

# СТАНДАРТИЗОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРОИЗВОДСТВА НИТРИДНОЙ СВЧ ЭКБ СОСТОЯНИЕ И БЛИЖАЙШИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ

Д.Красовицкий, к.х.н., А.Филаретов, к.ф.-м.н., ahf@semiteg.ru, В.Чалый, к.ф.-м.н.

На отраслевой научно-технической конференции "Состояние и перспективы развития отечественной микроэлектроники", которая прошла в Новосибирске 27–28 сентября 2012 года, В.П.Чалый, директор ЗАО "Светлана-Рост", сообщил, что возглавляемое им предприятие готово предоставлять услуги фаундри для производства СВЧ ЭКБ на основе DH-HEMT AlGaN-транзисторов (HEMT-транзисторы с двумя гетеропереходами). Соответствующие эпитаксиальные структуры стандартизованы и доступны, создана технология производства транзисторов S- и C-диапазонов. Предприятие переходит к разработке стандартизованных процессов производства монокристаллических интегральных схем на основе этих транзисторов, включая формирование воздушных мостиков, МДМ-конденсаторов и сквозных переходных отверстий. В перспективе предусматривается переход к более высоким частотам.

**Р**азвитие нитридных технологий в России началось с 2004 года, когда на совещании в Российском агентстве по системам управления (РАСУ) было принято решение о переходе от академических исследований к прикладным разработкам, и, прежде всего, к разработке гетероструктур для применения в мощных СВЧ-транзисторах. Для этого требовалось решить три задачи: разработать конструкцию эпитаксиальной структуры и соответствующее ростовое оборудование, развить технологии выращивания эпитаксиальных структур для применения в мощных СВЧ-транзисторах. Для решения первых двух задач в конце 2004 года было образовано ЗАО "Светлана-Рост", основной деятельностью которого стали развитие технологии выращивания нитридных эпитаксиальных гетероструктур, а затем – фаундри в области

мощных СВЧ нитридных приборов. Основу парка ростового оборудования составили отечественные установки молекулярно-пучковой эпитаксии производства ЗАО "Научное и технологическое оборудование", специально разработанные для выращивания нитридов металлов третьей группы. В результате в конце 2006 года произошло знаковое событие – состоялось тестирование в СВЧ-режиме первого российского мощного транзистора, который был изготовлен совместно специалистами ЗАО "Светлана-Рост" и ФГУП "НПП "Исток". Тем самым были проверены решения, заложенные в новую для того времени конструкцию гетероструктуры AlGaIn с двусторонним ограничением (DH-FET). В основу всех разработок ЗАО с самого начала его образования был положен принцип стандартизации конструкции гетероструктур и технологического процесса изготовления

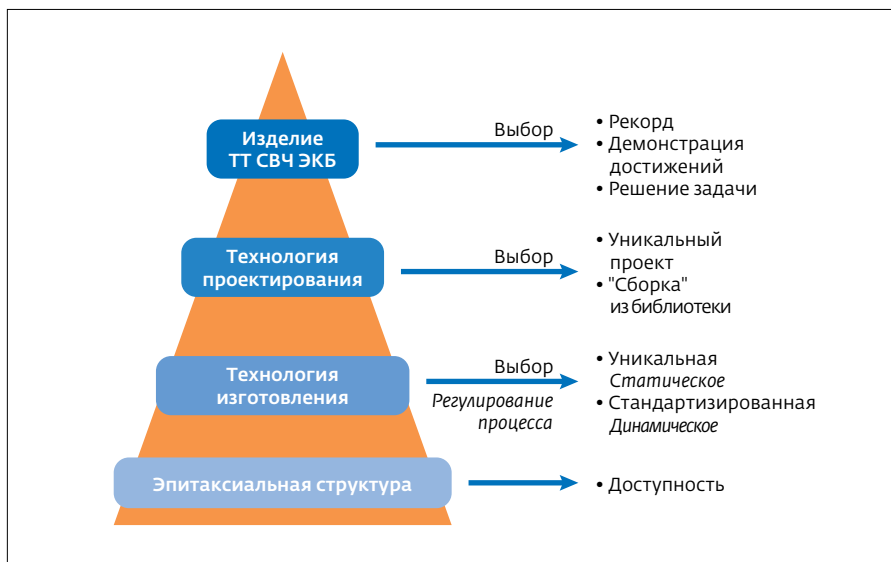


Рис.1. Технологическая пирамида

из этой стандартной гетероструктуры целого класса полупроводниковых изделий, в данном случае – мощных СВЧ-транзисторов.

Идея построения производства твердотельной СВЧ ЭКБ на принципах стандартизованных технологий постепенно развивалась и была отражена и в инициативных разработках российских предприятий, и в тематике финансируемых государством НИОКР. Так, в рамках Федеральной целевой программы "Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники" на 2008–2015 годы и в программе "Перспективные полупроводниковые гетероструктуры и приборы на их основе" ("Прометей") Союзного государства России и Беларуси в 2012 году появились опытно-конструкторские работы по построению стандартизованных технологий в области СВЧ-техники. Терминология взята из разработанных 22 ЦНИИИ МО РФ Временных положений [1, 2] с той поправкой, что вместо термина "базовая технология" используется термин "стандартизованная технология".

Стандартизованная технология – это технология, которая характеризуется, во-первых, конечным и постоянным для нее набором измеряемых параметров, во-вторых, в ее технологическом маршруте содержится набор тестовых элементов, образующих параметрический монитор, в-третьих, это технология, для которой параметры, измеряемые на одинаковых тестовых элементах, всегда укладываются в заданный диапазон значений, и в-четвертых, документация стандартизованной технологии содержит библиотеку стандартных элементов.

Поставленные задачи и возникающие проблемы при производстве конкретных типов изделий твердотельной СВЧ электронной компонентной базы (как, впрочем, и других видов твердотельной ЭКБ) можно сгруппировать в блоки, образующие пирамиду (рис.1). Приступая к разработке стандартизованной технологии, нужно ответить на следующие вопросы.

*Вопрос первый:* цель разработки – устройство для решения конкретной технической задачи или устройство с рекордными характеристиками?

*Вопрос второй:* как проектировать изделие – на основе компоновки библиотечных стандартных элементов

стандартизованного (базового) технологического процесса или исходя из принципов уникальности проекта?

*Вопрос третий:* какой технологический процесс применить?

*Вопрос четвертый:* какую конструкцию эпитаксиальной структуры следует использовать?

В вершине пирамиды расположен главный вопрос, определяющий выбор типа применяемой технологии: если разрабатывается устройство с рекордными и демонстрационными характеристиками, тогда оправдан выбор уникальной технологии. В остальных случаях экономически выгодно выбрать стандартизованные технологии. Тогда проектирование изделия превращается в сборку устройства из стандартных элементов, т.е. используется современная организационная схема разработок и производства изделий полупроводниковой техники [3].

Для обоснования построения производственного процесса на основе стандартизованных технологий существенными аргументами являются следующие:

- конструктивно изделия изготавливаются в едином, не требующем перестройки, технологическом процессе и представляют собой всего лишь различные исполнения одного изделия;
- обеспечена естественная возможность перехода от статического регулирования технологического процесса (когда решение об изменении процесса принимается после его выхода за допустимые пределы) к динамическому

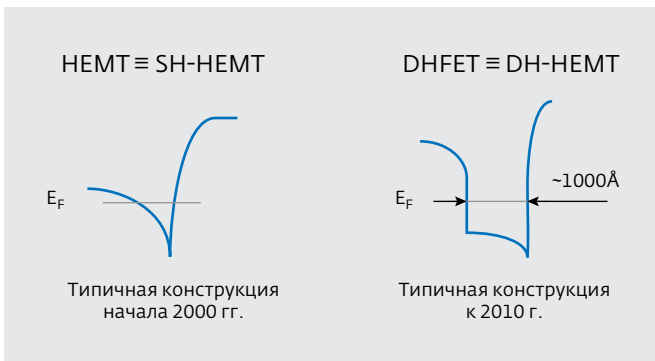


Рис.2. Соответствие гетероструктур DHFET и NEMT

регулированию на основе статистических данных (предупреждающему выход процесса за допустимые пределы).

В основании пирамиды – вопрос доступности эпитаксиальной структуры для решения соответствующей конечной задачи. Именно эпитаксиальная структура определяет предельно достижимые свойства изготавливаемых из нее приборов.

В технологиях производства мощных нитридных СВЧ-приборов с барьером Шоттки всеми мировыми производителями после 2010 года выпускаются эпитаксиальные структуры типа "двойная гетероструктура" (ДГС) с двусторонним электронным ограничением DHFET [4, 5], которые лишь

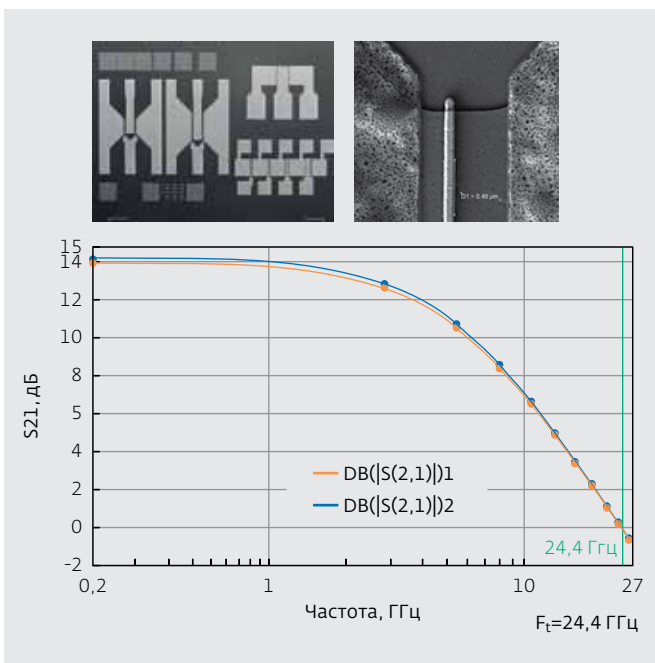


Рис.4. Динамические характеристики СВЧ-транзистора AlGaIn DHFET

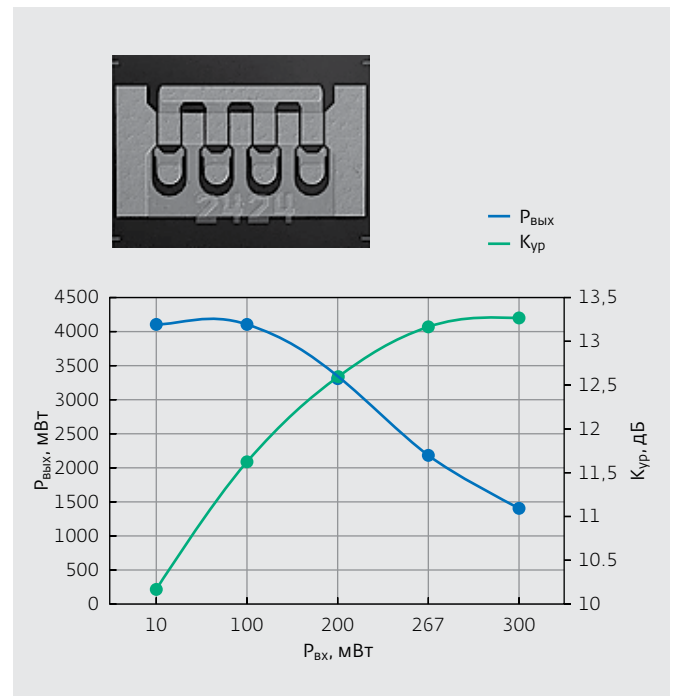


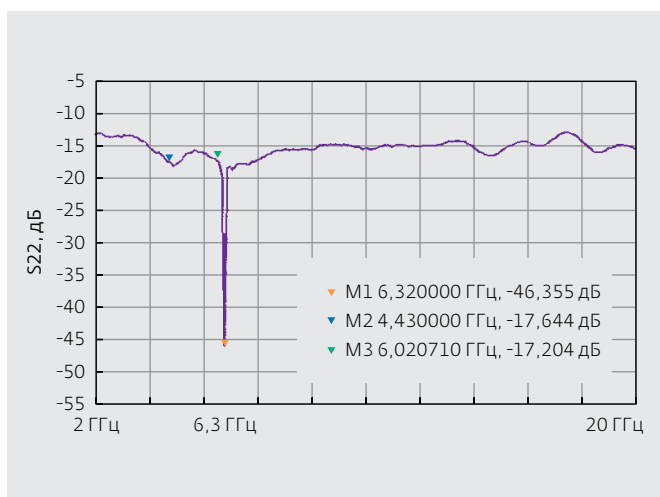
Рис.3. Мощностные характеристики транзистора AlGaIn DHFET

по традиции называются NEMT (рис.2). Но иногда, чтобы подчеркнуть наличие двойной гетероструктуры, вводится термин DH-NEMT (Double heterojunction NEMT) [6].

С самого начала разработки нитридных технологий в ЗАО "Светлана-Рост" основной задачей было создание двойной гетероструктуры [7]. В настоящее время изготовлена нитридная ДГС с широким каналом (DHFET-структура) на теплопроводящих полуизолирующих подложках SiC. На такой структуре модельный транзистор в режиме непрерывной волны имел удельную мощность 4,2 Вт на миллиметр ширины затвора на частоте 4 ГГц (рис.3). Это была совместная работа ЗАО "Светлана-Рост" (технологическое предприятие), ОАО "ГЗ "Пульсар" (предприятие, серийно выпускающее законченные изделия) и ФГУП "НПП "Пульсар" (разработчик изделий твердотельной ЭКБ).

В результате проведенной работы было установлено, что, во-первых, эпитаксиальные структуры пригодны для приборного применения и серийно производятся и, во-вторых, показано, что эта структура может стать основой стандартизованного технологического процесса изготовления усилительных нитридных кристаллов с проектной нормой (длиной затвора) 0,5 мкм (рис.4). Другими словами, уже сегодня созданы все предпосылки для проектирования и производства





**Рис.5.** Частотная характеристика резонатора FBAR брегговского типа

на принципах производственной кооперации конкретных гибридно-монокристаллических усилителей мощности. Что же касается характеристик, то из частотной зависимости коэффициента передачи S21 тестового транзистора видно: значение граничной частоты коэффициента передачи  $f_t$  составляет 24 ГГц, а это значит – можно разрабатывать усилители в частотном диапазоне до 7,5-8 ГГц.

Включение в стандартизованный технологический процесс AlGaN DHFET операций формирования мостиков, сквозных отверстий и МДМ-конденсаторов позволит перейти к разработке усилителей мощности в монокристаллическом исполнении. Для приборов и устройств, работающих в экстремальных условиях на более высоких частотах, перспективной конструкцией эпитаксиальной структуры представляется конструкция с каналом в виде квантовой ямы – QW-DHFET.

Разработка технологии выращивания эпитаксиальных структур AlGaN DHFET на подложках кремния в ЗАО "Светлана-Рост" была приостановлена, так как в России нет экономической перспективы организации производства таких структур для высокочастотных (X и выше) диапазонов. Но полученные результаты все-таки нашли применение в области пассивной СВЧ компонентной базы. Эпитаксиальные слои AlN и AlGaN оказались очень хорошим материалом для производства акустоэлектронных приборов [8] и чем тоньше слои высокого кристаллического совершенства, тем выше частота приборов на акустических волнах. Для других технологий

повышение частоты чрезвычайно сложно, а для технологии эпитаксиального выращивания – нет. Изготовленный в ОАО "Акбел" тонкопленочный резонатор на объемных акустических волнах (FBAR) брегговского типа имел резонансную частоту 6,3 ГГц (рис.5).

Таким образом, можно констатировать, что первый этап развития нитридных стандартизованных технологий производства дискретных и гибридно-монокристаллических интегральных схем С-диапазона завершен и созданы условия для перехода к проектированию и производству конкретных приборов. Второй, уже начавшийся этап развития, – разработка стандартизованных процессов производства монокристаллических интегральных схем. Для устройств и приборов с повышенными эксплуатационными свойствами необходима эпитаксиальная структура типа QW-FET.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Временное положение. Порядок выполнения работ при взаимодействии разработчика микросхем и изготовителя пластин с кристаллами заказанных элементов. – М.: 22 ЦНИИИ МО РФ, 2009.
2. Временное положение. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические военного назначения. Пластины с кристаллами заказанных элементов. Общие технические условия. – М.: 22 ЦНИИИ МО РФ, 2009.
3. **Зверев А.В., Попов В.В., Филаретов А.Г., Чалый В.П.** Модели организационного развития предприятий полупроводниковой промышленности. – Электроника: НТБ, 2011, №4, с.107-109.
4. Back-barrier enhancements to AlN/GaN HEMTs, Semiconductor Today, 29 December 2011.
5. **Jie Liu, Yugang Zhou, Jia Zhu, Yong Cai, Kei May Lau, Kevin J. Chen. et. al.** DC and RF Characteristics of AlGaIn/GaN/InGaIn/GaN Double-Heterojunction HEMTs. – IEEE Transactions on electron devices, 2007, v.54, №1, p.2-10.
6. **Ma Juncui, Zhang Jincheng, Xue Junshuai, Lin Zhiyu, Liu Ziyang, Xue Xiaoyong, Ma Xiaohua, Hao Yue.** Characteristics of AlGaIn/GaN/AlGaIn double heterojunction HEMTs with an improved breakdown voltage. – Journal of Semiconductors, 2012, v.33, p.014002-1-014002-5.
7. **Красовицкий Д.М., Филаретов А.Г., Чалый В.П.** Нитридная СВЧ-техника в России: материалы и технологии. – Электроника: НТБ, 2011, №8, с.114-123.
8. **S.Mahon, R.Aigner.** Bulk Acoustic Wave Devices – Why, How, and Where They are Going. – CS MANTECH Conference, May 14-17 2007, Austin, Texas, USA, p.15-18.