

ISSN 1991-346X

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ  
ҰЛТТЫҚ ҒЫЛЫМ АКАДЕМИЯСЫНЫҢ

# Х А Б А Р Л А Р Ы

---

---

## ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

## NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES  
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА  
СЕРИЯСЫ**



**СЕРИЯ**

**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ**



**PHYSICO-MATHEMATICAL  
SERIES**

**4 (308)**

**ШІЛДЕ – ТАМЫЗ 2016 ж.**

**ИЮЛЬ – АВГУСТ 2016 г.**

**JULY – AUGUST 2016**

1963 ЖЫЛДЫҢ ҚАҢТАР АЙЫНАН ШЫҒА БАСТАҒАН  
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1963 ГОДА  
PUBLISHED SINCE JANUARY 1963

ЖЫЛЫНА 6 РЕТ ШЫҒАДЫ  
ВЫХОДИТ 6 РАЗ В ГОД  
PUBLISHED 6 TIMES A YEAR

АЛМАТЫ, ҚР ҰҒА  
АЛМАТЫ, НАН РК  
ALMATY, NAS RK

Б а с р е д а к т о р

ҚР ҰҒА академигі,

**Мұтанов Г. М.**

Р е д а к ц и я а л қ а с ы:

физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Әшімов А.А.**; техн. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Байғұнчечков Ж.Ж.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Жұмаділдаев А.С.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Қалменов Т.Ш.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Мұқашев Б.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Өтелбаев М.О.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Тәкібаев Н.Ж.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Харин С.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Әбішев М.Е.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Жантаев Ж.Ш.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Қалимолдаев М.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Косов В.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Мұсабаев Т.А.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Ойнаров Р.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Рамазанов Т.С.** (бас редактордың орынбасары); физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Темірбеков Н.М.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Өмірбаев У.У.**

Р е д а к ц и я к ең е с і:

Украинаның ҰҒА академигі **И.Н. Вишневский** (Украина); Украинаның ҰҒА академигі **А.М. Ковалев** (Украина); Беларусь Республикасының ҰҒА академигі **А.А. Михалевич** (Беларусь); Әзірбайжан ҰҒА академигі **А. Пашаев** (Әзірбайжан); Молдова Республикасының ҰҒА академигі **И. Тигиняну** (Молдова); мед. ғ. докторы, проф. **Иозеф Банас** (Польша)

Главный редактор

академик НАН РК

**Г. М. Мутанов**

Редакционная коллегия:

доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **А.А. Ашимов**; доктор техн. наук, проф., академик НАН РК **Ж.Ж. Байгунчеков**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **А.С. Джумадильдаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Т.Ш. Кальменов**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Б.Н. Мукашев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **М.О. Отелбаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Н.Ж. Такибаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **С.Н. Харин**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **М.Е. Абишев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Ж.Ш. Жантаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **М.Н. Калимолдаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **В.Н. Косов**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Т.А. Мусабаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Р. Ойнаров**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Т.С. Рамазанов** (заместитель главного редактора); доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Н.М. Темирбеков**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **У.У. Умирбаев**

Редакционный совет:

академик НАН Украины **И.Н. Вишневский** (Украина); академик НАН Украины **А.М. Ковалев** (Украина); академик НАН Республики Беларусь **А.А. Михалевич** (Беларусь); академик НАН Азербайджанской Республики **А. Пашаев** (Азербайджан); академик НАН Республики Молдова **И. Тигиняну** (Молдова); д. мед. н., проф. **Иозеф Банас** (Польша)

«Известия НАН РК. Серия физико-математическая». ISSN 1991-346X

Собственник: РОО «Национальная академия наук Республики Казахстан» (г. Алматы)

Свидетельство о постановке на учет периодического печатного издания в Комитете информации и архивов Министерства культуры и информации Республики Казахстан №5543-Ж, выданное 01.06.2006 г.

Периодичность: 6 раз в год.

Тираж: 300 экземпляров.

Адрес редакции: 050010, г. Алматы, ул. Шевченко, 28, ком. 219, 220, тел.: 272-13-19, 272-13-18,

[www.nauka-nanrk.kz/physics-mathematics.kz](http://www.nauka-nanrk.kz/physics-mathematics.kz)

---

© Национальная академия наук Республики Казахстан, 2016

Адрес типографии: ИП «Аруна», г. Алматы, ул. Муратбаева, 75.

Editor in chief

**G. M. Mutanov**,  
academician of NAS RK

Editorial board:

**A.A. Ashimov**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **Zh.Zh. Baigunchekov**, dr. eng. sc., prof., academician of NAS RK; **A.S. Dzhumadildayev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **T.S. Kalmenov**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **B.N. Mukhashev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **M.O. Otelbayev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **N.Zh. Takibayev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **S.N. Kharin**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **M.Ye. Abishev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **Zh.Sh. Zhantayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **M.N. Kalimoldayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **V.N. Kosov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **T.A. Mussabayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **R. Oinarov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **T.S. Ramazanov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK (deputy editor); **N.M. Temirbekov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **U.U. Umirbayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK

Editorial staff:

**I.N. Vishnievski**, NAS Ukraine academician (Ukraine); **A.M. Kovalev**, NAS Ukraine academician (Ukraine); **A.A. Mikhalevich**, NAS Belarus academician (Belarus); **A. Pashayev**, NAS Azerbaijan academician (Azerbaijan); **I. Tighineanu**, NAS Moldova academician (Moldova); **Joseph Banas**, prof. (Poland).

**News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Physical-mathematical series.**  
**ISSN 1991-346X**

Owner: RPA "National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan" (Almaty)

The certificate of registration of a periodic printed publication in the Committee of information and archives of the Ministry of culture and information of the Republic of Kazakhstan N 5543-Ж, issued 01.06.2006

Periodicity: 6 times a year

Circulation: 300 copies

Editorial address: 28, Shevchenko str., of. 219, 220, Almaty, 050010, tel. 272-13-19, 272-13-18,  
[www.nauka-nanrk.kz](http://www.nauka-nanrk.kz) / [physics-mathematics.kz](http://physics-mathematics.kz)

---

© National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, 2016

Address of printing house: ST "Aruna", 75, Muratbayev str, Almaty

**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°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°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 SiO<sub>2</sub> on 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. Көшкінбай**

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°C от 10 до 360 минут вызывает ощутимые изменения межплоскостного расстояния  $d$ , начиная со 120 минутного термоотжига 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  $\text{Si-SiO}_2$ . 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 поглощаются стоками поверхностного образца и объемными микродефектами (вакансионными 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 (с)  $\text{Si}$  с удельным сопротивлением  $10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . 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 предпологать, что небольшие структурные изменения в кремнии возникают при наших условиях термоотжига образца Si в пределах от 120 до 360 минут.

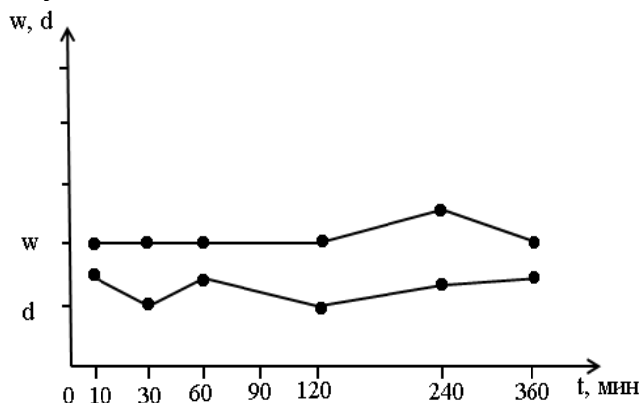


Рисунок 1 – Зависимость параметров  $d$ ,  $\omega$  кремния от времени прогрева образца ( $T=700^\circ\text{C}$ )

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 SiC (Т. А и В Рис.2), количество которых, по мере увеличения температуры отжига возрастает.

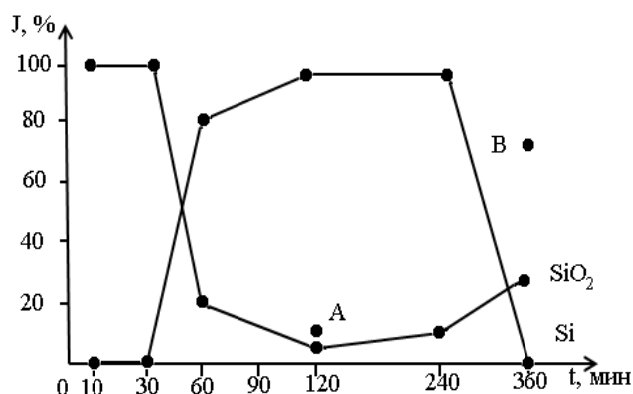


Рисунок 2 – Изменение содержания кремния и диоксида Si в зависимости от времени термоотжига ( $T=700^\circ\text{C}$ )

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.

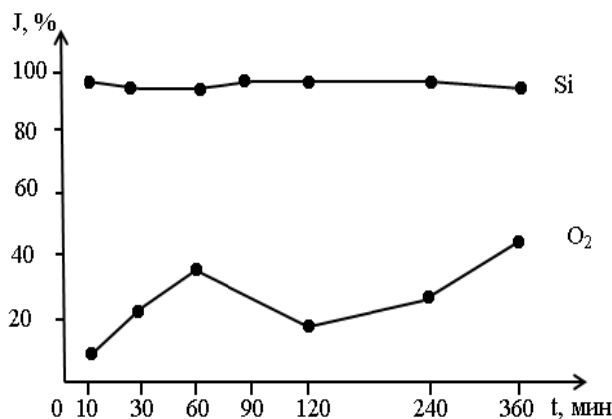


Рисунок 3 – Изменение содержания кислорода и кремния в зависимости от времени термоотжига ( $T=700^{\circ}\text{C}$ )

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 ( $\text{SiC}$ ) - 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 обратиться к рисунку 2 и 3, то можно предположить, что первые 60 минут термоотжига образца приводит 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 дислокации 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 ( $\text{SiC}$ ).

**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  $\text{SiC}$ . 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 ( $\sim 10^{16}-10^8 \text{ см}^{-3}$ ) [12] и



углерода ( $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) [13,14]. В частности, если проследить за изменением содержания кислорода в кремнии в зависимости от времени термоотжига (Рис.3), то видим, что их выделение наиболее при 60 и 360-минутной термообработке образца.

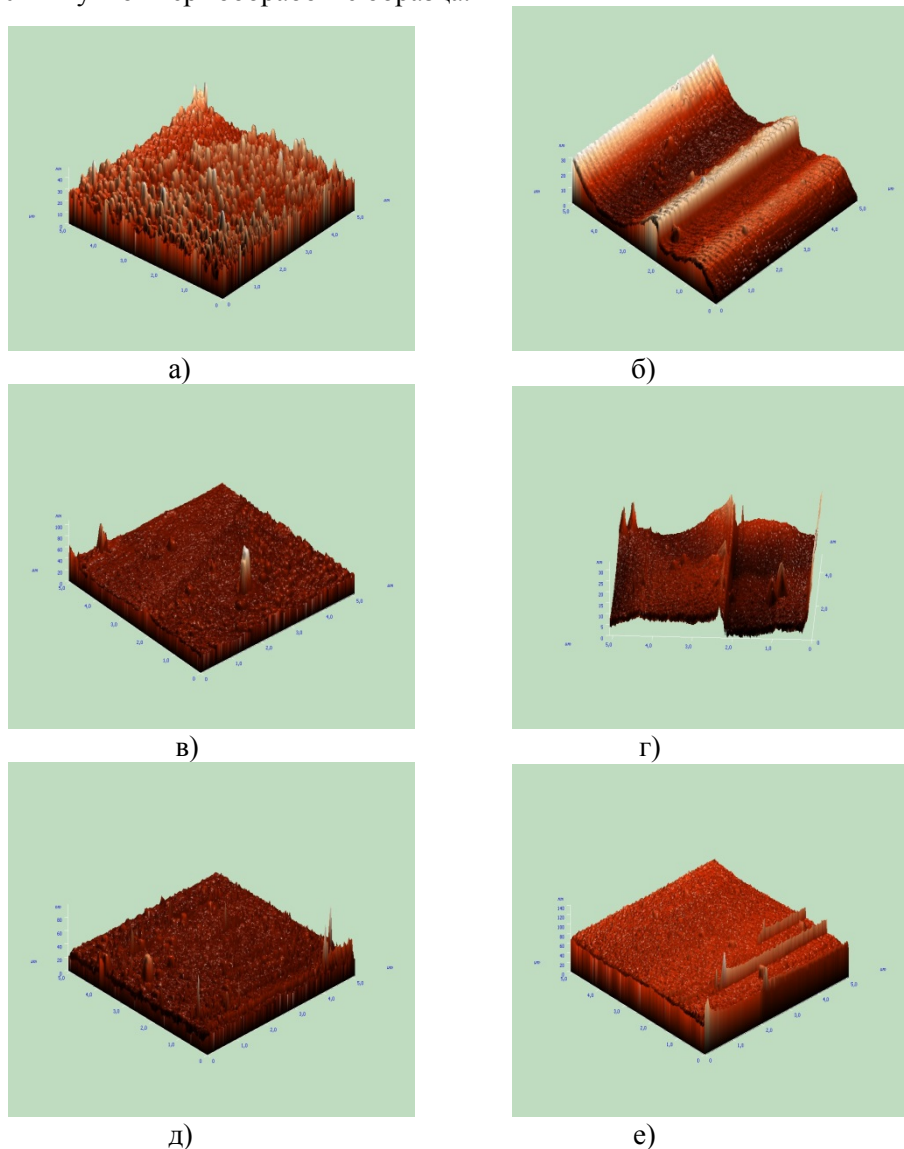


Рисунок 4 – АСМ изображение термоотожженного кремния при различном времени отжига: а)10 мин; б)30 мин; в)60 мин; г)120 мин; д )240 мин; е)360 мин

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 вакансионного типа.

Рассматривая трехмерные АСМ-изображения, полученные при термоотжиге ( $700^\circ\text{C}$ ) 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., Глеумуратова К.Т., Сеитов А.С. Стимулирование изменений физических характеристик кремния лазерным воздействием // Вестник КазНТУ. 2014. №2. с.328-334.
- [2] Меженный М.В., Мильвидский М.Г., Простомолотов А.И. Моделирование напряженного состояния пластин кремния большого диаметра в процессе термического отжига // ФТТ.2003. т.45. вып. 10. с.1794-1804.
- [3] Енишерлова 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. // ФТТ, 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 методом диффузного рассеяния рентгеновских лучей. // ФТТ.2003. т. 45. вып.10.с. 1825–1833.
- [6] Компан М.Е. Механизм самоорганизации регулярной структуры пористого кремния. // ФТТ.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., Кроков А.Ю. Разрушение поверхности кремния при импульсном воздействии лазерных импульсов. //Сб.трудов ИПЛИТ 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., Блецкан 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] Mezheny 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] Mezheny 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., Mezheny 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] Banischev 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., Habacek Y.S., Tucker I.R., Abeln G.C., Appl. Phys. Lett. G4, 2010(1994).
- [18] Kosherov T.S., Bolatov 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 КҮЙІНІҢ  
ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ

Т.С. Көшеров, Б.Қ.Көшкінбай

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

**Түйін сөздер:** термоөңдеу, силицидтер, құрылым, кернеу, тор параметрлері, пирамидалы құрылымдар, кристаллографиялық остер.

**Аннотация.** Рентгендік дифрактометр көмегімен әртүрлі уақыт аралығында ауадағы термиялық өңдеу кезіндегі кремнийдің кристалдық құрылымының өзгеру ерекшеліктері зерттелді. 10 минуттан 360 минут аралығында 700<sup>0</sup>С кезіндегі температуралық өңдеу, ауадағы термиялық өңдеудің 120-минутынан бастап жазықтықаралық қашықтық d-ның елеулі өзгерістерін шақыратыны көрсетілді. Үлгінің кристалдық торының ішкі кернеулерін зерттеу кезінде де осындай өзгерістер байқалды. Термоөңдеу уақытын жоғарылатқан сайын осы уақытқа байланысты айтарлықтай өзгерістерге ұшырайтын кремний диоксидінің пайда болып жүретіні, сондай-ақ оның пайда болуы кремний карбидінің (SiC) құрылуына алып келетіні дәлелденді. Құрылған кремний диоксидінің өзгеріс қарқыны дәл сондай температуралық өңдеу шарттарындағы оттегі құрамының сандық өзгерістерімен байланысты.

Өңдеудің әртүрлі уақыт аралығындағы (700<sup>0</sup>С) температуралық термоөңделген кремний беті фрагменттерінің топографиясының АҚМ-суреттерін зерттей отырып, үлгінің бүкіл беті биіктігі Z осі бойынша 10 нм-ден 80 нм-ге дейін болатын пирамидалы құрылымдардың қалың қабатымен бекітілді. Термоөңдеу уақытының жоғарылауы пайда болған шығыңқылардың тегістелуіне алып келеді, елеулі түрде өлшемдері бойынша кішірейеді және соңында қоршаған ортаға бөлініп шығатын пайда болған SiO<sub>2</sub>-нің SiO<sub>2</sub>-ға, ал оның Si және O-ге жіктелуімен байланысты елеулі үлкен пирамидалы құрылымдардың шыңы қиылады. Кремний термоөңдеудің 120-минутынан бастап белгілі кристаллографиялық бағытын бойлай кремний силицидтері құрыла бастайтыны байқалды.

Поступила 17.06.2016 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

## Процессы в околоземном космическом пространстве

<i>Яковец А.Ф., Гордиенко Г.И., Жумабаев Б.Т., Литвинов Ю.Г., Абдрахманов Н.</i> Статистика ночных увеличений электронной концентрации в максимуме F2-слоя.....	5
<i>Сомсиков В.М.</i> О природе бифуркации динамических систем.....	11
<i>Жантаев Ж.Ш., Грищенко В.Ф., Мукушев А.</i> Схемотехническое моделирование защиты электронной аппаратуры от электростатического разряда.....	15
<i>Антонова В.П., Крюков С.В., Луценко В.Ю., Чубенко А.П.</i> Эффекты землетрясений в интенсивности нейтронов тепловых энергий на высокогорной станции Северного Тянь-Шаня.....	20
<i>Салихов Н.М.</i> Новый метод регистрации динамики вспышек ионизации в ионосфере аппаратно-программным комплексом доплеровских измерений на наклонной радиотрассе.....	27

## Наземно-космические методы исследования геодинамических процессов в земной коре

<i>Вилев А.В., Жантаев Ж.Ш., Стихарный А.П.</i> Динамика сезонных движений GPS станций на территории Северного Тянь-Шаня.....	34
<i>Хачикян Г.Я., Жумабаев Б.Т., Тойшиев Н.С., Калдыбаев А., Нуракунов С.</i> Вариации солнечной активности и пространственно-временное распределение сильных землетрясений ( $M \geq 7.0$ ) на территории Евразии в 1973-2014 гг.....	40
<i>Бибосинов А.Ж., Шигаев Д.Т., Калдыбаев А.А., Нуракунов С.М., Бреусов Н.Г., Мамырбек Г.Б.</i> Исследование Шардаринского гидрокомплекса методом георадиолокации.....	46
<i>Бибосинов А.Ж., Нуракунов С.М., Калдыбаев А.А., Шигаев Д.Т.</i> Эффективность применения георадиолокационного метода при изучении инженерно-геологических условий на участках Алматинского метрополитена приповерхностного залегания.....	50
<i>Шигаев Д.Т., Мунсызбай Т.М.</i> Маломощная солнечная теплотэлектростанция с максимальным использованием энергии Солнца.....	56
<i>Жантаев Ж.Ш., Хачикян Г.Я., Кайраткызы Д., Андреев А.</i> Долговременные тренды в вариациях продолжительности земных суток и частоты возникновения на планете землетрясений.....	62
<i>Хачикян Г.Я., Жумабаев Б.Т., Сералиев А., Хасанов Э.</i> Пространственное распределение характеристик главного геомагнитного поля и эпицентров глубокофокусных ( $h > 350$ км) землетрясений по данным 1973-2014 гг.....	67

\*\*\*

<i>Исанова М.К., Коданова С.К., Рамазанов Т.С., Бастыкова Н.Х., Габдуллин М.Т., Молдабеков Ж.А.</i> Сечение рассеяния и тормозная способность в плотной плазме: влияние эффектов дифракции и динамического экранирования.....	73
<i>Кудайкулов А.А., Жозеранд К., Калтаев А.</i> Численное исследование процесса пальцеобразования при течении двух не смешивающихся жидкостей в канале.....	86
<i>Ахметов Б.С., Корченко А.А., Жумангалиева Н.К.</i> Модель решающих правил для обнаружения аномалий в информационных системах.....	91
<i>Бапаев К.Б., Сламжанова С.С., Исаева Г.Б.</i> О дискретных неравенствах.....	101
<i>Боос Э.Г., Альменова А.М., Жуков В.В., Садыков Т.Х., Степанов А., Таутаев Е.М.</i> Исследование взаимодействий частиц космического излучения методом радиоизлучения на высоте 3340 метров над уровнем моря.....	110
<i>Джакупов К.Б.</i> О моделировании динамики вязкой жидкости уравнениями ротора скорости и функции тока.....	117
<i>Джакупов К.Б.</i> Эффективное применение уравнений максвелла и закона ома в численном моделировании двухфазных процессов магнитной гидродинамики.....	124
<i>Исадыков А.Н., Иванов М.А., Сахиев С.К., Жаугашиева С.А., Нурбакова Г.С., Мукушев Б.А.</i> Вычисление ширины распада $\omega(782)$ мезона для реакции $\omega \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0$ в ковариантной модели кварков.....	135
<i>Калмурзаев Б.С.</i> О полурешетках роджерса двухэлементных семейств разностей в п. множеств.....	141
<i>Кошеров Т.С., Жумабекова Г.Е.</i> Исследование структуры и фазового состава поверхности кремния при температурном и лазерном воздействии.....	147
<i>Кошеров Т.С., Көшикбай Б.Қ.</i> Особенности напряженного состояния пластин кремния в процессе термического отжига.....	156
<i>Курманбаев Д.М.</i> Солитонная деформация поверхности энепера третьего порядка.....	163
<i>Майлебаева Д., Тилегенова Д.</i> Метод параметризации при решении трансцендентных уравнений.....	168
<i>Мамаев Ш.М., Даниярбек Р.Н.</i> Ұзындығы шектелген стержеңде пластикалық облыстың және кернеуді жеңілдету толқындарының құрылуын торлық-характеристика әдісімен зерттеу.....	173
<i>Оңгарбаева А.Д.</i> Электрондық білім беру ресурстарын оқу процесінде болашақ мұғалімдерді оқытуда қолдану.....	184
<i>Сүйменбаев Б.Т., Алексеева Л.А., Сүйменбаева Ж.Б., Гусейнов С.Р.</i> Моделирование динамики космического аппарата в гравимагнитном поле земли в системе «MATLAB SIMULINK».....	188
<i>Туленбаев К.М., Шаймарданова Ж.Н., Габдуллин Б.</i> Структурные свойства $(\alpha, \beta)$ – коммутативных алгебр.....	208
<i>Сарсенгельдин М.М., Касабек С., Сагидолла Б.М.</i> Точное и приближенное решения двухфазовой обратной задачи Стефана.....	214