

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, доцента Спивак Юлии Михайловны на диссертацию Заиченко Александра Николаевича: «Физико-технологические основы термомиграционного легирования микрообластей в объеме 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

Актуальность темы диссертации

Развитие полупроводниковой электроники ставит перед исследователями задачи по разработке перспективных технологий получения легированных гетерогенных структур с заданными свойствами. Одной из таких технологий является термомиграция, уникальные возможности которой позволяют получать легированные микрообласти высокого качества. Однако количество работ, посвященных получению таких микрообластей и на их основе структур кремния, а также исследованию их свойств весьма ограничено, что очевидно связано с трудностями практической реализации данного метода. В рецензируемой работе исследуются именно эти вопросы, поэтому актуальность темы исследования не вызывает сомнений.

Степень обоснованности научных положений,

Анализ диссертационной работы показал, что основные научные положения и выводы, сделанные Заиченко А.Н., теоретически и экспериментально обоснованы. Обоснованность выводов и заключений диссертанта основывается на корректной постановке задач, глубокой методической проработке порядка и последовательности исследований, а также всех проведенных экспериментов.

Исследование процесса термомиграции жидких зон и характеристик приборных структур проводили с привлечением современных методов диагностики, включая оптическую и сканирующую микроскопии и воль-

амперные измерения. Структурно-морфологические исследования выполнены с применением апробированных методик с применением рентгеновской дифрактометрии и топографии, атомно-силовой микроскопии. Для объяснения полученных результатов использованы методы физико-математического моделирования.

Научная новизна и достоверность результатов

Диссертантом получен ряд новых научных результатов, позволивших ему разработать научные основы технологии создания кремниевых высоковольтных фотопреобразователей с использованием сквозных вертикальных термомиграционных *p*-каналов. К наиболее значимым научным результатам, полученным впервые, являются:

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.

Научная новизна представленных результатов диссертационной работы не вызывает сомнений и имеет дальнейшую научную и практическую перспективу.

Достоверность полученных результатов подтверждается: согласованностью с результатами исследований других авторов, общенаучными основами процесса термомиграции; соответствием теории прикладным результатам диссертации; современными методами и оборудованием для экспериментальных исследований; эффективностью метода термомиграции, основанной на результатах исследований и разработок автора и использованием их различными предприятиями.

Практическая значимость работы состоит в реализации результатов теоретических и экспериментальных исследований для достижения возможности регулирования концентрации акцепторов в кремниевых термомиграционных каналах от $1 \cdot 10^{19}$ до $4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ за счет изменения состава алюминий-галлиевых зон. Впервые была показана возможность формирования с 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. Были изготовлены экспериментальные структуры ФЭП, состоящих из пятнадцати легированных микрообластей в объеме кремниевой подложки и имеющих: плотность тока короткого замыкания – $32,1 \text{ мА/см}^2$; напряжение холостого хода – 8,6 В; фактор заполнения ВАХ – 68,1; коэффициент полезного действия – 13,8 %

Значимость для науки и производства полученных результатов

Теоретическая значимость работы заключается в том, что на основе теоретических и экспериментальных исследований процесса миграции жидких зон в кремнии под действием градиента температуры соискателем установлены условия для воспроизводимой ТМ дискретных зон со скоростями от 400 до 1000 мкм в час, достигаемыми при температуре в диапазоне 1320–1520 К.

Полнота опубликования основных результатов работы в научной

печати и соответствие автореферата диссертации

Основные научные результаты опубликованы в 19 статьях 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 индексируются в наукометрической базе Scopus. Автореферат отражает основные научные положения диссертации.

Замечания по диссертационной работе

1. Описание математической модели, используемой для построения распределения нормального G_n и тангенциального G_t градиентов температуры приведено очень кратко. Не указано, каким методом осуществлялся процесс моделирования, а также как осуществлялось построение сетки, используемой при моделировании. Как следствие, сложно оценить результат моделирования.
2. Ссылка на рисунок 3.13 некорректна. Разработанный технологический процесс создание ТМ микрообластей на основе сквозных каналов приводится на рисунке 3.12. Кроме того сам технологический процесс не детализован и малоинформативен.
3. На рисунке 4.2 приводится пять зависимостей, при этом в легенде описаны присутствует только четыре.
4. Имеет место несовпадение стилей оформления подрисуночных надписей.
5. В работе заявлено о разработке конструкции нагревательного устройства на основе плоской графитовой дисковой спирали, однако на рисунке 3.1 показано устройство с нагревательным элементом иной формы.

Заключение

Диссертация Заиченко А.Н. является законченной научно-квалификационной работой. Она соответствует паспорту специальности 2.2.3 «Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники», а также Положению о присуждении ученых степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет». Автор

