

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**

1 (299)

**ҚАҢТАР – АҚПАН 2015 ж.
ЯНВАРЬ – ФЕВРАЛЬ 2015 г.
JANUARY – FEBRUARY 2015**

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 **Байғұнчеков 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 е ң 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

© Национальная академия наук Республики Казахстан, 2015

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 / physics-mathematics.kz

© National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, 2015

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 1, Number 299 (2015), 44 – 48

**STIMULATION OF CHANGES IN THE PHYSICAL
CHARACTERISTICS OF POLYCRYSTALLINE SILICON
BY THERMAL TREATMENT**

T. Kosherov, M. Bolatov, Yu. Ermolayev

Kazakh National Technical University named after K. Satpayev, Almaty, Kazakhstan

E-mail: slidelabb@gmail.com

Key words: oxide formation, crystallization, thermal processing, structural and phase changes.

Abstract. In this work the features of changes in the surface of polycrystalline silicon under the influence of a fixed temperature treatment in varying time of heating are identified. There is shown that under isothermal effects the silicon surface is covered by oxide formations of SiO₂ and other small in numbers oxides and silicides of admixtures. There is a height of pyramidal educations gradually passing to the burn-off of surface and crystallization at the increase of duration of annealing. The phase and structural changes of silicon are examined.

УДК 536.4:621.315.592

**СТИМУЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ
ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ**

Т. С. Кошеров, М. Б. Болатов, Ю. В. Ермолаев

Казахский национальный технический университет им. К. И. Сатпаева, Алматы, Казахстан

Ключевые слова: оксидные образования, кристаллизация, термическая обработка, структурные и фазовые изменения.

Аннотация. В работе выявлены особенности изменения поверхности поликристаллического кремния при действии фиксированной температурной обработки в условиях разного времени прогрева. Показано, что при изотермических воздействиях поверхность кремния покрывается оксидными образованиями SiO₂ и другими малочисленными оксидами и силицидами примесей. Наблюдается рост пирамидальных образований, постепенно переходящих к оплавлению поверхности и кристаллизации при увеличении длительности отжига. Рассматриваются фазовые и структурные изменения кремния.

Электронное возбуждение, деформация решетки и увеличение температуры могут привести к увеличению энергий образования дефектов, при этом концентрация дефектов достигает значений от 10¹⁹ до 10²¹ см³. Такая неравновесная концентрация точечных дефектов может привести к флуктуационному образованию скопления точечных дефектов, которые при определенных условиях трансформируются в дислокационные петли [1, 2]. Рост дислокации обусловлен стоком на них точечных дефектов и созданием неоднородных напряжений в окружающей среде.

С другой стороны, работа приборов существенно зависит от свойств и структуры образца, от качества его поверхности и термического воздействия, чем обуславливается неоднородная модификация поверхности кремния. Температурная обработка приводит к изменению объемной и поверхностной структуры кремния за счет образования и диффузии точечных дефектов, движения

и разложения дислокаций, увеличения подвижности поверхностных атомов. Параметры термической обработки могут привести к неоднозначным изменениям, как структуры, так и поверхности кремния. Возникшие термические напряжения приводят не только к возникновению дислокаций, но и их перемещению в своей плоскости, скольжению и выходу из объема кремния на поверхность, определяя ее топологию [3].

Такая же картина возможна и при появлении на поверхности оксидной пленки кремния самого образца на границе SiO_2/Si , под действием касательных напряжений дислокации по механизму скольжения передвигаются к поверхности образца [4, 5].

Цель настоящей работы – выявить возможность стимулирования изменений структуры и морфологии поверхности поликристаллического кремния (с) Si после фиксированной термической обработки ($T=1173^\circ\text{K}$) и варьируемого времени прогрева.

Методы и материалы. В качестве исследуемого материала использовали поликристаллический полупроводниковый (с) Si кремний в виде осколочных пластин размером 1 см^2 и удельным сопротивлением $3\text{ Ом}\cdot\text{см}$. Оптические изменения осуществлялись при комнатной температуре. Образцы подвергали термической обработке при атмосферном воздухе. Температура отжига: $T=1173^\circ\text{K}$, время отжига образцов: $t = 10, 30, 60, 120, 240$ и 360 минут. Морфология поверхности образцов кремния после термической обработки исследовалась методом атомной силовой микроскопии (АСМ) производства NT-MDT, модель Интегра-Прима. Рентгенографические исследования выполнены на рентгеновском дифрактометре X'PertPRO фирмы Philips, где анализировались рентгенограммы структур и фазовый состав (с) Si после термической обработки. Спектрограммы образцов кремния, предварительно термообработанные при различном времени отжига, получены на растровом электронном микроскопе с локальным рентгеноспектральным анализом типа JOEL JSM-6490LA – изображение во вторичных электронах.

Результаты и их обсуждения

Структурные и фазовые изменения кремния при термообработке. Исследования структурного параметра ω и полуширины кривой отражения, которая опосредованно характеризует состояние структуры нарушенного приповерхностного слоя. Таким образом, изменение структуры и внутренних напряжений в приповерхностных слоях термообработанных образцов показало, что их значения не *претерпевают* значительного изменения. Хотя предыдущее исследование [5] указывало на то, что начиная с 873°K до 1273°K , значение ω редко увеличивается при $t=60$ минутном термоотжиге. Однако, при фиксированной термообработке ($T=1173^\circ$) в течение от 10 до 360 минут не вызвало резкого изменения этого параметра структуры. Также нет и заметного изменения межплоскостного расстояния d образца.

Таким образом, структурные изменения при наших условиях температурного воздействия на кремний весьма незначительны. Однако, изменение площади S-пика кремния в рентгенографическом изображении спектра указывает на протекание некоторых процессов на поверхности и приповерхностном слое образца кремния (рисунок 1).

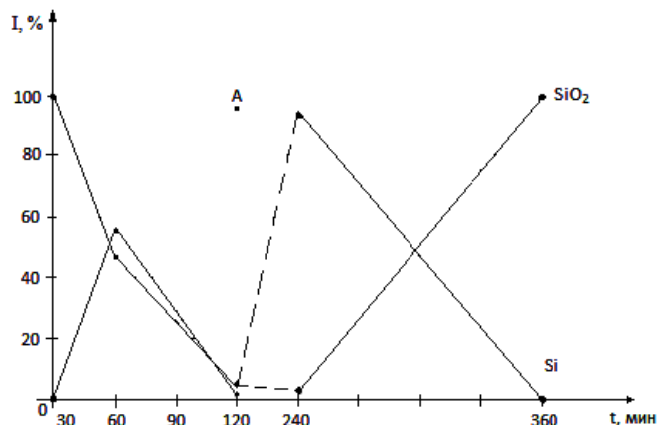


Рисунок 1 – Результаты полуколичественного анализа состава фаз после температурного отжига ($T=1173^\circ\text{K}$) кремния и различного времени прогрева образца. (Точка A – образование $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})$)

Результаты полуколичественного анализа состава фаз после фиксированного температурного отжига ($T=1173^\circ$) кремния и различного времени прогрева образца показывают, что при времени отжига от 10 до 120 минут количество атомов кремния постепенно снижается до минимальной отметки (рис.1). А затем, достигнув максимума при 240 минутном прогреве образца, вновь падает практически до нуля, в тоже время на поверхности появляется диоксид кремния (SiO_2), который за этот же период времени достигает дважды своего максимального значения (рисунок 1).

Установлено также, что при 120 минутном отжиге кремния в большом количестве ($\sim 93\%$) появляется гидрированный силицид алюминия ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})$). Как показано на рисунке 1, где точка А, говорит о том, что при этой температуре и времени отжига некоторые металлообразующие элементы, присутствующие в образце, могут вступать в химическую связь с атомами образца и прочно удерживаться на поверхностном слое кремния. Появление оксида кремния и изменение ее содержания в приповерхностном слое обуславливает стойкость его кислородных соединений при температуре 900°C .

Если проследить за зависимостью процентного содержания масс атомов кремния и кислорода в спектрограмме от времени температурного прогрева образца (рисунок 2), то видно, что их количества тесно связаны, и вследствие объясняет появление диоксида кремния и его количественный рост в приповерхностном слое кремния.

При 120-минутной температурной обработке процентное содержание атома кремния наименьшее, тогда как процентное содержание атома кислорода - наивысшее (рисунок 3).

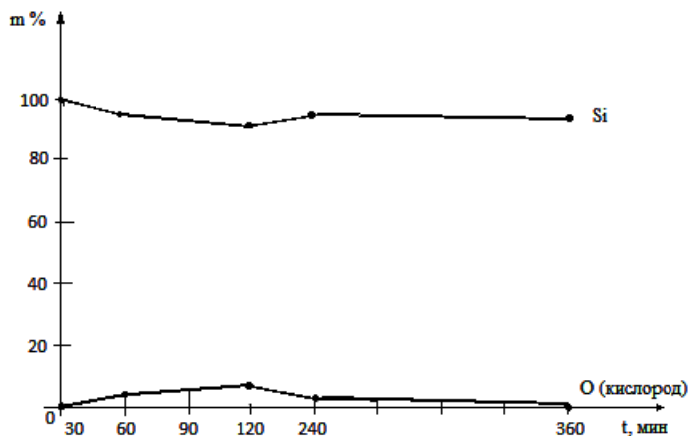


Рисунок 2 – Зависимость процентного содержания кислорода в спектрограмме от времени температурного прогрева образца ($T=1173^\circ\text{K}$)

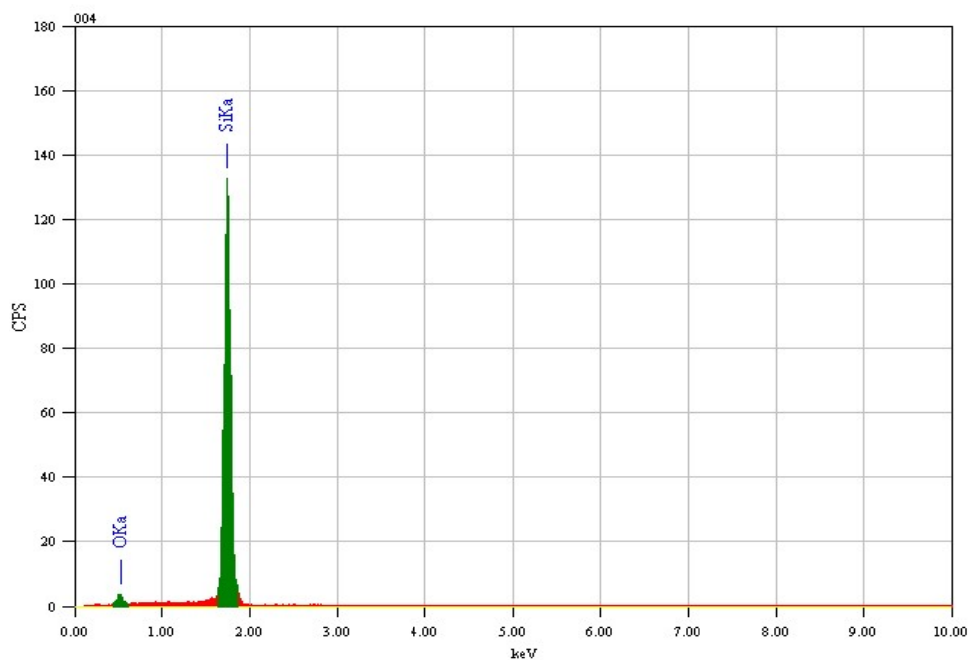


Рисунок 3 – Спектрограмма образца (с) Si после термообработки при 1173°K в течение 120 минут

Морфология поверхности кремния (с) Si после температурного воздействия. Исследования методом атомно-силовой микроскопии показали (рисунок 4), что после термообработки при 900°C и варьировании времени прогрева образца приводят к изменению рельефа поверхности. Как видно из рисунка 4, оксидные образования демонстрируют пирамидальные выступы протяженные по оси Z, перпендикулярные к плоскости в трехмерном изображении. Оксидные островки имеют неоднородный характер при увеличении времени термообработки.

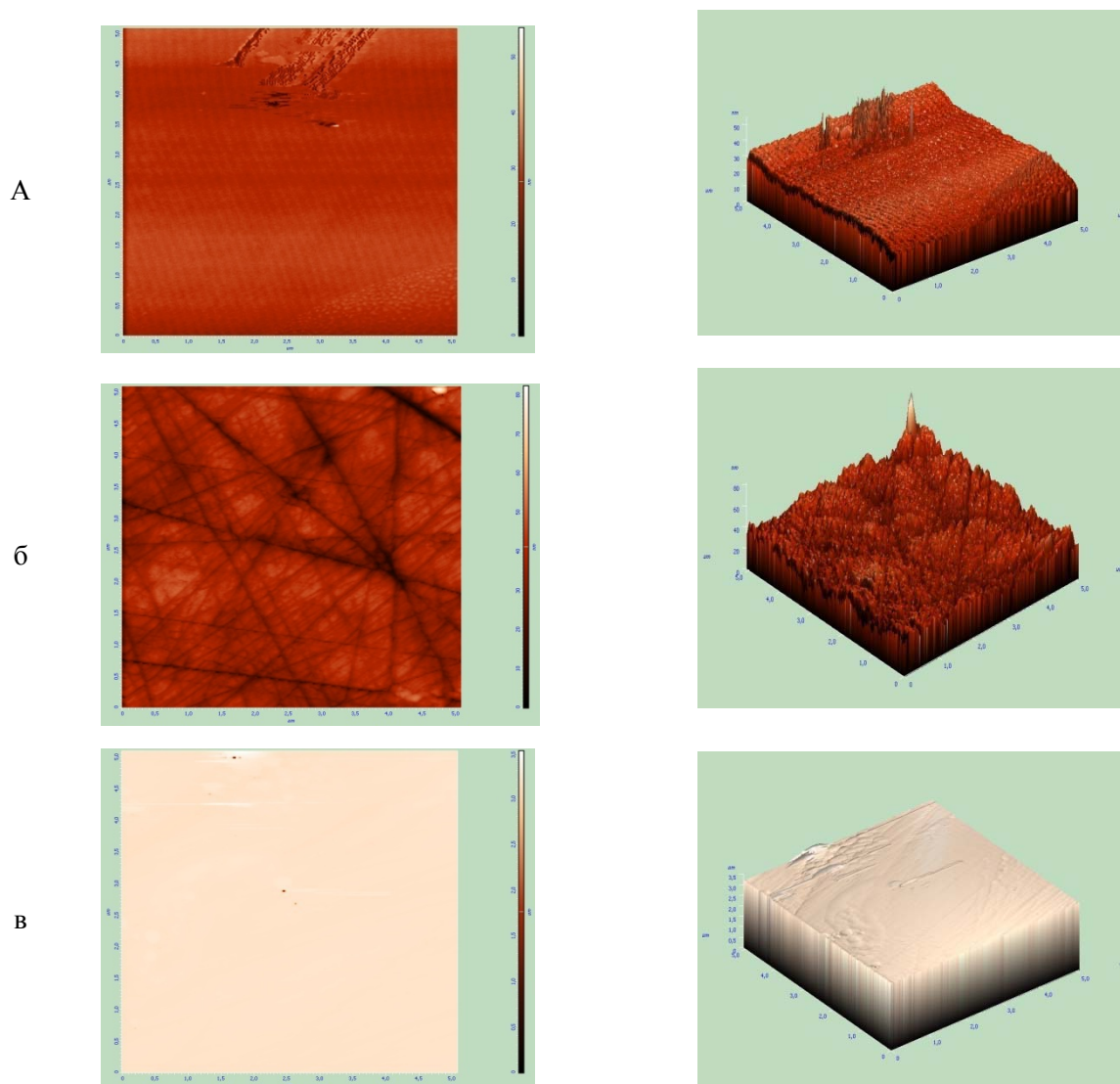


Рисунок 4 – АСМ изображения термоотожженного (с) Si кремния при $T=1173^{\circ}\text{K}$ и длительности: а) $t = 30$ мин; б) $t = 240$ мин; в) $t = 360$ мин

Наряду с оксидными образованиями SiO_2 и другими малочисленными оксидами и силицидами примесей, наблюдается рост пирамидальных образований по всей поверхности исследуемого образца, достигая местами высоты до 35-40 нм. При этом замечен неравномерный рост высоты слоев оксидных образований по всей поверхности, т.е. слой за слоем увеличиваются в глубину поверхности оксидные образования по мере увеличения времени термообработки при фиксированной термической обработке образца (рисунок 4, а,б). Температурная обработка при 900°C и длительности 360 минут приводит к постепенному оплавлению поверхностного слоя, глубина которых достигает порядка 1,2-1,5 нм, то есть идет процесс рекристаллизации поверхностного слоя, исчезают оксидные образования и неровности поверхности (рисунок 4, в).

Заключение. Результаты исследования показали, что при фиксированной термообработке при 900°C и различном времени термической обработки (с) Si наряду с оксидными образованиями SiO₂ и другими малочисленными оксидами и силицидами примесей наблюдается рост пирамидальных образований на поверхности поликристаллического кремния, структура которых по плотности, размеру и форме не одинаковы. Достаточно длительное термическое воздействие приводит к постепенному оплавлению поверхности слоя и кристаллизации.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Емельянов В.И., Кашкаров П.К. // Поверхность. – 1990. – № 2. – С. 77-86.
[2] Емельянов В.И., Кашкаров П.К., Шлыков Ю.Г., Диффузионно-деформационная нуклеация кластеров точечных дефектов. Сравнение с экспериментом // Препринт физического факультета МГУ. – 1997. – № 15. – С. 14.
[3] Горелик С.С., Дашевский М.Е. Материаловедение полупроводников и диэлектриков. – М.: Металлургия, 1988. – С. 574.
[4] Medvid A., Dmitruk I., Onufrijevs P., Pundyk I. Properties of nanostructure formed on SiO₂/Si interface by laser radiation // Solid State Phenomena. – 2007. – Vol. 131-133. – P. 559-562.
[5] Кошеров Т.С., Ермолаев В.Н., Тлеумуратова К.Т., Сеитов А.С. Стимулирование изменений физических характеристик кремния лазерным воздействием // Вестник КазНТУ. – 2014. – № 2. – С. 328-334.

REFERENCES

- [1] Emelyanov V.I., Kashkarov P.K. Poverhnost'. 1990. N 2. P. 77-86 (in Russ.).
[2] Emelyanov V.I., Kashkarov P.K., Shlikov U.G., Diffusion-deformational cluster nucleation point defects. Comparison with experiment. Preprint fizicheskogo fakul'teta MGU. 1997. N 15. P. 14 (in Russ.).
[3] Gorelik S.S., Dashevskii M.J., Material science of semiconductors and dielectrics. M.: Metallurgija, 1988. 574 p. (in Russ.).
[4] Medvid A., Dmitruk I., Onufrijevs P., Pundyk I., Properties of nanostructure formed on SiO₂/Si interface by laser radiation. Solid State Phenomena. 2007. Vol. 131-133. P. 559-562.
[5] Kosherov T.S., Yermolaev V.N., Tleumuratova K.T., Seitov A.S., Promoting changes the physical characteristics of Silicon laser exposure. Almaty: KazNTU, 2014. N 2. P. 328-334 (in Russ.).

ТЕРМИЯЛЫҚ ӨНДЕУ АРҚЫЛЫ ПОЛИКРИСТАЛЛДЫ КРЕМНИЙДІҢ ФИЗИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНІҢ ӨЗГЕРІСІНЕ ӘРЕКЕТ ЕТУ

Т. С. Кошеров, М. Б. Болатов, Ю. В. Ермолаев

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

Тірек сөздер: оксидті құрылым, кристаллизациялар, термиялық өңдеу, құрылымдық және фазалық өзгерістер.

Аннотация. Берілген жұмыста ауыспалы қыздыру уақытындағы тұрақталған температуралық өңдеудің әсерінен поликристаллды кремний бетінің өзгеріс ерекшеліктері анықталған. Изотермиялық әсер ету барысында кремний бетінде SiO₂ оксидті және аз мөлшерде басқада оксидтер мен силицидтердің қоспалары пайда болатыны анықталды. Сонымен қатар беттік құрылымда пайда болған пирамидальді өзгерістердің біртіндеп өсуі байқалса, қыздыру уақытының ұзаруы барысында олардың балқуы мен кристаллдануы байқалды. Кремнийдің құрылымдың және фазалық өзгерістері қарастырылды.

Поступила 27.01.2015 г.

Правила оформления статьи для публикации в журнале смотреть на сайте:

www.nauka-nanrk.kz
physics-mathematics.kz

Редактор *М. С. Ахметова*
Верстка на компьютере *Д. Н. Калкабековой*

Подписано в печать 10.02.2015.
Формат 60x881/8. Бумага офсетная. Печать – ризограф.
4,7 п.л. Тираж 300. Заказ 1.