

УДК 538.975:537.311

МРНТИ 29.19.22:47.09.48

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2022-19-2-29-38>

**УЛУЧШЕНИЕ ПАССИВИРУЮЩИХ СВОЙСТВ ПЛЕНОК SiO₂,
ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ БЫСТРОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА,
ПОСЛЕ ХИМИЧЕСКОЙ RCA ОБРАБОТКИ**

**НУСУПОВ К.Х.¹, БЕЙСЕНХАНОВ Н.Б.¹, СУЛТАНОВ А.Т.¹, ТЫСЧЕНКО И.Е.²,
КУСАЙНОВА А.Ж.¹, БУГЫБАЙ З.К.¹, ЫСКАК К.М.¹**

¹Казахстанско-Британский технический университет, 050000, г. Алматы, Казахстан

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики
полупроводников им. А.В. Ржанова», 630390, Новосибирск, Россия

***Аннотация.** Как известно увеличение эффективности кремниевых солнечных элементов является одной из важнейших задач в современной индустрии альтернативной энергетики. Оптимизация антиотражающего и пассивирующего слоя является наиболее экономичным способом увеличения КПД. В данной работе исследовано влияние предварительной очистки на пассивирующие свойства пленок диоксида кремния (SiO₂), выращенных методом быстрого термического отжига (RTP) при температурах отжига 900 и 950 °С в атмосфере сухого кислорода. Выращивание тонких пленок SiO₂ на поверхности монокристаллических пластин кремния осуществлено в камере французской установки быстрого термического отжига AS-ONE 150. Измерения бесконтактным СВЧ-методом времени жизни неосновных носителей заряда показали, что наилучшая пассивация образцов достигается при применении предварительной трехэтапной химической очистки (RCA) поверхности пластин кремния n-типа. Методом ИК-спектроскопии формирование слоя SiO₂ подтверждается наличием интенсивного максимума при 1071 см⁻¹, что было отнесено к валентным колебаниям типа «растяжение-сжатие». Результаты расчетов оптических констант полученных пленок SiO₂ с использованием спектров отражения и программного обеспечения SCOUT показывают наличие слоя диоксида кремния, у которого показатель преломления и коэффициент экстинкции близки к эталонным.*

***Ключевые слова:** кремний, диоксид кремния, пассивация, быстрый термический отжиг, RCA очистка.*

**RCA ХИМИЯЛЫҚ ӨНДЕУДЕН КЕЙІН ЖЫЛДАМ ТЕРМИЯЛЫҚ
КҮЙДІРУ АРҚЫЛЫ ӨСІРІЛГЕН SiO₂ ҚАБЫРШАҚТАРДЫҢ
ПАССИВАЦИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЖАҚСARTУ**

**НУСПОВ К.Х.¹, БЕЙСЕНХАНОВ Н.Б.¹, СУЛТАНОВ А.Т.¹, ТЫСЧЕНКО И.Е.²,
ҚҰСАЙЫНОВА А.Ж.¹, БҰҒЫБАЙ З.К.¹, ЫСҚАК К.М.¹**

¹Қазақстан-Британ техникалық университеті, 050000, Алматы қ., Қазақстан

²Ғылымның Федералдық мемлекеттік бюджеттік мекемесі А.В. Ржанов атындағы
Жартылай өткізгіштер физикасы институты, 630090, Новосибирск, Ресей

***Аңдатпа.** Өздеріңіз білетіндей, кремний күн батареяларының тиімділігін арттыру қазіргі заманғы баламалы энергетика индустриясындағы маңызды міндеттердің бірі болып табылады. Шағылысуға қарсы және пассивтеуші қабатты оңтайландыру ПӘК арттырудың ең бюджеттік әдісі болып*

табылады. Бұл жұмыста құрғақ оттегі атмосферасындағы 900 және 950 °C температураларында жылдам термиялық күйдіру (RTP) әдісімен өсірілген кремний диоксиді (SiO_2) қабыршақтарының пассивтеуші қасиеттеріне алдын ала тазартудың әсері зерттелді. Кремнийдің монокристалды тілімдерінің беттерінде SiO_2 жұқа қабыршақтарын өсіру AS-ONE 150 жылдам термиялық күйдіру француз қондырғысының камерасында жүзеге асырылды. Негізгі емес зарядты тасымалдаушылардың өмір сүру уақытын байланыссыз микротолқынды әдіспен өлшеу, үлгілердің ең жақсы пассивациясына *n* типті кремний тілімінің бетін алдын-ала үш сатылы химиялық тазарту (RCA) көмегімен қол жеткізілетіндігін көрсетті. ИҚ-спектроскопия әдісімен SiO_2 қабатының қалыптасуы 1071 см^{-1} кезінде қарқынды максимумның болуымен расталды, бұл "созылу-сығылу" түріндегі валенттік тербелістерге жатқызылды. Шағылысу спектрлері мен SCOUT бағдарламалық жасақтамасын қолдана отырып, алынған SiO_2 қабыршақтарының оптикалық тұрақтыларын есептеу нәтижелері сыну көрсеткіші мен экстинк коэффициенті эталондарға жақын кремний диоксиді қабатының болуын көрсетеді.

Түйінді сөздер: кремний, кремний диоксиді, пассивация, жылдам термиялық күйдіру, үш сатылы химиялық тазарту.

IMPROVEMENT OF THE PASSIVATION PROPERTIES OF SiO_2 FILMS, GROWN BY THE METHOD OF RAPID THERMAL ANNEALING, AFTER CHEMICAL RCA TREATMENT

NUSSUPOV K.KH.¹, BEISENKHANOV N.B.¹, SULTANOV A.T.¹, TYSCHENKO I.E.²,
KUSAINOVA A.ZH.¹, BUGYBAI Z.K.¹, YSKAK K.M.¹

¹Kazakhstan-British Technical University, 050000, Almaty, Kazakhstan

²Federal State Budgetary Institution of Science A.V. Rzhanov Institute of Semiconductor Physics,
630090, Novosibirsk, Russia

Abstract. As it is known, increasing the efficiency of silicon solar cells is one of the most important tasks in modern alternative energy industry. Optimization of the antireflection and passivation layer is the most economical way to increase efficiency. In this work, the effect of pretreatment on the passivation properties of silicon dioxide (SiO_2) films grown by rapid thermal processing (RTP) at annealing temperatures of 900 and 950°C in a dry oxygen atmosphere, was studied. The growth of thin films of SiO_2 on the surface of monocrystalline silicon wafers was carried out in the AS-ONE 150 rapid thermal annealing chamber (France). Measurements of the lifetime of minority charge carriers by the non-contact microwave method showed that the best passivation of the samples is achieved by applying a preliminary three-stage chemical cleaning (RCA) of the surface of the *n*-type silicon wafers. IR spectroscopy confirmed the formation of a SiO_2 layer by the presence of an intense maximum at 1071 cm^{-1} , which was attributed to stretching vibrations of the "tension-compression" type. The results of calculations of the optical constants of the obtained SiO_2 films using the reflection spectra and the SCOUT software show the presence of a silicon dioxide whose refractive index and extinction coefficient are close to the reference.

Keywords: silicon, silicon dioxide, passivation, rapid thermal annealing, three-stage chemical purification

Введение

Использование традиционных источников энергии, таких как уголь, нефть и газ, сопровождается рядом серьезных проблем, обусловленных ограниченностью и труднодоступностью природных ресурсов. Более того, их использование сопровождается возраста-

нием негативных последствий парникового эффекта, влияющих на здоровье человека и климат нашей планеты [1]. Поэтому переход значительной части мировой энергетики на возобновляемые источники энергии является лишь вопросом времени. Кремниевые солнечные элементы обладают наибольшим по-

тенциалом для смены традиционных источников энергии. Тем не менее поверхность кремниевого солнечного элемента представляет собой резкий разрыв кристаллической решетки. Это означает, что зонная структура материала нарушается и в запрещенной зоне возникает полуконтинуум энергетических состояний. Эти состояния соответствуют незамкнутым, или так называемым оборванным поверхностным связям [2]. Для достижения высокого КПД солнечных элементов требуется наличие пассивирующего слоя, который значительно увеличивает эффективное время жизни неосновных носителей заряда. Так, например, такие концепции кремниевых солнечных элементов, как Passivated Emitter and Rear Cell (PERC) [3] и Passivated Emitter Rear Locally-diffused (PERL) [4], которые показывают высокую эффективность ~21-25%, включают в себя пассивирующий слой высокого качества.

Как известно, наиболее эффективным пассивирующим слоем является термически выращенный SiO_2 . N.C. Mandal и соавторы [5] показали, что термически выращенный слой SiO_2 в сравнении с другими методами синтеза оксида кремния обеспечивает максимальное время жизни неосновных носителей заряда в пластинах кремния как p-, так и n-типа. Тем не менее классический метод выращивания SiO_2 в кварцевой печи из-за необходимости длительного поддержания высокой температуры является дорогостоящим и не может конкурировать с более экономичными методами пассивации поверхности. Поэтому большое развитие получили тонкие пленки SiO_2 , выращенные методом быстрого термического окисления (RTO, или RTP), в котором высокие температуры (900–1000 °C) достигаются менее чем за несколько минут. H. Fukuda и соавторы [6] предложили практическую модель для роста ультратонких (< 10 нм) пленок SiO_2 в кинетике быстрого термического окисления. С.Р. Liu и соавторы [7] рассмотрели возможность внедрения быстрого термического отжига в существующую линию производства монокристаллических солнечных элементов. В результате внедрение тон-

кого пассивирующего слоя между пластиной кремния и слоем SiN_x позволило увеличить КПД на 0,23%, при этом эффективное время жизни неосновных носителей возросло с 4,84 до 24,33 μs . К.М. Gad и соавторы в работе [8] сравнили пассивирующие свойства пленок SiO_2 , выращенных различными методами. Как показали результаты, ультратонкие пленки диоксида кремния, синтезированные методом быстрого термического отжига, показали наилучшие свойства, в особенности после отжига в формирующем газе N_2 (95%) + H_2 (5%) при температуре 400 °C в течение 20 минут. Таким образом, тонкие пленки SiO_2 , выращенные методом быстрого термического отжига, показали высокий потенциал для пассивации поверхности кремниевой подложки, а относительно низкая стоимость данной методики по сравнению с традиционным отжигом в кварцевой печи позволяет внедрить ее в производство солнечных элементов.

Считается, что предварительная химическая очистка значительно улучшает пассивирующие свойства диэлектрических пленок и увеличивает эффективное время жизни неосновных носителей заряда кремниевых подложек [9]. В данной работе продемонстрировано значительное увеличение времени жизни неосновных носителей заряда в результате трехэтапной RCA очистки поверхности кремниевой подложки перед выращиванием пленок SiO_2 методом быстрого термического отжига.

Экспериментальная часть

Для формирования тонких пассивирующих слоев диоксида кремния были использованы подложки кремния, выращенного методом Чохральского, n- и p-типа с ориентацией (100) и удельным электрическим сопротивлением 0,25 и 22,9 $\Omega \cdot \text{см}$ соответственно. Перед выращиванием пленок SiO_2 была произведена очистка поверхности кремниевых подложек различными способами. Поверхность первой партии образцов была очищена кипячением в этиловом спирте в течение 5 минут. Вторая партия образцов была подвергнута трехэтапной химической очистке RCA [9] в

перекись аммиачном растворе, затем в плавиковой кислоте и растворе $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$. Обработка в перекись аммиачном растворе и смеси гидрохлопероксида производилась при температуре $70\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 10 минут, а травление естественного окисного слоя производилось в плавиковой кислоте и длилось не более 1 минуты при комнатной температуре. Для сравнения были также выращены пленки диоксида кремния на кремниевых подложках, которые не подвергались какой-либо очистке.

неосновных носителей заряда $\tau_{\text{эфф}}$ полученных образцов было измерено на установке ТАУМЕТР бесконтактным СВЧ методом.

На спектрофотометре EVOLUTION UV-300 были измерены спектры отражения образцов, с помощью которых выполнены расчеты оптических констант полученных пленок методом компьютерного моделирования с использованием программного обеспечения SCOUT. Для определения толщины, шероховатости и плотности выращенных пленок

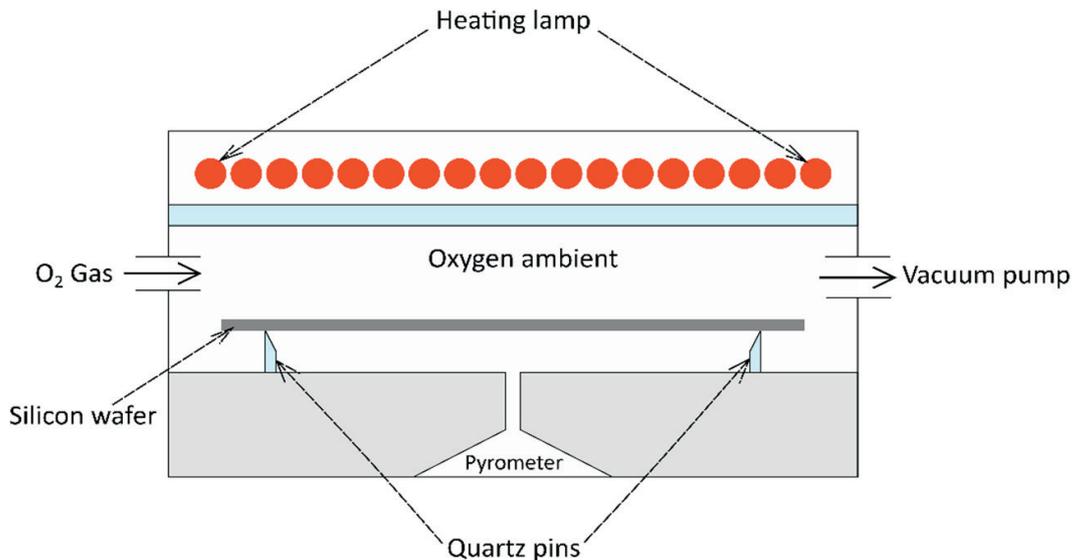


Рисунок 1 – Схема печи быстрого отжига As-One 150 для формирования тонких слоев диоксида кремния

Быстрое термическое окисление поверхности кремния было произведено в печи быстрого отжига As-One 150, схема которой изображена на рисунке 1. Перед началом отжига в камере печи устанавливалось давление 1×10^{-4} мм рт. столба, после чего производился напуск кислорода до достижения давления 500 мм рт. столба. Нагрев кремниевых пластин осуществлялся галогенными лампами при скорости подъема температуры $10^\circ\text{C}/\text{сек}$.

Окисление проведено при температурах 900 и $950\text{ }^\circ\text{C}$ в среде кислорода при давлении 500 мм рт. столба. Для образцов, которые не подвергались очистке или были очищены этанолом, время отжига составляло 5 минут, а для образцов, подвергнутых трехэтапной химической очистке RCA, время отжига составило 3 минуты. Эффективное время жизни

были измерены спектры рентгеновской рефлектометрии на установке ComplexRay C6, которые были обработаны с помощью программного обеспечения GenX. ИК-спектр полученных пленок был измерен на Nicolet iS 50 при комнатной температуре в диапазоне $4000\text{-}400\text{ см}^{-1}$.

Результаты и обсуждение

Основной задачей данной работы является изучение влияния химической обработки на пассивирующие свойства термически выращенных пленок SiO_2 . На рисунке 2 (стр. 33) представлены значения времени жизни носителей заряда кремниевых подложек с выращенным слоем SiO_2 после каждой предварительной очистки, использованной в данной работе. Как точка от-

счета (для сравнения) приведено $\tau_{эфф} = 12,9 \mu\text{с}$ для пластины кремния перед началом процедур по очистке и формированию слоя оксида кремния. Как видно, время жизни неосновных носителей заряда пластины без предварительной очистки после термической обра-

ботки при температурах 900 и 950 °C падает, достигая величин 4,6 и 6,0 $\mu\text{с}$ соответственно. Это вызвано проникновением поверхностных загрязнений в объем кремниевой пластины, что увеличивает количество дефектов и, как следствие, центров рекомбинации.

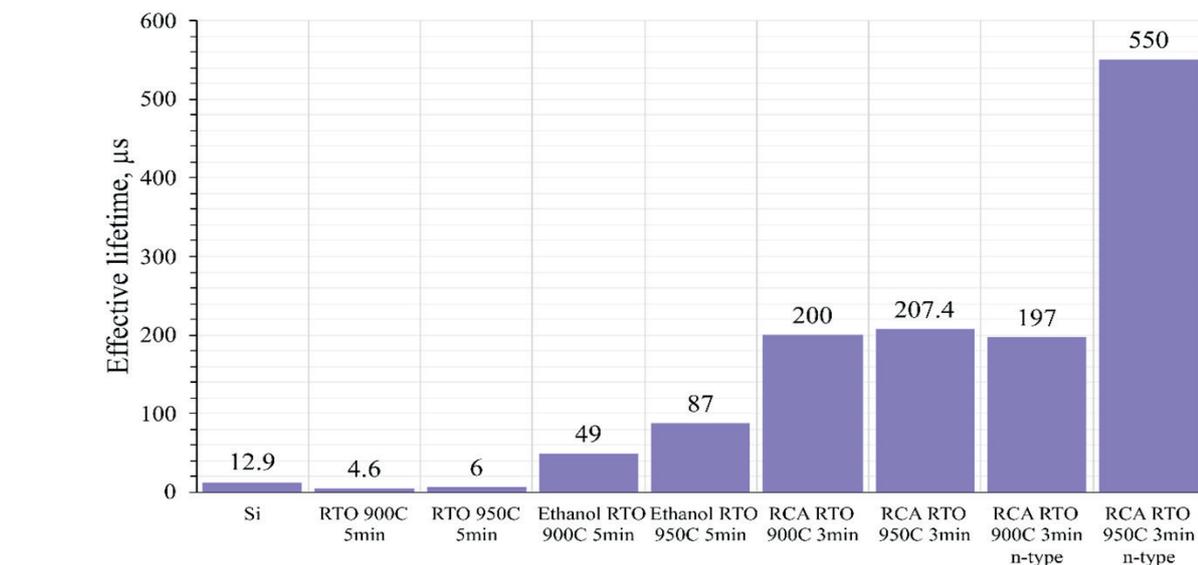


Рисунок 2 – Эффективное время жизни неосновных носителей заряда кремниевых подложек, пассивированных термически выращенным слоем SiO_2 , при температурах 900 и 950 °C с различными предварительными химическими очистками

ботки при температурах 900 и 950 °C падает, достигая величин 4,6 и 6,0 $\mu\text{с}$ соответственно. Это вызвано проникновением поверхностных загрязнений в объем кремниевой пластины, что увеличивает количество дефектов и, как следствие, центров рекомбинации.

В отличие от этого время жизни неосновных носителей заряда кремниевых пластин, подвергнутых очистке кипячением в этиловом спирте, возрастает и составляет 49 $\mu\text{с}$ после термической обработки при температуре 900 °C и 87 $\mu\text{с}$ после термообработки при температуре 950 °C. При этом рост $\tau_{эфф}$ с увеличением температуры связан с формированием более толстой пленки SiO_2 при более высокой температуре. Отсюда следует, что спирт позволяет удалить некоторое количество поверхностных загрязнений, включая органические, но степень пассивации остается на низком уровне, и это не позволит достигнуть высокого значения КПД солнечного элемента.

и 207,4 $\mu\text{с}$ для температур отжига 900 и 950 °C соответственно.

Как известно, SiO_2 в лучшей степени пассивирует поверхность кремния n-типа, поэтому для получения максимально достижимого времени жизни пленки оксида кремния были выращены на такой пластине при идентичных условиях роста. В результате удалось получить $\tau_{эфф} = 550 \mu\text{с}$ после термообработки при температуре 950 °C. Из этого следует, что метод RCA позволяет осуществлять эффективную очистку поверхности кремниевой пластины и, как следствие, формировать качественный пассивирующий слой SiO_2 .

Как известно, наибольшее практическое применение находит пассивирующий слой, который не только увеличивает время жизни неосновных носителей заряда, но и способствует уменьшению отражения от поверхности и, как следствие, увеличению поглощения солнечного излучения в объеме солнечного элемента. Поэтому оптические константы

играют важную роль в выборе пассивирующего слоя. Для расчета показателя преломления и коэффициента экстинкции полученных пленок был использован спектр отражения образца, измеренный на спектрофотометре EVOLUTION UV-300, и программное обеспечение SCOUT. Полученная зависимость показателя преломления и коэффициента экстинкции пленок от длины волны в интервале длин волн 300–1100 нм приведена на рисунке 3. Для сравнения представлены оптические константы эталонных пленок SiO₂ [10].

вале длин волн 300–1100 нм. Поскольку отличия этих кривых незначительные и не превышают 3%, то можно утверждать, что методом быстрого термического отжига удалось получить слои SiO₂, близкие к эталонным по своим оптическим характеристикам.

Для подтверждения наличия пленки SiO₂, сформированной методом быстрого термического отжига, был измерен ИК-спектр образца кремния после предварительной очистки в этиловом спирте и термообработки при температуре 900 °С. В спектре (рисунок 4, стр. 35) отчетливо виден интенсивный пик с максимумом при 1071 см⁻¹, который относит-

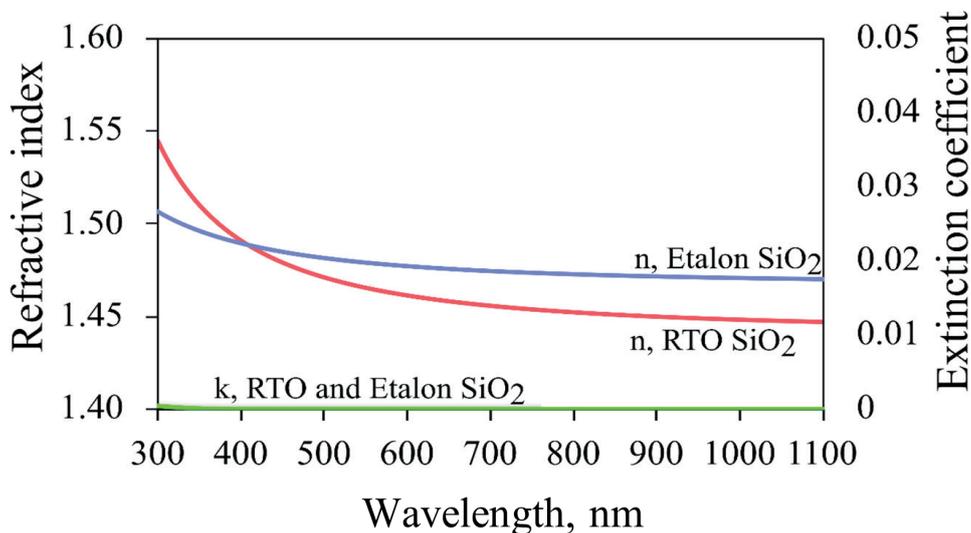


Рисунок 3 – Эталонные и измеренные волновые зависимости оптических констант пассивирующих пленок SiO₂

Видно, что для обоих случаев коэффициент экстинкции k близок к нулю во всем интервале длин волн, что говорит о высокой прозрачности пленок диоксида кремния. В свою очередь, значения показателя преломления n незначительно отличаются. Для пленок, синтезированных в данной работе, показатель преломления уменьшается с 1,54 при длине волны 300 нм до 1,44 при длине волны 1100 нм. Показатель преломления эталонных пленок SiO₂ варьируется в меньших пределах и уменьшается от 1.50 до 1.47 в том же интер-

ся к валентным колебаниям типа «растяжение-сжатие» связей Si-O, а плечевой пик на 1142 см⁻¹ относится к противофазному движению атомов кислорода [11] [12]. Также можно заметить наличие широкой полосы поглощения в области 760–970 см⁻¹, которое можно отнести к деформационным колебаниям маятникового типа связей Si-O. Таким образом, полученный ИК-спектр подтверждает наличие пленки диоксида кремния, выращенной методом быстрого термического отжига RTP.

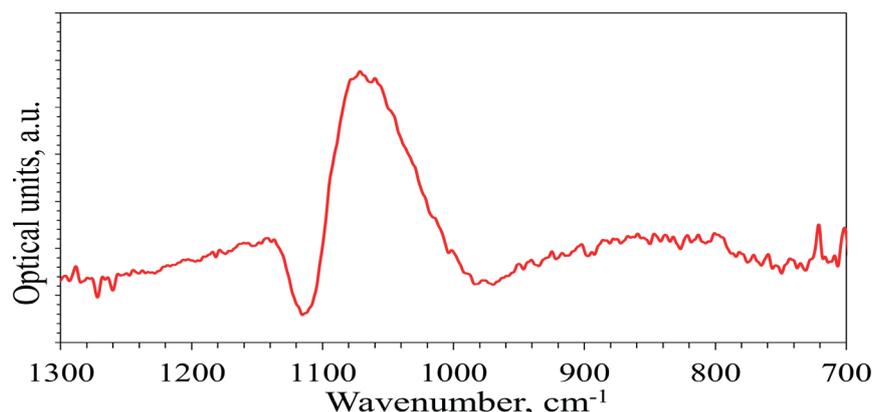


Рисунок 4 – ИК-спектр пленок SiO₂, сформированных методом быстрого термического отжига при температуре 900°C

Заключение

Методом быстрого термического отжига в течение 3 и 5 минут при температурах 900 и 950 °С в среде кислорода при давлении 500 мм рт. ст. были сформированы пассивирующие пленки диоксида кремния SiO₂. Было показано влияние предварительной очистки поверхности кремния на качество пассивирующих пленок. Показано, что рост пленки SiO₂ без предварительной очистки приводит к уменьшению эффективного времени жизни неосновных носителей заряда в кремнии с 12.9 мс до 4.6 и 6 мс. Удаление поверхностных загрязнений кипячением в этиловом спирте приводит к улучшению пассивации и увеличению времени жизни неосновных носителей до 49 и 87 мс после отжига при 900 и 950 °С. Наилучшей пассивации удается достичь при

трехэтапной химической очистке RCA, где $\tau_{эфф} = 207,4$ мс для пластин p-типа и 550 мс для пластин n-типа.

Результаты расчетов оптических констант полученных пленок SiO₂ с использованием спектров отражения и программного обеспечения SCOUT показывают наличие слоя диоксида кремния, близкого к эталонным. Величина n уменьшается от 1.50 до 1.47 в интервале длин волн 300–1100 нм, а k остается на нулевом уровне в рассматриваемом диапазоне длин волн.

Методом ИК-спектроскопии подтверждено формирование слоя SiO₂ методом RTP. Идентифицированы пики с максимумами при 1071 см⁻¹, 1142 см⁻¹, 760–970 см⁻¹, которые отнесены к валентным и деформационным колебаниям связей Si-O.

REFERENCES

- 1 Nussupov K.K., Beisenkhanov N.B., Keiinbay S., Sultanov A.T. Silicon carbide synthesized by RF magnetron sputtering in the composition of a double layer antireflection coating SiC/MgF₂ // *Optical Materials*, 2022, vol. 128, no. 112370.
- 2 Bonilla R.S., Hoex B., Hamer P., Wilshaw P.R. Dielectric surface passivation for silicon solar cells: A review. // *Phys. Status Solidi A*, 2017, no. 1700293.
- 3 Green M.A. The Passivated Emitter and Rear Cell (PERC): From conception to mass production // *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2015, pp. 190–197.
- 4 Cacciato A., Duerinck F., Baert K., Moors M., Caremans T., Leys G., Keersmaecker K.D., Szlufcik J. Investigating manufacturing options for industrial PERL-type Si solar cells // *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2013, pp. 153–159.
- 5 Mandal N. C., Biswas S., Acharya S., Panda T. Study of the properties of SiO_x layers prepared by different techniques for rear side passivation in TOPCon solar cells / *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2020, p. 119.

6 Fukuda H., Yasuda M., Iwabuchi T. Kinetics of Rapid Thermal Oxidation of Silicon // *Applied Physics*, 1992, pp. 3436–3439.

7 Liu C. P., Chang M.W., Chuang C.L. Effect of rapid thermal oxidation on structure and photoelectronic properties of silicon oxide in monocrystalline silicon solar cells // *Current Applied Physics*, 2014, pp. 653-658.

8 Gad K.M., Vössing D., Balamou P., Hiller D., Stegemann B., Angermann H., Kasemann M. Improved Si/SiO_x interface passivation by ultra-thin tunneling oxide layers prepared by rapid thermal oxidation // *Applied Surface Science*, 2015, vol. 353, pp. 1269–1276.

9 Kern W. The Evolution of Silicon Wafer Cleaning Technology // *Journal of the Electrochemical Society*, 1990, vol. 137, no 6, pp. 1887–1892.

10 Gao L., Lemarchand F., Lequime M. Refractive index determination of SiO₂ layer in the UV/Vis/NIR range: spectrophotometric reverse engineering on single and bi-layer designs // *J. Europ. Opt. Soc. Rap. Public.*, 2013, vol. 8, no 13010.

11 Prasad I., Chandorkar A.N. Spectroscopy of silicon dioxide films grown under negative corona stress // *Journal of Applied Physics*, 2003, vol. 94, no 4, pp. 2308–2310.

12 Samitier J., Marco S., Ruiz O., Morante J.R., Esteve-Tinto J., Bausells J. Analysis by FT-IR spectroscopy of SiO₂-polycrystalline structures used in micromechanics: stress measurements // *Sensors and Actuators A*, 1992, vol. 32, pp. 347–353.

Сведения об авторах

Нусупов Каир Хамзаевич

Доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник НОЦ альтернативной энергетики и нанотехнологий АО «КБТУ», ул. Толе би, 59, 050000, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0001-8200-7510

E-mail: rich-famouskair@mail.ru

Бейсенханов Нуржан Бейсенханович

Доктор физико-математических наук, руководитель НОЦ альтернативной энергетики и нанотехнологий АО «КБТУ», ул. Толе би, 59, 050000, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0002-5908-5614

E-mail: beisen@mail.ru

Султанов Асанали Талгатбекулы (автор для корреспонденции)

Ph.D. студент, младший научный сотрудник НОЦ альтернативной энергетики и нанотехнологий АО «КБТУ», ул. Толе би, 59, 050000, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0003-0074-431X

E-mail: asanalisultanovs@gmail.com

Тыщенко Ида Евгеньевна

Доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, пр. Академика Лаврентьева, 13, 630090, г. Новосибирск, Россия

ORCID ID: 0000-0002-9518-0651

E-mail: tys@isp.nsc.ru

Кусайнова Айжан Жамбуловна

Магистрант, ведущий химик-технолог НОЦ альтернативной энергетики и нанотехнологий АО «КБТУ», ул. Толе би, 59, 050000, г. Алматы, Казахстан

ORCID ID: 0000-0002-2485-9739

E-mail: a.kusainova@kbtu.kz

Бугыбай Захида Куанышқызы

Магистрант, менеджер НОЦ альтернативной энергетики и нанотехнологий АО «КБТУ»,
ул. Толе би, 59, 050000, г. Алматы, Казахстан
ORCID ID: 0000-0002-1625-2486
E-mail: z_bugybai@kbtu.kz

Ыскак Камила Мухтарқызы

Магистрант НОЦ альтернативной энергетики и нанотехнологий АО «КБТУ»,
ул. Толе би, 59, 050000, г. Алматы, Казахстан
ORCID ID: 0000-0001-9139-0400
E-mail: yskakkamila@gmail.com

Авторлар туралы мәлімет

Нүсіпов Каир Хамзаевич

ф-м.ғ.д., бас ғылыми қызметкер, Баламалы энергетика және нанотехнологиялар ғылыми-білім беру орталығы, ҚБТУ, Төле би, 59, Алматы қ., Қазақстан
ORCID ID: 0000-0001-8200-7510
E-mail: rich-famouskair@mail.ru

Бейсенханов Нұржан Бейсенханович

ф-м.ғ.д., жетекші, Баламалы энергетика және нанотехнологиялар ғылыми-білім беру орталығы, ҚБТУ, Төле би, 59, Алматы қ., Қазақстан
ORCID ID: 0000-0002-5908-5614
E-mail: beisen@mail.ru

Сұлтанов Асанали Талгатбекұлы (корреспонденция авторы)

PhD студент, кіші ғылыми қызметкер, Баламалы энергетика және нанотехнологиялар ғылыми-білім беру орталығы, ҚБТУ, Төле би, 59, Алматы қ., Қазақстан
ORCID ID: 0000-0003-0074-431X
E-mail: asanalisultanovs@gmail.com

Тысченко Ида Евгеньевна

ф-м.ғ.д., жетекші ғылыми қызметкер, А. В. Ржанова атындағы Федералды мемлекеттік бюджеттік ғылыми мекеме жартылай өткізгіштер физикасы институты, 630090, Ресей, Новосибирск қ, пр. Ак. Лаврентьева, 13
ORCID ID: 0000-0002-9518-0651
E-mail: tys@isp.nsc.ru

Кұсайынова Айжан Жамбуловна

Магистрант, жетекші химик-технолог, Баламалы энергетика және нанотехнологиялар ғылыми-білім беру орталығы, ҚБТУ, Төле би, 59, Алматы қ., Қазақстан
ORCID ID: 0000-0002-1625-2486
E-mail: z_bugybai@kbtu.kz

Бұғыбай Захида Куанышқызы

Магистрант, менеджер, Баламалы энергетика және нанотехнологиялар ғылыми-білім беру орталығы, ҚБТУ, Төле би, 59, Алматы қ., Қазақстан
ORCID ID: 0000-0002-1625-2486
E-mail: z_bugybai@kbtu.kz

Ысқақ Камила Мұхтарқызы

Магистрант, Баламалы энергетика және нанотехнологиялар ғылыми-білім беру орталығы,
ҚБТУ, Төле би, 59, Алматы қ., Қазақстан
ORCID ID: 0000-0001-9139-0400
E-mail: yskakkamila@gmail.com

Information on the authors

Nussupov Kair Khamzaevich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Researcher of the Scientific and Educational Center for Alternative Energy and Nanotechnology of JSC "KBTU", Tole Bi 59, 050000, Almaty, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0001-8200-7510
E-mail: rich-famouskair@mail.ru

Beisenkhanov Nurzhan Beisenkhanovich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Supervisor, Scientific and Educational Center for Alternative Energy and Nanotechnologies of JSC "KBTU", Tole bi 59, Almaty, 050000, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0002-5908-5614
E-mail: beisen@mail.ru

Sultanov Assanali Talgatbekuly (corresponding author)

Ph.D. student, Junior Research, Scientific and Educational Center for Alternative Energy and Nanotechnologies of JSC "KBTU", Tole bi 59, Almaty, 050000, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0003-0074-431X
E-mail: asanalisultanovs@gmail.com

Tyschenko Ida E.

Ph.D., Dr of Scie., Leading scientist, Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Science, 13 Lavrentyev avenue, Novosibirsk, 630090, Russia

ORCID ID: 0000-0002-9518-0651
E-mail: tys@isp.nsc.ru

Kusainova Aizhan Zhambulovna

Master student, Leading chemist-technologist, Scientific and Educational Center for Alternative Energy and Nanotechnologies of JSC "KBTU", Tole bi 59, Almaty, 050000, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0002-2485-9739
E-mail: a.kusainova@kbtu.kz

Bugybay Zakhida Kuanyshkyzy

Master student, Manager, Scientific and Educational Center for Alternative Energy and Nanotechnologies of JSC "KBTU", Tole bi 59, Almaty, 050000, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0002-1625-2486
E-mail: z_bugybai@kbtu.kz

Yskak Kamila

Master student, Scientific and Educational Center for Alternative Energy and Nanotechnologies of JSC "KBTU", Tole bi 59, Almaty, 050000, Kazakhstan

ORCID ID: 0000-0001-9139-0400
E-mail: yskakkamila@gmail.com