

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

P14-84-717

**В.Н.Бугров, Л.В.Джолос, И.Н.Егошин,
С.А.Карамян, Н.В.Пронин**

**ТЕНЕВАЯ ИОНОГРАФИЯ
МОНОКРИСТАЛЛА ГЕРМАНИЯ**

Направлено в "Известия АН СССР, сер. физ."

1984

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известны возможности исследования монокристаллов с помощью эффекта теней на пучке протонов с энергией 0,1-2 МэВ, такой метод получил название протонографии. В последние годы выполнены эксперименты^{1,2/} по наблюдению теневых распределений при упругом рассеянии тяжелых ионов с энергией ~1 МэВ/нуклон. Теневая ионография монокристаллов, обладая общими с протонографией преимуществами, позволяет расширить область исследования и изучить особенности взаимодействия тяжелых заряженных частиц с монокристаллами. Преимущества методов, основанных на эффекте теней, состоят в получении сведений о совершенстве решетки монокристалла прямым способом при несложной обработке. Другие методы, измеряющие механические, электрические, оптические свойства монокристаллов, не дают прямой информации о состоянии решетки, тем не менее они также могут быть полезны при решении тех или иных научно-технических задач.

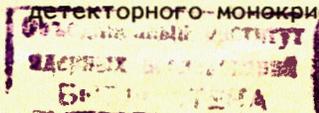
В настоящей работе выполнено ионографическое исследование монокристалла германия, изучены следующие вопросы:

1. Измерение параметров теневых минимумов германия при разных значениях дозы ионов. Сравнение с известными результатами, полученными для монокристалла GaP. Выяснение зависимости радиационной стойкости от особенностей структуры монокристалла.

2. Исследование зависимости угловой ширины $\psi_{1/2}$ теневых минимумов от атомного номера и энергии ионов. Выявление зависимости $\psi_{1/2}$ от массового числа частицы, определение роли явления отдачи при взаимодействии тяжелых заряженных частиц с монокристаллами.

1. ПОВРЕЖДАЮЩЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ НА МОНОКРИСТАЛЛ ГЕРМАНИЯ

Исследован эффект теней при рассеянии ионов ^{20}Ne с энергией 12 и 102 МэВ и $^{40}\text{Ar}/^{24}\text{Mg}$ МэВ/ на монокристалле Ge. Облучения проводились на циклотроне У-300 ОИЯИ. Выведенный пучок ионов, имевший диаметр 1 мм, после прохождения коллиматора направлялся на монокристаллическую мишень, ориентация которой исключала совпадение оси пучка с какой-либо из основных кристаллографических осей или плоскостей. В качестве мишени использовалась полированная пластина (III) детекторного монокристаллического ^{67}Ge



толщиной 1,3 мм. Поверхность мишени выглядела как зеркало без видимых дефектов. Мишень крепилась серебряной пастой к массивному металлическому держателю, при интенсивности пучка ионов около 10^{10} с^{-1} облучаемая область мишени сохраняла комнатную температуру. Вакуумный объем камеры отделялся от объема ускорителя и откачивался азотным крионасосом с целью уменьшения толщины углеродной пленки, осаждающейся на мишень под действием пучка.

Интегральный поток ионов, попавших на мишень за время экспозиции, определялся непосредственно по выходу продуктов упругого рассеяния ядер. Расчет выхода на толстой мишени при известном сечении реакции сделан с использованием формул из [1,4]. Стандартная точность абсолютизации дозы ионов оценивается равной $\pm 25\%$. При исследовании угловой зависимости выхода продуктов реакции на толстой монокристаллической мишени выявилось убывание выхода при отклонении плоскости реакции от нормального к мишени положения. Уменьшение выхода /по сравнению с расчетным значением/ становится вполне заметным для частиц, выходящих под небольшим углом к поверхности / $\leq 8^\circ$ /. Можно предположить, что оно связано с влиянием микронеровностей поверхности, меньших по размеру, чем пробег регистрируемых частиц /т.е. величиной доли мкм/.

При облучении ионами с энергией 0,6 МэВ/нуклон регистрировались упруго рассеянные ионы, а в случае ионов ^{20}Ne с энергией 102 МэВ фиксировалась теневая картина в угловом распределении ядер отдачи (Ge) упругого и квазиупругого рассеяния. Рассеянные ионы ^{20}Ne регистрировались пластиковым трековым детектором /лавсан/, ядра ^{40}Ar и Ge - детектором из стекла. Детекторы располагались на расстоянии 120 мм от мишени в диапазоне углов рассеяния от 45 до 170° . После химической обработки детекторов, с помощью оптического микроскопа производилось сканирование осевых и плоскостных теневых минимумов. С учетом поправок на угловое разрешение эксперимента, на изменение телесного угла элемента площади детектора и толщины работающего слоя мишени при изменении угла, на просчеты, связанные с двойными наложениями треков, был получен в каждом случае профиль теневого минимума, определены его основные параметры - выход в минимуме χ и угловая полуширина $\psi_{1/2}$ на половине глубины. Форма теневых минимумов, полученных при взаимодействии ионов с монокристаллами Ge и GaP, показана на рис.1. Большее значение χ для ионов ^{14}N и ^{20}Ne объясняется меньшим порогом регистрации частиц у пластикового детектора, чем у стекла, и соответствующим увеличением толщины работающего слоя монокристалла.

На рис.2 даны измеренные зависимости минимального выхода от дозы $\chi(I)$ для всех трех видов пучка. Чтобы характеризовать увеличение $\chi(I)$ количественно, введем значение дозы $I_{0,2}$, соответствующей увеличению выхода в теновом минимуме до значения $\chi_{\text{рад}} = 0,2$, где $\chi_{\text{рад}}$ показывает радиационное повреждение в чистом виде: $1 - \chi_{\text{рад}} = (1 - \chi_{\text{экс}})(1 - \chi_0)^{-1}$, χ_0 относится к неповрежденному кристаллу. Нетрудно видеть, что ионы ^{20}Ne с энергией

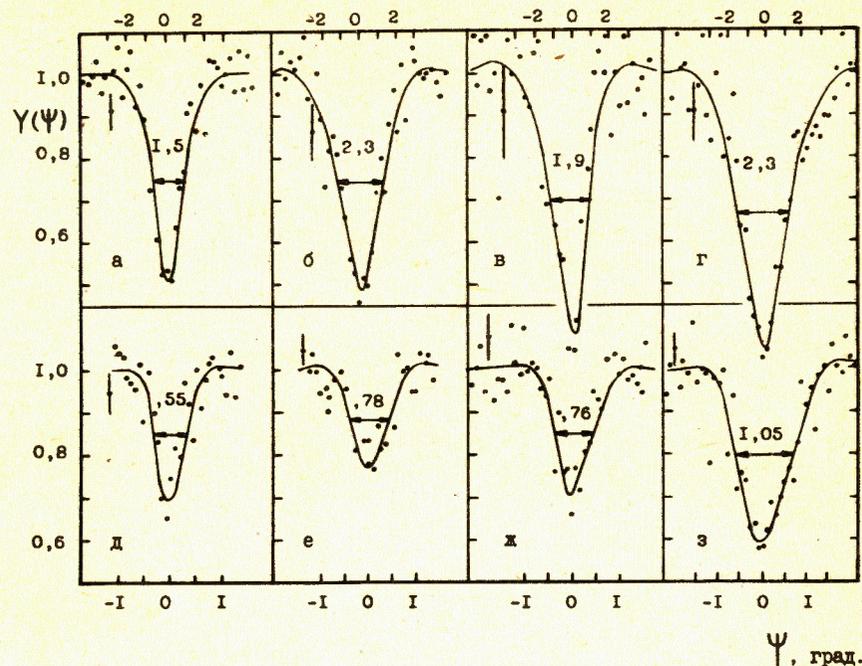


Рис.1. Профиль осевых $\langle 111 \rangle$ /а-г/ и плоскостных $\langle 110 \rangle$ /д-з/ теневых минимумов при регистрации рассеянных на монокристалле GaP ионов ^{14}N под углом 125° к пучку /а/; Ge, ^{20}Ne , 130° /б/; Ge, ^{40}Ar , 71° /в/; Ge, ядра отдачи Ge, 66° /г/; GaP, ^{14}N , 115° /д/; Ge, ^{20}Ne , 119° /е/; Ge, ^{40}Ar , 73° /ж/; Ge, ядра отдачи Ge, 74° /з/.

102 МэВ имеют повреждающую способность, в 10 раз меньшую, чем те же ионы с энергией 12 МэВ, и в 23 раза меньшую, чем ^{40}Ar /24 МэВ/. Эти цифры неплохо соответствуют установленной ранее корреляции повреждающей способности ионов с их ядерной тормозной способностью в веществе [1,3]. Вместе с тем значения повреждающей дозы для монокристалла Ge /рис.2/ в 4-6 раз меньше, чем для GaP, согласно измерениям [4], выполненным подобным образом по эффекту теней.

Различие между Ge и GaP не объясняется простым способом, т.к. по большому числу параметров эти кристаллы близки между собой. Поэтому предлагается следующее объяснение. Радиолит молекул GaP под действием облучения приводит к появлению свободных носителей заряда в объеме монокристалла уже при небольшой дозе ионов. Это способствует образованию компенсирующего поля объемного заряда при прохождении иона через вещество и снижает его повреждающую способность. Для монокристалла Ge такой процесс затруднен и повреждающая способность ионов выше, чем для GaP. Таким образом,

Результаты измерения угловой полуширины теневого минимума в случае взаимодействия монокристаллов Ge и GaP с тяжелыми ионами

Взаимодействие	Кристаллографическое направление	Угол наблюдения, град.	Интервал энергии, МэВ	$2 \psi_{1/2}$, град.	$2 \psi_I$, град.
1	2	3	4	5	6
$^{14}\text{N} + \text{GaP}$	<111>	125	8,8-4,7	1,48(II)	1,49
^{14}N (77%) ^{31}P (23%) + GaP	<100>	70	12,6-6,7 1,80-1,67	1,59 (12)	1,26 4,34
$^{14}\text{N} + \text{GaP}$	(011)	85	11,6-5,6	0,49(4)	0,49
	(011)	115	9,3-4,8	0,55(4)	0,55
	(110)	93	11,0-5,2	0,56(4)	0,55
$^{20}\text{Ne} + \text{Ge}$	<011>	95	6,5-3,5	2,45(15)	2,62
	<111>	130	4,7-2,8	2,30(15)	2,72
	(011)	83	7,3-4,0	0,72(5)	0,84
	(011)	119	5,2-2,9	0,78(5)	0,97
	(111)	85	7,2-3,9	0,82(5)	0,94
$^{40}\text{Ar} + \text{Ge}$	<111>	71	10,7-9,1	1,98(15)	2,14
	<111>	71	10,7-9,1	1,90(15)	2,14
	<111>	68	11,4-9,4	2,11(15)	2,11
^{40}Ar (95%) Ge (5%) + Ge	<111>	61	13,1-10,8 5,2-5,0	1,95(15)	1,99 3,97
$^{40}\text{Ar} + \text{Ge}$	(011)	73	10,2-8,1	0,76(5)	0,84
	(101)	65	12,1-9,4	0,67(5)	0,77
^{40}Ar (74%) Ge (26%) + Ge	(110)	55	14,6-11,9 7,2-5,0	0,76(5)	0,694 1,36
	<111>	66	11,5-5,0	2,30(15)	3,18
Ge + Ge	<111>	65	12,4-5,0	2,42(15)	3,10
	<111>	59	17,8-5,0	2,25(15)	2,78
	(011)	74	5,6-5,4	1,05(7)	1,44
	(011)	68	9,7-9,4	0,87(5)	1,08
	(011)	66	11,5-5,0	0,89(5)	1,18
	(011)	63	14,2-5,0	0,76(5)	1,14
	(011)	60	17,2-5,0	0,82(5)	1,04

делены в предыдущем разделе. Видно, что для всех трех частиц, взаимодействующих с монокристаллом германия, зависимости $\psi_{1/2}$ (I) подобны. Путем экстраполяции нетрудно найти значения $\psi_{1/2}$ (0), соот-

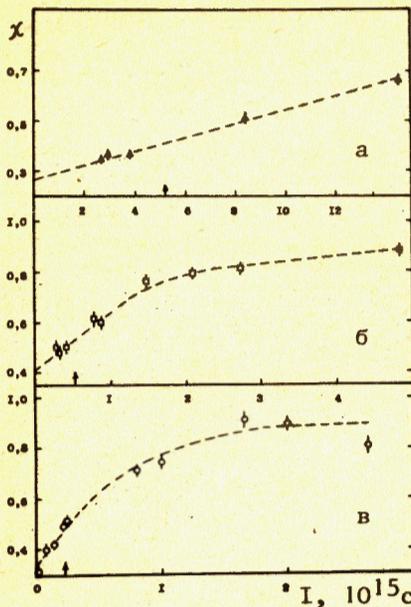


Рис.2. Зависимости выхода в теневого минимуме от дозы ионов ^{20}Ne с энергией 102 МэВ /а/, ^{20}Ne - 12 МэВ /б/, ^{40}Ar - 24 МэВ /в/, измеренные для кристаллографической оси <111> Ge. Стрелками отмечены значения $I_{0,2}$.

просматривается различие между Ge и GaP, состоящее в различном характере изменения концентрации носителей заряда под действием пучка.

2. УГЛОВАЯ ПОЛУШИРИНА ТЕНЕВЫХ МИНИМУМОВ

Измеренные значения угловой полуширины $\psi_{1/2}$ теневого минимума для взаимодействия ионов ^{20}Ne , ^{40}Ar и Ge с монокристаллом Ge и ионов ^{14}N с монокристаллом GaP приведены в таблице. Значения $\psi_{1/2}$ относятся к случаю минимальной повреждающей дозы ионов. При получении величин $\psi_{1/2}$ вводилась поправка, учитывающая аппаратную форму линии углового разрешения. В таблице приведен также интервал энергии рассеянных частиц, соответствующий потере энергии падающих ионов на толщине работающего слоя мишени. При квазиупругом рассеянии ионов ^{20}Ne /102 МэВ/ интервал энергии ядер отдачи Ge обусловлен не только энергией бомбардирующей частицы, но также естественной вариацией степени неупругости взаимодействия. Значения $\psi_{1/2}$ сравниваются с величинами Линдхардского ψ_1 угла ψ_1 вычисленными путем усреднения по интервалу энергии с учетом весового фактора, определяющегося выходом ядерной реакции. Видно, что Линдхардский угол неплохо воспроизводит значения $\psi_{1/2}$ для взаимодействия $^{14}\text{N} + \text{GaP}$, однако при уменьшении энергии ионов и увеличении их атомного номера согласие сменяется заметным расхождением. Такое поведение объясняется ограничением на энергию частиц $E \gg E'$, для которых, согласно Линдхарду ψ_1 , может быть использовано значение ψ_1 .

В процессе исследования угловой полуширины минимумов выявилась зависимость $\psi_{1/2}$ от дозы ионов I, она представлена на рис.3а. Значения дозы даны в отношении к величинам $I_{0,2}$, которые опре-

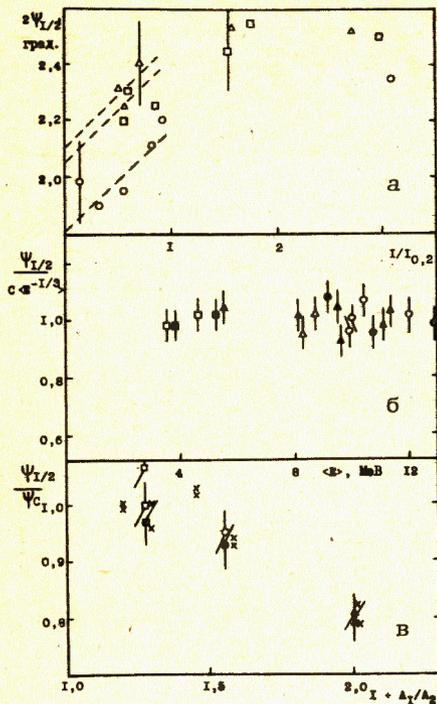


Рис.3. Угловая полуширина $\psi_{1/2}$ теневых минимумов как функция дозы ионов $1/a$, энергии $1/b$ и массового числа частиц $1/v$. В случае осевых теней точки относятся к взаимодействию с монокристаллом Ge ядер: $^{20}\text{Ne} - \square$, $^{40}\text{Ar} - \circ$ и Ge - \triangle . Соответствующие плоскостные минимумы представлены зачерненными точками. Крестиками даны результаты, относящиеся к взаимодействию тяжелых ионов с монокристаллом GaP^{/2/}.

ответствующие взаимодействию частиц с исходным, неповрежденным монокристаллом ($I = 0$).

Набор значений $\psi_{1/2}$, полученных для разных кристаллографических направлений в зависимости от угла рассеяния при изменении атомного номера иона Z_1 , оказывается достаточным для анализа вопроса о зависимости $\psi_{1/2}$ от Z_1

и E . На рис.3б представлено отношение $\psi_{1/2} / C \langle E^{-1/3} \rangle$ как функция энергии частиц. Здесь коэффициент C включает в себя зависимость $\psi_{1/2}$ от типа частицы. Усреднение величины $E^{-1/3}$ по толщине мишени сделано с учетом весового фактора. По данным рис.3б можно сделать вывод, что функция $CE^{-1/3}$ исчерпывающим образом описывает зависимость $\psi_{1/2}(E)$ на данном интервале изменения E . В работе^{/2/} на основе анализа значений $\psi_{1/2}$ в случае взаимодействия тяжелых ионов с монокристаллом GaP установлен следующий вид функции ψ_c /критического угла/:

$$\psi_c = aE^{-1/3} (Z_1 Z_2 / d)^{1/2}, \quad /1/$$

где d - межатомное расстояние в кристаллографической оси. Результаты настоящих измерений также неплохо соответствуют этой функции. Очевидно, она применима в области энергии тяжелых ионов $E \sim E'$.

На рис.3в показано отношение $\psi_{1/2}$ к вычисленному по формуле /1/ значению ψ_c в зависимости от $1 + A_1/A_2$, где A_1/A_2 - отношение массовых чисел иона и атома монокристалла. Значения $\psi_{1/2}$, показанные на рис.3в, получены с учетом экстраполяции к нулевой дозе по данным рис.3а. Одна из осевых теней, наблюдаемых при взаимодействии $^{20}\text{Ne} + \text{Ge}$, использована для определения нормирующей константы a . При вычислении ψ_c производилось усреднение по интерва-

лу энергии частиц. В плоскостном случае критический угол считался на фактор 0,375 меньшим, чем в осевом. На рис.3в крестиками показаны также результаты исследования взаимодействия ионов ^{14}N /наст.раб./, ^{20}Ne , ^{31}P , ^{40}Ar ^{/2/} с монокристаллом GaP, приведены результаты для осевого и плоскостного случаев. Видно, что результаты настоящей работы находятся в хорошем согласии с измерениями^{/2/}. По данным рис.3в выявляется определенное уменьшение отношения $\psi_{1/2} / \psi_c$ при увеличении массового числа тяжелой частицы, взаимодействующей с монокристаллом. В работе^{/2/} уже отмечалось, что установление зависимости $\psi_{1/2}(A_1)$ подтверждает заметную роль явления отдачи при отклонении частицы последовательно атомов кристаллографической оси или плоскости.

Траектории частицы, проходящей через монокристалл, можно представить в простом приближении как последовательность бинарных столкновений с атомами. Учет энергии отдачи при рассеянии частицы приводит, в конечном итоге, к уменьшению эффективного атомного потенциала оси или плоскости на фактор $(1 + A_1/A_2)^{-2}$ и уменьшению критического угла на фактор $(1 + A_1/A_2)^{-1/2}$ соответственно. Результаты рис.3в подтверждают убывание $\psi_{1/2}(A_1)$ с ростом A_1 , однако оно не столь сильное, как ожидалось $\sim (1 + (A_1/A_2))^{-1}$. Таким образом, средняя энергия ядер отдачи при ориентированном прохождении тяжелого иона не обращается в нуль, но она и не равна максимально возможной энергии. Следовательно, часть взаимодействия происходит как бинарное рассеяние частицы на атоме монокристалла, а часть - как коллективный мессбауэровский процесс, в котором импульс отдачи принимает на себя кристалл как целое. Вообще известно, что эффект Мессбауэра имеет вероятностный характер. Тип взаимодействия зависит от температуры кристалла, от прицельного параметра налетающей частицы и от угла между импульсом отдачи и вектором тепловой скорости атома, колеблющегося в узле решетки. Отсюда следует, что для тяжелых частиц совершенно исключить выбивание ядер из узлов решетки не удастся даже при ориентированном прохождении вдоль кристаллографических осей. Средняя энергия отдачи в этом случае меньше, чем при движении в разупорядоченном направлении, но она не исключается полностью. Следовательно, можно объяснить экспериментально установленный факт, что повреждающая способность тяжелых ионов убывает всего в 2-3 раза при выстраивании оси монокристалла вдоль пучка по сравнению с неориентированным случаем /см., например,^{/6/}.

ВЫВОДЫ

На основе исследования эффекта теней при взаимодействии тяжелых ионов с монокристаллом Ge и сравнения результатов с полученными ранее для GaP можно сделать следующие выводы:

1. Доза быстрых заряженных частиц изменяет состояние как ядерной, так и электронной подсистем монокристалла. Степень воздействия на различные параметры монокристалла может оказаться разной. Так, например, уже небольшая доза ионов $\text{Ar} / <10^{14} \text{ см}^{-2} /$ вызывает сильное почернение монокристалла GaP , при этом геометрическая структура решетки остается совершенной и требуется доза в сто раз большая, чтобы вызвать значительное разрушение решетки.

2. Электронная и ядерная подсистемы связаны между собой, изменение состояния первой влияет на вторую и наоборот. Этим влиянием можно объяснить существенное различие радиационной стойкости Ge и GaP . Радиолитиз молекул GaP под действием ионов приводит к появлению свободных носителей заряда в объеме монокристалла уже при небольшой дозе ионов, что способствует образованию компенсирующего поля объемного заряда при прохождении иона через вещество и приводит к понижению повреждающей способности иона. Для монокристалла Ge такой процесс затруднен.

3. Обнаруженная зависимость угловой полуширины теней от массового числа частицы $\psi_{1/2}(A_1)$ подтверждает заметную роль явления отдачи при отклонении тяжелого ядра последовательностью атомов в кристаллографической оси или плоскости. Вместе с тем зависимость $\psi_{1/2}(A_1)$ более слабая, чем ожидалось в простом приближении $\psi_{1/2} \sim (1 + A_1/A_2)^{-1}$. Таким образом, средняя энергия ядер отдачи при ориентированном прохождении тяжелого иона не обращается в нуль, но она и не равна максимально возможной энергии. Некоторая доля взаимодействий происходит как коллективный мессбауэровский процесс.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бугров В.Н., Карамян С.А. АЭ, 1983, т.54, с.127.
2. Бугров В.Н., Карамян С.А. Изв.АН СССР, сер.физ., 1984, т.48, с.989.
3. Ашерон К. и др. Труды XIII Всесоюзн. совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Изд-во МГУ, М., 1984, с.87.
4. Бугров В.Н., Карамян С.А. ОИЯИ, P14-82-325, Дубна, 1982.
5. Линдхард Й. УФН, 1969, т.99, с.249.
6. Куликаускас В.С. и др. Труды XI Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Изд-во МГУ, М., 1982, с.536.

Рукопись поступила в издательский отдел
6 ноября 1984 года.

Бугров В.Н. и др.
Теневая ионография монокристалла германия

P14-84-717

Изучен эффект теней при взаимодействии ядер ^{20}Ne , ^{40}Ar и ^{76}Ge в области энергий 4-12 МэВ с монокристаллом Ge . Выявлена зависимость угловой ширины теневых минимумов от массового числа частицы, что подтверждает заметную роль явления отдачи при отклонении частиц последовательностью атомов кристаллографической оси или плоскости. Измерена зависимость параметров теневых минимумов от дозы ионов, проведено сравнение результатов с полученными ранее для монокристалла GaP .

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1984

Перевод Ю.С.Виноградовой

Bugrov V.N. et al.
Blocking Ionography of Germanium Single Crystal

P14-84-717

Blocking effect is studied at the interaction of the ^{20}Ne , ^{40}Ar and ^{76}Ge nuclei with germanium single crystal in the 4-12 MeV energy range. The angular width of the blocking minimum is dependent on a particle mass number, then particle deflection by the crystallographic direction atomic row is accompanied by an observable recoil influence. Blocking minima parameters are measured as a function of ion dose, the results are compared with these obtained previously for GaP single crystal.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1984