

## NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN  
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 6, Number 298 (2014), 55 – 59

## CHANGES OF MORPHOLOGICAL SURFACE OF POLYCRYSTALLINE SILICON UNDER THE ISOTHERMAL ANNEALING

T. Kosherov, A. Serik

Kazakh National Technical University named after K. Satpayev, Almaty, Kazakhstan.  
E-mail: aigera-11@mail.ru

**Key words:** modification, dislocation, homogenization, temperature gradient, oxides.

**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 modified differently with activating movement and redistribution of dislocations, there is the surface's homogenization process and the fixing of surface layer of silicon dioxide. So it is expecting, when a thermal annealing of silicon depending on processing time, local areas of a significant layer and a formation of oxides may appear.

УДК 536.4:621.315.592

## ИЗМЕНЕНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ ПРИ ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ОТЖИГАХ

Т. С. Кошеров, А. С. Серик

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

**Ключевые слова:** модификация, дислокация, гомогенизация, градиент температур, оксиды.

**Аннотация.** В работе выявлены особенности изменения поверхности поликристаллического кремния под влиянием фиксированной температурной обработки в варьируемом времени прогрева. Показано, что при изотермических воздействиях поверхность кремния модифицируется по-разному, при этом активируются движения и перераспределение дислокаций, идет процесс гомогенизации поверхности и фиксирование поверхностного слоя из диоксида кремния. Предполагается, что при термических отжигах кремния в зависимости от времени обработки могут появляться локальные области значительного слоя и образования собственных оксидов.

Эффективность работы приборов на основе кремния существенно зависит от свойств и структуры поверхностного слоя, от качества ее поверхностей. Качество поверхности кремния определяется, в частности, кристаллическим совершенством поверхностных слоев и степенью физико-химической чистоты. Различные виды обработки, в том числе термические обуславливают неоднозначную модификацию и претерпеваемые изменения поверхности кремния. Температурная обработка обуславливает изменение объемной и поверхностной структуры кремния за счет образования и диффузии точечных дефектов, движения и размножения дислокаций, увеличения подвижности поверхностных атомов.

Известно, что параметры термической обработки, такие как температура, скорость нагревания и охлаждения, длительность воздействия, внешняя среда, могут обуславливать неоднозначные изменения в структуре и поверхности кремния.

Длительные прогревания вызывают образования кислородных преципитатов [1], выделение кремния в реакцию с кислородом и образование диоксида кремния. Термические напряжения приводят к возникновению дислокаций. Под действием градиента температур дислокации перемещаются в своей плоскости скольжения и могут выходить из объема образца на поверхность, определяя ее топологию [2, 3].

Термоотжиг полупроводниковых структур приводит к твердофазной эпитаксиальной кристаллизации упорядочивания расположения атомов на границе раздела и движению этой границы к поверхности.

Нагревание полупроводникового материала может привести к высоким пространственным градиентам температуры, и иногда обеспечивает возможность плавления.

Цель настоящей работы – выявить особенности изменения поверхности поликристаллического кремния под влиянием фиксированной температурной обработки ( $T = 800^\circ\text{C}$ ) в варьируемом времени прогрева.

**Методы и материалы.** В качестве исследуемого материала использовали поликристаллический полупроводниковый кремний (С) Si с удельным сопротивлением  $3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  в виде пластин размером  $1 \text{ см}^2$ . Температурная обработка кремниевых пластин проводилась на воздухе при температуре  $800^\circ\text{C}$  в течение 10, 30, 60, 120, 240 и 360 минут. После термообработки образцы исследовались на рентгеновском рефрактометре  $x^{\text{PertPRO}}$  фирмы Phillips. Морфология поверхности образцов кремния после термической обработки исследовалась методом атомной силовой микроскопии (АСМ) производства NT-MDT, модель Интегра-Прима.

**Результаты и их обсуждение.** На рисунке 1 представлены результаты полуколичественного анализа состава фаз в зависимости от времени термического отжига при  $600$  и  $800^\circ\text{C}$ . По мере увеличения времени термического отжига ( $T = 600^\circ\text{C}$ ) изменение состава фаз кремния приводит к появлению диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ) (рисунок 1) и его постоянному росту. Несколько иная картина при термическом отжиге кремния при  $800^\circ\text{C}$ . Здесь мы видим резкие скачки. Так, при 30-минутном термическом отжиге и 120 минутном величина фазового состояния кремния падает до минимального значения, так как в этих интервалах времени отжига образцы появившегося диоксида кремния достигают своего максимального значения. Одновременно наблюдаем появление силицидов кремния, стишовита при 30 минутном отжиге образца (точка А на рисунке 1).

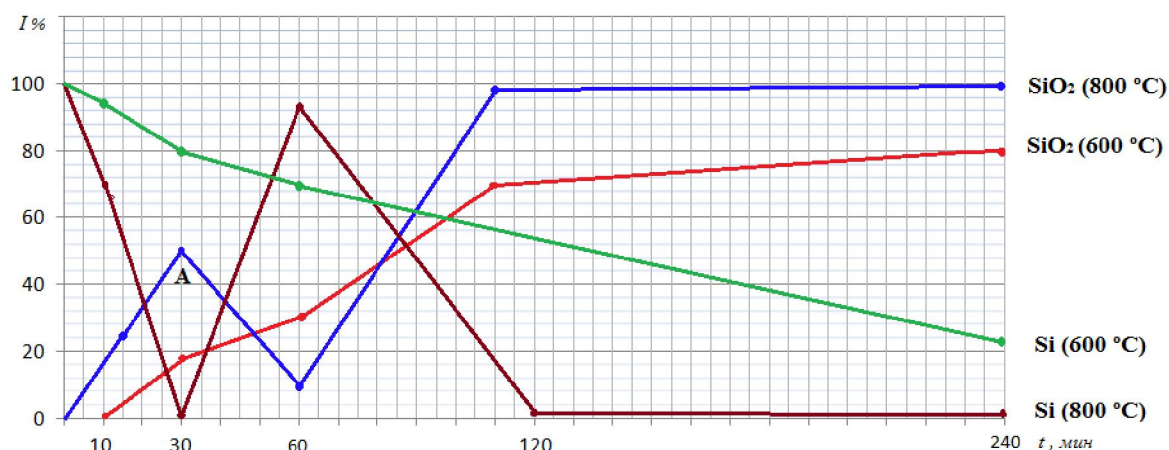


Рисунок 1 – Изменение состава фаз Si, SiO<sub>2</sub> в зависимости от времени термоотжига образца и температуры (точка А-появление силицидов кремния и стишовита)

Следовательно, изотермоотжиг при  $T = 600^\circ\text{C}$ , можно сказать, приводит к изменению реальной структуры кремния. Структура, изначально является не идеальной, т.е. в ней имеет место содержание точечных дефектов, микродефектов и дислокаций, то при нагреве кремниевого кристалла в ней образуются термически активируемые процессы, которые переводят структуру кремния в термодинамически более устойчивое состояние с меньшей свободной энергией. Такие процессы повышают структурное совершенство кремния за счет стока точечных дефектов к дислокациям,

межфазным границам, а также за счет перераспределения дислокаций [2, 4]. При отжиге при  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  в зависимости от времени прогрева образца мы замечаем активацию движения дислокаций, ее увеличение в размерах и выхода их на поверхность, т.е. к гомогенизации поверхности кремния за счет стока дислокаций к дефектным областям. Одновременно, по мере увеличения времени термоотжига, наблюдаем увеличения в размерах как количественно, так объемно на поверхности кремния диоксида кремния (рисунок 1).

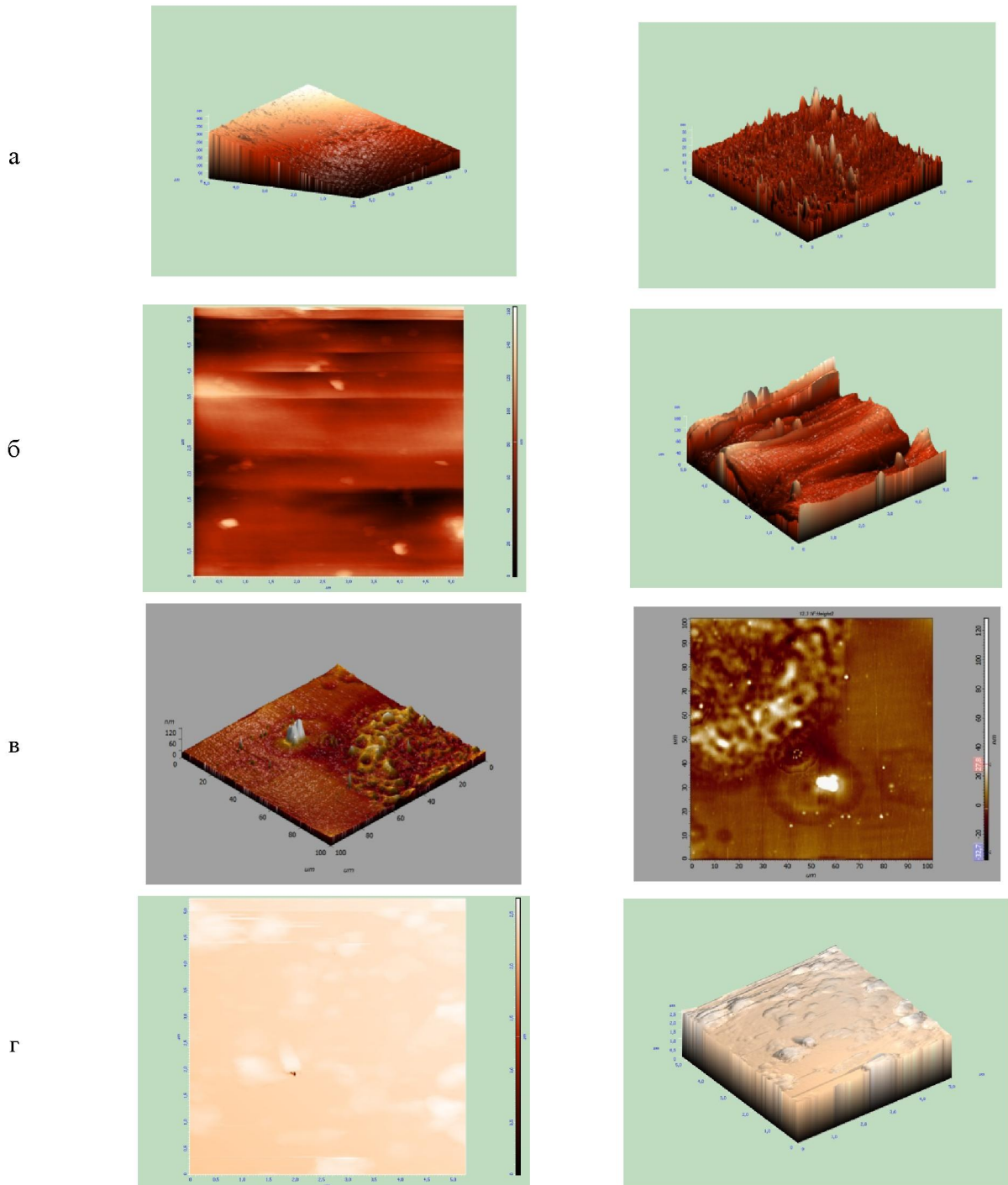


Рисунок 2 – Пирамидальные и структуры проплавленного кремния при термических отжигах:  
а)  $t = 10$  мин; б)  $t = 30$  мин; в)  $t = 120$  мин; г)  $t = 360$  мин

Наблюдаются аналогическая зависимость и происходящие выше процессы, но более выраженную, можно заметить при 800 °С прогреве образца. При этом образование диоксида кремния и ее рост при  $t = 30$  минутном прогреве и достижения наибольшего значения – при 120 минутном термоотжиге (рисунок 1). Видимо, здесь происходит образование диоксида кремния в два этапа: сначала кремний на поверхности активно взаимодействует с кислородом воздуха атмосферы, а затем в реакцию вступает по мере увеличения времени прогрева, кислород диффундирующий с приповерхностного слоя и объема образца. Этот диоксид кремния покрывает в виде пленки всю поверхность образца.

Анализируя серию АСМ изображений, подверженного термоотжигу кремния, можно заметить, что по мере увеличения времени отжига, изменения рельефа поверхности (рисунок 2). Новым структурным аспектом, выявленным при этом, было наличие пирамидальных структур. Данные пирамидальные структуры могут находиться как в обособленном состоянии, так и в совокупности. Их размеры в отдельных случаях достигают несколько десятков нанометров. При этом поверхность несколько деформируется. По площади такие скопления невелики, сами пирамидальные структуры имеют большой разброс по размерам и по форме. С увеличением времени отжига увеличивается площадь пирамидальных скоплений. Одновременно увеличиваются по форме и размерам и виды деформаций поверхностей кремния.

Замечено также, что при 240 минутной термообработке образца имеет место увеличение плотности пирамидального скопления, а при 360 минутном прогреве кремния наступает оплавление всей поверхности и выявлено формирование периодических структур (рисунок 2). Такая модификация поверхности обусловлена наличием значительного градиента температур и возможно, способствует закалке высокотемпературных состояний кремния.

**Заключение.** Результаты исследования показали, что при изотермических воздействиях поверхность кремния модифицируется по-разному. Отжиг при различном времени воздействия активирует движение и перераспределение дислокаций на поверхности кремния, способствует гомогенизации поверхностей и формированию поверхностного слоя из диоксида кремния. Термообработка поликристаллического кремния не обеспечивает относительно равномерное распределение температуры и скорости нагрева в объеме и на поверхности образцов. При этом наблюдаются и локальные области поверхности кремния, которые наиболее интенсивно прогреваются и подвергаются окислению и пирамидальные образования, структура которых как по плотности, размеру и форме не одинаковы. Это дает основание высказать предположение, что при термоотжигах кремния в зависимости от времени обработки могут появиться локальные области значительного градиента температур, что сказывается на изменении структур поверхностного слоя и образовании собственных оксидов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Светухин В.В. Моделирование современных перспективных кремниевых технологий, основанных на управлении процессами кластеризации и преципитации кислорода в кремнии. – Ульяновск: УГУ, 2006. – 108 с.
- [2] Горелик С.С., Дашевский М.Е. Материаловедение полупроводников и диэлектриков. – М.: Металлургия, 1988. – 574 с.
- [3] Кошеров Т.С., Ермолаев В.Н., Солтан Р., Сейтов А.С. Влияние термической обработки кремния на наноструктуру и морфологию поверхности // Сб. докл. междунар. конф. «Коллоиды и нанотехнологии в индустрии». – Алматы: КазНТУ, 2012. – С. 94.
- [4] Аппикалиева К.Х., Каныгина О.Н., Васильченко А.С. Модификация поверхности монокристаллического кремния при изотермическом и лазерном отжигах. – Оренбург: Вестник ОГУ, 2012. – № 9. – С. 96.

#### REFERENCES

- [1] Svetuhin V.V., Simulation of modern-looking silicon technologies based on process management and clustering of oxygen precipitation in silicon. Ulyanovsk Ulyanovsk State University, 2006. 108 p. (in Russ.).
- [2] Gorelik S.S., Dashevskii M.J. Materials science of semiconductors and dielectrics. Moscow: Metallurgy, 1988. 574 p. (in Russ.).
- [3] Kosharov T.S., Yermolaev V.N., Soltan R., Seitov A.S. Effect of heat treatment on the silicon structure and morphology of the surface. Coll. rep. Int. Conf. "Colloids and nanotechnology industry ". Almaty: KazNTU, 2012. P. 94 (in Russ.).
- [4] Ashikkaliev K.H., Kanygina O.N., Vasilchenko A.S. Surface modification of monocrystalline silicon under isothermal and laser annealing. Vestnik OSU, 2012. N 9. P. 96 (in Russ.).

---

---

**ИЗОТЕРМИЯЛЫҚ КҮЙДІРУ БАРЫСЫНДАҒЫ ПОЛИКРИСТАЛДЫ  
КРЕМНИЙ БЕТІНІҢ МОРФОЛОГИЯЛЫҚ ӨЗГЕРІСТЕРІ****Т. С. Көшеров, А. С. Серік**

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

**Тірек сөздер:** модификация, дислокация, гомогенизация, температуралар градиенті, оксидтер.

**Аннотация.** Берілген жұмыста ауыспалы қыздыру уақытындағы тұрақталған температуралық өңдеудің әсерінен поликристалды кремний бетінің өзгеріс ерекшеліктері анықталған. Изотермиялық әсер ету барысында кремний бетінің модификациясы әртүрлі өтіп, сонымен қатар дислокациялардың қозғалысы мен қайта үлестендірілуі белсендендіріліп, беттің гомогенизациясы мен кремний диоксидінен түзілген жоғарғы қабаттың бекітілу үдерістері жүзеге асырылады. Ықтималынша, өңдеу уақытына байланысты кремнийді термиялық күйдіру кезінде маңызды қабаттардың локальды аймақтары пайда болып, өзіндік оксидтер түзілуі мүмкін.

*Поступила 26.11.2014 г.*