

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 2

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

Выпуск 1 (232) 2014

Научно-технический журнал

Издаётся с 1958 года

Наблюдательный совет

Председатель совета

В.В. Груздов, к.э.н., профессор МЭСИ,
генеральный директор ОАО «НПП «Пульсар»

А.А. Соколов, заместитель генерального
директора ОАО «Российская электроника»

Г.А. Егорочкин, к.х.н., генеральный директор
ОАО «ФНПЦ «ННИИРТ»

В.Г. Немудров, д.т.н., профессор,
генеральный директор

ОАО «НИИМА «Прогресс»

С.Н. Игнатьков, генеральный директор
ОАО «КБ «Кунцево»

В.А. Телец, д.т.н., профессор,
директор ИЭПЭ НИЯУ МИФИ

А.А. Щука, д.т.н., профессор МГТУ МИРЭА

Редакционная коллегия

Главный редактор

Ю.В. Колковский, д.т.н., профессор

Заместитель главного редактора

В.Ф. Синкевич, д.т.н., профессор

Члены редколлегии:

А.Н. Алёшин, д.ф.-м.н.

А.С. Евстигнеев, к.т.н.

И.П. Жиган, д.т.н., профессор

М.Х. Канкулов, к.э.н., доцент

Ю.А. Концевой, д.т.н., профессор

И.В. Малышев, к.т.н.

В.М. Миннебаев, к.т.н.

К.О. Петросянц, д.т.н., профессор

Е.М. Савченко, к.т.н.

А.С. Скрылёв, к.т.н.

В.А. Телец, д.т.н., профессор

Т.П. Комарова, ответственный секретарь
редколлегии

Содержание

**Петросянц К.О., Самбурский Л.М.,
Харитонов И.А.**

*Влияние различных видов радиации на
характеристики кремний-германиевых
гетеропереходных транзисторов.....3*

**Будяков А.С., Журавлёва Л.В., Власов А.И.,
Аверьянихин А.Е.**

*Проектирование симметрирующих
устройств Маршанда для кремниевых
монокристаллических интегральных схем
миллиметрового диапазона волн.....20*

Зубков А.М.

*Исследования возможности использования
кубической модели Куртиса для расчёта
мощных СВЧ усилителей на AlGaIn полевых
транзисторах.....29*

**Батулин А.В., Григорьева Т.А., Лоскот А.И.,
Малинин В.Г.**

*Использование теоремы Байеса для оценки
показателей надёжности электронной
компонентной базы.....35*

Иванов К.А.

*Верификация программного кода для
расчёта поля температур.....40*

**Гладышева Н.Б., Завадский Ю.И., Колковский
Ю.В., Концевой Ю.А.**

*Эллипсометрический контроль процессов
металлизации в технологии СВЧ
транзисторов.....44*

Заместитель ответственного секретаря –
ответственный за дизайн и компьютерную
вёрстку журнала
Ю.О. Никольская

Технический редактор
В.И. Грибкова

ISSN 2073-8250

Журнал включен в Перечень ведущих
рецензируемых научных журналов и изданий
ВАК в России и в Российский индекс научного
цитирования

Подписка по каталогам агентства
«Роспечать»:
«Издания органов научно-технической
информации» – индекс 59890

Журнал отражается
в РЖ и БД ВИНТИ

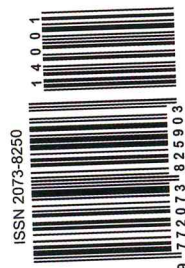
Адрес редакции:
Москва 105187, Окружной проезд, 27

Тел.: 8-499-369-28-21, 8-495-366-50-47

E-mail: redlab@pulsarnpp.ru, yuliya@pulsarnpp.ru

Подписано в печать 10.06.2014 г.
Печать офсетная цветная
Уч.-изд. л. 19,1
Тираж 500 экз.
Заказ 40 от 11.06.2014 г.

Издатель:
открытое акционерное общество «Научно-
производственное предприятие «Пульсар»



Васильев В.Ю.
Низкотемпературное осаждение из газовой
фазы при субатмосферном давлении
слоев диоксида кремния окислением
тетраэтоксисилана смесью озон-
кислород для применения в субмикронных
интегральных микросхемах. Часть 2.
Исследование роста слоёв в условиях
непрерывного напуска реагентов.52

Александров О.В., Ковтун Е.С.,
Романов Н.М., Семёнов А.Е.
Исследования коррозионной устойчивости
алюминиевой металлизации ИМС
.....63

Лисянский А.Н., Кожевников В.А.
Технология изготовления затвора
с барьером Шоттки транзистора с
вертикальной.....69

Каргин Н.И., Кузнецов А.Л., Сейдман Л.А.,
Чашкин Н.А., Шостаченко С.А.
Формирование омических контактов
в транзисторе с высокой подвижностью
электронов с метаморфным
гетеропереходом на основе арсенида галлия
.....75

Информация об опубликованных статьях
.....85

УДК 621.382:531.1

Влияние различных видов радиации на характеристики кремний-германиевых гетеропереходных транзисторов

Петросянц К.О., Самбурский Л.М., Харитонов И.А.

Приведён обзор работ по исследованию воздействия ионизирующих излучений (гамма, нейтроны и протоны) на характеристики кремний-германиевых гетеропереходных транзисторов, входящих в состав SiGe БиКМОП БИС четырёх поколений с проектной нормой 0,25; 0,18; 0,13 и 0,09 мкм. Экспериментальные данные объясняются на основе существующих представлений о радиационных эффектах в биполярных транзисторах с учётом особенностей кремний-германиевой гетероструктуры. Показано, что основные параметры SiGe ГБТ (β , g_m , V_A , f_T , f_{max} и др.) менее чувствительны к воздействию перечисленных видов радиации, чем у кремниевых транзисторов. По фактору суммарной поглощённой дозы SiGe ГБТ имеют уникальные показатели стойкости, которые для приборов, изготовленных по последним уровням SiGe технологии, составляют 50-100 Мрад.

Введение

Последние годы характеризуются резким прогрессом в области создания полупроводниковых приборов и схем на основе кремний-германиевой технологии. Созданы SiGe гетеропереходные биполярные транзисторы (ГБТ) с предельными частотами $f_T/f_{max} = 200/300$ ГГц и выше вплоть до 600 ГГц и высоким усилением по току $\beta = 200-300$ и выше (рис. 1), технология изготовления которых полностью совместима со стандартными технологиями кремниевых БИС, в том числе с технологией КМОП [1]. Таким образом, появилась возможность создавать устройства микроволнового и миллиметрового диапазонов на базе полупроводниковых приборов, изготовленных по SiGe БиКМОП технологии, которая обладает рядом важных преимуществ перед технологиями $A_{III}B_V$: более низкой стоимостью; возможностью интеграции на одном полупроводниковом кристалле множества функций – цифровых, аналоговых, сенсорных и др.; возможностью совмещать на одном чипе интегральные схемы с дискретными компонентами – варакторами, резисторами различных типов, индуктивностями.

Анализ современного состояния работ в области создания SiGe БиКМОП СВЧ БИС для систем телекоммуникаций, беспроводной связи, радарной техники и др., изготовленных зарубежными компаниями IBM (США) [2], STMicroelectronics (Франция) [3], INP (Германия) [4], Jazz Semiconductor (США) [5], Infineon Technology (Германия) [6], NXP Semiconductor (Англия, Нидерланды) [7], Hitachi Ltd. (Япония) [8] и др., а также отечественными компаниями [9-12], показывает, что в настоящее время для создания схем различного функционального назначения в этой области используются четыре поколения SiGe БиКМОП технологии с проектной нормой 0,25; 0,18; 0,13 и 0,09 мкм. В основном это системы на кристалле, реализующие приёмо-передающие устройства миллиметрового диапазона длин волн и схемы цифровой обработки и передачи сигналов со скоростью 20-100 Гбит/с, состоящие из следующих типовых узлов: генераторов, управляемых напряжением (voltage-controlled oscillator); делителей/умножителей частоты; мультиплексоров/демультиплексоров; модуляторов/демодуляторов; СВЧ-усилителей различной мощности; смесителей; трансмиттеров и др.

Краткие сведения, характеризующие уровень промышленно освоенных SiGe БиКМОП технологий ведущих мировых компаний, приведены в таблице.

Верификация программного кода для расчёта поля температур

Иванов К.А.

Приведены результаты проверки трёхмерной программы моделирования температурных полей, реализованной на основе алгоритмов С. Патанкара и Б. Сполдинга на совмещённых сетках Рхи-Чоу. С применением разработанной программы проведено моделирование радиатора жидкостного охлаждения. Сравнение с коммерческими программами ANSYS Icerak и COSMOS Flow Work показывает расхождение в значениях результатов моделирования не более 6 %.

Введение

Предложена программа [1], позволяющая анализировать потоки тепла и массы теплоносителя в трёхмерных моделях мощных устройств на транзисторах и интегральных схемах, использующих систему вынужденного охлаждения. Реализация программы проведена с использованием описанных в [2, 3] алгоритмов. Программа обладает возможностью передать данные расчёта в инженерный графопостроитель tесplot360 [4] для просмотра температурных полей, распределений скоростей теплоносителя и других характеристик как в заданных сечениях конструкции, так и в изометрии. Рассматривается верификация написанного программного кода путём сравнения результатов расчёта по разработанной программе с результатами расчётов, полученными в программах ANSYS Icerak (Fluent) [5] и Solid Work (Cosmos Flow Work) [6].

Математическая постановка задачи

Внешний вид радиатора жидкостного охлаждения и шести держателей тепловыделяющих элементов с местами их посадки показан на рис. 1.

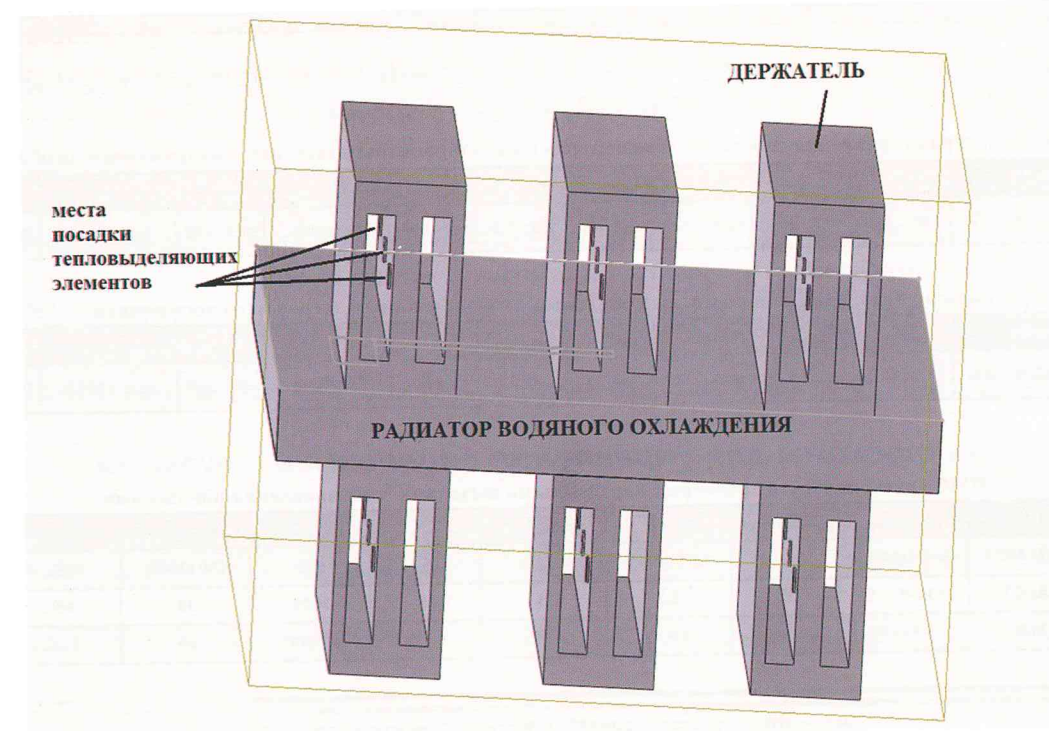


Рис. 1

Трёхмерное изображение анализируемой тепловой модели

Сечение радиатора жидкостного охлаждения изображено на рис. 2. Штриховкой показано твёрдотельное наполнение из латуни. Держатели, изображённые на рис. 1, выполнены из алюминия. Стрелками на рис. 2 показано направление подачи теплоносителя (воды). Высота водяного канала составляет 8 мм. По 4 мм сверху и снизу от канала занимают основание радиатора и крышка.

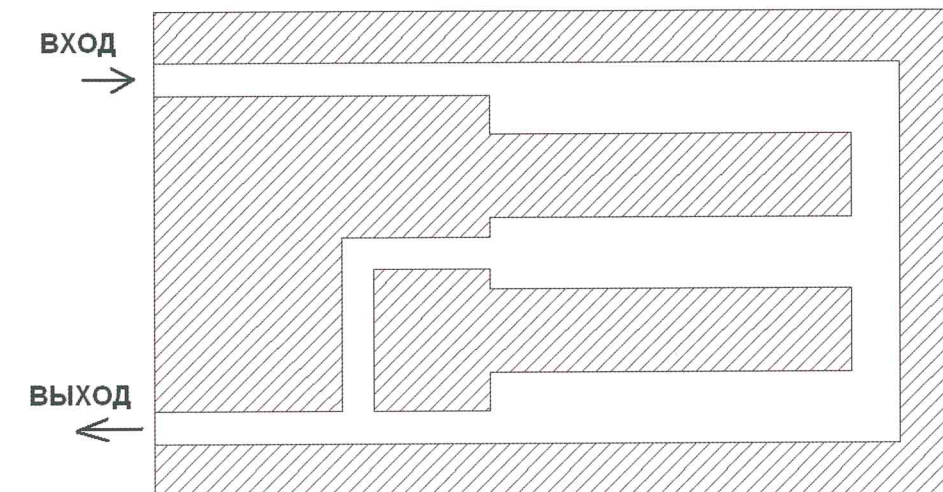


Рис. 2

Сечение радиатора водяного охлаждения

На каждом из 6 одинаковых держателей расположено 6 источников тепла. Схематично места посадки источников и мощности тепловыделения показаны на рис. 3.



Рис. 3

Места посадки источников тепла и мощности тепловыделения

Закладываемый в расчёт диапазон изменения скоростей потока таков, что течение является ламинарным и расчёт можно проводить без модели турбулентности.

Программа [1] реализует SIMPLE алгоритм С. Патанкара и Б. Сполдинга 1972 на совмещённых сетках (Рхи-Чоу 1983) [2, 3]. Уравнения переноса дискретизируются по способу контрольного объёма, в результате чего получается система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Для конвективного члена реализовано несколько схем на основе противоточной схемы: QUICK, WACEB, SuperBee и др. [7]. Для решения СЛАУ использован алгоритм BiCGStab+ILU2, адаптированный из SPARSKIT2 Ю. Саада [8].

Постановка задачи на расчёт осуществляется с помощью достаточно простого и консервативного графического интерфейса пользователя, который автоматически по запросу пользователя вызывает решатель, а затем постпроцессор tесplot360.

Сравнение результатов расчёта

Результаты численного моделирования данной задачи при различных расходах охлаждающей жидкости в программах ANSYS Fluent [5], нашей программе [1] и Cosmos Flow Work [6] представлены в таблице. Рассматриваются следующие характеристики: перепад давления между входом и выходом на радиаторе водного охлаждения в Па, максимальная температура в расчётной области (достигается на дальнем от входа воды 7 Вт источнике тепла) в °С, разница в температурах на 7 Вт источниках: ближнем и дальнем от входа воды в °С. Разница температур вызвана тем, что один из 7 Вт источников тепла расположен ближе к входу холодного теплоносителя в радиатор, чем другой 7 Вт источник, расположенный вниз по потоку (он горячее, так как охлаждается более тёплым теплоносителем). Все рассмотренные программы позволяют предсказать этот эффект. Если принять данные программы [5] за эталон, то температуры, рассчитанные в нашей программе, отличаются от эталона не более чем на 6,1 %, а температуры, рассчитанные в программе [6] – на 3,5 %.

Таблица

Данные расчётов в различных программах

Расход, л/час	Скорость на входе 4.5 мм штуцера, м/с	Программа	Перепад давления, Па	Максимальная температура 7 Вт источника тепла, °С	Разница в температурах между ближним и дальним от входа теплоносителя 7 Вт источником тепла, °С
3.5	0.061	[5]	3.33	46.68	3.08
		[1]	4.34	44.01	1.86
		[6]	4.70	46.30	2.41
7.0	0.122	[5]	12.47	36.59	2.26
		[1]	14.38	35.96	1.42
		[6]	16.83	36.97	1.55
14.0	0.244	[5]	49.41	31.31	1.50
		[1]	58.37	31.40	1.60
		[6]	66.35	32.27	1.67
21.0	0.366	[5]	108.20	29.42	1.05
		[1]	130.29	29.69	1.44
		[6]	146.35	30.44	1.04

Выводы

Полученные результаты позволяют утверждать, что в рамках выбранной постановки задачи предложенная программа [1] обеспечивает точность расчётов не хуже коммерческих программ.

Литература

1. Зубков А.М., Иванов К.А. Программа трёхмерного моделирования тепло- и массообмена в радиаторах, состоящих из набора прямоугольных параллелепипедов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013660267 – М. – 2013.

2. I. Sezai. SIMPLE method for the solution of incompressible flows on non-staggered grids. 2011. Revised 2013. Eastern Mediterranean University, Mechanical Engineering Department, Mersin 10 – Turkey. – P. 1-12.

3. <http://sigma-cfd.ru/>: Снижения напряжённости в вопросе о зависимости решения от схемных параметров через поправку Рхи-Чоу. – С. 1-5.

4. www.tecplot.com (описание формата входного файла).

5. ANSYS Icepak 12.1 Tutorial Guide. November 2009. Chapter 36. Theory. – P. 1-48.

6. Алямовский А.А. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике // СПб.: БХВ-Петербург. – 2008. – С. 227-252.

7. M.S. Darwish, F.H. Moukalled. Normalized Variable and Space Formulation Methodology for High-Resolution Schemes // Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals. – 2009. – V. 26, issue 1. – P. 79-96.

8. Ю. Саад. Итерационные методы для разреженных линейных систем // МГУ. – 2013. – Т. 1. – С. 217-221, 278-282.