

УДК 657.2:336.645.3(043.3)

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
СИЛОВЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ,  
ДОПОЛНИТЕЛЬНО ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ИОНАМИ АЗОТА**

**В. Б. ОДЖАЕВ<sup>1)</sup>, А. Н. ПЕТЛИЦКИЙ<sup>2)</sup>, В. С. ПРОСОЛОВИЧ<sup>1)</sup>, Н. С. КОВАЛЬЧУК<sup>2)</sup>,  
Я. А. СОЛОВЬЕВ<sup>2)</sup>, Д. В. ШЕСТОВСКИЙ<sup>2)</sup>, В. Ю. ЯВИД<sup>1)</sup>, Ю. Н. ЯНКОВСКИЙ<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

<sup>2)</sup>«Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл»,  
ул. Казинца, 121а, 220108, г. Минск, Беларусь

Исследованы электрофизические характеристики силовых МОП-транзисторов, дополнительно имплантированных ионами азота. Ионная имплантация азота производилась через защитный оксид толщиной 23 нм с энергиями 20 и 40 кэВ и дозами  $1 \cdot 10^{13}$ – $5 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>. Быстрый термический отжиг осуществлялся при температуре 900 или 1000 °С в течение 15 с. Установлено, что азотирование подзатворного диэлектрика позволяет уменьшить шумы токов утечки затвора и их дисперсию. При прямом порядке термообработки (сначала проведение быстрого термического отжига, а затем снятие защитного оксида) для образцов, изготовленных с дополнительной операцией ионной имплантации азота, отмечены увеличение порогового напряжения и уменьшение емкости подзатворного диэлектрика по сравнению с аналогичными параметрами контрольных образцов. Установлено, что при прямом порядке быстрого термического отжига использованные дозы ионной имплантации азота не вызывают существенных изменений максимального значения крутизны вольт-амперной характеристики. При этом во всех исследованных случаях происходит смещение максимального значения крутизны вольт-амперной характеристики в сторону больших значений напряжения на затворе. При обратном порядке термообработки (сначала снятие защитного оксида, а затем проведение быстрого термического отжига) существенных различий в величине порогового

---

**Образец цитирования:**

Оджаев ВБ, Петлицкий АН, Просолович ВС, Ковальчук НС, Соловьев ЯА, Шестовский ДВ, Явид ВЮ, Янковский ЮН. Электрофизические характеристики силовых МОП-транзисторов, дополнительно имплантированных ионами азота. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2022;3:81–92.

<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2022-3-81-92>

**For citation:**

Odzaev VB, Pyatlitski AN, Prasalovich US, Kovalchuk NS, Soloviev YaA, Shestovski DV, Yavid VYu, Yankovski YuN. Electrophysical characteristics of power MOSFETs additionally implanted with nitrogen ions. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2022;3:81–92. Russian.

<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2022-3-81-92>

---

Сведения об авторах см. на с. 92.

Information about the authors see p. 92.

напряжения и максимальном значении крутизны вольт-амперной характеристики для образцов, созданных с дополнительной имплантацией азота, и контрольных образцов не обнаружено. Показано, что в диапазоне напряжений от  $-0,15$  до  $0$  В ток стока имплантированных азотом образцов, изготовленных с применением прямого порядка термообработки, превышает ток стока контрольных образцов, тогда как ток стока имплантированных азотом образцов при обратном порядке термообработки ниже тока стока контрольных образцов. Полученные результаты объясняются снижением плотности поверхностных состояний на границе раздела Si – SiO<sub>2</sub> в МОП-структурах, созданных с использованием дополнительной операции ионной имплантации азота при прямом порядке термообработки.

**Ключевые слова:** подзатворный диэлектрик; ионная имплантация; ионы азота; силовые МОП-транзисторы.

## ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF POWER MOSFETs ADDITIONALLY IMPLANTED WITH NITROGEN IONS

V. B. ODZAEV<sup>a</sup>, A. N. PYATLITSKI<sup>b</sup>, U. S. PRASALOVICH<sup>a</sup>, N. S. KOVALCHUK<sup>b</sup>,  
Yu. A. SOLOVIEV<sup>b</sup>, D. V. SHESTOVSKI<sup>b</sup>, V. Yu. YAVID<sup>a</sup>, Yu. N. YANKOVSKI<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Belarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

<sup>b</sup>«Integral» – Holding Management Company, 121a Kazinca Street, Minsk 220108, Belarus

Corresponding author: U. S. Prasalovich (prosolovich@bsu.by)

The electrical characteristics of power MOSFETs additionally implanted with nitrogen ions have been studied. Ion implantation of nitrogen was carried out through a protective oxide of 23 nm thickness with energies of 20 and 40 keV and doses of  $1 \cdot 10^{13}$ – $5 \cdot 10^{14}$  cm<sup>-2</sup>. Rapid thermal annealing was carried out at temperature of 900 or 1000 °C for 15 s. It has been established that nitridisation of the gate dielectric makes it possible to reduce the noise of the gate leakage currents and their dispersion. In the direct order of heat treatment (first rapid thermal annealing, and then the removal of the protective oxide), for samples prepared with an additional operation of nitrogen ion implantation, there is an increase in the threshold voltage compared to control samples. The capacitance of the gate dielectric in the case of implantation of nitrogen ions in the direct order of heat treatment is less than for control samples. It has been established that in the direct order of rapid thermal annealing, the doses of nitrogen ion implantation do not cause significant changes in the maximum value of the current-voltage slope. At the same time, in all studied cases, there is a shift in the maximum value of the current-voltage slope towards higher gate voltages. In the reverse order of heat treatment (first the removal of the protective oxide, and then rapid thermal annealing), there are no significant differences in the value of the threshold voltage for the samples created with additional nitrogen implantation and the control ones. The maximum value of the current-voltage slope also does not experience significant changes. It is shown that in the voltage range from  $-0.15$  to  $0$  V, the drain current of nitrogen-implanted samples manufactured using the direct order of heat treatment is higher than for control samples, and the drain current of nitrogen-implanted samples obtained with the reverse order of heat treatment it is lower compared to control samples. Results are explained by a decrease in the density of surface states at the Si – SiO<sub>2</sub> interface in MOS-structures created using an additional operation of nitrogen ion implantation in the direct order of heat treatment.

**Keywords:** gate dielectric; ion implantation; nitrogen ions; power MOSFETs.

### Введение

Электрофизические характеристики МОП-транзисторов (MOSFET) существенно зависят от качества подзатворного диэлектрика [1]. Основной проблемой при формировании диэлектрических пленок для подзатворного диэлектрика МОП-транзисторов является создание требуемой оптимальной структуры границы раздела диэлектрической пленки с кремнием, обеспечивающей эффективный захват носителей заряда на ловушки и обладающей высокой инжекционной способностью и низкой зарядовой дефектностью. Наличие дополнительного встроенного заряда в диэлектрике, а также быстрых поверхностных состояний на границе раздела Si – SiO<sub>2</sub> может привести как к увеличению порогового напряжения, так и к снижению тока и напряжения насыщения, крутизны вольт-амперной характеристики (ВАХ) МОП-транзистора в линейной области и области насыщения, уменьшению проводимости структуры в линейной области. Помимо этого, возрастают токи утечки затвора.

Указанные факторы обуславливают необходимость комплексного и всестороннего исследования процесса формирования диэлектрической пленки в целях оптимизации ее параметров, обеспечивающих повышение стабильности и надежности приборов. Оксид кремния, характеризующийся низкой плотностью

поверхностных состояний на границе раздела Si – SiO<sub>2</sub>, имеет низкую ( $10^{17} \text{ см}^{-2}$ ) концентрацию дефектов (ловушек) в объеме. Захват электронов и дырок в слое оксида приводит к накоплению заряда и деградации приборов. Нитрид кремния, обладающий существенно более высокой диэлектрической проницаемостью, наоборот, имеет высокую ( $10^{19}–10^{20} \text{ см}^{-2}$ ) концентрацию электронных и дырочных ловушек. Применение оксинитрида кремния SiO<sub>x</sub>N<sub>y</sub> позволяет сочетать преимущества оксида кремния и нитрида кремния. В работах [2; 3] предложены способы улучшения эксплуатационных характеристик (величина заряда пробоя, ток насыщения, ток утечки затвора и т. д.) управляющих МОП-транзисторов СБИС путем азотирования подзатворного диэлектрика или его границ раздела с монокристаллическим кремнием методами нитрования, ионной имплантации (ИИ) либо посредством плазмостимулированных процессов. В публикациях [4–6] установлено влияние количества ионно-имплантированного азота на пороговое напряжение, крутизну ВАХ и величину заряда на границе раздела Si – SiO<sub>2</sub> для субмикронных МОП-транзисторов с толщиной подзатворного диэлектрика 2–7 нм. Однако толщина подзатворного диэлектрика может оказывать существенное влияние на процессы, происходящие в приповерхностных слоях или на границах раздела, и, соответственно, на характеристики формируемых устройств. В настоящей работе исследовалось влияние азотирования подзатворного оксида методом ИИ на электрофизические параметры силовых МОП-транзисторов с толщиной подзатворного диэлектрика 44 нм в целях определения оптимальных режимов ИИ азота, окисления и отжига для получения силовых МОП-транзисторов с улучшенными характеристиками.

### Методика эксперимента

Исследовались силовые МОП-транзисторы с вертикальной структурой, полученные на основе метода двойной диффузии (PMOSFET). Приборы создавались на кремниевых пластинах ориентации (100) *p*-типа проводимости (удельное сопротивление  $\rho = 0,005 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ) с эпитаксиальным слоем *p*-типа ( $\rho = 2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ). Области базы транзисторов формировались ИИ фосфора с энергией ( $E$ ) 80 кэВ и дозой ( $D$ )  $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . Азот имплантировался в активную область структуры прибора через защитный оксид толщиной 23 нм с  $E = 20 \text{ кэВ}$  и  $E = 40 \text{ кэВ}$  в диапазоне доз  $D_{N^+} = 1 \cdot 10^{13}–5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  в одну половину кремниевой пластины. При этом ИИ обоих видов примесей производилась на установке «Днепр». Пластины подвергались быстрому термическому отжигу (БТО) системой УБТО № 1 в атмосфере воздуха при температуре 900 или 1000 °С в течение 15 с, скорость нагрева пластин составляла 50 °С/с. Химическое удаление защитного оксида кремния осуществлялось в 72 % растворе плавиковой кислоты. Для одной группы пластин сначала проводился БТО, за ним следовало снятие оксида (прямой порядок, или  $F$ ), для другой группы пластин сначала производилось снятие оксида, а потом пластины подвергались БТО (обратный порядок, или  $B$ ). Далее выполнялись выращивание подзатворного оксида толщиной 44 нм и последующие операции по формированию прибора. Параллельно исследовались контрольные образцы, изготовленные на второй половине той же кремниевой пластины и прошедшие все этапы формирования прибора, но без ИИ азота ( $W/O$ ).

Измерение ВАХ и вольт-фарадных характеристик (ВФХ) проводилось на измерителе параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500A (*Agilent Technologies*, США) с зондовой станцией Cascade Summit 11000B-AP (*Cascade Microtech*, США). При этом ВАХ регистрировались в режиме ограничения тока  $I_{\text{max}} = 1 \text{ А}$ , а ВФХ – в диапазоне напряжений от –20 до +20 В на частоте 1 МГц. Профили распределения концентрации азота по глубине структур диэлектрик – кремний определялись методом времяпролетной масс-спектрометрии вторичных ионов (TOF-SIMS) системой TOF.SIMS 5 (*IONTOF*, Германия) с чувствительностью не хуже  $5 \cdot 10^{15}–1 \cdot 10^{16}$  атомов на  $1 \text{ см}^3$ . Травление образцов в процессе исследований производилось пучком ионов Cs<sup>+</sup> с величиной тока 100 нА, ускоряемых напряжением 2 кэВ. Измерение объемной концентрации примесей осуществлялось в импульсном режиме со временем цикла 50–100 мкс. В качестве первичных ионов применялись ионы Bi<sup>+</sup>, ускоряемые напряжением 30 кэВ. Проецированный пробег ионов N<sup>+</sup> ( $R_p$ ) при имплантации с энергиями 20 и 40 кэВ определялся с помощью программы *SRIM* и составлял около 60 и 110 нм соответственно.

### Результаты и их обсуждение

Ранее было показано [7], что для приборов, сформированных с использованием дополнительной операции ИИ азота, наблюдается снижение разброса токов утечки затвора от пластины к пластине по сравнению с контрольными приборами. Это указывает на улучшение и стабилизацию диэлектрических свойств оксида и его границы раздела с Si в МОП-структурах. В ходе проведенных в настоящей работе исследований установлено, что дополнительная имплантация ионов азота приводит не только к снижению разброса токов утечки затвора от пластины к пластине, но и к уменьшению шумов токов утечки при измерении ВАХ (рис. 1, 2).

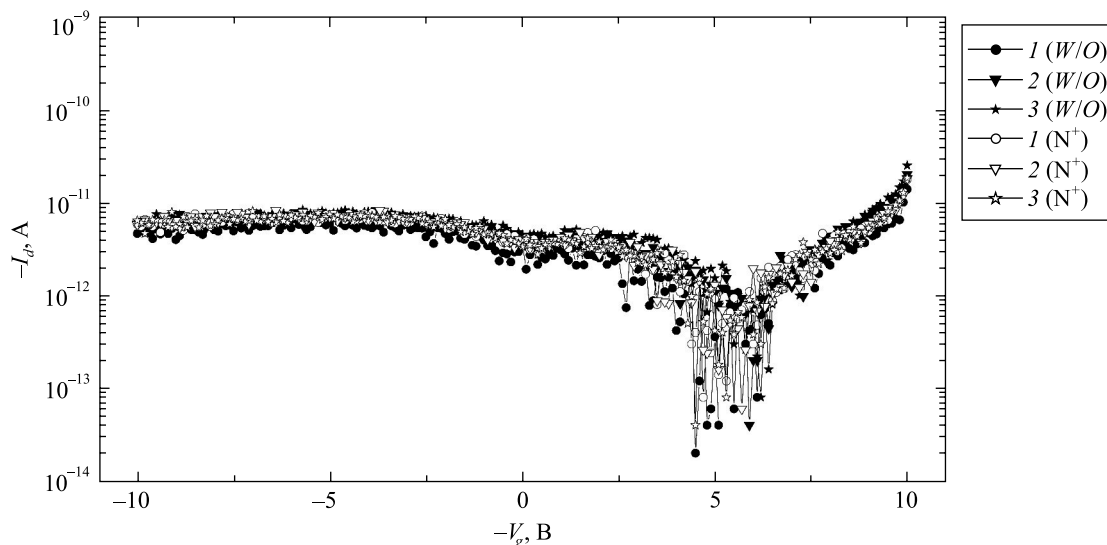


Рис. 1. Зависимости тока утечки затвора ( $I_d$ ) от напряжения на затворе ( $V_g$ ) для контрольных ( $W/O$ ) и имплантированных ( $N^+$ ) образцов при прямом порядке БТО ( $D_{N^+} = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ,  $E = 40 \text{ кэВ}$ ).

Номера кривых соответствуют трем разным приборам, изготовленным на одной пластине

Fig. 1. Dependences of gate leakage current ( $I_d$ ) on gate voltage ( $V_g$ ) for control ( $W/O$ ) and implanted ( $N^+$ ) samples at forward order of rapid thermal annealing ( $D_{N^+} = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ,  $E = 40 \text{ кэВ}$ ).

Curve numbers correspond to three different devices made on the same wafer

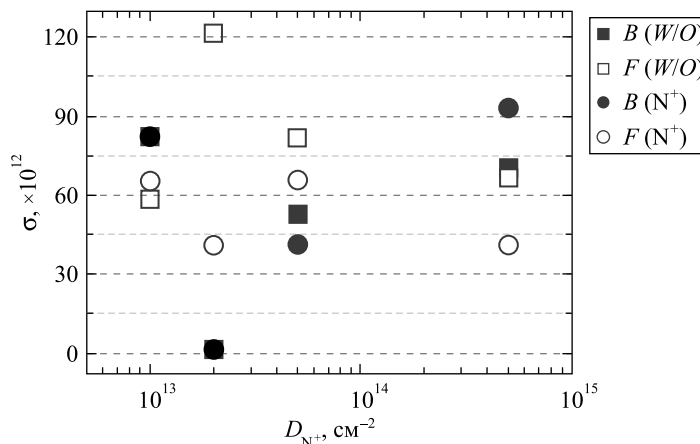


Рис. 2. Зависимость величины дисперсии уровня шума ( $\sigma$ ) транзистора ( $V_g = -10 \dots +10 \text{ В}$ ) от дозы имплантации азота ( $D_{N^+}$ ) при прямом ( $F$ ) и обратном ( $B$ ) порядке термообработки для контрольных ( $W/O$ ) и имплантированных ( $N^+$ ) образцов. Доза имплантации  $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  соответствует энергии имплантации 40 кэВ, для остальных доз энергия имплантации составляет 20 кэВ

Fig. 2. Dependence of the dispersion of the noise level ( $\sigma$ ) of the transistor ( $V_g = -10 \dots +10 \text{ V}$ ) on the dose of nitrogen implantation ( $D_{N^+}$ ) with the direct ( $F$ ) and reverse ( $B$ ) order of heat treatment for control ( $W/O$ ) and implanted ( $N^+$ ) samples. Implantation dose of  $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  corresponds to an implantation energy of 40 keV, for other doses the implantation energy is 20 keV

Как видно из рис. 2, при прямом порядке БТО для  $D_{N^+} = 2 \cdot 10^{13} - 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  наблюдается снижение дисперсии уровня шума, наиболее выраженное в случае  $D_{N^+} = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  и  $E = 40 \text{ кэВ}$ . При обратном порядке термообработки для  $D_{N^+} = 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  и  $D_{N^+} = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  значительных изменений не зарегистрировано. Для образцов, имплантированных азотом с  $D_{N^+} = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  и  $E = 20 \text{ кэВ}$  при обратном порядке БТО, дисперсия шума, наоборот, выше, чем для контрольных образцов. Основной шумовой составляющей МОП-транзистора, сказывающейся на более высоких частотах, является наведенный шум затвора. Прежде всего это обусловлено влиянием процессов генерации-рекомбинации в дефектных

центрах канала и в обедненной области затвора [8]. Дробовой шум тока затвора в низкочастотной области пренебрежимо мал. На самых низких частотах основную шумовую составляющую образует фликкер-шум, который появляется в результате случайного захвата свободных носителей заряда поверхностными ловушками (дефектами), находящимися на границе полупроводника и изолирующего слоя канала [9].

Снижение уровня шума в МОП-структурах, созданных с применением дополнительной операции ИИ азота при прямом порядке БТО, может быть связано с уменьшением плотности состояний на границе раздела Si – SiO<sub>2</sub>. Большая часть остаточных радиационных нарушений отжигается в процессе БТО, а оставшиеся нарушения в нестехиометрическом слое Si<sub>x</sub>O<sub>y</sub> пассивируются атомами азота. Это согласуется с результатами работ [2; 3], где ИИ азота, по мнению авторов, оказывает влияние на плотность поверхностных состояний на границе раздела Si – SiO<sub>2</sub>. Наибольшая выраженность снижения уровня шума при прямом порядке БТО после ИИ азота с  $E = 40$  кэВ может быть обусловлена более глубоким проникновением имплантируемого азота в кремний и локализацией большего количества атомов азота в области нестехиометрического слоя Si<sub>x</sub>O<sub>y</sub>.

На преимущественную локализацию имплантированных атомов азота вблизи границы раздела Si – SiO<sub>2</sub> после проведения БТО указывают данные, полученные методом времяпролетной масс-спектрометрии вторичных ионов (рис. 3). При выполнении БТО основная часть атомов азота диффундирует к границе раздела Si – SiO<sub>2</sub> и накапливается в приграничной области оксида. Большинство атомов азота удаляются в процессе химического травления вместе с защитным диэлектриком при прямом порядке БТО. Снижение уровня шума токов утечки при имплантации дозами  $D_{N^+} = 2 \cdot 10^{13} - 2 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> также наблюдалось в исследовании [10], а в работе [11] для  $D_{N^+} = 5 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> и  $E = 20$  кэВ было отмечено повышение уровня шума. Для ИИ азота с дозой  $D_{N^+} = 5 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> при обратном порядке термообработки повышение уровня шума может быть связано с неполным отжигом радиационных нарушений и, как следствие, повышенной плотностью поверхностных состояний и их перезарядкой при проведении измерений. При меньших дозах ИИ азота ( $D_{N^+} = 2 \cdot 10^{13} - 2 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>) остаточные нарушения после имплантации и постимплантационного отжига, а также часть нарушений в нестехиометрическом слое Si<sub>x</sub>O<sub>y</sub> пассивируются атомами азота.

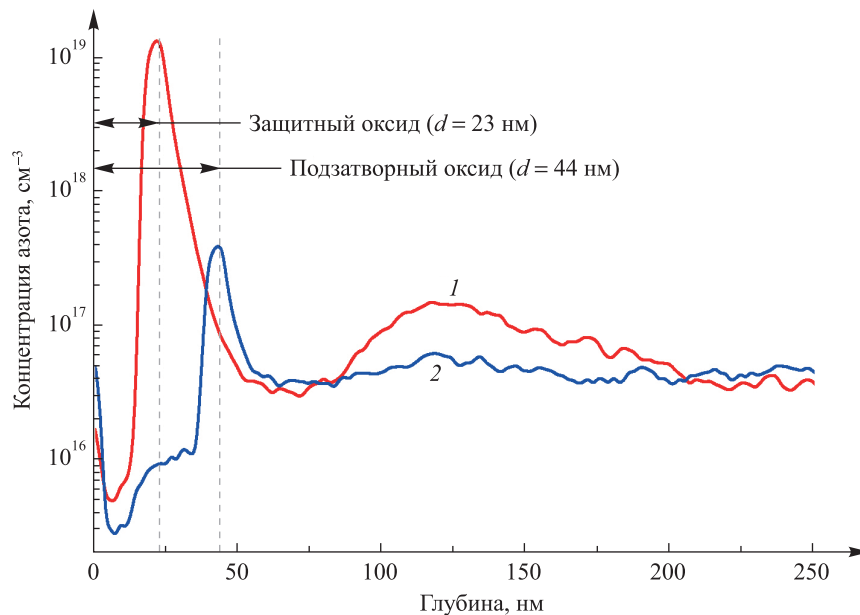


Рис. 3. Профили распределения атомов азота после имплантации ( $D_{N^+} = 5 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>,  $E = 40$  кэВ):

1 – до удаления защитного оксида; 2 – после удаления защитного оксида и последующего наращивания подзатворного диэлектрика.

Проецированный пробег ионов N<sup>+</sup> ( $R_p$ ) при имплантации с энергией 40 кэВ согласно проведенным расчетам с использованием программы SRIM составляет ~110 нм

Fig. 3. Distribution profiles of nitrogen atoms after implantation ( $D_{N^+} = 5 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>,  $E = 40$  keV):

1 – before the removal of the protective oxide; 2 – removal of the protective oxide and subsequent growth of the gate dielectric.

The projected range of N<sup>+</sup> ions ( $R_p$ ) during implantation with an energy of 40 keV according to the calculations performed using the SRIM program is ~110 nm



На рис. 4 приведена зависимость величины порогового напряжения транзисторов от дозы имплантации азота. В случае прямого порядка термообработки для образцов, изготовленных с дополнительной ИИ азота, происходит рост порогового напряжения. Это может быть связано с увеличением как концентрации заряженных центров на границе раздела Si – SiO<sub>2</sub>, так и количества встроенного заряда в диэлектрике вследствие формирования радиационных нарушений при дополнительной имплантации азота. Также следует учитывать, что при прямом порядке термообработки, как видно из рис. 3, большинство атомов азота удаляются при снятии оксида. Наибольшие различия величины порогового напряжения наблюдаются при прямом порядке БТО для  $D_{N^+} = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , что обусловлено возрастанием числа постимплантационных дефектов [2]. При этом в кремниевой подложке в процессе термообработки могут формироваться дефекты типа дислокационных петель [5]. Для образцов, имплантированных азотом с  $E = 40 \text{ кэВ}$ , увеличение порогового напряжения по сравнению с пороговым напряжением контрольных образцов может быть дополнительно связано с образованием радиационных дефектов на большей глубине от границы Si. Часть радиационных дефектов при проведении БТО не аннигилируют на поверхности, а остаются в объеме кремния и впоследствии локализируются вблизи границы раздела Si – SiO<sub>2</sub>. В случае  $D_{N^+} = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  на пороговое напряжение также оказывает влияние образование большого количества радиационных дефектов и, возможно, формирование комплексов дефектов и дислокаций [4]. При обратном порядке БТО существенных различий в величине порогового напряжения для образцов, созданных с дополнительной имплантацией азота, и контрольных образцов не выявлено. В данном случае в процессе БТО на поверхности Si происходит аннигиляция части радиационных дефектов ввиду отсутствия защитного оксида, формирования крупных дефектно-примесных комплексов не наблюдается. При наличии защитного оксида такая аннигиляция существенно затруднена. Вследствие этого при прямом порядке БТО как на границе раздела Si – SiO<sub>2</sub>, так и в полученном слое оксида происходит накопление пострadiационных дефектов.

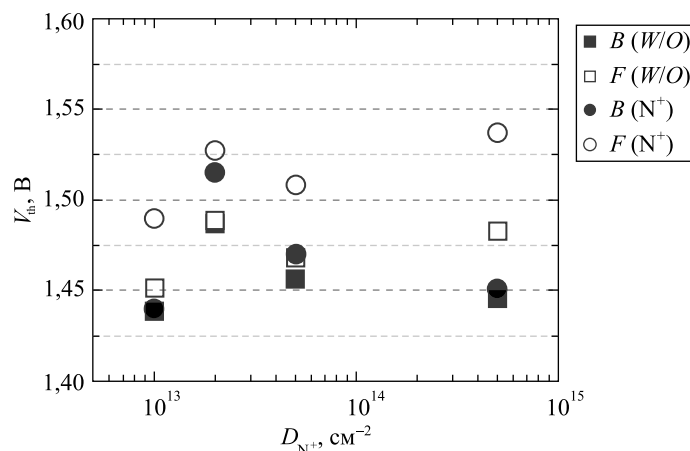


Рис. 4. Зависимость величины порогового напряжения ( $V_{th}$ ) транзистора от дозы имплантации азота ( $D_{N^+}$ ) при прямом ( $F$ ) и обратном ( $B$ ) порядке БТО для контрольных ( $W/O$ ) и имплантированных ( $N^+$ ) образцов

Fig. 4. Dependence of the threshold voltage value ( $V_{th}$ ) of transistor on the dose of nitrogen implantation ( $D_{N^+}$ ) with the direct ( $F$ ) and reverse ( $B$ ) order of rapid thermal annealing for control ( $W/O$ ) and implanted ( $N^+$ ) samples

Как известно [12], пороговое напряжение ( $V_{th}$ ) МОП-транзистора определяется следующим выражением:

$$V_{th} = 2\psi_B + \frac{\sqrt{2\varepsilon_S q N_A (2\psi_B)}}{C_i},$$

где  $\psi_B$  – разность между уровнем Ферми в материале и положением уровня Ферми в собственном полупроводнике;  $\varepsilon_S$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость кремния;  $N_A$  – концентрация легирующей примеси в  $p$ -подложке;  $C_i$  – удельная емкость оксида.

Из представленного выражения следует, что при прочих равных параметрах ( $\psi_B$ ,  $N_A$ ) пороговое напряжение определяется прежде всего емкостью подзатворного диэлектрика.

В результате проведенных измерений установлено, что емкость подзатворного диэлектрика для образцов, полученных с применением ИИ азота как с  $E = 20$  кэВ, так и с  $E = 40$  кэВ при прямом порядке БТО, ниже, чем для контрольных образцов (рис. 5). С увеличением дозы имплантации эта разница уменьшается. Схожие различия величин емкости при обратном порядке БТО отмечены как в случае  $E = 20$  кэВ ( $D_{N^+} = 5 \cdot 10^{13}$  см $^{-2}$ ), так и в случае  $E = 40$  кэВ ( $D_{N^+} = 2 \cdot 10^{13}$  см $^{-2}$ ). Для  $D_{N^+} = 1 \cdot 10^{13}$  см $^{-2}$  и  $D_{N^+} = 5 \cdot 10^{14}$  см $^{-2}$  наблюдается обратное соотношение, т. е. емкость подзатворного оксида выше при дополнительной имплантации азота.

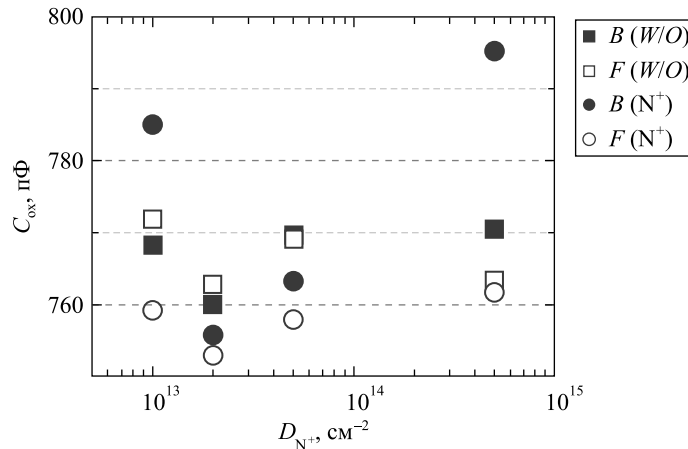


Рис. 5. Зависимость величины емкости подзатворного оксида ( $C_{ox}$ ) транзистора от дозы имплантации азота ( $D_{N^+}$ ) при прямом ( $F$ ) и обратном ( $B$ ) порядке БТО для контрольных ( $W/O$ ) и имплантированных ( $N^+$ ) образцов

Fig. 5. Dependence of the capacitance value of the gate oxide ( $C_{ox}$ ) of transistor on the dose of nitrogen implantation ( $D_{N^+}$ ) with the direct ( $F$ ) and reverse ( $B$ ) order of rapid thermal annealing for control ( $W/O$ ) and implanted ( $N^+$ ) samples

Сравнение отношения удельных емкостей подзатворного диэлектрика, определенных из данных проводимости в линейной области насыщения ( $C_i^{лин} / C_{iN^+}^{лин}$ ), показало, что наибольшие различия имеют место при прямом порядке обработки (см. таблицу). В этом случае величина удельной емкости для приборов, созданных с применением дополнительной операции ИИ азота, практически везде меньше аналогичной величины для контрольных образцов. Это может быть обусловлено наличием в слое оксида и на границе раздела Si – SiO<sub>2</sub> в контрольных образцах четырех различных по своей природе источников заряда – заряда быстрых поверхностных состояний в полупроводнике, постоянного заряда в оксиде, заряда на ловушках в слое оксида и заряда подвижных ионов [12; 13].

Отношение удельных емкостей подзатворного диэлектрика, полученных из данных крутизны ВАХ в линейной области

The ratio of the specific capacitances of the gate dielectric, obtained from the data on the current-voltage slope in the linear region

$D_{N^+}, \text{см}^{-2}$	$C_i^{лин} / C_{iN^+}^{лин}$	
	$F$	$B$
$1 \cdot 10^{13}$	2,02	1,01
$2 \cdot 10^{13}$	1,83	1,73
$5 \cdot 10^{13}$	2,32	1,21
$5 \cdot 10^{14}$	2,12	1,39

Величина постоянного заряда в оксиде зависит от режима окисления, вида преокислительных обработок кремниевых пластин и загрязнения системы Si – SiO<sub>2</sub> ионами примесей. Заряд на ловушках в стехиометрической части слоя оксида представляет собой объемный заряд, захваченный на энергетические уровни дефектов в SiO<sub>2</sub>. Этот тип заряда ассоциируется с медленными состояниями. Заряд подвижных

ионов связан с присутствием в оксиде ионов щелочных ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Li}^+$ ) и тяжелых металлов, попадающих в оксид из окружающей среды и материалов, используемых в технологическом процессе. Влияние азотирования обычно связывают с накоплением азота вблизи границ раздела  $\text{Si} - \text{SiO}_2$  и включением атомов азота в структуру этих границ [2; 3]. Связи  $\text{Si}-\text{N}$  заменяют напряженные или нескомпенсированные связи в нестехиометрическом слое  $\text{Si}_x\text{O}_y$ , уменьшая энергию деформации границы раздела  $\text{Si} - \text{SiO}_2$ . В результате в процессе термических обработок уменьшается вероятность адсорбирования на оборванных связях границ раздела ионов примесей металлов. Меньшее влияние ИИ азота на параметры силовых МОП-транзисторов при обратном порядке обработки, вероятно, обусловлено тем, что после снятия защитного оксида значительная часть внедренных атомов азота испаряется из приповерхностной области пластин при проведении БТО и не участвует в формировании связей  $\text{Si}-\text{N}$ .

Результаты измерений зависимости тока стока ( $I_d$ ) и крутизны ВАХ ( $\Delta g_m$ ) полевых транзисторов в триодном режиме (напряжение сток – исток  $V_d = -0,1$  В) от напряжения на затворе ( $V_g$ ) для контрольных образцов и образцов, имплантированных ионами азота, представлены на рис. 6. Практически на всем интервале приложенных напряжений величина  $I_d$  для контрольных образцов превышает соответствующую величину для образцов, имплантированных азотом.

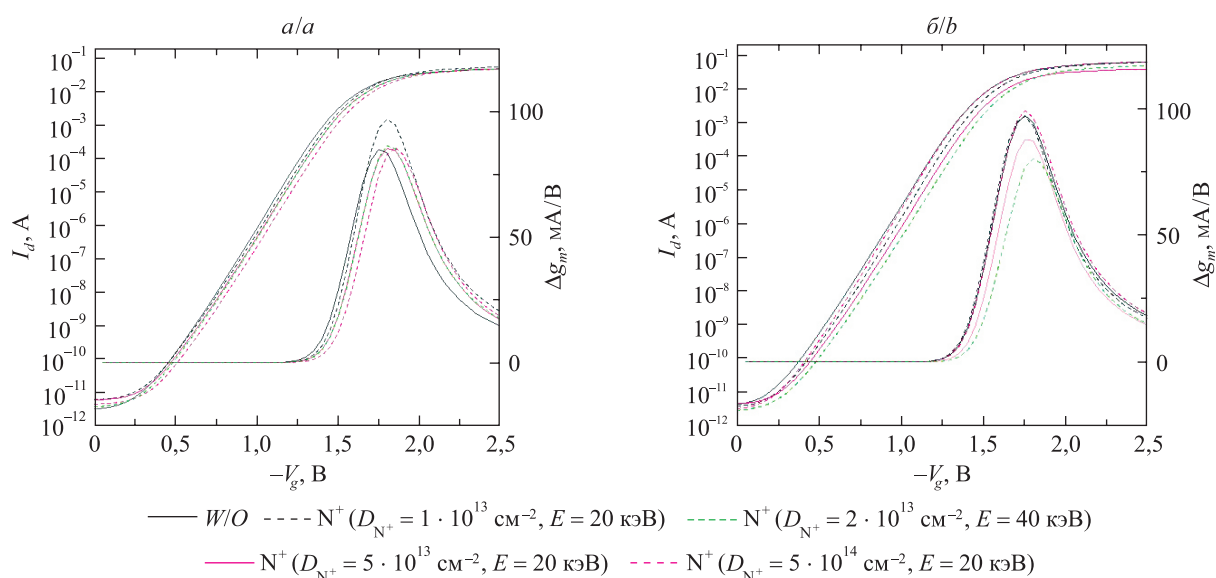


Рис. 6. Зависимости тока стока ( $I_d$ ) и крутизны ВАХ ( $\Delta g_m$ ) МОП-транзисторов в триодном режиме ( $V_d = -0,1$  В) от напряжения на затворе ( $V_g$ ) в диапазоне 0–2,5 В для контрольных ( $W/O$ ) и имплантированных ( $N^+$ ) образцов:  
а – прямой порядок БТО; б – обратный порядок БТО

Fig. 6. Dependences of the drain current ( $I_d$ ) and the current-voltage slope ( $\Delta g_m$ ) of MOSFETs in the triode mode ( $V_d = -0.1$  V) on the gate voltage ( $V_g$ ) in the range 0–2.5 V for control ( $W/O$ ) and implanted ( $N^+$ ) samples:  
а – direct order of rapid thermal annealing; б – reverse order of rapid thermal annealing

Однако в диапазоне напряжений  $V_g$  от  $-0,15$  до 0 В величина  $I_d$  для имплантированных азотом образцов, изготовленных при прямом порядке БТО, выше, чем для контрольных образцов (рис. 7, а). Наибольшие различия в данной области наблюдаются при  $D_{N^+} = 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  и  $D_{N^+} = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ . Это может быть связано с повышенной концентрацией (быстрых) ловушек вблизи границы и на границе  $\text{Si} - \text{SiO}_2$  по сравнению с их концентрацией в контрольных образцах при прямом порядке БТО. Носители заряда захватываются на эти ловушки вследствие наличия диффузионного тока через сток и исток. При обратном порядке термообработки большая часть остаточных радиационных нарушений отжигается, а оставшиеся нарушения пассивируются атомами азота на поверхности  $\text{Si}$  в процессе БТО ввиду отсутствия защитного оксида. При прямом порядке БТО такой аннигиляции не будет из-за наличия защитного оксида, в данном случае как на границе раздела  $\text{Si} - \text{SiO}_2$ , так и в полученном слое оксида будут накапливаться пострadiационные дефекты. Отсутствие эффекта для образцов, имплантированных азотом с  $D_{N^+} = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , обусловлено аннигиляцией радиационных дефектов в процессе БТО, а также малой концентрацией атомов азота вследствие их удаления из образцов при снятии защитного оксида.



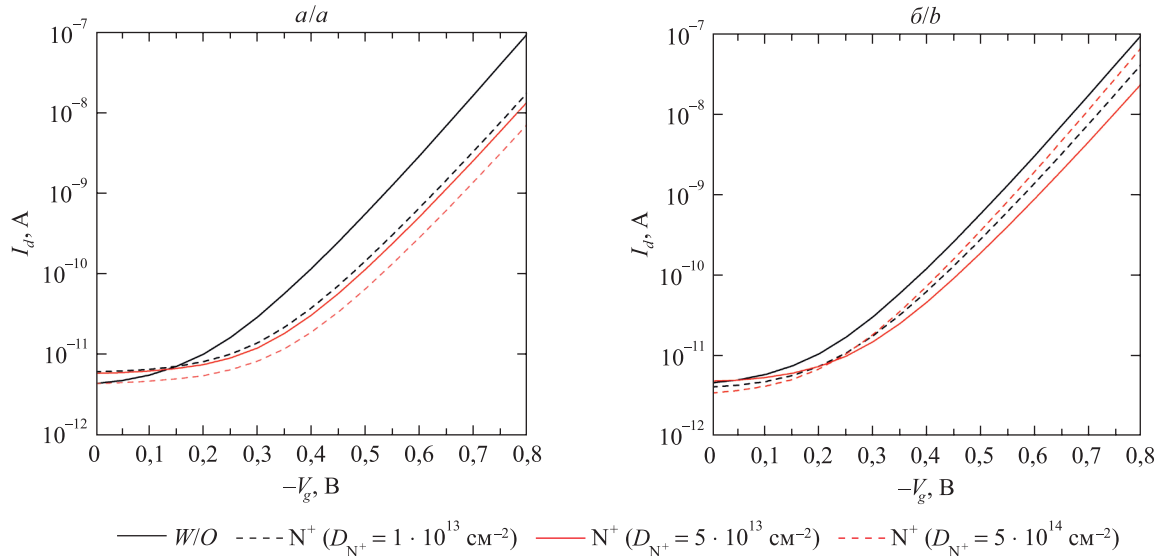


Рис. 7. Зависимости тока стока ( $I_d$ ) и крутизны ВАХ ( $\Delta g_m$ ) МОП-транзисторов в триодном режиме ( $V_d = -0,1$  В) от напряжения на затворе ( $V_g$ ) в диапазоне 0–0,8 В для контрольных ( $W/O$ ) и имплантированных ( $N^+$ ) образцов:  
а – прямой порядок БТО; б – обратный порядок БТО

Fig. 7. Dependences of the drain current ( $I_d$ ) and the current-voltage slope ( $\Delta g_m$ ) of MOSFETs in the triode mode ( $V_d = -0.1$  V) on the gate voltage ( $V_g$ ) in the range 0–0.8 V for control ( $W/O$ ) and implanted ( $N^+$ ) samples:  
a – direct order of rapid thermal annealing; b – reverse order of rapid thermal annealing

В подпороговой области ( $V_g = V_{\text{SubThExp}} - V_{\text{th}}$ ) ВАХ является линейной при построении в экспоненциальном масштабе (см. рис. б), ее смещение вдоль оси напряжений для образцов, дополнительно имплантированных ионами азота, связано с наличием положительного заряда, который может находиться как в оксиде, так и на границе раздела Si – SiO<sub>2</sub>. Образование положительного заряда обусловлено не только повреждениями подложки (радиационные дефекты в Si), на которой впоследствии наращивается оксид, но и наличием напряжений растягивающего характера ввиду присутствия атомов азота на границе раздела Si – SiO<sub>2</sub> [2]. Для обратного порядка термообработки этот эффект менее выражен, поскольку в процессе БТО происходят аннигиляция радиационных дефектов и испарение атомов азота с поверхности пластины кремния. При  $V_d = -3$  В в триодном режиме данный эффект не так ярко выражен, что обусловлено большими величинами тока сток – исток в режиме отсечки вследствие более быстрой перезарядки ловушек.

На рис. 8 представлено сравнение ВАХ контрольных образцов полевых транзисторов в триодном режиме при смещении сток – исток  $V_d = -0,1$  В и  $V_d = -3$  В. В подпороговой линейной области ( $V_g = V_{\text{SubThExp}} - V_{\text{th}}$ ), где ВАХ при построении в логарифмическом масштабе по оси  $I_d$  имеет практически линейную зависимость ( $I_d \sim e^{kV_g}$ ), сдвиг ВАХ вдоль оси напряжений отсутствует, и наблюдается совпадение зависимостей. Это указывает на отсутствие DIBL-эффекта короткоканальных МОП-транзисторов.

Основное проявление DIBL-эффекта – сильная зависимость тока сток – исток через закрытый МОП-транзистор от напряжения на стоке в подпороговой области, где в режиме слабой инверсии существует потенциальный барьер между истоком и областью канала. Высота барьера является результатом баланса дрейфового и диффузионного токов между этими областями. При подаче высокого напряжения на сток высота барьера может уменьшиться, что приведет к увеличению тока стока. Таким образом, при наличии DIBL-эффекта ток сток – исток контролируется не только напряжением затвора, но и напряжением сток – исток. Наличие этого эффекта также сильно влияет на снижение порогового напряжения в зависимости от напряжения на стоке [14].

Крутизна ВАХ ( $\Delta g_m = \frac{dI_d}{dV_g}$ ) находится в прямой зависимости от плотности поверхностных состояний, которые обусловлены процессами ИИ и постимплантационного отжига. Из анализа зависимости  $\Delta g_m$  от напряжения на затворе (см. рис. б) видно, что для всех образцов, имплантированных азотом при прямом порядке БТО, наблюдается смещение максимума кривой вправо. При этом для  $D_{N^+} = 1 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup> и  $E = 20$  кэВ имеет место увеличение максимального значения крутизны ВАХ. Это может быть обусловлено более полной аннигиляцией радиационных дефектов при БТО. Для обратного порядка отжига

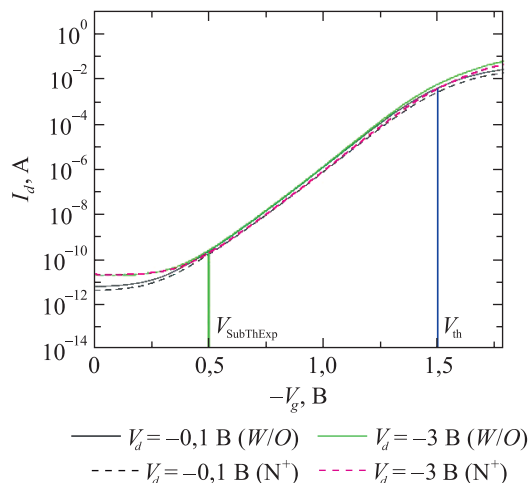


Рис. 8. Зависимость тока стока ( $I_d$ ) МОП-транзисторов в триодном режиме ( $V_d = -0,1$  В и  $V_d = -3$  В) от напряжения на затворе ( $V_g$ ) для контрольных ( $W/O$ ) и имплантированных ( $N^+$ ) образцов при обратном порядке БТО ( $D_{N^+} = 5 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup>,  $E = 20$  кэВ)

Fig. 8. Dependence of the drain current ( $I_d$ ) of MOSFETs in the triode mode ( $V_d = -0.1$  V and  $V_d = -3$  V) on the gate voltage ( $V_g$ ) for control ( $W/O$ ) and implanted ( $N^+$ ) samples with the reverse order of rapid thermal annealing ( $D_{N^+} = 5 \cdot 10^{13}$  cm<sup>-2</sup>,  $E = 20$  keV)

существенное смещение вправо максимума кривой зависимости  $\Delta g_m$  от напряжения на затворе зарегистрировано только для  $D_{N^+} = 2 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup> и  $E = 40$  кэВ. Для  $D_{N^+} = 5 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup> и  $E = 20$  кэВ, а также  $D_{N^+} = 2 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup> и  $E = 40$  кэВ при данном режиме термообработки наблюдается снижение максимального значения крутизны ВАХ. Деградация крутизны ВАХ для  $p$ -канальных транзисторов может быть обусловлена возникновением внутренних напряжений растягивающего характера в диэлектрике вследствие формирования азотированного слоя SiO<sub>2</sub>, имеющего более высокое значение модуля Юнга, чем у неазотированного оксида [2]. Еще одним важным фактором, оказывающим существенное влияние на деградацию крутизны ВАХ, является проникновение атомов бора из карманов  $p$ -типа и  $p^+$ -типа в оксид [2]. Накапливаемая в оксиде повышенная концентрация бора способствует деградации характеристик подзатворного диэлектрика вследствие увеличения темпа процессов захвата зарядов.

### Заключение

Установлено, что проведение азотирования подзатворного диэлектрика методом ИИ при изготовлении силовых МОП-транзисторов позволяет уменьшить шумы токов утечки затвора и их дисперсию. Это обусловлено снижением плотности поверхностных состояний на границе раздела Si – SiO<sub>2</sub> в МОП-структурах, созданных с применением дополнительной операции ИИ азота при прямом порядке термообработки.

Показано, что при прямом порядке БТО для образцов, имплантированных ионами N<sup>+</sup>, происходит увеличение порогового напряжения по сравнению с его значением для контрольных образцов. Наибольшие различия величины порогового напряжения наблюдаются для  $D_{N^+} = 5 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>. Это может быть связано с увеличением количества встроенного заряда в диэлектрике вследствие формирования радиационных нарушений при дополнительной имплантации ионов азота, которые не полностью отжигаются при использованном режиме постимплантационного отжига. При обратном порядке термообработки существенных различий в величине порогового напряжения для образцов, созданных с дополнительной имплантацией азота, и контрольных образцов не выявлено. При таком порядке термообработки в процессе БТО на поверхности Si происходит аннигиляция части радиационных дефектов ввиду отсутствия защитного оксида, и формирования крупных дефектно-примесных комплексов не происходит.

Установлено, что емкость подзатворного диэлектрика для образцов, имплантированных ионами азота с  $E = 20$  кэВ и  $E = 40$  кэВ при прямом порядке отжига, ниже, чем для контрольных образцов. С увеличением дозы имплантации данные различия уменьшаются.

Отмечено, что в диапазоне напряжений  $V_g$  от  $-0,15$  до  $0$  В ток стока имплантированных азотом образцов, изготовленных с применением прямого порядка термообработки, выше, чем аналогичный параметр контрольных образцов, а ток стока имплантированных азотом образцов, полученных при обратном порядке термообработки, ниже тока стока контрольных образцов. Для обоих видов БТО наибольшие

различия наблюдаются при  $D_{N^+} = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . При прямом порядке термообработки полученные результаты обусловлены увеличением количества встроенного заряда в диэлектрике вследствие формирования радиационных нарушений при дополнительной имплантации ионов азота. При обратном порядке термообработки на поверхности Si происходит аннигиляция части радиационных дефектов ввиду отсутствия защитного оксида, формирования крупных дефектно-примесных комплексов не наблюдается.

Установлено, что использованные дозы ИИ азота не вызывают существенных изменений максимального значения крутизны ВАХ при прямом порядке БТО, за исключением  $D_{N^+} = 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  и  $E = 20 \text{ кэВ}$ . При этом во всех исследованных случаях происходит смещение максимального значения крутизны ВАХ в сторону больших значений напряжений на затворе. При обратном порядке термообработки в случае  $E = 20 \text{ кэВ}$  значения  $\Delta g_m$  не испытывают существенных изменений. Это может быть обусловлено тем, что большая часть остаточных радиационных нарушений отжигается, а оставшиеся нарушения в нестехиометрическом слое  $\text{Si}_x\text{O}_y$  пассивируются атомами азота. Для образцов, имплантированных азотом с  $D_{N^+} = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  и  $E = 20 \text{ кэВ}$ , наблюдается значительное снижение крутизны ВАХ по сравнению с таковой для контрольных образцов. При проведении БТО после снятия защитного оксида (обратный порядок) атомы азота легко испаряются с поверхности пластины, а дефекты, образовавшиеся после ИИ, не полностью отжигаются в нестехиометрическом слое  $\text{Si}_x\text{O}_y$ .

### Библиографические ссылки

1. Оджаев ВБ, Петлицкий АН, Просолович ВС, Турцевич АС, Шведов СВ, Филипеня ВА и др. Влияние технологических примесей на электрофизические параметры МОП-транзистора. *Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук*. 2014;4:14–17.
2. Красников ГЯ. *Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов*. 2-е издание. Москва: Техносфера; 2011. 800 с.
3. Adam LS, Bowen C, Law ME. On implant-based multiple gate oxide schemes for system-on-chip integration. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2003;50(3):589–600. DOI: 10.1109/TED.2003.810473.
4. Nam In-Ho; Sim Jae Sung; Hong Sung In; Park Byung-Gook; Lee Jong Duk; Lee Seung-Woo, et al. Ultrathin gate oxide grown on nitrogen-implanted silicon for deep submicron CMOS transistors. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2001;48(10):2310–2316. DOI: 10.1109/16.954470.
5. Liu CT, Lloyd EJ, Ma Y, Du M, Opila RL, Hillenius SJ. High performance 0.2  $\mu\text{m}$  CMOS with 25 Å gate oxide grown on nitrogen implanted Si substrates. In: *IEEE International electron devices meeting – 1996. IEDM technical digest; 1996 December 8–11; San Francisco, California*. [S. l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 1996. p. 499–502.
6. Furukawa A, Abe Y, Shimizu S, Kuroi T, Tokuda Y, Inuishi M. Channel engineering in sub-quarter-micron MOSFETs using nitrogen implantation for low voltage operation. In: *IEEE International electron devices meeting – 1996. IEDM technical digest; 1996 December 8–11; San Francisco, California*. [S. l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 1996. p. 62–63.
7. Оджаев ВБ, Панфиленко АК, Петлицкий АН, Просолович ВС, Ковальчук НС, Соловьев ЯА и др. Влияние ионной имплантации азота на электрофизические свойства подзатворного диэлектрика силовых МОП-транзисторов. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2020;3:55–64. DOI: 10.33581/2520-2243-2020-3-55-64.
8. Жалуд В, Кулешов ВН. *Шумы в полупроводниковых устройствах*. Нарышкин АК, редактор. Москва: Советское радио; 1977. 416 с. Совместное издание с SNTL (Прага).
9. ван дер Зил А. *Шум: источники, описание, измерение*. Кулешов ВН, Царапкин ДП, переводчики; Нарышкин АК, редактор. Москва: Советское радио; 1973. 228 с.
10. Liu CT, Misra D, Cheung KP, Alers GB, Chang CP, Colonell JI, et al. Reduced 1/f noise and  $g_m$  degradation for sub-0.25  $\mu\text{m}$  MOSFETs with 25 angstroms – 50 angstroms gate oxides grown on nitrogen implanted Si substrates. In: *1997 55<sup>th</sup> annual device research conference digest; 1997 June 23–25; Fort Collins, USA*. [S. l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 1997. p. 124–125. DOI: 10.1109/DRC.1997.612498.
11. D'Souza S, Hwang L-M, Matloubian M, Martin S, Sherman P, Joshi A, et al. 1/f Noise characterization of deep sub-micron dual thickness nitrided gate oxide n- and p-MOSFETs. In: *International electron devices meeting 1999. Technical digest (cat. No. 99CH36318); 1999 December 5–8; Washington, USA*. [S. l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 1999. p. 839–842. DOI: 10.1109/IEDM.1999.824280.
12. Sze SM, Lee MK. *Semiconductor devices: physics and technology*. 3<sup>rd</sup> edition. New York: John Wiley & Sons; 2012. IX, 578 p.
13. Денисенко В. Новые физические эффекты в нанометровых МОП-транзисторах. *Компоненты и технологии*. 2009;12: 157–162.
14. Galup-Montoro C, Schneider MC. *MOSFET modeling for circuit analysis and design*. Singapore: World Scientific; 2007. XXIV, 420 p. (International series on advances in solid state electronics and technology).

### Reference

1. Odzaev VB, Pyatlitski AN, Prasalovich US, Turtsevich AS, Shvedau SV, Filipenia VA, et al. Influence of technological impurities on electrical parameters of MOS transistor. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*. 2014;4:14–17. Russian.
2. Krasnikov GYa. *Konstruktivno-tekhnologicheskie osobennosti submikronnykh MOP-tranzistorov* [Design and technological features of submicron MOS transistors]. 2<sup>nd</sup> edition. Moscow: Tekhnosfera; 2011. 800 p. Russian.
3. Adam LS, Bowen C, Law ME. On implant-based multiple gate oxide schemes for system-on-chip integration. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2003;50(3):589–600. DOI: 10.1109/TED.2003.810473.

4. Nam In-Ho; Sim Jae Sung; Hong Sung In; Park Byung-Gook; Lee Jong Duk; Lee Seung-Woo, et al. Ultrathin gate oxide grown on nitrogen-implanted silicon for deep submicron CMOS transistors. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2001;48(10):2310–2316. DOI: 10.1109/16.954470.
5. Liu CT, Lloyd EJ, Ma Y, Du M, Opila RL, Hillenius SJ. High performance 0.2  $\mu\text{m}$  CMOS with 25 Å gate oxide grown on nitrogen implanted Si substrates. In: *IEEE International electron devices meeting – 1996. IEDM technical digest; 1996 December 8–11; San Francisco, California*. [S. l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 1996. p. 499–502.
6. Furukawa A, Abe Y, Shimizu S, Kuroi T, Tokuda Y, Inuishi M. Channel engineering in sub-quarter-micron MOSFETs using nitrogen implantation for low voltage operation. In: *IEEE International electron devices meeting – 1996. IEDM technical digest; 1996 December 8–11; San Francisco, California*. [S. l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 1996. p. 62–63.
7. Odzaev VB, Panfilenka AK, Pyatlitski AN, Prasalovich US, Kovalchuk NS, Soloviev YaA, et al. Influence of nitrogen ion implantation on the electrophysical properties of the gate dielectric of power MOSFETs. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2020;3:55–64. Russian. DOI: 10.33581/2520-2243-2020-3-55-64.
8. Zhalud V, Kuleshov VN. *Shumy v poluprovodnikovyykh ustroystvakh* [Noises in semiconductor devices]. Naryshkin AK, editor. Moscow: Sovetskoe radio; 1977. 416 p. Co-published by the SNTL (Prague). Russian.
9. van der Ziel A. *Noise: sources, characterization, measurement*. Englewood Cliffs: Prentice – Hall Inc.; 1970. VIII, 184 p. Russian edition: van der Ziel A. *Shum: istochniki, opisaniye, izmereniye*. Kuleshov VN, Tsarapkin DP, translators; Naryshkin AK, editor. Moscow: Sovetskoe radio; 1973. 228 p.
10. Liu CT, Misra D, Cheung KP, Alers GB, Chang CP, Colonell JI, et al. Reduced 1/f noise and  $g_m$  degradation for sub-0.25  $\mu\text{m}$  MOSFETs with 25 angstroms – 50 angstroms gate oxides grown on nitrogen implanted Si substrates. In: *1997 55<sup>th</sup> annual device research conference digest; 1997 June 23–25; Fort Collins, USA*. [S. l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 1997. p. 124–125. DOI: 10.1109/DRC.1997.612498.
11. D'Souza S, Hwang L-M, Matloubian M, Martin S, Sherman P, Joshi A, et al. 1/f Noise characterization of deep sub-micron dual thickness nitrated gate oxide *n*- and *p*-MOSFETs. In: *International electron devices meeting 1999. Technical digest (cat. No. 99CH36318); 1999 December 5–8; Washington, USA*. [S. l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 1999. p. 839–842. DOI: 10.1109/IEDM.1999.824280.
12. Sze SM, Lee MK. *Semiconductor devices: physics and technology*. 3<sup>rd</sup> edition. New York: John Wiley & Sons; 2012. IX, 578 p.
13. Denisenko V. [New physical effects in nanometric MOSFETs]. *Components & Technologies*. 2009;12:157–162. Russian.
14. Galup-Montoro C, Schneider MC. *MOSFET modeling for circuit analysis and design*. Singapore: World Scientific; 2007. XXIV, 420 p. (International series on advances in solid state electronics and technology).

Получена 11.07.2022 / исправлена 19.07.2022 / принята 22.07.2022.  
Received 11.07.2022 / revised 19.07.2022 / accepted 22.07.2022.

#### Авторы:

**Владимир Борисович Оджаев** – доктор физико-математических наук, профессор; заведующий кафедрой физики полупроводников и нанoeлектроники физического факультета.  
**Александр Николаевич Петлицкий** – кандидат физико-математических наук; директор государственного центра «Белмикроанализ» филиала НТЦ «Белмикросистемы».  
**Владислав Савельевич Просолович** – кандидат физико-математических наук, доцент; заведующий научно-исследовательской лабораторией спектроскопии полупроводников кафедры физики полупроводников и нанoeлектроники физического факультета.  
**Наталья Станиславовна Ковальчук** – кандидат технических наук, доцент; заместитель главного инженера.  
**Ярослав Александрович Соловьев** – кандидат технических наук, доцент; заместитель директора филиала «Транзистор».  
**Дмитрий Викторович Шестовский** – инженер-технолог отдела перспективных технологических процессов.  
**Валентин Юльянович Явид** – кандидат физико-математических наук; старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории спектроскопии полупроводников кафедры физики полупроводников и нанoeлектроники физического факультета.  
**Юрий Николаевич Янковский** – кандидат физико-математических наук; ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории спектроскопии полупроводников кафедры физики полупроводников и нанoeлектроники физического факультета.

#### Authors:

**Vladimir B. Odzaev**, doctor of science (physics and mathematics), full professor; head of the department of semiconductor physics and nanoelectronics, faculty of physics. [odzaev@bsu.by](mailto:odzaev@bsu.by)  
**Aliaksandr N. Pyatlitski**, PhD (physics and mathematics); director of the state center «Belmicroanalysis», branch STC «Belmicrosystems». [petan@tut.by](mailto:petan@tut.by)  
**Uladislau S. Prasalovich**, PhD (physics and mathematics), docent; head of the laboratory of semiconductor spectroscopy, department of semiconductor physics and nanoelectronics, faculty of physics. [prosolovich@bsu.by](mailto:prosolovich@bsu.by)  
**Natalya S. Kovalchuk**, PhD (engineering), docent; deputy chief engineer.  
**Yaroslav A. Soloviev**, PhD (engineering), docent; deputy director of the branch «Transistor».  
**Dmitry V. Shestovski**, engineer-technologist at the department of advanced technological processes. [dshestovski@integral.by](mailto:dshestovski@integral.by)  
**Valentin Yu. Yavid**, PhD (physics and mathematics); senior researcher at the laboratory of semiconductor spectroscopy, department of semiconductor physics and nanoelectronics, faculty of physics. [yavid@bsu.by](mailto:yavid@bsu.by)  
**Yuri N. Yankovski**, PhD (physics and mathematics); leading researcher at the laboratory of semiconductor spectroscopy, department of semiconductor physics and nanoelectronics, faculty of physics. [yankouski@bsu.by](mailto:yankouski@bsu.by)