ISSN 0002-306Х. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2003. Т. LVI, № 2.

УДК 537.531

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

А.О. АБОЯН

РЕНТГЕНОВСКАЯ ТОПОГРАФИЯ ШАГОВОГО СКАНИРОВАНИЯ

Предложен метод шагового сканирования, свободный от всех недостатков, присущих известным методам проекционного топографирования. Данный метод регистрирует рентгенодифракционное изображение с большим разрешением и без искажений.

Ключевые слова: кристалл кремния, интерферометр, муар, топограмма, несовершенство кристаллов, сканирование, кинематическое и динамическое рассеяние.

1. Введение

Как известно, рентгенодифракционное изучение несовершенств кристаллов, применяемых в науке, технике и производстве полупроводниковых приборов, является одной из актуальнейших задач физики твердого тела. Оно особенно важно в области материаловедения при создании материалов с заранее заданными свойствами.

Эффективность этих исследований в основном обусловлена правильностью и однозначностью интерпретации (расшифровки) регистрирован-ных дифракционных изображений несовершенств кристаллов – правильным описанием реального состояния решетки кристалла.

Несомненно, для правильной и однозначной расшифровки рентгенодифракционных изображений, зарегистрированных для прямого наблюдения несовершенств в кристаллах, необходимо:

1. Точно установить, при каких первичных пучках (плоские, цилиндрические и сферические волны, узкие, широкие и δ – образные пучки), каких кристаллах (тонкий, толстый, плоскопараллельная пластинка, трапециевидный образец) и каких кристаллических системах (интерферометры и неинтерферометрические кристаллические системы) какие создаются дефекты (несовершенства) и изображения.

2. Выбрать (разработать) рентгенодифракционную методику исследования несовершенств, дающую возможно большое разрешение при данном образце.

3. При регистрации не искажать информации, содержащейся в волнах, дифрагированной в исследуемых кристаллах.

Основная задача рентгеноинтерферометрических методов исследования несовершенств кристаллов сводится к получению интерферометрических дифракционных изображений несовершенств кристаллов с большим разрешением и их однозначной интерпретации. Из-за большой чувствительности интерферометрических дифракционных картин [1,2] к любым незначительным деформациям кристаллической решетки эти картины сильно осложняются, и поэтому их однозначные интерпретации порой чрезмерно затрудняются, что приводит к потере интереса к таким исследованиям.

Следовательно, для повышения эффективности интерферометрических исследований несовершенств кристаллов необходимо разработать новые методы, облегчающие расшифровку дифракционных картин.

Цель настоящей работы - разработка метода получения рентгеновских проекционных топограмм несовершенств кристаллов кремния с большим разрешением и их регистрация без искажения.

2. Метод получения рентгеновских проекционных топограмм с большим разрешением

Известен метод проекционной топографии [3], заключающийся в том, что лентообразный пучок рентгеновского монохроматического излучения направляют под углом Брэгга на отражающие плоскости кристалла для получения полного дифракционного изображения исследуемой части кристалла. Пленка и образец параллельно и синхронно сканируются относительно падающего пучка с сохранением величины угла Брэгга (рис. 4а).

Однако этот метод, нашедший широкое применение в исследованиях несовершенств кристалла, при всех своих преимуществах тем не менее обладает существенным недостатком: в случае, когда линии – изображения дислокации или интерференционной полосы, полученные от интерферометров, перпендикулярны направлению сканирования и имеют большую плотность, картины этих изображений (полос) при сканировании на проекционной топограмме исчезают. Действительно, при сканировании образец и пленка совместно смещаются относительно первичного пучка, а на пленке линии дифракционного изображения смещаются в направлении сканирования, и при их больших плотностях они могут налагаться друг на друга, в результате чего структура дифракционной картины исчезает.

В этом можно убедиться и с помощью экспериментов. Рассмотрим следующие частные случаи.



1. Допустим, что интерференционные полосы – параллельные линии, направленные вдоль сканирования. Тогда, независимо от их плотности на проекционной топограмме, они сохраняются (рис. 1). Как на секционной (рис. 1а), так и на проекционной (рис. 1б) топограмме горизонтальные полосы хорошо видны.



Рис. 3. Муаровые картины с вертикальными полосами с малыми периодами: а – секционная топограмма; б – проекционная топограмма; в – шаговая топограмма

2. Рассмотрим случай, когда полосы дифракционного изображения перпендикулярны направлению сканирования. При этом необходимо различать большие и малые периоды полос.

При большом расстоянии между полосами (малая плотность) как на секционных, так и на проекционных топограммах сохраняются интерференционные полосы (рис. 2a, б), а при малых расстояниях (большая плотность) муаровые полосы, полученные на секционных топограммах (рис. 3a), исчезают на проекционных (сканирование) топограммах (рис. 3б).

3. В случае, когда полосы расположены под углом
$$0 < \beta < \frac{\pi}{2}$$
, где β –

угол между полосами и направлением сканирования, контраст полос на проекционных топограммах уменьшается в зависимости от их угла и периода.

Следовательно, можно однозначно считать доказанным, что на обычных проекционных топограммах получаются изображения не всех дислокаций и не всех интерференционных полос.

Задачей исследования является предложение способа получения рентгеновских проекционных топограмм с большим разрешением (метод проектирования), при котором на проекционной топограмме запечатлеваются все полосы дифрагированного пучка независимо от их плотности и направления.

Указанная цель достигается с помощью шагового синхронно-поступательного движения образца и рентгеновской пленки относительно первичного падающего пучка.

В [4, 5] также обсужден вопрос проекционной топографии и предложены новые методы сканирования. В работе [4] указывается, что в методе Ланга образец и пластинка перемещаются всегда параллельно поверхности образца, а пластинка всегда перпендикулярна дифрагированному пучку (рис. 4а), поэтому искажения на

фотографиях или различное увеличение между горизонтальным и вертикальным направлениями в большинстве случаев неизбежны. Во избежание этих недостатков метода Ланга [3] авторы этой работы предлагают сканирование образца и пластинки (пленки) производить в разных направлениях (рис.4б,в).



Брэгга, где К – кристалл, ФП - фотопластинка

Однако этот метод сканирования, устраняя недостатки, обусловленные направлениями сканирования образца и пластинки, оставляет в силе недостатки, связанные с непрерывным сканированием. В работе [5] предлагается шаговое сканирование, причем кристалл и фотопластинка перемещаются с одинаковыми шагами, равными ширине дифрагированного (отраженного) пучка, что, как мы увидим ниже, имеет недостатки.

В излагаемой работе предлагается метод сканирования, свободный от всех недостатков перечисленных методов проекционного топографирования. В данном методе реализованы следующие модификации эксперимента:



Рис. 5. Дифрагирующие области кристалла при данной ширине первичного пучка. *АВВ*₁'*A*₁ - дифрагирующая область пучка **1**; *BCC*₁'*B*₁' - дифрагирующая область пучка **2**; *BB*₁*B*₁' - недифрагирующая зона

1. Сканирование образца и пластинки совершается в разных направлениях – кристалл перемещается параллельно самому себе, а пластинка – перпендикулярно дифрагированному (отраженному) пучку.

2. Сканирование шаговое: ширины шагов кристалла и пластинки разные – ширина шага кристалла равна ширине первичного пучка, а пластинки – ширине дифрагированного (отраженного) пучка (рис. 5).

Казалось бы, при сканировании образца (кристалла) с шагом, равным ширине первичного пучка, области кристалла, подобные $BB_1B'_1$ (рис. 5), проектируются дважды, и, независимо от скорости перемещения пластинки, картины таких областей на ней получаются дважды. Однако нетрудно убедиться, что дифракционно проектируемыми зонами кристалла являются только области, облучаемые первичными пучками, т.е. дифракционно проектируемой зоной для пучка 1 является область ABB'_1A_1 , а для пучка 2 – область $BCC'_1B'_1$ (рис. 5). В этом можно убедиться на основании следующих соображений.

Мы здесь должны различать кинематическое и динамическое рассеяние. Как известно, при кинематическом рассеянии рентгеновских лучей в рассеиваемом объеме не происходит многократных отражений – отраженный в этом объеме один раз пучок больше не отражается и выходит из кристалла (рис. 6а).



Рис. 6. Схема дифракции: а – схема кинематического рассеяния; б – схема динамического рассеяния

Лучи, отраженные (дифрагированные) в объеме $ABB'_{1}A_{1}$, облучаемом первичным пучком (первым пучком на рис. 5), выходят из кристалла через зону $BB_{1}B'_{1}$ без дальнейшей дифракции (отражения). Таким образом, область $BB_{1}B'_{1}$ является как бы недифрагирующей зоной для пучков, дифрагированных в объеме $ABB'_{1}A_{1}$. Следовательно, характер распределения интенсивности пучков, дифрагированных в объеме $ABB'_{1}A_{1}$ вследствие прохождения через указанную недифрагирующую зону, при кинематическом рассеянии не меняется, а может только ослабляться вследствие поглощения. Как видно из рис. 5, часть недифрагирующей зоны первого пучка входит в дифрагирующую зону второго пучка и т.д.

Таким образом, при шаговом сканировании, когда ширина шага перемещения образца равна ширине первичного пучка, а ширина шага пластинки ширине дифрагированного пучка, ни одна часть кристалла дифракционно повторно не проектируется и не исключается из дифракционного проектирования. При динамическом рассеянии рентгеновских лучей в кристалле происходят многократные отражения, и энергия дифрагированных волн течет по направлению отражающих плоскостей (рис.6б). Как видно из этого рисунка, при симметричном отражении ширины первичного падающего и дифрагированного пучков одинаковы, тогда шаги сканирования образца и пластинки также могут быть одинаковыми. При несимметричных динамических отражениях шаги перемещения образца и пластинки могут отличаться в зависимости от степени асимметричности отражения и семейства отражающих плоскостей.

При интерферометрических исследованиях в большинстве случаев реализуется симметрично-динамическое рассеяние, поэтому ширины первичного и дифрагированного пучков равны, и, следовательно, в таких случаях могут быть одинаковыми и шаги перемещения образца (интерферометра) и пластинки.

В преимуществах предложенного метода шагового сканирования можно убедиться на основании результатов наших опытов (рис.7).



Рис. 7. Проекционная и шаговая топограммы смешанной муаровой картины: а – проекционная топограмма; б – шаговая топограмма

На рис. 7а,б показаны проекционная и шаговая топограммы смешанной муаровой картины, полученной от одного и того же трехкристального интерферометра (излучение CuK_{α} , отражение 220). Причем на обычной проекционной топограмме муаровые полосы почти не видны, кроме нижней части топограммы (рис. 7а), между тем как на шаговой топограмме получалась муаровая картина. Это объясняется тем, что муаровые полосы перпендикулярны направлению движения (сканирования) пленки, и их плотность достаточно велика (период мал), о чем было сказано выше. Следует обратить внимание и на рис. 3в. На секционной топограмме (рис. 3а) хорошо видны полосы смещения, полученные от двухкристального интерферометра (излучение MoK_{α}), которые при непрерывном сканировании исчезают (рис. 3б), а при шаговом четко видны (рис. 3в).

Таким образом, предложенный способ обеспечивает получение топограмм с большим разрешением и возможностью наблюдения на них любого несовершенства исследуемого кристалла.

Здесь интересно обсудить вопрос секционных и проекционных топограмм, применяемых при визуализации рентгеновских дифракционных изображений несовершенств (дефектов) в кристаллах. При этом необходимо иметь в виду следующее обстоятельство: основным преимуществом методов визуализации рентгенодифракционных изображений кристаллов (наблюдение их на мониторе телевизора) является быстрота реализации этого процесса, что дает возможность исследовать быстропротекающие процессы структурных изменений. Эффективность таких быстродействующих методов обеспечивается тем, что на экране монитора достаточно долгое для исследования время сохраняется изображение одного и того же достаточно широкого участка кристалла.

При инерционных видиконах это можно осуществить с помощью сканирования – получением проекционных топограмм, что несколько уменьшает возможности исследования быстропротекающих структурных процессов (слишком быстрые процессы, происходящие быстрее инерции видикона, невозможно проследить).

При безынерционных видиконах проекционные топограммы невозможно получить – секционные топограммы на экране монитора моментально исчезают. В таких случаях необходимо увеличить ширину первичного пучка без уменьшения разрешения и произвести шаговое сканирование первичного пучка. Здесь важно отметить, что для получения изображения несовершенств кристаллов на экране монитора удобно сканировать первичный пучок, оставив неподвижными видикон и все остальные приспособления. Наконец, отметим, что в рассматриваемых случаях при инерционном видиконе сканированием первичного пучка на экране получается проекционная топограмма участков кристалла, а при безынерционном видиконе сканированием широкого первичного пучка - секционная топограмма с шириной, достаточной для исследования. В последнем случае для исследования участка кристалла с размерами, равными размерам входного окна видикона, необходимо произвести секционное сканирование первичного пучка.

Как правило, в случае фотографической регистрации для получения проекционной топограммы при неподвижных первичном падающем пучке и ограничивающих щелях синхронно сканируют кристалл и фотопластинку, однако с таким же успехом можно при неподвижных кристалле и фотопластинке синхронно сканировать первичный пучок с экранами.

Таким образом, на основании результатов исследований можно прийти к следующим выводам:

1. Доказано, что обычные методы сканирования не всегда дают истинную картину несовершенств кристаллов, часто видимость дифракционных картин несовершенств кристаллов падает до нуля. Секционные дифракционные картины несовершенств кристаллов при сканировании часто исчезают - в случае, когда направление сканирования перпендикулярно интерференционным линиям, период которых мал, на проекционных топограммах эти линии становятся невидимыми.

2. Предложен метод получения рентгеновских дифракционных изображений несовершенств кристаллов с большим разрешением. Метод основан на принципе шагового сканирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абоян А. О. Исследование полей деформации в кристалле-анализаторе рентгеновского интерферометра, подвергнутого ионной имплантации // Изв. НАН РА Физика. -2000.-Т.4, № 4. – С. 212-219.
- **2.** Абоян А. О. Рентгеноинтерферометрический метод определения плотности радиационных дефектов в монокристаллах // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. –2000. Т.66, № 6. С.22-24.
- Lang A. R. The Projection Topography: a New Method in X-Ray Diffraction Microradiography // Acta Cryst. – 1959. – Vol. 12. – P. 249-250.
- **4**. **Yoshimatsu M., Shibata A., Kohra K.** A modification of the Scanning X-Ray Topographic Cameras (Lang's Method) // Advances in X-Ray Analysis. –1966. –Vol.9 P. 14-22.
- Andersen A. L., Gerward L. X-Ray Step Scanning Topography // Phys. Stat. Sol. (a). –1974. Vol.23. - P. 537-542.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 10.12.2002.

Ա.Հ. ԱԲՈՅԱՆ

ՔԱՅԼԱՅԻՆ ՏԵՍԱԾՐՄԱՆ ՌԵՆՏԳԵՆՅԱՆ ՏԵՂԱԳՐՈՒԹՅՈՒՆ

Առաջարկված է պրոյեկցիոն տեղագրության հայտնի մեթոդներին բնորոշ բոլոր թերություններից զերծ քայլային տեսածրման մեթոդ, որը ռենտգենադիֆրակցիոն պատկերը գրանցում է մեծ լուծաչափությամբ և առանց աղավաղումների։

A.H. ABOYAN

X-RAY STEP SCANNING TOPOGRAPHY

A method of step-by-step scanning, free from all the deficiencies inherent in the known methods of projection topography is proposed. The proposed method allows one to detect high resolution, undistored X-ray diffraction pictures.