

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу *Заиченко Александра Николаевича* «**Физико-технологические основы термомиграционного легирования микрообластей в объёме кремния акцепторными примесями**», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.3– Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники.

1. Актуальность темы диссертационной работы

Современные интегральные микросхемы изготавливают при формировании гетероструктур на поверхности монокристаллической подложки, как правило, методами газотранспортной эпитаксии и твердофазной диффузии. Контролируемое легирование на заданную глубину подложки в виде каналов позволит расширить функциональные возможности микросхем. Известен метод термомиграции, обеспечивающий легирование микрообъемов полупроводниковых монокристаллов. Однако для такого легирования каналы должны иметь заданную форму, перпендикулярность поверхности пластины и однородное распределение легирующих компонентов. Диссертационная работа *Заиченко А. Н.* посвящена исследованиям и разработке технологических условий термомиграционного легирования заданных микрообластей в пластинах кремния диаметром до 100 мм акцепторными добавками для применения в производстве микросхем и является **актуальной** для современной науки, что подтверждается выполненными научно-исследовательскими работами по научному направлению ЮРГПУ (НПИ) «Полупроводниковые структуры и приборы электронной техники».

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность и новизна

При выполнении диссертационной работы автором проведены исследования и разработаны физико-технологические основы термомиграционного легирования алюминием, галлием и их сплавами пластин кремния диаметром 100 мм для создания сквозных каналов с концентрацией акцепторов до $4 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Для реализации метода термомиграционного

легирования разработаны методики формирования дискретных зон избирательным смачиванием поверхности пластины кремния расплавом алюминий-галлий. Установлен эффект изменения скорости термомиграционного легирования пластин кремния в области температур 1320–1520 К, влияющий на конфигурацию легированных микрообластей. Продемонстрировано высокое совершенство структуры сквозных каналов, обеспечивающее создание электронных приборов с низкими токами утечки и высокими пробивными напряжениями. Предложена конструкция фотоэлектрического преобразователя со сквозными вертикальными термомиграционными *p*-каналами и *p-n*-переходами, что обеспечило повышение электрофизических свойств и эффективности преобразования энергии.

3. Практическая значимость результатов работы для науки и производства

Полученные А. Н. Заиченко новые сведения о разработке метода термомиграционного легирования за счет создания жидких алюминий-галлиевых зон в подложках кремния для получения легированных сквозных каналов, контролируемое введение концентрации акцепторов в эти каналы при изменении состава алюминий-галлиевых областей, определение скорости роста и диапазона температур для воспроизводимого получения термомиграционных зон, изготовление экспериментальных структур фотоэлектрических преобразователей с заданными параметрами, которые использованы для усовершенствования процессов легирования и специального термического оборудования на двух предприятиях АО «ВЗПП-Микрон» и АО «Сатурн».

4. Общая характеристика работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 129 страниц с 57 рисунками и 2 таблицами. Список литературы содержит 142 наименования.

Во введении диссертант обосновывает актуальность работы, сформулированы цель диссертации, ее задачи, научная новизна и практическая значимость. Также изложены методология и методы исследования, степень разработанности темы исследований. Приводятся данные по апробации работы.

В первой главе представлен литературный обзор, включающий общие характеристики термомиграционного метода легирования, результаты исследований кинетики и стабильности, достоинства и недостатки методик реализации данного метода в управлении уровнем легирования микрообластей

акцепторной примесью. Рассмотрены применения метода термомиграционного легирования с использованием дискретных зон в технологии полупроводниковых приборов, термическое оборудование и сформулированы задачи исследований.

Во второй главе описаны методика формирования дискретных зон на поверхности пластины кремния с использованием металла растворителя галлия, сплавов Al-Ga и маскирующего покрытия SiO_2 , полученного термическим испарением в атмосфере влажного кислорода. Предложено использование пористого кремния в качестве маскирующего покрытия, окисленного при температуре 1370–1390 К, толщиной 30–50 мкм с плотностью 75%. Для преодоления ограничений по удельному сопротивлению областей легирования разработан метод формирования дискретных зон с помощью порошкообразного галлия на кремниевых пластинах *n*-типа. Выбор методики обусловлен требованиями к легированным зонам в зависимости от задач изготовления электронных приборов.

В третьей главе представлены результаты усовершенствования нагревательного устройства для термомиграции с использованием математического моделирования. Основным требованием к нагревательному устройству является создание тепловых условий с однородным полем градиента температуры, перпендикулярного поверхности пластины. Разработанное нагревательное устройство для пластин кремния диаметром до 150 мм конструктивно выполнено в виде плоской графитовой спирали, обеспечивающей снижение тепловых потерь на периферии пластины за счет создания специальной кольцевой области перегрева, называемой охранным кольцом. Данное устройство позволяет проводить процесс термомиграции при температурах 1270–1570 К с градиентами температуры 40–60 К/см. Исследование кинетики термомиграции жидких зон позволило выявить уменьшение скорости легирования каналов при увеличении концентрации галлия до 10 мас.% в расплаве при температурах 1300–1400 К и увеличение скорости в области температур 1400–1520 К. Выполненные автором исследования позволили разработать технологический процесс термомиграционных *p*-каналов.

В четвертой главе приведены результаты исследований совершенства структуры и свойств термомиграционно легированных алюминием и галлием микрообластей в виде сквозных каналов *p*-типа проводимости в пластине кремния. Установлено, что разработанная технология обеспечила изготовление

монокристаллических каналов с заданным распределением легирующих компонентов. Измерение вольт-амперных характеристик свидетельствует об эквивалентности свойств встречных $n-p$ и $p-n$ переходов, что обеспечивает заданные их характеристики. Изготовленные массивы сквозных линейных p -каналов шириной 100 мкм использованы для создания высоковольтных фотоэлектронных приборов. Полученный фотоэлектронный прибор на пластине кремния с системой соединенных между собой вертикальных каналов p -типа проводимости позволит увеличить на 20% эффективность преобразования солнечной энергии.

В заключении работы приведены новые полученные результаты диссертационной работы.

5. Основные замечания и вопросы по работе

1. В главе 3 приведено схематическое изображение охранного кольца нагревателя, которое помогает компенсировать снижение температуры на периферии пластины кремния, способствуя повышению однородности температурного поля. Принцип выравнивания температурного поля состоит в создании кольцевой проточки на поверхности нагревателя, которая обеспечивает локальное по кольцу увеличение температуры. Компьютерным моделированием определены градиенты температуры в пластине кремния. Рис. 3.76 не понятен вследствие того, что в его подписи не указаны обозначения температурных полей или градиентов температуры. Кроме того, на рис. 3.1 показано устройство с вертикальным расположением пластины в камере установки «РЕДМЕТ-8». Такое крепление пластины с нагревателем способствует возникновению градиентов температуры в области нагрева пластины. Это обусловлено тем, что периферийная область пластины расположена на различных расстояниях от водоохлаждаемых стенок камеры установки роста. Такая разность расстояний влияет на температурное поле нагревателя, пластины и внутренней поверхности камеры. В результате возникают неоднородные градиенты температуры в области нагрева. Кроме того, камера имеет отверстие для откачки воздуха, что также может влиять на тепловые потоки от нагревателя к стенкам камеры. Поэтому для подтверждения расчетных параметров температуры теплового поля желательно, кроме расчета, определить температуры на пластине экспериментально.
2. В главе 4 (4.2, 4.3) не приведены погрешности измерений электрофизических параметров.

3. В тексте диссертации имеются опечатки на с. 6, 9, 11 («пяти» глав и в автореферате), 12, 68, 82.

4. Выводы к главе 4 написаны недостаточно ясно.

Указанные недостатки не снижают общей значимости диссертационной работы Заиченко Александра Николаевича «Физико-технологические основы термомиграционного легирования микрообластей в объеме кремния акцепторными примесями», которая представляет собой завершённое научное исследование на актуальную тему.

6. Заключение о соответствии диссертационной работы критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет» (далее – Положение) и паспорту научной специальности 2.2.3 – Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники.

Диссертация А. Н. соответствует критериям Положения, которым должны отвечать диссертации на соискание ученых степеней в ЮФУ, в частности, пункту 2.1, поскольку диссертация содержит новые научно обоснованные технологические решения и разработки, имеющие важное теоретическое и практическое значения для создания физико-технологических моделей и процессов, исследования и моделирования функциональных характеристик усовершенствованного оборудования для производства материалов и приборов электронной техники. Диссертационная работа соответствует пунктам 2.2–2.5 Положения и обладает внутренним единством, логично построена, содержит новые научные результаты, ее структура и содержание соответствует заявленной цели исследования. Достоверность полученных результатов подтверждается большим объемом статистически значимых экспериментальных данных, полученных с использованием взаимодополняющих современных методов. Основные научные результаты диссертации прошли апробацию и были представлены на российских и международных конференциях. Опубликовано три статьи из Перечня научных изданий ЮФУ, две статьи в научных рецензируемых изданиях рекомендованного перечня ВАК; патент РФ на полезную модель; свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Автореферат и опубликованные работы в полной мере отражают содержание диссертации. В связи с вышеизложенным, считаю, что Заиченко

Александр Николаевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.3 – Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники.

Официальный оппонент
Ведущий научный сотрудник
лаборатории космического
материаловедения ИК РАН – филиала
Федерального государственного
учреждения «Федеральный научно-
исследовательский центр
«Кристаллография и фотоника» РАН»,
доктор технических наук, научная
специальность 05.27.06 – Технология и
оборудование для производства
полупроводников, материалов и
приборов электронной техники,
профессор

Геннадий

Геннадий Николаевич Кожемякин

1.12.2023

Почтовый адрес:

Лаборатория космического материаловедения ИК РАН, Филиал ФГУ
«Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и Фотоника»
РАН»

248640, г. Калуга, улица Академическая, д. 8.

Тел. ++7-910-705-19-17

E-mail: genakozhemyakin@mail.ru

Подпись д.т.н., профессора Кожемякина Г.Н. заверяю:

Руководитель Лаборатории космического материаловедения ИК РАН
филиала ФГУ ФНИЦ «Кристаллография и Фотоника» РАН, к.ф.-м.н.

Супельняк С.И.

