

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования показывают, что генерация звука в твердых телах пучками тяжелых заряженных частиц имеет ряд особенностей по сравнению с генерацией в жидкостных мишенях. Кроме того, существуют устойчивые корреляционные связи между параметрами пучка заряженных частиц и пространственно-временными характеристиками генерируемого акустического излучения. Наличие данных связей позволяет проводить эффективную диагностику импульсных протонных пучков, в частности определять с достаточно высокой степенью точности глубину проникновения частиц в вещество мишени, а по ней энергию протонов.

Список литературы

- [1] Стародубцев С. В., Ромашов А. М. Прохождение заряженных частиц через вещество. Ташкент, 1962. 228 с.
- [2] Sulak L., Armstrong T., Baranger H. // Nucl. Instr. and Meth. 1979. Vol. 161. P. 203—217.
- [3] Боршковский И. А., Воловик В. Д. // Изв. вузов. Физика. 1973. № 10. С. 72—76.
- [4] Бавижев М. Д., Бурликов В. Л., Воробьев С. А. и др. // Деп. в ВИНТИ. М., 1989. № 5907-B89.
- [5] Каргапольцев А. В., Симанчук В. И. // Тез. докл. III Всесоюз. науч.-техн. конф. «Использование современных физических методов в неразрушающем контроле». Хабаровск, 1987. С. 237—238.
- [6] Бурликов В. Л., Жуков В. К., Забаев В. Н. и др. // ПТЭ. 1989. № 5. С. 67—70.
- [7] Боршковский И. А., Воловик В. Д. и др. // ЖЭТФ. 1972. Т. 63. Вып. 4 (10). С. 1337—1341.
- [8] Бавижев М. Д., Бурликов В. Л., Воробьев С. А. // Деп. в ВИНТИ. М., 1989. № 7095-B89.
- [9] Atkinson J.-H. Jr., Beverly H.-W. High-energy Particle Data. California, 1957. Vol. II. P. 92.

Научно-исследовательский институт
ядерной физики
при Томском политехническом институте
им. С. М. Кирова

Поступило в Редакцию
25 января 1990 г.
В окончательной редакции
7 мая 1990 г.

05

Журнал технической физики, т. 61, в. 8, 1991

© 1991 г.

СЕЛЕКТИВНОЕ ПОВЫШЕНИЕ КОНТРАСТА ЗА СЧЕТ КАНАЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ

А. Н. Ефимов, В. Ю. Флоринский

Комплексный характер информации, получаемой с помощью растрового электронного микроскопа, связан с большим разнообразием физических явлений, возникающих при взаимодействии высокоэнергетичных электронов с твердым телом. Известно, что поглощение падающих частиц существенно зависит от взаимной ориентации первичного пучка и кристаллографических плоскостей объекта. В связи с этим большой интерес представляет каналирование электронов [1], заключающееся в их аномальном поглощении монокристаллическим образцом, которое возникает при изменении угла падения вблизи брэгговского. Интерпретация данного явления осуществлена в динамической теории дифракции, где волновую функцию, связанную с частицами, определяют как суперпозицию двух типов блоховских волн [2]. Сканирование поверхности образца электронным лучом приводит к появлению так называемой картины каналирования, состоящей из полос и линий, накладывающейся на обычное изображение поверхности. Она позволяет судить о кристаллографических характеристиках исследуемого объекта, при этом локальность анализа может достигать 0.01 мкм. Контраст за счет каналирования электронов обычно не превышает 5 %, поэтому для формирования качественного изображения необходимо применять специальные методы обработки сигнала, повышающие контраст, такие

как подавление постоянной составляющей, дифференцирование. Однако, если помимо кристаллического имеется значительно превышающий его топографический контраст, применение упомянутых процедур не позволяет улучшить условия наблюдения линий каналирования, так как одновременно будет повышаться и контраст за счет топографического рельефа. Следовательно, для изучения кристаллографических характеристик материалов в приповерхностной области необходимо выделить кристаллографическую компоненту контраста. С этой целью в настоящей работе использовалось изменение длины волны падающих на образец электронов λ .

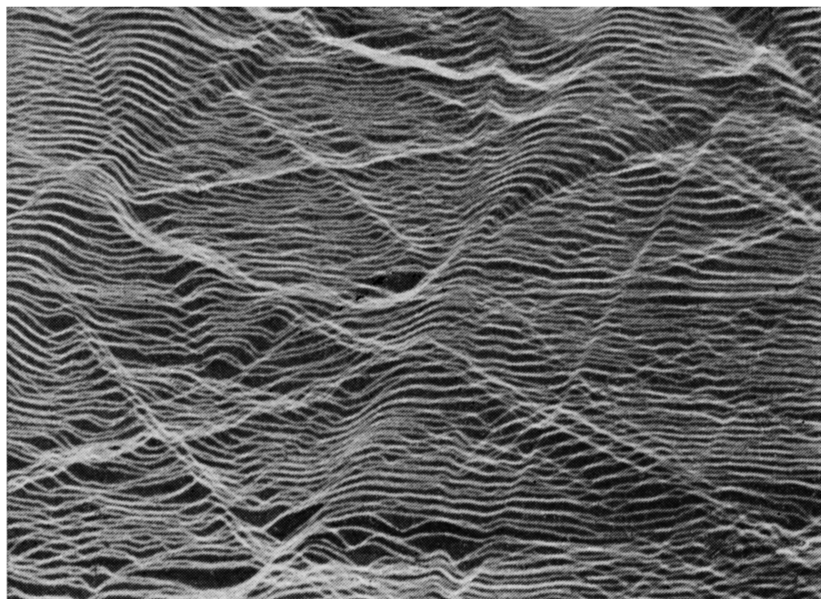


Рис. 1. Изображение поверхности кремния в режиме Y-модуляции при двойном сканировании электронного луча по образцу.

Первое сканирование — образец заземлен, при втором к образцу приложено +300 В.

Аномальное поглощение электронов наблюдается при небольшом, порядка 0.1° , изменении угла падения относительно брэгговского угла Θ_B , определяемого известным соотношением

$$2d \cdot \sin \Theta_B = n \cdot \lambda, \quad (1)$$

где n — целое число, d — межплоскостное расстояние.

При изменении длины волны падающих электронов на $\Delta\lambda$ соотношение (1) будет выполняться при другом угле $\Theta = \Theta_B + \Delta\Theta$, поэтому в растровом режиме должно наблюдаться соответствующее смещение линий каналирования электронов в отличие от неизменного положения деталей топографического рельефа. Различие длин волн падающих электронов сказывается, таким образом, на величине только кристаллического контраста, ввиду чего появляется принципиальная возможность выделить его на фоне других, более сильных видов контраста.

Малость угла Брэгга для электронов приводит с учетом уравнения (1) к следующему соотношению:

$$\Delta\Theta = \Theta \frac{\Delta\lambda}{\lambda}, \quad (2)$$

где $\Delta\Theta$ — изменение брэгговского угла.

Следовательно, для низкоиндексных линий, соответствующих дифракции электронов на плоскостях с большими межплоскостными расстояниями, при-

ращение $\Delta\lambda \sim 5 \cdot 10^{-2} \cdot \lambda$ обеспечит сдвиг линий на расстояние, равное их угловой ширине, которая обычно составляет $\sim 0.1^\circ$ при угле Брэгга порядка 2° . Изменение энергии падающих электронов можно осуществить путем подачи на образец потенциала ΔV , величина которого оценивается из формулы (2) с учетом связи ускоряющего напряжения V и длины волны электронов ($\lambda \sim 1/\sqrt{V}$): $(\Delta V/V) \simeq 2 (\Delta\lambda/\lambda)$. Для высокоиндексных линий величина ΔV значительно снижается, так как возрастает угол Брэгга, а угловая ширина таких линий существенно уменьшается. Это подтверждается экспериментальными результатами. На рис. 1 представлено изображение гладкой поверхности кремния, полученное в режиме Y -модуляции. Каждая строка на снимке является результатом двух проходов электронного луча по образцу.

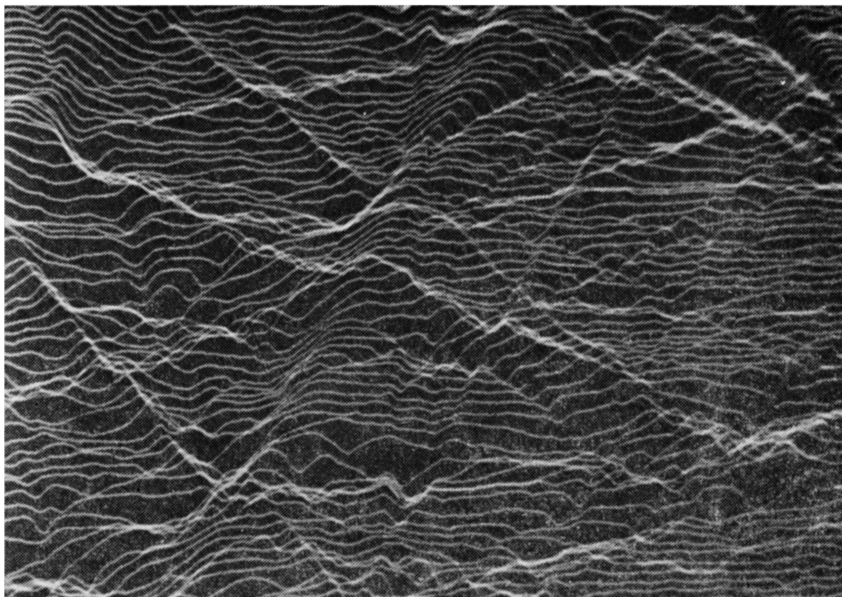


Рис. 2. Изображение поверхности кремния в режиме Y -модуляции при двойном сканировании электронного луча по заземленному образцу.

Когда растр формируется в первый раз, образец заземляется, а во второй — на него подается потенциал $+300$ В, при этом одни линии смещаются, тогда как другие заметного смещения не испытывают, таким образом, они представляют собой высокоиндексные и низкоиндексные рефлекс соответственно. То, что все линии представляют собой линии каналирования, подтверждается наблюдениями, выполненными с помощью оптического микроскопа, показавшими отсутствие топографического рельефа; контрольный список, полученный путем двукратного сканирования электронного луча по заземленному образцу, показал отсутствие раздвоенных пиков, т. е. свидетельствует о наблюдаемой стабильности тока зонда во время экспозиции (рис. 2).

Поскольку смещение линий достаточно велико, то можно утверждать, что приложение к образцу потенциала порядка 100 В позволяет существенно изменить картину каналирования, причем дальнейшая обработка сигнала, в основе которой лежит смещение этих линий при изменении длины волны дифрагирующих электронов, позволит получить информацию о высокоиндексных рефлекс, наиболее чувствительных к состоянию кристаллической решетки.

Рассмотрим теперь образец с сильно развитым топографическим рельефом, который, как отмечалось ранее, маскирует линии каналирования, делая их наблюдение невозможным. Получим обычное (положительное) изображение объекта с яркостной модуляцией сигнала при нулевом потенциале на образце, затем подадим на него напряжение, что оставит положение деталей топографического рельефа неизменным, и сделаем второе изображение негативным. Наложение

обоих изображений приведет к исчезновению топографических особенностей образца, так как произойдет компенсация светлых мест темными, тогда как испытывавшие сдвиг линии каналирования компенсироваться не будут и станут доступными для регистрации. Одним из возможных способов реализации подобной методики является оцифровка изображений с последующей обработкой посредством ЭВМ.

Наиболее простым представляется, однако, другой путь — создание разностного сигнала в каждой исследуемой точке образца в процессе сканирования. Для этого вместо постоянного напряжения на него подаются прямоугольные импульсы со скважностью 0.5, а схема регистрации состоит из селективного усилителя и синхронного детектора, после которого полученный разностный сигнал поступает на видеоконтрольное устройство. Требования к величине амплитуды импульсов остаются теми же самыми — изменить на $\Delta\lambda$ длину волны электронов так, чтобы линии каналирования сдвинулись на расстояние, по порядку величины равное их угловой ширине, а частота следования этих импульсов f_0 .

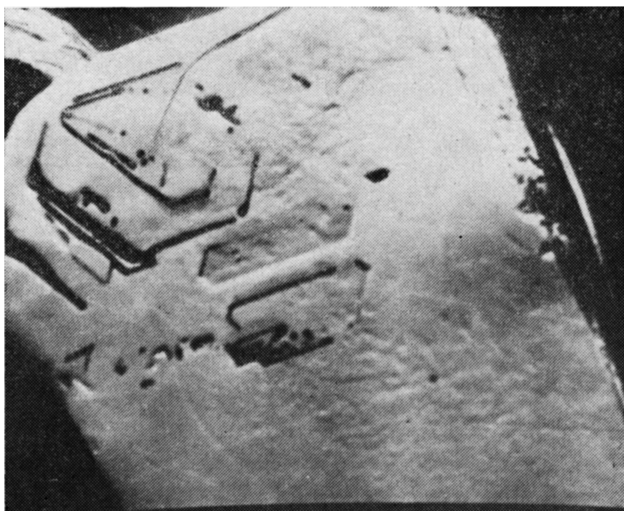


Рис. 3. Изображение поверхности карбида кремния в режиме яркостной модуляции сигнала.

должна обеспечить выполнение неравенства $t_0 \ll \tau \ll t_{стр}$, где $t_0 = 1/f_0$, τ — постоянная времени синхронного детектора, $t_{стр}$ — длительность строки. Выполнение этого неравенства означает обеспечение необходимых условий для получения большого числа элементов изображения, позволяющего сформировать высококачественную картинку. В эксперименте, описанном ниже, амплитуда импульсов $\Delta V = 100$ В, ускоряющее напряжение $V = 40$ кВ, $f_0 = 10$ кГц, $\tau = 1$ мс, $t_{стр} = 200$ мс (отметим, однако, что картины каналирования наблюдались и при значительно более низких напряжениях модуляции, вплоть до $\Delta V = 10$ В). Изучался образец карбида кремния, изображение которого, полученное в стандартном режиме работы электронного микроскопа, представлено на рис. 3. Хорошо виден сильно развитый топографический рельеф, на участках, где топография выражена не так существенно, с трудом можно различить отдельные линии, природа которых непонятна. Модуляция потенциала образца и применение соответствующей схемы регистрации с использованием синхронного детектирования позволили получить значительное возрастание контраста этих линий, а в области с сильно развитым топографическим рельефом выявить продолжение оборванных ранее полос, которые теперь проходят, не прерываясь, по всей поверхности (рис. 4). При данном способе получения изображения не вызывает сомнений, что существование упомянутых выше линий обусловлено процессами каналирования электронов. Таким образом, исследовавшийся образец представляет собой монокристалл; непрерывность линий каналирования

свидетельствует о неизменности кристаллографических характеристик на всем протяжении образца.

К изложенному следует сделать несколько замечаний.

1. Идентифицировать слабо различимые линии на рис. 4 как линии каналирования можно, работая в стандартном режиме. Для этого необходимо переместить образец. Линии каналирования при этом вследствие трансляционной симметрии останутся неподвижными. Однако там, где из-за топографических особенностей никаких линий обнаружить не удастся, сделать какие бы то ни было выводы о кристаллографических свойствах исследуемого объекта, разумеется, нельзя.

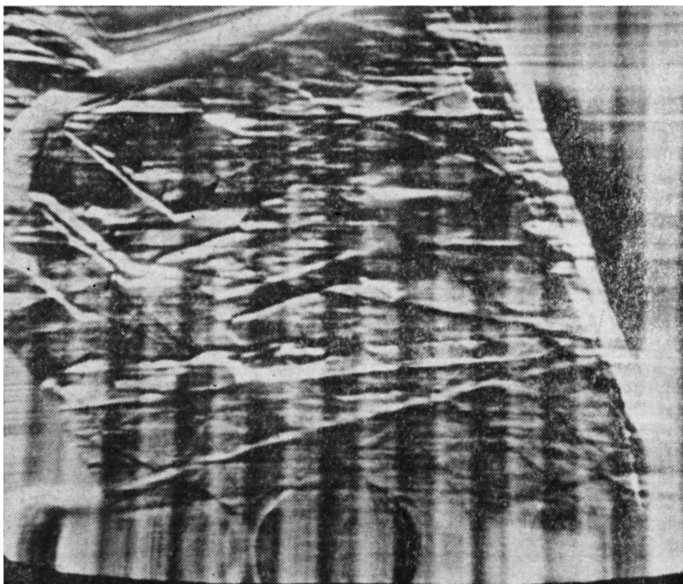


Рис. 4. Изображение поверхности карбида кремния в режиме яркостной модуляции сигнала с использованием синхронного детектирования при подаче на образец импульсного напряжения.

2. Вертикальные полосы на рис. 4 представляют собой сетевую наводку, возникшую вследствие несовершенства применявшейся аппаратуры.

Таким образом, в данной работе показана возможность селективного повышения кристаллической компоненты контраста. Это позволит использовать картины каналирования электронов для получения информации о кристаллографических характеристиках образцов, имеющих развитую поверхность (естественные поверхности роста, изломы и т. д.); соответственно, расширится область применения высоколокального неразрушающего контроля кристаллических материалов средствами растровой электронной микроскопии.

Авторы выражают благодарность В. А. Ильину за полезные обсуждения полученных результатов.

Список литературы

- [1] Микροанализ и растровая электронная микроскопия / Под ред. Ф. Морис, Л. Менил. М.: Металлургия, 1985. 392 с.
- [2] David C. Joy, Dale E. Newbury // J. Appl. Phys. 1982. Vol. 53. N 8. P. R81—R122.

Ленинградский электротехнический институт
им. В. И. Ульянова (Ленина)

Поступило в Редакцию
4 июня 1990 г.