

# Новый элемент памяти на кремниевых нанокластерах в диэлектрике с высокой диэлектрической проницаемостью $ZrO_2$ для электрически перепрограммируемого постоянного запоминающего устройства

© В.А. Гриценко<sup>¶</sup>, К.А. Насыров\*, Д.В. Гриценко, Ю.Н. Новиков, А.Л. Асеев, Д.Х. Ли<sup>+</sup>, Д.-В. Ли<sup>+</sup>, Ч.В. Ким<sup>+</sup>

Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук,  
630090 Новосибирск, Россия

\* Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук,  
630090 Новосибирск, Россия

<sup>+</sup> Samsung Advanced Institute of Technology,  
P. O. Box 111, Suwon 440-600, Korea

(Получена 11 августа 2004 г. Принята к печати 14 октября 2004 г.)

Моделировались характеристики записи/стирания и хранения заряда в элементе памяти для электрически перепрограммируемого постоянного запоминающего устройства на основе структуры кремний/оксид/кремниевая-точка/оксид/полупроводник, в котором в качестве блокирующего диэлектрика использовались  $SiO_2$  и альтернативный диэлектрик с высокой диэлектрической проницаемостью  $ZrO_2$ . Установлено, что применение альтернативного диэлектрика приводит к ряду эффектов: уменьшается паразитная инжекция из поли-Si, увеличивается поле в туннельном оксиде, появляется возможность увеличить толщину туннельного диэлектрика и, следовательно, увеличить время хранения информации, появляется возможность использовать более низкие напряжения записи/стирания. Программирование импульсом амплитудой  $\pm 11$  В и длительностью 10 мс позволяет получить через 10 лет окно памяти  $\sim 3$  В.

## 1. Введение

В настоящее время электрически перепрограммируемые постоянные запоминающие устройства (ЭППЗУ или ФЛЭШ память) имеют рынок сбыта, превышающий рынки ОЗУ и микропроцессоров вместе взятых [1]. На гражданском рынке доминируют ЭППЗУ с плавающим затвором [2]. Для специальных применений используются радиационно стойкие кремний/оксид/нитрид/оксид/кремний (КОНОП) приборы на основе эффекта памяти в нитриде кремния [3]. Согласно прогнозам, при разработке терабитных ( $10^{12}$  бит/кристалл) схем ЭППЗУ элементы памяти с плавающим затвором будут вытеснены КОНОП структурами [4].

Недостатком ЭППЗУ с плавающим затвором является невозможность их дальнейшего масштабирования от гига- до терабитного масштаба. В настоящее время в ЭППЗУ гигабитной емкости используется туннельный оксид между кремниевой подложкой и плавающим затвором толщиной  $\sim 7.0$  нм. Уменьшение длины канала сопровождается уменьшением толщины туннельного оксида. Однако дальнейшее уменьшение толщины туннельного оксида приводит к быстрому стеканию электронов из поликремния в подложку из-за деградации (увеличения) проводимости туннельного оксида при перепрограммировании (чередование импульсов разной полярности на затворе). При перепрограммировании в туннельном диэлектрике образуются ловушки, приводящие к увеличению тока утечки (stress induced leakage current SILC) [5]. Утечка туннельного оксида (SILC) создает проблему хранения информации (заряда элек-

тронов в плавающем затворе) в течение 10 лет при  $85^\circ\text{C}$  для гражданских применений и при  $125^\circ\text{C}$  для специальных применений.

Для терабитных схем памяти в настоящее время осуществляется интенсивная разработка ЭППЗУ, основанных на проводящих нанокластерах в диэлектрике [6–12]. В качестве запоминающей среды в таких ЭППЗУ выступают полупроводниковые (Si, Ge,  $Si_xGe_y$ ) или металлические кластеры наноразмеров (1–10 нм). Принципиальным преимуществом ЭППЗУ на нанокластерах перед ЭППЗУ с плавающим затвором является то, что нанокластеры изолированы друг от друга в направлении, параллельном границе раздела кремний/диэлектрик. Благодаря этому дефекты (поры) в туннельном диэлектрике не приводят к стеканию всего заряда, накопленного в нанокластерах.

В качестве туннельного диэлектрика в приборах памяти с нанокластерами обычно используется двуокись кремния  $SiO_2$  [6–11], нитрид кремния  $Si_3N_4$  [10], оксид гафния  $HfO_2$  [11,12]. Блокирующий диэлектрик между нанокластерами и затвором изготавливают обычно из  $SiO_2$  [6–11]. Поскольку двуокись кремния имеет низкое значение диэлектрической проницаемости ( $\epsilon \approx 3.9$ ), в блокирующем диэлектрике в процессе записи/стирания информации (перепрограммирования) создается сильное электрическое поле и, следовательно, большое паразитное падение напряжения. Паразитное падение напряжения на блокирующем  $SiO_2$  приводит к нежелательному увеличению напряжения записи/стирания информации. Сильное поле в блокирующем оксиде может приводить, кроме того, к паразитной инжекции электронов и дырок из поликремниевых затворов и, таким образом, к умень-

<sup>¶</sup> E-mail: grits@isp.nsc.ru

шению окна памяти (разница пороговых напряжений элемента памяти в состояниях логической „0“ и „1“).

В последнее время предпринимаются интенсивные усилия для замены двуокиси и оксинитрида кремния  $\text{SiO}_2\text{N}_x$  в комплементарных МОП транзисторах на альтернативные диэлектрики, так называемые *high-k* диэлектрики. Альтернативные диэлектрики имеют высокую диэлектрическую проницаемость [13–15]. Наиболее перспективными альтернативными диэлектриками считаются  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{HfO}_2$  ( $\epsilon \approx 25$ ),  $\text{Y}_2\text{O}_3$  ( $\epsilon \approx 15$ ),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\epsilon \approx 10$ ). Ранее теоретически и экспериментально было показано, что замена блокирующего  $\text{SiO}_2$  в КОНОП-элементе памяти на альтернативный диэлектрик, например,  $\text{ZrO}_2$  [16–18] или  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [19], приводит к уменьшению падения напряжения на блокирующем диэлектрике и, следовательно, к уменьшению напряжения перепрограммирования КОНОП-ЭППЗУ. Цель настоящей работы заключается в изучении запоминающих свойств элементов памяти ЭППЗУ на основе структуры кремний/оксид/кремниевая-точка/оксид/полупроводник (КОТОП), путем моделирования процессов перепрограммирования и хранения (растекания) заряда. В качестве блокирующего диэлектрика использованы двуокись кремния и двуокись циркония.

## 2. Энергетическая диаграмма КОТОП структур с разными блокирующими диэлектриками

На рис. 1 представлена энергетическая диаграмма КОТОП-структур с  $\text{SiO}_2$  в качестве блокирующего оксида (слева на рисунке) и  $\text{ZnO}_2$  (справа на рисунке) без приложенного напряжения, при отрицательном и положительном потенциалах на поликремнии. Высота барьера для электронов и дырок на границе Si/SiO<sub>2</sub> составляет 3.14 и 3.8 эВ соответственно [20,21]. В литературе приводятся разные данные о величине барьера для электронов на границе Si/ZrO<sub>2</sub>:  $1.95 \pm 0.08$  [22], 2.0 [23] и 1.23 эВ [24]. Для величины запрещенной зоны ZrO<sub>2</sub> приводятся величины 5.4 [23] и 5.5 эВ [24]. В настоящей работе при расчетах использовалась ширина запрещенной зоны 5.5 эВ. Для электронного и дырочного барьера на границе Si/ZrO<sub>2</sub> использовались величины 2.0 и 2.4 эВ соответственно. В качестве контрольного параметра, который можно измерять в запоминающей структуре, использовалось напряжение плоских зон  $U_{FB}$ . Это напряжение, которое необходимо приложить к затвору запоминающей структуры для того, чтобы поле в кремнии на границе кремний/диэлектрик обратилось в нуль.

## 3. Теоретическая модель

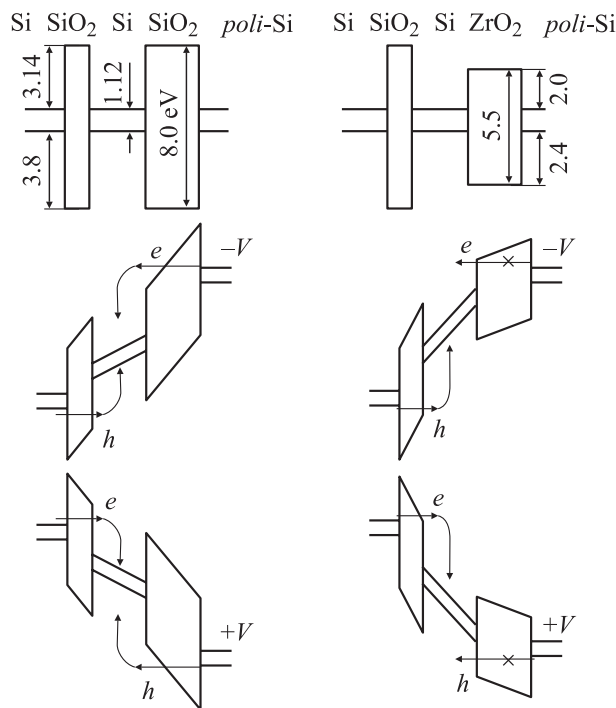
В настоящей работе моделировались запоминающие свойства структур КОТОП с двуокисью кремния в качестве блокирующего слоя и структуры КОТОП, в которых в качестве блокирующего слоя используется альтернативный диэлектрик ZrO<sub>2</sub>. В качестве Si-точки

(Si-нанокластер) использовался собственный полупроводник. Концентрация акцепторов в кремниевой подложке составляет  $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , концентрация акцепторов в поликремниевом затворе  $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Толщина туннельного оксида варьировалась в диапазоне 1.5–5.0 нм. Размер кремниевых нанокластеров был фиксирован во всех случаях и равен 5.0 нм. Квантованием электронного и дырочного спектра, а также эффектом кулоновской блокады в Si-точках пренебрегалось. Толщина блокирующего SiO<sub>2</sub> составляет 5.0 нм. Толщина блокирующего ZrO<sub>2</sub> составляет 8.0 нм. Использовалась одномерная, двухзонная модель, учитывающая инжекцию электронов из отрицательного смещенного и инжекцию дырок из положительного смещенного электрода (рис. 1).

В работе для расчета туннельного тока использовалась модифицированная формула Фаулера–Нордгейма. Для полей и толщины диэлектрика, таких, что  $F_{ox} \cdot d_{ox} > \Phi$ , где  $d_{ox}$  — толщина диэлектрика,  $\Phi$  — величина энергетического барьера на границе Si/диэлектрик,  $F_{ox}$  — поле в диэлектрике, туннелирование осуществляется через треугольный барьер, в этом случае

$$j = AF_{ox}^2 \exp \left\{ -\frac{4}{3} \frac{\sqrt{2m^*} \Phi^{3/2}}{\hbar e F_{ox}} \right\}. \quad (1)$$

Здесь  $A = 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ A/V}^2$ ,  $e$  — заряд электрона. Величины туннельной эффективной массы  $m^*$  для электронов и дырок в SiO<sub>2</sub> и ZrO<sub>2</sub> принимались равными  $0.5m_e$  [20].



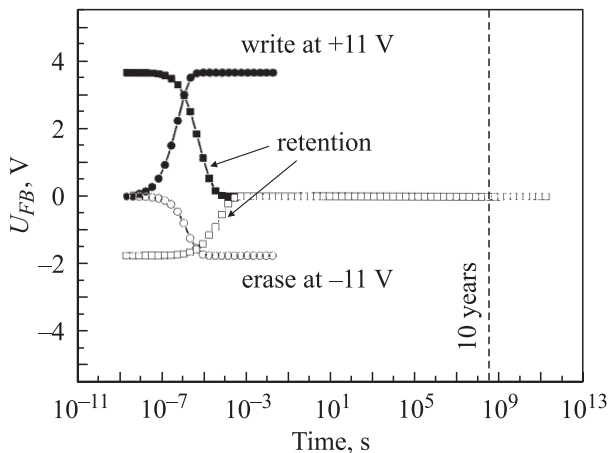
**Рис. 1.** Энергетические диаграммы КОТОП-структур с блокирующим диэлектриком SiO<sub>2</sub> (слева) или ZrO<sub>2</sub> (справа): вверху без приложенного напряжения, в середине при отрицательном потенциале на затворе, внизу при положительном потенциале на затворе. Энергии приведены в эВ. Для простоты на рисунке не показано падение напряжения на кремниевой подложке и кремниевом затворе.

В случае трапецеидального барьера ( $F_{ox} \cdot d_{ox} < \Phi$ ) для расчета туннельного тока использовалась формула

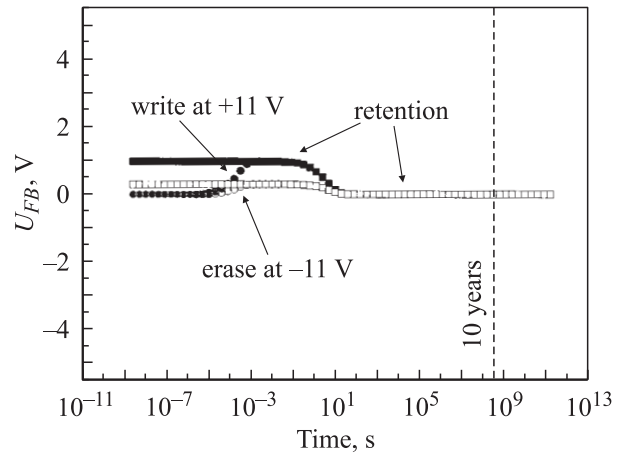
$$j = AF_{ox}^2 \exp \left\{ -\frac{4}{3} \frac{\sqrt{2m^*}}{\hbar e} \frac{(\Phi^{3/2} - (\Phi - F_{ox}d_{ox})^{3/2})}{F_{ox}} \right\}. \quad (2)$$

#### 4. Сравнение запоминающих свойств КОТОП-структур с SiO<sub>2</sub> и ZrO<sub>2</sub> в качестве блокирующего диэлектрика

Вначале было проведено моделирование записи/стирания и хранения заряда в структурах КОТОП с блокирующим диэлектриком SiO<sub>2</sub> при толщине туннельного окисла 1.5 нм (рис. 2). Длительность записывающего и стирающего импульса во всех случаях составляла 10 мс. Положительный потенциал +11 В на поликремниевом затворе приводит к инжекции электронов из кремниевой подложки через туннельный окисел в Si-нанокластер, накоплению отрицательного заряда и сдвигу плоских зон до величины +4 В. Окно памяти в этом случае составляет +6 В. В режиме записи и стирания наблюдалась паразитная инжекция заряда через блокирующий окисел по механизму Фаулера–Нордгейма. Стеkanie отрицательного и положительного заряда из Si-нанокластера в режиме хранения информации (закороченное состояние) происходит за 10<sup>-5</sup> с. Стеkanie электронов и дырок из Si-нанокластера происходит за счет туннелирования носителей через туннельный окисел в кремниевую подложку. Разрядка за счет туннелирования носителей через блокирующий окисел в затвор пренебрежима из-за его большой толщины.



**Рис. 2.** Характеристики записи/стирания КОТОП-структуры, где в качестве блокирующего диэлектрика используется SiO<sub>2</sub> с толщиной 5.0 нм. Темными точками показано накопление отрицательного заряда, светлыми — положительного. Напряжение импульса записи/стирания ±11 В, длительность 10 мс. Темными и светлыми квадратами показан процесс стекания заряда в закороченном состоянии. Толщина Si-нанокластера 5.0 нм, туннельного окисла 1.5 нм.



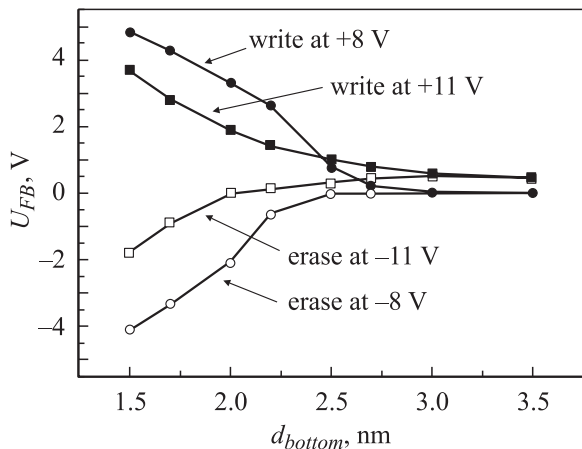
**Рис. 3.** Характеристики записи/стирания КОТОП-структуры, где в качестве блокирующего диэлектрика используется SiO<sub>2</sub> с толщиной 5.0 нм. Темными точками показано накопление отрицательного заряда, светлыми точками положительного. Напряжение импульса записи/стирания ±11 В с длительностью 10 мс. Темными и светлыми квадратами показан процесс стекания заряда в закороченном состоянии. Толщина Si-нанокластера 5.0 нм, туннельного окисла 2.5 нм

Для увеличения времени хранения информации до 10 лет ( $\sim 3 \cdot 10^8$  с) естественно увеличивать толщину туннельного окисла для блокирования туннелирования электронов и дырок из Si-точки в подложку. Однако увеличение толщины туннельного окисла до 2.5 нм при амплитуде перепрограммирующего импульса ±11 В приводит к уменьшению окна памяти до  $\sim 1$  В (рис. 3). Туннельный окисел толщиной 2.5 нм резко уменьшает инжекцию электронов и полностью блокирует инжекцию дырок из подложки. Напряжение импульса стирания -11 В не приводит к накоплению положительного заряда. Наблюдается накопление незначительного отрицательного заряда. Это происходит из-за паразитной инжекции электронов из поликремниевых затворов. Увеличение толщины туннельного окисла до 2.5 нм приводит к замедлению стекания заряда и увеличению времени хранения до  $\sim 10$  с. Однако эта величина более чем на 8 порядков меньше времени хранения информации, требуемого от ЭПЗУ (10 лет). Дальнейшее увеличение толщины туннельного окисла сопровождается драматическим уменьшением окна памяти из-за экспоненциального уменьшения тока инжекции электронов и дырок в Si-нанокластеры.

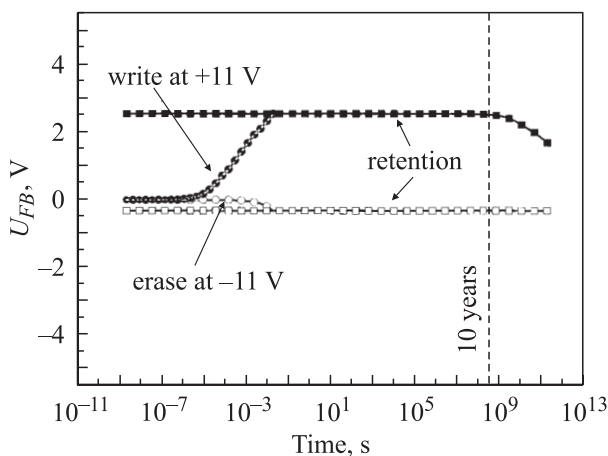
На рис. 4 приведен график зависимости окна памяти от толщины туннельного окисла в режиме записи/стирания для напряжений ±8 и ±11 В. Примечательно, что при уменьшении записывающего/стирающего напряжения от 11 до 8 В окно памяти увеличивается на 2–3 В. Этот эффект связан с уменьшением паразитной инжекции через блокирующий диэлектрик. Из рис. 4 видно, что при толщинах туннельного окисла более чем 2.5 нм окно памяти становится меньше 1 В.

Таким образом, анализ показывает, что эффект памяти (накопление электронов и (или) дырок в КОТОП-

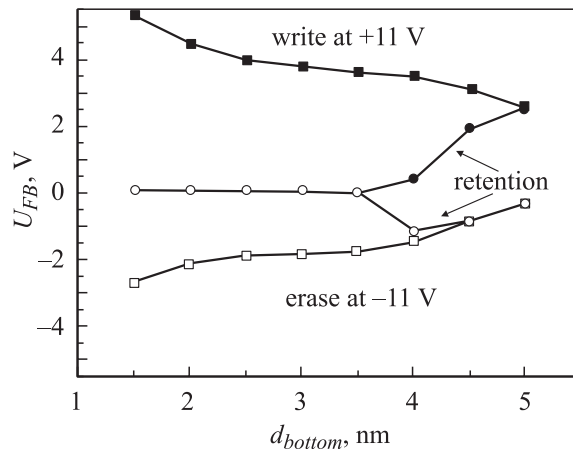
структурах) проявляется только в условиях, когда толщина нижнего окисла меньше толщины верхнего. В этом случае за счет большего тока прямого туннелирования через нижний окисел в кремниевых точках накапливается заряд. Если толщины нижнего и блокирующего окислов превышают туннельную длину в диэлектрике и толщины нижнего и блокирующего диэлектриков одинаковы, то КОТОП-структура эффектом памяти не обладает. Это связано с тем, что ток инжекции электронов из подложки в кремниевую точку равен току инжекции электронов из кремниевой точки в затвор.



**Рис. 4.** Зависимость окна памяти КОТОП-структуры от толщины туннельного окисла в режиме записи. В качестве блокирующего диэлектрика использовался SiO<sub>2</sub> с толщиной 5.0 нм. Для записи/стирания структуры использовались импульсы напряжения +8 В (темные точки), -8 В (светлые точки) и +11 В (темные квадраты), -11 В (светлые квадраты) с длительностью 10 мс. Толщина туннельного окисла изменялась от 1.5 до 3.5 нм.



**Рис. 5.** Характеристики записи/стирания КОТОП-структуры, где в качестве блокирующего диэлектрика используется ZrO<sub>2</sub> с толщиной 8.0 нм. Темными точками показано накопление отрицательного заряда, светлыми точками положительного. Напряжение импульса записи/стирания ±11 В, длительность 10 мс. Темными и светлыми квадратами показан процесс стекания заряда в закороченном состоянии. Толщина Si-нанокластера 5.0 нм, туннельного SiO<sub>2</sub> 5.0 нм



**Рис. 6.** Зависимость окна памяти КОТОП-структуры от толщины туннельного (нижнего) диэлектрика в режиме записи и хранения. В качестве блокирующего диэлектрика использовался ZrO<sub>2</sub> с толщиной 8.0 нм. Для записи/стирания структуры использовались импульсы напряжения +11 В (темные квадраты), -11 В (светлые квадраты) с длительностью 10 мс. Толщина туннельного окисла изменялась от 1.5 до 5.0 нм. На рисунке показано окно памяти через 10 лет (темные и светлые точки).

Замена блокирующего диэлектрика SiO<sub>2</sub> на ZrO<sub>2</sub> позволяет при толщине туннельного окисла 5.0 нм и амплитуде программирующего импульса +11 В получить сдвиг плоских зон +2.5 В (рис. 5). Стирающий импульс -11 В приводит лишь к незначительному накоплению положительного заряда (-0.4 В). Однако в отличие от случая, когда в качестве блокирующего диэлектрика используется SiO<sub>2</sub>, в случае использования ZrO<sub>2</sub> не наблюдается паразитной инжекции электронов из поликремниевго затвора. Применение ZrO<sub>2</sub> за счет использования толстого туннельного окисла позволяет значительно замедлить стекание электронов и получить окно памяти 3 В через 10 лет (рис. 5).

На рис. 6 представлена зависимость окна памяти от толщины туннельного диэлектрика для КОТОП-структуры с блокирующим диэлектриком ZrO<sub>2</sub>. Используемая амплитуда импульса записи/стирания ±11 В. Увеличение толщины туннельного окисла от 1.5 до 5.0 нм приводит к уменьшению окна памяти от 8 до 3 В. На этом же рисунке показано окно памяти через 10 лет предварительно заряженной электронами или дырками КОТОП-структуры. Измеряемое окно памяти через 10 лет наблюдается при толщине туннельного окисла больше 3.5 нм (рис. 6).

## 5. Обсуждение результатов

Замена блокирующего диэлектрика двуокиси кремния с низкой диэлектрической проницаемостью на двуокись циркония с высокой диэлектрической проницаемостью в приборах памяти на нанокластерах приводит к двум эффектам: усилению поля в туннельном диэлектрике и

уменьшению поля в блокирующем диэлектрике. Усиление поля в туннельном диэлектрике вызывает экспоненциальное увеличение тока инжекции электронов и дырок из кремния в нанокластер, что приводит к увеличению окна памяти. Также появляется возможность для фиксированного окна памяти уменьшить амплитуду и (или) длительность программирующего импульса. Эффект усиления поля в туннельном оксиде позволяет увеличить его толщину и, таким образом, заблокировать стекание заряда в кремниевую подложку в режиме хранения информации.

В настоящее время приборы памяти на нанокластерах с использованием диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью интенсивно исследуются. Так, например, в [12] исследовались приборы с кремниевыми нанокластерами, в которых оксид гафния  $\text{HfO}_2$  использовался в качестве туннельного диэлектрика и в качестве блокирующего диэлектрика. Подобные приборы с нанокластерами  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$  изучались в [11]. Однако в рассмотренных приборах эффект усиления электрического поля в туннельном оксиде отсутствует. Следует отметить, что, по-видимому, впервые запоминающий прибор на кремниевых нанокластерах, осажденных на оксид кремния и покрытых нитридом кремния, был изготовлен в работе [25]. В таком приборе за счет высокой диэлектрической проницаемости  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ( $\epsilon = 7$ ) по сравнению с  $\text{SiO}_2$  ( $\epsilon = 3.9$ ) наблюдается эффект усиления поля в туннельном оксиде.

В модели, используемой в настоящей работе, предполагается, что инжекция носителей через диэлектрик с высокой диэлектрической проницаемостью ограничивается туннельным механизмом Фаулера–Нордгейма. Однако в реальных диэлектриках с высокой диэлектрической проницаемостью, например  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{HfO}_2$ , имеется высокая концентрация ловушек, и проводимость ограничивается ионизацией дефектов по модели Френкеля или по многофононному механизму. Таким образом, для разработки предлагаемых приборов необходима разработка технологии альтернативных диэлектриков с низкой концентрацией ловушек и малой величиной токов утечки.

## 6. Заключение

На примере использования  $\text{ZrO}_2$  было показано, что применение альтернативных диэлектриков в качестве блокирующего слоя в КОТОП-структурах ведет к ряду преимуществ. А именно:

1) увеличению электрического поля в туннельном оксиде и, следовательно, возрастанию инжекционного тока. Этот эффект дает возможность при фиксированном окне памяти использовать более толстый туннельный диэлектрик, что позволяет увеличить время хранения заряда;

2) при неизменной геометрии КОТОП появляется возможность использовать более низкие напряжения записи/стирания;

3) не изменяя геометрию КОТОП и напряжение записи/стирания, можно повысить быстродействие;

4) уменьшение падения напряжения на блокирующем диэлектрике ведет к снижению паразитной инжекции электронов и дырок из поликремниевого затвора в режиме записи/стирания.

Моделирование режима хранения заряда показало, что при использовании  $\text{SiO}_2$  в качестве блокирующего диэлектрика время хранения заряда составляет не более 10 с (для любой толщины туннельного и блокирующего оксида). При использовании  $\text{ZrO}_2$ , в качестве блокирующего диэлектрика, толщиной 8.0 нм и  $\text{SiO}_2$ , в качестве туннельного, толщиной 5 нм удается получить при комнатной температуре окно памяти  $\sim 3$  В через десять лет.

## Список литературы

- [1] S.M. Sze. In: *Future Trends in Microelectronics*, ed. by S. Luryi, J. Xu and A. Zaslavsky (John Wiley & Sons, Inc., 1999) p. 135.
- [2] P. Pavan, R. Bez, P. Olivo, E. Zanony. *Proc. IEEE*, **85** (5), 1248 (1997).
- [3] J. Bu, M.H. White. *Sol. St. Electron.*, **45**, 113 (2001).
- [4] *International Technology Roadmap*, <http://public.itrs.net/>, (2003).
- [5] K. Komiya, Y. Omura. *J. Appl. Phys.*, **92** (5), 2953 (2002).
- [6] Y.I. Hanafi, S. Tiwari, I. Khan. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **43** (9), 1553 (1996).
- [7] Y.-C. King, T.-J. King, C. Hu. *IEEE Electron. Dev. Lett.*, **20** (8), 409 (1999).
- [8] B. De Salvo, G. Gibaudo, G. Pananakakis, P. Masson, T. Baron, N. Buffet, A. Fernandes, B. Guillaumot. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **48** (8), 1789 (2001).
- [9] Z. Liu, C. Lee, V. Narayanan, G. Pen, E.C. Kan. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **49** (9), 1614 (2002).
- [10] M. She, T.-J. King. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **50** (9), 1934 (2003).
- [11] D.-W. Kim, T. Kim, S.K. Banerjee. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **50** (9), 1823 (2003).
- [12] J.J. Lee, X. Wang, W. Bai, N. Lu, D.-L. Kwong. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **50** (10), 2067 (2003).
- [13] G.D. Wilk, R.M. Wallace, J.M. Anthony. *J. Appl. Phys.*, **89**, 5243 (2001).
- [14] E.P. Gusev, E. Cartier, D.A. Buchanan, M. Gribelyuk, M. Copel, H. Okorn-Schmidt, C. D'Emic. *Microelectronic Engin.*, **59**, 341 (2001).
- [15] Г.Я. Красников. *Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП транзисторов* (М., Техносфера, 2002).
- [16] V.A. Gritsenko, K.A. Nasyrov, Yu.N. Novikov. *Proc. 12th Workshop on Dielectrics in Microelectronics (WODIM)*, November 18–20, Grenoble, France (2002) с. 179.
- [17] V.A. Gritsenko, K.A. Nasyrov, Yu.N. Novikov, A.L. Aseev. *Микроэлектроника*, **32** (2), 69 (2003).
- [18] V.A. Gritsenko, K.A. Nasyrov, Yu.N. Novikov, A.L. Aseev, S.Y. Yoon, J.-W. Lee, E.-H. Lee, C.W. Kim. *Sol. St. Electron.*, **47** (10), 1651 (2003).
- [19] C. Lee, S. Hur, Y. Shin, J. Ghoi, D. Park, K. Kim. *Abstracts 2002 Int. Conf. on Solid State Devices and Materials*, Nagoya, Japan (2002) с. 162.
- [20] V.A. Gritsenko, E.E. Meerson, Yu.N. Morokov. *Phys. Rev. B*, **57**, R2081 (1997).

- [21] В.А. Гриценко. *Строение и электронная структура аморфных диэлектриков в кремниевых МДП-структурах* (Новосибирск, Наука, 1993).
- [22] V.V. Afanas'ev, M. Houssa, A. Stesmans, G.J. Adrianssen, M.M. Heyns. *Microelectronic Engin.*, **59**, 335 (2001).
- [23] M. Houssa, M. Tuominen, M. Naili, V. Afanasiev, A. Stesmans, S. Haukka, M.M. Heyns. *J. Appl. Phys.*, **87**, 8615 (2000).
- [24] S. Miyazaki, M. Narasaki, M. Ogasawara, M. Hirose. *Microelectronic Engin.*, **59**, 373 (2001).
- [25] В.И. Белый, В.В. Воскобойников, А.С. Гиновкер, Е.А. Криворотов, С.П. Сеница. *Микроэлектроника*, **2**, 182 (1971).

Редактор Л.В. Беляков

## A new memory element based on silicon nanoclusters in the $ZrO_2$ dielectric with high permittivity for Electrically Erasable Read Only Memory

V.A. Gritsenko, K.A. Nasyrov\*, D.V. Gritsenko,  
Yu.N. Novikov, A.L. Aseev, J.H. Lee<sup>+</sup>, J.-W. Lee<sup>+</sup>,  
C.W. Kim<sup>+</sup>

Institute of Semiconductor Physics,  
Russian Academy of Sciences, Siberian Branch,  
630090 Novosibirsk, Russia

\* Institute of Automation and Electrometry,  
Russian Academy of Sciences, Siberian Branch,  
630090 Novosibirsk, Russia

<sup>+</sup> Samsung Advanced Institute of Technology,  
P. O. Box 111, Suwon 440-600, Korea

**Abstract** The write/erase and data retention characteristics of memory element based on silicon/oxide/silicon dot/oxide/silicon structure are simulated. Silicon oxide and high-k dielectric ( $ZrO_2$ ) as blocking oxide were used. It was demonstrated, that using of high-k dielectric results in a number of effects: the decreasing of parasitic injection from poly-Si gate, the increasing of the electric field in the tunnel oxide, which makes it possible to increase the bottom oxide thickness, and therefore to increase the data retention, the write/erase voltage can be decrease. The programming with the impulse  $\pm 11$  V during 10 ms allows obtaining after 10 years the memory window  $\sim 3$  V.