

“УТВЕРЖДАЮ”

Директор ~~Федерального государственного бюджетного учреждения науки~~ ~~Института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН (ИПТМРАН)~~ ~~Института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН (ИПТМРАН)~~

~~д.ф.мн.~~ Д.В. Рошупкин

22“ февраля 2022 года

### ОТЗЫВ

ведущей организации – **Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук на диссертационную работу**

**Данилова Дениса Васильевича**

**«Электрофизические и рекомбинационные свойства дефектов в кремнии, имплантированном ионами кислорода», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.11 — «физика полупроводников»**

Актуальность диссертационной работы Данилова Д.В., посвященной выявлению особенностей электрических и рекомбинационных свойств кислородных преципитатов, а также сопутствующих дефектов, формируемых после высокотемпературных термообработок кремния, имплантированного кислородом, обусловлена тем, что кислород в кремнии не только всегда присутствует в кремнии в довольно больших концентрациях, но в значительной степени определяет механические свойства, а преципитаты кислорода широко используются для геттерирования нежелательных примесей. Электрические свойства преципитатов кислорода в настоящее время далеки от полного понимания, что определяется как многообразием форм преципитатов, так и тем, что их формирование, как правило, сопровождается генерацией других точечных и протяженных дефектов. В связи с вышесказанным, актуальность темы диссертационной работы не вызывает сомнений.

Диссертационная работа Данилова Д.В. состоит из введения, литературного обзора, описания методов исследования, трёх глав, в которых представлены экспериментальные результаты, заключения, списка сокращений, благодарностей и списка литературы. Диссертация содержит 136 страниц с 43 рисунками, 2 таблицами и списком литературы из 252 наименования.

Во введении диссертации описана актуальность выбранной темы, сформулированы цели и задачи исследования, указаны научная новизна и личный вклад автора, представлены защищаемые положения и апробация работы.

Первая глава посвящена классификации и свойствам дефектов в решётке кремния. Глава начинается с описания возможных электронных уровней, привносимых дислокациями в запрещённую зону кремния. Далее автор переходит к описанию кислородсодержащих комплексов в кремнии, среди которых особое внимание уделяется кислородным преципитатам. Глава завершается описанием процесса ионной имплантации кислорода в кремний, где рассматривается распределение по глубине имплантированных ионов и радиационных дефектов при ионной имплантации, а также влияние постимплантационного отжига на формируемую дефектную структуру.

Во второй главе представлены использованные в работе экспериментальные методы. Сначала описываются электрофизические методы исследования, включая анализ дифференциальной емкости области пространственного заряда, а также нестационарная емкостная и токовая спектроскопия глубоких уровней. Далее приводится описание методов просвечивающей электронной микроскопии, а также сканирующей электронной микроскопии в режиме тока, индуцированного электронным пучком, а также методы электролюминесценции и катодолуминесценции.

В третьей главе приводятся экспериментальные результаты исследований влияния температуры отжига на состав и свойства дефектов. В начале главы приводится описание образцов. После этого автор анализирует данные просвечивающей электронной микроскопии, а также результаты исследования электрофизических характеристик, из которых сделан вывод о присутствии положительного заряда в образцах. На основании сопоставления данных о связи заряда и размеров преципитатов автор приходит к предположению о локализации обнаруженного положительного заряда на оболочках преципитатов. Глава заканчивается обсуждениями и выводами.

Четвёртая глава посвящена исследованию дефектной структуры, формируемой при  $700^{\circ}\text{C}$  отжиге кремния, имплантированного кислородом, т.е. преципитатов, сформированных на начальной стадии роста. В начале главы приведены данные, полученные методами просвечивающей электронной микроскопии, вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик. На основании представленных данных делается вывод о формировании энергетического барьера для основных носителей заряда в области имплантации за счет захвата электронов на уровни, связанные с протяженными дефектами. Далее приводятся результаты исследования глубоких уровней в запрещенной зоне кремния. На основании сопоставления вышеперечисленных результатов автор делает

вывод о локализации барьера на дальней от поверхности границе области имплантации. Глава оканчивается рассмотрением результатов токовой нестационарной спектроскопии, описанием модели эмиссии носителей с акцепторных состояний, формирующих энергетический барьер и выводами к главе.

Пятая глава посвящена исследованию свойств дефектов, формируемых при многостадийных отжигах кремния, имплантированного ионами кислорода, что приводило к формированию сравнительно больших кислородных преципитатов. Глава начинается с описания образцов, включая анализ дефектной структуры, исследованной при помощи просвечивающей электронной микроскопии. После этого приводятся результаты электрофизических исследований, включающие распределение положительного заряда и глубоких уровней дефектов в области имплантации. Глава заканчивается обсуждением люминесцентных особенностей дефектов в области имплантации. По окончании главы приводятся основные выводы.

В заключении описаны основные результаты работы и выводы.

Достоверность результатов, полученных в работе подтверждается использованием широкого набора экспериментальных методов, тщательным анализом данных, полученных электрофизическими, оптическими и микроскопическими методами исследования, корреляцией экспериментальных данных образцов со схожими условиями термообработки, сопоставлением результатов с известными экспериментальными и теоретическими литературными данными, а также представлением полученных результатов на множестве российских и международных конференциях, а также в периодических изданиях.

Научная новизна работы определяется тем, что в ней представлены новые данные о строении и свойствах кислородных преципитатов в имплантированном кислородом кремнии, среди которых можно выделить следующие:

1. Показано, что использованные в работе многостадийные термообработки позволяют получать структуры с пространственным разделением дефектов разного типа, что, в свою очередь, позволило выделить характерные свойства дефектов каждого типа. В частности, на основании этого было выявлено различие спектров люминесценции небольших кислородных агломератов в окрестности дислокаций и кислородных преципитатов размерами несколько десятков нанометров.

2. Показано, что с кислородными преципитатами связан положительный заряд, и величина этого заряда изменяется обратно пропорционально радиусу преципитатов при неизменной концентрации кислорода в исследуемой области.

3. Показано, что в результате  $700^{\circ}\text{C}$  отжига кремния, имплантированного кислородом на дальней от поверхности границе области имплантации образуется слой наноразмерных дефектов, проявляющих акцепторные свойства. Сравнение литературными данными, а также, то, что эти дефекты формируются в области, обогащенной междоузельными дефектами, позволило связать их с линейными междоузельными дефектами.

Результаты, выводы и основные положения, выносимые на защиту, в достаточной степени обоснованы, базируются на всестороннем анализе исследуемой проблемы и сравнении результатов с литературными данными по теме работы.

Автореферат соответствует основному содержанию и выводам диссертации. Публикации соискателя в полной мере отражают наиболее значимые моменты проведённых исследований.

В то же время следует высказать ряд замечаний к рецензируемой работе:

1. Прежде всего, следует отметить недостаточно четкую постановку задачи исследований, в частности, не отмечены достоинства и недостатки использованного метода повышения концентрации кислорода путем ионной имплантации по сравнению с обычно используемыми методами роста кислородных преципитатов при отжиге кремния, выращенного методом Чохральского.

2. Было бы полезно обсудить, относятся ли исследованные свойства протяженных дефектов к частному случаю ионной имплантации, при которой наряду с кислородом вводится много собственных точечных дефектов, или они имеют более общий характер.

3. Протяженные дефекты, а конкретно, преципитаты кислорода эффективно геттерируют примеси переходных металлов, что может существенно влиять на электрические свойства этих дефектов. В связи с этим, было бы важно знать примесный состав исследованных образцов

4. Измеренные DLTS спектры уширены, как это обычно и наблюдается в случае протяженных дефектов. Однако в этом случае определение энергий активации из кривых Аррениуса не всегда корректно.

5. Было бы интересно провести детальное сравнение свойств сформированных в работе дефектов со свойствами кислородных преципитатов, полученных при отжиге кремния, выращенного методом Чохральского, тем более, что в работе используются схожие режимы термообработок.

6. В п.2 положений, выносимых на защиту, указано, что встроенный положительный заряд "объясняется локализацией этого заряда в оболочках преципитатов, обладающих нестехиометрическим составом". По-видимому, правильнее было бы написать, что это объясняется в рамках предположения о локализации и т.д.

7. Следует сделать замечания и по оформлению работы. Так пропущена формула 2.21. Трудно найти определение  $\chi_d$ . Литературный обзор охватывает слишком широкий круг вопросов, в том числе слабо связанных с тематикой диссертации, и в результате содержит некоторые спорные утверждения. В работе содержатся грамматические ошибки.

В целом указанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы. Теоретическая, практическая и научная значимость работы, а также достоверность представленных результатов не вызывают сомнения. Работа

Данилова Д.В. выполнена на высоком уровне, проведен большой объем исследований, результаты работы прошли апробацию на российских и международных конференциях и семинарах, а также опубликованы в международных периодических изданиях.

Можно констатировать, что диссертационная работа Данилова Д.В. «Электрофизические и рекомбинационные свойства дефектов в кремнии, имплантированном кислородом» соответствуют всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.11 «Физика полупроводников» согласно Положению о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, а её автор заслуживает присуждения ему искомой ученой степени по специальности 01.03.11 – «Физика полупроводников».

Диссертационная работа Д.В. Данилова рассмотрена и обсуждена на семинаре Материаловедение и технология ИПТМ РАН. Отзыв утвержден на заседании Ученого Совета ИПТМ РАН (протокол № 2 от 21 февраля 2022 г.).

Отзыв подготовил:

Доктор физико-математических наук,

г.н.с. ИПТМ РАН

Е.Б. Якимов

Руководитель семинара:

Доктор физико-математических наук,

г.н.с. ИПТМ РАН

Е.Б. Якимов

телефон: (49652) 44161.

e-mail: [yakimov@iptm.ru](mailto:yakimov@iptm.ru)

Подпись Якимова Е.Б. **ЗАВЕРЯЮ**

Ученый секретарь ИПТМ РАН

к. физ.-мат. наук

Феклисова О.В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук.

142432, Московская обл., г.Черноголовка, ул.Академика Осипьяна, д.б.

Тел. +7 (496) 524-40-60