

P14-2006-25

Л. А. Власукова<sup>1</sup>, А. Ю. Дидык<sup>2</sup>, Ф. Ф. Комаров<sup>1</sup>,  
В. К. Семина<sup>2</sup>, А. Хофман<sup>2,3</sup>, В. Н. Ювченко<sup>1</sup>

**ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ НА ИЗМЕНЕНИЕ  
СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ  
ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИОНАМИ <sup>86</sup>Kr  
С ЭНЕРГИЕЙ 253 МэВ**

Направлено в оргкомитет XVI Международной конференции  
«Радиационная физика твердого тела», Севастополь, 3–8 июля 2006 г.

---

<sup>1</sup> Белорусский государственный университет, Минск;  
e-mail: komarovf@bsu.by; Vlasukova@mail.ru

<sup>2</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна;  
e-mail: Alexandr.Didyk@jinr.ru

<sup>3</sup> Институт атомной энергии, Сверк, Польша;  
e-mail: Hofman@jinr.ru

Власукова Л. А. и др.

P14-2006-25

Влияние деформаций на изменение структуры поверхности кремния при облучении ионами  $^{86}\text{Kr}$  с энергией 253 МэВ

Изучено влияние предварительно созданной деформации структуры в кремнии путем нанесения поверхностных макроцарапин на процессы распыления при последующем облучении ионами  $^{86}\text{Kr}$  высокой энергии. Методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) обнаружено, что происходит значительное выравнивание поверхности облученного кремния, в особенности это касается сглаживания микроцарапин, образованных при механической полировке исходных пластин кремния. Исследования структуры облученной поверхности АСМ позволили установить, что невозможно объяснить изменения за счет одних процессов упругого каскадного распыления, рассчитанного с использованием компьютерной программы TRIM-98. На основании этого можно сделать вывод о том, что за счет упругих процессов распыления невозможно было бы обнаружить какие-нибудь изменения структуры поверхности после облучения ионами криптона до флюенса  $\Phi_{\text{Kr}} = 1,3 \cdot 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup>, так как расчетное значение толщины распыленного слоя составляет  $\Delta H_{\text{Sputtering}}^{\text{Kr}} = 5,5 \cdot 10^{-4}$  Å. Следовательно, изменения структуры поверхности обусловлены одним из механизмов неупругого распыления, наиболее вероятно — моделью термического пика.

На отдельных участках поверхности поцарапанных образцов обнаружены микротрещины, свидетельствующие о значительных механических напряжениях в кристалле Si, инициированных облучением тяжелыми ионами криптона.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2006

Vlasukova L. A. et al.

P14-2006-25

The Influence of Deformation on the Surface Structure of Silicon Under Irradiation by  $^{86}\text{Kr}$  Ions with Energy 253 MeV

The influence of the previously produced deformation in silicon structure by means of macro-scratch surface covering on the sputtering processes under following irradiation by swift  $^{86}\text{Kr}$  ions is studied. The significant leveling of surface relief of irradiated silicon was observed using atomic force microscopy method (AFM), in particular it takes place for smoothing of micro-scratches produced by mechanical polishing of silicon initial plates. The experimental studies of irradiated surface allowed one to conclude that it is impossible to explain the surface changes only by elastic cascade mechanism as it was calculated using the computer code TRIM-98, because the calculated sputtered layers of silicon at ion fluence  $\Phi_{\text{Kr}} = 1.3 \cdot 10^{14}$  ion/cm<sup>2</sup> should be  $\Delta H_{\text{Sputtering}}^{\text{Kr}} = 5.5 \cdot 10^{-3}$  Å. Correspondingly, the surface changes should be explained by one of mechanisms of inelastic sputtering.

The macro-cracks on the surface were observed near the scratches. It means that the significant mechanical strains take place in silicon single crystal stimulated by swift krypton heavy ion irradiation.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2006

## ВВЕДЕНИЕ

Изучению процессов образования трека тяжелых ионов высоких энергий в монокристаллах полупроводников уделяется пристальное внимание в течение длительного периода времени [1–4]. Но до настоящего времени полного понимания влияния различных факторов, таких как уровень ионизационных потерь энергии, скорость бомбардирующего иона, влияние дефектов структуры различного происхождения и ряда других, на формирование сильно деструктурированной области (трека) еще не имеется. Основными моделями образования трека иона в материале являются модель термического пика и кулоновского взрыва [1] или их модификации [1, 2, 5–7]. Основным материалом для изготовления полупроводниковых устройств является монокристалл кремния (см., например, [8] и цитированную там литературу). Поэтому детальное изучение процессов, протекающих в монокристаллическом кремнии, является важной и актуальной задачей.

Расширяется использование ускорителей тяжелых ионов высоких энергий для изучения процессов радиационного дефектообразования [2, 3, 7] в ряде стран и разрабатываются новые методы прецизионного изучения топографии поверхности [5, 6]. Все больше внимания стало уделяться изучению процессов прохождения тяжелых ионов высоких энергий через поверхность твердых тел, приводящих к изменению ее рельефа, обусловленному процессами упругого [9], неупругого [10] распыления и трекообразования [1, 2, 5–7].

Известно, что на процессы распыления под действием осколков деления и ионов высоких энергий определяющее влияние оказывают исходная структура распыляемого материала (состояние приповерхностных слоев) и энергия бомбардирующей частицы.

Цель настоящей работы — изучение особенностей изменения топографии поверхности, а также изменений в монокристалле кремния, предварительно деформированном путем нанесения на поверхность царапин, при облучении тяжелыми ионами  $^{86}\text{Kг}$  высокой энергии.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для проведения исследований были использованы образцы кремния *n*-типа без легирования с удельным сопротивлением  $\rho = 2,0 \cdot 10^3$  Ом·см. На

поверхности исходных образцов перед облучением были нанесены параллельные царапины, видимые визуально. Как известно, при нанесении царапин происходит деформация материала как под ней, так и вблизи нее. При этом образуются протяженные дефекты типа дислокаций и петель, а также точечные дефекты.

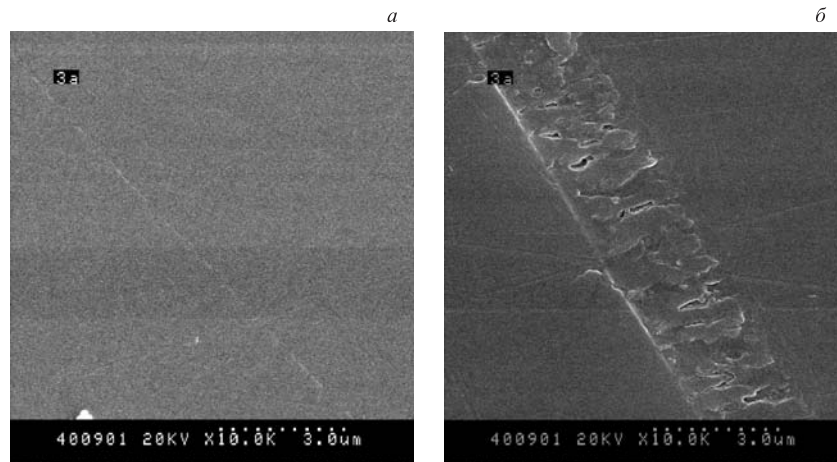


Рис. 1. СЭМ-изображение необлученной поверхности Si: *a*) область без царапин; *б*) специально поцарапанный участок

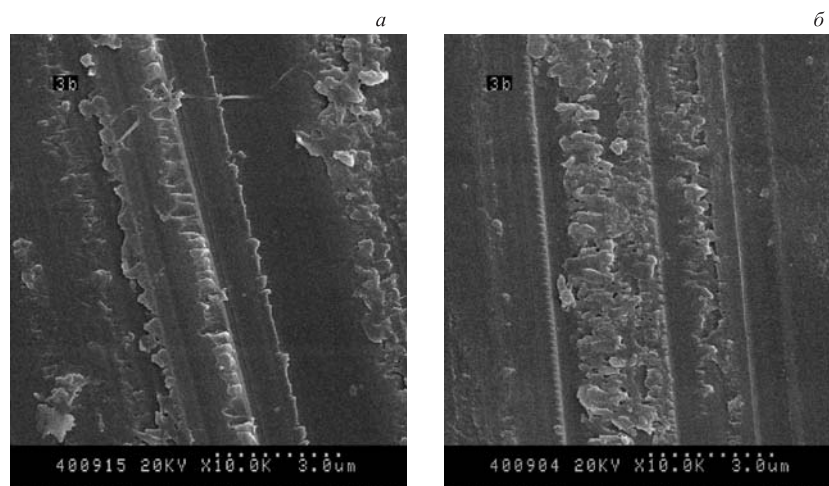
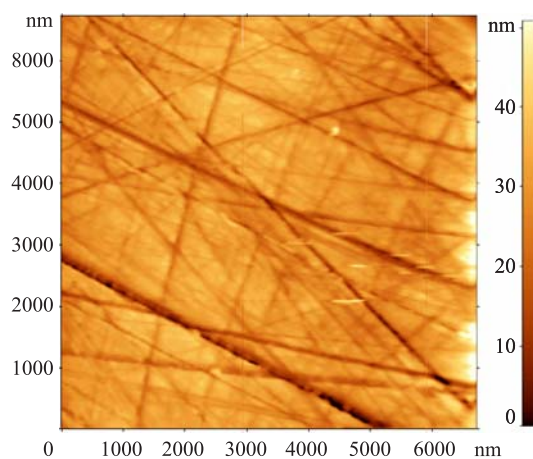
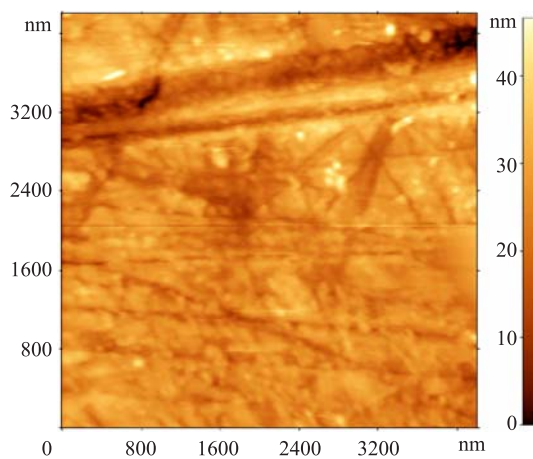


Рис. 2. СЭМ-изображение одной и той же царапины на необлученном (*a*) и облученном ионами криптона (*б*) участках поверхности кремния

На рис. 1 представлены фотографии части поверхности образца Si без нанесенных царапин (*a*) и с царапиной (*b*), сделанные с использованием метода сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на растровом микроскопе «Hitachi».



Fite: 3b#001r6  
Image data: Height *a*



Fite: 3as003  
Image data: Height *b*

Рис. 3. АСМ-изображения необлученной (*a*) и облученной ионами криптона (*b*) частей поверхности кремния

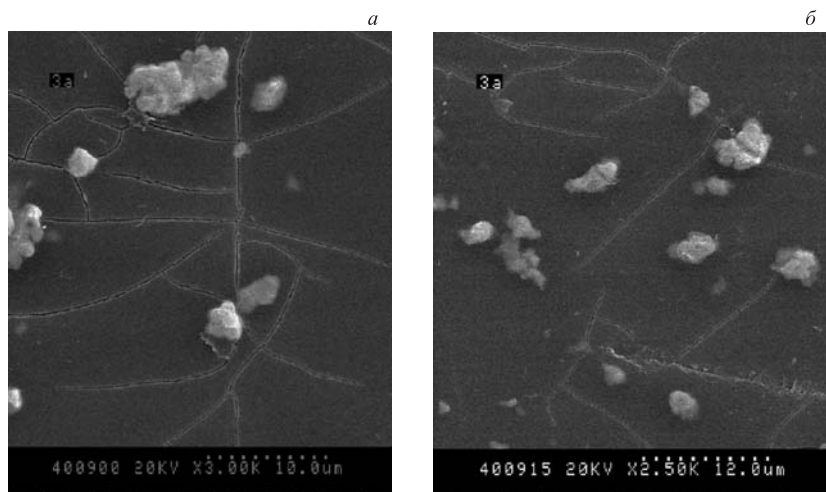


Рис. 4. СЭМ-изображения двух областей с микротрещинами на облученной ионами поверхности кремния с царапинами. На фотографиях (а) и (б) увеличения  $\times 3000$  и  $\times 2500$  соответственно

Подготовленные таким образом образцы были облучены тяжелыми ионами  $^{86}\text{Kr}$  с энергией  $E = 253$  МэВ до флюенса  $\Phi_{\text{Kr}} = 1,3 \cdot 10^{14}$  ион/см $^2$ . При облучении половины образцов были перекрыты никелевой фольгой с толщиной, превышающей пробег ионов. Это позволило изучать изменение рельефа поверхности вдоль выделенной царапины при переходе от облученной ее части к необлученной. Температура при облучении образцов не превышала 40 °С. На рис. 2 при одинаковом увеличении приведены изображения структуры поверхности кремния вдоль одной царапины для ее необлученного (а) и облученного ионами (б) участков.

Как видно, облучение тяжелыми ионами при флюенсе  $\Phi_{\text{Kr}} = 1,3 \times 10^{14}$  ион/см $^2$  не приводит к существенным изменениям топографии поверхности. В то же время на облученном участке поверхности наблюдается сглаживание структуры царапины за счет происходящих процессов неупругого распыления, что будет показано далее.

На рис. 3 представлена топография поверхности необлученной части (а) и облученной ионами криптона части (б) образца кремния, полученные с использованием атомно-силового микроскопа «Femtoscan 001» (метод АСМ). Как и на рис. 2, б, на рис. 3, б заметно значительное сглаживание нанесенных при механической полировке царапин, часть из которых практически незаметна. Помимо этого на участках между царапинами появляется своеобразная «рябь», также свидетельствующая о процессах неупругого распыления.

Отметим, что в работах [11–13] были изучены процессы распыления кристаллов GaAs, InP и эпитаксиальных слоев  $\text{Si}_{0,84}\text{Ge}_{0,16}$  под действием бомбардировки ионами  $^{40}\text{Ar}$  в диапазоне энергий 0,5–5 кэВ. Показано, что после облучения GaAs и  $\text{Si}_{0,84}\text{Ge}_{0,16}$  ионами аргона поверхность остается достаточно гладкой, но на ней появляется «рябь», как и на рис. 2, б и 3, б. При этом заметные изменения шероховатости начинаются с флюенса облучения  $\Phi_{\text{Ar}} \sim 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>.

На одном из изученных участков поверхности кремния с нанесенными царапинами были обнаружены области с микротрещинами. На рис. 4 приведены изображения двух таких характерных участков.

## 2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для ионов  $^{86}\text{Kr}$  с энергией  $E_{\text{Kr}} = 253$  МэВ и флюенса облучения  $\Phi_{\text{Kr}} = 1,3 \cdot 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> в кремнии величины проективного пробега  $R_p$ , значения удельных ионизационных потерь энергии  $S_e^{\text{Kr}} = -(dE/dx)_{\text{inel}}$ , сечения дефектообразования на входе в мишень  $\sigma(x=0)$  и в области пика Брэгга  $\sigma(x \approx R_p)$ , дозы повреждений  $D(x=0) = \sigma(x=0) \cdot \Phi_{\text{Kr}}$  и  $D(x \approx R_p) = \sigma(x \approx R_p) \cdot \Phi_{\text{Kr}}$  и коэффициент распыления  $S_{\text{Si}}$  атомов кремния (по модели упругого распыления [9]), рассчитаны с использованием компьютерной программы TRIM-98 [14]. Все вышеперечисленные параметры представлены в таблице. Пороговая энергия дефектообразования равна  $E_d = 15$  эВ.

**Пробег  $R_p$  ионов  $^{86}\text{Kr}$  ( $E = 253$  МэВ), величина удельных ионизационных потерь энергии в приповерхностном слое  $S_e^{\text{Kr}} = -(dE/dx)_{\text{inel}}$ , сечения дефектообразования вблизи поверхности  $\sigma(x=0)$  и в области пика Брэгга  $\sigma(x \approx R_p)$ , дозы повреждений  $D(x=0)$  и  $D(x \approx R_p)$  и коэффициент распыления  $S^{\text{Kr}}$**

$R_p$ , мкм	$S_e$ , кэВ/нм	$\sigma(x=0)$ , (с.н.а.·см <sup>2</sup> )/ион	$\sigma(x \approx R_p)$ , (с.н.а.·см <sup>2</sup> )/ион	$D(x=0)$ , с.н.а.	$D(x \approx R_p)$ , с.н.а.	$S^{\text{Kr}}$ , атом/ион
32,2	9,6	$3,0 \cdot 10^{-17}$	$2,2 \cdot 10^{-15}$	$8,7 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-1}$	0,021

Следовательно, для флюенса ионного облучения  $\Phi_{\text{Kr}} = 1,3 \cdot 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> максимальная толщина распыленного слоя может быть оценена из выражения

$$\Delta_{\text{расп}}^{\text{Kr}} = S^{\text{Kr}} \cdot \Phi_{\text{Kr}} / N_{\text{Si}} \approx 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ нм}, \quad (1)$$

здесь  $N_{\text{Si}} = 4,976 \cdot 10^{22}$  атом/см<sup>3</sup> — число атомов кремния в единице объема. Естественно, что при такой малой толщине распыленного слоя какие-либо изменения топографии поверхности обнаружить невозможно. С применением

программы TRIM-98 [14] нами были вычислены коэффициенты распыления атомов Si и Ge при бомбардировке ионами  $^{40}\text{Ar}$  (энергия 5 кэВ), составляющие  $S_{\text{Si}}^{\text{Ar}} = 1,1$  атом/ион и  $S_{\text{Ge}}^{\text{Ar}} = 0,27$  атом/ион. Расчетная плотность  $\text{Si}_{0,84}\text{Ge}_{0,16}/\rho_{\text{SiGe}} = 2,805$  г/см<sup>3</sup>, а плотность атомов  $N_{\text{SiGe}} = 4,799 \cdot 10^{22}$  см<sup>-3</sup>. Тогда для флюенса  $\Phi_{\text{Ar}} = 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> после облучения ионами  $^{40}\text{Ar}$  средняя толщина распыленного слоя примерно составит:

$$\Delta_{\text{расп}}^{\text{Ar}} \approx (0,84 \cdot S_{\text{Si}}^{\text{Ar}} + 0,16 \cdot S_{\text{Ge}}^{\text{Ar}}) \cdot \Phi_{\text{Ar}} / N_{\text{SiGe}} \approx 0,2 \text{ нм.} \quad (2)$$

Примерно на такое значение и уменьшается шероховатость поверхности  $\text{Si}_{0,84}\text{Ge}_{0,16}$  (rms roughness) для данного флюенса ионов Ar, т.е. экспериментально измеренные значения коэффициентов распыления согласуются с расчетными значениями по теории упругого распыления [9].

### 3. ВЫВОДЫ

Как видно из выражения (1), за счет упругих процессов распыления невозможно было бы обнаружить какие-нибудь изменения структуры поверхности после облучения ионами криптона до флюенса  $\Phi_{\text{Kr}} = 1,3 \cdot 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup>. Поэтому можно сделать вывод о том, что изменения структуры поверхности (рис. 2, б и рис. 3, б) обусловлены одним из механизмов неупругого распыления [10, 14].

Обнаруженные на отдельных участках поверхности поцарапанных образцов микротрещины (рис. 4) свидетельствуют о значительных механических напряжениях в кристалле Si, инициированных облучением тяжелыми ионами криптона. Возрастание уровня механических напряжений может быть обусловлено дефектами структуры, созданными при нанесении механических царапин. Как известно, вблизи и под такими царапинами образуются как протяженные, так и точечные дефекты структуры. Наличие таких дефектов уменьшает длину свободного пробега возбужденных («горячих») электронов, образующихся при прохождении тяжелого иона, и тем самым локализует область выделенной энергии. Это может приводить к локальным перегревам и изменять скорость рекристаллизации перегретой области (см., например, обзор [2]).

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Fleisher R. L., Price P. B., Walker R. M.* // J. Appl. Phys. 1965. V. 36, No. 11. P. 3645–3652.
2. *Chadderton L. T.* Nuclear tracks in solids: registration physics and the compound spike // Radiation measurements. 2003. V. 36. P. 13–34.



3. *Wesch W., Komarov A., Wendler E.* Effect of high electronic energy deposition in semiconductors // Nucl. Instr. Meth. B. 2004. V. 225. P. 111–128.
4. *Furuno S. et al.* // Nucl. Instr. Meth. B. 1996. V. 107, No. 1–4. P. 223–226.
5. *Toulemonde M.* // Nucl. Instr. Meth. B. 1999. V. 156, No. 1–4. P. 1–11.
6. *Neumann R.* // Ibid. V. 151, No. 1–4. P. 1–11.
7. *Комаров Ф. Ф.* // УФН. 2003. Т. 173, № 12. С. 1288–1318.
8. *Челядинский А. Р., Комаров Ф. Ф.* Дефектно-примесная инженерия в имплантированном кремнии // УФН. 2003. Т. 173, № 8. С. 813–846.
9. *Sigmund P.* // Phys. Rev. 1969. V. 184, No. 2. P. 383.
10. *Баранов И. А. и др.* // УФН. 1998. Т. 156, № 3. С. 476.
11. *van der Berg N.G. et al.* Argon bombardment-induced topography and sputter yield on  $\text{Si}_{0.84}\text{Ge}_{0.16}$  // Nucl. Instr. Meth. B. 2002. V. 193. P. 739–744.
12. *Malherbe J. B.* // CRC Critical Rev. Solid State Sci. Mater. Science. 1994. V. 19. P. 55; 128.
13. *Malherbe J. B., Odental R. Q.* // Appl. Surf. Sci. 1999. V. 144/145. P. 192.
14. *Biersack J. P., Hassmark H.G.* // Nucl. Instr. Meth. B. 1980. V. 174. P. 274.

Получено 21 февраля 2006 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 16.05.2006.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,44. Уч.-изд. л. 0,50. Тираж 290 экз. Заказ № 55340.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@pds.jinr.ru](mailto:publish@pds.jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)