

ПРОЦЕССЫ НИТРИЗАЦИИ ПОДЗАТВОРНОГО ДИЭЛЕКТРИКА И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ИЗМЕНЕНИЕ ПЛОТНОСТИ МЕЖСЛОЙНЫХ СОСТОЯНИЙ МДП-СТРУКТУР

Н.В. Черкесова¹, Г.А. Мустафаев¹, А.Г. Мустафаев²

¹ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет
им. Х.М. Бербекова»

360004, Россия, Нальчик, ул. Чернышевского, 173

²ГАОУ ВО «Дагестанский государственный университет народного хозяйства»
367008, Россия, Махачкала, ул. Джамалутдина Атаева, 5
natasha07_2002@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.1070

Аннотация: Процессы, протекающие в системе кремний-кислород-азот, представляет большое практическое значение, поскольку диэлектрические слои из материалов этой системы широко применяются в качестве барьеров для проникновения примесей, элементов накопительных конденсаторов, полевых изолирующих слоев и т.д. Интерес к созданию таких диэлектриков повысился в связи с использованием в технологических процессах этапа быстрого термического отжига, сопровождающегося возникновением на поверхности раздела быстрых поверхностных состояний и механических напряжений. В результате исследования определено что МДП-структурах изменение порогового напряжения, связано с захватом электронов на образующиеся при этом в объеме полупроводника ловушки. МДП-структуры с азотированным оксидом по сравнению с обычным оксидом обладают лучшей стабильностью. Исследования показали, что подавление процесса образования состояний на поверхности раздела зависит от степени азотирования. Характеристики МДП-структур под воздействием облучения существенно зависят от температуры и длительности быстрой термической нитризации.

Ключевые слова: металл–диэлектрик–полупроводник (МДП), оксинитрид кремния, нитризация, подзатворный диэлектрик, диоксид кремния, термообработка.

1. Введение

Увеличение степени интеграции предъявляет более высокие требования к параметрам МДП-транзисторов, которые определяются электрофизическими свойствами диэлектрика затвора. Поверхностные состояния, механические напряжения, а также стойкость диэлектрика к ионизирующим воздействиям прямо влияют на эксплуатационные параметры МДП-транзисторов. Способом улучшения электрофизических характеристик подзатворного диэлектрика является азотирование SiO_2 или использование в качестве диэлектрика затвора плёнок оксинитрида кремния.

2. Методика эксперимента

Изучение процесса проводили на пленках оксинитрида кремния SiO_xN_y , осажденных при низком давлении и температуре 820°C методом парофазного химического осаждения (ПФХО). Такие пленки содержали

2-3 ат.% N , в основном связанного с азотом, и 0,05-0,6 ат.% C . Часть образцов пленок оксинитрида кремния, получали стимулированным плазмой методом ПФХО, которые содержали 5-20 ат.% N . В этом случае температура осаждения составляла 380°C , частота возбуждения плазмы – 400 кГц. Окисление проводили в парогазовой смеси H_2O-O_2 различного состава при температуре $800-1000^{\circ}\text{C}$ в течение 0,5-16 ч.

Для азотирования термического окисла толщиной 8-120 нм проводили нагрев в атмосфере аммиака при температуре $800-1100^{\circ}\text{C}$ в течение от нескольких секунд до нескольких часов. Было установлено, что, нагрев пленок оксинитрида кремния, полученного методом ПФХО, в окислительной среде приводит к дополнительному внедрению атомов кислорода и потере атомов азота до уровня ниже предела детектирования (0,3 ат. %). При этом скорость окисления при 1000°C линейно увеличивалась с ростом соотношения H_2O/O_2 в газовой фазе и резко возрастала с уменьшением содержания азота в пленке (см. рис. 1).

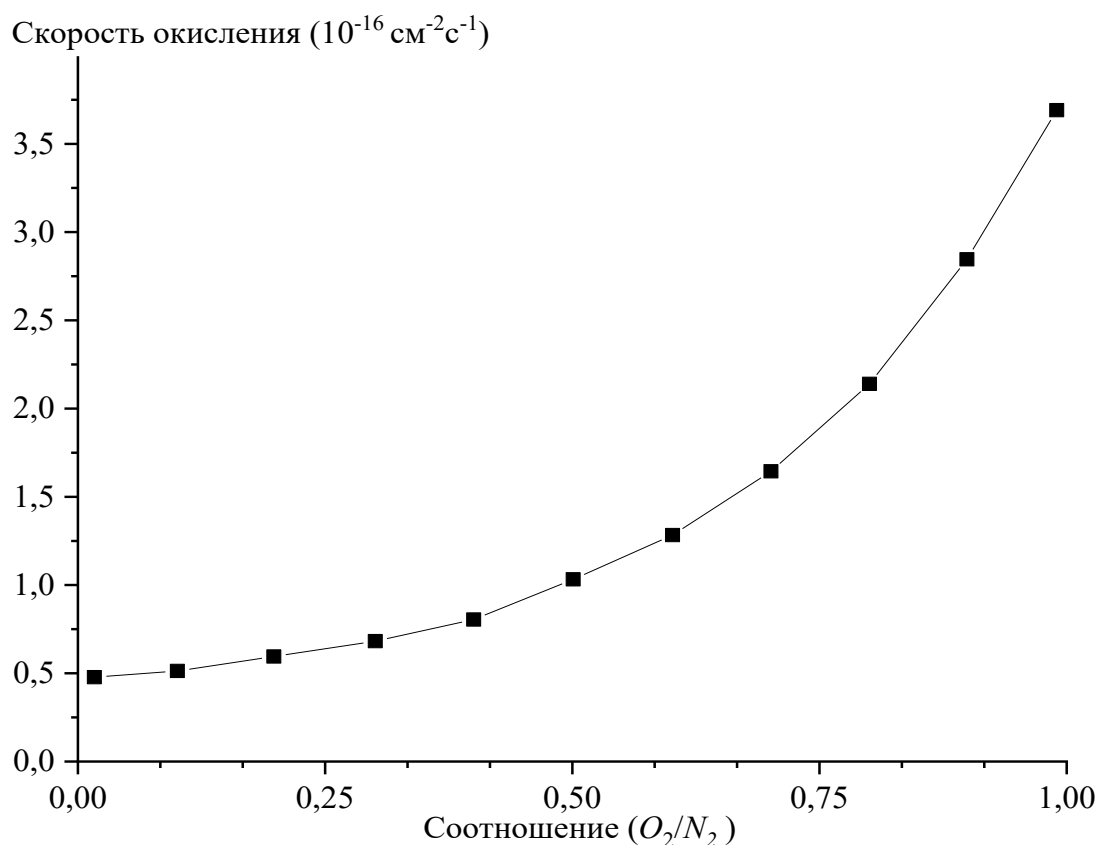
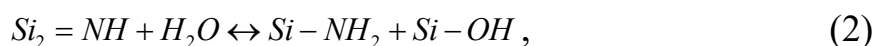
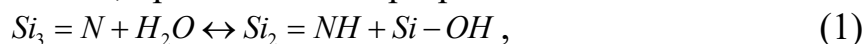


Рис. 1. Зависимость скорости окисления при 1000°C от содержания азота в пленке.

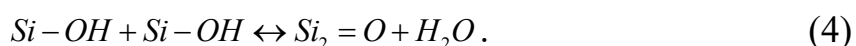
Отмечено также, что, если слой, прилегающий к кремниевой подложке, содержит порядка 1 ат. % водорода, то верхний окисный слой – всего несколько десятых атомного процента. Максимальное количество водорода ($8 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$) обнаружено на границе раздела оксид/оксинитрид кремния после отжига при 950°C в течение 9 часов во влажной среде.

Для дальнейшего выяснения роли водорода проводили окисление образцов оксинитрида, полученных при плазменном стимулировании осаждения. Установлено, что при меньшей температуре осаждения содержание водорода в оксинитриде кремния больше. В результате его состав в процессе высокотемпературной обработки меняется за счет диффузионного удаления водорода. Однако если весь водород в таком материале связан с азотом, то он может выдержать термообработку при 850°C без существенных потерь водорода [1, 2]. В целом по характеру окисления такой оксинитрид кремния аналогичен материалу, полученному методом ПФХО при низком давлении [3-5], но при этом одно и то же количество кислорода вводится при температуре, примерно на 200°C более низкой.

На основе полученных экспериментальных данных можно предложить механизм окисления. В принципе на процесс окисления могут влиять диффузия частиц окислителя через окисный слой к поверхности раздела окисел/оксинитрид кремния, протекание реакций на поверхности раздела и перенос азотсодержащих продуктов реакции к поверхности [6-8]. Установлено, что для материала, полученного методом ПФХО при низком давлении, лимитирующим фактором для процесса окисления является скорость реакций на поверхности раздела. Такой вывод следует из полученных экспериментальных данных, согласно которым скорость окисления оксинитрида не зависит от длительности процесса или толщины образующегося окисла. Кроме того, увеличение концентрации кислорода происходит гораздо быстрее для оксинитрида кремния, полученного при плазменном стимулировании осаждения, чем при низком давлении, при одном и том же отношении содержания кислорода к азоту. Отсюда следует, что существенную роль может также играть диффузионное удаление азотсодержащих продуктов реакции с поверхности раздела оксид/оксинитрида к поверхности внешнего окисного слоя. Поскольку максимальное содержание водорода из газовой фазы обнаруживается на этой поверхности раздела, а при окислении в сухой среде кислород практически не внедряется в диапазоне исследованных температур, можно сделать вывод об определяющей роли реакций на поверхности раздела с участием водорода. Процесс окисления можно представить с помощью последовательности реакций, протекающих с разрывом связи $Si - N$:



Образование SiO_2 можно представить реакцией:



Очевидно, что окисление нитрида или оксинитрида кремния в сухом кислороде будет описываться другой последовательностью реакций. Такой процесс имеет энергию активации 6 эВ (против 2 эВ во влажной среде), что можно объяснить образованием фазы Si_2N_2O на поверхности раздела окисел/оксинитрид. При влажном окислении наличие водорода в реакционном объеме предотвращает образование такой фазы. Учитывая, что в оксинитридах, полученных с плазменной стимуляцией, наблюдается очень быстрое удаление атомов азота, которые практически все присутствуют в виде групп $=NH$, можно признать в качестве лимитирующей скорость окисления реакции (1). Отсюда также следует, что реакции (2)-(4) протекают с высокой скоростью слева направо. Согласно реакции (1), происходит превращение кремния с четырьмя координационными связями в кремний с двумя координационными связями, что соответствует превращению структуры нитрида кремния в структуру окисла.

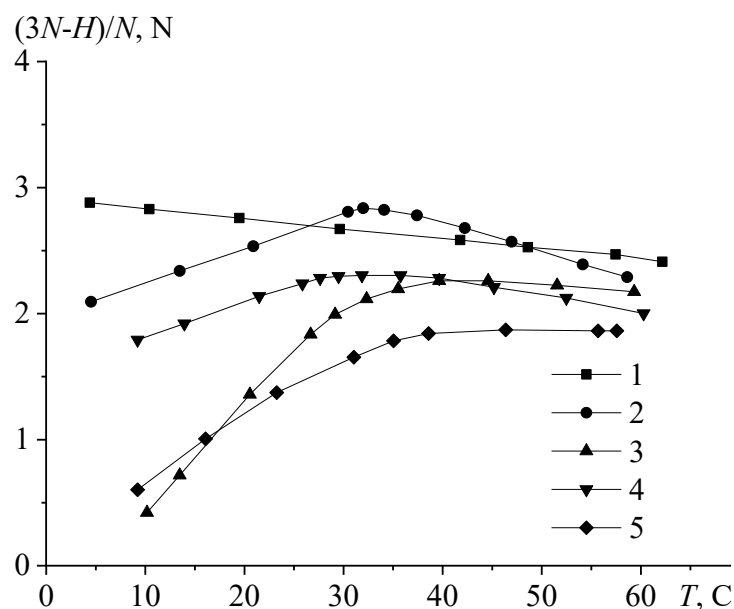
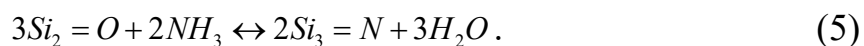


Рис. 2. Зависимость числа связей $Si-N$ на один внедренный атом азота от времени азотирования, при разных температурах этого процесса: 1 – 1100°C; 2 – 1150°C; 3 – 950°C; 4 – 1050°C; 5 – 1000°C.

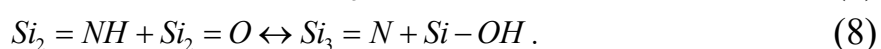
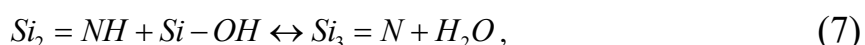
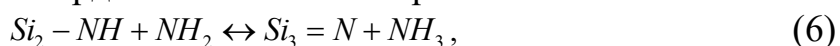
Азотирование двуокиси кремния исследовали путем проведения отжига в атмосфере аммиака при температурах 800-1100°C. Установлено, что при малой длительности процесса (30 с) и относительно низкой температуре максимальная концентрация азота обнаруживается у границы кремний/пленка. С ростом температуры этот пик сдвигается в сторону окисла. Заметное азотирование достигается при высоких значениях температуры и длительности процесса. При этом происходит обеднение пленки окисла кислородом и обогащение азотом, причем второй процесс происходит быстрее. Важную роль, которую играет водород в процессе

азотирования, иллюстрирует такой факт, как отсутствие сколь-нибудь заметного внедрения азота в пленку окисла при отжиге в молекулярном азоте или имплантации ионов азота; причем, в последнем случае обнаруживается внедрение азота в слой кремния, лежащий непосредственно под окислом.

Существенную информацию для установления механизма образования азотированной структуры окисла дает изучение соотношения между количеством внедряющегося в окисел водорода и азота. Как видно из рис. 2, где представлена зависимость числа связей $Si-N$ на один внедренный атом азота (по вертикали) от времени азотирования (по горизонтали), при разных температурах этого процесса, и длительности азотирования – это соотношение равно 2-3 и уменьшается до величины, меньшей единицы, с ростом обоих этих параметров. Анализ данных рис. 2 показывает, что при высоких температурах азотирования уже через 30 с большая часть атомов азота в пленке оксинитрида образует с кремнием структуру с тремя связями:



Эта суммарная реакция протекает через несколько стадий, начиная от хемисорбции аммиака на поверхности окисла, через образование групп $Si-NH_2$ и Si_2-NH . Последняя нестабильна в присутствии воды и превращается в другие конфигурации с высвобождением атома азота. Большая подвижность атома азота сохраняется в объеме окисной структуры до тех пор, пока он не достигнет области поверхности раздела в процессе азотирования или поверхности при окислении оксинитрида кремния. Имобилизация азота в окисной структуре может протекать путем образования трех координатных связей с кремнием:



Данные рис. 2 свидетельствуют о том, что такие процессы протекают довольно быстро. Отсутствие пика водорода у поверхности раздела оксинитрид-кремний и наличие пика азота у этой поверхности раздела доказывает, что образование комплексов $Si_3 = N$ в основном протекает у этой поверхности, а не в объеме окисла. Показано, что окисление во влажной среде оксинитридов кремния, полученных двумя разновидностями метода ПФХО и азотирование окисла кремния в атмосфере аммиака описываются одной и той же равновесной системой, в кинетике которой ключевую роль играет водород.

Далее было проведено исследование полученных образцов МДП-структур с нитрированием подзатворного окисла. Исследовали структуры

при воздействии горячих электронов и ионизирующего излучения. Термический оксид имел толщину 10 нм. Окисел был термически нитрирован при температуре между 900 и 1200°C в течение 10, 30 и 60 с. МДП-структуры были изготовлены с этой оксидной пленкой как подзатворным диэлектриком по поликремниевому процессу. Ионизирующее облучение проводилось энергией 50 кэВ рентгеновским излучением до дозы 0,5 Мрад по кремнию. Оценка изменения параметров структур после облучения проводилась на базе вольт-фарадных характеристик, снимаемых в высокочастотном и квазистатическом режимах.

Результаты воздействия ионизирующего облучения на МДП-структуры с быстрым термическим нитрированием при различной температуре и длительности нитрирования показаны на рис. 3. На рис. 3 а показана зависимость изменения плотности межслойных состояний, вызванного облучением 0,5 Мрад при разных температурах и разной длительности нитрирования. Видно, генерация межслойных состояний уменьшается как при увеличении температуры, так и при увеличении длительности нитрирования. Для сильно нитрированных образцов изменение почти на порядок. На рис. 3 б показано изменение напряжения плоских зон (ΔV_{fb}) в результате облучения, также для образцов, подвергавшихся нитрированию при разных температурах с разной длительностью. Как видно из рис. 3 б и температура нитрирования и длительность уменьшают величину изменения напряжения.

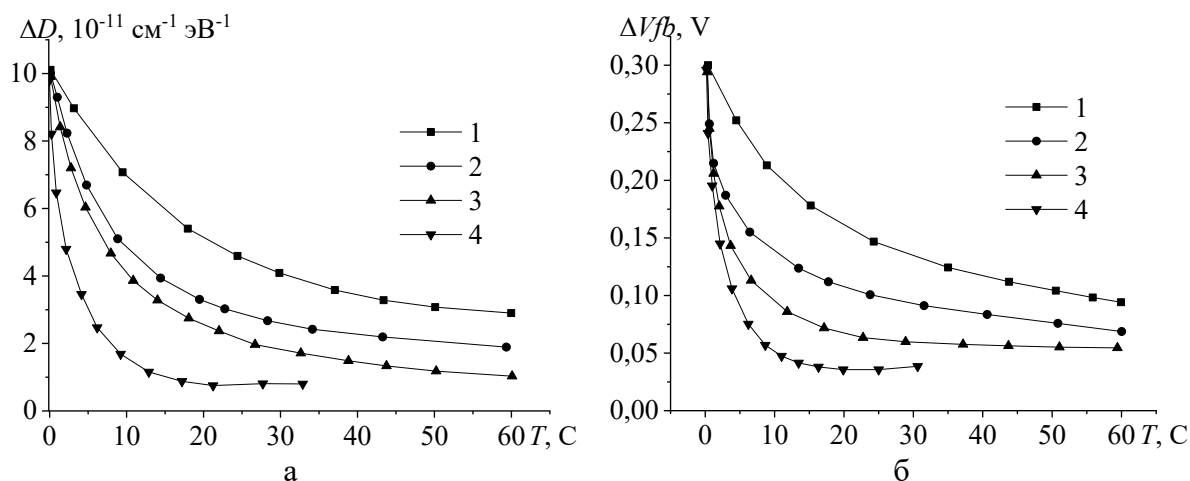


Рис. 3. Зависимость изменения плотности межслойных состояний, вызванного облучением 0,5 Мрад при разных температурах и длительности нитрирования; б – изменение напряжения плоских зон в результате облучения, также для образцов, подвергавшихся нитрирования (1 – 900°C, 2 – 1000°C, 3 – 1100°C, 4 – 1200°C).

Наблюдающиеся изменения напряжения могут быть следствием либо увеличения воздействия ловушек электронов, либо уменьшения воздействия ловушек дырок. Теоретические расчеты показывают, что

длина связи $Si-N$ в структуре Si_2N_2O равна 0,12 нм, и короче, чем длина связи $Si-O$ в тетраэдрной структуре SiO_4 , равной 0,262 нм. Поэтому в результате нитрирования происходит ограничение оксидной области, вызванное формированием связки кремний-азот. По мере увеличения длительности нитрирования связки кремний-кислород заменяются связками кремний-азот [9, 10]. Влияние этого процесса на радиационную стойкость определяется генерацией промежуточных состояний, вызванных распространением дефектов, вызванных облучением в направлении границы $Si-SiO_2$. Скорость распространения зависит от градиента напряжений на границе.

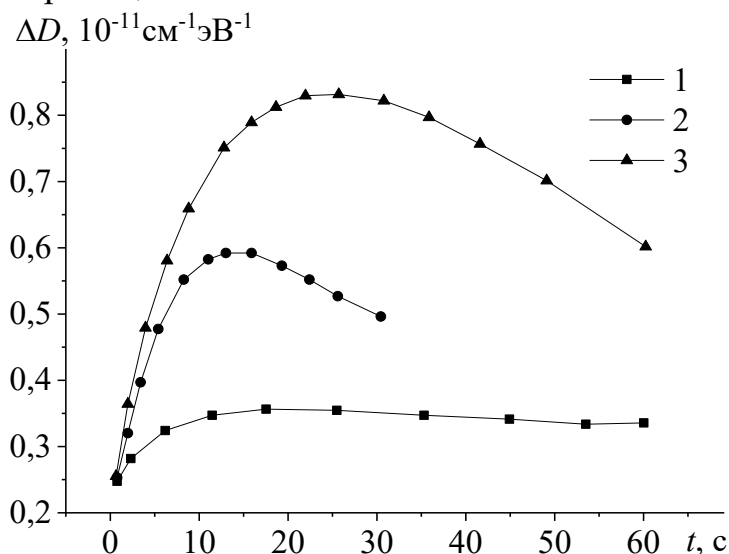


Рис. 4. Изменение плотности межслойных состояний ΔD в зависимости от длительности нитризации при разных температурах (1 – 900°C, 2 – 1200°C, 3 – 1100°C).

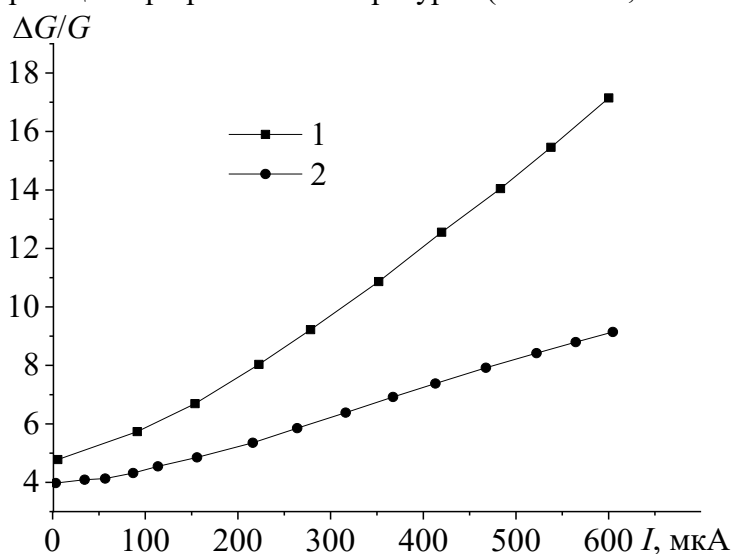


Рис. 5. Изменения величины крутизны $\Delta G/G$ от тока подложки: 1 – стандартный термический оксид; 2 – термически азотированный оксид.

При нагрузке плотностью постоянного тока 1 мА/см^2 (имитация

горячих электронов) изменение плотности межслойных состояний в зависимости от длительности нитризации при разных температурах (см. рис. 4), после некоторого времени прекращает нарастать и начинает уменьшаться.

3. Заключение

Было исследовано изменение напряжения плоских зон от времени нагружения в режиме постоянного тока и положительного смещения на затворе МДП-структур. Определено, что в МДП-структурах исходные значения напряжения плоских зон для азотированного оксида сдвинуты в положительную сторону по отношению к оксиду, что свидетельствует образованию положительного фиксированного заряда и о наличии электронных ловушек на границе раздела $Si - SiO_2$.

Под нагрузкой азотированный оксид характеризуется увеличенной генерацией состояний на поверхности раздела по сравнению с стандартным выращенным термическим оксидом [11]. Видно (см. рис. 5), что изменения крутизны в азотированных приборах существенно меньше, чем в приборах с обычным оксидом в использованном диапазоне напряжений стока, что подтверждает меньшую степень образования состояний на поверхности раздела и захват заряда.

В результате исследования определено что МДП-структурах изменение порогового напряжения, связано с захватом электронов на образующиеся при этом в объеме полупроводника ловушки. МДП-структуры с азотированным оксидом по сравнению с обычным оксидом обладают лучшей стабильностью. Исследования показали, что подавление процесса образования состояний на поверхности раздела зависит от степени азотирования. Характеристики МДП-структур под воздействием облучения существенно зависят от температуры и длительности быстрой термической нитризации.

Библиографический список:

1. **Bayat, K.** Low temperature silicon oxinitride technology for compact cmos compatible planar optical devices / K. Bayat, S. Chaudhuri, S.K. Safavi-Naeini // Proceedings of the COIN-ACOFT 2007 - Joint International Conference on the Optical Internet and the 32nd Australian Conference on Optical Fibre Technology, Melbourne, Australia, June 24-27, 2007. – New York: IEEE Publ., 2007. – P. 1-3. DOI: 10.1109/COINACOFT.2007.4519157.
2. **Chen, C.H.** High-quality ultrathin (1.6 nm) nitride/oxide stack gate dielectrics prepared by combining remote plasma nitridation and LPCVD technologies / C.H. Chen, Y.K. Fang, C.W. Yang et al. // IEEE Electron Device Letters. – 2001. – V. 22. – I. 6. – P. 260-262. DOI: 10.1109/55.924835.
3. **Karna, S.P.** Electronic structure theory and mechanisms of the oxide trapped hole annealing process / S.P. Karna, A.C. Pineda, R.D. Pugh et al. // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2000. – V. 47. – I. 6. – P. 2316-2321. DOI: 10.1109/23.903771.
4. **Imai, S.** Formation and electrical characteristics of silicon dioxide layers by use of nitric acid oxidation method / S. Imai, M. Takahashi, K. Matsuba et al. // Acta Physica Slovaca. – 2005. – V. 55. – № 3. – P. 305-313.
5. **Yu, Z.** Effect of nitrogen and hydrogen on the charge trapping properties of silicon rich oxide / Z. Yu,

- M. Aceves-Mijares, J. Carrillo // Proceedings of the International Caribbean Conference on Devices, Circuits and Systems, Playa del Carmen, Mexico, April 26-28, 2006. – New York: IEEE Publ., 2006. – P. 161-164. DOI: 10.1109/ICCDACS.2006.250854.
6. **Doyen, C.** Insight into HCI reliability on I/O nitrided devices / C. Doyen, V. Yon, X. Garros et al. // Proceedings of the IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS), Monterey, CA, USA, March 26-30, 2023. – New York: IEEE Publ., 2023. – P. 1-5. DOI: 10.1109/IRPS48203.2023.10117681.
7. **Islam, A.E.** Gate leakage vs. NBTI in plasma nitrided oxides: characterization, physical principles, and optimization / A.E. Islam, G. Gupta, S. Mahapatra, et al. // Proceedings of the International Electron Devices Meeting, San Francisco, CA, USA, December 11-13, 2006. – New York: IEEE Publ., 2006. – P. 1-4. DOI: 10.1109/IEDM.2006.346775.
8. **Cavarsan, F.A.** Characteristics of silicon oxide gate MOS capacitors formed by rapid thermal oxidation and annealing / F.A. Cavarsan, A. Toma, J.G. Fo et al. // Proceedings of the 15th International Conference on Advanced Thermal Processing of Semiconductors, Cannizzaro, Italy, October 02-05, 2007. – New York, IEEE Publ., 2007. – P. 197-202. DOI: 10.1109/RTP.2007.4383842.
9. **Randriamihaja, Y.M.** New hot carrier degradation modeling reconsidering the role of EES in ultra short N-channel MOSFETs / Y.M. Randriamihaja, X. Federspiel, V. Huard et al. // Proceedings of the IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS), Monterey, CA, USA, April 14-18, 2013. – New York: IEEE Publ., 2013. – P. XT.1.1-XT.1.5. DOI: 10.1109/IRPS.2013.6532116.
10. **Terai, M.** Effect of nitrogen profile and fluorine incorporation on negative-bias temperature instability of ultrathin plasma-nitrided SiON MOSFETs / M. Terai, K. Watanabe, S. Fujieda // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2007. – V. 54. – I. 7. – P. 1658-1665. DOI: 10.1109/TED.2007.899432.
11. **Son, Y.** Characterization of near-interface oxide trap density in nitrided oxides for nanoscale MOSFET applications / Y. Son, C.-K. Baek, I.-S. Han et al. // IEEE Transactions on Nanotechnology. – 2009. – V. 8. – I. 5. – P. 654-658. DOI: 10.1109/TNANO.2008.2009760.

References:

1. Bayat K., Chaudhuri S., Safavi-Naeini S.K. Low temperature silicon oxynitride technology for compact CMOS compatible planar optical devices. *Proceedings of the COIN-ACOFT 2007 - Joint International Conference on the Optical Internet and the 32nd Australian Conference on Optical Fibre Technology*, Melbourne, Australia, June 24-27, 2007, New York, IEEE Publ., 2007, pp. 1-3. DOI: 10.1109/COINACOFT.2007.4519157.
2. Chen C.H., Fang Y.K., Yang C.W. et al. High-quality ultrathin (1.6 nm) nitride/oxide stack gate dielectrics prepared by combining remote plasma nitridation and LPCVD technologies, *IEEE Electron Device Letters*, 2001, vol. 22, issue 6, pp. 260-262. DOI: 10.1109/55.924835.
3. Karna S.P., Pineda A.C., Pugh R.D. et al. Electronic structure theory and mechanisms of the oxide trapped hole annealing process, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2000, vol. 47, issue 6, pp. 2316-2321. DOI: 10.1109/23.903771.
4. Imai S., Takahashi M., Matsuba K. et al. Formation and electrical characteristics of silicon dioxide layers by use of nitric acid oxidation method, *Acta Physica Slovaca*, 2005, vol. 55, no. 3, pp. 305-313.
5. Yu Z., Aceves-Mijares M., Carrillo J. Effect of nitrogen and hydrogen on the charge trapping properties of silicon rich oxide, *Proceedings of the International Caribbean Conference on Devices, Circuits and Systems*, Playa del Carmen, Mexico, April 26-28, 2006. New York, IEEE Publ., 2006, pp. 161-164. DOI: 10.1109/ICCDACS.2006.250854.
6. Doyen C., Yon V., Garros X. et al. Insight into HCI reliability on I/O nitrided devices, *Proceedings of the IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS)*, Monterey, CA, USA, March 26-30, 2023. New York, IEEE Publ., 2023, pp. 1-5. DOI: 10.1109/IRPS48203.2023.10117681.
7. Islam A.E., Gupta G., Mahapatra S. et al. Gate leakage vs. NBTI in plasma nitrided oxides: characterization, physical principles, and optimization, *Proceedings of the International Electron Devices Meeting*, San Francisco, CA, USA, December 11-13, 2006. New York, IEEE Publ., 2006, pp. 1-4. DOI: 10.1109/IEDM.2006.346775.
8. Cavarsan F.A., Toma A., Fo J.G. et al. Characteristics of silicon oxide gate MOS capacitors formed by rapid thermal oxidation and annealing. *Proceedings of the 15th International Conference on Advanced Thermal Processing of Semiconductors*, Cannizzaro, Italy, October 02-05, 2007. New York, IEEE Publ., 2007, pp. 197-202. DOI: 10.1109/RTP.2007.4383842.
9. Randriamihaja Y.M., Federspiel X., Huard V. et al. New hot carrier degradation modeling reconsidering the role of EES in ultra short N-channel MOSFETs, *Proceedings of the IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS)*, Monterey, CA, USA, April 14-18, 2013. New York, IEEE Publ., 2013, pp. XT.1.1-XT.1.5. DOI: 10.1109/IRPS.2013.6532116.
10. Terai M., Watanabe K., Fujieda S. Effect of nitrogen profile and fluorine incorporation on negative-bias

temperature instability of ultrathin plasma-nitrided SiON MOSFETs, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2007, vol. 54, issue 7, pp. 1658-1665. DOI: 10.1109/TED.2007.899432.

11. Son Y., Baek C.-K., Han I.-S. et al. Characterization of near-interface oxide trap density in nitrided oxides for nanoscale MOSFET applications, *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2009, vol. 8, issue 5, pp. 654-658. DOI: 10.1109/TNANO.2008.2009760.

Short Communication

**GATE DIELECTRIC NITRIZATION AND EFFECT ON CHANGES IN THE DENSITY OF
INTERLAYER STATES OF MOS STRUCTURES**

N.V. Cherkesova¹, G.A. Mustafaev¹, A.G. Mustafaev²

¹*Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russia*

²*Dagestan State University of National Economy, Makhachkala, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.1070

Abstract: The processes occurring in the silicon-oxygen-nitrogen system are of great practical importance, since dielectric layers made from materials of this system are widely used as barriers to the penetration of impurities, elements of storage capacitors, field insulating layers, etc. Interest in the creation of such dielectrics has increased in connection with the use of the rapid thermal annealing stage in technological processes, which are accompanied by the appearance of fast surface states and mechanical stresses on the interface. As a result of the study, it was determined that the change in the threshold voltage in MDS structures is associated with the capture of electrons by the traps formed in the bulk of the semiconductor. MDS structures with nitrided oxide have better stability than conventional oxide. Studies have shown that the suppression of the formation of states at the interface depends on the degree of nitriding. The characteristics of MDS structures under the influence of irradiation substantially depend on the temperature and duration of fast thermal nitridation.

Keywords: *metal–dielectric–semiconductor, silicon oxynitride, nitridation, gate dielectric, silicon dioxide, heat treatment.*

Черкесова Наталья Васильевна – к.ф.-м.н., доцент кафедры электроники и информационных технологий ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

Мустафаев Гасан Абакарович – д.т.н., профессор кафедры электроники и информационных технологий ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

Мустафаев Арслан Гасанович – д.т.н., профессор кафедры информационных технологий и информационной безопасности ГАОУ ВО «Дагестанский государственный университет народного хозяйства»

Natalya V. Cherkesova – Ph. D., Docent, Department of Electronics and Information Technologies, Kabardino-Balkarian State University

Gasan A. Mustafaev – Dr. Sc., Full Professor, Department of Electronics and Information Technologies, Kabardino-Balkarian State University

Arslan G. Mustafaev – Dr. Sc., Full Professor, Department of Information Technologies and Information Security, Dagestan State University of National Economy

Поступила в редакцию/received: 02.09.2023; после рецензирования/reviced: 06.10.2023; принята/accepted: 10.10.2023.