

ТАНДЕМ ЗАО "НТО" И НОЦ "НАНОТЕХНОЛОГИИ" ЮФУ – ПРИМЕР УСПЕШНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОИЗВОДСТВА И НАУКИ

А.Алексеев, к.ф.-м.н.¹, О.Агеев, д.т.н.², Е.Гусев, к.т.н.³, Б.Коноплев, д.т.н.⁴,
И.Лысенко, д.т.н.⁵, С.Петров, к.ф.-м.н.⁶

УДК 621.382
ВАК 05.27.06

Инновационное развитие в области современных технологий во многом основано на эффективной кооперации отечественных разработчиков оборудования с ведущими исследовательскими центрами. Добиться высоких результатов в инновационных разработках невозможно без наличия соответствующей исследовательской инфраструктуры, трансфера современных технологий и подготовки квалифицированных инженерных кадров. При этом, очевидно, что совместная хорошо выстроенная работа производственно-технологической компании и исследовательских центров обеспечивает серьезный синергетический эффект для обоих участников процесса. Позитивным примером такого взаимодействия может служить многолетнее сотрудничество ЗАО "НТО" (г. Санкт-Петербург) и НОЦ "Нанотехнологии" ЮФУ (г. Таганрог).

В 2008 году в рамках реализации ФЦП "Образование" и "Развитие инфраструктуры нанопромышленности в Российской Федерации" в Южном федеральном университете (ЮФУ) был открыт Научно-образовательный центр "Нанотехнологии" (далее – НОЦ "Нанотехнологии"), входящий в национальную нанотехнологическую сеть. Структура НОЦ "Нанотехнологии" включает в себя 10 лаборато-

рий, комплексно оснащенных уникальным оборудованием на общую сумму более 600 млн. руб., в том числе два специализированных чистых помещения – гермозоны площадью 100 и 400 м².

Основы сотрудничества ЗАО "НТО" и НОЦ "Нанотехнологии" были заложены в ходе поставки модулей молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) гетероструктур на основе материалов III–V групп, специально разработанных для интеграции в многофункциональный сверхвысоковакуумный нанотехнологический комплекс "НАНОФАБ" НТК-9 производства ЗАО "НТ-МДТ", расположенный в первой гермозоне (рис.1).

В продолжение успешной инсталляции модулей МЛЭ ЗАО "НТО" было привлечено к реализации проекта создания и оснащения второй технологической гермозоны (рис.2). Инфраструктура проекта предполагала оснащение комплектной технологической линией оборудования для реализации проектов прототипирования широкого спектра дискретных приборов микро- и оптоэлектроники, а также

¹ ЗАО "НТО", генеральный директор, sales@semiteq.ru.

² ФГОУ ВПО "Южный федеральный университет",
НОЦ "Нанотехнологии", директор, ageev@sfedu.ru.

³ ФГОУ ВПО "Южный федеральный университет",
НОЦ "Нанотехнологии", зав. лабораторией, eyugusev@sfedu.ru.

⁴ ФГОУ ВПО "Южный федеральный университет",
НОЦ "Нанотехнологии", научный руководитель, kbg@sfedu.ru.

⁵ ФГОУ ВПО "Южный федеральный университет",
НОЦ "Нанотехнологии", главный конструктор, ielysenko@sfedu.ru.

⁶ ЗАО "НТО", начальник прикладной лаборатории, sales@semiteq.ru.

микроэлектромеханических систем (МЭМС). В этом проекте ЗАО "НТО" выступило интегратором, отвечающим за весь комплекс задач – от формирования совместно с НОЦ "Нанотехнологии" перечня оборудования до контроля процесса монтажа и запуска гермозоны, а также ввода в эксплуатацию всего технологического и контрольно-измерительного оборудования. На подготовительном этапе проекта специалистами ЗАО "НТО" и НОЦ "Нанотехнологии" была проведена огромная работа по выбору и оптимизации перечня технологического оборудования исходя из перспективных задач и технологических маршрутов, которые предполагалось развивать на данной площадке. Результатом стал оптимально сконфигурированный комплекс оборудования и базовых технологических процессов, который позволил команде НОЦ "Нанотехнологии" в сжатые сроки выйти на высокий уровень самостоятельных разработок.

На этапе реализации проекта создания гермозоны ЗАО "НТО", помимо комплектования технологической линии, выполняло задачи: корректировки проекта чистых помещений, исходя из уточнений инфраструктурных требований к поставляемому оборудованию; обеспечения непрерывного сопровождения процесса поэтапного ввода в эксплуатацию технологического оборудования; проведения многоступенчатого тренинга инженеров-технологов НОЦ работе с оборудованием; разработки и постановки базовых технологических процессов.

В составе технологического комплекса были также введены в эксплуатацию установки плазмохимической обработки и быстрого термического отжига производства ЗАО "НТО". Многолетний опыт эксплуатации

всего комплекса оборудования оказался крайне полезным для ЗАО "НТО" и был использован специалистами и технологами в дальнейшем для совершенствования выпускаемых моделей оборудования серий STE ICP и STE RTA/RTP. Следует отметить быстрый ввод в эксплуатацию ростового модуля МЛЭ на базе ранней модификации установки STE35, который позволил специалистам НОЦ "Нанотехнологии" ЮФУ вскоре самостоятельно получить эпитаксиальные GaAs/AlGaAs 2DEG наногетероструктуры с хорошими электрофизическими параметрами.

На сегодняшний день в НОЦ "Нанотехнологии" ЮФУ успешно организована интеграция и координация усилий учебного, научного и инновационно-внедренческого потенциала подразделений ЮФУ. Среди основных направлений работы НОЦ:

- МЭМС и нанозлектромеханические системы (НЭМС): исследования и разработка принципов конструирования и основ технологии изготовления интегральных сверхминиатюрных гироскопов с тремя осями чувствительности и матриц интегральных сверхминиатюрных зеркал на основе наноразмерных технологий;
- микро- и нанозлектронная сенсорика: исследования и разработка электронной компонентной базы (ЭКБ) перспективных газочувствительных мультисенсорных систем обеспечения безопасности, направленных на повышение функциональных возможностей, снижение энергопотребления, улучшение массогабаритных характеристик приборов.

Современная инфраструктура лабораторий НОЦ "Нанотехнологии" позволяет его коллективу



Рис.1. Модуль молекулярно-лучевой эпитаксии SemiTEq STE35 для GaAs и твердых растворов на его основе в гермозоне НОЦ "Нанотехнологии" ЮФУ



Рис.2. Плазменный участок технологической гермозоны НОЦ "Нанотехнологии" ЮФУ

не только проводить исследования, но и получать патентоспособные результаты в следующих направлениях:

- методы построения функционально-интегрированных логических элементов, СВЧ-коммутаторов и элементов статической памяти на основе туннельно-связанных квантовых ям и сверхрешеток второго типа с взаимодополняющими типами проводимости (семь патентов РФ);
- методики формирования многослойных наногетероструктур A^3B^5 методом МЛЭ, в том числе типа FET, НЕМТ (подвижность носителей $5300-5700 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$), рНЕМТ (подвижность носителей $7000-7500 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$);
- методики контролируемого формирования самоорганизующихся наногетероструктур A^3B^5 методом МЛЭ, в том числе нитевидных нанокристаллов, квантовых точек, наноразмерных кластеров;
- методики наноразмерного ионно-лучевого травления и модификации поверхностей полупроводниковых материалов и структур нанoeлектроники, МЭМС и НЭМС;
- методы построения сверхбыстродействующих функционально-интегрированных лазеров-модуляторов с управляемой передислокацией максимума амплитуды волновых функций носителей заряда в пространственно смещенных квантовых областях (два патента РФ);
- модели, методика и программные средства численного моделирования функционально-интегрированных наногетероструктур на основе туннельно-связанных квантовых ям с взаимодополняющими типами проводимости (пять свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ);
- методы построения многоосевых интегральных микро- и наномеханических гироскопов-акселерометров (12 патентов РФ).

Одним из наиболее перспективных применений комплекса оборудования НОЦ "Нанотехнологии" стало

развитие систем ориентации, стабилизации, управления движением и навигации с использованием МЭМС и НЭМС. Как известно, ЭКБ навигационных систем включает в себя микромеханические гироскопы и акселерометры для измерения угловой скорости, угловых и линейных ускорений подвижного объекта. В настоящее время в России выпускаются микромеханические гироскопы и акселерометры на основе одноосевых сенсоров. Для измерения скоростных параметров объекта по трем осям сенсоры располагают по трем взаимно ортогональным осям, что, в свою очередь, приводит к увеличению габаритов и массы навигационного модуля, снижению надежности измерительного блока, увеличению уровня внутренних шумов. За рубежом производятся интегральные микромеханические гироскопы и акселерометры с несколькими осями чувствительности.

В НОЦ "Нанотехнологии" ЮФУ уже несколько лет успешно развивается данное направление, что подтверждается разработкой ряда защищенных 12-ю патентами многоосевых интегральных микро- и наномеханических гироскопов-акселерометров. Особенности разрабатываемой ЭКБ по сравнению с аналогами: повышенные функциональные возможности за счет регистрации угловых скоростей и линейных ускорений по двум или трем осям чувствительности одним сенсорным элементом, улучшенные массогабаритные характеристики (в шесть раз по сравнению с гибридными микросистемами и в два раза по сравнению с интегральными микро- и наносистемами).

В рамках Проекта № 14.575.21.0045 (идентификатор RFMEFI57514X0045) по ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы" разработана линейка функционально интегрированных микро- и наномеханических гироскопов-акселерометров с двумя и тремя осями чувствительности (рис.3, 4), изготовлены экспериментальные образцы

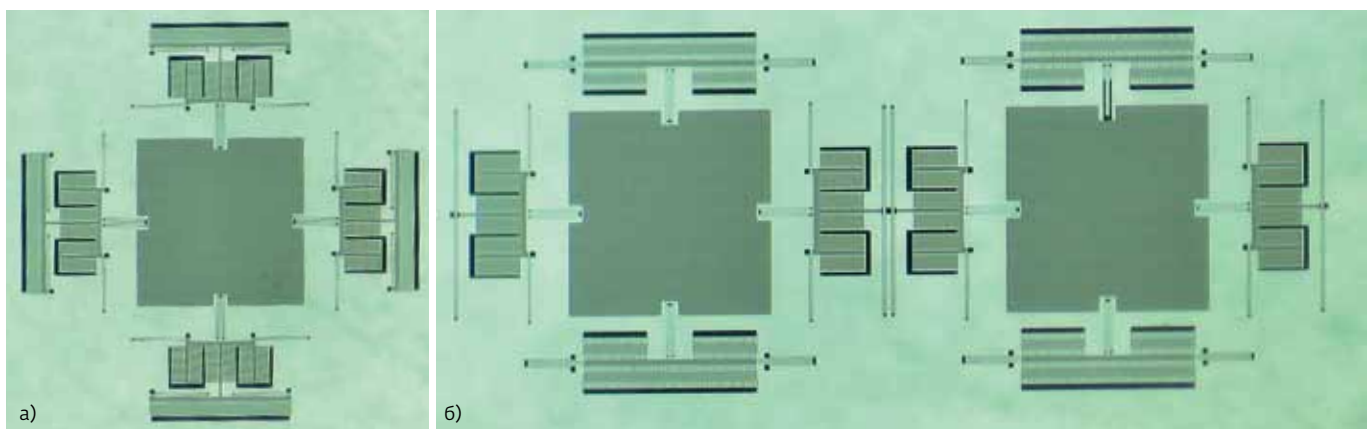


Рис.3. Топологии одномассового (а) и двухмассового (б) микромеханических гироскопов-акселерометров

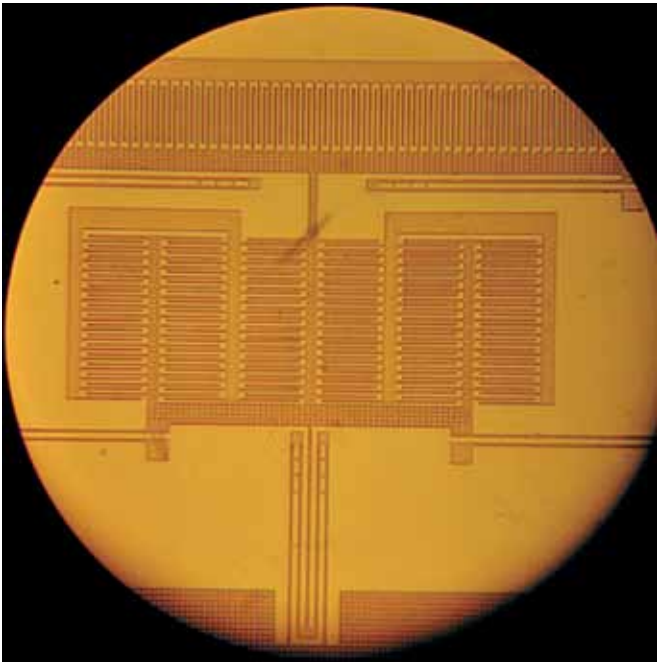


Рис.4. Фрагмент (емкостной преобразователь перемещений и электростатический привод) экспериментального образца микромеханического гироскопа-акселерометра с перестраиваемыми осями чувствительности

сенсоров и макеты оригинальных устройств обработки их сигналов.

Экспериментальные образцы двухосевых и трехосевых микромеханических гироскопов-акселерометров имеют диапазон измеряемых угловых скоростей ± 500 град./с, диапазон измеряемых ускорений $\pm 10g$ и уровень подавления перекрестных помех не менее 50 дБ. У экспериментальных образцов двухосевых микромеханических акселерометров диапазон измеряемых ускорений составляет $\pm 1g$, а уровень подавления перекрестных помех – не менее 40 дБ.

В планы проведения новых исследований на базе имеющегося комплекса оборудования НОЦ "Нанотехнологии" ЮФУ входят:

- разработка интегрального сверхминиатюрного гироскопа-акселерометра с тремя осями чувствительности на основе наноразмерных технологий;
- разработка и исследование конструктивно-технологических основ создания СВЧ-наногетероструктур A^3B^5 для элементной базы фотоники терагерцового диапазона;
- разработка и исследование конструктивно-технологических основ создания СВЧ-наногетероструктур A^3B^5 для электронной компонентной базы субтерагерцового диапазона;
- исследование технических путей создания акустооптической ячейки в интегральном исполнении для

малогабаритного энергоэффективного радиотехнического процессора обработки сверхширокополосных СВЧ-сигналов;

- разработка принципов конструирования и основ технологии изготовления матриц интегральных сверхминиатюрных зеркал на основе наноразмерных технологий;
- разработка конструкций и технологий изготовления мультисенсорных МЭМС-газовых анализаторов для систем обеспечения техносферной безопасности;
- разработка перспективных солнечных элементов на основе наногетероструктур и наноструктурированных пленок полупроводниковых материалов;
- разработка основ комплексных технологий новых наноструктурированных покрытий и наноустройств на базе лазерных и ионно-плазменных нанотехнологий для повышения надежности и энергосбережения аэрокосмических аппаратов.

Сегодня НОЦ "Нанотехнологии" ЮФУ и ЗАО "НТО" продолжают свое успешное сотрудничество, которое не прекращается почти 10 лет. Организации находятся в постоянном контакте, в частности:

- ЗАО "НТО" продолжает оказывать всестороннюю техническую и сервисную поддержку оборудования, а также проводит его постепенную модернизацию;
- компании совместно участвуют в выставках, семинарах и конференциях, где представляют результаты, достигнутые в НОЦ "Нанотехнологии";
- обмениваются научными и технологическими разработками, которые способствуют повышению эффективности деятельности обеих предприятий.

Необходимо отметить, что опыт длительной эксплуатации инфраструктурного комплекса НОЦ "Нанотехнологии" ЮФУ подтвердил правильность технических и технологических решений, выработанных совместными усилиями специалистов разного уровня с обеих сторон. Продуманная инфраструктура позволяет сотрудникам НОЦ "Нанотехнологии" получать научные результаты высокого уровня, которые применимы в целом ряде отраслей промышленности.

В заключение стоит сказать, что отечественные проектировщики и разработчики оборудования должны уделять особое внимание взаимодействию с конечными пользователями. На примере сотрудничества НОЦ "Нанотехнологии" ЮФУ и ЗАО "НТО" можно отметить, что комплексная работа от начала совместного проектирования технологической линии до ее ввода в эксплуатацию, а также последующее сопровождение и поддержка важны не столько для заказчика проекта, но и в большей степени для его исполнителя. Такие научные центры, как НОЦ "Нанотехнологии" Южного федерального университета, находятся в авангарде разработчиков перспективных технологий и ЭКБ завтрашнего

дня. Соответственно, отечественные разработчики специального технологического оборудования имеют возможность в ходе выполнения прикладных НИОКР совершенствоваться совместно со специалистами таких центров те или иные конструктивно-технологические решения, которые в скором времени будут внедрены в оборудование для серийного производства ЭКБ. Это имеет большое значение для развития отечественной радиоэлектронной промышленности и, в частности, производственно-ориентированного специального технологиче-

ского оборудования, которое, к сожалению, на сегодняшний день в России развито слабо. Таким образом, регулярный обмен опытом между производственно-технологическими компаниями и эксплуатирующими их разработками научными центрами, систематическая работа по подготовке высококвалифицированных инженерных кадров, совместная реализация научно-исследовательских проектов позволяют достигать синергического эффекта, который дает позитивный импульс к развитию радиоэлектронной отрасли в целом. ●

По просьбе авторов публикуем дополнительные ссылки на источники, которые использовались при написании статьи "Создание мощных СВЧ-транзисторов и микросхем на основе GaN – отечественный комплекс технологического оборудования" (ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес, 2016, №5).

Работа по созданию мощных СВЧ-транзисторов S-диапазона (рис.3) была проведена ЗАО "Светлана-Рост" совместно с ОАО "НИИЭТ" (г. Воронеж). Результаты представлены в следующих публикациях:

1. Дикарев В.И., Кожевников В.А., Красовицкий Д.М., Тарасов С.В., Цоцорин А.Н., Чалый В.П. Мощные GaN-транзисторы для применения в модулях L- и S-диапазона мобильных средств связи // В сб.: Микроэлектроника-2015. Интегральные схемы и микроэлектронные модули: проектирование,

производство и применение. Сборник докладов. Крым, г. Алушта, 28 сентября – 3 октября 2015 г. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. С. 355–357.

2. Пат. 2013630107 Российская Федерация. Интегральная микросхема 10-ваттной GaN транзисторной структуры S-диапазона с напряжением питания 28 В / А.Н.Цоцорин, В.И.Дикарев, В.А.Кожевников, С.В.Кокин, О.И.Токмаков, С.В.Тарасов; заяв. и патентообл. Открытое акционерное общество "Научно-исследовательский институт электронной техники"; опубл. 20.09.2013.

Тестовые МИС X-диапазона с коэффициентом усиления 13 дБ (рис.4) были созданы в рамках совместной работы ЗАО "Светлана-Рост" и ОАО "Минский НИИ радиоматериалов". Рис.4 был опубликован с разрешения ОАО "Минский НИИ радиоматериалов".