

ВЛИЯНИЕ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ АЗОТА НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СИЛОВЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ

В. Б. Оджаев¹, А. К. Панфиленко², А. Н. Петлицкий², В. С. Просолович¹,
Н. С. Ковальчук², Я. А. Соловьев², В. А. Филипеня², Д. В. Шестовский²

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

²⁾ Открытое акционерное общество «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга
«ИНТЕГРАЛ», ул. Казинца И.П., д.121А, 220108 Минск, Беларусь,

Исследованы силовые МОП-транзисторы с вертикальной структурой. Дополнительно в часть приборов проводилась ионная имплантация азота с энергиями 20 кэВ и 40 кэВ в диапазоне доз $1 \times 10^{13} - 5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ через защитный оксид толщиной 20 нм. Для одной группы пластин проводился сначала быстрый термический отжиг (БТО), затем снятие оксида (прямой порядок), для другой группы – обратный порядок. Установлено, что при прямом порядке термообработки для образцов, изготовленных с дополнительной операцией имплантации N^+ , происходит увеличение порогового напряжения. При обратном порядке термообработки существенных различий в величине порогового напряжения для образцов, созданных с дополнительной имплантацией азота, и контрольных не наблюдается. Показано, что в диапазоне напряжений $V_G = 0 \dots -0,3 \text{ В}$ ток стока образцов, изготовленных с применением прямого порядка термообработки, выше, чем для контрольных образцов, а при обратном порядке термообработки – ниже. Полученные результаты объясняются различием в процессах генерации, трансформации и отжига радиационных дефектов на границе раздела Si/SiO_2 при прямом и обратном режимах БТО.

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

INFLUENCE OF ION IMPLANTATION OF NITROGEN ON THE ELECTROPHYSICAL PARAMETERS OF POWER MOS-TRANSISTORS

V. B. Odzaev¹, A. K. Panfilenko², A. N. Pyatlitskiy², V. S. Prasolovich¹,
N. S. Kovalchuk², Ya. A. Soloviev², V. A. Filipenia², D. V. Shestovski²

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

²⁾ JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company,
121A Kazintsa Street, 220108 Minsk, Belarus
Corresponding author: V. S. Prasolovich (prosolovich@bsu.by)

Power MOSFET transistors with vertical structure are investigated. Additionally, in some devices, ion implantation of nitrogen with energies of 20 keV and 40 keV was carried out in a dose range of $1 \times 10^{13} - 5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ through a sacrificial oxide 20 nm thick. For one group of wafers, rapid thermal annealing was first carried out, then oxide removal (forward order), for the other group – reverse order. It was established that in the direct order of heat treatment for the samples prepared with the additional operation of N^+ implantation, the

threshold voltage increases. With the reverse order of heat treatment, no significant differences in the value of the threshold voltage for the samples created with additional implantation of nitrogen and the control ones are observed. It is shown that in the voltage range $V_G = 0 \dots -0.3$ V the drain current of the samples made using the direct order of heat treatment is higher than for the control samples, and in the reverse order of heat treatment it is lower. The obtained results are explained by the difference in the processes of generation, transformation, and annealing of radiation defects at the Si/SiO₂ interface in the forward and reverse *RTA* regimes.

Key words: gate dielectric; ion implantation; nitrogen ions; power MOS transistors.

ВВЕДЕНИЕ

Основной проблемой при создании пленок изолятора подзатворного диэлектрика МОП-транзисторов является получение требуемой оптимальной структуры диэлектрической пленки, обеспечивающей эффективный захват носителей заряда на ловушки, а так же обладающей высокой инжекционной способностью и низкой зарядовой дефектностью. Всё это обуславливает необходимость комплексного и всестороннего исследования процесса формирования плёнки с целью оптимизации её параметров, необходимых для повышения стабильности и надежности приборов. Оксид кремния имеет низкую плотность поверхностных состояний на границе Si/SiO₂ и малую (10^{17} см⁻³) концентрацию дефектов (ловушек) в объеме. Захват электронов и дырок в слое оксида приводит к накоплению заряда и деградации приборов. Нитрид кремния, наоборот, имеет высокую (10^{19} – 10^{20} см⁻³) концентрацию электронных и дырочных ловушек. Оксинитрид кремния SiO_xN_y сочетает преимущества оксида и нитрида кремния. В работах [1, 2] предложены способы улучшения эксплуатационных характеристик (величина заряда пробоя, ток насыщения, ток утечки затвора и т.д.) управляющих МОП транзисторов сверхбольших интегральных схем (СБИС) путем азотирования подзатворного диэлектрика или его границ раздела с монокристаллическим кремнием методами нитрования, ионной имплантации (ИИ) или плазмостимулированными процессами. Авторами [3–5] установлено влияние количества ионно-имплантированного азота на пороговое напряжение, крутизну вольт-амперной характеристики и величину заряда на границе Si/SiO₂ для субмикронных MOSFET с толщиной подзатворного диэлектрика 2–7 нм. Однако толщина подзатворного оксида может оказывать существенное влияние на процессы, происходящие в приповерхностных слоях или на границах раздела, и, соответственно, на характеристики полученных устройств. В настоящей работе исследовалось влияние азотирования подзатворного оксида методом ИИ на электрофизические параметры силовых МОП транзисторов с толщиной подзатворного диэлектрика 42 нм.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследовались силовые *p*-МОП-транзисторы с вертикальной структурой (PMOSFET), полученные на основе метода двойной диффузии. Приборы формировались на кремниевых пластинах *p*-типа проводимости с удельным сопротивлением $\rho = 0,005$ Ом·см ориентации (100) с эпитаксиальным слоем *p*-типа ($\rho = 2$ Ом·см). Области базы транзисторов формировались ИИ фосфора с энергией 80 кэВ дозой 5×10^{14} см⁻². Азот имплантировался в активную область структуры прибора через защитный оксид толщиной 20 нм энергиями 20 кэВ и 40 кэВ в диапазоне доз 1×10^{13} – 5×10^{14} см⁻² в одну половину кремниевой пластины. Пластины подвергались

БТО при температурах 900 °С или 1000 °С длительностью 15 с и химическому удалению защитного оксида. Для одной группы пластин проводилось сначала БТО с последующим снятием оксида (прямой порядок, F), а для другой группы – сначала снятие оксида, а потом пластины подвергались БТО (обратный порядок, B). Затем проводилось выращивание оксида затвора толщиной 42 нм и последующие операции по формированию прибора. Параллельно исследовались контрольные образцы, изготовленные на второй половине тех же кремневых пластин, прошедшие все этапы формирования прибора, но без ионной имплантации азота (W/O). Измерения вольт-амперных (ВАХ) характеристик проводились на измерителе параметров полупроводниковых приборов *Agilent B1500A* с зондовой станцией *Cascade Summit 11000B-AP*.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведена зависимость порогового напряжения транзисторов от дозы имплантированного азота (D_{N^+}). Видно, что при прямом порядке термообработки для образцов, изготовленных с дополнительной операцией ИИ N^+ , происходит увеличение порогового напряжения. Это может быть связано с увеличением как концентрации заряженных центров на границе раздела Si/SiO₂, так и количества встроенного

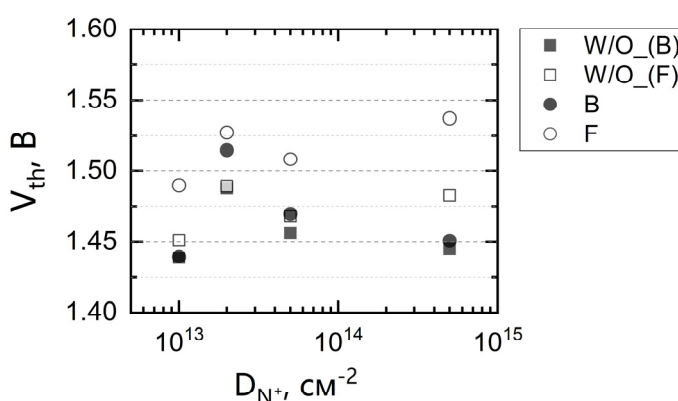


Рисунок 1 – Зависимость порогового напряжения транзисторов от дозы имплантированного азота (D_{N^+} , см⁻²) при прямом (F) и обратном (B) порядке термообработки для образцов, имплантированных N^+ , и контрольных образцов (W/O)

заряда в диэлектрике вследствие формирования радиационных нарушений при дополнительной имплантации ионов азота. Наибольшие различия величины порогового напряжения наблюдаются при прямом порядке термообработки для дозы имплантации N^+ 5×10^{14} см⁻², что обусловлено возрастанием числа постимплантационных дефектов [6]. Если доза имплантации азота превышает 5×10^{14} см⁻² в кремниевой подложке могут образовываться дислокационные петли [3]. Для энергии имплантации 40 кэВ увеличение порогового напряжения по сравнению с контрольными образцами может быть дополнительно связано с образованием радиационных дефектов на большей глубине от границы раздела Si/SiO₂, часть радиационных дефектов при проведении БТО не аннигилирует на поверхности, а остается в объеме кремния, и впоследствии локализуется вблизи границы раздела Si/SiO₂. Для дозы 5×10^{13} см⁻² на пороговое напряжение также оказывает влияние образование большого количества радиационных дефектов, возможно также образование комплексов дефектов и дислокаций [2]. Слабый эффект для образцов 1×10^{13} см⁻² обусловлен аннигиляцией радиационных дефектов и испарением атомов азота с поверхности пластины.

При обратном порядке термообработки существенных различий в величине порогового напряжения для образцов, созданных с дополнительной имплантацией азота, и контрольных не наблюдается. При таком порядке термообработки в процессе БТО на поверхности Si происходит аннигиляция части радиационных дефектов. Ввиду отсутствия защитного оксида формирование крупных комплексов дефектов не происходит. Исключение составляют образцы с энергией имплантации 40 кэВ вследствие локализации постимплантационных дефектов вблизи границы раздела Si/SiO₂. При прямом порядке БТО такая аннигиляция вследствие наличия защитного оксида существенно затруднена, в результате как на границе раздела Si/SiO₂, так и в полученном слое оксида происходит накопление пострадиационных дефектов.

На рис. 2 представлены зависимости тока стока (I_D) и крутизны (g) полевых транзисторов в триодном режиме ($V_D = -0,1$ В) от дозы имплантированного азота и контрольных образцов (W/O). Видно, что в диапазоне напряжений $V_G = 0 \dots -0,3$ В ток стока образцов, изготовленных с применением прямого порядка термообработки, выше, чем для контрольных образцов, а для обратного порядка ниже по сравнению с контрольными образцами.

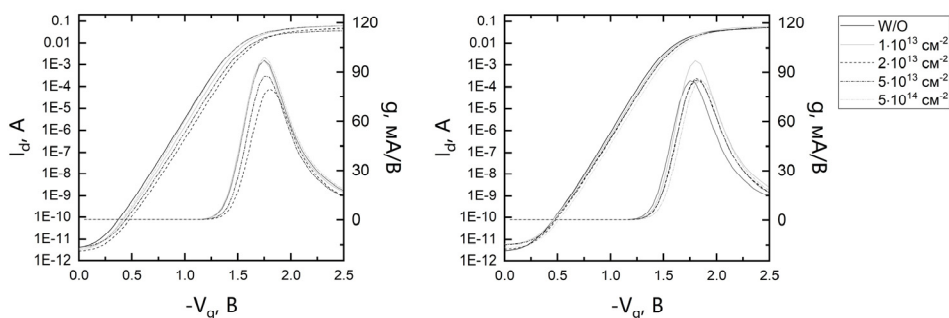


Рисунок 2 – Зависимости тока стока (I_D) и крутизны (g) полевых транзисторов в триодном режиме $V_G = -0,1$ В контрольных образцов (W/O) и образцов, дополнительно имплантированных ионами азота от напряжения на затворе, а) – прямой порядок БТО; б) – обратный порядок БТО

Наибольшие различия наблюдаются для образцов при дозе $N^+ 5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ для обоих видов проведения БТО. При прямом порядке это может быть связано с наличием повышенной по сравнению с контрольными образцами концентрации ловушек (быстрых) вблизи границы и на границе Si/SiO₂. Носители заряда будут захватываться на эти ловушки вследствие наличия диффузионного тока через сток и исток. При обратном порядке большая часть остаточных радиационных нарушений отжигается, а оставшиеся нарушения пассивируются атомами азота на поверхности Si при проведении БТО ввиду отсутствия защитного оксида. При прямом порядке БТО такой аннигиляции не будет из-за наличия защитного оксида, в результате, как на границе раздела Si/SiO₂, так и в полученном слое оксида будут накапливаться пострадиационные дефекты. Отсутствие эффекта для образцов имплантированных N^+ дозой $1 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ обусловлено аннигиляцией радиационных дефектов и испарением атомов азота с поверхности пластины. При $V_D = -3$ В в триодном режиме эффект не так ярко выражен, что обусловлено большими величинами тока сток-исток в режиме отсечки из-за более быстрой перезарядкой ловушек.

Смещение ВАХ вдоль оси напряжений в подпороговой области, линейной в экспоненциальном масштабе, связано с наличием положительного заряда, который

может находиться как в оксиде, так и на границе раздела Si/SiO₂. Образование положительного заряда происходит как вследствие наличия повреждений подложки (радиационных дефектов в Si), на которой впоследствии выращивается оксид, так и наличия напряжений растягивающего характера ввиду присутствия атомов азота на границе раздела Si/SiO₂ [1]. Для обратного порядка этот эффект менее выражен, так как происходит как аннигиляция радиационных дефектов, так и испарение атомов азота с поверхности пластины кремния при проведении БТО.

Из анализа зависимости крутизны g от напряжения на затворе видно, что для всех образцов, имплантированных азотом, кроме дозы $1 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ (В), наблюдается снижение максимального значения крутизны и смещение вправо максимума кривой. В [1] было показано, что формирование нового азотированного слоя SiO₂, имеющего более высокое значение модуля Юнга, чем у неазотированного оксида, приводит к возникновению в диэлектрике внутренних напряжений растягивающего характера, которые могут приводить к деградации крутизны для p -канальных транзисторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что при прямом порядке БТО для образцов, изготовленных с дополнительной операцией ИИ N^+ , происходит увеличение порогового напряжения по сравнению с контрольными образцами. Наибольшие различия величины порогового напряжения наблюдаются для дозы имплантации $N^+ 5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$. При обратном порядке термообработки существенных различий в величине порогового напряжения для образцов, созданных с дополнительной имплантацией азота, и контрольных не наблюдается. Показано, что в диапазоне напряжений $V_G = 0 \dots -0,3 \text{ В}$ ток стока образцов, изготовленных с применением прямого порядка термообработки, выше, чем для контрольных образцов, а при обратном порядке термообработки – ниже по сравнению с контрольными образцами. Наибольшие различия наблюдаются при дозе $N^+ 5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ для обоих видов БТО. Полученные результаты для прямого порядка термообработки обусловлены как увеличением концентрации заряженных центров на границе раздела Si/SiO₂, так и 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 формирование крупных дефектно-примесных комплексов не происходит.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Красников, Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП транзисторов / Г.Я. Красников – М.: «ТЕХНОСФЕРА», 2011. – 800 с.
2. Adam L.S. On implant-based multiple gate oxide schemes for system-on-chip integration / L.S. Adam, C. Bowen, M.E. Law // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2003. – Vol. 50, № 3. P. 589–600.
3. Ultrathin gate oxide grown on nitrogen-implanted silicon for deep sub-micron CMOS transistors / I. - H. Nam [et al.] // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2001. – Vol. 48, № 10. – С. 2310–2316.
4. High Performance 0.2 μm CMOS with 25 Å Gate Oxide Grown on Nitrogen Implanted Silicon / C.T. Liu [et al.] // Technical Digest International Electron Devices Meeting. – 1996. – С. 499.
5. Channel engineering in sub-quarter-micron MOSFETs using nitrogen implantation for low voltage operation / A. Furukawa [et al.] // Digest of Technical Papers - 1996 Symposium on VLSI Technology / IEEE. – 1996. – С. 62–63.
6. Annealing Effects on Q_{BD} of Ultra-Thin Gate Oxide Grown on Nitrogen Implanted Silicon / I.-H. Nam [et al.] // Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea SD. – 2000. – Vol. 37, № 3. – С. 6–13 (на корейском).