

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), 147 – 155

UDC 536.4:621.373.

**STUDY OF STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION OF SILICON SURFACE AT TEMPERATURE AND LASER EXPOSURE****T. Kosherov, G. Zhumabekova**Kazakh National Research Technical University named after K. Satpaev, Almaty  
[gulbarshyn\\_94@mail.ru](mailto:gulbarshyn_94@mail.ru)**Key words:** defects, parameters, voltage, oxidation, crystallization, laser beams.

**Abstract:** Structural changes and surface morphology of silicon at 400<sup>0</sup> C annealing temperature and with different heat processing time, and following effect of continuous laser exposure during 60 minutes were studied using the methods of X-ray structure analysis and AFM. It was determined that structural changes of oxidation and oxidation defects forming, and crystallization are observed at these exposure conditions on the samples. It was demonstrated that there occur destructed and annealed unsteady stable defects during sample heating (400<sup>0</sup>C). Effects related to these defects result in decreasing of lattice compression and deformation. The condition of first structural change of crystalline lattice is defined. Heat processing (with) Si provides thermos oxidizing production on sample surface which takes place in two steps. Continuous laser exposure after thermal annealing of the sample recrystallizes its surface layer and effects oxidation and photochemistry processes. Thermal annealing which is one of the laser exposure components results in relaxation of mechanical stresses at the interface between silicon and oxide. The growth of SiO<sub>2</sub> thickness is connected with increase of prior thermal annealing time for the sample, and subsequent use of the laser beam due to increase of the oxidation rate, and its decrease is due to the SiO<sub>2</sub> decomposition and subsequent evaporation of its degradation products.

Close connection of lattice parameters changes depending on thermal annealing time of the sample and further laser exposure was identified.

УДК 536.4:621.373

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ ПРИ ТЕМПЕРАТУРНОМ И ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ****Т.С. Кошеров, Г.Е.Жумабекова**

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

**Ключевые слова:** дефекты, параметры, напряжение, окисление, кристаллизация, лазерные лучи.**Аннотация:** Методами рентгеноструктурного анализа и АСМ исследовались структурные изменения и морфология поверхности кремния при температуре отжига

400<sup>0</sup>С при различном времени термообработки, а также последующее влияние непрерывного лазерного воздействия в течение 60 минут. Установлено, что при этих условиях воздействия на образцы наблюдаются структурные изменения, окисления и формирования окислительных дефектов, а также кристаллизация. Показано, что при прогреве образца до (400<sup>0</sup>С) в нем возникают неустойчивые стабильные дефекты, которые распадаются и отжигаются. Связанные с этими дефектами эффекты приводят к снижению сжатия и деформации решетки. Установлено условие первичного структурного изменения кристаллической решетки. Термообработки (с) Si обуславливают появление на поверхности образца термоокисление, которое протекает в два этапа. Непрерывное лазерное облучение после термоотжига образца рекристаллизует его поверхностный слой, влияет на процессы окисления и фотохимии. Термический отжиг, являющийся одной

из составляющих лазерного воздействия, приводит к релаксации механических напряжений на границе раздела кремний и его окисел. Рост толщины  $\text{SiO}_2$  с увеличением времени предварительного термоотжига образца и последующее действие лазерного луча – следствие увеличения скорости окисления, а ее уменьшение связано с разложением  $\text{SiO}_2$  и последующем испарением продуктов ее разложения.

Выявлена тесная связь изменений параметров решетки в зависимости от времени термоотжига образца и последующего лазерного воздействия.

**Введение.** Изучение модификации поверхности и изменений структуры полупроводников, в частности, кремния является лазерная технология обработки [1], отличающаяся высокой локальностью и селективностью воздействия на обрабатываемые элементы. Термическое влияние лазерного излучения даже после предварительного температурного отжига создают большие градиенты температур и термонапряжений. Известно, что при воздействии лазерного излучения на поверхность кристаллических твердых тел возможна генерация структурных дефектов, концентрация которых меняется [2]. Воздействие лазерного излучения на полупроводники может приводить к различным изменениям их кристаллической структуры, электрофизических и оптических свойств [3,4].

Нетермические действия лазерного излучения связываются с возбуждением электронных состояний, а также связывают с локальным плавлением поверхности. Причем процесс разрушения поверхности наблюдается только при многоимпульсном воздействии, носит накопительный характер и связан с генерацией и ростом дислокации.

В ряде работ [5,6] установлена структура ряда междоузельных комплексов, которые исследовались путем изучения эффектов вытеснения элементов из узлов решетки междоузельными атомами Si. Они возникают при термообработке облученных образцов в результате распада комплексов.

Результаты этих работ однозначно указывают на то, что лазерное воздействие на Si неоднозначно в результатах полученных экспериментом и поэтому исследование процесса дефектообразования и диффузии, разрушение поверхности кремния, образование локальных неоднородностей в приповерхностном слое кремния, плавление и кристаллизация при лазерном воздействии представляет определенный интерес.

В работе исследованы отличительные особенности в приповерхностном слое и структуре кремния после термоотжига при различном времени и последующем лазерном воздействии, а также наблюдаемые при этих условиях эксперимента изменения параметров решетки и структуры, морфологии поверхностного слоя.

**Методы исследования.** Исследование проводилось с кристаллами (с) Si с удельным сопротивлением  $10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . Образцы предварительно подвергали термической обработке в атмосфере воздуха при температуре  $400^\circ\text{C}$  и времени 10, 30, 60, 120, 240 и 360 минут. Рентгенографические исследования выполнены на рентгенографическом дифрактометре X'Pert PRO фирмы Philips. Морфология поверхности образцов кремния, а также топографическая визуализация новых фазовых образований и изучение реальной структуры этих образований на уровне атомного разрешения после термического и лазерного воздействия, исследовались методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) производства NT-МДТ, модель Интегра-Прима. Источником излучения служил лазер типа LCS-DTL-317-50, мощность которого составила  $50 \text{ Вт}$ , работающий в непрерывном режиме. Эффективный диаметр сфокусированного лазерного пятна составил  $1,3 \text{ мм}$ .

Мерой структурного совершенства поликристаллического кремния подвергавшегося воздействию термоотжига и лазерного луча, измеряемого на основе дифрактометрических зависимостей, явилась величина параметра  $\omega$ , которая характеризует изменение структуры внутренних напряжений в приповерхностных слоях кремния [7].

**Результаты и их обсуждение.** Структурные изменения кремния при температурном отжиге и лазерном воздействии.

Проведенные исследования позволили получить зависимость структурных параметров  $\omega$ ,  $d$  и  $s$  от температуры прогрева образца при различном времени температурного воздействия. С увеличением времени термообработки образца при температуре  $400^\circ\text{C}$  параметры  $d$  – межплоскостное расстояние решетки кристалла и  $\omega$  – степень, возникших при термоотжиге

образца напряжение в структуре (с) Si (полуширина пика Si в спектрограмме), заметно изменяются, начиная с 30 минутной термообработки, достигая max при 60 минутах и, начиная с 120 минутного прогрева образца, эти параметры практически начинают стабилизироваться (Рис.1).

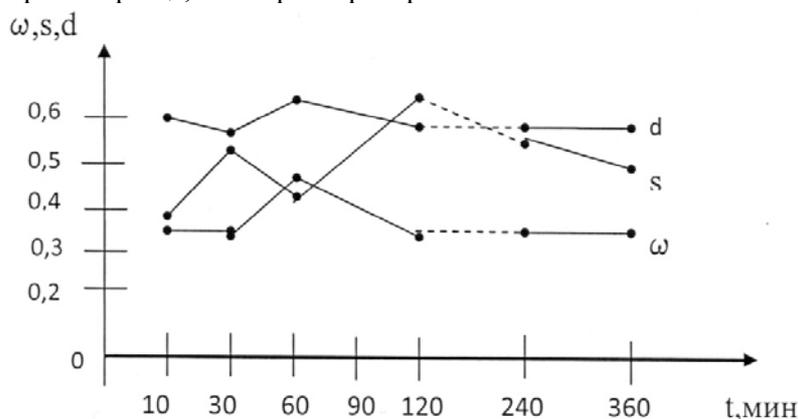


Рисунок 1- Зависимость параметров d, s, ω кремния от времени прогрева образца

Поскольку параметр  $\omega$  характеризует структурное состояние кристаллической решетки (с) Si и соответственно связанных с дефектами внутренних напряжений, возникших в образце при термоотжиге [8,9,10], то можно предположить, что небольшие структурные изменения в (с) Si возникают при названных выше условиях термоотжига образца кремния.

Полученные экспериментальные результаты показывают, что при прогреве образца до ( $400^{\circ}\text{C}$ ) в нем возникают неустойчивые стабильные дефекты, которые распадаются и отжигаются. В свою очередь уменьшение концентрации указанных дефектов сопровождается снижением, связанным с этими дефектами, сжатия или деформации и тем самым приводит к уменьшению, а затем и к исчезновению внутренних напряжений в кремнии и соответствующему убыванию и стабилизации структурных параметров d и  $\omega$ .

Несколько иная картина наблюдается в структуре (с) Si при постепенном нагревании образца Si от 10 до 360 минут (Рис.2). Параметры кристаллической решетки, такие как a и d изменяются также по-разному. Если изменение параметра a происходит постепенно нарастающей и стремится к стабилизации, то d решетки, начиная с 60 минут до 120 минут, претерпевает скачок и далее стремится к стабилизации по значению, что указывает на постепенную стабилизацию вновь образовавшейся структуры (с) Si после термоотжига. Таким образом, 60 минутный термоотжиг при  $400^{\circ}\text{C}$  является точкой начала первичного структурного изменения кристаллической решетки кремния, приводящего в дальнейшем к диффузии объемного кислорода, уменьшению концентрации междоузельного  $\text{O}_2$ , а это в свою очередь к образованию преципитатов  $\text{SiO}_x$  или  $\text{Si}_y\text{O}_x$  в объеме кристалла так и к образованию диоксида кремния на поверхности термоотожженного Si. Такая новая фаза может образовываться на поверхности, как отмечено [11], и в зоне активной деформации, что наблюдается при наших условиях термоотжига образца.

Изменение параметров a и d может быть и результатом наличия в решетке введенных примесей, несоответствующих атомным размерам решетки, которые становятся источником напряжений. Процесс изменений d и соответствующий рост значений параметра говорит об упорядочении кристаллической решетки в связи с уходом с узлов и междоузелье примесей замещения. И как установлено экспериментально, процесс кристаллизации решетки, при наших условиях термоотжига, стабилизирует постоянные решетки a и d при длительном времени прогрева образца (Рис.2).

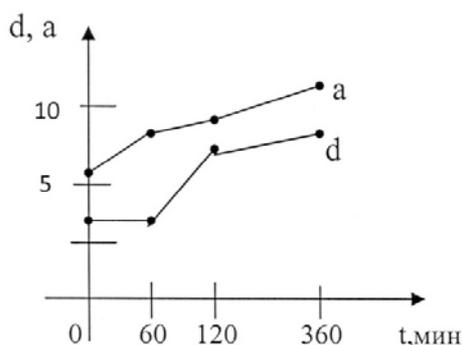


Рисунок 2 - Зависимость параметров структур (с) Si от времени термоотжига образца

Процесс уменьшения d и соответствующее увеличение величины a наблюдается при лазерном воздействии на образцы, предварительно термоотожженные (Рис.3).

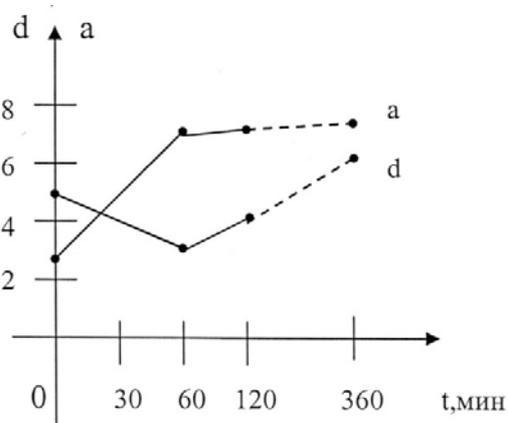


Рисунок 3 - Зависимость параметров решетки d и a от времени предварительного термоотжига и последующего лазерного воздействия ( $T=400^{\circ}\text{C}$ )

Эти заметные изменения наблюдаются на образцах, которые предварительно прошли термообработку при  $t=60$  минут, а затем дальнейшее облучение образцов, предварительно прошедших термоотжиг до 360 минут, приводят к постепенной стабилизации постоянных решетки d и a (Рис.3). Видимо, при наших условиях термообработки образцов и последующем лазерном воздействии возможны активация миграции примесей из объема полупроводника в область пространственного заряда и деформации. Термические эффекты как в случае термоотжига и дальнейшего непрерывного лазерного облучения не только отжигают дефекты в кристаллах Si, рекристаллизуют его поверхностный слой, но и влияют на процессы окисления кремния, а также фотохимии поверхности в условиях высокого уровня возбуждения кристалла [11].

Так, в частности, продукты фотохимического превращения и реакции могут стать причиной стимулированных процессов атомной перестройки неупорядоченной поверхностной фазы, ингибировать или способствовать дефектообразованию на поверхности образца.

Если рассмотреть зависимость параметров решетки d и a и полуширину пика рентгенографического спектра Si, указывающего на степень возникших напряжений в образце ( $\omega$ ), то видим, что значение  $\omega$  при  $t=60$  минут предварительном термоотжиге имеет наибольшее отклонение, которое в последующем времени воздействия, как температурного, так и лазерного, начинает стабилизироваться.

Детальное исследование поверхности термоотожженного образца показывает, что по мере увеличения времени отжига на поверхности появляется диоксид кремния, который претерпевает неоднократное изменение, достигая своего максимума при 120 минутном термоотжиге. Затем идет

постепенный спад его образования (Рис.4). Замечено также, что диоксид кремния появляется на поверхности образца также в виде других полимерных модификаций при 10 минутном прогреве (точка. А на рис.4).

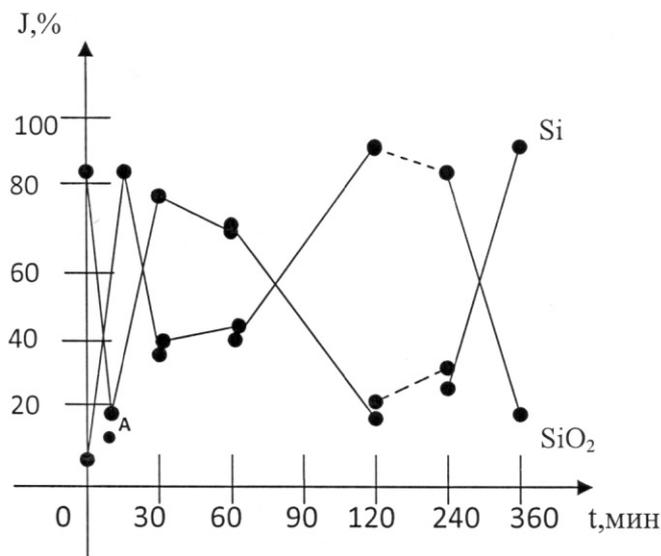


Рисунок 4 - Изменение процентного содержания Si и SiO<sub>2</sub> в зависимости от времени термоотжига

Таким образом, температурное воздействие на образцы кремния в зависимости от времени термообработки выявляют появление на поверхности образца диоксида кремния и других полимерных модификаций, и эти процессы тесно связаны со структурными изменениями.

**Морфология поверхности кремния (с) Si после температурного термоотжига и лазерного воздействия.** Морфология поверхности образцов (с) Si, по данным АСМ при температурной обработке 400°C и длительности от 10 до 360 минут в начале имеет однородную структуру с небольшими пирамидальными выступами по всей поверхности исследуемого образца по оси z высотой до 15нм, а затем поверхность трансформируется в более мелкие образования по фазовому составу. Низкая величина среднеквадратичной шероховатости и отсутствие кристаллических образований указывают на аморфизацию поверхности кремния в процессе термоокисления. По мере увеличения продолжительности термообработки размеры пирамидальных выступов сглаживаются, а в некоторых местах поверхности обнаруживается процесс объединения, приводящий к большим пирамидальным образованиям, размеры которых достигают по высоте до 200-300 нм и по площади в несколько десятков квадратных нм (Рис.5). Это островки оксидов кремния, сформировавшихся в результате термоотжига. Если обратиться к рисункам 1-5, то можно предположить, что при t=60 минут термоотжиг образца приводит к максимальному образованию SiO<sub>2</sub> на поверхности кремния и соответственно к изменению параметров решетки. С другой стороны эти результаты показывают, что при этих условиях температурной обработки Si происходит сдвиговые напряжения, а также высокие концентрации точечных дефектов и их градиенты могут привести к реализации условий для появления дислокаций и их роста [12]. Нагрев и высокая концентрация точечных дефектов приводят к деформации и образованию объединенных пирамидальных выступов больших размеров на поверхности. После установления термодинамического равновесия (до t=120минут) весь процесс вновь повторяется, но уже с частичной кристаллизацией.

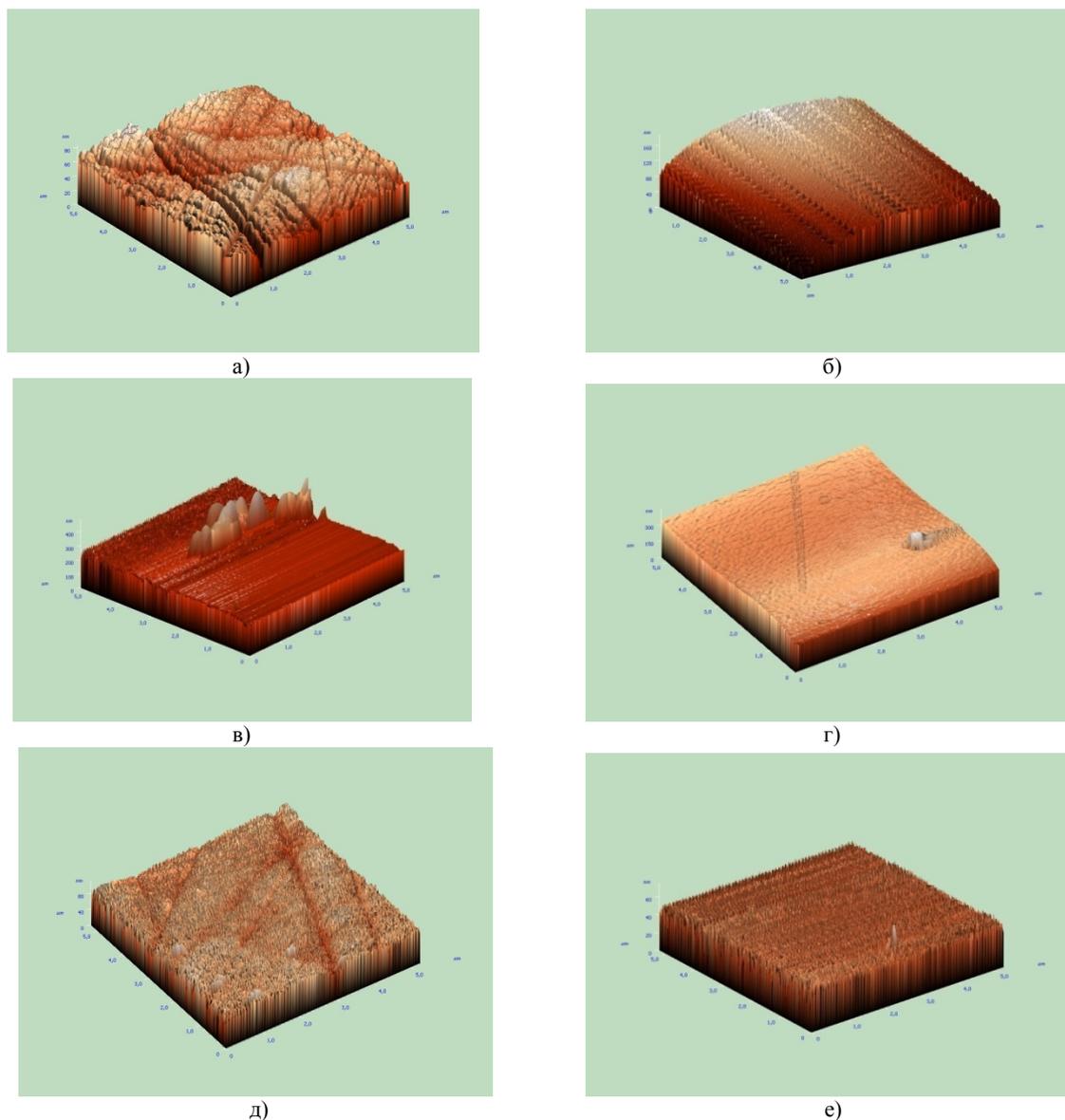


Рисунок 5- АСМ изображение термоотожженного при 673°К образца (с) Si при различном времени : а)10 мин; б)30 мин; в)60 мин; г)120 мин; д)240 мин; е) 360 мин

Анализ АСМ изображений морфологии поверхности образцов (с) Si при лазерном воздействии после предварительной температурной обработки при 400°С и длительности от 10 до 360 минут показывают, что уже при 10 минутном предварительном термоотжиге лазерное облучение вызывает образование на поверхности кремния ее диоксида, поверхность покрывается пирамидальными выступами по оси z высотой до несколько десятков нм (Рис.б). Если время предварительного термоотжига образца увеличить до 60 минут дальнейшее лазерное воздействие приводит к сглаживанию термоокисления, приостанавливаются и остаются только небольшие островки пирамидальных выступов (Рис.б).

При дальнейшем увеличении времени термоотжига до 120 минут процесс сглаживания поверхности кремния продолжается, укрупняя оставшиеся островки диоксида кремния. При длительном предварительном термоотжиге образца (t=240 минут) и последующем лазерном облучении мы замечаем, что вновь идет процесс термоокисления - пирамидальные образования, причем не исключено, что поверхность пирамидальных образований частично плавится и испаряется. При t=360минут термоотжига и последующего лазерного воздействия поверхность образца покрывают игольчатые образования, а пирамидальные выступы постепенно сглаживаются.

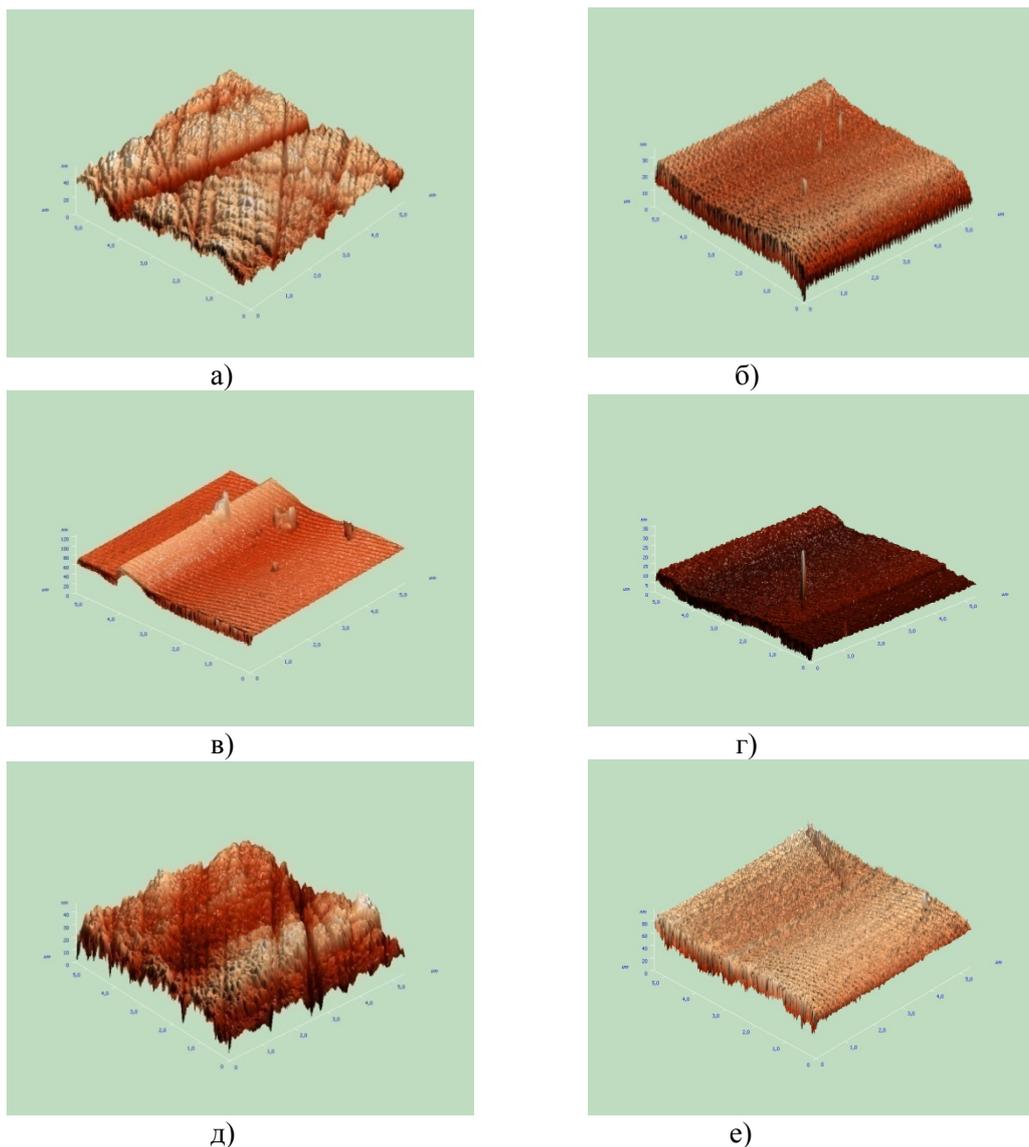


Рисунок 6 - АСМ изображение термоотожженного при 673°K образца (с) Si при различном времени отжига и последующем непрерывном лазерном воздействии ( $t=60$  мин): а)10 мин; б)30 мин; в)60 мин; г)120 мин; д )240 мин; е)360 мин

Таким образом, сопоставляя рисунки 5 и 6, мы видим, что образование термоокисленных диоксидов кремния ( $\text{SiO}_2$ ) идет в два этапа: при  $t=10$  минут и  $t=240$  минут. При этом лазерное воздействие убыстряет этот процесс. Одновременно идет процесс частичного плавления оксидной пленки и ее испарение, что может повлиять на структуру образца, а следовательно, на электрофизические характеристики кремния.

Как известно, при получении полупроводниковых материалов используемых для создания электронной техники, часто используют технологическую операцию введения примесей, приводящую к нарушению структуры (аморфизации) поверхностного слоя [13-16]. Восстановление кристаллической структуры и электрической активации введенных примесей осуществляется термической обработкой полупроводникового материала, что является нежелательным фактом, приводящим иногда к необратимому изменению электрофизических параметров исходного материала [17,18]. Лазерный отжиг поверхностных слоев - один из наиболее результативных способов активации таких материалов [19]. Ведь преимуществом такого способа обработки является возможность проведения отжига в атмосферных условиях, и локализация участка отжига. Этот вид отжига связан также с локальным расплавлением активируемого объема или поверхности образца, при котором происходит кристаллизация с возрастанием коэффициента

диффузии основных примесей, приводящих к их высокой активации в несколько раз и возможностью получения бездефектных слоев. Наши эксперименты подтверждают эту трактовку.

Термический отжиг, являющийся одной из составляющих лазерного воздействия, приводит к релаксации механических напряжений на границе раздела кремния - (естественный) окисел, что сопровождается образованием дефектов. Поскольку центрами адсорбции газов на реальной поверхности кремния являются, как правило, дефекты, увеличение их концентрации после термообработки и последующего лазерного воздействия должно приводить к увеличению чувствительности структур поверхностного слоя к кислороду, природа появления которого разнообразна.

Если рассмотреть изменение слоев окисла, его рост и уменьшение, то можно предположить, что рост толщины  $\text{SiO}_2$  с увеличением времени предварительного термоотжига и последующего действия лазерного луча является следствием увеличения скорости окисления, а уменьшение толщины пленки связано с разложением  $\text{SiO}_2$  и последующим испарением, что подтверждается результатами наших экспериментов [20].

**Выводы.** Таким образом, полученные результаты позволяют заключить, что при термообработке (с) Si на поверхности образца появляются диоксид кремния и другие полимерные модификации, причем образование термоокисленных диоксидов кремния идет в два этапа. В образце возникают неустойчивые дефекты, которые распадаются и отжигаются. Связанные с этими дефектами процессы приводят к снижению сжатия и деформации. Установлено условие первичного структурного изменения кристаллической решетки (с) Si. Дальнейшее непрерывное лазерное воздействие ускоряет этот процесс, приводит к частичному плавлению приповерхностного слоя, и испарению, изменению структуры образца и постепенной кристаллизации. Показана тесная связь изменений параметров решетки в зависимости от времени термоотжига образца и последующего лазерного воздействия.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Вейко В.П., С.М.Метев Лазерные технологии в микроэлектронике. – София: Издательство Болгарской академии наук, 1991.-363 с.
- [2] Бойко В.И., Лукьянчук Б.С., Царев Е.Р // Труды GPI.1991.-том.30.-С.6.
- [3] Кошеров Т.С., Ермолаев В.Н., Болатов М.Б. Влияние лазерного воздействия на структуру и морфологию поверхности кремния. –Алматы: ж.Вестник КазНТУ.-2014.-№4.-С.369-374.
- [4] Кошеров Т.С., Серик А.Изменение морфологии поверхности поликристаллического кремния при изотермических отжигах.-Алматы:Известие НАН РК,серия физико-математических наук.-2014.-№6.-С.55-59.
- [5] Бережнов Н.И., Стельмах В.Е., Челябинский А.Р. Статистика физики.1983(а) 78.к121
- [6] Бережнов Н.И., Супрун-Белевич Ю.Р., Челябинский А.Р., Хаки Тахер Х.И. Известия Вузов. Физика, 1991.- том.4.- С.55.
- [7] Баушев А.Ф., Емельганов В.Й., Новиков М.М. // Физика. - 1992.-№2.-С.178.
- [8] Кошеров Т.С., Ермолаев В.Н., Тлеумуратова К.Т., Сеитов А.С. Стимулирование изменений физических характеристик кремния лазерным воздействием. –Алматы: ж. Вестник КазНТУ.-2014.-№2.- С.328-334.
- [9] Горелик С.С., Дашевский М.Я. Материаловедение полупроводников и диэлектриков. – Москва: Металлургия, -1988.-574 с.
- [10] Макара В.А., Стебленко Л.П., Крит А.Н., Калинин Д.В., Курилюк А.Н., Науменко С.Н. Стимулирование воздействием рентгеновского излучения и магнитного поля изменение физических характеристик кристаллов кремния // ФТТ.-2012.-том.54, вып.7.- С.1356-1360.
- [11] Шмытько И.М., Изотов А.Н, Афоникова Н.С., Виейра С., Рубио Г. //Фазовые переходы в монокристаллах кремния, обусловленные ориентированной пластической деформацией // ФТТ.-1998.-том.40,- №4.-С.746-749.
- [12] Шапавалов В.П.,Грядун В.И.,Королев А.Е.Дефектообразование в поверхностной области кремния при его термическом окислении // ФТП.- 1995.- том 29, вып.11.- С. 1995- 2001.
- [13] Н.-J. Gossman, J.M. Poate. Proc. ICPS-23 (Berlin, 1996) 4, 2569
- [14] Баграев Н.Т., Чайкина Е.И., Клячкин Л.Е. и др. Сверхрешетка. Микроструктура. 23(2), 337 (1998)
- [15] Bagraev N.T., W. Gehlhoff, L.E. Klyachkin, A. Naser. Def. Dif. Forum, 143--147, 1003 (1997)
- [16] Баграев Н.Т., Буравлев А.Д., Клячкин А.Е., Маляренко А.М., Рыков С.А. Самоупорядоченные микрорезанаторы в сверхмелких кремниевых  $p^+-n^-$  переходах. Физика и техника полупроводников.-2000.-том.34, вып.6.- С. 726-736.
- [17] Галкин Н.Г., Ваванова С.В., Галкин К.Н., Баталов Р.И., Баязитов Р.М., Нуждин В.И. Наносекундный импульсный отжиг кремния, имплантированного ионами магния // ЖТФ.-2013.-том.83,-№1.-С.99-104.
- [18] Баталов Р.Н., Баязитов Р.М., Теруков Е.И., Кудоярова В.Х., Weiser G., Kuehne // ФТП.-2001.-том.35.-С.1320-1325.
- [19] Двуреченский А.В., Качурин Г.А., Нидаев Е.В., Смирнов Л.С. Импульсный отжг полупроводниковых материалов.-М.Наука.-1982.-С.208.
- [20] Кошеров Т.С., Ермолаев В.Н., Мута А.Н. Модификация поверхности кремния при температурном воздействии //Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Инженерное образование и наука в XXI веке: проблемы и перспективы».-Алматы:2014.-том.2.-С.487-490.

## REFERENCES

- [1] Veiko V.P., S.M. Metev Laser technology in microelectronics. Sofia. Publishing House of the Bulgarian Academy of Sciences, 1991.-363p.(in Russ.).
- [2] Boyko V.I., Lukyanchuk B.S., Tsarev E.R. Proceedings of the GPI.1991.t.30.p.6.(in Russ.).
- [3] Kosher T.S., Yermolaev V.N., Bolotov M.B. Influence of laser impact on the silicon surface structure and morphology. Almaty: zh.Vestnik KazNTU.2014.No4.P.369-374.(in Russ.).
- [4] Kosher T.S., Serik A. Change of polycrystalline silicon surface morphology for isothermal annealing. Almaty: RK NAS News, a series of physical and mathematical sciences.2014.No 6.P.55-59.(in Russ.).
- [5] Berezhnov N.I., Stelmakh V.F., Chelyadinskii A.R, Phys.Stat.Sol.1983 (a) 78.k121.(in Russ.).
- [6] Berezhnov N.I., Suprun-Belevich Yu.R., Chelyadinskii A.R., Haki Taher H.I. Изв. Вузов физика 1991 t.4.p.55.(in Russ.).
- [7] Baushev A.F., Emelganov V.J., Novikov M.M. //Las physics.1992.№2.r.178. (in Russ.).
- [8] Kosher T.S., Ermolaev V.N., Tleumuratova K.T., Seitov A.S. Stimulation of changes in physical characteristics of the silicon laser action. -Almaty: Bulletin of KazNTU.2014.No 2.P.328-334.(in Russ.).
- [9] Gorelik S.S., Dashevskii M.J. Materials of semiconductors and dielectrics. Moscow: Metallurgy, -1988.-574 P.(in Russ.).
- [10] Makara V.A. Steblenko L.P., Krit A.N. Kalinichenko D.V. Kuryliuk A.N., Naumenko S.N. Stimulating the changes in the physical characteristics of silicon crystals with X-rays and magnetic field. FTT.2012.Vol.54, Issue.7.P.1356-1360.(in Russ.).
- [11] Shmyt'ko I.M., Izotov N.N., Afonikova N.S., Veira S, Rubio G.Phase transitions in silicon single crystals caused by oriented plastic deformation. F.T.T.1998.T40 №4.p.746-749.(in Russ.).
- [12] Shapavalov V.P., Gredun V.I., Korolev A.E. Defect in the surface region of silicon in thermal oxidation.FTP.1995.t.29.exh.s.1995-2001. (in Russ.).
- [13] H.-J. Gossman, J.M. Poate. Proc. ICPS-23 (Berlin, 1996) 4, 2569
- [14] N.T. Bagraev, E.I. Chaikina, L.E. Klyachkin et al. Superlat. Microstr., 23(2), 337 (1998)
- [15] N.T. Bagraev, W. Gehlhoff, L.E. Klyachkin, A. Naser. Def. Dif. Forum, 143--147, 1003 (1997)
- [16] Bagrayev N.T., Buravlev A.D., Klyachkin A.E., Marchenko A.M., Rykov S.A. Self-ordered microresonators in ultrafine silicon junctions. Physics and Technology of Semiconductors.2000.Vol.34, Issue 6.P. 726-736.(in Russ.).
- [17] Galkin N.G., Vavanov S.V., Galkin K.N., Batalov R.I., Bayazitov R.M., Nuzhdin V.I. Nanosecond pulsed annealing of silicon implanted with magnesium ions. ZHTF.2013.Vol.83, No 1.P.99-104.( in Russ.).
- [18] Batalov R.N., Bayazitov R.M., Terukov E.I., Kudoyarova V.H., Weiser G., Kuehne FTP.2001.Vol.35.P.1320-1325. (in Russ.).
- [19] Dvurechensky A.V., Mazurin G.A., Nidayev E.V., Smirnov L.S. Pulse annealing of semiconductor materials.M. Nauka.1982, P.208. (in Russ.).
- [20] Kosher T.S., Yermolaev V.N., Muta A.N.Surface modification of silicon at temperature influence.Sb.trudov International scientific-practical conference Engineering education and science in the XXI century: problems and prospects.Almaty.2014.t.2.p.487-490.(in Russ.).

### ТЕМПЕРАТУРАЛЫ ЖӘНЕ ЛАЗЕРЛІ ӘСЕР БАРЫСЫНДА КРЕМНИЙДІҢ БЕТКІ БӨЛІГІНІҢ ҚҰРЫЛЫМЫ МЕН ФАЗАЛЫ ҚҰРАМЫН ЗЕРТТЕУ

Т.С. Көшеров, Г.Е. Жумабекова

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

**Түйін сөздер:** ақаулар, параметрлер, кернеу, тотығу, кристалдану, лазерлі сәулелер.

**Аннотация.** АКМ және рентген құрылымды талдау тәсілдерінің көмегімен термо өңдеу шараларының түрлі уақыттарында және 400<sup>0</sup>С-та қыздыру температурасында кремнийдің беткі бөлігінің морфологиясы мен құрылымдық өзгерістері, сонымен қатар 60 минуттағы үздіксіз лазерлі әсердің деңгейі зерттелді. Үлгіге мұндай әсер барысында тотығу процесінің құрылымдық өзгерістері және тотықтыру барысындағы түрлі ақаулар, сонымен қатар кристалдану процесі орнатылды. Үлгіні қыздыру барысында (400<sup>0</sup>С-та) босанқы тұрақты ақаулардың пайда болатыны анықталды. Ол ақаулар тез арада ыдырап жанып кетеді. Осы ақаулармен байланысты әсерлер, қысу процесінің және тор деформациясының төмендеуіне алып келеді. Кристаллды торлардың алғашқы құрылымдық өзгеріс шарттары орнатылды. Термоөңдеу (с) Si шаралары, үлгінің беткі бөлігінде, екі бағытта ағатын термототығу процестерінің пайда болуын шарттайды. Үлгінің термототығу процесінен кейін үздіксіз лазерлі сәулелендіру шаралары беткі бөлікті қайта кристаллдайды және де тотығу мен фотохимия процестеріне әсер етеді. Лазерлі әсер бөліктерінің бірі болып табылатын жылумен қыздырып босандату шаралары, кремний мен оның тотығының қиылысатын жеріндегі механикалық кернеулердің релаксациясына алып келеді. Үлгіні алдын ала жылумен қыздыра отырып босату уақытының ұлғаюымен қатар SiO<sub>2</sub> қалыңдығының өсуі және лазерлі сәулелердің кейінгі әсерлері – тотығу шараларының ұлғаюы салдарынан туындайды. Ал, оның төмендеуі болса, SiO<sub>2</sub>-нің ыдырауының себебінен және ыдырайтын өнімдердің булануы салдарынан туындайды.

Үлгінің термототығу уақыты мен лазерлі әсерге тәуелді болып келетін, тор параметрлері өзгерістерінің бір-бірімен тығыз байланысы анықталды.

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 геодинимических 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 теплоэлектростанция 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 стерженде пластикалық облыстың және кернеуді жеңілдету толқындының 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