

Г.Р. ДРМЕЯН

РЕНТГЕНОИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ КРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ

Приводятся экспериментальные и теоретические результаты исследования методом рентгенодифракционного муара полей деформаций, возникающих в блок-кристалле рентгеновского интерферометра, подвергнутого ионной имплантации, в зависимости от дозы облучения. Исследовано перераспределение напряжений, возникающих в этом блоке интерферометра при его бомбардировке.

Ключевые слова: наноструктура, муар, имплантация, поля деформаций.

Введение. Проблема дефектообразования и влияния дефектов на физико-химические свойства материалов является одной из центральных проблем физики твердого тела на протяжении многих лет. Особенно актуальны эти вопросы для физики полупроводников, т.к. структурные дефекты, наряду с примесями, в сильной степени влияют на электрические, фотоэлектрические и другие свойства полупроводниковых кристаллов.

Создание обобщенной теории дифракции рентгеновских лучей на неидеальных кристаллах открыло возможность детального теоретического и экспериментального исследования явлений динамического рассеяния рентгеновского излучения на упругодеформированных монокристаллах. Одним из наиболее чувствительных методов исследования микроструктуры вещества являются рентгеноинтерферометрические, позволяющие фиксировать малейшие искажения кристаллических решеток исследуемых образцов. Трудности, возникающие при расшифровке интерференционных картин, связаны в основном с отсутствием развитой теории рассеяния рентгеновских лучей в интерферометрических системах со структурно нарушенными кристаллами.

Известно [1-3], что при бомбардировке монокристаллов ионами аргона, неона, азота и углерода большой энергии (80 кэВ ... 3 мэВ) в них возникают радиационные нарушения, сводящиеся, в частности, к изменениям межплоскостных расстояний. Как замечено авторами указанных работ, для участков кристалла, в которые внедрены ионы, имеет место объемное расширение. В [4] указывается, что подобный эффект, т.е. образование дилатации (изменение межплоскостных расстояний), возникает и при создании на кристаллической пластинке температурного градиента, который также ведет к структурным нарушениям кристалла. В [5] показано, что дилатационный муар обнаруживается в случае, когда одна из работающих частей кремниевого рентгеновского интерферометра бомбардируется ионами аргона. В связи с этим интересно исследовать влияние внешнего воздействия (бомбардировки ионами аргона) на степень возникающих при этом структурных несовершенств с помощью изменения периода дилатационных муаровых картин, получаемых при использовании рентгеновского интерферометра, состоящего из трех кристаллических пластинок.

В работе [3] 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. Исследовано также перераспределение напряжений, возникающих в этом блоке интерферометра при его бомбардировке.

Известно [6], что интерференционные картины, полученные от рентгеновских интерферометров, очень чувствительны к структурным нарушениям (дефектам) монокристаллов. Измеряя периоды интерференционных картин, можно с высокой точностью вычислить относительные деформации (дилатации порядка 10^{-8} и малые повороты-ротации порядка 10^{-3} угл. сек) кристаллических решеток облучаемых участков интерферометра с помощью выражений [7]

$$\Delta d / d = d / \Lambda_{\parallel}, \quad \varphi = d / \Lambda_{\perp},$$

где d - период решетки; φ - угол между дифракционными решетками; $\Lambda_{\parallel}$ и $\Lambda_{\perp}$ - периоды соответственно параллельного (дилатационного) муара и муара вращения (ротационного). Эти выражения используются для изучения поля деформаций, возникающих вокруг ростовой дислокации в кремниевом интерферометре [8].

В работе [9] при теоретических расчетах упругая анизотропия тонкой кремниевой пластинки учтена введением трех компонентов модуля Юнга и трех коэффициентов Пуассона. Сначала получены выражения для поперечных напряжений (σ_x и σ_y), затем – для компонентов деформации:

$$\varepsilon_x = \left| \frac{\Delta d_1}{d} \right| = \frac{d}{\Lambda'_D} = \frac{2\beta D}{t_0} \left[\frac{1}{1-\nu_x} - \frac{\nu_x}{1-\nu_y} \right]; \quad \varepsilon_y = \left| \frac{\Delta d_2}{d} \right| = \frac{d}{\Lambda''_D} = \frac{2\beta D}{t_0} \left[\frac{1}{1-\nu_y} - \frac{\nu_y}{1-\nu_x} \right],$$

где d - межплоскостное расстояние; Λ_D - период полос дилатационного муара; D - доза

облучения $D = \int_{-t_0/2}^{t_0/2} \psi_D dz$; ψ_D - распределение дефектов, вызванных внедрением ионов;

β - температурный коэффициент расширения; ν_x и ν_y - соответствующие коэффициенты Пуассона; t_0 - толщина пластинки (т.е. толщина анализатора).

Предполагается, что имеем состояние плоского (одномерного) напряжения, т.е. $\sigma_z = 0$.

Так как ось X в нашем случае параллельна направлению $[1\bar{1}0]$, ось Y - направлению $[110]$, а ось Z - направлению $[001]$ (см. рис. 1), то согласно работе [10]:

$$E_x = 1,689 \cdot 10^{11} \frac{H}{M^2}, \quad \nu_x = 0,262, \quad E_y = 1,689 \cdot 10^{11} \frac{H}{M^2},$$

$$\nu_y = 0,0624, \quad E_z = 1,31 \cdot 10^{11} \frac{H}{M^2}, \quad \nu_z = 0,279.$$

Как видно из приведенных числовых значений, $E_x = E_y$. Это объясняется специальной конструкцией интерферометра: он изготовлен так, что поверхности его блоков параллельны двум эквивалентным взаимно перпендикулярным кристаллографическим направлениям $[1\bar{1}0]$ и $[110]$, вдоль которых модули Юнга равны друг другу, коэффициенты Пуассона разные [10].

Далее по предлагаемой нами методике [9] определены величины линейных сил, действующих на единицу длины границы имплантированного слоя в направлении, нормальном к этой границе, а также оценены максимальные локальные напряжения и вычислены величины набухания поверхности кристалла.

Результаты наших исследований стали основой для решения обратной задачи, а именно - восстановление полей механических напряжений в кристаллических блоках интерферометра с помощью расшифровки муаровых картин. Фактически рентгеновская муаровая картина является совокупностью изофазовых линий и обусловлена установившимися структурными нарушениями в блоках интерферометра. Однако если в одном из блоков интерферометра внести дефект определенного типа (например, дислокацию), то поле механических напряжений, возникающее вокруг данного дефекта, приведет к перераспределению фаз между наложенными волнами на входной поверхности анализатора, а изменение муаровой картины будет заключать в себе информацию о механических напряжениях. Следовательно, метод рентгеноинтерферометрического муара дает возможность прямого экспериментального изучения полей механических напряжений, созданных структурными дефектами кристаллической решетки.

Экспериментальная часть. Из высокосовершенного монокристалла кремния был изготовлен трехкристальный интерферометр, толщина каждого кристалла которого 1 мм (рис. 1). Топограммы были получены в камере КРС излучением $MoK\alpha$ от плоскостей (110). Сначала получена исходная интерферометрическая топограмма, т.е. до имплантации (рис. 2).

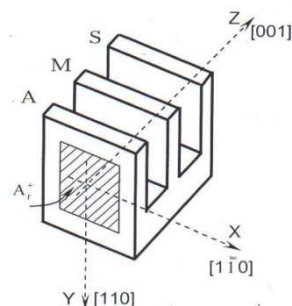


Рис. 1. Трехкристальный рентгеновский интерферометр. Область, подвергнутая ионной бомбардировке, заштрихована



Рис. 2. Исходная топограмма до имплантации

После получения исходной топограммы поверхность анализатора интерферометра подверглась имплантации ионами аргона с энергией 180 кэВ. Суммарная доза менялась в пределах $10^{14} \dots 10^{16}$ ион/см². После каждого акта облучения проводились съемки, в результате чего были получены топограммы, соответствующие различным дозам облучения (рис 3а-в).

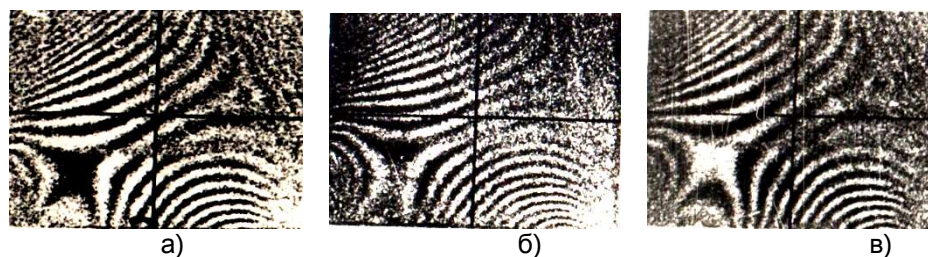


Рис. 3. Топограммы после ионной имплантации для отражения $(2\bar{2}0)$. Доза облучения: а - 10^{14} ион/см²; б - 10^{15} ион/см²; в - 10^{16} ион/см²

Обсуждение результатов. Как видно из топограмм, приведенных на рис. 3а-в, облучение ионами приводит к изменению муаровых полос. С увеличением дозы облучения период муаровых полос сначала уменьшается (деформация увеличивается), а затем увеличивается. Видно, что при имплантации возникают дислокации.

Исходя из интерферометрических топограмм, определены относительные деформации и интегральные напряжения в зависимости от дозы облучения, а также оценены максимальные локальные напряжения и глубина проникновения ионов. В результате расчетов для глубины проникновения ионов аргона с энергией 180 кэВ в кремний получено $\langle \Delta z \rangle = 0,18$ мкм, а максимальное локальное напряжение составляет примерно $10,21 \cdot 10^7$ Н/м².

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

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 определяются поперечными напряжениями, возникающими на имплантируемой поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bonse U., Hart M., Schuttke G.H. // Phys. Stat. Sol.-1969. -33. - P.361.
2. Schuttke G.H., Brack K.// Z. Naturforsch.- 1973.- 28f.- P.654.
3. Gerward L. // Z. Physik.- 1973.- 259.- P. 313.
4. Дрмеян Г.Р. // Кристаллография.-2005.- Т. 50, №3. - С. 407-410.
5. Gerward L., Christiansen G., Lindegaard Andersen A. // Phys. Lett.- 1972. - 39a, 63.
6. Эйрамджян Ф.О., Безирганян П.А. // Изв. АН АрмССР. Физика. – 1970. – 5. - С.453.
7. Lang A.R. // Nature. – 1968.- 220, 652.
8. Christiansen G., Gerward L., Lindegaard Andersen A. // J. Appl. Cryst.- 1971.- 4, 370.
9. Drmeyan H.R. // Applied Crystallography.- 2004.- 37.- P.585-588.
10. Wortman J.J., Evans R.A. // J. Appl. Phys.-1965.- 36.- P.153-158.

Гюмрийский государственный педагогический институт. Материал поступил в редакцию 17.11.2008.

Հ.Ռ.ԴՐՄԵՅԱՆ

ՄԻԼԻՑԻՈՒՄԻ ԲՅՈՒՐԵՂՆԵՐԻ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒԹԱՅԻՆ ՇԵՐՏԵՐԻ ՌԵՆՏԳԵՆԱԻՆՏԵՐՖԵՐԱԶԱՓԱԿԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ

Բերված են Ռենտգենյան մուարի եղանակով ռենտգենյան ինտերֆերաչափի բլոկ-բյուրեղում իոնների լեզիրումով առաջացած դեֆորմացիաների դաշտերի հետազոտության տեսական և փորձարարական արդյունքները՝ ճառագայթման դոզայից կախված: Ուսումնասիրված է նաև ինտերֆերաչափի այդ բլոկում ուժակոծման հետևանքով առաջացած լարումների վերաբաշխումը:

Առանցքային բառեր. նանոկառուցվածք, մուար, իմպլանտացիա, դեֆորմացիաների դաշտ:

H.R. DRMEYAN

THE X-RAY INTERFEROMETRICAL INVESTIGATION OF SURFACE LAYERS OF SILICON CRYSTALS

The experimental and theoretical results of the investigation are given by the method of X-Ray diffraction of Moiré deformation fields, arising in the block-crystal of X-Ray interferometers, exposed to ion implantation depending on irradiation dose. The redistribution of stresses appearing in this block of interferometer during its bombardment is also investigated.

Keywords: nanostructure, Moiré, implantation, deformation fields.