

УДК 53 : 538.91

ОПТИМИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ БЛОКИРУЮЩЕГО ДИЭЛЕКТРИКА В ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТИ, ОСНОВАННОЙ НА НИТРИДЕ КРЕМНИЯ*

Ю. Н. Новиков¹, В. А. Гриценко¹, К. А. Насыров²

¹Институт физики полупроводников СО РАН им. А. В. Ржанова,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13
E-mail: nov@ispr.nsc.ru

²Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

Показано, что для блокирующего слоя элемента флэш-памяти, основанного на нитриде кремния, существует оптимальная величина диэлектрической проницаемости, что позволяет достичь максимальной величины окна памяти в режимах записи—стирания.

Ключевые слова: флэш-память, блокирующий диэлектрик, нитрид кремния.

Введение. В настоящее время на смену флэш-приборам с плавающим затвором приходят приборы на основе нитрида кремния как запоминающей среды: polySi—SiO₂—Si₃N₄—SiO₂—Si (КОНОП) и metal—Al₂O₃—Si₃N₄—SiO₂—Si (МОНОП) [1–3]. В качестве металлического затвора используется Pt или TaN (ТОНОП). В этих приборах информация хранится в виде заряда на электронных и дырочных ловушках в нитриде кремния. Блокирующим слоем (БС) в ТОНОП-структурах в последнее время является диэлектрик с высоким значением диэлектрической проницаемости (ДВДП) Al₂O₃ ($\epsilon = 10$) [1, 2]. Масштабирование (уменьшение размеров ячейки памяти) требует применения в качестве БС флэш-памяти диэлектриков с более высоким значением диэлектрической проницаемости, чем в Al₂O₃. Как было показано в [4, 5], использование в качестве БС ДВДП (Al₂O₃, HfO₂, ZrO₂ ($\epsilon = 25$)) вместо традиционно применяемого SiO₂ ($\epsilon = 3,9$) позволяет уменьшить время программирования, понизить напряжение программирования, уменьшить паразитную инжекцию, увеличить окно памяти (разница напряжений плоских зон U_{FB} элемента памяти в состояниях логический «0» и «1»). С другой стороны, применение ДВДП дает возможность использовать более толстый туннельный оксид, что необходимо для длительного хранения заряда в ячейке памяти (10 лет при $T = 85$ °C).

Цель данной работы — теоретически показать, что для диэлектрической проницаемости БС существует оптимальное значение, отклонение от которого приводит к ухудшению характеристик структур флэш-памяти, основанной на нитриде кремния (расчеты проводились для ТОНОП-структур).

Модель расчета характеристик записи—стирания ТОНОП-структуры. Перенос заряда в Si₃N₄ описывается на основе биполярной модели с помощью одномерного уравнения Шокли — Рида — Холла и уравнения Пуассона, учитывающего неоднородное распределение электрического поля в нитриде кремния [6, 7]. Токи инжекции через туннельный и блокирующие оксиды рассчитывались по механизму Фаулера — Нордгейма.

*Работа выполнена при поддержке Сибирского отделения РАН (интеграционный проект № 70) и Корейского министерства науки и технологий (Национальная программа приборов терабитного масштаба (National Program for Tera-Level Nanodevice)).

Перезарядка ловушек описывалась на основе модели многофононной ионизации. Предполагалось, что параметры электронных и дырочных ловушек в нитриде кремния одинаковые [6, 7] и их значения брались из [7]: W_{opt} — оптическая энергия ($W_{\text{opt}} = 2,8$ эВ); W_{T} — термическая энергия ($W_{\text{T}} = 1,4$ эВ); W_{ph} — энергия фонона ($W_{\text{ph}} = 60$ мэВ); m^* — эффективная масса ($m^* = 0,5m_0$); σ — сечение захвата ($\sigma = 5 \cdot 10^{-13}$ см²); σ^r — сечение рекомбинации ($\sigma^r = 5 \cdot 10^{-13}$ см²).

Изменение напряжения плоских зон ТОНОП-структуры рассчитывалось по формуле из работы [3]

$$U_{\text{FB}}(t) = \frac{q}{\varepsilon_0} \int_0^{d_{\text{SN}}} dx(n_t^e(x, t) - n_t^h(x, t)) \left[\frac{d_{\text{SN}} - x}{\varepsilon_{\text{SN}}} + \frac{d_{\text{bloc}}}{\varepsilon_{\text{bloc}}} \right]. \quad (1)$$

Здесь $n_t^e(x)$, $n_t^h(x)$ — локальные концентрации захваченных на ловушки в Si₃N₄ электронов и дырок соответственно; q — заряд электрона; d_{SN} — толщина нитрида кремния; d_{bloc} — толщина БС; ε_0 — диэлектрическая постоянная; ε_{SN} , $\varepsilon_{\text{bloc}}$ — диэлектрические проницаемости нитрида кремния и БС соответственно.

Энергетическая диаграмма ТОНОП-структуры при разных полярностях приложенного напряжения показана на рис. 1. Для геометрии этой структуры использовались следующие значения толщин: $d_{\text{tun}} = 5$ нм (туннельный оксид), $d_{\text{SN}} = 5$ нм (нитрид кремния), $d_{\text{bloc}} = 15$ нм (блокирующий оксид). Длительность импульса записи—стирания во всех случаях составляла 10 мс.

Оптимизация блокирующего диэлектрика. Рассчитанные характеристики записи—стирания ТОНОП-структуры, в которой в качестве БС использовались три ди-

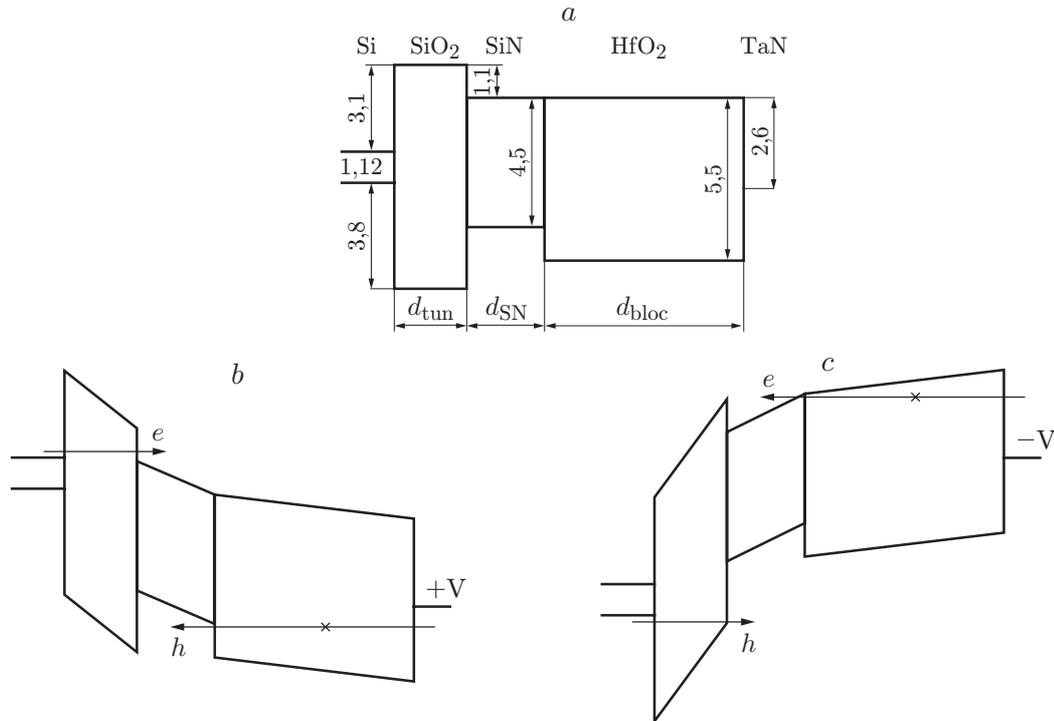


Рис. 1. Энергетическая диаграмма ТОНОП-структуры: без приложенного напряжения (а), при положительном (b) и отрицательном (с) потенциалах на затворе. Энергия обозначается в электронвольтах

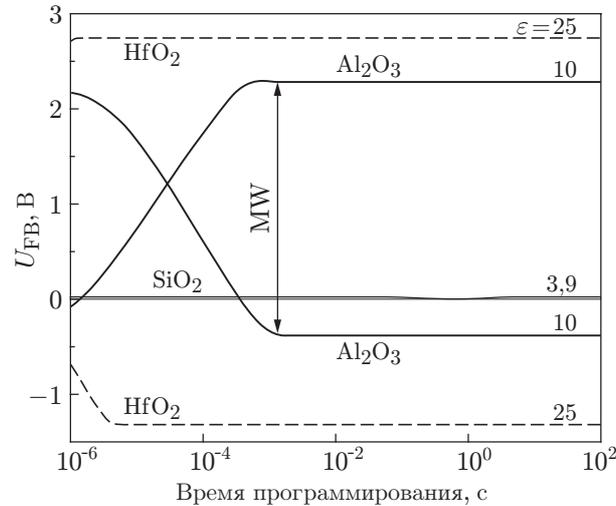


Рис. 2. Рассчитанные характеристики записи—стирания ТОНОП-структуры для разных диэлектриков (SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2), используемых в качестве БС

электрика (SiO_2 , Al_2O_3 , HfO_2 ,) а также окно памяти (MW — Memory Window) показаны на рис. 2. Величина импульса программирования $U_{w/e}$ составляла ± 16 В с длительностью 10 мс. Для концентрации электронных и дырочных ловушек использовалась величина $N_t = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Расчет показывает, что наименьшее окно памяти получается при применении SiO_2 как блокирующего диэлектрика. Это связано с тем, что значительная доля напряжения записывающего (или стирающего) импульса падает на БС. Как следствие, уменьшается падение напряжения на туннельном SiO_2 , что ведет к снижению инжекционного тока Фаулера — Нордгейма. Также для ТОНОП-структуры с БС из SiO_2 характерна значительная паразитная инжекция. Максимальное окно памяти получено, если блокирующим слоем является HfO_2 . Из-за высокого значения диэлектрической проницаемости БС ($\epsilon = 25$) падение напряжения на нем значительно уменьшается. В то же время на туннельном SiO_2 падение напряжения увеличивается, что ведет к усилению тока инжекции через туннельный слой SiO_2 в режимах записи—стирания и, следовательно, к увеличению окна памяти. Отметим, что по причине высокого энергетического барьера для дырок на границе Si/SiO_2 ($\sim 3,8$ эВ) величина накопленного положительного заряда (режим стирания) меньше величины накопленного отрицательного заряда (режим записи).

Рассчитанные характеристики записи—стирания ТОНОП-структуры в зависимости от величины записывающего (стирающего) импульса показаны на рис. 3. Для амплитуды импульса программирования использовались величины $U_{w/e} = \pm 14, \pm 15, \pm 16$ В. В качестве блокирующего диэлектрика был применен ДВДП HfO_2 . Для концентрации электронных и дырочных ловушек использована величина $N_t = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Уменьшение амплитуды программирующего импульса от 16 до 14 В ведет к сужению окна памяти от 4,0 до 2,6 В, при этом быстродействие уменьшается примерно на два порядка.

Рассчитанные зависимости величины окна памяти от диэлектрической проницаемости блокирующего оксида ($\epsilon_{\text{блос}}$) приведены на рис. 4. Для амплитуды импульса программирования применялась величина $U_{w/e} = \pm 16$ В. Для концентрации электронных и дырочных ловушек были использованы величины $N_t = 10^{19}$ (пунктирная кривая) и $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (сплошная кривая). Величины электронного (2,6 эВ) и дырочного (2,9 эВ) энергетических барьеров на границе $\text{TaN}/\text{ДВДП}$ использовались, как в случае HfO_2 . Отметим, что незначительное отклонение указанных величин энергетических барьеров не влияет на характе-

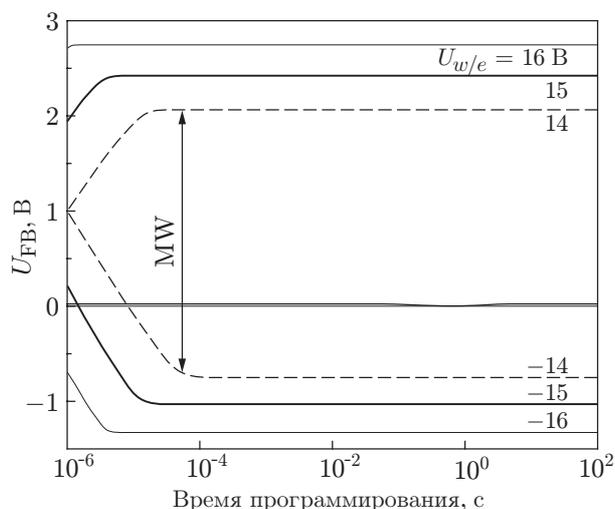


Рис. 3. Рассчитанные характеристики записи—стирания ТОНОП-структуры для разных значений напряжений импульсов с длительностью 10 мс

ристики ТОНОП-структуры, так как при использовании ДВДП в качестве БС паразитная инжекция практически отсутствует. Расчеты показали, что увеличение диэлектрической проницаемости блокирующего оксида (ϵ_{bloc}) приводит к усилению электрического поля в туннельном оксиде и возрастанию инжекционного тока в Si_3N_4 , что способствует увеличению окна памяти, а также уменьшению падения напряжения на блокирующем оксиде (см. уравнение (1)) и окна памяти.

Конкуренция этих двух процессов дает оптимальное $\epsilon = 20\text{--}30$ значение диэлектрической проницаемости блокирующего диэлектрика. Дальнейшее увеличение диэлектрической проницаемости не влияет на характеристики записи—стирания ТОНОП-структуры. Это связано с тем, что падение напряжения на БС с увеличением диэлектрической про-

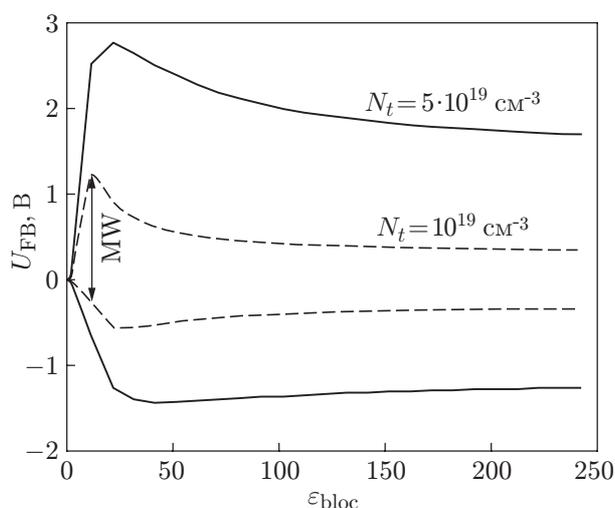


Рис. 4. Рассчитанные зависимости величины окна памяти от диэлектрической проницаемости блокирующего оксида (ϵ_{bloc}) ТОНОП-структуры для разных концентраций электронных и дырочных ловушек в Si_3N_4

нищаемости БС стремится к нулю и его вклад в напряжение плоских зон становится пренебрежимо малым. Отметим, что максимальное окно памяти ТОНОП-структуры для концентрации ловушек $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ примерно в 2 раза превышает максимальное окно памяти для концентрации ловушек 10^{19} см^{-3} (см. рис. 4). Известно, что обогащение нитрида кремния кремнием ведет к увеличению общей концентрации ловушек, в то же время глубина ловушек (термическая энергия ионизации) уменьшается [8]. В связи с этим для предотвращения стекания заряда из обогащенного кремнием нитрида кремния в кремниевую подложку необходимо использовать более толстые слои туннельного SiO_2 . Это возможно только при использовании БС из ДВДП.

Заключение. В данной работе рассмотрено влияние величины диэлектрической проницаемости блокирующего диэлектрика на характеристики записи—стирания ТОНОП-структуры. Для малых значений диэлектрической проницаемости БС (менее 10) характерно значительное падение напряжения на нем, приводящее к паразитной инжекции и уменьшению инжекционного тока через туннельный оксид, захваченного на ловушки заряда, и к сужению окна памяти. Увеличение диэлектрической проницаемости БС (10–25) ведет к уменьшению падения напряжения на нем и, следовательно, к увеличению падения напряжения на туннельном оксиде, что приводит к возрастанию инжекционного тока через туннельный оксид, захваченного на ловушки заряда, и окна памяти. Дальнейшее увеличение диэлектрической проницаемости БС (более 25) приводит к уменьшению окна памяти вследствие уменьшения падения напряжения на БС примерно до нуля. Оптимальная величина диэлектрической проницаемости для блокирующего оксида ТОНОП-структуры лежит в диапазоне 20–30.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lai S.-C., Lue H.-T., Hsieh J.-Y. et al.** Study of the erase mechanism of MANOS (Metal/ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}/\text{SiO}_2/\text{Si}$) device // IEEE Electron Dev. Lett. 2007. **28**, N 7. P. 643–645.
2. **Lee C.-H., Park K.-C., Kim K.** Charge-trapping memory cell of $\text{SiO}_2/\text{SiN}/\text{high-k}$ dielectric Al_2O_3 with TaN metal gate for suppressing backward-tunneling effect // Appl. Phys. Lett. 2005. **87**. P. 073510–073513.
3. **Wang Y., White M. H.** An analytical retention model for SONOS nonvolatile memory device in the excess electron state // Solid-State Electron. 2005. **49**. P. 97–107.
4. **Gritsenko V. A., Nasyrov K. A., Novikov Y. N. et al.** A new low voltage fast SONOS memory with high-k dielectric // Solid-State Electron. 2003. **47**. P. 1651–1658.
5. **Гриценко В. А., Насыров К. А., Новиков Ю. Н., Асеев А. Л.** Новый элемент памяти для электрически перепрограммируемого запоминающего устройства на основе диэлектрика с высокой диэлектрической проницаемостью // Микроэлектроника. 2003. **32**, № 2. С. 90–96.
6. **Nasyrov K. A., Gritsenko V. A., Novikov Y. N. et al.** Two-bands charge transport in silicon nitride due to phonon-assisted trap ionization // Journ. Appl. Phys. 2004. **96**, N 8. P. 4293–4296.
7. **Vishnyakov A. V., Novikov Y. N., Gritsenko V. A., Nasyrov K. A.** The charge transport mechanism in silicon nitride: multi-phonon trap ionization // Solid-State Electron. 2009. **53**, N 3. P. 251–255.
8. **Гриценко В. А.** Строение и электронная структура аморфных диэлектриков в кремниевых МДП структурах. Новосибирск: Наука, 1993. 278 с.