

ПАРАМЕТРЫ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК В УЛЬТРАТОНКИХ ПЛЁНКАХ ОКСИДА КРЕМНИЯ С НЕОДНОРОДНОЙ БЛОКИРУЮЩЕЙ ГРАНИЦЕЙ

Г. В. Перов¹, А. В. Сеница^{1,2}

¹АО «Новосибирский завод полупроводниковых приборов с ОКБ», 630082, г. Новосибирск, ул. Дачная, 60

²Новосибирский государственный технический университет, 630073, г. Новосибирск,
пр. Карла Маркса, 20

В статье определены пределы электрической совместимости процессов ионной и электронной проводимости ультратонкого диэлектрика цифровых и аналоговых микросхем со сложной архитектурой компонентов при приближении к экстремальным нагрузкам. Превышение критических значений электрических полей, кумулятивной энергии, концентрации подвижного заряда на неоднородностях архитектуры отнесены к кондуктивным помехам в диэлектрических плёнках.

Ключевые слова: электронная, ионная проводимость оксида кремния в цифровых и аналоговых устройствах, моделирование проводимости оксида кремния с неоднородной границей, кондуктивные помехи

Сведения об авторах: Перов Геннадий Васильевич, к.т.н., доцент, mef@ngs.ru; Сеница Анна Вячеславовна, kuldir88@mail.ru

PARAMETERS OF EXTREME ELECTRICAL STRESS IN ULTRATHIN FILMS OF SILICON OXIDE WITH INHOMOGENEOUS BLOCKING EDGE

G. V. Perov¹, A. V. Sinitsa^{1,2}

¹JSC «Novosibirsk facility of semiconductor devices with experimental design bureau»,
630082, Novosibirsk, Dachnaya street, 60

²Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, prospekt Karla Marksa, 20

Limits of electrical matching of ion and electron conductance in ultrathin dielectric of digital and analog microchips with complex structure were defined under near-extreme load conditions. The exceed of electrical fields critical values, cumulative energy, charge density on structure inhomogeneities are related to the conductive interference in dielectric films.

Keywords: electron, ion conductance of silicon oxide in digital and analog devices, silicon oxide conductance modeling with inhomogeneous edge, conductive interference

Data of authors: Perov Gennady Vasilyevich, Ph.D., associate professor, mef@ngs.ru; Sinitsa Anna Vyacheslavovna, kuldir88@mail.ru

Введение

Пространственная архитектура современных аналоговых и цифровых электронных компонентов постоянно усложняется (флеш-память, ЦАП, АЦП, ИК преобразователи оптического сигнала – ИКП). Современные

компоненты высокого уровня расширяют возможности системных электронных устройств.

Перепрограммируемая флеш-память применяется в качестве носителя программ для микроконтроллеров HDD и CD-ROM, хранения BIOS в ПК, сменной памяти в цифро-

вых мультимедийных устройствах, сотовых телефонах, электронных часах и т. д. [1].

ЦАП позволяют построить делители функций, аналоговые звенья, управляемые от микроконтроллеров, такие как аттенюаторы, интеграторы, генераторы сигналов.

АЦП используются в компьютерной, медицинской, измерительной технике, телефонии [2].

Поиск, обнаружение и опознавание теплоизлучающих и теплоотражающих объектов в космосе и на Земле, а также многие другие задачи решает сегодня инфракрасная техника (ИКТ; космическая оптическая связь и наведение космических аппаратов, исследование природных ресурсов Земли, метеорологическая разведка) [3].

В микросхемах в активных режимах в основном используются тонкие и ультратонкие плёнки диоксида кремния (в качестве подзатворного диэлектрика МДП-транзисторов, в межуровневой изоляции поликремниевого затвора флеш-памяти, кремниевых ИКП). Поэтому исследования, направленные на оптимизацию условий эксплуатации тонких и ультратонких диэлектриков на рельефных поверхностях микросхемы, актуальны.

Постановка задачи

Современные цифровые и аналоговые микросхемы имеют многоуровневую архитектуру (рис. 1).

Диэлектрические плёнки в межуровневой изоляции микросхем РПЗУ, кремниевых ИКТ формируются в основном термическим окислением плёнки затвора (поликремния). В результате термического окисления поликремниевого затвора, особенно при низких температурах, во влажном кислороде, парах воды на горизонтальной поверхности и на углах рельефа может радикально измениться профиль (рис. 2) [4, 5].

Возникающие неоднородности искажают карту распределения электрических полей в изолирующих оксидных плёнках и приводят к увеличению их проводимости. Таким образом, задача установления норм на превышение предельно допустимых значений проводимости диэлектрика на неоднородностях архитектуры в зависимости от изменения горизонтального и вертикального рельефов проводящих слоёв является актуальной.

Целью настоящей работы является нормирование параметров электрической проводимости (электронной и ионной) термической двуокиси поликремния с учётом неоднородности поверхности.

Теория

Электронная проводимость термического оксида кремния с плоской границей.

Проводимость слоя изолятора в идеальной МДП-структуре предполагается рав-

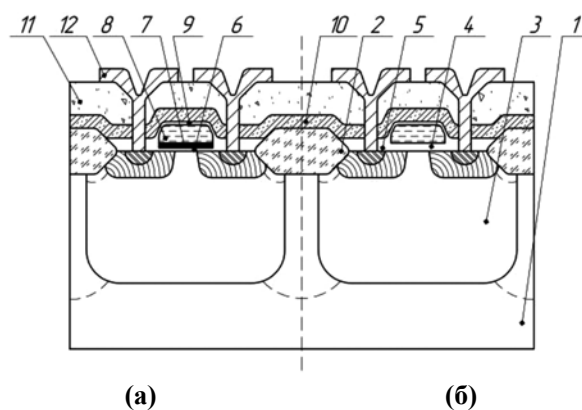


Рис. 1

Cross-section фрагмента электрически перепрограммируемой ячейки памяти:

а) элемент памяти (ЭП); б) полевой транзистор (ПТ) ячейки памяти;

- 1 – подложка п-кремния; 2 – LOCOS изоляция; 3 – р-карман; 4 – подзатворный окисел полевого транзистора; 5 – исток-сток ЭП и ПТ; 6 – туннельный окисел; 7 – нитрид кремния;**
- 8 – поликремний; 9 – окисел поликремния; 10 – окисел изолирующий из парогазовой среды;**
- 11 – защитный слой фосфоросиликатного стекла; 12 – Al**

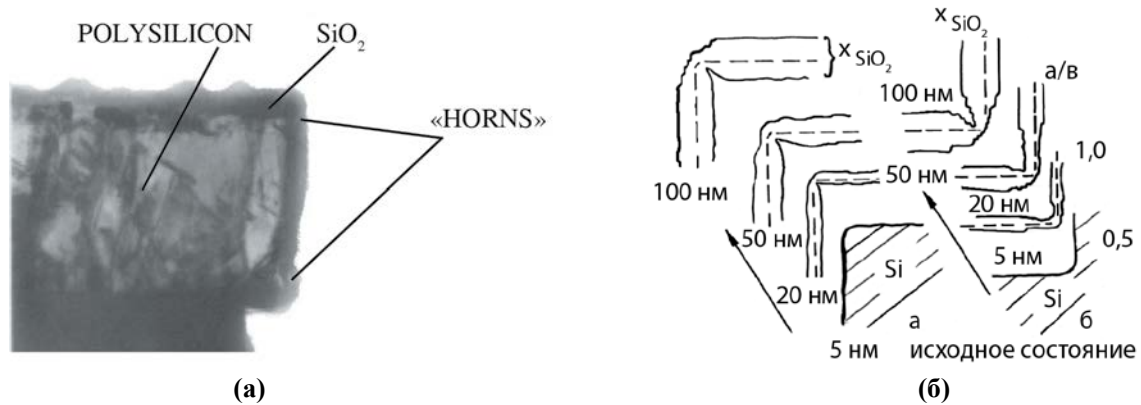


Рис. 2

ТЕМ фотография Cross-section поликремниевого затвора (а) и схема последовательности образования «усов» («horn») на крае ступеньки кремния (б) при низкотемпературном окислении в парах воды; видно образование усов («horn») в углах затвора [4, 5]

ной нулю. Реальные диэлектрики обладают проводимостью, особенно заметной в сильных электрических полях [6]. По закону сохранения электрической индукции поле в диэлектрике E_i и электрическое поле E_s в полупроводнике на границе с диэлектриком связаны соотношением:

$$E_i = E_s \cdot \left(\frac{\epsilon_s}{\epsilon_i}\right), \quad (1)$$

где ϵ_s и ϵ_i – соответствующие диэлектрические проницаемости. Так например, в системе Si-SiO₂, когда поле в кремнии достигает характерной для лавинного пробоя величины $3 \cdot 10^5$ В·см⁻¹, соответствующее поле в окисле примерно в три раза больше $3 \cdot 10^5$ В·см⁻¹, поскольку $\epsilon_s/\epsilon_i = 11,7/3,9$. Проводимость ультратонких слоёв диоксида кремния SiO₂ менее 5 нм и более толстых в области высоких электрических полей $E > 5$ МВ/см определяется «эффектами туннелирования» Фаулера-Нордгейма:

$$J_{\text{Ф-Н}} = E^2 \exp \left[- \frac{4\sqrt{2m^*}(q\phi_B)^{3/2}}{3q\hbar E} \right], \quad (2)$$

где m^* – эффективная масса электронов в запрещённой зоне SiO₂; q , m – заряд и масса свободного электрона; \hbar – постоянная Планка; ϕ_B – высота барьера на границе подложки или плёнки с диэлектриком.

В более слабых полях могут наблюдаться избыточные токи по дефектам границы раздела или объёма оксида по сравнению с током Фаулера-Нордгейма.

Ионная проводимость оксида кремния с плоской блокирующей границей.

Ионная проводимость оксида кремния проявляется при повышенной температуре и связана с перемещением ионов (Na⁺, K⁺) во внешнем электрическом поле. Источником ионов являются элементы оснастки, конструкции оборудования.

Энергия взаимодействия иона с диэлектрической средой оксида кремния представляет собой пространственно распределённую систему потенциальных ям и барьеров (рис. 3). Ионы колеблются около равновесных положений вблизи дна потенциальных ям. В результате тепловых флуктуаций ионы перескакивают в соседние устойчивые положения, совершая хаотические перемещения по диэлектрику. В однородной изотропной среде при отсутствии движущих сил прыжки ионов во всех направлениях происходят с одинаковой вероятностью, поэтому направленное движение их отсутствует [7].

В неоднородных диэлектриках потенциальный рельеф и длины скачков ионов изменяются с координатой. Это связано, в основном, с изменением состава диэлектрика или возникновением локальных механических напряжений.

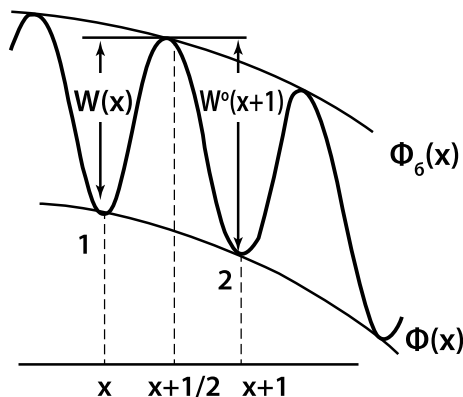


Рис. 3

Схематическое изображение энергии взаимодействия примесного иона со средой в диэлектрике МДП-структуры в отсутствие электрического поля [7]

В однородном по составу диэлектрике в слабых электрических полях и области малых деформаций плотность потока ионов:

$$J_{\text{пз}}(x) = J_{\text{др}}^{\text{эл}}(\chi) + J_{\text{др}}^{\text{упр}}(\chi) + J_{\text{дифф}}(\chi), \quad (3)$$

$$J_{\text{др}}^{\text{эл}}(\chi) = \mu N_{\text{пз}}(x) E(x), \quad (4)$$

$$J_{\text{др}}^{\text{упр}}(\chi) = -D/kT[\gamma(x) + \alpha(x)\nabla N_{\text{пз}}(x)] N_{\text{пз}}(x), \quad (5)$$

$$J_{\text{дифф}}(\chi) = -D\nabla N_{\text{пз}}(x), \quad (6)$$

где $J_{\text{др}}^{\text{эл}}(\chi)$, $J_{\text{др}}^{\text{упр}}(\chi)$, $J_{\text{дифф}}(\chi)$ – плотности дрейфового электрического, упругого и диффузионного потоков соответственно; D – коэффициент диффузии ионов; $E(x)$ – напря-

жённость электрического поля; μ – подвижность ионов; $\gamma(x)$ – силовой параметр; $\alpha(x)$ – энергетический коэффициент; $N_{\text{пз}}$ – концентрация ионов.

Динамика изменения концентрации ионов во времени и пространстве показывает их скопление вблизи внутренней блокирующей границы в стационарном электрическом поле (рис. 4).

В соответствии с результатами расчёта в начальный момент времени ионы распределены симметрично относительно центральной плоскости диэлектрического слоя (рис. 4, кривая 1), затем под действием электрического поля при повышенной температуре происходит движение пика концентрации вправо от левой границы с постепенным его «размытием» (рис. 4, кри-

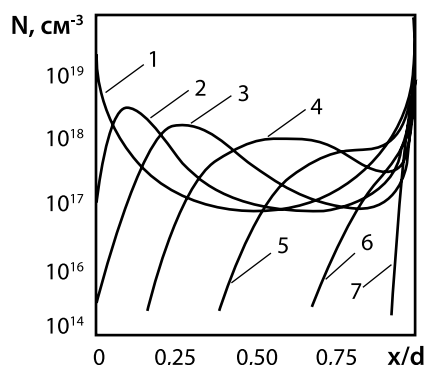


Рис. 4

Распределение концентрации ионов в однородном диэлектрике в различные моменты времени:

1) $t = 0$ с; 2) $t = 6$ с; 3) $t = 15$ с; 4) $t = 30$ с; 5) $t = 45$ с; 6) $t = 60$ с; 7) равновесное распределение при $U_d = 6$ В; $Q = 2,1 \cdot 10^{-7}$ Кл/см²; $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; $D = 1,1 \cdot 10^{-14}$ см²/с; $\epsilon = 3,8$; $d = 100$ нм; $T = 400$ °К; $U_d = 6$ В [7]

вые 2-6), при этом концентрация ионов на правой границе диэлектрика возрастает.

Модель

Изменение рельефа геометрической границы приводит к перераспределению внутреннего электрического поля подвижного заряда ионов. В [8, 9] проведены исследования влияния подвижного заряда на электронную проводимость окисла на неоднородной границе поликремниевого затвора матрицы памяти и предложена феноменологическая модель, в соответствии с которой при появлении неоднородностей происходит накопление подвижного заряда при температурных и электрических нагрузках на остриях поликремния (Si^*). При увеличении степени неоднородности границы раздела окисла (увеличении высоты, уменьшении эффективного диаметра) локальное электрическое поле и степень накопления ионов на остриях Si^* увеличиваются (рис. 5). Это сопровождается смещением ВАХ Si^*O_2 в область слабых электрических полей и уменьшением крутизны ВАХ.

Влияние неоднородности поверхности на интенсивность процессов электронной проводимости и ионной миграции в диоксиде кремния усиливается в области высоких внешних электрических полей более $E_i > 5$ МВ/см.

Плотности электронного тока проводимости Фаулера-Нордгейма, ионного тока на остриях уменьшаются с выравниванием рельефа границы поликремния.

Кинетика процесса ионной миграции в окисле с неоднородной блокирующей грани-

цей включает перемещение потока ионов по нескольким «каналам» Si^*O_2 , отличающимся своим положением на поверхности Si^* и энергетическими характеристиками. Часть структурных дефектов находится вблизи острий Si^* («центральные каналы»), другая часть расположена в периферийных областях этих острий («периферийные каналы»).

Согласно [9] в слабых внешних поляризующих полях внутреннее электрическое поле в Si^*O_2 вблизи окисленной поверхности Si^* распределено однородно, поэтому в процессе поляризации ионный заряд оказывается равномерно распределённым вдоль неё.

В сильных внешних полях поляризации локальные электрические поля вблизи острий неоднородной поверхности увеличиваются, а на периферии бугорка поликремния уменьшаются. Поэтому положительно заряженные ионы накапливаются преимущественно вблизи острий Si^* и по мере удаления от центра острия их концентрация убывает. В цикле последующей деполяризации плотность ионов, релаксирующих по «каналам» Si^*O_2 , локализованных у острий Si^* («центральным каналам»), увеличивается, а плотность ионов, перемещающихся по «каналам» периферии бугорка Si^* («периферийным каналам»), уменьшается.

Параметры электрической совместимости и помехоустойчивости процесса проводимости оксида кремния с неоднородной границей

Одним из аспектов оценки работоспособности слаботочных устройств по ана-

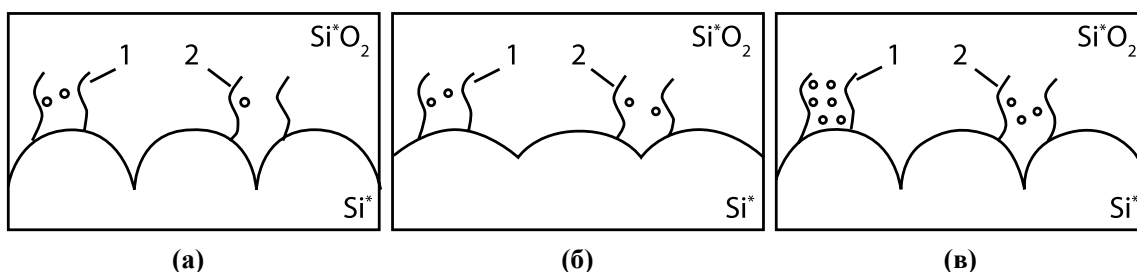


Рис. 5

Иллюстрация модели ионного дрейфа в окисле с неоднородной блокирующей границей при изменении напряжённости электрического поля (а, б) и шероховатости поверхности Si^* (б, в) [9]: а) $E_{\text{н}} < 0,5$ МВ/см, $\zeta = 1,2$; б) $E_{\text{н}} < 0,5$ МВ/см, $\zeta = 1,1$; в) $E_{\text{н}} > 0,5$ МВ/см, $\zeta = 1,2$ (ζ – неоднородность); 1 – «центральные каналы» переноса; 2 – «периферийные каналы» переноса

логии с высокоточными может являться анализ процессов помехоустойчивости в электронных компонентах. В микросхемах к категории помехоустойчивости относится изменение свойств ультратонкого термического оксида в межуровневой изоляции при рабочих наносекундных импульсных нагрузках и динамических изменениях напряжения в предпробойных электрических полях для диэлектрика ~ 10 МВ/см.

В связи с появлением экстремальных нагрузок на диэлектрик с неоднородной границей в рабочих режимах функционирования микросхемы необходимо нормирование электрических параметров изолирующей плёнки. Поэтому в терминологии силовых устройств электроники к основным параметрам электрической совместимости и помехоустойчивости процесса проводимости оксида можно отнести [10]: *отклонение напряжённости переменного электрического поля δE от критического*. Под ним понимается разность номинального значения электрического поля и установившегося действующего фактического. Предельно допустимые значения нормы отклонения напряжённости электрического поля δE_v равны соответственно ± 5 и ± 10 % от предельной напряжённости:

$$\delta E_v = \frac{E_{(d)} - E_{nom}}{E_{nom}} \cdot 100, \quad (7)$$

где $E_{(d)}$, E_{nom} – действующее и номинальное значения первой гармоники межфазного (фазного) переменного электрического тока.

Критическое значение внешнего электрического поля пробоя диоксида кремния на плоской границе в статическом режиме нагрузок – 10 МВ. Достижение этих значений внутреннего электрического поля на остриях, неоднородностях поверхности с учётом скопления положительного подвижного заряда снижает рабочие пределы работоспособности устройства.

Таким образом, электрическая нагрузка переменного или постоянного сигнала на диэлектрик может быть усилена неоднородностью границы диэлектрика и затвора, это

проявляется в локальном усилении электрического поля в соответствии с пространственным расположением неоднородности.

Распределение шероховатостей на поверхности структур может быть хаотичным, если это связано с технологическим рельефом плёнок, либо повторяющимся, если это связано с процессами формирования заданного рисунка микросхемы и углов рельефа.

Расчёты карты распределения электрических полей, выполненные по результатам моделирования в среде Sentaurus Tcad, показывают, что локальные критические электрические поля 10 МВ на остриях границы раздела достигаются в оксиде кремния толщиной $(1-5) \cdot 10^{-6}$ см (10-50 нм), начиная с коэффициентов неоднородности 1,3 и более [11]. Поэтому можно установить такую норму на величину неоднородности рельефа как для горизонтальной поверхности границы раздела, так и к поверхности рельефа затворов в целом.

Временное перенапряжение. Под временным перенапряжением диэлектрика понимают повышение напряжённости электрического поля в заданной точке выше $1,1 E_{nom}$ продолжительностью более 10 мс, возникающее в изолирующей плёнке при коммутациях внешнего сигнала. Характеризуют его коэффициентом временного перенапряжения $K_{перU}$, равным отношению значения огибающей амплитудных значений напряжённости к амплитуде номинальной напряжённости с длительностью временного напряжения $\Delta t_{перE}$.

Ионная перенагрузка. Под ионной перенагрузкой можно понимать превышение неконтролируемой концентрации ионов в локальных пространственных точках относительно критического значения. В связи с этим можно ввести понятие предельной концентрации подвижного заряда в диэлектрике на неоднородностях. Такие значения для плоской границы подложки и диэлектрика составляют по литературным оценкам $Q = 1 \cdot 10^{-7}$ Кл/см². С учётом коэффициента неоднородности на рельефной поверхности и результатов оценки [11] эта норма снижается на 30 % относительно плоской поверхности, то есть до $Q = 7 \cdot 10^{-8}$ Кл/см².

Энергетическая перенагрузка. В отношении прочности, сохранения целостности изолирующей плёнки как диэлектрика было бы логичным говорить об энергетических нагрузках, о скоплении энергии в локальных пространственных точках. Это значение сконцентрированной (кумулятивной) критической энергии разрушения окисла до настоящего времени не определялось. Под энергетической перенагрузкой тогда можно понимать превышение предельной мощности, выделяемой в локальных пространственных точках окисла с неоднородной границей.

Электрическая мощность, которая выделяется в диэлектрике с однородной границей толщиной d при экстремальных нагрузках E :

$$P_{\text{одн}} = E \cdot d \cdot I = E \cdot d (I_{\text{Ф-Н}} + I_{\text{Ф-Н}}^{\text{ПЗ}}), \quad (8)$$

где $I_{\text{Ф-Н}}^{\text{ПЗ}}$ – электронный туннельный ток за счёт поля подвижного заряда, накопившегося на острие после завершения цикла его перемещения. Для изолирующих плёнок толщиной $1 \cdot 10^{-6}$ см (10 нм) в экстремальных электрических полях 10 МВ/см, температурных полях $E = 150$ °С, токах $I_{\text{Ф-Н}}$, порядка 10^{-6} – 10^{-7} А, кумулятивная выделяемая мощность составит величину $P_{\text{одн}} = 10^{-5}$ – 10^{-6} Вт.

В областях с нарушением плоскостности, неоднородной границей окисла и поверхности экстремальные значения мощности $P_{\text{неодн}}$ могут быть достигнуты при меньших значениях внешних электрических полей:

$$P_{\text{неодн}} = k_k \cdot P_{\text{одн}} = P_{\text{одн}} (k_{\text{гор}} + k_{\text{арх}} + k_{\text{сигн}}), \quad (9)$$

где k_k – коэффициент кумулятивности мощности, $k_{\text{гор}}$, $k_{\text{арх}}$, $k_{\text{сигн}}$ – коэффициенты кумулятивности, связанные с неоднородностью горизонтальной поверхности, степенью локализации подвижного заряда на неоднородностях блокирующей поверхности поликремния, архитектурным рельефом затвора, особенностями сигнала (скоростями, частотой цифрового или аналогового).

Анализ коэффициента кумулятивности k_k – это предмет отдельного исследования. Можно предположить, что коэффициенты кумулятивности $k_{\text{гор}}$ (связанный с неоднородностью горизонтальной поверхности затвора ЭП) и $k_{\text{арх}}$ (связанный с архитектурным рельефом затвора) максимальны из этого ряда и могут изменяться до 10. Коэффициент $k_{\text{сигн}}$ может составить 1,05. Тогда кумулятивная мощность на неоднородностях границы составит «экстремальную величину» $P_{\text{одн}} = 10^{-4}$ – 10^{-5} Вт при напряжениях 5-10 В, близких к рабочим режимам эксплуатации микросхемы, а её выделение приведёт к преждевременному тепловому пробою окисла.

Выводы

По материалам научных публикаций основными контрольными параметрами плёнок оксида поликремния являются электрические поля пробоя и токи утечки [4, 5]. Предлагается ввести дополнительные параметры контроля Si^+O_2 по расчётным экстремальным электрическим нагрузкам с учётом неоднородностей горизонтального и вертикального рельефа поликремниевого затвора. К таким дополнительным параметрам контроля отнесены энергетическая и ионная перенагрузки, кумулятивная мощность. Дополнительные параметры отображают усиление и возникновение наведённых ионным зарядом электрических полей вблизи острий. Допустимый предел неоднородности по горизонтальному и вертикальному рельефу затвора не должен превышать 30 %, кумулятивная мощность на неоднородностях $P_{\text{одн}} = 10^{-4}$ – 10^{-5} Вт, концентрация неконтролируемых примесей в виде положительных ионов Na^+ , K^+ – 10^{11} см⁻². При нарушении этих пределов на технологических операциях формирования затвора и окисла возможен пробой, нарушение целостности его изоляции.

Предложен перечень параметров электрической совместимости для нормирования процессов проводимости ультратонкой диоксида кремния толщиной 5-25 нм, используемых в технологии изготовления флеш-памяти, с топологическими размерами менее 0,25 мкм и более толстыми > 25 нм, используемых в технологии ИК преобразователей.

Проведена оценка норм на показатели качества кондуктивных помех для ультратонких диэлектриков – превышение критического значения напряжённости электрического поля и концентрации ионного заряда, временного перенапряжения и энергетической перенагрузки.

Литература

1. Лукичев В. Ф., Шиколенко Ю. Л. Современная элементная база запоминающих устройств // Нано- и микросистемная техника. – 2015. – № 11 (184). – С. 40-53.
2. Дьяконов В. Сверхскоростные ЦАП // Компоненты и технологии. – 2013. – № 2. – С. 46-54.
3. Иванов В. Г., Каменев А. А., Романов В. А. Современные матричные фотоприёмные устройства сверхбольшого формата инфракрасного диапазона для космических информационных систем глобального наблюдения за воздушно-космическим пространством // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. – 2013. – № 2. – С. 20-46.
4. Marcus R. B., Sheng T. T. Oxidation of Shaped Silicon Surface // Solid State Science and Technology, 1982, Jun., pp. 1278-1282.
5. Yoshikawa K., Nagakubo Y., Kanzaki K. Two Dimensional Effect in Suppression of Thermal Oxidation Rate // Extended Abstracts of the (1984 International) Conference in Solid State Devices and Materials, Kobe–1984, pp. 475-478.
6. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. Книга 1. – М.: Мир, 1981. – С. 345-349.
7. Романов В. П., Соколов А. Ю. Ионные процессы в диэлектрических слоях МДП структур. – М.: Издательский дом «РТ-Пресс», 2001. – С. 74-88.
8. Perov G., Salman E., Vertoprachov V. Ionic current study in thermally grown dioxide films on polycrystalline silicon // Phys. Stat. Sol., 1987, V. 99, № 2, pp. 537-544.
9. Перов Г. В., Сединин В. И. Моделирование ионной проводимости диэлектрика с неоднородной блокирующей границей // Вестник Тамбовского университета ТГТУ. – 2011. – Т. 17. – Вып. 1. – С. 131-137.
10. Зиновьев Г. С. Силовая электроника: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – С. 271-280.
11. Перов Г. В., Егоркин А. В. Определение рабочего диапазона неоднородности поверхности окисленного поликремния по распределению электрических полей в ультратонком диэлектрике в среде Sentaurus

Tcad // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2015. – Вып. 2-3 (236-237). – С. 89-95.

References

1. Lukichev V. F., Shikolenko Yu. L. Modern elements of memory devices. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and microsystem engineering], 2015, № 11 (184), pp. 40-53.
2. Dyakonov V. Ultrafast CAD. *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies], 2013, № 2, pp. 46-54.
3. Ivanov V. G., Kamenev A. A., Romanov V. A. Modern matrix ultrawide infrared band photoreceivers for space informational system for world aerospace surveillance. *Voprosy radioelektroniki. Ser.: Tekhnika televidiniya* [Radioelectronic Issues. Ser.: Television technology], 2013, № 2, pp. 20-46.
4. Marcus R. B., Sheng T. T. Oxidation of Shaped Silicon Surface // Solid State Science and Technology, 1982, Jun., pp. 1278-1282.
5. Yoshikawa K., Nagakubo Y., Kanzaki K. Two Dimensional Effect in Suppression of Thermal Oxidation Rate // Extended Abstracts of the (1984 International) Conference in Solid State Devices and Materials, Kobe–1984, pp. 475-478.
6. Zi S. M. *Fizika poluprovodnikovyykh priborov. Kniga 1* [Physics of semiconductor devices. Book 1]. Moscow, Mir Publ., 1981, pp. 345-349.
7. Romanov V. P., Sokolov A. Yu. *Ionnye protsesy v dielektricheskikh sloyakh MDP struktur* [Ion processes in dielectric films of MDS structures]. Moscow, «RT-Press» Publ., 2001, pp. 74-88.
8. Perov G., Salman E., Vertoprachov V. Ionic current study in thermally grown dioxide films on polycrystalline silicon // Phys. Stat. Sol., 1987, V. 99, № 2, pp. 537-544.
9. Perov G. V., Sedinin V. I. Modeling of dielectric ion conductance with inhomogeneous blocking edge. *Vestnik Tambovskogo universiteta* [Bulletin of the Tambov University], 2011, T. 17, vol. 1, pp. 131-137.
10. Zinoviyev G. S. *Silovaay elektronika: uchebnoe posobie* [Power Electronics: study guide]. Novosibirsk, NGTU Publ., 2009, pp. 271-280.
11. Perov G. V., Egorokin A. V. Determination of operation range of oxidized polysilicon surface inhomogeneity by the distribution of electric fields in ultra-thin dielectric in Sentaurus Tcad environment. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2015, № 2-3 (236-237), pp. 89-95.