

УДК 621.315.592:539.23

ТИПОВАЯ МОДЕЛЬ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ ДЛЯ СВЧ–УСТРОЙСТВ

© 2016 г. К. К. Абгарян¹, В. А. Харченко¹¹Вычислительный центр им. А. А. Дородницына
Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» РАН,
ул. Вавилова, д. 40, Москва, 119333, Россия

Обоснована необходимость разработки методологии выбора исходных материалов, архитектуры и синтеза гетероструктур, базирующихся на отечественных материалах и технологиях, с привязкой к конкретным типам СВЧ–компонентов. По мере расширения номенклатуры существенно возрастают требования к энергопотреблению, габаритам и весу, частотному диапазону, шумам, значениям рабочих температур и другим характеристикам СВЧ–компонентов. Рассмотрены конкретные примеры усилителей мощности различного назначения (системы беспроводной связи и системы локации). Показано, что для выполнения подобных разработок требуется применение современных методов многоуровневого компьютерного моделирования с использованием различных методов оптимизации, а также широкое использование проверенных технических решений. Конечным результатом данной разработки является создание ряда типовых моделей гетероструктур, базирующихся, в том числе, на решении оптимизационных задач по выбору исходного материала, материала подложки, состава слоев, их последовательности, толщины слоев, содержания в них примеси, распределения ее по толщине слоя и т. д. Все это в совокупности позволяет сформировать в гетероструктуре допустимый уровень механических напряжений и высокие значения электрофизических характеристик. Набор исходных данных в виде библиотеки типовых моделей гетероструктур позволит заметно ускорить разработку различных СВЧ–компонентов и компонентов оптоэлектроники в системе приборно–технологического проектирования, улучшить характеристики приборов и экономические показатели.

Ключевые слова: СВЧ–компоненты, гетероструктуры, типовая модель, многоуровневое моделирование, оптимизационные алгоритмы

Введение

Актуальной проблемой была и остается проблема рационального выбора электронных компонентов. В нее входят, в том числе, их разработка, обеспечивающая заданные тактико–технические характеристики электронных систем высокотехнологичных изделий, их надежность и приемлемые цены. В полной мере эта проблема относится к электронным компонентам СВЧ–диапазона. Так как СВЧ–компоненты находят широкое применение в различных системах военного и гражданского назначения, номенклатура их производства достаточно велика. Причем по мере расширения области практического приложения резко возрастают требования к энергопотреблению, габаритам и весу, частотному диапазону, шумам, значениям рабочих температур и другим характеристикам СВЧ–компонентов. Согласно работе [1], энергопотребление и массогабаритные характеристики СВЧ–устройств одного и того же функционального назначения могут различаться на три порядка и более. Успешному решению проблем, связанных с разработкой новых видов СВЧ–приборов, способствует применение в проектировании таких систем приборно–технологического проектирова-

ния (ПТП). Основной акцент ПТП — моделирование технологических процессов, гетеропереходов, приборов на их основе, фотодетекторов, светоизлучающих диодов и лазеров, а также анализ растекания носителей в канале.

Для выполнения подобных разработок используют различные системы автоматизированного проектирования (САПР): Microwave Harmonica, Microwave Explorer, Success, Microwave Office фирмы Appliedwave Reserch и др. [2]. В состав указанных выше систем входят различные инструменты. Например, в САПР Synopsys Sentaurus TCAD входят следующие [3]:

– Sentaurus Workbench для создания модели структур с различными толщиной слоев, длиной затвора и глубиной затворной канавки;

– Sentaurus Structure Editor для создания геометрических моделей транзистора;

– Sentaurus Mesh используется для электрофизического моделирования и др.

Следует отметить, что указанные выше системы содержат библиотеки с большим количеством моделей исходных пассивных и активных элементов (транзисторов). Однако фирмы–производители СВЧ–компонентов и монолитных интегральных схем, как правило,

Абгарян Каринэ Карленовна¹ — кандидат физ.–мат. наук, заведующая отделом, e-mail: kristal83@mail.ru; Харченко Вячеслав Александрович¹ — доктор техн. наук, старший научный сотрудник, e-mail: vakh41@mail.ru

тщательно охраняют свои технологии их изготовления. В первую очередь это относится к процессам выращивания и конструкции используемых гетероэпитаксиальных структур, что существенно затрудняет прямое использование зарубежных САПР [4]. Кроме того, в подобных САПР имеется существенный пробел, связанный с отсутствием методологии обоснования использования исходных материалов, схемы распределения слоев в структуре, привязки к конкретным технологиям и т. д. В связи с этим возникает настоятельная необходимость разработки типовых моделей СВЧ–гетероструктур, базирующихся на отечественных материалах и технологиях и являющихся основным исходным конструктивным элементом в САПР.

Постановка задачи

Постановку задачи рассмотрим на примере разработки СВЧ–компонентов — усилителей мощности. На основе теоретических и экспериментальных исследований, а также накопленного опыта производства рассматриваемых компонентов к настоящему времени уже сформированы достаточно устойчивые ниши изготовления мощных СВЧ–транзисторов на базе определенного вида полупроводниковых материалов. Серийно выпускаемые основные типы транзисторов и их функциональные характеристики с привязкой к исходным материалам приведены в табл. 1 [5]. Как следует из данных табл. 1, каждый тип приборов характеризуется определенными значениями выходной мощности, диапазоном рабочих частот, КПД и др., в свою очередь, зависящих от ряда фундаментальных свойств базовых материалов.

Нишу до 2 ГГц прочно удерживают транзисторы на кремнии (Si LDVOS — кремниевые транзисторы с боковой диффузией). Из приборов на основе GaAs наибольшим спросом пользуются GaAs pHEMT — арсенид–галлиевые псевдоморфные гетероструктур-

ные полевые транзисторы. Эти транзисторы имеют высокие усиление, КПД и граничные частоты. Транзисторы на основе карбида кремния (SiC MESFET — полевые транзисторы с однородным легированием на карбиде кремния) в диапазоне частот до 2,5 ГГц могут иметь выходную мощность до 100–150 Вт и работать в тяжелых условиях. Довольно высокие технические характеристики имеют транзисторы GaN HEMT — гетероструктурные полевые транзисторы на нитриде галлия. Ввиду явных преимуществ нитрид–галлиевые транзисторы находят все более широкое практическое приложение. Таким образом, краткий анализ данных табл. 1 позволяет в первом приближении выбрать базовый материал и тип транзистора в зависимости от заданных частотных границ, мощности и т. д. Кроме того, следует учесть также всевозрастающие потребности в новых компонентах быстроразвивающихся различных систем беспроводной высокоскоростной передачи данных. Для обеспечения этих систем требуются СВЧ–компоненты, работающие в диапазоне частот до 10 ГГц и выше и имеющие чрезвычайно малые размеры и минимальное энергопотребление. Они также должны иметь низкую цену при высоком уровне надежности. В наибольшей степени этим требованиям удовлетворяют приборы на основе кремния, твердого раствора кремния с германием и арсенида галлия [6]. Для проведения более детальных исследований по рациональному выбору исходного материала необходимо учесть еще ряд типичных требований к усилителям СВЧ–мощности, перечень которых приведен в табл. 2.

На основании указанных требований в каждом конкретном случае необходимо провести анализ зависимостей типа: «частота — мощность»; «мощность — рабочая температура»; «рабочая температура — температура среды»; «механические напряжения — рассогласование параметров кристаллической решетки, температурных коэффициентов расшире-

Таблица 1

Параметры серийно выпускаемых мощных СВЧ–транзисторов

[Parameters of commercial high–power RF transistors]

Технология	Диапазон частот, ГГц	Диапазон выходных мощностей, Вт	КПД транзисторов, %	Напряжение питания, В	Рабочая температура, °С	Выходная мощность с кристалла, Вт (оценка)
Si LDMOS	0–2	5–15	60	28	< 200	—
GaAs MESFET	0–14	< 14,5	40	8–10	< 175	20
GaAs HiFET	0–2,5	1–8	35	14–28	—	—
GaAs HFET	< 10,5	< 10	50	8	—	20
GaAs pHEMT	0–50	< 15	55	8–10	< 150	20
GaInP HBT	< 10,5	< 10	40	9	—	—
SiC MESFET	0–4	< 60	40	48	< 300	100
GaN HEMT	0–20	< 100	60	28–50	< 225	200

Таблица 2

Типичные требования к усилителю СВЧ–мощности [Typical requirements to RF power amplifiers]

Вид прибора	Режим работы	Функциональные параметры	Габариты, мм Вес, г	Условия эксплуатации	Надежность	Стоимость изделия, руб.
1. Дискретный 2. МИС 3. Гибридные схемы (МИС + вакуумные)	1. Импульсный 2. Непрерывный	Диапазон частот: дециметровые волны 300 МГц — 3 ГГц сантиметровые волны 3 ГГц — 30 ГГц миллиметровые волны 30 ГГц — 300 ГГц Выходная мощность, Вт до 1; 10; 20; 40; 100; 200; 1000 КПД, % 15—60; >60 Коэффициент шума	1. Размеры кристалла 2. Удельная выходная мощность, Вт/мм 3. Вес, г	1. Температура среды 2. Механические нагрузки 3. Климатическое воздействие: – на земле – в космосе 4. Радиационное воздействие	1. Выход годных, % 2. Интенсивность отказов, ч ⁻¹ 3. Время наработки на отказ, ч	Стоимость материалов Стоимость технологии

ния» и др. Эти зависимости позволяют обоснованно выбрать: исходный материал; материал несущей подложки; конструктивную схему гетероструктуры, в которой формируется 2D–газ, и дополнительные слои, обеспечивающие нормальное функционирование гетероструктуры в целом (устанавливаются последовательность, толщины и химический состав слоев), а также провести сравнительную оценку ожидаемой стоимости гетероструктуры. Подобного рода исследования до настоящего времени преимущественно осуществлялись на основе собственного опыта разработчика, методом проб и ошибок, упрощенных методик расчета и т. д. Все это делало процесс проектирования длительным и трудоемким. Для выполнения подобной работы требуется применение современных методов многоуровневого компьютерного моделирования с использованием различных методов оптимизации, а также широкое использование опыта предыдущих разработок. Отметим, что сокращение сроков разработки новых СВЧ–компонентов является актуальной задачей. Так, согласно данным работы [7], длительность этапов исследований и разработки до освоения промышленного производства во многих случаях достигает до 9 лет и более. Таким образом, отсутствие средств решения интеллектуальной задачи по формированию и синтезу архитектуры гетероструктур затрудняет успешную реализацию различных систем приборно–технологического проектирования СВЧ–компонентов в целом. Это в конечном счете предопределяет качественные характеристики электронных устройств, цену и надежность.

Разработка типовой модели гетероструктуры

Как уже указывалось выше, первым шагом в системе разработки типовой модели гетероструктуры

является выбор исходного материала и материала подложки. В качестве примера рассмотрим вариант оптимизационной задачи в связи с определением конкурентных преимуществ маломощных СВЧ–устройств с привязкой к исходным материалам, на базе которых они изготавливаются. Отметим, что рынок таких устройств в системе беспроводной связи в настоящее время практически не ограничен, а объем выпуска достигает нескольких миллиардов единиц в год. В случае дискретного прибора (транзистора или иного) к конкурентным показателям относим стоимость прибора, его надежность, энергопотребление, геометрические размеры, вес и др. В случае монолитных интегральных схем геометрические размеры и вес предлагается заменить параметром интеграции. Такая замена обоснована тем, что в настоящее время в большинстве случаев в радиотехнических решениях, кроме дискретных приборов, широко используются интегральные схемы, системы на кристалле и/или системы в корпусе. При этом достигается значительный синергетический эффект как в части снижения веса и геометрических параметров, так и в части улучшения экономических показателей устройства в целом. Пример совмещения различных функциональных блоков приемного СВЧ–устройства на основе монолитной интегральной схемы приведен на рис. 1 [8]. По данным работы [1], в этом случае может быть достигнут выигрыш по весу и габаритам в десятки и сотни раз. Таким образом, показатель интеграции характеризует возможность совмещения технологий изготовления на одном кристалле блока СВЧ–компонентов, блока СВЧ–компонентов с периферийными устройствами, обеспечивающими работу в заданных режимах активных СВЧ–приборов. Кроме того, — совмещение с технологиями изготовления устройств, обрабатывающих целевую информацию (например перевод аналогового сигнала в цифровой и наоборот и т. д.). Учитывая, что рынок

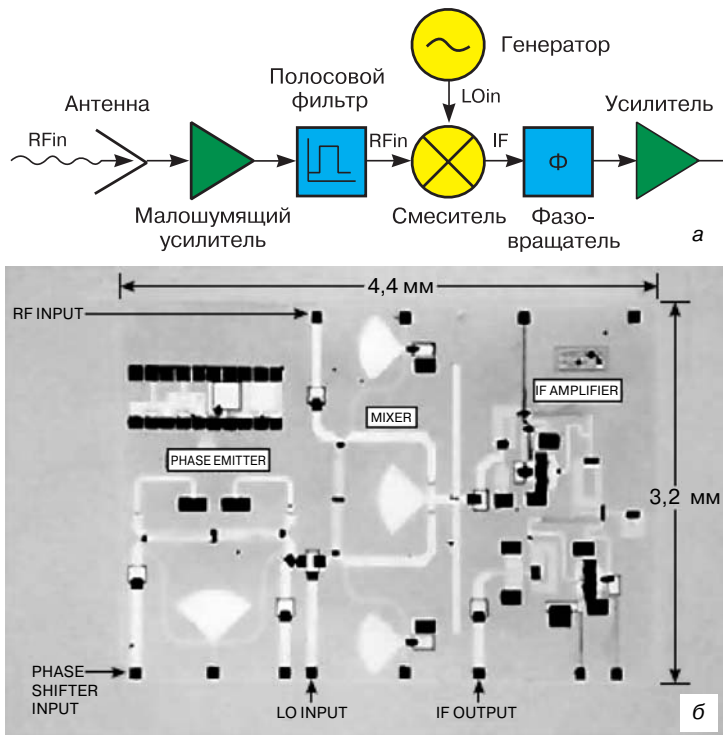


Рис. 1. Функциональная схема (а) и конструкция (б) СВЧ–приемника на 30 ГГц [8]

Fig. 1. (a) functional diagram and (б) design of a 30 GHz RF receiver [8]

маломощных устройств постоянно расширяется, возникает задача оптимального выбора исходного материала из ряда Si—SiGe—GaAs для их производства. В качестве критериальных параметров мы предлагаем показатели стоимости, энергопотребления и интеграции (отношение весов или объемов модулей, изготовленных с использованием дискретных компонентов и в виде монолитных интегральных схем). Очевидно, для случая массового производства наиболее значим показатель стоимости. Математически задача сводится к поиску оптимального значения интегрального критерия [9]. Расчеты достаточно корректно подсказывают, что в случае ориентации на массовое производство предпочтение должно быть отдано SiGe. В случае ответственных применений,

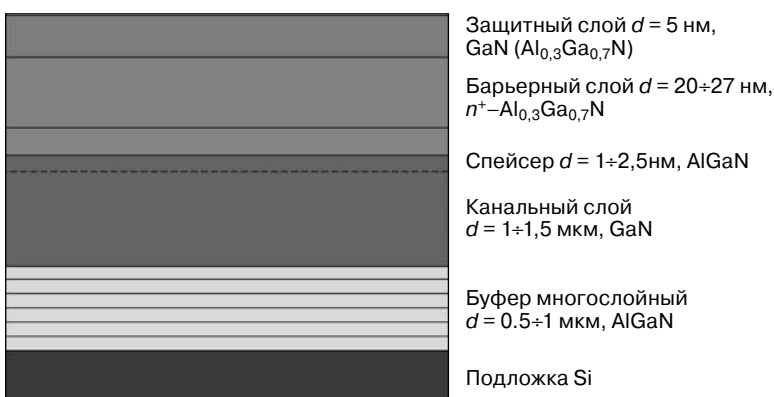


Рис. 2. Схема типовой нитрид–галлиевой гетероструктуры на кремниевой подложке

Fig. 2. Schematic of standard gallium nitride heterostructure on silicon substrate

когда стоимость незначительна, приборы изготавливают чаще на основе GaAs. Преимущества применения кремний–германиевой технологии в производстве СВЧ–устройств для систем беспроводной связи и локации достаточно подробно исследованы в работах [1, 6, 10].

Далее рассмотрим пример выбора материала подложки в случае разработки и изготовления усилителя мощности на основе нитрид–галлиевой гетероструктуры. В качестве конкурентных параметров для подложечного материала на основе кремния, карбида кремния и сапфира выбраны стоимость, теплопроводность, интеграция. Для случая гражданского применения преобладающим показателем является стоимость подложки. Для случая космического использования наиболее важный показатель — теплопроводность. В результате расчетов получены корректные данные о перспективности кремниевых подложек для производства нитрид–галлиевых гетероструктур, предназначенных для массовых приложений. Отметим, что кремниевые подложки имеют явные преимущества за счет низкой стоимости (в 10 и 100 раз меньше по отношению к сапфиру и карбиду кремния соответственно), высокого качества рабочей поверхности, доступности пластин большого диаметра (200 мм и более), высокой степени интеграции. В совокупности это позволяет существенно снизить геометрические размеры и вес изделий, заметно расширить их функциональные возможности, а также добиться заметного снижения их стоимости.

Следующим шагом в построении типовой модели является выбор исходной гетероструктуры с известной архитектурой и известными параметрами на основе опыта предыдущих разработок и литературных данных. Пример подобной структуры показан на рис. 2. В работе [11] рассмотрены вопросы применения различных оптимизационных методов для создания компьютерной модели многослойной полупроводниковой наноструктуры (МПНС). Представлен общий подход к решению задачи получения перспективных материалов для СВЧ–электроники с прогнозируемыми свойствами, который может быть применен при разработке новых технологий получения различных МПНС. Для решения поставленной задачи применяется комплексный подход, основанный на предсказательном компьютерном моделировании и сопоставлении экспериментальных и теоретических данных. Он предполагает теоретическое моделирование структур и свойств создаваемых материалов, исходя из детального понимания их структуры на атомистическом уровне (рис. 3).

Далее с использованием математических инструментов, приведенных на рис. 3, проводится оптимизация электрически активной

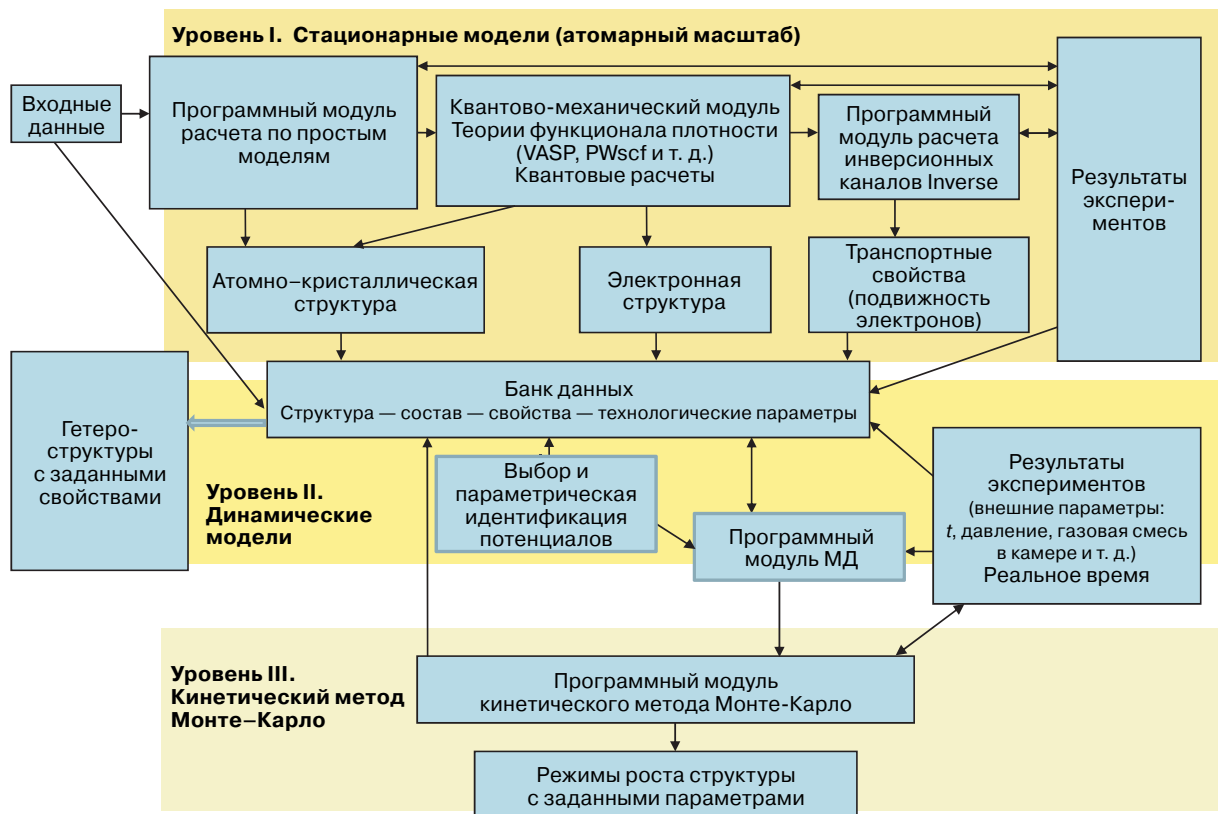


Рис. 3. Схема многомасштабного моделирования полупроводниковых гетероструктур
 Fig. 3. Flow chart of multiscale modeling of semiconductor heterostructures

части исходной гетероструктуры в зависимости от требований технического задания. В рамках модели электрической проводимости исследуется влияние на концентрацию и подвижность носителей заряда содержания легирующей примеси, стехиометрического состава AlGaN, дефектов в объеме и на границах, а также толщин слоев спейсера и барьерного слоя [12—14]. Отметим, что оптимальные электрофизические параметры GaN-гетероструктур для некоторых применений достигаются при мольной доле Al в слое не менее 0,25, толщине барьерного слоя 6—30 нм, толщине слоя спейсера 1—2,5 нм, уровне легирования кремнием $(1—5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Отметим, что снижение толщины барьерного слоя в оптимальном диапазоне в зависимости от заданного частотного интервала может являться одним из основных способов повышения мощностных параметров СВЧ-устройства [15].

Далее рассмотрим постановку задачи оптимизации конструкции гетероструктуры, которая позволяет устранить (или снизить) отрицательное влияние механических напряжений на величину прогиба структуры и, как следствие, добиться требуемых характеристик конечного изделия. В зависимости от конкретных условий предлагаются различные технологические приемы решения указанной проблемы. Например, в работах [16—18] было установлено, что даже при малом различии в периоде решеток лазерной структуры AlGaAs/GaAs $(\sim 1,18 \cdot 10^{-3})$ возникают механические напряжения, вызывающие значитель-

ный прогиб пластин. Экспериментально было показано, что целенаправленное введение примеси фосфора в эмиттерные и волноводные слои гетероструктур AlGaAsP/GaAs, предназначенных для лазерных диодов, позволяет избежать возникновения значительных механических напряжений, снизить величину прогиба и в конечном счете улучшить характеристики приборов. В случае комбинации GaN—Si имеют место наибольшие различия в параметрах решетки (17 %) и в коэффициентах термического расширения: для кремния он на 50 % меньше, чем для GaN. При формировании гетероструктуры из-за существенных различий указанных параметров возникают сильные растягивающие напряжения, следствием которых является значительный прогиб эпитаксиальных структур и возможное растрескивание слоя GaN при его толщине ~ 1 мкм и более. В работе [19] предложен оригинальный вариант компенсации возникающих растягивающих напряжений в процессе охлаждения структуры от рабочей температуры роста до комнатной температуры за счет создания сжимающих напряжений при предварительном формировании буфера AlGaN и подстилающего слоя AlN на кремниевой подложке. Характер изменения кривизны структуры *in situ* в процессе нанесения буферного слоя и при охлаждении показан на рис. 4. Взаимное наложение напряжений разного знака позволило заметно снизить величину прогиба и, следовательно, устранить причину дефектообразования и растрескивания слоя GaN. Другой вари-

ант решения проблемы компенсации механических напряжений в GaN–гетероструктурах рассмотрен в работе [7]. Достаточно низкие значения прогиба, близкие к исходным величинам, были достигнуты в случае формирования многослойного буфера (до шести слоев AlGaIn) различного состава и толщины на подложке кремния, на которую предварительно наносили слои Al и AlN. Следует отметить, что совершенствование технологии создания в том числе и GaN–гетероструктур в первую очередь связано с моделированием процессов возникновения напряжений разного знака и оптимизацией их распределения (модель изгиба пластин). Также предметом моделирования является влияние остаточных напряжений на пьезоэлектрическую поляризацию и подвижность носителей заряда (модель напряжений вблизи границ раздела) для корректировки данных, полученных при оптимизации электрически активной части гетероструктуры. Таким образом, располагая типовой моделью гетероструктуры и определенным набором вычислительных инструментов, можно в достаточно короткие сроки создать исходную архитектуру гетероструктуры для дальнейшего приборно–технологического проектирования. Аналогично можно построить подробный набор типовых моделей гетероструктур для транзисторов различного назначения, лазеров, светодиодов и других компонентов, изготавливаемых на нитриде галлия, карбиде кремния, арсениде галлия, фосфиде индия, SiGe и других материалах. Другим важным фактором, определяющим целесообразность разработки типовых моделей гетероструктур, является возможность совмещения требований разработчиков электронных компонентов с возможностями технологий изготовления структур через типовые модели. Данное обстоятельство позволяет унифицировать параметры приборов и гетероструктур при наличии большого количества промышленных типов СВЧ–компонентов и устройств.

Заключение

Рассмотрена проблема формирования и синтеза архитектуры гетероструктур, базирующихся на отечественных материалах и технологиях и являющихся основным исходным конструктивным элементом в системах приборно–технологического проектирования. Показано, что создание библиотеки типовых моделей гетероструктур позволяет существенно ускорить разработку различных СВЧ–компонентов, совместить требования конструкторов к параметрам гетероструктур с возможностями технологий их изготовления, создать унифицированные ряды СВЧ–приборов и устройств.

Библиографический список

1. Немудров, В. Системы на кристалле и системы в корпусе / В. Немудров, К. Борисов, Ю. Завалин, И. Корнеев, И. Малышев, В. Шиллер // Электроника НТБ. – 2014. – № 1. – С. 144–150.

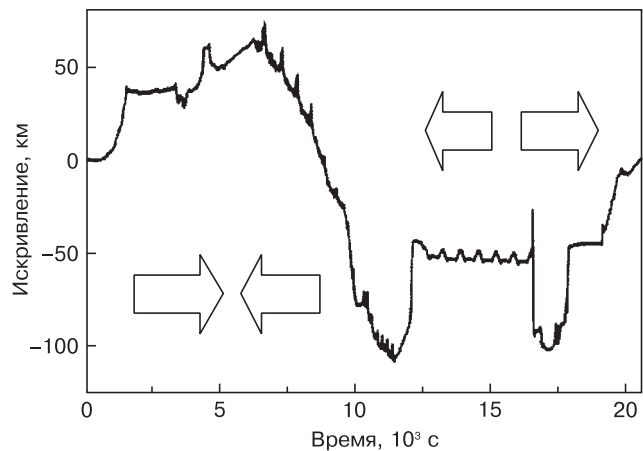


Рис. 4. Характер изменения кривизны структуры *in situ* в процессе нанесения буферного слоя и при охлаждении. Стрелки — напряжения растяжения и сжатия на разных стадиях технологического процесса

Fig. 4. *in situ* structure curvature variation during buffer layer application and cooling. Arrows show tension and compression stresses at different process stages

2. Дмитриев, В. Ф. Моделирование СВЧ–транзисторов методом экстраполяции S–параметров / В. Ф. Дмитриев, А. М. Осипов // Вестн. Новгородского государственного ун–та. – 2004. – № 26. – С. 74–77.

3. Радченко, Д. Моделирование СВЧ–транзистора на основе эпитаксиальной гетероструктуры (HEMT) с помощью САПР Synopsys Sentaurus TKAD / Д. Радченко, К. Сбитнев // Время электроники. URL: <http://www.russianelectronics.ru/engineer-r/review/2327/doc/48316/>

4. Торхов, Н. А. Физическое моделирование GaN/AlGaInHEMT наногетероструктур и мощных СВЧ–транзисторов с использованием пакета Synopsys / Н. А. Торхов, Л. И. Бабак, В. Г. Божков, А. Н. Разжувалов, А. С. Сальников. // Доклады ТУСУРА. – 2012. – № 2(26), Ч. 2. – С. 145–151.

5. Кищинский, А. Широкополосные транзисторные усилители СВЧ–диапазона: смена поколений / А. Кищинский // Электроника НТБ. – 2010. – № 2. – С. 60–67.

6. Юрков, Р. Компоненты NEC Electronics для беспроводной связи на базе кремниевое–германиевой технологии / Р. Юрков // Компоненты и технологии. – 2006. – № 11. – С. 18–20.

7. Арендаренко, А. А. Тенденции развития эпитаксиальной технологии нитридных соединений. / А. А. Арендаренко, Б. А. Орешкин, Ю. Н. Свешников, И. Н. Цыпленков // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. – 2015. – № 1. – С. 5–15. DOI: 10.17073/1609-3577-2015-1-5-15

8. Александров, Р. Монолитные интегральные схемы СВЧ: взгляд изнутри / Р. Александров // Компоненты и технологии. – 2005. – № 9. – С. 174–182.

9. Векторная оптимизация. URL: <http://sov.opredelim.com/docs/137600/index-1761.html>

10. Майская, В. Высококачественные полупроводниковые приборы. Не кремнием и арсенидом галлия единым. / В. Майская // Электроника НТБ. – 2004. – № 8. – С. 16–21.

11. Абгарян, К. К. Применение оптимизационных методов для моделирования многослойных полупроводниковых наносистем / К. К. Абгарян // Труды Института системного анализа Российской академии наук. Динамика неоднородных систем. – 2010. – Т. 53(3). – С. 6–9.

12. Абгарян, К. К. Численное моделирование распределения носителей заряда в наноразмерных полупроводниковых гетероструктурах с учетом поляризационных эффектов / К. К. Абгарян, Д. Л. Ревизников // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2016. – № 1. – С. 155–166.

13. Abgaryan, K. K. Computational model of 2DEG mobility in AlGaIn/GaN heterostructures / K. K. Abgaryan, I. V. Mutigullin, D. L. Reviznikov // Physica status solidi (c). – 2015. – Iss. 4–5. – P. 460–465. DOI: 10.1002/pssc.201400200

14. Abgaryan, K. K. Theoretical investigation of 2DEG concentration and mobility in the AlGaIn/GaN heterostructures with various Al concentrations / K. K. Abgaryan, I. V. Mutigullin, D. L. Reviznikov // Physica status solidi (c). – 2015. – V. 12. – Iss. 12. – P. 1376–1382. DOI: 10.1002/pssc.201510159

15. Федоров, Ю. В. Нитридные НЕМТ против арсенидных: последняя битва? / Ю. В. Федоров, С. В. Михайлович // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. – 2015. – № 1. – С. 16—22. DOI: 10.17073/1609-3577-2015-1-16-22

16. Винокуров, Д. А. Лазерные диоды, излучающие на длине волны 850 нм, на основе гетероструктур AlGaAsP/GaAs / Д. А. Винокуров, В. А. Капитонов, А. В. Лютецкий, Д. Н. Николаев, Н. А. Пихтин, С. О. Слипченко, А. Л. Станкевич, В. В. Шамахов, Л. С. Вавилова, И. С. Тарасов // ФТП. – 2012. – Т. 45, вып. 10. – С. 1344—1348.

17. Винокуров, Д. А. Характеристика лазерных диодов, излучающих на длине волны 850 нм, с различными способами

компенсации внутренних механических напряжений в гетероструктуре AlGaAs(P)/GaAs / Д. А. Винокуров, А. В. Лютецкий, Д. Н. Николаев, В. В. Шамахов, К. В. Бахвалов, В. В. Васильева, Л. С. Вавилова, М. Г. Растегаяева, И. С. Тарасов // ФТП. – 2013. – Т. 47, вып. 8. – С. 1078—1081.

18. Мармалюк, А. А. Линейки лазерных диодов на основе гетероструктур AlGaPAs/GaAs с компенсацией механических напряжений / А. А. Мармалюк, М. А. Ладугин, И. В. Яроцкая, В. А. Панарин, Г. Т. Микаелян // Квантовая электроника. – 2012. – Т. 42, № 1. – С. 15—17.

19. Zhu, D. Low-cost high-efficiency GaN LED on large-area Si substrate / D. Zhu, C. J. Humphreys // CS MANTECH Conf. – New Orleans (LA, USA), 2013. – P. 269—272.

ISSN 1609–3577 *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoy tekhniki = Materials of Electronic Technics*. 2016, vol. 19, no. 1, pp. 42–49.

Standard model heterostructures for microwave devices

K. K. Abgaryan, V. A. Kharchenko

Dorodnicyn Computing Centre, Federal Research Center «Computer Science and Control» of Russian Academy of Sciences, 40 Vavilov Str., Moscow, 119333 Russia

Abstract. This paper addresses the need to develop a methodology of choosing initial materials, architecture of heterostructures and their synthesis for specific types of microwave components taking into account the availability of domestic materials and technologies, locates. Moreover, extending the product range significantly increases the requirements to energy consumption, dimensions and weight, frequency range, noise, sizes of working temperatures and other characteristics of microwave components. Specific examples of amplifiers for various applications (wireless communication and location systems) show that the development of these devices requires modern methods of multilevel computer modeling implying various optimization techniques as well as wide use of proven technical solutions. This development results in the fabrication of a number of standard basic physical models of heterostructures which are based on the solution of optimization tasks, e.g. choice of initial material, substrate material, structure of layers, their sequences, thickness of layers, impurity contents in them, impurity distribution in layer thickness, etc. the totality of which allows achieving an acceptable level of mechanical stress and high electrophysical parameters in heterostructure. The availability of a set of source data in the form of a library of standard heterostructure models will significantly speed up the development of various microwave and optoelectronics components within the system of instrument and technological design, and improve the characteristics of the devices and their economic parameters.

Keywords: microwave components, heterostructures, standard model, multilevel model, optimization algorithms

References

1. Nemudrov V., Borisov K., Zavalin Yu., Korneev I., Malyshev I., Shiller V. The systems on the chip and the systems in the case. *Elektronika NTB*, 2014, no. 1, pp. 144—150. (In Russ.)
2. Dmitriev V. F., Osipov A. M. Modeling of microwave transistors by extrapolation of S-parameters. *Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2004, no. 26, pp. 74—77. (In Russ.)
3. Radchenko D., Sbitnev K. Simulation of a microwave transistor based on an epitaxial heterostructure (HEMT) using Synopsys Sentaurus TCAD. *Vremya elektroniki*. (In Russ.). URL: <http://www.russianelectronics.ru/engineer-r/review/2327/doc/48316/>
4. Torhov N. A., Babak L. I., Bozhkov V. G., Razzhivalov A. N., Sal'nikov A. S. Physical modeling of GaN/AlGaInHEMT nano-heterostructures and high-power microwave transistors using the Synopsys package. *Doklady TUSURa*, 2012, no. 2(26), pp. 145—151. (In Russ.)
5. Kishchinskij A. Broadband transistor amplifiers of the microwave range: alternation of generations. *Elektronika NTB*, 2010, no. 2, pp. 60—67. (In Russ.)
6. Yurkov R. Components of NEC Electronics for wireless com-

munication based on silicon-germanium technology. *Komponenty i tekhnologii = Components & Technologies*, 2006, no. 11, pp. 18—20. (In Russ.)

7. Arendarenko A. A., Oreshkin V. A., Sveshnikov Yu. N., Tsyplenkov I. N. Trends in the development of the epitaxial nitride compounds technology. *Modern Electronic Materials*, 2016, vol. 2, no. 2, pp. 33—40. DOI: 10.1016/j.moem.2016.10.001

8. Aleksandrov R. Monolithic microwave integrated circuits: inside view. *Komponenty i tekhnologii = Components & Technologies*, 2005, no. 9, pp. 174—182. (In Russ.)

9. Vector optimization. (In Russ.). URL: <http://sov.opredelim.com/docs/137600/index-1761.html>

10. Majsakaya V. High-frequency semiconductor devices. Not silicon and gallium arsenide unified. *Elektronika NTB*, 2004, no. 8, pp. 16—21. (In Russ.)

11. Abgaryan K. K. Application of optimization methods for modelling of semiconductor film nanosystems. *Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossiiskoi akademii nauk. Dinamika neodnorodnykh system*, 2010, vol. 53(3), pp. 6—9.

12. Abgaryan, K. K., Reviznikov D. L. Numerical simulation of the charge carrier distribution in nanoscale semiconductor heterostructures with allowance for polarization effects. *Zhurnal vychislitel'noi matematiki i matematicheskoi fiziki*, 2016, no. 1, pp. 155—166. (In Russ.)

13. Abgaryan K. K., Mutigullin I. V., Reviznikov D. L. Computational model of 2DEG mobility in AlGaN/GaN heterostructures. *Phys. status solidi (c)*, 2015, vol. 12, no. 4–5, pp. 460—465. DOI: 10.1002/pssc.201400200

14. Abgaryan K. K., Mutigullin I. V., Reviznikov D. L. Theoretical investigation of 2DEG concentration and mobility in the AlGaN/GaN heterostructures with various Al concentrations. *Phys. status solidi (c)*, 2015, vol. 12, no. 12, pp. 1376—1382. DOI: 10.1002/pssc.201510159

15. Fedorov Yu. V., Mikhaylovich S. V. Nitride HEMTs vs arsenides: The ultimate battle? *Modern Electronic Materials*, 2016, vol. 2, no. 1, pp. 1—6. DOI: 10.1016/j.moem.2016.08.006

16. Vinokurov D. A., Kapitonov V. A., Lyutetskiy A. V., Nikolaev D. N., Pikhin N. A., Slipchenko S. O., Stankevich A. L., Shamakhov V. V., Vavilova L. S., Tarasov I. S. 850 nm diode lasers based on AlGaAsP/GaAs heterostructures. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Semiconductors*, 2012, vol. 45, no. 10, pp. 1344—1348. (In Russ.)

17. Vinokurov D. A., Lyutetskiy A. V., Nikolaev D. N., Shamakhov V. V., Bakhvalov K. V., Vasilyeva V. V., Vavilova L. S., Rastegayeva M. G., Tarasov I. S. 850 nm diode lasers with various compensation techniques of internal mechanical stress in AlGaAs(P)/GaAs heterostructure. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Semiconductors*, 2013, vol. 47, no. 8, pp. 1078—1381. (In Russ.)

18. Marmalyuk A. A., Ladugin M. A., Yarotskaya I. V., Panarin V. A., Micaelyan G. T. Laser diode bars based on strain-compensated AlGaPAs/GaAs heterostructures. *Kvantovaya elektronika = Quantum Electronics*, 2012, vol. 42, no. 1, pp. 15—17. (In Russ.). DOI: 10.1070/QE2012v042n01ABEH014737

19. Zhu D., Humphreys C. J. Low-cost high-efficiency GaN LED on large-area Si substrate. *CS MANTECH Conf.* New Orleans (LA, USA), 2013. Pp. 269—272.

Information about authors:

Karine K. Abgaryan — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Head of the Department (kristal83@mail.ru); **Vyacheslav A. Kharchenko** — Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher (vakh41@mail.ru)