

УДК 548.74

ПОЛНОЕ ОБРАЩЕНИЕ КОНТРАСТА КИКУЧИ-ЛИНИЙ НА ЭЛЕКТРОНОГРАММАХ КРЕМНИЯ

Р.К. КАРАХАНЯН

Ереванский государственный университет

(Поступила в редакцию 14 июня 2001 г.)

Получены кикучи-электронограммы кремния с взаимным обращением контраста кикучи-линий избытка и недостатка по всей их протяженности. Выявлены условия, необходимые для полного обращения контраста кикучи-линий. Дан механизм обнаруженного полного обращения контраста, основанный на двойной дифракции кикучи-электронов.

В соответствии с обычно наблюдаемым контрастом кикучи-линий на фотографиях черная линия недостатка всегда расположена ближе к нулевому рефлексу, чем белая линия избытка [1]. Вместе с тем известно обращение контраста кикучи-линий вдоль их длины для электронограмм как на отражение [2-4], так и на прохождение [5,6]. Обращение контраста кикучи-линий в [4,5] объяснено на основе динамической теории рассеяния электронов. В настоящей работе, в отличие от работ [2-6], посвященных частичному обращению контраста кикучи-линий, когда линии избытка и недостатка взаимно меняют свой контраст на противоположный лишь на отдельных участках своей длины, впервые обнаружено и детально исследовано полное взаимное обращение контраста кикучи-линий, когда они меняют свой контраст на противоположный по всей длине. Показано, что это полное взаимное обращение контраста кикучи-линий легко объясняется уже в рамках элементарного механизма образования кикучи-электронограмм [1], если учесть явление двойной дифракции кикучи-электронов, когда в образовании кикучи-картин участвуют, кроме первичного, и дифрагированные электронные пучки [7].

Кикучи-электронограммы тонких монокристаллических пленок кремния, изготовленных методом химического травления массивных образцов, были получены съемкой на прохождение на электронографе ЭГ-100М при ускоряющем напряжении 100 кВ и падении электронного пучка вблизи кристаллографической оси [112] образца. На рис.1 приведена кикучи-электронограмма кремния с нормальным контрастом кикучи-линий. Как видно из этого снимка, линии недостатка $4\bar{4}0$ и $6\bar{6}0$, прохо-

дящие вблизи нулевого отражения, являются черными, а более удаленные линии избытка $\bar{4}40$ и $\bar{6}60$ являются белыми, что соответствует нормальному контрасту кикучи-линий. Отметим, что электронограмма на рис.1 снята при нахождении вблизи точного отражающего положения плоскостей (555), о чем свидетельствует сама электронограмма, на которой через нулевое отражение проходит кикучи-линия недостатка $\bar{5}55$, а через точечный рефлекс 555 проходит линия избытка 555 .

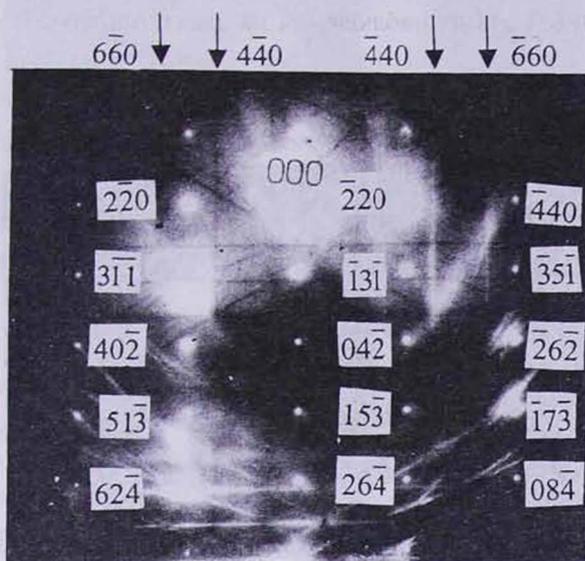


Рис.1. Электронограмма кремния с нормальным контрастом кикучи-линий $\bar{4}40$ и $\bar{6}60$.

Как видно из рис.1, черные кикучи-линии недостатка $\bar{4}40$ и $\bar{6}60$ проходят вблизи ряда точечных отражений $\bar{2}20$, $\bar{3}11$, $\bar{4}02$, $\bar{5}13$, $\bar{6}24$, а белые линии избытка $\bar{4}40$ и $\bar{6}60$ проходят, соответственно, вблизи ряда точечных отражений $\bar{2}20$, $\bar{1}31$, $\bar{0}42$, $\bar{1}53$, $\bar{2}64$ и $\bar{4}40$, $\bar{3}51$, $\bar{2}62$, $\bar{1}73$, $\bar{0}84$. Укажем, что присутствие на электронограмме запрещенных для структуры кремния отражений $\bar{4}02$, $\bar{0}42$ и $\bar{2}62$ вызвано явлением двойной дифракции электронов при образовании точечных электронограмм [1]. На рис.2 приведена кикучи-электронограмма от того же образца кремния после небольшого изменения угла между образцом и электронным пучком (около 36 угл. мин.), когда к положению отражения близки плоскости (333) и (444). Это следует из того, что вблизи нулевого отражения проходят линии недостатка $\bar{3}33$ и $\bar{4}44$, а линии избытка 333 и 444 проходят, соответственно, вблизи точечных рефлексов 333 и 444 . На рис.2 хорошо видно частичное взаимное обращение контраста линий $\bar{4}40$ и $\bar{4}40$. Действительно, в окрестности точечного рефлекса $\bar{5}13$ черная линия не-

недостатка $\bar{4}\bar{4}0$ является белой, а белая линия избытка $\bar{4}\bar{4}0$ является черной в окрестности рефлекса $15\bar{3}$ на участке, противолежащем участку линии недостатка $\bar{4}\bar{4}0$ с обращенным контрастом. При этом в окрестности нулевого рефлекса линии $\bar{4}\bar{4}0$ и $\bar{4}\bar{4}0$ имеют нормальный контраст. Линии типа 660, имея уже на предыдущей электронограмме слабый контраст, теперь уже не наблюдаются, что обусловлено изменением угла между образцом и падающим электронным пучком, приведшим к нарушению дифракционных условий, необходимых для образования линий 660 с достаточным для их наблюдения на электронограмме контрастом.

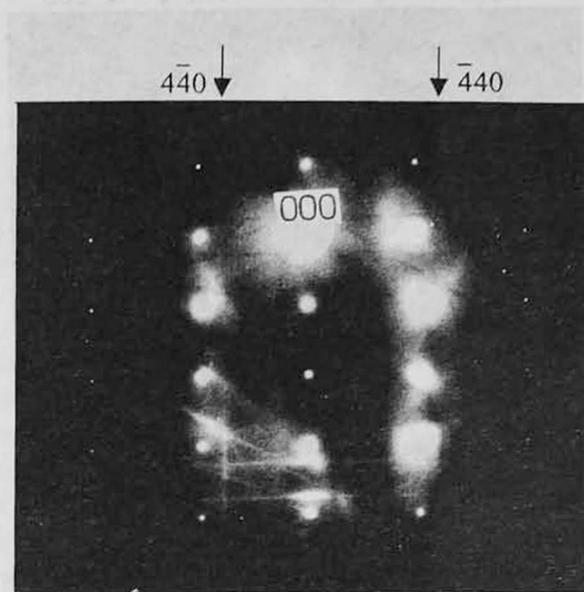


Рис.2. Электронограмма кремния с частично обращенным контрастом кичуци-линий 440.

На рис.3 приведена кичуци-электронограмма от того же образца кремния после дальнейшего изменения угла между образцом и электронным пучком (около 24 угл. мин.). В этом случае, как видно из электронограммы, вблизи нулевого рефлекса проходят линии недостатка $\bar{2}\bar{2}\bar{2}$ и $\bar{3}\bar{3}\bar{3}$, а линии избытка $2\bar{2}\bar{2}$ и $3\bar{3}\bar{3}$ проходят вблизи соответствующих им точечных рефлексов $2\bar{2}\bar{2}$ и $3\bar{3}\bar{3}$. Как ясно видно на рис.3, более близко расположенные к нулевому рефлексу линии $\bar{4}\bar{4}0$ и $\bar{6}\bar{6}0$ являются по всей своей протяженности белыми, а более удаленные от нулевого рефлекса линии $\bar{4}\bar{4}0$ и $\bar{6}\bar{6}0$ являются по всей своей протяженности черными, что противоречит нормальному контрасту кичуци-линий. Таким образом, можно заключить, что на рис.3 имеет место полное взаимное обращение контраста кичуци-линий (440) и (660).

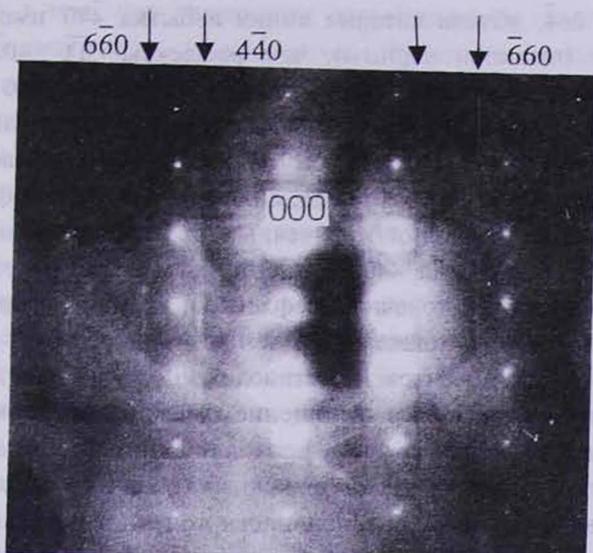


Рис.3. Электронограмма кремния с полностью обращенным контрастом кикучи-линий 440 и 660.

Отметим, что на всех трех приведенных электронограммах вертикальные кикучи-линии (440) и (660) практически не меняют своего положения относительно параллельных им рядов точечных рефлексов. Изменение угла между образцом и падающим электронным пучком приводит к сдвигу только горизонтальных кикучи-линий относительно соответствующих точечных рефлексов, что обусловлено параллельностью этих линий оси вращения образца.

Анализ полученных электронограмм выявил следующие особенности, связанные с контрастом кикучи-линий. На первой электронограмме (рис.1) с нормальным контрастом кикучи-линий точечные рефлексы, вблизи которых параллельно им проходят черные линии недостатка $\bar{4}40$ и $\bar{6}60$, имеют ясно выраженные большие интенсивности, чем точечные рефлексы, вблизи которых параллельно им проходят белые линии избытка $\bar{4}40$, $\bar{6}60$. Исключение составляет лишь рефлекс $\bar{2}20$, который значительно слабее рефлекса $\bar{2}20$. Но в этом случае следует учесть наличие сильного нулевого рефлекса, к которому черные линии $\bar{4}40$, $\bar{6}60$ расположены гораздо ближе, чем белые линии избытка $\bar{4}40$, $\bar{6}60$. Таким образом, линии недостатка $\bar{4}40$, $\bar{6}60$ проходят вблизи более интенсивных точечных рефлексов, чем соответствующие им линии избытка $\bar{4}40$, $\bar{6}60$.

На рис.2 для точечных рефлексов, вблизи которых проходят участки кикучи-линий с обращенным контрастом, распределение интенсивностей обратное. Здесь более интенсивными являются рефлексы

$\bar{131}$, $04\bar{2}$, $15\bar{3}$, $26\bar{4}$, вблизи которых линия избытка $\bar{440}$ имеет обращенный контраст (является черным), чем рефлексы $3\bar{11}$, $40\bar{2}$, $51\bar{3}$, $62\bar{4}$, вблизи которых расположен участок линии недостатка $\bar{440}$ с обращенным (белым) контрастом. Нормальный контраст участков линий избытка и недостатка вблизи рефлексов $\bar{220}$ и $2\bar{20}$ (в верхней части электрограммы) обусловлен, как и прежде, сильным нулевым рефлексом. Наконец, на рис.3 интенсивности точечных рефлексов, вблизи которых проходят линии недостатка $\bar{440}$, $6\bar{60}$ с полным обращением контраста, меньше интенсивностей точечных рефлексов, вблизи которых проходят линии избытка $\bar{440}$, $6\bar{60}$ также с обращенным контрастом.

Таким образом, контраст противоположащих участков данной пары кикучи-линий определяется соотношением между интенсивностями точечных рефлексов, вблизи которых проходят линии избытка и недостатка. Если линия недостатка проходит вблизи точечного рефлекса с большей интенсивностью, чем интенсивность точечного рефлекса, вблизи которого проходит соответствующая линия избытка, то контраст кикучи-линий будет нормальным – обращения контраста не происходит (рис.1). В противном случае, когда линия недостатка проходит вблизи менее интенсивного рефлекса, чем рефлекс, вблизи которого проходит соответствующая линия избытка, на противоположащих участках линий избытка и недостатка, прилегающих к этим двум рефлексам, происходит обращение контраста указанных кикучи-линий (рис.2). Когда линия избытка проходит вблизи ряда точечных рефлексов с интенсивностями, большими интенсивностей рефлексов, вблизи которых проходит линия недостатка, происходит полное взаимное обращение контраста кикучи-линий недостатка и избытка по всей их протяженности (рис.3).

В соответствии с элементарным механизмом образования кикучи-картин, нормальный контраст кикучи-линий обусловлен меньшей интенсивностью электронных волн, распространяющихся вдоль конуса недостаточной интенсивности, по сравнению с интенсивностями волн вдоль конуса избыточной интенсивности. Когда некоторый участок линии избытка проходит вблизи более сильного рефлекса, чем рефлекс, вблизи которого проходит линия недостатка, это соответствует тому, что интенсивность электронных волн вдоль соответствующего участка конуса недостаточной интенсивности становится больше интенсивности волн, распространяющихся вдоль соответствующего участка конуса избыточной интенсивности. Очевидно, что это приведет к взаимному обращению контраста кикучи-линий избытка и недостатка на противоположащих участках вблизи указанных рефлексов. Отметим, что хотя на рис.2 и 3 кикучи-линии избытка отклонены от сильных точечных рефлексов и соответствующие им дифракционные пучки не совпадают с конусом недостатка, тем не менее обращение контраста кикучи-линий имеет место вследствие двойной дифракции кикучи-электрограмм.

Это связано с тем, что увеличение интенсивности электронных волн вдоль конуса недостатка в этом случае обусловлено распространением по образующим этого конуса электронных пучков, образующихся при неупругом рассеянии вышеуказанных дифрагированных пучков, играющих роль первичного электронного пучка. В случае полного взаимного обращения контраста (рис.3) кикучи-линии избытка $\bar{440}$ и $\bar{660}$ проходят вблизи целого ряда сильных точечных рефлексов. Это значит, что вблизи конусов недостаточной интенсивности, образующих кикучи-линии $\bar{440}$ и $\bar{660}$, проходит множество дифрагированных пучков, неупругое рассеяние которых приводит к увеличению интенсивности электронных волн вдоль конусов недостатка. Так как дифрагированные пучки соседствуют друг с другом, то усиление интенсивности будет также происходить на прилегающих друг к другу участках конусов недостатка, что приводит к взаимному обращению контраста кикучи-линий по всей их длине.

Обращение контраста кикучи-линий можно интерпретировать и следующим образом. Исходя из сущности явления двойной дифракции, примем некоторый интенсивный точечный рефлекс, например, $\bar{131}$, в качестве нулевого рефлекса. Тогда относительно этого рефлекса кикучи-линии избытка $\bar{440}$ и $\bar{660}$, будучи расположены к нему ближе, чем линии недостатка $\bar{440}$, $\bar{660}$, будут линиями недостатка, а линии недостатка $\bar{440}$, $\bar{660}$ станут линиями избытка. Можно заключить, что в формировании контраста кикучи-линий избытка $\bar{440}$ и $\bar{660}$ в окрестности сильного точечного рефлекса $\bar{131}$ и соответствующих противолежащих участков линий недостатка $\bar{440}$, $\bar{660}$ преобладающую роль играет сильный дифрагированный пучок $\bar{131}$, а не первичный электронный пучок. Если распространить приведенное рассмотрение на остальные интенсивные точечные рефлексы $\bar{220}$, $\bar{042}$, $\bar{153}$, $\bar{264}$, вблизи которых проходят кикучи-линии избытка $\bar{440}$ и $\bar{660}$, то вновь станет очевидным полное обращение контраста кикучи-линий. В этом случае каждый из этих интенсивных точечных рефлексов, играя роль первичного, становится "нулевым", и проходящие в их окрестности кикучи-линии избытка будут линиями недостатка, а противолежащие участки линий недостатка $\bar{440}$, $\bar{660}$ приобретут контраст избыточной линии, т.е. станут белыми на фотографии. В результате произойдет полное взаимное обращение контраста кикучи-линий ($\bar{440}$) и ($\bar{660}$).

Следует отметить, что чем более контрастна данная пара кикучи-линий, т.е. чем больше разность интенсивностей электронных волн вдоль конусов избытка и недостатка, тем большей интенсивностью должен обладать дифрагированный пучок, чтобы изменить эту разницу в пользу конуса недостатка и привести к обращению контраста кикучи-линий. Одновременно, чем менее контрастна данная пара кикучи-линий, тем меньше может быть требуемая для обращения их контраста ин-

тенсивность дифрагированной волны, и тем дальше от сильного точечного рефлекса может проходить на электронограмме кикучи-линия избытка. С удалением линий избытка от сильного отражения в формировании их контраста начинают участвовать менее интенсивные электронные волны, образованные при неупругом рассеянии данного сильного дифрагированного пучка. Поэтому уменьшается возможность взаимного обращения контраста кикучи-линий, и тем интенсивнее должен быть дифрагированный пучок для получения обращения контраста.

Таким образом, полное взаимное обращение контраста кикучи-линий избытка и недостатка имеет место при прохождении линии избытка вблизи параллельного ей ряда интенсивных точечных рефлексов и является прямым следствием двойной дифракции кикучи-электронов. Аналогично тому, как совпадение интенсивного дифрагированного пучка с конусом избыточной интенсивности приводит к усилению линии избытка вблизи отражений с другими индексами [8], совпадение нескольких прилегающих друг к другу дифрагированных пучков с конусом недостаточной интенсивности приводит к полному взаимному обращению контраста кикучи-линий.

Работа выполнена в рамках научной темы №00-949, финансируемой из государственных централизованных источников Республики Армения.

ЛИТЕРАТУРА

1. П.Хирш, А.Хови, Р.Николсон, Д.Пэшли, М.Уэлан. Электронная микроскопия тонких кристаллов. М., Мир, 1968.
2. B.S.Miyake, K.Nayakawa, T.Kawamura, Y.H.Ohtsuki. Acta Cryst., 31, 32 (1975).
3. T.Kawamura. Phys. Stat. Solidi (a), 27, 27 (1975).
4. С.Л.Дударев, Л.М.Пенг, М.И.Рязанов. Тепловое диффузное рассеяние при дифракции электронов высокой энергии в геометрии Брэгга. Препринт №047-906, М., МИФИ, 23 с., 1990.
5. J.Gjonnes, D.Watanabe. Acta Cryst., 21, 297 (1966).
6. Р.К.Караханян, П.Л.Алексян. Кристаллография, 44, 438 (1999).
7. R.K.Karakhanyan, P.L.Aleksanyan, J.K.Manoucharova. Phys. Stat. Solidi (a), 121, K1 (1990).
8. Р.К.Караханян. Известия НАН Армении, Физика, 35, 38 (2000).

COMPLETE REVERSAL OF KIKUCHI LINES CONTRAST IN DIFFRACTION PATTERNS OF SILICON

R. K. KARAKHANYAN

The Kikuchi patterns of silicon with mutual contrast reversal of excess and defect lines over their entire length are obtained. The conditions necessary for complete contrast reversal of Kikuchi lines are revealed. The mechanism of the found complete contrast reversal is treated in terms of double diffraction of Kikuchi electrons.