

На правах рукописи

Колесникова Екатерина Владимировна



ФОРМИРОВАНИЕ НАНОКЛАСТЕРОВ КРЕМНИЯ В ДИОКСИДЕ  
КРЕМНИЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

01.04.10. – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2009

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук Заморянская Мария Владимировна

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,

Теруков Евгений Иванович

Учреждение Российской академии наук Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

доктор физико-математических наук, профессор

Барабан Александр Петрович

Санкт-Петербургский Государственный Университет

Ведущая организация – Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет

Защита состоится «21» января 2010 г. в 10.00 на заседании диссертационного совета Д. 002.205.02

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН

Автореферат разослан «18» декабря 2009 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д. 002.205.02

доктор физико-математических наук



Сорокин Л.М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность

С начала 60-х годов прошлого столетия и по сегодняшний день кремний остается основным полупроводниковым материалом микроэлектроники. В совершенстве отработаны методы получения, очистки и обработки монокристаллического кремния, а также планарная технология на его основе, используемая в производстве интегральных схем. В настоящее время традиционные полупроводниковые элементы микроэлектроники уже вплотную приблизились к физическим ограничениям по размерам активных элементов. Такой важнейший параметр, как быстродействие интегральных схем, лимитируется задержками, обусловленными сопротивлением и емкостями металлических межсоединений, общая длина которых резко возрастает с ростом степени интеграции. Эта проблема может быть решена путем замены электрических межсоединений оптическими. Соответственно, встает вопрос о возможности применения кремния в изготовлении интегральных схем, реализующих функции генерации, передачи и обработки электрических и оптических сигналов. Одним из способов решения данной проблемы является использование структур на основе наноразмерного кремния. В настоящее время не удастся создать структуры с достаточно интенсивной люминесценцией в видимом диапазоне, поэтому необходимы дальнейшие исследования в этой области.

Еще одна не менее важная проблема – это улучшение характеристик (уменьшение размеров, уменьшение рабочего напряжения и повышение надежности) элементов энергонезависимой памяти. Наиболее перспективным в данной области является использование нанокристаллов кремния, погруженных в тонкие диэлектрические слои.

В связи с этим были опробованы различные способы формирования нанокластеров кремния в аморфном диоксиде кремния: ионная имплантация с последующим отжигом,

отжиг осажденных  $\text{SiO}_x$  пленок и пр. Основными недостатками метода ионной имплантации являются сложность создания тонких слоев (менее 10 нм) с нанокластерами кремния и дороговизна оборудования. Метод осаждения из газовой фазы позволяет формировать тонкие пленки, но слои выращенные таким методом обладают высокой пористостью и низкой адгезией. В обоих методах для формирования нанокластеров кремния необходим последующий высокотемпературный отжиг. Также эти методы не позволяют изучать рост нанокластеров кремния *in situ*.

Соответственно, разработка нового метода роста нанокластеров кремния в объеме диоксида кремния и исследование изменения люминесцентных свойств при формировании нанокластеров кремния являются актуальными. Данная работа посвящена формированию нанокластеров кремния в аморфном диоксиде кремния под воздействием электронного пучка. Такой метод позволяет не только создавать нанокластеры кремния в облучаемом микрообъеме, но и контролировать изменения структуры аморфного диоксида кремния и процесс роста нанокластеров кремния методом локальной катодолюминесценции *in situ*.

**Целью диссертационной работы** являлось установление основных закономерностей процесса формирования нанокластеров кремния в аморфном диоксиде кремния под воздействием электронного пучка высокой удельной мощности.

Были поставлены следующие основные задачи:

1. Разработка метода формирования нанокластеров кремния в объеме диоксида кремния при облучении электронным пучком и исследования изменения катодолюминесцентных свойств облучаемого объема *in situ*.
2. Оценка температуры локального перегрева при облучении электронным пучком в объемном аморфном диоксиде кремния и пленках диоксида кремния.
3. Выявление основных этапов модификации аморфного диоксида кремния электронным пучком с разной удельной мощностью.

4. Исследование влияния количества точечных дефектов и примеси ОН-групп в исходном аморфном диоксиде кремния на процесс его модификации.

#### **Научная новизна**

- Впервые показана принципиальная возможность формирования нанокластеров кремния в аморфном диоксиде кремния под воздействием электронного пучка. Определены условия формирования нанокластеров кремния при модификации аморфного диоксида кремния электронным пучком. Получены распределения по размерам и структурные параметры нанокластеров кремния.
- Впервые проведена оценка температуры объемных стекол и тонких пленок диоксида кремния в области облучения электронным пучком.
- Впервые установлены пороговые значения параметров эксперимента. При превышении этих значений характер динамики катодолуминесцентных свойств диоксида кремния под воздействием электронного пучка принципиально изменяется.
- Впервые показано влияние ОН-групп в исходном диоксиде кремния на процесс модификации электронным пучком в аморфном диоксиде кремния.
- Впервые предложена модель формирования нанокластеров кремния в диоксиде кремния под воздействием электронного пучка.

#### **Научная и практическая значимость работы**

Научная значимость данной работы заключается в установлении основных закономерностей роста нанокластеров кремния в аморфном диоксиде кремния под воздействием электронного пучка. Практическая значимость работы определяется возможностью использовать предложенный метод роста нанокластеров кремния при создании элементов энергонезависимой памяти нового поколения. Данный метод роста совместим с современными планарными технологиями.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. При облучении аморфного диоксида кремния электронным пучком с плотностью тока более  $1 \text{ А/см}^2$  в диоксиде кремния формируются нанокластеры кремния. Нанокластеры кремния представляют собой монокристаллы с тетрагональной  $\beta\text{-Sn}$  структурой со средним размером 2-4 нм.
2. При плотности тока менее  $1 \text{ А/см}^2$  не происходит изменений в облучаемом объеме; при плотности тока от  $1 \text{ А/см}^2$  до  $3,5 \text{ А/см}^2$  – формируются точечные дефекты и нанокластеры кремния малых размеров (менее 4 нм); более  $3,5 \text{ А/см}^2$  – происходит формирование нанокластеров кремния (линейный размер около 4 нм), их рост и затем образование кластеров кремния с линейными размерами более 10 нм. Таким образом, выявлены два пороговых значения мощности облучения диоксида кремния электронным пучком.
3. Высокое содержание ОН-групп (более 1000 ppm) в исходном диоксиде кремния стимулирует формирование точечных дефектов и нанокластеров кремния в объеме диоксида кремния при более низких значениях плотности тока электронного пучка, чем в диоксиде кремния с низким содержанием ОН-групп. Нанокластеры в диоксиде кремния с низким содержанием ОН-групп имеют меньший размер (2 нм) и меньшее отклонение от среднего размера, чем нанокластеры кремния в диоксиде кремния с высоким содержанием ОН-групп.

### **Апробация работы**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах лаборатории диффузии и дефектообразования в полупроводниках Учреждения Российской академии наук Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН и в лаборатории физики диэлектриков и полупроводников института физики Университета г. Росток, Германия, а также на международных школах, конференциях и симпозиумах, в том числе:

Gettering and Defect Engineering in Semiconductor Technology г. Гьенс (Франция) 2005 г.;

8<sup>th</sup> International Workshop on Beam Injection Assessment of Microstructures in Semiconductors г. Санкт-Петербург (Россия) 2006 г.;

12<sup>th</sup> International Conference on Defects-Recognition, Imaging and Physics in Semiconductors г. Берлин (Германия) 2007 г.;

VI Международная конференция Кремний-2009 г. Новосибирск (Россия) 2009 г.;

25<sup>th</sup> International Conference on Defects in Semiconductors г. Санкт-Петербург (Россия) 2009 г.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 11 работ (7 статей в журналах, рекомендованных ВАК, и 4 тезиса докладов на конференциях), список публикаций приведен в конце автореферата.

### **Личный вклад**

Автором разработан метод формирования нанокластеров кремния в диоксиде кремния под воздействием электронного пучка, проведен расчет температуры перегрева облучаемого микрообъема, проведены катодлюминесцентные исследования диоксида кремния в процессе модификации электронным пучком, проведены расчеты параметров диффузии кислорода в диоксиде кремния, обработаны данные, полученные методом просвечивающей электронной микроскопии. Получение светлопольных, темнопольных изображений и микродифракции методом просвечивающей электронной микроскопии проводились А.А. Ситниковой.

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Работа содержит 112 страниц машинописного текста, включая 54 рисунка, 3 таблицы и библиографию из 98 наименований.

### Краткое содержание работы

**Во введении** дана общая характеристика работы, обоснована актуальность темы, определены цель и задачи исследований, изложена новизна и практическая ценность работы, сформулированы основные защищаемые положения.

**В первой главе** представлен обзор современных методов формирования нанокластеров кремния в объеме диоксида кремния, продемонстрированы их основные преимущества и недостатки.

Также в главе 1 представлен обзор люминесцентных свойств структур  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ . В табл. 1 приведены люминесцентные характеристики основных полос в видимом и ИК диапазоне структур  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ . Люминесцентные методы позволяют исследовать такие системы, а также выявлять изменение содержания точечных дефектов в диоксиде кремния, определять наличие нанокластеров кремния и крупных кремниевых включений.

**Во второй главе** описаны экспериментальные методы, используемые автором. Для облучения аморфного диоксида кремния использовался электронный пучок, формируемый в электронно-зондовом микроанализаторе CAMEBAX. Оборудование позволяло исследовать облучаемый объем методами локальной катодolumинесценции (КЛ) и рентгеноспектрального микроанализа в процессе модификации.

Для более подробного исследования нанокластеров кремния был использован метод просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Для этого были подготовлены тонкие пленки диоксида кремния. Модификация данных образцов проводилась на рентгеноспектральном микроанализаторе CAMEBAX. Затем на этих образцах методом ПЭМ



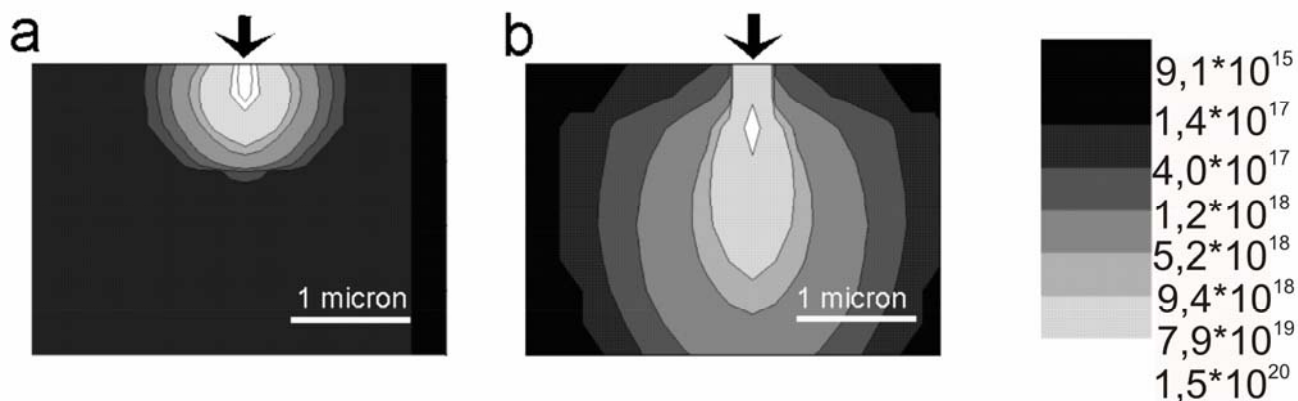
получали распределение по размерам образовавшихся нанокластеров кремния и данные о их структурной модификации.

Табл.1 Основные люминесцентные характеристики КЛ полос структуры  $SiO_2/Si$ .

Положение максимума интенсивности (эВ)	Полуширина (эВ)	Время затухания	Трактовка
1,15	0,12	–	Кристаллический объемный кремний [1]
1,3	0,15	–	Аморфный объемный кремний [2]
1,6-1,8	0,1	–	Нанокластеры кремния [3]
1,9	0,14	25 мкс	Немостиковый кислород [4]
2,1-2,3	0,2	8 мкс	Дефект =Si-Si= [5]
2,65	0,3	5 мс	Двухкоординированный атом кремния Si=Si [6]

Основной причиной изменения люминесцентных свойств аморфного диоксида кремния и формирования нанокластеров кремния является нагрев диоксида кремния из-за торможения электронов в облучаемой области. Для определения подходящих для модификации параметров электронного пучка была проведена оценка температуры перегрева при облучении аморфного диоксида кремния электронным пучком. Для этого был проведен расчет пространственного распределения энергетических потерь электронов с энергиями 5-20 кэВ по методу Монте-Карло (Рис. 1). В соответствии с литературными данными предполагалось, что более 80% энергии электронов тратится на формирование электрон-дырочных пар. Далее решалось уравнение теплопроводности при аппроксимации области генерации тепла полуэллипсоидом в случае объемного диоксида кремния и

цилиндром в случае пленки диоксида кремния. Было показано, что при рабочих режимах установки температура перегрева может варьироваться от нескольких градусов до 1200 °С. Также была проведена оценка температуры перегрева для тонких пленок диоксида кремния подготовленных для исследования просвечивающей электронной микроскопией. Показано, что при одинаковых параметрах электронного пучка для тонких пленок в вакууме температура перегрева в полтора-два раза выше, чем для объемных образцов.



*Рис. 1 Пространственное стационарное распределение энергетических потерь электронов ( $\text{эВ}/\text{мкм}^3\text{с}$ ), рассчитанное по методу Монте-Карло. Энергия электронов: а – 5 кэВ; б – 20 кэВ.*

**В третьей главе** представлены исследования процесса модификации аморфного диоксида кремния под воздействием электронного пучка с высокой удельной мощностью. Исследования проводились методами локальной катодлюминесценции и просвечивающей электронной микроскопии на тонких пленках подготовленных для ПЭМ. Как было показано в главе 2 при плотности тока  $2 \text{ А}/\text{см}^2$  температура перегрева превышает 1200 °С. При облучении аморфного диоксида кремния электронным пучком с такими параметрами происходит формирование области дефицита кислорода (по данным КЛ), затем формируются кластеры кремния (по данным КЛ и ПЭМ).

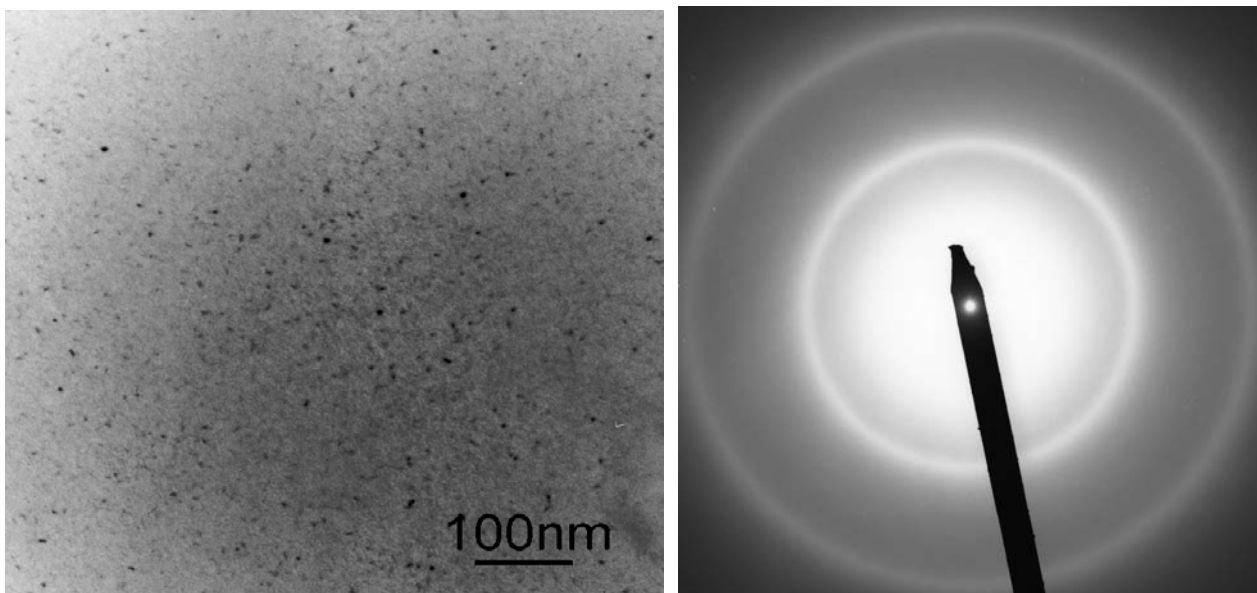


Рис. 2 ПЭМ изображение и микродифракция нанокластеров кремния, полученных в результате облучения диоксида кремния электронным пучком.

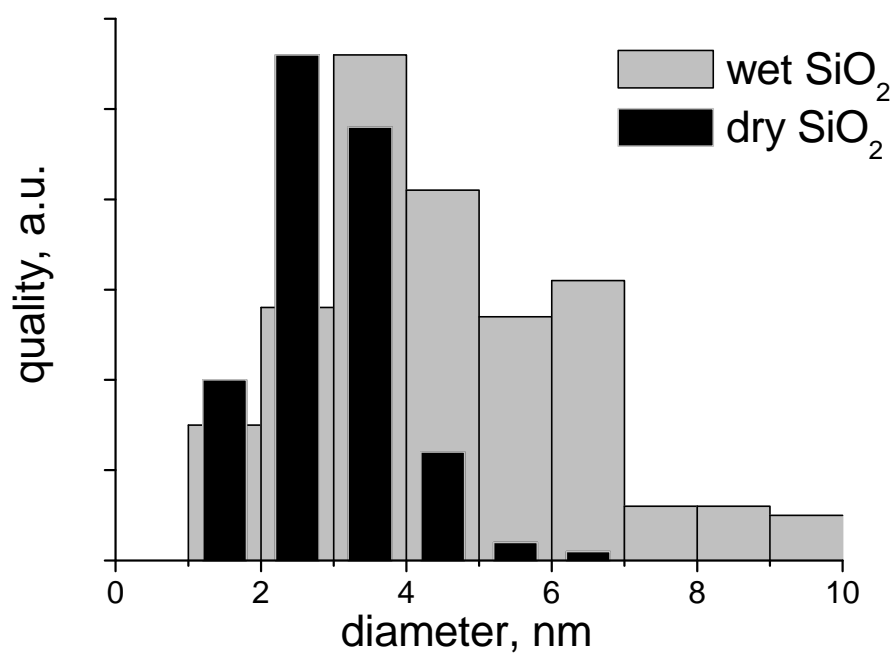
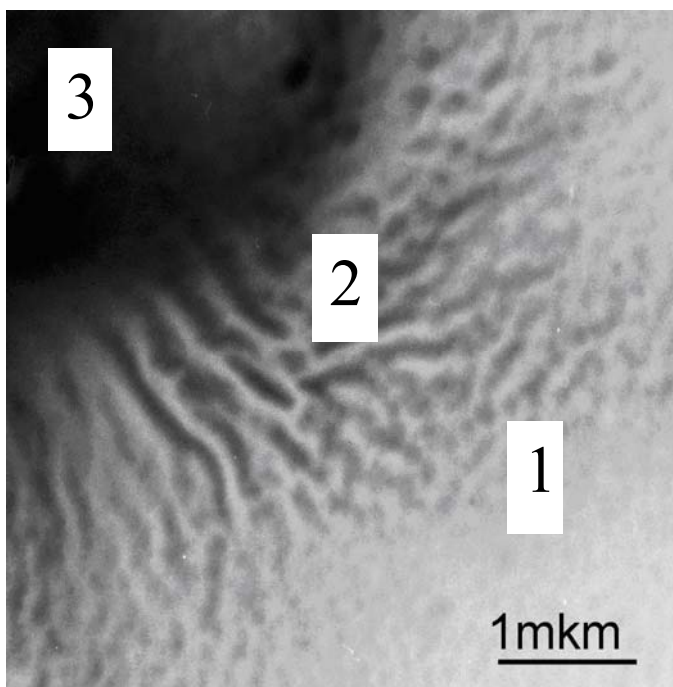


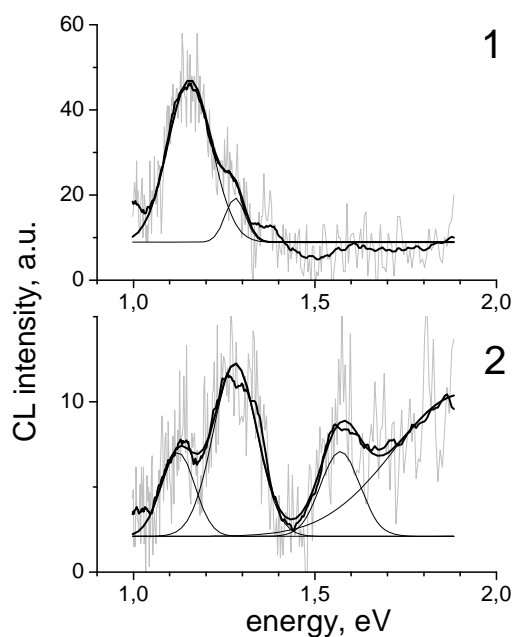
Рис. 3 Распределение по размерам нанокластеров кремния, сформировавшихся при модификации диоксида кремния электронным пучком: wet – в диоксиде кремния с высоким содержанием ОН-групп (1000 ppm); dry – в диоксиде кремния с низким содержанием ОН-групп (1-2 ppm).

По данным микродифракции нанокластеры кремния обладают следующим набором межплоскостных расстояний:  $d = 2.08 \pm 0.02 \text{ \AA}$ ,  $d = 1.24 \text{ \AA}$  и  $d = 1.08 \text{ \AA}$  (рис. 2). Такие межплоскостные расстояния соответствуют нанокластерам кремния с тетрагональной кристаллической структурой  $\beta$ -Sn. Это связано с высокими напряжениями, возникающими в аморфном диоксиде кремния при модификации электронным пучком.

На рис. 3 показано распределение по размерам нанокластеров кремния, образовавшихся при модификации пленок диоксида кремния с высоким и низким содержанием ОН-групп. Видно, что средний размер нанокластеров в сухом окисле 2-3 нм, а во влажном 4 нм. Также в сухом окисле заметно меньше отклонение диаметра нанокластеров кремния от среднего значения.



*Рис. 4 ПЭМ изображение пленки диоксида кремния после модификации. 1 – немодифицированная область; 2 – область дефицита кислорода; 3 – область воздействия электронного пучка.*



*Рис. 5 Спектры КЛ в ИК-диапазоне: 1 – кристаллический кремний; 2 – диоксид кремния после модификации электронным пучком.*

Методами КЛ и ПЭМ было показано, что при модификации диоксида кремния электронным пучком с плотностью тока  $3 \text{ A/cm}^2$  (температура перегрева  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ ) в области воздействия электронного пучка формируются крупные включения кремния (рис. 4 и рис.5). На расстоянии порядка 2-3 микрон от области, облученной электронным пучком, также наблюдается изменение люминесцентных свойств и структуры диоксида кремния, и формируются нанокластеры кремния (рис. 4).

**В четвертой главе** приведены результаты модификации объемных образцов аморфного диоксида кремния с различным содержанием ОН-групп.

Эксперимент, позволяющий определять обратимость изменений КЛ свойств облучаемого объема диоксида кремния, происходил в три этапа:

1. микрообъем образца облучался электронным пучком и одновременно регистрировались спектры КЛ. Облучение продолжалось до того момента, пока КЛ спектры облучаемой области не переставали меняться;
2. воздействие электронного пучка на диоксид кремния прекращалось на время сопоставимое со временем облучения;
3. облучение исследуемой области электронным пучком и регистрация КЛ спектров возобновлялись.

Можно выделить два пороговых значения плотности тока при модификации аморфного диоксида кремния с высоким содержанием ОН-групп. Выявлено, что при плотности тока ниже  $0,6 \text{ A/cm}^2$  интенсивность полос катодолюминесценции, связанная с точечными дефектами диоксида кремния, возрастает. После длительного времени релаксации интенсивность КЛ полос восстанавливается до начального значения, то есть не происходит формирования стабильных дефектов в модифицируемом объеме (рис.6 а). При плотности тока от  $0,6 \text{ A/cm}^2$  до  $2,5 \text{ A/cm}^2$  (рис.6 б) интенсивности полос катодолюминесценции диоксида кремния, связанные с точечными дефектами диоксида кремния, растут в течение

20-30 минут, в ИК-диапазоне возникают полосы, связанные с люминесценцией кремниевых нанокластеров. После длительной релаксации интенсивность катодолюминесценции не восстанавливается, то есть при таких условиях облучения в диоксиде кремния формируются стабильные точечные дефекты и нанокластеры кремния малых размеров.

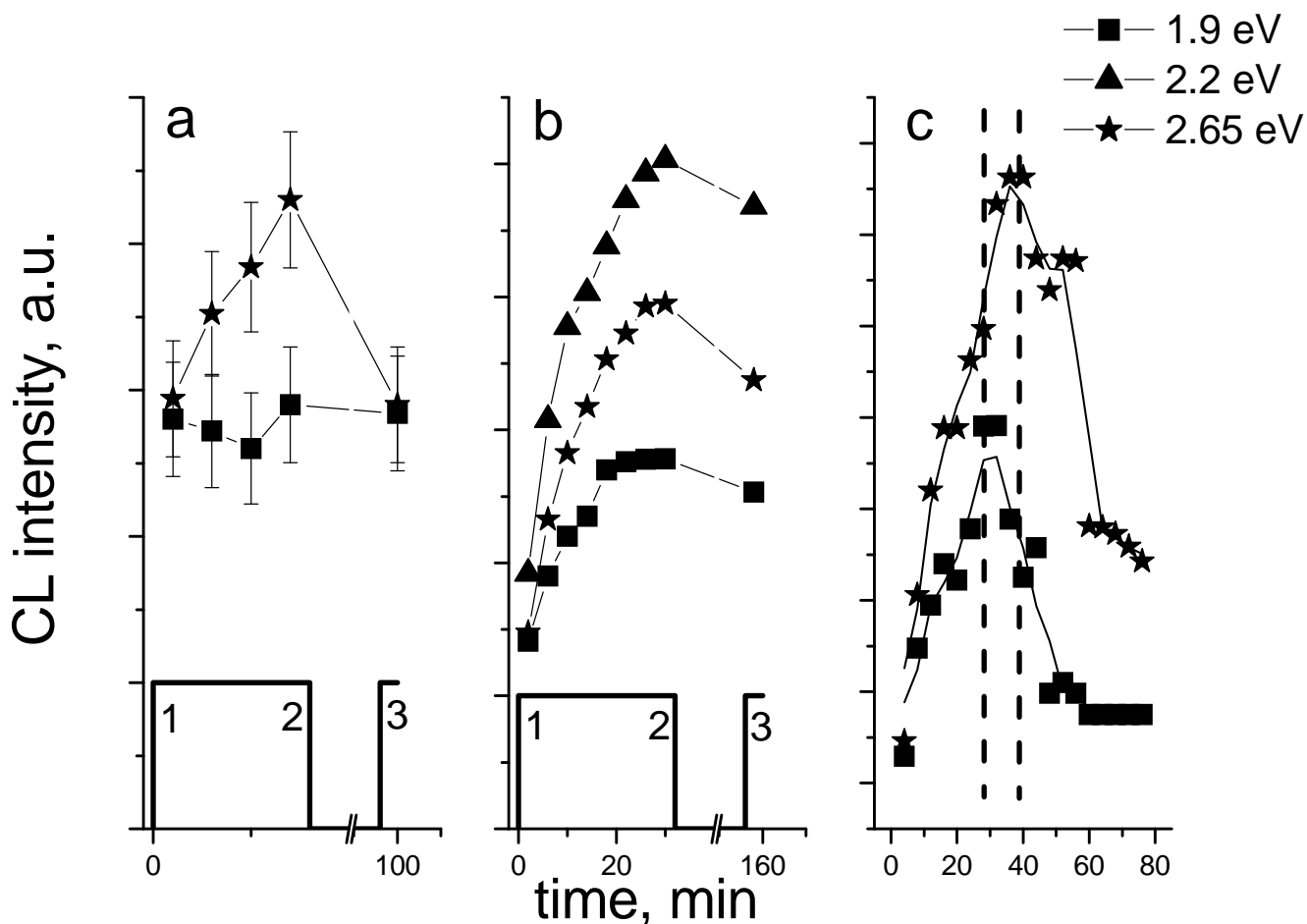


Рис. 6 Динамика полос катодолюминесценции аморфного диоксида кремния до и после модификации электронным пучком и после релаксации облучаемого объема в течение 20 минут. В промежутке времени 1-2 электронный пучок включен, в промежутке времени 2-3 выключен, в момент времени 3 – включен. Плотность тока ( $A/cm^2$ ): а – 0,13; б – 0,63; в – 3,1.

При плотности тока выше  $2,5 A/cm^2$  в течение 20-30 минут происходит рост полос КЛ, связанных с точечными дефектами в диоксиде кремния, после 30 минут облучения начинается падение интенсивности полосы 1,9 эВ и продолжается рост полосы 2,65 эВ (происходит формирование области дефицита кислорода), после 40 минут облучения

наблюдается общее падение интенсивности КЛ, связанное с уменьшением доли диоксида кремния в облучаемом микрообъеме.

После модификации диоксида кремния в течение 60 минут возникают полосы в ИК диапазоне с максимумами 1,15 эВ и 1,3 эВ, связанные с крупными включениями кремния. Таким образом, происходит формирование нанокластеров кремния, их рост и затем формирование крупных кластеров аморфного кремния (рис. 6 с).

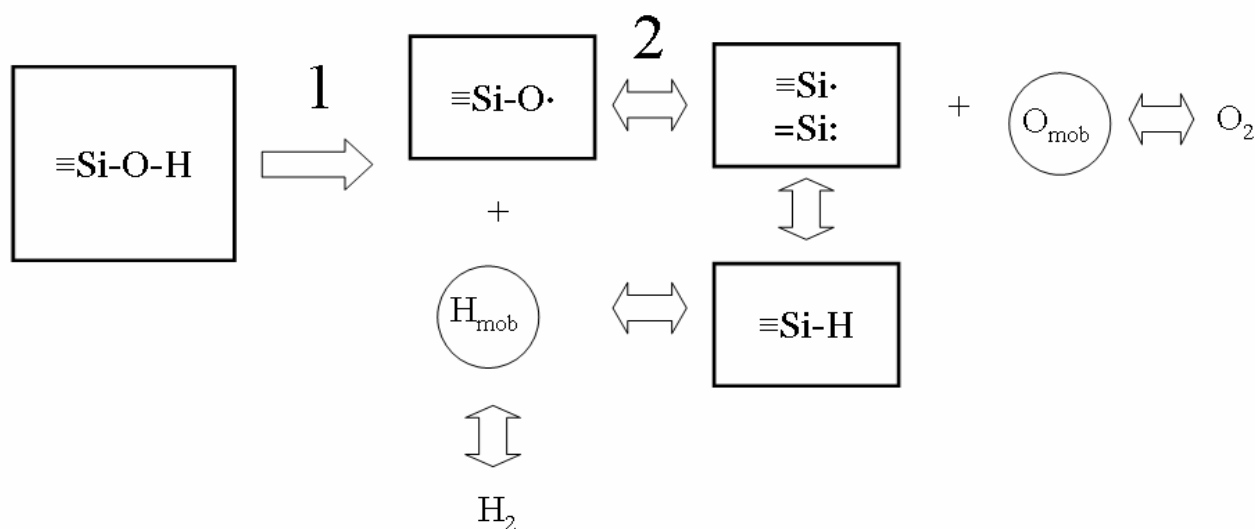
Пороговые значения плотности тока были получены для образцов объемного диоксида кремния с различным содержанием ОН-групп (1-2 ppm и 1000 ppm). Показано, что при модификации диоксида кремния с низким содержанием ОН-групп пороговые значения плотности тока выше, чем в диоксиде кремния с высоким содержанием ОН-групп. В диоксиде кремния с низким содержанием ОН-групп порог возникновения стабильных дефектов  $1 \text{ А/см}^2$ , порог формирования крупных включений кремния  $3,5 \text{ А/см}^2$ .

Для сравнения результатов воздействия длительного высокотемпературного отжига и облучения электронным пучком были исследованы пленки диоксида кремния после имплантации ионами кремния. Получено, что спектры КЛ пленок диоксида кремния, имплантированных ионами кремния после отжига при  $700 \text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение часа, и после модификации электронным пучком в течение 30 минут с температурой локального перегрева около  $700 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , различаются незначительно. И в том, и в другом случаях в пленках формируются нанокластеры кремния.

**В пятой главе** рассмотрены возможные механизмы формирования нанокластеров кремния в диоксиде кремния под воздействием электронного пучка.

Формирование точечных дефектов и, затем, нанокластеров кремния в аморфном диоксиде кремния при облучении электронным зондом, связано с температурным перегревом облучаемой области. На это указывают такие факты:

- при облучении диоксида кремния электронным пучком с плотностью тока  $1 \text{ A/cm}^2$  в образцах при комнатной температуре происходит формирование нанокластеров кремния, тогда как при температуре  $77 \text{ K}$  не происходит никакой модификации;
- формирование нанокластеров кремния происходит также в области, не подвергавшейся облучению электронами, но находящейся в непосредственной близости от области облучения;
- при уменьшении энергии электронов происходит понижение пороговых значений плотности тока, так как в этом случае происходит повышение температуры перегрева за счет уменьшения объема взаимодействия с электронами.



*Рис. 7 Схема трансформации точечных дефектов в диоксиде кремния.*

На рис.7 показана схема формирования точечных дефектов и мобильного кислорода при облучении комплексов Si-OH электронным пучком.

Методами ПЭМ и рентгеноспектрального микроанализа было получено, что после длительной модификации электронным пучком облучаемая область имеет состав  $\text{SiO}_{1,87}$ . Рассчитано изменение концентрации свободного кислорода в пленках диоксида кремния в вакууме и в объемном диоксиде кремния. Показано, что в обоих случаях скорость диффузии свободного кислорода в диоксиде кремния на порядки выше, чем скорость модификации. То



есть, скорость модификации диоксида кремния зависит большей частью от скорости формирования свободного кислорода.

Представлен обзор теорий зародышеобразования и последующего роста нанокластеров кремния из  $\text{SiO}_x$  при отжиге. Показано, что при модификации диоксида кремния электронным пучком с плотностью тока от 1 до  $3,5 \text{ А/см}^2$  преобладает процесс зародышеобразования, тогда как при плотности тока выше  $3,5 \text{ А/см}^2$  преобладает процесс коалесценции, что вызывает формирование крупных включений кремния.

### **Основные результаты и выводы**

1. Определены условия формирования нанокластеров кремния в диоксиде кремния под воздействием электронного пучка.
2. Проведена оценка температуры перегрева аморфного диоксида кремния при облучении электронным пучком высокой удельной мощности для объемных образцов и тонких пленок.
3. Установлены два пороговых значения параметров облучения диоксида кремния электронным пучком. При плотности тока менее  $1 \text{ А/см}^2$  не происходит изменений в облучаемом объеме; при плотности тока от  $1 \text{ А/см}^2$  до  $3,5 \text{ А/см}^2$  – формируются точечные дефекты и нанокластеры кремния малых размеров; более  $3,5 \text{ А/см}^2$  – происходит формирование нанокластеров кремния (линейный размер около 4 нм), их рост и затем образование крупных кластеров кремния (линейные размеры более 10 нм).
4. Определены распределения по размерам и кристаллическая структура нанокластеров кремния, сформировавшихся при облучении диоксида кремния электронным пучком.
5. Исследовано влияние содержания ОН-групп в исходном диоксиде кремния на процесс модификации электронным пучком. В диоксиде кремния с содержанием ОН-групп около 1000 ppm пороговые значения плотности тока ниже, чем в стекле с содержанием ОН-групп 1-2 ppm.

## **Список публикаций по теме диссертации**

### **Публикации в журналах, рекомендованных ВАК:**

1. Бакалейников Л.А., Заморянская М.В., Колесникова Е.В., Соколов В.И., Флегонтова Е.Ю. Модификация диоксида кремния электронным пучком.// ФТТ, 2004, Т. 46, В 6, стр. 989-994
2. Kolesnikova E.V., Sitnikova A.A., Sokolov V.I., Zamoryanskaya M.V. Modification of silicon oxide by high energy electron beam.// Solid State Phenomena, 2005, V. 108-109, pp. 729-734
3. Fitting H.-J., Ziems T., Salh R., Zamoryanskaya M.V., Kolesnikova E.V., Schmidt B., von Czarnowski A. Cathodoluminescence of wet, dry and hydrogen-implanted silica film.// Journal of Non-Crystalline Solids, 2005, V. 351, pp. 2251-2262
4. Salh R., von Czarnowski A., Zamoryanskaya M.V., Kolesnikova E.V., Fitting H.-J. Cathodoluminescence of SiO<sub>x</sub> under-stoichiometric silica layers.// Physica Status Solidi (a), 2006, V. 203, N 8, pp. 2049-2057
5. Salh R., Fitting L., Kolesnikova E.V., Sitnikova A.A., Zamoryanskaya M.V., Schmidt B., Fitting H.-J. Si and Ge nanocluster formation in Silica matrix.// ФТТ, 2007, Т. 41, N 4, стр. 397-402
6. Kolesnikova E.V., Zamoryanskaya M.V. Silicon nanoclusters formation in silicon dioxide by high power density electron beam.// Physica B: Condensed Matter, 2009, V. 404, pp. 4653–4656
7. Fitting H.-J., Fitting Kourkoutis L., Salh R., Kolesnikova E. V., Zamoryanskaya M. V., von Czarnowski A., Schmidt B. Silicon Cluster Aggregation in Silica Layers.// Solid State Phenomena, 2009, V. 156-158, pp. 529-533

### **Публикации в прочих изданиях:**

1. Kolesnikova E.V., Salh R., Fitting L., Sitnikova A.A., Zamoryanskaya M.V. and Fitting H.-J. Si and Ge nanocluster formation in silica matrix.// The 8<sup>th</sup> International Workshop on Beam Injection Assessment of Microstructure in Semiconductors. Тезисы докладов, 2006, p. 102

2. Kolesnikova E.V., Mukchin E.E., Sokolov V.I., Zamoryanskaya M.V. Study of radiation defects in amorphous silicon dioxide by local cathodoluminescence.// 12<sup>th</sup> International Conference on Defects-Recognition, Imaging & Physics in Semiconductors. Тезисы докладов, 2007, p.101
3. Kolesnikova E.V., Zamoryanskaya M.V. Silicon nanoclusters formation in silicon dioxide by high power density electron beam.// 25<sup>th</sup> International Conference on Defects in Semiconductors. Тезисы докладов, 2009, pp. 435-436
4. Колесникова Е.В., Загорянская М.В., Формирование нанокластеров кремния в аморфном диоксиде кремния под воздействием электронного зонда высокой удельной мощности.// VI Международная конференция Кремний-2009. Тезисы докладов, 2009, стр. 119

### **Список литературы**

1. McLean T.P., Loudon R. Exciton energy levels in germanium and silicon.//J. Phys. Chem. Solids., 1960, V. 13, № 1, pp. 1-9
2. Акимченко И.П., Бармин Ю.В., Вавилов В.С., Гавриленко В.И., Золотухин И.В., Литовченко В.Г. Оптические свойства и структура пленок  $\alpha$ -Si, свободных от подложки.//ФТП, 1984, Т. 18, № 12, стр. 2138-2141
3. Sanders G.D., Chang Y.C., Chung Y. Theory of optical properties of quantum wires in porous silicon.//Phys. Rev. B, 1992, V. 45, issue 16, pp. 9202-9213
4. Skuja L.N., Silin A.R. A model for the non-bridging oxygen center in fused silica.// Physica Status Solidi (a), 1982., V. 70, issue 1, pp 43-49
5. Zamoryanskaya M.V., Sokolov V.I., Plotnikov V. Cathodoluminescence study of Si/SiO<sub>2</sub> interface structure.//Applied Surface Science, 2004, V. 234, issues 1-4, pp. 214-217
6. Skuja L.N., Streletsky A.N., Pakovich A.B. A New Intrinsic Defect In Amorphous SiO<sub>2</sub>: Twofold Coordinated Silicon.// Solid State Communication., 1984, V. 50, № 12, pp. 1069-1072