

А.О. АБОЯН

РЕНТГЕНОИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В МОНОКРИСТАЛЛАХ КРЕМНИЯ

Теоретически обоснован и экспериментально реализован рентгеноинтерферометрический метод определения плотности радиационных точечных дефектов в зависимости от дозы и глубины проникновения электронного облучения с использованием трехкристального интерферометра, изготовленного из совершенного монокристалла кремния с отражающими плоскостями (110). По муаровым картинам определены относительные деформации и вычислена плотность радиационных дефектов в зависимости от дозы облучения быстрыми электронами энергией 8 МэВ.

Ключевые слова: интерферометр, монокристалл кремния, плотность радиационных дефектов, доза облучения, муаровые картины.

Введение. Радиационные повреждения в совершенных кристаллах, вызванные электронным облучением, хорошо изучены [1,2]. Однако надо отметить, что такие исследования в области динамического рассеяния рентгеновских лучей в облученных кристаллах проведены недостаточно детально. Поэтому разработка чувствительных методов экспериментального исследования локальных плотностей точечных дефектов, возникающих под действием радиации в кристаллах вообще и в полупроводниковых кристаллах в частности, весьма актуальна.

Известен электрический способ исследования плотностей радиационных дефектов в кристаллах [3]. В данной работе на основе измерений распределения сопротивления приближенно определены распределения по глубине радиационных дефектов, образованных в кремнии n типа облучением электронным пучком с энергиями 2...3 МэВ. Известны также рентгенодифракционные и рентгеноинтерферометрические способы исследования кристаллов [4 -7].

В работе [8] методом рентгеновской интерферометрии исследованы поперечные деформации, создаваемые имплантированными в кремний ионами аргона с энергией 180 кэВ. Определены относительные деформации и интегральные напряжения в зависимости от дозы облучения. В [9] рентгеноинтерферометрическим методом в неполярных кристаллах, в частности в полупроводниковых кристаллах кремния, обнаружены структурные искажения, вызванные действием постоянного электрического поля. Показано, что электрическое поле вызывает изменения периодов муаровых картин, полученных от двукратного трехкристального интерферометра.

Рентгенодифракционные (неинтерферометрические) методы, за исключением метода качания кристалла, не применимы для исследования локальных плотностей точечных дефектов. Метод качания кристалла [10] из-за малых чувствительности и разрешения также не применим для исследования локальных плотностей точечных дефектов при малых дозах облучения.

1.Экспериментальная часть. Применение интерферометрических методов для исследования локальных плотностей радиационных дефектов связано с большими трудностями. Действительно, для получения ощутимых интерферометрических эффектов при малых дозах облучения необходимо это облучение направить перпендикулярно отражающим плоскостям интерферометра, так как чувствительность интерферометра наибольшая относительно смещений атомов, происходящих в направлении нормали отражающих плоскостей, а такие смещения атомов кристаллической решетки больше всего вызываются потоками облучения, перпендикулярными отражающим плоскостям. Для исследования зависимости локальных плотностей радиационных дефектов от дозы облучения и глубины его проникновения размер облучаемого кристалла в направлении облучения должен быть достаточно большим. Следовательно, если отражающими плоскостями интерферометра, показанного на рис.1, являются плоскости $ABCD$, то подходящим направлением облучения, удовлетворяющим перечисленным выше требованиям, будет направление 4 (см. рис. 1).

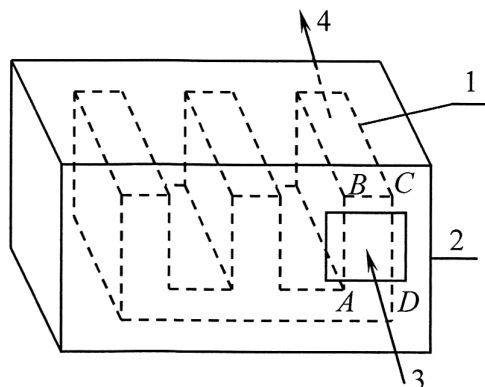


Рис.1. Схема облучения интерферометра: 1 – интерферометр, 2 – свинцовый каркас, 3 – направление потока электронов, 4 – направление нормали отражающих плоскостей (110)

При малых дозах облучения полупроводниковых кристаллов возникающие структурные нарушения настолько малы, что обыкновенные методы исследований оказываются неэффективными. Поэтому, с целью изучения вышеупомянутых структурных нарушений, нами был применен метод рентгенодифракционного муара, который очень чувствителен к нарушениям периодической

структуры и имеет большое разрешение. Из совершенного монокристалла кремния нами был изготовлен трехкристальный интерферометр с отражающими плоскостями (110), которые были перпендикулярны рабочим поверхностям и основанию интерферометра.

После получения исходной топограммы третий кристалл - анализатор интерферометра - облучался быстрыми электронами 8 МэВ. Суммарная доза менялась от $2(10^{15})$ до $10(10^{15} \text{ эл/см}^2)$. Во всех случаях облучение проводилось в направлении, перпендикулярном отражающим плоскостям третьего кристалла интерферометра. Во избежание облучения остальных блоков был приготовлен специальный свинцовый каркас, который полностью закрывал остальные блоки (рис. 1).

После каждого акта облучения электронами проводились съемки, в результате чего были получены муаровые картины, соответствующие различным дозам облучения.

На рис. 2 показана исходная муаровая картина, полученная от интерферометра, который в дальнейшем подвергался облучению электронами.

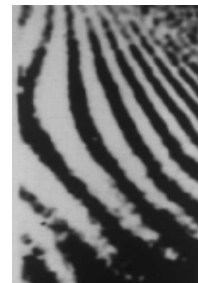


Рис. 2. Исходная муаровая картина

На рис. 3а - д показаны муаровые картины, полученные от того же интерферометра после облучения электронами с энергией 8 МэВ при различных дозах. Как видно из этого рисунка, облучение электронами приводит к изменению муаровых картин. С увеличением дозы облучения периоды полос уменьшаются (рис. 3а - д), следовательно, деформация увеличивается.

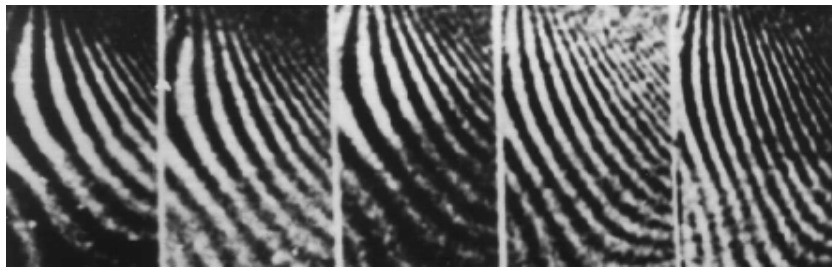
Следует отметить, что во всех вышеуказанных и известных рентгеноинтерферометрических (рентгенодифракционных) исследованиях несовершенств кристаллов не разработаны методы определения плотности точечных дефектов. Нашей целью является теоретическое обоснование и экспериментальная реализация рентгеноинтерферометрического метода определения плотности радиационных точечных дефектов в зависимости от дозы и глубины проникновения облучения.

Известно [11], что изменение объема кристалла в результате деформации можно выразить следующим образом:

$$\Delta V = \frac{1}{3K} \int \vec{r} \vec{F} dV, \quad (1)$$

где K - коэффициент всестороннего сжатия кристалла; $\vec{F}$ - вектор плотности объемных сил, действующих на кристалл.

Поскольку излучение приводит к появлению дефектов Френкеля (точечных дефектов), то, зная $\vec{F}$, обусловленную этими дефектами, можно вычислить изменение объема, а следовательно, и изменение параметра решетки.



а б в г д

Рис. 3. Муаровые картины, полученные от интерферометра после облучения электронами с энергией 8 МэВ суммарными дозами (эл/см²): а - 2(10¹⁵, б - 4(10¹⁵, в - 6(10¹⁵, г - 8(10¹⁵, д - 10(10¹⁵

Используя заранее полученные из эксперимента значения относительной деформации, как будет видно далее, можно вычислить плотность радиационных дефектов.

В теории упругости межузельный атом (вакансия) создает упругие поля, которые описываются плотностью сил [11]:

$$\vec{F}(\vec{r}) = -K\Omega_0 \text{grad}\delta(\vec{r}). \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получим

$$\Delta V = -\frac{1}{3}\Omega_0 \int \vec{r} \text{grad}\delta(\vec{r})dV = \frac{1}{3}\Omega_0 \int \text{div} \vec{r} \delta(\vec{r})dV = \Omega_0. \quad (3)$$

Следовательно, величина Ω_0 равна увеличению объема кристалла, вызванному наличием в нем одного межузельного атома. Можно показать [2], что N точечных дефектов, создающих деформации в соответствии с (2), вызывают объемное расширение ΔV , определяемое выражением

$$\Delta V = 12\pi \frac{1-\nu}{1+\nu} \cdot NC, \quad (4)$$

где C - постоянная, имеющая размерность объема и равная по порядку атомному объему, характеризует “силу” дефекта; ν - коэффициент Пуассона.

Относительное же изменение параметра решетки можно выразить в виде

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{1}{3} \frac{\Delta V}{V} = 4\pi \frac{1-\nu}{1+\nu} \cdot \frac{N}{V} C. \quad (5)$$

Таким образом, используя (5) и вычисля относительную деформацию $\Delta d/d$, по муаровым картинам можно оценить локальную плотность $\left(\frac{N}{V} = N_D\right)$ радиационных дефектов.

2. Обсуждение результатов и выводы. Из полученных топограмм (рис. 3а-д) микрофотометрическим методом были найдены распределения интенсивностей муаровых полос в определенном направлении и измерены расстояния между максимумами. Во всех случаях измерения проводились только между определенными максимумами, и, таким образом, были рассчитаны значения относительной деформации $\Delta d/d$, соответствующие различным дозам облучения.

Решая уравнение (5) относительно $\frac{N}{V} = N_D$, получим

$$N_D = \frac{(1 + \nu)\Delta d/d}{4\pi(1 - \nu)C}. \quad (6)$$

Подставляя в (6) определенные из эксперимента значения $\Delta d/d$, соответствующие различным дозам, и учитывая, что $C \approx 10^{-24} \text{ см}^3$ и $\nu = 0,262$, находим зависимость плотности радиационных дефектов N_D от дозы облучения. Результаты приведены в таблице.

Таблица

Доза облучения, эл/см^2	$\Delta d/d$	$N_D, \text{см}^{-3}$
$2 \cdot 10^{15}$	$1,62 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{16}$
$4 \cdot 10^{15}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$3,4 \cdot 10^{16}$
$6 \cdot 10^{15}$	$3,2 \cdot 10^{-7}$	$4,4 \cdot 10^{16}$
$8 \cdot 10^{15}$	$4,3 \cdot 10^{-7}$	$5,9 \cdot 10^{16}$
$10 \cdot 10^{15}$	$5,7 \cdot 10^{-7}$	$7,8 \cdot 10^{16}$

Как видно из таблицы, с увеличением дозы облучения локальная плотность радиационных дефектов возрастает.

Исследована также зависимость плотности дефектов от глубины проникновения электронов в кристалл с энергией 8 МэВ. Показано, что плотность дефектов по мере углубления электронов в кристалл - анализатор интерферометра уменьшается.

Исходя из вышеизложенного, приходим к следующим выводам:

1. Методом рентгенодифракционного муара обнаружены структурные искажения, возникающие в результате облучения кристалла - анализатора интерферометра электронами энергией 8 МэВ.
2. Определяя из полученных топограмм относительную деформацию, можно оценить как локальную плотность точечных дефектов, так и ее изменение в зависимости от глубины проникновения электронов при различных дозах облучения.

3. Разработанный метод может быть использован, в частности, для определения плотности радиационных (точечных) дефектов в кристаллах, применяемых в науке и в производстве полупроводниковых приборов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вавилов В.С., Ухин Н.А.** Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах. - М.: Атомиздат, 1969. - 88с.
2. **Динс Дж., Винйард Дж.** Радиационные эффекты в твердых телах. - М.: Изд. Иностранной литературы, 1960.-126с.
3. **Yasuda K., Wada T., Masuda H., Takeda M., Ikata S.** //Phys. Stat. Sol(a).- 1985. - V. 88.-P. 543 - 551.
4. Прямые методы исследования дефектов в кристаллах / Под ред. **А.М. Елистратова,** - М.: Мир, 1965. - 221с.
5. **Bonse U., Graeff W.** //J.Appl. Phys.-1977. - V. 22.- P. 93 - 143.
6. **Aboyan A.O., Bezirganyan P.A., Khzardzhyan A.A.** // Phys. Stat. Sol.(a).- 1990.-V.118.- P. 21-27.
7. **Aboyan A.O., Sarafyan M.A.** //Cryst. Res.Technol.-1994. - V. 29, No2.- P. 253-257.
8. **Drmevan H. R.** // J. Appl. Crust.- 2004. - V. 37.- P. 585 - 588.
9. **Aboyan A.O., Aghbalyan S. G.** // Cryst. Res. Technol. - 2010. - V. 45, No1.- P. 140 -144.
10. **Ровинский Б.М., Лютцау В.Г., Ханонкин А.А.** //Аппаратура и методы рентгеновского анализа (Машиностроение). - 1971. - Вып. 9. - С. 3 – 35.
11. **Косевич А.М.** Основы механики кристаллической решетки. - М.: Наука, 1972. - 202с.

ГИУА (П). Материал поступил в редакцию 25.01.2010.

Ա. Հ. ԱՐՈՅԱՆ

ՄԻԼԻՑԻՈՒՄԻ ՄԻԱԲՅՈՒՐԵՂՆԵՐՈՒՄ ՈԱԴԻԱՅԻՈՆ ԱՐԱՏՆԵՐԻ ԽՏՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՇՄԱՆ ՌԵՆՏԳԵՆԱԻՆՏԵՐՖԵՐԱԶԱՓԱԿԱՆ ՄԵԹՈԴ

Տեսականորեն հիմնավորվել և փորձնականորեն իրականացվել է ռադիացիոն կետային արատների որոշման ռենտգենահինտերֆերաչափական մեթոդ՝ կախված էլեկտրոնային ճառագայթման բաժնեչափից և թափանցման խորությունից՝ օգտագործելով սիլիցիումի կատարյալ միաբյուրեղից պատրաստված (110) անդրադարձնող հարթություններով եռաբյուրեղ ինտերֆերաչափ: Ըստ մուարի պատկերների՝ որոշվել են հարաբերական դեֆորմացիաները, որոնց կիրառումով որոշվել է ռադիացիոն արատների խտությունը՝ կախված 8 ՄէՎ էներգիայով արագ էլեկտրոններով ճառագայթման բաժնեչափից:

Առանցքային բառեր. ինտերֆերաչափ, սիլիցիումի միաբյուրեղ, ռադիացիոն արատների խտություն, ճառագայթման բաժնեչափ, մուարի պատկերներ:

A.H. ABOYAN

X-RAY INTERFEROMETRIC METHOD OF DEFINING RADIATION DEFECT DENSITY IN SILICON MONOCRYSTALS

The X-ray interferometric method of defining radiation pointed defects depending on the dose and depth of penetrating electron radiation using a three-crystal interferometer made of perfect silicon monocrystal with reflecting planes is theoretically substantiated and experimentally realized (110). Relative deformations are defined and the density of radiation defects depending on radiation dose by fast electrons with energy 8 MeV is calculated according to Moiré patterns.

Keywords: interferometer, silicon monocrystal, density of radiation defects, radiation dose, Moiré patterns.