

**Соглашение о субсидии № 14.607.21.0071 от 20 октября 2014 г.
тема «Разработка технологии получения эпитаксиальных
гетероструктур арсенидов галлия и алюминия для нового поколения
силовых приборов»**

в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по
приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса
России на 2014 - 2020 годы»,

лот «Разработка технологий получения эпитаксиальных широкозонных
гетероструктур для нового поколения СВЧ- и/или силовых приборов»

шифр лота 2014-14-579-0096

(шифр заявки «2014-14-579-0096-001»)

Уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта)
RFMEFI60714X0071.

Этап 4 «Анализ полученных результатов и корректировка технологических режимов, разработка технологии»

В ходе выполнения проекта на этапе № 4 в период с 01.01.2016 по 30.06.2016 выполнены следующие работы:

1 Работы, выполненные за счет средств субсидии

- ✓ разработка программы и методик исследований макетов силовых р-і-п диодов на основе гетероэпитаксиальных структур арсенидов галлия и алюминия;
- ✓ разработка на основе проведенных исследований и расчетов лабораторного регламента получения макетов силовых р-і-п диодов на основе гетероэпитаксиальных структур арсенидов галлия и алюминия;
- ✓ проведение экспериментальных исследований влияния технологических режимов формирования на структурные, морфологические и электрофизические свойства гетероэпитаксиальных структур арсенидов галлия и алюминия;
- ✓ исследование влияния механической обработки анодной стороны гетероэпитаксиальных структур на основе арсенидов галлия и алюминия на качество омических контактов;
- ✓ разработка лабораторного регламента получения термоэлектрических модулей и термоэлектрических узлов;
- ✓ изготовление экспериментальных образцов термоэлектрических модулей;
- ✓ проведение испытаний экспериментальных образцов термоэлектрических модулей;
- ✓ проведение анализа и сопоставления экспериментальных результатов с результатами исследования теоретических моделей.

2 Работы, выполненные за счет внебюджетных средств

- ✓ проведение экспериментальных исследований концентрации легирующей и фоновой примеси, а также свободных носителей тока в слоях AlGaAs методом ВИМС и электрофизическими методами - Холла и DLTS;
- ✓ изготовление модернизированной графитовой оснастки для оборудования жидкофазной эпитаксии;
- ✓ исследования технологических режимов механической обработки анодной стороны гетероэпитаксиальных структур на основе арсенидов галлия и алюминия;
- ✓ разработка оснастки и приспособлений для сборки термоэлектрических узлов охлаждения;
- ✓ проведение испытаний силовых р-і-п диодов в различных режимах эксплуатации.

3 Основные результаты, полученные в отчётный период

На этапе 4 были получены следующие основные результаты:

1. Разработана «Программа и методики исследований макетов силовых р-і-п диодов на основе гетероэпитаксиальных структур арсенидов галлия и алюминия».
2. Разработан «Лабораторный регламент получения макетов силовых р-і-п диодов на основе гетероэпитаксиальных структур арсенидов галлия и алюминия».
3. Проведенные исследования позволили определить основные параметры температурно-временного режима выращивания р-і-п гетероструктуры методом жидкофазной эпитаксии: длительность изотермической выдержки от 60 до 70 минут; превышение температуры изотермической выдержки над температурой начала эпитаксиального роста от 20 до 30°C; формирование высокоомной і-области в интервале температур от 870 до 900°C. Определен оптимальный средний ростовой зазор между подложками: 2,5 мм. Определена оптимальная скорость охлаждения - 0,25°C/мин, обеспечивающая, с одной стороны, допустимую неоднородность толщины слоев по площади структуры, а с другой - требуемый профиль распределения донорной примеси в п-области. Определена оптимальная скорость сдвижки (скорость перемещения поршневой рамы) - не более 5 мм/с, обеспечивающая высокое качество морфологии поверхности гетероструктур.
4. По результатам исследований определен оптимальный способ механической обработки анодной стороны гетероструктур GaAs-AlGaAs, состоящий из последовательных операций шлифования, травления и полировки. Данный способ обеспечивает высокое качество омического контакта с низким контактным сопротивлением $\rho_k \leq 4 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ и высокой механической прочностью.

5. Разработан «Лабораторный регламент получения термоэлектрических модулей и термоэлектрических узлов».
6. Были изготовлены экспериментальные образцы термоэлектрических модулей для систем с естественной (МТЕ) и принудительной конвекцией (МТП) в количестве по 5 шт. каждого типа. Все образцы были испытаны согласно программе и методикам испытаний, разработанной в ходе третьего этапа, и успешно прошли проверку на соответствие требованиям Технического задания. Значения отводимой тепловой мощности при напряжении питания модуля 12 В составили 21,0 Вт для МТЕ и 90,8 Вт для МТП, соответственно.
7. Несколькими методами проведено исследование примесного состава и электрофизических свойств тестовых образцов с глубокими уровнями. Методом ВИМС не удалось обнаружить атомов примеси, специфических для создания глубоких уровней в GaAs, таких как Fe или Cu. Исследование образцов методом фотолюминесценции показало, что введение центров с глубокими уровнями не уменьшает вероятность межзонной и экситонной излучательной рекомбинации. Вместе с тем, скорость затухания ФЛ уменьшается для образцов с ГУ, что может быть связано с эффектом «прилипания» носителей на глубоких уровнях. Методом DLTS в тестовых структурах дырочного типа проводимости были обнаружены три глубоких акцепторных уровня с энергией активации $\sim 0,7$ эВ, $\sim 0,42$ эВ и $\sim 0,16$ эВ. Концентрация ГУ оказалась ниже 10^{14} см⁻³, что объясняет затруднения ВИМС при их анализе.
8. Изготовлена модернизированная графитовая оснастка для оборудования жидкофазной эпитаксии, которая позволила снизить разброс рабочих параметров p-i-n диодов, формируемых на пластине.
9. Исследование технологических режимов механической обработки анодной стороны гетероэпитаксиальных структур на основе арсенидов галлия и алюминия на этапе утонения пластины позволило установить, что оптимальным режимом шлифования обратной стороны гетероструктуры является использование шлифовального порошка марки F500, удельного давления 0,03 кг/см² и скорости подачи суспензии не более 150 мл/мин.
10. Разработаны оснастка и приспособления для сборки термоэлектрических узлов охлаждения.
11. Испытания экспериментальных образцов p-i-n диодов на основе эпитаксиальных гетероструктур AlGaAs в различных режимах эксплуатации показали, что диоды имеют высокую энергостойкость. Они выдержали значения энергии лавинного пробоя до $E=200$ мДж, что много больше значений, нормируемых для кремниевых диодов $E = 12,5$ мДж. Диоды успешно выдержали испытания на безотказность (500 часов) и долговечность (1000 часов) при температуре окружающей среды 250°C и прямом токе 3 А.

Работы, запланированные на этап 4, выполнены. Полученные результаты соответствуют техническим требованиям к выполняемому проекту. Работы будут

продолжены на заключительном этапе проекта.

Комиссия Минобрнауки России признала обязательства по Соглашению на отчетном этапе исполненными надлежащим образом.