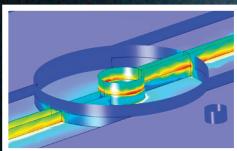


МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

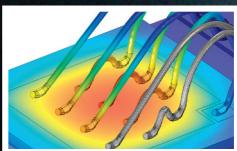
При поддержке
 COMSOL

 IEEE
SPECTRUM

СЕНТЯБРЬ 2015 Г.



**INTEL ПОВЫШАЕТ
ЦЕЛОСТНОСТЬ
И СКОРОСТЬ
ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ**
СТР. 18



**АВВ ПРОДЛЕВАЕТ
СРОК СЛУЖБЫ
СИЛОВЫХ
ТРАНЗИСТОРОВ**
СТР. 20

**МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПОМОГАЕТ WITRICITY
РАЗРАБАТЫВАТЬ
ТЕХНОЛОГИИ
БЕСПРОВОДНОЙ ЗАРЯДКИ**
СТР. 8

ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТАНОВЯТСЯ ВСЕ ПОПУЛЯРНЕЕ

Автор: **ДЖЕЙМС А. ВИК (JAMES A. VICK)**, СТАРШИЙ ДИРЕКТОР, IEEE MEDIA; ИЗДАТЕЛЬ, IEEE SPECTRUM

НАДЕЕМСЯ, что этот выпуск издания «Мультифизическое моделирование», во многом изменит ваши представления о моделировании. Если вы считаете, что моделирование — удел избранных специалистов в области научных исследований, то вы сильно удивитесь, прочитав новый выпуск нашего журнала. Сегодня моделирование доступно всем: высокая стоимость и отсутствие специализированных средств моделирования и анализа больше не является помехой.

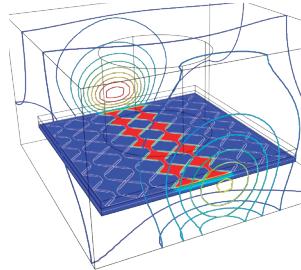
Удобные, специализированные приложения для моделирования находят все более широкое применение, и их использование становится основной тенденцией. Например, компания Cypress Semiconductor (Сан-Хосе, США) успешно повышает эффективность научных разработок с помощью приложений для моделирования. Вероятно, самый известный продукт Cypress — сенсорные экраны для смартфонов. Компания применяет приложения для моделирования при разработке широкого спектра изделий бытового и промышленного применения. Моделирование емкостных сенсоров для сенсорных экранов начинается в научно-исследовательском отделе. Но благодаря среде моделирования от COMSOL теперь не нужно запускать моделирование для каждого конкретного случая — разработчики создают удобные приложения и передают их другим отделам. Службы поддержки клиентов во всем мире имеют доступ к этим приложениям, работа с ними практически не требует обучения, а создание обходится в разы дешевле разработки полномасштабной модели. Единая программная среда позволяет и разрабатывать эти приложения, и распространять их.

Этот номер издания «Мультифизическое моделирование», выпущенный при поддержке COMSOL, Inc., — отличная возможность узнать больше о разработке приложений для моделирования и передовых проектах по моделированию. Если вы разрабатываете зарядное устройство, в первую очередь посмотрите статью о технологии беспроводной передачи энергии от Witricity. Еще одна тема, вызывающая в последнее время всеобщий интерес, — графен и сферы его практического применения. В этом номере вы найдете статью ведущих экспертов университета Пердью, посвященную точному и эффективному моделированию графеновых фотонных устройств.

Надеемся, что этот номер журнала «Мультифизическое моделирование», вдохновит вас на новые достижения! ☺

Адрес эл. почты: jv.ieeemedia@ieee.org

СОДЕРЖАНИЕ



3 СЕНСОРНЫЕ ЭКРАНЫ: РАЗРАБОТКА В ОДНО КАСАНИЕ

— Cypress Semiconductor, Сан-Хосе, штат Калифорния, США

6 ПРИЛОЖЕНИЯ COMSOL — МОДЕЛИРОВАНИЕ, ДОСТУПНОЕ КАЖДОМУ

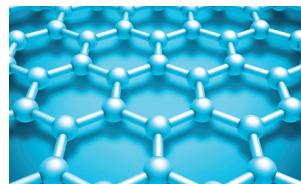
— COMSOL, Берлингтон, штат Массачусетс, США

8 WITRICITY СОЗДАЕТ ГИБКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ БЕСПРОВОДНОЙ ЗАРЯДКИ НА ОСНОВЕ МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА

— Witricity, Уотертаун, штат Массачусетс, США

11 MEDTRONIC СОВЕРШЕНСТВУЕТ ТЕХНОЛОГИИ АБЛЯЦИИ С ПОМОЩЬЮ МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

— Medtronic, Боулдер, штат Колорадо, США



14 ГРАФЕН ОТКРЫВАЕТ ДОРОГУ НОВОМУ ПОКОЛЕНИЮ ПЛАЗМОННЫХ УСТРОЙСТВ

— Purdue University, Уэст-Лафайетт, штат Индиана, США

18 ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ОПТИМИЗАЦИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ И УСКОРЕНИЮ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ

— Intel, Гвадалахара, Мексика

20 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ БУДУТ РАБОТАТЬ ДОЛЬШЕ

— ABB Semiconductors, Ленцбург, Швейцария

24 РАЗРАБОТКА ИНТЕГРИРОВАННЫХ ДАТЧИКОВ ВЫВОДИТ КАЧЕСТВО КОНТРОЛЯ ГЛЮКОЗЫ В КРОВИ НА НОВЫЙ УРОВЕНЬ

— Roche Diagnostics, Индианаполис, штат Индиана, США

27 МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОРОДНЫХ АКТУАТОРОВ ПЕЧАТАЮЩЕЙ ГОЛОВКИ В FUJIFILM DIMATIX

— Fujifilm Dimatix, Лебанон, штат Нью-Гэмпшир, США

30 МОДЕЛИРОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ КОМПЬЮТЕРОВ ПОМОГАЕТ РАЗРАБАТЫВАТЬ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

— BLOCK Transformatoren-Elektronik, Верден, Германия



32 ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ УПРОЩАЮТ РАЗРАБОТКУ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

— Arkansas Power Electronics, Файетвилль, штат Арканзас, США

НА ОБЛОЖКЕ: Беспроводная зарядка электромобиля, припаркованного над зарядной площадкой. Производители автомобилей, электроники, разработчики медицинских имплантатов и другие компании работают совместно с Witricity над созданием более эффективных и удобных решений в различных областях техники. Подробнее — в статье на стр. 8. Иллюстрация предоставлена Witricity.

СЕНСОРНЫЕ ЭКРАНЫ: РАЗРАБОТКА В ОДНО КАСАНИЕ

Cypress Semiconductor использует средства моделирования для оптимизации сенсорных экранов различных устройств, включая смартфоны, ноутбуки, системы для автомобильного транспорта и промышленности, бытовую технику и т.д.

Автор: АЛЕКСАНДРА ФОУЛИ (ALEXANDRA FOLEY)

ЧТОБЫ СДЕЛАТЬ ТЕЛЕФОННЫЙ ЗВОНОК, отправить SMS или пройти очередной уровень в игре Angry Birds™, мы просто берем смартфон и касаемся его экрана. Неважно, какого размера ваши пальцы, пользовались ли вы недавно кремом для рук, лежит ли телефон на плоской поверхности — сенсорный экран реагирует мгновенно, и птицы взмываются отправляются в полет.

Безупречная работа этих устройств в самых различных условиях — во многом заслуга инженеров компании Cypress Semiconductor, ведущего поставщика технологий сенсорных экранов для смартфонов и других сенсорных решений. «Мы занимаемся не только смартфонами, — рассказал Питер Ваварутсос (Peter Vavaroutsos), сотрудник группы моделирования сенсорных экранов в Cypress. — Наши технологии применяются в смартфонах, MP3-плеерах, ноутбуках, автомобилях, в промышленных и бытовых устройствах и во множестве других приборов. И для каждого конкретного случая необходимо создавать специализированное решение».

В настоящее время наиболее распространенными сенсорными экранами в электронных устройствах являются емкостные (см. рис. 1, сверху). Они состоят из набора прозрачных защитных стекол, подложек, клеевых соединений и электродов из оксида индия и олова. Все эти элементы образуют сенсорную панель. Сенсорная панель и решетка электродов разрабатываются для конкретного применения в конкретных условиях. Сенсорная панель (см. пример на рис. 1, внизу) содержит слой ЖКИ, подложку, решетку из выровненных по горизонтали и по вертикали электродов ромбовидной формы из оксида индия и олова и, наконец, прозрачный клеевой слой, на который крепится защитное стекло.

Для специалистов Cypress мультифизическое моделирование и приложения для моделирования стали важнейшими средствами эффективной разработки продуктов. Они позволяют прогнозировать и оптимизировать работу множества разных конструкций

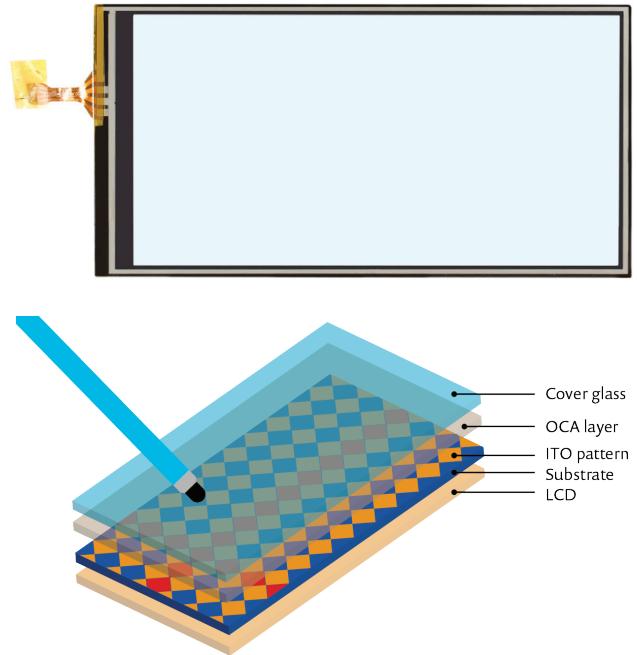


РИС. 1. Вверху: Модуль емкостного сенсорного экрана. Внизу: Стандартная сенсорная панель. Расположение пера отслеживается по изменению емкости связи между электродами.

устройств, не требуя создания большого числа физических прототипов.

» ПРАВИЛО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

ОБЯЗАТЕЛЬНЫМ УСЛОВИЕМ ЯВЛЯЕТСЯ ТО, что сенсорные экраны должны отслеживать положение пальца или стилуса с высокой точностью. Это означает, что в любой момент времени сенсорный экран должен определить не только факт касания экрана объектом переменного размера, но и точку касания, продолжительность касания и направление перемещения объекта. Для выполнения этого требования емкостный сенсор состоит из решетки горизонтальных и вертикальных электродов из оксида индия и олова, и объект детектируется на пересечении элементов решетки. При прикосновении к поверхности экрана палец или

стилус искажает электростатическое поле, в результате чего возникает измеримое изменение емкости связи между передающими и принимающими электродами (см. рис. 1, внизу).

Компоненты панели можно комбинировать множеством способов, в зависимости от того, где и как будет применяться сенсорный экран. «Сенсорный экран для автомобильного строения сильно отличается от сенсорного экрана, используемого, например, в ноутбуке, — объяснил Ваварутсос. — Моя работа в Cypress — проектировать панели экранов для различных потребительских устройств с учетом таких факторов, как, например, отличия между взаимодействием с горизонтально закрепленным устройством GPS и со смартфоном, который можно держать и использовать множеством различных способов».

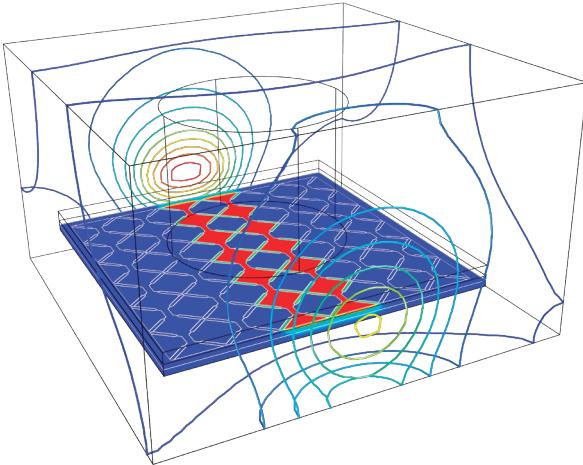


РИС. 2. Результат моделирования линий электрического поля сенсорного датчика в модуле AC/DC — модуле расширения для COMSOL Multiphysics.

Научно-исследовательский отдел Сурпресс разработал множество электростатических моделей устройств с определенной геометрией и с различными параметрами. Сотрудники называют его «набором моделей». «Результаты, полученные благодаря анализу определенного набора моделей, затем применяют наши инженеры отдела продаж и служба поддержки клиентов, чтобы оптимизировать некоторые характеристики устройства с целью удовлетворения требований отдельных заказчиков», — рассказал Питер Ваварутсос.

С помощью пакета для мультифизического моделирования COMSOL Multiphysics® инженеры научно-исследовательского отдела Сурпресс проводят анализ для определения электрических характеристик конкретной компоновки электродов из оксида индия и олова, в том числе измеряют изменение взаимной емкости между электродами при касании экрана пальцем или стилусом. На рис. 2 показан пример электростатической модели с граничными условиями для пла-

вающих потенциалов. Эта возможность имела важное значение: она позволила инженерам Сурпресс моделировать границы прикасающихся объектов, а также любое электрическое экранирование или электроды, которые в настоящее время не возбуждены. Ввиду того, что эти объекты воздействует приложенное внешнее электрическое поле, они будут обладать постоянным, но неизвестным электрическим потенциалом. В модели они представлены в виде поверхности, на которой заряд может свободно перераспределяться.

«С экраном можно взаимодействовать множеством различных способов. Поэтому для оптимизации сенсорной панели для конкретного устройства или продукта нам необходимо провести множество электростатических моделирований для тестирования различных вариантов размещения прикасающихся объектов», — объяснил Ваварутсос. — Мы стараемся свести к минимуму влияние таких факторов, как плохая работа

экрана при попадании на него воды или слабый отклик экрана телефона, положенного на стол. Моделирование стало для нас ценным инструментом, с помощью которого можно обеспечить эффективную работу наших изделий в различных средах и условиях. Мы можем выделить влияние определенных факторов и выяснить, как эффективнее всего оптимизировать рабочие характеристики».

Программное обеспечение COMSOL® можно запускать на неограниченном числе ядер, на кластере или в облаке без ограничений на количество вычислительных узлов.

В результате специалисты Сурпресс могут быстро обрабатывать наборы моделей практически любого размера. «Мы можем уменьшить количество допущений и точно моделировать емкостные сенсорные экраны, регистрируя малейшие изменения между активными электродами и работая при этом с реалистичной геометрией и материалами, — пояснил Ваварутсос.

В рамках одного набора моделей инженеры Сурпресс могут проверить эффективность защитных стекол различной толщины, изменять диэлектрическую проницаемость отдельных слоев и характеристики решетки. Если того требует задача, сенсорный экран можно укомплектовать несколькими слоями электродов или изменить порядок

слоев. К примеру, в наборе моделей могут использоваться защитные стекла с толщинами 0,5–1,5 миллиметра. Чтобы понять особенности конкретного устройства, научно-исследовательский отдел выполняет моделирование для диапазона параметров. Однако поведение устройства при выходе параметров за границы диапазонов остается неизвестным.

» ПРИМЕНЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЕНСОРНЫХ ЭКРАНОВ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ УСТРОЙСТВ

ЧТОБЫ РАСШИРИТЬ область применимости своих моделей, инженеры Сурпресс используют Среду разработки приложений, входящую в COMSOL Multiphysics. Он позволяет создавать приложения для моделирования на основе разработанных моделей. «Чтобы эффективнее взаимодействовать со службами поддержки клиентов, мы начали разрабатывать в Среде разработки приложений упрощенные интерфейсы пользователя в виде надстройки над нашими моделями, — рассказал Ваварутсос. — До того, как мы начали использовать приложения для моделирования, всякий раз, когда клиенту требовалось решение, характеристики которого лишь немного выходили за пределы набора моделей, приходилось снова привлекать

“С помощью моделирования мы смогли обеспечить эффективную работу наших изделий в различных средах и условиях”.

— ПИТЕР ВАВАРУТСОС (PETER VAVAROUTSOS), ИНЖЕНЕР НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ОТДЕЛА, СУРПРЕСС

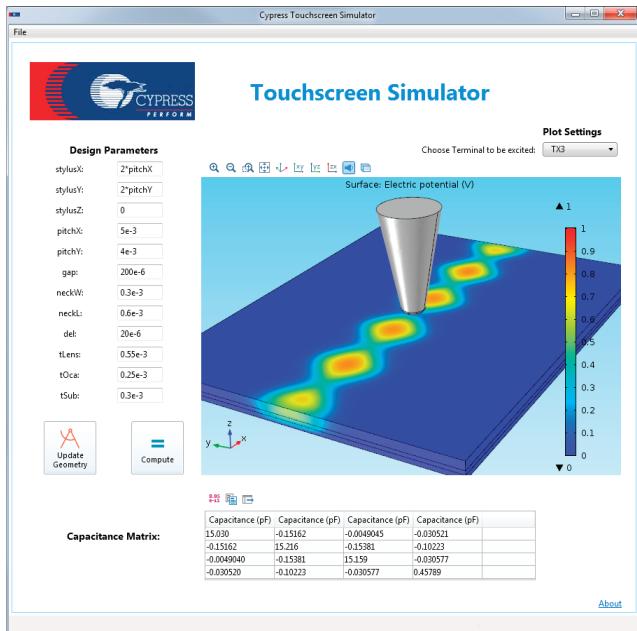


РИС. 3. Приложение для моделирования сенсорного экрана, созданное в Среде разработки приложений и выполняемое с использованием клиента для Windows®, подключенного к COMSOL Server™.

наш отдел, чтобы повторить моделирование с незначительным изменением параметров. Инженеры отдела продаж неоднократно пробовали сами запустить моделирование, хотя они почти не имели опыта работы в среде COMSOL. В итоге нам приходилось проверять результаты моделирования, к тому же они занимали места, количество которых ограничено лицензией на программное обеспечение».

В примере на рис. 3 показаны параметры, которые можно добавить в приложение для моделирования сенсорного экрана. Палец или стилус, касающийся панели, представляется коническим объектом. Пользователь приложения может изменять различные расчетные параметры — от расположения пальца до толщины различных слоев сенсора. Затем приложение формирует отчет

о характеристиках емкостной матрицы, неотъемлемой части информации для разработки емкостных сенсоров. Кроме того, приложение позволяет построить картину распределения электрического поля, а в раскрывающемся списке можно выбрать решение, соответствующее возбуждению различных ленточных проводников сенсора.

Компания Cypress также использует лицензию COMSOL Server™, чтобы использовать свои приложения для моделирования совместно с коллегами в различных странах. Работать с приложениями для моделирования можно через клиент для Windows® или браузер. «Мы считаем, что предоставление нашим группам поддержки доступа к результатам мультифизического моделирования существенно облегчает их работу. Мы можем управлять

выбором параметров, доступных для пользователя приложения, чтобы обеспечить точность расчетов, а инженеры службы поддержки могут экспериментировать с тысячами вариантов параметров проекта, не привлекая к этому сотрудников научно-исследовательского отдела и не занимая места в нашей лицензии COMSOL Multiphysics».

» ИСПЫТАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ СЕНСОРНЫХ ЭКРАНОВ ДЛЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

CYPRESS СОЗДАЕТ СЕНСОРНЫЕ ЭКРАНЫ не только для потребительских продуктов, но и для использования в автомобильной промышленности. При разработке устройств для этих задач инженеры экспериментируют с различными вариантами проектов, чтобы обеспечить соответствие определенным требованиям автомобильной отрасли.

«В группе разработок для автомобильной промышленности, наши исследования во многом определяются требованиями клиента. Часто нам приходится разрабатывать индивидуальные решения для конкретного продукта или клиента, — рассказал Натан Томас (Nathan Thomas), инженер научно-исследовательского отдела, сотрудник группы разработок для автомобильной промышленности в Cypress. — Наши наборы моделей являются нестандартными, и нам необходимо чаще проводить моделирование в соответствии с требованиями конкретного клиента. В автомобилях сенсорные экраны могут применяться по различному назначению: например, для центральной панели управления, в развлекательных системах для пассажиров на задних

сидениях, в потолочной развлекательной системе. Для каждого случая необходима отдельная модель».

Однако группа разработок для автомобильной промышленности не разрабатывает новую модель для каждого случая, а создает для выездных инженеров приложения, позволяющие проверить новые конструкции даже за пределами набора моделей. Эти приложения могут быть использованы для поиска ответов на специализированные вопросы клиентов, которых интересует, как изменение параметра скажется на эффективности устройства. «В таких случаях мы создаем в Среде разработки приложений приложения для моделирования, которыми наши выездные инженеры могут воспользоваться самостоятельно, не запрашивая у нас разработку отдельной модели. Эта технология достаточно нова, однако, на мой взгляд, в будущем приложения для моделирования станут для наших выездных инженеров основным инструментом».

» НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

ПРИ РАЗРАБОТКЕ СЕНСОРНОГО ЭКРАНА для смартфона, автомобильной отрасли или иных производственных процессах инженеры научно-исследовательского отдела Cypress могут создать приложения для моделирования. Такие приложения позволят другим сотрудникам службы поддержки экспериментировать с параметрами модели, не прибегая к помощи специалистов научно-технического отдела. Благодаря использованию моделирования специалисты Cypress предоставляют клиентам более адаптированные решения быстрее, чем когда-либо ранее. ©

ПРИЛОЖЕНИЯ COMSOL — МОДЕЛИРОВАНИЕ, ДОСТУПНОЕ КАЖДОМУ

Авторы: АЛЕКСАНДРА ФΟΥЛИ И ВАЛЕРИО МАРРА (VALERIO MARRA)

ЗА КАЖДЫМ КОММЕРЧЕСКИМ ПРОДУКТОМ, каждой инновационной технологией и научным открытием стоит работа группы профессионалов, их идеи, опыт и увлеченность. Выпуск любого успешного продукта возможен только благодаря знаниям и опыту множества людей: от инженеров-конструкторов до выездных технических специалистов, инженеров по продажам и руководителей производства.

Реализация научно-исследовательских проектов требует участия большого числа инженеров с высоким уровнем квалификации, которые выполняют тестирование, анализ и реализацию технологий с использованием усовершенствованных систем инженерного анализа (CAE). Средства CAE позволяют создавать виртуальные модели, которые помогают понять, как изделие будет работать в реальных условиях.

Обновления продукта, доработка, анализ различных вариантов применения устройства и материалов, а также прочие оптимизации требуют выполнения моделирования на основе физических моделей, разработанных научно-исследовательским отделом. «Эти модели достаточно сложны, поэтому зачастую только автор способен вносить в них изменения и проверять новые варианты. Во многих современных компаниях от этой небольшой группы зависит работа множества людей, в результате чего в системе создается «узкое место», — объяснил Бьорн Шюдин (Bjorn Sjodin), вице-президент по управлению продуктами компании COMSOL.

Как обеспечить доступность этих мощных вычислительных инструментов для более широкого круга пользователей? Без сомнения, повышенная доступность средств мультифизического моделирования повысит производительность труда и облегчит создание новых продуктов,

но как сделать этот процесс экономичным и масштабируемым?

» ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СТАНОВЯТСЯ ВСЕ БОЛЕЕ ПОПУЛЯРНЕЕ

ПРОГРАММНЫЙ ПАКЕТ COMSOL MULTIPHYSICS® и Среда разработки приложений позволяют инженерам научно-исследовательского отдела передать свои знания о моделировании другим — быстро, легко и удобным способом (см. рис. 1). С помощью Среды разработки приложений инженер может дополнить любую модель, реализованную в программной среде COMSOL®, интуитивно понятным интерфейсом и адаптировать его с учетом задачи, для решения которой приложение разрабатывалось. Результат такой работы, приложение для моделирования, обладает функциональностью исходной модели при упрощенном интерфейсе, с помощью которого пользователь сможет изменить ограниченный набор параметров модели: входных переменных, материалов, геометрических характеристик и прочих — а затем еще раз рассчитать ожидаемые эксплуатационные характеристики нового варианта устройства. Такое приложение можно создать в единой программной среде COMSOL Multiphysics.

Приложения для моделирования могут быть использованы для решения множества различных задач. К примеру, компании могут предлагать использовать вместо технических описаний приложения, демонстрирующие работу их продуктов, или начать разработку лицензируемых приложений в качестве собственных продуктов. Внутри компании специалист по продажам или инженер технической поддержки может использовать приложение для быстрого анализа ожидаемой эффективности, надежности и стоимости конкретного продукта, проводя испытания

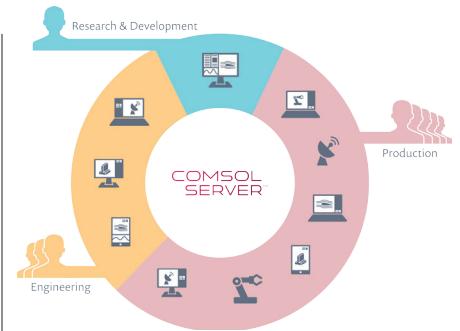


РИС. 1. Научно-исследовательский отдел создает приложения в Среде разработки приложений и размещает их в среде COMSOL Server™. Другие отделы могут подключаться к серверу и работать с этими приложениями.

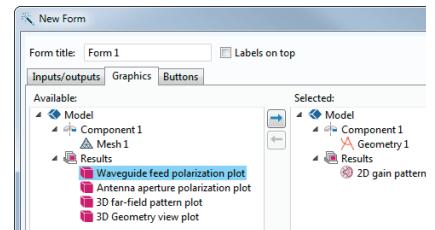


РИС. 2. Созданная в Мастере форм новая форма демо-приложения для моделирования гофрированной конической антенны. Приложение входит в состав пакета COMSOL®.

с различными материалами и вариантами конструкции.

Одним словом, «приложения для моделирования предлагают новый способ обмена профессиональным опытом между специалистом по построению моделей и другими сотрудниками производственного отдела», — резюмировал Бьорн Шюдин.

» РАЗРАБОТКА ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ В СРЕДЕ РАЗРАБОТКИ ПРИЛОЖЕНИЙ

ВСЕ НЕОБХОДИМЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ для разработки приложения для моделирования доступны в среде COMSOL Desktop®, в которую полностью интегрированы Построитель моделей и Среда разработки приложений. В качестве примера рассмотрим модель гофрированной конической рупорной антенны (соответствующее демонстрационное приложение доступно в Библиотеках приложений). Переключившись из режима Построителя моделей в режим Среды разработки приложений, пользователь может создать простое при-

ложение всего несколькими щелчками мыши, а затем продолжить его настройку и совершенствование.

В Мастере форм содержится список элементов модели, которые можно использовать для получения и вывода данных, операций моделирования и для работы с графикой (рис. 2).

Шаблон приложения, созданный с помощью Мастера форм, можно дополнять и адаптировать с помощью двух инструментов: Редактора форм и Редактора методов. Используя Редактор форм, объекты форм, такие как поля ввода, кнопки, графические окна и таблицы результатов, можно добавить к приложению простым перетаскиванием (см. рис. 3).

После добавления этих форм пользователь может выполнить расширенную настройку приложения, добавляя новые функциональные возможности с помощью Редактора методов — среды программирования на языке Java®, которая позволяет пользователям комбинировать интерфейс COMSOL® с программами и библиотеками Java®.

В примере приложения для моделирования гофрированной рупорной антенны (рис. 4) были добавлены такие функции, как ограничение значений в полях частоты и длины волны сверху и снизу, возможность восстановить значения параметров по умолчанию, визуализация результатов в 2D- и 3D-режимах. Кроме того, после завершения расчетов приложение составляет отчет о моделировании, который можно автоматически отправить на указанный адрес электронной почты. Итоговый вид приложения показан на рис. 4.

Приложения для моделирования могут полностью адаптироваться согласно конкретным потребностям пользователя, а также разрабатываться для различных проектов. К примеру, вы можете создать приложение для специалиста по продажам, которому требуется модифицировать конструкцию в соответствии с пожеланиями клиента, или для инженера-разработчика, желающего быстро оценить реализуемость нового проекта. Приложения, созданные с использованием Среды разработки приложений и программного пакета COMSOL Multiphysics, открывают возможности моделирования для широкого круга людей, участвующих в разработке, проектировании и производстве продуктов. Моделирование теперь доступно для всех! ©

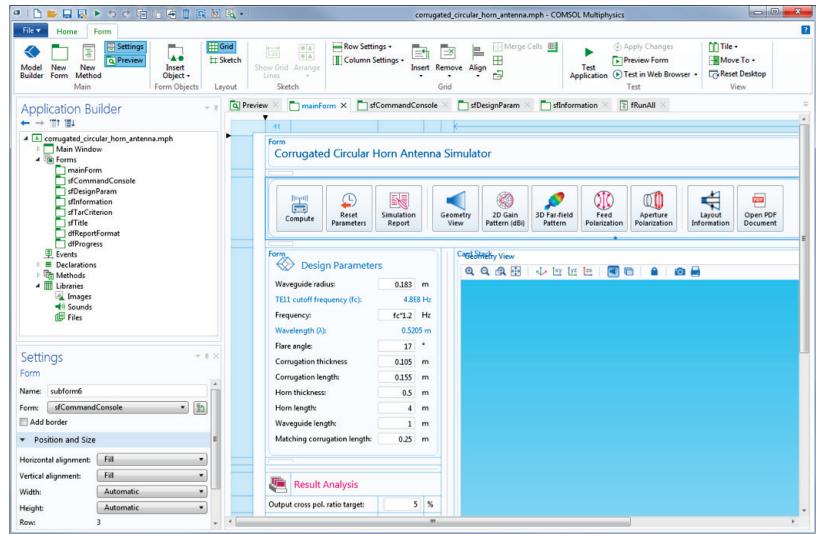


РИС. 3. Итоговый вид основной формы приложения для моделирования гофрированной конической антенны содержит карты, текстовые метки, поля ввода, единицы измерения, изображения и другие элементы. Эти объекты доступны в раскрывающемся меню Редактора форм.

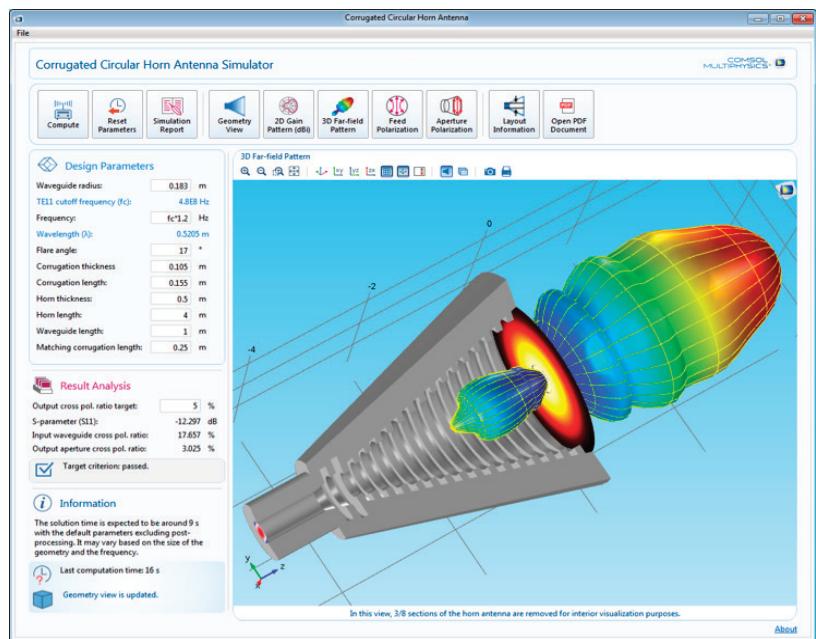


РИС. 4. Приложение, показывающее излучение в дальней зоне гофрированной конической рупорной антенны. Для оптимизации рабочих характеристик антенны можно изменять ее геометрические параметры и рабочие частоты.

“ Приложения для моделирования предлагают новый способ обмена профессиональным опытом в области моделирования между специалистом по построению моделей и другими сотрудниками производственного отдела”,

— БЬОРН ЩОДИН, ВИЦЕ-ПРЕЗИДЕНТ ПО УПРАВЛЕНИЮ ПРОДУКТАМИ, COMSOL.

WITRICITY СОЗДАЕТ ГИБКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ БЕСПРОВОДНОЙ ЗАРЯДКИ НА ОСНОВЕ МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА

Инженеры WiTricity использовали средства мультифизического моделирования для инновационной разработки технологии беспроводной передачи энергии, превосходящей существующие методы по эффективности и дальности.

Автор: ЛЕКСИ КАРВЕР (LEXI CARVER)

ПРЕДСТАВЬТЕ, ЧТО ВЫ возвращаетесь домой и оставляете телефон, ноутбук и гарнитуру Bluetooth® на кухонном столе, чтобы подзарядить сразу все эти устройства. Или, что вы ставите свой электромобиль в гараж, над специальным ковриком, и знаете, что к утру он будет полностью заряжен. Или врач говорит, что ваш медицинский имплант можно заменить новым — без проводов питания и без сменных аккумуляторов.

Беспроводная передача энергии, позволяющая заряжать аккумуляторы электронных устройств без проводов, делает реальностью эти и многие другие возможности. Компания WiTricity из города Уотертаун, штат Массачусетс, США, разрабатывает беспроводную технологию зарядки на основе магнитного резонанса и уже выпустила самое удобное из представленных на рынке решений для беспроводной передачи электроэнергии. Технология WiTricity была создана в Массачусетском технологическом институте профессором Мартином Сольясиком (Marin Soljacic) и его научной группой. Она позволяет заряжать несколько устройств одновременно и дистанционно, через такие материалы, как дерево, пластик, гранит и стекло. Ряд компаний, в числе которых Toyota, Intel и Thoratec, уже лицензировали использование этой технологии в гибридных электромобилях, смартфонах, переносных электронных устройствах и сердечных насосах.

» МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС УВЕЛИЧИВАЕТ ДАЛЬНОСТЬ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ

ДРУГИЕ ТЕХНОЛОГИИ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ требуют точного размещения устройства на подставке или в держателе, очень близко к источнику зарядки (иногда непосредственно на нем). При этом источник способен заряжать только одно устройство с одной катушкой. Инженеры WiTricity обходят эти ограничения с помощью явления магнитного резонанса.

Их технология, «высокорезонансная беспроводная передача энергии», основана на использовании осциллирующих, изменяющихся во времени магнитных полей, которые возбуждаются переменным током, проходящим через индукционную катушку, выполняющую функцию источника энергии для зарядки. К этой катушке источника подключен усилитель мощности, управляющий мощностью и рабочей частотой магнитного поля.

В приемном устройстве, улавливающем магнитное поле, установлена другая катушка, настроенная на ту же частоту, что

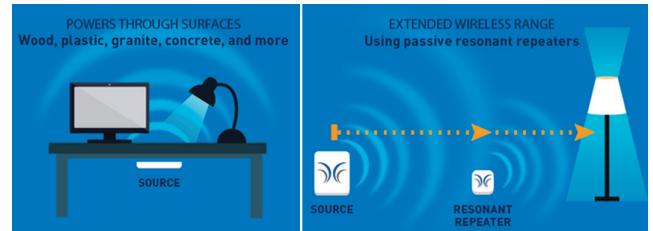
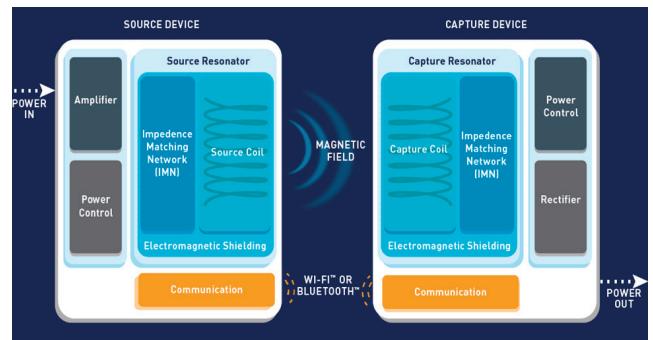


РИС. 1. Вверху: концепция технологии WiTricity — катушки, устройства, управляющие выходной мощностью, беспроводная связь между источником и приемными устройствами для обеспечения правильной регулировки выходной мощности. Внизу: технология позволяет заряжать устройства даже через поверхности из различных материалов (слева); увеличение дальности беспроводной передачи энергии с помощью резонансных повторителей (справа).

и источник (рис. 1). В приемнике магнитная энергия преобразуется обратно в переменный ток радиочастотного диапазона. После выпрямления и регулирования силовой электроникой этот ток можно использовать в качестве местного источника питания.

От других методов технология WiTricity отличается

использованием магнитного резонанса. Обе катушки настроены на одну и ту же резонансную частоту, поэтому катушка приемника способна захватывать большую часть энергии через магнитное поле с минимумом потерь. А для передачи энергии не требуется размещения источника и приемника вплотную или их тща-

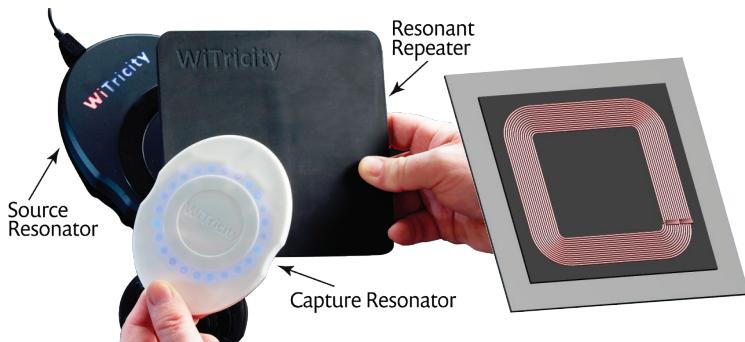


РИС. 2. Слева: резонатор приемника, резонансный повторитель и резонатор источника. В центре: резонатор источника WiTricity для применений, связанных с бытовой электроникой. Справа: Беспроводная зарядка электроавтомобиля, припаркованного над зарядной площадкой.

тельного позиционирования относительно друг друга. «Существенным преимуществом нашей технологии является гибкость в размещении устройств и возможность их перемещать. Вам не придется обеспечивать прямой контакт катушки приемника с источником. Например, когда вы ведете машину, нет необходимости устанавливать телефон в зарядное устройство. Достаточно положить его в расположенный рядом с приемным устройством подстаканник, — объяснил Андре Курс (Andre Kurs), сооснователь WiTricity. — При этом вы сможете заряжать все устройства одновременно, даже если их требования по электропитанию различаются».

Увеличить дальность беспроводной передачи энергии тоже достаточно просто: между источником и приемником можно разместить резонансные повторители, содержащие еще одну схему и катушку, которые позволяют ретранслировать энергию на большие расстояния (см. рис. 2).

Барьеры между источником и приемником (например, люди или бетонные стены) не препятствуют передаче энергии.

» МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ

ЧТОБЫ ОБЕСПЕЧИТЬ МАКСИМАЛЬНУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ работы катушек на общей резонансной частоте, Андре Курсу и его группе потребовалось учесть множество переменных параметров — количество витков и диаметр катушки, необходимая входная мощность. С самого начала проекта они полагались на компьютерное моделирование для проверки основных узлов и конструкций и для оптимизации системы. С помощью программной модели COMSOL Multiphysics® Андре Курс анализировал электромагнитное и тепловое поведение различных конфигураций катушки, что позволило быстро выполнять валидацию новых конструкций.

Одной из сложных задач оказалось обеспечение масштабируемости технологии для широкого спектра устройств: например для автомобиля и смартфона требуются совершенно различные конфигурации системы зарядки. «У этой технологии огромное множество вариантов применения. Ведь созда-

ние и валидация прототипов отнимают много времени и денег, а ошибки при разработке сильно отбрасывают процесс назад — на столь конкурентном рынке мы не могли себе этого позволить, — объяснил Курс. — Валидация конструкции в ПО COMSOL оказалась экономичным и быстрым подходом, который позволил нам оценить работоспособность макетов еще до создания прототипов».

Андре Курс создал модели с различными характеристиками для каждой задачи и добавил важные для нее электромагнитные компоненты: обмотки катушек, ферритовые сердечники особой формы и металлические поверхности для направления электромагнитного поля, экраны для защиты чувствительной электроники от влияния крупных объектов, которые могут иска-

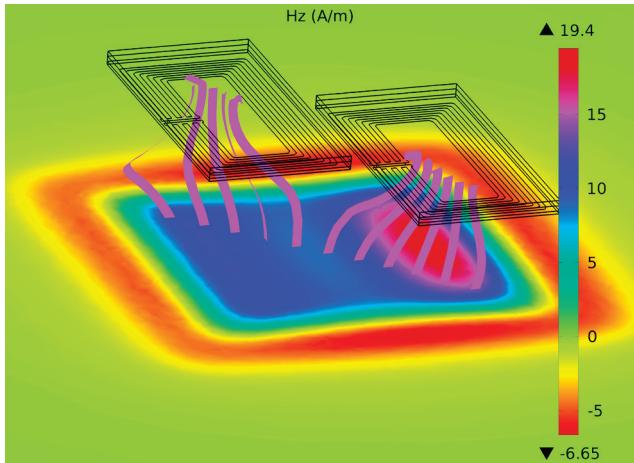
зить поле, такие как, например, шасси автомобиля.

Затем он провел мультифизическое исследование, чтобы проанализировать итоговые электромагнитные и тепловые характеристики в зависимости от мощности, потребляемой устройствами, размещения катушек и влияния возмущающих объектов (рис. 3, сверху).

На основании полученных результатов он определил параметры цепи, которые были позднее использованы при разработке электроники, а также спрогнозировал величины рассеиваемой мощности и тепловой нагрузки для различных компонентов (рис. 3, внизу). Специалисты группы определили приемлемые величины смещения катушек и зависимость уровня энергии от размеров, масс и тепловых ограничений и внесли соответствующие изменения в разработки. «Моде-

“ Валидация конструкции в среде COMSOL оказалась подходом, который сэкономил время и средства и позволил нам виртуально тестировать наши идеи еще до создания прототипов”,

— АНДРЕ КУРС, СОУЧРЕДИТЕЛЬ, WITRICITY.



Left: Surface loss (mW/cm²), Right: Core loss (mW/cm³),

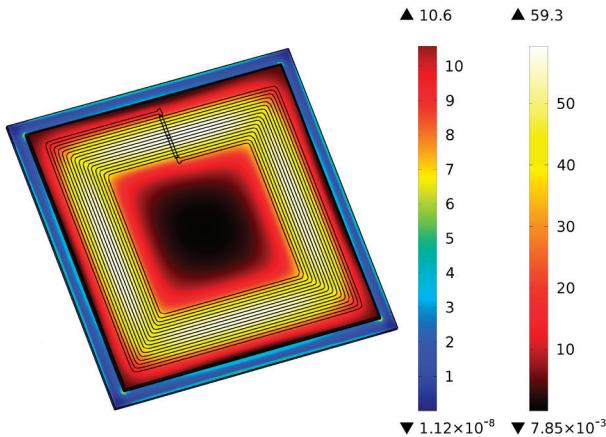


РИС. 3. Результаты моделирования: напряженность магнитного поля (вверху) и рассеянная мощность (внизу) в резонаторе источника для применений, связанных с бытовой электроникой.

лирование позволило нам оценить влияние отдельных явлений, изолировать которые в эксперименте было бы невозможно: например, рассеяния мощности и теплопередачи, — отметил Курс. — Гибкость COMSOL оказалась особенно ценной; мы создали пакет приложений для моделирования, с помощью которого любой наш инженер, даже не имея опыта работы с COMSOL, может быстро выполнять тестирование и валидацию различных конструкций, не вникая в работу модели в целом».

» БЕЗОПАСНОСТЬ НА ЛЮБОМ РАССТОЯНИИ

ТАКИЕ УСТРОЙСТВА обычно находятся рядом с пользователем или в непосредственном контакте с его телом, поэтому производители электроники обязаны соблюдать безопасные предельные уровни электромагнитного излучения приборов. Магнитные поля, посредством которых в технологии WiTricity осуществляется беспроводная передача энергии, достаточно слабы, однако каждое новое решение необходимо проверять на соответствие стандартам.

Стремясь обеспечить соблюдение требований к уровню излучения и к уровню нагрева тела, которые оно вызывает, группа разработала несколько моделей COMSOL, чтобы проанализировать воздействие устройства на биологические ткани, расположенные в непосредственной близости от устройства. В этих моделях электрическое поле рассчитывалось для рабочей частоты системы зарядки. В результате было подтверждено, что устройства соответствуют требованиям FCC с большим запасом (рис. 4).

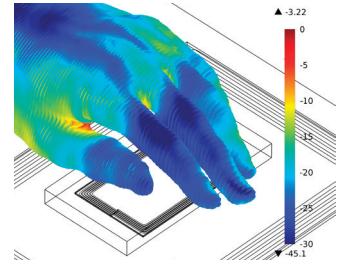


РИС. 4. Результаты моделирования в среде COMSOL: удельный коэффициент поглощения (SAR) для руки над заряжающимся мобильным телефоном. SAR является мерой поглощенной и преобразованной в тепло электромагнитной энергии. Результаты выражены в дБ относительно установленного FCC (Федеральное агентство по связи США) допустимого предела (которому соответствует значение 0).

» НОВЫЕ ГОРИЗОНТЫ БЕСПРОВОДНОЙ ЗАРЯДКИ

УСТРОЙСТВА WITRICITY, основанные на явлении магнитного резонанса, обеспечивают надежную беспроводную передачу энергии наряду с гибкостью и удобством при использовании. Это большой шаг вперед по сравнению с другими методами беспроводной зарядки. Моделирование, выполненное в среде COMSOL Multiphysics, помогло специалистам WiTricity оптимизировать свои устройства, повысить их эффективность и дальность действия до начала изготовления дорогих прототипов.

Компания WiTricity, являясь лидером в разработке передовой технологии беспроводной передачи энергии, входит в правление организации Alliance for Wireless Power (A4WP), которая призвана создать «глобальную экосистему беспроводных устройств» и разработать стандарты беспроводной зарядки. Другой член правления — компания Intel — лицензировала технологию WiTricity для разработки беспроводных настольных систем. A4WP — группа организаций, занимающихся новыми разработками, в кото-

рую входят ведущие компании, положившие начало новым представлениям о беспроводной энергии. Своей работой они приближают будущее, в котором обычные бытовые поверхности — письменные столы, держатели чашек и даже кухонные рабочие столы — станут зонами зарядки для электронных устройств, от которых мы так зависим. ☺



Андре Курс (Andre Kurs), соучредитель, WiTricity.

MEDTRONIC СОВЕРШЕНСТВУЕТ ТЕХНОЛОГИИ АБЛЯЦИИ С ПОМОЩЬЮ МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Новая технология предоставит врачам новые возможности планирования и проведения процедур абляции, а в итоге — поможет улучшить результаты лечения пациентов.

Автор: ГЭРИ ДАГАСТИН (GARY DAGASTINE)

АБЛЯЦИЕЙ НАЗЫВАЕТСЯ ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО электромагнитного излучения для разрушения опухолей мягких тканей. Этот метод существует уже несколько десятилетий, однако за последние годы его базовая технология была значительно улучшена.

Эталоном минимально инвазивного лечения опухолей долгое время оставалось уничтожение патологических тканей электрическим током. Этот процесс получил название термоабляции. Патологическая ткань разрушается путем нагрева. Энергия вносится посредством радиочастотного электромагнитного излучения с частотой 500 кГц, поэтому такие системы называются аппаратами радиочастотной термоабляции.

В последние годы на рынке появились устройства для микроволновой абляции. И они становятся все более популярными. На микроволновых частотах термоабляция осуществляется с помощью осциллирующих электромагнитных полей. Medtronic — одна из крупнейших мировых компаний, предлагающих медицин-

ские технологии и услуги, лидер в области технологий как радиочастотной, так и микроволновой термоабляции.

В системах этих двух типов энергия для абляции передается через один или несколько игльчатых зондов.

Последняя разработка Medtronic, система абляции Emprint™ с использованием технологии Thermosphere™, позволяет получить более прогнозируемые и повторяемые результаты, чем другие методы и устройства (рис. 1). Подобные

преимущества обусловлены возможностью точного управления электромагнитным полем с помощью технологии Thermosphere™ независимо от окружающей ткани.

» ПОВЫШЕНИЕ ПРОГНОЗИРУЕМОСТИ СОГЛАСНО ИССЛЕДОВАНИЯМ, врачи считают самой существенной проблемой абляции низкую прогнозируемость результатов. Ведь чем выше уровень прогнозируемости, тем легче специалисту составить безопасный и эффективный план процедур, который дает быстрые результаты.

Однако с учетом самой природы радиочастотной абляции гарантировать получение желаемых результатов сложно. Различные патологические ткани обладают разной электрической проводимостью, а значит, и неодинаковой восприимчивостью к радиочастотному излучению. Кроме того, когда температура опухоли приближается к 100 °С, вода начинает интенсивно испаряться, и электропроводность быстро падает. Это может затруднить достижение температур, достаточно высоких для разрушения клеток.

Технология микроволновой абляции стремится преодолеть эти ограничения за счет использования электромагнитного поля, излучаемого в ткань (рис. 2). Однако на практике на размер и форму электромагнитного поля влияют также тип ткани и испарение воды в ходе абляции.

Система абляции Emprint™ с использованием технологии Thermosphere™ обеспечивает большую прогнозируемость процедуры. С помощью этой системы врач может легко контролировать количество подводимой тепловой энергии, гибко управляя электромагнитным

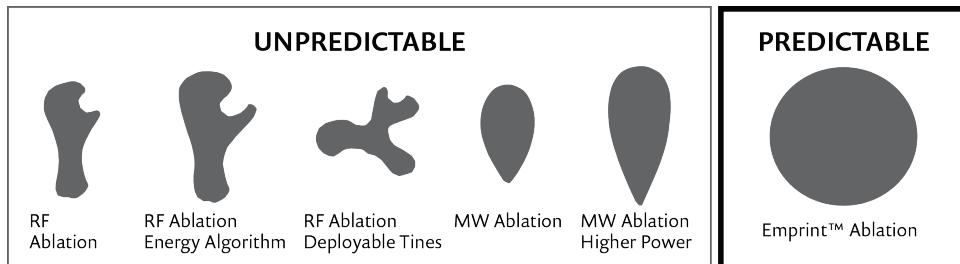


РИС. 1. Слева — области абляции неконтролируемой формы, которые могут возникать при использовании различных методов абляции. Справа — результат применения системы абляции Medtronic Emprint™ с использованием технологии Thermosphere™: предсказуемая сферическая область абляции независимо от расположения цели и типа ткани.

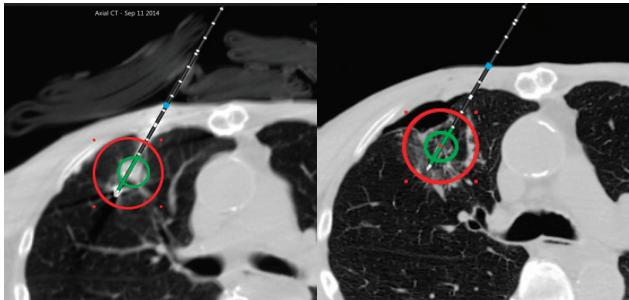


РИС. 2. На фотографии слева показано размещение абляционного зонда. Зеленым кругом отмечен очаг опухоли, красным — целевые границы области абляции. Справа — та же область после абляции.

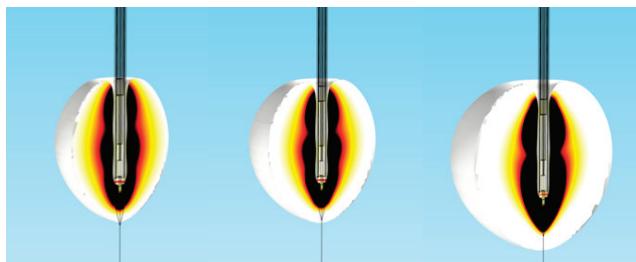


РИС. 3. Результаты, полученные с помощью моделирования в среде COMSOL®, — плотность рассеяния мощности или степень абляции, определяемая путем расчета термического повреждения. Антенна изначально хорошо согласуется с окружающей тканью, но характеристики согласования (в частности, диаграмма направленности) изменяются с течением времени из-за повышения температуры ткани в ходе процедуры (слева направо).

полем для различных тканей и температур. Такие возможности позволяют специалистам точно предсказывать границы и характеристики области абляции.

» МОНИТОРИНГ АБЛЯЦИИ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

«СЕГОДНЯ ВАЖНЕЙШЕЙ ЗАДАЧЕЙ является мониторинг абляции в реальном времени, — объяснил Кейси Ладтков (Casey Ladtchow), ведущий инженер отдела перспективных технологий в группе минимально инвазивных методов терапии (MITG) компании Medtronic. — к сожалению, пока врач не

может выполнять такое отслеживание. Если бы перед ними была точная картина происходящего в данный момент на протяжении всей процедуры, то это повысило бы эффективность абляционных методов лечения».

В этом отделе работают около 40 специалистов, занятых исследованиями в области оперативной онкологии. Их задача — создание процедурных решений, которые позволят снизить боль, вернуть здоровье и увеличить продолжительность жизни пациентов. Чтобы еще более повысить прогнозируемость и эффективность процедуры, для разра-

ботки новых абляционных зондов Кейси Ладтков и его группа применяют пакет COMSOL Multiphysics®.

Цель одного из проектов — оптимизировать устройство этих зондов таким образом, чтобы они могли формировать более точную область абляции и отслеживать ход процедуры в реальном времени с помощью радиометров.

Радиометры измеряют уровень электромагнитного излучения и позволяют составить картину распределения электромагнитного поля в пространстве. Группа Кейси Ладткова занимается встраиванием радиометров в зонды Medtronic, чтобы дать возможность врачам отслеживать состояние области абляции в реальном времени. Это позволит врачу при необходимости корректировать область абляции в ходе процедуры и обеспечить разрушение излучением только намеченных целевых тканей с минимальным воздействием на окружающие здоровые ткани.

Для моделирования зондов и лучшего понимания свойств и оптимизации характеристик, влияющих на процессы излучения и детектирования (кон-

троля), специалисты используют пакет COMSOL Multiphysics и его модуль «Радиочастоты». «Эффективность и точность систем микроволновой абляции зависят от множества изменяющихся факторов, одновременно действующих во многих физических областях. COMSOL® позволяет нам быстро и легко выполнять соответствующее сложное моделирование, понимать эти связанные эффекты и совершенствовать наше устройство», — рассказал Кейси Ладтков.

» МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК СРЕДСТВО БЫСТРОЙ И БЕЗОПАСНОЙ РАЗРАБОТКИ, ОПТИМИЗАЦИИ И ПРОТОТИПИРОВАНИЯ

ДЛЯ СТОЛЬ СЛОЖНОГО устройства, работа которого зависит от множества взаимосвязанных физических факторов, практически неприменим традиционный подход — разработка, изготовление и тестирование множества физических прототипов.

Поэтому для моделирования излучателя энергии и тестирования устройств со встроенным радиометрическим датчиком, группа воспользовалась программным пакетом COMSOL. Чтобы определить радиометрические характеристики в различных условиях (рис. 3), специалисты выполнили моделирование связанных тепловых и электромагнитных эффектов вокруг излучающего зонда.

Ладтков проанализировал теплопередачу в живых тканях с помощью уравнения нагрева биологической ткани, которое содержит слагаемое перфузии для учета прекращения кровотока после коагуляции ткани (рис. 4). Это помогло группе понять, как происходит теплопередача к клеткам вокруг опухоли, и спрогнозировать рас-

«Мульти-физическое моделирование открыло для нас возможности быстрой разработки, тестирования и оптимизации устройств. Без него все это было бы невозможно»,

— КЕЙСИ ЛАДТКОВ, ВЕДУЩИЙ ИНЖЕНЕР, MEDTRONIC

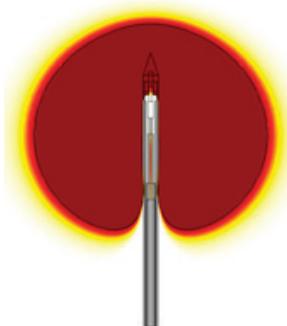


РИС. 4. График COMSOL — поперечное сечение прогнозируемой области абляции (прогнозируемое повреждение ткани). На основе этой информации специалисты корректируют уравнение бионагрева и изменяют таким образом условия перфузии в ткани. Красные области соответствуют коагулированной ткани, где перфузия отсутствует, белые области — ткани с нормальной перфузией. Теперь перфузия участвует в уравнении бионагрева только тогда, когда она действительно происходит, а значит, точность модели возросла.

пределение температуры, чтобы обеспечить эффективную и прогнозируемую передачу энергии.

Кейси Ладтков провел и другие исследования: анализ зависимости скорости реакций от температуры (чтобы понять размер области абляции); радиометрическое моделирование для определения количества энергии, поступающей в ткань и отражающейся обратно к излучателю; анализ динамики перехода жидкой фазы в газообразную (рис. 5). «Последний анализ был критически важен для понимания того, как будет выглядеть волновая картина. Ведь содержание воды в ткани влияет на длину волны и во многом определяет поведение радиомет-

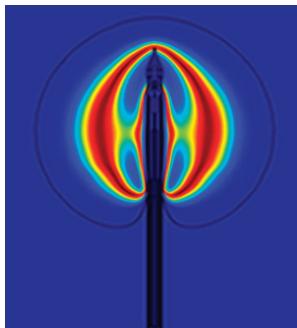


РИС. 5. Рассчитанные в COMSOL изменения теплоемкости ткани вокруг зонда. Основная причина изменений — фазовое изменение воды в этой ткани. Очень важно знать, в каких областях вода кипит, потому что длина волны микроволнового излучения в жидкой и в испаренной воде сильно различается.

тра, — объяснил ученый. — Создать такую модель в среде COMSOL достаточно просто».

Моделирование показало, что удлинение проксимальной излучающей секции антенны и укорочение дистальной излучающей секции позволит получить эффективный абляционный излучатель и эффективный детектор излучения. Эти исследования (рис. 6) помогли создать несколько прототипов абляционных излучателей со встроенным радиометром, а также получить показатели эффективности комбинированного зонда.

» ОТ НЕВОЗМОЖНОГО — К ВОЗМОЖНОМУ

«БЕЗ АНАЛИТИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ ПАКЕТА COMSOL мы просто не смогли бы провести достаточное число экспериментов, чтобы определить оптимальное устройство комбинированного излучателя и приемника. COMSOL помог нам понять, что некоторые конфигурации, которые нам бы

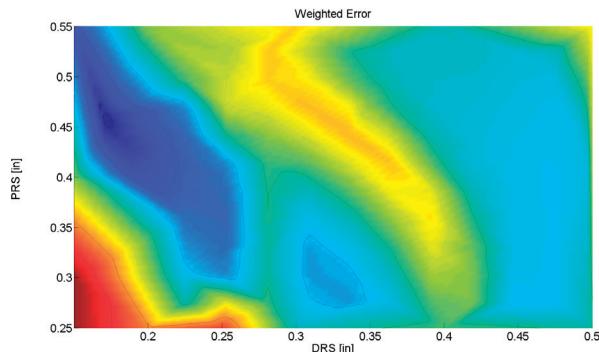


РИС. 6. График взвешенной ошибки в ПО COMSOL. Синим цветом отмечены области, в которых мощность отраженного абляционного излучения мала, и где качество приема сигнала радиометром — хорошее. Они соответствуют конфигурациям антенны, которая одновременно будет хорошим и абляционным устройством, и радиометром.

и в голову не пришло изучать, позволяют создать комбинированный прибор», — добавил Кейси Ладтков.

Его группа использует программное обеспечение COMSOL® в сочетании с пакетом MATLAB®. По словам исследователя, такая комбинация является мощным средством быстрой и удобной оптимизации сложных моделей с помощью комплексных алгоритмов. Кроме того, он надеется интегрировать Среду разработки приложений COMSOL Multiphysics в процессы моделирования. Это позволит группе создавать приложения для моделирования, с помо-

щью которых партнеры смогут проверять различные варианты устройств. Но право интеллектуальной собственности на модели будет защищено.

«Сейчас с помощью моделирования мы создаем такие абляционные устройства, которые позволяют врачам не только точно контролировать количество подводимой энергии, но и отслеживать процесс абляции в реальном времени, — рассказал Ладтков. — Мультифизическое моделирование открыло для нас возможности быстрой разработки, тестирования и оптимизации устройств, которых бы мы не имели в противном случае». ©



Слева направо: сотрудники Medtronic — Морган Хилл (Morgan Hill), Кейси Ладтков, Роберт Бенке (Robert Behnke).

ГРАФЕН ОТКРЫВАЕТ ДОРОГУ НОВОМУ ПОКОЛЕНИЮ ПЛАЗМОННЫХ УСТРОЙСТВ

Инструменты моделирования позволяют учитывать сложные физические явления двумерных материалов и плазмоники одновременно. Это может привести к созданию принципиально новых оптоэлектронных устройств.

Автор: **ДЕКСТЕР ДЖОНСОН (DEXTER JOHNSON)**

В 2004 ГОДУ ВПЕРВЫЕ БЫЛА УСПЕШНО СИНТЕЗИРОВАНА ПЛЕНКА ГРАФИТА толщиной в один атом. Полученное вещество назвали «графен». За прошедшее десятилетие графен нашел множество применений в самых различных областях, в том числе в фотоэнергетике, в аккумуляторах нового поколения и в электронике.

Благодаря многим своим полезным характеристикам — таким как электрическая проводимость и теплопроводность — графен изначально рассматривался как перспективный материал для электроники. В то же время его не менее привлекательные свойства, относящиеся к оптоэлектронике, зачастую оставались без внимания. Но вскоре стало очевидно, что графен обладает огромным потенциалом в качестве прозрачного проводящего электрода и может стать альтернативой обычно используемому оксиду индия и олова. Графен обладает сопоставимыми или даже лучшими оптоэлектронными характеристиками, высокой механической прочностью и гибкостью. Он может применяться и во многих других областях: например, в роли прозрачного проводника в сенсорных экранах и фотоэлектрических устройствах (см. рис. 1), в приборах типа «лаборатория на чипе» для обнаружения вирусов или белков, в улучшенных приборах ночного видения, в приборах для построения

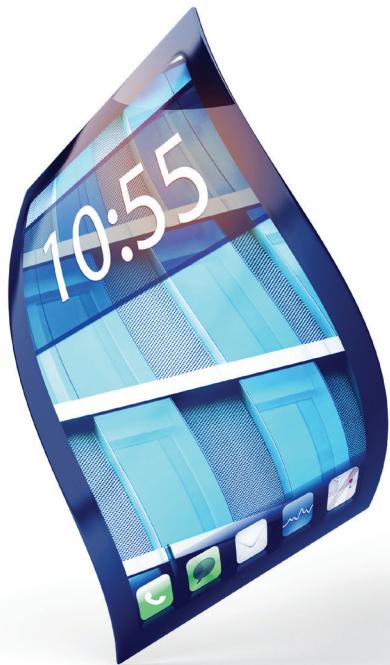


РИС. 1. Создание более гибких и легких экранов ноутбуков и смартфонов — лишь одно из множества применений графена. В числе других — энергетика, обработка данных, техника, медицинские технологии.

изображений в среднем инфракрасном диапазоне и в солнечных батареях.

» ПРИМЕНЕНИЕ ГРАФЕНА В ПЛАЗМОНИКЕ

ВОЗМОЖНОСТИ ГРАФЕНА проявились особенно ярко в фотонике, когда она используется в сочетании с плазмоникой. Плазмоника — это область фотоники, которая начала развиваться в связи с необходимостью непрерывного исследования свойств и применений света в малых масштабах пространства.

Обычно фотоника имеет дело со структурами размером порядка микрометров. Подача, или, можно сказать, «втискивание», света в такие малые объемы связано с принципиальными трудностями, ведь у света существует такая характеристика, как «дифракционный предел». Плазмоника помогает решить эту задачу и локализовать световое излучение даже в объемах наномасштаба.

Это достигается за счет связи падающего света с колебаниями электронов, известными под названием плазмоны. Отсюда и родилось название «плазмоника». Сегодня плазмоника является важной, динамично развивающейся областью фотоники, в которой изучаются возможности эффективного возбуждения, контроля и применения плазмонов.

» ПРИМЕНЕНИЕ ГРАФЕНА В ПЛАЗМОНИКЕ ВЕДЕТ К СОЗДАНИЮ УСТРОЙСТВ НА ПРАКТИКЕ

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ вычислительной нанофотоники, проведенные под руководством Александра Кильдишева (адъюнкт-профессора в области электрической и компьютерной инженерии) в Центре нанотехнологий Берка, Университет Пердью, послужили основой для применения графена в плазмонике, что способствовало созданию практических оптоэлектронных устройств.

Александр Кильдишев и его коллеги работали над фундаментальной проблемой, возникающей при исследованиях графена: в настоящее время трудно изготовить высококачественные графеновые пленки большой площади. В ожидании разработки улучшенных методов производства графена исследователи разрабатывают и оптимизируют графеновые устройства с помощью средств моделирования.

На основе моделирования и экспериментов группа Кильдишева продемонстриро-

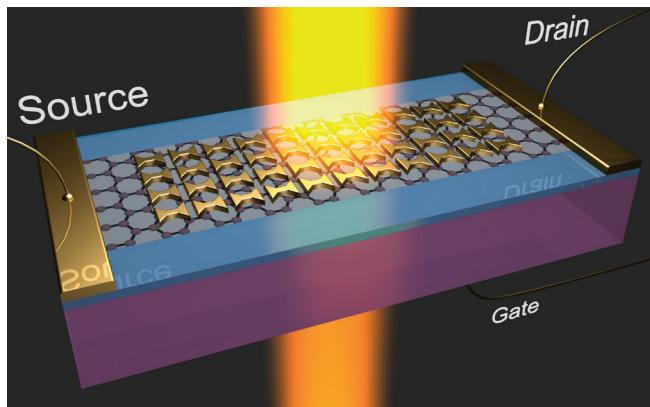


РИС. 2. Устройство плазмонных антенн на основе резонанса Фано, выполненных на однослойном листе графена и оптимизированных с использованием ПО COMSOL® и его модуля Волновая оптика для получения резонанса при длине волны 2 мкм. Возможность настройки устройства была подтверждена в экспериментах, в которых управление пропусканием осуществлялось с использованием гелевого ионного электролита².

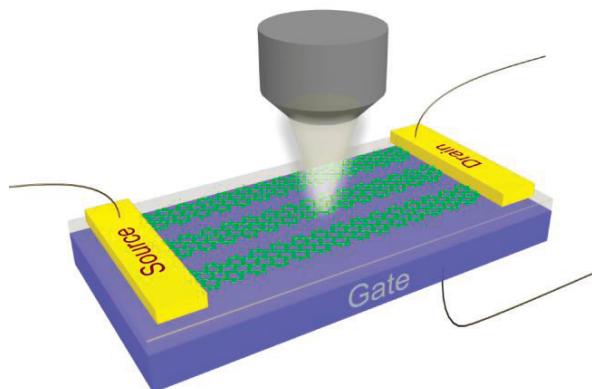


РИС. 3. Трехмерная иллюстрация экспериментальной установки, использованной для исследования плазмонного резонанса в графеновых нанолентах, который был смоделирован в среде COMSOL Multiphysics® с использованием подхода с поверхностными токами. Ориентация решетки графеновых нанолент выбрана только для иллюстрации, масштаб не соблюден.

вала регулируемое демпфирование плазмонных резонансов в нанопериодической решетке с помощью графена. Это важно для разработки регулируемых фотонных устройств в среднем инфракрасном диапазоне.¹ Основные резонансные колебания широкого спектра молекул относятся именно к среднему ИК-диапазону. Поэтому так важно разработать настраиваемые плазмонные устройства, способные детектировать колебания данного диапазона и строить соответствующие изображения.

С другой стороны, приближение к коротковолновому инфракрасному диапазону крайне важно для задач телекоммуникации и обработки изображений. Исследовательская группа продемонстрировала эффективное динамическое управление резонансами Фано в гибридных графено-металлических плазмонных структурах на длинах волн ближнего инфракрасного диапазона. Резонансы Фано наблюдаются при прохождении излучения через резонансные оптические системы, связанные особым образом. В настоящее время исследователи ищут применение резонансам Фано в оптических фильтрах, датчиках и модуляторах (см. рис. 2).

По мнению профессора Кильдишева, использование возможностей прогностического моделирования COMSOL Multiphysics® — важный этап разработки настраиваемых элементов для следующего поколения расположенных на кристалле

плазмонных и гибридных нанопериодических устройств, таких как датчики и фотодетекторы. Фотодетекторы могут найти применение в устройствах для регистрации инфракрасного электромагнитного излучения, для многоцветного ночного видения и для тепловидения. Другая потенциальная область их применения — биосенсоры: резонансные линии плазмонных элементов настраиваются таким образом, чтобы они соответствовали резонансам спектральных оптических характеристик вирусов или белков.

В своей работе исследователи института Пердью воспользовались сочетанием уникальных свойств графена с плазмонными нанопериодическими структурами для модулирования оптических свойств антенны. Наличие настраиваемого резонансного элемента на оптическом пути в оптоэлектронике играет такую же важную роль, как и наличие транзистора в электрической цепи.

«Использование наноструктурированного графена с электрическим управлением отпираемостью (см. рис. 3) позволило модулировать поток света в пространстве с недоступным ранее пространственным разрешением, — рассказал доктор Нареш Эмани (Naresh Emani), ранее докторант Кильдишева, а в настоящее время сотрудник института DSI, Сингапур. — Уменьшенная размерность и полуметаллические свойства графеновых плазмонных элементов открывают для нас в числе прочих и очень ценную

возможность электрической настройки. Обычная плазмоника металлов не способна обеспечить такие важные функциональные возможности».

Плазмонные устройства на основе благородных металлов не позволяют столь тонко управлять возможностями электрической настройки. В зоне проводимости благородных металлов находится множество электронов, и их электропроводность не так просто модулировать. Но графен — управляемый полуметалл, и в чистом состоянии не содержит электронов в зоне проводимости. Концентрацией электронов в этом материале, а значит, и его электрической проводимостью, можно управлять с помощью химических методов, модулировать ее электрическими или даже оптическими воздействиями.

» РОЛЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ — важный инструмент в арсенале исследователей, позволяющий оптимизировать устройства без сложности и значительных затрат, связанных с изготовлением прототипов наноструктур.

«Математическое моделирование намного дешевле экспериментов. Оно позволяет оценить результат с помощью меньшего числа прототипов, прогнозировать результаты и оптимизировать параметры устройства, чтобы получить нужные характеристики», — объяснил Александр Кильдишев.

Качество графеновых листов непостоянно, поэтому тесная связь между численными результатами и экспериментами критически важна для понимания влияния всех переменных. «Чаще всего мы можем изучить физику процессов путем, подгоняя параметры моделей под результаты экспериментов, — пояснил Александр Кильдишев. — Проверенная математическая модель всегда облегчает понимание и интерпретацию результатов. Разобравшись в явлении с помощью математической модели, мы можем понять механизм в целом и применить эти знания в решении других задач».

Безусловно, математическое моделирование имеет свои ограничения. «К сожалению, многие задачи не имеют аналитического решения. Тогда приходится прибегать к другим вариантам», — добавил ученый.

По словам Людмилы Прокопьевой (специалиста по высокопроизводительным вычислениям в научной группе Кильдишева), неопределимую роль в решении этих задач играют численные методы. Качественные средства моделирования позволяют проводить стабильные, точные и быстрые расчеты. Высокопроизводительные вычислительные системы часто являются необходимым инструментом, особенно при полностью трехмерном (3D) моделировании устройств с наноструктурами. «Мультифизическая и много-масштабная природа задач вычислительной нанофотоники требует мощных средств моделирования», — отметил профессор Кильдишев.

Универсального средства моделирования не существует. «У нас есть множество собственных программ и коммерческих решений, и мы постоянно ищем новые способы моделировать новые, интересные физические явления, — рассказал ученый. — Пакет COMSOL Multiphysics мы используем вот уже около десяти лет. Его ключевое преимущество — гибкость в сочетании с уникальным, не имеющим себе равных механизмом вычислений на основе уравнений».

И добавил: «Пользователь COMSOL может объединять несколько интерфейсов физик на общей сетке или даже на различных сетках. Кроме того, мы можем связать решатели со сложными функциями свойств материала. К примеру, мои коллеги разработали в MATLAB® несколько слож-

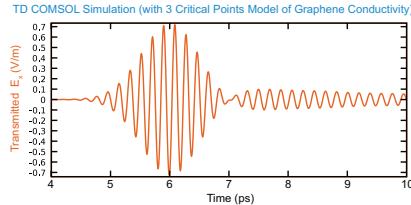


РИС. 4. Зависящее от времени электрическое поле колоколообразного импульса, прошедшего через решетку графеновых нанолент.

ных диэлектрических моделей графена, и их удалось бесшовно интегрировать в систему с использованием программного пакета COMSOL®. Некоторые из этих функций диэлектрических характеристик не позволяют обрабатывать параметры в явном виде — как, например, арифметические операции или таблицы. Кроме того, нам удалось учесть нелинейные эффекты, связать их с анализом теплопередачи, добавить квантовые излучатели и сделать многое другое».

«Еще одно преимущество COMSOL — встроенная возможность моделирования двумерных материалов при исследовании поверхностной проводимости (т. е. поверхностного тока), — отметила Людмила Прокопьева. — Толщина графенового слоя — 1 атом, поэтому он ведет себя как двумерный материал, однако многим исследователям приходится искусственно вводить толщину и пользоваться трехмерными моделями, потому что двумерные не поддерживаются их программным обеспечением. Использование трехмерных моделей вносит искажения, не имеющие отношения к физике, неопределенность в процедурах оптимизации, а также существенно усложняет расчеты».

В ожидании отработки технологий производства ученые университета Пердью применили теоретическую модель оптической проводимости графена и выполнили моделирование отклика устройства в среде COMSOL, чтобы численно исследовать характеристики системы (см. рис. 2 и 4). «Нам очень повезло — по соседству с нами в Центре нанотехнологий Блека в университете Пердью разместились группы экспериментаторов профессоров Йонг Чен (Yong Chen), Александры Болтасевой (Alexandra Boltasheva), Влада Шалаева (Vlad Shalaev),

Ашрафа Алама (Ashraf Alam), Дэвида Джейнса (David Janes) и Гари Чен (Gary Chen), и мы смогли работать вместе. Сотрудничество с группами Теда Норриса (Ted Norris) и Винода Менона (Vinod Menon) из центра C-PHOM NSF MRSEC также сыграло важную роль. Экспериментальные исследования ориентированы на изучение множества новейших применений графена, включая инфракрасные датчики, гибридные фотоэлектрические электроды и даже другие двумерные материалы, поэтому они открывают отличные возможности для проверки наших новых методов моделирования. Такие исследования обеспечивают незаменимую обратную связь из сферы производства и оптической оценки реальных наноструктур на основе графена».

» ПЕРСПЕКТИВЫ ДЛЯ КВАНТОВОЙ ОПТИКИ, ПРОИЗВОДСТВА УЛУЧШЕННЫХ ПРИБОРОВ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ И ГИБКИХ СЕНСОРНЫХ ЭКРАНОВ УЧЕНЫЕ УНИВЕРСИТЕТА ПЕРДЬЮ

продолжают свои работы по моделированию, стремясь понять и научиться прогнозировать поведение графена, чтобы его можно было использовать в фотоэлектрических устройствах, оптических модуляторах и, когда-нибудь, даже в гибких сенсорных экранах. Они стремятся создать графеновые наноленты, которые позволят начать производство прототипов устройств для модуляции света^{3,4}.

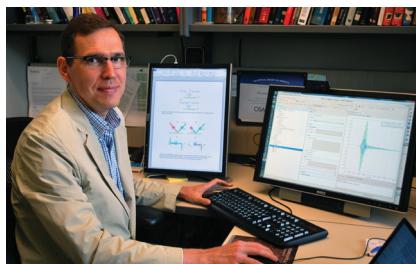
«Генерация коротких импульсов света и их изменение очень важны для построения изображений и детектирования излучения, — объяснил Александр Кильдишев. — Современные устройства с такими возможностями в среднем инфракрасном диапазоне довольно громоздки и не поддерживают возможность настройки. Мы стремимся создать прототип устройства, которое будет динамически изменять частотный спектр входящего оптического импульса или светового луча. Это откроет новые возможности повышения чувствительности для приборов ночного видения и для построения изображений в среднем инфракрасном диапазоне (тепловидение)».

Долгосрочным проектом отдела является изучение плазмонных свойств графена в режиме квантовой оптики. Профессор Кильдишев и его коллеги считают, что режим квантовой оптики станет следу-

“Еще одно достоинство COMSOL — встроенная возможность моделирования двумерных материалов в терминах поверхностного тока”,

— ЛЮДМИЛА ПРОКОПЬЕВА (LUDMILA PROKOPEVA), СПЕЦИАЛИСТ ПО ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫМ ВЫЧИСЛЕНИЯМ, ЦЕНТР НАНОТЕХНОЛОГИЙ БЕРКА.

ющим рубежом науки о свете, а сегодня он недостаточно исследован в среднем инфракрасном диапазоне. «Квантовые ямы в полупроводниках обладают интересными свойствами, однако пока они наблюдаются только при низких температурах, — объяснил ученый. — Если бы мы решили некоторые задачи в исследовании графенов, то смогли бы создавать в полупроводниках квантовые ямы с уникальными характеристиками. Это позволило бы существенно уменьшить размер многих устройств». Будущее сулит невиданные ранее перспективы, и ученые продолжают свою работу на переднем крае науки, где остается еще много неизведанного. ©



Александр Кильдишев, адъюнкт-профессор, Центр нанотехнологий Берка, Университет Пердью.

Литература

- 1 N. K. Emani et al., *Nano Lett.* 12, 5202–5206 (2012).
- 2 N. K. Emani et al., *Nano Lett.* 14, 78–82 (2014).
- 3 D. Wang et al., “Plasmon Resonance in Single- and Double-layer CVD Graphene Nanoribbons,” in *CLEO: 2015*, p. FTu1E.3.
- 4 L. Prokopeva and A. V. Kildishev, “Time Domain Modeling of Tunable Graphene-Based Pulse-Shaping Device (invited),” in *ACES* 2014.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРАФЕНА

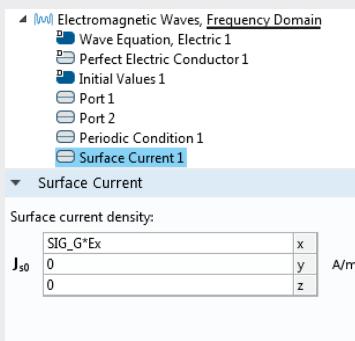
Автор: ЭНДРЮ СТРИКВЕРДА (ANDREW STRIKWERDA)

КАКОЙ СПОСОБ моделирования графена является лучшим? Если говорить точнее, то как же следует моделировать графен — в виде двумерного слоя или как трехмерный материал с очень малой толщиной? Многие исследователи предпочитают второй способ только потому, что их система численного моделирования не поддерживает других вариантов. Программное обеспечение COMSOL Multiphysics® позволяет воспользоваться любым из этих двух методов. В статье рассказано, что профессор Кильдишев и его коллеги обнаружили, что моделирование графена как двумерного материала позволяет добиться лучшего совпадения с результатами экспериментов. Рассмотрим реализацию этой функции в пакете COMSOL®.

Согласно закону Ома в частотной области плотность тока равна произведению удельной проводимости среды и напряженности электрического поля:

$$J = \sigma E$$

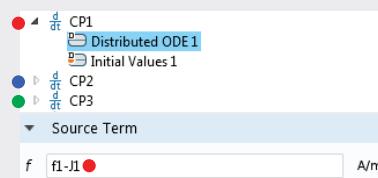
В среде COMSOL Multiphysics эту формулу можно реализовать в двумерной модели с помощью граничного условия Surface Current (Поверхностный ток). В нем индуцированный ток выражается, согласно закону Ома, как произведение удельной проводимости графена (вычисляемой, например, на основе приближения случайных фаз) и касательной составляющей напряженности электрического поля.



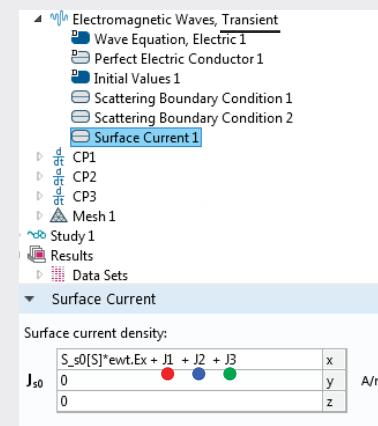
Для моделей во временной области рассчитать необходимую плотность тока может оказаться несколько сложнее, поскольку в этом случае в законе Ома фигурирует свертка напряженности электрического поля и удельной проводимости:

$$J(t) = \int_{-\infty}^t \sigma(t-\tau)E(\tau)d\tau$$

Чтобы реализовать это в программном пакете COMSOL (см. рис. 4), группа профессора Кильдишева воспользовалась приближением Паде для зависящей от частоты оптической проводимости графена. Затем они применили преобразование Фурье к членам ряда Паде и получили уравнения в частных производных второго порядка по времени. Эти уравнения можно решить в ПО COMSOL.



Решения данных уравнений, соответствующие вкладам в зависящий от времени поверхностный ток, можно связать с граничным условием Поверхностный ток.



Если вас интересует моделирование графена, посмотрите вебинар Александра Кильдишева на странице comsol.ru/webinars и скачайте его модели COMSOL со страницы comsol.ru/community/exchange/361.

ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ОПТИМИЗАЦИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ И УСКОРЕНИЮ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ

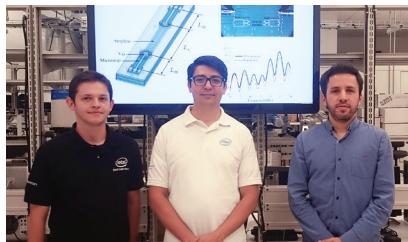
Инновационные методы оптимизации, объединяющие алгоритмы отображения пространств параметров и электромагнитное моделирование, делают возможным повышение скорости передачи и целостности сигналов внутри устройств. Быстрые методы моделирования позволяют как можно скорее начать разработку новейших технологий высокоскоростных межкомпонентных соединений.

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

КОМПАНИЯ INTEL прочно удерживает лидерские позиции в производстве электроники и компьютерных устройств. Конечно, ее исследователи и инженеры активно пользуются мощными вычислительными кластерами для моделирования и оптимизации своих разработок. Но при создании новейших высокоскоростных межкомпонентных соединений в электронных устройствах им также помогают программные средства мультифизического моделирования и нестандартные методы оптимизации, разработанные в Центре разработки Intel в г. Гвадалахара, Мексика.

В качестве примера рассмотрим печатные платы. Печатные платы — главный конструктивный элемент практически любого электронного устройства: от карманных компьютеров и телефонов до передовых спутниковых систем связи. В печатных платах используется множество высокоскоростных межкомпонентных соединений. Они предназначены для обмена электронными сигналами между компонентами, установленными на поверхности платы. На рис. 1 показан экспериментальный образец печатной платы, где измерительные щупы подключены к поверхностным ленточным проводникам на обоих концах внутреннего соединения.

Специалисты стремятся сделать электронные устройства максимально компактными, что требует и уменьшения внутренних межкомпонентных соединений. Поэтому на компьютерную оптимизацию



Инженеры Гвадалахарского центра разработки Intel, справа налево: Хуан Сервантес-Гонзалес (Juan C. Cervantes-Gonzalez), Карлос Лопес (Carlos A. Lopez) и Исаак Фариас-Камачо (Isaac G. Farias-Camacho).

таких соединений, призванных повысить скорость передачи и целостности сигнала, необходимо все больше времени.

Чем выше частота идущего через проводник сигнала, т. е. скорость передачи информации, тем больше мощности будет потребляться. Геометрию и материалы внутренних межкомпонентных соединений необходимо модернизировать, чтобы свести к минимуму потребление энергии и предотвратить потерю сигнала в условиях данной задачи. Это особенно важно для печатных плат, учитывая широкий спектр их применения. «При оптимизации конструкции внутренних межкомпонентных соединений очень важно использовать моделирование, для которого требуется создание точных моделей, отражающих характеристики существенных взаимосвязей в сложных трехмерных структурах, — объяснил Хуан Сервантес-Гонзалес (Juan C. Cervantes-González), инженер Intel. —

Чтобы еще более ускорить моделирование электромагнитных процессов во внутренних межкомпонентных соединениях, мы воспользовались алгоритмом оптимизации на основе отображения пространств параметров и подтвердили его применимость в данном случае. Этот оптимизированный подход к моделированию помог значительно ускорить как разработку устройств, так и выпуск на рынок новейших технологий высокоскоростных межкомпонентных соединений».

» МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ МЕЖКОМПОНЕНТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

ПОЛНОВОЛНОВОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ необходимо для моделирования распространения сигнала в межкомпонентных соединениях, работающих на высоких частотах. Моделирование, в ходе которого выполняется решение полной системы уравнений Максвелла без упрощающих предположений, позволяет точно учесть существенные электромагнитные взаимосвязи и рассогласование полных сопротивлений в сложных трехмерных структурах. Это важные факторы, которые обуславливают появление переходных помех и отражений, способных нарушить целостность сигналов.

С помощью программного обеспечения COMSOL Multiphysics® инженеры Intel разработали модель линии несимметричного межкомпонентного соединения в структуре печатной платы. Поперечное сечение геометрии модели и оптимизируемые параметры показаны на рис. 2.

Несимметричные соединения позволяют обеспечить высокую скорость передачи сигналов и занимают меньше места

«Этот оптимизированный подход к моделированию помог значительно ускорить как разработку устройств, так и выпуск на рынок новейших технологий высокоскоростных межкомпонентных соединений»,

— ХУАН СЕРВАНТЕС-ГОНСАЛЕС, ИНЖЕНЕР, INTEL

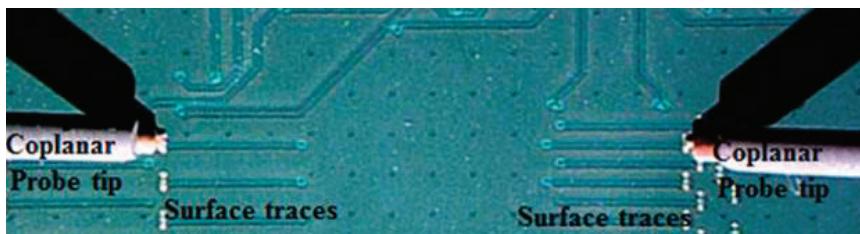


РИС. 1. Экспериментальный образец печатной платы Intel. Показаны внутренние межкомпонентные соединения.

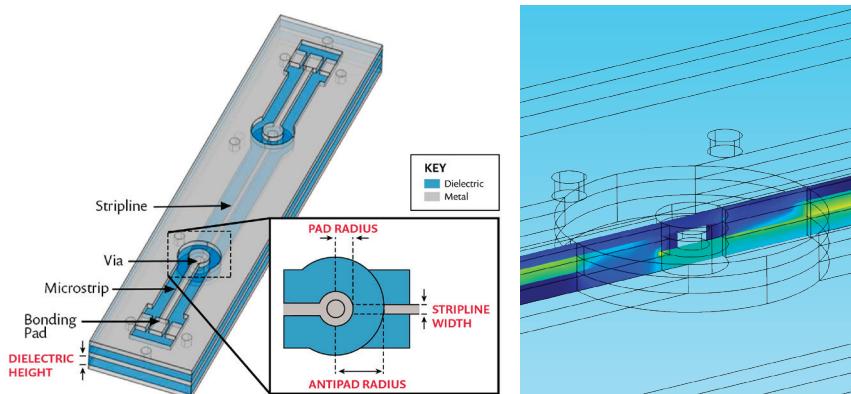


РИС. 2. Слева: геометрия модели несимметричного межкомпонентного соединения в COMSOL Multiphysics®. Параметры, выделенные красным, оптимизируются с помощью моделирования. Справа: распределение электрического поля в моделируемом внутреннем межкомпонентном соединении.

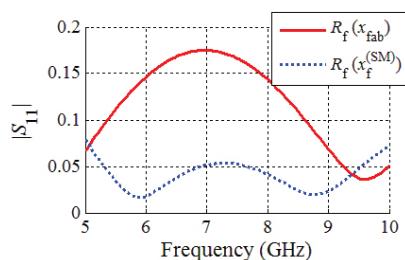


РИС. 3. Величина отраженного сигнала ($|S_{11}|$), полученная путем решения точной модели. Для решения, полученного с использованием оптимизации на основе отображения пространств параметров (синяя кривая), наблюдается существенно меньшее отражение, чем для решения на основе расчетных параметров изготовленного прототипа (красная кривая).

в конструкции электронного устройства, поэтому их часто используют в приборах с плотным размещением компонентов. Сигнал распространяется через межкомпонентное соединение по металлическим микрополосковым линиям и симметричным полосковым линиям с двумя заземленными проводящими пластинами, которые разделены диэлектрическим материалом. По вертикали сигнал распростра-

няется через межслойные переходы. Даже в обычных печатных платах он зачастую преодолевает более 10 слоев диэлектрика и металла, поэтому именно от межслойных переходов во многом зависит рассогласование полных сопротивлений.

В COMSOL®, чтобы оптимизировать геометрические параметры прототипа для минимизации рассогласования полных сопротивлений и возникающего отражения сигнала либо потерь на отражение, применяют полноволновое электромагнитное моделирование. Полученное путем моделирования распределение электромагнитного поля в несимметричном межкомпонентном соединении показано на рис. 2 справа.

» ОПТИМИЗАЦИЯ МЕЖКОМПОНЕНТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ НА ОТРАЖЕНИЕ

СТРЕМЯСЬ ОПТИМИЗИРОВАТЬ КОНСТРУКЦИЮ высокоскоростных внутренних межкомпонентных соединений и минимизировать величину отраженного сигнала в диапазоне частот, специалисты выполнили моделирование на высокопроизводительном сервере с двумя ЦП Intel® Xeon® X5670, 2,93 ГГц, и 160 Гб ОЗУ. Чтобы дополнительно ускорить моделирование, был использован алгоритм оптимизации на

основе отображения пространств параметров на базе метода Бройдена.

Применение способа отображения пространств параметров для электромагнитного моделирования требует расчета в среде COMSOL двух отдельных моделей межкомпонентного соединения. Первая — «грубая» модель, двумерное упрощение геометрии на рис. 2, в которой не учитываются электромагнитные потери. Она основана на очень крупной сетке и служит для быстрого получения результатов. Вторая — уточненная модель с той же топологией, однако полностью отражающая 3D-геометрию, показанную на рис. 2. В модели использовалась значительно более мелкая сетка. Расчет потребовал больше времени, но позволил получить значительно более точный результат.

Вначале с помощью стандартных методов оптимизации определялся ответный сигнал для оптимальной двумерной модели. Это важный этап, позволяющий сократить общее время вычислений. Задачей алгоритма отображения пространств параметров, реализованного в программном пакете MATLAB®, было отыскание таких параметров трехмерной модели, которые приближали бы ее ответный сигнал к ответному сигналу оптимальной двумерной модели. Этот метод позволил оптимизировать параметры конструкции соединений всего за 4 итерации. Результаты на рис. 3 были получены путем решения полной трехмерной модели. Величина отраженного сигнала в оптимизированной конструкции существенно меньше, чем в исходном изготовленном прототипе межкомпонентного соединения. «Сочетание полноволнового электромагнитного моделирования и оптимизации путем отображения пространств параметров помогло разработать значительно более эффективную конструкцию межкомпонентного соединения с меньшими потерями на отражение и сделать это намного быстрее, чем если бы мы изготавливали и тестировали множество прототипов», — прокомментировал Хуан Сервантес.

В исходной модели рассматривалось только распространение электромагнитной волны для проверки метода оптимизации на основе отображения пространств параметров. Однако в полностью взаимосвязанные мультифизические модели могут быть включены также процессы теплопередачи и механики твердого тела, что откроет новые, нестандартные возможности разработки. ©

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ БУДУТ РАБОТАТЬ ДОЛЬШЕ

С помощью экспериментальных тестов и мультифизического моделирования специалисты ABB Semiconductors создали усовершенствованные модули на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором (модули БТИЗ, англ. IGBT). Такие модули применяются в электрических компонентах большой мощности для продления срока эксплуатации устройств.

Автор: **ДЕКСТЕР ДЖОНСОН**

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ большой мощности локомотивов должны выдерживать огромные перегрузки, которые неизбежно возникают в условиях высоких напряжений и токов. Основа этих электрических систем — биполярные транзисторы с изолированным затвором (БТИЗ), электронные переключатели, применяемые в силовых блоках локомотивных систем благодаря своей высокой эффективности и способности быстро переключаться. Во время движения состава силовые модули на основе БТИЗ подвергаются повторяющемуся усталостному электрическому, тепловому и механическому воздействию, которое может привести к ухудшению характеристик модуля и затем к отказу.

«Обычно тяговые электродвигатели локомотивов рассчитаны на эксплуатацию в условиях интенсивных нагрузок в течение 30 лет», — рассказал Самуэль Хартманн (Samuel Hartmann), ведущий инженер научно-исследовательского отдела ABB Semiconductors в городе Ленцбург, Швейцария. Если модули на основе БТИЗ изнашиваются до окончания срока службы тягового электродвигателя, их необходимо заменить. Чтобы соблюсти требования по обеспечению большего срока службы тягового электродвигателя и повысить надежность этих систем, Хартманн и его коллеги воспользовались компьютерным моделированием. Это помогло им лучше понять, как можно повысить устойчивость модулей



РИС. 1. Силовой модуль ABB HiPak. Номинальное запирающее напряжение — 6500 В, номинальный ток — 750 А.

БТИЗ к нагрузкам с циклическим изменением мощности.

«Наша группа ищет способы улучшения характеристик силовых модулей ABB HiPak», — рассказал Хартманн (см. рис. 1). — Каждый модуль состоит из множества параллельно соединенных чипов БТИЗ. Включенный чип способен пропускать очень большой ток, выключенный — выдерживать очень высокое напряжение». Эти модули применяются и в других устройствах: например, в промышленных приводах и системах возобновляемой энергии.

«В процессе эксплуатации силовые модули локомотива на основе БТИЗ подвергаются воздействию высоких температур, а значит, соединения различных компонентов под действием термомеха-

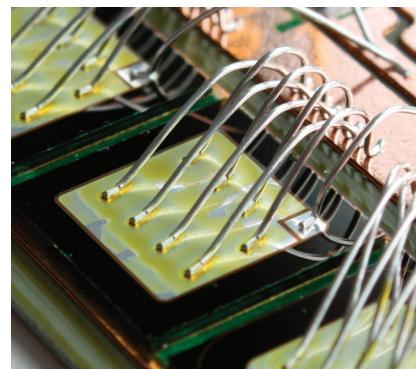
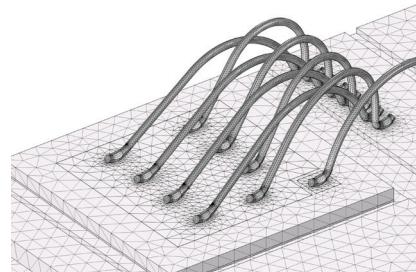


РИС. 2. Вверху: Сетчатая программная модель COMSOL® для эталонного размещения проводов. Внизу: Фотография эталонного эмиттера.

нического напряжения могут деградировать», — объяснил Хартманн. — Когда самое слабое соединение разрушается и провод отсоединяется от эмиттера,

остальным проводам, соединяющим полупроводниковое устройство с его корпусом, приходится выдерживать воздействие тока возросшей силы. В итоге термомеханическое напряжение в остальных креплениях возрастает, и возникает цепная реакция сбоев. Если же сделать самое слабое соединение более надежным, то увеличится и срок службы всего устрой-

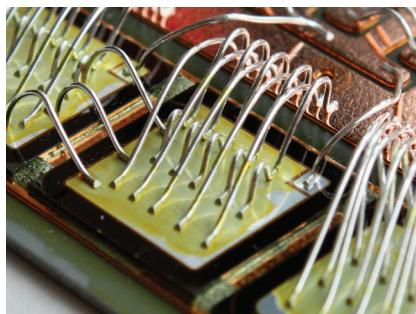
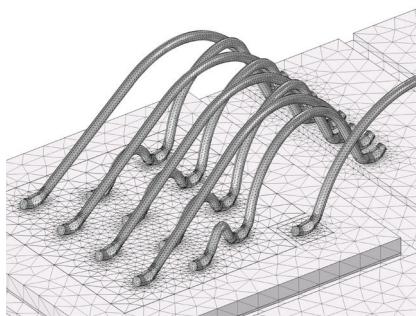


РИС. 3. Вверху: Сетка модели стежкового крепления проводов. Внизу: фотография стежкового крепления, которое теперь применяется в некоторых силовых модулях HiPak.

ства». Повышая срок службы силового модуля HiPak, АВВ сможет уменьшить количество модулей, необходимое для работы электродвигателя в течение 30 лет, а значит, сэкономят деньги и время на ремонт.

» МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОМОГАЕТ ПОНЯТЬ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

СИЛОВЫЕ МОДУЛИ HIPAK ОТ АВВ обычно состоят из основания, печатных плат, БТИЗ и диодных чипов, проводных соединений и концевых выводов. Работая над тем, как продлить срок службы силового модуля, Хартманн изучил несколько способов повысить надежность проводных соединений между монтажной платой и контактной площадкой эмиттера.

«Мы рассмотрели два способа улучшить устройство, — рассказал он. — В одном случае были проанализированы альтернативные способы крепления проводов к эмиттеру: мы хотели проверить, может ли стежковое крепление проводов предотвратить деградацию компонентов и увеличить срок службы устройства». Фотографии устройства и сетчатых моделей для обычно используемой (эталонной) системы проводочных соединений показаны на рис 2, схема со стежковыми соединениями — на рис. 3. «Во втором случае мы использовали новые способы соединения, чтобы создать буфер для поглощения напряжений между кремниевым чипом эмиттера и алюминиевыми проводами, — добавил Хартманн. — Коэффициент теплового расширения буфера напряжения занимает место между значениями коэф-

“ Опытным путем мы изучили несколько вариантов подсоединения проводочных выводов и применили мультифизическое моделирование, чтобы понять, почему один вариант лучше другого”,

— САМУЭЛЬ ХАРТМАНН, ВЕДУЩИЙ ИНЖЕНЕР НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ОТДЕЛА, АВВ SEMICONDUCTORS

фициентов теплового расширения кремния и алюминия, поэтому такая прокладка позволяет снизить тепловую и механическую нагрузку».

Специалисты АВВ воспользовались мультифизическим моделированием, чтобы лучше понять базовые механизмы деградации БТИЗ-чипов, в том числе связанные с электротепловыми и термомеханическими характеристиками различных конструкций устройств в условиях повторяющихся испытаний с циклическим изменением мощности. «Чем выше устойчивость устройства к нагрузкам с циклическим изменением мощности, тем выше его надежность и долговечность, — объяснил Самуэль Хартманн. — Опытным путем мы изучили несколько вариантов креплений соединительных проводов и выполнили мультифизическое моделиро-

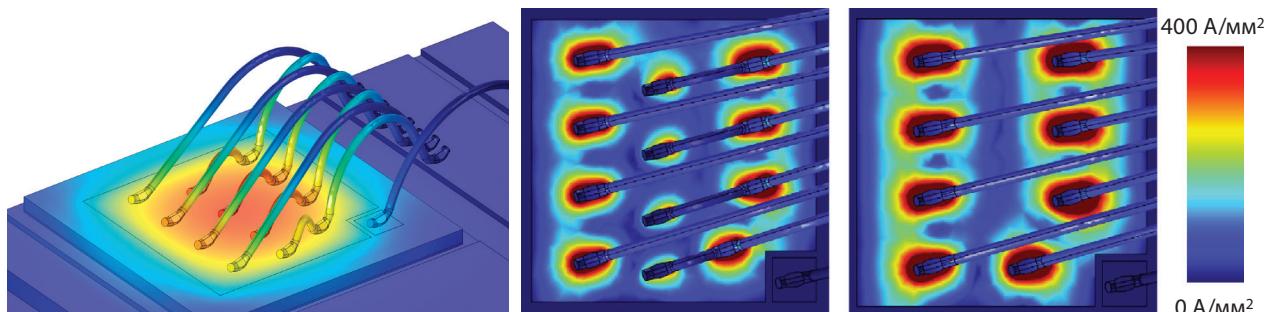


РИС. 4. Слева: результаты моделирования в пакете COMSOL — распределение температуры для стежкового крепления выводов. Справа: плотность тока в устройстве со стежковым креплением выводов и в эталонном устройстве. Показано уменьшение тока у основания провода в новом варианте крепления.

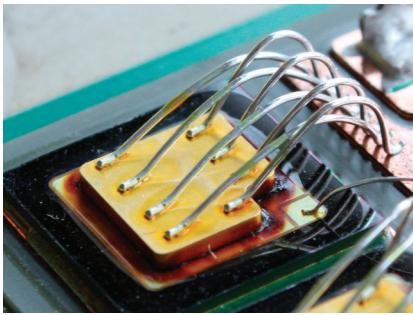
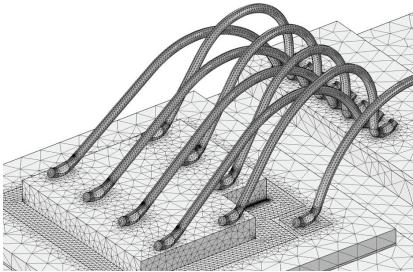


РИС. 5. Вверху: Сетка модели усиленного контакта эмиттера. Внизу: Фотография усиленного контакта эмиттера.

вание, чтобы понять, почему один вариант лучше другого». Хартманн считает, что именно применение средств мультифизического моделирования COMSOL Multiphysics® помогло АВВ добиться успеха при разработке устройства.

» АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ МОДУЛЕЙ БТИЗ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В ПЕРВОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ специалисты АВВ проверили два способа крепления проводов: эталонную схему крепления (рис. 2) и стежковое крепление, при котором провод присоединяется к поверхности чипа в нескольких точках (рис. 3).

Используя моделирование и проводя эксперименты, Хартманн сравнил три варианта стежкового крепления с эталонным вариантом. «Как и ожидалось, мы выяснили, что при креплении к одному чипу нескольких проводов плотность тока через них, особенно у основания, уменьшается, — рассказал он. — Однако моделирование дало и неожиданный результат: стежковое крепление не уменьшает перепады температур или механическое напряжение. Улучшение характеристик обусловлено уменьшением плотности тока

вследствие меньшей плотности тока в слое металлизации чипа у основания проводочных выводов».

Дополнительные крепления открыли новый путь для выхода тока через провода, что уменьшило количество тока, рассеиваемого каждым отдельным проводом (рис. 4). «Новая схема крепления проводов позволила создать модуль на основе БТИЗ с устойчивостью к нагрузкам с циклическим изменением мощности, в четыре раза превышающей характеристики эталонной схемы. Эта новая конструкция уже используется в некоторых силовых модулях HiPak».

Во втором эксперименте Хартманн и его коллеги сравнивали крепление проводов непосредственно к чипу и к металлической пластине, соединенной с чипом и усиливающей эмиттер (рис. 5).

Моделирование позволило установить, что в случае с усиленным контактом эмиттера плотность тока, изменения температуры и механические напряжения, которым подвергаются провода в зоне крепления, намного меньше, чем для эталонного модуля (рис. 6). Эти результаты помогли повысить надежность крепления проводочных проводов к эмиттеру. «В усиленных модулях БТИЗ стойкость крепления проводочных выводов в отношении

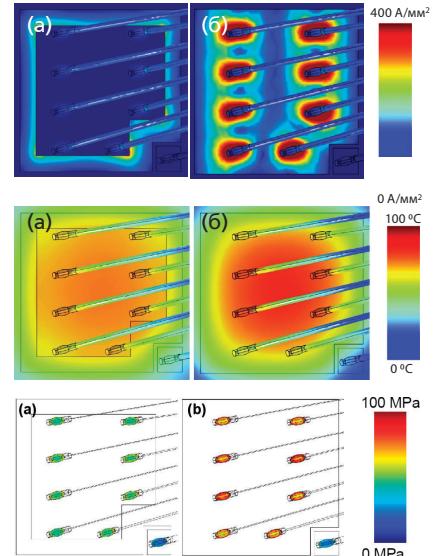


РИС. 6. Сверху вниз: Результаты моделирования, проведенного АВВ в пакете COMSOL. На иллюстрациях: смоделированная плотность тока, изменение температуры и напряжения по Мизесу в соединении проводочного вывода и чипа для (а) усиленных и (б) эталонных контактов эмиттера на фронтальной поверхности слоя металлизации и в соединительных проводах.



Эмре Оезкол (Emre Oezkol), слева, с печатной платой и Самуэль Хартманн (Samuel Hartmann), справа, с силовым модулем HiPak.

“ В усиленных модулях БТИЗ (с усиленным креплением выводов) устойчивость проводных соединений к циклическим нагрузкам оказалась в 10 раз выше, чем в стандартных модулях. Моделирование подтвердило снижение механического напряжения, что и обусловило столь существенное повышение надежности”,

— САМУЭЛЬ ХАРТМАН

циклических нагрузок в 10 раз превышает соответствующий показатель для стандартных модулей, — пояснил Хартманн. — Моделирование помогло подтвердить, что механическое напряжение уменьшилось, что и обусловило столь значительный рост надежности».

» УВЕЛИЧЕННЫЙ СРОК СЛУЖБЫ СИЛОВЫХ МОДУЛЕЙ НА ОСНОВЕ БТИЗ

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОВОДНЫХ соединений и создание новых методов крепления позволили увеличить срок службы силовых модулей АВВ для конструкции со стежковым креплением проводов в 4 раза, а для конструкции с усиленным контактом эмиттера — в 10 раз. Продление срока службы обеспечивает повышение эффективности устройства и снижение расходов покупателей силовых модулей АВВ.

«Если устойчивость устройства к нагрузкам с циклическим изменением мощности возрастает, как у наших модулей с улучшенным креплением проводов, — рассказал Хартманн, — то для обеспечения стандартного 30-летнего срока службы тягового электродвигателя потребуется меньше силовых модулей. Это позволяет снизить стоимость самого локомотива и повысить конкурентоспособность наших силовых модулей». ©

НАГРЕВ ДЖОУЛЕВЫМ ТЕПЛОМ И ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ

Автор: ХЕНРИК СЁННЕРЛИНД (HENRIK SÖNNERLIND)

ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ СРЕДУ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА выделяется тепло, обусловленное реостатными потерями. Это явление называется Джоулевым нагревом. Сопротивление в значительной степени зависит от температуры, поэтому, для точного распределения температур и токов, необходимо одновременно учитывать и теплопередачу, и электрические явления.

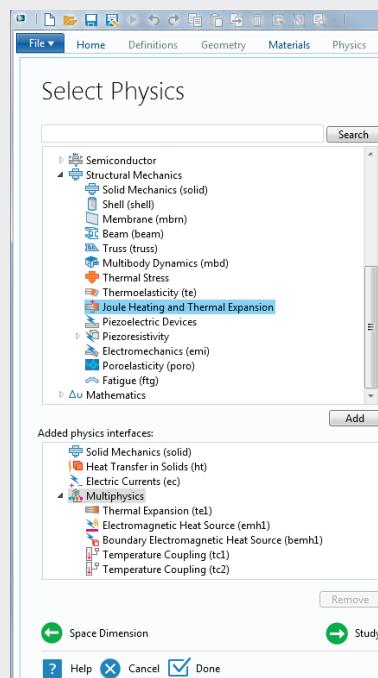
Нагрев ведет к тепловому расширению, а оно, в свою очередь, к деформациям. Существенные напряжения и деформации могут возникать по ряду причин. Деформации в материалах с различными коэффициентами теплового расширения несовместимы одна с другой. Кроме того, в пределах одного материала могут наблюдаться большие перепады температуры.

В некоторых случаях на распределение тепла влияют деформации конструкции. К примеру, контакт различных объектов или вызванные деформациями изменения в электрических или тепловых граничных условиях могут привести к существенному изменению формы. Если цикл нагрева повторяется, то вместе с ним повторяются и соответствующие циклы напряжения и деформации. Это может привести к усталостному разрушению материала.

В пакете COMSOL Multiphysics® все эти эффекты можно непосредственно комбинировать. Достаточно выбрать *нагрев джоулевым теплом и тепловое расширение* в списке доступных интерфейсов физик модуля *Механика конструкций*.

При этом к приложению будут добавлены три участвующие в данном случае интерфейсы физик (*Solid Mechanics (Механика твердого тела)*, *Heat Transfer in Solids (Теплопередача в твердых телах)* и *Electric Currents*

(*Электрические токи*) и все необходимые мультифизические связи — через мультифизический узел.



Затем для этих трех интерфейсов физик можно выбрать параметры расчетов. Один из вариантов — одновременное вычисление электрических токов и температур в исследовании с зависимостью от времени, а после него — решение задачи механики конструкций в стационарном виде. Максимум напряжения может быть достигнут в любой момент теплового цикла, поэтому необходимо проверять значения напряжения периодически с некоторым интервалом по времени.

Для качественного сравнения достаточно взглянуть на расчетные напряжения. Однако добавление интерфейса *Fatigue (Усталость)* позволит прогнозировать и срок службы.

РАЗРАБОТКА ИНТЕГРИРОВАННЫХ ДАТЧИКОВ ВЫВОДИТ КАЧЕСТВО КОНТРОЛЯ ГЛЮКОЗЫ В КРОВИ НА НОВЫЙ УРОВЕНЬ

Используя мультифизическое моделирование, исследователи и инженеры Roche Diagnostics разрабатывают новые, более точные датчики глюкозы для больных диабетом.

Автор: ЛЕКСИ КАРВЕР (LEXI CARVER)

ВЫСОКОТОЧНЫЙ КОНТРОЛЬ МЕТАБОЛИЗМА при помощи наблюдения за уровнем глюкозы — широкоизвестная процедура, проводимая у больных сахарным диабетом для поддержания здоровья во избежание развития возможных осложнений. Работа современных глюкометров основана на использовании электрохимических методов, обеспечивающих высочайшую точность измерений и предоставляющих надежный способ контроля за соблюдением необходимой диеты и приемом инсулина.

В то же время химические реакции, происходящие на чувствительных тест-полосках глюкометров, очень восприимчивы к воздействию окружающей среды и различных химических веществ. Данные датчики поставляются в каждый уголок планеты, хранятся в неопределенных условиях. Они нужны пациентам с разными уровнями знаний и опыта. Надежная конструкция является ключевым фактором, позволяющим датчикам переносить эти условия, обеспечивать точные результаты и выявлять условия, которые могут стать причиной ошибок. Сегодня мультифизическое моделирование используется совместно с экспериментами и замерами, позволяя исследователям понять химические, электрические и биологические явления, происходящие в тест-полосках. Благодаря мультифизическому моделированию ученые могут улучшить их конструкцию и методы измерения.

» ВОЗМОЖНОСТИ ДАТЧИКА НОВОГО ТИПА

КОМПАНИЯ ROCHE DIABETES CARE — один из ведущих мировых поставщиков диагностических средств и услуг для больных диабетом. Инженеры компании тщательно изучают электрохимические процессы, происходящие в уже существующих устройствах, и разрабатывают новые методы измерения для повышения точности наблюдения за уровнем глюкозы. Глюкометры компании (пример показан на рис. 1), как и другие амперометрические биодатчики, измеряют электрический ток, возникающий при поданном на систему электродов напряжении. Возникающий ток пропорционален уровню глюкозы в электролитическом растворе, таком как смесь пробы крови и химического реагента.



РИС. 1. Фотографии глюкометров ACCU-CHEK Aviva® и ACCU-CHEK Nano® от Roche Diagnostics.

На каждой тест-полоске для измерения уровня глюкозы нанесены несколько золотых дорожек. Они соединяют систему электродов полоски с электрическими контактами, вставляемыми в глюкометр (см. рис. 2). Реагент, состоящий из реагирующего с глюкозой фермента и очень стабильного химического вещества — протомедиатора — наносится на электроды полоски при изготовлении, а затем высушивается. В капиллярный канал над системой электродов попадает проба крови, которая насыщает реагент жидкостью, после чего тот вступает в реакцию с глюко-

зой крови. «Начальная реакция глюкозы и фермента преобразует протомедиатор в реактивный медиатор с низким потенциалом, который выполняет остальную часть реакции», — объясняет Харви Бак, ведущий научный сотрудник Roche Diagnostics Operations, Inc.

» МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСКРЫВАЕТ ТАЙНЫ ХИМИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

ТОК, ВОЗНИКАЮЩИЙ в результате поданного в ходе реакции на электроды постоянного напряжения, позволяет прогнозировать концентрацию глюкозы в пробе крови. Эта важная информация поможет пациенту определить, какие действия следует предпринять, чтобы скорректировать уровень сахара в крови. Однако на точность анализа влияют особенности конфигурации тестовых полосок и процесса их производства. Специалисты Roche провели исследование, в ходе которого они изучили один из нескольких вариантов новых конструкций тестовой полоски с помощью двух моделей COMSOL Multiphysics®. Эти модели позволяют изолировать химические реакции от электрических, механических и температурных условий. Благодаря этому исследователи смогли проанализировать отклик по напряжению.

В изолированной системе есть целый ряд параметров и связанных переменных, таких как концентрации различных химических веществ. В системе реагентов происходит так много сложных взаимодействий между химическими соединениями и химических реакций, что спрогнозировать их отклик на различные методы измерения или на присутствие посторонних веществ

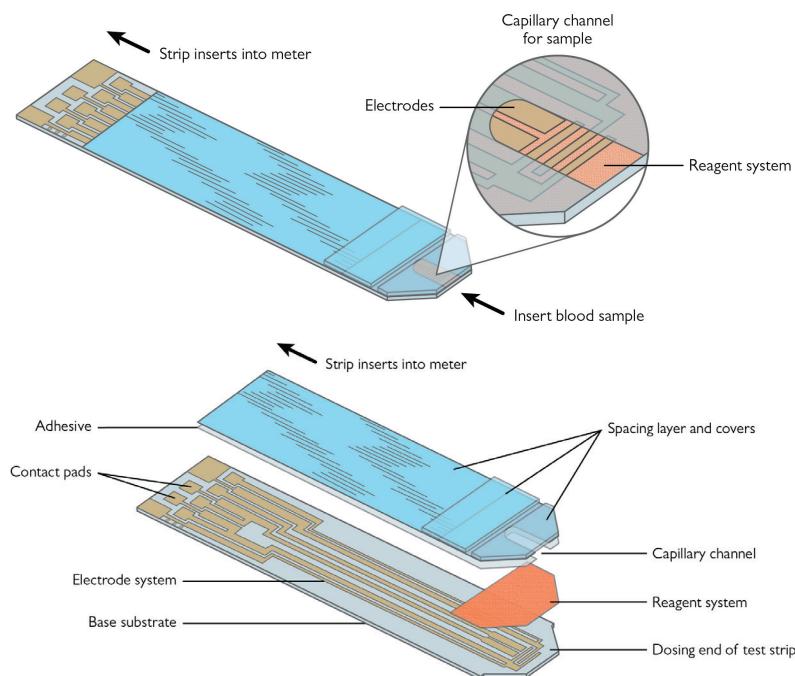


РИС. 2. Схематическое изображение компонентов тест-полоски. Химическая реакция протекает непосредственно над электродами. Адгезивы и промежуточные слои образуют капиллярный канал и соединяют электроды, систему реагентов, верхнюю и нижнюю крышки.

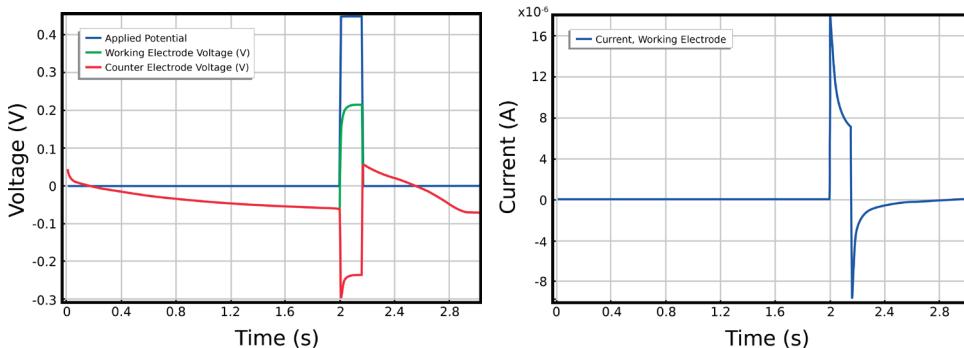


РИС. 3. Результаты моделирования: приложенная разность потенциалов и потенциалы рабочего и отсчетного электродов в сенсоре Roche (слева), токовый выходной сигнал при скачкообразном изменении разности потенциалов (справа). Потенциалы рабочего и отсчетного электродов (обозначены зеленым и красным цветом соответственно) измерить невозможно — их можно лишь определить с помощью моделирования.

было нелегко. Поэтому команда разработчиков сделала такое упрощающее предположение: массообмен веществ происходит только в очень тонком слое над электродом — достаточно тонком, чтобы считать его реакционную активность однородной в направлении нормали к поверхности. «Мы создали одномерную модель, которая позволяет понимать и прогно-

зировать реакцию. Для этого потребовалось объединить уравнение ферментативной кинетики Михаэлиса — Ментен и уравнение кинетики электродных процессов Батлера — Фольмера», — объяснил Харви Бак.

После установления скоростей различных реакций соответствующие уравнения были легко реализованы в про-

граммной модели. Рассмотрев модель, ограниченную одним измерением, специалисты смогли прогнозировать реакцию датчика на различные профили потенциала постоянного тока с приемлемыми затратами времени на решение данной задачи (см. рис. 3).

Однако на силу постоянного тока также влияют температура и концентрация красных кровяных телец (гематокрит) в пробе. Поэтому, прежде чем измерять силу постоянного тока, к датчику прикладывается напряжение переменного тока. Это позволяет определить величину полного сопротивления, которая затем используется для компенсации указанных эффектов (рис. 4). Такие измерения в сочетании с измерениями постоянного тока используются в математическом алгоритме, посредством которого датчик получает необходимую информацию для правильного определения уровня глюкозы.

Возможности программного пакета COMSOL® оказались особенно полезными для интерпретации результатов этих сложных измерений. «В ходе моделирования мы поняли, что, используя большой скачок потенциала для формирования ограниченного диффузией потока на электроде, можно получить слишком высокие значения потенциала, — добавил Харви Бак. — Работая в COMSOL, мы можем легко представить концентрацию в логарифмическом масштабе, что существенно упрощает анализ».

«Измерения полного сопротивления сильно зависят от пробы и не столь существенно — от реагента, — добавил Харви Бак. — Создание электрода, дающего возможность измерения полного сопротивления, является составной частью разработки датчика и сильно влияет на чувствительность измерений». Для решения электрической задачи группа Харви Бака разработала еще одну модель ячейки, на этот раз трехмерную. «По проводимости пробы в ячейке можно судить об изменении гематокрита. Мы

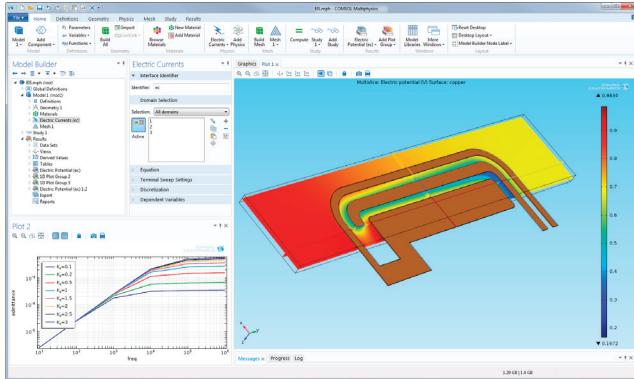


РИС. 4. Выполненное Харви Бак 3D-моделирование в среде COMSOL. Показаны график полной проводимости при различных значениях электропроводности в логарифмическом масштабе (слева внизу) и диаграмма электрического потенциала в зоне измерения сенсора (справа). Золотые электроды контактируют с электролитом на границе раздела по поверхностному импедансу.

“ Мы можем анализировать различные конфигурации и материалы электродов и прогнозировать чувствительность измерений импеданса к гематокриту, а также к другим механическим характеристикам датчика, например к высоте капилляров и размещению заполнителей”,

— ХАРВИ БАК (HARVEY BUCK), ВЕДУЩИЙ НАУЧНЫЙ СОТРУДНИК ROCHE DIAGNOSTICS.

можем анализировать различные конфигурации и материалы электродов и прогнозировать чувствительность измерений импеданса к гематокриту, а также к другим механическим характеристикам датчика, например к высоте капилляров и размещению заполнителей». (См. рис. 5.)

Электроды изготавливаются из напыленных пленок металла, и их сопротивление существенно влияет на результаты измерения полного сопротивления и на распределение потенциалов. Нельзя измерить разность потенциалов на электродах или в электролите в измерительной ячейке без физического возмущения системы. Однако моделировать этот процесс относительно просто.

Руководствуясь полученными с помощью COMSOL результатами, Бак изменял форму, длину и расположение рабочих электродов и противоэлектродов, пока не получил оптимальную компоновку для измерения полного сопротивления. В итоге ему удалось обеспечить максимальную чувствительность электродов к уровню гематокрита и минимальную — к технологическим отклоне-

ниям, допущенным при изготовлении, что позволяет точно измерить полное сопротивление для компенсации сигнала постоянного тока. Это открыло новой конфигурации путь к внедрению в производство.

» КОНТРОЛЬ НАД УРОВНЕМ ГЛЮКОЗЫ: НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИ ПОМОЩИ ПОПРАВКИ НА ХИМИЧЕСКИЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ОТКЛИК, смоделированных в программном пакете COMSOL, специалисты Roche смогли лучше проанализировать особенности конструкции новых датчиков и выпустить глюкометры, корректирующие сигнал постоянного тока для повышения точности измерений. Эта инновационная система со встроенными возможностями датчиков устанавливает новый стандарт биосенсорных устройств. Моделирование позволило специалистам изучать параметры, которые невозможно измерить экспериментально, принимать обоснованные инженерные решения и оптимизировать конфигурацию электродов. Работа по исследованию и моделированию, которую они ведут, позволяет начать производство новых датчиков, что, в конечном счете, повысит качество ухода за больными диабетом. ☺

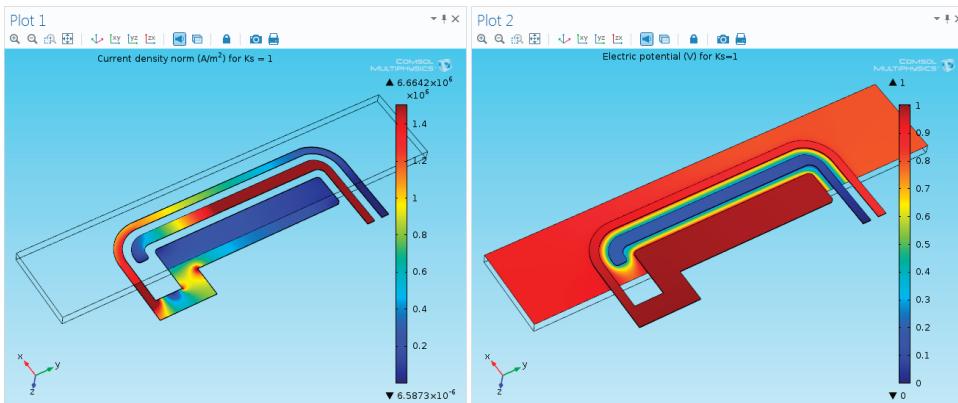


РИС. 5. Результаты моделирования в пакете COMSOL: распределение тока (слева) и электрического потенциала (справа) в электродах и электролите.



Харви Бак, ведущий научный сотрудник Roche Diagnostics.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОРОДНЫХ АКТУАТОРОВ ПЕЧАТАЮЩЕЙ ГОЛОВКИ В FUJIFILM DIMATIX

Инженеры FUJIFILM Dimatix воспользовались мультифизическим моделированием для получения данных о податливости актуатора промышленной печатающей головки, чтобы улучшить его характеристики.

Автор: ЛЕКСИ КАРВЕР

ШИРОТА ПРИМЕНЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТРУЙНЫХ ПРИНТЕРОВ поистине впечатляет. Они используются для нанесения изображений на упаковку товаров, создания широкоформатных графических изображений на вывесках и тканях, и даже применяются в электронных приложениях. Струйная печать упрощает обмен информацией и взаимодействие, которые окружают нас в повседневной жизни. Компания FUJIFILM Dimatix, один из ведущих производителей печатающих головок для коммерческих струйных принтеров, использует средства мультифизического моделирования при разработке микроэлектромеханических (MEMS) актуаторов для своих новейших струйных устройств.

» ПРИМЕНЕНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АКТУАТОРОВ МИКРОННОГО РАЗМЕРА В ПЕЧАТИ

ВЕДУЩИЙ НАУЧНЫЙ СОТРУДНИК исследовательского отдела FUJIFILM Dimatix, Крис Мензел (Chris Menzel), изучает работу актуаторов печатающих головок, чтобы разработать новейшие однородные диафрагменные актуаторы FUJIFILM. Эти актуаторы создаются в результате технологического процесса MEMS с использованием высокосовершенного тонкопленочного слоя пьезоэлектрика. Материал данного слоя — высококачественный цирконат-титанат свинца (ЦТС), напыленный по фирменной технологии. Этот электрокерамический материал изменяет форму под действием электрического поля и применяется во множестве преобразователей. ЦТС прикреплен к кремниевой мембране. Актуаторы находятся на поверхности пластины — по одному для каждого миниатюрного сопла, состоящего из проточных каналов и дюзы (см. рис. 1 и 2). На печатающей головке компактно размещены тысячи таких компонентов.

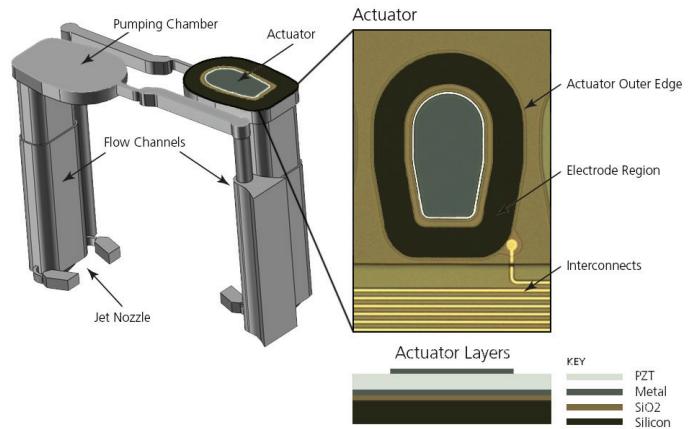


РИС. 1. Геометрия печатающей головки FUJIFILM. Каждый актуатор расположен сверху откачиваемой камеры с заполненной чернилами емкостью. Под камерой находятся каналы, по которым чернила подаются к дюзе.

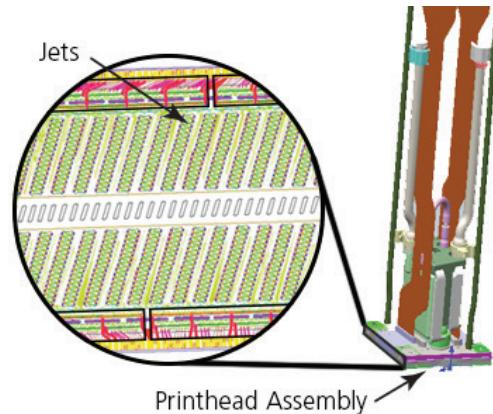


РИС. 2. Увеличенное изображение сопел на пластине и их расположение в узле печатающей головки.

Компоненты каждого сопла (жидкостные каналы и актуатор) образуют резонансный жидкостной элемент. При возбуждении ЦТС электрическими импульсами, настроенными на резонанс сопла, актуатор выгибается и генерирует акустические волны в тесно связанных проточных каналах. Конструкция сопла эффективно преобразует волну давления в осциллирующий поток, который должен преодолеть поверхностное натяжение

на дюзе, чтобы выбросить каплю чернил. Если результирующий момент импульса жидкости достаточно велик, то капля вылетает наружу и попадает на подложку.

Крис Мензел стремился создать такие актуаторы и проточные каналы, которые позволяли бы выбрасывать капли нужной массы с заданной скоростью и максимальной частотой при заданном напряжении. Помимо того, при разработке требовалось обеспечить

компактность и низкую себестоимость изделия. Таким образом, основные требования при разработке актуатора — максимальное выгибание, минимальный размер и соответствие импеданса актуатора характеристикам проточных каналов и дюзы.

» **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЗВОЛЯЕТ ОПРЕДЕЛИТЬ ПОДАТЛИВОСТЬ И СТЕПЕНЬ ИЗМЕНЕНИЯ ФОРМЫ АКТУАТОРА** МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕБОВАЛОСЬ ПРОВОДИТЬ В ДВА ЭТАПА, поскольку актуатор работает в системе сопел. На первом этапе Крис Мензел определил функциональные параметры для различных геометрий актуаторов. Затем он использовал эти параметры в полной модели сопла, чтобы определить отклик всей системы.

«Для анализа работы актуаторов мы выполнили моделирование в среде COMSOL Multiphysics®, — рассказал Мензел. — Моделирование помогает понять взаимосвязи между функциональными параметрами и различными значениями толщины слоев, граничными условиями и размерами, которые можно получить с помощью нашего процесса». Способность программного пакета эффективно осуществлять параметрический анализ больших массивов переменных и выдавать наглядные результаты оказалась весьма ценной. С ее помощью мы легко можем оптимизировать общий отклик

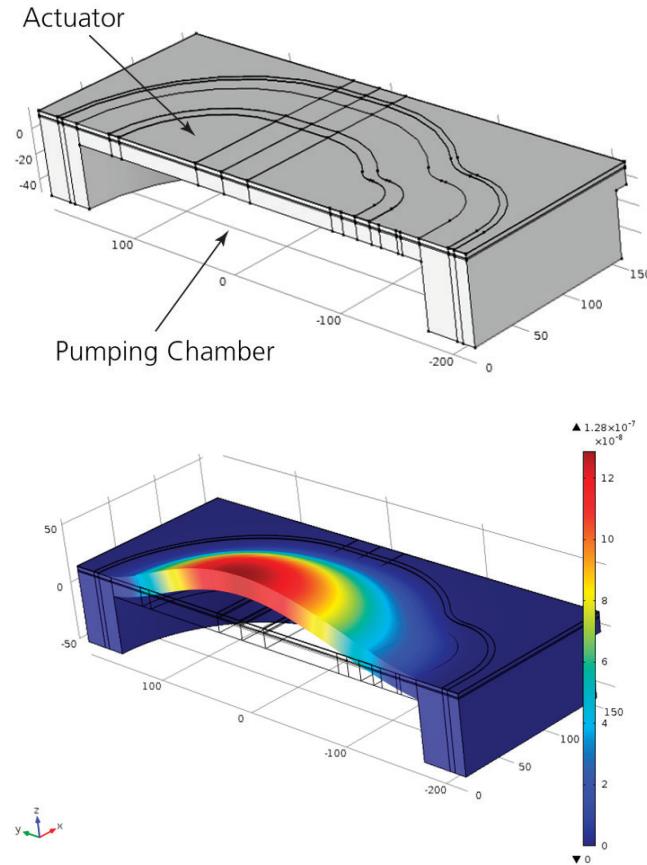


РИС. 3. Вверху — созданная Крисом Мензелом в среде COMSOL® программная модель половины геометрии актуатора: металл, кремний, пьезоэлектрический материал ЦТС, электроды и находящаяся под давлением камера с чернилами. Внизу — результаты моделирования, показывающие выгибание актуатора.

системы, а значит, повысить качество нашего продукта».

Крис выполнил моделирование половины геометрии актуатора с разрезом по центральной оси. В составе модели было несколько слоев — кремний, металлы, изоляторы и ЦТС (см. рис. 3, вверху). Также он поместил под актуатор часть

заполненной чернилами откачиваемой камеры и часть прилегающего проточного канала. Затем с помощью моделирования он определил выгибание актуатора под действием нагрузки давлением (параметр, называемый податливостью) и выгибание под действием напряжения (параметр, назы-

ваемый степенью изменения формы), см. рис. 3, внизу. Мензел провел исследование для множества различных геометрий актуатора. Полученные значения были использованы в более масштабной модели, предназначенной для общей оптимизации конструкции устройства.

» **ПОВЫШЕНИЕ КОМПАКТНОСТИ И СКОРОСТИ РАБОТЫ ПЕЧАТАЮЩИХ ГОЛОВОК РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА COMSOL,** помогли

Мензелу разработать новую конструкцию, дав ему информацию, необходимую для того, чтобы обеспечить соответствие нового устройства жестким требованиям к характеристикам актуаторов и к уменьшению их размеров. Ценная информация, полученная с помощью мультифизической модели, позволила инженерам лучше понять все особенности работы актуатора и сопла. Таким образом, моделирование остается отправной точкой для оценки концепции актуатора и реализуемости устройства. А достигнутое сокращение времени разработки является критически важным фактором для выпуска производительных и эффективных продуктов. Инструменты для моделирования помогают FUJIFILM Dimatix сохранять лидирующие позиции в разработке печатающих головок, а значит, скоро мы увидим в продаже еще более качественные устройства для печати. ©

«Способность программного пакета эффективно осуществлять параметрический анализ больших массивов переменных и выдавать наглядные результаты оказалась весьма ценной. С ее помощью мы легко можем оптимизировать общий отклик системы, а значит, повысить качество нашего продукта»,

— КРИС МЕНЗЕЛ (CHRIS MENZEL), ВЕДУЩИЙ НАУЧНЫЙ СОТРУДНИК, FUJIFILM DIMATIX

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

АВТОР: ЙЕСВАНТ РАО (YESWANTH RAO)

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ — это семейство твердотельных материалов, натуральных и искусственных, которые приобретают электрическую поляризацию при механической деформации. Подобное явление называется прямым пьезоэлектрическим эффектом. Эти материалы демонстрируют и обратный пьезоэлектрический эффект, когда в результате приложения электрического поля возникает механическая деформация. Пьезоэлектрические материалы — это естественные преобразователи, которые находят применение во множестве различных датчиков и актуаторов.

Программный пакет COMSOL Multiphysics® предлагает готовый интерфейс *Piezoelectric Devices* (Пьезоэлектрические устройства). Он позволяет учесть взаимосвязь явлений электростатики и механики конструкций (рис. 1). Такая способность очень полезна при моделировании рассматриваемых процессов.

Для точного моделирования следует тщательно описать свойства и ориентацию материалов. Интерфейс *Piezoelectric Devices* (Пьезоэлектрические устройства) позволяет пользователю задать свойства материалов с помощью формы «напряжение-заряд» или «деформация-заряд» (рис. 2), а также задать ориентацию материалов через углы Эйлера.

Обычно, пьезоэлектрические материалы являются лишь одним из множества компонентов устройства. Чтобы точно описать устройство как единое целое, необходимо составить модель взаимодействий между пьезоэлектрическими элементами и окружающими материалами. Возможности мультифизического моделирования в среде COMSOL® позволяют связывать интерфейс

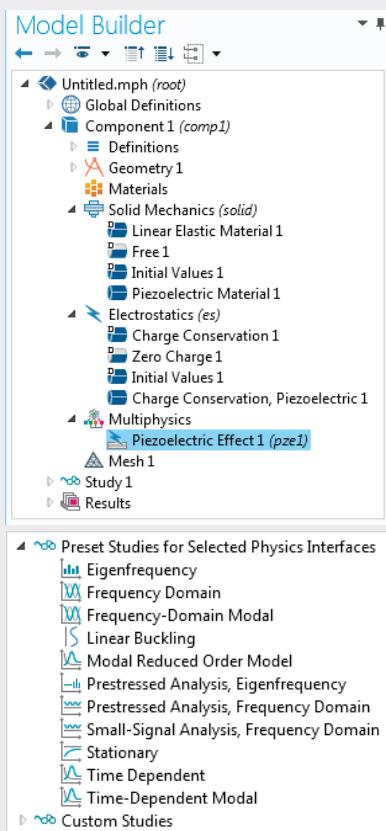


РИС. 1. COMSOL® Построитель моделей пакета COMSOL — настройки для моделирования пьезоэлектрического эффекта (вверху) и доступные пользователю исследования для моделирования пьезоэлектрического устройства (внизу).

Piezoelectric Devices (Пьезоэлектрические устройства) с различными разделами физики, такими как скалярная акустика, гидродинамика и вибрации конструкций (рис. 3). Также важно описать механизмы демпфирования, которые могут повлиять на работу устройства. Инструменты COMSOL позволяют пользователям учи-

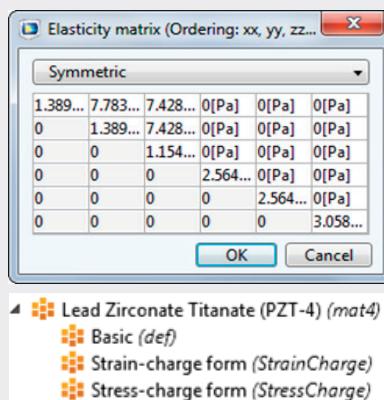


РИС. 2. Настройки формы «деформация-заряд», отображающие матрицу упругости, доступ к которой можно получить через узел Материалы в Построителе моделей.

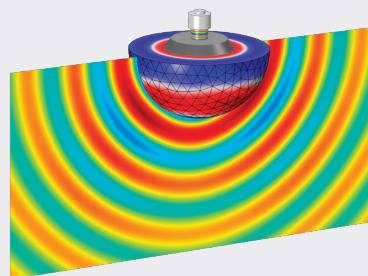


РИС. 3. Моделирование пьезоэлектрического преобразователя грибовидной конструкции (topipilz). Показаны уровни акустического давления, в том числе в дальней зоне, и распределение напряжения в пьезокерамических кольцах. Эти преобразователи используются для генерирования мощного низкочастотного звука.

тывать механическое демпфирование, потери в диэлектрике, потери вследствие проводимости и электромеханических связей в пьезоэлектрике.

МОДЕЛИРОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НРС ПОМОГАЕТ РАЗРАБАТЫВАТЬ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ

COMSOL Multiphysics и его возможности НРС (High-Performance Computing — высокопроизводительные вычисления) позволяют разрабатывать наиболее эффективные устройства для клиентов быстрее, чем когда-либо ранее.

Автор: **ДЕКСТЕР ДЖОНСОН**

BLOCK TRANSFORMATOREN-ELEKTRONIK — ведущий производитель намоточных изделий, применяемых во множестве отраслей, особенно часто в электронике.

Инженеры BLOCK разрабатывают специализированные трансформаторы, источники питания, фильтры ЭМС и реакторы (см. рис. 1), которые обычно должны точно соответствовать спецификациям относительно рабочих частот, размера и массы устройства, электрических потерь, изоляции. Подобные устройства должны быть пригодны для эксплуатации в различных условиях, включая грязь, влажность и перепады температуры. Обычно срок службы такого оборудования составляет примерно 30 лет. «Зачастую задача, которую ставит нам клиент, ограничивает в выборе материалов, — сказал Марек Сиатковски (Marek Siatkowski), ответственный за все работы по моделированию в компании BLOCK. — К примеру, материалы для железнодорожных устройств должны соответствовать строгим требованиям по пожарной безопасности, токсичности дыма при пожаре и т. п. Поэтому мы не можем просто предложить клиентам выбрать необходимое готовое устройство из каталога. Клиент сам определяет размер устройства и требования, поэтому каждый раз нам приходится проводить вычисления».

В таких условиях разработка катушек индуктивности и трансформаторов с помощью устаревающего ПО для моделирования становилась для компании BLOCK все более сложной задачей.

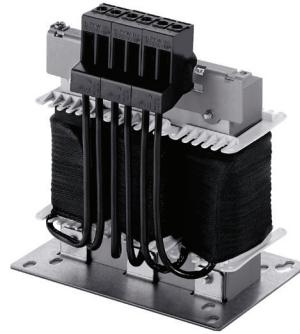


РИС. 1. Внешний вид линейного реактора, используемого для отфильтровывания выбросов тока и для противодействия проникновению токов высших гармоник в систему электропитания.

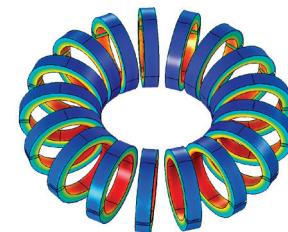
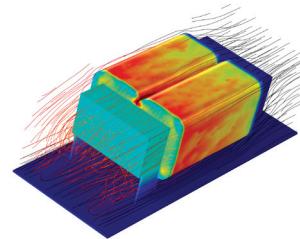


РИС. 2. Модель охлаждаемой воздухом дроссельной катушки постоянного тока. Показано распределение температур и линии тока (вверху). Плотность магнитного потока в тороидальной катушке (внизу). Значение индуктивности катушки вычисляется как функция внешнего и внутреннего радиусов катушки и толщины провода.

Чтобы уменьшить затраты и эффективнее выполнять заказы клиентов, компании нужно было сократить число прототипов при разработке устройства.

В качестве решения была выбрана среда моделирования COMSOL Multiphysics®, поскольку она отличается простотой использования, гибкостью и поддержкой высокопроизводительных вычислений. «Теперь мы можем моделировать новые устройства и находить критические области: например, такие, в которых имеют место высокие электромагнитные потери или температура устройства достигает пороговой величины, — рассказал Марек Сиатковски. — COMSOL Multiphysics помогает определять подобные области, моделировать соответствующие физические явления, быстро находить надежные способы улучшить устройство».

Исследовательский отдел изучает магнитные характеристики и гистерезисные потери ряда магнитомягких материалов в испытательной лаборатории BLOCK. Одной из главных причин внедрения программного пакета COMSOL® для компании стала возможность легко добавлять собственные, разработанные за многие годы формулы для всех этих характеристик и применять их в моделях.

» ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПОВЫШАЮТ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ДЛЯ BLOCK ПОЛЕЗНЫМИ ОКАЗАЛИСЬ НЕ ТОЛЬКО ВОЗМОЖНОСТИ мультифизического моделирования, но и реализованная в среде COMSOL Multiphysics поддержка высокопроизводительных вычислений. Теперь для

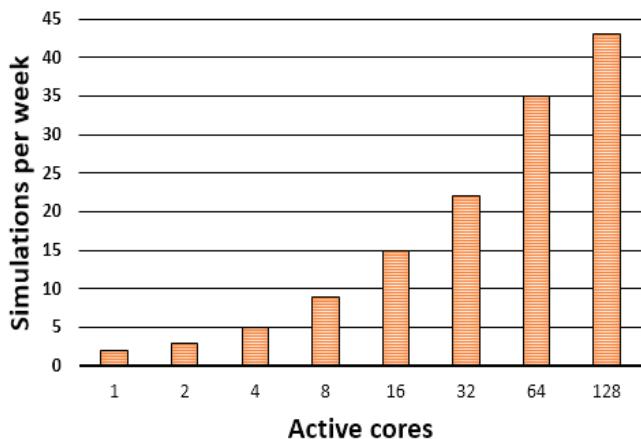


РИС. 3. Переход от отдельной восьмиядерной рабочей станции к кластеру среднего масштаба может существенно повысить производительность.

моделирования можно использовать многоядерные рабочие станции без ограничения числа ядер и кластеры без ограничений на количество вычислительных узлов. Это позволило повысить эффективность моделирования как на рабочих станциях, так и на кластерах. Теперь научно-исследовательский отдел компании может быстрее разрабатывать наилучшие продукты для клиентов.

Марек Сياتковски использует пакет COMSOL для создания моделей самых различных устройств BLOCK. Зачастую их характеристики сложно считать аналитически, однако их геометрию можно задать на основе нескольких параметров и потребностей клиента. Примером может служить разработанная Марек Сياتковски модель дроссельной катушки для постоянного тока (см. рис. 2). «В среде COMSOL Multiphysics можно создать модель с заданными параметрами — шириной, высотой, толщиной проводов и другими — а затем изучить ее во всем диапазоне допустимых характеристик. Наши разработ-

чики и специалисты по продажам стали работать эффективнее, ведь теперь им проще найти оптимальное решение», — объяснил Сياتковски.

» ВСЕ ДЕЛО В АРХИТЕКТУРЕ

«**НЕСЛОЖНЫЕ МОДЕЛИ** можно создавать и запускать на рабочей станции, но для крупных моделей быстрого действия и объема памяти моего компьютера недостаточно», — отметил Марек Сياتковски.

Здесь гибкость COMSOL проявилась особенно ярко: компания BLOCK использовала все возможности для высокопроизводительных вычислений при поддержке программной архитектуры, а также широкие права, которые дает лицензия. Марек Сياتковски запускает свои модели на нескольких многоядерных компьютерах. «Сейчас я использую кластер с 22 ядрами и 272 Гб ОЗУ. На нем удобно выполнять удаленное моделирование», — объяснил он. — Решение COMSOL поддерживает вычисления с использованием распределенной оперативной памяти,

позволяя всем узлам кластера параллельно обращаться и к общей локальной памяти. В итоге я могу задействовать все имеющиеся вычислительные ресурсы». Прирост производительности для большой модели электрического устройства (в количестве сеансов моделирования в неделю) показан на рис. 3.

После моделирования на высокопроизводительном компьютере Марек Сياتковски

анализирует и обрабатывает результаты на своей рабочей станции. «При таком подходе в процессе моделирования мой компьютер остается свободным. И я могу заниматься другой работой или даже проводить пре- или постпроцессинг иных моделей. Архитектура программного пакета COMSOL помогла нам повысить производительность труда и эффективность решения задач для клиентов». ☺

ПРОДОЛЖЕНИЕ, НАЧАЛО НА СТР. 32

Сейчас у нас есть множество приложений: от простых средств разработки до сложных инструментов анализа, позволяющих получить все важные показатели конкретных конфигураций наших силовых модулей. Эти инструменты помогают нашим инженерам выполнять требования клиентов максимально быстро и с минимумом усилий. В прошлом эти повторяющиеся исследования длились часами и требовали участия специалистов по моделированию. Сегодня с помощью приложения COMSOL выполнить моделирование может любой сотрудник компании.

В итоге средства COMSOL для мультифизического моделирования и разработки приложений помогают нам создавать более эффективные и конкурентоспособные продукты. Эффективность, стремление делать больше меньшими средствами — одна из основ философии нашей компании. Мы стремимся воплотить ее не только в наших продуктах, но и в методах ведения бизнеса, генерирования идей и создания новых разработок. Среда разработки приложений стала для APEI ключевым средством создания наиболее совершенных решений на базе полупроводников с широкой запрещенной зоной. ☺



БРАЙС МАКФЕРСОН (BRICE MCPHERSON) — старший инженер APEI с 11-летним опытом разработки высокопроизводительных силовых устройств для экстремальных внешних условий на базе полупроводников с широкой запрещенной зоной. Его специализация — параметрическое проектирование в САПР, анализ силовых модулей и систем преобразования энергии APEI.

ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ УПРОЩАЮТ РАЗРАБОТКУ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Автор: **БРАЙС МАКФЕРСОН (BRICE MCPHERSON)**

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА ИГРАЕТ КЛЮЧЕВУЮ РОЛЬ практически во всех электрических приборах: от зарядных устройств для мобильных телефонов до промышленных энергосетей. Преобразование электроэнергии из одной формы в другую необходимо для решения множества прикладных задач. К примеру, для управления электродвигателем электрического транспортного средства нужны силовые ключи, драйверы, фильтры, датчики и схемы управления. Эти преобразующие устройства позволяют эффективно, безопасно и экономично обрабатывать и использовать энергию.

Компания APEI расширяет границы применения силовой электроники, разрабатывая передовые технические решения на основе полупроводников с широкой запрещенной зоной. Такие системы способны блокировать более высокие напряжения, пропускать больший электрический ток, быстрее переключаться и эффективнее рассеивать выделяющееся тепло, чем обычные полупроводники. Эти особенности позволяют создавать максимально компактные и эффективные устройства для управления большими мощностями.

Программный пакет COMSOL Multiphysics® и Среда разработки приложений кардинально меняют наши методы разработки, поддержки и маркетинга. Прикладные задачи обычно не ограни-



Разработанное в APEI приложение для моделирования COMSOL® помогает прогнозировать эффективность различных моделей силовых модулей.

чиваются одним физическим явлением, изолированным от других. В электронных устройствах тепловые, электрические и механические процессы тесно взаимосвязаны. Чтобы понять весь спектр факторов, влияющих на эффективность, эти явления и их взаимодействия нужно исследовать одновременно. Модели COMSOL Multiphysics стали для инженеров компании ключевым средством анализа наших продуктов. Они помогают лучше понять происходящие процессы, оценить эффективность реального устройства на виртуальной модели и обойтись меньшим числом прототипов.

После выхода Среды разработки приложений нам не терпелось испытать её. И мы были сразу же удивлены, насколько просто оказалось создать наше первое приложение — средство для анализа тока плавления и импеданса миниатюрных проволочных соединителей, которые используются для внутренних соединений полупроводниковых устройств. Переход от готового моделирования в программном обеспечении COMSOL® к удобному приложению на основе сложной мультифизической модели занял совсем немного времени. Графический интерфейс с поддержкой перетаскивания, простые средства управления и поля ввода, полная интеграция со средой COMSOL — все это существенно облегчило освоение нового инструмента. Таким образом, если вы можете построить модель, то и легко создадите на ее основе приложение.

**ПРОДОЛЖЕНИЕ
СМ. НА СТР. 31**