

Согласование логопериодической антенны в широком диапазоне частот

Владислав Бондарев, Роман Каленов (Москва)

В статье описана процедура точного моделирования и оптимизации логопериодической антенны и согласующего устройства при помощи численного электродинамического метода. Отдельные элементы антенны – логопериодическая структура и согласующее устройство, описанные S-параметрами, – включены так, чтобы выполнить согласование антенны в широкой полосе частот. В расчёте использованы программы HFSS и FEKO.

ВВЕДЕНИЕ

Впервые о возможности создания частотно-независимых антенн упомянуто в статье Дюамеля и Избелла [1] от 1957 г., где описывается способ построения логопериодических антенн и связь метода с «принципом углов», впервые изложенным в статье Рамсея [2]. В своей работе Кэррел [3] подробно описывает конструктивные особен-

ности логопериодической вибраторной антенны. В 1964 г. в Советском Союзе вышел сборник статей под редакцией Бененсона [4], в котором опубликованы переводы работ по исследованиям широкополосных логопериодических и спиральных структур. Имеются и публикации российских учёных по этой тематике [5, 6].

Конструирование частотно-независимых антенн основано на трёх прин-

ципах. Первый – «принцип углов» – заключается в том, что геометрия антенн в основном определяется углами α , β и ψ (см. рис. 1) [7], а не линейными размерами. Примеры таких антенн – бесконечный биконус и логарифмическая спираль. Антенны такого типа являются широкополосными, т.е. их характеристики не зависят от частоты в рабочем диапазоне. Однако из-за конечных размеров структур характеристики излучателей могут сильно меняться на крайних частотах диапазона.

Второй принцип конструирования использует то обстоятельство, что входное сопротивление плоской антенны, идентичной по своей конфигурации дополняющей её до сплошного экрана, не зависит от частоты. Другими словами, если форма антенны такова, что её металлические элементы совпадают по форме и размерам со своими щелевыми дополнениями, то её входной импеданс теоретически равен 60Ω во всём частотном диапазоне.

Третий принцип заключается в конструировании антенны таким образом, чтобы её электрические свойства периодически повторялись с из-

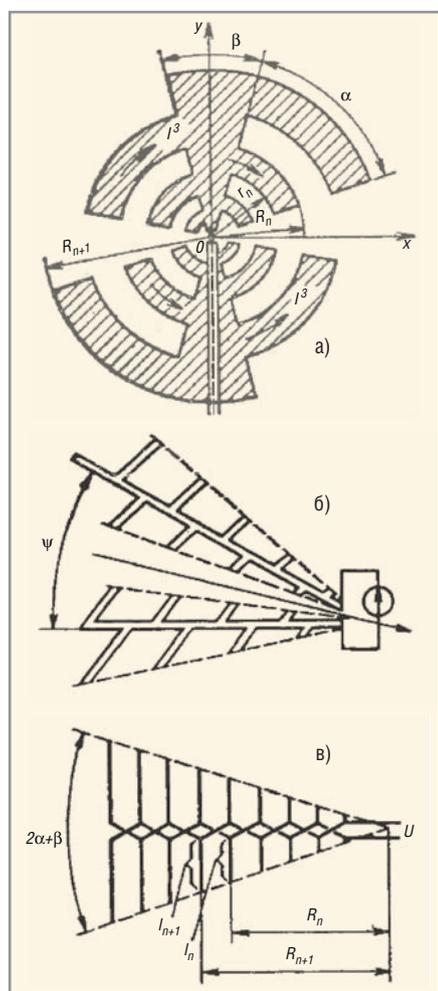


Рис. 1. Логопериодические антенны

а) Плоская, б) пространственная однонаправленная, в) плоская однонаправленная

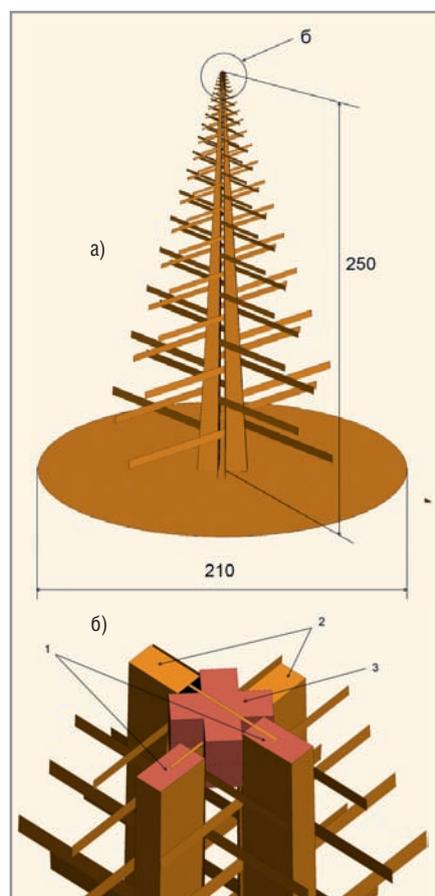


Рис. 2. Модель излучателя

а) Общий вид логопериодической антенны, б) верхний узел питания, где 1 – согласующие устройства (полосковые трансформаторы), 2 – симметрирующие устройства, 3 – диэлектрическая прокладка

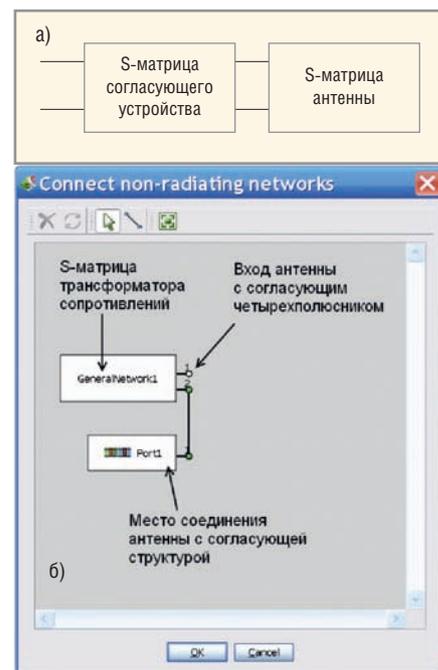


Рис. 3. Каскадное соединение четырёхполюсника и двухполюсника

а) Схематическая реализация; б) реализация каскадного соединения в FEKO

менением частоты (как логарифм последней) [3].

Цель работы, результаты которой приводятся в данной статье, – продемонстрировать возможность расширения рабочего диапазона частот антенны до теоретического предела, определяемого формулой Фано, на примере реальной логопериодической антенны.

ВИБРАТОРНАЯ ЛОГОПЕРИОДИЧЕСКАЯ АНТЕННА

Логопериодическая структура вибраторов (см. рис. 1б) представляет собой линейно поляризованную частотно-независимую антенну с небольшим коэффициентом усиления.

Ограничение рабочего диапазона со стороны низких частот обусловлено увеличением габаритов, а со стороны высоких частот – достижимой точностью изготовления конструкции. Длина вибраторов и расстояние между ними (см. рис. 1в) изменяются в геометрической прогрессии, показатель которой находится из соотношения:

$$\tau = \frac{R_{n+1}}{R_n} = \frac{l_{n+1}}{l_n} \quad (1)$$

На рисунке 2а представлена модель излучателя, к которому предъявляются следующие требования: способность работать по двум линейным ортогональным поляризациям в диапазоне от 1 до 16 ГГц, ширина диаграммы на-

правленности в меридиональной плоскости 110° по уровню -10 дБ, КСВ не более 1,6.

Каждая ветвь антенны выполнена из листа дюралюминия толщиной 0,5 мм, содержит 40 вибраторов, параметр $\tau = 0,8$. Питание организовано с помощью симметричной полосковой линии, которая также является трансформатором сопротивлений. Из узкого торца полосковой линии 1 (см. рис. 2б) выходит отрезок полосковой линии 2 и по диэлектрическому изолятору 3 перекидывается на противоположную ветвь с вибраторами. Материалом симметричной полосковой линии и «звездочки» был выбран Duroid 5880 (толщина материала 0,508 мм – стандартная панель).

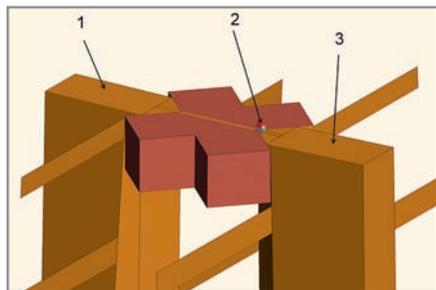


Рис. 4. Верхняя часть модели

1 – Симметрирующее устройство, 2 – порт 1 (вход антенны), 3 – согласующее устройство

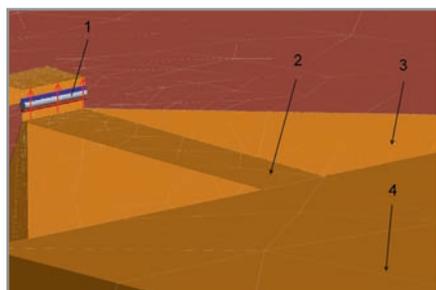


Рис. 5. Установка порта антенны

1 – Виртуальный порт антенны (красными стрелками показано направление течения тока на фаске порта), 2 – полосковая линия, 3 – несущая ветвь с вибраторами, 4 – модель корпуса согласующего устройства

Трансформаторная линия питания 1 полностью экранирована от излучающей структуры. Симметрирующим устройством является металлическая трапеция, которая повторяет токи, текущие по поверхности экрана полоскового трансформатора.

Электродинамический расчёт СВЧ-структур открывает широкие возможности улучшения характеристик традиционных и оригинальных структур. Высокочастотные узлы сложного ра-

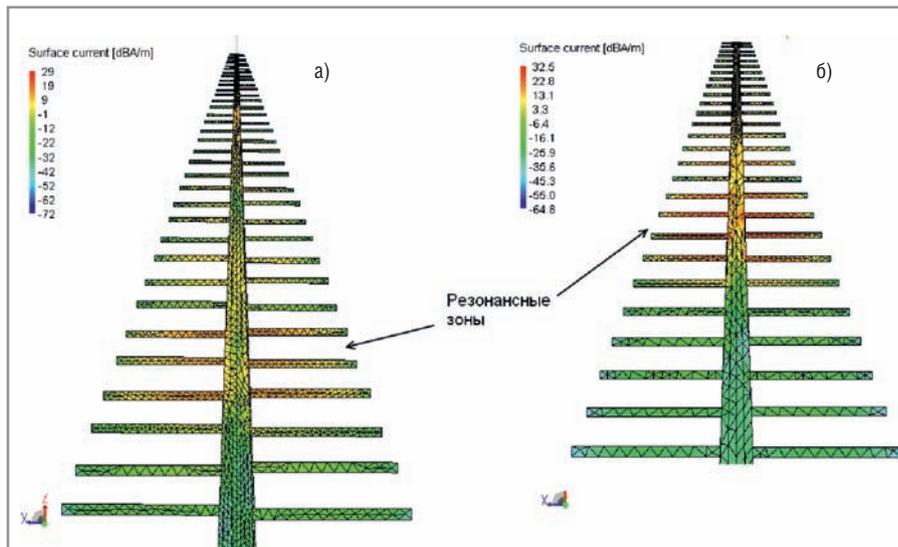


Рис. 6. Токи на поверхности логопериодической антенны

а) на частоте 2 ГГц, б) на частоте 5 ГГц

диотехнического устройства (РТУ) разрабатываются, как правило, по отдельности, и произвести полное моделирование системы часто не представляется возможным из-за ограниченных вычислительных ресурсов и времени. Реализованные в программной среде FEKO [8, 9] средства позволяют выполнить декомпозицию общей задачи проектирования антенных устройств и СВЧ-узлов, т.е. сначала рассчитать излучающую структуру электродинамическими методами и затем на схематическом уровне объединить это решение с S-матрицами согласующих устройств, рассчитанными отдельно (см. рис. 3). Расчёт S-матрицы каскадного соединения элементов достаточно прост и может быть реализован обычными программными средствами. Однако в нашем случае необхо-

димо учесть влияние конструктивных решений неизлучающей структуры на характеристики антенны, например, влияние металлического корпуса фидерной линии на диаграмму направленности антенны и её входное сопротивление. Это особенно важно, когда размеры неоднородностей соизмеримы с длиной волны. Результаты математического моделирования будут только тогда правильными, когда ближнее поле антенны не будет наводить в подводящей линии токи, не учитываемые в анализе.

Основным инструментом расчёта такой сложной структуры, как логопериодическая антенна, являются популярные программы электродинамического моделирования HFSS [10, 11] и FEKO. Безусловно, даже расчёт всей модели без питающей линии в программе FEKO может занять много времени из-за большого количества элементов сетки разбиения. Для сокращения сроков проектирования были введены следующие упрощения:

- расчёт проводился только для одной поляризации (не учитывалось взаимное влияние между ортогональными каналами);
- не рассматривалась конструкция перехода от трансформатора к полоску звездочки (см. рис. 4);

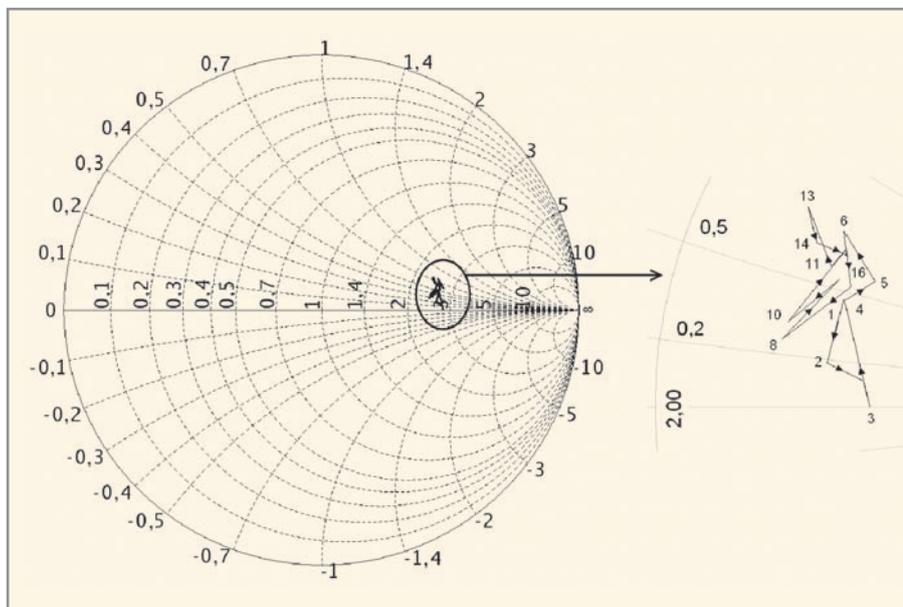


Рис. 7. Входное сопротивление антенны без согласующего устройства во всём диапазоне частот

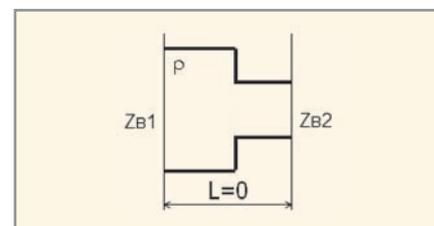


Рис. 8. Модель идеального трансформатора

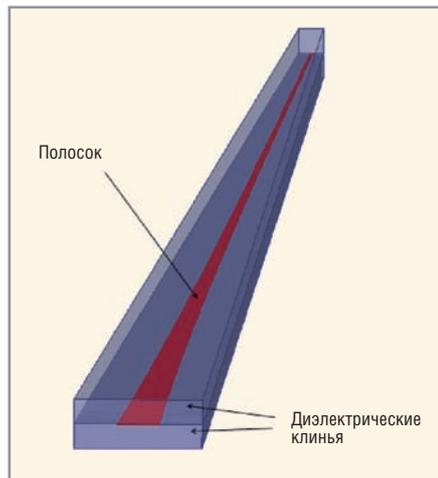


Рис. 9. Общий вид линии питания, выполняющей функцию согласующей структуры

- не учитывалась толщина металла ветвей вибраторов;
- трансформатор сопротивлений 3 представлен в виде металлической коробки, в которую включается S-матрица;
- на металлические части модели наложено граничное условие идеальной проводящей поверхности.

Порт 1 (см. рис. 5), порт на ребре – Edge port в FEKO, является виртуальным входом антенны. Использование данного порта удобно при моделировании микрополосковых, планарных фильтров, делителей мощности, циркуляторов, мостов и линий питания.

Установка сетки разбиения конструкции (Mesh) также может сократить время расчёта. Это важно, если РТУ имеет сверхширокую полосу частот и большой разброс электрических размеров конструкции. Логопериодическая антенна с плоскими вибраторами имеет набор резонансных зон, т.е. таких участков конструкции, где поверхностная плотность тока наибольшая. Зо-

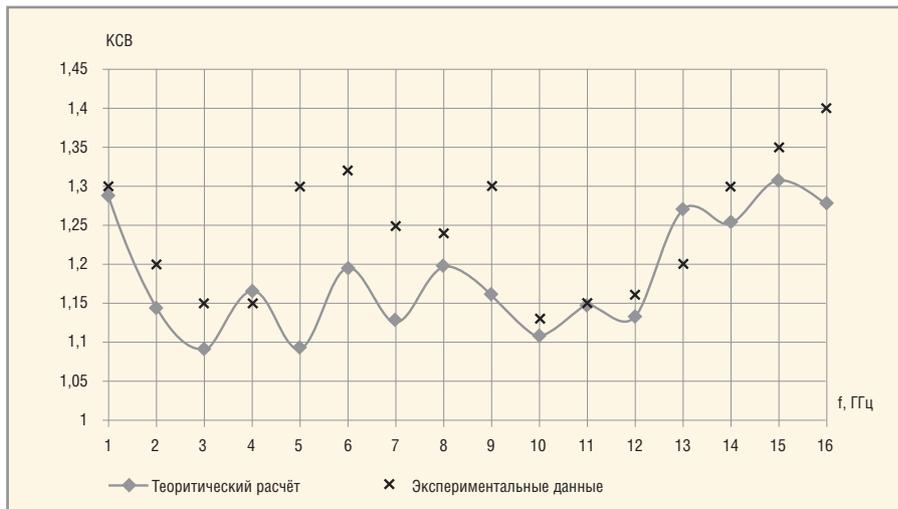


Рис. 10. КСВ на входе трансформаторной линии, подключенной к антенне

ны имеют длину около половины длины волны. Вибраторы, не участвующие в формировании зон, можно считать неактивными рефлекторами или директорами. На активных излучателях сетку разбиения желательно делать более плотной, чем на пассивных (см. рис. 6). Программные средства FEKO позволяют выполнять тонкую настройку Mesh в проблемных, на взгляд инженера, местах конструкции. Для установки оптимального разбиения в критических местах геометрии, проект было решено разделить на три части. В каждой из частей применяется локальная сетка в соответствии с заданным участком частотного диапазона.

Разбиение данной конструкции содержит в нижнем диапазоне частот 9548 треугольников и не больше 12 000 элементов на верхних частотах. Расчёт 16 частотных точек занимает около 9 ч на персональном компьютере с ОЗУ объёмом 3,5 Гб и четырёхъядерным процессором (2,66 ГГц). Результаты расчёта приведены на рисунке 6.

Как было сказано выше, отличительной особенностью логопериодической антенны является небольшое изменение входного импеданса с изменением частоты. Как видно из рисунка 7, входное сопротивление антенны без учёта питающей линии колеблется в районе 140 Ом. Необходимо согласовать входное сопротивление антенны с 50-омным сопротивлением стандартного коаксиального кабеля с помощью трансформатора сопротивлений.

Математическая модель идеального трансформатора (см. рис. 8) описывается матрицей передачи:

$$A = \begin{pmatrix} \sqrt{Z_{22}/Z_{21}} & 0 \\ 0 & \sqrt{Z_{21}/Z_{22}} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

В задаче согласования роль этого трансформатора играет линия питания, выполненная в виде симметричной полосковой линии, имеющей на одном конце волновое сопротивление

S-матрица полосковой линии

Частота, ГГц	IS11	Фаза IS11, град.	IS12	Фаза IS12, град.	IS21	Фаза IS21, град.	IS22	Фаза IS22, град.
1	0,44	-179,24	0,89	-3,96	0,89	-3,97	0,45	-8,51
2	0,43	158,90	0,90	-13,00	0,90	-13,00	0,43	-4,73
3	0,42	141,57	0,90	-20,95	0,90	-20,95	0,43	-3,31
4	0,42	124,78	0,89	-28,74	0,89	-28,74	0,43	-2,09
5	0,41	108,96	0,89	-36,33	0,89	-36,33	0,43	-1,46
6	0,40	93,66	0,89	-43,83	0,89	-43,83	0,42	-1,17
7	0,41	78,60	0,89	-51,28	0,89	-51,28	0,43	-1,02
8	0,40	62,80	0,88	-58,84	0,88	-58,84	0,42	-0,39
9	0,40	50,61	0,88	-65,84	0,88	-65,84	0,42	-2,12
10	0,39	31,98	0,88	-73,80	0,88	-73,81	0,41	0,39
11	0,39	15,69	0,88	-81,44	0,88	-81,44	0,41	1,42
12	0,39	3,69	0,87	-88,41	0,87	-88,41	0,42	-0,44
13	0,39	-11,92	0,87	-95,92	0,87	-95,92	0,42	0,04
14	0,39	-26,95	0,87	-103,33	0,87	-103,33	0,42	0,14
15	0,39	-43,79	0,87	-111,04	0,87	-111,04	0,43	1,50
16	0,40	-60,77	0,86	-118,79	0,86	-118,79	0,44	2,89
17	0,37	-75,28	0,87	-126,07	0,87	-126,07	0,41	2,72
18	0,40	-86,94	0,85	-133,03	0,85	-133,03	0,44	0,66

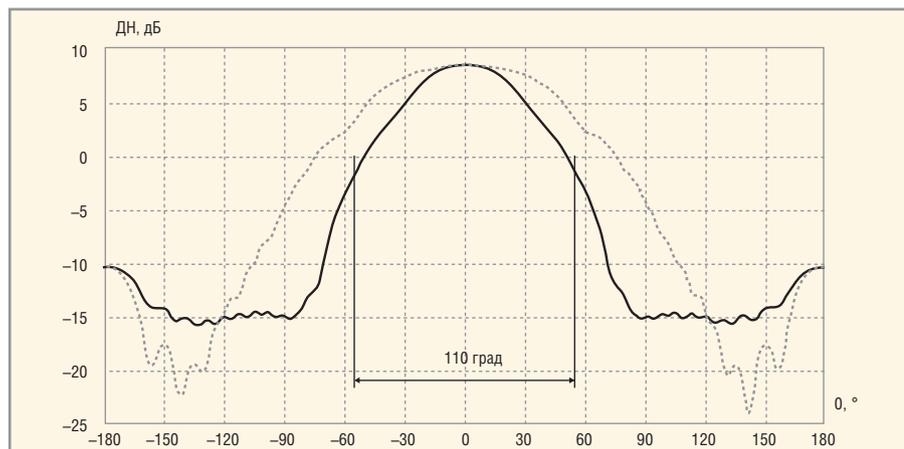


Рис. 11. Диаграмма направленности в Е-плоскости (сплошная кривая) и Н-плоскости (пунктирная кривая) на частоте 10 ГГц

в 50 Ом, а на другом конце – 140 Ом. Ожидаемый коэффициент отражения на входе (при 50-омной нагрузке на выходе) такого трансформатора при заданных параметрах составляет:

$$\rho = 20 \lg \left(\frac{Z_{B2} - Z_{B1}}{Z_{B2} + Z_{B1}} \right) \approx -6,5 \text{ дБ.} \quad (3)$$

Общий вид линии питания представлен на рисунке 9. Расчёт [12] и оптимизация полосковой линии с потерями проводились в программе электродинамического моделирования HFSS. В таблице приведена S-матрица полосковой линии.

Результаты моделирования логопериодической антенны с согласующим устройством представлены на рисунках 10 и 11. Из рисунка 10 видно, что КСВ логопериодической антенны в полосе частот от 1 до 16 ГГц не превышает 1,4. Широкополосные антенны не

обладают высокой направленностью, коэффициент усиления обычно не превышает 11 дБ. В нашем случае $K_{\gamma} = 8 \text{ дБ}$ (см. рис. 11).

Данная антенна полностью удовлетворяет всем предъявляемым требованиям и может использоваться для решения задач электромагнитной совместимости в широкой полосе частот, а также в других экспериментальных исследованиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Широкополосные антенны, предназначенные для работы в широком диапазоне частот, имеют частотно-зависимые характеристики излучения и согласования, что затрудняет достижение наилучших характеристик. Исправить положение можно, подключив последовательно с антенной согласующее устройство – фильтр, который одновременно играет

роль линии питания. Поскольку расчёт и моделирование сложной антенны с согласующей структурой требует больших вычислительных затрат, целесообразно синтез согласующей структуры выполнить отдельно, а затем объединить решение частотно-зависимой антенны и S-параметры фильтра на платформе программы электродинамического проектирования FEKO.

ЛИТЕРАТУРА

1. DuHamel R.H., Isbell D.E. 1957 IRE Nat. Conv. Rec. Pt. 1. PP. 119–128.
2. Rumsey V.H. 1957 IRE Nat. Conv. Rec. Pt. 1. PP. 114–118.
3. Carrel R. 1961 IRE Internat. Conv. Rec. Pt. 1. PP. 65–75.
4. Бененсон Л.С. Сверхширокополосные антенны. Мир, 1964.
5. Яцкевич В.А. Логопериодические антенны. Вологда: Русь, 1994.
6. Петров Б.М., Костромитин Г.И., Горемыкин В.Е. Вибраторные логопериодические антенны. Горячая линия – Телеком, 2005.
7. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. Высшая школа, 1988.
8. Банков С.Е., Курушин А.А. Расчёт излучающих структур с помощью FEKO. НПШ «Родник», 2008.
9. www.feko.inf.
10. Банков С.Е., Курушин А.А. HFSS Ansoft Электродинамическое моделирование сложных СВЧ-структур. Солон-Пресс, 2006.
11. www.ansoft.com.
12. Матей Г.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. Т. 1. Связь, 1971.



Новости мира News of the World Новости мира

Учёные создали солнечные батареи в виде краски

Возможность «красить» солнечными батареями технику и здания для получения бесплатной энергии обещают исследователи Университета Нотр-Дам (University of Notre Dame). На пути к получению недорогих источников энергии команда профессора Прашанта Камата (Prashant V. Kamat) по-



лучила новый светочувствительный материал, способный преобразовывать солнечный свет в электричество. Учёные разработали пастообразную водно-спиртовую смесь из наночастиц диоксида титана и сульфида кадмия.

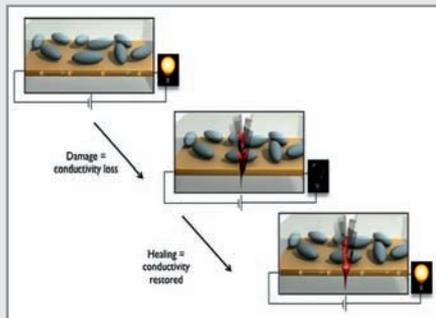
Эта паста, нанесённая кистью на прозрачную токопроводящую поверхность, демонстрирует эффект генерации электроэнергии за счёт солнечного света. Коэффициент преобразования энергии этой краски из полупроводниковых наночастиц пока не превышает 1%, что заметно меньше показателей традиционных кремниевых батарей (10...15%). Но Камат говорит, что этот недостаток нивелируется дешёвизной материала при промышленном производстве и возможностью наносить его на большие площади, невзирая на кривизну поверхности.

В настоящее время исследователи изучают возможность улучшить стабильность «солнечной краски».

<http://www.physorg.com/>

Самовосстанавливающиеся проводники поднимут уровень надёжности электроники

В число объектов и материалов, обладающих способностью самостоятельно восстанавливать свои свойства или структуру, таких как пластик или краска, недавно добавились проводники. В частности, инженерам удалось сделать так, чтобы контактные дорожки на печатных платах восстанавливались быстрее, чем можно было бы заметить разрыв. Два года назад команда инженеров из Иллинойского университета предложила внедрять в тело проводника



капсулы с углеродными нанотрубками, которые бы восстанавливали проводимость дорожки при разрыве. На сегодняшний день исследователи усовершенствовали технологию, заменив нанотрубки «жидким металлом» (сплав индия и галлия) и значительно уменьшив размер капсул. Верхний слой такого самовосстанавливающегося проводника содержит множество микроскопических (10 мкм в диаметре) капсул, содержащих ремонтный сплав в жидком состоянии. Разрыв дорожки вызывает разрушение капсул на этом участке и заполнение трещины проводящим материалом.

Авторы технологии утверждают, что при экспериментах им удавалось восстанавливать проводимость в 90% случаев намеренного повреждения дорожек даже при относительно небольшом количестве капсул в теле проводника.

По их мнению, технология в основном найдёт применение там, где обычный ремонт дорожек затруднён или невозможен. Кроме этого, есть немало видов техники, где нагрузки на электронику часто бывают запредельные, а выход из строя части схемы весьма критичен. В первую очередь это военные и аэрокосмические сферы деятельности.

<http://www.physorg.com/>

LG создала самый большой OLED-телевизор в мире

LG объявила о создании первой в мире 55-дюймовой OLED-панели для коммерческих телевизоров. Приступить к продажам таких устройств компания намерена во второй половине будущего года.

LG Display продемонстрировала панель на базе светоизлучающих диодов (OLED) с диагональю 55 дюймов, предназначенную для установки в телевизоры. В компании утверждают, что это самая большая OLED-панель на сегодняшний день. Широкой публике она была представлена в начале января на выставке потребительской электроники в Лас-Вегасе – Consumer Electronics Show. Тогда же она утратила свой титул, так как на этой выставке демонстри-

ровалась панель аналогичных размеров от Samsung, – пишет The Verge.

Особенностью панели является не только размер, но и новая технология производства. Вместо низкотемпературного поликристаллического кремния (Low Temperature Poly Silicon – LTPS), используемого в современном производстве OLED-панелей, технологи LG применили оксид кремния. По их словам, это позволило существенно снизить себестоимость производства.

Кроме того, чтобы в целом повысить качество изображения, создаваемого новой панелью, инженеры использовали технологию White OLED (WOLED). Она позволила обеспечить более равномерное отображение цветов под различными углами обзора и дополнительно снизить энергопотребление при выводе изображений с большими площадями белого цвета, например веб-страниц (при использовании функции Smart TV).

Есть у новой OLED-панели и ещё одно достоинство. Её толщина составляет всего 5 мм, что сопоставимо с диаметром карандаша. Столь малая толщина – особенность светодиодной технологии, так как она не требует наличия подсветки сзади, как в случае с ЖК-панелью. Наконец, коэффициент контрастности панели составляет 100 000 : 1.

В компании утверждают, что успешное создание демонстрируемой панели – это важный шаг на пути к коммерциализации технологии. В июле 2011 г. исполнительный директор LG Display Квон Янг-со (Kwon Young-soo) заявил, что во второй половине будущего года компания LG планирует приступить к серийному производству 55-дюймовых OLED-телевизоров.

Наблюдатели полагают, что примерно в это же время или даже раньше к продажам аналогичного устройства приступит Samsung Electronics. Дело в том, что летом будущего года пройдут Олимпийские игры, и это лучшее время для того, чтобы приступить к продажам новой технологии и снять сливки, – уверены эксперты.

Напомним, что предыдущий и пока что единственный опыт массовых продаж OLED-телевизоров не привел к успеху. В феврале прошлого года Sony объявила о том, что отказывается от продажи таких устройств на родном японском рынке из-за дороговизны и низкого спроса. Первый в мире OLED-телевизор, обладающий 11-дюймовым дисплеем, был выпущен корпорацией осенью 2007 г. по цене 200 тыс. иен



(около \$2,2 тыс.). Представители Sony неоднократно повторяли, что прибыльным не стал ни один из этих телевизоров.

<http://www.cnews.ru/>

Графен научили отводить тепло

Новая форма графена, созданная учёными из Техасского университета, может спасти ноутбуки и другую электронику от перегрева. Таким образом будет преодолено основное препятствие на пути создания более компактных и мощных электронных устройств.

Новая форма графена на 60% эффективнее проводит тепло, чем обычный графен, что позволит использовать его в качестве термоинтерфейса в различных электронных устройствах. Теплопроводящая форма графена состоит из сверхчистого 99,99-процентного углерода-12.

Графен (слой углерода толщиной в один атом) имеет большие перспективы в самых разных сферах науки и техники. Но результаты последних исследований демонстрируют, что и различные формы графена могут иметь не менее ценные качества.

Полученные американскими учёными результаты могут оказать существенное влияние на дальнейшее развитие полупроводниковой электроники. Так, кремниевые транзисторы, основная часть современной электроники, становятся всё меньше и быстрее, в то время как существующие технологии отвода тепла уже не справляются с перегревом сверхплотных чипов и ограничивают их производительность.

Обычный графен уже в ближайшее время будет использоваться в некоторых устройствах, например, в качестве теплоизоляционного материала для чипов, в прозрачных электродах для фотоэлектрических солнечных элементов или гибких дисплеев. Но через несколько лет использование графена будет более разнообразным, и новая форма графена с большой теплопроводностью станет отличным решением для графеновой электроники.

CNews.ru