

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Субботина Евгения Юрьевича на тему «Формирование и термоэлектрические свойства кремниевых гетероструктур со встроенными нанокристаллами антимонида галлия», представленной к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по научной специальности: 1.3.11. – «Физика полупроводников»

Достижения в области миниатюризации электронных устройств последнего десятилетия привели к тому, что требования к необходимой мощности источников питания для различных портативных устройств снизились от мили до микро и нано Ватт. Повсеместное распространение беспроводных технологий приводит к острой необходимости разработки миниатюрных источников энергии, способных длительное время обеспечивать электроэнергией электронные устройства. В связи с этим, в последнее время активно разрабатывается новый тип источника питания – миниатюрные термоэлектрические генераторы (ТЭГ), предназначенные для преобразования в электричество тепловых потоков низкой интенсивности. Основной проблемой широкого применения термоэлектрических структур является их низкая эффективность, определяемая термоэлектрической добротностью применяемых полупроводниковых материалов.

Твердые растворы на основе кремния используются в качестве термоэлектрических материалов (ТЭМ). Однако, применение кремния для изготовления термоэлектрических структур сдерживается его высокой теплопроводностью и, как следствие, низкой термоэлектрической добротностью ТЭМ на его основе.

Диссертационная работа посвящена структурированию матрицы кремния нанокристаллами антимонида галлия, что позволило существенно снизить теплопроводность кремниевых гетероструктур в области температур (300-580К) и тем самым увеличить их термоэлектрические параметры. Этот факт имеет принципиальное значение для создания маломощных преобразователей слабых тепловых потоков, которые могут применяться для питания активно разрабатываемых высокотехнологичных интеллектуальных беспроводных систем и датчиков, устройств аэрокосмической, военной, вычислительной и СВЧ техники. В этом заключается актуальность диссертационной работы и определяет, в основном, ее научную и практическую значимость.

Для структурирования кремния нанокристаллами GaSb требовалось решить ряд задач. В литературе накоплен определённый опыт по синтезу нанокристаллов антимонида галлия, однако предложенные способы роста не подходят для формирования кремниевых структур. В диссертационной работе предложен способ формирования массива нанокристаллов из тонкого покрытия стехиометрической смеси галлия и сурьмы и повышения их термической стабильности. Для встраивания нанокристаллов в матрицу кремния был использован метод молекулярно-лучевой эпитаксии. Результаты, полученные в процессе синтеза таких композитов имеют высокую научную значимость. Монолитная интеграция кремния и элементов группы III-V давно является объектом активных исследований большого количества исследовательских групп. Однако, работы по

формированию композитов Si:GaSb не были представлены и это подчеркивает научную новизну работы.

В процессе исследований были определены термоэлектрические свойства полученных гетероструктур в широком температурном диапазоне. Установлено, что инжекция электронов из нанокристаллов в матрицу кремния смещает температуру инверсии основных носителей заряда в область низких температур (с 500 до 282 К). Также встраивание нанокристаллов оптимизирует термоэлектрические свойства кремния в области низких температур. Структуры на основе легированного кремния демонстрируют высокое значение фактора мощности, сопоставимое с основными низкотемпературными ТЭМ на основе теллуридов висмута. Это важно для создания миниатюрных источников энергии для электронных устройств и определяет практическое значение диссертационной работы.

В качестве замечаний к автореферату можно выделить следующее:

- отсутствует пункт "Основные результаты и выводы";
- не приведены расчеты термоэлектрической добротности.

Однако представленные замечания не снижают общей положительной оценки работы. Текст автореферата передаёт содержание диссертационной работы. Автореферат позволяет заключить, что работа, сделанная автором, имеет научный и практический интерес, а её содержание отвечает требованиям ВАК РФ, которые предъявляются к кандидатским диссертациям.

Считаю, что диссертант заслуживает присуждения искомой учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. – «Физика полупроводников».

Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники"

Доктор технических наук, профессор

  
Штерн Ю.И.

Подпись д.т.н., проф. Штерна Юрия Исааковича удостоверяю, Ученый секретарь Ученого совета НИУ МИЭТ, к.т.н., доцент

  
Козлов А.В.

29 декабря 2021 г.

**Почтовый адрес:** 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1.  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники"

Телефон: 8-916-147-16-32

Эл. почта: hptt@miee.ru