

## ОБРАЗОВАНИЕ ФИКСИРОВАННОГО ЗАРЯДА В $\text{SiO}_2$ , ПОЛУЧЕННЫМ ПИРОГЕННЫМ ОКИСЛЕНИЕМ КРЕМНИЯ

Открытое акционерное общество «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» Минск, Беларусь

Приведены результаты исследования влияния твердофазной рекристаллизацией механически нарушенного слоя кремния с применением быстрой термообработки на формирование фиксированного заряда в  $\text{SiO}_2$  при пирогенном окислении кремния. Показано, что это приводит к уменьшению поверхностного потенциала по площади пластин и позволяет уменьшить остаточный фиксированный заряд в двуокиси кремния в полтора раза. Снижение поверхностного потенциала по площади пластин указывает на улучшения свойств границы раздела кремний-двуокись кремния, а снижение фиксированного заряда говорит о повышении однородности микро-структуры поверхностного слоя двуокиси кремния, образующегося за счет механически нарушенного слоя на рабочей стороне пластины.

Важную роль в надежности создаваемой электронной элементной базы играют зарядовые свойства границы раздела  $\text{Si-SiO}_2$ , которые в наибольшей степени касаются изделий, изготовленных с применением МОП и КМОП технологий. Это обусловлено тем, что зарядовые свойства определяют, как время наработки на отказ подзатворного диэлектрика, так и зависимость характеристик приборов от условий их эксплуатации [1, 2].

Хорошо известно, что при термическом окислении кремния в  $\text{SiO}_2$  формируется положительный фиксированный заряд, а также заряд быстрых поверхностных состояний. Величины данных зарядов изменяются при повышенных температурах и напряжениях, приводя к изменению характеристик электронной элементной базы, тем самым понижая ее надежность [3, 4]. В настоящее время имеется большое количество качественных моделей, объясняющих появление фиксированного заряда в  $\text{SiO}_2$ , например, наличие примесей металлов [4], заряженных атомов кремния или  $\text{Si-O}$  комплексов [5] и ряд других. Повышение качества современной технологии практически полностью устранило вышеуказанные причины возникновения фиксированного заряда, однако его формирование продолжает иметь место. Это указывает на несоответствие данных моделей причинам образования данного заряда. Наиболее адекватная аналитическая модель его образования и ее математическое описание были предложены в [5]. В данной работе основная причина его формирования связывалась с возникновением неравновесной концентрацией междоузельных атомов кремния и их диффузией как вглубь окисла, так и к границе  $\text{Si-SiO}_2$  с последующей рекомбинацией на ней. Однако, несмотря на хорошее соответствие данной модели экспериментальным результатам, она не смогла описать существование остаточного фиксированного заряда в окисле после его отжига. В этой связи выяснение причины образования остаточного заряда и предложение модели его образования является достаточно актуальным вопросом, так как позволит определить пути его устранения.

В качестве образцов для исследования использовались пластины кремния КЭФ 4,5 и КДБ 12 ориентации  $\langle 100 \rangle$  диаметром 100 мм после химико-механической полировки. Часть пластин проходила быструю термообработку в естественных атмосферных условиях путем облучения с рабочей стороны пластины некогерентным оптическим излучением в течение 7 с, обеспечивая нагрев пластин до температуры  $1000^\circ\text{C}$ . Затем методом пирогенного окисления при температуре  $850^\circ\text{C}$  в течение 40 мин. формировался подзатворный диэлектрик толщиной 42,5 нм и методом вольт-фарадных характеристик определялось напряжение плоских зон и плотность заряда на границе раздела кремний-двуокись кремния. Для изучения их распределения по поверхности пластины и определения относительных изменений данных параметров после различных видов обработки, использовался метод сканирующей зондовой электрометрии, основанный на определении контактной разности потенциалов (КРП) [6].

Предложенная в работе [5] модель формирования фиксированного заряда строилась на предположении, что на поверхности кремниевой пластины отсутствует механически нарушенный слой кремния и за образование данного заряда в  $\text{SiO}_2$  отвечают междоузельные атомы кремния (МА). Величина заряда определяется количеством однократно ионизованных междоузельных атомов кремния вблизи межфазной границы, которые оказываются там за счет их генерации на данной границе и диффузии вглубь окисла. Согласно представленному механизму образования фиксированного заряда, уменьшение его величины и плотности быстрых поверхностных состояний с ростом температуры процесса окисления связано с увеличением коэффициента диффузии междоузельных атомов кремния и их последующей рекомбинации на межфазной границе, которые преобладают над скоростью генерации на ней междоузельных атомов кремния.

Однако, как было показано в работе [7] на поверхности кремниевой пластины после финишной полировки остается слой толщиной от 5 до 100 нм, представляющий собой механически деформированную кристаллическую решетку. Это означает, что энергия связи Si-Si в такой кристаллической решетке будет меньше, чем в решетке без ее деформации. Поскольку за формирование фиксированного заряда в  $\text{SiO}_2$  отвечают междоузельные атомы (МА) кремния и их концентрация на межфазной границе, следовательно, чем выше скорость их генерации, тем больше фиксированный заряд в  $\text{SiO}_2$ . Учитывая, что наличие деформированного слоя на поверхности пластины приводит к увеличению скорости генерации МА, за счет пониженной энергии связи Si-Si, то это будет приводить к увеличению величины данного заряда. Это означает, что на пластинах, имеющих механически нарушенный слой, величина фиксированного заряда должна быть выше, чем на пластинах с недеформированной кристаллической решеткой на окисляемой поверхности.

С другой стороны, величина фиксированного заряда в  $\text{SiO}_2$  также зависит от микроискажений структуры двуокиси кремния, получаемой путем термического окисления кремния. Поскольку рост окисла на 44% идет за счет подложки кремния, у которой на поверхности находится слой с деформированной кристаллической решеткой, то для его полного участия в процессе окисления, толщина выросшего окисла, должна составлять более от 0,01 до 0,22 мкм, при толщине деформированного слоя от 5 до 100 нм. Это означает, что микроструктура верхней части диэлектрика, сформированной за счет деформированной кристаллической решетки кремния, будет иметь нарушенную микроструктуру, в которой имеют место напряженные связи Si-O, оборванные связи Si не заполненные кислородом, уменьшенная сила связей Si-O, измененные углы связей Si-O. Следовательно, весь окисел можно рассматривать как двухслойную систему с различной микроструктурой по толщине. Поскольку, такие микроискажения структуры  $\text{SiO}_2$ , также приводят к возникновению фиксированного заряда, то природа фиксированного заряда в этой части диэлектрика будет определяться как структурой диэлектрика, так и механизмом МА кремния. В этой связи, наблюдаемый в работе [5] остаточный фиксированный заряд в  $\text{SiO}_2$  после отжига, может быть обусловлен микроискаженной структурой верхней части диэлектрика, которая сохраняется и после отжига.

Для подтверждения предполагаемого механизма образования фиксированного заряда в  $\text{SiO}_2$  при термическом окислении кремния были подготовлены образцы с окислом толщиной 42,5 нм на кремниевых пластинах КЭФ 4,5 и КДБ 12 ориентации  $\langle 100 \rangle$ . Перед окислением половина всех пластин подвергалась БТО при температуре 1000 °С в течение 7 с, путем их фотонного облучения с рабочей стороны пластины. Такая обработка позволяла провести твердофазную рекристаллизацию механически нарушенного слоя [8], тем самым позволяло определить его роль в формировании фиксированного заряда. С этой целью методом вольт-фарадных характеристик определялись плотность заряда и напряжение плоских зон, а сканирующей зондовой электрометрией изучалась КРП. После данных измерений проводилась БТО всех пластин при температуре 1000 °С в течение 7 с, для отжига фиксированного заряда, и осуществлялись повторные измерения всех выше указанных параметров.

Исследование вольт-фарадных характеристик пленок  $\text{SiO}_2$  на пластинах, прошедших быструю термообработку, показывает значительное улучшение их параметров. Наблюдается

уменьшение, как напряжения плоских зон, так и плотности заряда на границе раздела кремний-диоксида кремния.

Анализ пространственного распределения (КРП) по площади пластины с использованием метода сканирующего зонда Кельвина показал, что его величина на пластинах, прошедших такую обработку меньше, чем на пластинах, не проходивших ее. Так для пластин КЭФ 4,5 КРП уменьшился с -1,211 В до -1,134 В, а для КДБ 12 с -0,725 В до -0,359 В. Данные изменения поверхностного потенциала по площади пластины соответствуют уменьшению работы выхода электронов с поверхности и позволяют говорить об улучшении свойств границы раздела кремний-диоксида кремния после быстрой термообработки такой системы за счет значительного повышения однородности микроструктуры поверхностного слоя диоксида кремния.

Проведение БТО структур Si-SiO<sub>2</sub>, полученных на кремниевых пластинах с предварительной БТО рабочей поверхности и без такой обработки показало, что во всех случаях имеет место отжиг фиксированного заряда. Так в случае КЭФ 4,5 напряжения плоских зон уменьшилось более чем на порядок, а для КДБ 12 в 1,5 раза, а плотность заряда уменьшилась до 3,7 раза до 4,3 раза соответственно. При этом проведение БТО кремниевых пластин перед окислением позволяет уменьшить остаточный фиксированный заряд в полтора раза. Анализ распределения поверхностного потенциала показал, что проведение БТО пластин после окисления обеспечивает равномерное ее распределение по площади пластины, независимо от БТО исходных подложек.

Подтверждением роли механически нарушенного слоя в формировании остаточного фиксированного заряда в SiO<sub>2</sub> является то, что на пластинах с предварительной обработкой заряд в пленке как после окисления, так и после БТО ниже, чем на пластинах без предварительной быстрой термообработки.

#### Список литературы

1. Солодуха, В. А. Основы силовой электроники / В. А. Солодуха, В. А. Пилипенко, А. И. Белоус, С. А. Ефименко – М.: Техносфера, 2019.– 424 с.
2. Харченко, В. А. Проблемы надежности электронных компонент / В. А. Харченко // Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2015. – Т. 18, №1. – С. 52-57.
3. Deal, B. E. Standardized Terminology for Oxide Charges Associated with Thermally Oxidized Silicon / B. E. Deal // IEEE Trans. Electron Devices. – 1980. – V. ED-27. – P. 606-610.
4. Красников, Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов: В 2 ч. / Г. Я. Красников – М.: Техносфера, 2002. – Ч. 1. – 416 с.
5. Александров, О. В. Модель образования фиксированного заряда в термическом диоксиде кремния / О. В. Александров, А. И. Дусь // ФТП – 2011. – Т. 45, вып. 4. – С. 474-480.
6. Воробей, Р.И. Контроль дефектов структуры кремний-диэлектрик на основе анализа пространственного распределения потенциала по поверхности полупроводниковых пластин / Р.И. Воробей, А.Л. Жарин, О.К. Гусев, А.Н. Петлицкий, В.А. Пилипенко, А.С. Турцевич, А.К. Тявловский, К.Л. Тявловский // Приборы и методы измерений. – 2013. – № 2(7). – С. 67-72.
7. Наливайко, О. Ю. Базовые технологические процессы изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на кремнии: В 3 т. / О. Ю. Наливайко, В. А. Солодуха, В. А. Пилипенко [и др.]; под. ред. А.С. Турцевича – Минск: Интегралполиграф, 2013. – Т. 1. – 704 с.
8. Пилипенко, В. А. Твердофазная рекристаллизация механически нарушенного слоя кремния при быстрой термообработке / В. А. Пилипенко, В. А. Солодуха, В. А. Горушко, А. А. Омельченко // Доклады национальной академии наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 3. – С. 347–352.