

## ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ, ОБЛУЧЕННОГО 6.8 МэВ ПРОТОНАМИ И 27.2 МэВ $\alpha$ -ЧАСТИЦАМИ

Н.Л. Дмитрук<sup>1)</sup>, О.С. Кондратенко<sup>1)</sup>, П.В. Кучинский<sup>2)</sup>, М.Б. Пинковская<sup>3)</sup>, В.И. Хиврич<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> ИФП НАН Украины, просп. Науки, 45, Киев, 03028, e-mail: dmitruk@isp.kiev.ua

<sup>2)</sup> НИИ ПФП им. А.Н. Севченко, БГУ, ул. Курчатова, 7, Минск, 220064, e-mail: Kuchvnski@bsu.by

<sup>3)</sup> ИЯИ НАН Украины, просп. Науки, 47, Киев, 03680, e-mail: V.Khivrych@iee.org

В работе приведены результаты изучения влияния 6.8 МэВ протонов и 27.2 МэВ  $\alpha$ -частиц на оптические свойства поверхности механически и химически полированных монокристаллов Si. Методом многоугловой монохроматической эллипсометрии ( $\lambda = 632.8$  нм) определены оптические параметры (показатель преломления  $n$ , коэффициент поглощения  $k$  и толщина  $d$  окисной пленки  $\text{SiO}_2$ ) на поверхности Si. Показано, что после облучения протонами потоками  $10^{15}$  и  $10^{17}$   $\text{см}^{-2}$  оптические константы приповерхностного слоя образцов, изначально дефектного из-за недостаточного химического травления после механической полировки, изменяются:  $n$  увеличивается, а  $k$  уменьшается. По мере облучения протонами толщина окисной пленки значительно уменьшается – реализуется "сухое травление" поверхности Si. Эти результаты свидетельствуют о модификации поверхности – происходит увеличение ее плотности и, соответственно, рост  $n$ . Если поверхность бездефектная, то после облучения наблюдается ее разрыхление, сопровождающееся уменьшением  $n$  с 3.80 до 2.85. При облучении  $\alpha$ -частицами потоками  $2.7 \cdot 10^{14}$  и  $2.6 \cdot 10^{16}$   $\text{см}^{-2}$  отмеченные эффекты незначительны, что свидетельствует о неупругом взаимодействии  $\alpha$ -частиц данной энергии с поверхностью монокристаллов Si.

### Введение

Известно, что модифицированная электрохимическим травлением поверхность кремния (пористость) обладает рядом уникальных свойств [1].

Можно предположить, что как подобными, так и отличительными свойствами будет обладать поверхность Si, обработанная ускоренными заряженными частицами, образующими треки. Это может стать также основой разработки нового класса многочисленных сенсоров.

В данной работе изучается влияние 6.8 МэВ протонов и 27.2 МэВ  $\alpha$ -частиц на оптические характеристики поверхности механически и химически полированных образцов Si. Ускорение частиц производилось на циклотроне У-120 ИЯИ НАН Украины. Общим свойством ускоренных частиц является примерно одинаковая длина пробега в кристаллах Si  $\approx 300$  мкм [2].

Для измерения оптических характеристик поверхности и окисной пленки на ней до и после облучения различными потоками частиц (протонами  $10^{15}$  и  $10^{17}$   $\text{м}^{-2}$  и  $\alpha$ -частицами  $2.7 \cdot 10^{14}$  и  $2.6 \cdot 10^{16}$   $\text{см}^{-2}$ ) использовалась методика многоугловой монохроматической эллипсометрии на длине волны  $\lambda = 632.8$  нм с использованием ноль-эллипсометра типа ЛЭФ-3М. Измерялись при  $T = 300\text{K}$  эллипсометрические углы  $\psi$ ,  $\Delta$  в зависимости от угла падения  $\phi$  луча монохроматического света. Точность измерения поляризационных углов составляла  $\delta\psi = 0.03^\circ$ ,  $\delta\Delta = 0.09^\circ$ .

Отметим, что эллипсометрия – высоко чувствительный и точный поляризационно-оптический метод исследования поверхностей и границ раздела различных сред, основанный на изучении изменения состояния поляризации света из-за его взаимодействия с поверхностью (границей раздела) [3].

### Результаты и их обсуждение

Оптические параметры: показатель преломления исходного, нарушенного приповерхностного слоя  $n$ , коэффициент поглощения  $k$  и толщина  $d$  окисного слоя  $\text{SiO}_2$  рассчитывались по извест-

ным формулам [3] на длине волны  $\lambda = 632.8$  нм. Оптические параметры до и после облучения протонами и  $\alpha$ -частицами определяли путем подгонки рассчитанных по модели однослойной пленки на подложке угловых зависимостей поляризационных углов  $\psi(\phi)$ ,  $\Delta(\phi)$  к экспериментальным зависимостям с помощью разработанной программы минимизации квадратической целевой функции  $F$  (Рис. 1, 2) [3].

Рассчитанные оптические параметры, а также толщина окисной пленки приведены в Таблице 1.

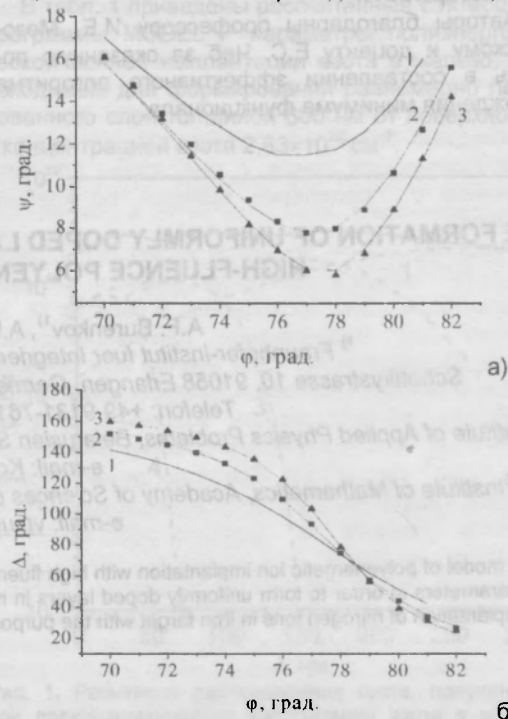


Рис. 1 Угловые зависимости  $\psi(\phi)$  (а),  $\Delta(\phi)$  (б) для структуры  $\text{SiO}_2/n\text{-Si}$ , облученной потоком протонов,  $\text{см}^{-2}$ : 1-0;  $2 \cdot 10^{15}$ ;  $3 \cdot 10^{17}$ . Символы – эксперимент, линии – рассчитанные по модели.

Из полученных результатов видно значительное влияние облучения протонами, а именно по мере облучения растет показатель преломления

поверхностного слоя n-Si, в то время как коэффициент поглощения  $k$  уменьшается. Параллельно наблюдается уменьшение толщины окисного слоя  $\text{SiO}_2$  – происходит очищение поверхности – вариант "сухого травления".

Таб.1. Параметры пленок  $\text{SiO}_2$  и подложки Si, определенные методом многоугловой эллипсометрии

Парам.	n-Si исх.	$10^{15}$ $\text{см}^{-2}$	$10^{17}$ $\text{см}^{-2}$	p-Si исх.	$2.7 \cdot 10^{14}$ $\text{см}^{-2}$	$2.6 \cdot 10^{16}$ $\text{см}^{-2}$
$n_{\text{SiO}_2}$	1.508	1.521	1.505	1.466	1.431	1.491
$k_{\text{SiO}_2}$	0.023	0.024	0.030	0.044	0.050	0.041
$d_{\text{SiO}_2}$ , нм	14.4	11.25	8.30	2.70	2.29	2.50
$n_{\text{Si}}$	4.246	4.535	4.655	3.878	3.843	3.848
$k_{\text{Si}}$	0.028	0.024	0.021	0.024	0.026	0.024

Изначально большая величина показателя преломления  $n$  (~4.2 против табличного значения ~3.8) объясняется наличием на поверхности дефектного слоя, образованного механической полировкой и недостаточно полным последующим химическим травлением. Более того, облучение протонами приводит к дальнейшей дефектной модификации этого слоя – увеличению его плотности и, соответственно, к росту  $n$ . В то же время, если поверхность бездефектная ( $n \sim 3.8$ ), наблюдается разрыхление приповерхностного слоя – при тех же потоках облучения  $n$  уменьшается с 3.8 до 2.85 (табл.2).

Таб.2. Оптические параметры образцов с изначально бездефектной поверхностью (до и после облучения протонами)

Поток, $\text{см}^{-2}$	$n_{\text{SiO}_2}$	$k_{\text{SiO}_2}$	$n_{\text{Si}}$	$k_{\text{Si}}$ исх.
0	1.455	0.048	3.800	0.018
$10^{15}$	1.416	0.033	3.805	0.018
$10^{17}$	1.410	0.021	2.845	0.021

Несмотря на то, что  $\alpha$ -частицы значительно превосходят протоны по массе и энергии, подобные эффекты при облучении  $\alpha$ -частицами незначительны.

Это видно из рис. 2, где приведены угловые зависимости  $\psi(\varphi)$ ,  $\Delta(\varphi)$  для образцов p-Si после облучения  $\alpha$ -частицами потоками  $2.7 \cdot 10^{14}$  и  $2.6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ .

Видно, что, как и при облучении протонами, наблюдается "сухое травление" и незначитель-

ное уменьшение  $n$ , что свидетельствует также о некотором разрыхлении поверхности.

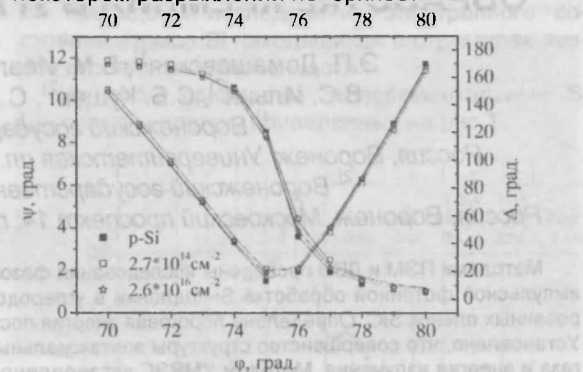


Рис. 2 Угловые зависимости  $\psi(\varphi)$ ,  $\Delta(\varphi)$  для структуры  $\text{SiO}_2/\text{p-Si}$ : ■ – эксперимент для подложки p-Si, □, \* – эксперимент для структуры, облученной  $\alpha$ -частицами; сплошные линии – рассчитанные по модели.

Таким образом, как видно из рис.2, доля упругих взаимодействий  $\alpha$ -частиц с энергией 27.2 МэВ с поверхностью незначительна по сравнению с облучением 6.8 МэВ протонами. Эти экспериментальные результаты свидетельствуют о "проникновении"  $\alpha$ -частиц данной энергии в кристалл в основном без упругих столкновений.

### Заключение

При приблизительно одинаковом пробеге в Si 6.8 МэВ протонов и  $\alpha$ -частиц значительную дефектную модификацию структуры поверхности производят только протоны.

### Список литературы

1. Свечников С.П. и др. // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. -1997.-Вып. 32.- с. 19.
2. Пучеров Н.Н., Романовский С.В., Чеснокова Т.Д. Таблицы массовой тормозной способности и пробегов заряженных частиц с энергией 1-100 МэВ.-К.: „Наукова Думка“, 1975.- 254 с.
3. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. Пер. с англ.- М.: Мир, 1981. -583 с.

Работа выполнена при поддержке Фонда Фундаментальных Исследований МНО Украины (проект 14.1-012) и Научного Фонда АН Республики Беларусь (проект Ф07К-104).

## ELLIPSO-METRIC STUDY OF SI SURFACE, IRRADIATED BY 6.8 MeV PROTONS AND 27.2 MeV ALPHA-PARTICLES

N.L. Dmytruk<sup>1</sup>), O.C. Kondratenko<sup>1</sup>), P.V. Kuchynsky<sup>2</sup>), M.B. Pinkovska<sup>3</sup>), V.I. Khivrych<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>ISP NAS of Ukraine, prosp. Nauky, 45, Kyiv, 03028, e-mail: dmitruk@isp.kiev.ua  
<sup>2</sup>SRI by A.N. Savchenko, Kurchatov str., 7, Minsk, 220064, e-mail: Kuchynski@bsu.by  
<sup>3</sup>INS NAS of Ukraine, prosp. Nauky, 47, Kyiv, 03680, e-mail: V.Khivrych@ieee.org

Influences of 6.8 MeV protons and 27.2 MeV alpha-particles on optical properties of the surface of chemically polished Si monocrystals were studied. Optical parameters (refraction index  $n$ , absorption coefficient  $k$  and  $\text{SiO}_2$  film thickness  $d$ ) were received by using polygonal monochromes ellipsometry method ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ). It has been shown that after proton irradiations with fluences  $10^{15}$  and  $10^{17} \text{ cm}^{-2}$  optical constants of near surface layer, primordially imperfect due to the insufficient chemical etching after mechanical polish, were changed:  $n$  increased, while  $k$  decreased. During proton irradiation the oxide film thickness drops noticeably and "dry etching" of Si surface is realized. The results testify about modification of the surface – its density grows and, accordingly, refraction index  $n$  too. If the surface is free from defects, than after irradiation its loosening occurs, accompanied by the  $n$  decrease. The mentioned effects in samples, irradiated by alpha-particles with fluences  $2.7 \cdot 10^{14}$  and  $2.6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ , are insignificant, which indicate on the shock-free ionizing interaction of alpha-particles of given energy with the Si monocrystal surface.