

На правах рукописи



Субботин Евгений Юрьевич

ФОРМИРОВАНИЕ И ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
КРЕМНИЕВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР СО ВСТРОЕННЫМИ
НАНОКРИСТАЛЛАМИ АНТИМОНИДА ГАЛЛИЯ

Специальность 1.3.11
Физика полупроводников

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Владивосток
2021

Работа выполнена в ФГБУН Институт автоматике и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, г. Владивосток.

Научный руководитель: Горошко Дмитрий Львович, д.ф.-м.н., в.н.с. лаборатории «Оптики и электрофизики» ИАПУ ДВО РАН, г. Владивосток

Официальные оппоненты: Пустовалов Евгений Владиславович, д.ф.-м.н., доцент, директор Департамента информационных и компьютерных систем ИМиКТ ДВФУ, г. Владивосток

Шамирзаев Тимур Сезгирович, д.ф.-м.н., доцент, в.н.с. «Лаборатории физики и технологии гетероструктур» ФГБУН ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН,

Ведущая организация: ФГБУ ВОН «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН», г. Санкт-Петербург

Защита состоится « ___ » _____ 202__ г. в _____ часов на заседании диссертационного совета 24.1.027.02 при ИАПУ ДВО РАН по адресу:
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5, ИАПУ ДВО РАН, ауд. 510

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале ФГБУН ИАПУ ДВО РАН. Диссертация и автореферат размещены на сайте <https://www.iacp.dvo.ru/diss/dis4>

Автореферат разослан « ___ » _____ 202__ г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент _



Е.Л. Гамаюнов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы исследования

Современный уровень цифровизации повседневной жизни открывает широкие возможности для использования тонкоплёночных термоэлектрических преобразователей (ТЭП), работающих в низкотемпературном диапазоне (<500 К). Такие преобразователи могут использоваться в быту [1], медицине [2], микроэлектронике [3]. Термоэлектрические системы для данного диапазона широко представлены соединениями на основе висмута, сурьмы, селена и теллура (BST) [4,5]. Однако этот материал имеет высокую цену и содержит токсичные компоненты. Кремний лишён подобных недостатков и широко используется в электронике. Для оценки эффективности термоэлектрика используют термоэлектрическую добротность (ZT):

$$ZT = \frac{\sigma \cdot S^2}{k} \cdot T = \frac{PF}{k} \cdot T, \quad (1)$$

где σ – удельная проводимость, S – коэффициент термо-ЭДС, k – теплопроводность, $PF = \sigma \cdot S^2$ – фактор мощности, T – температура.

Кремний имеет высокий фактор мощности, однако его широкое применение в ТЭП сдерживается высокой теплопроводностью [6]. Одним из перспективных решений, позволяющих одновременно ограничить тепловой транспорт и сохранить исходный фактор мощности, является встраивание нанокристаллов (НК) в матрицу кремния, которые могут обладать пониженной теплопроводностью за счет размерного эффекта, а также обеспечивать рассеяние фононов на интерфейсе НК/матрица.

Одним из подходящих материалов для таких структур является антимонид галлия (GaSb). Данное соединение позволяет формировать массив НК с высокой концентрацией из небольшого количества материала (<1 нм) при низких температурах (<400 °С). Структуры GaSb/Si широко известны по

синтезу сверхрешёток [7] и незакрытого массива НК методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) [8], однако, монокристаллическая интеграция НК GaSb не освящена. Соединение имеет ряд особенностей, осложняющих синтез гетероструктур. При температурах, необходимых для гомоэпитаксии кремния, сурьма начинает активно десорбировать с поверхности кремния и GaSb. Для компенсации десорбции сурьмы осаждаемую смесь многократно пересыщают (типичные соотношения молекулярных потоков $V_{Sb}/V_{Ga} \approx 10$) [8]. Такой подход оправдан при синтезе незакрытых НК GaSb или сверхрешёток, но не подходит для роста кремниевых гетероструктур, которые требуют строгого контроля стехиометрии при монокристаллической интеграции с соединениями III-V. Высокие температуры, необходимые для роста монокристаллической матрицы кремния, критичны для стабильности соединения Ga-Sb, что ведёт к декомпозиции НК.

Таким образом, для успешного формирования кремниевых гетероструктур со встроенными НК GaSb необходимо синтезировать массив НК из стехиометрической смеси сурьмы и галлия, увеличить их термическую устойчивость и встроить их в кремний. Также будет установлено влияние структурирования кремния НК GaSb на термоэлектрические свойства таких композитов.

Обоснование выбора материалов

Широкая распространённость кремния в современной микроэлектронике, биологическая совместимость, развитая технология производства, возможность формирования обоих плеч ТЭГ и высокий фактор мощности делают материал привлекательным для низкотемпературных термоэлектрических преобразователей. Различие параметров кристаллических решёток антимонида галлия и кремния позволяет формировать массив нанокристаллов с регулируемыми параметрами (размер, концентрация, площадь покрытия) при температурах, совместимых с кремниевой планарной технологией.

Цель диссертационной работы – формирование кремниевых гетероструктур со встроенными нанокристаллами антимонида галлия и исследование их термоэлектрических свойств.

Основные задачи диссертационной работы:

1. Методом твердофазной эпитаксии сформировать на кремнии массив нанокристаллов GaSb с высокой концентрацией из стехиометрической смеси галлия и сурьмы с суммарным покрытием 1.5 и 2.6 монослоя.
2. Исследовать термическую стабильность нанокристаллов GaSb.
3. Методом молекулярно-лучевой эпитаксии сформировать многослойную кремниевую гетероструктуру со встроенными нанокристаллами GaSb.
4. Установить эпитаксиальные соотношения между кремниевой матрицей и нанокристаллами GaSb, а также особенности интерфейса Si/нанокристалл GaSb.
5. Исследовать термоэлектрические свойства сформированных гетероструктур: удельную проводимость, коэффициент Зеебека, теплопроводность.

Научная новизна работы

1. Изучено влияние модификации поверхности кремния на размер и концентрацию нанокристаллов GaSb. Установлено, что предварительное формирование поверхностных реконструкций сурьмы 2×1 -Sb и $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -R30°-Sb на Si(111)-7×7 предотвращает декомпозицию нанокристаллов при температурах до 450 °С.
2. Показаны особенности монокристаллической интеграции нанокристаллов GaSb и кремния. Нанокристаллы GaSb, встроенные в матрицу кремния, имеют эпитаксиальное соотношение GaSb(111)||Si(111) с азимутальным сопряжением GaSb $[1\bar{1}0]$ ||Si $[1\bar{1}0]$. Деформация кристаллической решётки таких нанокристаллов лежит в диапазоне от -0.46% до -3.84% вдоль направления GaSb $[\bar{1}10]$.

3. Зарегистрирована инжекция электронов из нанокристаллов GaSb в матрицу кремния. В результате такого перехода носителей смена знака термо-ЭДС гетероструктуры на основе нелегированного кремния происходит при 282 К; у исходного кремния инверсия наблюдается при 400 К. В результате инжекции такая структура демонстрирует коэффициент Зеебека $-520 \text{ мкВ} \cdot \text{К}^{-1}$ при 420 К.

4. Установлено, что легирование матрицы кремния смещает максимальную величину термо-ЭДС в высокотемпературную область и увеличивает её значения до $-670 \text{ мкВ} \cdot \text{К}^{-1}$ в интервале 510 – 580 К и до $740 \text{ мкВ} \cdot \text{К}^{-1}$ при 480 К в гетероструктурах на основе n- и p-кремния, соответственно.

5. Показано, что структурирование кремния нанокристаллами GaSb позволило снизить теплопроводность до $7.8 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, в то время как теплопроводность контрольного образца без нанокристаллов составляет $37 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$.

Практическая ценность работы:

1. Методом твердофазной эпитаксии на Si(111) в условиях сверхвысокого вакуума сформирован массив нанокристаллов GaSb с концентрацией $2.2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ из стехиометрической смеси галлия и сурьмы с суммарным покрытием 1.5 монослоя.

2. Комбинацией методов твердофазной и молекулярно-лучевой эпитаксий созданы кремниевые гетероструктуры со встроенными нанокристаллами GaSb.

3. Формирование монокристаллической матрицы со встроенными нанокристаллами GaSb позволило улучшить термоэлектрические свойства кремниевых гетероструктур в области низких температур (300 – 450 К). В измеренном температурном диапазоне образцы сохранили удельную проводимость легированного кремния. Коэффициент Зеебека n-гетероструктуры $-670 \text{ мкВ} \cdot \text{К}^{-1}$ в интервале 510 – 580 К, p-гетероструктуры $740 \text{ мкВ} \cdot \text{К}^{-1}$ при 480 К. Фактор мощности n- и p-образцов составляет $16 \text{ мВт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-2}$ и $3 \text{ мВт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-2}$

при 400 К. Поперечная теплопроводность многослойного образца при комнатной температуре $7.8 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$. Достигнутые параметры делают подобный материал перспективным с точки зрения использования в низкотемпературных термоэлектрических преобразователях.

Защищаемые положения:

1. Методом твердофазной эпитаксии сформирован массив нанокристаллов антимонида галлия из стехиометрической смеси галлия и сурьмы с суммарным покрытием 1.5 и 2.6 монослоя на поверхности Si(111). Поверхностная концентрация, средние латеральный размер и высота нанокристаллов составляют $2.2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, 10 нм, 1.8 нм, соответственно.
2. Предварительное формирование поверхностных реконструкций $2 \times 1\text{-Sb}$ и $\sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-R}30^\circ\text{-Sb}$ на Si(111)- 7×7 повышает термическую стабильность нанокристаллов GaSb с 380 °С до 450 °С.
3. Методом молекулярно-лучевой эпитаксии были выращены многослойные гетероструктуры на основе матрицы кремния со встроенными нанокристаллами GaSb. Эпитаксиальное соотношение между нанокристаллами и матрицей имеет вид: GaSb(111)||Si(111) с азимутальным сопряжением GaSb[$1\bar{1}0$]|Si[$1\bar{1}0$].
4. Использование легированной матрицы позволяет увеличить фактор мощности гетероструктур, который при 400 К составляет $3 \text{ мВт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-2}$ и $16 \text{ мВт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-2}$ для гетероструктуры на основе p- и n-Si соответственно.

Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечивается корректным проведением экспериментов на современном высокотехнологичном оборудовании и повторяемостью результатов, а также комплексным применением взаимодополняющих методов элементного, структурного анализа и электрофизических измерений транспортных свойств. Представленные результаты

согласуются с имеющимися в литературе данными экспериментов других исследовательских групп.

Апробация результатов работы

Результаты диссертационной работы были представлены в качестве устных и стендовых докладов на 6 международных конференциях, проводимых в период с 2017 по 2021 год:

1. «Международная молодёжная научная школа - конференция», Россия, Москва, 2017.
2. «International conference METANANO – 2017», Россия, Владивосток, 2017.
3. «ASCO - NANOMAT – 2018», Россия, Владивосток, 2018.
4. «APAC – Silicide», Япония, Миядзаки, 2019.
5. «ASCO - NANOMAT – 2020», Россия, Владивосток, 2020.
6. «57 - я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР», Беларусь, Минск, 2021.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 5 работ в изданиях, входящих в список ВАК и международную базу Scopus, в том числе 4 работы в изданиях, входящих в международную базу Web of Science [A1-A5].

Личный вклад автора состоит в проведении экспериментов по формированию образцов в сверхвысоковакуумной камере и их *in situ* диагностике. Автор принимал участие в подготовке образцов и выполнении транспортных измерений, анализе полученных результатов, планировании экспериментов и написании статей и тезисов докладов на конференциях.

Структура и объём диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объём диссертации составляет 134 страницы, включая 59

рисунков, 4 таблицы и 167 наименований цитируемой литературы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дана общая характеристика диссертации, актуальность работы, сформулирована цель и основные задачи, необходимые для её достижения, показаны научная новизна работы и её практическая ценность. Указаны защищаемые положения, отображена апробация результатов работы на международных конференциях и публикациях, отражён личный вклад автора, обоснованность и достоверность полученных результатов, приведены сведения о структуре и объёме диссертации.

В **первой главе** представлен литературный обзор, состоящий из четырёх разделов. В первом разделе описана суть термоэлектрических явлений, отражены параметры перспективных термоэлектрических систем. Перечислены основные факторы, влияющие на термоэлектрическую добротность и способы управления этими параметрами. Представлены наиболее развитые технологии создания перспективных термоэлектрических систем. Во втором разделе приводится обзор тонкоплёночных ТЭП. Рассмотрены область и условия их применения, популярные термоэлектрические системы, используемые в таких преобразователях. В третьем разделе рассмотрены преобразователи на основе кремния. Представлены методы управления термоэлектрическими характеристиками кремниевых ТЭП: увеличения фактора мощности, снижения теплопроводности, способы структурирования материала. В четвёртом разделе описаны свойства антимонида галлия, рассмотрены перспективы соединения в области термоэлектричества, интеграции с кремнием для создания тонкоплёночных ТЭП. Представлен обзор по формированию антимонида галлия на кремнии и особенностям их интеграции.

Из анализа литературы можно сделать следующее заключение. Оптимальным дизайном для разработки ТЭП на основе кремния является монокристаллическая матрица со встроенными НК. Такая структура позволит сохранить высокий фактор мощности кремния, снизив теплопроводность за счёт фононного рассеяния на границе раздела НК/матрица. Синтез подобных структур осложнён формированием массива нанокристаллов с высокой поверхностной концентрацией. Использование антимионида галлия (GaSb) позволит решить эту проблему. Системы GaSb/Si в основном представлены многослойными сверхрешётками или массивом нанокристаллов на поверхности кремния. Комплексных исследований посвящённых монокристаллической интеграции НК GaSb с кремнием не проводилось.

Во **второй главе** в первом разделе рассмотрены методы исследования гетероструктур. Параметры НК и шероховатость плёнок определялись методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). Поведение элементов на каждом этапе формирования образцов анализировалось силами электронной Ожэ-спектроскопии (ЭОС) и спектроскопии характеристических потерь энергии электронами (СХПЭЭ). Изучение состояния поверхности и условий формирования поверхностных реконструкций проводили с помощью дифракции медленных электронов (ДМЭ). Спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС) позволила установить наличие соединения GaSb. С помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) были определены параметры НК после встраивания в матрицу, кристаллическое качество НК, их деформация и эпитаксиальное соотношение с кремниевой матрицей. Теплопроводность образцов установили 2ω -методом. Удельную проводимость и коэффициент Зеебека измеряли дифференциальным методом. Концентрацию носителей измеряли с помощью регистрации эффекта Холла в режиме ван дер Пау. В краткой форме приведены методы расчётов термоэлектрических параметров

образцов, учёт плёночного вклада в коэффициент термо-ЭДС и электропроводность, построения зонных диаграмм гетеропереходов.

Во втором разделе дана информация по СВВ камере Omicron Compact, в которой осуществлялся рост образцов. Описана методика эксперимента: подготовка образцов перед загрузкой в камеру, калибровка источников, ростовые процедуры и подготовка образцов к термоэлектрическим измерениям.

Третья глава посвящена синтезу гетероструктур Si/НК GaSb/Si. Установлено, что методом ТФЭ удаётся получить массив НК с высокой концентрацией $(1.2 \text{ и } 1.6) \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ из тонкого слоя стехиометрической смеси Ga и Sb с суммарным покрытием 2.6 и 1.5 монослоя (МС) (рисунок 1а и 1б, соответственно). Уменьшение покрытия с 2.6 до 1.5 МС позволяет освободить дополнительную ориентирующую поверхность кремния, необходимую для гомоэпитаксии, сохранив при этом высокую концентрацию НК ($\sim 10^{11} \text{ см}^{-2}$). Температура, при которой синтезировались НК (380°C), недостаточна для роста кремния ($\geq 450^\circ\text{C}$). При проверке термической стабильности НК установлено, что НК, сформированные из 2.6 МС смеси, частично сохраняются при отжиге (рисунок 1г). НК, сформированные из меньшего количества материала, полностью распадаются (рисунок 1д). При анализе ДМЭ можно видеть, что в обоих образцах сурьма образовала на кремнии набор поверхностных реконструкций (ПР): $2 \times 1\text{-Sb} + \sqrt{3} \times \sqrt{3}\text{-R}30^\circ\text{-Sb}$ (вставки на рисунках 1г и 1д). Свободные атомы галлия коалесцируют в крупные капли. Остаточная концентрация НК в первом образце обусловлена большим количеством материала, которого оказалось достаточно для образования ПР и сохранения НК (рисунок 1г). В случае меньшего количества материала, сурьма полностью переходит из соединения Ga-Sb в соединение Sb-Si, что ведёт к декомпозиции НК (рисунок 1д).

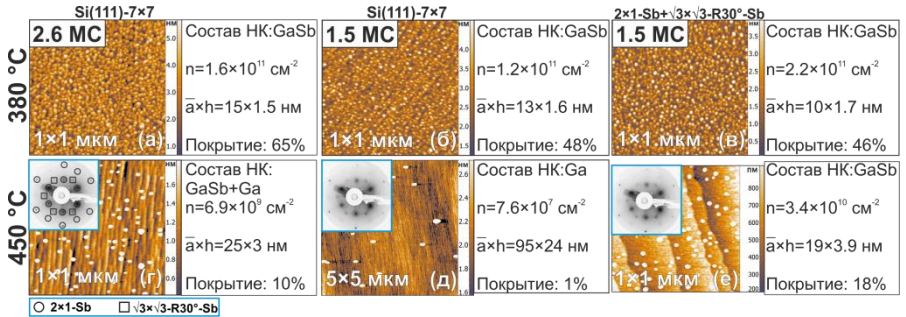


Рисунок 1 – Проверка термической стабильности НК GaSb (а-в), сформированных из 2.6 (а) и 1.5 МС (б,в) смеси Ga и Sb на Si(111)-7×7 (а,б) и ПР 2×1-Sb (обведены кружочками) и $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -R30°-Sb (обведены квадратиками) (в). На сканах АСМ (г-е) показан результат дополнительного отжига НК GaSb

Для предотвращения такого перехода было выполнено предварительное модифицирование поверхности кремния данным набором ПР. Установлено, что при равном количестве материала НК, сформированные на модифицированной поверхности, обладают вдвое большей концентрацией (рисунок 1в). При этом за счёт уменьшения латеральных размеров НК, сохраняется ориентирующая поверхность кремния. В результате проверки термической стабильности установлено, что НК демонстрируют высокую поверхностную концентрацию после отжига при повышенной температуре (рисунок 1е). При этом количество материала перед дополнительным отжигом и после остаётся неизменным, что говорит о корректно выбранном температурном режиме для последующей эпитаксии кремния.

Способ увеличения термической стабильности НК GaSb лёг в основу синтеза структур НК/Si (рисунок 2). Встраивание НК осуществляли методом МЛЭ при температуре 450 °C (до полного закрытия НК) и 610 °C (последующее зарастивание). Комбинацией методов ТФЭ и МЛЭ были синтезированы многослойные образцы для термоэлектрических измерений.

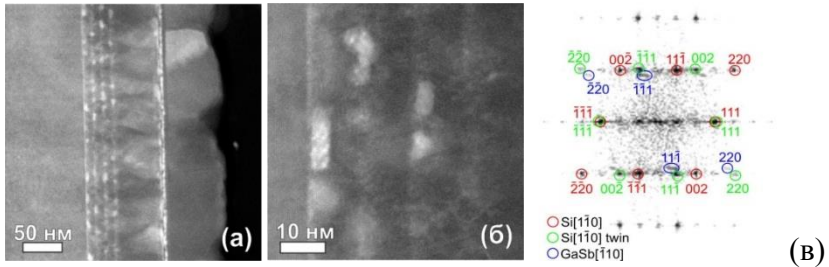


Рисунок 2. а) Снимок ПЭМ поперечного среза структуры НК/Si и его увеличенный фрагмент (б), на котором видны крупные и мелкие НК GaSb. в) Изображение БФП, полученные от снимка НК GaSb

Методом ПЭМ изучена кристаллическая структура образцов (рисунок 2). Определена величина деформации кристаллической решётки нанокристаллов, лежащая в диапазоне от -0.46 до -3.84% вдоль направления $\text{GaSb}[\bar{1}10]$. Эпитаксиальное соотношение интерфейса НК GaSb/Si : $\text{GaSb}(111)\|\text{Si}(111)$ с азимутальным сопряжением $\text{GaSb}[\bar{1}\bar{1}0]\|\text{Si}[\bar{1}\bar{1}0]$ (рисунок 2в).

Четвёртая глава состоит из двух разделов и посвящена исследованию термоэлектрических свойств гетероструктур Si/НК GaSb/Si. В первом разделе изучено влияние структурирования кремния НК GaSb на термоэлектрические свойства. Для этого была использована матрица нелегированного кремния (рисунок 3). Установлено, что НК GaSb инжектируют электроны в матрицу кремния, что приводит к смещению температуры инверсии знака коэффициента Зеебека с положительного на отрицательный в область низких температур с 400 до 282 К (рисунок 3, кривая НК/i-Si). Максимальный коэффициент Зеебека такой структуры -520 мкВ·К⁻¹ при 420 К. Максимальная удельная электропроводность 0.016 (Ом·см)⁻¹ при 390 К (рисунок 3б, кривая НК/i-Si).

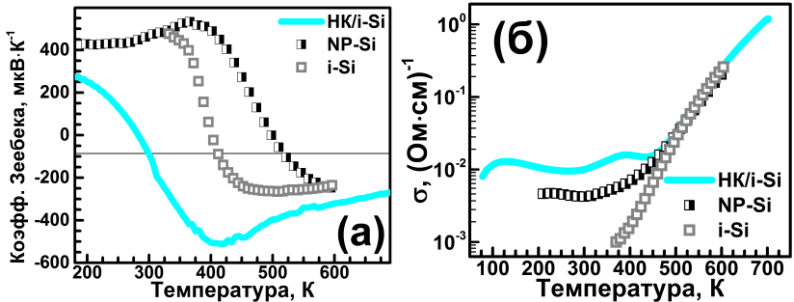


Рисунок 3. Термоэлектрические свойства гетероструктур (НК/i-Si) со встроенными НК GaSb на основе нелегированного кремния. а) Коэффициент Зеебека, б) удельная проводимость. NP-Si – компенсированный кремния, подложка. i-Si – собственный кремний, матрица.

Во втором разделе представлены результаты измерений термоэлектрических свойств гетероструктур Si/НК GaSb/Si на основе легированного кремния (рисунки 4 и 5). Использование легированной матрицы улучшило термоэлектрические свойства образцов. Максимальное значение коэффициента Зеебека образца на основе n-Si составляет $-670 \text{ мВ}\cdot\text{К}^{-1}$ и лежит в широком температурном диапазоне от 510 до 580 К (рисунок 4в). На рисунке 4г видно, что широкое плато с максимальным значением коэффициента Зеебека гетероструктуры на основе n-Si обусловлено вкладом подложки и плёнки со встроенными НК GaSb. В образце на основе p-Si термо-ЭДС преимущественно определяется кремниевой матрицей, а структурированный слой с НК не вносит заметного вклада в (рисунок 4в). Коэффициент Зеебека p-образца составляет $740 \text{ мВ}\cdot\text{К}^{-1}$ при 480 К (рисунок 4в). Сурьма, содержащаяся в ПР, при данных режимах синтеза сегрегирует к поверхности, что исключает компенсацию и снижение термоэлектрических параметров образца на основе p-Si (Рисунок 4а и 4в, кривые «НК/p-Si»).

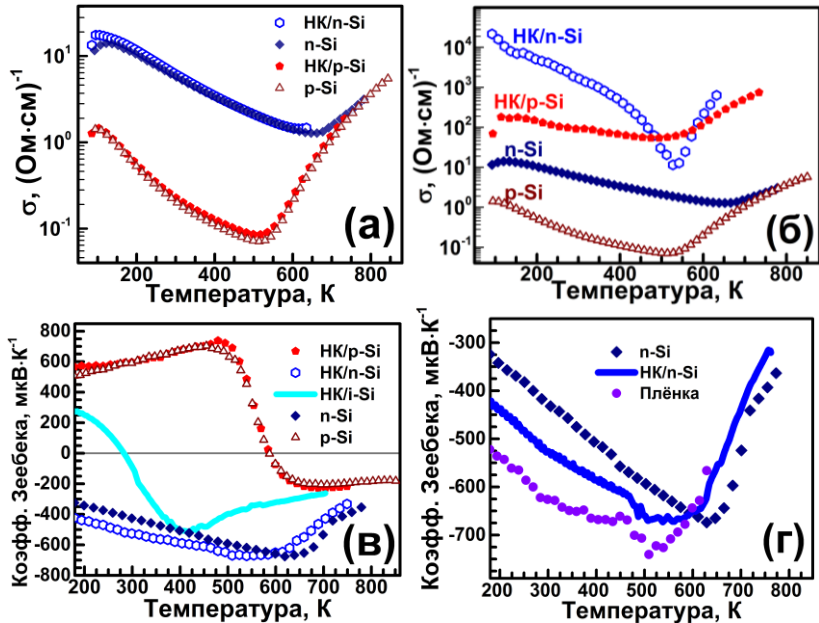


Рисунок 4. Термоэлектрические свойства гетероструктур на основе легированного кремния (n-, p-Si). а) Удельная проводимость, б) удельная проводимость, рассчитанная по двухслойной модели, в) коэффициент Зеебека, г) вклад плёнки и подложки (n-Si) в коэффициент Зеебека гетероструктуры на основе n-кремния.

Удельная проводимость гетероструктуры на основе p-Si в широком диапазоне температур превосходит проводимость подложки за счёт использования сильнолегированной матрицы (рисунок 4а). Расчёт удельной проводимости по двухслойной модели показывает, что плёнки кремния со встроенными НК GaSb в среднем на два порядка превосходят подложки (рисунок 4б).

На основе полученных данных (рисунки 3 и 4) был рассчитан фактор мощности кремниевых гетероструктур со встроенными НК GaSb. Видно, что встраивание НК в матрицу нелегированного кремния позволяет оптимизировать термоэлектрические свойства кремния в области низких

температур (рисунок 5, образец НК/i-Si). Фактор мощности такой гетероструктуры составляет $0.8 \text{ мВт} \cdot (\text{м} \cdot \text{К}^2)^{-1}$.

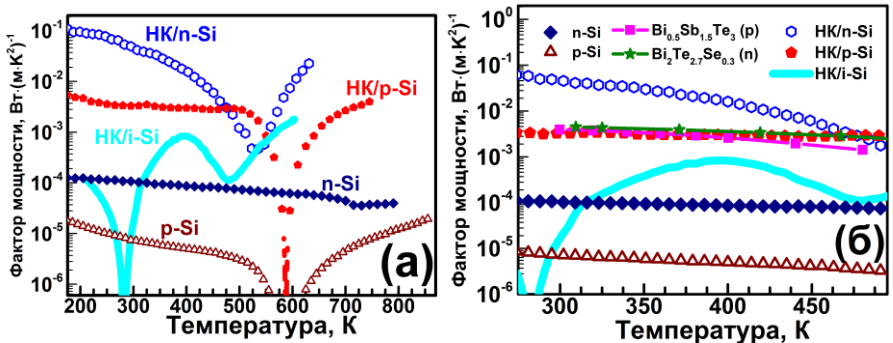


Рисунок 5. Фактор мощности сформированных гетероструктур. а) Во всём измеренном диапазоне, б) подробный фрагмент, отражающий рабочий температурный диапазон низкотемпературных ТЭП.

Использование матрицы легированного кремния улучшает термоэлектрические параметры гетероструктур. При 400 К фактор мощности р-образца $3 \text{ мВт} \cdot (\text{м} \cdot \text{К}^2)^{-1}$, что несколько превосходит параметры $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ и $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$: $2.6 \text{ мВт} \cdot (\text{м} \cdot \text{К}^2)^{-1}$ и $3.6 \text{ мВт} \cdot (\text{м} \cdot \text{К}^2)^{-1}$, соответственно [4,5]. Фактор мощности гетероструктуры на основе n-Si составляет $16 \text{ мВт} \cdot (\text{м} \cdot \text{К}^2)^{-1}$. Таким образом, встраивание НК GaSb в матрицу легированного кремния позволило сохранить (в случае р-образца) или улучшить (п-гетероструктура) фактор мощности исходного кремния.

Теплопроводность гетероструктур оценивали с помощью 2ω -метода в поперечном направлении при комнатной температуре. Для оценки влияния НК GaSb на теплопроводность кремния был сформирован контрольный образец без встроенных нанокристаллов, состоящий из послойно осаждённого кремния. Рассеяние фононов на границе раздела между слоями кремния снизило теплопроводность кремния со 150 до $37 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$. Встраивание НК GaSb в матрицу кремния привносит дополнительные факторы,

осложняющие тепловой транспорт. К таким факторам можно отнести: рассеяние фононов на границе раздела GaSb/Si, встраивание кристаллов пониженной размерности, контакт материалов с различной теплопроводностью, чередование атомов с разной массой и природой химической связи. В результате теплопроводность такой гетероструктуры составляет $7.8 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$.

Основные результаты работы отражены в следующих публикациях:

- [A1] Goroshko D. L. Photoluminescence spectroscopy investigation of epitaxial Si/GaSb nanocrystals/Si heterostructure / D. L. Goroshko, A. V. Shevlyagin, E. A. Chusovitin, S. A. Dotsenko, A. K. Gutakovskii, M. Iinuma, Y. Terai, E. Y. Subbotin, N. G. Galkin // AIP Conf. Proc. – AIP Publishing LLC, 2017. – Vol. 1874. – №. 1. – P. 030015
- [A2] Chusovitin E. Formation of a thin continuous GaSb film on Si (001) by solid phase epitaxy / E. Chusovitin, S. Dotsenko, S. Chusovitina, D. Goroshko, A. Gutakovskii, E. Subbotin, K. Galkin, N. Galkin // Nanomaterials. – 2018. – Vol. 8. – №. 12. – P. 987.
- [A3] Goroshko D. Thermoelectric properties of nanostructured material based on Si and GaSb / D. L. Goroshko, E. Y. Subbotin, E. A. Chusovitin, S. A. Balagan, K. N. Galkin, S. Dotsenko, A. Gutakovskii, V. V. Khovaylo, A. A. Usenko, V. U. Nazarov, N. G. Galkin // Defect and Diffus. Forum. – 2018. – Vol. 386. – 102-109 p.
- [A4] Goroshko D. L. Formation and thermoelectric properties of the n-and p-type silicon nanostructures with embedded GaSb nanocrystals / D. L. Goroshko, E. A. Chusovitin, E. Y. Subbotin, S. V. Chusovitina, S. A. Balagan, K. N. Galkin, S. A. Dotsenko, A. K. Gutakovskii, V. V. Khovaylo, V. U. Nazarov, N. G. Galkin // Jpn. J. Appl. Phys. – 2020. – Vol. 59. – №. SF. – C. SFFB04.
- [A5] Goroshko D. Dissolution suppression of self-assembled GaSb quantum dots on silicon by proper surface preparation / D. Goroshko, E. Chusovitin, E. Subbotin, S. Chusovitina // Semicond. Sci. Tech. – 2020. – Vol. 35. – №. 10. – C. 10LT01.

Список литературы

1. Nozariasbmarz A. et. al. Review of wearable thermoelectric energy harvesting: From body temperature to electronic systems // *Appl. Energ.* – 2020. – Vol. 258. – P. 114069.
2. Yu H. et. al. How Far Are We from Achieving Self-Powered Flexible Health Monitoring Systems: An Energy Perspective // *Adv. Energy Mater.* – 2021. – Vol. 11. – №. 9. – P. 2002646.
3. Chowdhury I. et. al. On-chip cooling by superlattice-based thin-film thermoelectrics // *Nat. Nanotechnol.* – 2009. – Vol. 4. – №. 4. – P. 235-238.
4. Kim S. I. et. al. Dense dislocation arrays embedded in grain boundaries for high-performance bulk thermoelectrics // *Science* – 2015. – Vol. 348. – №. 6230. – P. 109-114.
5. Zhang J. et. al. Ultralow Thermal Conductivity and High Thermoelectric Performance of N-type Bi₂Te_{2.7}Se_{0.3}-Based Composites Incorporated with GaAs Nanoinclusions // *ACS Appl. Mater. Inter.* – 2020– vol. 12. – №. 33. – P. 37155-37163.
6. Stranz A. et. al. Thermoelectric properties of high-doped silicon from room temperature to 900 K // *Journal of electronic materials.* – 2013. – Vol. 42. – №. 7. – P. 2381-2387.
7. Kroemer H. The 6.1 Å family (InAs, GaSb, AlSb) and its heterostructures: a selective review // *Physica E* – 2004. – Vol. 20. – №. 3-4. – P. 196-203.
8. Machida R. et. al. Effect of low-temperature-grown GaSb layer on formation of high-density and small GaSb islands on Si (100) substrate // *Phys. Status Solidi B* – 2016. – Vol. 253. – №. 4. – P. 648-653.