

МОДИФИКАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК МДП-ПРИБОРОВ

В.Андреев¹, д.т.н. andreev@bmstu-kaluga.ru, В.Масловский, д.ф.-м.н. acdmaslovsky@mail.ru,
А.Сафонов, к.т.н. asaf@niifp.ru, А.Столяров¹, д.т.н.

Воздействие сильных электрических полей, радиационных облучений и других критических явлений на кремниевые приборы со структурой металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) активно исследуется с середины шестидесятых годов прошлого века [1–3]. Основные направления исследований в этой области связаны с повышением зарядовой стабильности (ЗС), радиационной стойкости и надежности МДП-приборов и интегральных схем. До последнего времени сильнополевые, радиационные, плазменные и другие воздействия для управления параметрами МДП-приборов практически не применялись из-за значительных деградационных процессов, сопутствующих этим воздействиям. Однако благодаря разработке новых диэлектрических пленок и методов управляемого воздействия на них появилась возможность проводить радиационную, сильнополевую, плазменную и другие обработки МДП-структур с целью улучшения и модификации их характеристик [4–10]. Создание полупроводниковых приборов и интегральных схем, параметрами которых сможет управлять после изготовления как производитель, так и потребитель, позволит в перспективе сократить их номенклатуру за счет применения универсальных приборов. В результате использования радиационных, сильнополевых, плазменных и других видов обработки, проводимых как отдельно, так и совместно, можно будет исключить МДП-структуры с грубыми дефектами подзатворного диэлектрика и существенно повысить надежность полупроводниковых приборов и интегральных схем.

Основная причина отказа СБИС – пробой подзатворного диэлектрика, связанный со скрытыми дефектами МДП-структур [1–4]. Как известно, деградация электрофизических параметров МДП-структур наступает после пропускания через диэлектрик заряда плотно-

стью $>10^{-3}$ Кл/см², а при плотности заряда, большей в 100–1000 раз в зависимости от технологии изготовления МДП-структуры, наступает ее пробой. Поверхностная плотность пропущенного через диэлектрик заряда, приводящая к его необратимому пробую, определяет зарядовую стабильность прибора. В этой связи весьма информативной оказалась регистрация гистограмм ЗС [2], на основе которой был

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал

предложен метод определения плотности протяженных дефектов (микродефектов) у границы раздела Si-SiO₂.

Важные данные можно получить, исследуя влияние внешних воздействий на ЗС. Ток туннельной инжекции электронов в окисел индуцирует появление в диэлектрике положительного встроенного заряда. Условия, при которых эффективны механизмы, связывающие генерацию положительного встроенного заряда с генерацией дырок у полевого электрода, а также с транспортом водорода к границе Si-SiO₂, обсуждаются до сих пор [11].

СПОСОБЫ МОДИФИКАЦИИ МДП-СТРУКТУР

При облучении планарных полупроводниковых приборов происходит накопление заряда на дефектах оксидной пленки, что приводит к их отказу либо при облучении, либо через некоторое время после него. В основе любого способа модификации полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на основе МДП-структур – физический процесс, вызывающий изменение примесно-дефектной структуры диэлектрической пленки и ее границы раздела с полупроводником (рис.1). Для отбраковки образцов с протяженными дефектами или с большой плотностью заряженных дефектов в окисной пленке используется метод радиационно-термической обработки (РТО), заключающийся в облучении кристалла или прибора γ -квантами и его последующем отжиге [4]. РТО является также эффективным методом ускоренных испытаний МДП интегральных микросхем (ИМС) на надежность в составе пластины, позволяющим повысить их выход годных и надежность. С помощью РТО выявляются структуры с аномально низкой радиационной стойкостью, т.е. низкой надежностью. В основе эффекта повышения стойкости к воздействию ионизирующих излучений и улучшения характеристик ИМС в результате РТО лежат процессы образования дефектов и их эволюции в системе Si-SiO₂.

Прецизионно управлять значением порогового напряжения МДП-приборов можно с помощью мягкого рентгеновского (10–20 кэВ) и ближнего ультрафиолетового излучений благодаря формированию стабильного радиационно-индуцированного заряда в затворном слое двуокиси кремния с примесью фосфора [5]. В настоящее время для улучшения характеристик приборов с МДП-структурой также применяются методы

плазменной обработки [6–10]. Одно из основных их достоинств – возможность обработки на завершающей стадии изготовления интегральных схем после формирования металлизации.

Показано, что высокочастотная (ВЧ) плазменная обработка обеспечивает не только термический отжиг прибора, но и вызывает нетермические процессы нейтрализации и отжига заряда в диэлектрике и на границе раздела, а также позволяет проводить наводораживание МДП-структур [6, 8]. В результате при ВЧ плазменной обработке происходит перестройка структуры двуокиси кремния и границы раздела Si-SiO₂, обеспечивающая возможность модификации характеристик прибора. Одно из перспективных направлений модификации характеристик МДП-структур с помощью плазменной обработки – создание структур с повышенной стойкостью к воздействию сильных электрических полей, ионизирующих облучений и других стрессовых факторов.

Воздействие слабых импульсных магнитных полей (ИМП) на примесно-дефектную структуру кремниевых пластин может приводить к существенным изменениям электрофизических параметров приповерхностной области кремния МДП-структур, формируемых на этих пластинах [2, 12], и выявлять потенциально ненадежные приборы.

Существенно корректировать структуру и параметры диэлектрической пленки, а также границы раздела полупроводник-диэлектрик позволяет высокотемпературный отжиг. В настоящее время для получения сверхтонких пленок оксинитрида кремния широко используется отжиг в азотосодержащей среде [13, 14].

Рассмотрим управление параметрами МДП-структур с помощью сильнополевой туннельной инжекции электронов в диэлектрик – инжекционно-термической обработки (ИТО) (см. рис.1).

ИЗГОТОВЛЕНИЕ СТРУКТУР И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

Основная проблема создания полупроводниковых приборов на основе МДП-структур с возможностью управления их параметрами путем инжекционной модификации после изготовления – получение диэлектрической пленки с высокой ЗС и высокими пробивными полями [15], не изменяющимися в процессе длительной эксплуатации. В качестве таких диэлектрических пленок можно использовать многослойный диэлектрик



Рис.1. Основные способы управления параметрами МДП-структур

на основе термической двуокиси кремния, пассивированной слоем фосфоросиликатного стекла (ФСС) [9, 16]. Пленка ФСС толщиной от нескольких единиц до нескольких десятков нанометров в таких структурах обычно формируется путем легирования термической пленки SiO₂. Применение такого диэлектрика, с одной стороны, позволяет использовать на начальном этапе стандартный технологический процесс изготовления комплементарной МДП (КМДП) ИС, а с другой стороны, принять во внимание уже имеющиеся данные о процессах зарядовой деградации этих слоев в сильных электрических полях.

На рис.2 показаны энергетические зонные диаграммы МДП-структуры Si-SiO₂-ФСС-Me (где Me – металл), иллюстрирующие накопление отрицательного заряда в пленке ФСС при сильнополевой туннельной по Фаулеру-Нордгейму инжекции электронов из кремния и металлического электрода. Малая часть инжектированных электронов захватывается на ловушках в пленке ФСС. Для упрощения описания на рис.2 не показаны другие механизмы изменения зарядового состояния диэлектрической пленки SiO₂-ФСС. К таким механизмам относятся: накопление положительного заряда в диэлектрической пленке у границы раздела Si-SiO₂; повышение плотности поверхностных состояний (ПС); накопление отрицательного заряда в объеме SiO₂ и др. [12]. Важное условие сильнополевой инжекционной модификации МДП-структур с пленкой SiO₂-ФСС – минимизация других процессов изменения зарядового состояния диэлектрической пленки, что достигается совершенствованием технологии формирования многослойного диэлектрика и подбором режимов инжекции.

Легирование пленки затворного диэлектрика на основе термического диоксида кремния фосфором может применяться специально для стабилизации характеристик приборов [17] или возникать при использовании затворов из поликристаллического кремния, легированного фосфором [5]. Наличие пленки ФСС существенно меняет характер изменения зарядового состояния МДП-структур при сильнополевой по Фаулеру-Нордгейму инжекции электронов в диэлектрик по сравнению со структурами на основе термической пленки SiO₂, не легированной фосфором. Структурная модель, в которой постулировалось присутствие в пленке ФСС положительно и отрицательно заряженных групп, связанных с атомами фосфора, при общей электронейтральности стекла, была предложена в работе [17]. В соответствии с этой моделью отрицательно заряженные группы

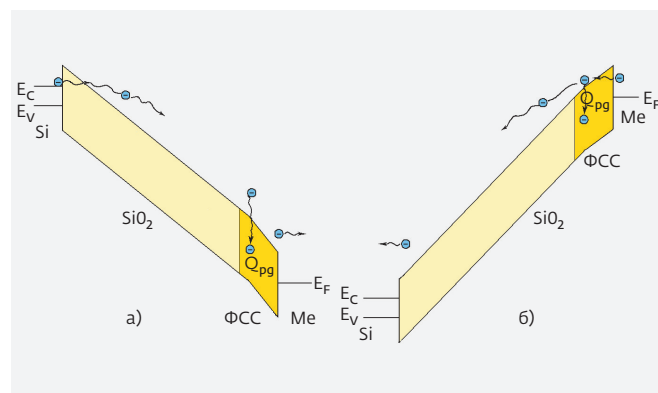


Рис.2. Энергетические зонные диаграммы и захват носителей в МДП-структуре с подзатворным диэлектриком SiO₂-ФСС при инжекции электронов из кремния (а) и металлического затвора (б)

выступают в роли геттера подвижного положительного заряда (в основном связанного с наличием ионов щелочных металлов), тем самым стабилизируя электрические характеристики работающих МДП-приборов.

Инжектированные в диэлектрик электроны захватываются положительно заряженными группами, присутствующими в пленке ФСС. Эти электронные ловушки вносят основной вклад в значение накапливаемого отрицательного заряда в пленке ФСС и характеризуются сечением захвата σ_1 . Кинетика накопления отрицательного заряда в МДП-структуре Si-SiO₂-ФСС-Me может быть удовлетворительно описана следующей формулой [18]:

$$Q_{\text{trap}}(t) = \sum_{i=1}^3 Q_{0i} \left[1 - \exp\left(-\frac{\sigma_i Q_{\text{inj}}(t)}{q}\right) \right],$$

где Q_{0i} – поверхностная плотность ловушек с сечением захвата σ_i .

Помимо ловушек первого типа в двухслойном диэлектрике SiO₂-ФСС присутствуют электронные ловушки с сечением захвата $\sigma_2 = 3,2 \cdot 10^{-16}$ см², наблюдающиеся при инжекции электронов из Si, и электронные ловушки с сечением захвата $\sigma_3 = 7 \cdot 10^{-16}$ см² при инжекции из металлического затвора. Одним из возможных объяснений появления электронных ловушек второго типа является воздействие молекул POCl₃ на структуру SiO₂, в результате чего происходит ее перестройка вблизи границы раздела SiO₂-ФСС, приводящая к появлению оборванных связей кислорода, которые могут выступать в роли электронных ловушек. В случае инжекции электронов из кремния $Q_{03} = 0$, при инжекции электронов из металлического электрода $Q_{02} = 0$.

В качестве экспериментальных образцов использовались изготовленные на кремнии n-типа МДП-конденсаторы с пленкой SiO₂, пассивированной слоем ФСС. Пленку двуокиси кремния толщиной 30-100 нм получали термическим окислением кремния в атмосфере кислорода при температуре 850-1000°C с добавлением 3% HCl, пленку ФСС – диффузией фосфора из газовой фазы путем пиролиза смеси POCl₃-O₂ при температуре 900°C. Для создания экспериментальных образцов конденсаторов с различной толщиной ФСС время загонки фосфора варьировалось от 3 до 6 мин. В качестве затвора использовались пленки поликремния (Si*) толщиной 0,6 мкм, легированные фосфором до поверхностного сопротивления 20 Ом/□,

и пленки алюминия толщиной 1,2 мкм и площадью 10^4 - 10^2 см².

Для инжекционной модификации электрофизических характеристик МДП-структур использовалась сильнополевая туннельная инжекция электронов из кремниевой подложки [15-18] в режиме протекания постоянного инжекционного тока плотностью от 0,1 до 10 мкА/см² в диапазоне температур от 20 до 100°C. В процессе инжекции контролировалось напряжение на МДП-структуре, что позволяло получать информацию об изменении ЗС диэлектрической пленки непосредственно в процессе модификации. Для определения значения термостабильной компоненты отрицательного заряда, накопленного в диэлектрике, после инжекционных воздействий МДП-структуры отжигались при температуре 200°C от 200 с до 30 мин.

Изменение зарядового состояния МДП-структур контролировалось с помощью высокочастотных CV-характеристик и метода многоуровневой токовой нагрузки [20]. В течение сильнополевой инжекции в режиме протекания постоянного тока измерялось приращение напряжения на МДП-структуре ΔV_1 , характеризующее изменение зарядового состояния исследуемого образца.

ВЧ плазменная обработка проводилась на частоте 13,6 МГц в кислородной плазме в стандартных промышленных установках с реакторами объемного и диодного типа. Для уточнения представлений об изменении электрофизических параметров исследуемых приборов электродуговой плазменной струей (ЭДПС) проводилась плазмоструйная [7, 10] обработка подобных полупроводниковых структур, но без пассивации ФСС. Параметры воздействия ЭДПС: плотность потока аргоновой плазмы 10^{20} см⁻²с⁻¹; кинетическая энергия электронов – 0,1 эВ, давление – атмосферное. Поток Ar-плазмы формировался многоструйным генератором электрической дуги. Использовалась гидродинамически непрерывная высокоэнтальпийная (10^4 Дж/град) низкотемпературная ($2 \cdot 10^4$ К) плазменная струя. Транспорт заряженных и нейтральных возбужденных частиц к поверхности осуществлялся путем диффузии через тонкий приграничный слой плазмы. Таким образом, с поверхностью взаимодействовал поток активных частиц чрезвычайно высокой плотности (порядка 10^{20} см⁻²с⁻¹) с кинетической энергией менее 0,1 эВ. При этом плотность потока энергии также была весьма высокой (порядка 10^3 Вт/см²),

а поток квантов в диапазоне ближнего УФ превышал $10^{17} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Изменение температуры поверхности во время обработки контролировалось скоростью пересечения пластины плазменной струей и обычно не превышало 200К.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ранее проведенных исследованиях было показано, что отрицательный заряд, накапливающийся в пленке ФСС в структуре Si-SiO₂-ФСС-Al в процессе туннельной инжекции электронов в сильных электрических полях, может использоваться для коррекции порогового напряжения МДП-приборов с такой структурой [8-9]. В результате измерения токов термостимулированной деполяризации и исследования изотермической релаксации CV-характеристик при нескольких фиксированных температурах было установлено, что при сильнополевой туннельной инжекции электронов в МДП-структурах Si-SiO₂-ФСС-Al накапливаемый отрицательный заряд Q_{trap} состоит из двух компонент. Первая компонента обладает низкой термополевой стабильностью и практически полностью стекает при отжиге при 200°C. Вторая - термостабильная компонента заряда - начинает релаксировать лишь при температурах выше 230°C. Таким образом, для получения приборов с высокой термополевой стабильностью после модификации зарядового состояния инжекцией электронов их необходимо отжигать при температурах около 200°C.

На рис.3 приведены зависимости сдвига порогового напряжения МДП-транзистора после сильнополевой туннельной инжекции электронов из кремниевой подложки (кривая 1, которая полностью соответствует вышеприведенному выражению) и последующего отжига (кривая 2) от времени инжекции. Для реализации режима сильнополевой инжекции электронов из кремниевой подложки на затвор МДП-транзистора подавался импульс постоянного тока плотностью 1 мкА/см². Сечения захвата электронных ловушек в пленке ФСС определялись из наклона прямой $\ln(DQ_{\text{trap}}) = wf(Q_{\text{inj}})$ в соответствии с приведенным выше выражением. Захват электронов в области ФСС осуществлялся ловушками с сечениями захвата $\sigma_1 = (1,3 - 1,5) \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ и $\sigma_2 = (3 - 3,3) \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$. На начальной стадии инжекции заполнялись ловушки с сечением захвата σ_1 , а затем с сечением захвата σ_2 . В пленках SiO₂, не легированных фосфором, ловушки

с такими сечениями захвата не наблюдались. Значение σ_1 близко к значениям сечений захвата, полученных для электронных ловушек в пленке ФСС в работе [18]. После инжекционной модификации МДП-транзисторы отжигались при температуре 200°C в течение 20 мин. Термостабильная компонента отрицательного заряда составляла ~60% от общей плотности заряда, накопленного в диэлектрике в процессе инжекции.

Использование ИТО вместо радиационной обработки в ряде случаев упрощает процесс испытаний, а также позволяет получать дополнительную информацию о зарядовом состоянии МДП-прибора. На рис.4 показаны гистограммы распределения МДП-структур по значению ЗС. Гистограмма 1 соответствует группе структур без ИТО, гистограмма 2 - группе структур после ИТО. Из рисунка видно, что ИТО позволяет выявлять структуры с малой ЗС. В результате после обработки практически отсутствуют структуры с малой лотностью (менее 1 мКл/см²) заряда, инжектированного до пробоя. При этом инжекционный ресурс образцов не снижается, что является положительным фактом при проведении ИТО. Благодаря ИТО происходит достаточно заметное повышение инжекционной и радиационной стойкости МДП-структур (см. рис.4), что можно объяснить образованием более совершенной структуры

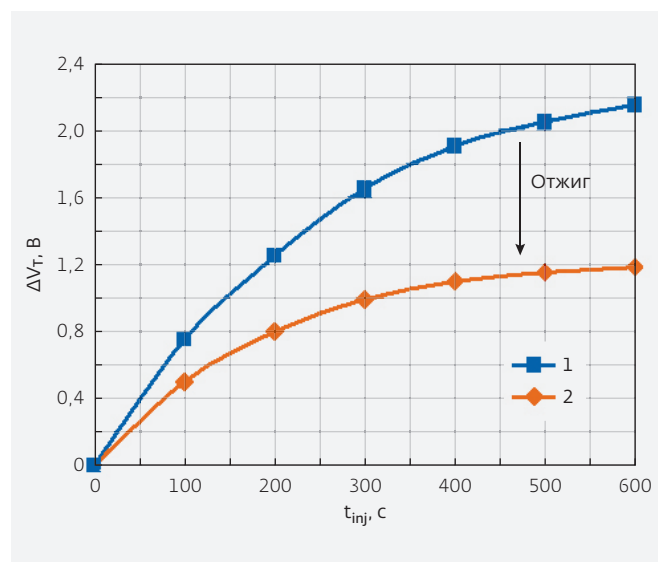


Рис.3. Зависимость сдвига порогового напряжения МДП-транзистора от времени инжекции после сильнополевой инжекции электронов из кремниевой подложки (кривая 1) и последующего отжига (кривая 2)

затворного диэлектрика. Сильнополевая инжекция электронов стимулирует реакции разрыва напряженных связей у границы раздела Si-SiO₂, а в результате последующего отжига плотность напряженных связей значительно уменьшается. Релаксируют и внутренние механические напряжения [19–21]. При определенных режимах ВЧ плазменной обработки МДП-структур в объеме пленки SiO₂ можно получить требуемую плотность электронных ловушек. В результате на начальной стадии сильнополевой туннельной по Фаулеру-Нордгейму инжекции электронов доминирующим процессом, приводящим к изменению зарядового состояния затворного диэлектрика, становится захват электронов в пленке SiO₂, а не генерация положительного заряда, как в необработанных структурах. Это снижает вероятность пробоя образцов. В результате захвата отрицательного заряда на инжектирующей границе раздела повышается потенциальный барьер для туннелирования, что приводит к уменьшению токов, локализованных в областях протяженных дефектов, и, как следствие – к увеличению ЗС и пробивных полей. Гистограммы распределения МДП-структур по значению ЗС для необработанных (1) и обработанных (2) в плазме пластин с исследуемыми образцами показывают увеличение ЗС более чем на порядок (рис. 5).

Воздействие ЭДПС подтверждается изменением распределения МДП-структур по генерационному времени жизни носителей, для чего регистрируются изменения гистограмм времени релаксации нестационарной емкости

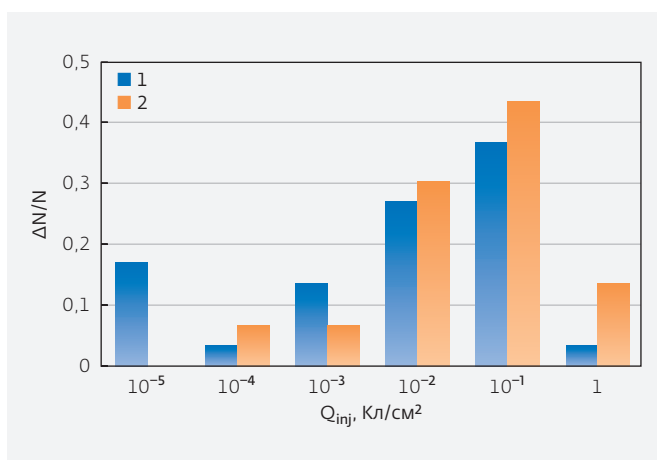


Рис.4. Гистограммы ЗС, представляющие распределение МДП-структур по значению ЗС: 1 – до ИТО, 2 – после ИТО

МДП-структур, измеряемых не менее чем у 100 структур на одной пластине, а также по величине ЗС. Измерялись значения времени релаксации нестационарной емкости одних и тех же МДП-структур до и после воздействия ЭДПС.

Профилограмма значений времени релаксации τ нестационарной емкости МДП-структуры, регистрируемая по диаметру пластины перпендикулярно траектории плазменной струи после обработки ЭДПС, приведена рис.6. Начальное значение τ составляло 3–4 с для пластины 1 и 2–3 с для пластины 2. Область непосредственного контакта плазменной струи с пластиной лежала в диапазоне $x/D=0,2-0,5$, где D – диаметр пластины, равный 10 см, а x – расстояние от ее края. Генерационное время жизни носителей, определяемое концентрацией генерационных центров в приповерхностной области, пропорционально времени релаксации нестационарной емкости [21]. Важное значение имеет корреляция этой профилограммы с профилограммой ЗС (рис.6), также регистрируемой вдоль диаметра пластины перпендикулярно траектории плазменной струи. Значительное уменьшение генерационного времени жизни в области вне воздействия плазменной струи связано с генерацией поверхностных состояний (ПС) на границе раздела Si-SiO₂ под действием плазменного излучения (видимый и ближний УФ-диапазоны), а также с изменением их зарядового состояния. Увеличение плотности ПС в структурах с внутренними механическими напряжениями может быть следствием

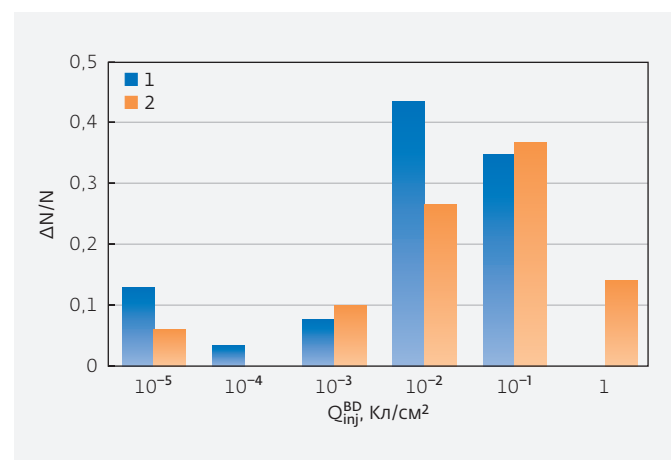


Рис.5. Гистограммы ЗС, представляющие распределение МДП-структур по значению ЗС: 1 – до плазменной обработки; 2 – после плазменной обработки

транспорта дырок, образующихся в окисле, к межфазной границе Si-SiO₂. Захват дырок локализованными состояниями, образованными напряженными Si-O связями, вызывает перемещение атомов из локального уровня в абсолютный минимум свободной энергии, что приводит к возникновению трехкоординированного кремния, формирующего ПС. Вследствие наличия положительного встроенного заряда ЗС резко уменьшается (начальное значение 0,2–0,6 Кл/см²).

Таким образом, ЭДПС-обработка может в несколько раз увеличить зарядовую стабильность МДП-структур. Это обусловлено возможностью захвата электронов в окисле, препятствующего росту тока в диэлектрике в предпробном состоянии. О накоплении отрицательного заряда в результате захвата электронов ловушками окисла свидетельствует временная зависимость напряжения на МДП-структуре при пропускании через нее постоянного тока. Электроны инжектируются из кремния и в сильных полях индуцируют реакцию, в результате которой дефект, содержащий гидроксильную группу, изменяет свое зарядовое состояние в соответствии с реакцией Si-O-H + e ⇒ Si-O⁻ + H [7]. Концентрация

таких гидроксильных групп с сечением захвата электронов ≈10⁻¹⁷ см² составляет 10¹⁷–10¹⁸ см⁻³. Увеличение концентрации гидроксильных групп в результате ЭДПС-обработки представляется вполне естественным. Так, показана возможность антибатной корреляции плотностей электронных и дырочных ловушек: появление электронных ловушек (плотность 10¹² см⁻²) сопровождается уменьшением концентрации дырочных ловушек [1]. Увеличение предпробного напряжения МДП-структуры почти в три раза после ЭДПС-обработки связано с возникновением встроенного в окисел отрицательного заряда. В результате захвата инжектированных электронов увеличивается потенциальный барьер, препятствующий локализации токов в областях протяженных дефектов у границы раздела с подложкой. Тем самым повышается инжекционная и радиационную стойкость приборов. Вне областей контакта с плазменной струей параметры существенно ухудшаются вследствие генерации поверхностных состояний в локальных областях с большой концентрацией напряженных связей под действием УФ-излучения плазмы. В области непосредственного контакта с плазменной струей эти ПС отжигаются вследствие транспорта электронных возбуждений к границе Si-SiO₂ [7].

* * *

Показано, что отрицательный заряд, накапливаемый в пленке ФСС МДП-структуры с двухслойным затворным диэлектриком SiO₂-ФСС в процессе сильнополевой туннельной инжекции электронов, может использоваться для модификации электрофизических характеристик приборов с такой структурой. Предложен способ модификации электрофизических характеристик МДП-структур путем сильнополевой туннельной инжекции электронов в диэлектрик в режиме протекания постоянного инжекционного тока. Этот способ позволяет непосредственно во время модификации контролировать изменение параметров структуры и с учетом стекания части заряда при последующем отжиге проводить прецизионную корректировку значения порогового напряжения МДП-транзисторов. Определены сечения захвата электронных ловушек в области ФСС.

Показано, что ИТО позволяет выявить и исключить структуры с грубыми дефектами изоляции и зарядовыми дефектами. При этом ресурс работы приборов на основе МДП-структур

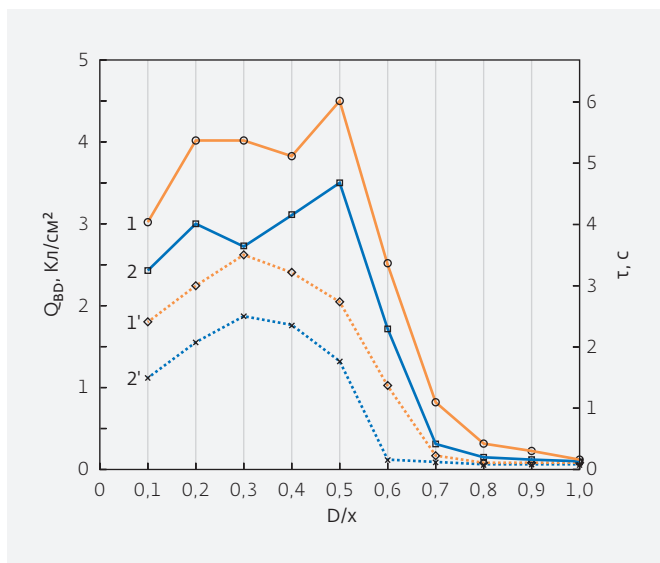


Рис. 6. Изменения зарядовой стабильности $Q_{вд}$ (кривые 1', 2') и времени релаксации нестационарной емкости τ (кривые 1, 2) МДП-структур по диаметру пластины, перпендикулярному траектории обработки пластины плазменной струей (область контакта с плазменной струей $x/D=0,2-0,5$). Кривые 1, 1' – для пластины №1, кривые 2, 2' – для пластины №2

практически не снижается. Плазменная обработка также может значительно улучшить характеристики МДП-приборов, повышая инжекционную и радиационную стойкость затворного диэлектрика за счет создания в объеме пленки SiO₂ требуемой плотности электронных ловушек. В результате захвата инжектированных электронов увеличивается потенциальный барьер, препятствующий локализации токов в областях протяженных дефектов у границы с подложкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Барабан А.П., Булавинов В.В., Коноров П.П.** Электроника слоев SiO₂ на кремнии. – Л.: ЛГУ, 1988, 304 с.
2. **Maslovsky V.M., Litchmanov J.O., Samsonov N.S.** Charge stability of Si-SiO₂ systems and its changes induced by a pulsed magnetic field treatment. – *Physics Letters A*, 1995, v.197, p.253-256.
3. **Першенков В.С., Попов В.Д., Шальнов А.В.** Поверхностные радиационные эффекты в ИМС. – М.: Энергоатомиздат, 1988, 256 с.
4. **Воронкова Г.М., Попов В.Д., Протопопов Г.А.** Уменьшение плотности ловушечных центров в оксиде кремния при радиационно-термической обработке. – *Физика и техника полупроводников*, 2007, №41, вып.8, с.977-980.
5. **Левин М.Н., Татаринцев А.В., Макаренко В.А., Гитлин В.Р.** Моделирование процессов рентгеновской корректировки пороговых напряжений МДП-интегральных схем. – *Микроэлектроника*, 2006, т.35, №5, с.382-391.
6. **Назаров А.Н., Лысенко В.С.** ВЧ плазменная обработка как метод радиационно-термического наводораживания микроэлектронных кремниевых структур. – *Микроэлектроника*, 1994, т.23, №4, с.45-65.
7. **Maslovsky V.M., Pavlov G.Ya.** Effect of electronic arc plasma jet treatment on MOS-structure reliability. – *Proceedings of MRS Symp*, 1995, v.391, p.139-143.
8. **Bondarenko G.G., Andreev V.V., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A., Drach V.E.** Plasma and injection modification of gate dielectric in MOS structures. – *Thin Solid Films*, 2003, v.427, p.377-380.
9. **Андреев В.В., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А., Васютин М.С., Коротков С.И.** Влияние температуры на инжекционную модификацию диэлектрических пленок МДП-структур. – *Перспективные материалы*, 2008, №5, с.26-30.
10. **Maslovsky V.M., Pavlov G.Ya.** Influence of dynamically plasma cleaning on Si-SiO₂ structures. – *Proc. of Second International Symposium on Ultra Clean Processing of Silicon Surfaces*. Belgium. Brugges, 1994, p.83-86.
11. **Булусева М.А., Попов В.Д., Протопопов Г.А., Скородумова А.В.** Физическая модель процесса старения МОП-структуры. – *Физика и техника полупроводников*, 2010, т.44, вып.4, с.527-532.
12. **Levin M.N., Maslovsky V.M.** Correlation of Electric Parameters Change and Structural Changes Induced in Silicon Systems by Pulsed Magnetic Field Treatment. – *Proceedings of MRS Symp*, 1994, v.319, p.429-434.
13. **Green M.L., Gusev E.P., Degraeve R., Garfunkel E.L.** Ultrathin (<4 nm) SiO₂ and Si-O-N gate dielectric layers for silicon microelectronics: Understanding the processing, structure, and physical and electrical limits. – *J. Appl. Phys.*, 2001, v.90. №5, p.2057-2121.
14. **Гриценко В.А., Тыщенко И.Е., Попов В.П., Перевалов Т.В.** Диэлектрики в нанoeлектронике. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010, 258 с.
15. **Андреев В.В., Столяров А.А., Васютин Д.С., Михальков А.М.** Контроль качества диэлектрических слоев интегральных микросхем и изделий микросистемной техники. – *Научные технологии*, 2010, т.11, №7, с.44-52.
16. **Андреев В.В., Барышев В.Г., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А., Шахнов В.А.** Зарядовая деградация МДП-систем с термическим оксидом кремния, пассивированным фосфорно-силикатным стеклом, при высокополевой туннельной инжекции. – *Микроэлектроника*, 1997, № 6, с.640-646.
17. **Balk P., Eldridge J.M.** Phosphosilicate glass stabilization of FET devices. – *Proc. IEEE*, 1969, v.57, p.1558-1563.
18. **Солдатов В.С., Воеводин А.Г., Коляда В.А.** Модель генерации поверхностных состояний в МДП-структурах при туннельной инжекции. – *Поверхность*, 1990, №7, с.92-97.
19. **Bondarenko G.G., Andreev V.V., Stolyarov A.A., Tkachenko A.L.** Modification of metal-oxide-semiconductor devices by electron injection in high-fields. – *Vacuum*, 2002, v.67/3-4, p.507-511.
20. **Андреев В.В., Бондаренко Г.Г., Масловский В.М., Столяров А.А.** Multilevel current stress technique for investigation thin oxide layers of MOS structures. – *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 41 (2012) 012017.
21. **Масловский В.М., Климов Ю. А., Самсонов Н.С., Симанович Е.В.** Изменения электрофизических параметров систем Si-SiO₂, индуцированные импульсным магнитным полем. – *ФТП*, 1994, т.28, №5, с.772-777.