

УДК 537.531

СТРУКТУРНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ, ВЫЗВАННЫЕ ДЕЙСТВИЕМ ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

А.О. АБОЯН

Государственный инженерный университет Армении, Ереван

(Поступила в редакцию 10 июня 2011 г.)

Рентгеноинтерферометрическим методом в неполярных кристаллах, в частности, в полупроводниковых кристаллах кремния, обнаружены структурные искажения, вызванные действием постоянного электрического поля. Показано, что поле изменяет частоту (период) и направления муаровых полос, а при разностях потенциалов больше 1.5 кВ муаровые картины исчезают. Муаровая картина, полученная под действием электростатического поля, не зависит от направления (полярности) поля: при обеих полярностях получаются совершенно одинаковые картины.

1. Введение

Исследование структурных нарушений, возникающих в полупроводниковых кристаллах под действием электрического поля, является одной из актуальных задач физики полупроводников и производства полупроводниковых приборов. Действительно, с одной стороны, с точки зрения физики полупроводников, интересно знать, какие структурные изменения происходят в полупроводниковых кристаллах, помещенных в электрическое поле, с другой – для производства полупроводниковых приборов важно изучение зависимости надежности приборов от этих нарушений.

Влияние электрического поля на структуру полярных кристаллов, в частности, пьезоэлектрических и сегнетоэлектрических, хорошо изучено [1-3]. Однако, насколько нам известно, до сих пор в неполярных, в частности, в полупроводниковых кристаллах не обнаружены структурные нарушения, вызванные действием электрического поля. Видимо, это связано с малой чувствительностью и разрешением применяемых методов исследования искажения структур кристаллов.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального исследования влияния постоянного электрического поля на полупроводниковые кристаллы кремния методом рентгенодифракционного муара.

Известно [4,5], что рентгеноинтерферометрические методы чрезвычайно чувствительны к структурным нарушениям и имеют большое разрешение. Поэтому нам удалось с помощью кратных рентгеновских интерферометров на эф-

фактах динамического рассеяния рентгеновских лучей впервые обнаружить структурные искажения, вызванные в кремниевых кристаллах под действием постоянного электрического поля.

2. Экспериментальная часть

Известны рентгеноинтерферометрические способы исследования несовершенств кристаллов [6]. Во всех исследованиях использованы одинарные интерферометры – одно семейство отражающих плоскостей. В таких интерферометрах, как правило, есть только одно семейство сильно отражающих плоскостей, принадлежащих одному и тому же комплексу симметрично эквивалентных плоскостей, удобно ориентированных для отражения, поэтому интерферограммы, полученные от этих интерферометров, не дают полной картины несовершенств исследуемого кристалла. Нами предложен новый рентгеноинтерферометрический способ, более полно описывающий поля деформации кристаллов. Цель достигается с помощью кратных интерферометров [7].

Кратность интерферометра, как будет показано далее, определяется числом семейств отражающих плоскостей, принадлежащих одному и тому же комплексу симметрично эквивалентных плоскостей, удобно расположенных (ориентированных) для получения отражения (см. рис.1а,б).

Как видно из формулы

$$\cos \alpha = (h_1 h_2 + k_1 k_2 + l_1 l_2) / \left((h_1^2 + k_1^2 + l_1^2)^{1/2} (h_2^2 + k_2^2 + l_2^2)^{1/2} \right), \quad (1)$$

в кубической сингонии угол α между симметрично эквивалентными плоскостями (110) и $(1\bar{1}0)$ равен 90° (удобное сочетание для двукратного интерферометра).

Из бездислокационного кристалла кремния изготовлены кратные двух- и трехкристальные рентгеновские интерферометры (рис.1а,б) с лауэ-отражениями и от них получены муаровые картины.

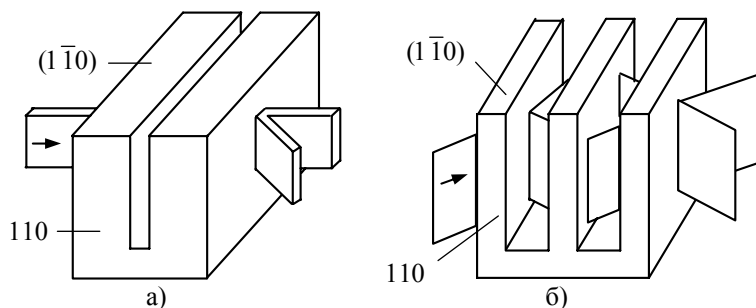


Рис.1. Двукратные интерферометры: а) двухкристальный, б) трехкристальный.

Для проверки достоверности полученных результатов опыты выполнены на двух интерферометрах, отличающихся исходными картинками (рис.2 и 3).

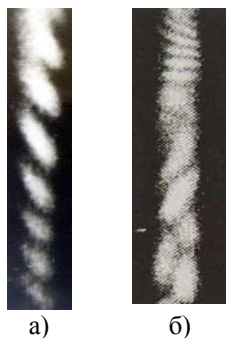


Рис.2. Исходные муаровые картины, полученные от первого интерферометра: а) отражение 220 , б) отражение $2\bar{2}0$ (излучение CuK_α).

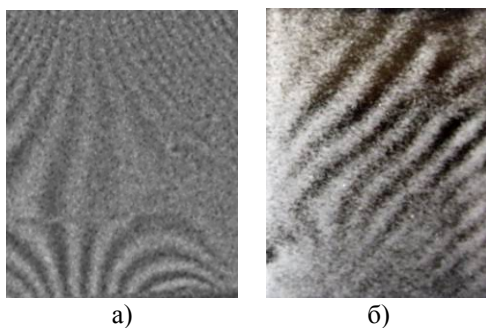


Рис.3. Исходные проекционные топограммы, полученные от второго интерферометра: а) отражение 220 , б) отражение $2\bar{2}0$ (излучение CuK_α).

Нами были использованы вторые порядки отражения от семейства плоскостей (110) и $(1\bar{1}0)$, которые были перпендикулярны входным и выходным поверхностям кристаллов интерферометров (симметричное отражение).

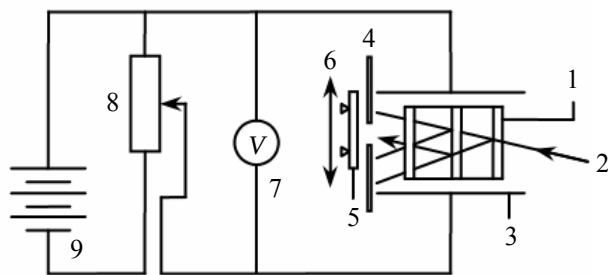


Рис.4. Схема эксперимента: 1 – рентгеновский интерферометр, 2 – направление рентгеновского пучка, 3 – обкладки конденсатора, 4 – диафрагма, 5 – кассета с фотоплёнкой, 6 – направления сканирования, 7 – цифровой вольтметр, 8 – потенциометр, 9 – источник питания.

Затем интерферометры помещались между обкладками конденсатора, отделенными от интерферометра изолятором толщиной 100 мкм. Поле между обкладками конденсатора создавалось с помощью стабилизированного источника БСВ-3 (рис.4).

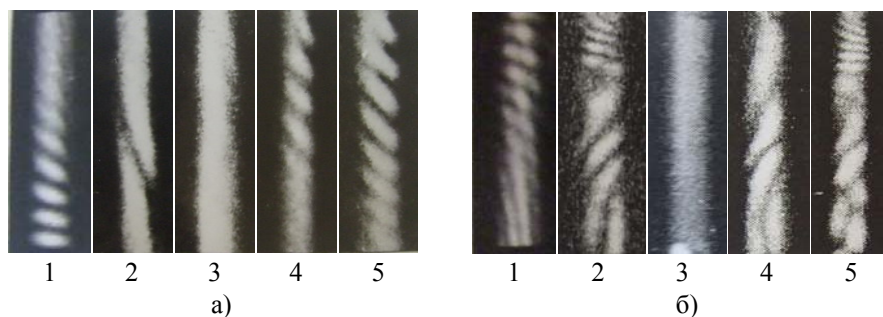


Рис.5. Секционные картины, полученные от первого интерферометра при разности потенциалов между обкладками конденсатора: 1 – 50 В; 2 – 100 В; 3 – 1.5 кВ; 4 – после выключения поля через 16 ч, 5 – после 48 ч; а) отражение 220, б) отражение $2\bar{2}0$ (излучение CuK_α).

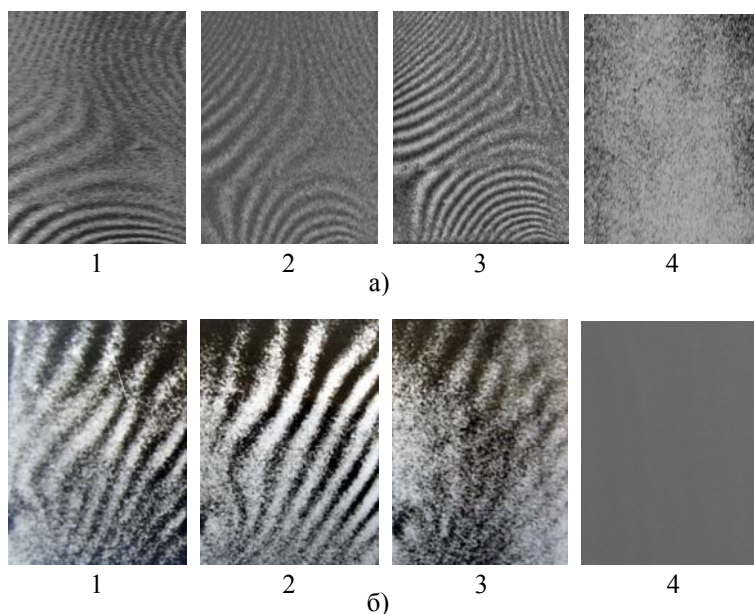


Рис.6. Топографические (проекционные) картины, полученные от второго интерферометра при разности потенциалов между обкладками конденсатора: 1 – 50 В; 2 – 100 В; 3 – 300 В; 4 – 1.5 кВ; а) отражение 220, б) отражение $2\bar{2}0$ (излучение CuK_α).

Получены как секционные муаровые картины, так и от больших участков проекционные топограммы (рис.5, 6) из двух интерферометров в зависимости от величины подаваемого напряжения на обкладках конденсатора, направ-

ления поля (полярности поля), промежутка времени после выключения поля. Величина поля изменялась от 50 В до 1.5 кВ и больше. Результаты исследований показывают, что поле изменяет частоту (период) и направления муаровых полос, а при разностях потенциалов больше 1.5 кВ муаровые картины исчезают (рис.5а-3 и 5б-3). Как видно из этих рисунков, рентгеновские муаровые картины в зависимости от разности потенциалов на обкладках конденсатора меняются.

Как известно, муаровые картины возникают в интерферометрах, отражающие плоскости кристаллов которых отличаются или межплоскостными расстояниями, или их направлениями [4,5]. В работе [8] показано, что при одинаковых межплоскостных расстояниях и направлениях плоскостей муаровые картины могут возникать и в том случае, когда по направлению отличаются входные и выходные поверхности кристаллов интерферометра. Следовательно, под воздействием постоянного электрического поля в кристаллах кремния происходят структурные нарушения: поворачиваются плоскости и изменяются расстояния между ними.

Как видно из рис.1а и 1б, семейства плоскостей (110) и $(1\bar{1}0)$ перпендикулярны друг другу, размеры интерферометров подобраны так, что условия отражения 220 и 440 удовлетворяются. Когда одно из этих семейств приведено в отражающее положение, то для приведения другого семейства в такое положение необходимо интерферометр повернуть на 90° вокруг оси, перпендикулярной поверхности входа интерферометра.

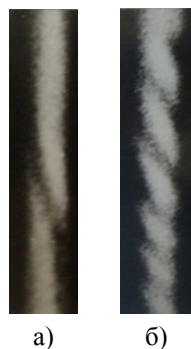


Рис.7. Секционные картины, полученные от первого интерферометра, когда: а) к конденсатору приложено поле обратной полярности (-100 В); (отражение 220); б) после отключения поля сразу подано поле в обратном направлении (-200 В) в течение 15 мин и после выключения поля съемка проводилась без поля.

Таким образом, создаются условия для получения совершенно одинаковых интерференционных картин от двукратных двух- и трехкристального интерферометров. Конечно, это достигается только в том случае, когда блоки интерферометра – почти идеальные кристаллы. Если же блоки интерферометра (или исследуемый кристалл) содержат дефекты, ориентация которых относительно отражающих плоскостей разных семейств двукратного интерферометра

разная, то интерференционные картины этих интерферометров будут отличаться, что даст возможность судить о пространственной ориентации дефектов и распределении деформаций, вызванных этими дефектами.

Муаровая картина, полученная под действием электростатического поля (постоянного поля), не зависит от направления (полярности) поля, при обеих полярностях получаются совершенно одинаковые картины (рис.5а-2 и 7а).

Возникающие под действием электрического поля структурные несовершенства сохраняются некоторое время после выключения поля. Сняты интерферограммы от интерферометра через 16 и 48 ч после выключения поля. Исходная картина, показанная на рис.2а,б, полностью восстанавливается только через 48 ч (рис.5а-5; 5б-5).

Ускорить восстановление искаженных состояний можно наложением поля обратной полярности на искаженный кристалл. После четырехчасовой экспозиции под действием электрического поля и получения муаровой картины искаженного кристалла интерферометр на 15 мин оставляли в поле обратной полярности, после чего делали съемку в отсутствие поля. Полученная таким образом муаровая картина показала, что за такое короткое время полностью восстанавливается неискаженное состояние (рис.7б).

Искажение структуры наблюдалось и в том случае, когда только любые два кристалла интерферометра из трех подвергались воздействию электрического поля, а также в случае, когда электрическое поле было применено только к одному из трех кристаллов интерферометра.

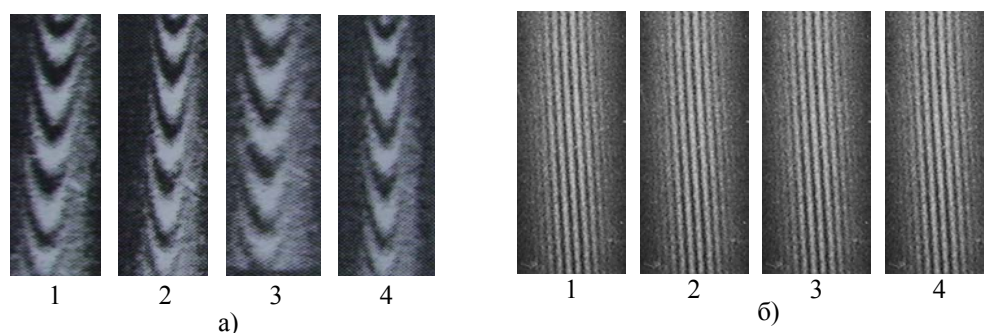


Рис.8. а) Маятниковые полосы от двукратного двухкристального интерферометра с клинообразной формой одного из кристаллов: 1 – без поля; 2 – 50 В; 3 – 100 В; 4 – 1.5 кВ (отражение 220, излучение MoK_α). б) Линии смещения, полученные от двукратного двухкристального интерферометра: 1 – без поля; 2 – 50 В; 3 – 100 В; 4 – 1.5 кВ (отражение $2\bar{2}0$, излучение MoK_α).

Влияние электрического поля на структуру кремниевых кристаллов исследовано также и с помощью других эффектов динамического рассеяния – маятниковых полос и линий смещения в двукратных двухкристальных интерферометрах (рис.1а). Полученные рентгенограммы показывают, что

электрическое поле не меняет характера маятниковых полос и линий смещения; видимо, чувствительность двухкристалльных систем мала для обнаружения структурных искажений, возникающих в кремниевых кристаллах под действием электрического поля (рис.8).

Таким образом, экспериментально однозначно доказано, что под действием постоянного электрического поля даже в неполярных кристаллах, каковыми являются кристаллы кремния, возникают структурные искажения, которые достаточно долгое время (десятки часов) после снятия поля не исчезают.

3. Обсуждение результатов

Изменение муаровых картин – результат деформации блоков интерферометра, которая обусловлена силами, действующими со стороны поля. Известно, что плотность этих сил определяется, согласно [9], выражением

$$\mathbf{F} = \rho_{\text{ст}} \mathbf{E} - \left(\frac{E^2}{8\pi} \right) \text{grad} \varepsilon + \mathbf{F}', \quad (2)$$

где $\rho_{\text{ст}}$ – плотность сторонних зарядов; $\mathbf{E}$ – вектор напряженности электрического поля; ε – диэлектрическая проницаемость кристалла; $\mathbf{F}'$ – плотность силы, которой обусловлена электрострикция. В рассмотренном случае, так как интерферометр изготовлен из полупроводника *n*-типа, плотность $\rho_{\text{ст}}$ в основном определяется зарядами доноров. Образец, из которого изготовлены интерферометры, имел удельное сопротивление порядка 100–200 Ом см, что соответствует концентрации зарядов порядка 10^{14} см^{-3} .

Оценка членов правой части уравнения (2) показывает, что первый член на три порядка больше, чем второй и третий. Следовательно, деформация кристалла, помещенного в электрическое поле, в основном обусловлена первым членом, т.е. $\mathbf{F} \approx \rho_{\text{ст}} \mathbf{E}$. Эта сила приводит к относительной деформации порядка 10^{-6} – 10^{-7} , что и обнаруживается в эксперименте.

Таким образом, на основе результатов исследований приходим к следующим основным выводам:

1. Впервые рентгеноинтерферометрическим методом в неполярных кристаллах, в частности, в полупроводниковых кристаллах кремния, обнаружены структурные искажения, вызванные действием постоянного электрического поля.
2. Показано, что с увеличением напряженности электрического поля период муаровых картин уменьшается (деформация кристаллов возрастает). При определенных значениях напряженности электрического поля муаровая картина исчезает (деформация настолько увеличивается с ростом напряженности электрического поля, что нарушается условие динамического рассеяния рентгеновских лучей).

ЛИТЕРАТУРА

1. У.Кеди. Пьезоэлектричество и его практическое применение. М., ИЛ, 1949.
2. П.А.Безирганян, В.И.Авунджян. Изв. АН Арм.ССР, Физика, **1**, 147 (1966).

3. **Ф.Иона, Д.Ширане.** Сегнетоэлектрические кристаллы. М., Мир, 1965.
4. **В.И.Иверонова, Г.П.Ревкевич.** Теория рассеяния рентгеновских лучей. М., изд. МГУ, 1972.
5. **З.Г.Пинскер.** Рентгеновская кристаллооптика. М., Наука, 1982.
6. **U.Bonse, W.Graeff.** J. Appl. Phys., **22**, 93 (1977).
7. **А.О.Абоян, С.Г.Агбальян.** Вестник Инженерной академии Армении, **5**, 379 (2008).
8. **П.А.Безирганян, С.Е.Безирганян.** Уч. зап. ЕГУ, **1**, 52 (1986).
9. **Дж.А.Стрэттон.** Теория электромагнетизма. М., ГИТЛ, 1948.

ՀԱՍՏԱՏՈՒՆ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ԴԱՇՏԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՄԲ
ԿԻՍԱՀԱՂՈՐԴՉԱՅԻՆ ՍԻԼԻՑԻՈՒՄԻ ԲՅՈՒՐԵՂՆԵՐՈՒՄ ԱՌԱՋԱՅԱԾ
ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԱՅԻՆ ԱՂԱՎԱՂՈՒՄՆԵՐԸ

Ա.Հ. ԱԲՈՅԱՆ

Ռենտգենախիտեֆերաչափական մեթոդով ոչ բևեռային, մասնավորապես, կիսահաղորդչային սիլիցիումի բյուրեղներում դիտված են հաստատուն էլեկտրական դաշտի ազդեցությամբ հարուցված կառուցվածքային աղավաղումներ: Ցույց է տրված, որ դաշտը փոփոխում է մուարի շերտերի հաճախությունը (պարբերությունը) և ուղղությունը, իսկ 1.5 կՎ պոտենցիալների տարբերության դեպքում մուարի պատկերները վերանում են: Մուարի պատկերը, որն ստացվում է էլեկտրական դաշտի ազդեցությամբ, կախված չէ դաշտի ուղղությունից (բևեռականությունից), երկու բևեռականությունների դեպքում էլ ստացվում են միանգամայն միատեսակ պատկերներ:

STRUCTURAL DISTORTIONS OF SEMICONDUCTING SILICON CRYSTALS
CAUSED BY A PERMANENT ELECTRIC FIELD

A.H. ABOYAN

Structural distortions in nonpolar, particularly, in semiconducting silicon crystals, caused by a permanent electric field, have been revealed by means of X-ray interferometry. It was shown that both the direction of moiré fringes and the frequency (period) are changed in the field, and that the moiré patterns disappear at values of potential difference in excess of 1.5 kV. The moiré pattern obtained under the action of electrostatic field is independent of the direction (polarity) of the field, the patterns for both polarities being completely identical.