УДК 548.74

ОРИЕНТАЦИОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ ЗАПРЕЩЕННЫХ И НЕИНДИЦИРУЕМЫХ КИКУЧИ-ЛИНИЙ

Р.К. КАРАХАНЯН

Ереванский государственный университет

(Поступила в редакцию 17 мая 2000 г.)

Посредством электронограмм на прохождение найдено, что запрещенные линии образуются при тех же ориентациях, что и запрещенные точечные отражения, а интенсивность запрещенных линий высшего порядка сильно зависит от изменения угла между образцом и электронным пучком. Неиндицируемые линии наблюдаются при тех ориентациях, при которых обеспечивается их достаточная интенсивность. Полученные экспериментальные результаты объяснены на основе двойной дифракции кикучи-электронов.

Как показано в [1-3], образование запрещенных и неиндицируемых линий на кикучи-электронограммах является прямым следствием двойной дифракции кикучи-электронов. В этом случае однократно и дважды дифрагированные электронные пучки подвергаясь, как и первичный пучок электронов, неупругому рассеянию, образуют вторичные кикучи-картины. Суперпозиция этих картин с первичной кикучи-картиной, обусловленной неупругим рассеянием падающего электронного пучка, приводит к образованию запрещенных и неиндицируемых кикучи-линий. Запрещенным кикучи-линиям отвечают запрещенные для данной кристаллической структуры индексы, и они являются, в этом смысле, аналогами запрещенных брэгговских отражений. Неиндицируемые линии, в отличие от пар светлых и темных кикучи-линий, являются одиночными, что не позволяет определить их индексы. В [4,5] нами была исследована зависимость образования запрещенных и неиндицируемых кикучи-линий от толщины и температуры исследуемого кристалла. Настоящая работа посвящена исследованию образования этих линий в зависимости от ориентации образца по отношению к падающему электронному пучку.

Кикучи-электронограммы монокристаллических пленок кремния, изготовленных химическим травлением массивных образцов, были получены на электронографе ЭГ-100М съемкой на прохождение при ускоряющем напряжении 100 кВ. Анализ электронограмм, снятых при падении первичного электронного пучка вдоль множества различных кристаллографических направлений кристаллов кремния, выявил, что запрещенные кикучи-линии образуются лишь при тех ориентациях образца относительно электронного пучка, при которых наблюдаются запрещенные точечные отражения. Например, при падении пучка электронов вдоль оси [112] наблюдаются запрещенные кикучи- линии и точечные отражения с индексами (222), (666), а в случае осей [310] и [110] – запрещенные линии и отражения (002), (006). Этот результат полностью согласуется с известным принципом построения кикучи-картин [6], в соответствии с которым каждому точечному отражению с разрешенными индексами отвечает кикучи-линия с теми же индексами, одновременно ясно показывая справедливость этого правила и в случае запрещенных кикучи-линий и точечных отражений.

Наши исследования показали, что, если при данной ориентации кристалла кремния образуются запрещенные кикучи-линии, то интенсивность линий высшего порядка существенно зависит от угла между образцом и падающим электронным пучком. На рис.1 приведена электронограмма кремния при падении первичного пучка вблизи кристаллографической оси [112], на которой наблюдаются пара запрещенных кикучи-линий (222) и запрещенная линия избытка 666. На рис.2 представлена электронограмма того же образца кремния, но после небольшого (24 угл. мин.) изменения угла между образцом и пучком электронов. Как видно, на второй электронограмме присутствует лишь пара линий (222), а запрещенная линия избытка 666 уже отсутствует. Отметим, что запрещенная линия недостатка 666 не наблюдается на обеих электронограммах.



Рис.1. Кикучи-электронограмма кремния с запрещенными линиями 222, 666 и неиндицируемой линией (Н.Л.).



Рис.2. Кикучи-электронограмма кремния без неиндицируемой линии избытка 666.

Пля объяснения полученных результатов обратимся к [7], где на основе явления двойной дифракции кикучи-электронов показано, что запрешенные линии избытка, как и обычные (разрешенные) линии. при приближении к точечным отражениям с теми же запрещенными индексами постепенно усиливаются, приобретая максимальную интенсивность при прохождении через эти отражения. Усиление кикучилиний избытка с разрешенными индексами объясняется тем [6], что при ее прохождении через отражение с теми же индексами первичный электронный пучок падает на соответствующие атомные плоскости под точным углом Брэгта. В результате первичный пучок становится одной из образующих конуса избыточной интенсивности и приводит после отражения от указанных плоскостей к усилению прилегающего к нему участка кикучи-линии избытка. Но усиление запрещенных кикучи-линий нельзя объяснить, как в случае разрешенных линий, отражением первичного пучка электронов от плоскостей с запрещенными индексами, так как этим отражениям по правилам погасаний отвечает нулевая интенсивность. Усиление запрещенной кикучи-линии избытка вблизи точечного отражения с теми же индексами обусловлено тем, что в этом случае с тем или иным конусом избыточной интенсивности совпадает некоторый интенсивный дифрагированный пучок, выступающий в роли источника вторичных кикучи-картин. Это приводит к усилению тех вторичных кикучи-линий, которыми обусловлено образование запрещенных кикучи-линий.

Электронограмма на рис.1 получена при такой ориентации кристалла, когда первичный пучок падает на образец под углом,

близким к углу отражения для плоскостей (444), что следует из того. что линия избытка 444 проходит вблизи отражения 444. На рис.2 условие отражения выполняется уже для плоскостей 333, так как на ней линия избытка 333 проходит через отражение 333. В соответствии с [7], чем ближе запрещенная линия избытка 666 к отражению 666, тем больше ее интенсивность и, следовательно, тем легче она будет наблюдаться. Если *в* - угол отражения для плоскостей (111), то максимальное усиление линии избытка 666 произойдет при угле между первичным пучком и плоскостями (666), равном 60, что отвечает прохождению линии избытка 666 точно через отражение 666. Рис.1, на котором видна запрещенная линия избытка 666, отвечает углу между первичным пучком и плоскостями (666), равному 40. На рис.2, где уже не наблюдается линия избытка 666, этот же угол равен 30. Значит, на рис.1 линия удалена от положения своей максимальной интенсивности на угол 20, а на рис.2 это удаление равно 3 в. По этой причине в первом случае запрещенная линия избытка 666 имеет относительно большую интенсивность и наблюдается, а во втором случае ее интенсивность так мала, что она не видна на электронограмме.

Отсутствие запрещенной линии недостатка 666 на обеих приводимых электронограммах связано со следующим обстоятельством. Обе электронограммы в силу геометрических условий их съемки соответствуют случаю, когда отражение 111 более интенсивно, чем отражение 111. Поэтому основную роль при образовании вторичных кикучи-линий играет отражение 111. На основе двойной дифракции кикучиэлектронов [1,2] легко показать, что при принятии в качестве источника вторичных кикучи-линий дифрагированного пучка 111 линия недостатка 666 будет обусловлена слабой вторичной линией недостатка 888 и не может наблюдаться на полученных электронограммах (рис.1,2). Линия избытка 666 обусловлена более интенсивной вторичной линией избытка 444 и наблюдается на снимках. Отметим, что из-за своей слабости на рис.1,2 не видна и пара линий (888), обусловленных неупругим рассеянием падающего электронного пучка.

Образование на обеих электронограммах (рис.1,2) пары запрещенных линий (222) связано с тем, что линия избытка 222 обусловлена интенсивной вторичной линией 444 с источником в дифрагированном пучке 111, а линия недостатка 222 сформирована также сильной вторичной линией недостатка 444 с источником в пучке 111. Причем, в данном случае образованию линии избытка 222 не препятствует малая интенсивность пучка 111, так как вторичная линия избытка 444, тем не менее, достаточно интенсивна, чтобы вызвать образование линии 222. Итак, запрещенные линии низкого порядка (222) при изменении угла между пучком и образцом, в отличие от запрещенных линий высшего порядка (666), продолжают ясно наблюдаться (рис.1,2). Такое их поведение подобно тому, что разрешенные кикучилинии при изменении угла между образцом и пучком также непрерывно наблюдаются, лишь перемещаясь по экрану.

Перейдем к рассмотрению ориентационной зависимости образования неиндицируемых кикучи-линий. Если исходить из механизма их образования [2,3], основанного на двойной дифракции кикучи-электронов, то неиндицируемые линии могут всегда присутствовать на электронограммах при тех ориентациях, когда наблюдается систематический ряд параллельных линий избытка и недостатка. При этом образование данной неиндицируемой линии обусловлено тем, что при взятии в качестве источника вторичных кикучи-картин некоторого дифрагированного пучка, т.е. при параллельном переносе вышеуказанного ряда кикучи-линий в ту или иную сторону и последующем наложении вторичных кикучи-картин на первичную, некоторая достаточно интенсивная кикучи-линия вызовет возникновение неиндицируемой линии. На электронограммах (рис.1,2) ясно видна неиндицируемая линия (Н.Л.), проходящая посередине ряда параллельных линий (111). (222), (333)... Согласно [3], эта неиндицируемая линия обусловлена неупругим рассеянием дважды дифрагированного пучка 222. соответствующий которому рефлекс хорошо виден на приводимых электронограммах. Неиндицируемая кикучи-линия, параллельная линиям 220. 440, 660..., не наблюдается по той причине, что в соответствии с [2] она обусловлена дифрагированным пучком 220, имеющим в нашем случае нулевую интенсивность (соответствующий рефлекс вообще не наблюдается). На рис.3 представлена кикучи-электронограмма кремния при падении первичного электронного пучка вблизи оси [001] образца. На ней наблюдаются кикучи-линии (400), (040), (220), (220), но соответствующие им неиндицируемые линии отсутствуют. Анализ, основанный на механизме двойной дифракции кикучи-электронов, показывает, что, например, при взятии в качестве источников вторичных кикучи-картин самых интенсивных дифрагированных пучков 400 и 400 неиндицируемая линия, проходящая вдоль пары линий (400), будет обусловлена вторичными линиями (880). Если учесть, что уже на основной картине с источником в первичном пучке кикучи-линии (880) являются слабыми и не наблюдаются, то вторичные кикучи-линии (880) с источниками в дифрагированных пучках 400 и 400 будут еще более слабыми и никак не могут появиться на электронограммах. Такой же несложный анализ показывает, что неиндицируемые линии, параллельные парам кикучилиний (040), (220), (220), не образуются из-за слабости соответствующих вторичных кикучи-линий. При падении электронного пучка вдоль оси [111] кристалла кремния наблюдаются только неиндипируемые линии, параллельные кикучи-линиям (220), а запрещенные линии отсутствуют (см. электронограмму в [5]). В этом случае все вторичные кикучи-линии совпадают с линиями первичной картины, кроме трех вторичных, приводящих к образованию трех неиндицируемых кикучи-линий с углом между ними в 120⁰ в соответствии с третьим порядком оси [111].



Рис.3. Кикучи-электронограмма кремния при падении электронного пучка вдоль оси [001] без неиндицируемой линии.

Отметим, что при небольших изменениях угла между образцом и электронным пучком неиндицируемые линии, аналогично запрещенным линиям низкого порядка, на электронограммах по-прежнему ясно наблюдаются. Это обусловлено тем, что указанные линии, будучи расположены в центральной области данного ряда параллельных кикучи-линий, образуются вторичными кикучи-линиями, обладающими большой интенсивностью, и небольшое изменение угла между образцом и первичным пучком электронов не приводит к значительному ослаблению их интенсивности, как это имеет место в случае со вторичной кикучи-линией, приводящей к образованию запрещенной линии избытка 666.

Таким образом, запрещенные кикучи-линии образуются при тех же ориентациях кристаллов относительно первичного электронного пучка, что и запрещенные точечные отражения. Неиндицируемые кикучи-линии могут наблюдаться при тех ориентациях, когда порождающие их вторичные кикучи-линии обладают достаточной интенсивностью. Неиндицируемые и запрещенные кикучи-линии низкого порядка при малых изменениях угла между образцом и первичным пучком сохраняются на электронограммах. Интенсивность запрещенных линий высшего порядка сильно зависит от угла между образцом и первичным пучком электронов. Полученные результаты объясняются на основе явления двойной дифракции кикучи-электронов [6].

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Р.К.Караханян, П.А.Григорян, П.А.Безирганян. Кристаллография, 24, 817 (1979).
- 2. Р.К.Караханян, П.Л.Алексанян. Кристаллография, 32, 1256 (1987).
- 3. Р.К.Караханян, П.Л.Алексанян, А.О.Абоян. Кристаллография, 41, 954 (1996).
- 4. Р.К.Караханян, П.Л.Алексанян. Кристаллография, 36, 1289 (1991) .
- 5. Р.К.Караханян. Кристаллография, 42, 927 (1997).
- Г.Томас, М.Дж.Гориндж. Просвечивающая электронная микроскопия материалов. М., Наука, 1983.
- 7. Р.К.Караханян, П.Л.Алексанян. Кристаллография, 35, 992 (1990).

ԱՐԳԵԼՎԱԾ ԵՎ ՉՅՈՒՅՉԱՎՈՐՎՈՂ ԿԻԿՈՒՉԻ-ԳԾԵՐԻ ԱՌԱՋԱՅՄԱՆ ԿՈՂՄՆՈՐՈՇՈՒՄԱՅԻՆ ԿԱԽՈՒՄԸ

Ռ.Կ. ԿԱՐԱԽԱՆՅԱՆ

Հետազոտված է արգելված և չցուցչավորվող Կիկուչի-գծերի առաջացման կախումը սիլիցիումի բյուրեղի և ընկնող էլեկտրոնային փնջի միջև եղած անկյունից։ Յույց է տրված, որ արգելված գծերն առաջանում են առաջնային փնջի նկատմամբ բյուրեղի նույն այն կողմնորոշումների դեպքում, ինչ որ արգելված կետային անդրադարձումները։ Չցուցչավորվող Կիկուչի-գծերը դիտվում են բյուրեղի ցանկացած կողմնորոշումների դեպքում։ Մտացված փորձնական արդյունքները բացատրված են Կիկուչի-էլեկտրոնների կրկնակի դիֆրակցիայի հիման վրա։

ORIENTATION DEPENDENCE OF FORBIDDEN AND UNINDEXED KIKUCHI LINES FORMATION

R.K. KARAKHANYAN

The dependence of forbidden and unindexed Kikuchi lines formation on the angle between primary electron beam and silicon crystal is investigated by means of transmission Kikuchi patterns. It is shown that forbidden Kikuchi lines are formed under the same orientation of crystal, as forbidden spot reflexes. Unindexed Kikuchi lines can be observed under any orientation of crystal. Obtained experimental results are explained on the basis of Kikuchi electrons double diffraction.