

УДК 537.531

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕЙ ДЕФОРМАЦИЙ В КРИСТАЛЛЕ-АНАЛИЗАТОРЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА, ПОДВЕРГНУТОГО ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

А.О. АБОЯН

Государственный инженерный университет Армении

(Поступила в редакцию 22 декабря 1999 г.)

В работе методом рентгеновской интерферометрии исследованы поперечные деформации, создаваемые имплантированными в кремний ионами аргона с энергией 200 кэВ. Исходя из интерферометрических топограмм, определены относительные деформации и интегральные напряжения в зависимости от дозы облучения, а также оценено максимальное локальное напряжение, составляющее $8,5 \cdot 10^7$ Н/м².

1. Введение

Метод рентгеновского дифракционного муара является единственным прецизионным методом, позволяющим проводить прямые экспериментальные исследования структуры полей смещений, деформаций и напряжений дислокационных ансамблей, определения плотности дислокаций, величины и направления их векторов Бюргерса. Бонзе и Харт разработали рентгеновский интерферометр, обладающий высокой чувствительностью к напряжениям [1,2]. Относительные деформации или малые вращения в радианах могут быть измерены в пределах $10^{-8} \div 10^{-6}$.

В работе [3] рентгеноинтерферометрическим методом исследованы структурные несовершенства кристаллов кремния, вызванные диффузией бора, в зависимости от концентрации и глубины проникновения диффузанта. Показано, что напряжения, возникающие в процессе диффузии бора в кремнии, при малых концентрациях имеют бездислокационный характер, а при больших концентрациях появляются дислокации. В работе [4] экспериментально реализован рентгеноинтерферометрический метод определения плотности радиационных точечных дефектов в зависимости от дозы и глубины проникновения электронного облучения с использованием трехкристального интерферометра. В

работах [5,6] показано, что при имплантации ионов в кристалле возникают напряженные состояния, эквивалентные термическому проникновению поврежденного слоя вглубь кристалла.

В работе [7] показано, что в случае ионной имплантации одного из блоков рентгеновского интерферометра можно наблюдать дилатационные муаровые полосы. В этой работе изучены поперечные деформации, вызываемые имплантированными в кремний ионами аргона с энергией 80 кэВ, однако отсутствует исходная топограмма, что не дает возможности отделить напряжения, внесенные при имплантации, от имевших место в исходном образце, а также не показана динамика изменения муаровых картин в зависимости от дозы облучения.

Поэтому в настоящей работе приводятся экспериментальные и теоретические результаты исследования методом рентгенодифракционного муара полей деформаций, возникающих в кристалле-анализаторе рентгеновского интерферометра, подвергнутого ионной имплантации, в зависимости от дозы облучения. Исследована также зависимость полей деформации от направления падения первичного пучка на интерферометр.

2. Экспериментальная часть

Для проведения экспериментальных исследований, из высоко-совершенного монокристалла кремния был изготовлен трехкристальный интерферометр, толщина каждого кристалла которого равнялась 1 мм (рис.1).

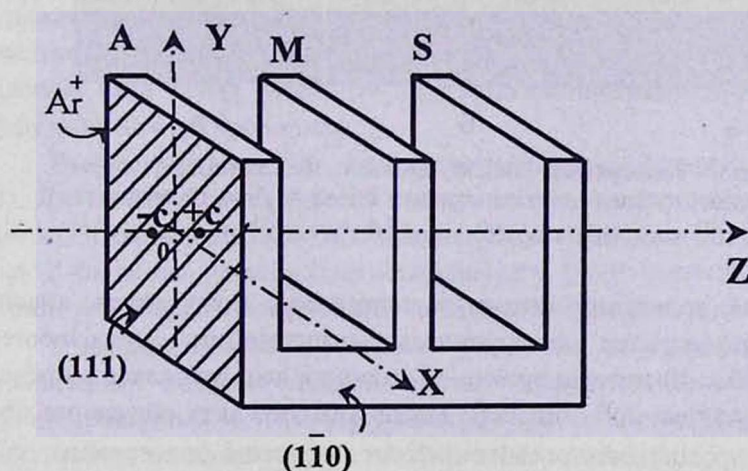


Рис.1. Трехкристальный рентгеновский интерферометр: S – расщепитель пучка, M – зеркало, A – анализатор. Область, подвергнутая ионной бомбардировке, заштрихована.

Топограммы были получены в камере КРС излучением MoK_α от плоскостей (110). Интерферометрические топограммы отражения 220,

полученные до имплантации в случаях, когда первичная волна падала как со стороны блока S, так и со стороны блока A, оказались идентичными (рис.2).



Рис.2. Исходная топограмма до имплантации.

Поскольку муаровые картины, полученные с помощью этого трехкристального интерферометра, не зависят от направления падения первичного пучка, т. е. от того, падает ли первичный пучок со стороны первого или третьего кристалла, то межплоскостные расстояния первого и третьего кристаллов одинаковы, и они отличаются от межплоскостных расстояний второго кристалла [8].

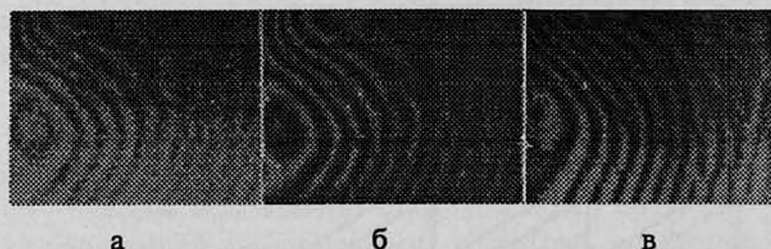


Рис.3. Топограммы после ионной имплантации, первичный пучок падает со стороны блока S. Доза облучения: а – 10^{13} ион/см²; б – 10^{14} ион/см²; в – 10^{15} ион/см².

После получения исходных топограмм, поверхность анализатора интерферометра подвергалась имплантации низкоэнергетическими (200 кэВ) ионами аргона. Суммарная доза менялась в пределах от 10^{13} ион/см² до 10^{15} ион/см². После каждого акта облучения ионами аргона проводились съемки и были получены топограммы, соответствующие различным дозам облучения, когда первичная волна падала со стороны кристалла S (рис. 3а – 3в) и со стороны кристалла А (рис.4а – 4в).

Как видно из этих топограмм, облучение ионами приводит к изменению муаровых полос. С увеличением дозы облучения период муаровых полос уменьшается (см. рис. 3а – 3в и рис. 4а – 4в), а деформа-

ция увеличивается. Видно, что при имплантации возникают дислокации.



Рис.4. Топограммы после ионной имплантации, первичный пучок падает со стороны блока А. Доза облучения: а – 10^{13} ион/см²; б – 10^{14} ион/см²; в – 10^{15} ион/см².

Анализируя полученные топограммы, можно сделать вывод: в дилатационном муаре дислокация изображается в виде светлой дополнительной полосы (или вилки – для темных муаровых полос (рис.3в)). В смешанном муаре дислокация изображается двумя темными полосами на нижней части левой стороны топограммы (см. рис.3в).

3. Определение напряжений и относительной деформации, вызванных ионным легированием кристалла

Объемные изменения в имплантированной области ведут к напряженному состоянию: его можно рассматривать как напряжение, вызванное термическим расширением поврежденного слоя. Эту аналогию ввел автор работы [9] при анализе напряжений, вызванных диффузионным легированием.

Рассмотрим тонкий слой кремния, параллельный плоскости (111). Для дальнейших расчетов выберем координатную систему таким образом, чтобы плоскость XOY была центральной плоскостью блока А и ось Z была бы параллельна направлению [111], перпендикулярному входной и выходной поверхности интерферометра (см. рис.1 и 5).

В имплантированной области объемные изменения приводят к напряжениям, которые должны расти с увеличением концентрации имплантированных ионов. Предполагая, что при имплантации возникает одномерное напряженное состояние, имеем $\sigma_z = 0$.

Для учета анизотропии упругости введем E_x , E_y , E_z – компоненты модуля Юнга вдоль соответствующих осей и два коэффициента Пуассона ν и ν_z . Так как ось X в нашем случае параллельна направлению $[1\bar{1}0]$, ось Y – направлению $[11\bar{2}]$, а ось Z – направлению $[111]$ (см. рис.1), имеем $E = E_x = E_y = 1,69 \cdot 10^{11}$ Н/м²; $E_z = 1,88 \cdot 10^{11}$ Н/м²; $\nu = 0,262$; $\nu_z = 0,18$ [10].

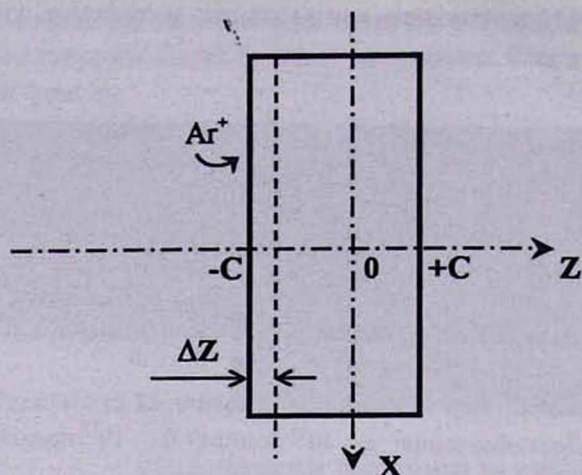


Рис.5. Анализатор интерферометра с имплантированной поверхностью и выбранная ориентация осей координат.

В работе [11] получено следующее выражение для температурных напряжений:

$$\sigma = \sigma_x = \sigma_y = -\frac{\alpha TE}{1-\nu} + \frac{1}{2c(1-\nu)} \int_{-c}^c \alpha TE dz + \frac{3z}{2c^3(1-\nu)} \int_{-c}^c \alpha TE z dz, \quad (1)$$

где α – температурный коэффициент расширения, $2c$ – толщина кристалла. Если заменить αT на βN_D , где β – решеточный коэффициент расширения, N_D – распределение дефектов, вызванных внедрением ионов, то формула (1) примет вид:

$$\sigma = \frac{\beta E}{1-\nu} \left[-N_D + \frac{1}{2c} \int_{-c}^c N_D dz + \frac{3z}{2c^3} \int_{-c}^c N_D z dz \right]. \quad (2)$$

Из рис.5 видно, что $z = -c$ соответствует расположению имплантированного слоя, причем его толщина Δz в случае облучения ионами с энергией в десятки кэВ много меньше толщины кристалла $2c$. Поэтому в формуле (2) вынесем $z = -c$ из под второго интеграла; так как $N_D \neq 0$ только в пределах этого значения z , получим:

$$\sigma = \frac{\beta E}{1-\nu} \left[-N_D + \left(1 - \frac{3z}{c} \right) \frac{D}{2c} \right], \quad (3)$$

где $D = \int_{-c}^c N_D dz$ – доза облучения, выраженная в количестве ионов на единицу площади.

Для нахождения компонент деформации напишем закон Гука с использованием наших обозначений:

$$\varepsilon_x - \beta N_D = [(1-\nu)/E]\sigma, \quad (4)$$

$$\varepsilon_y - \beta N_D = [(1-\nu)/E]\sigma, \quad (5)$$

$$\varepsilon_z - \beta N_D = -2\nu_z \sigma / E_z, \quad (6)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_x = \varepsilon_y = \left(1 - \frac{3z}{c}\right) \frac{\beta D}{2c}. \quad (7)$$

Из выражений (3) и (6) имеем:

$$\varepsilon_z = \beta N_D \frac{E}{E_z(1-\nu)} \left[(1-\nu) \frac{E_z}{E} + 2\nu_z - 2\nu_z \left(1 - \frac{3z}{c}\right) \frac{\beta D}{2c} \right]. \quad (8)$$

Поперечная относительная деформация ε изменяется с глубиной линейно, в то время как напряжение и нормальная деформация ε_z имеют резкий пик вблизи имплантируемой поверхности. Из (7) видно, что на глубине $c/3$ от поверхности кристалла, подвергнутого имплантации, $\varepsilon = 0$.

Интегрирование пика напряжений в уравнении (3) по глубине проникновения дает величину линейной силы F , действующей на единицу длины границы бомбардируемой поверхности в направлении, нормальном к этой границе:

$$F = \int_{-c}^{-c+\Delta z} \frac{\beta E}{1-\nu} \left[-N_D + \left(1 - \frac{3z}{c}\right) \frac{D}{2c} \right] dz.$$

Имея в виду, что $\Delta z \ll c$, для интегрального напряжения получим выражение

$$F = \beta \frac{ED}{1-\nu}. \quad (9)$$

В формулах, полученных выше, фигурирует относительная деформация $\varepsilon = \varepsilon_x = \Delta d / d$, где d — межплоскостное расстояние между отражающими плоскостями.

Из теории муаровых картин известно, что $|\Delta d / d| = d / \Lambda$, где Λ — период муаровых полос. Подставляя в (7) $z = c$, получаем:

$$\varepsilon = |\Delta d / d| = d / \Lambda = \beta D / c. \quad (10)$$

Имея в виду выражения (9) и (10), для результирующего напряжения получаем:

$$F = \frac{E}{1-\nu} c |\varepsilon|. \quad (11)$$

Из (10) следует, что наблюдаемая деформация должна быть обратно пропорциональна толщине кристалла-анализатора.

Исходя из полученных с помощью топограмм микрофотометрических кривых, в зависимости от дозы облучения вычислены относи-

тельные деформации и интегральные напряжения при имплантации в кремний ионов аргона с энергией 200 кэВ. Результаты приведены в следующей таблице:

Доза облучения (ион/см ²)	$\varepsilon = \Delta d / d $	F (Н/м)
10^{13}	$1,62 \cdot 10^{-7}$	18,5
10^{14}	$1,79 \cdot 10^{-7}$	20,5
10^{15}	$1,94 \cdot 10^{-7}$	22,2

Как видно из данных, приведенных в таблице, зависимость интегрального напряжения от дозы линейно изменяется вплоть до 10^{15} ион/см² в отличие от результатов работы [7], где интегральное напряжение достигает максимума при значениях дозы 10^{14} ион/см² и далее уменьшается. Такое уменьшение объясняется тем, что аморфизация слоя, подвергнутого имплантации, приводит к изменению коэффициента расширения решетки, который перестает быть константой, начиная со значения локального напряжения $\sigma = 1,1 \cdot 10^8$ Н/м². В нашем случае глубина проникновения ионов аргона с энергией 200 кэВ в кремний $\langle \Delta z \rangle = 0,26$ мкм. Максимальное локальное напряжение при дозе 10^{15} ион/см² можно оценить, разделив соответствующее значение F на $\langle \Delta z \rangle$, что дает значение $8,5 \cdot 10^7$ Н/м². Таким образом, в нашем случае при дозе 10^{15} ион/см² максимальное локальное напряжение не превышает того предела, за которым β перестает быть константой.

Так как при имплантации возникает относительная деформация вдоль оси Z , то это приводит к изменению толщины соответствующего кристалла. Интегрируя пик этой деформации (первый член в уравнении (8)) по глубине проникновения и исключая дозу с помощью уравнения (9), получим выражение для набухания поверхности:

$$w = (1 - \nu + 2\nu_z)F/E_z. \quad (12)$$

Подставляя значение линейной силы $F = 22,2$ Н/м² в выражение (12), получаем $w = 0,12$ нм.

Таким образом, можно утверждать, что рентгеновская интерферометрия может быть использована для изучения поперечных напряжений, вызванных ионной бомбардировкой кристаллов кремния. Наблюдаемые на топограмме дилатационные муаровые картины определяют поперечными напряжениями, возникающими на имплантируемой поверхности.

Если энергия ионов лежит в диапазоне до одного кэВ, то кристалл следует рассматривать как идеальный, покрытый тонким поверхностным слоем. Интегральное напряжение в поврежденном слое линейно возрастает при изменении дозы имплантированных ионов аргона.

на (с энергией 200 кэВ) от дозы 10^{13} ион/см² вплоть до 10^{15} ион/см². Максимальное локальное напряжение составляет примерно $8,5 \cdot 10^7$ Н/м². При симметричных Лауэ-отражениях интерферометрическая картина, казалось бы, не должна зависеть от того, падает ли первичная волна на первый блок или на третий блок интерферометра, так как в обоих случаях облучаются одни и те же места интерферометра. Однако, при наличии дефектов в блоках интерферометра происходит смещение дифрагированных пучков, зависящее от направления падения первичной волны, и поэтому в таких случаях интерференционная картина зависит от направления падения, как это показано экспериментально на рис.4а-4в.

ЛИТЕРАТУРА

1. U.Bonse, M.Hart. Appl. Phys. Letters, 6, 155 (1965).
2. U. Bonse, M.Hart. Z. Physik, 190, 455 (1965).
3. A.O.Aboyan, M.A.Sarafyan. Cryst. Res. Technol., 29, 253 (1994).
4. А.О.Абоян. Тезисы докладов второй национальной конференции по применению рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов для исследования материалов (РЧЭ-99), Москва, ИК РАН, 1999, с.172.
5. U.Bonse, M.Hart, G.H.Schwuttk. Phys. Stat. Sol. (a), 33, 361 (1969).
6. L.Gerward, G.Christiansen, A.Andersen-Lindegaard. Phys. Letters, 39A, 63 (1972).
7. L.Gerward. Z. Physik, 259, 313 (1973).
8. A.O.Aboyan, A.A.Khazardzhyan, P.A.Bezirganyan, S.E.Bezirganyan. Phys. Stat. Sol. (a), 118, 11 (1990).
9. S.Prussin. J. Appl. Phys., 32, 1876 (1961).
10. J.J.Wortman, R.A.Evans. J. Appl. Phys., 36, 153 (1965).
11. S.Timoshenko, J.N.Goodier. Theory of Elasticity. Sec. ed., London and New York, McGraw-Hill, 1951.

ԻՌՆՆԵՐՈՎ ԻՄՊԼԱՆՏԱՑՄԱՆ ԵՆԹԱՐԿՎԱԾ ՌԵՆՏԳԵՆՅԱՆ
ԻՆՏԵՐՖԵՐՈՄԵՏԱՓԻ ՎԵՐԼՈՒԾԻՉ-ԲՅՈՒՐԵՂՈՒՄ ԱՌԱՋԱՑԱԾ
ԴԵՖՈՐՄԱՑԻՈՆ ԴԱՇՏԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ա.Հ. ԱՐՈՅԱՆ

Հետազոտվել են սիլիցիումի բյուրեղում 200 կէՎ էներգիայով արգոնի իոնների լեզիրումով առաջացած լայնական դեֆորմացիաները ռենտգենյան ինտերֆերաչափության եղանակով: Ելմելով ստացված ռենտգենյան տեղադրերից՝ որոշվել են հարաբերական դեֆորմացիաները և իմտեգրալ լարումները՝ կախված ճառագայթման դոզայից: Գնահատվել է մակ տեղային առավելագույն լարումը, որը կազմում է $8,5 \cdot 10^7$ Ն/մ²:

INVESTIGATION OF DEFORMATION FIELDS IN ANALYZING CRYSTAL OF X-RAY INTERFEROMETER UNDER THE ION IMPLANTATION

A.O. ABOYAN

Lateral deformations created by 200 keV argon ions implanted in silicon crystals are investigated by means of X-ray interferometry. Using the interferometric topograms the relative strains and integral stresses are determined as a function of radiation dose. The maximum local stress is evaluated as being equal to $8,5 \cdot 10^7$ N/m².