точного моделирования.

Явления теплопередачи в твердых телах моделируются по всей геометрической структуре с изолирующими граничными условиями, определенными

на слое пассивирования поверхности, а также в виде границ теплоизолирующего канала при его наличии. Нагревательный элемент, выполненный из нитрида титана, выполняет роль источника нагрева в модели коммутационного устройства. Результаты моделирования показывают, какую величину тепловой мощности необходимо подвести к устройству для создания фазового сдвига на π в представленной конструкции. Для создания фазового сдвига на π температура волновода должна измениться на 13,3 кельвина; данное значение получено в результате измерений при оптическом испытании.

Анализ стационарного состояния термооптического кремниевое коммутационное устройство показывает 23-кратное уменьшение мощности, необходимой для создания фазового сдвига на π , в том случае, если в конструкцию включен теплоизолирующий канал. Распределение температуры представлено на рис. 5 слева для каждого варианта геометрии устройства. Графики в средней части описывают разность температур между нагревательным

элементом и волноводом, показывая величину теплопотерь устройств без канала. Разность в 0,2 кельвина была достигнута в конструкции с каналом в сравнении с 13 кельвинами в конструкции без него. Анализ переходных состояний, выполненный с помощью метода симметрии четвертой для дальнейшего снижения временных затрат на вычисления, позволяет выяснить, сколько времени потребуется для регулировки волновода до желаемых температуры и фазы, ограничивающих скорость переключения устройства между состояниями перекрестного и прямого пропускания. Как видно из графика нарастания и спада в правой части рис. 5, несмотря на то, что устройство, оснащенное теплоизолирующим каналом, более энергоэффективно, скорость их переключения ниже, чем у устройств без канала.

Проверенные модели стационарного и переходного состояния также имеют решающее значение при оценке толщины кварцевого стекла, габаритных размеров отдельного коммутационного устройства Маха-Цендера, а также влияния верхнего охлаждающего слоя

пассивирования устройства. Таким образом можно получить максимальную выгоду от сниженного энергопотребления.

» КАК УМЕСТИТЬ ТЫСЯЧИ КОММУТАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ НА ОДНОЙ МИКРОСХЕМЕ НЕСМОТЯ НА ТО, ЧТО В ЦЕНТРЕ ВНИМАНИЯ

при моделировании теплопередачи находится оптимизация характеристик отдельного термооптического коммутационного устройства Маха-Цендера, в действительности они применяются не по отдельности, а в составе больших коммутационных матриц, пример которой представлен на рис. 6. Матрица производства Huawei

спроектирована для предотвращения взаимных оптических помех, что обеспечивает чистоту оптических сигналов на выходе коммутационного устройства. Конструкция, расположенная в левой части рис. 6, представляет собой кремниевую фотонную коммутационную матрицу размером 32×32, содержащую 448 термооптических коммутационных ячеек Маха-Цендера размером 2×2. Свет проходит сквозь одну из ячеек в каждом столбце, его путь определяется посредством подведения к ячейкам мощности, обеспечивающей состояние перекрестного или прямого пропускания. Поддача питания на коммутационное устройство увеличивает температуру расположенного

ниже волновода и создает фазовый сдвиг на π , который позволяет сигналу распространяться вдоль выбранного пути.

Изготовленный прототип коммутационной матрицы размером 32×32 представлен на рис. 6 справа. Данный прототип был выполнен на предприятии, выпускающем микросхемы КМОП и специализирующемся на производстве кремниевых оптических устройств, в том числе и с теплоизолирующими каналами. Данный прототип также оснащается контрольными фотодиодами для каждой ячейки, размещаемыми на кристалле, которые позволяют определить наличие управляющего тока перекрестного/прямого пропускания, и существенно облегчает работу специалистов компании.

Переход проекта в фазу прототипирования и полномасштабной разработки продукта поставил перед специалистами компании новые задачи, потребовавшие от них распределения своего времени между

отделами исследований и разработок компании Huawei и предприятием-изготовителем устройства. «Достижение необходимых тепловых характеристик является небольшим, но крайне важным элементом в большой мозаике, которую представляет собой процесс проектирования.» — объясняет Село. «Наше желание начать полномасштабное производство кремниевых фотонных коммутационных матриц размером 128×128, состоящих из тысяч размещенных на единой заготовке ячеек Маха-Цендера, потребляющих не более 50 Вт мощности и предназначенных для эксплуатации в различных условиях, поставило перед нами вопросы механической устойчивости устройства. Теперь центр нашего внимания сместился к структурному анализу помещенного в корпус коммутационного устройства, и вновь средства моделирования в составе программного обеспечения COMSOL® оказались полезными для оптимизации конструкции». ©

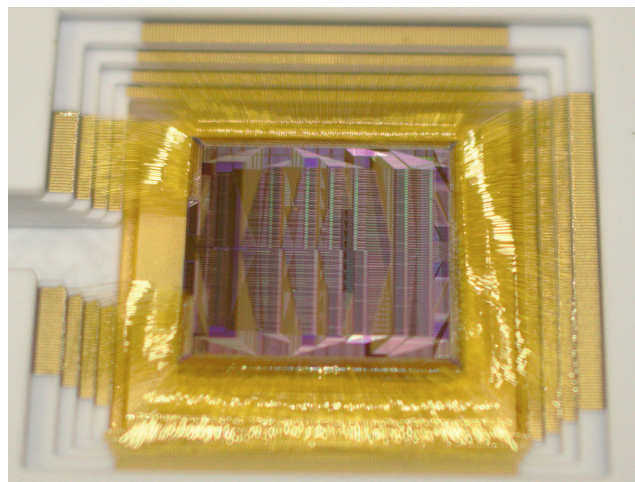
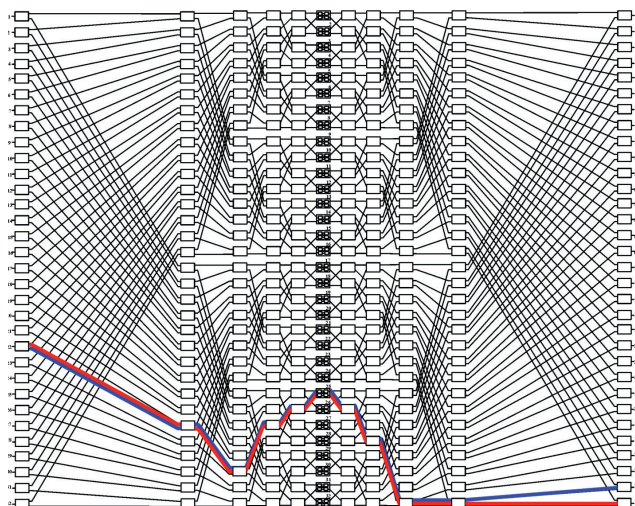
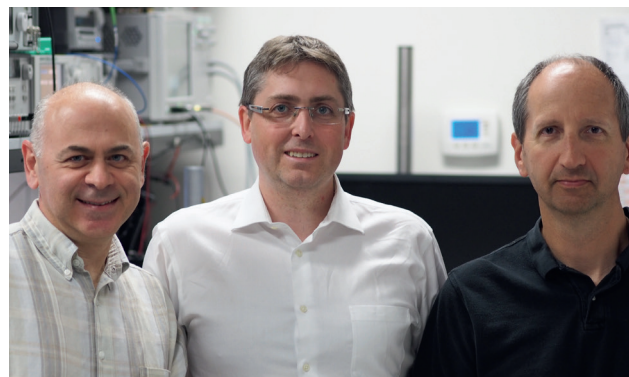


РИС. 6. Коммутационная матрица размером 32×32, включающая 448 термооптических ячеек Маха-Цендера размером 2×2 (вверху), и изготовленный прототип, оснащенный контрольными фотодиодами на кристалле для каждой ячейки (внизу)



Дритан Село (Dritan Celu), Эрик Бернье (Eric Bernier) и Доминик Гудвил (Dominic Goodwill) из подразделения передовых оптических устройств компании Huawei Technologies Canada

Литература

D. Celu, D. J. Goodwill, J. Jiang, P. Dumais, C. Zhang, F. Zhao, X. Tu, C. Zhang, S. Yan, J. He, M. Li, W. Liu, Y. Wei, D. Geng, H. Mehrvar, E. Bernier. 32x32 Silicon Photonic Switch, доклад представлен на конференции Optoelectronics and Communications Conference/International Conference on Photonics in Switching, Ниизата, Япония, 2016 г.

D. Celu, D. J. Goodwill, J. Jiang, P. Dumais, M. Li, E. Bernier. Thermo-optic silicon photonics with low power and extreme resilience to over-drive, доклад представлен на конференции IEEE Optical Interconnects Conference, Сан-Диего, Калифорния, США, 2016 г. DOI: 10.1109/OIC.2016.7482994, IEEE.

НАШЕ ВИДЕНИЕ БУДУЩЕГО СТАНДАРТА 5G: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАБИРАЕТ СКОРОСТЬ

Автор: ЧЖИЕН МУН (JIYOUN MUNN)

СРЕДИ НАИБОЛЕЕ ГОРЯЧИХ ТЕМ ОБСУЖДЕНИЯ В СРЕДЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ РАДИО- И МИКРОВОЛНОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ МОЖНО НАЗВАТЬ СТАНДАРТ СВЯЗИ 5G И ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ (IOT).

Наша повседневная жизнь и развитие технологий как никогда раньше зависят от надежной и быстрой передачи данных. В настоящее время перед разработчиками стоит сложнейшая задача по обеспечению выхода на новый уровень использования и обработки данных в режиме реального времени. Решение данной задачи требует доступа к самым передовым инструментам и достижениям в области проектирования и обработки сигналов, устройствам связи и развивающимся техническим стандартам.

» ОТ СЕТЕЙ 4G LTE К 5G

ОЖИДАЕТСЯ, ЧТО СЕТИ 5G ПОТРЕБУЮТ использования спектров более высокой частоты в миллиметровом диапазоне при развертывании активных антенных решеток с электронным сканированием (AESA), которые позволят использовать технологии многолучевой многоканальной передачи и массового ввода-вывода (MIMO) (рис. 1). Исследователи, работающие на переднем крае разработки наследника сетей 4G LTE, обладающего большей скоростью и пропускной способностью, полагаются на средства моделирования для оптимизации разработки и циклов испытаний продуктов.

Моделирование приходит на помощь конструкторам на стадии проектирования, позволяя им виртуально сравнить несколько проектных идей и выполнить физическое прототипирование наиболее подходящих решений. Другое преимущество заключается в возможности исследовать различные граничные условия: в этом случае с помощью моделирования инженер может точно оценить и проверить несколько сценариев без повреждения прототипа, например, в случае экстремальных перепадов температуры, структурной деформации, химических реакций. Целью специалиста в области моделирования является максимально приближенное к действительности воспроизведение реального мира с тем чтобы основанный на численных результатах прототип достигал ожидаемых эксплуатационных характеристик и при этом не требовал большого количества изменений в конструкции и повторных испытаний.

» ПРИЛОЖЕНИЯ ПОМОГАЮТ КОНСТРУКТОРАМ И СПЕЦИАЛИСТАМ ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ ОБЪЕДИНИТЬ УСИЛИЯ

ПРИ ПОДГОТОВКЕ К РАЗВЕРТЫВАНИЮ СЕТЕЙ 5G проектировщикам приходится преодолевать большое количество препятствий, в частности, решать задачу выбора частот, обеспечивать необходимую дальность распространения сигнала, надежность, срок службы аккумулятора и помехоустойчивость. Каждая из указанных выше проблем описывается уникальным сочетанием различных физических явлений, требующих привлечения специалиста по моделированию

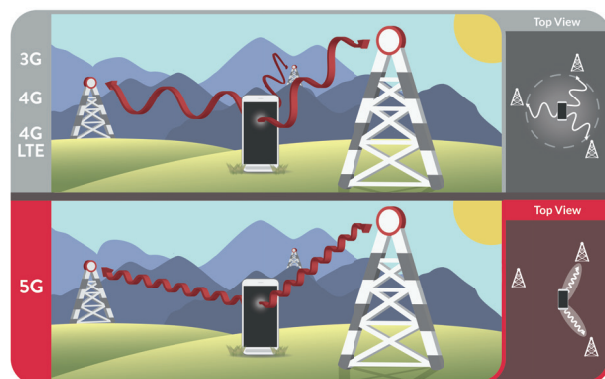


РИС. 1. До эпохи 5G предпочтение отдавалось изотропной диаграмме излучения (вверху). Для обеспечения связи миллиметрового диапазона в сетях пятого поколения потребуются антенны с более высоким коэффициентом направленности для компенсации потерь в полосе пропускания при распространении сигнала на открытой местности (внизу)

для каждой отдельной области. Такой специалист должен располагать соответствующими инструментами для создания подходящей математической модели. Для того, чтобы продукт появился в нужное время, необходимо обеспечить идеальное взаимодействие между конструкторами и специалистами по моделированию.

Обычно только специалисты в области моделирования могут надежно предоставить исходные данные, которые позволят получить из модели полезные результаты. Поэтому им необходимо участвовать в процессе всякий раз при внесении изменений в моделируемое устройство. Более того, результаты моделирования зачастую представлены в среде, знакомой только специалисту,

поэтому их предоставление коллегам, разъяснение и интерпретация зачастую требуют отдельной встречи.

Что, если у специалиста по моделированию будет возможность создавать приложения, например, помещать сложную математическую модель в интуитивно понятный интерактивный пользовательский интерфейс? Что, если пользователи, не имеющие опыта работы с ПО для моделирования, смогут использовать приложения, разработанные специально для них? Приложения для моделирования предоставляют специалистам по моделированию простой и эффективный способ поддержки инженеров, кропотливо работающих над следующим технологическим прорывом в сверхконкурентной области беспроводной связи. Благодаря подходящим инструментам, специалисты, работающие над внедрением связи стандарта 5G, могут свободно взаимодействовать со своими коллегами и сотрудниками, специализирующимися в области физики и численного анализа.

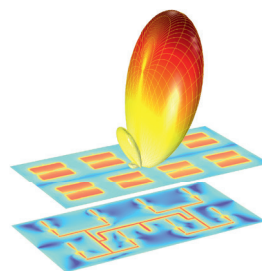


РИС. 2. Фазированная микрополосковая антенна размером 4x2, смоделированная средствами программного обеспечения COMSOL Multiphysics®. Верхний график показывает логарифмическую норму электрического поля антенны и трехмерную диаграмму излучения в дальней зоне. На нижнем графике представлена логарифмическая норма электрического поля плоскостей питающих линий

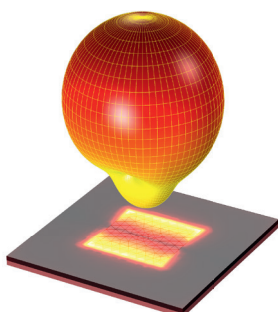


РИС. 3. Отдельная антенна. Визуализированы логарифмическая норма электрического поля антенны, сетка и трехмерная диаграмма излучения в дальней зоне

» КАК ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ МОГУТ ПОМОЧЬ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СРЕДСТВ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ РАССМОТРИМ, НАПРИМЕР,

активные антенные решетки с электронным сканированием или фазированные антенные решетки. Они широко используются в изделиях военного назначения: радиолокаторах и спутниках, однако сейчас занимают заметное место и в гражданской сфере вследствие растущего спроса на высокоскоростную передачу данных устройствами связи. Размер простого компонента может превосходить длину волны в десятки раз, что делает его численный анализ затратным с точки зрения памяти. В результате моделирование занимает очень много времени даже в тех случаях, когда для проверки концепции хватило бы и приближенных значений. Быстрый процесс прототипирования может воспроизвести тенденции в изменении характеристик и быстро определить конструктивные параметры будущего устройства.

На рис. 2 представлена модель фазированной микрополосковой антенной решетки, способной отклонять луч в требуемом направлении. Данный пример значительно более требователен к памяти, а также требует больше времени для расчета, чем моделирование отдельной микрополосковой антенны (рис. 3).

Результаты, представленные на рис. 3, основываются на полной конечно-элементной

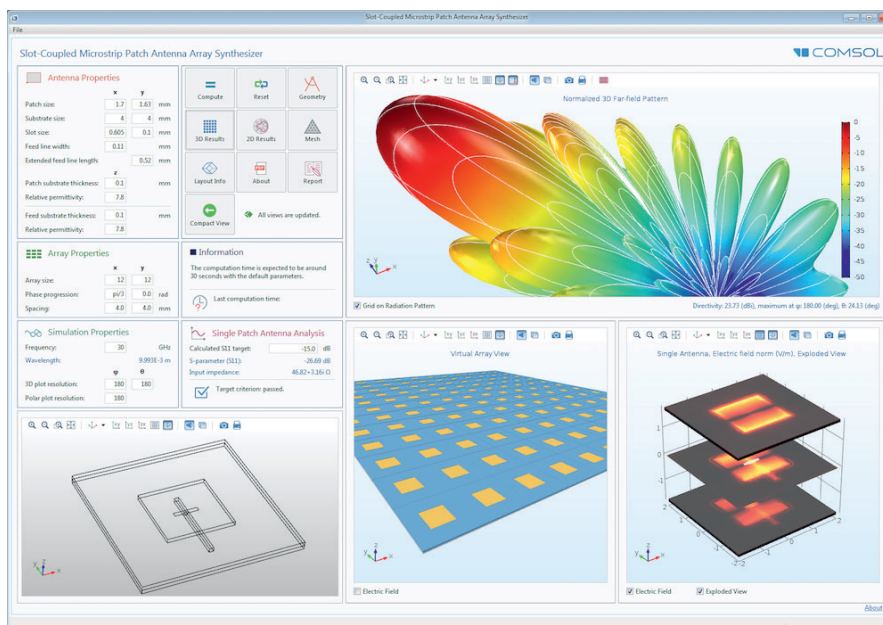


РИС. 4. Пользовательский интерфейс приложения Slot-Coupled Microstrip Patch Antenna Array Synthesizer (Синтезатор прямоугольной микрополосковой антенной решетки с щелевой связью), созданного в Среде разработки приложений в составе COMSOL Multiphysics

модели отдельной микрополосковой антенны с щелевой связью, размещенной на низкотемпературных керамических подложках совместного обжига (LTCC), с исходной рабочей частотой 30 ГГц.

Можем ли мы использовать результаты анализа отдельной антенны для описания поведения всей решетки? Возможности и гибкость программного обеспечения COMSOL Multiphysics® позволяют специалистам выполнять точное моделирование отдельной микрополосковой антенны, а затем, учитывая такие пользовательские исходные данные, как размер решетки, арифметический набег фазы и угловое разрешение, использовать его результаты для описания, например, трехмерной дальней зоны всей решетки. COMSOL облегчает для специалистов процесс сопряжения уже имеющихся различных физических интерфейсов, включающих в себя уравнения или алгоритмы, необходимые для моделирования конкретного применения.

В этом случае был реализован коэффициент для двумерной антенной решетки, включающий в себя переходные фазовые сдвиги и весовые коэффициенты

элементов решетки, для определения диаграммы излучения всей решетки.

Можем ли мы представить разработчикам подобную модель, оснащенную удобным интерфейсом? Специалисты в области моделирования в настоящий момент располагают интуитивно понятными инструментами для создания специализированных пользовательских интерфейсов на основе мультифизической модели. Приложение для моделирования антенной решетки, о котором мы говорили выше, представлено на рис. 4.

Данное приложение позволяет разработчику изменять физический размер отдельной микрополосковой антенны, а также толщину каждого слоя и характеристики его материала в дополнение к прочим релевантным параметрам, определенным специалистом в области моделирования. В данном примере интерактивная составляющая приложения была расширена за счет отображения соответствия выбранных параметров конструкции путем сравнения вычисленного параметра рассеивания (S11) с целевым критерием соответствия/несоответствия. Данное приложение также включает в себя

отчет о результатах и документацию, объясняющую правила работы с приложением. Эта последняя особенность имеет множество практических вариантов применения и может быть использована как для составления отчетов для заинтересованных лиц и руководителей, так и для обучения новых сотрудников компании.

Приложения легко распространяются среди коллег и членов команды посредством локальной установки продукта COMSOL Server™, который обеспечивает авторизованным пользователям доступ к приложениям через клиент COMSOL Client или основные веб-браузеры.

Нам предстоит выполнить огромный объем работы, прежде чем связь 5G будет представлена широкой публике. Когда разработчики располагают необходимым набором инструментов, они могут свободно взаимодействовать с коллегами как в рамках своей организации, так и вне ее. Совместная работа станет ключевым фактором, который позволит победить в гонке 5G-решений. ☺

ДА БУДЕТ СВЕТ: СВЕТЛОЕ БУДУЩЕЕ ОРГАНИЧЕСКИХ СВЕТОДИОДОВ

Моделирование поверхностных плазмонов и разработка наноструктурированных электродов ведут к увеличению яркости и энергоэффективности органических светодиодов.

Автор: **ЛЕКСИ КАРВЕР (LEXI CARVER)**

ХОТЯ ПРОШЛО УЖЕ ПОЧТИ полтора десятилетия с тех пор, как Томас Эдисон повернул выключатель и зажег первую электрическую лампочку, поиски лучших источников света продолжаются. С того дня в 1879 году было разработано много других технологий освещения с разной яркостью, качеством цвета, возможностью регулирования и малой стоимостью жизненного цикла.

Органические светодиоды (OLED) привлекают к себе внимание, потому что их можно использовать в составе легких и тонких, как бумага, светодиодных панелей разных форм и размеров. На их основе можно создать гибкие или гнущиеся осветительные устройства, которые можно установить на плоскую или искривленную поверхность, создавая такие детали, как задние фонари автомобилей или даже «светящиеся цветы» (см. рис. 1).

Но органические светодиоды не настолько яркие и энергоэффективные, как их неорганические собратья, поэтому исследователи компании Konica Minolta, Inc. спешат разработать конструкции, отвечающие растущему спросу. Эта компания — мировой лидер в производстве органических светодиодов — поддерживает разработку самых современных фотографических и оптических устройств и часто сотрудничает с ведущими университетами Японии.

Леймин Ван (Leiming Wang), ведущий исследователь в лаборатории Konica Minolta в Сан-Матео, штат Калифорния, США, и его команда используют численное моделирование для анализа механизмов потери яркости в органических светодиодах, виртуально испытывая улучшения конструкции.

«Несмотря на все свои преимущества, органические светодиоды отличаются рядом ограничений, которые мы стараемся минимизировать, — заявляет он. — Больше всего на них влияет сложное явление плазмонного взаимодействия, на которое приходится 40% потерь света при взаимодействии с устройством».

» КАК РАБОТАЮТ ОРГАНИЧЕСКИЕ СВЕТОДИОДЫ

ОРГАНИЧЕСКИЕ СВЕТОДИОДЫ состоят из органических полупроводников, расположенных между положительным электродом (анодом) и отрицательным электродом (катодом). Рис. 2 показывает принципиальную схему органического светодиода с анодом из прозрачного оксида индия-олова (ITO), тремя органическими слоями: слоем с дырочной проводимостью (HTL), излучающим слоем (EML) и слоем с электронной проводимостью (ETL), и серебряным катодом. Все слои наносятся на стеклянную подложку, через которую и проходит свет от включенного устройства.



« Мы смогли понять классификацию механизмов потерь, с легкостью проверить влияние различных ограничений конструкции и приспособить к ним наши светодиоды. COMSOL показал нам, как сократить плазмонные потери вдвое.

— **ЛЭЙМИН ВАН, ВЕДУЩИЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬ, КОМПАНИЯ KONICA MINOLTA**



РИС. 1. Хейс-тен-Бос — парк развлечений в Сасебо, префектура Нагасаки, Япония, построенный в традиционном голландском стиле. Компания Konica Minolta создала «светодиодные тюльпаны», которые парк показывал на фестивале тюльпанов

Когда через устройство течет ток, электроны вводятся через катод, а дырки — через анод. Электроны и дырки мигрируют друг к другу, проходя через несколько слоев, и рекомбинируют в излучающем слое, высвобождая энергию в виде фотонов. Таким образом, пока течет ток, непрерывно излучается свет.

» ПОЙМАТЬ ФОТОННЫХ ВОРОВ

НО НЕКОТОРЫЕ ФОТОНЫ ТАК И НЕ ВЫБИРАЮТСЯ НАРУЖУ. Потери света в органических светодиодах возникают из-за нескольких механизмов, например, из-за разности показателей преломления каждого слоя, ведущей к тому, что свет отражается от слоя, а не проходит дальше, как показано на рис. 2.

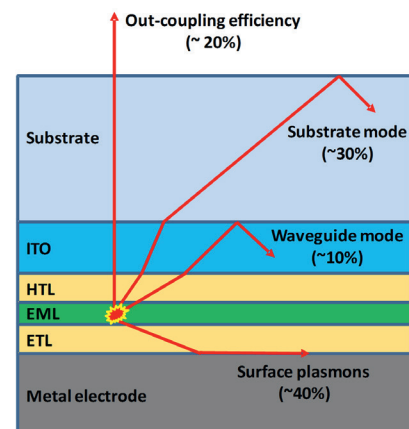


РИС. 2. Схема многослойного органического светодиода с различными типами потерь света

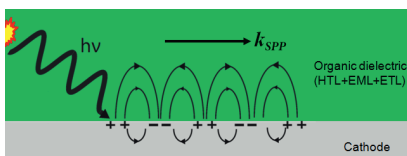


РИС. 2. Схематическое изображение взаимодействия поверхностных плазмонов и дипольного излучения в органических светодиодах, удерживающего фотоны в волне поверхностных плазмон-поляритонов и препятствующего их излучению через стеклянную подложку светодиода

Команда Вана в основном изучала другой механизм потерь, а именно взаимодействие дипольного излучения с поверхностными плазмонами на границе между катодом и органическим материалом. Поверхностные плазмоны — это волны колеблющихся электронов на поверхности проводника. В органических светодиодах свет, испущенный диполями (молекулярными экситонами) в излучающем слое, может взаимодействовать с колебаниями электронов катода, приводя к появлению волн, которые называются поверхностными плазмон-поляритонами. Они распространяются вдоль поверхности катода и затухают, унося излученные фотоны вместо того, чтобы позволить им пройти сквозь стекло (см. рис. 3).

Другими словами, из-за наличия металлического катода в непосредственной близости от органического излучающего слоя часть света поглощается электронами катода, при этом электроны колеблются и образуют поверхностные плазмон-поляритоны. Поляритоны, в свою очередь, рассеиваются в виде тепла, приводя к значительным потерям энергии.

С помощью численного моделирования в программном обеспечении COMSOL Multiphysics® Ван смоделировал излучение света в органическом слое и появление поверхностных плазмон-поляритонов, чтобы проанализировать методы

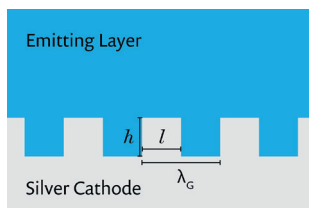


РИС. 4. Слева: катод-нанорешетка. Команда Вана испытала при моделировании влияние различных значений горизонтального и вертикального шага решетки, чтобы определить наилучший вариант. Справа: результаты моделирования двумерного распределения поля дипольного излучения для (а) плоской поверхности катода и (б) катода-нанорешетки. Большая часть излучения для плоской поверхности связана с волной поверхностных плазмон-поляритонов, и лишь малая часть излучается свободно. Эта связь значительно ослабляется нанорешеткой в случае (б)

уменьшения потерь. Одна из перспективных идей заключалась в использовании катода-нанорешетки (слева на рис. 4), который бы предотвращал образование поляритонной моды, снижая передачу энергии между дипольным излучением и плазмонами.

Модели Вана показали, как распределено электромагнитное поле и какая часть света покидает органический светодиод с катодами разной формы (справа на рис. 4). С помощью этих результатов команда подтвердила, что плазмонные явления приводят к значительной потере энергии.

Программное обеспечение COMSOL® — важный инструмент лаборатории Konica Minolta, потому что он не только мощный, но гибкий и простой в использовании. Лабораторный персонал использует этот пакет для различных исследований. «Проект по изучению органических светодиодов мы смогли полностью выполнить в COMSOL, включая постобработку данных. Мы также импортировали зависящие от длины волны оптические свойства из своих файлов и использовали их в моделировании», — говорит Ван.

Его команда моделировала органические светодиоды с плоскими катодами и катодами-нанорешетками, изменяя геометрические параметры в поисках оптимальной конфигурации (см. рис. 5).

Специалисты также выполнили моделирование, чтобы изучить влияние различных ориентаций диполей, рассчитывая влияние положения диполя и длины волны на уровни потерь яркости из-за поверхностных плазмон-поляритонов. Команда Вана анализировала потоки энергии, чтобы рассчитать, какая часть света, испущенного в излучающем слое, действительно покинет светодиод через стекло.

С помощью своих моделей команда Вана установила, что можно снизить плазмонные потери на 50% благодаря оптимизированной наноструктурной поверхности катода.

» ГИБКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕЛАЕТ ОСВЕТИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ ЯРЧЕ

ПРОВЕДЯ РАБОТУ ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ, Ван смог предложить многообещающую конструкцию органических светодиодов со значительно возросшей эффективностью. «Мы смогли смоделировать органические светодиоды и определить оптимальную конфигурацию катода-нанорешетки, — сделал вывод Ван. — Мы смогли понять классификацию механизмов потерь, с легкостью проверить влияние различных ограничений конструкции и приспособить к ним наши светодиоды. COMSOL показал нам,

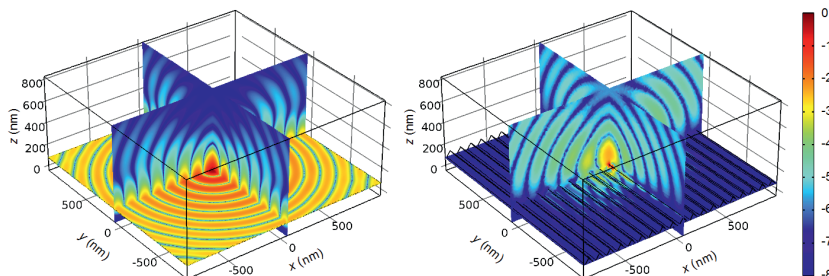
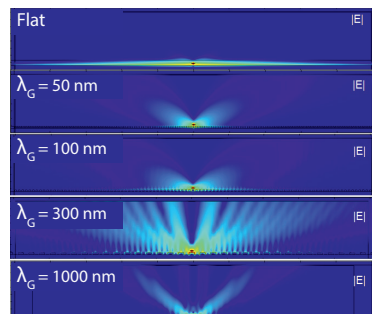


РИС. 5. Результаты расчета в программном обеспечении COMSOL® показывают распределение излучения для плоской поверхности (слева) и нанорешетки (в центре). Интенсивность нормализована и изображена в логарифмическом масштабе. Справа показаны диаграммы излучения для нескольких конструкций катода-нанорешетки



ПОВЕРХНОСТНЫЕ ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОНЫ — ЧТО ЭТО?

Автор: Эндрю Стрикверда (Andrew Strikwerda)

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОНЫ — неотъемлемая и весьма интересная часть исследований в области плазмоники и нанофотоники. Как можно понять из названия, поверхностные плазмон-поляритоны — это электромагнитные волны инфракрасной и видимой части спектра, распространяющиеся вдоль поверхностей. Интерес они представляют из-за того, что успешно ограничивают электромагнитную энергию ниже диффракционного предела. Именно поэтому они часто встречаются в таких разных областях, как оптика ближнего поля, биосенсоры и метаматериалы. К сожалению, поверхностные плазмон-поляритоны не всегда полезны! В статье выше, рассказывающей об оптимизации многослойных органических светодиодов, поверхностные плазмон-поляритоны вносят основной вклад в потери энергии. Если снизить плазмонные потери, выходная эффективность светодиодов станет выше, а значит, мы получим лучшие и более эффективные устройства. Здесь мы коротко расскажем о том, что такое поверхностные плазмон-поляритоны, когда они появляются и почему в ваших моделях в программном обеспечении COMSOL® они будут учитываться автоматически.

Как я уже говорил, поверхностные плазмон-поляритоны распространяются вдоль поверхности — но не любой. Они могут распространяться только по границе двух материалов с диэлектрической проницаемостью разных знаков. У многих обычных материалов: воздуха, воды, пластика и бумаги, диэлектрическая проницаемость положительная. У металлов: золота, серебра и алюминия — отрицательная, поэтому, например, поверхностные плазмон-поляритоны могут появиться на границе между золотом и воздухом.

Впрочем, если поверхностные плазмон-поляритоны и могут

существовать на такой границе, это не значит, что их так просто сформировать и контролировать. Создать поверхностные плазмон-поляритоны обычным источником света, например, лазером, довольно сложно, и обратный процесс — превращение их в видимый свет, как это происходит в органических светодиодах — не проще.

Чтобы свободно распространяющийся свет и поверхностные плазмон-поляритоны взаимодействовали, их дисперсионные кривые должны пересекаться, другими словами, их энергии и импульсы должны совпадать. На приведенном здесь рисунке диагональная черная линия — это дисперсионная кривая для свободно распространяющегося света, а синяя кривая — для поверхностных плазмон-поляритонов на границе воздуха и металла. Две линии асимптотически сближаются, но не пересекаются. Существует ряд методов, позволяющих этим кривым сойтись, например, можно

воспользоваться призмой в схеме Отто или Кречмана, но мы обратим внимание на использование решеток.

Решетка имеет регулярно повторяющийся рисунок, например, синусоиду или зубья пилы. Такая периодичность описывается своим волновым вектором, который можно прибавлять к волновому вектору поверхностных плазмон-поляритонов (или вычитать из него), чтобы совместить дисперсионные кривые. На рисунке это показано красной стрелкой.

Как такую взаимосвязь учесть при моделировании? На самом деле, достаточно просто. Создайте интересующую вас геометрию и задайте свойства материалов и граничные условия, как и при создании любой другой модели высокочастотных электромагнитных явлений. Вот и все! COMSOL Multiphysics® решает уравнения Максвелла, а значит, взаимосвязь между светом в свободном пространстве и поверхностными плазмон-поляритонами учитывается без каких-либо дополнительных изменений. ©

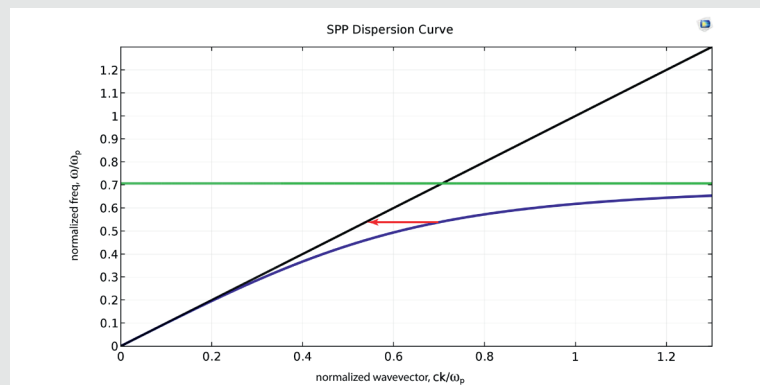


РИС. 1. График в программном обеспечении COMSOL®, показывающий дисперсионную кривую поверхностных плазмон-поляритонов. Черная диагональная линия соответствует свету, а зеленая горизонтальная линия представляет частоту поверхностных плазмонов. Синяя дисперсионная кривая поверхностных плазмон-поляритонов асимптотически приближается к ним в пределах низких и высоких частот соответственно. Красная стрелка представляет волновой вектор решетки, позволяющей поверхностным плазмонам взаимодействовать со свободно распространяющейся световой волной

ОТ НАНОАНТЕНН ДО СПУТНИКОВ ДЛЯ ДАЛЬНОГО КОСМОСА: ЭФФЕКТИВНАЯ ВЫРАБОТКА ЭНЕРГИИ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ

Инженеры Итальянского технологического института пользуются мультифизическим анализом, чтобы выяснить, как использовать явление электронной эмиссии в прикладных задачах биомедицины и технологий для экстремальных сред в целях повышения энергоэффективности.

Автор: **ЛЕКСИ КАРВЕР (LEXI CARVER)**

У ДАЛЬНОГО КОСМОСА И ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ТЕЛА есть нечто общее — сложно спроектировать устройства, которые смогли бы безотказно, безопасно и эффективно работать в этих условиях. Для оборудования, которое используется в водной среде, при экстремальных температурах, давлениях или других условиях, сложно создать стабильные и эффективные источники энергии. Недавно, в поисках возможностей повышения энергоэффективности медицинских устройств и спутников, изучающих дальний космос, исследователи обратили внимание на электронную эмиссию как на многообещающий метод выработки электроэнергии.

Электронная эмиссия возникает, когда электростатическое поле, тепло или падающий свет выбивают электроны из металла, зачастую в вакуум; эти электроны можно использовать для получения тока. Итальянский технологический институт и Европейское космическое агентство (ЕКА) вместе разрабатывают основанные на электронной эмиссии системы для сбора солнечной энергии на спутниках для освоения дальнего космоса. Исследователи Итальянского технологического института применяют те же идеи к силовым наноантеннам, изучая электрические сигналы мозга. Они используют численный анализ,

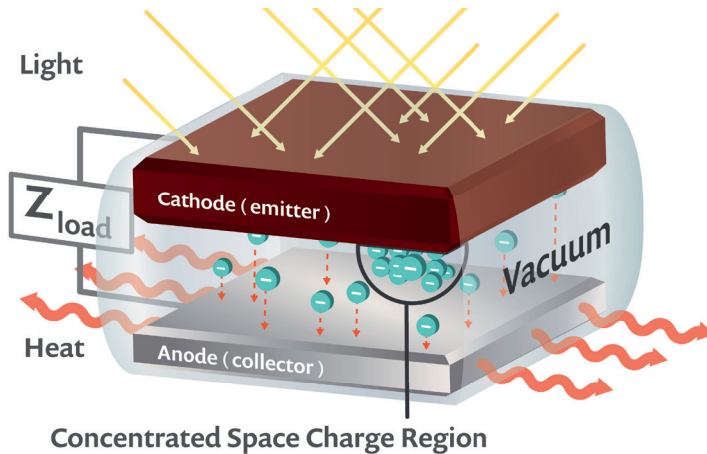


РИС. 1. Схематическое изображение фотонно-усиленной термоэлектронной эмиссии. Электроны покидают катод благодаря свету, падающему на полупроводник, и теплу, выделяющемуся из-за электрической нагрузки. Пролетая к аноду, электроны отталкиваются друг друга и «застывают» в вакуумном промежутке, из-за чего накапливается пространственный заряд

чтобы исследовать поведение излучаемых электронов и оптимизировать функциональность и эффективность своих устройств.

» БОЛЬШЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ СПУТНИКОВ

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ, которые преобразуют солнечный свет в электричество, хорошо работают в солнечных батареях на Земле или вблизи нее, но не очень эффективны в околосолнечных полях в дальнем космосе, в которых высокие температуры сводят на нет эффективность преобразования энергии. Солнечные элементы, основанные на фотонно-усиленной термоэлектронной эмиссии, которые впервые разработали в 2010 году в Стэнфордском университете, совмещают фотоэлектрические системы и термоэлектронную эмиссию — вызванный температурой электрический ток, высвобождающий электроны из нагретого полупроводника — для усиления выработки энергии.

Ячейка фотонно-усиленной термоэлектронной эмиссии (рис. 1) состоит из вакуумной камеры, расположенной между анодом и полупроводниковым катодом, например, из арсенида галлия. Падающие фотоны возбуждают электроны, переводя их из валентной зоны катода в зону проводимости, при этом часть электронов излучается в вакуум, а другие смещаются ближе к вакуумному уровню энергии полупроводника и легче участвуют в термоэлектронной эмиссии. Нагрев катода выбрасывает больше электронов в вакуумный промежуток. Свободные электроны движутся к аноду на другой стороне и накапливают заряд, который можно использовать для получения электрической энергии.

«Фотонно-усиленная термоэлектронная эмиссия использует полупроводниковую структуру катода и разность температур между катодом и анодом, преобразуя тепло в электроэнергию, — объясняет Пьерфранческо Цилио (Pierfrancesco Zilio), научный сотрудник Итальянского технологического института. — В отличие от обычной фотоэнергетики в преобразовании участвуют и видимая, и ультрафиолетовая, и инфракрасная части солнечного спектра: первые две переводят электроны в зону проводимости полупроводника, а третья позволяет им вырваться в вакуумный промежуток».

Однако излученные электроны отталкиваются друг друга, и некоторые попадают обратно на катод или «застывают» посередине вакуумного промежутка. Во втором случае они могут создавать облако пространственного заряда, которое мешает прохождению других электронов и сильно снижает эффективность устройства.

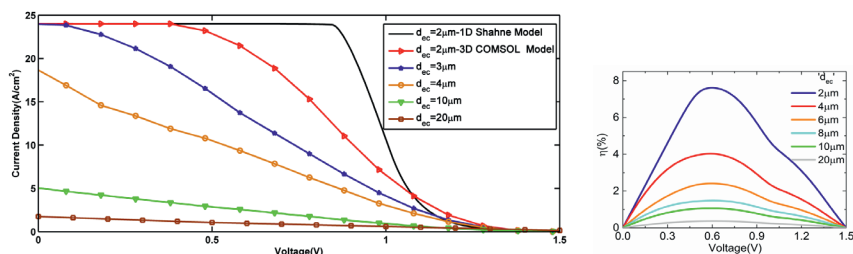


РИС. 2. Результаты моделирования в программном обеспечении COMSOL® показывают плотность анодного тока (слева) и КПД преобразования энергии (справа), рассчитанные для разных расстояний между катодом и анодом и разных рабочих напряжений

» НА ПОМОЩЬ ПРИХОДИТ МОДЕЛИРОВАНИЕ

ДЗИЛИО И ЕГО КОЛЛЕГИ, АСПИРАНТ УАСИМ РАДЖА (WASEEM RAJA) и ведущий исследователь Ремо Проетти (Remo Proietti) работали с ЕКА, изучая основные на фотонно-усиленной термоэлектронной эмиссии системы с целью максимизации накапливающегося на аноде заряда и создания конструкции, достаточно надежной для использования на спутниках для дальнего космоса. Они использовали программное обеспечение COMSOL Multiphysics® для исследований ячейки фотонно-усиленной термоэлектронной эмиссии, создания нескольких моделей возможных конструкций и определения наиболее практичной и эффективной.

Команда Цилио отслеживала поток электронов между катодом и анодом и изучала образование облака пространственного заряда. Они начали с модели, рассчитывающей электрические поля в катоде, которые возникают при поглощении фотона, а затем рассмотрели, как такое поле влияет на возможность электронов покинуть поверхность катода.

«Это позволило нам определить, как образование облака пространственного заряда замедляет накопление заряда на аноде, а следовательно, и вырабатываемый на выходе ток, — говорит Цилио. — Мы рассчитали барьер, который нужно преодолеть электронам для достижения анода, включая работу выхода из катода и работу сил, тормозящих электроны при прохождении через облако пространственного заряда».

С помощью численного моделирования они испытали разные конструкции, отыскивая положение двух электродов, которое дало бы наибольший ток на выходе и эффективность (см. рис. 2). «COMSOL позволил нам связать поведение пространственного заряда с другими физическими явлениями, а именно с поглощением света и переносом носителей в катоде».

Чтобы проанализировать эмиссию и распространение электронов в вакуумной камере, они связали модель трассировки частиц с электрической и тепловой моделями. «Мы определили плотность анодного тока на основе электронных траекторий и электрического потенциала, — продолжает Цилио. — Затем мы рассчитали полный ток на выходе и КПД преобразования энергии для выбранной конструкции ячеек фотонно-усиленной термоэлектронной эмиссии».

Они также испытали несколько методов уменьшения облака пространственного заряда. Одна идея предполагала использование катода с поверхностью в виде массива наноконусов, поскольку вокруг острых концов формируется более сильное электрическое поле, что усиливает электронную эмиссию. Цилио моделировал электрические поля и траектории электронов для случая наноконуса (см. рис. 3) и рассчитал результирующую плотность анодного тока.

Несмотря на то, что из катода высвобождается больше электронов, конструкция из наноконусов не смогла уменьшить облако пространственного заряда и увеличить ток на выходе. Команда Цилио обратилась к новой тактике. «Мы добавили в вакуумную камеру положительно заряженный сетчатый затвор, который притягивает высвобожденные электроны и ускоряет их, — сказал он. — Это улучшило выход электронов, заметно уменьшив облако пространственного заряда между анодом и катодом».

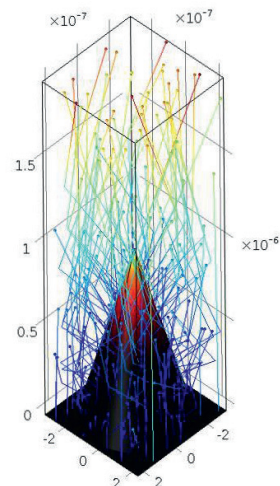


РИС. 3. Результаты моделирования наноконуса в COMSOL. Графики показывают траектории частиц и величину скорости, а также норму электрического поля по поверхности конуса

«Затем нам потребовалось оптимизировать размер отверстий и мощность источника заряда для затвора, чтобы найти наилучший компромисс между КПД и сбором электронов, а также минимизировать число электронов, остающихся на затворе».

Они испытали сетки с различным шагом (расстоянием между центрами соседних отверстий), чтобы узнать, какая конфигурация затвора дает наибольший анодный ток на выходе. Они также учли мощность, потребляемую затвором, в расчетах полного КПД преобразования. Рис. 4 и 5 показывают результаты для разных конфигураций, напряжений затвора и шагов сетки.

На основе моделирования команда выбрала напряжение затвора, шаг сетки и расстояние от катода до анода, повышающие эффективность конструкции. Изучив ячейку фотонно-усиленной термоэлектронной эмиссии, они применили схожие методы для плазмонного моделирования наноплазмонных антенн для биомедицинского и нейробиологического оборудования.

“ COMSOL нам очень помог, учитывая, насколько сложные междисциплинарные задачи стояли перед нами.

— ПЬЕРФРАНЧЕСКО ЦИЛИО, НАУЧНЫЙ СОТРУДНИК ИТАЛЬЯНСКОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

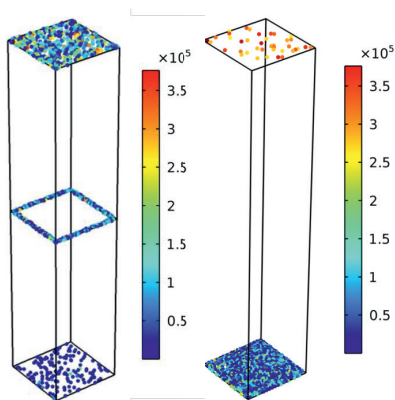


РИС. 4. Результаты моделирования демонстрируют накопление электронов на аноде с затвором (слева) и без него (справа)

» **ЦЕЛЬ — МОЗГ**
ЦИЛИО ИСПОЛЬЗОВАЛ ВОЗМОЖНОСТИ АНАЛИЗА В COMSOL, чтобы изучить

фотоэлектронную эмиссию в нанопланарных антеннах, состоящих из диэлектрических нанотрубок с золотым или серебряным покрытием (см. рис. 6), погруженных в жидкую среду, которая имитирует человеческий мозг. Эти антенны предполагается применять для оптического возбуждения нейронов, исследования электрических сигналов между нейронами, а также для лечения и диагностики.

Погружение антенны в жидкую среду понижает работу выхода, то есть энергию, требуемую для высвобождения электрона из металла. «Электронам теперь проще вырваться, но если плотность электронов вокруг антенны достигнет определенного уровня, произойдет экспоненциальная ионизация молекул воды, и антенна перестанет работать», — объясняет Цилио.

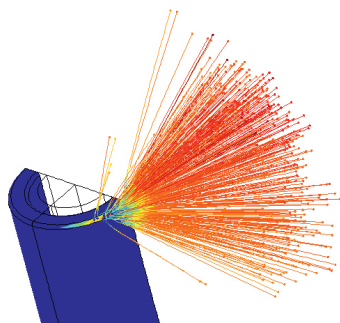


РИС. 7. Траектории электронов, покидающих металл

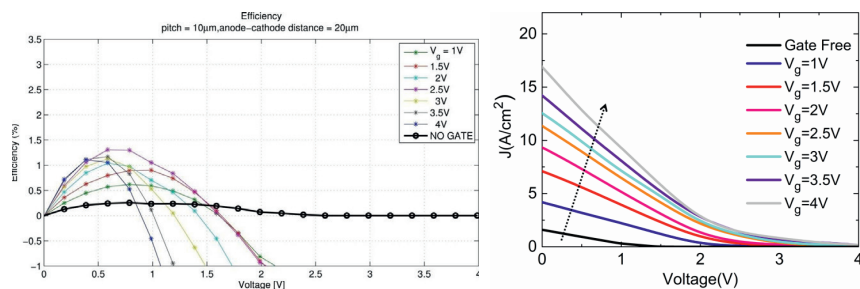


РИС. 5. Слева: результаты моделирования показывают КПД преобразования энергии для разных уровней напряжения на затворе при расстоянии в 20 мкм между катодом и анодом. Справа: накопленная плотность анодного тока для разных уровней напряжения на затворе и разных шагов сетки

Фемтосекундные лазерные импульсы, подаваемые на антенну, вызывают плазменные резонансы и усиливают электрическое поле на поверхности металла, увеличивая ускорение электронов после эмиссии.

Команда Цилио связала модель оптического отклика антенны со своей моделью электронной эмиссии и траекторий электронов, и нашла корреляцию между местным усилением поля и распределением испускаемых электронов. Далее, они изучили «электрические горячие точки» — области наибольшей плотности электронов, и исследовали происходящие каталитические реакции, основываясь на соударениях молекул воды с испущенными электронами. «Функциональные возможности моделирования соударений в COMSOL отвечали всем нашим запросам», — отмечает он. — Я мог одновременно моделировать возбуждение, ионизацию и упругие соударения».

Результаты моделирования (см. рис. 7) показали уровни электрического поля вокруг антенны и горячих точек, а также предсказали плотность электронов и их траектории при вылете. После изучения зависимости характеристик антенны от высоты и мощности лазера команда выбрала рабочий режим, уменьшающий риск ионизации и выхода антенны из строя.

» **НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ — НЕ ЗА ГОРАМИ**
КОГДА КОМАНДА ИТАЛЬЯНСКОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

взялась за оптимизацию оборудования спутников для дальнего космоса и нанопланарных антенн, инструменты мультифизического анализа оказали неоценимую помощь. «COMSOL нам очень помог, учитывая,

насколько сложные междисциплинарные задачи, объединяющие моделирование нелинейных явлений и движения частиц с другими эффектами, стояли перед нами», — замечает Цилио. Открывая границы дальнего космоса или пытаясь стимулировать одиночные нейроны, инженеры Итальянского технологического института планируют и дальше использовать моделирование, развивая технологии для экстремальных условий. ☺

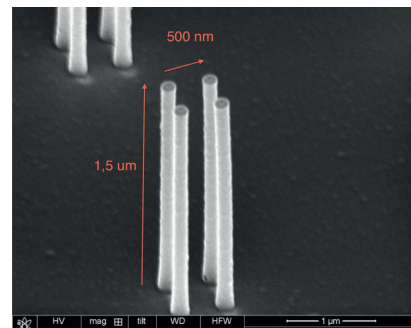


РИС. 6. Увеличенное изображение антенн из золотых нанотрубок, изготовленных вторичной электронной литографией. Эти антенны могут создавать плазменные «горячие точки» в видимой и ближней инфракрасной частях спектра



Пьерфранческо Цилио, научный сотрудник Итальянского технологического института

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ ОСВЕЩАЕТ ДОРОГУ В БУДУЩЕЕ

Автор: **КРИС БУШЕ (CHRIS BOUCHER)**

НАСТУПИЛО УДИВИТЕЛЬНОЕ ВРЕМЯ ДЛЯ РАБОТ В ОБЛАСТИ

математического и численного моделирования оптических систем. Вычислительные средства стали не только более мощными, но и более простыми в использовании. Эти инструменты помогают исследователям и инженерам решать задачи проектирования, оптимизации и диагностики во множестве оптических инженерных приложений. Основное внимание специалистов по моделированию направлено на максимально достоверное воспроизведение поведения реальных систем, благодаря чему уменьшается зависимость от экспериментов и физического прототипирования. В данной статье мы расскажем, какими инструментами и средствами располагает среда численного моделирования COMSOL Multiphysics® для обеспечения требуемого уровня точности, особенно в высокочастотной оптике.

» ИНТЕГРИРОВАННОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСКОРЯЕТ ПРОЦЕСС ПРОЕКТИРОВАНИЯ

ПРОГРАММНЫЙ ПАКЕТ COMSOL MULTIPHYSICS всегда представлял собой полностью интегрированное решение для задач мультидисциплинарного моделирования. Одно из его наиболее существенных преимуществ — это единый пользовательский интерфейс для каждого шага процесса моделирования, включая создание геометрии, настройку физики, построение сетки, решение и визуализацию результатов (рис. 1).

При разработке модуля Ray Optics (Геометрическая оптика) — одного из дополнительных продуктов в составе программного обеспечения COMSOL® — стало очевидным, что реализованный в нем замкнутый рабочий процесс должен также стать сильной стороной инструментов для трассировки лучей. Многие пользователи высказывали сходные претензии при работе в области оптического моделирования — необходимость обмена данными между несколькими более специализированными программными пакетами для точного описания реально существующих систем. Именно поэтому модуль Ray Optics был создан с учетом требований к полноте

и автономности на каждом этапе процесса моделирования.

» МУЛЬТИФИЗИЧЕСКИЙ ПОДХОД РАСШИРЯЕТ ВОЗМОЖНОСТИ ОПТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЕСЛИ ТРЕБУЕТСЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНО ВЫСОКАЯ ТОЧНОСТЬ

для сложной оптической модели, а также эксплуатация устройства в экстремальных условиях, то зачастую бывает недостаточно учитывать только влияние электромагнитных волн. COMSOL позволяет легко совместить результат моделирования электромагнитной волны с определяющими уравнениями для других физических явлений, чтобы описать, например, омический нагрев, микроволновый нагрев, лазерный нагрев, пьезоэлектрический эффект, магнитострикции и даже полупроводниковые оптоэлектронные устройства.

Поскольку концепция мультифизического моделирования долгое время оставалась центральной в философии COMSOL, быстро

стало очевидным, что данный принцип следует применять и при моделировании явлений геометрической оптики. Инструмент для работы с этими явлениями следовало сделать достаточно универсальным для того, чтобы его можно было легко комбинировать с прочими модулями программного пакета, поддерживающими анализ электрических, гидродинамических, механических, тепловых и химических явлений.

» ОДНО-НАПРАВЛЕННЫЕ И ДВУНАПРАВЛЕННЫЕ ТЕПЛОВЫЕ СВЯЗИ

СРЕДИ НАИБОЛЕЕ ВАЖНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ модуля Ray Optics — его способность создавать одно- и двунаправленные связи с другими модулями, в частности, Heat Transfer (Теплопередача) и Structural Mechanics (Механика конструкций). Однонаправленная связь наблюдается в том случае, если луч просто нагревает поглощающий материал или поверхность либо лучи отклоняются под воздействием деформаций конструкции.

Однонаправленные связи можно встретить, например, в солнечной энергетике (рис. 2). Высокотемпературный коллектор, как правило, состоит из отражающего параболического диска или целого массива отражателей, фокусирующих солнечную энергию на небольшом устройстве, называемом приемником. Как величина падающего теплового потока, так и его распределение на приемнике оказывают значительное влияние на КПД преобразования солнечной энергии в электрическую.

Двунаправленная связь возникает в тех случаях, когда мощный луч вызывает изменение структурных и тепловых характеристик в моделируемой области, что, в свою очередь, приводит к изменению траекторий лучей (рис. 3). Термическая деформация может повлиять на траекторию прохождения лучами системы линз посредством нескольких механизмов, включая зависимость

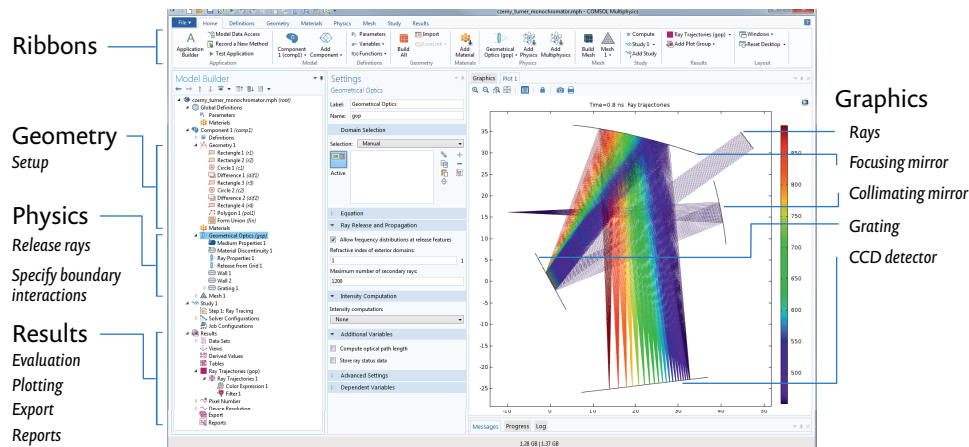


РИС. 1. Пользовательский интерфейс программного обеспечения предоставляет доступ к каждому шагу настройки модели

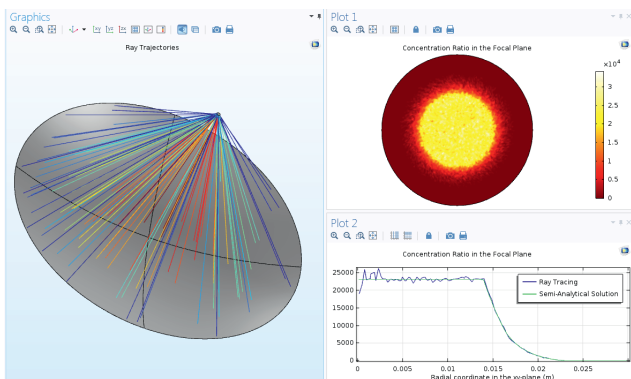


РИС. 2. Солнечные лучи отражаются параболической тарелкой и фокусируются на небольшом приемнике (слева). Отношение падающего теплового потока к естественному солнечному потоку или коэффициент концентрации построен в фокальной плоскости диска (вверху справа). В данной эталонной модели коэффициент концентрации, зависящий от радиального положения, хорошо соответствует известному решению (внизу справа)

показателя преломления и теплового расширения от температуры и напряжения.

Двунаправленную связь между распространением луча и структурными и тепловыми эффектами можно наблюдать в таком явлении, как эффект тепловой линзы, при котором мощный луч, распространяющийся в слое поглощающего материала, частично фокусируется (рис. 4). Также становится возможным наблюдать и определять величину сдвига фокальной плоскости, вызванного тепловым воздействием, изменения фокальной точки в системе линз в результате теплового расширения, а также изменения показателя преломления.

» ДОБАВЛЕНИЕ ОЖИДАЕМЫХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯМИ ФУНКЦИЙ ОБЕСПЕЧИВАЕТ РАЗВИТИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

являясь специализированным компонентом универсального программного пакета для моделирования, модуль Ray Optics включает множество удобных функций, имеющихся в программном пакете. На основе полученных отзывов пользователей

мы также добавили некоторые специализированные функции в ключевых областях, такие как отдельные последовательности решателя и функции постобработки. Например, сейчас пользователю доступны специализированные графики для визуализации монохроматических aberrаций, таких как несимметричная кометообразная aberrация, расфокусирование, астигматизм и сферические aberrации (рис. 5).

Способность программного обеспечения COMSOL Multiphysics® количественно определять и визуализировать оптические aberrации является существенным расширением функционала модуля Ray Optics (Геометрическая оптика). Теперь еще проще наблюдать за тем, как различные факторы, например, изменение температуры или напряжения, вызывают искажения изображения.

» ПЕРСПЕКТИВЫ КАК И В БОЛЬШИНСТВЕ ПРЕДМЕТНЫХ ОБЛАСТЕЙ,

нарастающее преобладание вычислительных моделей в области оптических систем демонстрирует потребность в интегрированной среде для моделирования. Появление специальных графических инструментов для работы с aberrациями — это очередной шаг в обеспечении специалистов, работающих в области оптики,

универсальным инструментом высокочастотного оптического моделирования, который может использоваться практически для любых приложений. Физические и математические основы геометрической оптики применимы в очень широкой области, включая офтальмологию, солнечную энергетику, разработку камер, телескопов, монохроматоров и спектрометров.

Более того, способность объединить при моделировании трассировку лучей с тепловыми

и механическими явлениями позволяет создавать точные и совершенные мультифизические модели сложных устройств и систем, в том числе и для эксплуатации в экстремальных условиях. Использование мультифизического подхода позволяет специалистам по моделированию, инженерам и конструкторам оставаться на переднем крае инноваций в быстро развивающейся высокотехнологичной оптической отрасли и за ее пределами. ©

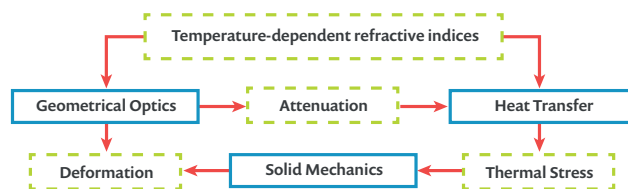


РИС. 3. Типовой рабочий процесс при моделировании двунаправленной связи, включающей в себя оптические, тепловые и структурные явления

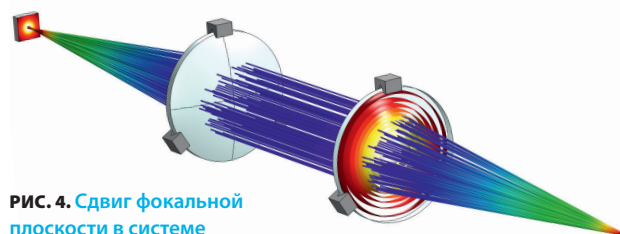


РИС. 4. Сдвиг фокальной плоскости в системе фокусировки мощного лазера в результате теплового воздействия

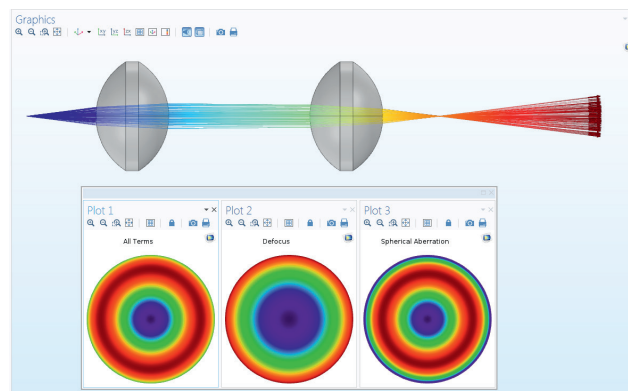


РИС. 5. Траектории лучей в системе из двух собирающих линз. Монохроматические aberrации на графике представлены как суперпозиции многочленов Зернике, из которых могут быть выбраны отдельные члены

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ НАНОФОТОНИКА: ОТ ОПТИЧЕСКИХ «ЧЕРНЫХ ДЫР» ДО ПЛАЗМОННОГО ПИНЦЕТА

Автор: АЛЕКСАНДР В. КИЛЬДИШЕВ (ALEXANDER V. KILDISHEV)

ВОЗМОЖНОСТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ НАНОФОТОНИКИ (CNP) позволяют найти ей множество вариантов применения: в физике, фотохимии, инженерном деле. Вот лишь несколько примеров: наноразмерная нелинейная оптика, расширенные возможности улавливания светового излучения, диэлектрические метаповерхности, плазмонные нанолазеры, спазеры и нанофотоника на основе графена.

Выбор вычислительных инструментов для численного моделирования в нанопотонных приложениях зависит от возможностей этих средств в области моделирования сложных взаимодействий между световыми явлениями и свойствами вещества, ограниченными наномасштабом. В большинстве случаев взаимодействие в ближней зоне также влияет на излучение в дальней зоне, что приводит к значительным геометрическим расхождениям именно там, где важно точное математическое представление.

Выбор подходящего инструмента представляет сложную задачу, однако программное обеспечение COMSOL Multiphysics® соответствует жестким требованиям, предъявляемым большим количеством практических задач. Мы с коллегами успешно применяли данную среду при работе над такой предметной областью, задействующей различные разделы физики, как математическое моделирование нанопотонных процессов. В настоящее время я разрабатываю методы, с помощью которых вычислительную нанофотонику можно будет использовать для проектирования трехмерных оптических метаматериалов и малоразмерных структур из них, или метаповерхностей, способных направлять свет и манипулировать им необычными и удивительными способами. Кроме того, я работаю над разработкой плазмонных наноструктур с принудительным усилением сигнала.

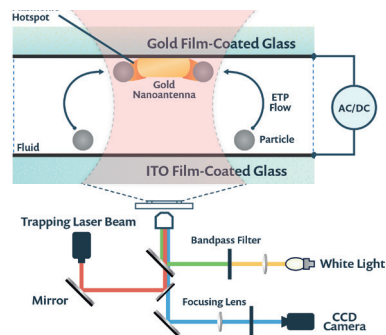
Как выполненные ранее, так и более современные исследования в данной области уже позволили нам приблизиться к созданию новых исполнительных устройств для активной нанофотоники. Данные исследования проводились в тесном

сотрудничестве с профессором Шалаевым (Shalaev, Университет Пердью, США) и профессором Кларом (Klar, Университет Иоганна Кеплера, Австрия). Совместная работа с профессором Наримановым (Narimanov, Университет Пердью, США) и доктором Прокопьевой (Prokoreva, Новосибирский государственный университет, Россия) привела к разработке оптических методов точного полноволнового и приближенного преобразования для оптимизации всенаправленных поглотителей светового излучения или оптических «черных дыр». Эти методы были недавно проверены с помощью модулей Wave Optics (Волновая оптика) и Ray Optics (Геометрическая оптика) из состава программного обеспечения COMSOL® (J. Opt. vol. 18, p. 044014, 2016).

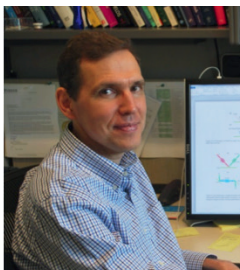
Один из наших магистрантов, Юстус Ндукайфе (Justus Ndukaife), предложил оригинальную конструкцию оптической ловушки на основе плазмонов (см. рисунок). Технология нанопотонного плазмонного пинцета активно разрабатывается в качестве элегантного решения для надежного удержания объектов субмикрометрового и нанометрового размера. Юстус изготовил прототип в лаборатории профессора Болтасева (Boltasseva, Университет Пердью) и успешно сравнил численные результаты с экспериментальными данными, полученными на сконструированном профессором Уэрэли (Wereley) стенде (см. Nat. Nanotechnol., vol. 11, pp. 53-59, 2016). В подобных устройствах присутствуют сложные мультифизические явления, описываемые сильно сопряженными системами уравнений в частных производных. Нанопинцет можно использовать для работы с микро- и нанообъектами,

а также для их анализа, в таких областях, как использование биосенсоров, программируемая наносборка, оптоволоконные экраны сверхвысокого разрешения, плазмонные цепи для интегрированных модулей квантовой логики.

Вычислительная нанофотоника — динамично развивающаяся область науки, которая и в дальнейшем будет оказывать значительное влияние на нашу повседневную жизнь. С помощью правильно подобранных вычислительных инструментов мы можем проверять свои теоретические предположения и разработки, решая задачи нанофотоники во всей их полноте. ☺



Конструкция нанопинцета. Подсвеченная плазмонная нанопинцетная наноструктура нагревает текучую среду и создает местные градиенты ее электрической проницаемости и проводимости. Приложенное поле переменного тока вызывает появление электротермоплазмонного потока, обеспечивающего перенос частиц к плазмонным «горячим точкам». Переключение с переменного тока на постоянный приводит к закреплению частиц, удерживаемых в плазмонных «горячих точках».



АЛЕКСАНДР В. КИЛЬДИШЕВ является адъюнкт-профессором школы электротехники и вычислительной техники (school of electrical and computer engineering) и центра нанотехнологий бирка (birck nanotechnology center) университета Пердью, США. Профессор Кильдишев принадлежит к немногочисленной группе мировых экспертов в области численного моделирования нанопотонных структур и устройств в реальных условиях. Результатом его исследований стало значительное количество открытий в области метаматериалов с отрицательным показателем преломления, оптических искусственных магнитных структур, компенсации потерь в метаматериалах, плазмонных нанолазеров и оптических метаповерхностей, а также в области теоретических и численных моделей средств оптической маскировки и гиперлинз.