

## МЕХАНИЗМ НИТРИДИЗАЦИИ СЛОЕВ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ФОТОННОЙ ОБРАБОТКЕ В АЗОТНОЙ АТМОСФЕРЕ

В. А. ПИЛИПЕНКО<sup>1)</sup>, Н. С. КОВАЛЬЧУК<sup>1)</sup>, Я. А. СОЛОВЬЁВ<sup>1)</sup>, Д. В. ШЕСТОВСКИЙ<sup>1)</sup>,  
В. М. АНИЩИК<sup>2)</sup>, В. В. ПОНАРЯДОВ<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>«Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл»,  
ул. Казинца, 121а, 220108, г. Минск, Беларусь

<sup>2)</sup>Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

**Аннотация.** Методом времяпролетной масс-спектропии вторичных ионов исследованы профили распределения концентрации связей Si—N в системе Si—SiO<sub>2</sub> после нитридации диоксида кремния путем импульсной фотонной обработки в азотной атмосфере, обеспечивающей нагрев некогерентным потоком излучения от кварцевых галогенных ламп, который направлен на нерабочую сторону кремниевой подложки, до температуры 1150 °С примерно за 7 с. Слои диоксида кремния толщиной 17,7 нм были получены пирогенным окислением легированных бором подложек монокристаллического кремния с удельным сопротивлением 12 Ом·см и ориентацией (100) при температуре 850 °С в течение 40 мин. Установлено, что нитридизация диоксида кремния при импульсной фотонной обработке в азотной атмосфере протекает за счет ускоренной диффузии ионов N<sup>+</sup>, образующихся из-за туннелирования и термоэлектронной эмиссии электронов с поверхности слоя кремния. Нитридизация приводит к формированию на поверхности диоксида кремния и границе раздела Si—SiO<sub>2</sub> слоя с максимальной концентрацией азота путем уменьшения энергии активации образования связей Si—N, обусловленного электронным возбуждением в кремнии и возможным разрывом связей Si—O, Si—OH, Si—Si. Уменьшение энергии

### Образец цитирования:

Пилипенко ВА, Ковальчук НС, Соловьёв ЯА, Шестовский ДВ, Анищик ВМ, Понарядов ВВ. Механизм нитридации слоев диоксида кремния при импульсной фотонной обработке в азотной атмосфере. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2025;2:68–73.  
EDN: MHDBOB

### For citation:

Pilipenka UA, Kovalchuk NS, Solovjov JA, Shestovsky DV, Anishchik VM, Ponariadov VV. Mechanism of nitridisation of silicon dioxide layers during pulsed photon treatment in a nitrogen ambient. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2025;2:68–73. Russian.  
EDN: MHDBOB

### Авторы:

**Владимир Александрович Пилипенко** – доктор технических наук, член-корреспондент НАН Беларуси, профессор; заместитель директора по научному развитию государственного центра «Белмикроанализ».

**Наталья Станиславовна Ковальчук** – кандидат технических наук, доцент; заместитель генерального директора, главный инженер.

**Ярослав Александрович Соловьёв** – доктор технических наук, доцент; заведующий отраслевой лабораторией новых технологий и материалов.

**Дмитрий Викторович Шестовский** – кандидат физико-математических наук; инженер-технолог отдела перспективных технологических процессов.

**Виктор Михайлович Анищик** – доктор физико-математических наук, профессор; профессор кафедры физики твердого тела и нанотехнологий физического факультета.

**Владимир Васильевич Понарядов** – кандидат физико-математических наук, доцент; заведующий учебной лабораторией кафедры физики твердого тела и нанотехнологий физического факультета.

### Authors:

**Uladimir A. Pilipenka**, doctor of science (engineering), corresponding member of the National Academy of Sciences of Belarus, full professor; deputy director for scientific development at the state centre «Belmicroanalysis».

[office@bms.by](mailto:office@bms.by)

**Natalia S. Kovalchuk**, PhD (engineering), docent; deputy general director and chief engineer.

[nkovalchuk@integral.by](mailto:nkovalchuk@integral.by)

**Jaroslav A. Solovjov**, doctor of science (engineering), docent; head of the laboratory of new technologies and materials.

[jsolovjov@integral.by](mailto:jsolovjov@integral.by)

<https://orcid.org/0000-0001-6332-7631>

**Dmitri V. Shestovsky**, PhD (physics and mathematics); engineer-technologist at the department of advanced technological processes.

[dshestovski@integral.by](mailto:dshestovski@integral.by)

<https://orcid.org/0000-0002-4259-3276>

**Viktor M. Anishchik**, doctor of science (physics and mathematics), full professor; professor at the department of solid state physics and nanotechnologies, faculty of physics.

[anishchik@bsu.by](mailto:anishchik@bsu.by)

<https://orcid.org/0000-0003-3294-2484>

**Vladimir V. Ponariadov**, PhD (physics and mathematics), docent; head of the training laboratory, department of solid state physics and nanotechnologies, faculty of physics.

[ponariadov@bsu.by](mailto:ponariadov@bsu.by)

активации происходит в результате изменения напряжений, углов и силы связей Si—O из-за фотонно-температурного воздействия и образования данных связей на поверхности кремния с деформированной кристаллической решеткой ввиду ее механической полировки.

**Ключевые слова:** кремний; диоксид кремния; импульсная фотонная обработка; нитридизация; масс-спектрокопия вторичных ионов.

## MECHANISM OF NITRIDISATION OF SILICON DIOXIDE LAYERS DURING PULSED PHOTON TREATMENT IN A NITROGEN AMBIENT

U. A. PILIPENKA<sup>a</sup>, N. S. KOVALCHUK<sup>a</sup>, J. A. SOLOVJOV<sup>a</sup>, D. V. SHESTOVSKY<sup>a</sup>,  
V. M. ANISHCHIK<sup>b</sup>, V. V. PONARIADOV<sup>b</sup>

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

<sup>b</sup>Belarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: J. A. Solovjov (jsolovjov@integral.by)

**Abstract.** The distribution profiles of Si—N bond concentrations in the Si—SiO<sub>2</sub> system were investigated using time-of-flight mass spectroscopy of secondary ions after nitridisation of silicon dioxide by pulsed photon treatment in a nitrogen ambient, which provides heating by an incoherent radiation flux from quartz halogen lamps directed at the non-working side of the silicon substrate to a temperature of 1150 °C in approximately 7 s. Silicon dioxide layers with a thickness of 17.7 nm were obtained by pyrolytic oxidation of boron-doped single-crystal silicon substrates with a resistivity of 12 Ω · cm and orientation (100) at a temperature of 850 °C for 40 min. It has been established that silicon dioxide nitridisation during pulsed photon treatment in a nitrogen ambient proceeds due to accelerated diffusion of N<sup>−</sup> ions formed as a result of tunnelling and thermionic emission of electrons from the surface of the silicon layer. Nitridisation leads to the formation of a layer with maximum nitrogen concentration on the surface of silicon dioxide and at the Si—SiO<sub>2</sub> interface by reducing the activation energy of Si—N bond formation caused by electronic excitation in silicon and possible rupture of Si—O, Si—OH and Si—Si bonds. The reducing the activation energy occurs as a result of changes in the stresses, angles and strength of Si—O bonds due to photonic and thermal effects and the formation of these bonds on the surface of silicon with a deformed crystal lattice due to its mechanical polishing.

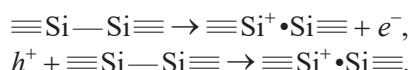
**Keywords:** silicon; silicon dioxide; pulsed photon treatment; nitridisation; mass spectroscopy of secondary ions.

### Введение

Нитридизация, или обогащение азотом, слоев диоксида кремния широко применяется в технологии производства интегральных схем с комплементарной структурой металл – окисел – полупроводник в целях управления скоростью процесса окисления, улучшения однородности толщины окисного слоя, повышения его устойчивости при воздействии горячих носителей, а также подавления диффузии бора в областях стока – истока *p*-типа [1–3]. Наиболее распространенными способами нитридизации слоев диоксида кремния являются ионная имплантация азота перед термическим окислением кремния и высокотемпературный стационарный отжиг в азотной атмосфере [4]. В обоих случаях отмечается локализация азота преимущественно на границе раздела Si—SiO<sub>2</sub>.

Механизм образования связей Si—N на границе раздела Si—SiO<sub>2</sub> предполагает закрепление атомов азота на межфазной границе кремния и окисла при достижении поверхности кремниевой подложки в результате диффузии, обусловленной возникающим градиентом концентрации азота и наличием на данной границе значительных упругих напряжений [5]. Граница раздела является тонким переходным слоем нестехиометрического состава SiO<sub>x</sub>, в котором атомы кремния имеют степени окисления Si<sup>1+</sup>, Si<sup>2+</sup> и Si<sup>3+</sup> и образуют только следующие группировки: поверхностные состояния, дефекты, появившиеся вследствие несоответствия периодов решеток, парамагнитные *P*<sub>60</sub>-центры (≡Si<sub>3</sub>Si•) с одной нескомпенсированной ковалентной связью атома кремния, а также *E'*-центры (•Si≡O<sub>3</sub>) [6; 7].

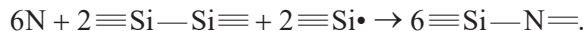
Максимальная концентрация *P*<sub>60</sub>-центров находится около границы раздела Si—SiO<sub>2</sub> со стороны кремния, а наибольшая концентрация *E'*-центров – со стороны слоя состава SiO<sub>x</sub> [7]. В соответствии с публикациями [8–10] к их образованию может приводить высвобождение электрона либо захват дырок на нейтральный диамагнитный Si—Si-дефект:



В случае нитридации диоксида кремния за счет взаимодействия азота с деформированными связями Si—Si образование связей Si—N наиболее вероятно произойдет при протекании реакции



Согласно работам [8–10] связи Si—N также появляются при взаимодействии азота с  $P_{b0}$ -центрами в соответствии с реакцией



В результате названных выше процессов снижается плотность поверхностных состояний на границе раздела Si—SiO<sub>2</sub> и уменьшаются процессы деградации МОП- и КМОП-изделий, вызванные горячими электронами [1].

Авторы исследования [11] при изучении нитридации слоев диоксида кремния путем их импульсной фотонной обработки в азотной среде также установили локализацию азота преимущественно на границе раздела Si—SiO<sub>2</sub>. Механизм нитридации применительно к данным условиям требует дополнительного изучения.

Настоящая работа посвящена определению механизма нитридации слоев диоксида кремния в процессе импульсной фотонной обработки в азотной атмосфере.

### Методика проведения эксперимента

Исходные подложки монокристаллического кремния марки КДБ12 ориентации (100) диаметром 100 мм подвергались пирогенному окислению при температуре 850 °С в течение 40 мин. Толщина полученных слоев диоксида кремния составила 17,7 нм. Далее подложки были подвержены импульсной фотонной обработке в азотной атмосфере путем нагрева некогерентным потоком излучения от кварцевых галогенных ламп, направленным на их нерабочую сторону. Мощность светового потока источника излучения подбиралась таким образом, чтобы обеспечить нагрев подложек до температуры 1150 °С примерно за 7 с.

Профили распределения концентрации связей Si—N в системе Si—SiO<sub>2</sub> по глубине образцов определялись методом времяпролетной масс-спектропии системой TOF-SIMS-5 (*IONTOF GmbH*, Германия). Чувствительность метода составляла  $5 \cdot 10^{15}$ – $1 \cdot 10^{16}$  атомов на 1 см<sup>3</sup>. Травление образцов осуществлялось потоком ионов Cs<sup>+</sup> с величиной тока 100 нА, ускоряемых напряжением 2 кВ. Изменения концентрации анализируемых элементов определялись в импульсном режиме с временем цикла 50–100 мкс. Для анализа использовались первичные ионы Вt<sup>+</sup> с энергией 30 кэВ. Расположение границы раздела Si—SiO<sub>2</sub> выявлялось относительно профиля распределения концентрации атомов кремния изотопа <sup>30</sup>Si<sup>–</sup>.

### Результаты и их обсуждение

Изучение профилей распределения концентрации связей Si—N в системе Si—SiO<sub>2</sub> по глубине слоя диэлектрика после его импульсной фотонной обработки в азотной атмосфере показало, что их максимум приходится на границу раздела Si—SiO<sub>2</sub> и внешнюю поверхность слоя диоксида кремния (рис. 1). Вместе с тем отмечена значительно меньшая их концентрация как в остальном объеме слоя, так и в кремнии. Такое распределение концентрации связей Si—N при импульсной фотонной обработке диоксида кремния в азотной среде указывает на сходство с механизмом нитридации при ионной имплантации азота перед окислением кремния и стационарной высокотемпературной обработкой в азотной среде [4]. Однако формирование подобного распределения концентрации связей за такое короткое время нагрева возможно лишь при ускорении диффузии азота в диоксид кремния и при торможении его диффузии из межфазного пространства вглубь кремниевой пластины.

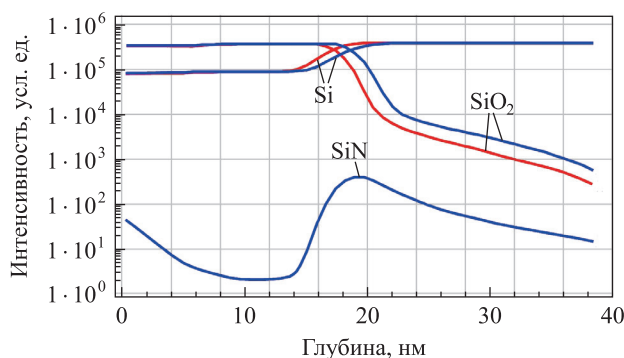


Рис. 1. Профили распределения концентрации Si, SiO<sub>2</sub> и SiN по глубине системы Si—SiO<sub>2</sub> до импульсной фотонной обработки в азотной атмосфере (красная линия) и после нее (синяя линия)  
Fig. 1. Profiles of the concentration distribution of Si, SiO<sub>2</sub> and SiN along the depth of the Si—SiO<sub>2</sub> system before pulsed photon treatment in a nitrogen atmosphere (red line) and after it (blue line)

Рассмотрим возможные механизмы протекания описанных выше процессов при импульсной фотонной обработке системы Si – SiO<sub>2</sub> в азотной атмосфере. Наиболее вероятно, что увеличение скорости диффузии азота в диоксид кремния обусловливается образованием ионов N<sup>+</sup>, которые из-за малых размеров имеют высокий коэффициент диффузии в окисел и низкую энергию активации формирования связей с оборванными связями кремния. Низкая энергия активации объясняется тем, что связь Si—N длиннее связи Si—O. Образованию ионов N<sup>+</sup> способствуют туннелирование и термоэлектронная эмиссия электронов с поверхностных слоев кремния из-за малой толщины окисла. Данным процессам содействуют такие факторы, как электронное возбуждение в кремнии, разрыв связей Si—Si и воздействие высоких температур, которые сопровождают импульсную фотонную обработку в азотной среде. Эти факторы также способствуют уменьшению энергии активации образования связей Si—N, значительно ускоряя его завершение как в поверхностных слоях кремниевой подложки, так и в диоксиде кремния.

Снижение энергии активации появления связей Si—N подтверждается непродолжительностью нитридации диоксида кремния и ходом профилей их распределения в системе Si – SiO<sub>2</sub>. Так, образование данных связей при импульсной фотонной обработке в азотной атмосфере, обеспечивающей нагрев до температуры 1150 °C примерно за 7 с, протекает в 250 раз быстрее, чем при стационарном отжиге в азоте при температуре 1100 °C в течение 30 мин. Сопоставление профилей распределения концентрации данных связей в системе Si – SiO<sub>2</sub> по глубине диоксида кремния после его импульсной фотонной обработки в азотной атмосфере (см. рис. 1) и стационарного отжига (рис. 2), описанного нами в работе [4], позволило установить следующую особенность их распределения на межфазной границе раздела Si – SiO<sub>2</sub> и в самом слое окисла. Так, после импульсной фотонной обработки в азотной среде максимальная концентрация связей Si—N наблюдается на межфазной границе раздела Si – SiO<sub>2</sub> и внешней стороне слоя диоксида кремния при их небольшой концентрации в объеме самого слоя. После длительной термической обработки азот находит энергетически выгодное положение для формирования данных связей только в дефектной структуре переходного слоя Si – SiO<sub>2</sub>, что позволяет ему локализоваться. В первом случае образование связи Si—N происходит по всей глубине слоя из-за более низкой энергии активации появления данной связи по сравнению с энергией активации диффузии азота в диоксид кремния. Во втором случае энергия активации диффузии азота в диоксид кремния превышает энергию активации формирования связи Si—N как на поверхности слоя, так и в его объеме, что энергетически не способствует ее появлению. Дополнительное влияние на нитридацию диоксида азота при импульсной фотонной обработке в азотной атмосфере также оказывают процессы, связанные с перестройкой структуры диоксида азота, а именно с изменением напряжений, углов и силы связей Si—O. Данные преобразования происходят из-за фотонно-температурного воздействия и появления связей Si—O на поверхности кремния с деформированной кристаллической решеткой в результате ее механической полировки, что может приводить к разрыву связей Si—O и Si—OH с последующим заполнением их азотом.

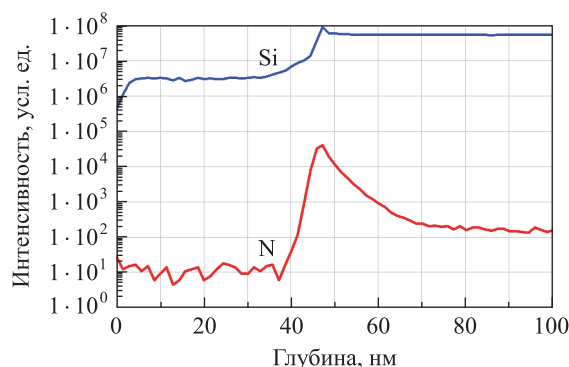


Рис. 2. Профили распределения концентрации Si и N по глубине системы Si – SiO<sub>2</sub> после стационарной термической обработки

Fig. 2. Profiles of the concentration distribution of Si and N along the depth of the Si – SiO<sub>2</sub> system after stationary heat treatment

Необходимым условием локализации азота в межфазном пространстве является торможение его диффузии из данного слоя в объем кремния, отображенное на рис. 1. Для пояснения данного эффекта рассмотрим диффузию азота и формирование его связей с междоузельными атомами кремния на границе раздела Si – SiO<sub>2</sub> с опорой на зарядовую одномерную модель Ферми. Эти процессы можно считать результатом миграции азота ввиду его многочисленных взаимодействий с окружающими атомами и дефектами кремния. Диффузия может протекать как самостоятельно, так и вместе с дефектами кристаллической решетки.



Для установления того, какой механизм (вакансионный или междоузельный) вносит основной вклад в диффузию азота в кремний, проанализируем энергию активации механизмов, необходимых для данного процесса. Высокое значение энергии активации образования комплекса азота с вакансией (4,4 эВ) [4] делает его формирование маловероятным. В этой связи основным механизмом диффузии азота в кремний будет являться междоузельный механизм. Он состоит в вытеснении узлового атома азота в междоузелье атомами кремния, что обуславливается взаимодействием замещающих атомов примеси с междоузельными атомами кремния из-за их высокой подвижности [2; 12]. Данное взаимодействие приводит к тому, что атомы замещения, имеющие не такой ковалентный радиус, как у кремния, смещаются междоузельными атомами кремния из узлов решетки по механизму Воткинса. Иными словами, азот, находящийся в узле решетки кремния, из-за разницы их ковалентных радиусов и большей энергии связи между ними, чем между кремнием и кремнием [4], смещает узловые атомы кремния к внедренному азоту. Возникающие при этом напряжения изменяют параметр решетки, что вызывает вытеснение азота из узла решетки и его перевод в междоузельное состояние.

При дальнейшей диффузии вытесненные атомы азота могут захватываться междоузельными атомами кремния и становиться неподвижными. Ближайшей областью с большой концентрацией междоузельных атомов кремния является граница раздела Si – SiO<sub>2</sub>, что обуславливает диффузию азота в сторону границы и локализацию его в этом месте. Данный процесс приводит к снижению концентрации азота, диффундирующего в кремний. Глубина механически нарушенного слоя кремния может достигать 100 нм. В таком случае в нем будет отмечаться достаточное количество междоузельных атомов кремния, концентрация которых уменьшается при смещении от межфазной границы раздела Si – SiO<sub>2</sub> вглубь кремния. Это означает, что при взаимодействии кремния с азотом, не захваченным на межфазной границе, на небольшом расстоянии от межфазной границы будет также происходить образование связей Si—N. Поскольку концентрация междоузельных атомов кремния уменьшается с глубиной нарушенного слоя, распределение концентрации связей Si—N должно иметь спадающий характер в кремнии. Данная ситуация отображена на рис. 1.

Следует остановиться на формировании профилей распределения концентрации связей Si—N в системе Si – SiO<sub>2</sub> по глубине диоксида кремния при его нитридации путем предварительного ионного легирования кремния азотом и последующего термического окисления (рис. 3). Проведенные нами исследования в этом направлении [4] показали, что такой подход позволяет получить профиль распределения концентрации связей Si—N, аналогичный профилю распределения концентрации этих связей при импульсной фотонной обработке диоксида кремния в азотной атмосфере. Однако для реализации данного подхода требуется применение большего числа технологических операций, чем в случае нитридации диоксида кремния путем импульсной фотонной обработки в азотной среде. Соответственно, предложенный подход является более предпочтительным.

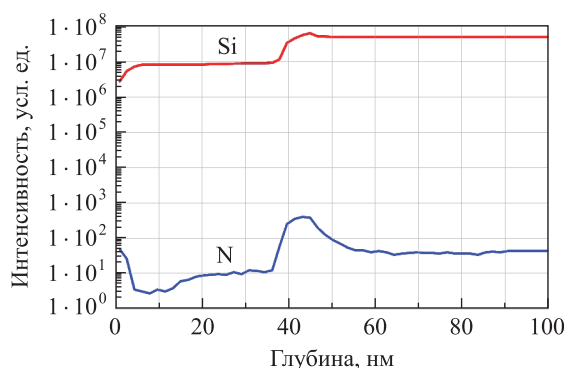


Рис. 3. Профили распределения концентрации Si и N по глубине системы Si – SiO<sub>2</sub> при ее нитридации путем предварительного ионного легирования кремния азотом и последующего термического окисления

Fig. 3. Profiles of the concentration distribution of Si and N along the depth of the Si – SiO<sub>2</sub> system during its nitridation by preliminary ion doping of silicon with nitrogen and subsequent thermal oxidation

При создании *p*-канальных МОП-транзисторов следует учитывать, что формирование отраженных на рис. 3 профилей распределения концентрации связей Si—N в системе Si – SiO<sub>2</sub> на границах диоксида кремния и в нем приводит к необходимости ограничения диффузии бора из затвора в подзатворный диэлектрик и *p*-канал транзистора. Как было показано в работах [3; 13], наличие в диэлектрике атомов азота в значительной степени подавляет диффузию бора за счет образования пар азот – междоузельный атом кремния, что не позволяет сформировать пару бор – вакансия для реализации парной диффузии,

являющейся для бора основным механизмом диффузии. Подавление диффузии бора обеспечивает как повышение воспроизводимости порогового напряжения транзисторов данного типа ввиду отсутствия проникновения бора в область  $p$ -канала и понижения уровня легирования затвора, так и надежность затвора из-за отсутствия диффузии бора в подзатворный диэлектрик [3].

### Заключение

Методом времяпролетной масс-спектропии вторичных ионов исследованы профили распределения концентрации связей Si—N в системе Si—SiO<sub>2</sub> после нитридации диоксида кремния путем импульсной фотонной обработки в азотной атмосфере, обеспечивающей нагрев некогерентным потоком излучения от кварцевых галогенных ламп, который направлен на нерабочую сторону кремниевой подложки, до температуры 1150 °C примерно за 7 с. Нитридизация слоя диоксида кремния при импульсной фотонной обработке в азотной среде протекает за счет ускоренной диффузии ионов N<sup>+</sup>, образующихся из-за туннелирования и термоэлектронной эмиссии электронов с поверхностных слоев кремния. Рассматриваемый процесс приводит к формированию на поверхности диоксида кремния и границе раздела Si—SiO<sub>2</sub> слоя с максимальной концентрацией азота путем уменьшения энергии активации появления связей Si—N, обусловленного электронным возбуждением в кремнии и возможным разрывом связей Si—O, Si—OH, Si—Si. Уменьшение энергии активации происходит в результате изменения напряжений, углов и силы связей Si—O из-за фотонно-температурного воздействия и образования данных связей на поверхности кремния с деформированной кристаллической решеткой ввиду ее механической полировки.

### Библиографические ссылки

1. Guarin FJ, Rauch SE, La Rosa G, Brelsford K. Improvement in hot carrier lifetime as a function of N<sub>2</sub> ion implantation before gate oxide growth in deep submicron NMOS devices. *IEEE Electron Device Letters*. 1999;20(12):602–604. DOI: 10.1109/55.806098.
2. 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.
3. Park H, Ilderem V, Jasper C, Kaneshiro M, Christiansens J, Jones KS. The effects of implanted nitrogen on diffusion of boron and evolution of extended defects. *Materials Research Society Online Proceedings Library*. 1997;469:425–430. DOI: 10.1557/PROC-469-425.
4. Оджаев ВБ, Просолович ВС, Петлицкий АН, Ковальчук НС, Соловьев ЯА, Жигулин ДВ и др. Локализация атомов азота в структурах Si—SiO<sub>2</sub>. *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С, Фундаментальные науки*. 2022;11: 65–79. DOI: 10.52928/2070-1624-2022-39-11-65-79.
5. Челядинский АР, Явид ВЮ, Венгерэк П. Накопление радиационных дефектов в кремнии при имплантации ионов азота. В: Белорусский государственный университет. *Взаимодействие излучений с твердым телом. Материалы V Международной научной конференции; 6–9 октября 2003 г.; Минск, Беларусь*. Минск: БГУ; 2003. с. 206–208. EDN: OOFGPU.
6. Берченко НН, Медведев ЮВ. Химия границы раздела сложный полупроводник – собственный диэлектрик. *Успехи химии*. 1994;63(8):665–672. DOI: 10.1070/rc1994v063n08abeh000108.
7. Ryan JT, Lenahan PM, Grasser T, Enichlmair H. Recovery-free electron spin resonance observations of NBTI degradation. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers. *2010 IEEE International reliability physics symposium; 2010 May 2–6; Anaheim, USA*. Anaheim: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2010. p. 43–49. DOI: 10.1109/IRPS.2010.5488854.
8. DiMaria DJ, Stasiak JW. Trap creation in silicon dioxide produced by hot electrons. *Journal of Applied Physics*. 1989;65(6): 2342–2356. DOI: 10.1063/1.342824.
9. Гриценко ВА, Журавлев КС, Надолинный ВА. Квантование электронного спектра и локализация электронов и дырок в кремниевых квантовых точках. *Физика твердого тела*. 2011;53(4):803–806. EDN: RCSJQR.
10. Li FM, Nathan A. *CCD image sensors in deep-ultraviolet: degradation behavior and damage mechanisms*. Berlin: Springer; 2005. 231 p. DOI: 10.1007/b139047.
11. Ковальчук НС, Пилипенко ВА, Соловьев ЯА. Влияние импульсной фотонной обработки в среде азота на оптические и электрофизические характеристики слоев двуокиси кремния и ее границы с кремнием. *Доклады БГУИР*. 2025;23(3):5–11. DOI: 10.35596/1729-7648-2025-23-3-5-11.
12. Челядинский АР, Оджаев ВБ. Эффект Воткинса в полупроводниках. Явление и приложения в микроэлектронике. *Вестник Белорусского государственного университета. Серия 1, Физика. Математика. Информатика*. 2011;3:10–17. EDN: TAZLPJ.
13. Красников ГЯ. *Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. Часть 1*. Москва: Техносфера; 2002. 416 с.

Получена 04.04.2025 / исправлена 11.04.2025 / принята 14.04.2025.  
Received 04.04.2025 / revised 11.04.2025 / accepted 14.04.2025.