

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics / Ed. by F. Sabath, D.V. Giri, F. Rachidi, A. Kaelin, – Springer, – 2010.– 496 p.
2. Precise, sub-nanosecond and high-voltage switching enabled by gallium nitride electronics integrated into complex loads / J.W. Simonaitis [et al.] // Rev. Sci. Instrum. – 2021. – 92, 074704.
3. A.I. Bishop, Sub-nanosecond Pockels cell switching using avalanche transistors/ A.I. Bishop, P.F. Barker // Rev. Sci. Instrum. – 2006. – 77, 044701.
4. A Marx High-Voltage Pulse Source Based on the Series–Parallel Connections of Avalanche Transistors / H. Guan [et al.] // Proceeding of Recent Developments in Intelligent Computing, Communication and Devices, Springer, – 2019. – pp. 767–772.
5. Лавинные транзисторы вчера, сегодня и завтра / Владимир Дьяконов // Компоненты и технологии –2010.– 8, с. 49–58.
6. MICRO-CAP 12 Analog/Digital Simulator // http://www.spectrum-soft.com/download/mc12_brochure.pdf.
7. Switching mechanisms triggered by a collector voltage ramp in avalanche transistors with short-connected base and emitter / S. Vainshtein et al. // IEEE Trans. Electron Devices. – 2016. – 63(8), pp. 3044–3048.

ТОКИ УТЕЧКИ ЗАТВОРА *n*-КАНАЛЬНЫХ СИЛОВЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ, ДОПОЛНИТЕЛЬНО ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ИОНАМИ АЗОТА

В. Б. Оджаев¹, А. Н. Петлицкий², В. С. Просолович¹, Н. С. Ковальчук²,
Д. В. Шестовский², Ю. Н. Янковский¹

¹⁾ *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Беларусь, e-mail: prosolovich@bsu.by*

²⁾ *ОАО «Интеграл» - управляющая компания холдинга «Интеграл», ул. И.П. Казинца, 121А, 220108 Минск, Беларусь, e-mail: 1279489@mail.ru*

Исследованы электрофизические характеристики силовых *n*-канальных МОП-транзисторов, дополнительно имплантированных ионами азота. Ионная имплантация ионов азота производилась через защитный оксид толщиной 23 нм энергиями 25 и 40 кэВ дозами $1 \cdot 10^{13}$ – $1 \cdot 10^{15}$ см⁻². Быстрый термический отжиг проводился при температурах 900 °С или 1000 °С длительностью 15 с. Установлено, что проведение азотирования подзатворного диэлектрика позволяет снизить как величину, так и уровень шумов тока утечки затвора при дозах имплантации $(1-2) \cdot 10^{13}$ см⁻². Значительное снижение токов утечки затвора обусловлено локализацией атомов азота в процессе быстрой термической обработки в области нестехиометрической части границы раздела Si/SiO₂ и последующей эффективной пассивацией поверхностных состояний. При повышении доз имплантации до $2,5 \cdot 10^{14}$ – $1 \cdot 10^{15}$ см⁻² наблюдается превышение обоих параметров по сравнению с контрольными образцами вследствие неполного отжига радиационных дефектов, сформированных дополнительной имплантацией ионов азота. Однако проведение трехступенчатого процесса (чередование ионной имплантации и быстрого термического отжига) с аналогичной суммарной дозой имплантации позволяет существенно снизить плотность пострадиационных дефектов.

Ключевые слова: силовые МОП-транзисторы; ионная имплантация; токи утечки затвора; шумы токов утечки затвора.

GATE LEAKAGE CURRENTS OF *n*-CHANNEL POWER MOSFET–TRANSISTORS ADDITIONALLY IMPLANTED WITH NITROGEN IONS

V. B. Odzhaev¹, A. N. Pyatlitski², V. S. Prosolovich¹, N. S. Kovalchuk²,
D. V. Shestovsky², Yu. N. Yankovski¹

¹) *Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus*

²) *JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company, 121A Kazintsya st.,
220108, Minsk, Belarus*

Corresponding author: V. S. Prosolovich (prosolovich@bsu.by)

The electrophysical characteristics of power *n*-channel MOSFETs additionally implanted with nitrogen ions have been investigated. Ion implantation of nitrogen ions was carried out through a 23 nm thick protective oxide at energies of 25 and 40 keV with doses of $1 \cdot 10^{13}$ – $1 \cdot 10^{15}$ cm⁻². Rapid thermal annealing was carried out at temperatures of 900 °C or 1000 °C for a duration of 15 s. It was found that nitriding of the gate dielectric allows to reduce both the magnitude and noise level of the gate leakage current at implantation doses of $(1-2) \cdot 10^{13}$ cm⁻². The significant reduction of leakage currents is due to the localisation of nitrogen atoms during rapid thermal treatment in the region of the non-stoichiometric part of the Si/SiO₂ interface and subsequent effective passivation of surface states. At increasing the implantation doses up to $2.5 \cdot 10^{14}$ – $1 \cdot 10^{15}$ cm⁻² an excess of both parameters compared to control samples is observed due to incomplete annealing of radiation defects formed by additional implantation of nitrogen ions. However, a three-step process (alternation of ion implantation and rapid thermal annealing) with a similar total implantation dose allows us to significantly reduce the density of post-radiation defects.

Key words: power MOSFET-transistors; ion implantation; gate leakage currents; gate leakage currents noise.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из способов регулирования электрофизических характеристик МОП-транзисторов является модификация их топологической структуры, однако его применение затруднено тем, что любое улучшение одного параметра, как правило, негативно отражается на других [1]. В работе [2] предложены способы улучшения эксплуатационных характеристик (величина заряда пробоя, ток утечки затвора, пороговое напряжение, и т. д.) управляющих МОП-транзисторов СБИС путем азотирования тонких (5–12 нм) и ультратонких (2–5 нм) подзатворных оксидов, а также методами нитрирования либо осаждения подзатворного оксинитрида. Азотирование оксида затвора методом ионной имплантации (ИИ) перспективно ввиду возможности локального и прецизионного введения требуемого количества атомов.

Ранее было установлено, что для силовых *p*-канальных МОП-транзисторов с вертикальной структурой, созданных с применением дополнительной операции имплантации ионов азота, наблюдается увеличение величины заряда пробоя подзатворного диэлектрика, а также уменьшение плотности фиксированного заряда [3]. Показано также, что для данных приборов, сформированных с дополнительной операцией ионной имплантации азота, наблюдается снижение как величины, так и шумов тока утечки затвора [4]. Значительное снижение тока утечки затвора обусловлено локали-

защитой атомов азота в процессе постимплантационной быстрой термической обработки (БТО) в области нестехиометрической части границы раздела Si/SiO₂ и сопутствующей данному процессу эффективной пассивацией поверхностных состояний. В настоящей работе исследовалось влияние азотирования подзатворного оксида методом ионной имплантации на электрофизические параметры (токи утечки затвора) силовых *n*-канальных МОП-транзисторов с толщиной подзатворного диэлектрика 42 нм.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Силовые *n*-канальные МОП-транзисторы с вертикальной структурой изготавливались методом двойной диффузии на кремниевых пластинах *n*-типа проводимости ($\rho = 0,01 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) ориентацией (100) с эпитаксиальным слоем *n*-типа ($\rho = 1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$). Азот имплантировался в активную область структуры прибора через защитный слой SiO₂ толщиной 23 нм энергиями 25 и 40 кэВ в диапазоне доз $1 \cdot 10^{13}$ – $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ в одну половину кремниевой пластины (для каждой дозы имплантации использовались отдельные пластины). Затем с целью отжига радиационных дефектов образцы подвергались быстрой термической обработке на воздухе при температурах 900 °С и 1000 °С длительностью 15 с с последующим химическим травлением защитного оксида до полного его удаления. Для ряда образцов проводилась трехстадийная обработка, которая состояла из трех последовательных блоков операций по ионной имплантации азота и последующего БТО ($5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \rightarrow \text{БТО} \rightarrow 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \rightarrow \text{БТО} \rightarrow 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \rightarrow \text{БТО}$). Затем производилось выращивание оксида затвора толщиной 42 м и последующие операции по формированию прибора. Параллельно исследовались контрольные образцы, изготовленные на второй половине тех же кремниевых пластин, прошедшие все этапы формирования прибора, но без операции 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 при температуре 20 °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования ВАХ токов утечки затвора в интервале напряжений V_G от -10 В до $+10 \text{ В}$ при замкнутых на землю стоке и истоке силовых *n*-канальных МОП-транзисторов показали, что для образцов с подзатворными диэлектриками, азотированными ионной имплантацией азота энергиями 25–40 кэВ дозами $D_{N^+} = (1-2) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, наблюдается значительное снижение среднего значения токов утечки затвора (рисунок 1). Это, вероятно, обусловлено пассивацией атомами азота дефектов, как в оксиде кремния, так и на его границе раздела с Si. В результате несоответствий параметров кристаллических решеток кремния и оксида кремния на границе раздела образуются E' и P_b -центры. После проведения БТО на границе SiO₂/Si создается высокая концентрация атомов азота [5], которые встраиваются в дефекты структуры с последующей компенсацией оборванных и напряженных связей. В результате чего происходит ликвидация ловушек, вносящих основной вклад в токи утечки.

Наибольшее снижение средней величины тока утечки затвора транзистора ($\langle I_G \rangle$) по сравнению с контрольными приборами наблюдается для образцов с ИИ азота энергией 40 кэВ дозой $D_{N^+} = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Для приборов с указанной дозой ИИ наблюдается также большее снижение токов утечки по сравнению с образцами, им-

плантрованными N^+ энергией 25 кэВ. В данном случае ввиду большей длины процированного пробега N^+ с энергией 40 кэВ максимум распределения концентрации атомов азота расположен ближе к области переходного нестехиометрического слоя границы раздела полученного подзатворного оксида с монокристаллическим кремнием, что сопровождается более эффективной пассивацией поверхностных состояний.

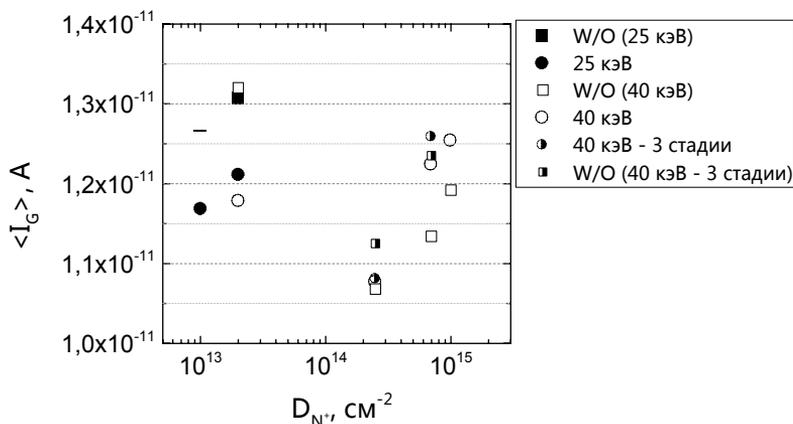


Рис 1. Зависимость средней величины тока утечки затвора транзистора $\langle I_G \rangle$ от дозы ионно-имплантированного азота D_{N^+} для образцов, имплантированных ионами азота с энергиями 25 и 40 кэВ, и соответствующих им контрольных образцов (W/O)

При увеличении доз имплантации до $7 \cdot 10^{14} - 1 \cdot 10^{15} cm^{-2}$ наблюдается рост величины токов утечки азотированного подзатворного диэлектрика МОП-транзисторов по сравнению с контрольными образцами. Это, вероятно, связано с увеличением количества пострadiационных дефектов, как в оксиде кремния, так и на его границе раздела с Si, которые не отжигаются при последующих термообработках. При выращивании подзатворного оксида на ионно-нарушенной матрице кремния её дефектность способствует возникновению структурных нарушений как в самом оксиде, так и на его границе раздела с кремнием. Как было ранее установлено [4], основным механизмом токов утечки затвора является туннелирование через ловушки в области границы раздела SiO_2/Si . В данном случае рост величины токов утечки при увеличении доз имплантации может быть связан с увеличением вклада туннелирования носителей заряда по ловушкам, в качестве которых выступают нескомпенсированные связи дефектов (E' и P_b -центров).

Следует отметить, что для приборов, имплантированных N^+ с энергией 40 кэВ дозой $2,5 \cdot 10^{14} cm^{-2}$, наблюдался незначительный рост $\langle I_G \rangle$. Однако в случае азотирования подзатворного диэлектрика трехстадийным процессом с аналогичной суммарной дозой имплантированных ионов азота наблюдается снижение значений токов утечки затвора по сравнению с контрольными образцами (рисунок 1), что может быть связано с отжигом дефектов при каждом из трех процессов БТО. Происходит также частичная пассивация радиационных дефектов атомами азота.

Исследования зависимости уровня шума токов утечки затвора (L_{I_G}) n -канальных МОП-транзисторов от дозы имплантации ионов азота, и их сравнение с соответст-

вующими им контрольными образцами (рисунок 2) показали, что для образцов, азотированных методом ИИ дозами $(1-2) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, наблюдается снижение уровня шума. Основной вклад в низкочастотные шумовые колебания токов утечки затвора вносят медленные поверхностные состояния на границе раздела SiO_2/Si со стороны оксида кремния – E' -центры, расположенные в переходном нестехиометрическом слое SiO_x [6–8]. Таким образом, снижение уровня шума в МОП-структурах, созданных с применением дополнительной операции ИИ азота, может быть связано со снижением плотности поверхностных состояний на границе раздела SiO_2/Si . Большая часть остаточных радиационных нарушений в процессе БТО отжигается, а оставшиеся нарушения в нестехиометрическом слое Si_xO_y пассивируются атомами азота. В результате локализации азота на границе раздела SiO_2/Si происходит частичная пассивация E' -центров атомами азота. Возрастание L_{IG} для образцов с $D_{N^+} = 2,5 \cdot 10^{14} - 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ обусловлено повышением концентрации E' -центров в нестехиометрическом слое SiO_x вследствие выращивания слоя диэлектрика на кремниевой матрице, нарушенной большими дозами ИИ азота.

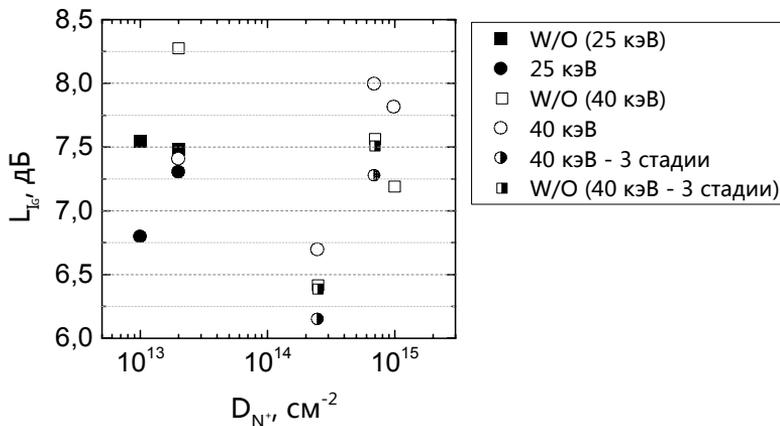


Рис. 2. Зависимость уровня шума токов утечки затвора n -канальных МОП-транзисторов L_{IG} (V_G от -10 до 10 В) от дозы имплантированного азота (D_{N^+}) для образцов, имплантированных ионами азота энергиями 25 кэВ либо 40 кэВ, и контрольных образцов (W/O)

При проведении трехстадийного процесса (три последовательных процесса ионной имплантации азота чередуются с тремя процессами БТО) наблюдается уменьшение значений уровня шума токов утечки по сравнению с образцами, азотированными одностадийной ионной имплантацией с аналогичной суммарной дозой ИИ. Таким образом, последовательное проведение трех операций БТО для суммарной дозы $N^+ 2,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ приводит к отжигу значительной части постимплантационных дефектов. Снижение концентрации дефектов способствует уменьшению числа поверхностных состояний, что положительно сказывается на характеристиках получаемых устройств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что проведение дополнительной операции ионной имплантации азота при изготовлении n -канальных МОП-транзисторов позволяет снизить как величину, так и уровень шумов тока утечки затвора при дозах имплантации $(1-2) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. Значительное снижение тока утечки обусловлено локализацией атомов азота в процессе БТО в области нестехиометрической части границы раздела Si/SiO₂ и эффективной пассивацией поверхностных состояний. При повышении доз имплантации до $2,5 \cdot 10^{14} - 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ наблюдается превышение обоих параметров по сравнению с контрольными образцами. Это, вероятно, связано с увеличением количества пострадиационных дефектов, как в SiO₂, так и на его границе раздела с Si, которые не отжигаются при последующих термообработках. Такими дефектами являются E' -центры, расположенные в переходном нестехиометрическом слое SiO_x со стороны оксида. Установлено, что проведение трехступенчатого процесса (три последовательных процесса ионной имплантации азота чередуются с тремя процессами БТО) с аналогичной суммарной дозой ИИ позволяет существенно снизить плотность пострадиационных дефектов. Это обуславливает снижение как величины, так и уровня шумов токов утечки затвора n -канальных МОП-транзисторов по сравнению с образцами, азотированными одностадийной ИИ с аналогичной суммарной дозой, а также по сравнению с соответствующими контрольными образцами, сформированными без дополнительной ионной имплантации азота.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Baliga, V.J. Advanced power MOSFET concepts / V.J. Baliga. – Springer Science & Business Media, 2010. – 578 p.
2. Красников, Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов / Г.Я. Красников – Акционерное общество Рекламно-издательский центр «ТЕХНОСФЕРА», 2011. – 800 с.
3. Оджаев, В.Б., Панфиленко, А.К., Петлицкий, А.Н., Просолович, В.С., Ковальчук, Н.С., Соловьев, Я.А., Филипня, В.А., Шестовский, Д.В. 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.
4. Электрофизические характеристики силовых МОП-транзисторов, дополнительно имплантированных ионами азота. / В.Б. Оджаев [и др.] // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2022. – № 3. – С. 81–92.
5. Спектры нарушенного полного внутреннего отражения азотированных структур SiO₂/Si / В.Б. Оджаев и др. // Журнал прикладной спектроскопии. – 2022. – Т. 89, №. 4. – С. 498–504.
6. Fleetwood, D.M. Defects in Microelectronic Materials and Devices / D.M. Fleetwood, R.D. Schrimpf. – CRC press, 2008. – 770 p.
7. Fleetwood, D.M. Border traps and bias-temperature instabilities in MOS devices / D.M. Fleetwood // Microelectronics Reliability. – 2018. – V. 80. – P. 266–277.
8. Grasser, T. Noise in Nanoscale Semiconductor Devices / T. Grasser. – Springer Nature, 2020. – 736 p.