

ОТЗЫВ

официального оппонента, д.ф.-м.н., заведующего лабораторией «Диффузия и дефектообразование в полупроводниках» Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук Заморянской Марии Владимировны на диссертационную работу Данилова Дениса Васильевича «Электрические и рекомбинационные свойства дефектов в кремнии, имплантированном ионами кислорода» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.11 - физика полупроводников

Актуальность. Кремний остается основным материалом современной электроники и вряд ли будет заменен в ближайшем будущем. Кислород является основной примесью в кремнии, его содержание может достигать $10^{16} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в зависимости от способа его выращивания и степени очистки. При высоком содержании кислорода и при различных способах его термообработки кислород может образовывать преципитаты, которые существенно влияют на свойства пластин. Они приводят к образованию глубоких уровней в запрещенной зоне кремния, формированию потенциальных барьеров, влияют на рекомбинационные свойства материала. Кроме того, преципитаты кремния могут способствовать сегрегации примесей. Это свойство дает возможность использовать их для очистки кремния. Несмотря на большую роль примеси кислорода в кремнии, многие вопросы до настоящего времени недостаточно исследованы. К этим вопросам относятся связь размера и состава преципитатов, влияние на них термической обработки, изменение электронной структуры и рекомбинационных свойств кремния в зависимости от размера и концентрации кислородных преципитатов. Для более детального исследования влияния кислорода на структуру, размер и концентрацию кислородных преципитатов автором работы исследовался кремний, дополнительно имплантированный кислородом. Это позволило управлять распределением содержания кислорода в пластинах кремния, исследовать связь процессов образования кислородных преципитатов с формированием протяженных дефектов. В связи с этим тема диссертационной работы, посвящённой исследованию влияния преципитатов кислорода на оптические и электрические свойства кремния, является актуальной.

Достоверность полученных результатов.

Достоверность полученных результатов обоснована тем, что полученные теоретические и экспериментальные результаты и выводы соответствуют современным представлениям физики твердого тела. Для интерпретации результатов привлекались ранее хорошо обоснованные теоретические положения. Эксперименты проводились на

новейшем оборудовании. При исследовании материалов использовался широкий набор современных методов, позволяющих с различных сторон исследовать состав, размер и содержание преципитатов, а также их влияние на электрические и рекомбинационные свойства кремния. Достоверность полученных результатов подтверждается также тем, что они были опубликованы в рецензируемых журналах и обсуждены на Всероссийских и Международных конференциях.

Научная новизна работы

В результате проведенной работы были получены следующие новые научные результаты:

-Показано, что при низкотемпературном отжиге (до 700°C) наблюдается образование небольших зародышей кислородных преципитатов вблизи поверхности и междоузельных кремниевых дефектов в области глубже торможения кислорода при имплантации.

-Кислородные преципитаты размерами порядка 50 нм образуют полосу состояний в верхней половине запрещенной зоны и характеризуются широкой люминесцентной полосой 0,82 – 0,87 эВ.

-Установлено, что кислородные преципитаты обладают положительным зарядом и его величина уменьшается с увеличением размера преципитатов.

-Обнаружено образование барьера на тыльной стороне имплантированного слоя, который вызван заполнением глубоких уровней дефектов, связанных с междоузельным кремнием.

Практическая значимость работы.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке и оптимизации технологий в современной микроэлектронике для получения слоев с заданной электронно-дырочной проводимостью и рекомбинационной активностью. Методики, разработанные в диссертации, могут быть использованы для исследования неоднородных по глубине материалов.

При прочтении диссертации у оппонента возникло несколько вопросов и замечаний.

1. На странице 57 диссертации представлены изображения кислородных преципитатов с использованием метода ПЭМ. Однако для каждого образца использовались различные условия получения изображения. Это не позволяет в процессе прочтения сравнивать изменения дефектов и размера преципитатов в различных образцах.

2. При оценке размеров преципитатов и их концентрации не указано, какое количество исходных данных было обработано, на основании какого количества преципитатов были сделаны выводы.

3. В работе продемонстрированы подробные исследования нескольких серий образцов различными методами, однако, для получения представления о влиянии кислородных преципитатов на электрические и рекомбинационные свойства было бы полезно сравнивать их с не имплантированными образцами

Отмеченные вопросы и замечания не снижают общего очень хорошего впечатления от работы.

Текст автореферата достаточно полно отражает содержание диссертации.

Изучение материалов кандидатской диссертации Данилова Д.В. показало, что диссертационная работа является законченным и оригинальным исследованием. Результаты работы могут иметь теоретическую и практическую ценность. Представленная к защите диссертация полностью отвечает всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Данилов Денис Васильевич заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – «Физика полупроводников».

д.ф.-м.н., заведующий лабораторией «Диффузия и дефектообразование в полупроводниках»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26

Тел. (812) 297-2245, e-mail: zam@mail.ioffe.ru

Заморянская Мария Владимировна

06.03.2022