# ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЕ В КРЕМНИИ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ПРОТОНАМИ

И.Г. Дьячкова[1)], Е.Г. Новоселова[1)], И.С. Смирнов[1, 2)], И.С. Монахов[2)]
[1)]*Институт кристаллографии имени А.В. Шубникова РАН, Ленинский проспект 59, 119333 Москва, Россия, sig74@mail.ru*
[2)]*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», ул. Мясницкая 20, 101000 Москва, Россия, ismirnov@hse.ru*

Недавние исследования показали перспективность облучения кремния легкими ионами (водорода, гелия) для формирования так называемых "нарушенных" слоев и областей. Уникальной особенностью этих слоев является наличие в них структурных дефектов, созданных путем ионной имплантации водорода и последующей термической обработкой. Формирование областей, насыщенных дефектами разного рода (например, кластеры точечных дефектов, микропоры, газовые пузыри, наполненные водородом), становится возможным и зависит от условий имплантации, температуры и времени постимплантационного отжига.

Исследование дефектов, образующихся при имплантации, позволит расширить возможности метода ионной имплантации для развития новых технологий и контроля характеристик приборов микроэлектроники. Сведения о структуре ионно-имплантированных образцов позволят подбирать дозы, энергии и условия ионной имплантации, необходимые для оптимизации свойств нарушенных слоев для конкретных практических приложений.

## Введение

Дефекты, образующиеся в процессе ионной имплантации, формируют на поверхности кристалла нарушенный слой с измененным параметром кристаллической решетки, что приводит к макроизгибу пластин кремния. В работе рассмотрено влияние механических напряжений разных знаков на процессы радиационного дефектообразования в кристаллическом кремнии, а также проведен расчет напряженно-деформированного состояния тонкой круговой пластинки, поверхностный слой которой подвергается физическому воздействию.

## Предварительные результаты

В работе для оценки распределения имплантированной примеси и радиационных дефектов в кремнии по методу Монте-Карло с помощью программы TRIM были рассчитаны концентрационные профили распределения внедренных ионов водорода и дефектов для энергий облучения 100, 200 и 300 кэВ [1]. Положение максимумов профилей распределения примеси и радиационных дефектов для одной энергии практически совпадают и соответствуют проективному пробегу протонов с соответствующей энергией. Профили распределения радиационных дефектов имеют четко выраженную колоколообразную форму с максимумом, смещающимся в глубь кристалла с ростом энергии. Ширина профиля увеличивается с увеличением энергии ионов, а высота максимума уменьшается с ростом энергии, однако в итоге, судя по площади кривой, с ростом энергии имплантации наблюдается прирост общего числа дефектов, приходящихся на один ион. Рассчитанная концентрация точечных дефектов превышает концентрацию водорода: для энергии имплантации 100 кэВ в 1..4 раза, для энергии имплантации 300 кэВ в 1.7 раза.

## Методы и описание образцов

В работе исследовалось влияние деформации на процесс накопления радиационных дефектов в кремнии марки КЭФ-4.5, имплантированном протонами с энергией 140 и 500 кэВ и флюенсом $2.5 \cdot 10^{15}$см$^{-2}$. Образцы представляли собой плоскопараллельные пластины размером 15x15x0.4 мм, которые подвергались деформации: в первом случае приповерхностный слой находился в сжатом состоянии, во втором – в растянутом. Для сравнения в каждой партии имелся также неизогнутый образец.

Величина деформации определялась по прогибу образца и контролировалась рентгеновским методом [2]. После облучения механические напряжения снимались, образцы исследовались на двухкристальном рентгеновском спектрометре. Изгиб пластин кремния определяли рентгенодифракционным методом по величине угла между максимумами кривых отражения лучей $K_{\alpha 1}$ и $K_{\alpha 2}$ [3].

Метод секционной топографии Ланга был использован для визуализации ионно-имплантированных слоев в кристаллах кремния.

## Результаты исследований

Нарушенный слой на рентгенотопографическом изображении мы видим как темную полосу на фоне светлой матрицы. Размер первичных радиационных дефектов и комплексов мал по сравнению с разрешением рентгенотопографического метода, что не позволяет нам наблюдать их индивидуально.

Было показано, что приложенные к образцу в процессе облучения механические напряжения влияют на величину остаточного изгиба кристаллических пластин. Измеренные радиусы кривизны имеют значения от 120 до 260 м, что соответствует остаточным напряжениям от 0.33 до 0.15 МПа. Причем минимальная кривизна наблюдалась у образцов, в поверхностном слое которых создавались напряжения сжатия (Таблица 1).

Для получения искомого профиля деформации применяется метод машинного сопоставления экспериментальных кривых и теоретических КДО, рассчитанных для заданного профиля по

Таблица 1. Рассчитанные значения радиуса кривизны и остаточного напряжения исследуемых образцов

| № образца | Исходное напряжение, $\sigma_{исх}$, МПа | Режим облучения | Радиус остаточной кривизны $R_{ост}$, м | Остаточное напряжение, $\sigma_{ост}$, МПа |
|---|---|---|---|---|
| 1.1 | 0 | $H^+$, 500кэВ | 120 | 0,33 |
| 1.2 | -34,9 | j=0,6мкА | 130 | 0,30 |
| 1.3 | -54,1 | $\Phi=5*10^{15}$см$^{-2}$ | 160 | 0,25 |
| 1.4 | -69,8 | | ∞ | 0 |
| 2.1 | 0 | $H^+$, 140кэВ | 190 | 0,21 |
| 2.2 | -104,7 | j=0,3мкА | 260 | 0,15 |
| 2.3 | 41,9 | $\Phi=2,5*10^{15}$см$^{-2}$ | 170 | 0,24 |

уравнениям Такаги-Топэна [3]. Рентгенодифракционная кривая качания в случае малой толщины нарушенного слоя может быть математически рассчитана с использованием приближенного решения уравнения Такаги. Этот метод определяет соотношение амплитуд дифрагированной и прошедшей волн Q.

Начальное приближение для профиля деформации ионно-имплантированных слоев определяется кубической сплайн-интерполяцией основных точек данных, с учетом особенностей экспериментальных кривых дифракционного отражения. Рассчитанные кривые качания сравниваются с экспериментальными кривыми дифракционного отражения. Критерием наилучшего соответствия является минимум среднеквадратичной ошибки между экспериментальным и теоретически рассчитанным коэффициентом отражения.

Установлено, что приложенные механические напряжения оказывают в основном влияние на толщину нарушенного слоя. С ростом сжимающих напряжений у поверхности толщина поврежденного слоя уменьшается по сравнению с толщиной в недеформированном образце и увеличивается в обратном случае, что согласуется с результатами измерения остаточной кривизны образцов (Таблица 1). Изгиб оказывается тем заметнее, чем больше толщина нарушенного слоя, вызывающего данный изгиб.

## Заключение

Результаты указывают на то, что механические напряжения заметно влияют на процесс радиационного дефектообразования в кристаллах.

Сдвиг нарушенного слоя в сторону поверхности в образцах, сжатых в процессе облучения, может быть связан с увеличением области рекомбинации дефектов междоузельного типа, вызывающих наиболее сильную деформацию решетки (чем сильнее сжата решетка, тем энергетически выгоднее для междоузельного атома занять узловое положение), а также изменением величины энергии дефектообразования в деформированной решетке.

Расчет остаточных напряжений в пластинах кремния, имплантированных в различных условиях, демонстрирует удовлетворительное согласие с экспериментальными данными, несмотря на то, что модель континуальной аппроксимации не учитывает анизотропию упругих свойств кристаллов кремния. Это свидетельствует о применимости континуальной аппроксимации для расчета напряженного состояния тонких поверхностных слоев.

## Список литературы

1. *Posselt M.* Crystal-TRIM and its application to investigations on channeling effects in ion implantation // Radiation Effects and Defects in Solids. 1994. № 130/131. P. 87.
2. *Larson B.C.* X-ray Diffuse Scattering Near Bragg Reflections For The Study Of Clustered Defects In Crystalline Materials / Diffuse Scattering and the Fundamental Properties of Materials, ed. Barabash, Ice, & Turchi (Momentum Press, New York, NY 2009).
3. *Боуэн Д.К., Таннер Б.К.* Высокоразрешающая рентгеновская дифрактометрия и топография. С-Пб.: Наука, 2002. 274 с.

## THE EFFECT OF MECHANICAL STRESSES ON DETECTIONRATE IN SILICON IRRADIATED BY PROTONS

Irina Dyachkova[1)], Elena Novoselova[1)], Igor Smirnov[1, 2)], Ivan Monakhov[2)]
[1)]*FGBUN Institute of crystallography A.V. Shubnikov RAS,*
*59 Leninsky prospect, 119333 Moscow, Russia, sig74@mail.ru*
[2)]*National Research University "Higher School of Economics",*
*20 Myasnitskaya str., 101000 Moscow, Russia, ismirnov@hse.ru*

The effect of stress of different signs on the processes of radiation defect formation in the crystalline silicon is presented in this study. The calculation of the state of thin circular plate with the surface layer under the deformation is shown as well. The influence of pre-deformation on the characteristics of the layer distorted by radiation defects in silicon KEF-4.5 implanted by protons with the energies of 140 and 500 keV and the flux of $2.5 \cdot 10^{15}$ cm$^{-2}$ was studied experimentally. The samples were plane-parallel plates with the size of 15x15x0.4 mm subjected to the deformation: in the first case the surface layer was in the compressed state, in the second case it was in the stretched state. For comparison each sample had also the unbent reference. The degree of deformation was determined by the sample deflection and controlled by the X-ray method. It was demonstrated that the applied mechanical stresses to the sample during the irradiation process affect the magnitude of the residual plate bending. The measured values of radii of curvature are between 120 and 260 m that corresponds to the residual stresses from 0.33 to 0.15 MPa. Moreover, the minimum curvature was observed for the samples with the surface layer subjected to the compressive stresses. The applied mechanical stresses affect the deformation distribution in the distorted layer. The maximum of deformation in the distorted layer shifts towards crystal's surface with the increase of the compressive stresses as compared to the non-deformed sample. It shifts in the opposite direction in case of stretched state of the surface layer. It is consistent with the measurements of the residual curvature.