

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
ИНСТИТУТ ТЕПЛО- и МАССООБМЕНА им. А. В. ЛЫКОВА
Журнал основан в январе 1958 г.

ТФЖ

И
НЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

JOURNAL
OF ENGINEERING PHYSICS
AND THERMOPHYSICS

Отдельный оттиск
Offprint

Том 88, № 6

Vol. 88, No. 6

НОЯБРЬ–ДЕКАБРЬ
NOVEMBER–DECEMBER

2015

ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в январе 1958 г.

2015. ТОМ 88, № 6 (НОЯБРЬ–ДЕКАБРЬ)

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОС В ДИСПЕРСНЫХ И ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

Баранов А. В. Неизотермическое течение реагирующей жидкости с одновременной пропиткой пористого слоя.....	1267
Рудобашта С. П., Кошелева М. К., Карташов Э. М. Нестационарная массоотдача у поверхности цилиндрического тела.....	1276
Филиппов А. И., Ахметова О. В., Губайдуллин М. Р. Поле давления при радиальной фильтрации в неоднородном ортотропном пласте в асимптотическом приближении.....	1285
Теплицкий Ю. С., Рослик А. Р. О нестационарных процессах теплопереноса в слое мелкодисперсных капсул при наличии фазового перехода.....	1297
Рамазанов М. М., Булгакова Н. С. Критерий возникновения фильтрационной конвекции смеси с учетом равновесной и неравновесной адсорбции.....	1307
Алхасов А. Б., Рамазанов М. М., Алхасова Д. А. О фронтовом режиме тепломассопереноса в геотермальном пласте.....	1314
Алишаев М. Г. Испарение и конденсация влаги в кротованной почве.....	1321

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ТЕПЛООБМЕН В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Зарубин В. С., Кувыркин Г. Н., Савельева И. Ю. Математическая модель термостатирующего покрытия с термоэлектрическими модулями.....	1328
Кузнецов Г. В., Кравченко Е. В. Влияние СВЧ-излучения на тепловой режим системы "полупроводник–композит".....	1336
Кот В. А. Метод граничных характеристик.....	1345
Сидоров Д. Э., Колосов А. Е., Погорелый О. В., Гурьева А. А. Инженерный подход к определению поля излучения ПЭТ-среды в условиях радиационного нагрева.....	1364
Соловьев С. В. Моделирование конвективного теплообмена в электропроводящей жидкости в шаровой полости. Алгоритм решения.....	1370

НАНОСТРУКТУРЫ

Футько С. И., Шулицкий Б. Г., Лабунов В. А., Ермолаева Е. М. Моделирование кинетики роста наночастиц железа при инжестировании ферроцена в процессе химического парофазного осаждения углеводородов.....	1386
Станкевич Ю. А., Фисенко С. П. Изотермическое осаждение капель и наночастиц на подложку из натекающей газовой струи.....	1396
Партизан Г., Мансуров Б. З., Медянова Б. С., Алиев Б. А., Jiang Xin. Синтез углеродных наноструктур на нанопорошках никеля, полученных методом электровзрыва проводников.....	1403

ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ

Аульченко С. М., Картаев Е. В. Управление процессом синтеза субмикронных частиц диоксида титана в проточном плазмохимическом реакторе.....	1409
Веремейчик А. И., Сазонов М. И., Хвисевич В. М., Цыганов Д. Л. Теплообмен между плазменной струей и поверхностью металла в полости реза.....	1415
Мессерле В. Е., Моссэ А. Л., Никончук А. Н., Устименко А. Б. Плазмохимическая переработка медико-биологических отходов.....	1420
Лебединский К. В., Курносоев Н. Е., Николотов А. А., Алексеев Д. П. Ионизация воздуха в вихревой трубе Ранка–Хилша и способ получения уни- и биполярной ионизации.....	1425

ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА В РЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ

Маланичев И. В., Ахмадиев Ф. Г. Моделирование течения неньютоновских эмульсий в микроканалах 1431

ГИДРОГАЗОДИНАМИКА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Стрельникова С. А., Ткаченко Г. В., Урюков Б. А. Гидродинамические аспекты эффекта Томса.....	1439
Корнилов В. И., Бойко А. В., Кавун И. Н. Турбулентный пограничный слой на мелкоперфорированной поверхности в условиях вдува воздуха за счет ресурсов внешнего потока	1448
Борисевич В. Д., Потанин Е. П. Магнитогидродинамические явления и теплоперенос вблизи вращающегося диска	1460
Мартюшев С. Г., Мирошниченко И. В., Шеремет М. А. Влияние геометрического параметра на режимы естественной конвекции и теплового поверхностного излучения в замкнутом параллелепипеде	1468
Тютюма В. Д. Распределение давления в кольцевом зазоре между вращающимися соосными цилиндрами при больших напряжениях сдвига	1476
Patil P. M. Comments on the Paper "Unsteady Radiative-Convective Boundary-Layer Flow of a Casson Fluid with Variable Thermal Conductivity" by M. Gnaneswara Reddy	1480
Shaw S. and Mukhopadhyay B. Electromagnetic Effects on Wave Propagation in an Isotropic Micropolar Plate.....	1483

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Кац М. Д., Кац И. М. Погрешности определения теплофизических характеристик гетерогенных высокоэнергетических материалов методом лазерного импульса	1493
Герасимов Г. Я. Наноматериалы в топливных элементах с протонно-обменной мембраной.....	1498
Дмитренко А. В. Аналитическая оценка полей скорости и температуры в круглой трубе на основе стохастических уравнений и эквивалентности мер	1512
Исаев С. А., Калинин Е. И., Судаков А. Г., Харченко В. Б. Оптимизация щелевого отсоса в вихревой круговой ячейке на толстом профиле NASA0022 с максимальным аэродинамическим качеством	1521
Содержание "Инженерно-физического журнала" за 2015 г.	1526
Авторский указатель к т. 88	1535

Подготовка оригинал-макета и сопровождение компьютерной системы в Internet осуществляется в редакции "Инженерно-физического журнала",
Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова
Национальной академии наук Беларуси
220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 15

Ответственный за выпуск: Л. Н. Шемет

Подписано в печать 02.11.2015. Формат 60×84%. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 31,73. Уч.-изд. л. 28,59. Тираж 126 экз. Заказ 201.

Отпечатано в Республиканском унитарном предприятии «Издательский дом «Беларуская навука».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий №1/18 от 02.08.2013.
ЛП № 02330/455 от 30.12.2013.

Ул. Ф. Скорины, 40. 220141, г. Минск.

УДК 621.192.3

*Г. В. Кузнецов, Е. В. Кравченко***ВЛИЯНИЕ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ СИСТЕМЫ
"ПОЛИМЕР–ПОЛУПРОВОДНИК–КОМПОЗИТ"**

Проведен численный анализ влияния СВЧ-излучения на тепловой режим элементов электронной аппаратуры (ЭА). Исследования показали, что температурное поле системы "полимер–полупроводник–композит" при таком воздействии является неоднородным. Установлено, что в достаточно типичных условиях работы с повышением напряженности электрического поля происходит значительное увеличение (с 362 до 387 К) максимальной температуры моделируемого объекта. Такое существенное влияние СВЧ-излучения на тепловой режим системы "полимер–полупроводник–композит" сопоставимо с ростом внешней температуры на 20 К или увеличением тепловыделения внутреннего источника на 30%.

Ключевые слова: радиоизлучение, СВЧ-нагрев, нестационарный тепловой режим, численное моделирование, метод конечных разностей.

Введение. Высокая степень интеграции устройств современной электронной аппаратуры (ЭА) на единицу площади, а также миниатюризация электрорадиоэлементов (ЭРЭ) совместно с радиоизлучениями различного происхождения приводят к интенсификации тепловых нагрузок на отдельные ЭРЭ [1, 2]. Наряду с известными положительными свойствами волн сверхвысокой частоты (СВЧ) и применением их в различных отраслях [3–6], СВЧ-излучение оказывает негативное воздействие (например, на ЭА при "нормальных" условиях эксплуатации) [1, 7, 8]. Результатом являются [1, 8]: нарушение теплового режима приборов, электромагнитные помехи, деструкция материалов и функциональные сбои. Прогнозирование температурных полей ЭРЭ в условиях воздействия СВЧ-излучений имеет большое значение при анализе надежности устройств ЭА.

Важным этапом при исследовании влияния СВЧ-излучения на тепловой режим элементов ЭА является выбор элементарных моделей (структур), которые, с одной стороны, должны быть наиболее используемыми, а с другой, восприимчивыми к такому воздействию [9].

При производстве широкого круга радиотехнических приборов (микропроцессоры, микроконтроллеры, интегральные микросхемы и т. д.) применяются полимеры [10, 11]. Без использования полимерных композиционных материалов (пластмасс, компаундов, слоистых пластиков) практически невозможно реализовать современное электронное устройство. В результате воздействия волн СВЧ в полимерных и полупроводниковых структурах ЭА происходит диэлектрический или СВЧ-нагрев [1]. Величина тепловыделения, обусловленного радиоизлучением, зависит от параметров электромагнитного поля (значения напряженности, частоты, направленности вектора напряженности и т. д.), электрических и теплофизических характеристик используемых материалов [12, 13]. Так, например, диэлектрическая проницаемость (ϵ) применяемых при производстве ЭА материалов изменяется в диапазоне от 1 до 12 [13]. Очевидно также, что тепловой режим структур типа "полимер–полупроводник" в условиях СВЧ-нагрева является нестационарным.

Работа внутреннего тепловыделяющего элемента — полупроводникового кристалла — приводит к тому, что температурное поле самих ЭРЭ является существенно неоднородным [14]. Поэтому для исследования воздействия СВЧ-излучения на тепловой режим работы целесообразен выбор характерного для широкого круга ЭА объекта. Таким, например, является печатный узел, который состоит из композиционного конструктивного материала и ЭРЭ в пластиковом корпусе [1, 8, 11].

Кроме непосредственного нарушения теплового режима работы ЭА при воздействии СВЧ-излучений, волны СВЧ создают электромагнитные помехи, приводящие к тепловому пробую и ускорению процесса деградации полупроводниковых и полимерных структур [16, 17].

Электромагнитные помехи могут приводить к функциональным отказам микросхем типа КМОП (КМОП — комплементарная структура "металл-оксид-полупроводник") вследствие эффекта "защелкивания" ("тиристорная защелка") [17]. Отказ ЭРЭ происходит в результате выгорания, металлизации или теплового пробоя внутренних полупроводниковых структур под действием импульсного тока, переводящего "защелку" в положение "включено" на достаточно долгое время [17]. Подобные явления наблюдаются в микросхемах и при воздействии нейтронов [18].

Процесс пробоя (теплового или электрического) полимерных материалов связан с потерей электрической прочности (предварительная стадия) и их дальнейшим разрушением (заключительная фаза) [13]. Известно [13], что электрическая прочность полярных полимеров уменьшается в 4 раза (при повышении температуры до 400 К), а у неполярных приблизительно в 2 раза в том же диапазоне температур. При этом тепловое воздействие СВЧ-помех зависит от взаимной ориентации вектора напряженности электрического поля (поляризация) и пространственного расположения корпуса ЭРЭ [9]. На основании результатов работ [9, 17] можно сделать вывод, что электромагнитные помехи создают предпосылки для теплового пробоя в структурах "полимер-полупроводник".

Скорость деструкции полупроводниковых и полимерных композиционных материалов существенно зависит от температуры и параметров электромагнитного излучения [12, 15, 16]. Согласно кинетической концепции С. Н. Журкова [19], разрушение полимеров происходит в результате теплового движения в материале. Термофлуктуационный механизм деструкции состоит в совместном действии тепловых колебаний и напряжений. Температура в уравнении Журкова [19] является важнейшим фактором, а долговечность полимерного материала зависит от нее экспоненциально. Известно [20], например, что даже единичный короткий импульс приводит к саморазогреву и деградации полупроводниковой структуры приборов. Также установлено, что перепады температур по системам типа "полимер-полупроводник" при эксплуатации ЭА в диапазоне умеренных рабочих температур могут достигать 20–30 К [14, 21].

Анализ влияния СВЧ-излучения на тепловой режим системы "полимер-полупроводник-композит" возможен на основе моделирования совместно протекающих процессов нестационарного СВЧ-нагрева и тепловыделения кристаллов ЭРЭ.

Математическое моделирование СВЧ-нагрева в диэлектрических и полупроводниковых материалах. В результате воздействия на диэлектрик внешнего электромагнитного поля происходит необратимое рассеивание некоторой части энергии в материале [22]. Совокупность параметров, определяющих диэлектрические потери (диэлектрическая проницаемость, тангенс диэлектрических потерь), и характер внешнего СВЧ-излучения (частота, напряженность электромагнитного поля, поляризованность) определяют состояние полимеров [11, 12, 22].

Методы математического моделирования СВЧ-нагрева формально можно разделить на аналитические и численные. Так, например, получены аналитические решения задачи нагрева слоя диэлектрика плоской электромагнитной волной [22, 23] с учетом линейной [24] и произвольной зависимостей коэффициента затухания от температуры [25] в одномерной постановке. Разработаны математические модели СВЧ-нагрева диэлектрического слоя конечной толщины, соответствующие разным способам возбуждения и условиям распространения электромагнитного поля [26], а также декомпозиционная математическая модель распространения электромагнитных волн в наноструктурированных композитах [27].

Аналитические методы решения [22–27] применимы лишь для ограниченного круга задач, так как они не учитывают нестационарность температурных полей, например, в структуре "полимер-полупроводник-композит", а также пространственную неоднородность температур в результате совокупного влияния СВЧ-излучения и тепловыделения локальных источников, например, полупроводниковых кристаллов ЭРЭ.

Численное решение систем уравнений (Максвелла и теплопроводности) осуществляется с использованием методов конечных объемов [28], конечных элементов [29], конечных разностей во временной области [30]. Поглощенная материалами мощность СВЧ-излучения превращается в теплоту и рассчитывается на основе теоремы Пойнтинга [29–31].

Методы анализа температурных полей при наличии локальных источников тепловыделения. Основной современных методов анализа тепловых режимов устройств ЭА является моделирование с использованием различных программных комплексов (например, Flow Vision) [32]. Известны и иные подходы: упрощенные математические модели [33–35], метод тепловых схем (теплового сопротивления) [36, 37], тепловизионного мониторинга [38], метода конечных элементов [37], конечно-разностных методов [39] при учете естественной конвекции [40] совместно с теплоотводом излучением [41] в стационарном [42] и циклическом режимах работы [43].

На основании анализа результатов работ [22–43] можно сделать вывод, что определение масштабов влияния СВЧ-излучения на тепловой режим системы "полимер–полупроводник–композит" возможно только на основе численного моделирования нестационарных температурных полей, формирующихся в результате взаимосвязанных процессов СВЧ-нагрева и тепловыделения от локальных ЭРЭ.

Постановка задачи. Постановка задачи (рис. 1) типична для широкого круга электрорадиоэлементов (микросхемы, транзисторы, диоды, силовые полупроводниковые приборы) и применяемых материалов (таблица).

Моделирование температурного поля с учетом влияния СВЧ-нагрева на тепловой режим системы "полимер–полупроводник–композит" проведено в диапазоне рабочих температур окружающей среды в плоскости XOY .

В двумерной постановке задача теплопереноса сводится к решению нестационарного уравнения теплопроводности:

$$C(x, y) \rho(x, y) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(x, y) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(x, y) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q_{\text{ист}}(t, x, y) + Q_{\text{свч}}(t, x, y). \quad (1)$$

При задании начальных условий считалось, что температура в начальный момент времени распределена равномерно:

$$T|_{t=0} = T_0(x, y). \quad (2)$$

В граничных условиях учитывался конвективный и радиационный теплообмен:

$$x = 0, \quad y \in [0; L_y] : -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T) (T_{\text{в}} - T) + \varepsilon_{\text{пр}} \sigma (T_{\text{в}}^4 - T^4), \quad (3)$$

$$x = L_x, \quad y \in [0; L_y] : \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T) (T_{\text{в}} - T) + \varepsilon_{\text{пр}} \sigma (T_{\text{в}}^4 - T^4), \quad (4)$$

$$y = 0, \quad x \in [0; L_x] : -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha(T) (T_{\text{в}} - T) + \varepsilon_{\text{пр}} \sigma (T_{\text{в}}^4 - T^4), \quad (5)$$

$$y = L_y, \quad x \in [0; L_x] : \lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha(T) (T_{\text{в}} - T) + \varepsilon_{\text{пр}} \sigma (T_{\text{в}}^4 - T^4). \quad (6)$$

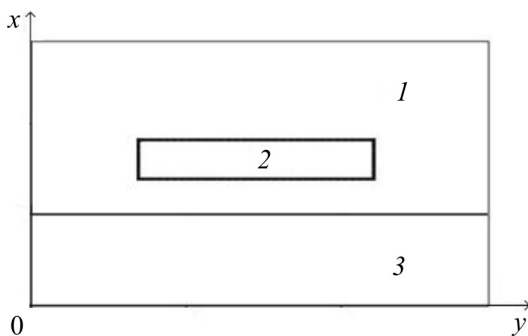


Рис. 1. Область решения задачи моделирования температурных полей в системе "полимер–полупроводник–композит": 1 — полимерный материал; 2 — полупроводниковый (кристалл) элемент; 3 — композиционный материал (стеклотекстолит)

Электрические и теплофизические параметры модели

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Удельная теплоемкость C , Дж/(кг·К)	Теплопроводность λ , Вт/(м·К)	Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$, 10 ⁻³	Диэлектрическая проницаемость ε
Полимерный материал	1200	1000	0.3	0.2	2.2
Полупроводник (кремний)	3000	733	109	1	12
Композит (стеклотекстолит)	1750	990	0.3	30	6

Коэффициент конвективного теплообмена $\alpha(T)$ зависит от температуры и определяется для каждой точки поверхности [44]:

$$\alpha(T) = (1.42 - 1.4 \cdot 10^{-3} T_c) N \left(\frac{T - T_B}{L} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (7)$$

Приведенный коэффициент черноты поверхности изделия и окружающей среды $\epsilon_{пр}$ определяется соотношением [44]:

$$\epsilon_{пр} = \left(\frac{1}{\epsilon_{п}} + \frac{1}{\epsilon_{окр}} - 1 \right)^{-1}. \quad (8)$$

Интенсивность тепловыделения при СВЧ-воздействии [45]:

$$Q_{свч}(t, x, y) = 2\pi\epsilon_0\epsilon \operatorname{tg}(\delta) f E^2. \quad (9)$$

Диапазон СВЧ-излучения ($f = 3-7$ ГГц) и значения напряженности электрического поля ($E = 600-1900$ В/м) в выражении (9) выбраны исходя из экспериментальных данных [46-48].

При постановке задачи сделаны следующие допущения:

1. Теплофизические и электрические характеристики материалов (таблица) структуры не зависят от температуры.
2. Тепловой контакт между элементами структуры считается идеальным.
3. Затухание СВЧ-излучения не учитывается.

Метод решения дифференциального уравнения (1) аналогичен [39-43].

Результаты и обсуждение. Характерный вид температурного поля системы "полимер-полупроводник-композит" в результате СВЧ-нагрева при температуре окружающей среды $T_B = 27^\circ\text{C}$ в момент времени $t = 100$ с показан на рис. 2.

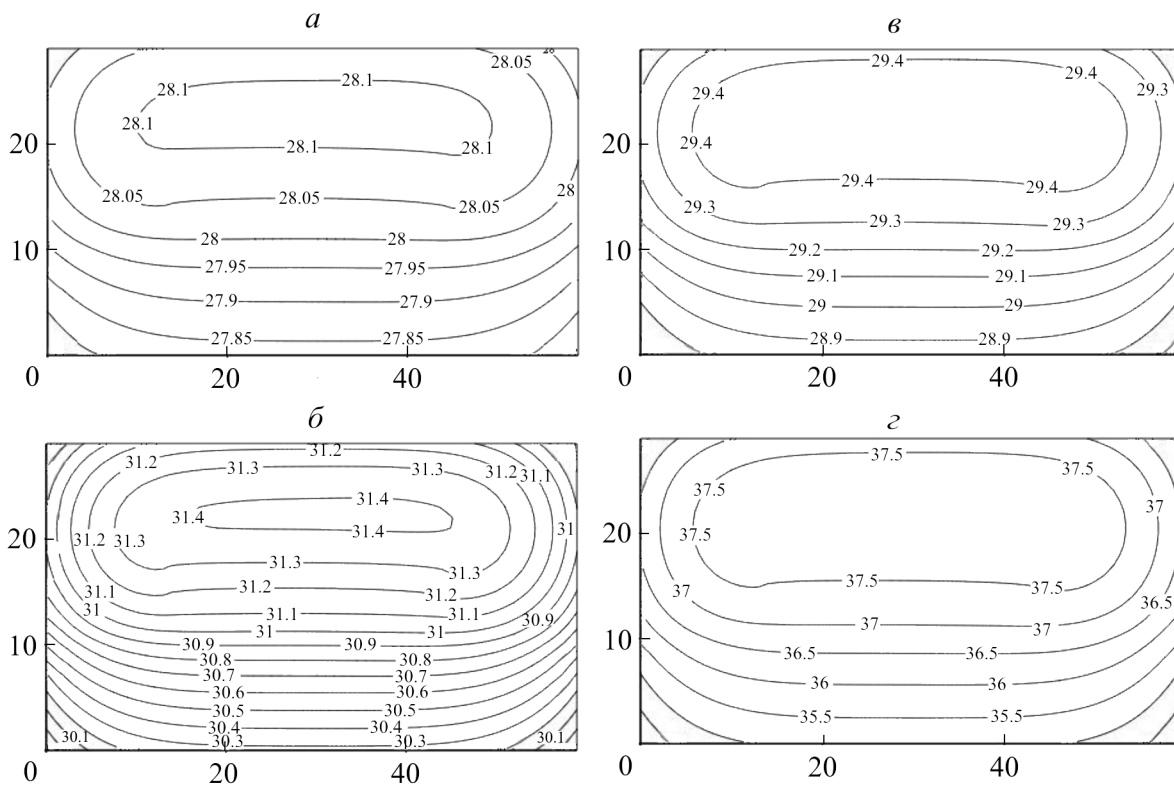


Рис. 2. Температурное поле системы "полимер-полупроводник-композит" при воздействии СВЧ-излучения: а — $E = 600$ В/м; б — 1200; в — 900; з — 1900

Численные исследования теплового режима структуры "полимер–полупроводник–композит" проводились для частоты 3 ГГц без учета тепловыделения внутреннего источника (рис. 2). Анализ результатов показал, что увеличение значения вектора напряженности до $E = 1900$ В/м приводит к росту температуры по структуре на 10 и более градусов (рис. 2, *з*), а температурное поле моделируемого объекта является существенно нестационарным. Необходимо отметить, что ресурс (надежность) радиотехнических приборов существенно зависит от температуры, при которой они работают. Известно, что интенсивность отказов ЭА увеличивается в 2 раза при повышении температуры на 10 К в диапазоне рабочих температур [49]. Поэтому численные исследования влияния СВЧ-излучения на тепловой режим работы системы "полимер–полупроводник–композит" целесообразно проводить для двух значений напряженности электрического поля (1200 и 1900 В/м).

Тепловой режим системы "полимер–полупроводник–композит" в результате совместного влияния СВЧ-нагрева и тепловыделения внутреннего источника иллюстрирует рис. 3. Следует отметить, что температурное поле структуры является существенно неоднородным, а градиенты температуры по оси OY достигают 60 К.

Результаты численного исследования влияния СВЧ-излучения в диапазоне частот 3–7 ГГц на тепловой режим структуры приведены для средней по объему (кривые 2–5 на рис. 4, *а*) и максимальной расчетной температуры (кривые 7–10 на рис. 4, *а*). Температурные зависимости 1 и 6 на рис. 4, *а* получены без учета воздействия СВЧ-нагрева при прочих равных условиях. Анализ зависимостей $T_{cp}(t)$ (кривые 1–5 на рис. 4, *а*) показывает, что с ростом частоты электромагнитного излучения средняя температура по системе "полимер–полупроводник–композит" увеличивается на 3 К (кривая 2, рис. 4) и на 10 К (кривая 5, рис. 4, *а*). Полученные зависимости характеризуют вклад СВЧ-нагрева в интенсификацию тепловой нагрузки по исследуемой структуре и хорошо согласуются с прогнозируемым температурным полем (рис. 2, *б*) при напряженности $E = 1200$ В/м и $f = 3$ ГГц.

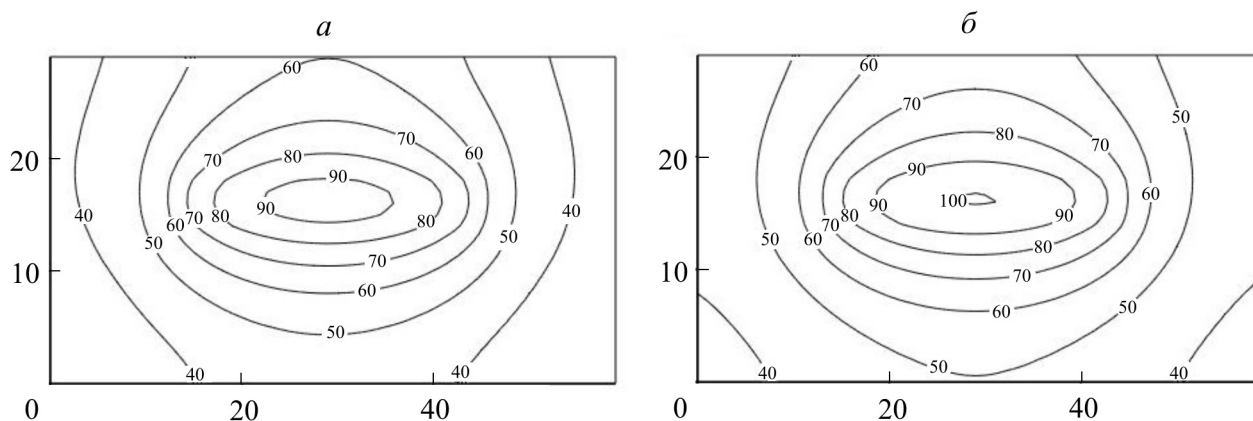


Рис. 3. Температурное поле системы "полимер–полупроводник–композит" при $Q_{ист} = 1$ Вт и $f = 3$ ГГц: *а* — $E = 1200$ В/м; *б* — 1900

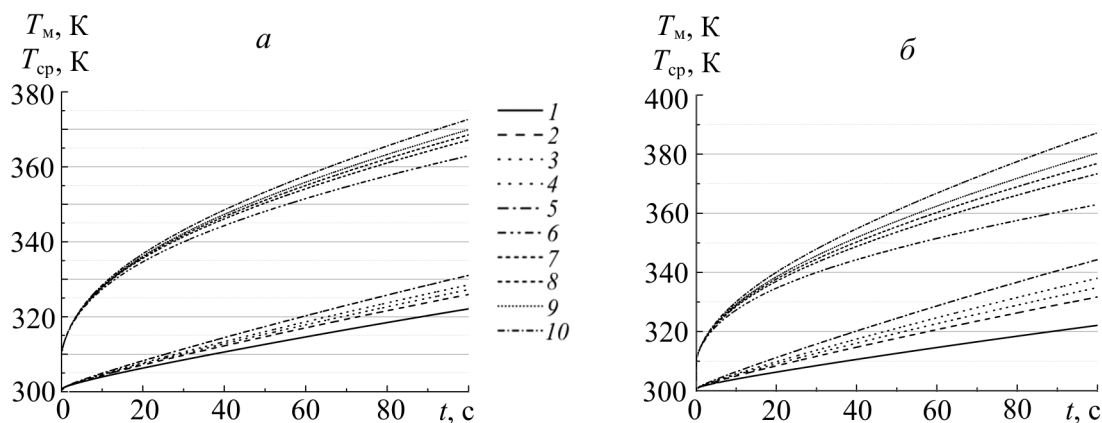


Рис. 4. Температурные зависимости системы "полимер–полупроводник–композит" при $E = 1200$ (*а*) и 1900 В/м (*б*): 1 и 6 — без СВЧ-нагрева; 2 и 7 — $f = 3$ ГГц; 3 и 8 — 4; 4 и 9 — 5; 5 и 10 — 7

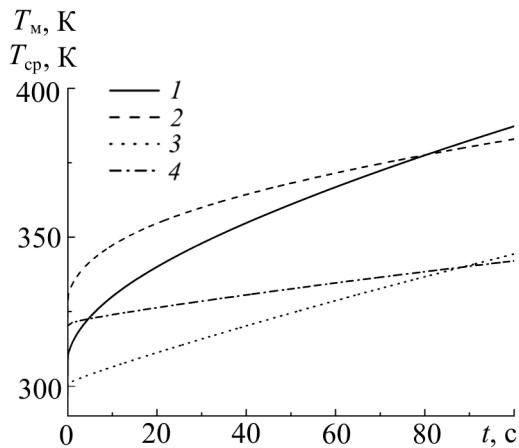


Рис. 5. Изменения характерных температур системы "полимер-полупроводник-композит" с ростом времени: 1, 3 — T_M и T_{cp} при $E = 1900$ В/м, $f = 7$ ГГц, $T_B = 300$ К; 2, 4 — T_M и T_{cp} без СВЧ-нагрева при $T_B = 320$ К

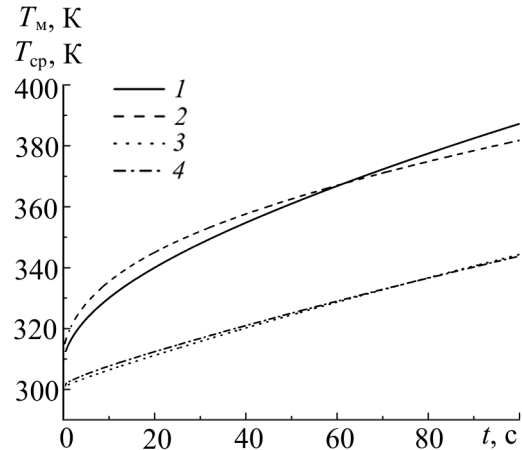


Рис. 6. Изменения характерных температур системы "полимер-полупроводник-композит" с ростом времени: 1, 3 — T_M и T_{cp} при $E = 1900$ В/м и $Q_{ист} = 1$ Вт; 2, 4 — T_M и T_{cp} без СВЧ-нагрева при $Q_{ист} = 1.3$ Вт

Абсолютная максимальная температура системы "полимер-полупроводник-композит" с возрастанием частоты с 3 ГГц (кривая 7, рис. 4, а) до 7 ГГц (кривая 10, рис. 4, а) увеличивается с 367 до 372 К соответственно. Сравнение показывает, что T_M структуры (кривая 6, рис. 4, а) без СВЧ-нагрева равна 362 К при $t = 100$ с.

С увеличением напряженности электрического поля до 1900 В/м в исследуемой системе "полимер-полупроводник-композит" происходит резкое увеличение как средних (кривые 2–5, рис. 4, б), так и максимальных температур (кривые 7–10, рис. 4, б). Например, для времени моделирования $t = 100$ с максимальная температура (кривая 10 на рис. 4, б) выше на 25 К по сравнению с T_M (кривая 6 на рис. 4, б) без учета влияния СВЧ-излучения.

Проблематика прогнозирования тепловых режимов нашла применение в двух перспективных методологиях, связанных с разработкой (PdFR — Probabilistic Design for Reliability [50]) и эксплуатацией (DRM — Dynamic Reliability Management [51]) устройств современной ЭА. Суть этих концепций заключается в определении наиболее значимых ключевых факторов, влияющих на эксплуатационный ресурс ЭРЭ, с последующей разработкой математических моделей, основанных на физике отказов. С целью сравнительного анализа степени влияния СВЧ-нагрева на тепловой режим системы "полимер-полупроводник-композит" были проведены исследования с анализом роста внешней температуры в диапазоне умеренных рабочих T_B (рис. 5) и тепловыделения внутреннего источника (рис. 6).

Температурные зависимости для максимальных (кривая 2, рис. 5) и средних по объему температур (кривая 4, рис. 5) без СВЧ-нагрева при $T_B = 320$ К, а также при воздействии электромагнитных волн, представлены на рис. 5. Анализ результатов численных исследований показывает, что в начальном временном интервале (до 40 с) есть существенные расхождения в абсолютных значениях T_M и T_{cp} . Однако при $t = 100$ с отличия в оценках температур не такие большие и составляют от 2 (кривые 3, 4 на рис. 5) до 5 К (кривые 1, 2 на рис. 5).

Результаты численных исследований теплового режима системы "полимер-полупроводник-композит" с увеличением тепловыделения внутреннего источника представлены на рис. 6. Анализ температурных зависимостей T_M (кривые 1 и 2 на рис. 6) и T_{cp} (кривые 3 и 4 на рис. 6) показывает, что СВЧ-воздействие сопоставимо с повышением тепловыделения кристалла ЭРЭ (область 2 на рис. 1) на 30%.

Полученные зависимости характерных температур от времени для системы "полимер-полупроводник-композит" (рис. 4–6) достаточно хорошо согласуются с априорными инженерными представлениями о теплопроводности твердых тел и позволяют сделать вывод о существенном влиянии СВЧ-излучения на тепловой режим электронной аппаратуры.

Выводы

1. Впервые решена нестационарная задача СВЧ-нагрева системы "полимер–полупроводник–композит". Показано, что температурное поле структуры является существенно неоднородным, а градиенты температуры достигают 60 К.

2. Впервые показаны диапазоны изменения средних и максимальных температур в результате СВЧ-воздействия. Установлено, что при $E = 1900$ В/м в диапазоне частот 3–7 ГГц температура увеличивается от 10 до 25 К.

3. Численные исследования теплового режима системы "полимер–полупроводник–композит" показали, что воздействие волн СВЧ-диапазона сопоставимо с увеличением температуры внешней среды на 20 К или повышением тепловыделения ($Q_{\text{ист}}$) на 30%.

4. Прогнозирование температурных полей электронных приборов (транзисторов, микросхем, микроконтроллеров и т. д.) в результате воздействия волн СВЧ можно проводить по результатам численного анализа реальных нестационарных режимов работы устройств.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 15-38-50595/15).

Обозначения

C — удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); E — напряженность электрического поля, В/м; f — частота СВЧ-излучения; L — определяющий размер поверхности, м; N — коэффициент, зависящий от ориентации поверхности в пространстве; $Q_{\text{ист}}$, $Q_{\text{свч}}$ — тепловыделения источника и за счет СВЧ-нагрева, Вт; t — время, с; T — температура, К; T_0 — начальная температура, К; $T_{\text{в}}$, $T_{\text{м}}$ — температуры окружающей среды и максимальная температура модели, К; $T_{\text{с}}$ — среднее арифметическое температур поверхности модели и внешней среды, К; $T_{\text{ср}}$ — средняя температура по модели, К; $\text{tg } \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь x , y , z — координаты; $\alpha(T)$ — коэффициент конвективного теплообмена поверхности элемента ЭА с внешней средой, Вт/(м²·К); $\varepsilon_{\text{пр}}$ — приведенный коэффициент черноты поверхности и окружающей среды; ε_0 — электрическая постоянная; ε — диэлектрическая проницаемость; λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); ρ — плотность, кг/м³; σ — постоянная Стефана–Больцмана, Вт/(м²·К⁴).

Литература

1. Ключник А. В., Пирогов Ю. А., Солодов А. В. Обратимые отказы интегральных микросхем в полях радиоизлучения. *Журнал радиоэлектроники*. 2013. № 1. С. 3–24.
2. Tilley V. S. On microchannel shapes in liquid-cooled electronics applications. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2013. Vol. 62 (1). Pp. 163–173.
3. Саломатов В. В., Сладков С. О., Пашенко С. Э. СВЧ-технологии в угольной энергетике. *Инженерно-физический журнал*. 2012. Т. 85, № 3. С. 535–549.
4. Акулич П. В., Темрук А. В., Акулич А. В. Моделирование и экспериментальное исследование тепло- и влагопереноса при СВЧ-конвективной сушке растительных материалов. *Инженерно-физический журнал*. 2012. Т. 85, № 5. С. 951–958.
5. Гринчик Н. Н., Акулич П. В., Адамович А. Л., Куц П. С., Кундас С. П. Моделирование неизотермического тепло- и влагопереноса в капиллярно-пористых средах при периодическом микроволновом нагреве. *Инженерно-физический журнал*. 2007. Т. 80, № 1. С. 3–11.
6. Анфиногентов В. И., Ганиева С. Р. Математическое моделирование СВЧ нагрева вязких жидкостей в трубопроводе. *Вестник Казанского технологического университета*. 2014. Т. 17, № 2. С. 123–126.
7. Доценко О. А., Вагнер Д. В., Кочеткова О. А. Функциональные радиоматериалы для обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2013. Т. 56, № 8/2. С. 260–262.
8. Пирогов Ю. А., Солодов А. В. Повреждения интегральных микросхем в полях радиоизлучения. *Журнал радиоэлектроники*. 2013. № 6. С. 3–38.
9. Ключник А. В., Пирогов Ю. А., Солодов А. В. Методические аспекты исследования стойкости интегральных микросхем в электромагнитных полях импульсного радиоизлучения. *Журнал радиоэлектроники*. 2010. № 8. С. 1–27.
10. Козырев А. А., Горин Д. А., Кособудский И. Д., Микаелян Г. Т. Перспективы использования полимерных и нанокompозитных материалов в твердотельной электронике. *Нано- и микросистемная техника*. 2010. № 3. С. 9–23.
11. Михайлин Ю. А. *Конструкционные полимерные композиционные материалы*. Санкт-Петербург: Научные основы и технологии, 2008.
12. Дементьев Ю. В., Каплун В. Г., Кучеров Ю. С., Сытник А. Ф. Влияние длины волны внешнего СВЧ излучения на стойкость элементной базы радиоэлектронной аппаратуры. *Радиотехника*. 1996. № 2. С. 125–126.
13. Бартнев Г. М., Зеленов Ю. В. *Физика и механика полимеров*. Москва: Высшая школа, 1983.
14. Кузнецов Г. В., Белозерцев А. В. Численное моделирование температурных полей силовых транзисторов с учетом разрывов коэффициентов переноса. *Известия Томского политехнического университета*. 2005. Т. 308, № 1. С. 150–154.

15. Антипин В. В., Годовицын В. А., Громов Д. В., Раваев А. А. Деградация малошумящих СВЧ полевых транзисторов с затвором Шоттки на арсениде галлия при воздействии мощных импульсных микроволновых помех. *Радиотехника*. 1994. № 8. С. 34–38.
16. Кузнецов Д. В. Анализ деградационных процессов, возникающих в чувствительных элементах радиоэлектронной аппаратуры под влиянием мощных электромагнитных излучений. *Измерительная и вычислительная техника в технологических процессах*. 2013. № 2 (43). С. 101–107.
17. Xinhai Y., Changchun C., Xingrong R., Xi X., Liu Y. Temperature dependence of latch-up effects in CMOS inverter induced by high power microwave. *J. Semiconductors*. 2014. Vol. 35, No. 8. Pp. 084011-1–084011-6.
18. Normand E. Single-event effects in avionics. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1996. 43 (2, Part 1). Pp. 461–474.
19. Карташов Э. М., Цой Б., Шевелев В. В. *Структурно-статистическая кинетика разрушения полимеров*. Москва: Химия, 2002.
20. Levinshtein M. E., Ivanov P. A., Mnatsakanov T. T., Palmour J. W., Das M. K., Hull B. A. Self-heating and destruction of high-voltage 4h-sic rectifier diodes under a single short current surge pulse. *Semiconductors*. 2008. Vol. 42, No. 2. Pp. 220–227.
21. Kuznetsov G. V., Sheremet M. A. New approach to the mathematical modeling of thermal regimes for electronic equipment. *Russ. Microelectron.* 2008. No. 2. Pp. 131–138.
22. Анфиногентов В. И., Гараев Т. К., Морозов Г. А. Об одной задаче теории СВЧ нагрева диэлектриков. *Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева*. 2002. № 3. С. 21–22.
23. Рикенглаз Л. Э. К теории нагрева диэлектриков мощными электромагнитными полями. *Инженерно-физический журнал*. 1974. Т. 27, № 6. С. 1061–1068.
24. Некрасов П. Б., Рикенглаз Л. Э. К теории адиабатического нагрева СВЧ полем диэлектрика с коэффициентом затухания, зависящим от температуры. *ЖТФ*. 1973. Т. 43, № 4. С. 694–697.
25. Рикенглаз Л. Э. К теории распространения СВЧ электромагнитных полей в диэлектриках с малыми потерями. *ЖТФ*. 1974. Т. 44, № 6. С. 1125–1128.
26. Анфиногентов В. И. Математические модели СВЧ нагрева диэлектриков конечной толщины. *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2006. Т. 9, № 1. С. 78–83.
27. Николенко А. С. Математическая модель распространения электромагнитных волн в нанокompозитах на основе магнитных нанопроволок. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки*. 2013. № 4 (28). С. 147–161.
28. Patankar S. V. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. New York: Hemisphere, 1980.
29. Aparna K., Basak T., Balakrishnan A. R. Role of metallic and composite (ceramic–metallic) supports on microwave heating of porous dielectrics. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2007. Vol. 50. Issues 15–16. Pp. 3072–3089.
30. Klayborworn S., Pakdee W., Rattanadecho P., Vongpradubchai S. Effects of material properties on heating processes in two-layered porous media subjected to microwave energy. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2013. Vol. 61, Issue 1. Pp. 397–408.
31. Калганова С. Г. Влияние СВЧ воздействия электромагнитного поля на кинетику отверждения эпоксидной смолы. *Вестник Саратовского государственного технического университета*. 2006. Т. 1, № 1. С. 90–95.
32. Аксенов А. А., Жлуктов С. В., Кудимов Н. Ф., Сон Э. Е., Таран М. Д., Третьякова О. Н., Шишаева А. С. О моделировании сложного теплообмена в силовых трансформаторах большой мощности. *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2013. № 2. С. 131–140.
33. Беспалов В. Я., Мощинский Ю. А., Цуканов В. И. Упрощенная математическая модель нестационарного нагрева и охлаждения обмотки статора асинхронного двигателя. *Электричество*. 2003. № 4. С. 20–26.
34. Van Duijssen P., Bauer P., Leuchter J. Thermal models for semiconductors. *14th Int. Power Electronics and Motion Control Conf. (EPE/PEMC)*. 2010. Vol. 1. Pp. 23–28.
35. Бородин А. И., Иванова А. А. Моделирование температурного поля непрерывнолитого слитка с определением положения границы фазового перехода. *Инженерно-физический журнал*. 2014. Т. 87, № 2. С. 492–497.
36. Булычев А. В., Ерохин Е. Ю., Поздеев Н. Д., Филичев О. А. Тепловая модель асинхронного двигателя для цепей релейной защиты. *Электротехника*. 2011. № 3. С. 26–30.
37. Jong E. C. W., Ferreira J. A., Bauer P. Thermal design based on surface temperature mapping. *Power Electron. Lett., IEEE*. 2005. Vol. 3. Pp. 125–129.
38. Власов А. Б. Оценка теплового состояния электрической машины на основе количественной термографии. *Электротехника*. 2012. № 3. С. 13–18.
39. Мартюшев С. Г., Мирошниченко И. В., Шеремет М. А. Численный анализ пространственных нестационарных режимов сопряженного конвективно-радиационного теплопереноса в замкнутом объеме с источником энергии. *Инженерно-физический журнал*. 2014. Т. 87, № 1. С. 119–128.
40. Kuznetsov G. V., Sheremet M. A. On the possibility of controlling thermal conditions of a typical element of electronic equipment with a local heat source via natural convection. *Russ. Microelectron.* 2010. No. 6. Pp. 427–442.
41. Кузнецов Г. В., Кравченко Е. В. Анализ деструкции полимерного материала изделий электронной техники в условиях пространственной неоднородности температурных полей. *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2014. Т. 19, № 3. С. 4–12.
42. Kuznetsov G. V., Kravchenko E. V. Influence of polymer aging on reliability indices of a typical printed-circuit assembly of radioelectronic equipment. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2007. Vol. 80, No. 5. Pp. 1050–1054.

43. **Kravchenko E. V., Kuznetsov G. V.** Prediction of power semiconductors devices reliability working in cyclic mode. *EPJ Web of Conferences*. 2014. Vol. 76. Pp. 01014.
44. **Дульнев Г. Н.** *Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре*. Москва: Высшая школа, 1984.
45. **Справочник по электротехническим материалам в 3-х томах**. Под. ред. Корицкого Ю. В. Москва: Энергия, 1974. Т. 1.
46. **Бердышев А. В., Ивойлов В. Ф., Исайкин А. В.** и др. Экспериментальные исследования воздействия СВЧ импульсов на содержащие интегральные микросхемы радиоэлектронные устройства. *Радиотехника*. 2003. № 6. С. 85–88.
47. **Грибский М. П., Ахрамович Л. Н., Григорьев Е. В.** и др. Воздействие импульсных электромагнитных полей на интегральные микросхемы памяти. *Радиоэлектроника и информатика*. 2006. Т. 35, № 4. С. 15–17.
48. **Грибский М. П., Григорьев Е. В., Старостенко В. В.** и др. Воздействие импульсных электромагнитных полей на современные микроконтроллеры. *Прикладная радиоэлектроника*. 2006. Т. 5, № 2. С. 294–297.
49. **Борисов А. А., Горбачева В. М., Карташов Г. Д., Мартынова М. Н., Прытков С. Ф.** Надежность зарубежной элементной базы. *Зарубежная радиоэлектроника*. 2000. № 5. С. 34–53.
50. **Suhir E.** When adequate and predictable reliability is imperative. *Microelectron. Reliability*. 2012. Vol. 52, Nos. 9–10. Pp. 2342–2346.
51. **Wang Y., Enachescu M., Cotofana S. D., Fang L.** Variation tolerant on-chip degradation sensors for dynamic reliability management systems. *Microelectron. Reliability*. 2012. Vol. 52, Nos. 9–10. Pp. 1787–1791.