

**NEWS**

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

**PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES**

ISSN 1991-346X

Volume 3, Number 307 (2016), 156 – 162

UDC 623.21:573.12

## **FEATURES OF THE STRESS STATE OF THE SILICON WAFER DURING THERMAL ANNEALING**

**T. Kosherov, B. Koshkinbay**

Kazakh national research technical university named K. I. Satpayev, Almaty  
[balzhan-1994k@mail.ru](mailto:balzhan-1994k@mail.ru)

**Keywords:** thermal annealing, silicide, structure, stress, lattice parameters, pyramid formation, crystallographic axis.

**Abstract:** With the help of roentgen diffractometer it was studied especially changes in the crystal structure of silicon by thermal annealing in the air at different time of thermal exposure. It is shown that thermal annealing at  $700^{\circ}\text{C}$  from 10 to 360 minutes causes significant changes in the interplanar distance  $d$ , starting with the 120-minute thermal annealing in air. Similar marked changes were seen during studies of internal stress of the crystal lattice of the sample. It was found that with increasing thermal annealing time there is the formation of silica, which is also undergoing significant change with increasing annealing time, as well as its appearance is accompanied by the formation of silicon carbide (SiC). Changes in the formed silica correlate with the quantitative change in the oxygen content under the same conditions of temperature annealing.

After the study of the AFM topography images of fragments of the surface of the silicon thermal annealed at  $700^{\circ}\text{C}$  for different annealing time it was found that the entire surface of the specimen is covered with a dense layer of pyramidal structures in the Z-axis height from 10 to 80 nm. Increasing the thermal annealing time leads to a smoothing of the formed protrusions reduced in size considerably and noticeable peaks largest cut pyramidal formations that binds to the decomposition of the formed  $\text{SiO}_2$  on  $\text{SiO}$ , and further the Si and O, which are subsequently extracted into the environment. It is noted, that since 120 minute thermal annealing of silicon on the surface along with particular crystallographic direction begin to form silicon silicides - silicon carbide (SiC).

УДК 623.21:573.12

## **ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПЛАСТИН КРЕМНИЯ В ПРОЦЕССЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА**

**Т.С. Кошеров, Б.Қ. Қөшкінбай**

Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, г. Алматы

**Ключевые слова:** термоотжиг, силициды, структура, напряжение, параметры решетки, пирамидальные образования, кристаллографические оси.

**Аннотация.** С помощью рентгеновского дифрактометра изучены особенности изменения кристаллической структуры кремния при термическом отжиге на воздухе при различном времени термического воздействия. Показано, что температурный отжиг при  $700^{\circ}\text{C}$  от 10 до 360 минут вызывает ощутимые изменения межплоскостного расстояния  $d$ , начиная со 120 минутным термоотжигом на воздухе. Такие же заметные изменения замечены при исследовании внутренних напряжений кристаллической решетки образца. Установлено, что по мере увеличения времени термоотжига идет образование диоксида кремния, который также претерпевает значительные изменения по мере увеличения времени отжига, а также ее появление сопровождается образованием карбида кремния (SiC). Динамика изменения образовавшегося диоксида кремния коррелирует с количественным изменением содержания кислорода при тех же условиях температурного отжига.

Проведя исследования АСМ-изображений топографии фрагментов поверхность кремния термоотожженных при  $700^{\circ}\text{C}$  в течение различного времени отжига обнаружено, что вся поверхность образца покрыта плотным слоем пирамидальных образований высотой по оси Z от 10 до 80 нм. Увеличение времени термоотжига приводит к сглаживанию образовавшихся выступов, заметно уменьшаются по размерам и заметным срезом вершин наиболее крупных пирамидальных образований, что связывается разложением образовавшихся  $\text{SiO}_2$  на  $\text{SiO}$ , и далее на  $\text{Si}$  и  $\text{O}$ , которые впоследствии экстрагируются в окружающую среду. Замечено, что, начиная со 120 минутного термоотжига кремния, на поверхности, вдоль определенного кристаллографического направления начинают образовываться силициды кремния – карбид кремния ( $\text{SiC}$ ).

**Введение.** Одним из эффективных методов изменения электрофизических свойств и параметров полупроводникового кремния является термическая обработка. При термическом отжиге кремния протекают процессы окисления, изменение электронных состояний на границе  $\text{Si}-\text{SiO}_2$ . В процессе термического отжига система в зависимости от времени и температуры отжига на поверхности образуются оксидные фазы не только самого образца ( $\text{Si}$ ), но и металлообразующих примесных элементов [1]. Возникает проблема источников упругих напряжений и возможности их релаксации с образованием дислокаций в процессе высокотемпературных термических воздействий. Большую роль в формировании поля упругих напряжений играют гравитационные силы [2]. Появляются трудности в обеспечении малых перепадов температуры. При проведении высокотемпературных технологических операций в образцах  $\text{Si}$  возникают возрастающее термическое напряжение, а в объеме пластин из кремния кислородосодержащие преципитаты, которые в зависимости от их природы и размера могут играть роль как центров зарождения дислокаций, так и стопоров для движения дислокаций, затрудняющих процессы их генерации и распространения [3,4].

Исследование процессов микродефектообразования в монокристаллических пластинах кремния, в особенности микродефектообразования на ранних стадиях распада пересыщенного твердого раствора кислорода в кремнии представляют также принципиальный интерес не только для выяснения механизма зародышеобразования, но и для выявления закономерностей в последовательной трансформации дефектной среды [5].

Определенный интерес имеет механизм первичной самоорганизации регулярной структуры в кремнии [6]. Были предположения, что зародышами пор являются дефекты на поверхности кремния, хотя затем было показано, что поры формируются независимо от положений дефектов [7].

В работе [8] имеется несколько иной подход, где учтены несколько вкладов, влияющих на профиль поверхности кремния: это энергия поверхностного натяжения, транспортировка дырок в  $\text{Si}$ . Рассматривая влияние собственных межузельных атомов на генерацию термодоноров в кремнии [9] авторы предполагают, что присутствие собственных межузельных атомов кремния генерируют возникшие при термоотжигах кремния термодоноры, а затем они поглащаются стоками поверхностного образца и объемными микродефектами (вакансационными порами), которые при отжиге на воздухе эти стоки «пассивируются» благодаря окислению и загрязнению и главным стоком становятся поры.

В связи с этим представляется определенный интерес проведения исследований по установлению особенностей напряженного состояния пластин кремния в процессе термического отжига, а также кислорода атмосферы и приповерхностного слоя образца на рельеф поверхности, фазовый состав образовавшихся оксидов на поверхности кремния и возможные структурные изменения.

**Методы исследования.** Исследование проводилось с образцами (c)  $\text{Si}$  с удельным сопротивлением 10 Ом·см. Образцы подвергали термической обработке в атмосфере воздуха при температуре  $700^{\circ}\text{C}$  и времени 10, 30, 60, 120, 240 и 360 минут. Полуколичественный анализ содержания элементов и электронно-микроскопические снимки были получены на рентгеновском дифрактометре и растровом электронном микроскопе, а морфология поверхности образца кремния после термической обработки исследовалась методом атомной силовой микроскопии [10].

**Результаты исследования.** Рассматривая изменение зависимости структурных параметров  $\omega$  и  $d$  от времени прогрева образца при температуре  $700^{\circ}\text{C}$  видим, что межплоскостное расстояние  $d$  претерпевает небольшие изменения до 120 минут термоотжига, затем наблюдается небольшой

рост его значений, если образец продолжать прогревать на воздухе до 360 минут (Рис.1). Такие же заметные изменения мы замечаем и у  $\omega$ , указывающий на степень возникших напряжений в структуре образца (полуширина пика Si). Поскольку параметр  $\omega$  характеризует структурное состояние приповерхностного слоя и соответственно связанных с дефектами внутренних напряжений, возникших в образце при термоотжиге, то можно предположить, что небольшие структурные изменения в кремнии возникают при наших условиях термоотжига образца Si в пределах от 120 до 360 минут.

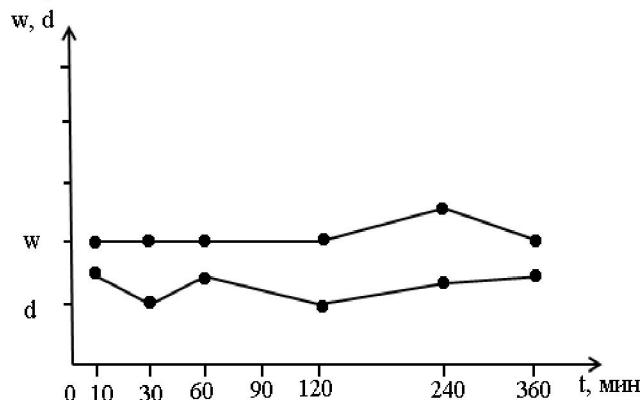


Рисунок 1 – Зависимость параметров  $d$ ,  $\omega$  кремния от времени прогрева образца ( $T=700^{\circ}\text{C}$ )

Полученные экспериментальные результаты показывают, что термоотжиг образца при  $700^{\circ}\text{C}$  вызывает неустойчивые состояния структуры, по видимому, за счет стабильных дефектов, которые начинают скапливаться на отдельных участках поверхности образца. В свою очередь концентрация указанных дефектов начинается при 120 минутном термоотжиге, достигая своего наибольшего значения при 240-минутном температурном воздействии и тем самым приводит к увеличению внутренних напряжений приповерхностных слоев кремния и соответствующего роста при 240 минутном температурном отжиге и далее к стабилизации.

Если проанализировать полуколичественное содержание кремния и его оксида (Рис.2), то видно, что по мере увеличения времени термоотжига образование диоксида кремния на поверхности образца происходит первые 30 минут, достигая своего наибольшего значения затем до 120 минут идет редкий спад, а затем медленно растет, увеличивая свое содержание на поверхности образца (Рис.2). По мере увеличения времени термоотжига образца мы также замечаем появление силицидных образований, таких как  $\text{SiC}$  (Т. А и В Рис.2), количество которых, по мере увеличения температуры отжига возрастает.

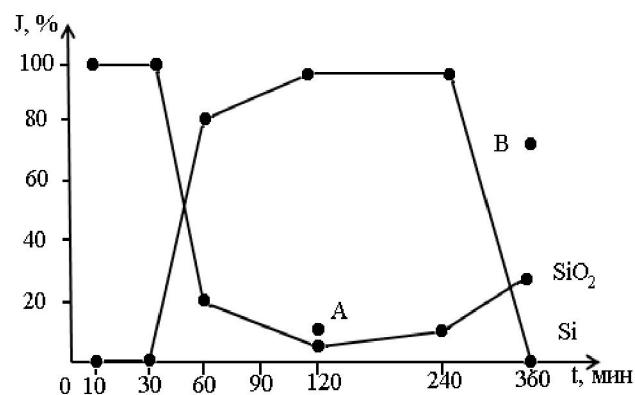


Рисунок 2 – Изменение содержания кремния и диоксида  $\text{Si}$  в зависимости от времени термоотжига ( $T=700^{\circ}\text{C}$ )

Рассматривая количественное содержание кислорода в исследуемом образце, обнаруживаем, что оно также меняется по мере увеличения времени термоотжига образца (Рис.3). Если до 60-минутного термоотжига кремния его количество медленно растет, то по мере увеличения времени

отжига до 120 минут образовавшееся количество кислорода медленно убывает, а затем наблюдается заметный его рост (Рис.3). Если сопоставить количественное содержание диоксида кремния (Рис.2) и количественное изменение кислорода (Рис.3), то заметна их корреляция.

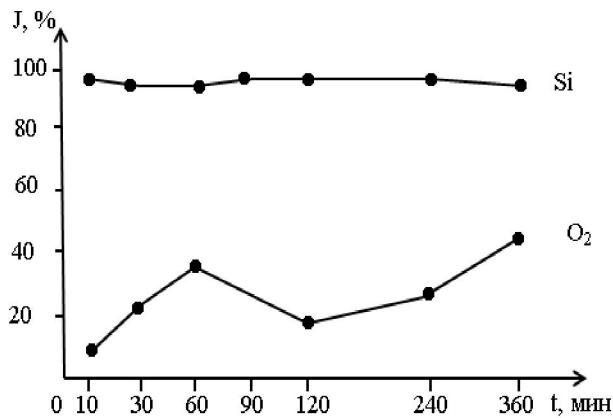


Рисунок 3 – Изменение содержания кислорода и кремния в зависимости от времени термоотжига ( $T=700^{\circ}\text{C}$ )

Полученные экспериментальные результаты показывают, что при термоотжигах кремния ( $700^{\circ}\text{C}$ ) в зависимости от времени температурных воздействий образцы кремния претерпевают структурные изменения, вызывает возникновение внутренних напряжений, появление оксидных и других силицидных образований.

На рис.4 представлены АСМ-изображения топографии фрагментов поверхности кремния термоотожженных при  $700^{\circ}\text{C}$  в течение разного времени отжига. При 10 минутном отжиге вся поверхность исследуемых образцов покрыта плотным слоем небольших пирамидальных выступов высотой по оси Z от 10 до 80 нм (Рис.4, а). Дальнейшее увеличение времени отжига сглаживают образовавшиеся выступы, оставляя наиболее крупные пирамидальные выступы на различных участках поверхности исследуемого образца, которые также постепенно уменьшаются по размерам и заметным срезом вершин пирамидальных образований.

Начиная со 120 минутного термоотжига кремния на ее поверхности заметны образования вдоль определенного кристаллографического направления (Рис.4, г, д, е), которые растут по своим размерам и представляют собой на фоне оксидных образований силицида кремния (SiC) - карбид кремния. Постоянное снижение величины среднеквадратичной шероховатости и отсутствие кристаллических образований указывают на аморфизацию поверхности кремния в процессе термоокисления. По мере увеличения продолжительности термоотжига размеры пирамидальных выступов в основном сглаживаются, оставляя небольшие островки оксидов кремния. Если обратится к рисунку 2 и 3, то можно предположить, что первые 60 минут термоотжига образца приводят к максимальному образованию  $\text{SiO}_2$  на поверхности образца и соответственно к нарастанию выделения кислорода. С другой стороны, эти результаты показывают, что высокие концентрации точечных дефектов и их градиенты могут привести к реализации условий для появления дислокаций и их росту [11]. Нагрев и высокая концентрация точечных дефектов приводит к деформации и образованию различных по виду и размерам пирамидальных выступов на поверхности. После установления термодинамического равновесия (до 120 минут термоотжига) весь процесс вновь повторяется, но уже с частичным фазовым образованием силицидов типа карбида кремния (SiC).

**Обсуждения результатов.** Полученные результаты свидетельствуют о том, что термообработка при  $700^{\circ}\text{C}$  (от 10 до 360 минут) приводит к существенным изменениям структуры образца, создает направление в кристаллической решетке, а возникшие островки оксидных образований имеют неоднородный характер и зависят от времени термообработки наряду с оксидными образованиями  $\text{SiO}_2$ , других малочисленных оксидов примесей, наблюдается появление карбида кремния SiC. Их появление достаточно отчетливо видно при 120 и 360-минутном прогреве образца на воздухе (Рис.2). Как известно, при технологическом процессе

получения кремния одним из ее недостатков является относительно высокая концентрация неконтролируемой примеси в выращенном образце, в основном, кислорода ( $\sim 10^{16}$ - $10^8$  см $^{-3}$ ) [12] и углерода ( $\sim 10^{17}$  см $^{-3}$ ) [13,14]. В частности, если проследить за изменением содержания кислорода в кремнии в зависимости от времени термоотжига (Рис.3), то видим, что их выделение наибольшее при 60 и 360-минутной термообработке образца.

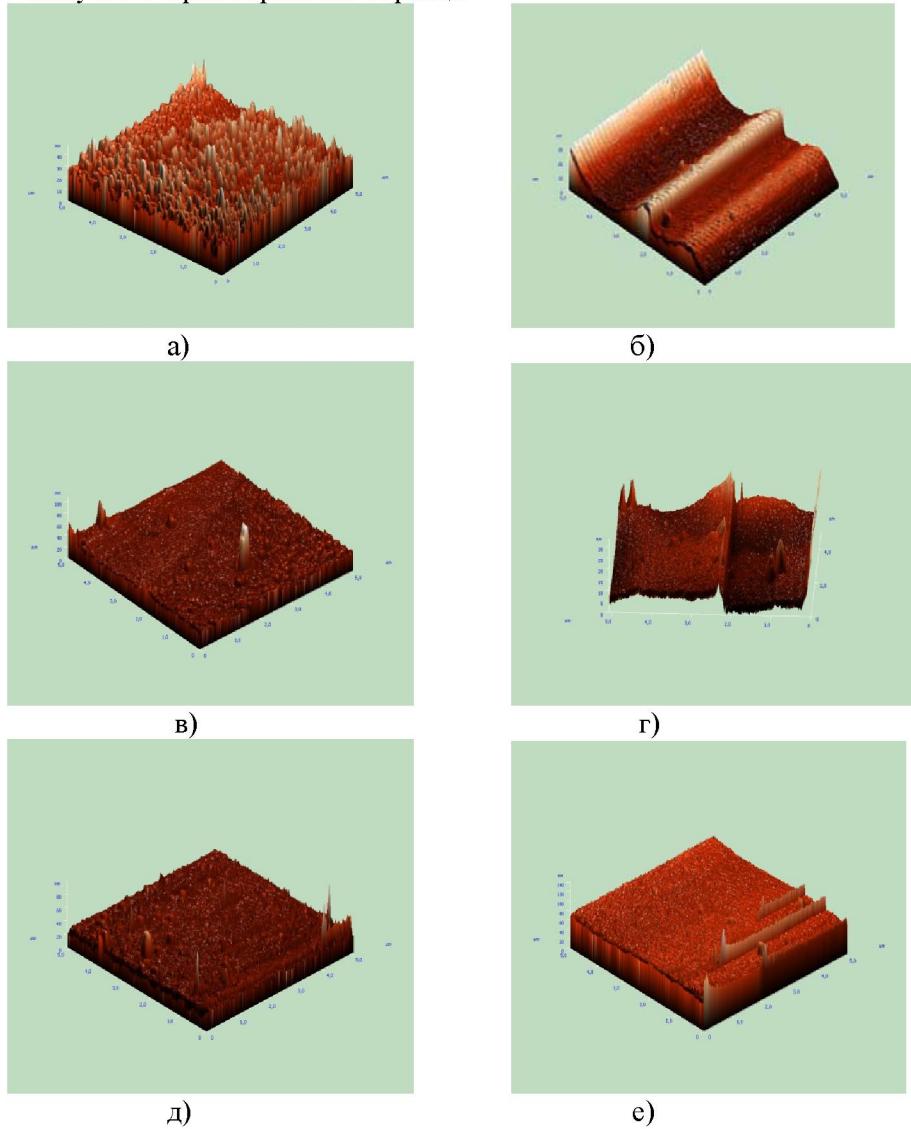


Рисунок 4 – АСМ изображение термоотожженного кремния при различном времени отжига:  
а)10 мин; б)30 мин; в)60 мин; г)120 мин; д)240 мин; е)360 мин

Как отмечалось в [5,15,16], при отжиге на воздухе поверхность становится пассивированной за счет роста слоев окисла  $\text{SiO}_2$  и поверхностными загрязнениями и при этом основным стоком диффузионного потока межузельных атомов кремния и кислорода становятся поры в кремнии вакансационного типа.

Рассматривая трехмерные АСМ-изображения, полученные при термоотжиге (700°C) различном времени температурного воздействия, степени образования и роста диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ), обусловленное диффузией кислорода и других малочисленных примесей, можно предположить, что в кристалле Si в начальный момент диффузии было определенное число вакансий, распределенных неравномерно по кристаллу. В местах пирамидальных образований (Рис.4) вакансии, очевидно, было значительно меньше, чем в областях между ними. Эти выпуклые образования представляют собой микродефекты, по-видимому, состоящие из межузельных атомов, которые в последующем вступают в реакцию с атомами кремния, образуя ее оксиды

[17,18]. При большом скоплении вакансий процесс примесной диффузии идет вдоль определенной кристаллической оси. В процессе примесной диффузии данные микродефекты являются стоками для мигрирующих межузельных атомов кремния, что отражается в увеличении не только размеров, но и площади. При этом скорость миграции межузельных атомов кремния максимальна вдоль кристаллографической оси, вследствие чего захват межузельных атомов кремния на микродефект происходит главным образом вдоль их поверхности [19]. Таким образом, размеры и площади микродефектов увеличиваются в процессе примесной диффузии. Следует отметить, что по мере увеличения времени термоотжига идет медленное уменьшение поверхностной части пирамидальных образований, у которых постепенно уменьшаются размеры и площади, что связывается с разложением  $\text{SiO}_2$  на  $\text{SiO}$ , а далее на  $\text{Si}$  и  $\text{O}$ , которые экстрагируются в окружающую среду [20]. В то же время преобладает появление и рост оксидных и силицидных образований вдоль кристаллической оси (Рис.4, г).

**Выводы.** Использование рентгеновского дифрактометра позволило определить влияние температурного воздействия на воздухе от 10 до 360 минут на характеристики структурного изменения, возникновения внутренних напряжений, появления оксидных и других силицидных образований ( $\text{SiC}$ ).

Установлено, что нагрев и высокая концентрация точечных дефектов на поверхности образца приводит к деформации и образованию различных по виду и размерам пирамидальных выступов, которые по мере увеличения времени термоотжига сглаживают образовавшиеся выступы с заметным срезом вершин этих образований. Это явление связывается тем, что при длительном термоотжиге кремния наступает разложение  $\text{SiO}_2$  на  $\text{SiO}$ , а далее на  $\text{Si}$  и  $\text{O}$ , которые экстрагируются в окружающую среду. Кроме того обнаружено, что начиная со 120 минутного термоотжига кремния на поверхности заметили образования вдоль определенного кристаллографического направления, представляющие собой силициды  $\text{SiC}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кошеров Т.С., Ермолаев В.Н., Тлеумуратова К.Т., Сейтov А.С. Стимулирование изменений физических характеристик кремния лазерным воздействием // Вестник КазНТУ.2014.№2.с.328-334.
- [2] Меженный М.В., Мильвидский М.Г., Простомолов А.И. Моделирование напряженного состояния пластин кремния большого диаметра в процессе термического отжига // ФТТ.2003. т.45. вып. 10. с.1794-1804.
- [3] Ениперлова К.Л, Мильвидский М.Г, Резник В.Я., Русак Т.Ф. Кристаллография, 1991, том 36, вып. 5, с. 1259-1266.
- [4] Меженный М.В., Мильвидский М.Г., Павлов В.Ф., Резник В. Я. // ФТГ, 2001, том 43, выпуск 1, Стр. 47.
- [5] Бублик В. Т., Мацнев С. Ю., Щербачев К. Д., Меженный М. В., Мильвидский М. Г., Резник В. Я. Исследование особенностей образования микродефектов в термически обработанных бездислокационных пластинах кремния большого диаметра методов диффузного рассеяния рентгеновских лучей. // ФТГ.2003. т. 45. вып.10.с. 1825–1833.
- [6] Компан М.Е. Механизм самоорганизации регулярной структуры пористого кремния. // ФТГ.2003. т.45. вып. 5. с.902-906.
- [7] Allongue P., Costa-Keilling V. . Gerischer H. . J. Electro- chemical Soc. 140,1009(1993).
- [8] Valance. Phys. Rev. B 52, 8323 (1991).
- [9] Воронков В.В., Воронкова Г.И., Батунина А.В., Головина В.Н., Мильвидский М.Г., Гуляева А.С., Тюрина Н.Б., Арапкина Л.В. Генерация термодоноров в кремнии: влияние собственных межузельных атомов. //ФТТ, 2000, т.42, вып.11, с. 1969-1975.
- [10] Кошеров Т.С., Ермолаев В.Н., Болатов М.Б. Влияние лазерного воздействия на наноструктуру и морфологию поверхности кремния. //ж.Вестник КазНТУ. 2004. №4. с. 369-374.
- [11] Банищев А.Ф., Голубев В.С., Крокев А.Ю. Разрушение поверхности кремния при импульсном воздействии лазерных импульсов. //Сб.трудов ИПЛПИ РАН.-2001.
- [12] Смирнов В.И. Физико – химические основы технологии электронных средств. Учебное пособие / В.И.Смирнов. -Ульяновск, 2005. – 112 с.
- [13] Bean A.R., Newman R.C. // J.Phys. Chem. Solid. 33, 2, 255(1972).
- [14] J. Lerouelle. Phys. Stat. Sol. A67, 1, 177 (1981).
- [15] Бабич В.М., Бледкан Н.И., Венгер Е.Ф. Кислород в монокристаллах кремния. Интерпресс. Киев.1977. с 240.
- [16] Болатов Л.Н., Козлов В.Ф., Макаренко И.В., Титков А.Н., ФТП, 27, 1375 (1993).
- [17] Lyding J.W., Shen T.C., Hubacek J.S., Tucker J.R., Abeln G.C., Appl. Phys. Lett. 64, 2010 (1994).
- [18] Кошеров Т.С., Болатов М.Б., Ермолаев Ю.В. Стимулирование изменений физических характеристик поликристаллического кремния термической обработкой. Известие НАН РК,серия физико-математических наук.-2015.- №1.-С.44-48.
- [19] Баграев Н.Т., Буравлев А.Д., Клячкин Л.Е., Маляренко А.М., Рыков С.А. Самоупорядоченные микрорезонаторы в сверхмелких кремниевых  $p^-$ - $n^-$  переходах. //ФТП.2000.т.34.вып.6.с.726-735.
- [20] Кошеров Т.С., Ермолаев В.Н., Болатов М.Б. Влияние термической обработки и лазерного воздействия на наноструктуру и морфологию поверхности кремния. //Сб.трудов международной научно-практической конф. «Подготовка инженерных кадров в контексте глобальных вызовов XXI века». Алматы.2013.т.1.с.220-222.

**REFERENCES**

- [1] Kosherov T.S., Ermolaev V.N., Tleumuratova K.T., Seitov A.S. Promote changes in the physical characteristics of the silicon laser action. // Herald KazNTU.2014.№2.p.328-334.(in Russ.).
- [2] Mezhenny M.V., Milvidsky M.G., Prostomolotov A.I. Modeling the stress state of large diameter silicon wafers during thermal annealing. //FTT.2003.v.45.i.10.p.1794-1804.(in Russ.).
- [3] Enisherlova K.L., Milvidsky M.G., Resnick V.Y., Rusak T.F. Crystallography, 1991, v 36, i. 5, p.1259-1266.(in Russ.).
- [4] Mezhenny M.V., Milvidsky M.G., Pavlov V.F., Resnick V.Y. // FTT, 2001, vol 43, issue 1, page. 47.(in Russ.).
- [5] Bagel V.T., Matsnev S.Y., Shcherbachev K.D., Mezhenny M.V., Milvidsky M.G., Resnick V.Y. Research of features of formation of micro-defects in dislocation-free thermally processed silicon wafers of large diameter diffuse scattering methods ray. // FTT.2003.v.45.i.10.p. 1825-1833.(in Russ.).
- [6] Compan M.E. The mechanism of regular porous silicon structures of self-organization. // FTT.2003.v.45.i.5.p.902-906.(in Russ.).
- [7] Allongue P., Costa-Keilling V. , Gerischer H. . J. Electro- chemical Soc. 140,1009(1993).
- [8] Valance. Phys. Rev. B 52, 8323 (1991).
- [9] Voronkov V.V., Voronkova G.I., Batunina A.V., Golovina V.N., Milvidsky M.G., Gulyaeva A.S., Tyurina N.B., Arapkina L.V. Generation of thermal donors in silicon: the influence of self-interstitials. // FTT, 2000, v.42, i.11, p. 1969-1975.(in Russ.).
- [10] Kosherov T.S., Yermolaev V.N., Bolatov M.B. Influence of laser action on nanostructure and morphology of the silicon surface. // Herald KazNTU.2004.№4.p.369-374.(in Russ.).
- [11] Banishev A.F., Golubev V.S., Krokiev A.Y. The destruction of the silicon surface pulsed laser pulses. // Bui.works IPLIT RAN - 2001.(in Russ.).
- [12] Smirnov V.I. Physical - chemical bases of technology of electronic means. Textbook / V.I.Smirnov.-Ulyanovsk, 2005.-112p.(in Russ.).
- [13] Bean A.R., Newman R.C. // J.Phys. Chem. Solid. 33, 2, 255(1972).
- [14] J. Lerouelle. Phys. Stat. Sol. A67, 1, 177 (1981).
- [15] Babich V.M., Bletskan N.I., Wenger E.F. Oxygen in the silicon single crystals. Interpress. Kiev.1977. p 240.(in Russ.).
- [16] Bolatov L.N., Kozlov V.F., Makarenko I.V., Titov A.N., FTP, 27, 1375 (1993). (in Russ.).
- [17] Lyoling Y.W., Shen T.C., Habacekk Y.S., Tucker I.R., Abeln G.C., Appl. Phys. Lett. G4, 2010(1994).
- [18] Kosherov T.C., Bolotov M.B., Ermolaev Y.V. Stimulation of changes in the physical characteristics of the polycrystalline silicon by heat treatment. RK NAS News, a series of physical and mathematical sciences.2015.No 1.P.44-48.(in Russ.).
- [19] Bagraev N.T., Buravlev A.D., Klyachkin L.E., Malyarenko A.M., Rykov S.A. Self-ordering microcavities in ultrafine silicon p + - n- transitions. //FTP.2000.v.34.i.6.p.726-735.(in Russ.).
- [20] Kosherov T.S., Yermolaev V.N., Bolatov M.B. Effect of heat treatment and laser effects on the nanostructure and the morphology of the surface of silicon. // Bui.works international scientific-practical conference. "Training of engineers in the context of the XXI century global challenges." Almaty.2013.v.1.p.220-222.(in Russ.).

**ТЕРМИЯЛЫҚ ӨНДЕУ ҮРДІСІНДЕ КРЕМНИЙ ПЛАСТИНАЛАРЫНЫң КЕРНЕУЛІ КҮЙІНІН  
ЕРЕКШЕЛІКТЕРИ**

**Т.С. Көшеров, Б.Қ.Көшкінбай**

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы

**Түйін сөздер:** термоөндеу, силицидтер, құрылым, кернеу, тор параметрлері, пирамидалы құрылымдар, кристаллографиялық остеर.

**Аннотация.** Рентгендік дифрактометр көмегімен әртүрлі уақыт аралығында аудағы термиялыш өндеу кезіндегі кремнийдің кристалдық құрылымының өзгеру ерекшеліктері зерттелді. 10 минуттан 360 минут аралығында 700°C кезіндегі температуралық өндеу, аудағы термиялыш өндеудің 120-минутынан бастап жазықтықаралық қашықтық d-ның елеулі өзгерістерін шақыратының көрсетілді. Улғінің кристалдық торының ішкі кернеулерін зерттеу кезінде де осынданған өзгерістер байқалды. Термоөндеу уақытын жогарылатқан сайын осы уақытқа байланысты айтарлықтай өзгерістерге ұшырайтын кремний диоксидінің пайда болып жүретіні, соңдай-ақ оның пайда болуы кремний карбидінің (SiC) құрылупына алып келетін дәлелденді. Құрылған кремний диоксидінің өзгеріс қарқыны дәл соңдай температуралық өндеу шарттарындағы оттегі құрамының сандық өзгерістерімен байланысты.

Өндеу дін әртүрлі уақыт аралығындағы (700°C) температуралық термоөнделген кремний беті фрагменттерінің топографиясының АКМ-суреттерін зерттей отырып, үлгінің бүкіл беті бийктігі Z оси бойынша 10 нм-ден 80 нм-ге дейін болатын пирамидалы құрылымдардың қалың қабатымен бекітілді. Термоөндеу уақытының жогарылауы пайда болған шығындардың тегістелуіне алып келеді, елеулі түрде елшемдері бойынша кішірейеді және соңында коршаган ортага болініп шығатын пайда болған SiO<sub>2</sub>-нің Si O-га, ал оның Si және O-ге жіктелуімен байланысты елеулі үлкен пирамидалы құрылымдардың шығыны қыллады. Кремний термоөндеудің 120-минутынан бастап белгілі кристаллографиялық бағытын бойлай кремний силицидтері құрыла бастайтыны байкалды.

*Поступила 17.06.2016 г.*