**СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ**

**НИТРИД-ГАЛЛИЕВОЙ СВЧ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Гамкрелидзе С.А., Федоров Ю.В.

**Институт СВЧ полупроводниковой электроники РАН, Москва**

За последние годы в ИСВЧПЭ РАН накоплен большой опыт разработки и изготовления монолитных интегральных схем (МИС) и многофункциональных приемо-передающих модулей (ППМ) см- и мм-диапазонов длин волн на нитрид-галлиевых гетероструктурах на подложках из сапфира и SiC. Установлены также проблемы изготовления и применения МИС, ассоциированные со свойствами материалов подложек, в частности: 1) низкая теплопроводность сапфира – перегрев подзатворной области – снижение параметров МИС на постоянном токе – необходимость импульсного режима по питанию (стока) и т.д.; 2) хрупкость SiC – растрескивание пластин в процессе изготовления – малый выход годных кристаллов, невозможность утонения менее 100 мкм, снижение эффективности теплоотвода, трудности использования пластин большого диаметра и т.д.; 3) невозможность формирования (сапфир) или низкая скорость травления (SiC) сквозных отверстий – необходимость изготовления «заземляющей плоскости» сверху – необходимость применения «флип-чип» монтажа кристаллов и т.д. Перечисленные проблемы длительное время сдерживали развитие нитрид-галлиевой электроники как в России, так и за рубежом.

Ситуация резко изменилась в последнее время в связи с разработкой технологии и освоением массового производства нитридных гетероструктур на кремниевых подложках (GaN-on-Si) ориентации (111) и (100) диаметром от 100 до 200 мм (в перспективе – до 300 мм) зарубежными производителями гетероструктур для СВЧ приборов: EpiGan (Бельгия), Nitronex (США), JDS (Тайвань), PAM-XIAMEN (Китай) и др. Особый интерес представляют наногетероструктуры GaN-on-Si с составом слоев Si3N4/AlN/GaN/Al0,08Ga0,92N (10нм/2-8нм/150нм/1500нм) [1], которые имеют ряд принципиальных преимуществ:

* не уступают по электрофизическим параметрам гетероструктурам на SiC [1], но превосходят их по технологичности, стойкости к растрескиваниям и стоимости (в 3-4 раза дешевле при одинаковых размерах уже сейчас);
* имеют предельно тонкий барьерный слой AlN (2-8 нм [1]), что позволяет получать максимально возможные пробивные напряжения затвор-исток (более 3000 В [1]), удельные мощности, КПД транзисторов и меньшие шумы при одновременном расширении частотного диапазона СВЧ приборов до сотен ГГц за счет максимизации аспектного отношения длины затворов к толщине барьерного слоя (оптимальная гетероструктура для всех частотных диапазонов);
* упрощают технологические процессы утонения подложки и изготовления металлизированных отверстий для заземления элементов схем на обратную сторону, что увеличивает функциональные возможности разрабатываемых СВЧ МИС и принципиально упрощает их монтаж в аппаратуру;
* не уступают по производительности и времени безотказной работы аналогичным приборам на SiC подложках, но обеспечивают меньшее тепловое сопротивление переход-корпус благодаря возможности утонения Si подложки до 50 мкм [2];
* позволяют осуществлять интеграцию СВЧ и цифровых КМОП приборов на одной подложке с единым технологическим циклом изготовления [2];
* позволяют использовать алмазные покрытия поверх гетероструктуры (300-400 нм) для эффективного отвода тепла из подзатворной области транзисторов (heat spreading) [3], что повышает их мощностные параметры и увеличивает срок эксплуатации;
* увеличивают производительность оборудования и снижают стоимость СВЧ приборов при массовом промышленном производстве за счет большего диаметра подложек и меньшего размера транзисторов.

По этим причинам в настоящее время происходит массовый переход зарубежных промышленных предприятий, производящих СВЧ ЭКБ, на гетероструктуры GaN-on-Si с одновременным расширением производства и прогнозируемым снижением уже к 2022 г. стоимости нитридных СВЧ МИС до стоимости МИС, изготовленных по кремниевой технологии [4].

Развивается процесс адаптации технологии изготовления нитридных СВЧ транзисторов и МИС к традиционной кремниевой КМОП технологии («Au-free») с целью использования действующих кремниевых фабрик для массового выпуска нитридных СВЧ приборов, в первую очередь, мощных транзисторов с периферией до 220 мм (Бельгия, Тайвань, Япония [5,6]). Это также позволит осуществить интеграцию цифровых и высокоэффективных СВЧ МИС на одной подложке (кристалле) в едином технологическом цикле.

Быстрыми темпами за рубежом разрабатывается технология «нормально-закрытых» нитридных транзисторов (в частности, путем введения эпитаксиального слоя p+GaN под затвором), что в ближайшей перспективе позволит создать дешевые мощные транзисторы на кремниевых подложках, аналогичные кремниевым LDMOS по входным характеристикам, но существенно превосходящие их по мощности, эффективности и рабочим частотам [7].

Разрабатываются также цифровые схемы на нитридных гетероструктурах с тактовыми частотами до 300-400 ГГц. Уже достигнуты времена задержки на вентиль менее 3 пс и созданы АЦП с тактовыми частотами до 100 ГГц.

**Задел в России.** В научных организациях ФАНО России и НИЦ «Курчатовский институт» (НИЦ КИ) имеется успешный опыт разработки приборов и технологий в данном направлении, в частности:

1. В ИСВЧПЭ РАН совместно с НИЦ КИ разработана отечественная технология изготовления нитридных СВЧ МИС диапазонов частот до 100 ГГц, включающая: невжигаемые омические контакты, грибообразные затворы с длиной до 50 нм, утонение подложки до 50 мкм, изготовление и металлизацию сквозных отверстий, резку пластины на кристаллы без использования специализированного оборудования. Данная технология успешно продемонстрирована, в частности, в 2017 г. при изготовлении МИС МШУ и ГУН Ка-диапазона на базе наногетероструктур GaN-on-Si производства Тайвань (JDS) диаметром 100 мм. Разработанная технология соответствует мировому уровню, обеспечивает высокий выход годных изделий (более 80% уже сейчас) и пригодна для внедрения на промышленные предприятия.
2. В ИОФ РАН разработана технология плазменно-стимулированного осаждения поликристаллического алмаза и выращивания соответствующих теплопроводящих подложек и покрытий. В настоящее время в ИОФ РАН совместно с ИСВЧПЭ РАН и НИЦ КИ в инициативном порядке проводятся исследования по разработке технологии создания нитридных СВЧ приборов на базе наногетероструктур GaN-on-Si с теплопроводящим алмазным покрытием с лицевой стороны гетероструктур в русле современных тенденций развития СВЧ электроники.
3. НИЦ КИ в настоящее время ведет разработку технологии роста нитридных гетероструктур для HEMT на подложках кремния методом MOCVD (установка фирмы AIXTRON). До конца текущего года будут доступны гетероструктруры на кремнии диаметром 50 мм. В планах на 2018 год модернизация оборудования для работы с пластинами 100 мм, а затем и 150 мм. На сегодняшний день в НИЦ КИ уже получены нитридные гетероструктуры приборного качества методами МЛЭ и MOCVD на подложках сапфира с ультратонкими (6 нм) барьерными слоями AlN, пригодные для создания устройств частотного диапазона до и выше 100 ГГц. Опыт коллектива в части роста и последующего изготовления тестовых элементов для аттестации приборного качества получаемых гетероструктур позволит перейти к изготовлению гетероструктур на кремнии в ближайшее время. Подобный опыт и задел выращивания гетероструктур GaN-on-Si с диаметром пластин 50 мм имеется также в АО «Элма-Малахит».
4. НИИСИ РАН (ИМТ НИЦ КИ) имеет опыт разработки и базу для промышленного производства специализированных СБИС по технологии КМОП на подложках диаметром 150 мм, что может быть основой для создания отечественного промышленного производства мощных транзисторов, СВЧ и цифровых МИС на базе нитридных наногетероструктур GaN-on-Si по технологии «Au-free», не уступающей зарубежным аналогам.

Таким образом, благодаря появлению новых материалов и современных отечественных технологий сложились уникальные условия для создания отечественного промышленного производства современной ЭКБ как для ВВСТ, так и для гражданского применения, не уступающей зарубежным аналогами и соответствующей основному направлению мирового развития.

**Вывод.** Для недопущения отставания России в производстве современной ЭКБ для ВВСТ нового поколения необходимо объединить усилия перечисленных организаций в создании отечественного промышленного производства мощных транзисторов, СВЧ и цифровых МИС на основе нитридных наногетероструктур на кремниевых подложках, включив их работы в подпрограмму «Поисковые научные исследования в интересах развития промышленных технологий для производства вооружения, военной и специальной техники», а также в план мероприятий по разработке и внедрению промышленных базовых и критических технологий в России.

1. Behet M. GaN on silicon - a truly revolutionary semiconductor technology matures – CS International Conference, Brussel, 7-8 March, 2017.

2. Ziehl M. GaN/Si for RF Applications: Shattering the Barriers to Mainstream GaN Adoption – CS International Conference, Brussel, 7-8 March, 2017.

3. Meyer D.J., Feygelson T.I., Anderson T.J. et al. Large-Signal RF Performance of Nanocrystalline Diamond Coated AlGaN/GaN High Electron Mobility Transistors - IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, VOL. 35, NO. 10, OCTOBER 2014, pp. 1013-1015.

4. Zong Z. GaN RF Industry: Landscape and Future Evolution - CS International Conference, Brussel, 7-8 March, 2017.

5. Lenci S., Kang X., Wellekens D. et al. Au-free, High-Breakdown AlGaN/GaN MISHEMTs with Low Leakage, High Yield and Robust TDDB Characteristics - CS MANTECH Conference, April 23rd - 26th, 2012, Boston, Massachusetts, USA.

6. Kawanago T., Kakushim K., Kataoka Y. et al. Advantage of TiN Schottky Gate over Conventional Ni for Improved Electrical Characteristics in AlGaN/GaN HEMT - Solid-State Device Research Conference (ESSDERC), 2013, Bucharest, Romania.

7. Chen K.J., Häberlen O., Alex Lidow A. et al. GaN-on-Si Power Technology:

Devices and Applications - IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 64, NO. 3, MARCH 2017, pp. 779-795.