

На правах рукописи



Заиченко Александр Николаевич

**ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ТЕРМОМИГРАЦИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ МИКРООБЛАСТЕЙ В  
ОБЪЕМЕ КРЕМНИЯ АКЦЕПТОРНЫМИ ПРИМЕСЯМИ**

Специальность 2.2.3 – Технология и оборудование для производства  
материалов и приборов электронной техники

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Таганрог – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования Южно-Российском государственном политехническом университете (НПИ) имени М.И. Платова

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
Середин Борис Михайлович

Официальные оппоненты: Кожемякин Геннадий Николаевич,  
доктор технических наук, профессор,  
Лаборатория Космического  
материаловедения ИК РАН - филиал  
Федерального государственного  
учреждения «Федеральный научно-  
исследовательский центр  
«Кристаллография и фотоника»,  
лаборатория роста кристаллов,  
ведущий научный сотрудник

Спивак Юлия Михайловна, доктор  
технических наук, доцент, Санкт-  
Петербургский государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова  
(Ленина), кафедра микро- и  
наноэлектроники, доцент

Защита состоится «28» декабря 2023 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета ЮФУ801.02.05 в Южном федеральном университете (ЮФУ) по адресу: г. Таганрог, ул. Шевченко 2, «Точка кипения» ИТА ЮФУ

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной библиотеке Южного федерального университета по адресу: г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге 21-ж, 2 этаж и на сайте: <https://hub.sfedu.ru/diss/show/1319501/>

Автореферат разослан «14» ноября 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент



В. С. Климин

### Актуальность работы

Современная электроника невозможна без электрически гетерогенных структур, которые создаются в полупроводниковом кристалле на границах локальных областей, легированных различными примесями. При этом широко используются технологии, основанные на методе твердотельной диффузии и газофазной эпитаксии. Однако эти методы позволяют эффективно формировать гетероструктуры только вблизи поверхности полупроводниковой пластины, в то время как объемная часть пластины играет лишь пассивную роль механической подложки. Управляемое легирование микрообъемов внутри полупроводниковой пластины существенно расширило бы возможности совершенствования и создания новых полупроводниковых приборов и интегральных схем.

Уникальными возможностями объемного легирования обладает метод термомиграции (ТМ) [1]. Для получения зон используются различные металлы-растворители, понижающие температуру плавления кристалла. Этот метод известен давно [2] и ему посвящено множество научных исследований, которые вскрыли сложные физико-химические процессы, обуславливающие и сопровождающие ТМ жидких зон и подтвердили принципиальные возможности метода. Движение жидкой зоны в кристалле при ТМ вызвано сочетанием трех взаимосвязанных процессов: растворения кристалла на более горячих частях границы зоны, диффузии атомов в расплаве и кристаллизации на относительно более холодных участках раздела фаз. Перекристаллизованный зоной материал легирован атомами металла-растворителя в соответствии с солидусом фазовой диаграммы состояния, а за движущейся зоной образуется канал с определенными физическими и геометрическими свойствами. Перемещение системы прямолинейных или криволинейных зон через пластину полупроводника позволяет, например, получать каналы или замкнутые ячейки определенного типа проводимости, пронизывающие пластину и соединяющие ее противоположные стороны.

Практическое применение метода ТМ требует, чтобы легированные каналы сохраняли заданную форму, не имели разрывов, были перпендикулярными поверхности пластины и однородно легированными. Существует необходимость в расширении диапазона регулирования концентрации легирующей примеси. С увеличением диаметра используемых пластин (более 100 мм) обеспечение таких требований становится сложной технической проблемой. Универсальной технологии, способной полностью реализовать возможности метода ТМ на кремниевых пластинах без ограничения их диаметра пока в мировой практике не существует.

### **Цели и задачи диссертационной работы**

Целью диссертационной работы является разработка физико-технологических основ термомиграционного легирования микрообластей в объеме кремния акцепторными примесями, необходимых для создания эффективных электронных приборов. Данная цель может быть достигнута посредством решения ряда задач:

1. разработать воспроизводимые методики формирования дискретных зон в кремнии на основе алюминия, галлия и их сплавов, необходимых для реализации ТМ;
2. изучить кинетику миграции зон в поле температурного градиента на основе выбранных металлов-растворителей;
3. провести компьютерное моделирование температурного поля и разработать нагревательное устройство для ТМ системы жидких зон в пластинах кремния диаметром не менее 100 мм;
4. исследовать электрофизические и структурные свойства, легированных термомиграционных каналов *p*-типа с привлечением современного высокоточного оборудования;
5. исследовать электрические характеристики фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии, полученных с использованием ТМ.

**Методы исследования.** Определение скорости ТМ проводилось с использованием металлографического анализа и оптической микроскопии. Для анализа кристаллического совершенства применялась рентгеновская дифрактометрия и рентгеновская топография. Для анализа распределения акцепторных примесей, внедренных ТМ, применялась вторичная ионная масс-спектрометрия. Для определения характеристик фотопреобразователей применяли источник-измеритель постоянного тока, пикоамперметр, имитатор солнечного излучения. Численное моделирование проводили методом конечных элементов.

**Объект исследования** – микрообласти *p*-типа проводимости в объеме *n*-кремния, пригодные для создания электронных приборов.

**Предмет исследования** – процесс создания микрообластей в объеме кремния, легированных акцепторными примесями методом ТМ.

### **Научная новизна**

1. Разработаны физико-технологические основы термомиграционного легирования кремния алюминием, галлием или их сплавами, позволяющие создавать в монокристаллических пластинах диаметром 100 мм систему микрообластей в виде сквозных каналов с концентрацией акцепторов в диапазоне  $(1-4) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ .
2. Разработаны методики формирования дискретных зон избирательным смачиванием кремния алюминий-галлиевым расплавом, обеспечивающие реализацию метода ТМ.

3. Обнаружен эффект уменьшения скорости легирования кремния методом ТМ с ростом концентрации галлия от 0 до 10 процентов (мас.) в расплаве при температуре в интервалах 1320–1400 К и увеличения в интервале 1420–1520 К соответственно, что позволяет прецизионно управлять конфигурацией микрообластей.

4. Выявлено высокое структурное совершенство полученных методом ТМ сквозных каналов, требуемое для создания электронных приборов с низкими токами утечки и высокими пробивными напряжениями.

5. Предложена и обоснована конструкция фотоэлектрического преобразователя с использованием сквозных вертикальных термомиграционных *p*-каналов и *p-n*-переходов на их основе, обеспечивающего повышение эффективности преобразования энергии.

#### **Практическая значимость работы:**

1. Впервые показана возможность формирования и последующей ТМ системы жидких алюминий-галлиевых зон в кремнии и получения легированных микрообластей в виде сквозных каналов шириной 100–200 мкм на пластинах диаметром 100 мм.

2. Достигнута возможность регулирования концентрации акцепторов в кремниевых термомиграционных каналах от  $1 \cdot 10^{19}$  до  $4 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup> за счет изменения состава алюминий-галлиевых зон.

3. Установлены условия для воспроизводимой ТМ дискретных зон со скоростями от 400 до 1000 мкм в час, достигаемыми при температуре в диапазоне 1320–1520 К.

4. Изготовлены экспериментальные структуры ФЭП, состоящих из пятнадцати легированных микрообластей в объеме кремниевой подложки и имеющих: плотность тока короткого замыкания – 32,1 мА/см<sup>2</sup>; напряжение холостого хода – 8,6 В; фактор заполнения ВАХ – 68,1; коэффициент полезного действия – 13,8 %.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Разработанные методики избирательного смачивания кремния алюминий-галлиевым расплавом, позволяющие сформировать систему дискретных зон толщиной 30–50 мкм и шириной 100–200 мкм, обеспечивающих реализацию метода ТМ на кремниевых пластинах диаметром 100 мм.

2. Технологический процесс термомиграции с использованием алюминий-галлиевых жидких зон, позволяющий получать в кремниевых пластинах *n*-типа структурно совершенные микрообласти в виде сквозных *p*-каналов с концентрацией акцепторов в диапазоне  $(1-4) \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>.

3. Эффект уменьшения скорости легирования кремния методом ТМ с ростом концентрации галлия от 0 до 10 процентов (мас.) в расплаве при температуре в интервале 1320–1400 К, и увеличения в интервале 1420–1520 К.

4. Технологический процесс получения термомиграционных сквозных  $p$ -каналов для кремниевых высоковольтных фотопреобразователей.

#### **Реализация результатов работы:**

Диссертационная работа выполнялась на кафедре «Физика и фотоника» ЮРГПУ (НПИ) являлась частью научно-исследовательских работ по научному направлению ЮРГПУ (НПИ) «Полупроводниковые структуры и приборы электронной техники» по темам ПЗ-923 «Моделирование и экспериментальные исследования процессов выращивания кремниевых слоев и создания на их основе приборов твердотельной электроники» и ПЗ-953 «Теоретические и экспериментальные исследования процесса термомиграции многокомпонентных жидких зон в монокристалле кремния», государственного задания ЮРГПУ (НПИ) на проведение научно-исследовательских работ «Разработка физико-технических основ объемного легирования акцепторной примесью микрообластей кремниевых пластин методом термомиграции жидких зон», шифр FENN-2023-0005.

Результаты работы приняты к использованию ведущими производителями промышленной электроники ПАО «Сатурн», г. Краснодар, и АО «ВЗПП-Микрон», г. Воронеж.

#### **Апробация работы:**

Основные результаты диссертации обсуждались на заседаниях кафедры физики и фотоники ЮРГПУ(НПИ), докладывались на научных конференциях: «Мокеровские чтения: 8-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники» (г. Москва, 2017); «International Conference on Industrial Engineering 2017» (г. Санкт-Петербург, 2017); «XXIII Международная конференция «Оптика и спектроскопия конденсированных сред»» (г. Краснодар, 2017); «XXIV Международная конференция «Оптика и спектроскопия конденсированных сред»» (г. Краснодар, 2018); «Мокеровские чтения: 10-я Юбилейная Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники» (г. Москва, 2019); «XXV Международная конференция «Оптика и спектроскопия конденсированных сред»» (п. Агой, 2019); «The International Conference PhysicA.SPb/2019» (г. Санкт-Петербург, 2019); «Международная конференция «Физика.СПб/2021» (г. Санкт-Петербург, 2021); «Международная конференция «Физика.СПб/2022» (г. Санкт-Петербург, 2022); «X Международная научная конференция «Актуальные проблемы физики твердого тела APSSP» (г. Минск 2023); «Мокеровские чтения: 14-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники» (г. Москва, 2023).

### Публикации:

Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 19 работах, в том числе: три статьи – в рецензируемых изданиях из Перечня научных изданий ЮФУ; две статьи в изданиях входящих в перечень рекомендованных ВАК; патент РФ на полезную модель; свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ; пять работ индексированы в наукометрической базе Scopus.

### Структура и объем диссертации:

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 131 страница с 57 рисунками и 2 таблицами. Список литературы содержит 142 наименования.

### Краткое содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность проведения исследований, сформулированы цель диссертации, ее задачи, научная новизна и практическая значимость. Изложены сведения о структуре диссертации, внедрении ее результатов и их апробации. Представлена информация о публикациях автора. Отмечен личный вклад автора в разработках.

**В первой главе** дана характеристика метода ТМ и его место среди других методов локального легирования кристаллов для создания электрически гетерогенных структур. Приведен литературный обзор по результатам исследований кинетики и стабильности процесса, перераспределения компонентов в процессе ТМ. Рассмотрены известные применения метода ТМ с использованием дискретных зон в полупроводниковой технологии. Проанализированы достоинства и недостатки методик реализации ТМ в управлении уровнем легирования микрообластей акцепторной примесью. Сформулированы задачи исследований.

**В второй главе** приводятся результаты исследований и разработки методик формирования дискретных зон на фронтальной поверхности пластины кремния с использованием алюминия [2.1] и галлия.

Для формирования жидких зон используется избирательное смачивание [1] поверхности кремния, реализация которого осуществляется протягиванием кремниевой пластины под контейнером с расплавом зонообразующего материала. Зоны при этом формируются за счет растворения кремния во вскрытых в маскирующем покрытии (диоксид кремния) областях. Однако при использовании алюминий-галлиевых сплавов обнаружены недостатки известной методики. Систематизированы, проанализированы и сгруппированы дефекты, проявляющиеся в проколах защитного покрытия (тип 1); отклонениях от заданной ширины зоны (тип 2); разрывав зон (тип 3); налипании расплава на защитное покрытие (тип 4). Увеличение в диапазонах варьирования шероховатости  $R_a$  поверхности кремниевой пластины (0,25–1,25 мкм), температуры  $T$

процесса смачивания (700–850°C), скорости  $v$  протяжки пластины (5,0–9,5 мм/с), высоты  $H$  расплава в контейнере (10–40 мм) увеличивает количество дефектов типа 1, 4 и уменьшает количество дефектов типа 2, 3. Найдены параметры:  $0,8 < R_a < 1,2$  мкм;  $750 < T < 800$  °С;  $6 < v < 8$  мм/с,  $20 < H < 30$  мм, обеспечивающие приемлемое значение процента выхода годных ( $P > 0,95$ ) при использовании алюминий-галлиевых расплавов с концентрацией галлия, менее 10 процентов (мас.).

Для формирования галлиевых зон разработаны новые методики. В частности, предложено заменить маскирующее покрытие из диоксида кремния на слой окисленного пористого кремния (ОПК). Для этого на поверхности кремниевой пластины анодной обработкой в концентрированной HF при дневном свете создают слой пористого кремния, а затем его окисляют. Окисление проводят в потоке «сухого» кислорода, поскольку это дает лучший результат по стойкости к расплаву и однородности свойств ОПК. Многочисленные эксперименты показали наибольшую стойкость маскирующего покрытия, полученного из пористого кремния с 75% плотностью. Дальнейшая обработка пластин с ОПК в процессе избирательного смачивания совпадает с предыдущей методикой. Процесс получения пористого кремния анодированием накладывает ограничение в виде требования высокой электропроводности пластин кремния (с концентрацией носителей выше  $10^{17}$  см<sup>-3</sup>).

Для формирования зон на основе галлия в кремнии без ограничений его уровня легирования предложена и разработана методика, основанная на использовании порошкообразного галлия.

Толщина формируемой зоны  $h$  в таком случае может задаваться глубиной предварительно вытравленных в пластинах кремния канавок  $h_0$  (см. рисунок 1, а). На следующем этапе (рисунок 1, б) пластину протягивали под контейнером с щелью и твердым порошком галлия со средним размером фракции (преимущественно диаметром)  $d$ . При этом порошок через щель заполнял вытравленные пазы. Далее пластины кремния с порошком галлия в пазах перемещали в нагревательный узел (рисунок 1, в), где происходило плавление галлия и заполнение пазов расплавом. Плавление в данном случае предназначено для удержания галлия в пазах на фронтальной поверхности пластины для облегчения последующего старта ТМ.

Результаты экспериментов по формированию дискретных зон отражают зависимости, приведенные на рисунке 2. Из формы кривых 1–3 характеризующих влияние температуры формирования  $T_S$  на выход однородно заполненных пазов  $P$  следует, что для обеспечения высоких значений  $P \geq 0,95$  (область окрашена) температура  $T_S$  не должна превышать 284 К. Из формы зависимостей 5–8 видно, что уменьшение скорости протягивания пластины увеличивает эффективность формирования галлиевых зон (кривая 5).

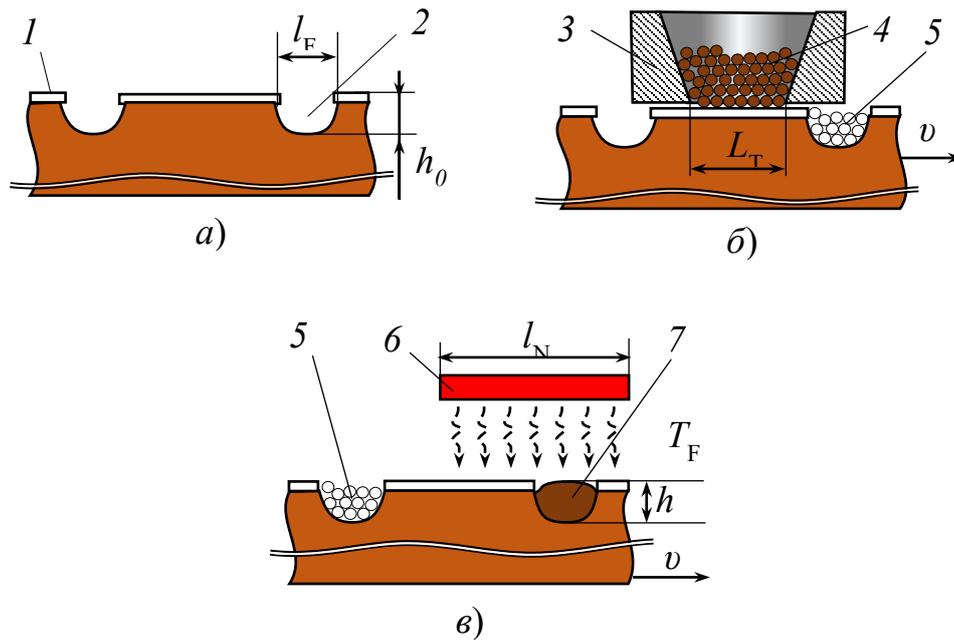


Рисунок 1 – Схема процесса формирования галлиевых зон: 1 – слой SiO<sub>2</sub>; 2 – канавка; 3 – контейнер; 4 – галлий; 5 – порошок в пазах; 6 – термический узел; 7 – жидкий галлий

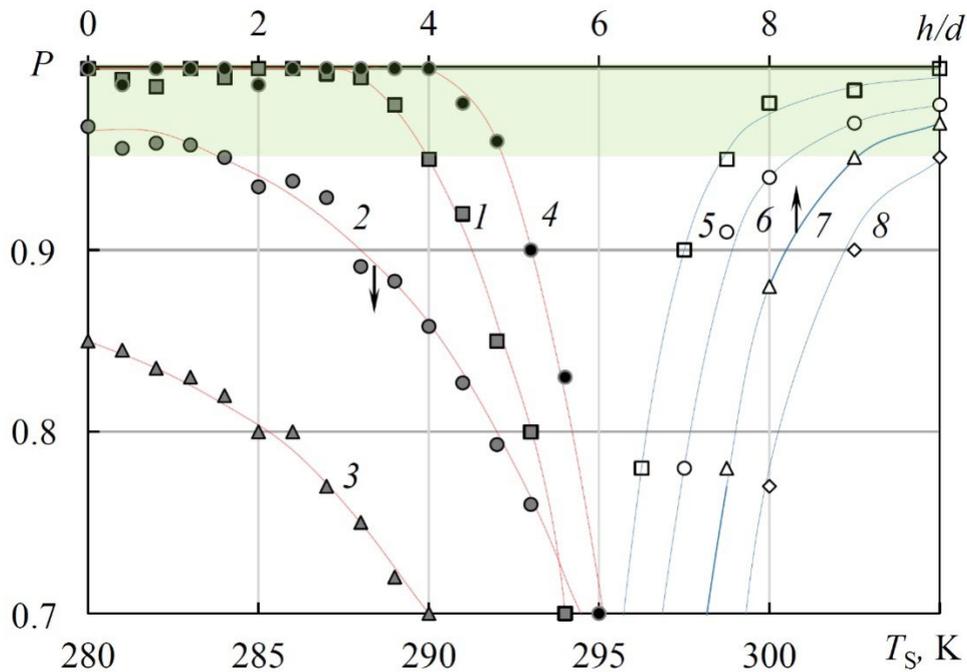


Рисунок 2 – Температурные (1, 2, 3, 4) и аспектные  $h/d$  (5, 6, 7, 8) зависимости выхода  $P$  годных галлиевых зон соответственно: 1, 2, 3 (для  $h/d = 10$ ; 6; 4 и  $v = 0,3$  м/с); 4 ( $h/d = 10$ ;  $v = 0,2$  м/с); 5, 6, 7, 8 (для  $v = 0,2$ ; 0,3; 0,34; 0,38 м/с при  $T_s = 287$  К)

Протягивание профилированной кремниевой пластины со скоростью 0,3 м/с под контейнером с порошкообразным галлием размером частиц  $d \sim 10$  мкм с последующим нагревом пластины до температуры 80°C формирует кремний-галлиевые дискретные зоны толщиной 30–50 мкм.

Разработанные методики дают возможность формировать дискретные зоны на основе расплавов алюминия и галлия в широком диапазоне соотношений концентраций. Схема выбора той или иной методики, в зависимости от потребностей технологии получения приборов, приводится на рисунке 3.

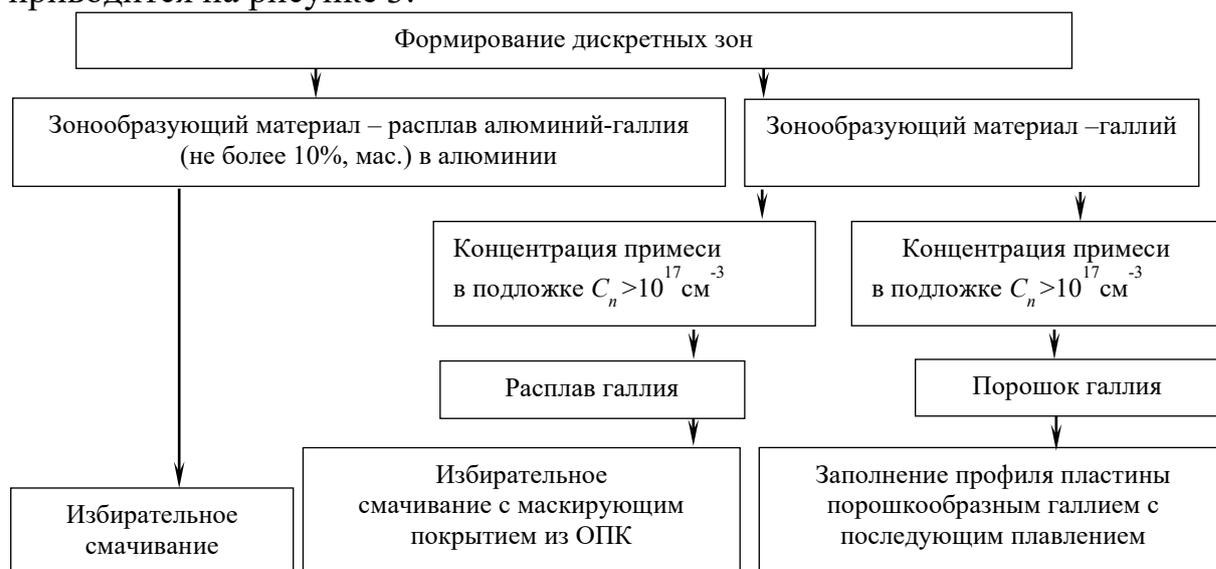


Рисунок 3 – Схема выбора рассмотренных методик формирования дискретных зон на основе галлия

**В третьей главе** представлена конструкция компактного термического узла для реализации процессов ТМ. (см. рисунок 4), которая имеет цилиндрическую форму и вертикальное расположение нагревательного элемента. Симметричное расположение пластин кремния в кассетах параллельно нагревательному элементу позволяют проводить идентичную температурно-временную обработку двух пластин кремния в одном процессе ТМ. Важной характеристикой термического узла является обеспечение однородного поля градиента температуры, перпендикулярного пластине.

Только в этом случае заданная конфигурация зон сохранится и обеспечит требуемую топологию каналов. Искажение температурного поля, связанное взаимодействием деталей термического узла друг на друга может приводить к нарушению геометрии формируемых каналов (см. рисунок 5).

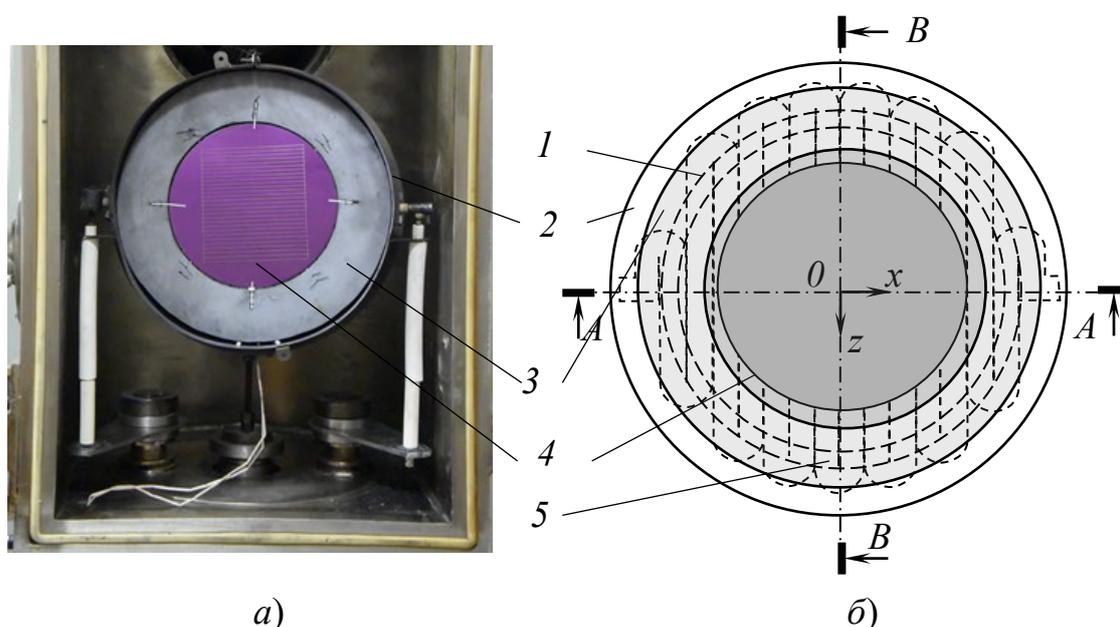


Рисунок 4 – Термическое устройство для ТМ жидких зон через кремниевые пластины диаметром до 150 мм – (а) и его схема – (б). 1 – нагревательный элемент, 2 – корпус, 3 – кассета, 4 – пластина кремния; 5 – охранный кольцо

Экспериментально установлено, что траектории движения зон в таком узле отклоняются от нормали под углом  $\alpha$  к центру пластины, причем отклонение тем больше, чем дальше от центра на стартовой поверхности располагается линейная зона, что обусловлено утечками тепла на периферии пластины.

Средствами математического моделирования процессов передачи тепла в пластине кремния с применением программного продукта Termomeander выявлено, что температура приповерхностных слоев центральной части нагревательного элемента должна быть одинаковой, за исключением периферии. Где при  $0,9 < r < 1$  она должна быть более существенной. Подобный перегрев предложено обеспечить локальным утонением в виде кольца соосным с пластиной кремния (охранного кольца).

Компьютерное моделирование позволило выявить влияние охранного кольца нагревателя на конфигурацию теплового поля в кремниевой пластине:  $G_n$ ,  $G_r$  и  $\alpha = \arctg(G_r / G_n)$ . Это иллюстрирует рисунок б, а, на котором показаны распределения градиентов температуры  $G_n$  и  $G_r$  вдоль сечений пластины  $A - A$  и  $B - B$ , полученные при использовании охранного кольца шириной  $f$  и глубиной проточки  $b-c$ . Кольцо слабо меняет вид распределения  $G_n$ . Более существенно влияние профилирования нагревателя на величину и знак  $G_r$ . В этом случае на кривой  $G_r(x)$  образуются локальные максимумы в периферийных

областях пластины. Величина и знак максимумов зависят от места сечения пластины.

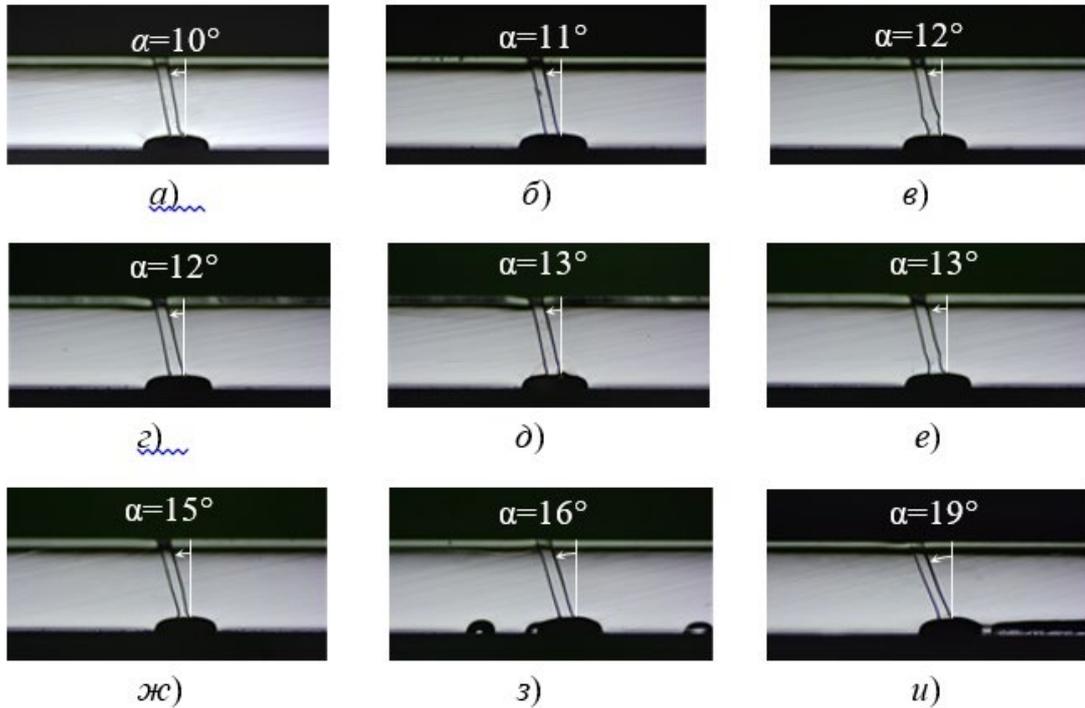


Рисунок 5 – Каналы на различных расстояниях от центра пластины (мм): 18 (а), 20 (б), 22 (в), 24 (г), 26 (д), 28 (е), 30 (ж), 32 (з), 34 (и). Зоны двигались снизу-вверх. Пластина кремния: диаметр 100 мм; толщина 500 мкм

Вдоль сечения  $A - A$  значения  $G_\tau$  становятся положительными, т.е. тангенциальный градиент температуры меняет направление на противоположное к изначальное (см. рисунок 6, а кривые 3 и 4). Высота максимумов  $G_\tau$  по сечению  $A-A$  уменьшается с ростом диаметра охранного кольца. На сечении  $B - B$  наблюдаются как положительные, так и отрицательные значения  $G_\tau$ . При этом значения положительных максимумов проявляются при малых диаметрах кольца. Отрицательные значения  $G_\tau$  становятся существенно меньше изначальных (см. рисунок 6, а кривые 7 и 8) и снижаются с увеличением  $D_k$ . В результате, площадь пластины, в которой реализуется оптимальная ТМ, меняется. Увеличение диаметра кольца  $D_k$  приводит к увеличению этой площади в направлении  $x$  (см. стрелки  $C, C'$  на рисунке 6) и уменьшению в направлении  $z$  (см. стрелки  $E, E'$  на рисунке 6). Максимальные значения площади достигаются при  $D_k$ , большем диаметра пластины кремния примерно на 4–5 %. Снижение  $d$  от 8 мм до 2 мм приводит к монотонному улучшению качества температурного поля в пластине. Найдено, что равенство толщины нагревателя  $b$  ширине ламели  $a$  (при  $c/b=0,3$ ) способствует улучшению равномерности распределения температуры поверхности пластины. При  $b = 4$  мм область, являющаяся оптимальной при ТМ с использованием

охранного кольца диаметром  $D_k = (1,04-1,05) D_k$ , увеличивается до 85%. В этом случае удается достичь значений  $G_\tau$  и степени неоднородности  $G_n$ , меньших 1 К/см и 0,7 % соответственно. Экспериментальная апробация данных моделирования подтверждает корректность полученных результатов отклонении каналов от нормали на угол меньше 10 градусов, достаточный для создания структуры электронного прибора

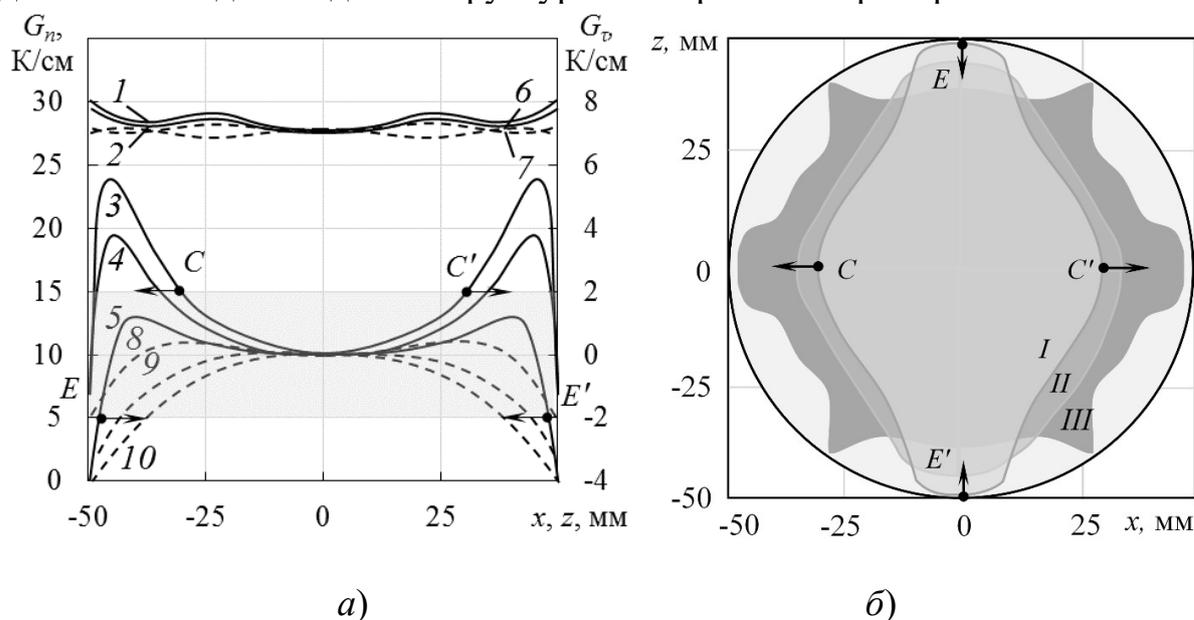


Рисунок 6 – Распределения нормального  $G_n$  (кривые 1, 2, 6, 7) и тангенциального  $G_\tau$  (кривые 3 – 10) градиентов температуры вдоль сечений  $A-A$  и  $B-B$  при наличии охранного кольца диаметром  $D_k$  (а) и области пластины, оптимальные для ТМ (б). 1 – 5 и 6 – 10 соответствуют сечениям  $A-A$  и  $B-B$ . 1, 3, 6, 8, I; 4, 9, II; 2, 5, 7, 10, III соответствуют  $D_k$ : 100; 104; 108 мм;  $T = 1345$  К (в центре пластины);  $f = 5$  мм;  $c = 0,3b$ ;  $d = 2$  мм

Исследование кинетики ТМ жидких зон сложного состава показало, в диапазоне варьирования концентрации галлия имеет место монотонное уменьшение скорости  $v$  легирования каналов кремния при увеличении концентрации галлия в расплаве для температур в диапазоне 1300–1400 К, и наоборот, увеличение скорости в диапазоне температур 1400–1520 К (см. рисунок 7). Скорость миграции дискретных через кремниевые пластины с кристаллической ориентацией плоскости (100) по сравнению с пластинами в ориентации (111) выше примерно на 50%.

Установлены зависимости  $v$  от толщины жидкой зоны  $l$  (см. рисунок 8). Установлено минимальное (пороговое) значение толщины  $l_k$  зоны, соответствующей началу ТМ. Увеличение концентрации галлия в расплаве не меняет  $l_k$ . Отсутствие движения жидких зон при толщинах  $l_k$ , меньших пороговых, возможно, объясняется наличием в жидкой зоне включений

оксидов  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  в виде остатков пленок (чешуек), блокирующих диффузионный массоперенос вещества.

$v$ ,

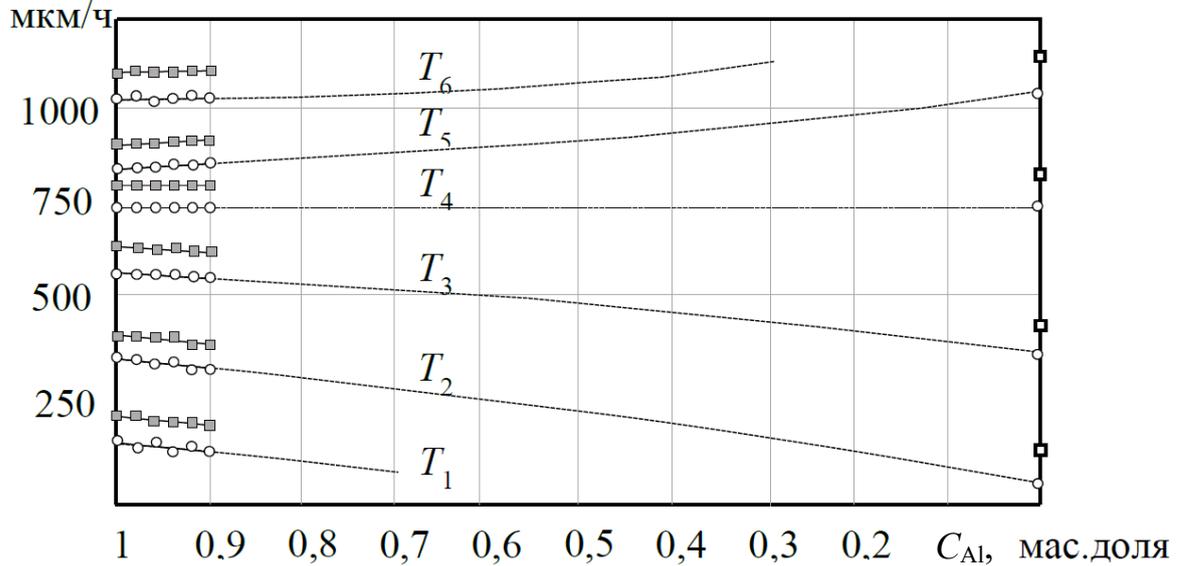


Рисунок 7 – Зависимости скорости ТМ от состава зоны Al-Ga. Сплошные кривые соответствуют перекристаллизации пластин КЭФ 4,5 (111) (кружки) и КЭФ 4,5 (100) (квадраты); пунктирные линии соответствуют данным для  $T_1 = 1320$ ;  $T_2 = 1350$ ;  $T_3 = 1370$ ;  $T_4 = 1420$ ;  $T_5 = 1470$ ;  $T_6 = 1520$  (К)

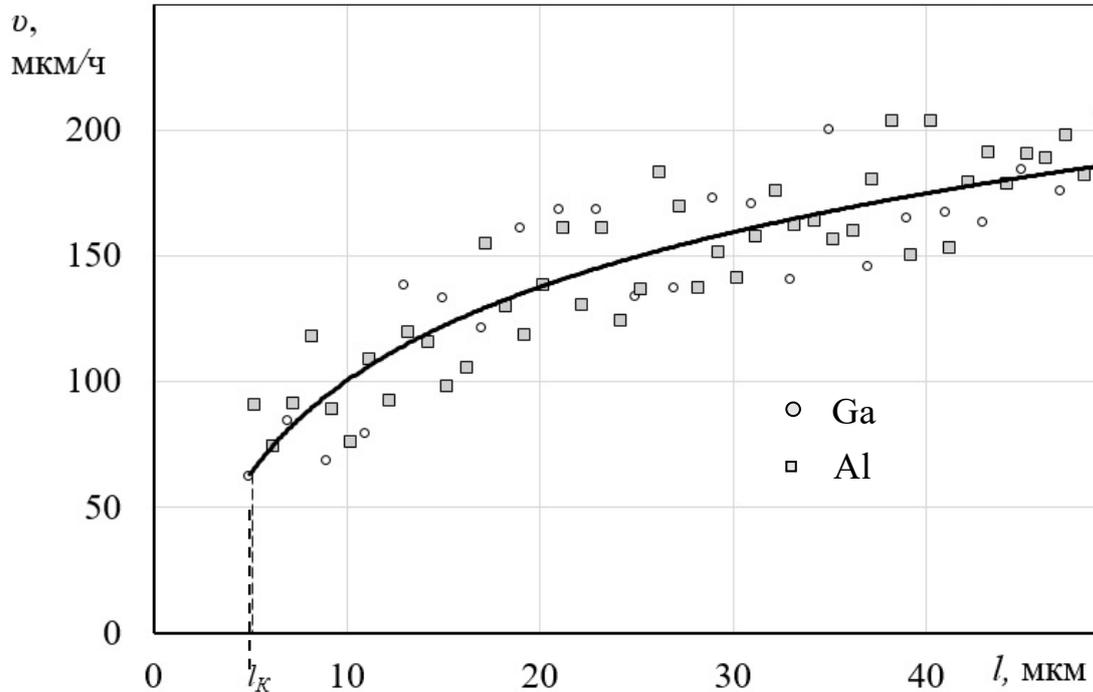


Рисунок 8 – Зависимость скорости зоны  $v$  от ее толщины  $l$  при  $T = 1320$  К

**В четвертой главе** приводятся результаты исследований кристаллического совершенства термомиграционно легированных алюминием и галлием микрообластей в пластине кремния в виде сквозных

*p*-каналов. Для изучения кристаллических свойств *p*-каналов использованы монокристаллические пластины *n*-Si (111) ( $\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ) диаметром 100 мм, толщиной 500 мкм и плотностью микродефектов не выше  $10^2 \text{ см}^{-2}$ . В качестве модельного зонообразующего металла для ТМ выбран алюминий. В последующих экспериментах использовался расплав алюминия с галлием до 10 % (мас.) и галлий. Массив используемых зон шириной от 50 до 200 мкм и толщиной 20 мкм формировали с шагом 3 мм на кремниевой пластине. Оси зон располагали вдоль направлений  $\langle 211 \rangle$ .

На рисунках 9, 10 показаны двухкristальные кривые дифракционного 333 отражения в геометрии Брэгга от образца *p*-каналами, записанные от участков поверхности вблизи выхода канала на поверхность пластины [1.1].

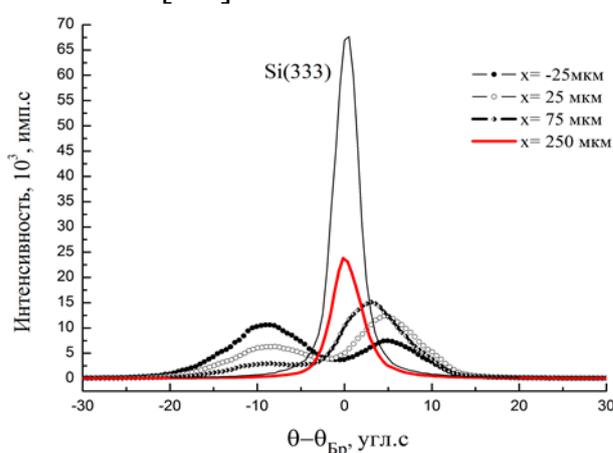
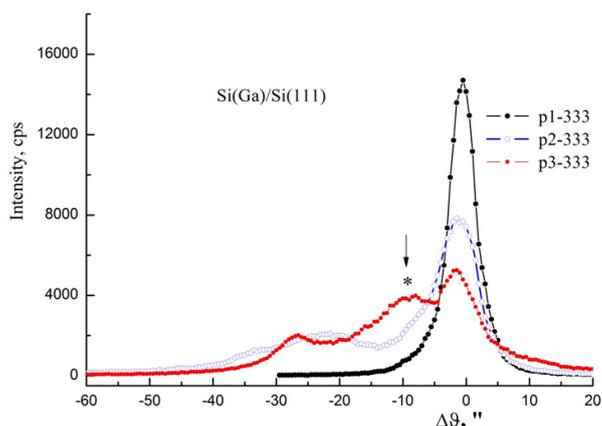


Рисунок 9 – Кривые дифракционного отражения от пластины Si(111) с *p*-каналом (Al) в зависимости от точки засветки  $x$  вблизи центра канала,  $\text{CuK}\alpha_1$  излучение

Рисунок 10 – Двухкristальные КДО (333) полученные для участков тестовой пластины кремния p1-p3 финишной поверхности Si(111): p1-вдали от канала, p2-на границе с каналом, p3-внутри *p*-канала (Ga); \* - отражение от канала. Для исследования применялось  $\text{CuK}\alpha_1$  излучение



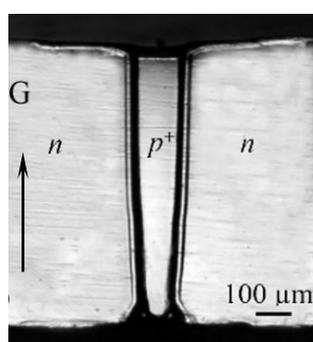
В зависимости от места засветки  $x$  (точность позиционирования 10 мкм) вблизи *p*-канала на кривых дифракционного отражения наблюдаются либо один пик, либо два пика с изменяющимися от координаты  $x$  интенсивностями. Пик Si(333) соответствует отражению от исходной пластины кремния. Вдали от центра канала при больших значениях  $x$  (участок поверхности между каналами) от образца наблюдается только один дифракционный максимум. Он имеет полуширину 3,5 угл.с, что близко к значению 2,63 угл.с для совершенного кристалла кремния согласно динамической теории рассеяния. Дополнительное уширение  $\sim 0,8$  угл.с связано с незначительной мозаичностью, изгибом образца после

приготовления и аппаратными искажениями. Поскольку ширина  $p$ -канала соизмерима с сечением пучка, то в  $x=0$  всегда наблюдается два пика на кривых. При малых углах  $\Delta\vartheta$  величину деформации дифракционных плоскостей можно оценить выражением [1.2]:  $\Delta d/d \approx -ctg\Theta_{Br} \cdot \Delta\vartheta$ .

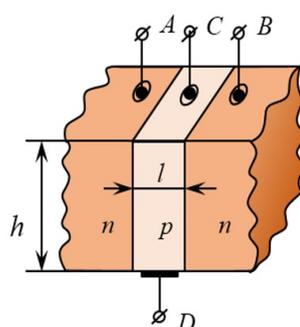
Концентрация алюминия, восстановленная с учетом тетрагональных искажений в модели внедрения атомов в узлы кристаллической решетки кремния  $C_{Al}=K(\Delta d/d)(1/\langle\beta_{Al}\rangle)$ , равна  $\sim 10^{19}\text{см}^{-3}$ , где:  $\beta_{Al} = [1/(3C_{Si})] \cdot [(r_{Al}/r_{Si})^3 - 1]$ , а  $C_{Si} = 5 \cdot 10^{22}\text{см}^{-3}$  – концентрация атомов кремния,  $K \approx 0,695$  для Si(111) и  $r_{Si} = 0,117$  нм,  $r_{Al} = 0,126$  нм ковалентные радиусы атомов кремния и алюминия, соответственно.

Структурные исследования образцов методом рентгеновской дифрактометрии подтверждаются наличием в  $p$ -канале алюминия, определенного и вторично-ионной масс спектрометрии (ВИМС). По данным ВИМС в канале Si(Al) концентрация алюминия вблизи поверхности равна  $(0,95 - 1,05) \cdot 10^{19}\text{см}^{-3}$  на лицевой и тыльной стороны канала. В последующих экспериментах использовался сплав алюминия с галлием с концентрациями 0,1; 100 % (мас.) Ga. Данные, полученные с использованием сплавов указанного ряда концентрации галлия, не выявили отклонений от вышеописанных закономерностей, полученных для зон на основе алюминия. Концентрация акцепторов в полученных ТМ каналах была получена в интервале  $(2,5 - 4,0) \cdot 10^{19}\text{см}^{-3}$ .

Проведены электрофизические исследования свойств полученных каналов (фото канала см. рисунок 11, а). Для испытаний использовали схему, представленную рисунком 11, б. Обратные вольт-амперные характеристики (ВАХ) (см. кривые 1, 2 на рисунке 12) для отдельных  $n$ - $p$ - $n$  структур симметричны в первом и третьем квадрантах, что указывает на эквивалентность свойств этих  $n$ - $p$  и  $p$ - $n$  встречных переходов на противоположных сторонах  $p$ -канала. Отклонение канала от нормали приводит к ухудшению характеристик (см. кривая 1, на рисунке 12),



а)



б)

Рисунок 11 – Исследуемый образец с термомиграционным каналом: фотография (а) и схема подключений к его областям для измерений ВАХ (б)

возможно связанному с повышенными объемными токами утечки из-за остаточных примесей и микронзон. Типичная прямая ветвь ВАХ для левого

и правого  $p$ - $n$ -переходов представлена рисунком 12, б. В образцах не было обнаружено существенных различий в значениях  $I(U)$  между  $p$ - $n$ -переходами. Безразмерный параметр  $\alpha$ , характеризующий качество  $p$ - $n$ -перехода (см. кривая 1, рисунок 12, б) в уравнении Шокли, определен равным 1,54. Расчетные зависимости электрического сопротивления канала от его ширины и концентрации примеси приведены на рисунке 13. Полученное удельное сопротивление каналов  $p$ -типа находится в диапазоне от 0,01 до 0,05 Ом·см.

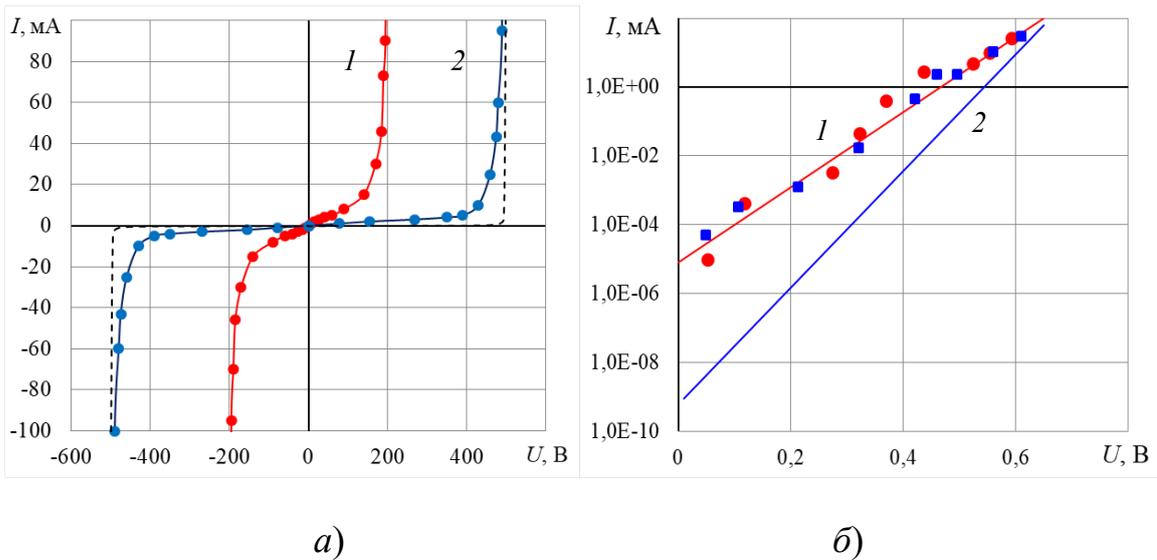


Рисунок 12 – Обратные (а) и прямые (б) ВАХ для левого и правого  $p$ - $n$ -переходов для кремниевой пластины  $n$ -типа ( $KЭФ$ ,  $10^{14}$  см $^{-3}$ )

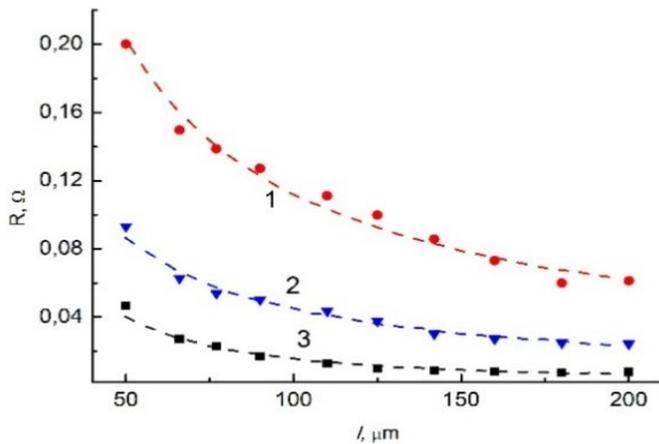


Рисунок 13 – Зависимости сопротивления  $R$  от ширины  $l$  канала, легированного алюминием; для различных температур  $T = 1273$  К (1), 1373 К (2) и 1473 К (3) процесса ТМ

Массивы сквозных линейных каналов  $p$ -типа шириной 100 мкм использованы для создания высоковольтных монолитных ФЭП. Измерения световых ВАХ отдельных каналов ФЭП проводились в соответствии со стандартными методами через контакты, отмеченные на рисунке 14. Запись кривых  $P$ - $V$  фототока как отдельных каналов, так и от монолитного модуля проводилась на имитаторе импульсного солнечного излучения.

Условия измерения соответствовали атмосферной массе AM 1,5D, плотность мощности падающего излучения составляла  $1000 \text{ Вт/м}^2$ , сопротивление нагрузки –  $10 \text{ Ом}$ .

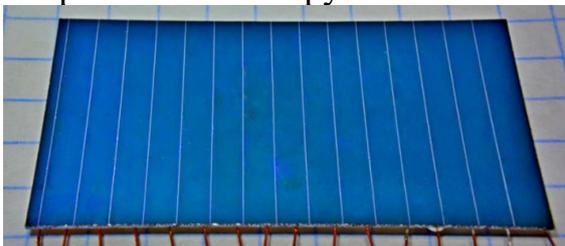


Рисунок 14 – Фотография ФЭП с вертикальными каналами: внизу фотографии видны контакты для подключения контактов

Измерены плотность тока короткого замыкания  $J_{sc}$ , напряжение разомкнутой цепи  $U_{oc}$  и коэффициент полезного действия  $E_{ff}$  отдельных ячеек ФЭП в зависимости от угла отклонения каналов в ячейке от нормали. Из 15 элементов три демонстрируют высокую эффективность, остальные, в которых угол  $\alpha$  больше 10 градусов – низкую.

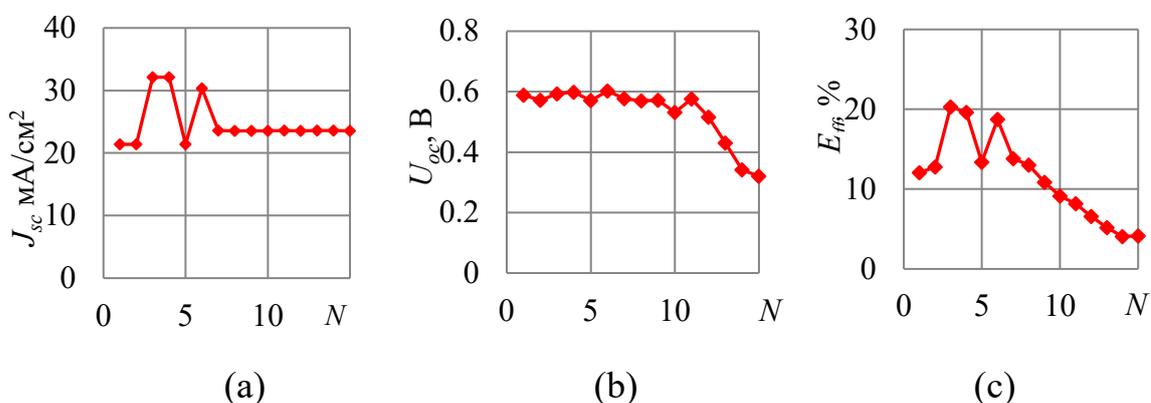


Рисунок 15 – Ток короткого замыкания  $J_{sc}$  (a), напряжение разомкнутой цепи  $U_{oc}$  (b) и коэффициент полезного действия (c) для отдельных солнечных элементов несовершенного модуля (мощность излучения  $1000 \text{ Вт/м}^2$ ,  $T_{sc}=25^\circ\text{C}$ )

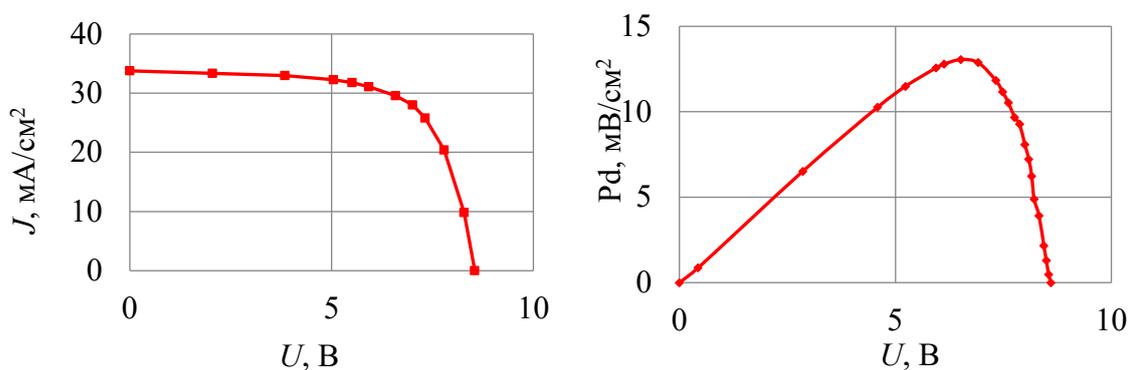


Рисунок 16 – Характеристики  $I-U$  (a) и  $P-U$  (b) для монолитных ФЭП при мощности излучения  $1000 \text{ Вт/м}^2$

На рисунке 16 приводятся достигнутые характеристики высоковольтного ФЭП, полученные на разработанном термическом узле, включая профилирование нагревательного элемента.

Управление процессом ТМ системой дискретных жидких зон на пластинах большой площади, в частности, получение заданных размеров ширины каналов и расстояния между ними, предоставляет возможность создания эффективных ФЭП. Повышение эффективности преобразования таким ФЭПом солнечной энергии в электрическую обеспечивается благодаря оптимальным расстояниям между вертикальными *p-n*-переходами структуры в диапазоне от одной до двух диффузионных длин неравновесных носителей тока в *p*- и *n*-областях.

Предложенный ФЭП получен на основе пластины кремния *n*-типа проводимости с удельным сопротивлением 10 Ом·см, в которой с помощью заданной конфигурации зон на основе алюминия сформирована система соединенных между собой вертикальных сквозных эпитаксиальных каналов *p*-типа проводимости с удельным сопротивлением 0,01–0,05 Ом·см. Диффузионная длина дырок в исходной кремниевой пластине *n*-типа проводимости  $\sim 250$  мкм, а в каналах *p*-типа проводимости — диффузионная длина электронов  $\sim 20$  мкм. Моделирование такого ФЭП показывало, что эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую достигает 20%.

**В заключении** сформулированы основные выводы диссертационной работы:

1. На основе анализа научно-технической литературы установлено, что метод ТМ является перспективным для легирования микрообластей в пластине полупроводника. Практическое применение метода сдерживается недостаточной изученностью сложных процессов, определяющих и сопровождающих миграцию жидких зон.
2. Развита известная методика формирования дискретных зон избирательным смачиванием расплавом алюминия и галлия поверхности кремния, а также предложены и разработаны новые методики формирования зон галлия с помощью окисленного пористого кремния и порошкообразного галлия.
3. Установлено, что применение перфорированного ОПК плотностью 75% в качестве маскирующего покрытия при избирательном смачивании сильнолегированного (более  $10^{17}$  см<sup>-3</sup>) кремния алюминий-галлиевым расплавом, позволяют формировать систему дискретных зон толщиной 30–50 мкм и шириной 100–200 мкм.
4. Найдены условия воспроизводимого формирования галлиевых дискретных зон толщиной 30–50 мкм с помощью твердого галлия в порошкообразной форме.
5. Экспериментально установлено, что при использовании дискретных алюминий-галлиевых зон имеет место монотонное уменьшение скорости легирования каналов кремния при увеличении концентрации галлия в расплаве от 0 до 10 процентов (мас.) для температур в интервале 1320–1400К и увеличение скорости при температуре в интервале 1420–1520К.

6. Разработана нагревательное устройство, обеспечивающее достаточно однородное поле градиента температуры в пластине кремния диаметром не менее 100мм. На основе компьютерного моделирования предложено использование кольцевого утонения плоского резистивного нагревателя для компенсации тепловых утечек с периферии пластины кремния.
7. Высокоразрешающими методами рентгеновской дифрактометрии и топографии установлено структурное совершенство полученных микрообластей, легированных алюминием и галлием.
8. Изготовлены опытные структуры кремниевых высоковольтных ФЭП с использованием метода ТМ с эффективностью преобразования солнечной энергии 13,8% (AM 1,5D).

#### Список цитируемых источников

1. Лозовский, В. Н. Зонная перекристаллизация градиентом температуры полупроводниковых материалов / В. Н. Лозовский, Л. С. Лунин, В. П. Попов. – М.: Металлургия, 1987. – 232 с.
2. Пфанн, В. Дж. Зонная плавка / В. Дж. Пфанн. – М.: Металлургиздат, 1960. – 272 с.

#### Основные публикации по теме диссертационной работы:

– в научных рецензируемых изданиях из перечня ЮФУ:

- 1.1. Термомиграционные *p*-каналы: реальная структура и электрические свойства / Лозовский В. Н., Ломов А. А., Середин Б. М., Симакин С. Г., **Заиченко А. Н.**, Середина М. Б. // Электронная техника. Серия 2: Полупроводниковые приборы. – 2017. – № 2 (245). – С. 29-38;
- 1.2. Структурное совершенство и состав легированных галлием термомиграционных слоев кремния / А. А. Ломов, Б. М. Середин, **А. Н. Заиченко** [и др.] // Письма в Журнал технической физики. – 2020. – Т. 46, № 6. – С. 27-30; (англ. перевод: Structural Perfection and Composition of Gallium-Doped Thermomigration Silicon Layers / А. А. Lomov, В. М. Seredin, **А. N. Zaichenko** [et al.] // Technical physics letters. – 2020. – Vol. 46, Is. 3. – P. 279-282. – DOI 10.1134/S1063785020030268);
- 1.3. Формирование и структура термомиграционных кремниевых каналов, легированных Ga / А. А. Ломов, Б. М. Середин, **А. Н. Заиченко** [и др.] // Журнал технической физики. – 2021. – Т. 91, № 3. – С. 467-474; (англ. перевод: The Formation and Structure of Thermomigration Silicon Channels Doped with Ga / А. А. Lomov, В. М. Seredin, **А. N. Zaichenko** [et al.] // Technical Physics. – 2021. – Vol. 66, No. 3. – P. 453-460. – DOI 10.1134/S1063784221030178);

– в работах, опубликованных в научных изданиях из перечня ВАК:

- 2.1. Середин, Б. М. Формирование дискретных зон на основе алюминия для их термомиграции в кремнии / Б. М. Середин, В. П. Попов, **А. Н. Заиченко** // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2017. – № 1(58). – С. 7-13;

2.2. Влияние галлия и олова на процесс термомиграции жидких зон на основе алюминия в кремнии / В. П. Попов, Б. М. Середин, **А. Н. Заиченко**, П. Б. Середина // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2017. – № 5 (62). – С. 39-45;

– в полученном патенте на полезную модель и свидетельстве о государственной регистрации программы для ЭВМ:

3.1. Патент на полезную модель 215917 U1 Российская Федерация, МПК H01L 31/00. Полупроводниковый фотоэлектрический преобразователь: № 2022127342 : заявл. 21.10.2022 : опубл. 10.01.2023 / Попов В. П., Середин Б. М., **Заиченко А. Н.**, Гаврус И. В. ; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова".

3.2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015661478 Российская Федерация. "Расчет распределения температуры и градиента температуры по образцу при использовании меандрового нагревателя переменной толщины" (Termomeander) : № 2015618792 : заявл. 15.09.2015 : опубл. 29.10.2015 / Б. М. Середин, Н. Ю. Архипова, **А. Н. Заиченко**

– в работах, опубликованные в журналах, индексируемых в наукометрической базе **Scopus**:

4.1. Precision silicon doping with acceptors by temperature gradient zone melting / Seredin B. M., Kuznetsov V. V., Lomov A. A., **Zaichenko A. N.**, Martyushov S. Yu. // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1400, No 4. – Art. No 044012. – DOI 10.1088/1742-6596/1400/4/044012;

4.2. Seredin, B. M. Optimizing conditions for formation of local zones for thermomigration in silicon / B. M. Seredin, V. P. Popov, **A. N. Zaichenko** // Solid State Phenomena. – 2017. – Vol. 265 SSP. – P. 839-844. – DOI 10.4028/www.scientific.net/SSP.265.839;

4.3. Seredin, B. M. Effects of  $p^+$ -Layer emitter profile of power diode structure on forward voltage / B. M. Seredin, N. V. Bykovsky, **A. N. Zaichenko** // Proceedings – 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020. – 2020. – Art. No 9112034.

#### **Прочие публикации:**

5.1. Середин, Б. М. Особенности легирования кремния методом термомиграции / Б. М. Середин, **А. Н. Заиченко**, М. Б. Середина // Мокеровские чтения : 8-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники, 24 мая 2017 года. : сборник трудов. – М.: НИЯУ МИФИ, 2017. – С. 68-69;

5.2. Расширение возможностей легирования кремния методом термомиграции / Б. М. Середин, В. В. Кузнецов, Э. Р. Рубцов, **А. Н. Заиченко**, М. Б. Середина // Оптика и спектроскопия

конденсированных сред : материалы XXIII международной конференции / Министерство образования и науки Российской Федерации, Кубанский государственный университет [и др. ; под науч. ред. В. А. Исаева, А. В. Лебедева]. – Краснодар : Кубанский государственный университет, 2017. – С. 85-88;

5.3. Свойства  $p$ -областей и  $p$ - $n$  переходов кремниевых фотопреобразователей, полученных методом термомиграции / Б. М. Середин, В. Н. Лозовский, А. А. Ломов, **А. Н. Заиченко** // Оптика и спектроскопия конденсированных сред : материалы XXIV международной конференции / Министерство образования и науки Российской Федерации, Кубанский государственный университет [и др. ; под научной редакцией В. А. Исаева, А. В. Лебедева]. – Краснодар : Кубанский государственный университет, 2018. – С. 332-337;

5.4. Локальное легирование галлием кремния методом термомиграции / Б. М. Середин, **А. Н. Заиченко**, А. А. Ломов, С. Г. Симакин // Оптика спектроскопия конденсированных сред : материалы XXV международной конференции / Министерство науки высшего образования Российской Федерации, Кубанский государственный университет [и др.] ; под науч. ред. В. А. Исаева, А. В. Лебедева. – Краснодар : Кубанский государственный университет, 2019. – С. 100-104;

5.5. Моделирование теплового поля градиентного нагревателя для термомиграции жидких зон в кремнии / Б. М. Середин, Н. Ю. Архипова, **А. Н. Заиченко**, П. Б. Середина // Новые материалы и технологии их получения: материалы IX Международной научно-практической конференции, г. Новочеркасск, 15 октября 2015 г. / Южно-Российский государственный технический университет (НПИ). – Новочеркасск : ЮРГПУ (НПИ), 2015. – С. 66-73.

5.6. Прецизионное легирование кремния акцепторами методом термомиграции / Б. М. Середин, В. В. Кузнецов, А. А. Ломов [и др.] // Физика.СПб : тезисы докладов международной конференции, 22-24 октября 2019 года. – Санкт-Петербург, 2019. – С. 375-376;

5.7. Электрические свойства кремниевых высоковольтных фотопреобразователей на основе сквозных термомиграционных каналов / Б. М. Середин, А. А. Ломов, **А. Н. Заиченко** [и др.] // Физика.СПб : тезисы докладов международной конференции, 18–22 октября 2021 года – Санкт-Петербург : Политех-Пресс, 2021. – С. 456-458;

5.8. Эффективная структура кремниевого фотоэлектрического преобразователя / Б. М. Середин, В. П. Попов, А. В. Малибашев [и др.] // Физика.СПб : тезисы докладов международной конференции, 17–21 октября 2022 года. — Санкт-Петербург : Политех-Пресс, 2022. — С. 386-387;

5.9. Применение локальной перекристаллизации кремния алюминием в фотовольтаике / Б. М. Середин, В. П. Попов, А. В. Малибашев [и др.] //

Мокеровские чтения : 14-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники, 24–25 мая 2023 года : сборник трудов / Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». – М.: НИЯУ МИФИ, 2023. – С. 146-147.

Личный вклад соискателя в опубликованных в соавторстве работах состоит в: проведении и систематизации натурального эксперимента по получению термомиграционно легированных микрообластей [1.1–1.3, 2.1–2.2, 5.1–5.9]; разработке, описании и реализации методик формирования жидких зон [1.3, 2.1, 4.2]; компьютерном моделировании теплового поля с использованием разработанной программы Termomeander и анализе результатов [5.5], составлении алгоритма расчета конфигурации теплового поля и программирования [3.2]; разработке структуры высоковольтного фотоэлектрического преобразователя [3.1, 5.8], проведении металлографического анализа и электрофизических исследований [5.1–5.4, 5.6, 5.7].

Заиченко Александр Николаевич  
Физико-технологические основы термомиграционного легирования  
микрообластей в объеме кремния акцепторными примесями  
Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук.

Подписано в печать  
2023