

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

2416/83

10/5-83

P14-83-80

К.Ашерон<sup>1</sup>, В.Н.Бугров, С.А.Карамян,  
Ю.Г.Машкаров<sup>2</sup>, Г.Отто<sup>1</sup>

НАРУШЕНИЕ СТРУКТУРЫ  
МОНОКРИСТАЛЛА GaP  
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

Направлено на XIII Совещание по физике  
взаимодействия заряженных частиц  
с кристаллами /Москва, май-июнь 1983 г./

<sup>1</sup> Университет им.Карла Маркса, Лейпциг, ГДР.

<sup>2</sup> Харьковский государственный университет  
им.М.Горького.

1983

При облучении монокристаллов заряженными частицами в результате радиационного повреждения возникают нарушения упорядоченного расположения атомов, а также механические напряжения в кристаллической решетке <sup>1,2/</sup>. В большинстве работ изучается влияние радиационных дефектов на параметры кристаллов, облученных ионами низких  $\sim 50$  кэВ/нуклон/ энергий, что требуется, например, для ионного легирования материалов. Цель настоящей работы - получить данные о радиационном повреждении монокристалла GaP, облученного тяжелыми ионами большей энергии  $/0,6-8$  МэВ/нуклон/. Для этого изучено нарушение структуры кристалла в зависимости от энергии, атомного номера ионов и плотности дозы облучения.

Толстые /толщина 0,6 мм/ монокристаллические мишени фосфида галлия облучались на циклотроне У-300 Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. Использовались пучки /диаметр 1 мм/ ионов <sup>20</sup>Ne с энергией 12 МэВ, <sup>22</sup>Ne - 174 МэВ, <sup>31</sup>P - 31 МэВ, <sup>40</sup>Ar - 24 МэВ. Исследован диапазон плотностей дозы  $10^{13} - 10^{16}$  см<sup>-2</sup>. Для получения сравнительных характеристик монокристаллы облучены на ускорителе Ван-де-Граафа Лейпцигского университета им. Карла Маркса протонами и ионами гелия с энергией 1,0 и 1,3 МэВ соответственно вплоть до значений плотности дозы  $\sim 10^{18}$  см<sup>-2</sup>. На пучке протонов выполнен также анализ облученных образцов с помощью эффекта Коссея. Так как изменение температуры влияет на процесс образования и стабильность дефектов, то существенно отметить, что монокристаллы оставались при комнатной температуре в процессе облучения и анализа. Условия облучения обеспечивали прохождение частиц вне режима каналирования.

В ходе облучения монокристалла тяжелыми ионами фиксировалась теневая картина в угловом распределении упруго рассеянных ионов. Для этой цели на расстоянии 120 мм от мишени устанавливались пластиковые трековые детекторы, регистрировавшие рассеянные ионы в диапазоне углов от 45° до 135°. Доза облучения определялась на основе измеренного выхода рассеянных ионов. В расчете выхода частиц в случае толстой мишени использовались функции пробег-энергия по данным <sup>3/</sup> для всех ионов, кроме <sup>40</sup>Ar. Для последнего были взяты результаты измерений <sup>4/</sup>, так как это дает более регулярную зависимость повреждающей дозы от атомного номера иона. В то же время и использование данных <sup>3/</sup> для ионов <sup>40</sup>Ar не приведет к кардинальному изменению результатов.

Измеренные профили осевых и плоскостных теневых минимумов, возникающих при рассеянии различных тяжелых ионов на монокристалле GaP, показаны на рис.1. Эти результаты получены при срав-

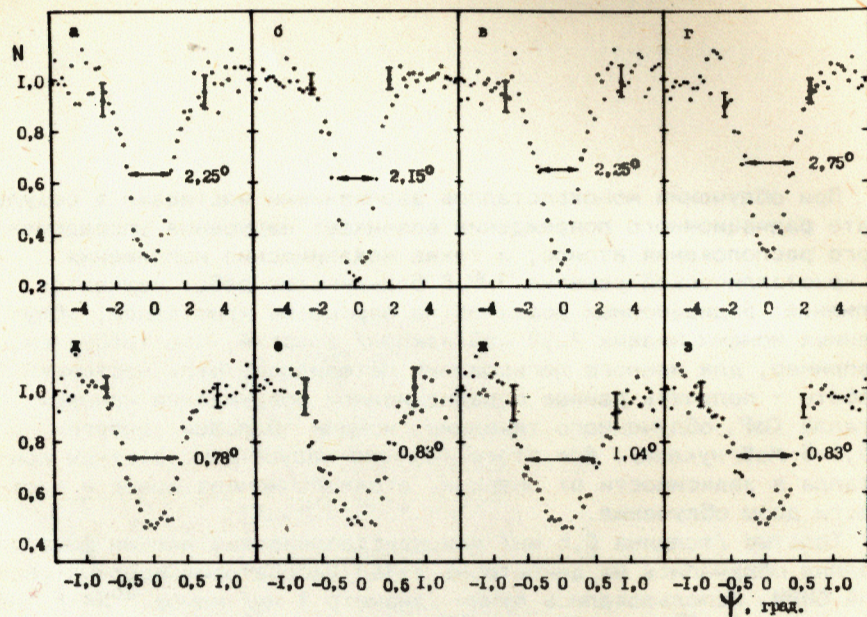


Рис.1. Профиль теневых минимумов при взаимодействии монокристалла GaP с тяжелыми ионами: а/ рассеяние ионов  $^{20}\text{Ne}$  вблизи кристаллографической оси  $\langle 111 \rangle$ , ориентированной под углом  $129^\circ$  к пучку; б/  $^{20}\text{Ne}$ ,  $\langle 110 \rangle$ ,  $95^\circ$ ; в/  $^{31}\text{P}$ ,  $\langle 110 \rangle$ ,  $95^\circ$ ; г/  $^{40}\text{Ar}$ ,  $\langle 110 \rangle$ ,  $95^\circ$ ; д/  $^{20}\text{Ne}$ , кристаллографическая плоскость (111),  $101^\circ$ ; е/  $^{31}\text{P}$ , (111),  $101^\circ$ ; ж/  $^{40}\text{Ar}$ , (111),  $101^\circ$ ; з/  $^{40}\text{Ar}$ , (110),  $57^\circ$ .

нительно небольшой дозе облучения  $\leq 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . С ростом плотности дозы ионов наблюдается ослабление эффекта теней, приводящее к увеличению выхода частиц  $\chi$  в центре теневого минимума. Измеренные зависимости минимального выхода  $\chi$  от дозы тяжелых ионов  $D$  приведены на рис.2. Полученные функции  $\chi(D)$  можно аппроксимировать прямой линией  $\chi(D) = \chi_0 + \gamma D$ , где параметр  $\gamma$  характеризует силу повреждающего действия тяжелого иона на монокристалл. В табл.1 даны условия эксперимента и приведены значения параметра  $\gamma$  и угловой ширины теней  $\psi_{1/2}$ , полученные для различных частиц, в таблицу включены и результаты работ <sup>5,6/</sup>. Видно, что наибольшее повреждающее действие на монокристалл оказывают ионы с наибольшим  $Z$  и наименьшей энергией.

Облученные монокристаллы в дальнейшем исследовались с помощью эффекта Косселя на пучке протонов ускорителя Ван-де-Граафа с целью получения информации об увеличении межплоскостных расстояний в кристаллической решетке GaP в результате воздействия накопленных дефектов. При регистрации характеристического рент-

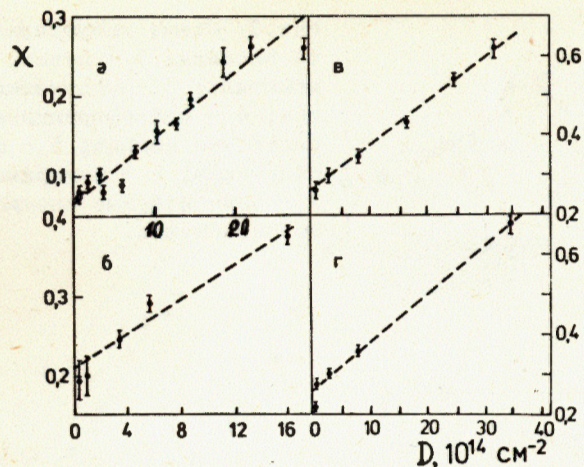


Рис.2. Зависимость измеренных значений глубины теневого минимума от плотности дозы облучения: а/ при рассеянии ионов  $^{40}\text{Ar}$  на монокристалле W для кристаллографической оси  $\langle 111 \rangle$ ; б/  $^{31}\text{P}$ , GaP,  $\langle 110 \rangle$ ; в/  $^{40}\text{Ar}$ , GaP,  $\langle 110 \rangle$ ; г/  $^{40}\text{Ar}$ , GaP,  $\langle 111 \rangle$ .

Таблица 1

Результаты исследования повреждения монокристаллов с помощью эффекта теней

Ион	Энергия, МэВ	Материал	Крист. ось	Угол относ. пучка	Регистр. частица	Толщина слоя, мг. см <sup>-2</sup>	$\psi_{1/2}$ , град.	$\gamma$ , $10^{-18} \text{ см}^2$	$\frac{\gamma}{Z_1^2 Z_2^2 E^{-1} A_2^{-1}}$
$^{12}\text{C}$	81	$\text{UO}_2$	$\langle 110 \rangle$	$150^\circ$	оск. дел.	5,8	$2,20 \pm 0,10$	2,8	1,48
$^{22}\text{Ne}$	174	W	$\langle 111 \rangle$	$161^\circ$	оск. дел.	3,3	$3,10 \pm 0,10$	9,0	2,37
$^{40}\text{Ar}$	24	W	$\langle 111 \rangle$	$161^\circ$	$^{40}\text{Ar}$	2,25	$3,55 \pm 0,10$	80	0,50
$^{31}\text{P}$	31	GaP	$\langle 110 \rangle$	$95^\circ$	$^{31}\text{P}$	0,84	$2,25 \pm 0,10$	110	3,53
$^{40}\text{Ar}$	24	GaP	$\langle 110 \rangle$	$95^\circ$	$^{40}\text{Ar}$	1,02	$2,75 \pm 0,10$	110	1,48
$^{40}\text{Ar}$	24	GaP	$\langle 111 \rangle$	$58,5^\circ$	$^{40}\text{Ar}, ^{31}\text{P}$	0,95	$2,25 \pm 0,10$	120	1,62

\* Результаты работ <sup>5,6/</sup>.

геновского излучения атомов монокристалла, возбуждаемых заряженными частицами, наблюдается интерференционная тонкая структура в угловой зависимости интенсивности излучения, что и называется

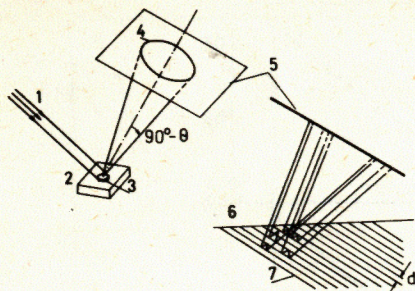


Рис.3. Схема наблюдения эффекта Косселя: 1 - пучок; 2 - монокристалл; 3 - излучающий участок; 4 - интерференционное косселевское кольцо; 5 - фотопластинка; 6 - поверхность; 7 - элементарные плоскости монокристалла.

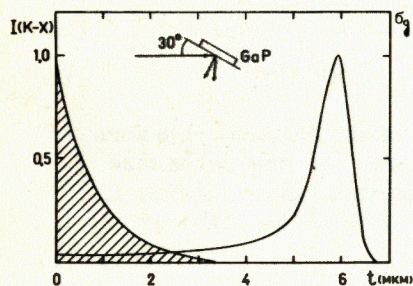


Рис.4. Распределение по глубине монокристалла интенсивности К-Х излучения и плотности дефектов при облучении протонами.

эффектом Косселя. Интерференционная структура возникает для рентгеновских лучей, выходящих из кристалла под углом  $\theta$  к кристаллографической плоскости, причем  $\theta$  удовлетворяет условию Вульфа-Брэгга:

$$2d \sin \theta = \lambda,$$

/1/

где  $d$  - межплоскостное расстояние в кристалле,  $\lambda$  - длина волны излучения. Схема наблюдения эффекта Косселя показана на рис.3. В случае монокристалла GaP рефлексы Косселя типа  $\{111\}$  рентгеновского излучения фосфора расположены симметрично относительно оси  $\langle 111 \rangle$ . При регистрации излучения на фотопластинке под углом  $90^\circ - \theta$  к кристаллографической оси наблюдается усиление или ослабление излучения, то есть возникают темные или светлые линии, имеющие форму сечения конуса /в настоящем случае - форму кольца/. Измерение диаметра этого кольца дает возможность найти угол Вульфа-Брэгга  $\theta$  и определить с большой точностью среднее межплоскостное расстояние  $d$  в исследуемой области монокристалла /7,8/. Измерение формы линии Косселя позволяет получить градиент межплоскостного расстояния, широкая линия Косселя соответствует большому изменению  $d$  с глубиной /9/. Кроме того, можно контролировать /9/ изменение межплоскостного расстояния в процессе облучения.

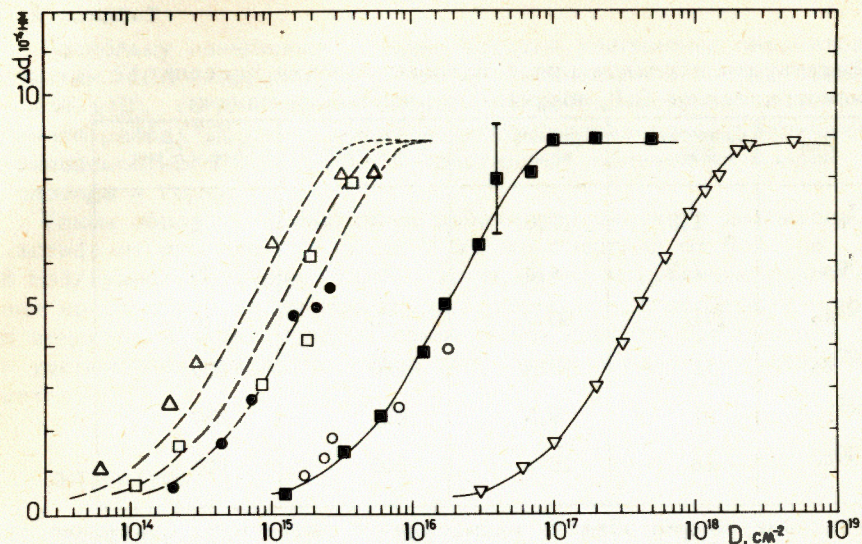


Рис.5. Зависимость увеличения межплоскостного расстояния в монокристалле GaP от плотности дозы облучения ионами:  $\nabla$  -  $^1\text{H}$  /1,0 МэВ/,  $\blacksquare$  -  $^4\text{He}$  /1,3 МэВ/,  $\circ$  -  $^{22}\text{Ne}$  /174 МэВ/,  $\bullet$  -  $^{20}\text{Ne}$  /12 МэВ/,  $\square$  -  $^{31}\text{P}$  /31 МэВ/,  $\Delta$  -  $^{40}\text{Ar}$  /24 МэВ/.

При определении  $d$  и градиента  $d$  методом Косселя получаемая информация относится к сравнительно тонкому /порядка 1 мкм/ приповерхностному слою монокристалла, что связано с сильным поглощением мягкого рентгеновского излучения. В наших опытах максимум концентрации дефектов, расположенный в конце пробега тяжелых ионов, находился на глубине, намного большей одного микрона /см. рис.4/. Поэтому наблюдаемые рефлексы Косселя относятся к области наименьшего повреждающего действия тяжелого иона.

Исследование облученного тяжелыми ионами кристалла привело к наблюдению картины эффекта Косселя /Р- $K_\alpha$  излучение/ хорошего качества: получены четкие, узкие линии. Это означает, что изменение параметра  $d$  с глубиной небольшое. Величина  $d$ , найденная для облученной области монокристалла, увеличивается с ростом плотности дозы облучения.

На рис.5 показана зависимость увеличения межплоскостного расстояния  $\Delta d$  от плотности дозы ионов  $^1\text{H}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^{20}\text{Ne}$ ,  $^{22}\text{Ne}$ ,  $^{31}\text{P}$ ,  $^{40}\text{Ar}$ . Введена поправка, учитывающая увеличение параметра решетки  $d$  под действием протонов в процессе анализа монокристалла. Для ионов гелия и водорода при высоких значениях плотности дозы происходит насыщение функции  $\Delta d$  от  $D$  вследствие установления равновесия между возникновением и отжигом дефектов. При облучении бо-

Таблица 2

Результаты исследования с помощью эффекта Косселя монокристаллов GaP, облученных различными ионами

Ион	Энергия, МэВ	Пробег, мкм	$D_{1H}/D_{ион}$	$\sigma_{ион}^{деф.}/\sigma_{ион}^{1H}$
$^1H$	1,0	12,6	1	1
$^4He$	1,3	4,3	20	20
$^{22}Ne$	174	90	20	16
$^{20}Ne$	12	5,8	220	270
$^{31}P$	31	9,3	310	380
$^{40}Ar$	24	15,0	800	900

лее тяжелыми ионами область насыщения не достигнута. Сравнение растущих участков функций  $\Delta d(D)$  показывает, что они подобны для различных ионов и отличаются только масштабом дозы. Одинаковому увеличению  $\Delta d$  соответствуют более низкие плотности дозы  $D$  для ионов с большим  $Z$  и с меньшей энергией. Для совмещения функций  $\Delta d(D)$  необходимо ввести множитель в величину плотности дозы. Значения этого множителя  $D_{1H}/D_{ион}$  приведены в табл.2. Величины пробега ионов в GaP, также приведенные в табл.2, получены по данным  $^{3,4/}$ . Наблюдаемое подобие функций  $\Delta d(D)$ , вероятно, связано с не очень большим изменением средней энергии отдачи смещенных ядер при увеличении массы бомбардируемых ионов. Это изменение составляет фактор 1,7 при переходе от  $^1H$  к ионам  $^{40}Ar$ .

Согласно модели  $^{10/}$  число дефектов пропорционально потерям энергии иона на выбивание первичных ядер отдачи и фактору умножения дефектов  $T/E_{деф.}$  за счет вторичных процессов:

$$\sigma_{деф.} = \frac{Z_1^2 Z_2^2}{E} \frac{A_1}{A_2} \frac{T}{E_{деф.}} \quad /2/$$

где  $Z_1$ ,  $A_1$ ,  $E$  - атомный номер, массовое число и энергия иона;  $Z_2$ ,  $A_2$  - ядра мишени;  $T$  - средняя энергия первичных выбитых ядер;  $E_{деф.}$  - энергия, необходимая для образования одного выбитого атома. Вычисленные по формуле /2/ значения  $\sigma_{деф.}$  даны в табл.2. Видно, что они хорошо коррелируют с поведением измеренного отношения  $D_{1H}/D_{ион}$ , что служит подтверждением модели  $^{10/}$ . По данным табл.1 также можно видеть корреляцию повреждающего действия иона с величиной его ядерной тормозной способности. Действительно, отношение  $\tau/Z_1^2 Z_2^2 E^{-1} A_1 A_2^{-1}$  не сильно меняется /по сравнению с изменением  $\tau$  для разных ионов и монокристаллов.

Поскольку измеренное методом Косселя увеличение параметра решетки  $\Delta d(D)$  коррелирует с ростом минимального выхода эффекта теней  $\chi(D)$ , то для случая тяжелых ионов подтверждается установленная ранее  $^{8,9/}$  связь между дефектообразованием и увеличением межплоскостного расстояния в кристаллах, облученных ионами водорода и гелия.

Таким образом, в настоящей работе для широкого диапазона частиц: от протонов до ионов  $^{40}Ar$ , при энергиях от 0,3 до 8 МэВ/нуклон экспериментально установлена корреляция повреждения кристалла с величиной ядерной тормозной способности иона в веществе и зафиксирована связь между дефектообразованием и увеличением межплоскостного расстояния в кристаллической решетке.

## ЛИТЕРАТУРА

1. EerNisse E.P. J.Appl.Phys., 1977, vol.48, p.3337.
2. Wemple S.H. et al. J.Appl.Phys., 1974, vol.45, p.1578.
3. Northcliffe L.C., Schilling R.F. Nucl.Data Tables, 1970, vol.A7, p.233.
4. Pape H. et al. Z.Phys., 1978, vol.A286, p.159.
5. Бугров В.Н., Карамян С.А. ЯФ, 1982, т.35, с.558.
6. Бугров В.Н., Карамян С.А. ОИЯИ, P14-81-714, Дубна, 1981.
7. Dearnaley G., Jordan D.R. Phys.Lett., 1975, vol.55A, p.201.
8. Geist V., Flaggmeyer R. phys.stat.sol.(a), 1974, vol.26, p.k1.
9. Geist V. et al. Radiat.Effects, 1981, vol.54, p.105.
10. Kinchin G.H., Pease R.S. Rep.Progr.Phys., 1955, vol.18, p.1.

### НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

ДЗ-11787	Труды III Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1978.	3 р. 00 к.
Д13-11807	Труды III Международного совещания по пропорциональным и дрейфовым камерам. Дубна, 1978.	6 р. 00 к.
	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
Д1,2-12036	Труды V Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1978	5 р. 00 к.
Д1,2-12450	Труды XII Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Приморско, НРБ, 1978.	3 р. 00 к.
	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
Д11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
Д4-80-271	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
Д4-80-385	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.
Д2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
Д10,11-81-622	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.
Д1,2-81-728	Труды VI Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 60 к.
Д17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
Д1,2-82-27	Труды Международного симпозиума по поляризационным явлениям в физике высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 20 к.
Р18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.
Д2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
Д9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
ДЗ,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:  
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79  
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

Ашерон К. и др.  
Нарушение структуры монокристалла GaP под действием тяжелых ионов

P14-83-80

Монокристаллы GaP облучены ионами  $^1\text{H}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^{20}\text{Ne}$ ,  $^{22}\text{Ne}$ ,  $^{31}\text{P}$ ,  $^{40}\text{Ar}$  в диапазоне энергий от 0,3 до 8 МэВ/нуклон и плотности дозы от  $10^{13}$  до  $10^{18}$  см $^{-2}$ . Их повреждение в процессе облучения контролировалось с помощью эффекта теней для реакции упругого рассеяния ионов. Выполнен анализ облученных монокристаллов с помощью эффекта Косселя на пучке протонов и определено увеличение межплоскостного расстояния в кристаллической решетке в зависимости от плотности дозы. На основе экспериментальных результатов установлена корреляция повреждающего действия иона на монокристалл с величиной ядерной тормозной способности иона в веществе.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Ascheron C. et al.  
Structure Damage of the GaP Single Crystal Induced by Heavy Ions

P14-83-80

GaP crystals were irradiated with  $^1\text{H}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^{20}\text{Ne}$ ,  $^{22}\text{Ne}$ ,  $^{31}\text{P}$ ,  $^{40}\text{Ar}$  ions at the energy interval from 0.3 up to 8 MeV/nucleon and the dose density from  $10^{13}$  up to  $10^{18}$  cm $^{-2}$ . Their damage at the irradiation was controlled using the blocking effect for the ion elastic scattering. Damaged monocrystalline samples are analysed by Kossel's effect on the proton beam and the increase of the interplane distance in the crystal lattice is determined as a function of the ion dose. On the base of the measured values a correlation is found between the ion damage action on the single crystal and the nuclear stopping power of the ion in the medium.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1983

Перевод О.С.Виноградовой.