
**ДИФРАКЦИЯ И РАССЕЯНИЕ
ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ**

УДК 548.0:539.27

**ЭЛЕКТРОНОГРАММЫ С МАКСИМУМАМИ ТЕПЛООВОГО
ДИФФУЗНОГО РАССЕЯНИЯ ВОКРУГ КИКУЧИ-ЛИНИЙ**

© 2011 г. Р. К. Караханян, К. Р. Караханян

*Ереванский государственный университет, Армения**E-mail: rkarakhanyan@yandex.ru*

Поступила в редакцию 10.06.2010 г.

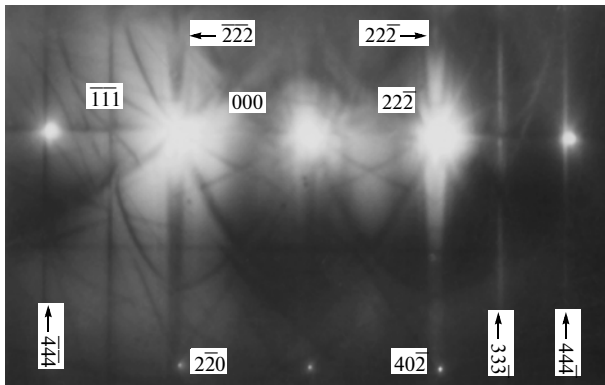
Получены электронограммы кремния на прохождение с тепловыми диффузными максимумами вокруг кикучи-линий, являющимися аналогами максимумов теплового диффузного рассеяния электронов вокруг точечных рефлексов. Установлено, что диффузные максимумы наблюдаются лишь вокруг кикучи-линий с индексами, запрещенными для структуры кремния. Обсуждены дифракционные условия образования этих максимумов.

Тепловое диффузное рассеяние электронов играет важную роль в формировании электронно-микроскопических изображений и дифракционных картин [1, 2]. В [3–7] исследовано влияние теплового диффузного рассеяния электронов на контраст в электронной микроскопии. В [8–12] изучено тепловое диффузное рассеяние в различных кристаллах при образовании электронограмм с присутствием на них кикучи-линий, а также точечных рефлексов с окружающими их тепловыми диффузными пятнами. В [12] развита динамическая теория теплового диффузного рассеяния электронов и показано, что оно участвует в формировании интенсивности кикучи-линий. Динамическая теория образования кикучи-электронограмм дана в [13]. Теория теплового диффузного рассеяния при дифракции электронов высокой энергии в геометрии Брэгга сформулирована в [14], где, в частности, показано, что динамические эффекты усиливают фон теплового диффузного рассеяния в окрестности дифракционного рефлекса. Вместе с тем в литературе не сообщается о тепловых диффузных максимумах в окрестности кикучи-линий, как это имеет место для точечных рефлексов.

Целью настоящей работы являлось изучение влияния теплового диффузного рассеяния на кикучи-электронограммы кремния. Тонкие кристаллы кремния были изготовлены из массивных монокристаллов методом химического травления. Электронограммы на прохождение были получены на электронографе ЭГ-100М при ускоряющем напряжении 100 кВ. Для увеличения интенсивности теплового диффузного рассеяния электронов с оптической оси электронографа была выведена подвижная конденсорная диафрагма, что обеспечивает определенный нагрев образца [15].

На рисунке приведена кикучи-электронограмма кремния при падении первичного электронного пучка вблизи оси [112] образца кремния. На ней указаны индексы дифракционных точечных рефлексов, а кикучи-линии отмечены их индексами со стрелками. На электронограмме темная кикучи-линия недостатка $\bar{2}\bar{2}\bar{2}$ проходит вблизи нулевого рефлекса 000, а светлая линия избытка $22\bar{2}$ – вблизи рефлекса $22\bar{2}$. Отметим, что образование кинематически запрещенных рефлексов (222) обязано, в частности, двойной дифракции электронов [1]. Запрещенные кикучи-линии (222), являющиеся аналогами запрещенных рефлексов, как показано в [16,17], обусловлены двойной дифракцией кикучи-электронов, когда дифрагированные пучки играют роль первичного и формируют вторичные кикучи-линии, которые приводят к появлению линий (222). Так, запрещенная линия избытка $22\bar{2}$ обусловлена вторичной линией избытка $44\bar{4}$ с источником в дифрагированном пучке $\bar{1}\bar{1}\bar{1}$, а запрещенная линия недостатка $\bar{2}\bar{2}\bar{2}$ - вторичной линией недостатка $\bar{4}\bar{4}\bar{4}$ с источником в дифрагированном пучке $11\bar{1}$.

На электронограмме кикучи-линии избытка и недостатка (333) и (444) являются обычными для электронограмм прямыми линиями, в то время, как кикучи-линии избытка $22\bar{2}$ и недостатка $\bar{2}\bar{2}\bar{2}$ соответственно в окрестности рефлексов 000 и $22\bar{2}$ имеют сложную, “стреловидную” форму и сравнительно широки. Вокруг запрещенных кикучи-линий (вдоль них) в окрестности рефлексов 000 и $22\bar{2}$ имеется хорошо выраженное диффузное распределение интенсивности. Полагаем, что эти распределения интенсивности являются максимумами теплового диффузного рассеяния электронов вокруг кикучи-линий и их можно



Электроннограмма кремния с тепловыми диффузными максимумами вокруг кикучи-линий $22\bar{2}$ и 222 .

рассматривать в качестве аналогов тепловых диффузных максимумов вокруг точечных рефлексов (т.е. вокруг узлов обратной решетки). При этом подобно тому, как светлая линия избытка $22\bar{2}$ и темная линия недостатка $\bar{2}22$ имеют разный по знаку контраст, окружающие их диффузные максимумы имеют контраст такого же характера. Действительно, на участках обеих линий (222) выше точечных рефлексов 000 и $22\bar{2}$ знак контраста диффузных максимумов совпадает со знаком контраста соответствующей им линии – светлая линия избытка $22\bar{2}$ окружена светлым диффузным максимумом, темная линия недостатка $\bar{2}22$ окружена темным диффузным максимумом. На участках этих же линий непосредственно ниже точечных рефлексов 000 и $22\bar{2}$ знаки контраста линий и окружающих их диффузных максимумов различны. Так, темная линия недостатка $\bar{2}22$ ниже рефлекса 000 обращает свой контраст и становится светлой, а окружающий ее диффузный максимум является темным. Похожая картина наблюдается и в случае светлой линии избытка $22\bar{2}$. Ниже точечного рефлекса $22\bar{2}$ эта линия обращает свой контраст и становится темной, а окружающий ее диффузный максимум сохраняет свой светлый контраст. При дальнейшем продвижении вдоль кикучи-линий (222) к нижней границе электроннограммы кикучи-линии избытка $22\bar{2}$ и недостатка $\bar{2}22$ приобретают присущий им нормальный соответственно светлый и темный контраст. Таким образом, кикучи-линии недостатка $\bar{2}22$ и избытка $22\bar{2}$ вместе с окружающими их тепловыми диффузными максимумами по всей своей протяженности имеют относительно друг друга противоположный по знаку контраст. Помимо этого максимумы теплового диффузного рассеяния имеют одинаковую форму (изодиффузные линии одинаковы) и симметричны относительно соответствующих им кикучи-линий, что подобно

известной симметричности тепловых диффузных максимумов (изодиффузных линий) относительно точечных рефлексов. Вместе с тем диффузные максимумы вокруг кикучи-линий не симметричны относительно рефлексов 000 и $22\bar{2}$, что свидетельствует об их принадлежности именно кикучи-линиям. Одновременно укажем, что на электроннограмме (рисунок) тепловые диффузные максимумы вокруг точечных рефлексов отсутствуют.

Проведенные электронографические исследования однозначно показали, что тепловые диффузные максимумы вокруг запрещенных линий (222) наблюдаются лишь при очень незначительных, почти близких к нулю отклонениях кикучи-линии избытка $22\bar{2}$ от точечного рефлекса $22\bar{2}$ (параметр отклонения s близок к нулю). Кроме того, даже при равных по абсолютной величине отклонениях, если s меньше нуля, т.е. когда линия избытка $22\bar{2}$ расположена ближе к нулевому рефлексу, чем точечный рефлекс $22\bar{2}$, тепловые диффузные максимумы вокруг кикучи-линий (222) более контрастны, лучше видны, чем в случае параметра отклонения s , большем нуля, когда линия избытка $22\bar{2}$ находится дальше от нулевого рефлекса, чем рефлекс $22\bar{2}$. Отметим, что на рисунке приведена электроннограмма, полученная при параметре отклонения s , меньшем нуля. Уже при незначительном увеличении расстояния между кикучи-линией избытка $22\bar{2}$ и рефлексом $22\bar{2}$ (т.е. при увеличении параметра отклонения s) посредством наклона образца относительно падающего пучка электронов в ту или другую сторону до двух-трех угловых минут тепловые диффузные максимумы исчезают, остаются лишь кикучи-линии (222), подобные кикучи-линиям (333) и (444). Описанная картина похожа на поведение тепловых диффузных пятен на электроннограммах сфалерита на отражение, где их интенсивность также различна в зависимости от того, в какую сторону от точечного рефлекса отклонена кикучи-линия, даже если эти отклонения одинаковы [11, 12].

Следует заметить, что запрещенная линия избытка $22\bar{2}$ (рисунок) проходит, кроме рефлекса $22\bar{2}$, вблизи и других кинематически запрещенных рефлексов, например, $40\bar{2}$, $04\bar{2}$, когда линия недостатка $\bar{2}22$ проходит вблизи рефлексов $2\bar{2}0$, $\bar{2}20$. Но в окрестности всех этих точечных рефлексов запрещенные линии (222) не окружены тепловыми диффузными максимумами. Запрещенные линии (222) при продвижении вдоль них к рефлексам $2\bar{2}0$ и $40\bar{2}$ постепенно сужаются, причем их относительно большая ширина обусловлена тепловыми диффузными максимумами, сформировавшимися вблизи рефлексов 000 и

$22\bar{2}$, где их ширина наибольшая. Для образования тепловых диффузных максимумов необходимо прохождение линии избытка $22\bar{2}$ именно в непосредственной близости от точечного рефлекса с теми же индексами $22\bar{2}$. Если учесть, что образование и запрещенных рефлексов (222) и запрещенных кикучи-линий (222) обусловлено явлением двойной дифракции [1, 16, 17], то можно полагать, что возникновение тепловых диффузных максимумов обусловлено взаимодействием электронных волн, формирующих запрещенные кикучи-линии и рефлексы с индексами (222). В связи с этим отметим, что кикучи-линии (222) образуются при неупругом рассеянии дифрагированных пучков $11\bar{1}$ и $\bar{1}\bar{1}1$, а рефлексы $22\bar{2}$ и $\bar{2}\bar{2}2$ образуются, в частности, вследствие двойной дифракции электронов соответственно от семейств плоскостей ($11\bar{1}$) и ($\bar{1}\bar{1}1$).

Следует отметить, что на электронограммах, полученных с конденсорной диафрагмой на оси электронографа, тепловые диффузные максимумы вокруг запрещенных кикучи-линий не были обнаружены. В этом случае, согласно [18], наблюдается лишь усиление запрещенной кикучи-линии избытка $22\bar{2}$ вблизи запрещенного рефлекса $22\bar{2}$. В [19–21] изучено влияние температуры кристалла на кикучи-электрограммы, но и в этих работах тепловые диффузные максимумы вокруг кикучи-линий не наблюдались. В частности, в [21] были получены кикучи-электрограммы кремния при падении электронного пучка вблизи оси $[111]$ образца, когда образования запрещенных точечных рефлексов и кикучи-линий не происходит, а значит в соответствии с результатами настоящей работы тепловые диффузные максимумы вокруг кикучи-линий и не могли возникнуть.

Таким образом, обнаружены тепловые диффузные максимумы вокруг кикучи-линий, являющиеся аналогами тепловых диффузных максимумов вокруг точечных рефлексов, и найдены условия их образования. Полученные экспериментальные результаты могут быть объяснены на основе динамической теории дифракции электронов [12–14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хирш П., Хови А., Николсон Р. и др. Электронная микроскопия тонких кристаллов. М.: Мир, 1968. 574 с.
2. Каули Дж. Физика дифракции. М.: Мир, 1979. 431 с.
3. Yamamate T., Choi M.-S., Majima S. et al. // Phil. Mag. 2008. V. 88. P. 1027.
4. Wang Z.L. // Micron. 2003. V. 34. P. 141.
5. Wang Z.L. // Phil. Mag. 1992. V. 65. P. 559.
6. Hall C.R., Hirsch P.B. // Proc. Roy. Soc. A. 1965. V. 286. P. 158.
7. Peng L.-M., Cowley J.M. // Ultramicroscopy. 1989. V. 29. P. 168.
8. Peng L.-M., Cowley J.M. // Ultramicroscopy. 1988. V. 26. P. 227.
9. Rossouw C.J., Bursill L.A. // Proc. Roy. Soc. A. 1986. V. 408. P. 149.
10. Rez P., Humphreys C.J., Whelan M.J. // Phil. Mag. 1977. V. 35. P. 81.
11. Miyake S., Kohra K., Takagi M. // Acta Cryst. 1954. V. 7. P. 393.
12. Takagi S. // J. Phys. Soc. Jpn. 1958. V. 13. P. 278. P. 287.
13. Chukhovskii F.N., Alexanian L.A., Pinsker Z.G. // Acta Cryst. A. 1973. V. 29. P. 38.
14. Дударев С.Л., Пенг Л.М., Рязанов М.И. Тепловое диффузное рассеяние при дифракции электронов высокой энергии в геометрии Брэгга. Препринт. М.: МИФИ, № 047-90.1990. 23 с.
15. Утевский Л.М. Дифракционная электронная микроскопия в металловедении. М.: Металлургия, 1973. 584 с.
16. Караханян Р.К., Григорян П.А., Безирганян П.А. // Кристаллография. 1979. Т. 24. С. 817.
17. Karakhanyan R.K., Aleksanyan P.L., Manucharova J.K. // Phys. Status Solidi. A. 1990. V. 121. P. K1.
18. Караханян Р.К., Алексанян П.Л. // Кристаллография. 1990. Т. 35. С. 992.
19. Berjot G., Bonnet N., Carnove J.C., Laberriquerie A. // Phys. Status Solidi. A. 1975. V. 29. P. 141.
20. Mazel A., Ajustron F. // Phys. Status Solidi. A. 1976. V. 35. P. 197.
21. Караханян Р.К., Григорян П.А. // Кристаллография. 1979. Т. 24. С. 371.