Ю. Н. Новиков, К. А. Насыров

ФЛЭШ-ЭЛЕМЕНТ ПАМЯТИ, ОСНОВАННЫЙ НА КРЕМНИЕВЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ, ВСТРОЕННЫХ В ДИЭЛЕКТРИК С ВЫСОКОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ

Работа поддержана грантом РФФИ N 10-07-00531-а
и интеграционным проектом № 97 Сибирского отделения Академии наук

Численно моделировались характеристики записи/стирания и хранения заряда во ФЛЭШ-элементе памяти на основе структуры кремний/оксид_1/оксид_2/кремниевая точка/блокирующий оксид/полупроводник. В качестве первого туннельного диэлектрика использовался слой SiO_2 ($\varepsilon \approx 3,9$) толщиной 1,5 нм, в качестве блокирующего и второго туннельного слоя использовался ZrO_2 ($\varepsilon \approx 25$) толщиной 8,0 нм. Такая последовательность диэлектриков в туннельном и блокирующих слоях позволяет максимально увеличить быстродействие и увеличить окно памяти во ФЛЭШ, основанной на нанокластерах встроенных в диэлектрик. Программирование предложенного ФЛЭШ-импульсами ±11 В позволяет достичь окно памяти ≈ 6 В через 10 лет хранения.

Ключевые слова: ФЛЭШ, Квантовые точки**.**

Yu. N. Novikov, K. A. Nasyrov

FLASH MEMORY ELEMENT BASED ON SILICON QUANTUM DOTS EMBEDDED IN THE DIELECTRIC WITH HIGH PERMITTIVITY

The write/erase and retention properties of electrical programming memory device based on the silicon/oxide_1/oxide_2/silicon dot/blocking oxide/semiconductor structure were simulated by numerical methods. The blocking and second tunnel dielectrics were the high-k dielectric (ZrO_2) while the first tunnel oxide was thin (~1.5nm) dielectric with low dielectric constant (SiO_2).

This kind of sequence in blocking and tunnel layers allows to increase the memory window and operation speed in memory devices based on nanoclasters embedded in dielectric. Simulations show that memory window of 6 V can be achieved for 10 years retention.

Keywords: FLASH, quantum dots.

В настоящее время интенсивно исследуются структуры кремний/туннельный оксид/проводящая точка (нанокластер)/блокирующий оксид/полупроводник (КОТОП) для электрически перепрограммируемых постоянных запоминающих устройств ЭППЗУ (ФЛЭШ) [8, 3, 6, 7]. В качестве проводящих нанокластеров (1–10 нм) используется полупроводник или металл. Основное преимущество этих ЭППЗУ по сравнению с традиционными, основанными на «плавающем затворе», — это отсутствие продольной проводимости (вдоль затвора), маленькая емкостная связь между соседними элементами памяти. Утеря заряда в одном кластере (из массива кластеров) не ведет к полной потере информации ячейки памяти, в то же время при утечке заряда из «плавающего затвора» вся информация теряется.

Туннельный слой выполняют из диэлектрика с небольшим значения диэлектрической проницаемости, как правило, из SiO_2 ($\varepsilon \approx 3{,}9$). В работе [1, 4] в качестве блокирующего слоя вместо традиционно SiO_2 было предложено использовать альтернативный диэлектрик ZrO_2 с высоким значением диэлектрической проницаемости ($\varepsilon \approx 25$). Использование блокирующего слоя из ZrO_2 вместо SiO_2 дает ряд преимуществ: усиление электрического поля в туннельном оксиде, возрастание инжекционного тока, снижение паразитной инжекции через блокирующий слой. Основной недостаток предложенного ЭППЗУ — это использование достаточно толстого туннельного слоя SiO_2 (5,0 нм), толщина которого обеспечивает длительное хранения заряда в Si-кластере (~10 лет). Однако толстый туннельный слой приводит к недостаточно хорошим его инжектирующим свойствам. В частности, из-за большого барьера для дырок на границе Si/SiO_2 (~3,8 эВ) такая структура не позволяет накапливать положительный заряд в Si(кластере), что приводит к небольшому окну памяти ~ 3 В (разница пороговых напряжений элемента памяти в состояниях логический «0» и «1») в режиме записи/стирания [1].

В настоящей работе предлагается использовать дополнительный к туннельному слою SiO_2 слой из диэлектрика с высоким значением диэлектрической проницаемости (ZrO_2). Блокирующий слой также выполнен из диэлектрика с высоким значением диэлектрической проницаемости (ZrO_2).

На рис. 1 представлена энергетическая диаграмма предложенной структуры кремний/оксид_1/оксид_2/кремниевая точка (нанокластер) / блокирующий оксид/полупроводник КООТОП без приложенного напряжения (верхний рисунок), при отрицательном (средний рисунок) и положительном (нижний рисунок) потенциалах на поликремнии. Высота барьера для электронов и дырок на границе Si/SiO_2 составляет 3,1 и 3,8 эВ соответственно [5, 2]. Для электронных и дырочных барьеров на границе Si/ZrO_2 брались величины такие же, как и в работе [1, 4], т. е. 2,0 и 2,4 эВ соответственно.

Запоминающие характеристики предлагаемого прибора в настоящей работе рассчитывались с помощью численного моделирования. За основу была взята численная модель из работы [1]. В качестве Si-кластера использовался собственный полупроводник. Концентрация акцепторов в кремниевой подложке составляет 2×10^{14} см$^{-3}$, концентрация акцепторов в поликремневом затворе 2×10^{14} см$^{-3}$. Размер дополнительного туннельного и блокирующего слоя [1] был взят 8,0 нм. Размер кремниевого нанокластера [1] был взят 5,0 нм. В работе, так же как и в [1], использовалась одномерная двухзонная модель, учитывающая инжекцию электронов из отрицательного смещенного и инжекцию дырок из положительного смещенного электрода (рис. 2).

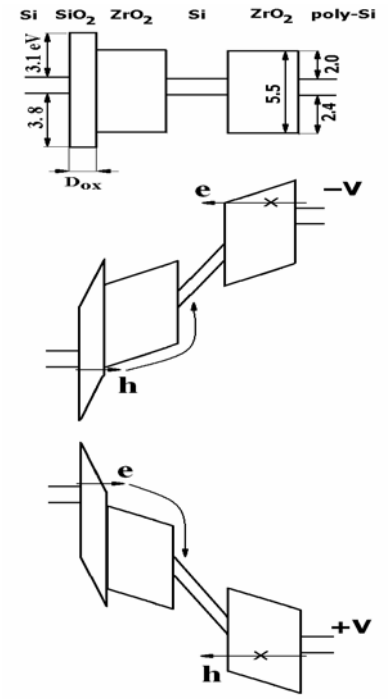


Рис. 1. Энергетические диаграмма КООТОП структуры: вверху без приложенного напряжения, в середине при отрицательном потенциале на затворе, внизу при положительном потенциале на затворе. Энергии приведены в эВ. Для простоты на рисунке не показано падение напряжения на кремниевой подложке и кремниевом затворе

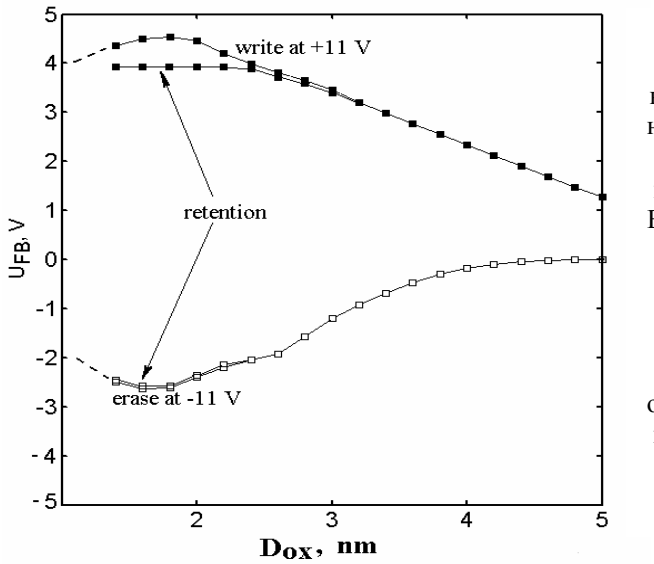


Рис. 2. Зависимость окна памяти в режимах записи/стирания и хранения КООТОП структуры от толщины первого туннельного слоя (SiO_2). Толщина туннельного слоя SiO_2 изменялась в диапазоне 1,5–5,0 нм. В качестве блокирующего и второго туннельного использовался ZrO_2 толщиной 8,0 нм. Напряжение импульса записи/стирания ±11 В с длительностью 10 мс. Темными квадратами показано накопление отрицательного заряда, светлыми — положительного. Также на рисунке показано окно памяти через 10 лет (retention)

Для расчета туннельного тока использовалась модифицированная формула Фаулера — Нордгейма. Для одного слоя диэлектрика ток рассчитывался как:

$$j = AF_1^2 P_1, \qquad (1)$$

где A = 2,2 10^{-6} A/V^2, F_1 — электрическое поле в диэлектрике, P_1 — вероятность туннелирования через слой диэлектрика.

Для электрических полей и толщины диэлектрика d_1, таких, что $(F_1 \cdot d_1 > \Phi_1$, где Φ_1 величина энергетического барьера на границе Si/диэлектрик, туннелирование осуществляется через треугольный барьер, в этом случае

$$P_1 = exp\left\{-\frac{4}{3}\frac{\sqrt{2m^*}}{\hbar e}\frac{\Phi_1^{3/2}}{F_1}\right\}, \quad (2)$$

где e — заряд электрона. Величины туннельной эффективной массы m* для электронов и дырок в SiO_2 и ZrO_2 принимались равными 0,5 m_e [2].

В случае трапецеидального барьера ($F_1 \cdot d_1 > \Phi_1$) для расчета туннельного тока использовалась формула:

$$P_1 = \exp\left\{-\frac{4}{3}\frac{\sqrt{2m^*}}{\hbar e}\frac{(\Phi_1^{3/2} - (\Phi_1 - F_1 d_1)^{3/2})}{F_1}\right\}. \quad (3)$$

Туннельный ток через два слоя разнородных диэлектриков рассчитывался по формуле:

$$j = AF_1^2 P_1 P_2, \quad (4)$$

где P_2 — вероятность туннелирования через второй слой диэлектрика, которая определялась своим набором параметров: F_2, d_2 , Φ_2. Расчет вероятности туннелирования для треугольного и трапециевидного барьера происходил по формулам, аналогичным формулам 2, 3. Электрические поля в туннельном слое, состоящем из двух диэлектриков, связаны соотношением: $E_1\varepsilon_1 = E_2\varepsilon_2$., где ε_1 и ε_2 соответствующие диэлектрические проницаемости диэлектриков.

Для определения оптимальной толщины первого туннельного слоя D_{ox} (рис. 1) было рассчитано окно памяти в режимах записи/стирания (рис. 2). Для записи структуры использовались импульсы +11 В (черные квадраты) для стирания –11 В (светлые квадраты) с длительностью 10 мс. На рис. 2 также приведено окно памяти в режиме хранения, т. е. его значение через 10 лет (retention — хранение в закороченном состоянии). Из рисунка видно, что толщина туннельного D_{ox} имеет оптимальную величину ~1,5–2,0 нм, при которой достигается максимальное окно памяти в режимах записи/стирание и хранения. Для небольших значений D_{ox} окно памяти имеет наименьшее значение, так как ток инжекции через туннельный оксид в кремниевый нанокластер равен току стекания заряда из нанокластера через блокирующий оксид, толщины которых одинаковы 8,0 нм. Так, например, в работе [3] в качестве туннельного и блокирующего диэлектрика использовался один и тот же диэлектрик (HfAlO). За счет разных толщин блокирующего и туннельных слоев был достигнут небольшой дисбаланс токов инжекции в нанокластер и из нанокластера. Это приводило к тому, что окно памяти, полученное в работе [2], было небольшим и составило ~ 1,5 В. При увеличении толщины D_{ox} ток инжекции в нанокластер вначале возрастает, а затем уменьшается, по причине уменьшения прозрачности туннельного слоя с увеличением его толщины.

На рис. 3 показаны характеристики записи/стирания в зависимости от толщины D_{ox}. Для записи структуры использовались импульсы +11 В, для стирания –11 В с длительностью 10 мс. Цифрой *1* помечена характеристика для толщины D_{ox}, равной 1,0 нм, *2* — 1,5 нм, *3* — 2,0 нм, *4* — 2,5 нм. Из рисунка видно, что быстродействие предложенного ЭППЗУ также имеет оптимальную величину по причинам, описанным выше. Максимальное быстродействие

ЭППЗУ достигается при D_{ox}, равным 1,5 нм. Отметим, что окно памяти при этом значении немного меньше по величине (на 0,4 В), чем окно памяти для D_{ox}, равного 2,0 нм.

На рис. 4 приведено сравнение характеристик записи/стирания и хранения для КОТОП (кружочки) (из работы [1]) и КООТОП (квадраты) структур. Для записи/стирания использовалось напряжение ±11 В. Для КОТОП структуры взяты оптимальные характеристики, полученные в работе [1], при следующей геометрии: толщина туннельного SiO_2 5,0 нм, блокирующего слоя из ZrO_2 8,0 нм. Для КООТОП использовалась следующая геометрия: толщина D_{ox} 1,5 нм, толщины блокирующего и второго туннельного 8,0 нм. Как видно из рисунка, у КООТОП окно памяти в режиме записи/стирания «хранения» превышает более чем в 2 раза, а также быстродействие в режиме записи/стирания превышает на 2–3 порядка этих же характеристик для КОТОП структуры.

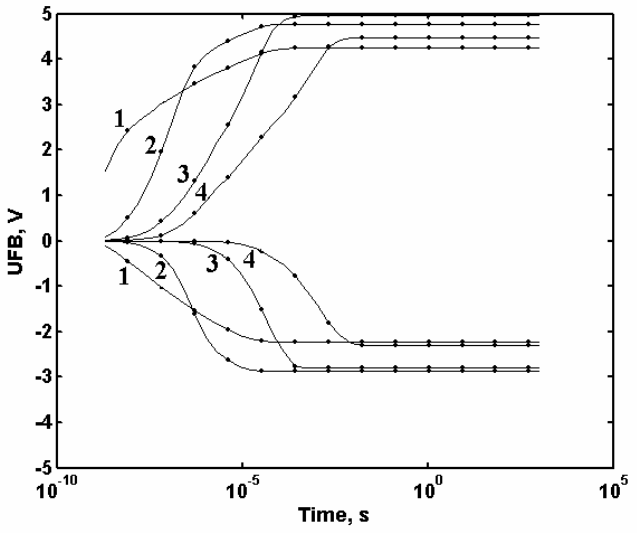


Рис. 3. Характеристики записи/стирания КООТОП структуры в зависимости от толщины первого туннельного слоя (SiO_2). Цифрой *1* помечена характеристика для толщины D_{ox} равной 1,0 нм, *2* — 1,5 нм, *3* — 2,0 нм, *4* — 2,5 нм. Напряжение импульса записи/стирания ±11 В длительностью 10 мс

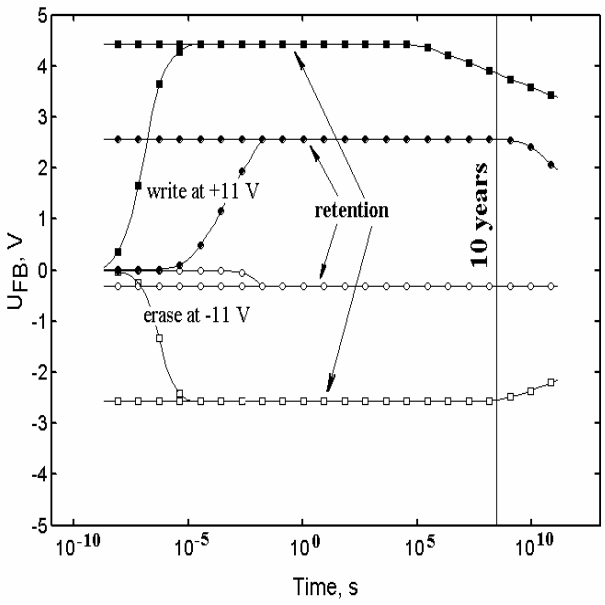


Рис. 4. Сравнение характеристик записи/ стирания и хранения КОТОП (кружочки) и КООТОП (квадраты) структур. Геометрия КОТОП структуры [5]: толщина туннельного SiO_2 5,0 нм, блокирующего 8,0 нм. Геометрия КООТОП структуры: толщина туннельного SiO_2 1,5 нм, второго туннельного 8,0 нм, блокирующего 8,0 нм. Напряжение импульса записи/стирания ±11 В, длительность 10 мс

В заключение отметим, что в настоящей работе предложен ФЛЭШ элемент памяти, основанный на эффекте Фаулера — Нордгема. В режиме записи/стирания такого прибора, инжекция происходит через достаточно тонкий диэлектрик с низким значением диэлектрической проницаемости (на примере SiO_2) ~1,5 нм. Блокирующий слой из диэлектрика с высоким значением диэлектрической проницаемостью (на примере ZrO_2) усиливает электрическое поле в режимах записи/стирания в туннельном SiO_2. Усиление электрического поля в туннельном SiO_2 позволяет повысить быстродействия и увеличить окно памяти. Расчеты показывают, что применение достаточно толстого дополнительного слоя из high-k диэлектрика между туннельно тонким SiO_2 и нанокластером обеспечивает надежное хранение инжектируемого заряда в Si-кластер в течение 10 лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гриценко В. А., Насыров К. А., Гриценко Д. В., Новиков Ю. Н., Асеев А. Л., Ли Д.-В., Ким Ч. В*. ФТП, **39** (6), 748 (2005).

2. *Гриценко В. А*. Строение и электронная структура аморфных диэлектриков в кремниевых МДП структурах. Новосибирск: Наука, 1993. С. 279.

3. *Chen Jing Hao, Wang Ying Qian, Yoo Won Jong, Samudra Ganesh, Daniel Sh Chan, An Yan Du* and *Kwong Dim-Lee.* IEEE Transactions on Electron Devices, 51,№N 11, 1840 (2004).

4. *Gritsenko V. A., Nasyrov K. A., Gritsenko D. V., Novikov Yu. N., H. Lee J., Lee J.-W., Kim C. W., Wong Hei.* Modeling of a EEPROM device based on silicon quantum dots embedded in high-k dielectrics, Microelectron Engineering , **81**, 530 (2005).

5. *Gritsenko V. A., Meerson E. E., Morokov Yu. N*. Phys. Rev. B., **57**, R2081 (1997).

6. *Liu Z., Lee C., Narayanan V., Pen G., Kan E.C.* IEEE Transactions on Electron Devices, **49**, N 9, 1614 (2002).

7. *She M., King T.-J.* IEEE Transactions on Electron Devices, **50**, № 9, 1934 (2003).

8. *Wang Chen-Chan, Chiou Yan-Kai, Chang Che-Hao, Tseng Jiun-Yi, Wu Lin-Jung, Chen Chun-Yu* and *Wu Tai-Bor.* Journal of Physics D: Applied Physycs, **40**, 1673 (2007).

REFERENCES

1. *Gricenko V. A., Nasyrov K. A., Gricenko D. V., Novikov Ju. N., Aseev A. L., Li D.-V., Kim Ch. V*. FTP, 39 (6), 748 (2005).

2. *Gricenko V. A*. Stroenie i jelektronnaja struktura amorfnyh dijelektrikov v kremnievyh MDP strukturah. Novosibirsk: Nauka, 1993. C. 279.

3. *Chen Jing Hao, Wang Ying Qian, Yoo Won Jong, Samudra Ganesh, Daniel SH Chan, An Yan Du* and *Kwong Dim-Lee.* IEEE Transactions on Electron Devices, **51**, № 11, 1840 (2004).

4. *Gritsenko V. A., Nasyrov K. A., Gritsenko D. V., Novikov Yu. N., H. Lee J., Lee J.-W., Kim C.W., Wong Hei.* Modeling of a EEPROM device based on silicon quantum dots embedded in high-k dielectrics, Microelectron Engineering, **81**, 530 (2005).

5. *Gritsenko V. A., Meerson E. E., Morokov Yu. N*. Phys. Rev. B., **57**, R2081 (1997).

6. *Liu Z., Lee C., Narayanan V., Pen G., Kan E. C.* IEEE Transactions on Electron Devices, **49**, № 9, 1614 (2002).

7. *She M., King T.-J.* IEEE Transactions on Electron Devices, **50**, № 9, 1934 (2003).

8. *Wang Chen-Chan, Chiou Yan-Kai, Chang Che-Hao, Tseng Jiun-Yi, Wu Lin-Jung, Chen Chun-Yu* and *Wu Tai-Bor.* Journal of Physics D: Applied Physycs, **40**, 1673 (2007).