

ЗАВИСИМОСТЬ КОНТРАСТА КИКУЧИ-ЭЛЕКТРОНОГРАММ КРЕМНИЯ ОТ ЭНЕРГИИ ПЕРВИЧНОГО ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ

Р. К. КАРАХАНИЯН, П. А. ГРИГОРЯН

Исследован контраст разрешенных и запрещенных кикучи-линий в зависимости от энергии первичного пучка электронов. Обнаружено ослабление и усиление соответственно контраста разрешенных и запрещенных линий с уменьшением величины ускоряющего напряжения электронов. Выявлена также большая ширина запрещенных линий по сравнению с разрешенными. Полученные экспериментальные результаты объяснены на основе механизмов образования разрешенных и запрещенных кикучи-линий.

В теории дифракции электронов [1] известны брэгговские отражения, наблюдаемые на электронограммах вопреки тому, что соответствующие им по кинематической теории структурные факторы, а значит и интенсивности, равны нулю. Вследствие этого отражения такого типа принято называть запрещенными.

При дифракции электронов на относительно толстых пленках с высокой степенью совершенства образуются кикучи-картины [2], представляющие собой, в частности, пары черных и белых линий. Согласно геометрическому принципу построения кикучи-картин по известной точечной электронограмме [3], все те линии, чьи индексы равны индексам запрещенных брэгговских отражений, являются запрещенными, т. е. не должны наблюдаться на электронограмме.

Вместе с тем впервые в [4] нами было сообщено о существовании на кикучи-электронограммах кремния запрещенных линий избытка и недостатка с индексом 222. Эти линии являются запрещенными потому, что отражение 222 запрещено для структуры кремния. В настоящей работе проведено исследование зависимости контраста кикучи-электронограмм кремния с запрещенными и разрешенными линиями от энергии падающего пучка электронов.

На рис. 1 приводится кикучи-электронограмма кремния, полученная на электронографе ЭГ-100М при падении электронного пучка с ускоряющим напряжением $E=100$ кВ. При съемке внешний пучок электронов лежал вблизи оси зоны {112}. Электронограмма, снятая при такой ориентации образца, как видно из рис. 1, содержит кикучи-линии типа hkh . При этом на снимке кроме обычных (разрешенных) пар линий наблюдаются запрещенные кикучи-линии 222 и 666.

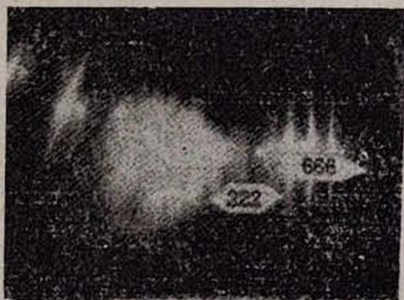


Рис. 1. Кикучи-электронограмма кремния с запрещенными линиями 222 и 666.

Отметим, что электронограммы нами были получены при ускоряющих напряжениях 40, 60, 80 и 100 кВ. При напряжениях в 40 и 60 кВ вследствие сильного поглощения электронов дифракционные картины получились со слабым контрастом и плохого качества. По этой причине в дальнейшем нами были использованы лишь снимки при 80 и 100 кВ. На рис. 2 приведены микрофотометрированные профили интенсивностей наиболее сильных кичуки-линий недостатка при указанных ускоряющих напряжениях и выполнении точного условия Вульфа—Брэгга для плоскостей 555 ($\Delta\theta_{555} = 0$). Из этих кривых хорошо видно, что контраст запрещенной линии недостатка 222 с уменьшением величины ускоряющего напряжения от 100 до 80 кВ улучшается — профиль этой линии относительно окружающего фона становится резче, острее. Одновременно это же уменьшение ускоряющего напряжения приводит, как видно из рис. 2, к ослаблению контраста разрешенных линий недостатка 333 и 444.

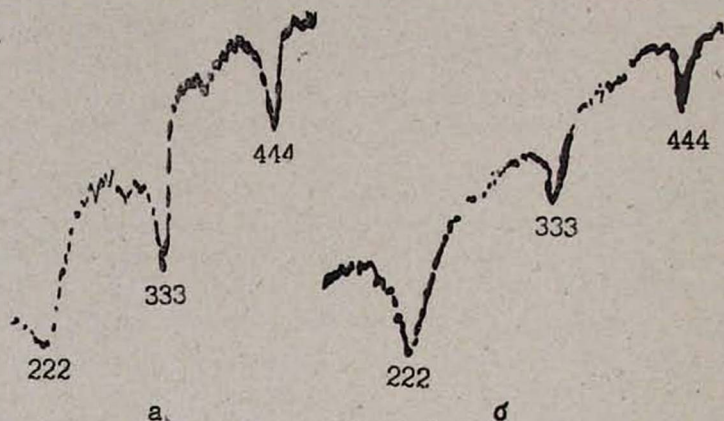


Рис. 2. Микрофотометрированные профили интенсивностей кичуки-линий при ускоряющем напряжении 100 (а) и 80 (б) кВ.

На рис. 2 профили линий избытка 222, 333 и 444 отсутствуют вследствие того, что при использованной ориентации кристалла ($\Delta\theta_{555} = 0$) эти линии выходят за пределы экрана и на фотопластинке, естественно, не наблюдаются. Вместе с тем съемки при других ориентациях (например, при $\Delta\theta_{555} \neq 0$) показали справедливость сделанных выше заключений и относительно линий избытка 222, 333 и 444.

Таким образом, можно утверждать, что даже относительно небольшое изменение ускоряющего напряжения от 80 до 100 кВ приводит к заметному изменению контраста кичуки-линий. Иными словами, контраст кичуки-линий весьма чувствителен к изменениям ускоряющего напряжения. Из микрофотометрированных профилей интенсивностей (рис. 2) видно также, что запрещенная линия недостатка 222 как при 80 кВ, так и при 100 кВ шире и более размыта, чем линии недостатка 333 и 444. Укажем, что линии 111, 555, 666 и 777 на электронограммах и микрофотометрических кривых относительно слабые и поэтому нами здесь не рассматриваются.

Приведенные выше экспериментальные результаты можно объяснить следующим образом. Появление запрещенных кикучи-линий 222 и 666 становится понятным, если, основываясь на явлении вторичной (двойной) дифракции [1, 3], учесть, что сильные дифракционные пучки могут играть роль первичного пучка. При рассмотрении процессов образования кикучи-картин учет вторичной дифракции будет означать принятие того обстоятельства, что сильные дифрагированные пучки, поскольку они играют роль первичного пучка, будут подвергаться тем же процессам неупругого рассеяния, что и падающий на кристалл извне пучок электронов. В результате на экране (фотопластинке) получается суперпозиция двух идентичных кикучи-картин, сдвинутых друг относительно друга на определенное расстояние, что и приводит, как и в случае запрещенных брэгговских отражений [1, 3], к появлению запрещенных кикучи-линий.

Исходя из предложенного нами выше механизма образования запрещенных кикучи-линий становится ясным улучшение контраста запрещенной линии 222 с понижением величины ускоряющего напряжения. Действительно, для образования запрещенной кикучи-линии необходимо, чтобы сформировался и затем неупруго рассеялся сильный дифрагированный пучок. А это значит, что если для образования разрешенных (обычных) кикучи-линий толщина образца должна быть не менее $1000 \text{ \AA}$ [2], то для появления запрещенных кикучи-линий будут необходимы более толстые кристаллы. Но, как известно [1], уменьшение ускоряющего напряжения эквивалентно увеличению толщины кристалла. В силу этого уменьшение величины ускоряющего напряжения, как и возрастание толщины кристалла, должно приводить к усилению контраста запрещенных линий, что и наблюдается в нашем эксперименте. Отметим, что запрещенные брэгговские отражения также обычно наблюдаются в толстых образцах [1].

При уменьшении ускоряющего напряжения до 60 кВ поглощение электронов начинает преобладать, вследствие чего контраст запрещенных линий, как и всей дифракционной картины, существенно ухудшается. Очевидно, что поглощение электронов ответственно также за ослабление контраста разрешенных линий недостатка 333 и 444 (рис. 2) при уменьшении ускоряющего напряжения от 100 до 80 кВ , хотя контраст запрещенной линии 222 при этом улучшается. Как отмечалось выше, образование разрешенных линий 333 и 444 вызвано неупругим рассеянием в кристалле внешнего электронного пучка, а запрещенные линии возбуждаются при неупругом рассеянии сильных дифрагированных пучков, появлению которых благоприятствуют относительно большие толщины кристалла. Все это приводит к тому, что возрастающее поглощение электронов при уменьшении энергии электронов в первую очередь влияет на контраст разрешенных линий, и лишь при дальнейшем понижении ускоряющего напряжения (до 60 кВ) поглощение электронов начинает сказываться и на контрасте запрещенных кикучи-линий.

Следует отметить, что запрещенные кикучи-линии могут наблюдаться, как и запрещенные брэгговские отражения, при определенных ориентациях исследуемого образца относительно падающего пучка электронов.

Запрещенные кикучи-линии наблюдаются лишь при тех ориентациях, когда могут наблюдаться запрещенные брэгговские отражения. Это обстоятельство соответствует геометрическому принципу построения кикучи-картин [3], согласно которому при данной ориентации кристалла присутствуют лишь те кикучи-линии, для которых могут возбуждаться брэгговские отражения. Понятно, что, как и в случае обычных (разрешенных) кикучи-линий, запрещенные линии могут выявляться на электронограмме и в случае, когда соответствующие им запрещенные брэгговские отражения на электронограмме не наблюдаются. Для структуры кремния (тип алмаза) в качестве ориентации, при котором наблюдаются запрещенные линии, кроме использованной в настоящей работе ориентации [112] можно использовать образцы с осью [110], параллельной падающему пучку. В этом случае на электронограмме могут наблюдаться, например, запрещенные кикучи-линии типа 002, 222 и т. д.

Отмеченная выше большая ширина запрещенной линии 222 по сравнению с разрешенными линиями 333 и 444, вероятно, обусловлена следующим обстоятельством. Известно [4, 5], что ширина кикучи-линий сильно зависит от степени совершенства кристаллической структуры образца — с ее ухудшением кикучи-линии размываются. Так как запрещенная линия 222 образована в более толстых слоях кристалла, чем линии 333 и 444, то можно полагать, что в более толстых слоях кристалла структурных дефектов больше, чем в тонких. А это, в свою очередь, приводит к уширению линии 222.

Таким образом, в работе показано, что изменение величины ускоряющего напряжения от 80 до 100 кВ приводит к различному поведению контраста разрешенных и запрещенных кикучи-линий, что ясно объясняется на основе геометрического механизма образования этих линий. Большая ширина запрещенной линии 222 по сравнению с разрешенными кикучи-линиями также следует из указанного механизма.

Авторы выражают благодарность проф. П. А. Безирганяну за ценные советы и внимание к работе.

Ереванский государственный
университет

Поступила 20.XII.1979

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. К. Вайнштейн. Структурная электронография, Изд. АН СССР, М., 1956.
2. Э. Г. Пинскер. Дифракция электронов, Изд. АН СССР, М.—Л., 1949.
2. Э. Г. Пинскер. Дифракция электронов, Изд. АН СССР, М.—Л., 1949.
4. Р. К. Караханян, П. А. Григорян. Кристаллография, 24, 159 (1979).
5. Р. Хейнедрейх. Основы просвечивающей электронной микроскопии, Изд. Мир, М., 1966.
6. Л. А. Жукова, М. А. Гуревич. Электронография поверхностных слоев и пленок полупроводниковых материалов, Изд. Металлургия, М., 1971.

ՍԻԼԻՑԻՈՒՄԻ ՄԻԱՔՅՈՒՐԵՂԻՑ ՄՏԱՅՎՈՂ ԿԻԿՈՒՉԻ-
ԷԼԵԿՏՐՈՆԱԳՐԱՄԱՆԵՐԻ ԿՈՆՏՐԱՍՏԻ ԿԱԽՈՒՄԸ ԷԼԵԿՏՐՈՆՆԵՐԻ
ԱՌԱՋՆԱՅԻՆ ՓՆՋԻ ԷՆԵՐԳԻԱՅԻՑ

Ռ. Կ. ԿԱՐԱԽԱՆՅԱՆ, Պ. Ա. ԳՐԻԴՈՐՅԱՆ

Աշխատանքում ուսումնասիրված է թույլատրված և արգելված կիկուչի-դժերի կոնտրաստը կախված էլեկտրոնների առաջնային փնջի էներգիայից: Դիտված է թույլատրված և արգելված կիկուչի-դժերի համապատասխանաբար կոնտրաստի թուլացումն ու ուժեղացումը էլեկտրոնների արագացնող լարման մեծությունը փոքրացնելիս: Գտնված է նաև, որ արգելված դժերի լայնությունը ավելի մեծ է, քան թույլատրվածներինը: Ստացված արդյունքները բացատրված են թույլատրված և արգելված կիկուչի-դժերի առաջացման մեխանիզմի հիման վրա:

DEPENDENCE OF THE CONTRAST OF KIKUCHI PATTERNS
OF Si CRYSTAL ON THE ENERGY OF PRIMARY
ELECTRON BEAM

R. K. KARAKHANYAN, P. A. GRIGORYAN

The contrast of allowed and forbidden kikuchi-lines was studied in dependence on the energy of primary electron beam. The weakening and intensification of the contrast of forbidden and allowed lines respectively were observed with increasing acceleration voltage. The obtained experimental results were explained on the basis of mechanisms of forbidden and allowed kikuchi-lines formation,