

УДК 537.311.333

ОБРАЗОВАНИЕ ДВОЙНИКОВ И ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ МОДИФИКАЦИИ В КРЕМНИИ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИНТЕНСИВНЫМИ ПУЧКАМИ ИОНОВ Ag^+

Ф. Ф. Комаров, А. П. Новиков, С. А. Петров

Проведена полная интерпретация электронно-дифракционных картин от монокристаллов кремния (001)-ориентации, облученных ионами Ag^+ с энергией 150 кэВ и плотностью тока ионного пучка ~ 100 мкА/см². Установлено, что в процессе рекристаллизации аморфизованных слоев как при высокоинтенсивном ионном облучении, так и в случае термического отжига при температуре 1073 К образцов, предварительно облученных ионами Ag^+ дозой $2 \cdot 10^{15}$ см⁻², создаются сходные условия для формирования вторичных нарушений. После окончания процесса твердофазной эпитаксии электронно-дифракционные картины различны. В частности, на электронограммах в случае высокоинтенсивного ионного облучения не наблюдаются первичные двойники типа $1/3 \{511\}$ и $1/3 \{822\}$, но появляются $\{0002\}$ -рефлексы, гексагональной модификации кремния.

Из литературных источников о кристаллической структуре кремния, облученного большими дозами (10^{16} см⁻²) ионов P^+ , As^+ и Ag^+ в самоотжиговом режиме, известно, что после высокоинтенсивного ионного легирования (ВИЛ) кристалл содержит повышенную концентрацию остаточных нарушений на глубине, превышающей средний проективный пробег ионов [¹⁻³].

В настоящей работе проведен анализ дифракционных картин от двойников при высокоинтенсивном ионном облучении в сравнении с термическим отжигом кристаллов кремния, предварительно облученных ионами Ag^+ . Имплантированные образцы исследовались с помощью методов обратного резерфордского рассеяния (РОР) каналированных протонов и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

Кремниевые пластины марки КЭФ-20 (001)-ориентации облучались в непрерывном режиме сфокусированным пучком ионов Ag^+ с энергией 150 кэВ. Плотность ионного тока ~ 100 мкА/см², времена имплантации 2, 14 и 30 с. Энергетические спектры РОР протонов с начальной энергией 600 кэВ снимались для случая каналирования вдоль $\langle 100 \rangle$ и для неориентированной мишени. ПЭМ исследования проводились на клиновидных участках имплантированных образцов, приготовленных методом химико-динамического утонения.

Из спектров РОР (рис. 1) видно, что уже после 2 с имплантации вблизи поверхности образуется аморфный слой толщиной 150—180 нм (кривая 1). Плотность мощности падающего пучка 15 Вт/см², что обеспечивает быстрый нагрев мишени. Рост температуры мишени способствует динамическому отжигу нарушений, образующихся в монокристаллической решетке матрицы. После достижения некоторой критической температуры над разупорядочением структуры начинает доминировать процесс отжига дефектов. После 16—20 с имплантации устанавливается максимальная температура мишени 1070 К. Кривая 2 показывает, что облучение монокристаллов интегральным потоком 8.6×10^{15} ион/см² приводит к уменьшению толщины нарушенного слоя в два раза. Ориентированная рекристаллизация происходит как из глубины, так и со стороны поверхности. Анализ спектров РОР от мишени, облученной интеграль-

ным потоком $1.8 \cdot 10^{16}$ ион/см² (кривая 3), позволяет заключить, что при ВИЛ в результате самоотжига происходит полная кристаллизация аморфного слоя. Область, содержащая максимальное количество нарушений, формируется на глубине, превышающей средний проективный пробег ионов R_p .

В результате ПЭМ исследований было установлено, что после имплантации ионов аргона в течение 14 с на электронограммах наряду с матричными рефлексами и размытыми диффузными кольцами наблюдаются дополнительные иррациональные пятна (экстрарефлексы). Анализ дифракционных картин от данных двойниковых структур осуществлялся при помощи стереографических проекций с учетом возможности явления вторичной дифракции [4, 5]. Проведенный анализ дифракционных картин при высокоинтенсивном ионном облучении позволил выделить следующие экстрарефлексы (рис. 2, а).

Восемь дифракционных пятен в $\langle 100 \rangle$ -направлениях, имеющих индексы типа $1/3 \{511\}$ в координатной системе обратной решетки матрицы. Рефлексы этой группы — результат дифракции на всех возможных первичных двойниках.

Такие же позиции на электронограмме занимают рефлексы вторичной дифракции на структуре первичный двойник—матрица. Здесь и в дальнейшем в тексте имеется в виду ситуация, когда пучок, дифрагированный в одном элементе структуры (двойнике или матрице), имеет геометрическую возможность дифрагировать в другом элементе [5].

Четыре пары экстраятен, расположенных на кольце (220), имеют индексы

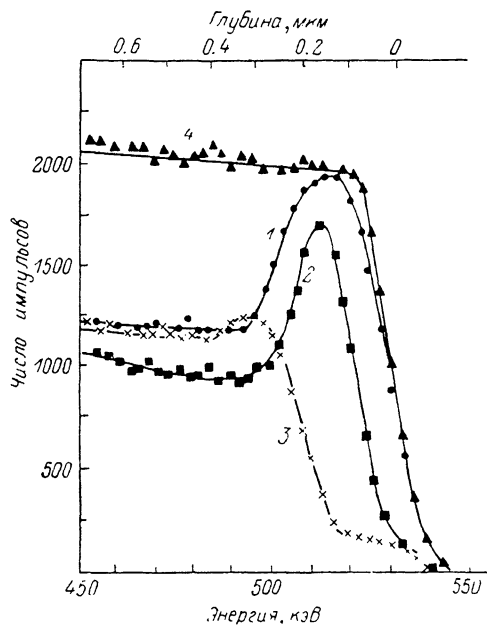


Рис. 1. Энергетические спектры обратного резерфордского рассеяния протонов в кристаллах кремния с ориентацией (001), облученных ионами Ar⁺ с энергией 150 кэВ.

Время облучения (с): 1 — 2, 2 — 14, 3 — 30; 4 — спектр для неориентированного кристалла.

типа $1/3 \{822\}$ и возникают в результате дифракции на первичных двойниках. Однако дальнейший анализ при построении стереографических проекций показал, что месторасположение каждого из вышеуказанных рефлексов с точностью $1-2^\circ$ совпадает с расположением двух пятен от вторичных двойников.

На кольце (311) можно выделить следующие группы экстрарефлексов.

1) Четыре рефлекса типа $1/3 \{771\}$, лежащих на $\langle 110 \rangle$ -направлениях. Каждый из них может являться результатом суперпозиции пучков, дифрагированных на первичных и вторичных двойниках, т. е. $g_{1/3\{771\}} = g_{1/3\{822\}} + g_{1/3\{511\}}$.

2) Четыре пары смежных групп рефлексов, лежащих на угловом расстоянии $\sim 19^\circ$ от $\langle 100 \rangle$ -направлений. В указанные области попадают рефлексы, обусловленные матрицей, первичными и вторичными двойниками, а также в результате вторичной дифракции. В частности, имеем: $g_{311} = g_{1/3\{511\}} + g_{1/3\{822\}}$.

На дифракционном кольце (331) находятся четыре рефлекса в $\langle 110 \rangle$ -направлениях, которые являются результатом суперпозиции узлов обратной решетки матрицы и первичных двойников. Получаем, что $g_{331} = g_{400} + g_{1/3\{822\}}$. Наличие на электронограммах от образцов кремния, облученных в течение 14 с, рефлексов от микродвойников позволяет сделать вывод о том, что произошла частичная кристаллизация аморфного слоя. Формирование микродвойников является эффектом, сопутствующим процессу кристаллизации.

Электронно-дифракционная картина образцов монокристаллического Si при высокоинтенсивном ионном облучении ($t=14$ с) имеет сходный характер с электронно-дифракционной картиной от образцов кремния (001)-ориентации,

облученных ионами аргона дозой $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ и отожженных при температуре 1073 К (рис. 2, б). В обоих случаях на электронограммах присутствуют двойниковые пятна: $1/3 \{511\}$, $1/3 \{822\}$, $1/3 \{771\}$. Это позволяет заключить, что в процессе твердофазной эпитаксии как при ВИЛ, так и обычном термическом отжиге кристаллов кремния, предварительно облученных ионами Ag^+ , сохраняются сходные условия для образования вторичных дефектов. Помимо рефлексов, разрешенных для структуры типа алмаза, на экспериментальных элек-

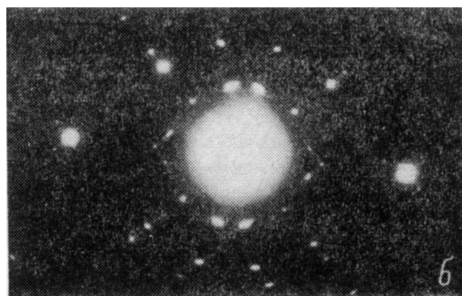
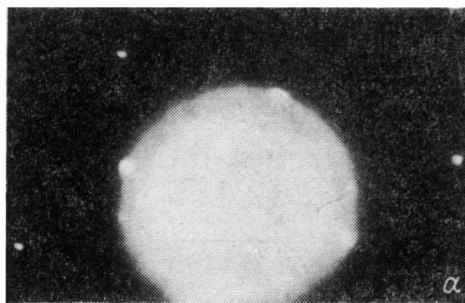


Рис. 2. Электронограммы от образцов кремния (001)-ориентации: а) облученных в течение 14 с ионами Ag^+ с энергией 150 кэВ при плотности тока ионного пучка $\sim 100 \text{ мкА/см}^2$; б) облученных ионами Ag^+ дозой $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ и отожженных при температуре 1073 К.

тронограммах (рис. 2, б) наблюдаются запрещенные отражения. К ним относятся четыре пары смежных рефлексов в $\langle 100 \rangle$ -направлениях, которые отстоят от центра дифракционной картины на расстояниях, соответствующих (222)-запрещенному кольцу. Было установлено, что данные экстрарефлексы являются результатом вторичной дифракции. Также дифракционные картины показывают наличие четырех пятен, лежащих на $\langle 110 \rangle$ -направлениях, которые обусловлены дифракцией на вторичных двойниках. На электронограммах ВИЛ

вышеуказанные рефлексы отсутствуют, но зато присутствуют размытые диффузные кольца, которых нет на рис. 2, б. Из этого рисунка видно, что на дифракционной картине появляются так называемые «ложные» рефлексы $\{200\}$, запрещенные для структуры типа алмаза правилами отбора. Их появление можно связывать с локальным усилением интенсивности в месте пересечения обратных стержней от смежных узлов $1/3 \{511\}$ первичных двойников. Данных «ложных» дифракционных пятен при высокоинтенсивном облучении ионами Ag^+ в течение 14 с монокристаллов Si не выявлено.

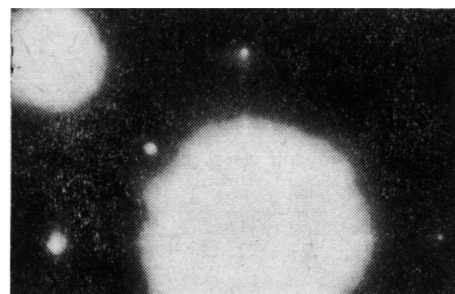


Рис. 3. Электронограмма от образцов кремния (001)-ориентации, облученных в течение 30 с ионами Ag^+ с энергией 150 кэВ при плотности тока ионного пучка $\sim 100 \text{ мкА/см}^2$.

В образцах, подвергнутых облучению в течение 30 с, аморфизированный слой полностью кристаллизовался и диффузные кольца на электронограммах исчезли (рис. 3). Наряду с двойниковыми рефлексами типа $1/3 \{771\}$ на электронно-дифракционных картинах появляются рефлексы $\{200\}$. Их появление можно трактовать как результат вторичной дифракции. Но двойниковые пятна типа $1/3 \{511\}$, которые присутствовали на электронограммах ВИЛ при $t=14$ с, уже не были обнаружены.

Кроме того, помимо двойниковых и матричных рефлексов, присутствуют также рефлексы, интерпретируемые как отражения от плоскостей гексагональной модификации кремния вюрцитного типа ($a=3.80 \text{ \AA}$ и $c=6.28 \text{ \AA}$). Эти рефлексы не могут быть объяснены с точки зрения дифракции от идеального кристалла. Четыре вытянутых вдоль $\langle 110 \rangle$ -направлений матрицы дифракционных пятна примерно соответствуют расстоянию между $\{111\}$ -плоскостями Si.

Указанные рефлексы могут быть интерпретированы как отражения от плоскостей {0002} гексагонального кремния вюрцитного типа. Межплоскостные расстояния для {0002}-отражений составляют 3.15 \AA , которые хорошо согласуются с литературными данными [6]. Исходя из формы дифракционных пятен, можно заключить, что ГПУ включения образуются в виде тонких пластин. Механизм образования ГПУ фазы кремния в настоящее время еще до конца не выяснен.

Литература

- [1] *Holland O. W., Narayan I.* Appl. Phys. Lett., 1984, v. 44, N 8, p. 758—760.
- [2] *Gabilli E., Lotti R., Lulli G. et al.* Jap. J. Appl. Phys., 1985, v. 24, N 1, p. 14—16.
- [3] *Tan T. Y., Foll H., Hu S. M.* Phys. Mag. A, 1981, v. 44, N 1, p. 127—140.
- [4] *Утевский Л. М.* Дифракционная электронная микроскопия в металловедении. М.: Металлургия, 1973. 584 с.
- [5] *Хирш П., Хови А., Николсон Р. и др.* Электронная микроскопия тонких кристаллов. М.: Мир, 1968. 575 с.
- [6] *Kasper I. S., Wentorf R. H.* Science, 1977, v. 197, N 4303, p. 599.

Научно-исследовательский институт
прикладных физических проблем
им. А. Н. Севченко
при Белорусском государственном
университете им. В. И. Ленина
Минск

Поступило в Редакцию
30 сентября 1986 г.
В окончательной редакции
14 мая 1987 г.