

УДК 548.0

КОНТРАСТ КИКУЧИ-ЛИНИЙ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ИНТЕНСИВНЫХ ДИФРАГИРОВАННЫХ ПУЧКОВ

Р.К. КАРАХАНИЯН

Ереванский государственный университет

(Поступила в редакцию 18 декабря 1998 г.)

Получены кикучи-электронограммы (на прохождение) тонких пленок кремния с усилением кикучи-линий избыточной интенсивности вблизи точечных отражений с другими индексами. Показано, что обнаруженное в работе усиление объясняется на основе явления двойной кикучи-дифракции электронов, когда учитывается роль интенсивных дифрагированных электронных пучков в образовании кикучи-картин.

Как известно [1], на электронограммах кикучи-линия с избыточной относительно фона интенсивностью при приближении к точечному отражению с теми же индексами усиливается в его окрестности и приобретает наивысшую яркость при прохождении через это точечное отражение. Указанное усиление обусловлено тем, что в этом случае первичный электронный пучок совпадает с одной из образующих соответствующего конуса избыточной интенсивности и после отражения от данного семейства атомных плоскостей приводит к росту интенсивности избыточной кикучи-линии.

Настоящая работа посвящена ранее неизвестному усилению контраста избыточной кикучи-линии в окрестности точечных отражений с другими индексами, что не предусматривается элементарным механизмом образования кикучи-электронограмм [1]. Кикучи-электронограммы тонких монокристаллических пленок кремния, изготовленных методом химического травления массивных образцов, были получены съемкой на прохождение на электронографе ЭГ-100М при ускоряющем напряжении 100кВ. На рис.1 приведена одна из полученных в работе кикучи-электронограмм кремния, отвечающая падению первичного электронного пучка вблизи кристаллографической оси [112] образца кремния. На этой электронограмме четко наблюдается не

только усиление кикучи-линий избытка $\bar{4}40$ вблизи точечного отражения $\bar{4}40$, что и должно происходить согласно [1], но ясно видно и усиление этой же линии $\bar{4}40$ вблизи точечных отражений $5\bar{3}1$ и $6\bar{2}2$ с другими индексами.

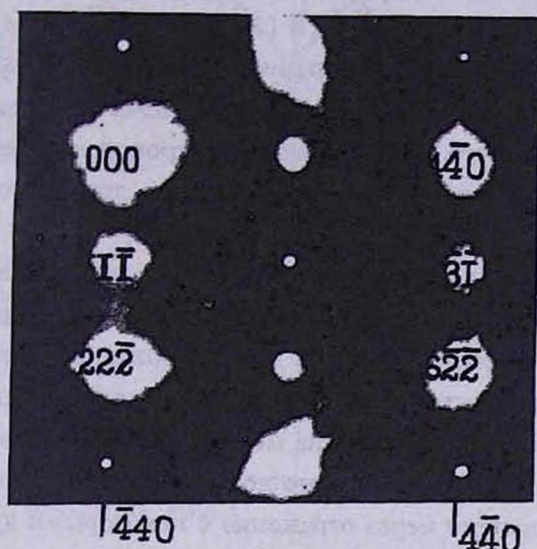


Рис.1. Кикучи-электронограмма кремния с усилением контраста линии избытка $\bar{4}40$ вблизи отражений $5\bar{3}1$ и $6\bar{2}2$.

Анализ полученных электронограмм, показал, что, как видно на рис.1, усиление кикучи-линий избытка имеет место в случае, когда противолежащие участки соответствующих кикучи-линий недостатка проходят вблизи интенсивных точечных отражений. Действительно, в соответствии с [1], при усилении линии избытка $\bar{4}40$ вблизи отражения $\bar{4}40$ противолежащий участок линии недостатка $\bar{4}40$ проходит вблизи нулевого отражения. В то же время, усилению контраста линии избытка $\bar{4}40$ вблизи отражения $5\bar{3}1$ отвечает прохождение противолежащего участка кикучи-линии недостатка вблизи интенсивного отражения $11\bar{1}$, а усиление контраста этой же линии $\bar{4}40$ вблизи отражения $6\bar{2}2$ происходит при прохождении противолежащего участка линии недостатка $\bar{4}40$ вблизи сильного отражения $22\bar{2}$. Отметим, что для кремния точечные отражения $6\bar{2}2$ и $22\bar{2}$, обладая нулевыми структурными факторами, являются запрещенными. Возникновение этих запрещенных отра-

жений, как известно, обусловлено явлением двойной дифракции электронов, когда один раз продифрагировавший пучок претерпевает повторное отражение от некоторого другого семейства атомных плоскостей, в результате чего дважды дифрагированный пучок приводит к образованию запрещенного отражения. Так, запрещенное отражение $22\bar{2}$ обусловлено, в частности, двойной дифракцией первичного электронного пучка от плоскостей $(\bar{1}3\bar{1})$ и $(3\bar{1}\bar{1})$, а запрещенное отражение $6\bar{2}\bar{2}$ образуется при двойной дифракции от плоскостей $(33\bar{3})$ и $(3\bar{5}\bar{1})$. Отметим, что большая интенсивность точечных отражений $11\bar{1}$ и $22\bar{2}$ связана с тем, что при съемке электронограмм соответствующие атомные плоскости находились вблизи точечного отражающего положения.

Усиление контраста линии избытка вблизи отражений с другими индексами можно ясно объяснить на основе явления двойной кикучи-дифракции электронов [2], когда дифрагированные электронные пучки рассматриваются в качестве первичного электронного пучка. Очевидно, что посредством изменения угла между исследуемым образцом и падающим пучком электронов можно достичь того, что данная кикучи-линия избытка пройдет через отражение с некоторыми другими индексами. В соответствии с механизмом образования кикучи-картин [1], это означает, что дифрагированный пучок, отвечающий указанному отражению, совпадает с конусом избыточной интенсивности, ответственным за образование линии избытка. На рис.2 луч J_0 представляет собой падающий пучок электронов, в то время как луч $J(h_2k_2l_2)$ — дифрагированный пучок, соответствующий точечному отражению $(h_2k_2l_2)$. Точка с индексами (000) является нулевым отражением на электронограмме, а точки $(\bar{h}_1\bar{k}_1\bar{l}_1)$ и $(h_1k_1l_1)$ изображают собой, соответственно, кикучи-линии недостатка и избытка, получающиеся при брэгтовском отражении от плоскостей $(h_1k_1l_1)$ электронных волн, образующихся при неупругом рассеянии первичного электронного пучка. Так как луч $J(h_2k_2l_2)$ совпадает с конусом избыточной интенсивности, ответственным за линию избытка $(h_1k_1l_1)$, то линия недостатка $(\bar{h}_1\bar{k}_1\bar{l}_1)$ проходит через отражение $h_2k_2l_2$. В то же время линия избытка $(h_1k_1l_1)$ проходит через точечное отражение, образующееся при брэгтовском отражении пучка $J(h_2k_2l_2)$ от плоскостей $(h_1k_1l_1)$ и имеющее, согласно [1], индексы $h_3 = h_1 + h_2$, $k_3 = k_1 + k_2$, $l_3 = l_1 + l_2$.

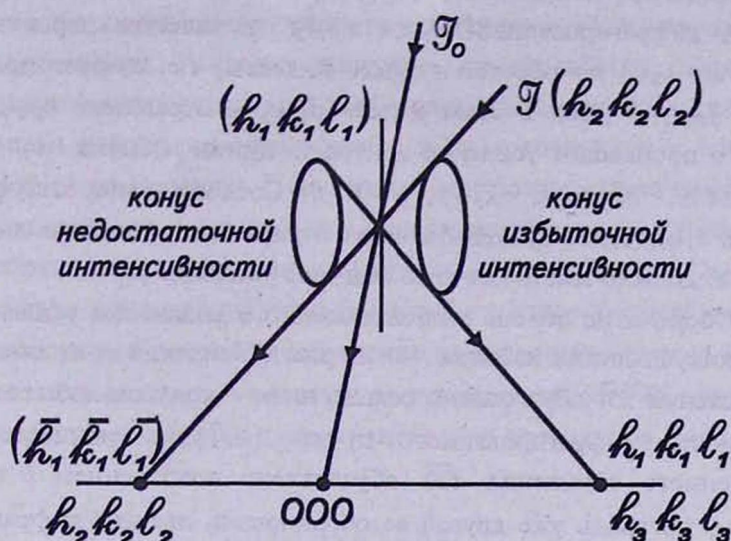


Рис.2. Схема усиления кичуи-линии избытка $(h_1k_1l_1)$ вблизи отражения $(h_3k_3l_3)$.

Ясно, что интенсивный дифрагированный пучок $J(h_2k_2l_2)$, совпадая с конусом избыточной интенсивности, после отражения от плоскостей $(h_1k_1l_1)$ приведет к усилению контраста линии избытка $h_1k_1l_1$ в окрестности отражения $h_3k_3l_3$. Большая интенсивность возбужденного дифрагированного пучка $J(h_2k_2l_2)$ необходима для того, чтобы усиление контраста кичуи-линии избытка было заметным на электронограмме. На дифракционной картине это проявляется в виде возбуждения интенсивного точечного отражения $h_2k_2l_2$, через которое проходит линия недостатка $\bar{h}_1\bar{k}_1\bar{l}_1$. Если отражение $h_2k_2l_2$ достаточно интенсивно, то усиление контраста линии избытка $h_1k_1l_1$ может наблюдаться и на некотором ее удалении от отражения $h_3k_3l_3$, как это имеет место при усилении контраста линии избытка отражения с теми же индексами. Это обусловлено совпадением с конусом избыточной интенсивности электронных волн, образующихся при неупругом рассеянии дифрагированного пучка $J(h_2k_2l_2)$. При увеличении отклонения избытка от точечного отражения ее усиление будет наблюдаться до тех пор, пока интенсивность неупруго рассеянных пучков будет достаточной для этого усиления.

Усиление контраста линии избытка $h_1k_1l_1$ вблизи точечного отражения $h_3k_3l_3$ можно интерпретировать и следующим образом. Если принять дифрагированный пучок $J(h_2k_2l_2)$ в качестве первичного, то отражение $h_2k_2l_2$ приобретет нулевые индексы, т.е. следует произвести замену $h_2k_2l_2 \rightarrow (000)$. В этом случае индексы отражения $h_3k_3l_3$, вблизи которого происходит усиление контраста линии избытка $h_1k_1l_1$, примут значения $h_1 = h_3 - h_2$, $k_1 = k_3 - k_2$, $l_1 = l_3 - l_2$. Следовательно, кикучи-линия избытка $h_1k_1l_1$ будет проходить через отражение с теми же индексами $h_1k_1l_1$, т.е. должно иметь место ее обычное усиление [1].

Обсудим на основе вышеизложенного механизма усиление контраста кикучи-линии избытка $\bar{4}40$ на рис.1. Усиление этой линии вблизи отражения $\bar{5}31$ обусловлено совпадением с конусом избыточной интенсивности дифрагированного пучка $J(11\bar{1})$, а усиление вблизи запрещенного отражения $\bar{6}22$ обусловлено совпадением с этим же конусом, но вдоль уже другой ее образующей, дважды дифрагированного интенсивного пучка $J(22\bar{2})$ с запрещенными индексами. Пучки $(11\bar{1})$ и $(22\bar{2})$, распространяясь вдоль двух различных образующих конуса избыточной интенсивности, приводящей к образованию кикучи-линии избытка $\bar{4}40$, претерпевают брэгговское отражение от плоскостей $(\bar{4}40)$ и приводят к усилению контраста линии избытка $\bar{4}40$ вблизи точечных отражений $\bar{5}31$ и $\bar{6}22$. Отметим, что наблюдаемому на рис.1 усилению контраста кикучи-линии избытка $\bar{4}40$ вблизи отражения $\bar{4}40$ соответствует совпадение с некоторой третьей образующей того же конуса уже первичного электронного пучка.

Теперь примем в качестве нулевого отражения $11\bar{1}$. Следовательно, отражению $\bar{5}31$ нужно приписать индексы $\bar{4}40$. Если в качестве нулевого отражения взять запрещенное отражение $22\bar{2}$, то запрещенному отражению $\bar{6}22$ следует приписать те же индексы $\bar{4}40$. Таким образом, отражения $\bar{5}31$ и $\bar{6}22$, вблизи которых происходит усиление кикучи-линии избытка $\bar{4}40$, приобретают индексы $\bar{4}40$ усиливаемой линии. На электронограмме (рис.1) это выражается тем, что линия недостатка $\bar{4}40$ проходит вблизи интенсивных "нулевых" точечных отражений $11\bar{1}$ и $22\bar{2}$, а линия избытка $\bar{4}40$ – вблизи отражений $\bar{5}31$ и $\bar{6}22$, приобретших индексы $\bar{4}40$. В результате получается усиление кикучи-линии избытка вблизи точечного отражения с теми же индексами [1].

Можно заключить, что усиление контраста кикучи-линий из-

бытка вблизи точечных отражений с другими разрешенными индексами связано с возбуждением интенсивных, однократно дифрагированных пучков и их совпадением с соответствующими конусами избыточной интенсивности. Усиление контраста линий избытка вблизи запрещенных точечных отражений обусловлено возбуждением интенсивных, дважды дифрагированных пучков и их совпадением с конусами избыточной интенсивности. Полученные результаты свидетельствуют о том, что однократно и дважды дифрагированные пучки не только вызывают образование запрещенных и неинициируемых линий [2-4], но и существенным образом влияют на контраст тех кикучи-линий, возникновение которых обусловлено собственно электронным пучком.

Работа выполнена в рамках научной темы 96-902, 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. Р.К.Карахян, П.А.Григорян, П.А.Безиргян. Кристаллография, 24, вып.5, 817 (1979).
3. Р.К.Карахян, П.Л.Алексанян. Кристаллография, 32, вып.6, 1256 (1987).
4. Р.К.Карахян, П.Л.Алексанян, А.О.Абоян. Кристаллография, 41, вып.5, 954 (1996).

ԿԻԿՈՒՉԻ-ԳԾԵՐԻ ԿՈՆՏՐԱՍՏԸ ԻՆՏԵՆՍԻՒԻ
ԴԻՖՐԱԿՑԻԱՆ ՓԼՁԵՐԻ ԳՐԳՈՍՄԸ ԴԵՊՈՒՄ

Ռ.Կ. ԿԱՐԱԽԱՆՅԱՆ

Միջիցումի բարակ բաղաձայնից անցումային եղանակով ստացվել են Կիկուչի-էլեկտրոնագրամներ այլ ինդեքսներով կետային ամրադարձումների մոտակայքում ավելցուկային ինտենսիվությամբ Կիկուչի-գծերի կոմորաստի ուժեղացմամբ: Այդ ուժեղացումը բացատրված է էլեկտրոնների կոկնակի Կիկուչի-դիֆրակցիայի հիման վրա, երբ հաշվի է առնվում դիֆրակցված փնջերի դերը Կիկուչի-պատկերների առաջացման ժամանակ:

CONTRAST OF KIKUCHI-LINES AT EXCITATION OF INTENSE DIFFRACTED BEAMS

R.K. KARAKHANYAN

Transmission Kikuchi patterns from single-crystalline silicon are studied. An enhanced contrast of the excess line in the region of a Laue spot with other indices is observed. This enhancement of contrast is explained on the basis of Kikuchi electrons double diffraction, when the role of intense diffracted beams is taken into account during the Kikuchi patterns formation.