

**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 3 «Экспериментальные исследования и разработка технологии»

В ходе выполнения проекта на этапе № 3 в период с 01.07.2015 по 31.12.2015
выполнены следующие работы:

1 Работы, выполненные за счет средств субсидии

- Проведены экспериментальные исследования закономерностей образования глубоких центров в эпитаксиальных слоях, связанных с легирующими примесями и собственными структурными дефектами.
- Разработана эскизная конструкторская документация гетероэпитаксиальных структур на основе арсенидов галлия и алюминия для силовых р-і-п диодов.
- Разработана эскизная конструкторская документация на макеты силовых р-і-п диодов на основе гетероэпитаксиальных структур арсенидов галлия и алюминия.
- Проведены экспериментальные исследования влияния топологических особенностей на свойства и характеристики силовых р-і-п диодов на основе гетероэпитаксиальных структур арсенидов галлия и алюминия.
- Проведены экспериментальные исследования влияния конструктивных особенностей гетероэпитаксиальных структур на основе арсенидов галлия и алюминия на электрофизические характеристики силовых р-і-п диодов на их основе.
- Исследовано влияние геометрии и способа обработки краевого профиля на качество поверхности подложек арсенида галлия.
- Проведены экспериментальные исследования влияния конструктивных особенностей термоэлектрических модулей на их характеристики.
- Разработана эскизная конструкторская документация на термоэлектрические модули.
- Разработана программа и методика испытаний термоэлектрических модулей.

2 Работы, выполненные за счет внебюджетных средств

- Проведены экспериментальные исследования особенностей формирования каналов токов утечки на боковой поверхности гетероэпитаксиальных структур на основе арсенидов галлия и алюминия.
- Проведены экспериментальные исследования влияния различных вариантов конструкции гетероэпитаксиальных структур на основе арсенидов галлия и алюминия на конечные параметры приборов.
- Исследованы режимы формирования краевого профиля (фаски) подложек арсенида галлия.
- Изготовлены оснастка и приспособления для сборки термоэлектрических модулей.
- Проведены исследования влияния температуры на вольтамперные характеристики и быстродействие силовых р-і-п диодов.
- Изготовлены оснастка и приспособления для проведения испытаний силовых р-і-п диодов.

2 Основные результаты, полученные в отчётный период

На этапе 3 были получены следующие основные результаты:

1. Методом нестационарной спектроскопии глубоких уровней и по данным анализа температурных зависимостей вольтамперных характеристик в р-і-п диодах и тестовых структурах дырочного типа проводимости с компенсацией были обнаружены три глубоких акцепторных уровня с энергией активации около 0,71 эВ, 0,42 эВ и 0,15 эВ. Первые два уровня связываются с особенностями процессов жидкофазной эпитаксии, а последний является акцепторным уровнем примеси, предположительно, меди. Электронных глубоких центров в изученных структурах не обнаружено. На основании полученных данных можно сделать утверждение, что обратные токи определяются соотношением концентраций этих центров.
2. Проведенные исследования показали, что на этапе формирования фаски пластины подложки арсенида галлия использование дисков с полукруглой внутренней алмазной рабочей поверхностью позволяет достичь лучшего качества краевого профиля, чем с трапецевидной, уменьшает повреждения рабочей поверхности подложек и потому является предпочтительным.
3. Экспериментально показано, что для получения обратного напряжения в диапазоне 700-750 В толщина і-слоя должна находиться в пределах 27-30 мкм. Дальнейшее увеличение толщины і-области нежелательно, поскольку приводит к росту прямого напряжения. Для достижения значений времени обратного восстановления менее 20 нс толщина р-области не должна превышать 15 мкм. В тоже время она должна быть не менее 5 мкм, чтобы обеспечить получение обратного пробивного напряжения в заданном диапазоне. Для получения значений прямого падения напряжения в диапазоне 1,4 – 1,6 В при плотности тока 150

- A/cm^2 требуется толщина n-области менее 30 мкм. В тоже время она должна быть не менее 20 мкм, из-за снижения обратного пробивного напряжения при меньших значениях.
4. По результатам исследований установлено, что высота термоэлемента, используемого для охлаждения р-і-п диода, оказывает существенное влияние на характеристики термоэлектрических модулей. При уменьшении высоты термоэлементов с 2,5 мм до 1,6 отводимая тепловая мощность практически не изменяется, однако при уменьшении с 1,6 мм до 1 - 1,2 мм отводимая тепловая мощность падает на 10 - 14 % относительно расчетной. Подобный эффект уменьшения отводимой тепловой мощности связывается с возрастающим влиянием нагрева контактных сопротивлений. Для термоэлементов с низкой высотой ~0,5 мм и форм-фактором $SF = 0,5 \text{ мм}^{-1}$ потери могут достигать 23%. По экспериментальным исследованиям определены оптимальные конструкции термоэлектрических модулей, используемых для охлаждения р-і-п диода. Для применения в узлах охлаждения с естественной конвекцией - форм-фактор 2,5 мм⁻¹; высота термоэлементов 1,6 мм. В узлах охлаждения с принудительной конвекцией - форм-фактор 0,5 мм⁻¹ и высота термоэлементов 0,6 мм.
 5. Разработана эскизная конструкторская документация гетероэпитаксиальных структур на основе арсенидов галлия и алюминия для силовых р-і-п диодов.
 6. Разработана эскизная конструкторская документация на макеты силовых р-і-п диодов на основе гетероэпитаксиальных структур арсенидов галлия и алюминия.
 7. Разработана эскизная конструкторская документация на термоэлектрические модули.
 8. Разработана Программа и методики испытаний термоэлектрических модулей.
 9. Экспериментально показано, что одновременное использование широкозонного буферного слоя AlGaAs и варизонной структуры в составе основного р--і-п- слоя в конструкции гетероструктуры позволяет уменьшить время обратного восстановления на 35%.
 10. На основании проведенных исследований выбран оптимальный сценарий обработки краевой зоны пластин арсенида галлия толщиной около 600 мкм. В зависимости от разницы начального и конечного диаметров пластины шаг подачи инструмента за один оборот стола составляет: на этапе формирования окружности – 0,25-0,30 мкм; на предпоследнем обороте – 0,10 – 0,12 мкм; на последнем обороте – 0,05 мкм.
 11. Изготовлены оснастка и приспособления для сборки термоэлектрических модулей.
 12. Изготовлены оснастка и приспособления для проведения температурных испытаний силовых р-і-п диодов
 13. Исследования влияния температуры на вольтамперные характеристики и

быстродействие экспериментальных образцов силовых р-і-n диодов показали, что быстродействие GaAs-p-i-n диодов при токах 1 А лучше чем у кремниевых приборов (2Д663А95) в 1,5÷2 раза – 16-28 нс против 40 нс; быстродействие кристаллов из партий №561-2(2), 558-2 при токах 15 А лучше в 1,4 раза (35нс – 40 нс) по сравнению с кремниевыми аналогами (2Д641ВС – 50 нс). Время обратного восстановления GaAs-p-i-n диодов практически не изменяется с ростом температуры перехода в отличие от кремниевых диодов, быстродействие которых при повышении температуры до 125°С ухудшается в 1,5 раза. Обратные токи на GaAs-p-i-n диодах значительно меньше растут (10 мкА – 65 мкА при $T_k = 150^\circ\text{C}$) с повышением температуры кристалла, чем на кремниевых диодах (220 мкА при $T_k = 150^\circ\text{C}$). При температуре 250 °С обратные токи GaAs-p-i-n диодов остаются на приемлемом уровне (400 мкА – 800 мкА), в то время как кремниевые диоды при температуре выше 175°С становятся неработоспособными. К положительным характеристикам GaAs-p-i-n диодов следует отнести высокую термополевою стабильность при температурах до 250°С включительно.

Работы, запланированные на этап 3, выполнены. Полученные результаты соответствуют техническим требованиям к выполняемому проекту. Работы будут продолжены на последующих этапах проекта.

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