

ВОЗДЕЙСТВИЕ БЫСТРЫХ ИОНОВ ^{40}Ar и ^{129}Xe НА МОНОКРИСТАЛЛ АЛМАЗА

А.Ю.Дидык, А.М.Зайцев*, С.А.Карамян

При исследовании радиационного повреждения полупроводниковых монокристаллов IV группы Ge, Si ранее выявлена аномально низкая повреждающая способность ионов Xe. Представляло интерес включить в рассмотрение также алмаз, учитывая его уникальные свойства. Эксперимент выполнен с применением прямого кристаллографического метода, основанного на эффекте теней. Установлено, что поведение алмаза имеет сходство с наблюдаемым для полупроводников, а не для диэлектриков. Результаты измерений показывают, что воздействие сильноповреждающих частиц на алмазоподобные кристаллы регулируется более сложными закономерностями, чем простые схемы дефектообразования.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Swift ^{40}Ar and ^{129}Xe Ions Effect on the Diamond Monocrystal

A.Yu.Didyk, A.M.Zaitsev, S.A.Karamyan

During the investigation of the radiation damage of semiconducting IV group monocrystals Ge, Si, earlier an anomalously low damaging power of the Xe ions is revealed. It was of interest also to include at the consideration the diamond, taking into account its unique properties. The experiment is carried out with using the direct crystallographic technique based on a crystal-blocking effect. It is established that the diamond behaviour has resemblance with one observed for the semiconductors but not for dielectrics. Measurement results show that hard damaging particle effect on diamond-like crystals is caused by more sophisticated regularities than ordinary schemes of the defect formation.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

*Белорусский государственный университет, Минск

Высокая тормозная способность тяжелых частиц ответственна за формирование в диэлектриках латентных треков, имеющих диаметр 10-20 нм^{/1/}. Отсюда можно сделать вывод о том, что уже при дозе $\approx 10^{12}$ см⁻² тяжелых частиц кристаллическая решетка должна быть полностью разрушена. Вместе с тем экспериментально установлено, что радиационная стойкость полупроводниковых монокристаллов (Si, Ge) намного выше. Они выдерживают дозы $\approx 10^{15}$ - 10^{16} см⁻² быстрых тяжелых ионов Хе при сохранении дальнего порядка решетки^{/2, 3/}. Представляло интерес экспериментально оценить повреждающую способность тяжелых ионов с энергией ≈ 1 МэВ/а.е.м. при воздействии на монокристалл алмаза.

Алмаз, с одной стороны, имеет сходство с полупроводниками Si, Ge по химическим и кристаллографическим свойствам, а с другой — является хорошим диэлектриком (удельное сопротивление 10^{14} - 10^{16} Ом·см). Он имеет предельно высокую теплопроводность. В отличие от кремния в алмазе подавлена диффузия атомов из-за высокой энергии связи атома в решетке. Еще одна особенность алмаза состоит в том, что из-за малого атомного номера расчетное сечение дефектообразования оказывается относительно малым. Вследствие этих противоречивых свойств трудно предсказать степень повреждения алмаза при облучении тяжелыми ионами даже по порядку величины. Ранее проведенные эксперименты по исследованию образцов алмаза после ионного облучения базируются на методах люминесцентной оптической спектроскопии^{/4/}. Представляло интерес использовать прямой кристаллографический метод для контроля состояния решетки алмаза в процессе и после экспозиции быстрыми ионами. Этим требованиям удовлетворяет метод, основанный на наблюдении эффекта теней "in situ" в процессе экспозиции тяжелыми ионами.

При облучении монокристалла естественного алмаза типа IIa применена техника эффекта теней в варианте регистрации ядер отдачи резерфордовского рассеяния ионов. Кристалл алмаза сошлифован гранью (110) до толщины 0,2 мм и прикреплен серебряной пастой к металлическому держателю для лучшего теплоотвода. Параметры пучков ионов ⁴⁰Ar (25 МэВ) и ¹²⁹Xe (122 МэВ) после прохождения коллиматора следующие: диаметр 1 мм, угловое расхождение $< 0,5^\circ$, интенсивность $\approx 3 \cdot 10^9$ с⁻¹, импульсная мощность $\approx 0,2$ Вт. Макронагрев области энергосвыделения пучка составлял, согласно оценкам, не более десятых долей градуса. Облучения проводились при комнатной температуре, пучок падал на кристалл вдоль направления, не совпадавшего с главными кристаллографическими направлениями. Из-за низкой

проводимости алмаза стекание заряда пучка происходило только за счет поверхностной утечки.

Кристаллографическая ось $\langle 101 \rangle$ алмаза составляла с пучком угол в интервале $\theta_L = 68-74^\circ$. Трековый детектор из нитрата целлюлозы CN-85 фирмы "Кодак" перекрывал широкий интервал телесного угла в окрестности оси $\langle 101 \rangle$. Детектор регистрировал ядра отдачи (С) резерфордского рассеяния, порог регистрации $\approx 0,1$ МэВ. Интервал угла регистрации, составлявший от 40 до 85° , свободен от других частиц, кроме ядер отдачи рассеяния. Вблизи оси $\langle 101 \rangle$ наблюдалась контрастная картина теневых рефлексов, а в области $\theta_L = 40-45^\circ$ имела место инверсия теневой картины в каналограну. Последнее обстоятельство связано с увеличением толщины активного слоя мишени из-за роста энергии ядер отдачи при уменьшении угла.

Путем сканирования трековых детекторов в оптическом микроскопе измерялась плотность треков и опереждалась форма теневых минимумов и их основные параметры: угловая полуширина $\psi_{1/2}$ и относительный выход в центре минимума χ_0 . На рис.1 для примера показан теневой минимум оси $\langle 101 \rangle$, зафиксированный при облучении алмаза ионами ^{129}Xe (122 МэВ). Виден глубокий теневой минимум — относительный выход в центре $\chi_0 = 0,19$. Рис.1 соответствует облучению исходно неповрежденного кристалла.

На рис.2 приведены значения параметров теневого минимума в зависимости от толщины t активного слоя мишени вдоль направления регистрации или от средней по t кинетической энергии рассеянных ядер отдачи (С). Толщина активного слоя

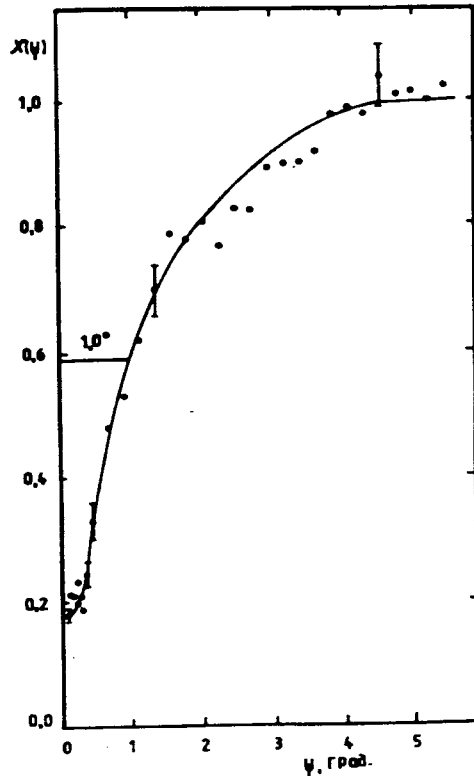


Рис.1. Форма теневого минимума $\langle 101 \rangle$ алмаза для ядер отдачи, регистрируемых под углом $\theta_L = 74^\circ$ к пучку ионов ^{129}Xe с энергией 122 МэВ.

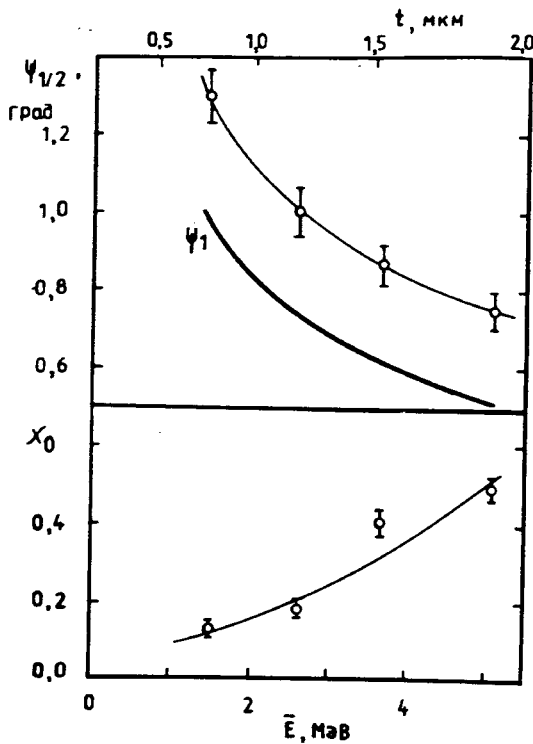


Рис. 2. Зависимость параметров теневого минимума от толщины активного слоя мишени алмаза и от средней энергии ядер (C) отдачи при рассеянии.

определяется расчетным путем на основе баланса энергетических потерь падающего иона и регистрируемой частицы. Как видно из рис. 2, угловая полуширина $\psi_{1/2}$ несколько выше расчетного значения линдхардовского угла ψ_1 , но показывает подобную зависимость от энергии частицы. Рост $\chi_0(t)$ связан с процессами перерасcеяния в толстом слое.

Для контроля радиационного повреждения кристалла условия эксперимента выбраны таким образом, чтобы активный слой мишени был достаточно тонким: 0,7 и 0,9 мкм вдоль пучка при облучении Ag и Xe соответственно. Таким образом, повреждающее воздействие определяется для области, удаленной от максимума повреждений, залегающе-

го в конце пробега ионов, а средняя по слою энергия ионов составляет 22 и 111 МэВ для Ag и Xe.

В процессе набора полной дозы экспозиции запись теневой картины про-

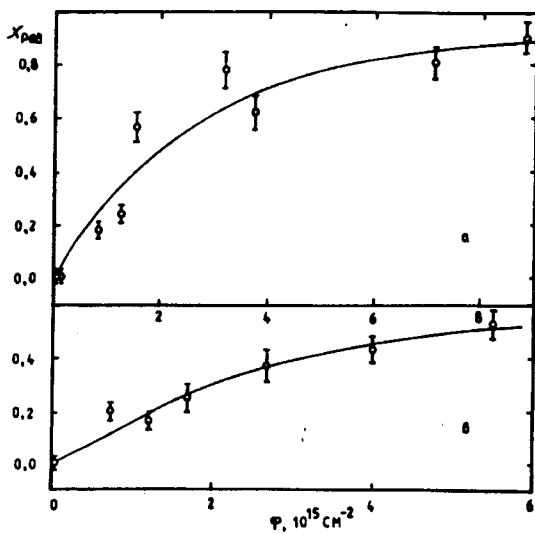


Рис. 3. Зависимость выхода в теновом минимуме $\chi_{рад}$ оси $\langle 101 \rangle$ алмаза от флюенса ионов ^{40}Ar (а) и ^{129}Xe (б) при средней энергии ионов 22 и 111 МэВ соответственно.

изводилась многократно, в результате прослежена зависимость $\chi_{\text{рад}}$ от флюенса ϕ в интервале от 10^{13} до $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Величина $\chi_{\text{рад}}$ показывает изменение выхода χ_0 в теновом минимуме за счет облучения по сравнению с исходным. Флюенс определялся на основе расчета и измерения абсолютного выхода регистрируемых ядер. Полученные функции $\chi_{\text{рад}}(\phi)$ приведены на рис.3. Видно, что с ростом дозы интенсивность эффекта теней убывает ($\chi_{\text{рад}}$ падает). Так как эффект теней однозначно связан с дальним порядком решетки, то рост $\chi_{\text{рад}}$ показывает заметное повреждение алмаза под действием ионного облучения. В случае ионов ^{40}Ag эффект теней почти исчезает ($\chi_{\text{рад}} \approx 0,9$) при максимальной дозе, т.е. достигается почти полная аморфизация кристалла. Ионы ^{129}Xe повреждают алмаз в два-три раза слабее.

После облучения наблюдалось также изменение состояния поверхности монокристалла: почернение и равномерное разрыхление в случае ^{40}Ag и образование выступов на плотной матрице в случае ^{129}Xe .

Обсудим кратко основные результаты, состоящие в том, что: 1) алмаз выдерживает дозу $\approx 10^{15} \text{ см}^{-2}$ тяжелых ионов с сохранением дальнего порядка решетки, 2) повреждающая способность ионов Xe меньше, чем Ag. Высокое значение дозы свидетельствует, что в случае алмаза неприменима модель электростатического клина, широко используемая для описания процессов трекообразования во многих диэлектриках. С другой стороны, модель, отождествляющая дефекты со смещенными при ядерном рассеянии атомами, также, видимо, неудовлетворительна. Согласно ей сечение дефектообразования в алмазе должно составлять $\sigma_D \approx 0,4$ и $1,3 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$ для ионов Ag и Xe соответственно. Эти сечения примерно в 20 раз меньше, чем для Ge. Эксперимент же, напротив, показывает, что радиационная стойкость алмаза меньше, чем германия. По абсолютной величине значения σ_D для алмаза также не соответствуют эксперименту (рис. 3). Кроме того, в этой модели необъясним тот факт, что повреждающая способность оказывается для ионов Xe меньше, чем Ag. Это наблюдается как для алмаза, так и для германия ^{2, 3/}, и приводит к выводу о том, что высокое энерговыделение вдоль трека ионов Xe (из-за высокой электронной тормозной способности) ответственно за частичный отжиг дефектов. Авторами ^{5, 6/} сделан аналогичный вывод о частичном отжигающем воздействии очень тяжелых ионов на дефекты в поликристаллических металлах на основе измерения дозовой зависимости электросопротивления. В наших работах, в отличие от ^{5, 6/}, обнаружено сохранение дальнего порядка

в монокристаллах полупроводников и в алмазе при достаточно высокой дозе ионов Хе.

Таким образом, поведение алмаза под действием сильноповреждающих частиц регулируется более сложными закономерностями, чем простые схемы, такие как модель электростатического ионного взрыва в диэлектриках или модель, отождествляющая дефекты со смещенными при рассеянии атомами.

Авторы благодарны Е.И.Куренковой за просмотр детекторов, С.П.Третьяковой за предоставление нитрата целлюлозы CN-85, В.Н.Бугрову за помощь при облучениях и группе эксплуатации циклотрона У-300 за получение пучков.

Литература

1. Hansen P., Heitmann H., Smit P.H. — Phys.Rev., 1982, v.B26, p.3539.
2. Карамян С.А., Рыхлюк А.В., Бугров В.Н. — В сб.: Краткие сообщения ОИЯИ, №5 (25) -87, Дубна, 1987, с.18.
3. Karamyan S.A., Oganessian Yu.Ts., Bugrov V.N. — Preprint JINR, E14-88-731, Dubna, 1988.
4. Вариченко В.С. и др. — ФТП, 1987, т.21, с.1095.
5. Iwase A., Sasaki S., Iwata T., Nihira T. — Phys.Rev.Lett., 1987, v.58, p.2450.
6. Dunlop A., Lesueur D., Dural J. — Nucl. Instr. Meth., 1989, v.B42, p.182.

Рукопись поступила 24 августа 1989 года.