

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТЕНДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ
СТАТИЧЕСКИХ И ИМПУЛЬСНЫХ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР
И ОЦЕНКА УГРОЗ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
ЛОКАЛЬНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ**

А. А. Потехин, А. А. Рябов, Е.А. Тарасова, А.Ю.Чурин, С.В. Оболенский,
Л.Ю. Ротков

Нижегородский госуниверситет

С целью проведения анализа радиационной стойкости электронной компонентной базы создан многоцелевой комплекс на базе локальной вычислительной и измерительной сети для исследования полупроводниковых приборов и структур. В качестве одной из компонент комплекса был создан стенд для измерения статических и импульсных вольтамперных характеристик. При использовании импульсных измерений на образцы можно подавать сигналы больших амплитуд, чем в статическом режиме, при этом не вызывая в исследуемых образцах необратимый тепловой пробой. Данная особенность импульсных измерений позволяет получить информацию о работе полупроводниковых приборов и структур в режиме облучения импульсным ионизирующим излучением.

Были проведены измерения SiGe p-i-n диодов и получены вольтамперные характеристики, которые хорошо согласуются с известными из литературы данными [1, 2]. Выполнен сравнительный анализ вольтамперных характеристик, полученных при помощи прибора для их измерения: Л2-56 и программно-аппаратного комплекса.

Экспериментально показано, что после облучения флюенсом нейтронов $1.3 \cdot 10^{15}$ н/см² пороговое напряжение полевого транзистора с двумерным электронным газом (НЕМТ) снижается на 0,2 В. При облучении уровнем нейтронов до уровня $3 \cdot 10^{14}$ н/см² не выявлено изменений характеристик. Для моделирования транспорта электронов в транзисторах и диодах использовалась квазигидродинамическая модель [3]. Результаты расчета позволили оценить уровень радиационной стойкости НЕМТ, который составил около $2 \cdot 10^{15}$ н/см².

Установка по измерению вольтамперных характеристик входит в состав программно-аппаратного комплекса на основе локальной вычислительной сети, а информация, обрабатываемая в комплексе, является конфиденциальной. На основании законодательства РФ в области защиты информации существует необходимость обеспечения информационной безопасности комплекса. В ходе анализа работы установки и прилагаемого к ней программного обеспечения для обработки результатов измерений были выявлены наиболее существенные угрозы безопасности информации, получаемой в процессе измерений и обработки результатов: 1) запись данных на внешние носители, 2) установка вредоносного программного обеспечения, 3) неумышленная порча информации.

В ходе разработки вычислительной сети большая часть прогнозируемых угроз ликвидирована при помощи установки антивирусных пакетов программ и их соответствующей конфигурации, создания правил своевременного реагирования на изменение персоналом ролей и привилегий, мониторинга внутрисетевой активности пользователей и программного обеспечения и установкой камер наблюдения для контроля персонала.

Внешние угрозы являются менее актуальными ввиду особенностей взаимодействия программного обеспечения стенда с локальной вычислительной сетью и использования технологии DMZ при организации внешнего канала связи. Использование данной технологии позволяет свести к минимуму возможности реализации атак, внешних по отношению к локальной вычислительной сети.

Работа поддержана грантом (соглашение от 27 августа 2013 г. № 02.В.49.21.0003 между МОН РФ и ННГУ).

- [1] Красильник З.Ф., Кудрявцев К.Е., Качемцев А.Н., Лобанов Д.Н., Новиков А.В., Оболенский С.В., Шенгуров Д.В. // Физика и техника полупроводников. 2011. Т. 45, вып. 2. С. 230.
- [2] Басаргина Н.В., Ворожцова И.В., Дубровских С.М., Ткачёв О.В., Шукайло В.П., Тарасова Е.А., Чурин А.Ю., Оболенский С.В. // Вестник Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. 2013. № 3(1). С. 61.
- [3] Тарасова Е.А., Демидова Д.С., Оболенский С.В., Фефелов А.Г., Дюков Д.И. // Физика и техника полупроводников. 2012. Т. 46, вып. 12. С. 1587.

**ПРИМЕНЕНИЕ АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА
ПРИ ОЦЕНКЕ РАДИАЦИОННОГО ПОРАЖЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
СТРУКТУР И СОЗДАНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ЗАЩИЩЕННОГО КАНАЛА
ОБМЕНА РЕЗУЛЬТАТАМИ ИЗМЕРЕНИЙ**

**И.Ю. Забавичев, Е.А. Тарасова, А.А. Рябов, А.Ю. Чурин, С.В. Оболенский,
Л. Ю. Ротков**

Нижегородский госуниверситет

Исследование радиационной стойкости полупроводниковых приборов весьма актуально для военной и космической промышленности. В этих сферах особенно остро встает вопрос защиты конфиденциальной информации и информации, содержащую государственную тайну. Решение указанных задач требует значительных вычислительных мощностей, поэтому могут применяться локальные вычислительные сети с распараллеливанием. В качестве начальных условий для решения этих задач могут выступать результаты измерений, полученных в территориально разнесенных подразделениях и иных академических институтах. Поэтому необходимо организовать обмен информацией между отдельными группами исследователей по защищенному каналу.

Разработка методики проведения подобных работ проводилась на примере исследования радиационной стойкости GaAs и GaN полевых транзисторов с двумер-

ным электронным газом (НЕМТ). Для определения изменения профилей легирования и подвижности электронов проводился анализ вольтфарадных характеристик указанных приборов [1]. Измерения проводились до и после радиационного облучения флюенсом нейтронов $\sim 10^{14}$ н/см². Выявлено изменение концентрации электронов в структурах после облучения. Экспериментально полученный пространственный (по глубине) профиль проводимости структур отличался от полученных аналитических оценок: было обнаружено наличие радиационно-стимулированной диффузии легирующей примеси в структуре.

Поиск радиационных дефектов непосредственно на поверхности исследуемого объекта с помощью АСМ методов затруднен некоторыми факторами. Часто поверхность структур загрязнена и содержит множество дефектов нерадиационной природы, что сказывается на АСМ изображении и не позволяет надежно выявить влияние излучения [2]. Поэтому исследовалось влияние облучения на сколы структур в полуконтактном режиме.

В результате проведенных измерений выявлен проводящий слой полупроводниковой структуры и проведены исследования его параметров. Для анализа результатов измерений проводилось компьютерное моделирование с использованием параллельных вычислений. Работы организовывались специальным образом. Моделирование проводилось в одно-, двухмерном квазигидродинамическом приближении [1] с учетом квантовых и тепловых эффектов. Предложена методика, позволяющая сократить время проведения работ в 8...12 раз при использовании параллельных вычислений и измерений, проводимых на локальной вычислительной сети из 10 компьютеров, управляющих измерительными стендами.

Для осуществления тесного взаимодействия с различными организациями, обладающими уникальной измерительной техникой, решался вопрос создания защищенного канала обмена информацией между сегментом сети ННГУ им. Н.И. Лобачевского и другими организациями. К способам создания таких соединений относятся технология VPN и использование межсетевых экранов. Рассмотрев различные способы создания канала взаимодействия, было решено остановиться на варианте с использованием отдельного сервера и обмена данными по защищенному протоколу. Чтобы не усложнять администрирование университетской сети, было решено использовать технологию DMZ, при которой сервер, отвечающий на запросы извне, ограничен в доступе к основным ресурсам сети с помощью межсетевого экрана с целью минимизировать ущерб при взломе. В качестве защищенного протокола обмена информацией выбран протокол SFTP.

Итак, разработана концепция оценки поражения радиационным излучением полупроводниковой структур путем анализа вольтфарадных характеристик приборов и исследования их АСМ изображения. Предложен эффективный способ обмена информацией по защищенному каналу, позволяющий проводить указанные работы дистанционно, т.е. с использованием уникальной аппаратуры иных организаций, что позволяет расширить спектр научно-технического сотрудничества при проведении исследований радиационной стойкости электронной компонентной базы.

Работа поддержана грантом (соглашение от 27 августа 2013 г. № 02.В.49.21.0003 между МОН РФ и ННГУ).

- [1] Тарасова Е.А., Демидова Д.С., Оболенский С.В., Фефелов А.Г., Дюков Д.И. // Физика и техника полупроводников, 2012. Т. 46, вып. 12. С. 1587.
- [2] Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Учебн. пособие для студентов. – Н.Новгород.: ИФМ РАН, 2004, 110 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В GAN НЕМТ

А. Б. Макаров, С.В. Оболенский

Нижегородский госуниверситет

В данной работе рассматривался полевой транзистор, активной областью которого является гетеропереход AlGa_n/AlN/GaN с образующимся в нём двумерным электронным газом. Цель работы состояла в построении модели переноса заряда через структуру, а также модели переноса тепла. Так как рассматривалась стационарная задача, то эти две модели были рассмотрены отдельно.

Моделирование тока транзистора проводилось с помощью коммерческого программного продукта Silvaco TCAD Baseline release 2005.07. В свою очередь, моделирование тепла проводилось с помощью программы Temperature, разработанной на кафедре электроники.

Модель переноса зарядов строилась с помощью квазигидродинамической модели НЕМТ на основе гетероструктуры AlGa_n/AlN/GaN, параметры которой были взяты из работы [1], и произведено сравнение полученных результатов. На рис. 1 представлено решение одномерного уравнения Пуассона для определения распределения потенциала под затвором. Как видно из графика, полученная зонная диаграмма совпала с данными из работы [1]. На рис. 2 представлено распределение концентрации электронов под затвором в сравнении с работой [1]. Видно, что в работе [1] получилось несколько завышенное значение концентрации.

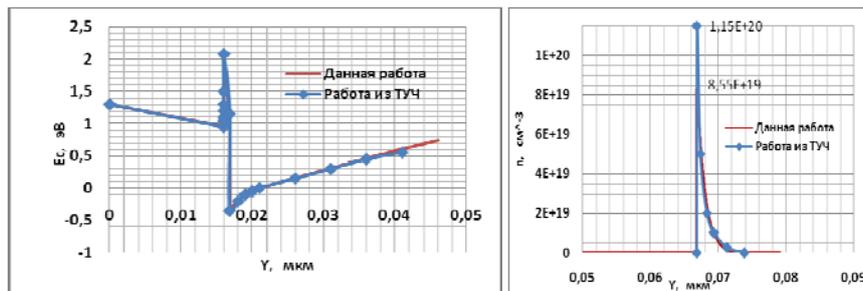


Рис. 1

Рис. 2

Математическая модель для решения задачи о распределении температуры в кристалле транзистора основана на решении уравнении Лапласа с соответствующими граничными условиями. Численные расчеты распределения температуры в кристалле проводились по двум трехмерным стационарным моделям [2]. Первая

учитывала разогрев поверхности кристалла от каждой секции в отдельности, причем секции трактовались в данной модели в виде плоских тепловыделяющих элементов. Вторая оперировала одной секцией в виде прямоугольника, ширина и длина которого равнялись внешним размерам многосекционного транзистора.

Из-за неравномерного распределения выделяемой мощности в канале была поставлена задача определения ширины тепловыделяющего элемента для первой модели. Нужно было найти критерий, который позволял бы из сравнения двух моделей, примененных к одной структуре, определить ширину тепловыделяющего элемента. Было решено за этот критерий взять совпадение максимальных температур, рассчитанных с помощью первой и второй модели.

Обе модели были применены к реальному транзистору фирмы Cree, ширина затвора которого 3600 мкм, а длина 350 нм. Транзистор разделен на 10 секций. Материал подложки – SiC, ее толщина – 100 мкм.

На рис. 3 приведены результаты расчетов, а именно распределение температуры вдоль поверхности кристалла с учетом выбранного критерия совпадения максимальных температур для первой и второй модели. Однако выбранный критерий оказался не оптимальным. К примеру, на рис. 4 показано распределение температуры с другим критерием, когда плавная кривая второй модели проходит между остриями пиков (температур нагретых секций) и минимальной температурой между секциями.

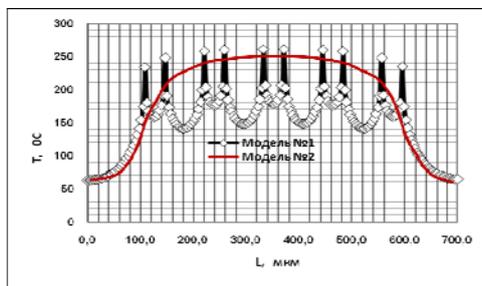


Рис. 3

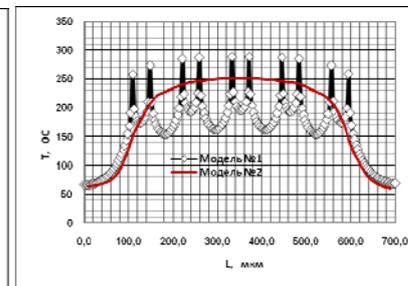


Рис. 4

На основе синтеза двух критериев получилось, что ширина тепловыделяющего элемента равна $4,5 \pm 0,25$ мкм, что совпадает с результатами, полученными в [3].

Работа поддержана грантом (соглашение от 27 августа 2013 г. № 02.В.49.21.0003 между МОН РФ и ННГУ).

- [1] Vais A. Physical Simulation of GaN based HEMT // Thesis for Erasmus Mundus Master Programme Nanoscience & Nanotechnology. – Gothenburg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2012, 56 p.
- [2] Тарасова Е.А., Оболенский С.В. // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. Электроника. 2011, №5 (3). С. 348.
- [3] Ди Лоренцо Д.В., Канделуола Д.Д. Полевые транзистора на арсениде галлия. – М.: Радио и связь, 1988, с. 496.

ИССЛЕДОВАНИЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОСТРУКТУР CoPt МЕТОДАМИ МАГНИТНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Ю.С. Бородавкина¹⁾, О.Л. Ермолаева²⁾

¹⁾Нижегородский госуниверситет

²⁾Институт физики микроструктур РАН

Ферромагнитные материалы играют большую роль в современной микроэлектронике, поскольку широко используются для изготовления транзисторов, магнитных носителей памяти и магниторезистивной оперативной памяти. Поэтому одним из приоритетных направлений является создание и исследование свойств различных ферромагнетиков. Одним из перспективных материалов, изучению свойств которого посвящено большое количество работ, является CoPt. Пленка CoPt имеет перпендикулярную анизотропию, то есть её намагниченность направлена вдоль оси, перпендикулярной плоскости образца. Цель данной работы заключается в исследовании особенностей распределения намагниченности в структурах CoPt.

Исследованные структуры представляли собой многослойные пленки CoPt толщиной 8 нм на подложке Si, покрытые дополнительным слоем Co. Как известно, пленки CoPt с перпендикулярной анизотропией имеют лабиринтную доменную структуру. Нанесение на многослойную структуру CoPt дополнительного слоя Co может привести к изменению магнитных свойств такой системы. Авторами было продемонстрировано, что при нанесении на слоистую структуру пленки Co толщиной 2 нм, характерный масштаб доменной структуры уменьшается с 200 до 50 нм. Распределение намагниченности таких структур, полученное с помощью атомно-силового микроскопа Solver Pro, представлено на рис. 1а для плёнки CoPt и на рис. 1б для плёнки CoPt, покрытой слоем Co толщиной 2 нм. Нанесение слоя Co 3 нм и более приводит к тому, что намагниченность всей структуры становится лежащей в плоскости.

Были также исследованы структуры, где многослойная пленка CoPt выращена на дополнительном слое Co толщиной 2 нм. МСМ изображение структуры приведено на рис. 2. Видно, что доменная структура мелкая, размер доменов тот же - порядка 50 нм. Но в отличие от системы, в которой слой Co находится сверху, в нулевом поле средний магнитный момент этой пленки равен нулю. Другими словами пленка такого вида не перемагничивается.

Проведено микромагнитное моделирование в программном пакете OOMMF [1]. Данная программа является разработкой Национального института стандартов и технологии США и свободно распространяется через Интернет по лицензии public domain (<http://math.nist.gov/oommf>). Авторами работы была смоделирована пленка CoPt, толщиной 10 нм и размерами 2×2 мкм, а также структура, представляющая собой обменно связанные пленки: Co толщиной 2 нм и CoPt. Результаты моделирования показывают, что структуры CoPt-Co обладают существенно меньшими характерными размерами доменов. Возможно, что это связано с обменным взаимодействием между слоями Co и CoPt.

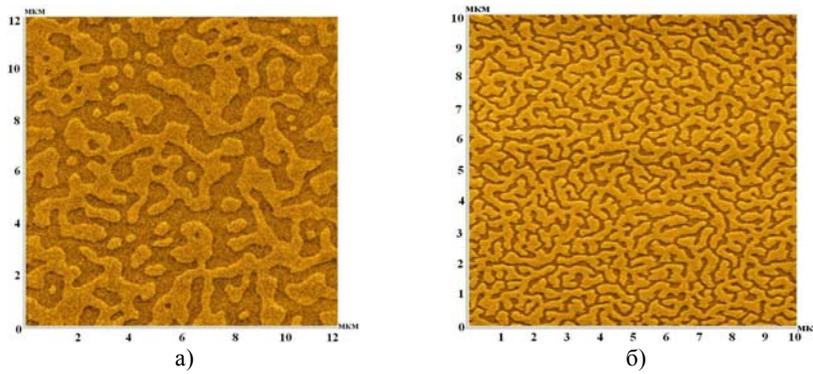
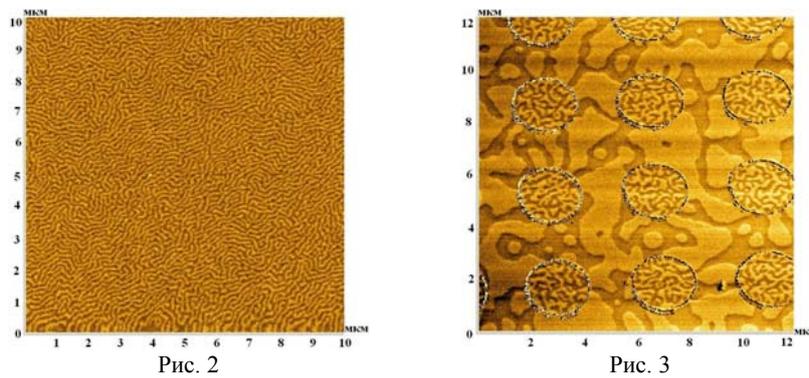


Рис. 1



Изучены структуры, представляющие собой диски Co, покрытые плёнкой CoPt и диски Co, лежащие на слое CoPt. Структуры были изготовлены методом фотолитографии и ионного травления. MFM изображение дисков Co, покрытых плёнкой CoPt представлено на рис. 3. Видно, что после формирования образца область многослойной структуры вокруг дисков возвращается к характерному для чистой CoPt распределению намагниченности. Области дисков Co-CoPt, имеют мелкую лабиринтную структуру, аналогичную структуре наблюдаемой на соответствующих пленках. Было изучено перемагничивание таких систем во внешних магнитных полях. Выяснилось, что перемагничивание как свободных областей CoPt, так и областей дисков Co-CoPt полностью совпадает с поведением пленок.

[1] Prinz, G.A. // Science. 1998. V. 282. P. 1660.

ТРАНСПОРТ ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛАНАРНОМ ДИОДЕ ГАННА

Е.С. Оболенская, А.Ю. Чурин, С.В. Оболенский

Нижегородский госуниверситет

Диоды Ганна находят широкое применение в современной микроэлектронике, измерительной технике и средствах связи. Традиционная конструкция диодов Ганна [1] имеет вертикальную структуру, т.е. транспорт электронов осуществляется по нормали к границам слоев полупроводника. Контакты диода в этом случае расположены на верхней и нижней гранях кристалла. В настоящее время идет активная разработка планарных диодов Ганна (см., например, [2]), которые можно было бы использовать в качестве элементов монолитных интегральных схем. Последнее особенно важно при работе в КВЧ диапазоне частот, где гибридные технологии использовать затруднительно.

В планарном диоде Ганна транспорт электронов организуется вдоль границ полупроводниковой структуры, а контакты анода и катода расположены на верхней стороне кристалла. Наличие дельта-легированных слоев создает высокую проводимость структуры. Благодаря примыкающим к ним низколегированным слоям реализуется отрицательная дифференциальная проводимость, связанная с междолинными переходами электронов. В отличие от конструкции планарного диода Ганна, предложенного в [2], в данной работе контакты к структуре создаются с помощью туннельно-прозрачных контактов Шоттки. Туннелирование осуществляется между слоем металла и полупроводником через область тонкого барьера, сформированного дельта-легированным слоем, расположенным на расстоянии около 3 нм от поверхности образца.

Важно то, что механизм, приводящий к наличию отрицательной дифференциальной проводимости должен быть быстрым, возникновение домена Ганна должно происходить за время ~ 1 пкс, для достижения частоты генерации 300 ГГц [2]. Отрицательная дифференциальная проводимость, связанная с разогревом, это медленный процесс, характеризуемый временами ~ 10 нс.

В ходе работы методом газофазной эпитаксии изготавливались структуры и с помощью литографии формировались контакты диодов.

Расстояние между контактами было от 2 до 16 мкм. В таблице приведена концентрация в активном слое двух типов исследуемых диодов. Проводилось измерение вольтамперных характеристик.

Была собрана импульсная экспериментальная установка.

Результат измерений зависимости напряжения и тока диода от времени (виды импульсов) для «Структуры 1» (слева) и «Структуры 2» (справа), где t - время от

Табл.

Название структуры	Концентрация доноров в активном слое N_s	Количество измеряемых образцов
Структура 1	10^{13} см^{-3}	20
Структура 2	$5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$	15

начала импульса до первого максимума тока представлены на рисунке. Для «Структуры 1» t - около 20 нс, для «Структуры 2» - $t \approx 2$ нс.

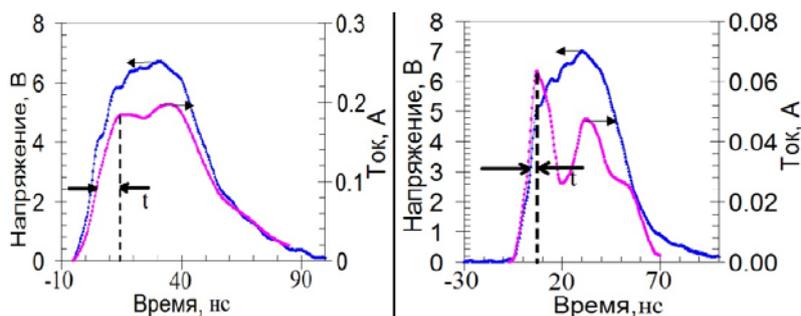


Рис.

Видно, что зависимости импульса тока от времени, соответствующие переднему и заднему фронтам импульса напряжения отличаются, что вероятно связано с нагревом диода. Оценено, что за первые 10 нс «Структура 2» нагревается примерно на 33°C , что мало влияет на параметры материалов. Провал импульса в середине зависимости для «Структуры 1», соответствующий отрицательной дифференциальной проводимости, мал, по сравнению с тем же провалом для «Структуры 2». Это объясняется тем, что отрицательная дифференциальная проводимость «Структуры 1» значительно меньше, что по-видимому, связано со значительным нагревом структуры (на $100\dots 150^{\circ}\text{C}$).

Моделирование транспорта электронов в полупроводниковой структуре осуществлялось в двумерном квазигидродинамическом приближении [1, 3]. Проведен расчет двумерных распределений концентрации электронов, потенциала, температуры электронного газа, плотности тока электронов, напряженности электрического поля в поперечном сечении диодов с различным расстоянием между контактами. Сопоставлены теоретические и экспериментальные ВАХ диодов с различным зазором между контактами.

Показано, что электроны из дельта-слоя легированной области инжектируются в верхний и нижний слаболегированные слои и образуют там ток проводимости. Увеличивается поперечное поле, так как в дельта-слое, концентрация электронов становится меньше, чем доноров, а выше и ниже она становится больше, чем концентрация доноров, т.е. образуется домен нестандартной формы – электрическое поле направлено поперек направления движения электронов. Для меньших расстояний между контактами домен занимает все пространство под зазором, т.е. электроны сразу около катода образуют домен. Можно предположить, что если уменьшать зазор дальше, то домен может и не появляться, т.е. отрицательная дифференциальная проводимость будет подавлена.

Работа поддержана грантом (соглашение от 27 августа 2013 г. № 02.В.49.21.0003 между МОН РФ и ННГУ).

- [1] Шур М. Современные приборы на основе GaAs. Пер. с англ. – М.: Мир, 1991, 632 с.
- [2] Khalid A., Pilgrim N.J., Dunn G.M. // Elec. Dev. Lett. 2007. V. 28, No. 10. P. 849.
- [3] Пожела Ю. Физика быстродействующих транзисторов. – Вильнюс: Мокслас, 1989, 264 с.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭФФЕКТОВ
АЗИМУТАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА
И ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
НА ВЫХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ
ГИРОТРОНОВ**

К.А. Лещева¹⁾, В.Ю. Заславский^{1,2)}, А.С. Седов²⁾, М.Ю. Глявин^{1,2)}

¹⁾*Нижегородский госуниверситет*

²⁾*Институт прикладной физики РАН*

Высокочастотные гиротроны востребованы рядом современных научных направлений, нуждающихся в эффективных источниках когерентного излучения вплоть до терагерцового диапазона частот [1]. В настоящей работе методами численного моделирования исследуется влияние на выходную мощность, частоту и модовый состав излучения эффектов, связанных азимутальной неоднородностью поперечного сечения резонатора, азимутальной неоднородностью и смещением электронного потока. Эта задача представляется особенно актуальной для гиротронов, предназначенных для спектроскопии и диагностики различных сред, когда предъявляются повышенные требования к стабильности указанных параметров, а вероятность погрешности юстировки прибора в магнитной системе растет в силу уменьшения характерных размеров резонатора с ростом частоты.

Указанные эффекты анализируются с помощью аналитических и численных моделей, в частности прямого 3D PIC моделирования на основе кода “CST Studio Suite”. Возможность использования данного кода для анализа ТГц гиротронов подтверждается данными работы [2]. Показано, что смещение электронного пучка и его азимутальная неоднородность приводят к существенному изменению мощности генерации, а по достижении некоего критического значения и к возбуждению паразитных мод. Сопоставление результатов прямого 3D моделирования с данными, полученными на основе метода усредненных уравнений [3, 4], позволяют утверждать о корректности используемого подхода и достоверности результатов численного моделирования. Для оценки неоднородности электронного потока в отпаянном гиротроне использован метод анализа переходного участка ВАХ [5]. Полученные значения эмиссионной неоднородности подтверждают наличие азимутальной неоднородности эмиссионного тока и свидетельствуют о необходимости учета этого эффекта при моделировании гироприборов. В перспективе 3D PIC моделирование должно позволить впервые учесть совместное влияние всех вышеперечисленных эффектов пространственной неоднородности на работу гиротрона.

Работа поддержана грантом (соглашение от 27 августа 2013 г. № 02.В.49.21.0003 между МОН РФ и ННГУ).

- [1] Братман В.Л., Литвак А.Г., Суворов Е.В. // УФН. 2011. № 181. С. 867.
- [2] Ginzburg N., Glyavin M., Zotova I., Zaslavsky V. // Phys. of Plasmas. 2013. V. 20. P. 043103.
- [3] Dumbrajs O., Nusinovich G.S. // Phys. of Plasmas. 2013. V. 20. P. 073105.
- [4] Nusinovich G.S., Vlasov A.N., Botton M. et.al. // Phys. of Plasmas. 2001. V. 8. P. 7.
- [5] Венедиктов Н.П., Глявин М.Ю., Запелалов В.Е. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1997. № 40, вып. 4. С. 506.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОЛУЧЕВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ ГИРОТРОНОВ

М.Ю. Глявин¹⁾, Н.А. Завольский¹⁾, В.Е. Запелалов¹⁾, В.Н. Мануилов²⁾,
А.С. Седов¹⁾

¹⁾Институт прикладной физики РАН

²⁾Нижегородский госуниверситет

В настоящее время существует потребность в источниках когерентного излучения диапазона вплоть до 1 ТГц с выходной мощностью порядка 100 Вт [1–3]. Одним из перспективных вариантов в указанной области параметров представляются гиротроны.

В связи со сложностью создания сильных постоянных магнитных полей большинство гиротронов этого диапазона проектируются на гармониках гирочастоты. В настоящее время существует целый ряд гиротронов, работающих на второй гармонике гирочастоты [2, 3], однако возбуждение более высоких гармоник и продвижение в область более высоких частот требует развития методов селекции рабочего типа колебаний.

Одним из перспективных методов селекции для ТГц гиротронов, работающих на гармониках гирочастоты, является использование электронно-оптической системы с двумя трубчатыми электронными пучками разного радиуса. Источником электронов в этом случае является катод традиционной для гиротронов геометрии с двумя эмитирующими кольцами. Ранее такая система успешно была использована для повышения выходной мощности гиротронов и селективного возбуждения второй гармоники [4]. Использование многолучевых систем, обладающих повышенной селекцией, должно обеспечить рекордные значения мощности и частоты гиротронов в непрерывном режиме генерации.

В данной работе исследовалась возможность построения гиротрона на третьей циклотронной гармонике с рабочей частотой 1 ТГц. После анализа спектра собственных колебаний цилиндрического резонатора с радиусом около 1,5 мм (что допускает относительно простую технологию изготовления) в качестве рабочей была выбрана мода $TE_{12,6}$. Было показано, что подбором геометрии электродов можно обеспечить формирование электронного потока с достаточно высокой долей вращательной энергии, приемлемым разбросом скоростей и равными значениями питч-факторов в обоих пучках [5], что позволяет рассчитывать на достижение относи-

тельно высоких КПД и мощности. Для данного гиротрона найдены стартовые токи рабочей и основных конкурирующих мод, выявлены оптимальные значения величин токов каждого пучка, а также допуск по точности юстировки гиротрона в магнитном поле.

Работа поддержана грантом (соглашение от 27 августа 2013 г. № 02.В.49.21.0003 между МОН РФ и ННГУ).

- [1] Братман В.Л., Литвак А.Г., Суворов Е.В. // УФН. 2011. № 181. С. 867.
- [2] Booske J. H., Dobbs R. J., Joye C. D. et al. // IEEE Trans. TST. 2011. V. 1, No. 1. P. 54.
- [3] Idehara T., Sabchevski S.P. // J. IR, MM and THz Waves. 2012. V.33, No. 7. P. 667.
- [4] Запечалов В.Е., Мануилов В.Н., Малыгин О.В., Цимринг Ш.Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 1994. Т. 37, № 3. С. 387.
- [5] Glyavin M., Manuilov V., Idehara T. // Physics of Plasmas. 2013. V. 20. P. 123303.

АНАЛИЗ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ GaAs, GaN СТРУКТУР

Е.А. Тарасова

Нижегородский госуниверситет

Для анализа радиационной стойкости полупроводниковых приборов целесообразным является анализ структур, предназначенных для их изготовления. Перспективными структурами для современных НЕМТ (транзисторы с двумерным электронным газом) являются GaAs, GaN. В работе проводились измерения вольт-фарадных характеристик транзисторных GaAs и GaN структур до и после гамма-нейтронного облучения с флюенсом 10^{13} – 10^{15} н/см². Эксперимент проводится совместно с РФЯЦ ВНИИЭФ (г. Саров) и РФЯЦ ВНИИТФ (г. Снежинск).

С помощью измерителя емкости Е7-20 были получены вольт-фарадные характеристики структур до и после облучения [1]. Выявлено снижение порогового напряжения и уменьшение емкости в GaAs структурах (рис. 1), что согласуется с данными из [2]. Изменение проводимости составило 30–50%.

Получено изменение концентрации электронов в GaAs структурах после облучения (рис. 3). Профиль распределения электронов по глубине в GaAs структуре отличался от полученных ранее в [1] аналитических оценок: обнаружено наличие радиационно-стимулированной диффузии легирующей примеси в структуре.

Резкое уменьшение концентрации в GaAs структуре связано с образованием большого количества кластеров радиационных дефектов при высоких уровнях флюенса нейтронов.

В GaN структурах впервые замечено увеличение емкости при облучении нейтронами с флюенсом от 10^{14} до 10^{15} н/см² (рис. 2). В работе выявлен доминирующий эффект при радиационном облучении на GaN структуру – сдвиг профиля распределения электронов в структуре связан с накоплением заряда на границе полупроводниковых слоев (рис. 4). Увеличение порогового напряжения также связано с захватом объемных зарядов ловушками в барьерном слое. Выявлено, что GaN

структуры выдерживают более высокий уровень флюенса, порядка 10^{15} н/см² без существенного изменения их параметров.

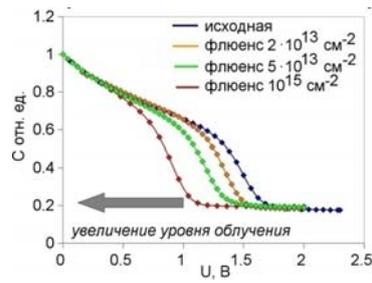


Рис. 1. Нормированное значение емкости GaAs структуры до и после облучения

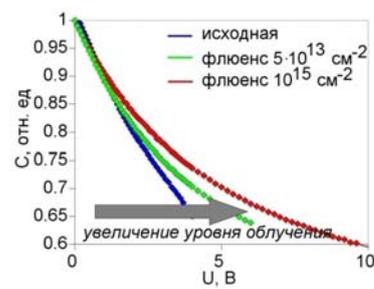


Рис. 2. Нормированное значение емкости GaN структуры и ее относительное изменение до и после облучения

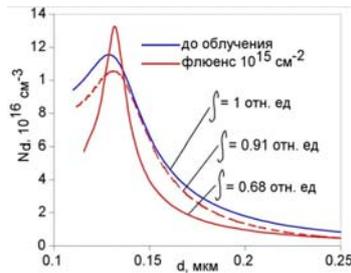


Рис. 3. Профили легирования GaAs структуры до и после облучения:

— экспериментальные данные;
 - - - аналитический расчет. Цифрами указана величина интеграла от приведенных зависимостей по координате

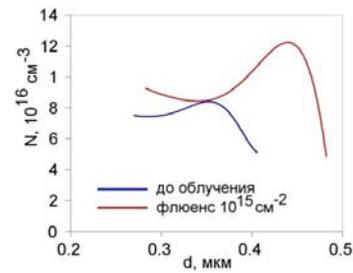


Рис. 4. Профили концентрации электронов в GaN структуре до и после облучения

Работа поддержана грантом (соглашение от 27 августа 2013 г. № 02.В.49.21.0003 между МОН РФ и ННГУ).

- [1] Оболенский С.В. Физико-топологическое моделирование характеристик субмикронных полевых транзисторов на арсениде галлия с учетом радиационных эффектов: Дис...док. техн. наук. Н. Новгород, 2002.
- [2] Оболенская Е.С., Тарасова Е.А., Оболенский С.В. // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2012, № 4. С. 9.

**ВОЛЬТ-ФАРАДНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ****Д. В. Истомин, Г.В. Медведев, С.В. Оболенский, Д.С. Смотровин***Нижегородский госуниверситет
«НПП Салют»*

Уникальные характеристики полупроводниковых приборов последнего поколения в большой степени определяются прогрессом в технологии формирования эпитаксиальных структур на основе полупроводников $A^{III}B^V$, в частности GaAs. Среди возможных методов получения эпитаксиальных слоев на передний план выдвигается МОС-гидридная эпитаксия (МОСГЭ) [1]. Именно на стадии получения эпитаксиальных структур формируются основные параметры приборов, поэтому немаловажным фактором является контроль их качества.

Состав контролируемых параметров эпитаксиальных структур определяется их назначением. Для структур СВЧ диодов, основными параметрами являются толщины слоев, а также их уровни легирования. Указанные параметры структур определяют вольт-фарадные характеристики диодов. В связи с этим наиболее приемлемым методом исследования структур является вольт-фарадный метод (CV метод), основанный на зависимости емкости барьерного контакта металл-полупроводник от концентрации носителей заряда в полупроводнике [2].

Основной проблемой использования CV метода является отсутствие стандартных эталонных полупроводниковых структур для калибровки измерительной установки и сопоставительного анализа со вновь изготавливаемыми структурами. В связи с этим предлагается для каждого типа эпитаксиальных структур проводить измерения профиля легирования эпитаксиальных слоев CV методом и сравнивать результаты с данными других методов (например, вторичной ионной масс-спектрографии) или с данными, полученными CV методом, но на другой установке.

На рис. 1 и рис. 2 приведены результаты исследования повторяемости результатов измерений ёмкости барьерного контакта и концентрации носителей заряда, полученных при измерениях на прецизионном измерителе LCR Agilent E4980A и E7-20, соответственно. Повторяемость определялась, как выраженная в процентах разница двух результатов измерений, отнесенная к значению первого результата. В качестве объекта измерений использовалась структура арсенида галлия типа p-n⁺буфер- $I_{\text{подложка}}$. На каждой измерительной установке в разные дни проводилось по 3 измерения. Это делалось для того, чтобы проследить динамику изменения ошибки с целью выявления возможного влияния на результаты измерений накопленных в структуре зарядов или других эффектов.

Из рисунков 1 и 2 видно, что ярко выраженной зависимости изменения результатов измерений во времени нет. Также видно, что повторяемость результатов измерений весьма высокая в области рабочего слоя структуры толщиной 0,2 мкм (на Agilent E4980A совпадает с погрешностью прибора, указанной в паспорте на прибор) и весьма заметное её снижение в области буферного слоя. Это объясняется тем, что вблизи границы «буферный слой - подложка» сильнее проявляется влияние

внешних условий измерений, так как концентрация электронов на 2-3 порядка меньше, чем в рабочем слое.

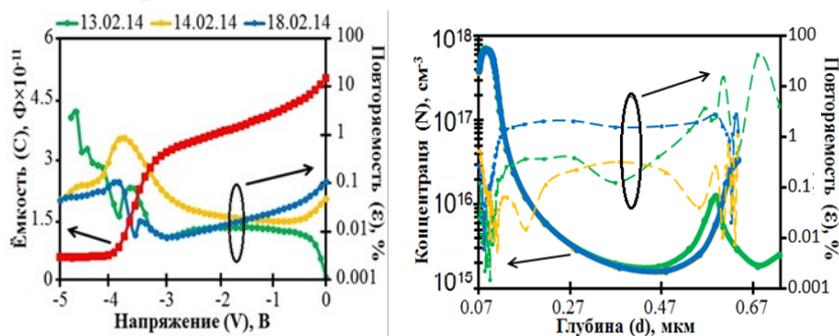


Рис. 1

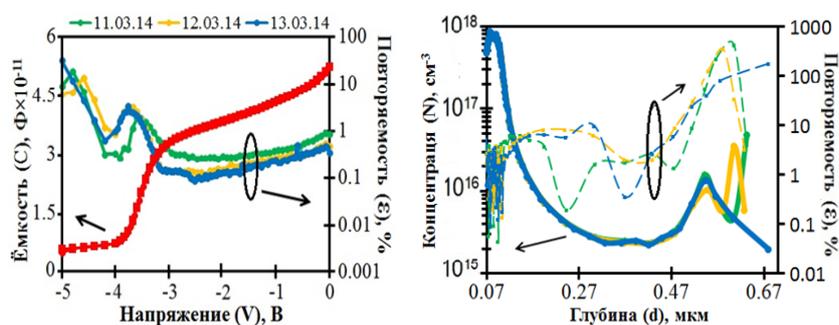


Рис. 2

Сравнивая графики на рисунках 1 и 2 можно установить, что по повторяемость результатов измерений параметров структур на установке Agilent E4980A превосходит аналогичные результаты, полученные на установке E7-20 на порядок.

Применение вольт-фарадного метода обеспечивает возможность контроля качества буферного p-слоя. Так на графиках рис. 1 и рис. 2 на глубине $\sim 0,5$ мкм выявлен всплеск концентрации носителей заряда, который очевидно связан с нарушением стехиометрии кристалла на границе «подложка-эпитаксиальный слой». Снижение температуры роста на начальной стадии формирования эпитаксиального слоя позволило устранить данный дефект и исключить возникновение паразитной проводимости.

Работа поддержана грантом (соглашение от 27 августа 2013 г. № 02.В.49.21.0003 между МОН РФ и ННГУ).

- [1] Акчурип Р.Х. // Материалы электронной техники. Известия вузов. 1999, № 2. С. 4.
 [2] Блад П., Ортон Дж. В. // Зарубежная радиоэлектроника. Ч. 1. 1981. № 1. С. 37.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СВЧ АКУСТОЭЛЕКТРОННЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ РЕЗОНАТОРОВ

М.Ю. Двошерстов, В.И. Чередник, В.А. Савин

Нижегородский госуниверситет

В настоящее время в качестве наборов резонаторов, образующих лестничные и (или) решетчатые полосовые фильтры, все чаще используются тонкопленочные резонаторы на объемных акустических волнах (FBAR резонаторы), отличающиеся чрезвычайно малыми размерами, высокой эффективностью и обеспечивающие требуемые эксплуатационные характеристики. В работе рассмотрены некоторые особенности расчета таких резонаторов и фильтров на них.

Частотные зависимости необходимых для расчета фильтра значений импедансов могут быть:

- 1) рассчитаны с помощью электрической эквивалентной схемы, описывающей резонатор (модель Баттерворта - Ван Дейка);
- 2) рассчитаны с помощью физической модели, описывающей резонатор как набор отрезков передающих линий (модель Мейсона);
- 3) рассчитаны с помощью строгой теории волновых процессов в резонаторе (теория Новотного);
- 4) получены экспериментально.

Первый способ является наиболее простым и поэтому самым быстродействующим, но параметры эквивалентной схемы не могут быть определены в рамках самой модели Баттерворта - Ван Дейка. Поэтому требуется предварительно получить импеданс путем расчета (п. 2 или 3), или с помощью измерений (п. 4), а затем уже из полученных зависимостей извлечь однозначные величины параметров эквивалентной схемы для расчета фильтра с применением п. 1.

Полная схема лестничного фильтра может включать в себя произвольное количество как Т-, так и П- звеньев, включенных последовательно друг за другом в произвольной комбинации, а также просто произвольные комбинации последовательных и параллельных резонаторов. Обычно эта схема включает в себя также входное сопротивление в виде последовательного импеданса и выходное сопротивление (нагрузку) в виде параллельного импеданса. Расчет произвольного лестничного фильтра, состоящего из произвольного количества импедансов, включенных последовательно друг за другом в произвольной комбинации, может быть выполнен с помощью метода перемножения матриц. Каждый импеданс, входящий в состав фильтра, можно представить в виде линейного четырехполюсника [1], после чего получить искомым коэффициент передачи (пропускания) всего фильтра. Применяя приведенные выше соображения, можно рассчитать амплитудно-частотную характеристику лестничного фильтра с учетом различных паразитных элементов конструкции либо включением их в эквивалентную схему каких-либо импедансов, либо включением их в схему всего фильтра в виде самостоятельных импедансов. Так был произведен расчет одного из возможных вариантов лестничного фильтра, образованного восемью FBAR резонаторами и обеспечивающего подавление вне

полосы пропускания около -27 дБ. Амплитудно-частотные характеристики резонаторов были предварительно рассчитаны с помощью теории Новотного [2, 3]. Параметры резонатора, соответствующего последовательному импедансу: толщина слоя пьезоэлектрического нитрида алюминия AlN 0,56 мкм, толщины обоих молибденовых электродов 0,1 мкм, размеры электродов 100x100 мкм². Параметры резонатора, соответствующие параллельному импедансу такие же, за исключением толщины одного из электродов, которая равна 0,116 мкм. Это различие обеспечивает различие резонансных частот резонаторов. Резонансные частоты импедансов составляют 5 ГГц. Компьютерная программа автоматически извлекает из рассчитанной амплитудно-частотной характеристики параметры эквивалентной схемы, которые вводятся в интерфейс программы, рассчитывающей частотный отклик фильтра.

Для звена решетчатого фильтра уже нет возможности непосредственно применить способ перемножения матриц, т.к. импедансы, образующие это звено, уже не располагаются каскадно, т.е. один за другим между входом и выходом. Для расчета коэффициента передачи этого звена можно воспользоваться законом Ома. Компьютерная программа, выполняющая расчет лестничного фильтра с применением процедуры перемножения матриц передачи, после небольшой модификации может быть использована для расчета также и решетчатого фильтра. Так был произведен расчет двухзвенного решетчатого фильтра, образованного восемью резонаторами с параметрами, близкими к параметрам резонаторов, образующих лестничный фильтр за исключением поперечных размеров электродов (120x120 мкм² вместо 100x100 мкм²), что дает несколько другие значения параметров фильтра, но такие же значения резонансной и антирезонансной частот. По-прежнему с центральной частотой полосы пропускания (5 ГГц) совпадает резонансная частота последовательно-го импеданса и антирезонансная частота параллельного импеданса.

Сравнение амплитудно-частотных характеристик лестничного и решетчатого фильтров показывает, что их главное отличие заключается в том, что решетчатый фильтр обеспечивает подавление вне полосы в два раза большее, чем лестничный фильтр из такого же количества практически таких же резонаторов. В ходе численного моделирования лестничных и решетчатых полосовых фильтров, образованных тонкопленочными резонаторами на объемных акустических волнах, была показана применимость процедуры перемножения матриц передачи импедансов для произвольных лестничных фильтров для расчета и решетчатых фильтров путем замены звена решетчатого фильтра эквивалентным T- звеном лестничного фильтра.

- [1] Лэнди Р., Дэвис Д., Албрехт А. Справочник радиоинженера. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961, 704 с.
- [2] Nowotny H., Benes E. // J. of Acoust. Society of America. 1987. V. 82 (2). P. 513.
- [3] Cherednick V.I., Dvoesherstov M.Y. // In the Book “Waves in Fluids and Solids”. Chapt. 3. /Ed. by Vila R.P. – Croatia: In Tech, 2011. P. 69.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АКУСТОЭЛЕКТРОННЫХ ПОЛОСОВЫХ СВЧ ФИЛЬТРОВ НА ОСНОВЕ SMR-BAW РЕЗОНАТОРОВ

М.Ю. Двошерстов, В.И. Чередник, В.А. Савин

Нижегородский госуниверситет

Полосовые фильтры СВЧ диапазона находят широкое применение в современных системах мобильной связи и спутниковой навигации. Требуемые эксплуатационные характеристики таких фильтров достигаются обычно путем использования наборов тонкопленочных резонаторов на объемных акустических волнах (SMR-BAW резонаторов, solidly mounted resonator bulk acoustic wave), отличающихся чрезвычайно малыми размерами, высокой эффективностью и обеспечивающих требуемые эксплуатационные характеристики в диапазоне частот 2-20 ГГц [1]. Принцип работы резонаторов основан на возбуждения продольной объемной акустической волны (ОАВ) в тонкой пьезокристаллической пленке, например, (001)AlN.

Классическая схема элементарной ячейки лестничного полосового фильтра имеет обычно вид либо Т- звена, либо П- звена [2]. Полная схема лестничного фильтра может включать в себя произвольное количество как Т-, так и П- звеньев, включенных последовательно друг за другом в произвольной комбинации, а также просто произвольные комбинации последовательных и параллельных резонаторов.

На рис. 1 X_1 , X_2 – импедансы SMR-BAW резонаторов, включенных последовательно и параллельно. Резонансная частота последовательных резонаторов должна совпадать с центральной частотой полосы пропускания фильтра, тогда антирезонансная частота этих резонаторов будет определять правую границу полосы пропускания. Антирезонансная частота (частота параллельного резонанса) параллельных резонаторов должна также совпадать с центральной частотой полосы пропускания, тогда резонансная частота этих резонаторов будет определять левую грани-

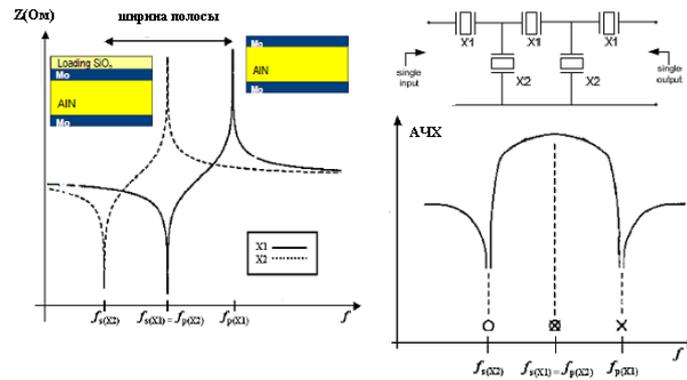


Рис. 1

цу полосы пропускания. На рис. 2 показана фотография матрицы трехзвенных фильтров, изготовленных по групповой технологии SMR-BAW резонаторов [3].

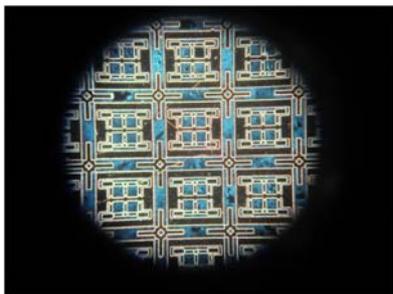


Рис. 2

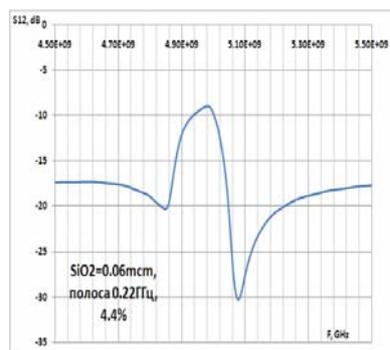


Рис. 3

Каждый фильтр состоит из 3 параллельных и 2 последовательных резонаторов. При этом все резонаторы настроены на одну частоту. Амплитудно-частотные характеристики Z_s и Z_p резонаторов были предварительно рассчитаны [2, 3]. Параметры резонатора, соответствующего последовательному импедансу Z_s : толщина слоя пьезоэлектрического нитрида алюминия AlN 0,56 мкм, толщины обоих молибденовых электродов 0,1 мкм, размеры электродов 100x100 мкм². Для формирования требуемой полосы фильтра необходимо центральную частоту параллельных резонаторов SMR_p уменьшить на нужную частоту путем напыления пленки SiO₂ определенной толщины. Габаритный размер одного фильтра 1x1 мм. На рис. 3 показана экспериментально снятая характеристика лестничного фильтра на SMR-BAW резонаторах, изготовленного на центральную частоту ~5 ГГц с полосой пропускания 220МГц (4,4%). При этом подстройка частоты параллельных резонаторов осуществлялась методом магнетронного напыления пленки SiO₂ толщиной 0,06 мкм (см. рис. 1). Для такой конфигурации фильтра затухание вне полосы составило 17 дБ, а вносимые потери 7 дБ. Для увеличения затухания вне полосы необходимо увеличивать количество звеньев в фильтре, а также оптимизировать фотошаблон. Для снижения вносимых потерь надо улучшать качество (металличность) электродов резонаторов.

- [1] Lanz R., Muralt P. // IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2005. V. 52, No. 6. P. 936.
- [2] Лэнди Р., Дэвис Д., Албрехт А. Справочник радиоинженера. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961, 704 с.
- [3] Двошерстов М.Ю., Чередник В.И., Коршунов С.Е., Босов С.И., // В кн. Труды II-й Всероссийской научно-технич. конф. «Электроника и микроэлектроника СВЧ». – г. Санкт-Петербург, 2013.