

**МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РНЕМТ
НАНОГЕТЕРОСТРУКТУР AlGaAs/InGaAs/GaAs**

***И.С. Васильевский¹, А.Н. Виниченко¹, Г.Б. Галиев², М.М. Грехов¹, К.Д. Щербачев³,
В.В. Сарайкин^{4,2}, Д.В. Лаврухин², Н.И. Каргин¹, М.Н. Стриханов¹***

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

115409, г. Москва, Каширское шоссе, дом 31, e-mail: ivasiljevskii@mail.ru

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук

117105, г. Москва, Нагорный проезд, дом 7, стр. 5, e-mail: galiyev_galib@mail.ru

³НИТУ МИСИС, ЦКП «Материаловедение и металлургия»,

119049, Москва, Ленинский пр., д.4, e-mail: kirill.shcherbachev@misis.ru

⁴ФГУП «Научно-исследовательский институт Физических Проблем им. Ф.В. Лукина»

124460, Москва, г. Зеленоград, проезд 4806, дом 6, e-mail: [vvsaraykin@yandex.ru](mailto:vvсарайкин@yandex.ru)

РНЕМТ $Al_xGa_{1-x}As/In_yGa_{1-y}As$ гетероструктуры являются одним из самых широко используемых базовых материалов в СВЧ электронике для создания транзисторов и монолитных интегральных схем (МИС). Данные структуры содержат большое число слоев, как основных, так и вспомогательных, из твердых растворов $Al_xGa_{1-x}As$ и $In_yGa_{1-y}As$. Для получения требуемой зонной структуры и характеристик образцов необходимо жестко контролировать состав и толщину данных слоев. Цель работы состояла в реализации технологии РНЕМТ гетероструктур с использованием методов нанометрологии, обеспечивающими точность и воспроизводимость технологических параметров не хуже 95%.

Для роста на установке МЛЭ Riber Compact 21Т использовались импортные ОСЧ металлы производства Azelis Electronics. Предельный вакуум в камере роста при замороженных криопанелях и с перекрытым потоком As_4 составлял до $1-2 \times 10^{-11}$ Торр. Одним из важных факторов получения стабильной и воспроизводимой скорости роста, состава и толщины слоев РНЕМТ гетероструктур являлось получение долговременной стабильности потоков и учет быстрых переходных процессов при открытии заслонок.

Обнаружено, что режим стабилизации потоков устанавливается спустя ~2 часа после прогрева источников до заданной температуры, что может быть связано с некоторым перераспределением испаряемого материала. Для установки Riber Compact 21 также важным условием стабильности потоков является поддержание температуры окружающей среды в лаборатории. Для метрологического сопровождения технологии РНЕМТ гетероструктур методом МЛЭ в НОЦ "Нанотехнологии" НИЯУ МИФИ выращивались калибровочные образцы, состоящие из толстых слоев $Al_xGa_{1-x}As$ (калибровка Al, Ga) и тонких двухъямных структур

GaAs/In_yGa_{1-y}As. Методами калибровки являлись - высокоразрешающая двух- и трехкристалльная рентгеновская дифрактометрия (РД) вблизи отражения (004), профилирование состава при помощи вторично-ионной спектроскопии масс (ВИМС) с устранением матричного эффекта, спектроскопия фотолюминесценции (ФЛ). В качестве опорной калибровки использовались измерения эквивалентных давлений потоков источников P_i(T_i), i= Ga, Al, In. В изготовленных в режиме стабилизации источников калибровочных образцах Al_xGa_{1-x}As толщиной 1,8-2,0 мкм толщинные колебания состава аппроксимируются линейной функцией и не превышают 0,9%. Переходные процессы для всех источников имели временной масштаб около 25-35 с, и амплитуду от 2% до 6%(Al).

После калибровок выращивались холловские РНЕМТ гетероструктуры с одно- или двусторонним дельта-легированием кремнием, с толщиной барьерного слоя Al_{0,23}Ga_{0,77}As 18 и 27 нм. Результаты измерений подвижности и концентрации электронов приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Электрофизические параметры образцов.

тип	d _{bar} (нм)	μ _e , см ² ·(В·с) ⁻¹		n _s , 10 ¹² см ⁻²
		300 К	77 К	300 К
1δ РНЕМТ	27	6200	21500	1.6
1δ РНЕМТ	18	6740	24900	1.5
2δ РНЕМТ	27	5830	16900	2.1

Неоднородность состава In_yGa_{1-y}As по пластине оценивалась по сдвигу пика основного перехода на спектре фотолюминесценции, измеренном при температурах 77 К и 300 К. На пластине диаметром 2 дюйма неоднородность составляет не более Δλ_{max}<1,9 нм. Неоднородность по составу и толщине КЯ составляет не более 2%. Однородность электрофизических параметров приборных структур контролировалась по измерению удельного сопротивления ρ, концентрации и подвижности электронов, и составила Δρ/ρ<1.5%.

Плотность овальных дефектов составила 80-130 см⁻² для выращенных РНЕМТ гетероструктур на подложках 2 дюйма Wafer Technology.

Результаты освоения РНЕМТ технологии в НИЯУ МИФИ находятся в целом на мировом уровне и позволяют вести разработки современных гетероструктурных СВЧ транзисторов и МИС.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП НИЯУ МИФИ, ЦКП «Материаловедение и металлургия» НИТУ МИСИС.