

# Деградация электрофизических характеристик МОП структур с оксидами эрбия, гадолиния, диспрозия под действием электрического поля

© М.Б. Шалимова<sup>†</sup>, Н.В. Сачук

Самарский государственный университет,  
443011 Самара, Россия

(Получена 26 января 2015 г. Принята к печати 5 февраля 2015 г.)

Исследовалась деградация характеристик кремниевых МОП структур с оксидами редкоземельных элементов под влиянием электрических полей (0.1–4) МВ/см в процессе электроформовки. Особенность электроформовки состоит в возможности многократного переключения структур из диэлектрического состояния в низкоомное и обратно. Временные характеристики деградации МОП структур при электроформовке описываются экспоненциальными зависимостями. Вольт-амперные характеристики представляют собой степенной закон в интервале 0.2–3 В, действие электрического поля приводит к изменению распределения энергетической плотности ловушек, ответственных за токи, ограниченные пространственным зарядом. Установлено, что множественные циклы электроформовки приводят к увеличению плотности поверхностных состояний на границе раздела Si–оксид и изменению энергетического положения уровней ловушек, что ведет к изменению их зарядового состояния.

## 1. Введение

Структуры металл–оксид–полупроводник (МОП) являются необходимой составной частью МОП транзисторов, энергонезависимых элементов памяти, приборов с зарядовой связью и т.д. Наибольшее внимание обычно приковано к толщине пленки окисла и качеству границы раздела оксид–полупроводник. Оптимальной считается такая толщина пленки затворного окисла, чтобы она обеспечивала необходимую высокую емкость и в то же время малый сквозной ток утечки. Стремление удовлетворить этим требованиям привело к тому, что традиционный затворный окисел SiO<sub>2</sub> стал заменяться в МОП структурах окислами с более высоким значением диэлектрической проницаемости, так называемыми *high-k*-диэлектриками.

Технология изготовления МОП структур с затворным оксидом SiO<sub>2</sub> изучается довольно давно и позволяет формировать достаточно совершенную границу раздела Si–SiO<sub>2</sub>. Однако даже в такой структуре к настоящему времени нет полного понимания картины деградации электрических свойств, происходящих при различных условиях эксплуатации МОП структур. Имеющиеся на такой границе раздела поверхностные электронные состояния (ПЭС), *P<sub>b</sub>*-центры, возникают из-за рассогласования решеток между объемным Si и окислом [1,2]. Основным парамагнитным дефектом в объеме SiO<sub>2</sub> является кислородная вакансия, захватившая дырку (*E'*-центр) [3–6].

Оксиды редкоземельных элементов (РЗЭ) являются предпочтительными кандидатами для материала затворных диэлектриков в ближайшем будущем [7–9]. Из-за относительно высокого значения диэлектрической проницаемости они относятся к *high-k*-диэлектрикам. Одной из главных проблем в применении оксидов РЗЭ является

большая концентрация заряженных дефектов, которая вызывает смещение порогового напряжения МОП транзистора. Эти заряженные дефекты обычно происходят из собственных дефектов, таких как кислородные вакансии и междоузлия. Кроме того, установлено, что на границе раздела оксид РЗЭ–кремний обычно формируется слой силиката, толщина которого составляет 0.7–2 нм [10]. Также во многих случаях между силикатом и оксидом РЗЭ зафиксировано формирование промежуточного слоя SiO<sub>2</sub> (либо формирование только слоя SiO<sub>2</sub>). Дефекты в пленке оксида и на границах раздела вызывают деградацию электрических свойств МОП структур. Следовательно, уменьшение заряженных дефектов, а также изучение условий их формирования являются важными задачами, требующими решения.

В настоящей работе изучаются кремниевые МОП структуры, в которых используются пленки оксидов РЗЭ. Перспективы использования МОП структур с *high-k*-диэлектриками, которые были представлены в последние годы, достаточно обнадеживающие, что ставит новые задачи исследования *high-k*-диэлектриков и устройств на их основе. В связи с этим актуальными являются вопросы исследования надежности и срока службы устройств на основе МОП структур с *high-k*-диэлектриками. Целью данной работы является изучение деградации электрофизических характеристик МОП структур с оксидами РЗЭ под действием электрического поля.

## 2. Детали эксперимента

В качестве подложек МОП структур использовались монокристаллические пластины кремния *n*- или *p*-типа проводимости с удельным сопротивлением 4.5–5 Ом·см, ориентации (111) или (100). Термическое испарение редкоземельных металлов проводилось

<sup>†</sup> E-mail: shamb@samsu.ru

на установке вакуумного напыления, исходными материалами для напыления служили вещества чистоты 99.6–99.98%. Окисление металлических пленок РЗЭ проводилось в потоке сухого кислорода или на воздухе в печи лабораторного типа при температурах 500–700°C в течение 20–30 мин. Перед нанесением слоя редкоземельного металла все кремниевые пластины проходили обработку в ацетоне в ультразвуковой ванне, затем обрабатывались в слабом растворе плавиковой кислоты. Полученные пленки оксидов РЗЭ толщиной 0.1–0.3 мкм имели поликристаллическую структуру, состав их был близок к стехиометрическому. Диэлектрическая проницаемость тонких пленок  $\text{Dy}_2\text{O}_3$  и  $\text{Er}_2\text{O}_3$  была  $\sim 11$ ,  $\text{Gd}_2\text{O}_3 \sim (13–14)$ . Для получения МОП структур на окисел методом термического испарения в вакууме через трафарет наносились алюминиевые электроды площадью  $\sim 0.2 \text{ мм}^2$ . Нижний алюминиевый электрод наносился сплошным слоем.

Исследовалось влияние на полученные структуры электрических полей, при которых наблюдается явление электроформовки. Процесс электроформовки состоит в том, что под действием электрических полей ( $\sim 0.1–4$ ) МВ/см в исходно однородной пленке оксида создается локальная неомогенная область — канал проводимости с металлическим характером электропроводности. Однако это состояние не является необратимым, и при обратной полярности прикладываемого напряжения имеется возможность переключения исследуемой структуры обратно в диэлектрическое состояние проходящим током. Была использована возможность многократного переключения структур из высокоомного состояния в низкоомное и обратно, так как данные МОП структуры с пленками оксидов РЗЭ обладают свойством бистабильного переключения [11,12].

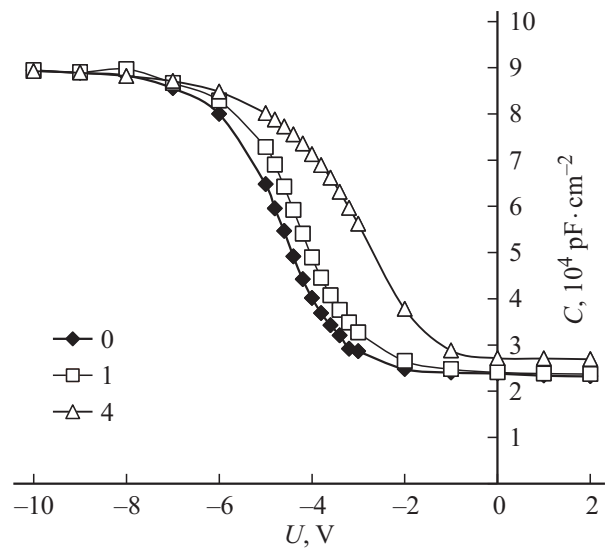
### 3. Экспериментальные результаты

#### 3.1. Экспериментальные вольт-фарадные характеристики

Изучалось влияние электрического поля, действующего на образец в процессе электроформовки, с последующим мониторингом параметров структур после каждого цикла электроформовки. Эти данные получались из анализа высокочастотных (1 МГц) вольт-фарадных характеристик МОП структур с оксидами РЗЭ в высокоомном состоянии.

При рассмотрении вольт-фарадных характеристик  $C(U)$  можно отметить, что электроформовка вызывает деградацию электрофизических параметров МОП структур с оксидами РЗЭ в качестве диэлектрика. Вольт-фарадные характеристики более растянуты по оси напряжений после нескольких циклов электроформовки, что указывает на рост плотности поверхностных состояний и изменение напряжения плоских зон (рис. 1).

Напряжение плоских зон  $U_{FB}$  — это напряжение, при котором поверхностный потенциал принимает нулевое



**Рис. 1.** Вольт-фарадные характеристики структуры  $\text{Al-Gd}_2\text{O}_3-p\text{-Si}$  в исходном состоянии и после нескольких циклов электроформовки (число циклов указано).

значение:

$$U_{FB} = \Phi_{ms} - \frac{Q_f}{C_D}, \quad (1)$$

где  $\Phi_{ms}$  — разность работ выхода металл–полупроводник,  $C_D$  — емкость оксида,  $Q_f$  — эффективный заряд. Под эффективным зарядом здесь понимается суммарная плотность заряда ловушек на границе раздела оксид–кремний ( $Q_{it}$ ) и в объеме оксида ( $Q_f^*$ ):

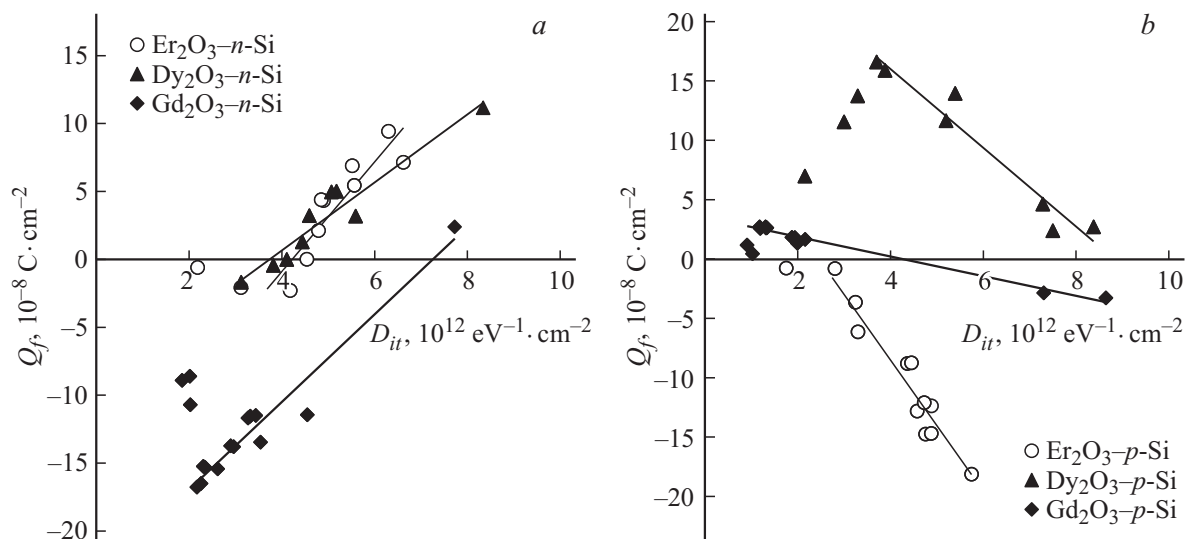
$$Q_f = Q_f^* + Q_{it}. \quad (2)$$

Распределение энергетической плотности поверхностных состояний  $D_{it}$  в запрещенной зоне кремния рассчитывалось из зависимости поверхностного потенциала от напряжения  $U$  по формуле

$$D_{it} = \frac{C_D}{e^2} \left( \frac{dU}{d\phi_s} - 1 \right) + \frac{C_s}{e^2}, \quad (3)$$

где  $C_s$  — емкость области пространственного заряда,  $\phi_s$  — величина поверхностного потенциала,  $e$  — элементарный заряд. Данный метод дает U-образный вид энергетического распределения  $D_{it}$  в запрещенной зоне кремния для исследованных структур. За значение  $D_{it}$  в настоящей работе принималось значение в минимуме распределения.

Для всех исследованных структур заряд изменяется сложным образом, однако экспериментальные результаты показывают, что если в процессе электроформовки происходит рост плотности поверхностных состояний, то для структур на основе кремния  $p$ -типа проводимости наблюдается тенденция к росту отрицательного заряда, и для структур на основе кремния  $n$ -типа растет положительный заряд. Так как переключение структур из высокоомного в низкоомное состояние происходило



**Рис. 2.** Изменение эффективного заряда в зависимости от изменения плотности поверхностных состояний при множественных циклах электроформовки для МОП структур с оксидами РЗЭ на основе *n*-Si (а) и *p*-Si (б).

при полярности напряжения, соответствующей режиму инверсии, возможно, это свидетельствует об участии носителей из инверсионного канала в деградации структур.

Зависимость эффективного заряда  $Q_f$  от плотности поверхностных состояний  $D_{it}$  при множественных циклах электроформовки можно аппроксимировать прямыми линиями, как показано на рис. 2, а, б для МОП структур на основе *n*-Si и *p*-Si соответственно. Пропорциональная зависимость указывает, что изменение заряда в МОП структурах на основе соединений РЗЭ при электроформовке обусловлено в основном изменением величины плотности ПЭС на границе раздела оксид–кремний. Начиная со значений  $\sim (2-4) \cdot 10^{12} \text{ эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$  наблюдается тенденция к уменьшению абсолютного значения  $Q_f$  при приближении к нулю значения  $D_{it}$ .

### 3.2. Экспериментальные вольт-амперные характеристики

Изучение механизмов проводимости осуществлялось путем регистрации измерений вольт-амперных характеристик (ВАХ) в ряде последовательных циклов электроформовки. Проводимостью МОП структур с соединениями РЗЭ можно управлять путем введения (инъекции) в них избыточных свободных носителей заряда.

В случае изолятора, не содержащего ловушек для электронов, а также в случае диэлектрика с мелкими моноэнергетическими ловушками плотность тока описывается зависимостью

$$j = \frac{\epsilon_0 \epsilon \mu U^2}{d^3}, \quad (4)$$

где  $\mu$  — подвижность носителей заряда в оксиде,  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость оксида,  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная,  $d$  — толщина оксида. Подобные

характеристики наблюдались в работе [13] (в интервале от 1 до 3 В) для кремниевых МОП структур с пленками оксида эрбия, полученными методом послойного атомного осаждения.

Если инжектированные из контактов носители захватываются на ловушки и создают в диэлектрике пространственный заряд, то проходящие через диэлектрик токи — это токи, ограниченные пространственным зарядом. При конденсаторном методе рассмотрения данного вопроса плотность заряда  $Q_i$  связана с удельной емкостью конденсатора  $C_D$  и приложенным напряжением:

$$Q_i = C_D U = \frac{\epsilon_0 \epsilon U}{d}. \quad (5)$$

Ток через диэлектрик есть

$$j = e \mu n E_{ox} = e \mu n \frac{U}{d}, \quad (6)$$

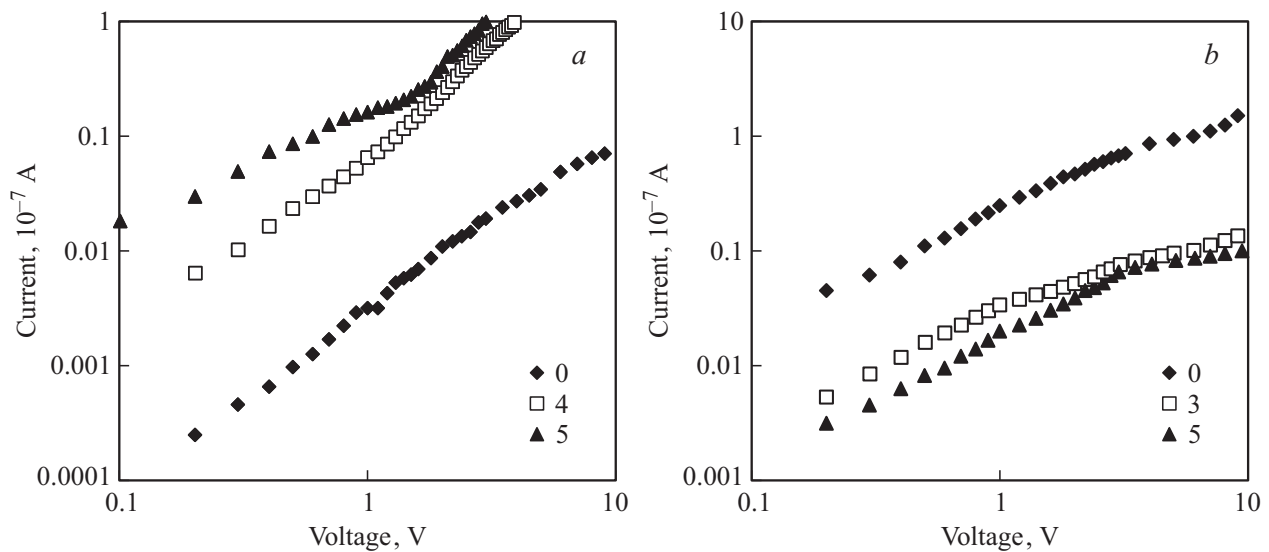
где  $n$  — концентрация электронов в зоне проводимости оксида,  $E_{ox}$  — напряженность поля в окисле,  $U$  — падение напряжения на слое окисла. Присутствие ловушек приводит к уменьшению тока, так как эти уровни захватывают подавляющую часть инжектированных электронов и создают объемный заряд вблизи границы раздела оксид–полупроводник. Концентрация электронов  $n_i$  на ловушках равна

$$n_i = \frac{Q_i}{ed} \approx \frac{\epsilon_0 \epsilon U}{ed^2}. \quad (7)$$

Согласно статистике Больцмана, концентрация электронов в зоне проводимости диэлектрика есть

$$n = N_c \exp\left(-\frac{\mathcal{E}_c - \mathcal{E}_F}{k_B T}\right), \quad (8)$$

где  $N_c$  — эффективная плотность состояний в зоне проводимости диэлектрика,  $\mathcal{E}_c$  — энергия дна зоны



**Рис. 3.** Прямые ветви ВАХ при множественных циклах электроформовки: *a* — структура  $\text{Al-Dy}_2\text{O}_3\text{-n-Si}$ , *b* — структура  $\text{Al-Dy}_2\text{O}_3\text{-p-Si}$ . Число циклов указано.

проводимости диэлектрика,  $\mathcal{E}_F$  — энергия уровня Ферми,  $k_B$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура.

Из-за значительного структурного разупорядочения решетки, особенно вблизи границы раздела диэлектрик–полупроводник, локальные электронные центры любого типа, как связанные с примесями, так и обусловленные собственными дефектами структуры, могут быть сильно „размазаны“ по энергиям. При этом распределение ловушечных уровней по энергии может иметь квазинепрерывный характер, и дно зоны проводимости размывается. В глубь запрещенной зоны уходит так называемый хвост зоны проводимости, состояния в хвосте являются локализованными и действуют как ловушки для электронов. Хвост ловушек, энергетическая плотность которых  $\rho(\mathcal{E})$  по мере приближения к дну зоны проводимости нарастает по экспоненциальному закону, имеет форму

$$\rho(\mathcal{E}) = \rho_0 \exp \left[ -\frac{(\mathcal{E}_c - \mathcal{E})}{gk_B T} \right], \quad (9)$$

где  $\rho_0$  — энергетическая плотность ловушек у дна зоны проводимости,  $g$  — фактор распределения, связанный с особенностями ловушек.

Инжектированные электроны практически все оседают на ловушках, полная концентрация которых

$$n_t = \int_{\mathcal{E}_F}^{\infty} \rho(\mathcal{E}) d\mathcal{E} = N_t \exp \left[ -\frac{(\mathcal{E}_c - \mathcal{E}_F)}{gk_B T} \right], \quad (10)$$

где  $N_t$  — концентрация ловушек вблизи дна зоны проводимости. Исключая из уравнений (8) и (10) уровень Ферми, можно получить:

$$j = e\mu N_c \left( \frac{\varepsilon_0 \mathcal{E}}{eN_t} \right)^g \frac{U^{g+1}}{d^{2g+1}}. \quad (11)$$

В координатах  $\lg j$  от  $\lg U$  ВАХ должна дать прямую линию с наклоном  $g + 1$ . ВАХ исследованных МОП структур были практически симметричными. На рис. 3 представлены прямые ветви ВАХ кремниевых МОП структур с оксидом диспрозия в исходном состоянии и после нескольких циклов электроформовки. Эти зависимости достаточно хорошо спрямляются в двойных логарифмических координатах, что указывает на степенной характер зависимости тока от напряжения. Аналогичные степенные зависимости с показателем степени 3–4 наблюдались в работе [12] для МОП структур с пленкой оксида гадолиния, полученной методом высокочастотного ионно-плазменного распыления на кремнии.

В настоящей работе для структур  $\text{Al-Dy}_2\text{O}_3\text{-n-Si}$  показатель степени (наклон ВАХ) в интервале напряжений 0.2–1.3 В составил  $g + 1 = 1.5\text{--}2.5$  и проводимость последовательно возрастала с ростом числа циклов электроформовки (рис. 3, *a*). При дальнейшем увеличении напряжения наклон возрастал до значений  $g + 1 = 2.2\text{--}2.9$ . Для структур  $\text{Al-Dy}_2\text{O}_3\text{-p-Si}$  электропроводность, напротив, уменьшалась при увеличении числа циклов электроформовки. Показатель степени был  $g + 1 = 0.7\text{--}1.1$  в интервале напряжений 0.2–3 В, при дальнейшем увеличении напряжения показатель степени уменьшался до значений  $g + 1 = 0.35\text{--}0.65$  (рис. 3, *b*). Обратные ветви ВАХ проявляли аналогичное поведение, т.е. ток последовательно возрастал с ростом числа циклов электроформовки для структур на основе *n-Si*, и последовательно убывал для структур на основе *p-Si*.

Хотя исследованные пленки оксидов РЗЭ имели в целом поликристаллическую структуру, на границе раздела оксид РЗЭ–кремний может наблюдаться тонкий переходный слой, структура которого близка к аморфной.

Кроме того, часто на такой границе раздела наблюдается промежуточный слой силиката или  $\text{SiO}_2$ , имеющий аморфную природу [10]. Поэтому можно предположить наличие хвоста ловушек, энергетическая плотность которых описывается экспоненциальным законом (9).

С точки зрения этого подхода можно объяснить и изменение ВАХ после электроформовки. Если в выражении (10) положить в первом приближении  $n_t = \text{const}$ , то для сохранения постоянства при увеличении фактора  $g$  должна уменьшаться величина  $N_t$ , и наоборот. Тогда для МОП структур на основе кремния  $n$ -типа проводимости, где с ростом числа циклов электроформовки фактор  $g$  имеет тенденцию к увеличению, величина  $N_t$  должна уменьшаться, что, согласно формуле (11), приводит к увеличению плотности тока. Напротив, для структур на основе кремния  $p$ -типа проводимости с ростом числа циклов электроформовки фактор  $g$  имеет тенденцию к уменьшению, при этом происходит рост величины  $N_t$  и, следовательно, уменьшение плотности тока.

Таким образом, воздействие электрического поля в процессе электроформовки приводит к изменению фактора  $g$ , т.е. изменению распределения энергетической плотности  $\rho(\mathcal{E})$  ловушек, ответственных за токи, ограниченные пространственным зарядом.

#### 4. Обсуждение результатов

Для изучения явления деградации МОП структур с оксидами РЗЭ были исследованы кинетические характеристики электроформовки. Характерным параметром кинетической характеристики электроформовки является наличие определенного времени задержки  $\tau_{\text{del}}$ , после которого образец быстро переходит из одного состояния в другое за время  $\tau_s$  — собственное время электроформовки. Время задержки уменьшается при увеличении амплитуды приложенного импульса напряжения, собственное время переключения практически не зависит от приложенного импульса напряжения. Для исследуемых структур с пленками оксидов РЗЭ время  $\tau_s$  составляло  $\sim 0.2$  мкс. На рис. 4 представлены зависимости времени задержки электроформовки  $\tau_{\text{del}}$  от напряженности электрического поля. Эти зависимости хорошо спрямляются в полулогарифмических координатах и описываются формулой

$$\tau_{\text{del}} = \tau_0 e^{-\gamma E_{\text{ox}}}, \quad (12)$$

где  $\tau_0$  — некоторая константа для данной структуры,  $E_{\text{ox}}$  — напряженность поля в окисле,  $\gamma$  — параметр ускорения поля.

В процессе электроформовки электрическое поле может способствовать созданию дефектов на границе раздела и в объеме диэлектрика. Данное поле служит для напряжения связей на границе раздела и, таким образом, ослабления связей в объеме диэлектрика. Эти

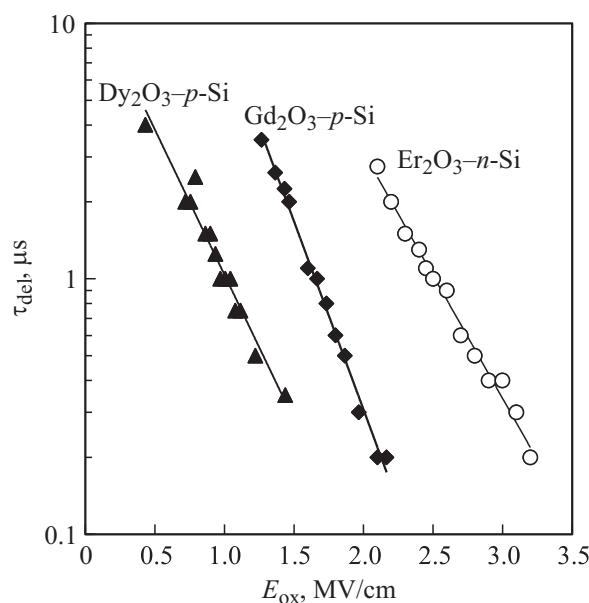


Рис. 4. Зависимость времени задержки  $\tau_{\text{del}}$  структур электроформовки от напряженности электрического поля.

ослабленные связи могут быть дополнительно возбуждены или катализируются взаимодействием либо с индуцированными током электронами, либо дырками, или ионами водорода.

Анализ экспериментальных данных показывает, что преимущественный вклад в изменение зарядового состояния МОП структур с оксидами РЗЭ, которое происходит в процессе электроформовки, вносит изменение заряда ПЭС. На это указывает пропорциональная зависимость изменения эффективного заряда от плотности ПЭС. По зарядовому состоянию поверхностные состояния бывают двух типов — донорные и акцепторные. Состояния донорного типа положительно заряжены, если расположены выше уровня Ферми, и нейтральны, если расположены ниже уровня Ферми. Состояния акцепторного типа нейтральны, если расположены выше уровня Ферми, и отрицательно заряжены, если расположены ниже уровня Ферми. В большинстве случаев, как показывает эксперимент, в верхней половине запрещенной зоны расположены ПЭС акцепторного типа, а в нижней половине — ПЭС донорного типа [14].

Можно предположить, что при увеличении плотности ПЭС ловушки изменяют свою энергию  $\mathcal{E}_t$ , т.е. в полупроводнике  $n$ -типа проводимости для вновь формируемых или уже существующих ловушек уменьшается разность

$$\Delta \mathcal{E}_t = \mathcal{E}_c - \mathcal{E}_t, \quad (13)$$

где  $\mathcal{E}_c$  — энергия дна зоны проводимости полупроводника. При этом акцепторная ловушка становится более мелкой и переходит на более высокое положение относительно уровня Ферми  $\mathcal{E}_F$ , теряя отрицательный заряд. Для верхней половины запрещенной зоны крем-

ния заряд, создаваемый акцепторами, есть

$$Q_{it}^a = e \left[ \int_{\mathcal{E}_F}^{\mathcal{E}_c} D_{it}(\mathcal{E}) f(\mathcal{E}) d\mathcal{E} + \int_{\mathcal{E}_i}^{\mathcal{E}_F} D_{it}(\mathcal{E}) f(\mathcal{E}) d\mathcal{E} \right], \quad (14)$$

где  $f(\mathcal{E})$  — функция, определяющая степень участия поверхностных состояний в изменении емкости,  $\mathcal{E}_i$  — уровень Ферми собственного полупроводника. При увеличении плотности поверхностных состояний уменьшается абсолютная величина вклада второго слагаемого в (14) в общую сумму и, следовательно, суммарный измеряемый заряд  $Q_{it}^a$  всех поверхностных ловушек становится более положительным.

Аналогично можно описать процессы, происходящие на границе раздела Si  $p$ -типа проводимости и оксида РЗЭ. При увеличении плотности ПЭС уменьшается разность

$$\Delta\mathcal{E}_i = \mathcal{E}_i - \mathcal{E}_v, \quad (15)$$

где  $\mathcal{E}_v$  — энергия потолка валентной зоны. Пересекая уровень  $\mathcal{E}_F$ , ловушка теряет положительный заряд, при этом суммарный заряд всех поверхностных ловушек становится более отрицательным при увеличении плотности поверхностных состояний.

В области значений ПЭС  $\sim (2-4) \cdot 10^{12} \text{ эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$  наблюдается перелом в ходе зависимостей на рис. 2, что также можно объяснить с точки зрения данного подхода. Следует предположить, что до точки перелома энергетическое положение вновь создаваемых ловушек находится ниже уровня Ферми для акцепторных ловушек и выше уровня Ферми для донорных ловушек (т.е. ближе к середине запрещенной зоны кремния).

Как было показано [15], физическая структура дефектов в затворном *high-k*-оксиде зависит от приложенного напряжения, при этом могут быть сформированы новые энергетические состояния ловушки, как стабильные, так и метастабильные.

Следовательно, множественные циклы электроформовки приводят к увеличению плотности ПЭС на границе раздела Si-оксид РЗЭ и изменению энергетического положения уровней ловушек, что в итоге ведет к изменению их зарядового состояния. Кроме того, фиксированный заряд в оксиде РЗЭ будет вносить свои особенности в общую картину изменения зарядового состояния МОП структуры в каждом случае.

## 5. Заключение

Исследовались кремниевые МОП структуры, в которых используются пленки оксидов с высоким значением диэлектрической проницаемости, а именно оксидов гадолиния, эрбия, диспрозия. Изучалось влияние электрических полей  $\sim (0.1-4) \text{ МВ/см}$ , при которых в структурах наблюдается явление электроформовки, на процесс их электрической деградации.

Временные характеристики деградации при электроформовке описываются экспоненциальными зависимостями. Электрическое поле, которое действует в процессе электроформовки, служит для напряжения и ослабления связей, которые могут быть дополнительно возбуждены или катализируются взаимодействием либо с индуцированными током электронами, либо дырками, или ионами водорода.

Вольт-амперные характеристики исследованных МОП структур практически симметричны. Предполагая наличие хвоста ловушек, энергетическая плотность которых по мере приближения к дну зоны проводимости нарастает по экспоненциальному закону, получили, что ВАХ в режиме токов, ограниченных пространственным зарядом, описывается степенным законом, что наблюдается в интервале 0.2–3 В для различных исследованных структур. Установлено, что воздействие электрического поля в процессе электроформовки приводит к изменению распределения энергетической плотности  $\rho(\mathcal{E})$  ловушек, ответственных за токи, ограниченные пространственным зарядом.

Анализ экспериментальных данных показывает, что множественные циклы электроформовки приводят к увеличению плотности ПЭС на границе раздела Si-оксид РЗЭ и изменению энергетического положения уровней ловушек, что в итоге ведет к изменению их зарядового состояния. В случае подложки  $n$ -типа проводимости при увеличении плотности ПЭС формируются акцепторные ловушки, которые энергетически находятся выше уровня Ферми. Альтернативно некоторая часть ловушек, расположенных ранее ниже уровня Ферми, изменяет свое энергетическое положение за счет перемещения в положение выше уровня Ферми. Аналогично для  $p$ -типа некоторая часть ловушек, расположенных ранее выше уровня Ферми, изменяет свое энергетическое положение за счет перемещения в положение ниже уровня Ферми, либо формируются новые донорные ловушки, расположенные ниже уровня Ферми.

## Список литературы

- [1] P.H. Caplan, E.H. Poindexter, B.E. Deal, R.R. Razouk. J. Appl. Phys., **50**, 5847 (1979).
- [2] G.J. Gerardi, E.H. Poindexter, P.J. Caplan, N.M. Johnson. Appl. Phys. Lett., **49**, 348 (1986).
- [3] D.L. Griscom, E.J. Friebele, G.H. Sigel. Solid State Commun., **15**, 479 (1974).
- [4] S. Ling, A. El-Sayed, F. Lopez-Gejo, M.B. Watkins, V.V. Afanas'ev, A.L. Shluger. Microelectronic Engineering, **109**, 310 (2013).
- [5] D.L. Griscom. J. Appl. Phys., **58**, 2524 (1985).
- [6] В.А. Грищенко, Ю.Н. Новиков, А.В. Шапошников, Ю.Н. Мороков. ФТП, **35**, 1041 (2001).
- [7] B.L. Yang, H. Wonga, K. Kakushima, H. Iwai. Microelectronics Reliability, **52**, 1613 (2012).
- [8] A.N. Nazarov, Y.V. Gomeniuk, Y.Y. Gomeniuk, H.D.B. Gottlob, M. Schmidt, M.C. Lemme, M. Czernohorsky, H.J. Osten. Microelectronic Engineering, **84**, 1968 (2007).



- [9] H.J. Quah, K.Y. Cheong. *Mater. Chem. Phys.*, **130**, 1007 (2011).
- [10] M. Kouda. *Doctor thesis* (Tokyo Institute of Technology, 2011).
- [11] М.Б. Шалимова, В.С. Афанасков, Е.Н. Хавдей. *Вестник СамГУ*, **104**, 107 (2013).
- [12] В.А. Рожков, А.И. Петров. *Письма ЖТФ*, **11**, 49 (1985).
- [13] K.B. Jinesh, Y. Lamy, E. Tois, W.F.A. Besling. *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 252906 (2009).
- [14] D.K. Schroder, J.A. Babcock. *J. Appl. Phys.*, **94**, 1 (2003).
- [15] D.S. Ang, C.J. Gu, Z.Y. Tung, A.A. Boo, Y. Gao. *Microelectronics Reliability*, **54**, 663 (2014).

*Редактор Л.В. Шаронова*

### **Degradation of electro physical characteristics of MOS structures with oxides of erbium, gadolinium, dysprosium under electric field**

*M.B. Shalimova, N.V. Sachuk*

Samara State University,  
443011 Samara, Russia

**Abstract** We investigated the degradation characteristics of silicon MOS structures with oxides of rare earth elements (REE) under the influence of electric fields  $\sim (0.1-4)$  MV/cm in the process of electroforming. Electroforming feature is the ability of multiple switching structures of the insulating state in the low-resistance and vice versa. Temporal characteristics of MOS structures degradation at electroforming, are described by exponential dependences. Current–voltage characteristics follow the power law in the range of 0.2–3 V, the electric field leads to a change in the distribution of the energy density of the traps responsible for the current, limited by space charge. It was found that multiple cycles of electroforming lead to an increase in the density of surface states at the interface Si–oxide REE and change in the energy position of trap levels, which leads to a change in their charge state.