

УДК 621.382

**СТОКОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИЛОВЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ С ДИЭЛЕКТРИКОМ, АЗОТИРОВАННЫМ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИЕЙ**

**Оджаев В. Б.<sup>1</sup>, Пеглицкий А. Н.<sup>2</sup>, Просолович В. С.<sup>1</sup>, Ковальчук Н. С.<sup>2</sup>, Черный В. В.<sup>3</sup>, Шестовский Д. В.<sup>2</sup>, Янковский Ю. Н.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет

<sup>2</sup>ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

<sup>3</sup>Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Исследовано влияние азотирования подзатворного оксида методом ионной имплантации на вольт-амперные характеристики силовых МОП-транзисторов. Установлено, что в диапазоне напряжений на затворе  $V_G = 0,5 \dots -1,5$  В происходит снижение тока сток-исток  $p$ -канальных МОП-транзисторов по сравнению с контрольными образцами. Указанный эффект наиболее ярко выражен для прямого порядка быстрой термообработки, что, вероятно, связано с увеличением концентрации легирующей примеси в канале МОП-транзистора вследствие изменения коэффициента сегрегации фосфора границей раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ , обогащенной атомами азота. Для обратного порядка термообработки уменьшение величины тока сток-исток в подпороговой области вольт-амперной характеристики менее ярко выражено по сравнению с прямым порядком.

**Ключевые слова:** силовые МОП-транзисторы, ионная имплантация, ток сток-исток, коэффициент сегрегации.

**DRAIN CHARACTERISTICS OF POWER MOSFETs WITH DIELECTRIC NITRIDED BY ION IMPLANTATION**

**Odzhaev V.<sup>1</sup>, Pyatlitski A.<sup>2</sup>, Prosolovich V.<sup>1</sup>, Kovalchuk N.<sup>2</sup>, Chornyi V.<sup>3</sup>, Shestovsky D.<sup>2</sup>, Yankovski Yu.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Belarusian State University

<sup>2</sup>“INTEGRAL” Joint Stock Company

<sup>3</sup>Belarusian National Technical University  
Minsk, Republic of Belarus

**Abstract.** The effect of nitriding of the sub-gate oxide by ion implantation on the volt-ampere characteristics of power MOSFETs has been studied. It is found that in the range of gate voltage  $V_G = 0.5 \dots -1.5$  V the drain-source current of  $p$ -channel MOSFETs decreases in comparison with control samples. This effect is most pronounced for the direct order of rapid heat treatment, which is probably associated with an increase in the dopant concentration in the MOSFET channel due to changes in the phosphorus segregation coefficient by the  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  interface enriched with nitrogen atoms. For the reverse order of heat treatment, the decrease in the value of the drain-source current in the subthreshold region of the volt-ampere characteristic is less pronounced compared to the direct order.

**Keywords:** power MOSFETs, ion implantation, drain-source current, segregation factor

Адрес для переписки: Просолович В. С., пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Республика Беларусь  
e-mail: prosolovich@bsu.by

Ранее было установлено, что для ряда силовых МОП-транзисторов с вертикальной структурой, созданных с применением дополнительной операции имплантации ионов (ИИ) азота наблюдается увеличение величины заряда пробоя подзатворного диэлектрика, а также уменьшение плотности фиксированного заряда [1]. Показано также, что для таких приборов наблюдается снижение как величины и шумов тока утечки затвора [1]. Это обусловлено снижением плотности поверхностных состояний на границе раздела  $\text{Si-SiO}_2$  в МОП-структурах, созданных с применением дополнительной операции ионной имплантации азота при прямом порядке термообработки.

В работе исследовалось влияние азотирования подзатворного оксида методом ионной имплантации на вольт-амперные (ВАХ) характеристики силовых МОП-транзисторов.

Азот имплантировался в активную область  $p$ -канальных МОП-транзисторы через защитный оксид толщиной 23 нм энергиями 20 и 40 кэВ в

диапазоне доз  $1 \cdot 10^{13} - 5 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> в одну половину кремниевой пластины. Затем образцы подвергались быстрому термическому отжигу (БТО) при температуре 1000 °С длительностью 15 с и химическому травлению защитного оксида. Для одной группы пластин проводилось сначала БТО с последующим снятием оксида (прямой порядок), а для другой группы – сначала снятие оксида, а потом пластины подвергались БТО (обратный порядок). Затем проводилось выращивание оксида затвора толщиной 42 нм и последующие операции по формированию прибора. Параллельно исследовались контрольные образцы, прошедшие все этапы формирования прибора, но без ионной имплантации азота ( $W/O$ ). Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) проводились на измерителе параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500A с зондовой станцией Cascade Summit 11000B-AP.

Исследования сток-источковых ВАХ от напряжения на затворе ( $V_G$ ) МОП-транзисторов в

триодном режиме (рисунок 1) показали, что в подпороговой области ( $V_G = 0,5 \dots -1,5$  В) ВАХ является линейной в логарифмическом масштабе. Наблюдается ее смещение вправо вдоль оси напряжений для образцов, дополнительно имплантированных ионами азота, что свидетельствует о меньших значениях тока сток-исток ( $I_{DS}$ ). Величина подпорогового диффузионного тока сток-исток при слабой инверсии для МОП-транзистора определяется геометрическими размерами канала, емкостью подзатворного диэлектрика, подвижностью носителей в канале, напряжением сток-исток и концентрацией примеси в канале ( $I_{DS} \sim N_D$ ) [3]. Геометрические размеры и емкости подзатворного оксида как для контрольных, так и для образцов с азотированным подзатворным оксидом кремния различались незначительно (~1 %). Наиболее вероятным процессом, оказывающим влияние на снижение  $I_{DS}$  в подпороговой области ВАХ, является увеличение концентрации легирующей примесей фосфора в канале МОП-транзистора вследствие изменения его коэффициента сегрегации.

На рисунке 1 представлены зависимости относительного изменения тока сток-исток ( $\Delta I_{DS}/I_{DS}$ ) от напряжения на затворе  $p$ -канальных МОП-транзисторов. Видно, что при изменении напряжения на затворе в подпороговой области ВАХ  $V_G = 0,5 \dots -1,5$  В наблюдается спад относительного изменения величины  $I_{DS}$ . В области  $V_G = -1,5 \dots -2,5$  В данные различия уменьшаются. Данный эффект наиболее ярко выражен для прямого порядка БТО. При проведении БТО при наличии защитного оксида кремния и в ходе выраживания подзатворного диэлектрика, содержащего на границе раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  атомы азота, происходит снижение коэффициента сегрегации фосфора, и как следствие, увеличение концентрации легирующей примеси в канале МОП-транзистора. Это обуславливает снижение диффузионного тока в подпороговой области ВАХ. Наибольшее снижение  $I_{DS}$  при  $V_G = -1$  В наблюдаются для образцов, имплантированных дозой  $N^+ 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  при прямом порядке БТО.

Для образцов с обратным порядком термообработки с ИИ азота  $D_{N^+} = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  эффект снижения величины  $I_{DS}$  выражен не так ярко по сравнению с образцами, полученными с применением прямого порядка. Это связано с аннигиляцией части постимплантационных дефектов на

поверхности кремния при проведении БТО без защитного  $\text{SiO}_2$  и, как результат, – снижение концентрации дефектов в Si.

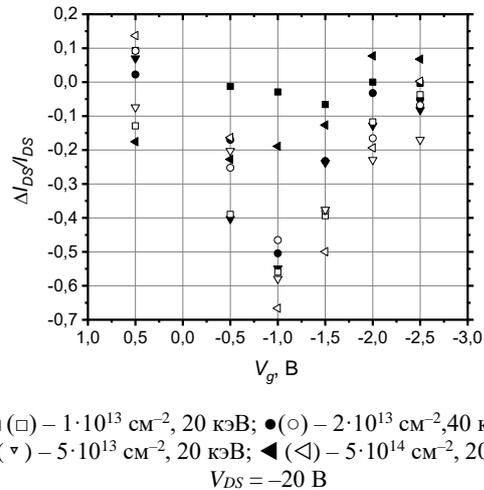


Рисунок 1 – Зависимости относительного изменения тока сток-исток ( $\Delta I_{DS}/I_{DS}$ ) от напряжения на затворе МОП-транзисторов с диэлектриком азотированным методом ИИ, по сравнению с соответствующими контрольными образцами. Режимы имплантации азота (черные значки – обратный порядок БТО, белые значки – прямой порядок БТО)

Установлено, что в диапазоне напряжений на затворе  $V_G = 0,5 \dots -1,5$  В происходит снижение  $I_{DS}$   $p$ -канальных МОП-транзисторов по сравнению с контрольными образцами, обусловленное увеличением концентрации легирующей примеси в канале МОП-транзистора. Наличие на границе раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  атомов азота при проведении БТО, блокирует сегрегацию фосфора в оксид.

#### Литература

1. Влияние ионной имплантации азота на электрофизические свойства подзатворного диэлектрика силовых МОП-транзисторов / В. Б. Оджаев [и др.] // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2020. – № 3. – С. 55–64.
2. Электрофизические характеристики силовых МОП-транзисторов, дополнительно имплантированных ионами азота. / В. Б. Оджаев [и др.] // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2022. – № 3. – С. 81–92.
3. Sze, S. M. Semiconductor Devices: Physics and Technology / S. M. Sze, M. -K. Lee. – 3rd ed. – Hoboken, N. J: Wiley, 2012. – 592 p.