АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН С УЧЕТОМ РЕАЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ В ИМПЛАНТИРОВАННОМ СЛОЕ

А.В. Еремин
Московский государственный институт электроники и математики (ТУ)
E-mail aleskey@mail.ru

For crystals of the silicon, implanted by ions, according to X-Ray diffractions examinations lateral views of strain in ion-implantation layers are calculated. The model of the intense state of silicon sheets which surface is subjected to ion-implantation processing is offered. The radiuses of curvature of sheets calculated by means of model are compared to experimental ones.

Известно, что облучение ионами разного типа формирует у поверхности кристалла нарушенный слой с увеличенным параметром решетки [1]. Толщина слоя определяется в основном глубиной пробега ионов и зависит от типа ионов, их энергии и дозы и составляет от ~0,04 мкм (при имплантации As+ с энергией 60 кэВ) до ~5,0 мкм (H+, 500 кэВ). Среднее изменение параметра решетки $\frac{\Delta d}{d}$ имеет величину порядка 10^{-4} и зависит от числа смещенных атомов кристалла. На практике это означает, что основная доза имплантации производится в кристалл с напряженным поверхностным слоем. Механические напряжения в слое, возникающие из-за такой деформации решетки, приводят к изгибу облученных кристаллов.

Для расчета радиуса кривизны облученной пластины использовалась математическая модель напряженно-деформированного состояния тонкой круговой пластинки, поверхностный слой которой подвергся физическому воздействию.

В модели рассматривается упругая изотропная пластинка толщиной h и радиусом R ($0<z<h$; $x^2+y^2<R^2$), упругие свойства которой характеризуются константами E - модуль Юнга, υ – коэффициент Пуассона. Вектор напряжения в любой точке поверхности этого тела равен нулю. Физическое воздействие (в нашем случае - имплантация) на поверхность этой пластинки приводит к тому, что в некотором слое вблизи поверхности $z = h$ возникает распределенное по глубине относительное изменение объема, описываемое функцией $\Theta(z)$.

Решение задачи об определении напряженно-деформированного состояния упругой пластинки по заданному распределению деформации $\varepsilon_{zz}(z)$ имеет следующий вид:

$$u_r = \frac{1-\upsilon}{3(1-2\upsilon)} \cdot \frac{r}{h}\int_0^h \Theta(z)dz + \frac{4(1-\upsilon)}{(1-2\upsilon)h^3} r\left(z-\frac{h}{2}\right)\int_0^h \Theta(z)\cdot\left(z-\frac{h}{2}\right)dz$$

$$u_z=\frac{1+\upsilon}{3(1-\upsilon)}\cdot\int_0^h\Theta(z)dz-\frac{2\upsilon}{3(1-2\upsilon)}\frac{z}{h}\int_0^h\Theta(z)\cdot dz-$$

$$-\left((1-\upsilon)r^2+2\upsilon\left(z-\frac{h}{2}\right)\right)\cdot\frac{2}{(1-2\upsilon)h^3}\int_0^h\Theta(z)\cdot\left(z-\frac{h}{2}\right)dz$$

$$\varepsilon_{rr}=\frac{1-\upsilon}{3(1-2\upsilon)}\cdot\frac{1}{h}\int_0^h\Theta(z)dz+\frac{4(1-\upsilon)}{(1-2\upsilon)h^3}r\left(z-\frac{h}{2}\right)\int_0^h\Theta(z)\cdot\left(z-\frac{h}{2}dz\right)dz$$

$$\varepsilon_{\varphi\varphi}=\frac{1-\upsilon}{3(1-2\upsilon)}\cdot\frac{1}{h}\int_0^h\Theta(z)dz+\frac{4(1-\upsilon)}{(1-2\upsilon)h^3}r\left(z-\frac{h}{2}\right)\int_0^h\Theta(z)\cdot\left(z-\frac{h}{2}dz\right)dz$$

$$\varepsilon_{zz}=\frac{1+\upsilon}{3(1-\upsilon)}\Theta(z)-\frac{2\upsilon}{3(1-2\upsilon)}\cdot\frac{1}{h}\int_0^h\Theta(z)dz+\frac{8\upsilon}{(1-2\upsilon)h^3}\left(z-\frac{h}{2}\right)\int_0^h\Theta(z)\cdot\left(z-\frac{h}{2}\right)dz$$

$$\varepsilon_{rz}=0$$

$$\mathrm{Div}\ \vec{u}=\frac{1+\upsilon}{3(1-\upsilon)}\Theta(z)-\frac{2}{3h}\int_0^h\Theta(z)dz+\frac{8}{h^3}\left(z-\frac{h}{2}\right)\int_0^h\Theta(z)\cdot\left(z-\frac{h}{2}\right)dz$$

$$\sigma_{rr}=-\frac{E}{3(1-\upsilon)}\Theta(z)+\frac{E}{3(1-2\upsilon)h}\int_0^h\Theta(z)dz+\frac{4E}{(1-2\upsilon)h^3}\left(z-\frac{h}{2}\right)\int_0^h\Theta(z)\cdot\left(z-\frac{h}{2}\right)dz$$

$$\sigma_{\varphi\varphi}=-\frac{E}{3(1-\upsilon)}\Theta(z)+\frac{E}{3(1-2\upsilon)h}\int_0^h\Theta(z)dz+\frac{4E}{(1-2\upsilon)h^3}\left(z-\frac{h}{2}\right)\int_0^h\Theta(z)\cdot\left(z-\frac{h}{2}\right)dz$$

$$\sigma_{zz}=0;\ \sigma_{rz}=0$$

В том случае, когда вместо $\Theta(z)$ определено, например, экспериментально $\varepsilon_{zz}(z)$, целесообразно выразить напряжения деформации перемещения через $\varepsilon_{zz}(z)$.

Зависимость $\Theta_{zz}(z)$ от $\varepsilon_{zz}(z)$ имеет вид:

$$\Theta(z)=\frac{3(1-\upsilon)}{1+\upsilon}\varepsilon_{zz}(z)+A\left(z-\frac{h}{2}\right)+B;\ \text{где:}$$

$$A=-\frac{\dfrac{24\upsilon(1-\upsilon)}{(1-2\upsilon)(1+\upsilon)h^3}\displaystyle\int_0^h\varepsilon_{zz}(z)dz}{\dfrac{1+\upsilon}{3(1-\upsilon)}-\dfrac{2\upsilon}{3(1-2\upsilon)}};\ B=\frac{\dfrac{2\upsilon(1-\upsilon)}{(1-2\upsilon)(1+\upsilon)h}\displaystyle\int_0^h\varepsilon_{zz}(z)dz}{\dfrac{1+\upsilon}{3(1-\upsilon)}-\dfrac{2\upsilon}{3(1-2\upsilon)}}$$

В работе методами трехкристальной рентгеновской дифрактометрии были исследованы пластины монокристаллического кремния (100), имплантированные ионами H^+ с различными значениями энергии и дозы. Полученные КДО, снимавшиеся на $CuK_{б1}$ излучении, использованы для определения макроскопического радиуса изгиба пластин и профиля распределения деформаций в имплантированном слое.

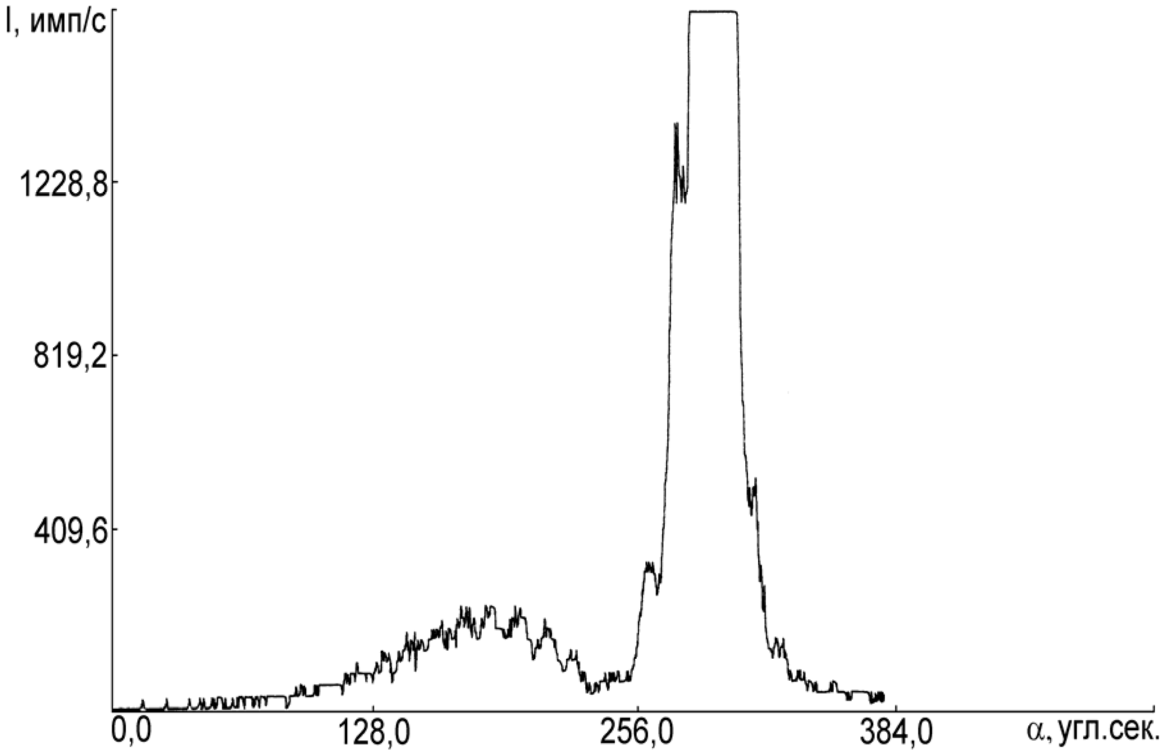

Рис. 1. Кривая дифракционного отражения кристалла Si, имплантированного H^+ с дозой $2.5\cdot 10^{15}$ см$^{-2}$.

Экспериментально измеренный радиус кривизны для пластины кремния, облученной протонами с энергией 150 кэВ и дозой $2.5\cdot 10^{15}$ см$^{-2}$ составил $R_к$=190м.

Для расчета распределения деформации по глубине деформированный слой разбивается на n подслоев. Толщина каждого подслоя будет определяться как $\Delta = \frac{z}{n}$. Считаем, что внутри каждого подслоя деформация является неизменной. Затем, варьируя значения деформации для каждого из подслоев, добиваемся того, чтобы кривая качания, рассчитанная по формуле

$$R(\eta) = |\xi - \eta|^2 \left| 1 - 2i\eta \sum_{k=1}^{n} \exp(i\varphi_k) \frac{\sin(\eta - \varepsilon_{zz\,k})\Delta}{\eta - \varepsilon_{zz\,k}} \right|^2$$

где η - нормализованный угол, f - нормализованная деформация,

$$\varphi_k = -\eta\Delta(2n - 2k + 1) + 2\Delta \sum_{k'=k+1}^{n} \varepsilon_{zz\,k'} + \varepsilon_{zz\,k}\Delta$$

совпала с экспериментально измерянной.

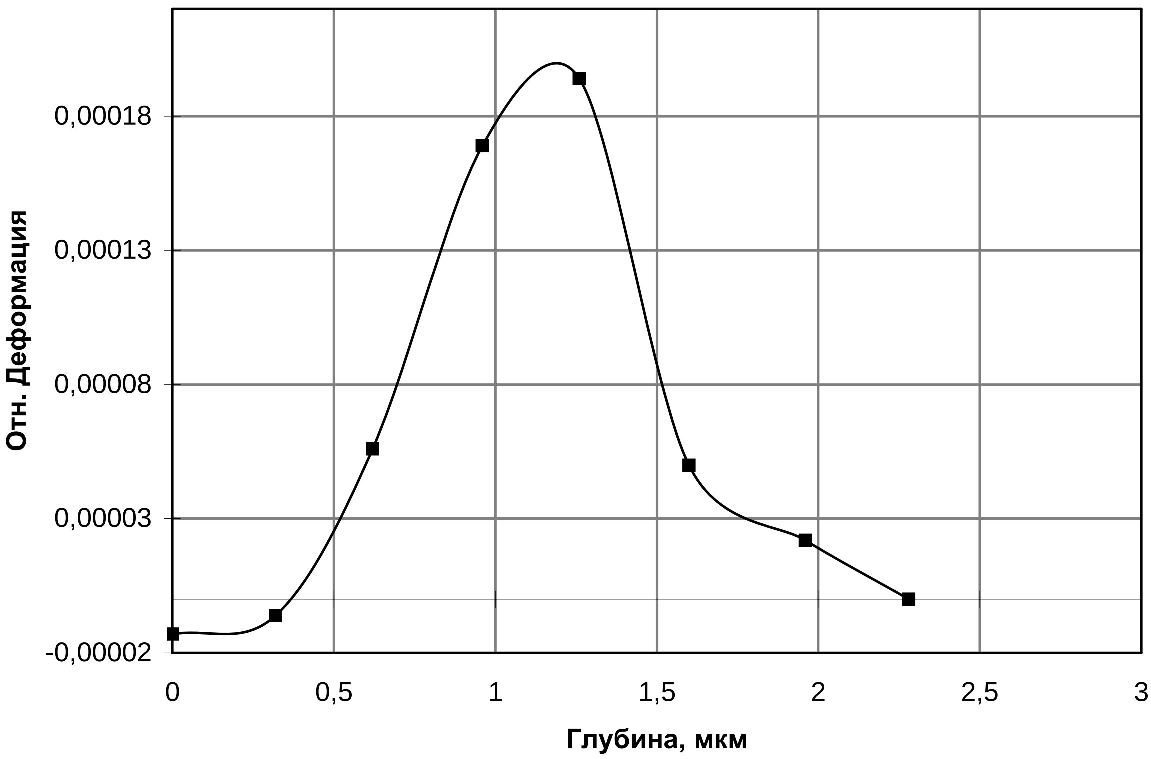

Рис. 2. Профили деформации кристаллической решетки исследованных образцов Si, облученных ионами водорода с энергией 150 кэВ, дозой 2,5·10^{15} см$^{-2}$.

Следует отметить, что экспериментально измеренные радиусы кривизны кремниевых пластин не совпадают с расчетом по предложенной модели с использованием распределений деформации, найденных по экспериментальным данным. Можно предположить, что это расхождение связано с тем, что модель напряженно-деформированного состояния тонкой круговой пластинки не учитывает анизотропии упругих свойств кристаллов кремния.

1. В.В. Козловский. Модифицирование полупроводников пучками протонов. СПб. «Наука» 2003.
2. R.N. Kyutt, P.V. Petrashen, and L.M. Sorokin. Strain Profiles in Ion-Doped Silicon Obtained from X-Ray Rocking Curves. Phys. Stat. sol. (a) 60, 381 (1980) p. 381-389.