

## ВЛИЯНИЕ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ АЗОТА НА ВЕЛИЧИНУ ТОКОВ СТОК-ИСТОК СИЛОВЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ

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>,  
В.А. Филипеня<sup>2)</sup>, Д.В. Шестовский<sup>2)</sup>, Ю.Н. Янковский<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет, пр. Независимости 4, 220030 Минск,  
Беларусь, odzaev@bsu.by, prosolovich@bsu.by, yankouski@bsu.by

<sup>2)</sup>ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,  
ул. Казинца 121А, 220108 Минск, Беларусь, DShestovski@integral.by

Исследовались силовые МОП-транзисторы с вертикальной структурой, полученные на основе метода двойной диффузии (DMOSFET). С целью установления влияния азотирования диэлектрика на электрофизические параметры силовых МОП транзисторов дополнительно технологический процесс изготовления приборов включал в себя операцию ионной имплантации азота в активную область структуры прибора через защитный окисел толщиной 20 нм энергиями 20 кэВ, 40 кэВ и 60 кэВ в диапазоне доз  $1 \cdot 10^{13}$ – $3 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>. Параллельно исследовались контрольные образцы, прошедшие все этапы формирования прибора без дополнительного внедрения азота. Установлено, что при трехстадийном процессе имплантации ионов азота и быстрых термических обработок при суммарной дозе  $2.5 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> в диапазоне напряжений от -2 В до -10 В происходит снижение токов утечки сток-исток ДМОП-транзисторов, обусловленное отжигом генерационных центров в р-области кармана. Основной вклад в токи утечки вносит генерационный ток в области пространственного заряда обратносмещенного р-п-перехода ДМОП-транзистора вследствие большой площади металлургической границы базы р-типа и подложки п-типа данного перехода. Проведение дополнительной имплантации ионов азота в диапазоне доз  $1 \cdot 10^{13}$  –  $2.5 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> позволяет снизить величину тока сток-исток ДМОП-транзисторов в подпороговой области как при одностадийном, так и при трехстадийном процессах имплантации и отжига. Данный эффект усиливается при снижении напряжения на затворе вследствие увеличения вклада диффузионного тока МОП-транзистора.

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

## INFLUENCE OF NITROGEN ION IMPLANTATION ON THE VALUE OF DRAIN-SOURCE CURRENTS OF POWER MOS-TRANSISTORS

Vladimir Odzhaev<sup>1)</sup>, Alexander Pyatlitski<sup>2)</sup>, Vladislav Prasalovich<sup>1)</sup>, Natallia Kovalchuk<sup>2)</sup>,  
Yaroslav Soloviev<sup>2)</sup>, Victor Filipenia<sup>2)</sup>, Dmitriy Shestovski<sup>2)</sup>, Yuri Yankouski<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus,  
odzaev@bsu.by, prosolovich@bsu.by, yankouski@bsu.by

<sup>2)</sup>JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company,  
121A Kazintsa Str., 220108 Minsk, Belarus, DShestovski@integral.by

Power MOS transistors with a vertical structure, obtained on the basis of the double diffusion method (DMOSFET), have been investigated. In order to establish the effect of dielectric nitriding on the electrophysical parameters of power MOS transistors, the technological process of manufacturing devices additionally included the operation of nitrogen ion implantation into active region of the device structure through a protective oxide with thickness 20 nm with energies of 20 keV, 40 keV and 60 keV in dose range  $1 \cdot 10^{13}$  –  $3 \cdot 10^{15}$  cm<sup>-2</sup>. In parallel, control samples were studied that had passed all the stages of the device formation without additional implantation of nitrogen. It was found that during a three-stage process of implantation of nitrogen ions and rapid thermal treatments with a total dose of nitrogen ions of  $2.5 \cdot 10^{14}$  cm<sup>-2</sup> in the voltage range from -2 V to -10 V, a decreasing of drain-source leakage currents of DMOS transistors occurs, due to annealing of the generation centers in the p-area of the pocket. The main contribution to the leakage currents is made by the generation current in the space charge region of the reverse-biased p-n-junction of the DMOS transistor due to the large area of the metallurgical boundary of the p-type base and the n-type substrate of this junction. Additional implantation of nitrogen ions in the dose range of  $1 \cdot 10^{13}$  –  $2.5 \cdot 10^{14}$  cm<sup>-2</sup> also makes it possible to reduce the drain-source current of DMOS transistors in the sub-threshold region both in one-stage and three-stage processes of implantation and annealing. This effect is enhanced with decreasing gate voltage due to an increase in the contribution of the diffusion current of the MOSFET.

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

## Введение

Стабильность и надежность полупроводниковых приборов тесно связаны с поверхностными состояниями на границах раздела. Захват электронов и дырок в слое диэлектрика приводит к накоплению заряда и деградации приборов. Перспективным с этой точки зрения является применение в качестве подзатворного диэлектрика оксинитрида кремния  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ . В работе [1] 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). Авторами [2] установлено влияние количества ионно-имплантированного азота на пороговое напряжение, крутизну вольт-амперной характеристики и величину заряда на границе  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  для субмикронных MOSFET 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 окисла методом ионной имплантации (ИИ) на величину токов сток-исток силовых МОП транзисторов с толщиной подзатворного диэлектрика 42 нм.

## Материалы и методы исследования

Исследовались силовые nМОП-транзисторы с вертикальной структурой, полученные на основе метода двойной диффузии (ДМОП). Приборы формировались на кремниевых пластинах n-типа проводимости с удельным сопротивлением  $\rho = 0.01$  Ом·см ориентации (100) с эпитаксиальным слоем p-типа ( $\rho = 1$  Ом·см). Области базы транзисторов формировались ИИ бора с энергией 80 кэВ дозой

$1 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>. Азот имплантировался в активную область структуры прибора через защитный окисел толщиной 20 нм энергиями 20 кэВ, 40 кэВ и 60 кэВ в диапазоне доз  $1 \cdot 10^{13}$ – $3 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup> в одну половину кремниевой пластины. Пластины подвергались быстрому термическому отжигу (БТО) при температурах 1000 или 1050 °С длительностью 15 с и последующему химическому травлению защитного оксида. Для ряда образцов проводился трехступенчатый порядок обработки, состоящий из трех этапов ионной имплантации азота и последующего быстрого термического отжига. Затем проводилось выращивание оксида затвора толщиной 42 нм и последующие операции по формированию прибора. Параллельно исследовались контрольные образцы, изготовленные на второй половине той же кремниевой пластины, прошедшие все этапы формирования прибора, но без ИИ азота. Измерения вольт-амперных (ВАХ) характеристик проводились при напряжении сток-исток 20 В на измерителе параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500A с зондовой станцией Cascade Summit 11000B-AP.

## Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены зависимости тока утечки сток-исток ( $\Delta I/I_i$ ) от дозы ИИ азота образцов МОП-транзисторов относительно соответствующих контрольных образцов. Видно, что при дозах ионной имплантации азота  $1 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup>,  $2.5 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> и  $7 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> величина токов утечки сток-исток несколько меньше по сравнению с контрольными образцами, изготовленными без ионной имплантации азота. При дозах ИИ азота  $2 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup> и  $1 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup> в имплантированных азотом образцах токи утечки сток-исток, наоборот, превышают соответствующие значения для контрольных образцов. Наибольшие различия наблюдаются при трехступенчатом режиме обработки с суммарной дозой ИИ  $2.5 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> с энергией 40 кэВ ( $5 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup>, БТО +  $1 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>, БТО +  $1 \cdot 10^{14}$

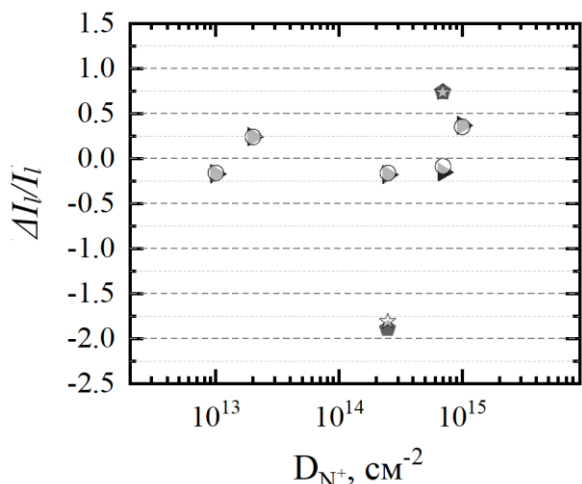


Рис. 1. Зависимость тока утечки сток-исток ( $\Delta I/I$ ) от дозы ионной имплантации  $N^+$  образцов МОП-транзисторов изготовленных с применением имплантации азота относительно соответствующих контрольных образцов

Напряжение на затворе  $V_g$ , В:  $\blacktriangleright$  – -10;  $\circ$  – -2;  $\blacklozenge$  – -10 (для трехстадийного процесса);  $\star$  – -2 (для трехстадийного процесса)

Fig. 1. Dependence of the drain-source leakage current ( $\Delta I/I$ ) on the dose of ion implantation of  $N^+$  samples of MOS transistors made using nitrogen implantation relative to the corresponding control samples

Gate voltage  $V_g$ , В:  $\blacktriangleright$  – -10;  $\circ$  – -2;  $\blacklozenge$  – -10 (for a three-step process);  $\star$  – -2 (for a three-step process)

$\text{cm}^{-2}$ , БТО). Причем при изменении напряжения на затворе от -2 В до -10 В данное различие увеличивается. Следует отметить, что применение данного режима обработки с суммарной дозой имплантации азота  $7 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  с энергией 40 кэВ ( $1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ , БТО +  $2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ , БТО +  $4 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ , БТО) дает отрицательный эффект – токи утечки сток-исток приборов превышают соответствующие значения не только для контрольных образцов, но и вообще значения для всех исследованных приборов.

Генерационный ток в области пространственного заряда (ОПЗ) обратномещенного р-n'-перехода ДМОП-транзистора превалирует в величине тока утечки сток-исток ввиду большой площади металлургической границы базы р-типа и подложки n'-типа этого перехода и меньших токах утечки через паразитный биполярный транзистор. Эффективное время жизни непосредственно определяется концентрацией генерацион-

ных центров – уменьшается с увеличением концентрации генерационных центров [3]. Таким образом, основной причиной снижения токов утечки р-n'-перехода является отжиг генерационных центров, обусловленных радиационными нарушениями при ИИ. При проведении трехстадийного процесса азотирования для суммарной дозы ИИ  $2.5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ , включающего три быстрых термических обработки, происходит как отжиг части точечных радиационных дефектов, образованных в процессе формирования прибора, так и частичная пассивация радиационных дефектов атомами азота, что приводит к снижению количества генерационных центров в кремнии. Следует отметить, что при трехстадийном процессе чередование операций ионной имплантации и БТО способствует также дополнительной аннигиляции радиационных дефектов на каждом последующем этапе обработки на структурных дефектах, образовавшихся при ионной имплантации и быстром термическом отжиге на предыдущем этапе обработки.

При изменении напряжения на затворе от -2 до -10 В уменьшение тока утечки сток-исток обусловлено ростом ОПЗ р-n'-перехода. При работе МОП-транзистора в режиме отсечки снижение управляющего потенциала на затворе приводит к увеличению концентрации дырок в слоях кремния вблизи границы Si-SiO<sub>2</sub>, вследствие чего происходит обеднение и обогащение основными носителями заряда в объеме р-области и n'-области соответственно. Обеднение для n'-области подложки превалирует над обогащением для р-области вследствие большей площади границы раздела с SiO<sub>2</sub>, результатом чего является увеличение ОПЗ обратномещенного р-n'-перехода ДМОП-транзистора. При проведении трехстадийного процесса азотирования для суммарной дозы ИИ  $7 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  наблюдается увеличение токов утечки по сравнению как с контрольными, так и со всеми исследовавшимися приборами обусловлено неполным отжигом радиаци-

онных дефектов при данных режимах имплантации и постимплантационной обработки.

На рис. 2 представлены зависимости тока сток-исток ( $I/I$ ) от напряжения на затворе для различных доз ионной имплантации  $N^+$  образцов МОП-транзисторов относительно соответствующих контрольных образцов. Видно, что для всех энергий ионной имплантации азота, превышающих суммарные дозы  $7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , значения тока превышают соответствующие величины для контрольных образцов. При дозах имплантации азота  $1 \cdot 10^{13} - 2.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  токи в приборах, изготовленных с применением внедрения азота, меньше, чем в контрольных образцах. Данный эффект усиливается при снижении напряжения на затворе вследствие увеличения вклада диффузионного тока МОП-транзистора. Максимальный эффект наблюдается для суммарной дозы ионной имплантации  $2.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  как для одностадийного режима обработки, так и для трехстадийного. При напряжении на затворе от 1 до 2 В эти значения практически совпадают. Уменьшение величины тока сток-исток ДМОП-транзисторов в подпороговой области при дозах имплантации азота  $1 \cdot 10^{13} - 2.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  как при одностадийном, так и при трехстадийном процессах имплантации и отжига, обусловлено снижением концентрации кулоновских центров в  $\text{SiO}_x$ .

В процессе БТО, следующего за ИИ азота, происходит диффузия атомов азота в направлении защитного оксида кремния и их локализация вблизи  $\text{Si}/\text{SiO}_2$ . Атомы азота интегрируются и встраиваются в дефекты на границе раздела кремний/оксид кремния, уменьшая количество заряженных центров. Наиболее вероятным механизмом снижения концентрации кулоновских центров в  $\text{SiO}_x$  является пассивация дефектов, ответственных за их образование в переходном слое оксида. Кулоновские центры в нестехиометрических слоях преимущественно положительно заряжены либо нейтральны [4].

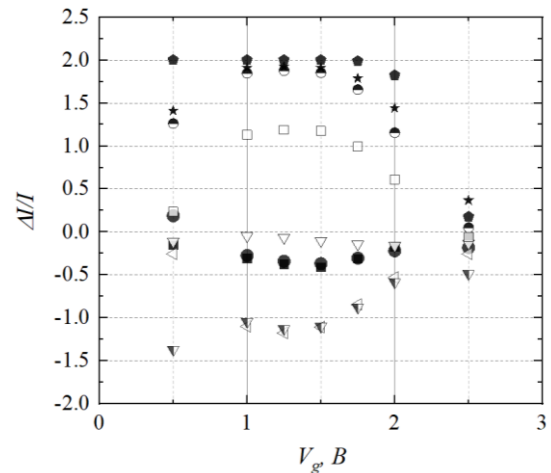


Рис. 2. Зависимость тока сток-исток ( $I/I$ ) от напряжения на затворе для различных доз ионной имплантации  $N^+$  образцов МОП-транзисторов относительно соответствующих контрольных образцов

Режимы имплантации азота: ■ –  $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , 25 кэВ; ● –  $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , 25 кэВ; ▽ –  $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , 40 кэВ; ◁ –  $2.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , 40 кэВ; ▽ –  $2.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , 40 кэВ (трехстадийный процесс); □ –  $7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , 40 кэВ; ● –  $7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , 40 кэВ (трехстадийный процесс); ★ –  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , 40 кэВ; ◆ –  $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , 60 кэВ

Fig. 2. Dependence of the drain-source current ( $I/I$ ) on the gate voltage for various doses of ion implantation of  $N^+$  samples of MOS transistors relative to the corresponding control samples

Nitrogen implantation regimes: ■ –  $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , 25 кэВ; ● –  $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , 25 кэВ; ▽ –  $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , 40 кэВ; ◁ –  $2.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , 40 кэВ; ▽ –  $2.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , 40 кэВ (three-step process); □ –  $7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , 40 кэВ; ● –  $7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , 40 кэВ (three-step process); ★ –  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , 40 кэВ; ◆ –  $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , 60 кэВ

Процессы отжига положительно заряженных центров вблизи канала оказывают влияние и на величину подвижности носителей заряда в подпороговой области ВАХ МОП-транзистора, где основной вклад в эффективную поперечную подвижность вносит рассеяние на кулоновских центрах, и, как следствие, на диффузионный подпороговый ток сток-исток паразитного биполярного транзистора. Отсутствие центров, притягивающих кулоновским взаимодействием электроны в р-область базы приводит также к снижению тока паразитного  $n^+ - p - n^-$  биполярного транзистора.

## Заключение

Установлено, что при трехстадийном процессе имплантации ионов азота и БТО при суммарной дозе  $2.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  в диапазоне напряжений от -2 В до -10 В происходит снижение токов утечки сток-исток ДМОП-транзисторов, обусловленное отжигом генерационных центров в р-области кармана. При проведении трехстадийного процесса азотирования для суммарной дозы ИИ  $7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  увеличение токов утечки по сравнению как с контрольными, так и со всеми исследовавшимися приборами обусловлено неполным отжигом радиационных дефектов при данных режимах ионной имплантации и быстрого термического отжига. Проведение дополнительной ИИ азота в диапазоне доз  $1 \cdot 10^{13} - 2.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  при изготовлении силовых МОП транзисторов позволяет снизить величину тока сток-исток в подпороговой области как при одностадийном, так и при трехстадийном процессах имплантации и отжига. Максимальный эффект наблюдается для суммарной дозы ионной имплантации  $2.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  как для одностадийного режима обработки, так и для трехстадийного. При снижении напряжения на затворе различие между приборами, изготовленными с дополнительной операцией ионной имплантации

азота, и контрольными образцами усиливается вследствие увеличения вклада диффузионного тока МОП-транзистора.

## Библиографические ссылки

1. Красников Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП транзисторов. Москва: Техносфера; 2011. 800 с.
2. Nam I.-H., Sim J.S., Hong S.I., Park B.-G., Lee S.-W., Kang M.-S. et al. Ultrathin gate oxide grown on nitrogen-implanted silicon for deep sub-micron CMOS transistors. IEEE Transactions on Electron Devices 2001; 48(10): 2310-2316.
3. Schroder D.K. Carrier lifetimes in silicon IEEE transactions on Electron Devices 1997; 44(1): 160-170 p.
4. Fleetwood D.M. Defects in microelectronic materials and devices. CRC press; 2009. 753 p.

## References

1. Krasnikov G.Ya. Konstruktivno-tehnologicheskie osobennosti submikronnyh MOP tranzistorov [Design and technological features of submicron MOS transistors]. Moscow: Tekhnosfera; 2011. 800 p. (In Russian)
2. Nam I.-H., Sim J.S., Hong S.I., Park B.-G., Lee S.-W., Kang M.-S. et al. Ultrathin gate oxide grown on nitrogen-implanted silicon for deep sub-micron CMOS transistors. IEEE Transactions on Electron Devices 2001; 48(10): 2310-2316.
3. Schroder D.K. Carrier lifetimes in silicon IEEE transactions on Electron Devices 1997; 44(1): 160-170 p.
4. Fleetwood D.M. Defects in microelectronic materials and devices. CRC press; 2009. 753 p.