

05.3; 11

© 1992

ПОДПОРОГОВЫЕ ЭФФЕКТЫ С МОДИФИКАЦИЯМИ
ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ В КРЕМНИИМ.С. Ю н у с о в, С.Н. А б д у р а х м а н о в а,
М.А. З а й к о в с к а я, М.У. К а л а н о в

Впервые получен медленно развивающийся фазовый переход (ФП) $Si - SiO_2$ в бездислокационном кремнии с концентрацией кислорода $\leq 10^{16} \text{ см}^{-3}$, выращенном методом бестигельной зонной плавки, не зависимо от типа и концентрации основной легирующей примеси. Процесс формирования ФП начинается в поле рентгеновского излучения и продолжается при долговременной выдержке (ДВВ) после прекращения облучения. Максимальная энергия X-квантов сплошного спектра 50 кэВ, плотность мощности в пучке $W \approx 1 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$. Образцы различной конфигурации толщиной от 0.3 до 5 мм вырезались из слитков перпендикулярно оси роста $\langle 111 \rangle$. Облучение проводилось при комнатной температуре в течение 1-10 часов.

Получен ряд взаимосвязанных объемных и поверхностных эффектов с приоритетом первых. Рентгенофазовый анализ (РФА) объема образцов кремния обнаружил нарастание с дозой облучения Φ и в процессе ДВВ фазы кварца как в области коллимированного X-пучка, так и за его пределами. Это возможно лишь в случае наличия затравок фазы SiO_2 [1]. Затравками могут быть произвольно расположенные, вытянутые по оси роста субмикроскопические кварцевые нити, кристаллизация которых имеет спиральный характер [2]. Новая кристаллическая фаза состоит из смеси Si и композита SiO_2 с эффективными параметрами ячеек: $a_{Si} = 5.434 \text{ \AA}$, $\bar{a}_{SiO_2} = 4.98 \text{ \AA}$, $\bar{c}_{SiO_2} = 5.87 \text{ \AA}$. Объемная доля фазы SiO_2 по отношению к основной фазе Si достигала в пределе ($\Phi \approx 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ и ДВВ до 8 месяцев) 10%, в то время как в исходном состоянии и сразу после облучения она составляла 5 и 7% соответственно.

На облученных шайбах $Si \langle B \rangle$ и $Si \langle P \rangle$ в области коллимированного X-пучка появляется светлое пятно (рис. 1), которое по данным РФА связано со значительным увеличением аморфного приповерхностного слоя, что наблюдалось ранее в [3] при $W \approx 1 \text{ МВт} \cdot \text{см}^{-2}$ в импульсе. Конфигурация аморфного пятна и окружающей его четырехлепестковым ореолом тонкой пленки конденсата плазмы имеет оригинальную динамику в процессе ДВВ. Поверхностная картина расплывается радиально от центра шайбы на протяжении двух месяцев, одновременно совершая поворот. Причем форма шестиугольной границы пятна характерна для рентгенограмм диффузного рассеяния кварца [2], а симметрия ореола отражает степень плоскопараллель-

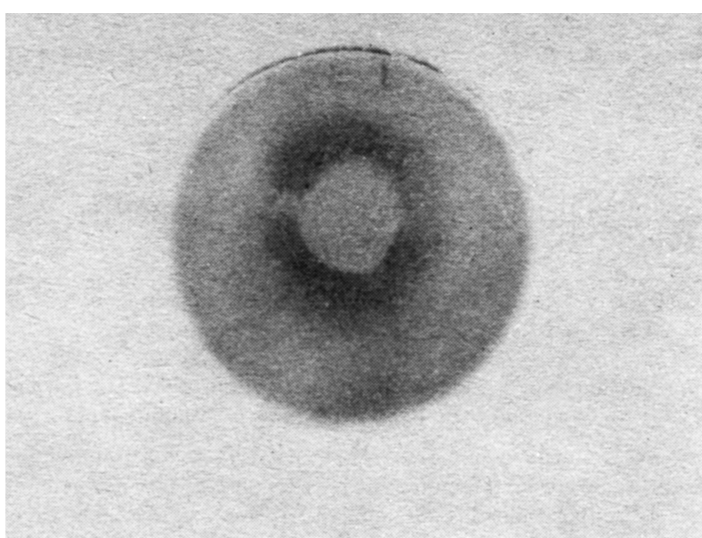


Рис. 1.

ности шайб. Наличие геометрических особенностей поверхностной картины позволило связать с поворотом структуры нарастание SiO_2 . Шлифовка обнаруживает, что расплывание поверхностной картины инициируется расплыванием области ФП в объеме, визуализация которой обусловлена изменением оптического коэффициента отражения. В шайбах толщиной ≤ 5 мм в зависимости от условий облучения можно получить сквозной ФП, имеющий в сечении по $\langle 111 \rangle$ неправильную эллипсоидальную форму.

В течение нескольких месяцев ДВВ без какого-либо воздействия механически полированная поверхность над областью ФП покрывается постепенно увеличивающимся числом микроскопических образований, отдельные из которых в форме пирамид, соответствующих монокристаллам SiO_2 (рис. 2). Этот процесс сопровождается заметным распуханием области ФП.

Из анализа полученных результатов следует, что за наблюдаемое явление ФП прежде всего несет ответственность специфика подпорогового дефектообразования (ПДО) в ионно-ковалентных кристаллических SiO_2 -нитях [4, 5], поскольку процессы в области коллимированного пучка и за его пределами, где основную роль играют наведенные характеристические и рассеянные кванты с энергией, недостаточной для ПДО в чисто ковалентном Si , по своему результату идентичны. Свободный кислород, по-видимому, имеет тенденцию скапливаться на границах раздела $Si-SiO_2$, где, по крайней мере, в области коллимированного пучка может залечивать дивакансии в комплексах V_2-S_I-X [6], образуя сразу молекулу SiO_2 .

Фактор радиальности динамических процессов можно объяснить экспоненциальным снижением интенсивности стимулирующих X-квантов от центра к краю шайб и связанным с этим радиальным уменьшением скорости удаления кислорода из поверхностные окислов (исчезновение пленки конденсата плазмы, фазовое превращение в

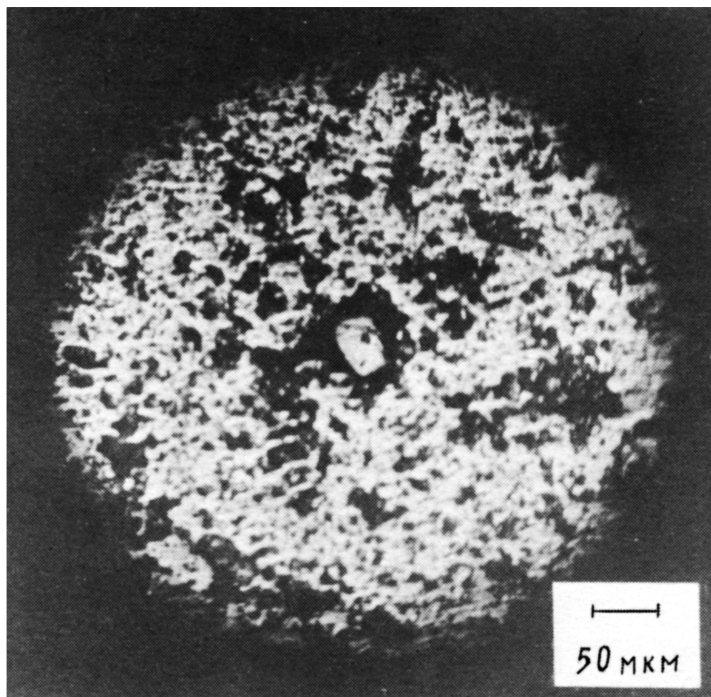


Рис. 2.

декорирующем поверхность порошке ВТСП-керамика $\gamma\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$, $x = 7 \rightarrow 5$ и др.). Влияние таких факторов, как геометрия образцов и внешнее магнитное поле, на динамику ФП при облучении в ДВВ (степень симметрии и вращение поверхностной картины, „Гашение” эффекта ФП у краев пластин произвольной формы и др.) указывает на определенную роль оптических свойств первичных и наведенных X-квантов в решетках Si и SiO_2 . В SiO_2 – нитях и на границах раздела Si-SiO₂, по-видимому, большое значение имеет динамическое рассеяние X-квантов на электрических дипольных моментах, отвечающее за их переориентацию в узлах и квазиравновесных конфигурациях [4, 7].

Большие сложности возникают с пониманием процессов ДВВ, объяснить которые в рамках известковых концепций (например, [8]) или с позиции релаксации пострадиационных механических напряжений на границах раздела и стимулированных тем самым крупномасштабных атомных перестроек не представляется возможным, поскольку в этом случае объемные эффекты не согласуются с поверхностными.

Авторы признательны Ж.Д. Ибрагимову за обсуждение вопросов, касающихся кварца.

- [1] Р е й в и К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии / Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 475 с.
- [2] Захарова Е.К., Зубов В.Г., Осипова Л.П. // Деп. рук. ВИНТИ № 3465-71. 138 с.
- [3] Кумахов М.А. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 17. С. 91-92.
- [4] Силинь А.Р., Трухин А.Н. Точечные дефекты и элементарные возбуждения в кристаллическом и стеклообразном SiO_2 . Рига: Зинатне, 1985. 283 с.
- [5] Вахидов Ш.А., Ибрагимов Ж.Д., Хушвак-ков О.Б., Юлдашев А.Д. // Тезисы докл. 1 регион. конф. по физ. тв. тела. Ч. 1. Самарканд, 1991. С. 29.
- [6] Юнусов М.С., Абдурахманова С.Н., Зайковская М.А. // Там же. С. 6.
- [7] Пинскер З.Г. Динамическое рассеяние рентгеновских лучей в идеальных кристаллах. М.: Наука, 1974. 368 с.
- [8] Берсукер И.Б., Полингер В.З. Вибронные взаимодействия в молекулах и кристаллах. М.: Наука, 1983. 336 с.

Институт ядерной физики
АН Республики Узбекистан

Поступило в Редакцию
30 ноября 1991 г.