

УДК 621.396.6-042.4(076)

## МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ СТРУКТУРАХ



**В.Ф. Алексеев**  
Доцент кафедры ПИКС  
БГУИР, кандидат  
технических наук, доцент



**Д.В. Лихачевский**  
Декан ФКП БГУИР,  
кандидат технических  
наук, доцент



**Г.А. Пискун**  
Доцент кафедры ПИКС  
БГУИР, кандидат  
технических наук, доцент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь

E-mail: alexvikt.minsk@gmail.com, likhachevskiyd@bsuir.by, piskunbsuir@gmail.com

### **В.Ф. Алексеев**

Окончил Минский радиотехнический институт. Область научных интересов связана с исследованием проблем тепловой нестационарности полупроводниковых структур, изучением проблем обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств, разработкой методов и алгоритмов построения информационно-компьютерных систем, организацией учебного и научно-исследовательского процессов в техническом университете.

### **Д.В. Лихачевский**

Окончил Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. Область научных интересов связана с исследованием проблем радиочастотной идентификации объектов, моделированием антенн, разработкой методов и алгоритмов построения информационно-компьютерных систем, организацией учебного и научно-исследовательского процессов в техническом университете.

### **Г.А. Пискун**

Окончил Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. Область научных интересов связана с исследованием воздействия электростатических разрядов на микроконтроллеры и интегральных схемы, изучением проблем обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств, разработкой методов и алгоритмов построения информационно-компьютерных систем, организацией учебного и научно-исследовательского процессов в техническом университете.

**Аннотация.** Показана необходимость численного моделирования тепловых процессов, протекающих в микроэлектронных структурах. Отмечается, что трудности расчета температурных полей в микроэлектронных структурах увеличиваются вследствие непрерывного увеличения плотности упаковки, числа топологических слоев, уменьшения размеров элементов. Предлагается в качестве метода моделирования выбрать метод конечных элементов, как эффективный способ численного решения краевых задач теплообмена.

**Ключевые слова:** микроэлектронная структура, многослойная конструкция, тепловые процессы, метод конечных элементов.

**Введение.** В связи с постоянным повышением требований к качеству и надежности микроэлектронных изделий, непрерывным увеличением степени интеграции, уменьшением размеров элементов, вопросы отвода тепла, моделирования и оптимизации тепловых процессов при разработке этих изделий приобретают особую актуальность.

Микроэлектронные структуры представляют собой неоднородные многослойные конструкции, содержащие большое количество топологических слоев со сложной

пространственной конфигурацией.

Наиболее значимые результаты по исследованию тепловых процессов в интегральных схемах были получены авторами, а также российскими и белорусскими учеными, которые проводили исследования тепловых процессов в микроэлектронных структурах: В.В. Жаднов, А.В. Сарафанов, Ю.Н. Кофанов, Н.В. Малютин, А.С. Шалумов, А.И. Белоус. Соответствующие этим задачам области поля являются, как правило, неограниченными, при этом допускается такая формулировка граничных условий, которая обеспечивает строгую аналитическую разрешимость задач [1–10].

*Описание задачи исследования.* Экспериментальные методы исследования температурных полей в микроэлектронных структурах оказываются зачастую не применимыми в силу малых размеров структур, и, кроме этого, они не позволяют произвести оценку локальных значений максимальных температур.

В задачах расчета температурных полей в микроэлектронных структурах области поля, как правило, ограничены, причем зачастую геометрия границ является весьма сложной, топологические слои обладают сложной пространственной конфигурацией, неоднородностью внутреннего строения, теплофизические характеристики являются разрывными функциями пространственных координат.

Трудности расчета температурных полей в микроэлектронных структурах увеличиваются вследствие непрерывного увеличения плотности упаковки, числа топологических слоев, уменьшения размеров элементов.

Точные расчеты температурных полей в микроэлектронных структурах, которые представляют собой кусочно-неоднородные среды, в ряде практических случаев не могут быть выполнены из-за отсутствия аналитических решений полевых задач и ввиду сложности, как геометрической формы этих структур, так и характера граничных условий, а также в силу разнообразия теплофизических характеристик применяемых материалов и сложного распределения источников теплоты в структурах такого рода.

Из численных методов для решения задач численного моделирования процессов теплообмена в микроэлектронных структурах сложной формы с разрывными теплофизическими характеристиками целесообразно использовать метод конечных разностей и метод конечных элементов.

В качестве метода моделирования можно выбрать, например, метод конечных элементов, эффективный способ численного решения краевых задач теплообмена [1, 6]. Одним из преимуществ метода конечных элементов является возможность применения конечных элементов произвольной формы и различных размеров для аппроксимации границ областей сложной формы и исследования областей с резким поведением искомой функции.

Авторами предложена методика и алгоритм численного моделирования процессов теплообмена в микроэлектронных структурах сложной формы с разрывными теплофизическими характеристиками.

Показано, что для решения указанных задач, целесообразно использовать комплекс программ MICROTERM, являющийся частью учебно-проектной САПР изделий микроэлектроники, твердотельной электроники, нано- и микросистемной техники, базирующейся на методе конечных элементов (МКЭ). В состав комплекса программ входят модули ввода и подготовки исходной информации, автоматической генерации конечно-элементной сетки в расчетной области, визуализации конечно-элементной сетки, расчета искомых величин в узлах конечно-элементной сетки, обработки, анализа и вывода результатов расчета. Эффективность конечно-элементного программного комплекса в большей степени определяется типом конечных элементов, которые в нем используются. Так как при решении задач расчета температурных полей в микроэлектронных структурах приходится иметь дело с поиском решения в областях со сложной геометрией, предпочтение отдано объемным прямоугольным и криволинейным тетраэдральным и гексаэдральным

изопараметрическим конечным элементам. Использование изопараметрических конечных элементов позволило существенно сократить объем исходной информации и повысить точность расчета тепловых режимов микроэлектронных изделий.

Авторами разработана методика построения нерегулярных конечно-элементных сеток, согласованных с формой границ, позволяющая автоматизировать процесс расчета температурных полей в микроэлектронных структурах.

*Заключение.* В результате дискретной аппроксимации по МКЭ нелинейных смешанных краевых задач расчета температурных полей в микроэлектронных изделиях получается система нелинейных алгебраических уравнений, для решения которой в работе использован итерационный метод Ньютона со специальной схемой построения начального приближения, гарантирующей сходимость итерационного процесса. Для оценки точности и достоверности получаемых результатов с помощью разработанного комплекса программ были решены тестовые линейные задачи расчета температурных полей, имеющие аналитические решения. В процессе таких расчетов наблюдалось совпадение аналитического и численного решений с точностью до 0,01%.

### **Список литературы**

- [1]. The Impact of ESD on Microcontrollers / Gennady A. Piskun, Viktor F. Alexeev, Sergey M. Avakov, Vladimir E. Matyushkov, Dmitry S. Titko ; Edited by PhD, Associate professor Viktor F. Alexeev. - Minsk : Kolorgrad, 2018. – 184 p.
- [2]. Алексеев, В.Ф. Программная реализация процесса оценки теплового режима средства медицинской электроники / В.Ф. Алексеев, Д.В. Лихачевский, Г.А. Пискун // Медэлектроника – 2018. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии : сборник научных статей XI Международная научно-техническая конференция, Минск, 5–6 декабря 2018 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2018. – С. 255–258.
- [3]. Оптимизация теплового режима приемо-передающего устройства по результатам моделирования тепловых процессов в среде SolidWorks Flow Simulation / Пискун Г. А., Алексеев В. Ф., Романовский П. С., Стануль А. А. // Znanstvena misel journal. – 2019. – Vol. 1, № 35. – P. 47–60.
- [4]. Алексеев, В.Ф. Совершенствование математической модели расчёта надёжности КМОП СБИС с учетом особенностей воздействия электростатического разряда / В.Ф. Алексеев, Г.А. Пискун // Технологии электромагнитной совместимости. – 2016. – № 1 (56). – С. 49–54.
- [5]. Алексеев, В.Ф. Особенности формализации задач принятия проектных решений при автоматизации проектирования радиоэлектронных средств / В.Ф. Алексеев // Известия Белорусской инженерной академии. – Минск, 2004. – № 1 (17/4). – С. 250–259.
- [6]. Алексеев, В.Ф. Тепловые модели отказов полупроводниковых структур при воздействии мощных электромагнитных импульсов / В.Ф. Алексеев, В.И. Журавлев // Доклады БГУИР. – 2005. – № 2 (10). – С. 65–72.
- [7]. Пискун Г.А. Методы технической диагностики микроконтроллеров при воздействии электростатических разрядов / Г.А. Пискун, В.Ф. Алексеев, О.А. Брылева // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2013. – №2 (39). – С. 130–137.
- [8]. Пискун, Г. А. Методика расчета распределения температуры в токоведущих элементах печатной платы при воздействии электромагнитного импульса до 2-х наносекунд в Comsol Multiphysics / Г. А. Пискун, В. Ф. Алексеев, А. А. Денисов // Электронный депозитарий научных изданий БелИСА. – 2018 . – №Д201807 от 05.01.2018.
- [9]. Пискун, Г. А. Распределение температуры в токоведущих элементах печатной платы при воздействии электромагнитного импульса длительностью до 2-х наносекунд / Г. А. Пискун, В. Ф. Алексеев, А. А. Денисов // Электронный депозитарий научных изданий БелИСА. – 2018 . – №Д201806 от 05.01.2018.
- [10]. Пискун, Г. А. Распределение температуры в токоведущих элементах интегральных схем при воздействии электромагнитного импульса длительностью до 2-х наносекунд / Г. А. Пискун, В. Ф. Алексеев, А. А. Денисов // Электронный депозитарий научных изданий БелИСА. – 2018 . – №Д201805 от 05.01.2018.

## **METHOD OF NUMERICAL SIMULATION OF THERMAL PROCESSES IN MICROELECTRONIC STRUCTURES**

***V.F. Alekseev***

*Associate Professor, Chair of  
Information and Computer  
Systems Design, BSUIR, PhD,  
Associate Professor*

***D.V. Likhachevsky***

*Dean of the Faculty of  
Computer Engineering  
BSUIR, PhD,  
Associate Professor*

***G.A. Piskun***

*Associate Professor, Chair of  
Information and Computer  
Systems Design, BSUIR, PhD,  
Associate Professor*

**Abstract:** The necessity of numerical simulation of thermal processes occurring in microelectronic structures is shown. It is noted that the difficulties of calculating temperature fields in microelectronic structures increase due to the continuous increase in the density of packaging, the number of topological layers, and the reduction in the size of elements. It is proposed to choose the finite element method as a modeling method, as an effective method for numerical solution of boundary value problems of heat transfer.

**Keywords:** microelectronic structure, multilayer construction, thermal processes, finite element method.