

ПРИБОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ 45НМ HIGH-K МОПТ С УЧЕТОМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГАММА ИЗЛУЧЕНИЯ

Петросянц К.О.^{1,2}, Попов Д.А.¹

¹ Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»
(123458, ул. Таллинская, д. 34, kpetrosyants@hse.ru)

² Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН
(124365, Москва, Зеленоград, ул. Советская, д.3)

Уменьшение физических размеров и увеличение количества элементов является ключевыми факторами развития интегральной микроэлектроники, которые позволяют достигнуть новых уровней производительности и функциональности схем. Однако при достижении размеров канала менее 50 нм эффективная толщина обычного подзатворного диэлектрика из SiO_2 составляет менее 1 нм, что примерно равно трем моноатомным слоям. При такой малой толщине подзатворного диэлектрика высока вероятность туннелирование носителей из сильнолегированного затвора в область канала, что может приводить к нарушению функциональности приборов. Для возможности дальнейшего масштабирования размеров элементов необходимо найти решение данной проблемы.

Наиболее подходящим решением было признано замена стандартного материала подзатворного диэлектрика на материал с большим значением диэлектрической проницаемостью – high- k диэлектрик. Основными кандидатами на замену оксида кремния SiO_2 ($k \approx 3,9$) рассматривались нитрид кремния Si_3N_4 ($k \approx 7$), оксид алюминия Al_2O_3 ($k \approx 9$), оксид лантана La_2O_3 ($k \approx 27$), оксиды на основе гафния HfO_2 ($k \approx 20$) и циркония ZrO_2 ($k \approx 23$) и др. [1]. К сожалению, все рассматриваемые материалы обладают теми или иными недостатками. По общему набору параметров и свойств для замены оксида кремния наиболее подходящим материалом является оксид гафния.

В настоящее время МОПТ с high- k материалами могут быть использованы для космической электроники и электроники специального назначения. Поэтому становится актуально изучение таких транзисторов с учетом влияния радиации. Для таких целей возможно использование средств приборно-технологического моделирования, в том числе Technology CAD (TCAD) [2]. В системе TCAD используются физические модели, учитывающие все основные эффекты, такие как перенос

и рассеяние носителей заряда, деградация подвижности, генерация-рекомбинация и другие, однако они требуют дополнительной настройки для моделирования структур с high-*k* материалом.

Ранее с помощью Sentaurus TCAD [3]–[6] и Silvaco ATLAS [7], [8] авторами анализировались характеристики структур с high-*k* материалами. Однако очень мало работ ([9], [10]) посвящено моделированию таких структур с учетом воздействия гамма-излучения, потому что физический механизм влияния облучения на HfO₂/Si структуры мало изучен.

В этой работе для достижения сходимости с экспериментальными данными в Synopsys TCAD настроена полуэмпирическая модель механизма учета гамма облучения в МОПТ с high-*k* материалом.

Были рассмотрены и выбраны физические модели для оптимального моделирования структур с тремя видам подзатворного оксида (Рис. 1): оксид только из SiO₂, составной оксид из SiO₂ и HfO₂, и оксид только из HfO₂. В таблице 1 перечислены выбранные модели.

Таблица 1

Набор физических моделей для моделирования структур с high-*k* материалом

Физический эффект	SiO ₂	SiO ₂ /HfO ₂	HfO ₂
Рассеяние носителей заряда	CarrierCarrierScattering (BrooksHerring)		
Деградация подвижности	Enormal		Enormal (Lombardi_high-k)
Генерация-рекомбинация носителей заряда	SRH(DopingDep) Auger		
Квантование	Density Gradient Quantization Model		
Туннелирование	DirectTunneling		
Инжекция горячих носителей	Lucky-модель		

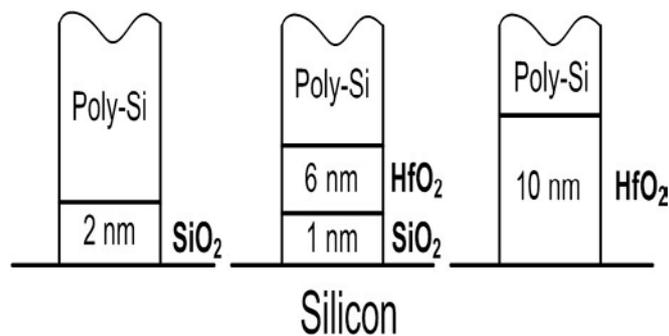


Рис. 1. Различные типы рассматриваемых подзатворных оксидов

В модель прямого туннелирования были внесены изменения. Значения параметров высота потенциального барьера, эффективная масса носителей в диэлектрике и относительная диэлектрическая проницаемость были взяты из работы [11] (Таблица 2). Значения промоделированных токов утечки затвора получились близкими с экспериментальными данными [12].

Таблица 2

Параметры, полученные из экспериментальных затворных характеристик [11]

Параметр	SiO ₂	HfO ₂
Высота потенциального барьера, эВ	1,13	3,10
Эффективная масса носителей в диэлектрике, m ₀	0,22	0,4
Относительная диэлектрическая проницаемость	3,9	20

На границе раздела HfO₂/Si происходит более интенсивный захват носителей, чем на границе SiO₂/Si, это вызвано большей дефектностью кремниевой границы раздела с оксидом гафния [8]. Для учета этого эффекта значения заряда поверхностных состояний были изменены: $Q_{\text{int}}(\text{SiO}_2)=5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, $Q_{\text{int}}(\text{SiO}_2/\text{HfO}_2)=1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и $Q_{\text{int}}(\text{HfO}_2)=5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$.

На основании данных работ [13], [14] введена аналитическая зависимость концентрации ловушечных уровней на границе раздела HfO₂/Si от дозы:

$$N_{it}(D) = 4700 \cdot D^{1.468}, \quad (1)$$

С измененной радиационной моделью был промоделирован 250 нм МОПТ с составным подзатворным диэлектриком (SiO₂=1,0/HfO₂=3,0 нм и SiO₂=1,0/HfO₂=7,5 нм) [15] (Рис.2). Для более тонких подзатворных оксидов интенсивность захвата меньше, чем для более толстых оксидов, соответственно радиационный сдвиг для тонких оксидов гораздо меньше [15].

Для КНИ МОПТ учитывалось захват носителей заряда в скрытом оксиде (BOX) и в боковой изоляции (STI) [10].

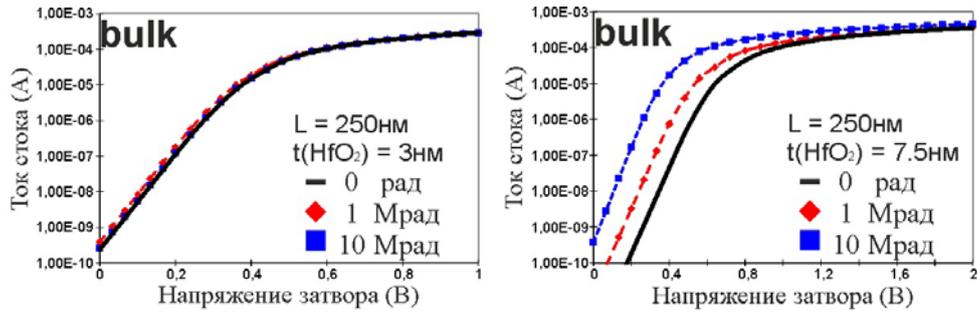


Рис.2. Промоделированные сток-затворные характеристики для 250 нм МОПТ с толщиной подзатворного диэлектрика HfO_2 3,0 нм (слева) и 7,5 нм (справа)

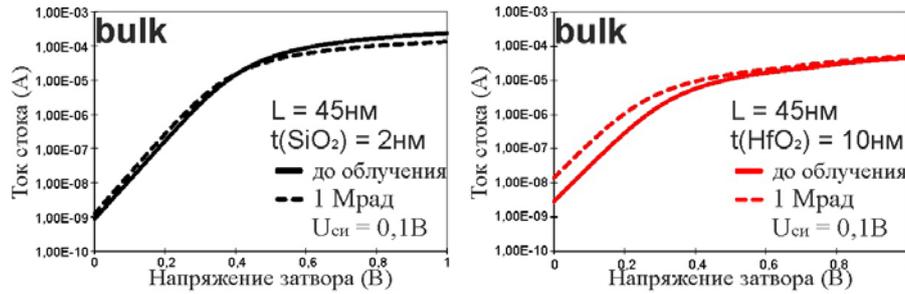


Рис.3. Промоделированные сток-затворные характеристики для 45 нм МОПТ $t(\text{SiO}_2)=2,0$ нм (слева) и 45 нм МОПТ $t(\text{HfO}_2)=10$ нм (справа)

Для подтверждения адекватности внесенных изменений были промоделированы субмикронные 45 нм МОП структуры на объемном кремнии и на изоляторе (КНИ) с поликремниевым затвором ($W_{\text{поли}}=500$ нм, $L_{\text{поли}}=45$ нм) и различной конструкцией подзатворного оксида: SiO_2 (2 нм); HfO_2 (10 нм); составной SiO_2 (1 нм) и HfO_2 (6 нм). Для всех структур эффективная толщина подзатворного оксида была выбрана 2 нм:

$$EOT = t_{\text{high-k}} \cdot \left(\frac{k_{\text{SiO}_2}}{k_{\text{high-k}}} \right), \quad (2)$$

Для каждой структуры были промоделированы сток-затворных и затворные характеристики до и после гамма-облучения в диапазоне от 0,1 до 1 Мрад. Основные параметры объемного 45 нм МОПТ до облучения представлены в таблице 3. На рисунке 3 представлена сток-затворная характеристика объемного 45 нм МОПТ. Сдвиг порогового напряжения для структуры с SiO_2 (физическая толщина 2 нм) подзатворным оксидом минимален. Однако для структуры с HfO_2 (физическая толщина 10 нм) сдвиг составляет 0,1 В. Как говорилось выше, это происходит вследствие большей физической толщины оксида гафния. Крутизна и ток насыщения за время облучения значительно не изме-

нились. Эти результаты согласуются с экспериментальными данными работ [15] и [16].

Таблица 3
 Параметры для объемного 45нм МОПТ
 с различной конструкцией подзатворного оксида

Параметр	SiO ₂ 2 нм	SiO ₂ /HfO ₂ 1,0/6 нм	HfO ₂ 10 нм
Ток утечки затвора, А	1,41E-10	9,6E-19	8,66E-14
Пороговое напряжение, В	0,38	0,46	0,51
Ток утечки стока, А	7,3E-10	1,18E-09	2,9E-09
Ток насыщения, мА	0,625	0,264	0,188
Крутизна, 10 ⁻⁶ А/В	310	280	180

Для КНИ структуры необходимо учесть наличие тока утечки вызванной накоплением заряда в скрытом оксиде (физическая толщина 145 нм) и боковой изоляции (Рис.4). Для моделирования этих токов был использован метод квази-трехмерного моделирования с внесенными в радиационную модель зависимостями захваченного положительного заряда на границах BOX/Si и STI/Si [10], [17], [18]. Полученные после облучения сток-затворные характеристики для верхнего затвора представлены на рисунке 5. Из рисунка видно, что ток утечки бокового оксида оказывает существенное влияние на общий ток утечки и вызывает его рост на несколько порядков. Сток-затворные характеристики для нижнего затвора представлены на рисунке 6. Видно, что ток утечки нижнего затвора вносит заметный вклад в общий ток утечки только при напряжении больше 5В на подложке.

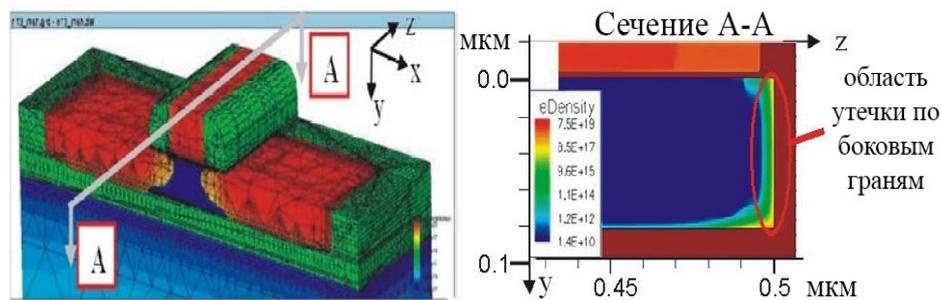


Рис.4. КНИ МОП структура (слева) и область тока утечки по боковой грани на границе с боковой изоляцией (справа)

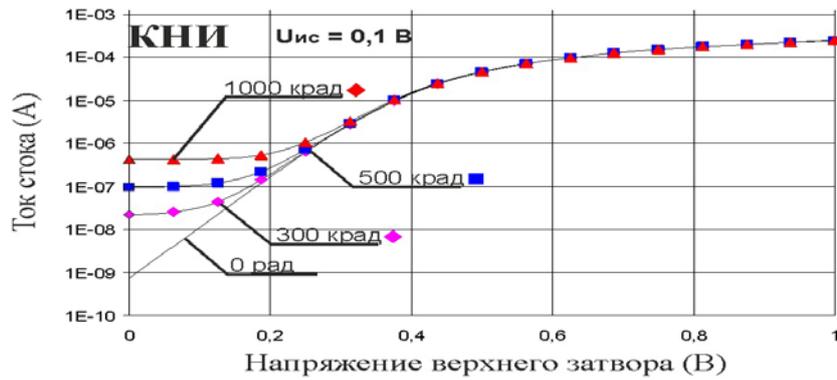


Рис.5. Промоделированные сток-затворные характеристики для 45 нм КНИ МОПТ при различных дозах гамма облучения

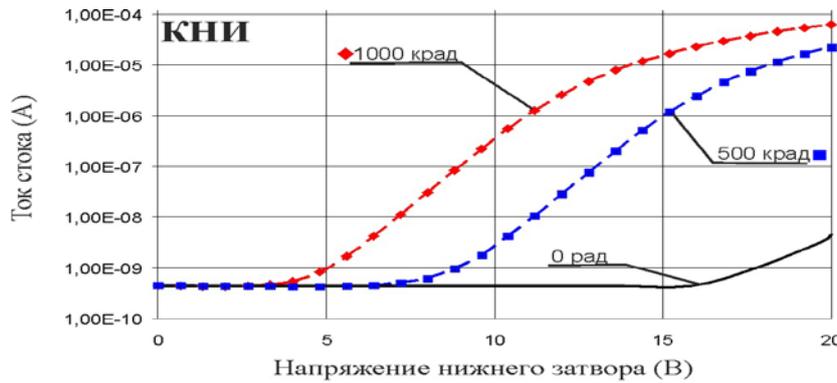


Рис.6. Промоделированные сток-затворные характеристики нижнего затвора для 45 нм КНИ МОПТ при различных дозах гамма облучения

Таким образом, в работе проанализированы встроенные в Synopsys TCAD физические модели и выбраны наиболее оптимальные для моделирования структур с high- k материалом. В описание модели туннелирования и радиационной модели внесены изменения, позволившие достичь хорошей сходимости с экспериментальными данными [9], [18]. В результате Sentaurus TCAD может быть рекомендован для адекватного моделирования воздействия гамма облучения на субмикронные МОПТ с high- k материалом.

Исследования осуществлены при поддержке грантов РФФИ №14-29-09145 и индивидуального исследовательского проекта программы «Научный фонд НИУ ВШЭ» №15-01-0165.

Литература

- [1] Н. Wong, Н. Iwai, “On the scaling issues and high- k replacement of ultrathin gate dielectrics for nanoscale MOS transistors”, *Microelectronic Engineering*, Vol. 83, pp. 1867–1904, 2006.

- [2] <http://www.synopsys.com/Tools/TCAD/Pages/default.aspx>
- [3] A. K. Rana, N. Chand, V. Kapoor, “TCAD Based Analysis of Gate Leakage Current for High-k Gate Stack MOSFET”, *ACEEE Int. Journ. on Communication*, Vol. 2, No.1, pp. 5–8, Mar. 2011.
- [4] S. Chander, P. Singh, S. Baishya, “Optimization of Direct Tunneling Gate Leakage Current in Ultrathin Gate Oxide FET with High-K Dielectrics”, *IJRDET*, No1, pp. 24–30, Oct. 2013.
- [5] C. Shen, L. T. Yang, G. Samudra, Y. C. Yeo, “A new robust non-local algorithm for band-to-band tunneling simulation and its application to Tunnel-FET”, *Sol.-St. Electronics* Vol. 57, pp. 23–30, 2011.
- [6] S. Yadav, A. Srivastava, J. Rahul, K. K. Jha “TCAD assessment of nonconventional Dual Insulator Double Gate MOSFET”, *ICDCS*, 2012, pp. 462-465.
- [7] N. Shashank, S. Basak, R. K. Nahar, “Design and Simulation of Nano Scale High-K Based MOSFETs with Poly Silicon and Metal Gate Electrodes”, *International Journal of Advancements in Technology*, Vol. 1, No.2, pp. 252-261, 2010.
- [8] N. Shashank, V. Singh, W.R. Taube, R.K. Nahar, “Role of Interface Charges on High-k Based Poly-Si and Metal Gate Nano-Scale MOSFETs”, *J. Nano- Electron. Phys.* 3, No.1, pp. 937–941, 2011.
- [9] R. Arora, Z. E. Fleetwood, En Xia Zhang, N. E. Lourenco, J. D. Cressler, D. M. Fleetwood, R. D. Schrimpf, A. K. Sutton, G. Freeman and B. Greene, “Impact of Technology Scaling in sub-100 nm nMOSFETs on Total-Dose Radiation Response and Hot-Carrier Reliability”, *IEEE Trans. on Nuclear Science*, Vol. 61, No.3, pp. 1426–1432, 2014.
- [10] N. Rezzak, PhD Dissertation, Vanderbilt Univ., 2012.
- [11] Y.-C. Yeo, T.-J. King and C. Hu, “MOSFET Gate Leakage Modeling and Selection Guide for Alternative Gate Dielectrics Based on Leakage Considerations”, *IEEE Transactions on electron devices*, Vol. 50, No.4, pp. 1027–1035, April 2003.
- [12] S. J. Lee, H. F. Luan, W. P. Bai, C. H. Lee, T. S. Jeon, Y. Senzaki, D. Roberts and D. L. Kwong, “High Quality Ultra Thin CVD HfO₂ Gate Stack with Poly-Si Gate Electrode”, *Electron Devices Meeting, IEDM'00. Technical Digest. International*, pp. 31–34, 2000.
- [13] F. B. Ergin, R. Turan, S. T. Shishiyanu and E. Yilmaz, “Effect of Gamma-Radiation on HfO₂ based MOS Capacitor”, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*, B268, pp. 1482–1485, 2010.
- [14] C. D. Young, G. Bersuke, G. A. Brown, C. Lim, P. Lysaght, P. Zeitzoff, R. W. Murto, Robert, H.R. Huff, “Charge trapping in MOCVD hafni-

- um-based gate field dielectric stack structures and its impact on device performance”, *Proc. of IEEE IRW*, 2003, pp. 28–35.
- [15] S. K. Dixit, X. J. Zhou, R. D. Schrimpf, D. M. Fleetwood, S. T. Pantelides, R. Choi, G. Bersuker, L. C. Feldman, “Radiation Induced Charge Trapping in Ultrathin HfO₂-Based MOSFETs”, *IEEE Trans. on Nuclear Science*, Vol. 54, No.6, pp. 1883–1889, 2007.
- [16] R. Arora, Z. E. Fleetwood, E. X. Zhang, N. E. Lourenco, J. D. Cressler, D. M. Fleetwood, R. D. Schrimpf, A. K. Sutton, G. Freeman and B. Greene, “Impact of Technology Scaling in sub-100 nm nMOSFETs on Total-Dose Radiation Response and Hot-Carrier Reliability”, *IEEE Trans. on Nuclear Science*, Vol. 61, No.3, pp. 1426–1432, 2014.
- [17] M. Gaillard, M. Martinez, P. Paillet, F. Andrieu, S. Girard, M. Raine, C. Marcandella, O. Duhamel, N. Richard, O. Faynot, “Impact of SOI Substrate on the Radiation Response of UltraThin Transistors Down to the 20 nm Node”, *IEEE Trans. on Nuclear Science*, Vol. 60, No.4, pp. 2583–2589, 2013.
- [18] S. T. Liu, A. L. Hurst, P. McMarr, J. Bedito and C. Capasso, “Total dose radiation response of a 45nm SOI Technology”, *Proc. of SOI Conf.* (San Diego, USA), 2010, pp. 1–2.