

Концентрация энергии электромагнитного поля для нагрева

Игорь Иванов (vela-kim@mail.ru), Александр Курушин (kurushin@mail.ru)

В статье представлены расчёт и экспериментальное исследование устройства концентрации электромагнитного поля в пространстве. Расчёт и оптимизация конструкции выполнены с использованием системы электродинамического моделирования CST SUITE. Результаты показали, что температура в целевом объекте на расстоянии 10 м от излучателя может увеличиваться до +500°C за время экспонирования, равное 10 с.

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость в концентрации энергии электромагнитных (ЭМ) волн СВЧ-диапазона может возникать в следующих случаях. Во-первых, при информационном использовании, включающем в себя связь, радиолокацию, телевидение, зондирование различных объектов, разведку полезных ископаемых, радиоэлектронное противодействие и т.п. Во-вторых, при энергетическом использовании СВЧ-колебаний: различные виды СВЧ-нагрева (в т.ч. плазмы), передача энергии на расстояние, воздействие электромагнитных волн на полупроводниковые СВЧ-приборы и биологические объекты с целью нагрева и нарушения их работоспособности.

Предполагается, что при воздействии СВЧ-энергии на объект происходит превращение энергии СВЧ-поля в энергию хаотических колебаний молекул, т.е. повышение температуры. Изменение состояния биологического объекта под действием облучения в настоящее время до конца не исследовано.

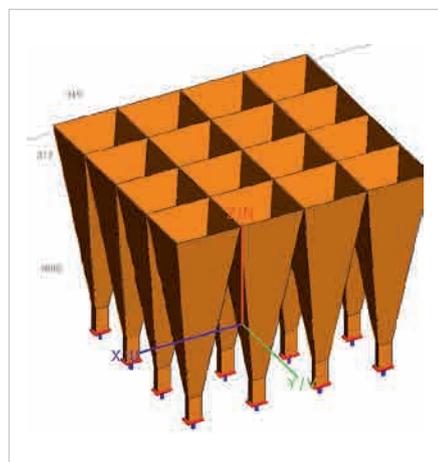


Рис. 1. Рупорная структура ФАР с 16 излучателями

В статье рассматривается энергетическое использование СВЧ-излучения на объект. Оно не требует столь высокой степени концентрации энергии, как информационное использование, однако для повышения его эффективности большое значение имеет согласование излучающего устройства с облучаемым объектом. В настоящее время специальное конструирование приборов для энергетических целей практически не ведётся.

Метод концентрации энергии в пространстве

Для того чтобы выполнить суммирование мощностей СВЧ-генераторов с различными собственными частотами, необходимо обеспечить соответствующие фазовые сдвиги в системе обратных связей от устройства суммирования [1, 2]. В этом случае генераторы аддитивно работают на одной частоте с коэффициентом суммирования $K_{\text{сум}} = P_{\text{сум}} / \sum P_n$, близким к 1.

Теоретический вопрос синхронизации и суммирования двух высокочастотных генераторов достаточно подробно рассмотрен в работе [2], в

которой, в частности, показано, что решение нелинейного дифференциального уравнения для разности фаз между основным и синхронизирующим сигналом имеет вид:

$$\sin \varphi = \frac{Q_{\text{внеш}} \times (\omega_1 - \omega)}{|\rho| \times \omega_0},$$

где φ – мгновенная разность фаз между колебаниями генератора и синхронизирующим сигналом, $Q_{\text{внеш}}$ – внешняя добротность, ρ – коэффициент отражения, ω_1 – частота синхронизирующего сигнала, ω – частота свободных колебаний при наличии нагрузки, ω_0 – собственная частота колебаний генератора. Синхронизация возможна при $|\sin \varphi| < 1$. Условие синхронизации

$$|\omega_1 - \omega| \leq \frac{|\rho|}{Q_{\text{внеш}}} \omega_0$$

определяет полосу «захвата». Синхронизация генераторов обеспечивает увеличение мощности и одновременно улучшает частотную стабильность системы, что существенно для информационных и энергетических систем.

Для энергетического воздействия на объекты, находящиеся на расстоянии ближнего поля радиопередатчика ЭМ-энергии, необходимо в малой области создать ЭМ-поле с большой напряжённостью, которое, переходя в тепло, повышает температуру до температуры необратимых изменений свойств материала (возгорания, плавления, механического разрушения, пробоя или химического преобразования). Одним из очевидных способов решения такой задачи является использование антен-

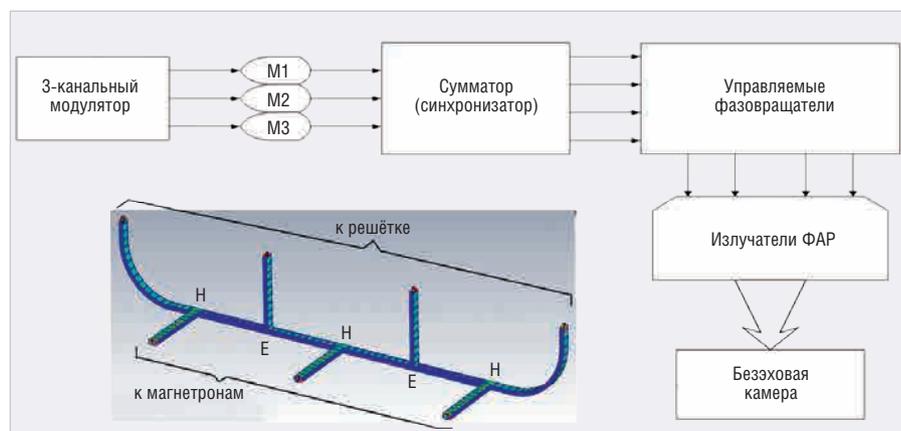


Рис. 2. Структура системы концентрации поля (3/4)

ной решётки. В данном случае были применены 9 магнетронных генераторов, работающих на рупорную структуру ФАР с 16 излучателями (см. рис. 1), каждый из которых способен излучать ЭМ-энергию мощностью 1 кВт.

В качестве базовой схемы для суммирования и синхронизации магнетронных генераторов была выбрана схема Е. Дэвида [2] на основе волноводов сечением 34×72 мм. На рисунке 2 представлена схема для трёх магнетронных генераторов (3/4), которая в дальнейшем была расширена для излучателя 9/16. Данная схема включает в себя три тройника Н-типа и два тройника Е-типа, связанные между собой отрезками волноводов. При этом порты 1–3 являются входными, а порты 4–7 – выходными.

С помощью математического моделирования были выполнены расчёт и оптимизация геометрических размеров сумматора для работы на частоте входных сигналов используемых генераторов. В результате проведения оптимизации:

- обеспечено равномерное распределение мощности на выходных портах схемы ($P_{\text{вых1}} \approx P_{\text{вых2}} \approx P_{\text{вых3}} \approx P_{\text{вых4}}$, при этом разброс $\Delta P_{\text{вых}}$ составил не более 5%);
- обеспечено необходимое равномерное распределение отражённой мощности на входных портах схемы ($P_{\text{отр1}} \approx P_{\text{отр2}} \approx P_{\text{отр3}}$, при этом разброс $\Delta P_{\text{отр}}$ составил не более 5% при отражении $\rho < -10$ дБ);
- обеспечена необходимая рабочая полоса частот не менее 200 МГц;
- коэффициент суммирования ($K_{\text{сум}} = \frac{\sum P_{\text{вых}}}{\sum P_{\text{вх}}}$) составил 0,8.

После проведения расчётов был изготовлен экспериментальный образец схемы. Для питания 16 выходов использована система с 12 входами. Для дальнейшей концентрации поля были произведены расчёт и изготовление фазированной решётки (излучатель ФАР).

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ КОНЦЕНТРАЦИИ ПОЛЯ

Для расчёта мощности поглощения в целевом объекте могут использоваться современные программы электродинамического моделирования, такие как FEKO Altair, HFSS ANSYS. Однако в настоящее время наиболее подходящей для этих целей является программа CST SUITE, которая с большой точностью позволяет рассчитать повышение температуры в

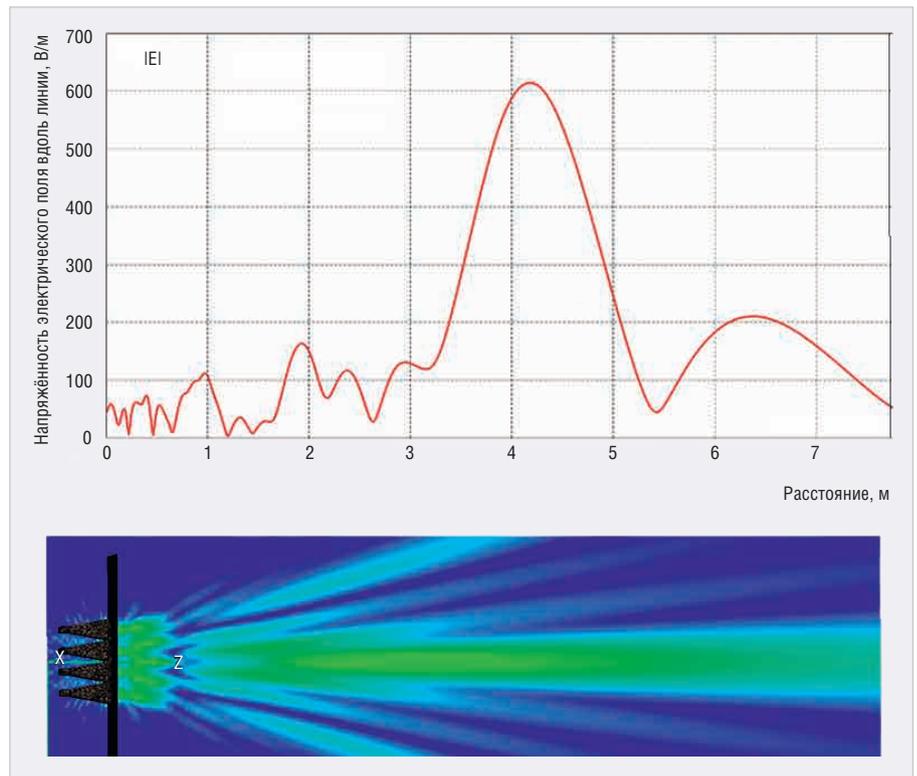


Рис. 3. Ближнее поле ФАР и напряжённость электрического поля вдоль оси излучения

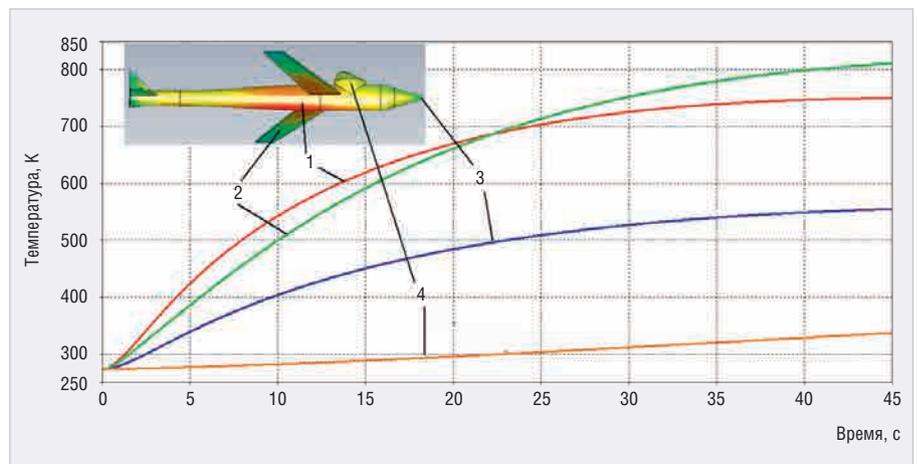


Рис. 4. Расчёт динамического изменения температуры облучаемого объекта на CST MWS

среде, на которую воздействует ЭМ-поле (см. рис. 3), а также поток частиц, воздействующих на электронные приборы, находящиеся в целевом объекте.

Воздействие мощности ЭМ-поля на целевой объект можно представить в виде наведения на нём токов, генерирующих тепло, или в виде перехода энергии фотонов в энергию хаотического движения частиц. Из расчётов, показанных на рисунке 3, видно, что на расстоянии 4 м в пространстве появляется максимум электромагнитного поля с напряжённостью 600 В/м. Данные о напряжённости электрического поля, полученные в FEKO, позволяют рассчитать в программе CST температурное распределение как в уста-

новившемся (статическом) состоянии, так и в динамическом. Нарастание температуры в различных точках целевого объекта в зависимости от времени экспонирования изображено на рисунке 4.

Расчёты и эксперименты показали, что температура в целевом объекте на расстоянии 10 м от излучателя может увеличиваться до +500°C за 10 с экспонирования. В условиях разреженного пространства, которое имеет место в мощных СВЧ-приборах (электронных лампах, ЛБВ, ЛОВ, магнетронах), а также в условиях космоса, температура устройства повышается за счёт бомбардировки металлов частицами. Этот механизм превращения энергии

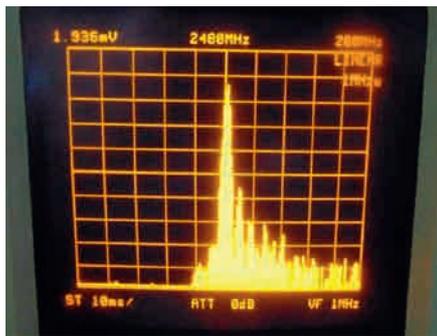


Рис. 5. Спектр на выходе синхронизированных магнетронов

частиц в тепловую рассчитывается в программе CST PARTICLE [4].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Работа магнетронов в составе одномерной антенной решетки 3/4 была осуществлена в безэховой камере. Плотность мощности измерена в области максимального поля. На рисунке 5 представлена визуализация спектра на выходе ФАР 3/4, на рисунке 6 – сечение ближнего поля, полученного с помощью тепловизора на расстоянии 1,5 м. Виден «ножевой» характер диаграммы излучения.

Кроме того, по результатам ранних работ по синхронизирующим излучающим устройствам [3] научным коллективом во главе с Р.Ф. Мюллером было изготовлено и испытано устройство сложения и синхронизации магнетронов 4/4, которое также может быть использовано для направленного

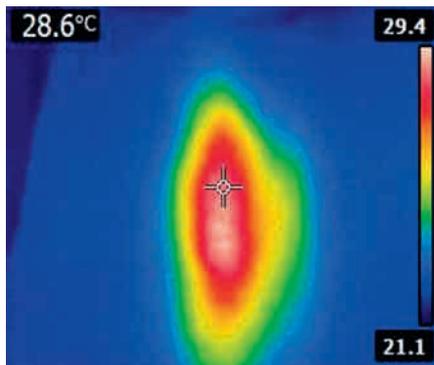


Рис. 6. Сечение диаграммы излучения

энергетического воздействия на объект (см. рис. 7).

При анализе взаимодействия ЭМ-излучения с полупроводниковыми приборами были рассмотрены силы, действующие на электрон в неоднородном высокочастотном электромагнитном поле. В определённых условиях для учёта воздействия на электрон можно рассматривать силы Гапонова-Миллера как градиент потенциала, зависящего от амплитуды ВЧ-поля вблизи поверхности полупроводника. В 70-е годы учёт действия этих сил в системах со знакопеременным магнитным полем позволил создать лазеры на свободных электронах – высокоэффективные устройства для генерации терагерцовых волн. «Несинхронные взаимодействия» этих полей имеют резонансный характер. Следует отметить, что действие данных сил может быть отнюдь не «малым» и в ряде слу-



Рис. 7. Синхронизатор на четырёх магнетронах

чаев сопоставимым с действием «синхронных» сил.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белобабa И.Н. Концентрация электромагнитного поля с помощью открытого зеркального резонатора: 05.12.07. Антенны и СВЧ-устройства: Диссертация кандидата технических наук. – М.: МЭИ, 2000. – 115 с.
2. Дейвид Е.Е. Фазирование высокочастотными сигналами. Электронные сверхвысокочастотные приборы со скрещенными полями. – М.: Иностранная литература, 1961.
3. Иванов И.М., Курушин А.А. Синхронизация магнетронов с выводом энергии в свободное пространство. Труды Международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн ИРЭМВ – 2013». Дивноморск, 24–28 июня 2013 г.
4. Ефремова М.В., Иванов И.М., Курушин А.А. Моделирование СВЧ-приборов с помощью программы CST Particle Studio. – М.: СОЛОН-Пресс, 2018. – 362 с.



НОВОСТИ МИРА

В Госдуме в первом чтении рассмотрели законопроект с поправками к 44-ФЗ (о госзакупках)

В Госдуме в первом чтении рассмотрели законопроект с поправками к 44-ФЗ (о госзакупках) в части заключения специальных инвестиционных контрактов для организаций ОПК.

Комментарий первого заместителя председателя Комитета по экономической политике, промышленности, инновационному развитию и предпринимательству Владимира Гутенёва:

«Механизм локализации производства путём заключения СПИКов (специальных инвестиционных контрактов) зарекомендовал себя одним из ключевых для решения таких важных задач, как диверсификация в сфере ОПК. Экономический эффект виден уже сейчас: создаются новые рабочие места, увеличиваются налоговые поступления в бюджет

от новых инвесторов и, самое главное, создаётся новая продукция, не имеющая произведённых в Российской Федерации аналогов.

Логичный шаг по развитию этого механизма – принятие отдельных закупочных положений, которые устанавливают особенности осуществления закупки товара, производство которого создаётся или модернизируется и осваивается на территории РФ в соответствии со СПИКаами.

Предлагается для организаций, которые входят в сводный реестр оборонно-промышленного комплекса, снизить минимальный объём инвестиций до 750 млн руб., сейчас этот порог – 3 млрд руб.

Кроме того, ещё одна предусмотренная законопроектом преференция для предприятий ОПК – это отмена ограничений для объёма поставок продукции. Организации из реестра ОПК смогут поставить любое количество това-



ра, в то время как остальные организации будут продолжать поставлять не более 30% от количества продукции, которую произвели за год.

Также заказчик будет заключать контракт с предприятием ОПК как с единственным поставщиком.

Предлагаемые поправки дадут возможность активнее использовать механизм СПИКов при реализации проектов по диверсификации и будут способствовать реализации задач по диверсификации производств ОПК».

Пресс-релиз Союза машиностроителей России

ChipEXPO-2019

КОМПОНЕНТЫ | ОБОРУДОВАНИЕ | ТЕХНОЛОГИИ

17-я
МЕЖДУНАРОДНАЯ
ВЫСТАВКА
ЭЛЕКТРОНИКИ

РОССИЯ | МОСКВА
ЭКСПОЦЕНТР



ТЕМАТИЧЕСКИЕ ЭКСПОЗИЦИИ

- Экспозиция Департамента радиоэлектронной промышленности Минпромторга России «Участники Государственной программы «Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности на 2013-2025 годы»
- Экспозиция участников конкурса на присуждение премии «Золотой Чип»
- Экспозиция «Испытания и контроль качества ЭКБ»
- Экспозиция «Новинки производителей электронных компонентов»
- Экспозиция «China electronics»
- Экспозиция предприятий Зеленограда (Корпорация развития Зеленограда)
- Экспозиция предприятий АО «Росэлектроника»

www.chipexpo.ru

16.10-
18.10

Реклама

