

Зарядовые характеристики МДП-структур с термическими плёнками SiO₂, легированными фосфором, при сильнополевой инжекции электронов

Д. В. Андреев, Г. Г. Бондаренко, А. А. Столяров

Исследованы процессы изменения зарядового состояния структур металл – диэлектрик – полупроводник (МДП) с многослойным подзатворным диэлектриком на основе термической пленки SiO₂, легированной фосфором, при воздействии сильнополевой инжекцией электронов. Установлено, что отрицательный заряд, накапливающийся в тонкой плёнке фосфорно-силикатного стекла (ФСС) в МДП-структурах с двухслойным подзатворным диэлектриком SiO₂ – ФСС в процессе сильнополевой туннельной инжекции электронов, может использоваться для корректировки пороговых напряжений, повышения зарядовой стабильности и увеличения пробивных напряжений МДП-приборов. Показано, что с увеличением толщины пленки ФСС возрастает плотность электронных ловушек, связанных с ней, при этом сечения захвата электронных ловушек остаются неизменными. Предложен способ модификации электрофизических характеристик МДП-структур путём сильнополевой туннельной инжекции электронов в диэлектрик в режиме управляемой токовой нагрузки. Способ позволяет контролировать изменение параметров МДП-структуры непосредственно во время модификации. Показано, что для получения приборов с высокой термической стабильностью после модификации зарядового состояния инжекцией электронов их необходимо отжигать при температурах около 200 °С.

Ключевые слова: МДП-структура, диэлектрическая плёнка, фосфорно-силикатное стекло, сильные электрические поля, инжекционный ток, модификация.

Введение

Легирование пленки подзатворного диэлектрика на основе термического диоксида кремния фосфором может применяться специально для стабилизации характеристик приборов [1 – 8]. Плёнка ФСС может возникать также при использовании затворов из поликристаллического кремния, легированных фосфором [7]. Наличие плёнки ФСС существенно меняет характер изменения зарядового состояния МДП-структур как при сильнополевой инжекции электронов в диэлектрик, так и при радиационном облучении по сравнению со структурами на основе термической пленки SiO₂, не легированной фосфором. В последнее время подзатворный диэлектрик на основе пленки SiO₂, пассивированной ультратонкой пленкой ФСС, широко используют в полевых приборах на основе карбида кремния [3, 4]. Формирование пленки ФСС позволяет уменьшить плотность поверхностных ловушек на границе раздела 4H-SiC/SiO₂. В работе [5] показано, что фосфор более эффективен

для пассивации границы раздела 4H-SiC/SiO₂ по сравнению с азотом. Основной проблемой при создании диэлектрических пленок для полупроводниковых приборов на основе МДП-структур, позволяющих управлять параметрами приборов путем инжекционной и радиационной модификации после их изготовления, является создание требуемой оптимальной структуры диэлектрической пленки, обеспечивающей эффективный захват носителей заряда на ловушки и обладающей высокой инжекционной и радиационной стойкостью и низкой зарядовой дефектностью [4, 6 – 8]. Таким образом, необходимо проведение комплексного и всестороннего исследования технологического процесса легирования плёнки SiO₂ фосфором и самой структуры SiO₂-ФСС с целью оптимизации параметров диэлектрической пленки, необходимой для повышения стабильности и надежности МДП-приборов.

Цель данной работы — оценка возможности модификации МДП-структур с пленкой SiO₂, легированной фосфором, путём сильнополевой

туннельной инжекции электронов в подзатворный диэлектрик, а также исследование влияния режимов легирования пленки SiO₂ фосфором на характеристики МДП-структур.

Методики и экспериментальные образцы

В качестве экспериментальных образцов использовали тестовые МДП-конденсаторы на основе термического диоксида кремния (SiO₂) и пленки SiO₂, легированной фосфором, изготовленные на кремнии *n*-типа. Диоксид кремния толщиной 7 – 50 нм получали термическим окислением кремния в атмосфере кислорода при температурах 850 – 1000 °С. Пленку ФСС толщиной 3 – 22 нм формировали диффузией фосфора из газовой фазы, используя в качестве диффузанта пары POCl₃ и PCl₃, при температуре 900 °С. С целью получения экспериментальных образцов с различной толщиной ФСС варьировали время загонки фосфора в пределах от 1,5 до 7 минут. Затем для окончательного формирования пленки ФСС в течении 15 минут пластины отжигали в атмосфере азота при температуре 1000 °С. В качестве затвора использовали пленки поликремния (Si*), легированные фосфором, площадью 10⁻⁴ – 10⁻² см².

Толщину пленки ФСС измеряли методом химического травления в селективном травителе (азотная кислота — 31 мл, фтористоводородная кислота — 46 мл, вода деионизованная — 923 мл). Толщина пленки ФСС определяли как разность толщин диэлектрической пленки (измеренной эллипсометрическим методом) до и после травления [8].

Для инжекционной модификации МДП-структур использовали сильнополевую туннельную инжекцию электронов из кремниевой подложки [9 – 11] в режиме протекания постоянного инжекционного тока плотностью от 0,1 мкА/см² до 10 мА/см². В процессе инжекции осуществляли контроль напряжения на МДП-структуре, что позволило получить информацию об изменении зарядового состояния диэлектрической пленки непосредственно в процессе модификации. Для определения величины термостабильной компоненты накопленного в диэлектрике отрицательного заряда, после инжекционных обработок МДП-структуры подвергали отжигу при температурах 150 – 250 °С во временном интервале от 200 с до 30 мин.

Изменение зарядового состояния МДП-структур контролировали с использованием *C – V* метода и метода многоуровневой токовой нагрузки [11]. В течение сильнополевой инжекции в режиме протекания постоянного тока измеряли приращение напряжения на МДП-структуре ΔV_s , характеризующее изменение зарядового состояния исследуемого образца [6, 8, 11].

Экспериментальные результаты и обсуждение

Исследованы изменения и модификации зарядового состояния МДП-структур при сильнополевой туннельной инжекции электронов в подзатворный диэлектрик. Отличительной особенностью МДП-структур с двухслойным диэлектриком SiO₂-ФСС при сильнополевой инжекции электронов является накопление отрицательного заряда в пленке ФСС [3, 7, 12]. Согласно предположениям, сделанным в работах [6, 12], инжектированные в диэлектрик электроны захватываются положительно заряженными группами, присутствующими в пленке ФСС. Эти электронные ловушки, по-видимому, вносят основной вклад в величину накапливаемого отрицательного заряда в пленке ФСС у границы SiO₂-ФСС и имеют сечение захвата $\sigma_1 = 1,4 \cdot 10^{-15}$ см² [8, 12, 13]. Как было показано в [12], помимо ловушек первого типа у границы SiO₂-ФСС присутствуют электронные ловушки с сечением захвата $\sigma_2 = 3,2 \cdot 10^{-16}$ см², наблюдаемые при инжекции электронов из Si, и электронные ловушки с сечением захвата $\sigma_3 = 7 \cdot 10^{-16}$ см², присутствующие при инжекции электронов из затвора. В [12] было сделано предположение, что электронные ловушки с сечениями захвата σ_2 и σ_3 имеют одну физическую природу, а разница в величине сечений захвата обусловлено различием условий при инжекции электронов из Si подложки или затвора, а также различием в перераспределении внутренних электрических полей в объеме подзатворного диэлектрика, связанными с накоплением отрицательного заряда в пленке ФСС. Одним из возможных объяснений появления электронных ловушек второго типа является воздействие молекул POCl₃ или PCl₃ на структуру SiO₂ [6, 14], вследствие которого происходит перестройка структуры диоксида кремния вблизи границы раздела SiO₂-ФСС, приводящая к появлению оборванных связей кислорода, которые могут выступать в роли электронных ловушек. Таким образом, учитывая ранее полученные экспериментальные данные [3, 6, 12], кинетика накопления отрицательного заряда в МДП-структуре с подзатворным диэлектриком SiO₂-ФСС может быть удовлетворительно описана следующей формулой:

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

где q — заряд электрона; Q_{inj} — заряд, инжектированный в диэлектрик. В случае инжекции электронов из кремниевой (Si) подложки $Q_{03} = 0$, в то время как при инжекции электронов из затвора $Q_{02} = 0$.

На рис. 1 приведены зависимости приращения напряжения на МДП-структуре в процессе сильно-

полевой инжекции электронов из подложки постоянным током (1) и приращения напряжения, обусловленного интегральным зарядом на поверхностных состояниях (2), а также изменение этих зависимостей при последующем отжиге образца при 200 °С (1', 2') от плотности инжектированных электронов. Приращение напряжения, обусловленное интегральным зарядом на поверхностных состояниях, определяли при анализе $C - V$ характеристик. Для реализации режима сильнополевой инжекции электронов из кремниевой подложки к затвору МДП-структуры прикладывали импульс постоянного тока плотностью 1 мкА/см². Плотность инжектированных электронов (рис. 1) определяли как $N = Q_{inj} / q$.

На рис. 1 кривая 1' характеризует термостабильную компоненту отрицательного заряда, для получения которой после инжекционной модификации МДП-структуры отжигали при температуре 200 °С в течение 20 мин [12].

При инжекции электронов из кремния с увеличением толщины слоя ФСС увеличивается диапазон возможных изменений порогового напряжения МДП-транзисторов с двухслойным подзатворным диэлектриком SiO₂ – ФСС. Однако для обеспечения приемлемых значений плотности поверхностных состояний величина инжектированного заряда при корректировке порогового напряжения не должна превышать 0,3 мКл/см². Диапазон токового воздействия при изменении зарядового состояния МДП-приборов целесообразно ограничить 10⁻⁷ – 10⁻⁵ А/см². Уменьшение амплитуды токового воздействия сопровождается трудностями технической реализации и

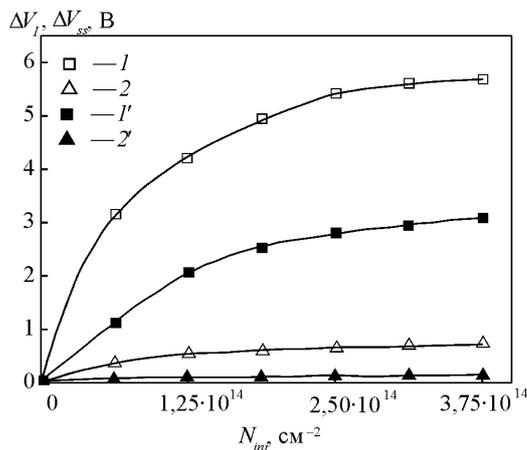


Рис. 1. Зависимости приращения напряжения на МДП-структуре в процессе инжекционной модификации постоянным током (1) и зависимости приращения напряжения, обусловленного интегральным зарядом на поверхностных состояниях (2) в процессе инжекции, а также изменение этих зависимостей после отжига при 200 °С (1', 2') от плотности инжектированных электронов.

нецелесообразно в связи со значительным возрастанием времени инжекции требуемой величины заряда. Увеличение плотности инжекционного тока приводит к значительному возрастанию вероятности пробоя образца, а также к повышению плотности поверхностных состояний на границе Si – SiO₂ [12] при инжекции электронов из Si.

На рис. 2 представлены зависимости приращения напряжения (ΔV_T) на МДП-структуре при туннельной инжекции электронов из кремния импульсом тока $j_0 = 1$ мкА/см² от величины инжектированного заряда для МДП-структур с различной толщиной пленки ФСС при общей толщине подзатворного диэлектрика SiO₂ – ФСС, равной 40 нм.

Прерывая процесс инжекции через определённые промежутки времени (процесс прерывания не влиял на вид экспериментальных зависимостей), измеряли сдвиг напряжения плоских зон ΔV_{FB} по $C - V$ характеристикам и величину изменения напряжения на образце при отрицательной полярности затвора $\Delta V_T (-)$. Изменение напряжения на образце при отрицательной полярности затвора определяли при той же плотности тока, которую использовали для инжекции электронов из кремниевой подложки. Анализ полученных зависимостей позволил установить, что центром отрицательного заряда располагался в плёнке ФСС ближе к границе раздела SiO₂ – ФСС. Установлено, что накопление отрицательного заряда для всех зависимостей, приведенных на рис. 2, хорошо описывается формулой (1), а доминирующими являются электронные ловушки с сечением захвата $\sigma_1 = 1,4 \cdot 10^{-15}$ см².

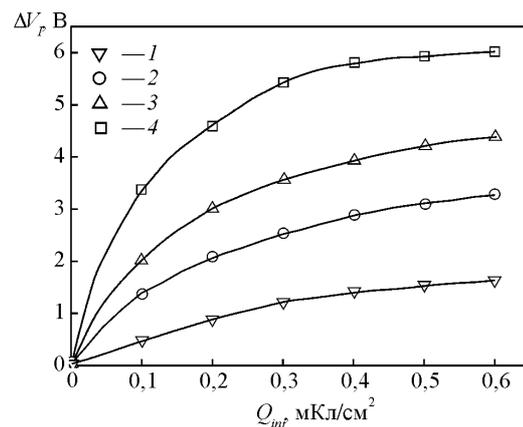


Рис. 2. Зависимости приращения напряжения на МДП-структуре с толщиной подзатворного диэлектрика SiO₂ – ФСС 40 нм в процессе инжекционной модификации постоянным током от плотности инжектированного заряда для плёнки ФСС с различной толщиной, нм: 1 – 5; 2 – 9; 3 – 13; 4 – 22.

Аналогичные результаты были получены и для МДП-структур с более толстым подзатворным диэлектриком и алюминиевым затвором [6, 8].

Из рис. 2 видно, что с повышением толщины пленки ФСС возрастает диапазон возможных изменений ΔV_T при одинаковой величине инжектированного заряда. Это связано как со смещением центра тока накапливаемого отрицательного заряда к границе раздела Si – SiO₂ при увеличении толщины пленки ФСС, так и с возрастанием плотности накапливаемого отрицательного заряда. Проведение высокотемпературного отжига для всех четырех групп образцов при температуре 200 °С в течении 20 минут приводило к стеканию 40 – 50 % отрицательного заряда, накопленного во время сильнополевой инжекции электронов. Увеличение длительности отжига практически не влияло на оставшуюся термостабильную компоненту отрицательного заряда. Возрастание толщины пленки ФСС не приемлемо для тонких подзатворных диэлектриков, так как может привести к сквозному легированию пленки SiO₂ фосфором и, как следствие, вызвать ухудшение зарядовой стабильности подзатворного диэлектрика и границы раздела диэлектрик – полупроводник. Повышение концентрации фосфора в пленке ФСС более 1,5 % может привести к возникновению поляризации и снижению зарядовой стабильности подзатворного диэлектрика [5, 8, 12]. Следовательно, увеличение диапазона коррекции электрофизических параметров МДП-приборов более предпочтительно проводить изменением соотношения между толщинами пленок диоксида кремния и ФСС, смещая центр отрицательного заряда к границе раздела Si – SiO₂, при этом концентрация фосфора в пленке ФСС не должна превышать 1,5 % [12].

Выполненные оценочные расчеты постоянной времени релаксации отрицательного заряда с высокой термической стабильностью в диапазоне рабочих температур МДП-приборов дали значение более $4 \cdot 10^8$ с. Эти расчеты были выполнены с использованием зависимостей термостимулированной деполяризации (ТСД) [8] и экспериментальных данных по релаксации $C - V$ характеристик в изотермических условиях. Следовательно, для получения МДП-приборов с высокой температурной стабильностью параметров после коррекции зарядового состояния структур их необходимо отжигать при температурах не ниже 200 °С, а модификацию характеристик проводить с учетом стекания части заряда при отжиге.

Накопление в объеме подзатворного диэлектрика заданной плотности термостабильной компоненты отрицательного заряда позволяет корректировать

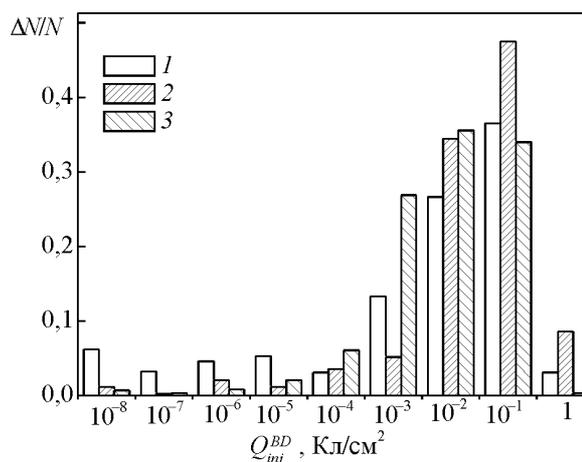


Рис. 3. Гистограммы распределения МДП-структур по заряду, инжектированному в диэлектрик до его пробоя для образцов: 1 – с подзатворным диэлектриком SiO₂, 2, 3 – с двухслойным подзатворным диэлектриком SiO₂ – ФСС для пленки ФСС с различной толщиной, нм: 2 – 9; 3 – 22.

пороговое напряжение МДП-транзисторов, а также повышать пробивное напряжение подзатворного диэлектрика и уменьшать вероятность его пробоя путем залечивания дефектов (“слабых мест”) за счет накопления в них отрицательного заряда [10, 12]. На рис. 3 представлены гистограммы распределения МДП-структур по заряду, инжектированному в диэлектрик до его пробоя в режиме протекания постоянного тока [1, 15] для образцов с подзатворным диэлектриком SiO₂ (1) и образцов с двухслойным подзатворным диэлектриком SiO₂ – ФСС (2, 3). Как видно из рис. 3, применение двухслойного подзатворного диэлектрика SiO₂ – ФСС позволяет повысить среднюю величину заряда, инжектированного в диэлектрик до его пробоя и уменьшить количество дефектных структур с малым значением заряда, инжектированного до пробоя. Этот эффект объясняется залечиванием “слабых мест” в подзатворном диэлектрике за счет накопления в них отрицательного заряда и, как следствие, уменьшением величины локальных инжекционных токов, протекающих в местах дефектов и приводящих к его пробояю. В результате захвата инжектированных электронов увеличивается потенциальный барьер, препятствующий локализации токов в областях протяженных дефектов у границы с подложкой.

На рис. 4 показаны энергетические зонные диаграммы, иллюстрирующие накопление зарядов и распределение локальных электрических полей в структуре Si – SiO₂ – ФСС – Si* при инжекции электронов из кремния. В режиме протекания постоянного инжекционного тока, при котором

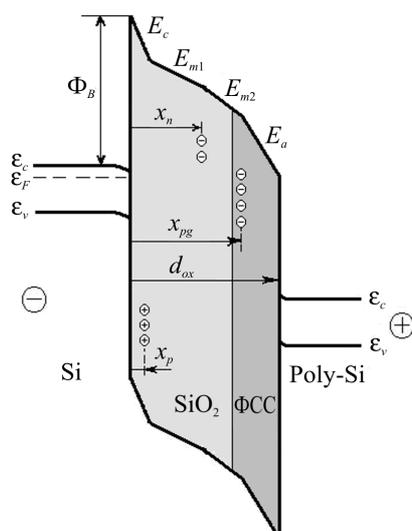


Рис. 4. Энергетическая зонная диаграмма, иллюстрирующая накопление зарядов и распределение локальных электрических полей в структуре Si – SiO₂ – FCC – Si* при инжекции электронов из кремниевой подложки. x_p , x_n , x_{pg} – расстояния от границы Si – SiO₂ до центроидов положительного и отрицательных зарядов, накопленных в пленке SiO₂ и FCC, соответственно; E_c и E_a – электрические поля в диэлектрике у катода и анода; E_{m1} и E_{m2} – электрические поля в объеме диэлектрика между центроидами накопленных зарядов; Φ_B – высота потенциального барьера на инжектирующей границе раздела, d_{ox} – толщина диэлектрической пленки)

проводили измерения, приведенные на гистограммах на рис. 3, накопление отрицательного заряда в пленке FCC приводит к возрастанию локального электрического поля между центроидом этого заряда и анодом E_a . По-видимому, это является основной причиной уменьшения средней величины заряда, инжектированного до пробоя, для образцов с толщиной пленки FCC $d_{PSC} = 22$ нм (рис. 3, 3), по сравнению с образцами, у которых $d_{PSC} = 9$ нм (рис. 3, 2), поскольку высокая плотность отрицательного заряда приводит к большему увеличению локального электрического поля E_a . Следовательно, сильное легирование пленки SiO₂ фосфором, и как следствие, увеличение толщины пленки FCC в двухслойном подзатворном диэлектрике SiO₂ – FCC может привести к снижению зарядовой стабильности МДП-приборов. При проведении инжекционной модификации МДП-структур Si – SiO₂ – FCC – Si* путем сильнополевой туннельной инжекции электронов в подзатворный диэлектрик целесообразно выбирать такие режимы инжекции, чтобы минимизировать накопление положительного заряда у границы раздела Si – SiO₂ и отрицательного заряда в объеме пленки SiO₂ [8, 12]. Как видно из рис. 4, накопление отри-

цательного заряда в пленке FCC приводит к повышению энергетического барьера на инжектирующей границе раздела и, как следствие, к увеличению пробивных напряжений подзатворного диэлектрика. Однако повышение пробивного напряжения подзатворного диэлектрика сопровождается изменением пороговых напряжений МДП-транзисторов, что необходимо учитывать при проведении инжекционной модификации таких приборов.

Выводы

1. Установлено, что отрицательный заряд, накапливающийся в пленке FCC в структурах с двухслойным подзатворным диэлектриком SiO₂ – FCC в процессе сильнополевой туннельной инжекции электронов, можно использовать для модификации МДП-приборов. Показано, что применение сильнополевой инжекции электронов для модификации зарядового состояния МДП-структур дает возможность проводить индивидуальную коррекцию характеристик каждого прибора и при определенных режимах сильнополевой инжекции — значительно снизить сопутствующие деградационные процессы.

2. Установлено, что как плотность накапливаемого отрицательного заряда, так и плотность его термостабильной компоненты возрастает с увеличением длительности легирования SiO₂ фосфором, приводящей к росту толщины пленки FCC, при этом сечения захвата электронных ловушек остаются неизменными.

3. Показано, что применение двухслойного подзатворного диэлектрика SiO₂ – FCC позволяет повысить среднюю величину заряда, инжектированного в диэлектрик до его пробоя и уменьшить количество дефектных структур с малым значением заряда, инжектированного до пробоя. Этот эффект объясняется залечиванием слабых мест в подзатворном диэлектрике за счет накопления в нём отрицательного заряда и, как следствие, повышения барьера и уменьшения величины локальных инжекционных токов.

Работа выполнена в рамках государственного задания МГТУ им. Н.Э. Баумана министерства образования и науки РФ (проект № 1117) и в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ в 2015 году.

Литература

1. Strong A.W., Wu E.Y., Vollertsen R., Sune J., Rosa G.L., Rauch S.E., Sullivan T.D. Reliability wearout mechanisms in advanced CMOS technologies. Wiley-IEEE Press, 2009, 624 p.

2. Balk P., Eldridge J.M. Phosphosilicate glass stabilization of FET devices. Proc. of the IEEE, 1969, v. 57, p. 1558 – 1563.
3. 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, pp. 377 – 380.
4. Sharma Y.K., Ahyi A.C., Issacs-Smith T., Shen X., Pantelides S.T., Zhu X., Feldman L.C. Phosphorous passivation of the SiO₂/4H–SiC interface. Solid-State Electronics, 2012, v. 68, pp. 103 – 107.
5. Sharma Y.K., Xu Yi., Jennings M.R., Fisher C., Mawby P., Feldman L.C., Williams J.R. Improved Stability of 4H SiC-MOS Devices after Phosphorous Passivation with Etching Process. IJFPS, 2014, v. 4, no. 2, pp. 37 – 42.
6. 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, pp. 507 – 511.
7. 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.
8. 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 высокополево́й туннельной инжекции. Микроэлектроника, 1997, № 6, с. 640 – 646.
9. Andreev V.V., Bondarenko G.G., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A., Andreev D.V. Modification and Reduction of Defects in Thin Gate Dielectric of MIS Devices by Injection-Thermal and Irradiation Treatments. Phys. Status Solidi C, 2015, v. 12, no. 1 – 2, p. 126 – 130.
10. Lombardo S., Stathis J.H., Linder P., Pey K.L., Palumbo F., Tung C.H. Dielectric breakdown mechanisms in gate oxides. J. Appl. Phys., 2005, v. 98, p. 121301 (1 – 36).
11. Andreev V.V., Bondarenko G.G., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A. Multilevel current stress technique for investigation thin oxide layers of MOS structures. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2012, v. 41, p. 012017 (1 – 9).
12. Andreev V.V., Bondarenko G.G., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A. Modification of Gate Dielectric in MOS Devices by Injection-Thermal and Plasma Treatments. Acta Phys. Pol. A, 2014, v. 125, no. 6, p. 1371 – 1373.
13. Bondarenko G.G., Andreev V.V., Drach V.E., Loskutov S.A., Stolyarov M.A.: Study of temperature dependence of positive charge generation in thin dielectric film of MOS structure under high-fields. Thin Solid Films, 2006, v. 515, p. 670 – 673.
14. Красников Г.Я., Зайцев Н.А. Система кремний-диоксид кремния субмикронных СБИС. М.: Техносфера, 2003, 384 с.
15. Андреев В.В., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А., Ахмедкин Д.М. Модификация диэлектрических пленок МДП-структур инжекционно-термической обработкой. Перспективные материалы, 2014, № 12, с. 25 – 31.

References

1. Strong A.W., Wu E.Y., Vollertsen R., Sune J., Rosa G.L., Rauch S.E., Sullivan T.D. Reliability wearout mechanisms in advanced CMOS technologies. Wiley-IEEE Press, 2009, 624 p.
2. Balk P., Eldridge J.M. Phosphosilicate glass stabilization of FET devices. Proc. of the IEEE, 1969, vol. 57, pp. 1558 – 1563.
3. 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, vol. 427, pp. 377 – 380.
4. Sharma Y.K., Ahyi A.C., Issacs-Smith T., Shen X., Pantelides S.T., Zhu X., Feldman L.C. Phosphorous passivation of the SiO₂/4H–SiC interface. Solid-State Electronics, 2012, vol. 68, pp. 103 – 107.
5. Sharma Y.K., Xu Yi., Jennings M.R., Fisher C., Mawby P., Feldman L.C., Williams J.R. Improved Stability of 4H SiC-MOS Devices after Phosphorous Passivation with Etching Process. IJFPS, 2014, v. 4, no. 2, pp. 37 – 42.
6. 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, vol. 67, pp. 507 – 511.
7. Levin M.N., Tatarintsev A.V., Makarenko V.A., Gitlin V.R. Modelirovanie processov rentgenovskoi korrekcirovki porogovih napryazhenii MDP-integral'nih shem [X-ray or UV adjustment of MOS threshold voltage: Analytical and numerical modeling]. *Mikroelektronika — Russian Microelectronics*, 2006, vol. 35, iss. 5, pp. 329 – 336. Reference: <http://link.springer.com/article/10.1134/S1063739706050088>.
8. Andreev V.V., Baryshev V.G., Bondarenko G.G., Stolyarov A.A., Shakhnov V.A. Zaryadovaya degradatsiya MDP-sistem s termicheskim oxidom kremniya, passivirovannim fosforno-silikatnim steklom, pri visokopolevoi tunnel'noi inzhetsii [Charge degradation of MIS structures with phosphosilicate glass-passivated thermal silicon oxide at high-field tunnel injection]. *Mikroelektronika — Russian Microelectronics*, 1997, vol. 26, pp. 378 – 383.
9. Andreev V.V., Bondarenko G.G., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A., Andreev D.V. Modification and Reduction of Defects in Thin Gate Dielectric of MIS Devices by Injection-Thermal and Irradiation Treatments. Phys. Status Solidi C, 2015, vol. 12, no. 1 – 2, pp. 126 – 130.
10. Lombardo S., Stathis J.H., Linder P., Pey K.L., Palumbo F., Tung C.H. Dielectric breakdown mechanisms in gate oxides. J. Appl. Phys., 2005, vol. 98, p. 121301 (1 – 36).
11. Andreev V.V., Bondarenko G.G., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A. Multilevel current stress technique for investigation thin oxide layers of MOS structures. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2012, vol. 41, p. 012017 (1 – 9).
12. Andreev V.V., Bondarenko G.G., Maslovsky V.M., Stolyarov A.A. Modification of gate dielectric in MOS devices by injection-thermal and plasma treatments. Acta Phys. Pol. A, 2014, vol. 125, no. 6, pp. 1371 – 1373.

13. Bondarenko G.G., Andreev V.V., Drach V.E., Loskutov S.A., Stolyarov M.A. Study of temperature dependence of positive charge generation in thin dielectric film of MOS structure under high-fields. *Thin Solid Films*, 2006, vol. 515, pp. 670 – 673.
14. Krasnikov G.Y., Zaitsev N.A. *Sistema kremnii-dioxid kremiya sybmikronnih SBIS* [System silicon-silicon dioxide of submicron VLSI circuits]. Moscow, Technosphaera Publ., 2003, 384 p.
15. Andreev V.V., Bondarenko G.G., Stolyarov A.A., Akhmelkin D.M. Modifikatsiya dielektricheskikh plenok MDP-struktur inzhektionsionno-termicheskoi obrabotkoi [Modification of MOS dielectric films by injection-thermal treatment]. *Perspektivnye materialy — Inorganic Materials: Applied Research*, 2015, vol. 6, no. 2, pp. 128 – 132. Reference: <http://link.springer.com/article/10.1134/S2075113315020021>.

Статья поступила в редакцию 23.04.2015 г.

Андреев Дмитрий Владимирович — Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э.Баумана (г. Калуга, 248000, ул. Баженова, 2), аспирант, специализируется в области физики полупроводниковых и диэлектрических материалов. E-mail: andreev@bmstu-kaluga.ru.

Бондаренко Геннадий Германович — Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики” (НИУ ВШЭ) (г. Москва, 101000, ул. Мясницкая, 20), доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией, специалист в области физики конденсированного состояния, радиационной физики твердого тела. E-mail: bondarenko_gg@rambler.ru.

Столяров Александр Алексеевич — Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э.Баумана (г. Калуга, 248000, ул. Баженова, 2), доктор технических наук, профессор, специалист в области физики полупроводниковых и диэлектрических материалов. E-mail: alalstol@mail.ru.

Charge characteristics of MOS structures with thermal SiO₂ films doped with phosphorus by electron injection

D. V. Andreev, G. G. Bondarenko, A. A. Stolyarov

We have investigated processes of modification and changing of the charge state of MOS structures having a multilayer gate dielectric based on a thermal SiO₂ film doped with phosphorus under conditions of different modes of high-field electron injection. We have determined that negative charge, accumulating in the PSG thin film (phosphosilicate glass) of the MOS structures having the two-layer gate dielectric SiO₂-PSG under conditions of high-field tunneling injection of electrons, could be used for a modification of the devices with SiO₂-PSG gate dielectric (e.g. correction of threshold voltage, improvement of charge stability and increase breakdown voltage of the MOS structure). We have shown that when the increase of thickness of PSG film, a raising of the electron traps density occurred, but the value of the cross-section of electron traps was the same. We have proposed a method to modify the MOS structures by high-field tunneling injection of electrons into dielectric in the mode of a current stress. The method allows to control the changing of MOS structure parameters at the time of MOS modification. It was established that in order to obtain MOS structures with high thermal stability, one has to anneal them at 200 °C after injection modification.

Key words: MOS-structure, dielectric film, phosphosilicate glass, high-field stress, injection current, modification.

Andreev Dmitrii — Kaluga branch of Bauman Moscow State Technical University (Kaluga, 248000, Bazhenov str., 2), post-graduate student, specialist in physics of semiconductors and dielectrics. E-mail: andreev@bmstu-kaluga.ru.

Bondarenko Gennady — National Research University Higher School of Economics (Moscow, 101000, Myasnitskaya Ulitsa, 20), Dr Sci (Phys-Math), professor, head of laboratory, specialist in condensed matter physics and radiation solid-state physics. E-mail: bondarenko_gg@rambler.ru.

Stolyarov Alexander — Kaluga branch of Bauman Moscow State Technical University (Kaluga, 248000, Bazhenov str., 2), DrSci (Eng), professor, specialist in physics of semiconductors and dielectrics. E-mail: alalstol@mail.ru.