

УДК 620.191:621.373.820

ВЛИЯНИЕ БЫСТРОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИСХОДНЫХ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН НА ПРОЦЕСС ИХ ПИРОГЕННОГО ОКИСЛЕНИЯ

**В. М. АНИЩИК¹⁾, В. А. ГОРУШКО²⁾,
В. А. ПИЛИПЕНКО¹⁾, В. В. ПОНАРЯДОВ¹⁾, В. А. СОЛОДУХА³⁾**

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

²⁾Государственный центр «Белмикроанализ» филиала НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл»,
ул. Казинца, 121А, 220108, г. Минск, Беларусь

³⁾ОАО «Интеграл», ул. Казинца, 121А, 220108, г. Минск, Беларусь

Представлены результаты исследования влияния быстрой термической обработки исходных кремниевых пластин на процесс их пирогенного окисления. Показано, что данная обработка приводит к повышению качества двуокиси кремния, сформированной на их поверхности за счет уменьшения толщины нарушенного слоя, оказывающего существенное влияние на начальный этап окисления.

Ключевые слова: быстрая термическая обработка; нарушенный слой; пирогенное окисление; коэффициент преломления.

INFLUENCE OF THE RAPID THERMAL TREATMENT OF THE INITIAL SILICON WAFERS ON THE PROCESS OF THEIR PYROGENIC OXIDATION

**V. M. ANISHCHIK^a, V. A. HARUSHKA^b,
U. A. PILIPENKA^a, V. V. PONARIADOV^a, V. A. SALADUKHA^c**

^aBelarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

^b«Belmikroanaliz» of the branch «Belmikrosistemy», JSC «Integral»,
121A Kazinca Street, Minsk 220108, Belarus

^cIntegral, 121A Kazinca Street, Minsk 220108, Belarus

Corresponding author: V. A. Harushka (office@bms.by)

The work represents the investigation results of influence of rapid thermal treatment of the initial silicon wafers on the process of their pyrogenic oxidation. It is shown that the given treatment results in the quality enhancement of silicon dioxide, formed on their surface owing to thickness reduction of the disrupted layer, substantially influencing the initial stage of the oxidation process.

Key words: rapid thermal treatment; disrupted layer; pyrogenic oxidation; refraction ratio.

Образец цитирования:

Анищик В. М., Горушко В. А., Пилипенко В. А., Понарядов В. В., Солодуха В. А. Влияние быстрой термической обработки исходных кремниевых пластин на процесс их пирогенного окисления // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. 2018. № 2. С. 81–85.

For citation:

Anishchik V. M., Harushka V. A., Pilipenka U. A., Ponariadov V. V., Saladukha V. A. Influence of the rapid thermal treatment of the initial silicon wafers on the process of their pyrogenic oxidation. *J. Belarus. State Univ. Phys.* 2018. No. 2. P. 81–85 (in Russ.).

Авторы:

Виктор Михайлович Анищик – доктор физико-математических наук, профессор; декан физического факультета.

Валентина Алексеевна Горушко – ведущий инженер.

Владимир Александрович Пилипенко – член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук; профессор кафедры физики полупроводников и нанoeлектроники физического факультета.

Владимир Васильевич Понарядов – кандидат физико-математических наук, доцент; заместитель декана физического факультета.

Виталий Александрович Солодуха – кандидат технических наук; генеральный директор.

Authors:

Victor M. Anishchik, doctor of science (physics and mathematics), full professor; dean of the faculty of physics.
dean@bsu.by

Valiantsina A. Harushka, leading engineer.
office@bms.by

Uladimir A. Pilipenka, corresponding member of the National Academy of Sciences of Belarus, doctor of science (engineering); professor at the department of semiconductor physics and nanoelectronics, faculty of physics.
office@bms.by

Vladimir V. Ponariadov, PhD (physics and mathematics), do-
cent; deputy dean of the faculty of physics.
ponariadov@bsu.by

Vitali A. Saladukha, PhD (engineering); general director.

Введение

В настоящее время основной тенденцией увеличения быстродействия интегральных микросхем (ИМС) является непрерывное уменьшение топологических размеров. Повышение функциональной сложности и степени интеграции ИМС выдвигает новые, более жесткие требования к их качеству и надежности, в значительной степени обусловленные свойствами подзатворного диэлектрика, который является ключевым элементом, определяющим стабильность их характеристик. С переходом к субмикронным проектным нормам толщина подзатворного диэлектрика уменьшается от сотен до единиц нанометров. Поскольку тонкий слой диэлектрика формируется за счет поверхности кремния, то его качество во многом зависит от ее состояния перед процессом окисления. Известно, что после химико-механической полировки на поверхности кремния имеется нарушенный слой. А по причине того, что на начальном этапе процесс окисления идет за счет поверхностного слоя кремния с нарушенной кристаллической решеткой, то его дефекты оказывают существенное влияние на структуру диэлектрика, приводя к отсутствию воспроизводимости его структурных и электрических параметров. Кроме того, качество подзатворного диэлектрика зависит от температуры и среды его формирования, которые во многом обуславливают свойства переходного слоя границы раздела Si – SiO₂. Именно он определяет такие характеристики подзатворного диэлектрика, как величина фиксированного заряда и плотность быстрых поверхностных состояний [1].

Цель настоящей работы – исследование возможности использования быстрой термической обработки исходных кремниевых пластин для улучшения структурных параметров подзатворного диэлектрика, полученного путем пирогенного окисления кремния.

Объекты и методика эксперимента

Исследования проводились на пластинах кремния КЭФ-4,5 (кремний электронный, легированный фосфором) и КДБ-12 (кремний дырочный, легированный бором) с ориентацией <100> диаметром 100 мм. Часть исходных кремниевых пластин подвергались быстрой термообработке, которая выполнялась в естественных атмосферных условиях с нерабочей стороны пластины некогерентным оптическим излучением в течение 7 с, обеспечивая нагрев пластин до температуры 1100 °С. Затем путем пирогенного окисления при температуре 850 °С в течение 40 мин формировался подзатворный диэлектрик толщиной 42,5 нм.

На подготовленных таким способом образцах методом спектральной эллипсометрии и фурье-спектрометрии проводились исследования влияния быстрой термической обработки исходных кремниевых пластин на процесс пирогенного окисления кремния.

Результаты исследований и их обсуждение

С помощью метода спектральной эллипсометрии было установлено, что характер распределения толщины двуокси кремния по площади пластины не зависит от типа проводимости кремния и имеет периодичность, определяемую газовым потоком окислителя в диффузионной трубе. При этом толщина окисла для пластин, прошедших быструю термообработку, имеет несколько меньшее значение, чем без обработки (рис. 1). Если для кремния КЭФ-4,5 с обработкой она составляет 48,05 нм, то без обработки – 48,13 нм, а для кремния КДБ-12 – 48,42 и 48,48 нм соответственно. Уменьшение толщины окисла на пластинах с предварительной термообработкой связано с тем, что те из них, которые не проходили быструю термообработку, имеют большую глубину нарушенного слоя, а значит, и меньшую, чем в объеме, плотность атомов кремния. Это приводит к увеличению скорости окисления нарушенного слоя, так как в нем коэффициент диффузии кислорода будет выше, чем в объемном кремнии, следовательно, и толщина окисла будет больше. Как видно из приведенных данных, разность по толщине окисла составляет от 0,8 нм и менее. Это говорит о том, что нарушенный слой влияет на скорость окисления только на начальном этапе процесса окисления. Исходя из приведенных результатов, можно утверждать, что наличие нарушенного слоя незначительно воздействует на процесс пирогенного окисления кремния. Характер распределения толщины двуокси кремния по площади пластины для кремния КДБ-12 имеет аналогичный характер, поэтому в статье приводятся иллюстрации только для кремния КЭФ-4,5.

Распределение коэффициента преломления двуокси кремния по площади пластины носит такой же характер, как и для ее толщины, и не зависит от типа проводимости кремния (рис. 2). Однако само распределение в случае пластин с предварительной быстрой термообработкой значительно ближе к гауссовому, чем в случае пластин без обработки, что указывает на более совершенную структуру пленок в первом случае. Об этом свидетельствует и величина коэффициента преломления пленок, которая имеет более низкое значение на пластинах с предварительной обработкой. Если без обработки для кремния

КЭФ-4,5 она составляет в среднем 1,493, то с обработкой – 1,487. Для кремния КДБ-12 эти величины имели значения в среднем 1,488 и 1,486 соответственно. Учитывая, что коэффициент преломления двуокиси кремния, полученной термическим окислением в среде сухого кислорода, составляет 1,46, то становится понятным, что предварительная быстрая термообработка позволяет получать окисные пленки, по структуре более близкие к пленкам, формируемым при высокотемпературном окислении кремния в сухом кислороде.

Анализ спектров пропускания пленок двуокиси кремния, проведенный с применением фурье-спектрометрии, показал существенное их изменение в случае проведения предварительной быстрой термообработки пластин кремния перед формированием подзатворного диэлектрика (рис. 3). Как показали исследования, данные изменения не зависят от типа проводимости кремния. Кроме того, имеет место существенное увеличение поглощения в области полосы, характеризующей связь Si—O в двуокиси кремния. Небольшой ее сдвиг (на $0,9\text{--}2,5\text{ см}^{-1}$) в коротковолновую область и увеличение интенсивности и уменьшение полуширины свидетельствуют об изменении концентрации связей Si—O, их силы и углов между ними, которые, в свою очередь, говорят об изменении микроструктуры, уплотнении и снижении пористости пленки двуокиси кремния, а также об уменьшении напряжений связи Si—O [2]. Это подтверждают ранее проведенные исследования коэффициента преломления данных пленок. Общий сдвиг кривых пропускания во всей области спектра для пластин, прошедших быструю термообработку, по-видимому, связан с увеличением коэффициента поглощения поверхностного слоя кремния за счет его улучшения в процессе твердофазной рекристаллизации нарушенного слоя при быстрой термической обработке.

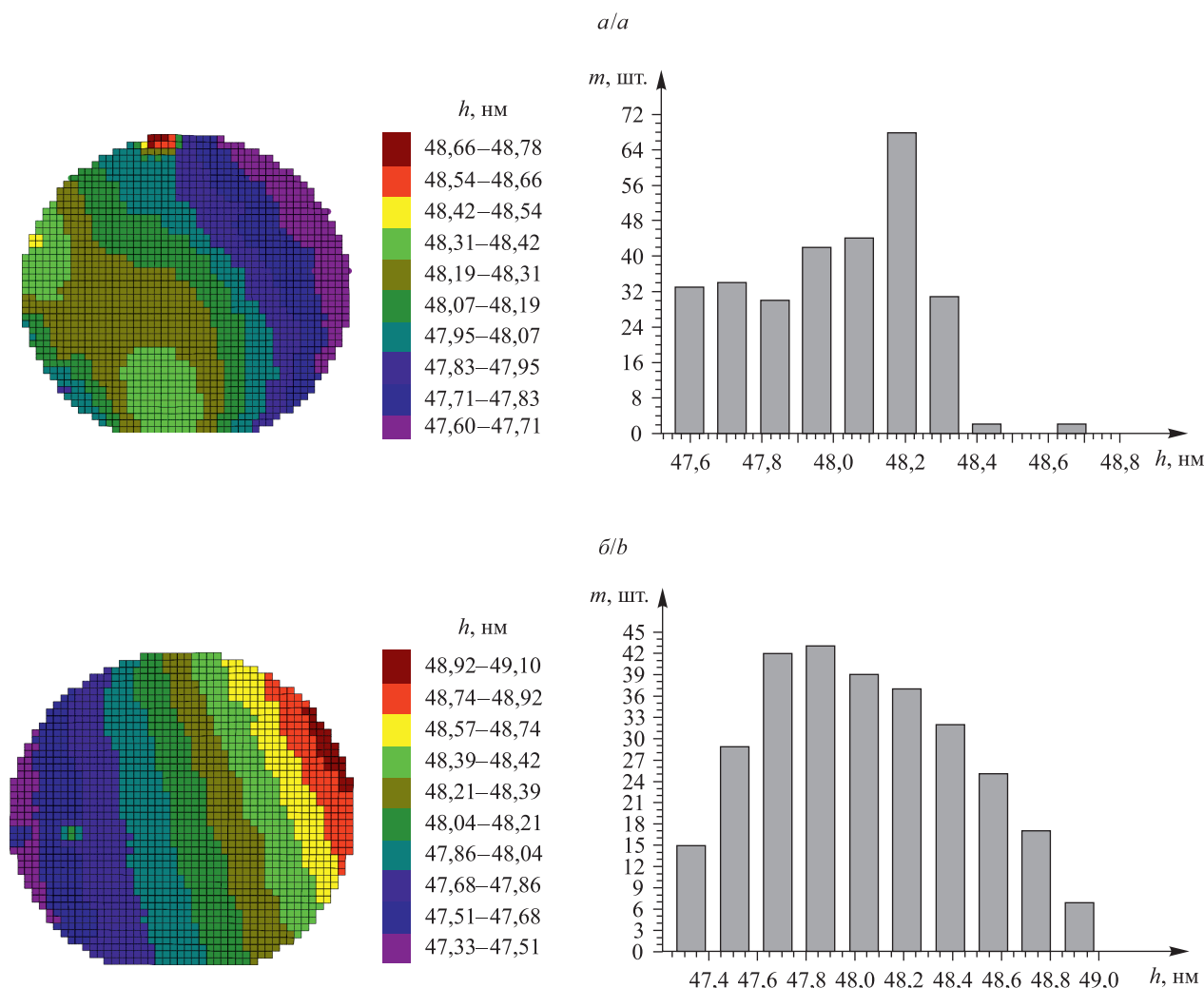


Рис. 1. Карта и гистограмма распределения толщины двуокиси кремния по площади пластины КЭФ-4,5: а – без предварительной быстрой термообработки; б – с предварительной быстрой термообработкой

Fig. 1. Map and histogram for thickness distribution of silicon dioxide as per the KEF-4.5 wafer area: а – without preliminary rapid thermal treatment; б – with preliminary rapid thermal treatment

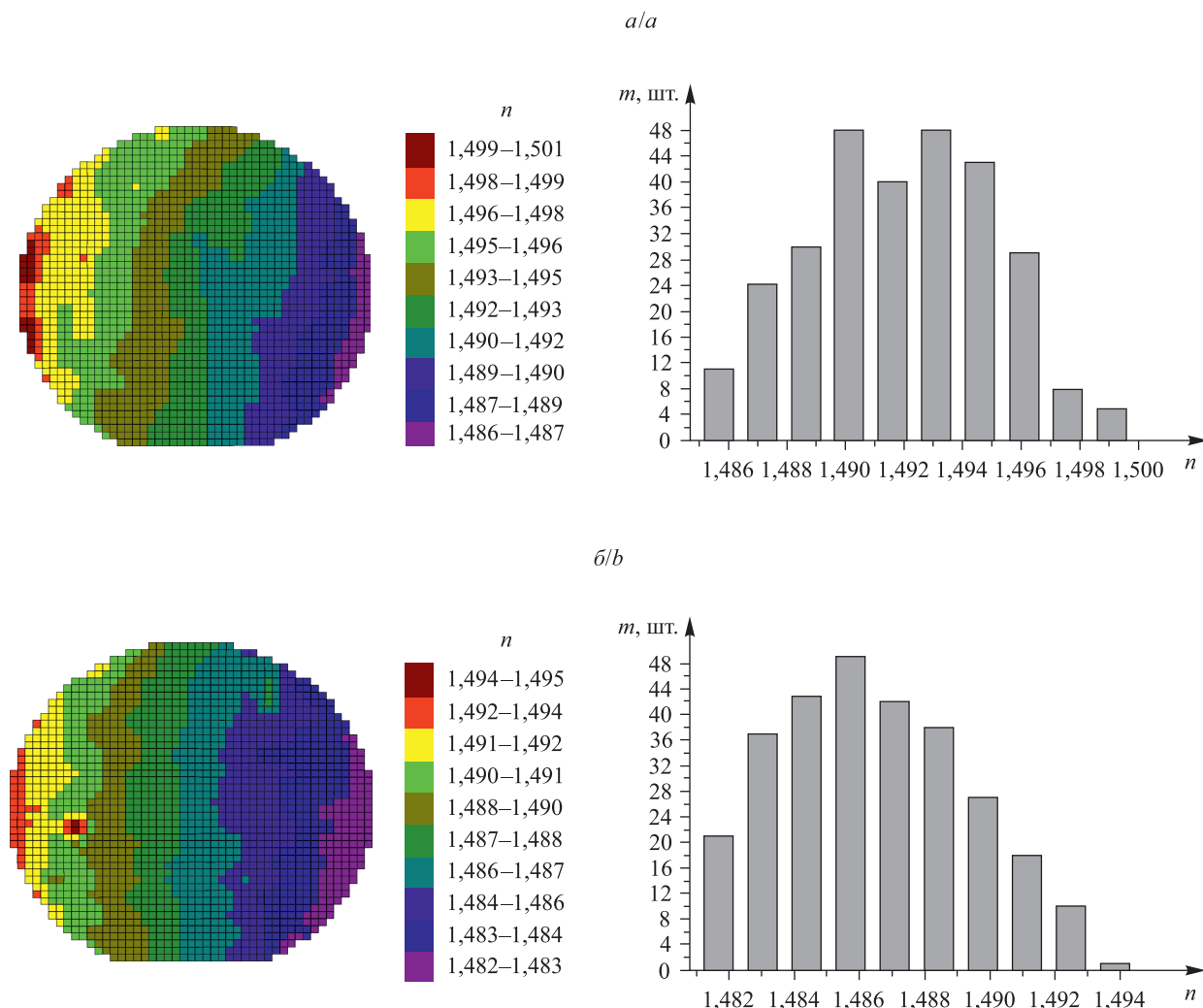


Рис. 2. Карта и гистограмма распределения коэффициента преломления двуоксида кремния по площади пластины КЭФ-4,5: а – без предварительной быстрой термообработки; б – с предварительной быстрой термообработкой
Fig. 2. Map and histogram for refraction ratio distribution of silicon dioxide as per the KEF-4.5 wafer area: а – without preliminary rapid thermal treatment; б – with preliminary rapid thermal treatment

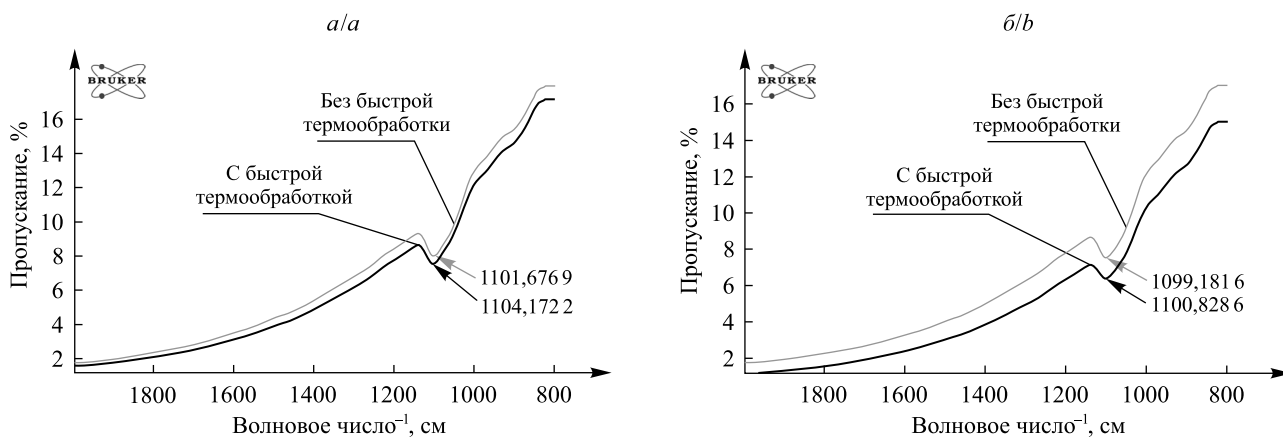


Рис. 3. Спектр пропускания двуоксида кремния на пластинах с предварительной быстрой термообработкой и без нее: а – кремний марки КЭФ-4,5; б – кремний марки КДБ-12
Fig. 3. Transmission spectrum of silicon dioxide on the wafers with preliminary rapid thermal treatment and without it: а – silicon of the KEF-4.5 grade; б – silicon of the KDB-12 grade

На основании результатов исследования влияния быстрой термообработки исходных кремниевых пластин на структуру формируемых слоев двуоксида кремния методом пирогенного окисления можно предложить следующий механизм такого процесса.

При окислении кремниевых пластин рост окисла на 44 % идет за счет подложки кремния. Поскольку на ее поверхности после химико-механической полировки находится слой с деформированной кристаллической решеткой, толщина которого составляет около 5 нм, то при толщине подзатворного диэлектрика 47–49 нм верхний его слой толщиной 12,5 нм формируется за счет данного слоя. Это означает, что микроструктура этой части окисла будет нарушенной, и в ней будут иметь место в большей степени напряженные связи Si—O, оборванные связи Si, не заполненные кислородом, уменьшенная сила связей Si—O, измененные углы связей Si—O. Следовательно, весь окисел можно рассматривать как двухслойную систему с различной микроструктурой по толщине. В связи с тем что быстрая термообработка приводит к уменьшению толщины нарушенного слоя до 1 нм и менее, в процессе термического окисления будут участвовать поверхностные слои кремния, практически не испытывающие деформации кристаллической решетки, а следовательно, формируемая пленка будет иметь более однородную микроструктуру по всей своей толщине.

Заключение

Таким образом, уменьшение толщины нарушенного слоя кремния после быстрой термической обработки снижает его влияние на начальный этап пирогенного окисления, повышая качество подзатворного диэлектрика за счет образования дополнительных связей Si—O, увеличения их силы и уменьшения напряжений, обеспечивая снижение его коэффициента преломления и формирования однородной микроструктуры по всей толщине.

Библиографические ссылки

1. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов : в 2 ч. М. : Техносфера, 2002. Ч. 1.
2. Пилипенко В. А. Быстрые термообработки в технологии СБИС. Минск : Изд. центр БГУ, 2004.

References

1. Krasnikov G. Ya. Konstruktivno-tehnologicheskie osobennosti submikronnykh MOP-tranzistorov [Design-Technological Peculiarities of the Submicron MOS-Transistors] : in 2 parts. Moscow : Tekhnosfera, 2002. Part 1 (in Russ.).
2. Pilipenko V. A. Bystrye termoobrabotki v tekhnologii SBIS [Rapid Thermal Treatments in the VLSI Technology]. Minsk : Publ. Centre of BSU, 2004 (in Russ.).

*Статья поступила в редколлегию 04.04.2018.
Received by editorial board 04.04.2018.*