

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-275-280

Влияние импульсной фотонной обработки в среде азота на надёжность подзатворного оксида кремния, полученного пирогенным окислением

Н.С. Ковальчук, В.А. Пилипенко, Я.А. Соловьёв

ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,
ул. Казинца, 121А, г. Минск 220108, Беларусь

Поступила 22.05.2025

Принята к печати 08.09.2025

Надёжность подзатворного диэлектрика является ключевым фактором его применения в электронной компонентной базе современных устройств электроники. Время наработки на отказ слоёв оксида кремния зависит от плотности дефектов, обусловленных наличием гидроксильных групп и водорода в его объёме, и оборванных связей кремния на границе раздела с оксидом. Целью данной работы являлось изучение влияния импульсной фотонной обработки в среде азота на надёжность подзатворного оксида кремния, полученного методом пирогенного окисления. Слои оксида кремния толщиной 17,7 нм получали методом пирогенного окисления подложек монокристаллического кремния, легированных бором с удельным сопротивлением 12 Ом·см диаметром 100 мм с ориентацией (100) при температуре 850 °С в течение 40 мин. Импульсную фотонную обработку выполняли путём нагрева в азотной среде до 1150 °С за 7 с некогерентным потоком излучения от кварцевых галогенных ламп, направленным на нерабочую сторону подложки. Время наработки диэлектрических слоёв на отказ определяли методом ускоренных испытаний с применением тестовых МОП-конденсаторов. Показано, что импульсная фотонная обработка пирогенного оксида в среде азота приводит за счёт уплотнения оксида кремния и образования связей Si–N к увеличению времени наработки на отказ в 2,45 раза, что на 29,8 % больше, чем при обработке в естественных атмосферных условиях.

Ключевые слова: оксид кремния, пирогенное окисление, импульсная фотонная обработка, вольт-амперная характеристика, наработка на отказ

Адрес для переписки:

Соловьёв Я.А.
ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга
«ИНТЕГРАЛ»,
ул. Казинца, 121А, г. Минск 220108, Беларусь
e-mail: jsolovjov@integral.by

Address for correspondence:

Solovjov Ja.A.
JSC «Integral» – «Integral» Holding Management Company,
Kazinka str., 121A, Minsk 220108, Belarus
e-mail: jsolovjov@integral.by

Для цитирования:

Н.С. Ковальчук, В.А. Пилипенко, Я.А. Соловьёв.
Влияние импульсной фотонной обработки в среде азота
на надёжность подзатворного оксида кремния, полученного
пирогенным окислением.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 3. С. 275–280.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-275-280

For citation:

Kovalchuk NS, Pilipenko VA, Solovjov JaA.
Effect of pulsed photon processing in a nitrogen ambient
on the reliability of gate silicon oxide obtained by pyrogenic oxidation.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(3):275–280. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-275-280

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-275-280

Effect of Pulsed Photon Processing in a Nitrogen Ambient on the Reliability of Gate Silicon Oxide Obtained by Pyrogenic Oxidation

N.S. Kovalchuk, V.A. Pilipenko, Ja.A. Solovjov

JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» holding managing company
Kazintsa str., 121A, Minsk 220108, Belarus

Received 22.05.2025

Accepted for publication 08.09.2025

Abstract

Reliability of a gate dielectric is a key factor in its application for modern electronic devices' electronic component base. Silicon oxide layers' operating free-running time depends on defects' density due to presence of hydroxyl groups and hydrogen in its volume, and broken silicon bonds at the interface with the oxide. Purpose of this work was to study effect of pulsed photon processing in a nitrogen ambient on the reliability of gate silicon oxide obtained by pyrogenic oxidation. Silicon oxide layers with a thickness of 17.7 nm were obtained by pyrogenic oxidation of single crystal silicon substrates doped with boron having resistivity of $12 \Omega \times \text{cm}$, diameter of 100 mm, with an orientation of (100) at a temperature of 850 °C for 40 min. Pulsed photon processing was performed by heating in a nitrogen ambient upto 1150 °C in 7 s under an incoherent radiation flux from quartz halogen lamps directed at the non-working side of the substrate. The dielectric layers' failure time was determined by accelerated testing using test MOSFET capacitors. It was shown that pulsed photon treatment of pyrogenic oxide in a nitrogen ambient lead to a 2.45-fold increase in operating free-running time due to densification of silicon dioxide and formation of Si-N bonds, which was 29.8 % longer than after processing in natural atmospheric conditions.

Keywords: silicon oxide, pyrogenic oxidation, pulsed photon processing, volt-ampere characteristic, operating time to failure

Адрес для переписки:

Соловьёв Я.А.
ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга
«ИНТЕГРАЛ»,
ул. Казинца, 121А, г. Минск 220108, Беларусь
e-mail: jsolovjov@integral.by

Address for correspondence:

Solovjov Ja.A.
JSC «Integral» – «Integral» Holding Management Company,
Kazinka str., 121A, Minsk 220108, Belarus
e-mail: jsolovjov@integral.by

Для цитирования:

Н.С. Ковальчук, В.А. Пилипенко, Я.А. Соловьёв.
Влияние импульсной фотонной обработки в среде азота
на надёжность подзатворного оксида кремния, полученного
пирогенным окислением.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 3. С. 275–280.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-275-280

For citation:

Kovalchuk NS, Pilipenko VA, Solovjov JaA.
Effect of pulsed photon processing in a nitrogen ambient
on the reliability of gate silicon oxide obtained by pyrogenic oxidation.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(3):275–280. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-3-275-280

Введение

Тонкие слои оксида кремния, получаемые термическим окислением, широко распространены в качестве подзатворного диэлектрика в изделиях интегральной электроники с комплементарной структурой металл–оксид–полупроводник (КМОП) [1]. В свою очередь, надёжность подзатворного диэлектрика является ключевым фактором его применения в электронной компонентной базе современных устройств электроники [2–5]. К одному из важнейших показателей надёжности относят время наработки на отказ диэлектрического слоя, которое, главным образом, определяется наличием примесных и структурных дефектов в исследуемом материале [6].

Наиболее совершенные и бездефектные слои оксида кремния получают термическим окислением кремния в сухом кислороде при температуре $\approx 1000^\circ\text{C}$. Однако при данных температурах происходит диффузионное перераспределению примесей в сформированных структурах активных областей. Поэтому в КМОП-технологии используют пироженное окисление при температуре $\approx 850^\circ\text{C}$ в среде кислорода, увлажнённого молекулами водяного пара, получаемого в результате реакции атомарно чистых кислорода и водорода [1]. Однако процесс окисления в таких условиях характеризуется увеличением количества дефектов в объёме оксида кремния, обусловленных наличием гидроксильных групп и водорода, а также на границе раздела с оксидом, вызванных ростом поверхностной плотности оборванных связей кремния.

Улучшить совершенство слоёв пироженного оксида кремния и соответственно их надёжность позволяет модификация путём импульсной фотонной обработки в естественных атмосферных условиях при температуре от 1100 до 1150°C как исходных кремниевых подложек, так и сформированных слоёв подзатворного диэлектрика [7]. В работе [8] показано, что импульсная фотонная обработка в азотной атмосфере слоёв оксида кремния, полученных пироженным окислением, также приводит к уменьшению в них плотности структурных и примесных дефектов за счёт нитридации. Это, в свою очередь, должно улучшить показатели надёжности таких слоёв. Однако данный вопрос требует дополнительного изучения.

Целью данной работы являлось изучение влияния импульсной фотонной обработки в среде азота на надёжность слоёв подзатворного оксида кремния, полученного методом пироженного окисления.

Методика проведения эксперимента

Слои оксида кремния толщиной $17,7\text{ нм}$ получали методом пироженного окисления подложек монокристаллического кремния марки КДБ 12 диаметром 100 мм с ориентацией (100) при температуре 850°C в течение 40 мин. После этого на части подложек выполняли импульсную фотонную обработку в азотной среде путём нагрева до 1150°C за время около 7 с некогерентным потоком излучения от кварцевых галогенных ламп, направленным на нерабочую сторону пластины.

Надёжность слоёв оксида кремния определяли по времени наработки на отказ при помощи метода ускоренных испытаний с применением тестовых МОП-конденсаторов, изложенного в работе [9]. Он основывается на экспоненциальной зависимости времени наработки на отказ подзатворного диэлектрика от подаваемого на него напряжения. Это позволяет за счёт подачи на МОП-конденсатор ступенчато-нарастающего напряжения определить величину его пробоя при различных скоростях изменения приложенного к нему напряжения и на этой основе рассчитать время наработки на отказ подзатворного диэлектрика (T_{op_time}) в соответствии с выражением:

$$T_{(op_time)} = (K_{scan}\beta)^{(-1)} \exp[(\beta(V_{br} - V_{oper}))], \quad (1)$$

где K_{scan} – скорость развёртки, В/с; β – коэффициент, В $^{-1}$; V_{br} – напряжение пробоя диэлектрика для заданной величины K_{scan} , В; V_{oper} – напряжение эксплуатации микросхемы, В.

Величину коэффициента β рассчитывали исходя из результатов определения напряжений пробоя V_{br_1} и V_{br_2} на уровне тока утечки 1 мА для скоростей развёртки $K_{scan_1} = 1,00\text{ В/с}$ и $K_{scan_2} = 0,25\text{ В/с}$ соответственно согласно выражению:

$$\beta = (V_{br_1} - V_{br_2})^{(-1)} \ln(K_{scan_1}^{(-1)} K_{scan_2}).$$

Тестовые испытания МОП-конденсаторов проводились для двух видов подзатворного оксида, полученного пироженным окислением

кремния, до и после импульсной фотонной обработки в среде азота. Измерения напряжений пробоя осуществляли на комплексе анализа характеристик микросхем модели B1500 ф. Agilent (США) с зондовой станцией Summit 11000 AP ф. Cascade (США).

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ вольт-амперных характеристик (ВАХ) показывает, что разница между напряжениями пробоя для двух скоростей

развёртки напряжения составляет 0,84 В для исходного пироженного оксида (рисунок 1) и 0,85 В после проведения импульсной фотонной обработки в среде азота (рисунок 2). При скорости развёртки 1,00 В/с напряжение пробоя исходного пироженного оксида имело величину 17,30 В, а при скорости развёртки 0,25 В/с напряжение пробоя снижалось до значения 16,46 В. Для слоя окисла, прошедшего импульсную фотонную обработку в среде азота, данные величины составляют 18,00 и 17,14 В соответственно.

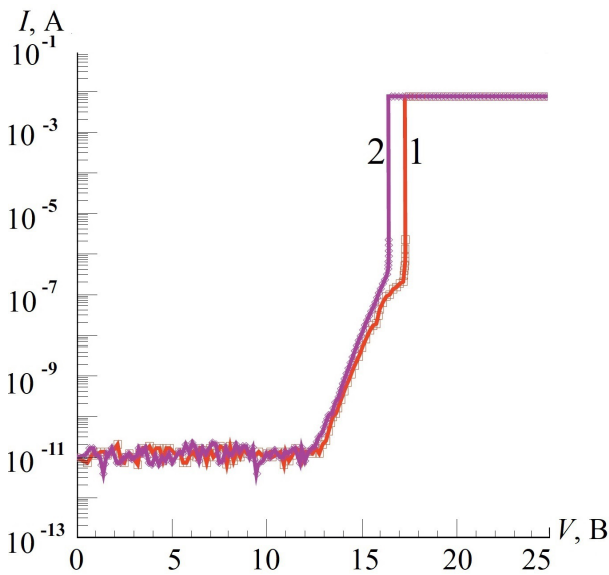


Рисунок 1 – Результаты испытания наработки на отказ подзатворного оксида без импульсной фотонной обработки: 1 – ВАХ при скорости развёртки 1 В/с; 2 – ВАХ при скорости развёртки 0,25 В/с

Figure 1 – Test results of the error-free running time of the gate dielectric without pulse photon processing: 1 – I–V-charts with the scan rate of 1 V/s; 2 – I–V-charts with the scan rate of 0.25 V/s

Исходя из полученных результатов на основании выражений (1) и (2), были рассчитаны численные значения коэффициента β и параметра T_{op_time} . Проведённые расчёты показали, что для исходного пироженного оксида данные величины составляют $1,65 \text{ В}^{-1}$ и 12,6 года, а после проведения импульсной фотонной обработки – $1,61 \text{ В}^{-1}$ и 30,9 года соответственно. Как видно, импульсная фотонная обработка пироженного оксида кремния в среде азота увеличивает его время наработки на отказ в 2,45 раза. Надо

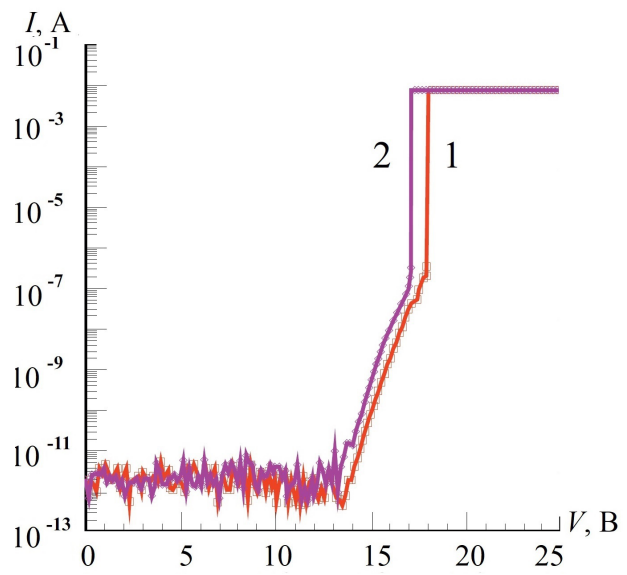


Рисунок 2 – Результаты испытания наработки на отказ подзатворного оксида после импульсной фотонной обработки в среде азота: 1 – ВАХ при скорости развёртки 1 В/с; 2 – ВАХ при скорости развёртки 0,25 В/с

Figure 2 – Test results of the error-free running time of the gate dielectric after pulse photon processing in nitrogen ambient: 1 – I–V-charts with the scan rate of 1 V/sec; 2 – I–V-charts with the scan rate of 0.25 V/s

отметить, что такое увеличение параметра T_{op_time} для диэлектрика после импульсной фотонной обработки в среде азота значительно превышает данные, полученные в работе [6] при аналогичной обработке диэлектрика в естественных атмосферных условиях, где время наработки на отказ исходного пироженного оксида составило 12,5 года, а после импульсной фотонной обработки – 21,7 года, т. е. в 1,74 раза меньше. При этом толщина диэлектрика, исследованного в работе [6] составляла 42,5 нм,

что почти в 2,4 раза больше толщины диэлектрика, используемого в нашем случае. Тем не менее время наработки на отказ этих диэлектриков до импульсной фотонной обработки практически одинаково. Это означает, что толщина диэлектрика мало сказывается на величине параметра T_{op_time} , который согласно выражениям (1) и (2) полностью зависит от разности напряжений пробоя для двух скоростей их развёртки и величины напряжения пробоя диэлектрика для заданной скорости его изменения.

Несмотря на то, что напряжение пробоя увеличивается с ростом толщины диэлектрика, это почти не изменяет величины параметра T_{op_time} , поскольку данное влияние компенсируется поведением коэффициента β . Это обуславливается тем, что время наработки на отказ обратно пропорционально его величине, а также экспоненциально зависит от величины β и напряжения пробоя. С ростом напряжения пробоя, имеющего место при увеличении толщины диэлектрика, величина коэффициента уменьшается, что не приводит к изменению времени наработки на отказ. Снижение величины β компенсирует увеличение времени наработки на отказ за счёт повышения напряжения пробоя, вызванного ростом толщины диэлектрика. Иная картина имеет место при снижении напряжения пробоя с уменьшением толщины диэлектрика. В этом случае компенсация падения напряжения пробоя происходит за счёт роста величины β , что не приводит к изменению времени наработки на отказ диэлектрика с уменьшением его толщины.

Это означает, что основным фактором, влияющим на параметр T_{op_time} , является структура оксида кремния, которая при одинаковых условиях проведения процессов окисления является идентичной. В этом случае время наработки на отказ диэлектриков, имеющих разные толщины, должно быть практически одинаковым, что и имеет место в действительности. В этой связи можно говорить о том, что основной причиной увеличения времени наработки на отказ слоёв оксида кремния, прошедших импульсную фотонную обработку в среде азота, по сравнению со слоями, прошедшими обработку в естественных атмосферных условиях, является большая структурная перестройка слоя за счёт как уплотнения,

так и нитридации. Так, если для пирогенного оксида, обработанного в естественных атмосферных условиях, величина параметра T_{op_time} составляет 21,7 года, то после обработки в азотной атмосфере достигает 30,9 года. То есть время наработки на отказ только за счёт нитридации слоя оксида кремния, приводящей к образованию связей Si–N, увеличивается на 9,2 года или на 29,8 %.

Таким образом, импульсная фотонная обработка в среде азота слоёв оксида кремния, полученных пирогенным окислением, обеспечивающая нагрев до 1150 °C за 7 с, приводит за счёт уплотнения оксида кремния и образования связей Si–N к увеличению времени наработки на отказ в 2,45 раза, что на 29,8 % больше, чем при обработке в естественных атмосферных условиях.

Заключение

Методом ускоренных испытаний с применением тестовых МОП-конденсаторов изучено влияние импульсной фотонной обработки в среде азота, обеспечивающей нагрев кремниевой пластины некогерентным потоком излучения от кварцевых галогенных ламп, направленным на её нерабочую сторону, до 1150 °C за 7 с, на надёжность слоёв подзатворного оксида кремния, полученного методом пирогенного окисления.

Показано, что импульсная фотонная обработка в среде азота приводит за счёт уплотнения оксида кремния и образования связей Si–N к увеличению времени наработки на отказ в 2,45 раза, что на 29,8 % больше, чем при обработке в естественных атмосферных условиях.

Список использованных источников

1. Doering, R. Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology, 2nd ed. / R. Doering, Y. Nishi. NY: CRC Press, 2007. DOI: 10.1201/9781420017663
2. Харченко, В.А. Проблемы надёжности электронных компонент / В.А. Харченко // Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2015. – Т. 18, № 1. – С. 52–57. DOI: 10.17073/1609-3577-2015-1-52-57
3. Данилин, Н. Проблемы применения перспективной электронной компонентной базы в космосе / Н. Данилин, С. Белослудцев // Современная электроника. – 2006. – № 4. – С. 16–17.

4. Красников, Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов : в 2 ч. / Г.Я. Красников. – М.: Техносфера, 2002. – Ч. 1. – 416 с.

5. Никифоров, А.Ю. Радиационная стойкость электронной компонентной базы систем специальной техники и связи / А.Ю. Никифоров, В.А. Телец // Спецтехника и связь. – 2011. – № 4. – С. 2–4.

6. Солодуха, В.А. Экспрессный контроль надежности подзатворного диэлектрика полупроводниковых приборов / В.А. Солодуха [и др.]. // Приборы и методы измерений. – 2018. – Т. 9, № 4. – С. 306–313. **DOI:** 10.21122/2220-9506-2018-9-4-308-313

7. Pilipenko, V.A. Influence of Fast Thermal Treatment on the Electrophysical Properties of Silicon Dioxide / V.A. Pilipenko, V.A. Solodukha, V.A. Gorushko // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2018. – Vol. 91, No 5. – P. 1337–1341.

DOI: 10.1007/s10891-018-1866-0

8. Ковальчук, Н.С. Влияние импульсной фотонной обработки в среде азота на оптические и электрофизические характеристики слоев двуокиси кремния и ее границы с кремнием / Н.С. Ковальчук, В.А. Пилипенко, Я.А. Соловьёв // Доклады БГУИР. – 2025. – Т. 23, № 3. – С. 5–11.

DOI: 10.35596/1729-7648-2025-23-3-5-11

9. Белоус, А.И. Методы повышения надежности микросхем на основе тестовых структур / А.И. Белоус, А.С. Турцевич, Г.Г. Чигирь. – Германия, LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG Heinrich-Böcking, 2012. – 240 с.

References

1. Doering R, Nishi Y. Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology, 2nd ed. NY: CRC Press, 2007. **DOI:** 10.1201/9781420017663

2. Kharchenko V.A. Reliability Problems of Electronic Components. News Bulletin Materials of Electronic Engineering. 2015;18(1):52-57. (In Russ.).

DOI: 10.17073/1609-3577-2015-1-52-57

3. Danilin N, Belosludtsev S. Application Problems of the Prospective Electronic Component Base in Space. Modern Electronics. 2006;(4):16–17. (In Russ.).

4. Krasnikov GYa. Design-Technological Peculiarities of the Sub-Micron MOS-Transistors : in 2 parts. Moscow, Technosphere Publ. 2002;1;416 p. (In Russ.).

5. Nikiforov AYu, Telets VA. Radiation Resistance of the Electronic Component Base of the Special Equipment and Communications Systems. Special Equipment and Communications. 2011;(4):2-4. (In Russ.).

6. Solodukha VA, Chigir GG, Pilipenko VA, Filipenya VA, Gorushko VA. Reliability Express Control of the Gate Dielectric of Semiconductor Devices. Devices and Methods of Measurements. 2018;9(4):306-313. (In Russ.).

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-4-308-313

7. Pilipenko VA, Solodukha VA, Gorushko VA. Influence of Fast Thermal Treatment on the Electrophysical Properties of Silicon Dioxide. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2018;91(5):1337-1341.

DOI: 10.1007/s10891-018-1866-0

8. Kovalchuk NS, Pilipenko VA, Solovjov JaA. Effect of Pulsed Photon Processing in Nitrogen Ambient on Optical and Electrophysical Characteristics of Silicon Dioxide Layers of Its Boundaries with Silicon. Doklady BGUIR. 2025;23(3):5-11. (In Russ.).

DOI: 10.35596/1729-7648-2025-23-3-5-11

9. Belous AI, Turtsevich AS, Chigir GG. Methods of Enhancing Reliability of Integrated Circuits on the Basis of Test Structures. Germany, LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG Heinrich-Böcking Publ., 2012;240 p. (In Russ.).