

# Технологии InGaP/GaAs HBT в рамках модели Российской фабрики-фаундри: отработка процессов и предварительные результаты

Р.С. Крюков<sup>1,2</sup>, Г.Е. Яковлев<sup>1,2</sup>, Т.О. Сумарокова<sup>2</sup>, В.К. Баля<sup>2</sup>, А.Л. Дудин<sup>1,2</sup>, И.С. Пушница<sup>2</sup>, В.П. Чалый<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

<sup>2</sup>АО «Светлана-Рост»

**Аннотация:** Представлены результаты разработки прототипа базовой технологии создания InGaP/GaAs HBT-транзисторов на мощностях АО «Светлана-Рост». Описаны ключевые особенности технологического маршрута и структуры приборов. Измеренные характеристики опытных образцов подтверждают принципиальную возможность реализации в России современной технологической платформы для производства МИС на основе гетеробиполярных транзисторов с высокой воспроизводимостью параметров.

**Ключевые слова:** гетеробиполярный транзистор, HBT, InGaP/GaAs, СВЧ-фаундри

## 1. Введение

Современное развитие СВЧ-электроники связано с растущими требованиями к повышению рабочих частот, увеличению выходной мощности, миниатюризации компонентов и улучшению энергоэффективности. При этом важной задачей является обеспечение стабильности их характеристик и воспроизводимости результатов производства. Одним из основных факторов, сдерживающих развитие отрасли, остается высокая себестоимость разработки, внедрения и поддержания специализированных производственных линий. Это обусловлено необходимостью внедрения уникального оборудования и привлечения высококвалифицированного персонала.

В традиционной модели IDM (Integrated Device Manufacturer - интегрированный производитель приборов) производство часто оптимизируется под конкретное изделие. Это может приводить к созданию узкоспециализированных технологических решений, которые трудно масштабировать на производство смежных классов устройств. В отличие от этого, модель фаундри ориентирована на разработку универсальных и статистически контролируемых технологических процессов. Такой подход позволяет рассматривать освоение производства нового типа приборов системно – как задачу построения базового технологического маршрута, обеспечивающего стабильные характеристики устройств по всей площади пластины.

Эффективность компаний, работающих по модели фаундри, во многом определяется уровнем развития их технологических компетенций. АО «Светлана-Рост» является единственной в России СВЧ-фаундри, обладающей компетенциями в серийном производстве СВЧ МИС на основе полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов (GaAs pHEMT и GaN HEMT) [1–3]. Эти компетенции включают в себя отработанные технологические процессы эпитаксиального роста и планарных процессов, а также развитые системы контроля качества продукции. Наличие рабочих PDK (Process Design Kit – набор комплексных инструментов для проектирования) подтверждает стабильность технологий и позволяет разработчикам создавать устройства с предсказуемыми характеристиками.

Вместе с тем, фаундри как правило имеет ограниченный набор технологических процессов, что мешает созданию разнообразных архитектур. При этом развитие возможностей фаундри не всегда требует создания новых производств с нуля. Концепция фаундри допускает перенос уже имеющихся компетенций на близкие типы приборов. За счет унификации материальной базы, оборудования и методов контроля качества можно расширять технологические возможности предприятия с относительно небольшими затратами. Такой подход основан на адаптации существующих технологических процессов под требования новых приборов при сохранении общей производственной инфраструктуры, что снижает риски и ускоряет внедрение новых технологий.

АО «Светлана-Рост» внимательно следит за динамикой рынка и растущими требованиями современных разработчиков электроники. В ответ на эти вызовы предприятие делает первые шаги в сторону развития нового технологического процесса на базе гетеробиполярных транзисторов (НВТ). Выбор данной технологии обусловлен растущим спросом на генераторы, управляемые напряжением [4], низковольтные и высоколинейные усилители [5], делители и умножители частоты [6, 7], а также высокоскоростные ИС для оптоволоконной телекоммуникации [8], в которых НВТ обеспечивают низкий уровень 1/f- и теплового шума, высокое и линейное усиление и очень высокое быстродействие. Это позволит значительно расширить возможности проектирования и обеспечить базу для создания следующего поколения высокотехнологичных устройств для комплектования перспективной отечественной РЭА специального применения импортонезависимой СВЧ ЭКБ. В данной работе рассматриваются результаты первых экспериментальных запусков предварительного технологического процесса производства InGaP/GaAs НВТ транзисторов.

## 2. Теоретические сведения и выбор конструкции

Гетеробиполярный транзистор – разновидность биполярного транзистора, отличающаяся использованием материалов с разной шириной запрещенной зоны для формирования гетеропереходов. Использование широкозонного эмиттера (например, InGaP) при узкозонной базе (GaAs) создает высокий энергетический барьер для обратной инжекции дырок. Это позволяет сильно легировать базу без потери коэффициента усиления, что минимизирует её толщину и сопротивление, радикально повышая граничную частоту работы прибора. Структура InGaP/GaAs является наиболее востребованной благодаря сочетанию высокой линейности, низкого фазового шума и отличной воспроизводимости техпроцесса. Принципиальная последовательность слоев НВТ-гетероструктур, рассматриваемых в данной работе представлена на рисунке 1.

Контакт к эмиттеру	n+ In <sub>0,5</sub> Ga <sub>0,5</sub> As
Градиентный слой	n+ In <sub>0,5</sub> Ga <sub>0,5</sub> As → In <sub>0,05</sub> Ga <sub>0,95</sub> As
	n+ GaAs
	n+ In <sub>0,5</sub> Ga <sub>0,5</sub> P
Эмиттер	n- In <sub>0,5</sub> Ga <sub>0,5</sub> P
База	p+ GaAs
Коллектор	n- GaAs
Контакт к коллектору	n+ GaAs
Подложка	S/I GaAs

Рис. 1. Принципиальная последовательность слоев гетероструктуры НВТ транзистора

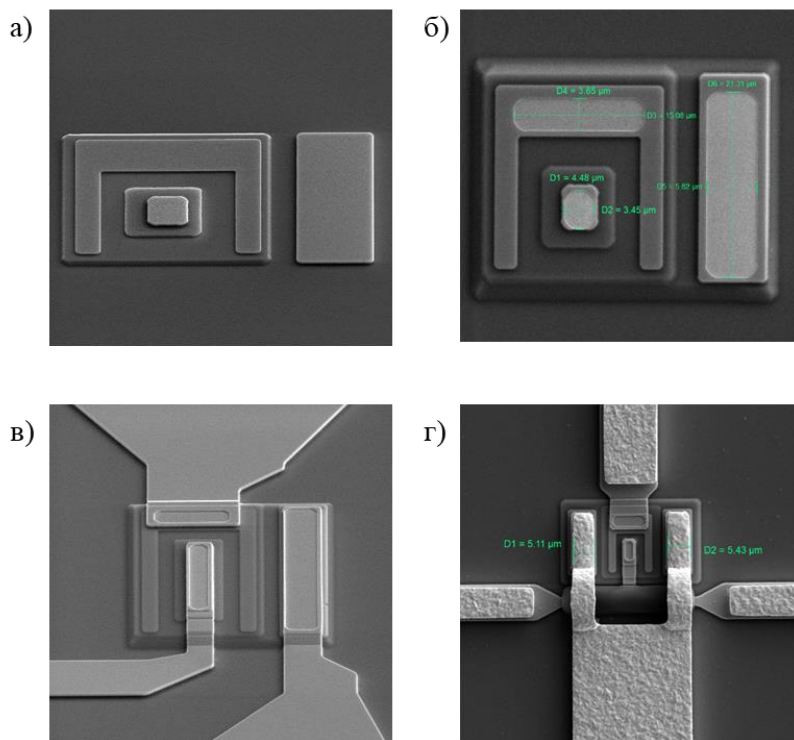
Следует отметить, что гетероструктура InGaP/GaAs является перспективной для освоения новых техпроцессов благодаря возможности использования селективного травления при формировании мезы эмиттера и базовых контактов. Применение селективных травителей гарантирует прецизионный контроль геометрии прибора и минимизирует влияние технологических погрешностей. В результате достигается высокая однородность и воспроизводимость параметров полупроводниковых структур по всей поверхности подложки.

### 3. Полученные результаты

В качестве основы для разработки прототипа базового технологического процесса изготовления InGaP/GaAs HBT транзисторов был взят стандартный технологический процесс АО «Светлана-Рост» по производству GaAs pHEMT, адаптированный с учетом вышеобозначенных особенностей гетероструктуры – селективного травления эмиттерных слоев, предотвращения диффузии омического контакта базы при высокотемпературных операциях и т.п. Вкратце данный маршрут представляет собой следующие операции:

1. Формирование омических контактов и травление мезы эмиттера, базы, коллектора.
2. Пассивация поверхности сформированных транзисторов.
3. Формирование первого уровня металлизации для коммутации транзисторов.
4. Формирование диэлектрика для изоляции двух уровней металлизации.
5. Формирование второго уровня металлизации для окончательной коммутации транзисторов.

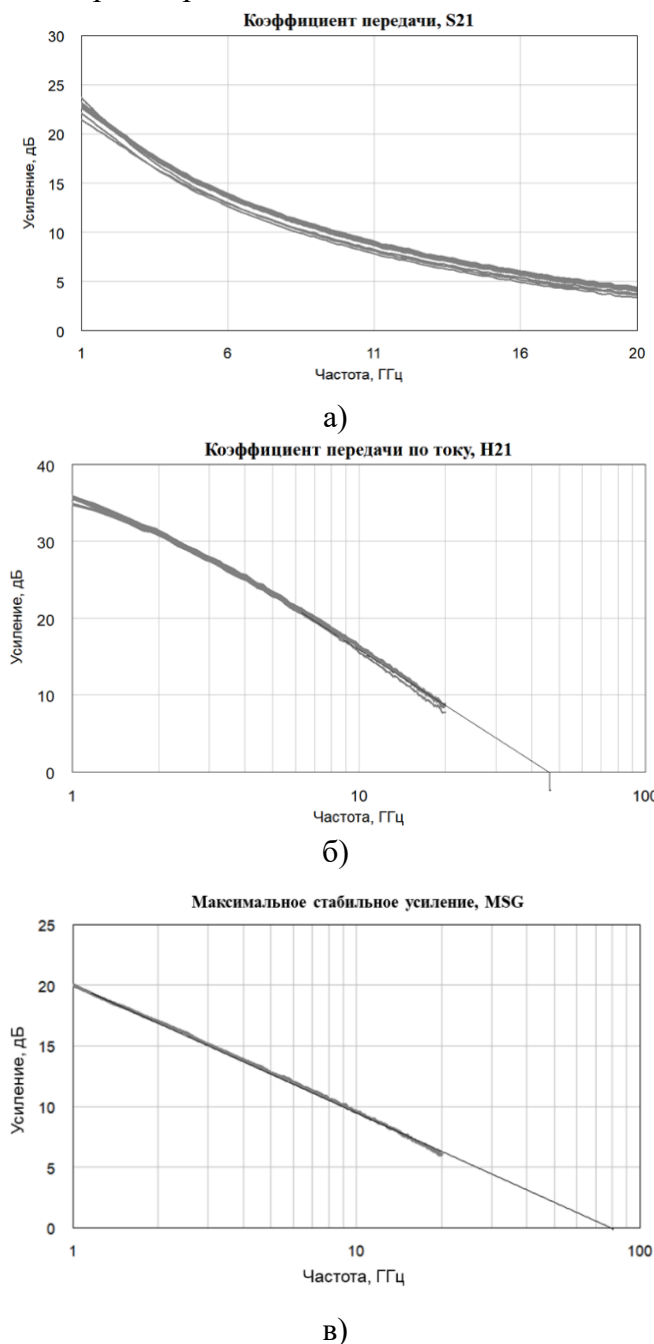
Промежуточные результаты выполнения групп технологических операций представлены на рисунке 2.



**Рис. 2.** Изображения топологии HBT транзисторов на разных этапах техпроцесса, полученные методом сканирующей электронной микроскопии: формирование омических контактов и травление мезы эмиттера, базы, коллектора (а), пассивация поверхности (б), формирование первого уровня металлизации (в), формирование второго уровня металлизации (г)

Для оценки высокочастотных характеристик InGaP/GaAs HBT транзисторов были проведены измерения S-параметров. Полученные данные использовались для определения коэффициента передачи по мощности  $S_{21}$ , коэффициента усиления по току  $H_{21}$ , а также максимального стабильного усиления MSG (рисунок 3). Близость характеристик, полученных для нескольких приборов по площади пластины, свидетельствует о хорошей воспроизводимости параметров.

Зависимость  $H_{21}$  от частоты позволила определить граничную частоту  $f_{гр}$  методом линейной экстраполяции до уровня 0 дБ. Полученное значение  $f_{гр}$  составило более 40 ГГц. Максимальная частота генерации  $f_{max}$  оценивалась на основе частотной зависимости максимального стабильного усиления и составила более 70 ГГц. Измерения проводились при напряжении  $U_{КЭ} = 3,6$  В и токе коллектора  $I_K = 20$  мА.



**Рис. 3.** Коэффициент передачи  $S_{21}$  (а), коэффициент передачи по току  $H_{21}$  (б) и максимальное стабильное усиление MSG (в) транзисторов, произведенных в рамках этой работы.

#### 4. Заключение

В работе подтверждена возможность создания в РФ нового базового техпроцесса на основе гетеробиполярных транзисторов (ГБТ). Измерения первых опытных образцов InGaP/GaAs HBT показали высокие частотные характеристики: граничная частота превысила 40 ГГц, а максимальная частота генерации составила более 70 ГГц. Успешная апробация технологии открывает путь к масштабированию платформы АО «Светлана-Рост», реализации полноценного СтП с PDK и проектированию отечественных монолитных интегральных схем (МИС) на основе ГБТ.

#### Список литературы

1. Филаретов А. Г., Чалый В. П. СВЧ фаундри с военной приемкой: от физико-топологического базиса к ТУ на библиотеку стандартных элементов //Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем. – 2020. – С. 232-235.
2. Красовицкий Д. М., Филаретов А. Г., Чалый В. П. Физико-технологические аспекты построения foundry производства СВЧ ЭКБ: опыт АО" Светлана-Рост" //Мокеровские чтения. – 2019. – С. 29-32.
3. Михайленко В. Е., Заболоцкий А. М. Обзор GaN-технологий при изготовлении монолитных интегральных схем СВЧ-диапазона //Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2024. – Т. 27. – №. 4. – С. 23-30.
4. Kuylenstierna D. et al. Design of low phase-noise oscillators and wideband VCOs in InGaP HBT technology //IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2012. – Т. 60. – №. 11. – С. 3420-3430.
5. Myoung S. S., Yook J. G. Low-noise and high-linearity LNA based on InGaP/GaAs HBT for 5.3-GHz WLAN //Microwave and Optical Technology Letters. – 2005. – Т. 46. – №. 6. – С. 550-553.
6. Wu Y. et al. Design of a 4–12GHz frequency doubler MMIC based on InGaP/GaAs HBT process //2010 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. – IEEE, 2010. – С. 1045-1048.
7. Zhang J. et al. A broadband regenerative frequency divider in InGaP/GaAs HBT technology //Journal of Semiconductors. – 2014. – Т. 35. – №. 7. – С. 075004.
8. Suzuki H. et al. Very-high-speed InP/InGaAs HBT ICs for optical transmission systems //IEEE Journal of solid-state circuits. – 1998. – Т. 33. – №. 9. – С. 1313-1320.