

**Отзыв на автореферат диссертационной работы**  
**Данилова Дениса Васильевича**  
**«Электрофизические и рекомбинационные свойства дефектов в кремнии,**  
**имплантированном ионами кислорода»,**  
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.03.11 — «физика полупроводников»

Кремний является основным материалом для изготовления устройств современной микроэлектроники и фотовольтаики. Дефекты, как присутствующие в промышленно выращиваемых монокристаллах кремния, так и создаваемые в процессе изготовления устройств, существенно влияют на свойства последних. Поэтому на изучение дефектов направлены значительные усилия. Основным сырьём для изготовления монокристаллов кремния является его диоксид, что приводит к наличию большой концентрации кислорода в готовых пластинах. Кислород как примесь образует в кремнии различные дефекты, одним из которых являются кислородные преципитаты, представляющие собой объёмные включения оксида кремния. Такие преципитаты влияют на электрические и механические свойства кристаллов. Также они могут служить в качестве геттера инородных примесей, что активно применяется в технологиях микроэлектроники для очистки рабочего объема пластин кремния. В то же время, электронные свойства кислород-содержащих дефектов, в том числе кислородных преципитатов, весьма непредсказуемым образом зависят от их формы, размеров и условий получения. Поэтому диссертационная работа Данилова Д.В., посвященная систематическому изучению электрических и рекомбинационных свойств дефектов, формируемых в результате высокотемпературных термообработок модельного объекта - кремния, имплантированного кислородом, является актуальной и современной.

Изучение дефектов, формирующихся в ходе отжига при температуре 700 С является весьма нетривиальной задачей ввиду того, что при данной температуре происходит активная трансформация комплексов точечных дефектов в протяжённые. В случае кислородной примеси имеет место образование зародышей кислородных преципитатов – одной из самых неизученных стадий их развития. В работе представлено большое количество новых результатов экспериментальных исследований электрофизических, рекомбинационных и структурных свойств кислородных преципитатов в кремнии, представлена модель возникновения заряда кислородных преципитатов. Предложена и опробована методика выделения вкладов центров излучательной рекомбинации, локализованных на различной глубине полупроводниковой пластины. Одним из основных результатов работы является обнаружение и объяснение необычного поведения эмиссии носителей с акцепторных состояний внутри области пространственного заряда диода Шоттки, образованных при отжиге кремния, имплантированного кислородом.

При прочтении работы возникает **ряд вопросов и замечаний:**

1) В автореферате не описана процедура ионной имплантации, использованная для получения исследуемых образцов. Расчетные профили распределений концентраций имплантированных атомов кислорода, приведенные на рис.1 (а, б) и рис. 7 имеют довольно сложную форму и отличаются друг от друга. Это позволяет предположить, что имплантация проводилась в несколько этапов, последовательность которых может

существенно влиять на формируемые радиационные повреждения структуры кремния и на дефекты, образуемые при отжигах.

2) Не очень четко описана процедура термообработки образцов. Например, на стр. 13 автореферата упоминается «короткий 1000 °С гомогенизирующий отжиг», однако дальнейшая процедура многоступенчатого отжига не приведена.

3) В автореферате имеется ряд опечаток.

В то же время, приведенные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы. Представленные результаты прошли апробацию на множестве российских и международных конференциях, а также опубликованы в периодических изданиях, входящих в международные базы данных. Автореферат написан хорошим языком.

Считаю, 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».

Доктор физико-математических наук,  
профессор высшей инженерно-физической  
школы федерального государственного  
автономного образовательного учреждения  
высшего образования «Санкт-Петербургский  
политехнический университет Петра  
Великого»

Карасев Платон Александрович