

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



10/11-75

К-441

14 - 8304

513/2-75

М.Киселевич, А.Лятушински, В.Жук, Б.П.Осипенко

ВНЕДРЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ
В МОНОКРИСТАЛЛЫ КРЕМНИЯ

1974

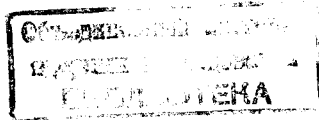
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

14 - 8304

М.Киселевич,* А.Лятушински,* В.Жук,* Б.П.Осипенко

**ВНЕДРЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ
В МОНОКРИСТАЛЛЫ КРЕМНИЯ**

Направлено в журнал "Физика твердого тела"



*Университет им. М.Кюри-Склодовской, Люблин, ПНР.

Киселевич М., Латушински А., Жук В.,
Осипенко Б.П.

14 - 8304

Внедрение тяжелых ионов в монокристаллы кремния

В работе получено экспериментальное распределение концентрации внедренных в монокристаллический кремний ионов с массой от 82 до 160. Энергия внедрения 45 кэВ, доза облучения $\approx 10^{10}$ ион/см². Внедрение проводилось вдоль кристаллических осей $\langle 111 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ и под углом 7° к $\langle 111 \rangle$. Проведено сравнение с теоретической моделью Линдхарда.

Анализ результатов показывает, что, пользуясь моделью Линдхарда для аморфных мишеней, можно с точностью до 30% оценить средний пробег \bar{R} тяжелых ионов $\langle M \geq 150 \rangle$ в кремнии.

Статистическое отклонение от \bar{R} , рассчитанное на основе этой модели, значительно отличается от экспериментальных данных и поэтому не может быть использовано даже для самых грубых оценок.

Препринт Объединенного института ядерных исследований.
Дубна, 1974

Введение

В последние годы в физике твердого тела широко используется новый способ легирования полупроводников методом ионного внедрения /имплантации/, так как он имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с другими методами /1/. Одним из них, в частности, является возможность получения воспроизводимых профилей введенных примесей.

Поведение ионов, внедряемых в кристалл, довольно хорошо описывается моделью, предложенной Линдхардом /2/, согласно которой пучок ионов, падающих на кристалл, разделяется на две основных компоненты: "беспорядочную" и "каналированную". Первая состоит из частиц, не чувствующих кристаллическую мишень и теряющих свою энергию главным образом на упругие столкновения с атомами решетки. Распределение пробегов этих частиц приблизительно соответствует гауссовскому с наиболее вероятным проецированным пробегом R_p и стандартным отклонением ΔR_p . Линдхард и др. /3/ получили универсальную зависимость среднего пробега от энергии, введя безразмерный пробег ρ и энергию ϵ :

$$\rho = 4\pi \bar{R} a^2 N \frac{M_1 M_2}{(M_1 + M_2)^2},$$
$$\epsilon = \frac{E_a}{e^2} \cdot \frac{M_2}{Z_1 Z_2 (M_1 + M_2)},$$

где

$$a = \frac{0,8853 a_0}{(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{1/2}},$$

причем a_0 - боровский радиус $/0,529 \cdot 10^{-8} \text{ см}/$, N - число атомов в единице объема, Z и M - порядковый номер элемента и атомный вес соответственно, причем индекс 1 относится к иону, а индекс 2 - к атому мишени.

В "канализованном" пучке содержатся частицы /ионы/, движущиеся в кристалле вдоль одного из открытых направлений в решетке. Осциллируя между цепочками ядер, они теряют энергию в основном в процессе неупругих столкновений с электронами мишени.

Если обе компоненты тормозятся независимо друг от друга, то теоретическое распределение будет обладать двумя максимумами, принадлежащими обоим компонентам. Однако, поскольку процесс внедрения идет намного сложнее, чем в представленной модели, наблюдаемые распределения обычно имеют вид, показанный на рис. 1.

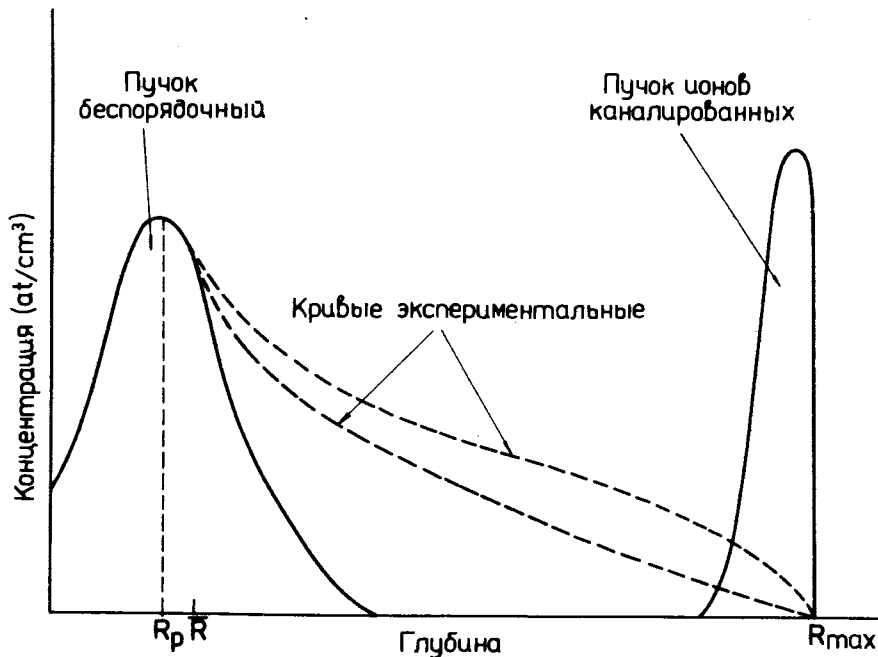


Рис. 1. Распределение внедренных атомов в монокристалле при ориентации ионного пучка вдоль одной из кристаллических осей. R_p - наиболее вероятный пробег, R - средний пробег, R_{max} - максимальный пробег.

Ход экспериментальных кривых для случая, когда отношение массы атомов мишени и внедряемых ионов близко к единице, довольно хорошо изучен в ряде работ /4, 5/. Большой интерес представляет сравнение экспериментальных распределений внедренных ионов с распределением, полученным исходя из модели Линдхарда, когда M_2/M_1 много меньше единицы. Целью данной работы является измерение распределений внедренных ионов с $82 < M_1 < 169$ в монокристаллах кремния, то есть в случае, когда $0,16 < M_2/M_1 < 0,35$.

Таблица I

И о н	Направ- ление	R_m (Å)	$L_{10^{-1}}$ (Å)	$L_{10^{-2}}$ (Å)	$L_{10^{-3}}$ (Å)
82_{Si}	<III>	390	760	2480	2940
140_{Si}	<III>	370	960	1980	2880
134_{Ca}	<III>	305	775	1775	2730
140_{Mn}	<III>	300	760	1700	2700
145_{Eu}	<III>	300	765	1680	2620
149_{Ga}	<III>	285	750	1610	2510
152_{Tb}	<III>	270	700	1520	2460
160_{Er}	<III>	240	445	1130	1950
169_{Lu}	<III>	210	410	960	1700
82_{Sr}	<III>	690	1480	3200	4600
128_{Ba}	<III>	515	1330	2480	3200
140_{Nd}	<III>	480	1090	2345	3000
152_{Tb}	<III>	460	900	1950	2850

Методика эксперимента

Используемые в работе радиоактивные изотопы ^{82}Sr , ^{128}Ba , ^{134}Ce , ^{140}Nd , ^{145}Eu , ^{152}Tb , ^{160}Er , ^{167}Tm и ^{169}Lu получались методом, описанным в /6/ при облучении танталовых и молибденовых мишеней на пучке протонов синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Внедрение ионов в монокристаллический кремний проводилось с помощью электромагнитного масс-сепаратора скандинавского типа, работающего в установке ЯСНАПП-1 /7/. Энергия однозарядных ионов равнялась 45 кэВ, а давление остаточных газов в камере масс-сепаратора $\approx 10^{-5}$ мм рт.ст.

Доза облучения образцов кремния, обработанных механическим и химическим путем до зеркальной поверхности, во всех случаях не превышала 10^{10} ионов/см².

Измерение распределения внедренных ионов по глубине проводилось путем последовательного снятия тонких однородных слоев и измерения оставшейся активности после каждого снятия.

Для снятия с поверхности тонких слоев образец окислялся электрохимическим методом, после чего окисленный слой растворялся в плавиковой кислоте. В качестве электролита использовался раствор этиленгликоля с добавкой $\text{KNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$. Остаточная активность определялась измерением с помощью $\text{Ge}(\text{Li})$ -детектора /50 см³/ интенсивности характерных для данного изотопа гамма-переходов.

Результаты и их обсуждение

Путем измерения оставшейся активности в мишени после многократного снятия тонких слоев получены интегральные распределения пробегов внедренных ионов. На рис. 2 в качестве примера приведены интегральные распределения ионов ^{128}Ba , ^{134}Ce , ^{160}Er , ^{167}Tm и ^{169}Lu , внедренных в кремний с энергией 45 кэВ вдоль кристаллической оси $\langle 111 \rangle$. Определены значения R_m - глубины в мишени, на которой останавливалось 50%

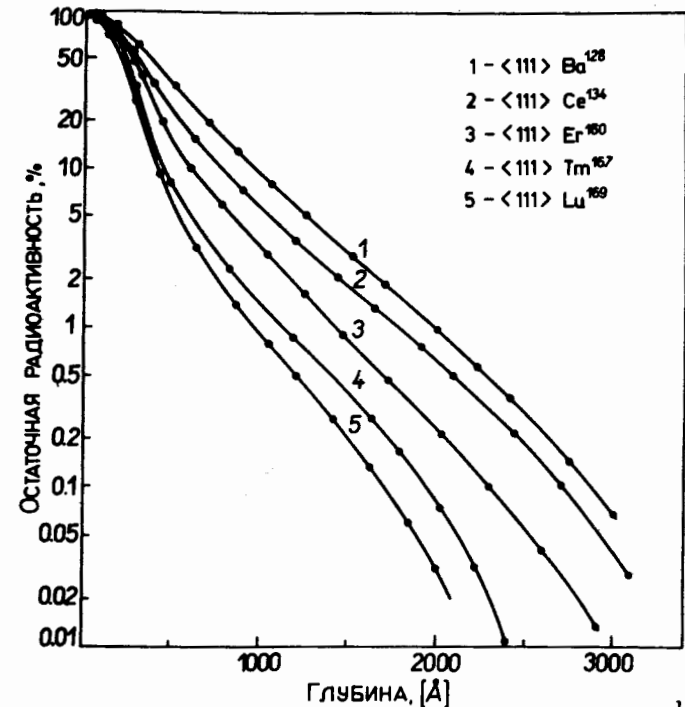


Рис. 2. Интегральные распределения пробегов ионов ^{128}Ba , ^{134}Ce , ^{160}Er , ^{167}Tm и ^{169}Lu , внедренных в кремний вдоль оси $\langle 111 \rangle$. Энергия ионов - 45 кэВ.

внедренных ионов, и $L_{10^{-1}}$, $L_{10^{-2}}$, $L_{10^{-3}}$ - глубины, на которой осталось 10, 1, 0,1% начальной активности /табл. 1/.

На рис. 3 и 4 показаны распределения концентрации ионов ^{82}Sr , ^{128}Ba , ^{140}Nd , ^{160}Er и ^{169}Lu по глубине кристалла, полученные дифференцированием интегральных распределений пробегов.

Проведено показанное на рис. 5 сравнение распределений ионов ^{152}Tb , внедренных в кремний с энергией 45 кэВ вдоль осей $\langle 110 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ и под углом 7° к оси $\langle 111 \rangle$, с теоретическими значениями, предсказанными Линдхардом и др. /3/ для аморфных мишеней.

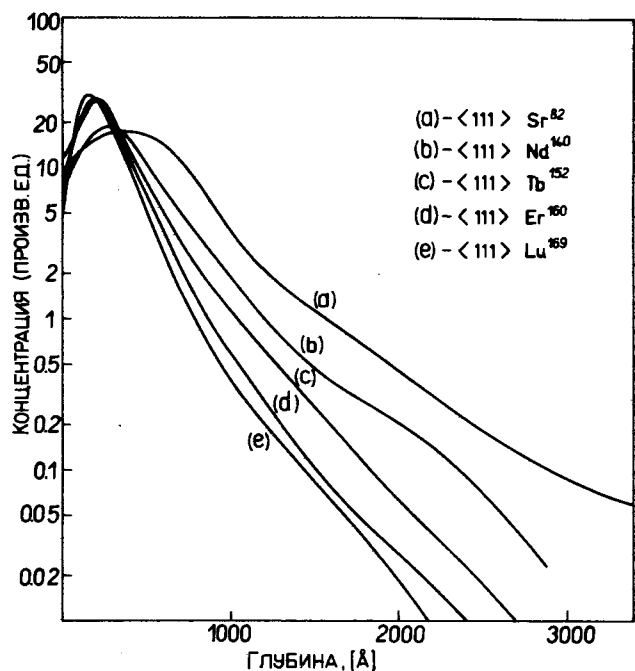


Рис. 3. Распределение концентрации ионов ⁸²Sr, ¹⁴⁰Nd, ¹⁵²Tb, ¹⁶⁰Er и ¹⁶⁹Lu, внедренных в кремний с энергией 45 кэВ вдоль оси $\langle 111 \rangle$.

В табл. 2 приведены величины, определяющие дифференциальные распределения \bar{R} - среднего пробега, R_p - наиболее вероятного пробега, соответствующего глубине с максимальной концентрацией внедренных ионов, и ΔR_p - разброса наиболее вероятного пробега. Там же в колонке 4/ для сравнения показаны рассчитанные по теории Линдхарда ^{3/} значения среднего пробега $R_{теор}$.

Так как $R_{теор}$ - полный путь, пройденный ионом до остановки, а полученная из эксперимента величина \bar{R} - проекция полного пробега на нормаль к поверхности кристалла, то для удобства их сравнения вводился поправочный коэффициент $R_{теор} / R = 1 + b M_2 / M_1$. Для наших условий $E = 46$ кэВ, $M_1 > M_2$ / $b = 1/3$ / $1/$

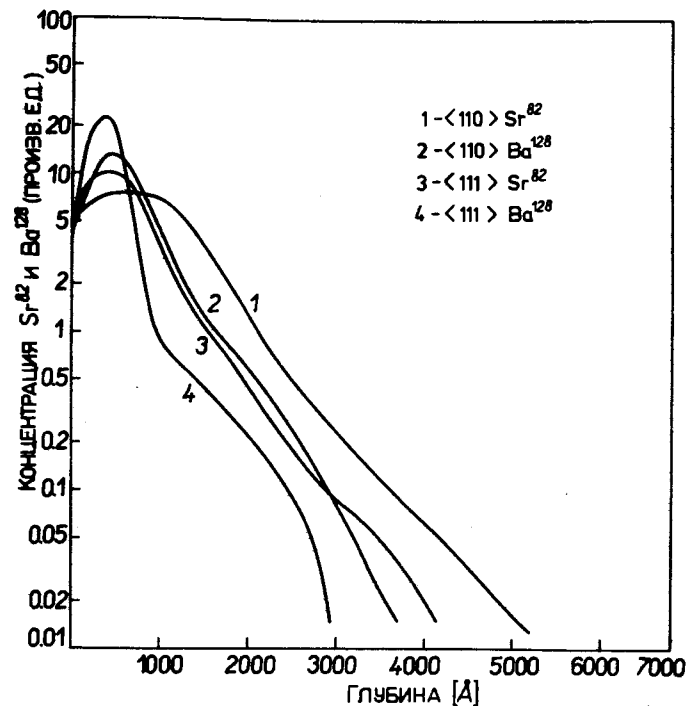


Рис. 4. Профили концентрации ионов ⁸²Sr и ¹²⁸Ba, внедренных в кремний вдоль кристаллических осей $\langle 111 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$.

Сравнивая экспериментальные и теоретические распределения, можно сделать вывод, что признаки каналирования заметны для всех ионов с массой от 82 до 169. Они тем заметнее, чем больше в решетке кристалла открыто направление, вдоль которого происходит внедрение /см. рис. 4/.

Так как не обнаруживаются предполагаемые теорией максимумы от каналированных ионов, то можно предположить, что в условиях, когда M_2 / M_1 много меньше единицы, деканалирование ионов существенно преобладает над каналированием.

Из рис. 6 видно, что с увеличением массы ионов сред-

Таблица 2

И о н	Направ- ление	R_p (\AA)	\bar{R} (\AA)	ΔR_p (\AA)	$R_{\text{теор.}}/3/$ (\AA)
^{82}Sr	<III>	$500_{\pm 20}$	744	$374_{\pm 10}$	352
^{128}Ba	<III>	$400_{\pm 15}$	570	$230_{\pm 10}$	282
^{134}Ce	<III>	$345_{\pm 10}$	486	$210_{\pm 10}$	279
^{140}Nd	<III>	$320_{\pm 10}$	385	$210_{\pm 10}$	276
^{145}Eu	<III>	$300_{\pm 10}$	362	$190_{\pm 10}$	274,5
^{149}Gd	<III>	$290_{\pm 10}$	335	$180_{\pm 10}$	273
^{152}Tb	<III>	$290_{\pm 10}$	326	$170_{\pm 10}$	272
^{160}Er	<III>	$280_{\pm 10}$	300	$140_{\pm 10}$	269
^{167}Tm	<III>	$275_{\pm 10}$	290	$137_{\pm 10}$	267
^{169}Lu	<III>	$270_{\pm 10}$	285	$135_{\pm 10}$	266
^{82}Sr	<II0>	$700_{\pm 30}$	1006	$770_{\pm 10}$	
^{128}Ba	<II0>	$525_{\pm 20}$	753	$400_{\pm 10}$	
^{140}Nd	<II0>	$450_{\pm 20}$	630	$310_{\pm 10}$	
^{152}Tb	<II0>	$400_{\pm 15}$	510	$270_{\pm 10}$	

ний экспериментальный пробег \bar{R} приближается к теоретическому, определенному для аморфных мишеней. $\bar{R}_{\text{теор.}}$ с точностью до 30% совпадает с \bar{R} в области масс $M_1 \geq 150$ /для направления <111> /.

Из этого сравнения можно заключить, что, пользуясь моделью Линдхарда для аморфных мишеней, можно примерно оценить средний пробег тяжелых ионов $/M_1 \geq 150/$ в кристаллах кремния. Статистическое же отклонение от \bar{R} , рассчитанное на основании этой модели, настолько сильно отличается от экспериментальных зна-

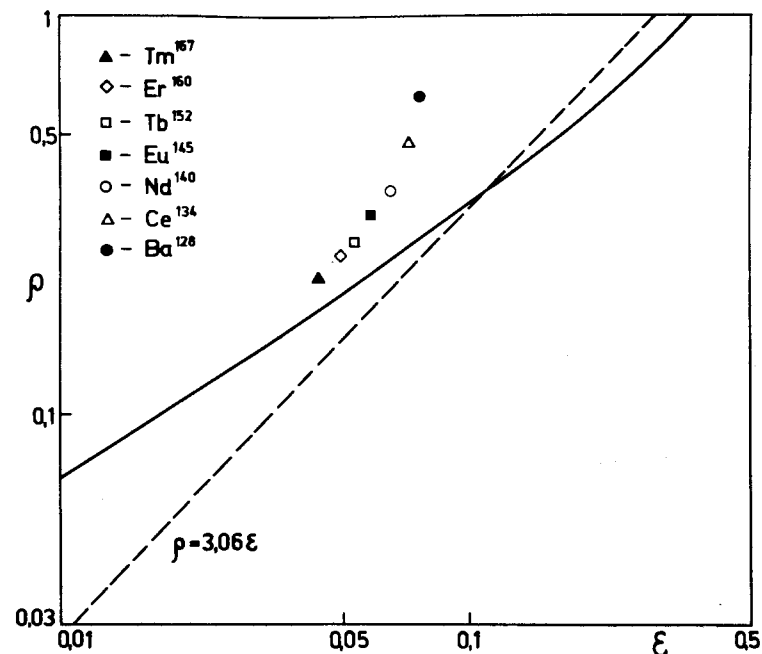


Рис. 5. Экспериментальные данные о зависимости ρ от ϵ и соответствующие теоретические кривые.

чений, что не может быть использовано даже для самых грубых оценок.

Авторы благодарны К.Я.Громову и В.И.Райко за поддержку и постоянный интерес к работе, а также Я.Юрковской и С.И.Минькову за помощь в подготовке работы.

Литература

1. J.W.Mayer, L.Eriksson, J.A.Davis. *Ion Implantation in Semiconductors*, New York and London, 1970.
2. J.Lindhard. *Phys.Lett.*, vol. 12, p. 126 (1964).
3. J.Lindhard, M.Scharff, H.E.Schiott. *Kgl. Danske. Videnskab Selskab. Mat. Fys. Medd.*, 33, No 14 (1963).
4. J.F.Gibbons. *Proc. IEEE*, 56, 296 (1968).

5. W.J.Kleinfelder, W.S.Johnson, J.F.Gibbons. *Can. Journ. Phys.*, 46, 597 (1968).
6. A.Latuszynski, K.Zuber, J.Zuber, A.Potempa, W.Zuk. *JINR, E6-7780, Dubna, 1974.*
7. Г.Музиоль, В.И.Райко, Х.Тыррофф. *ОИЯИ, Р6-4487, Дубна, 1969.*

Рукопись поступила в издательский отдел
4 октября 1974 года.

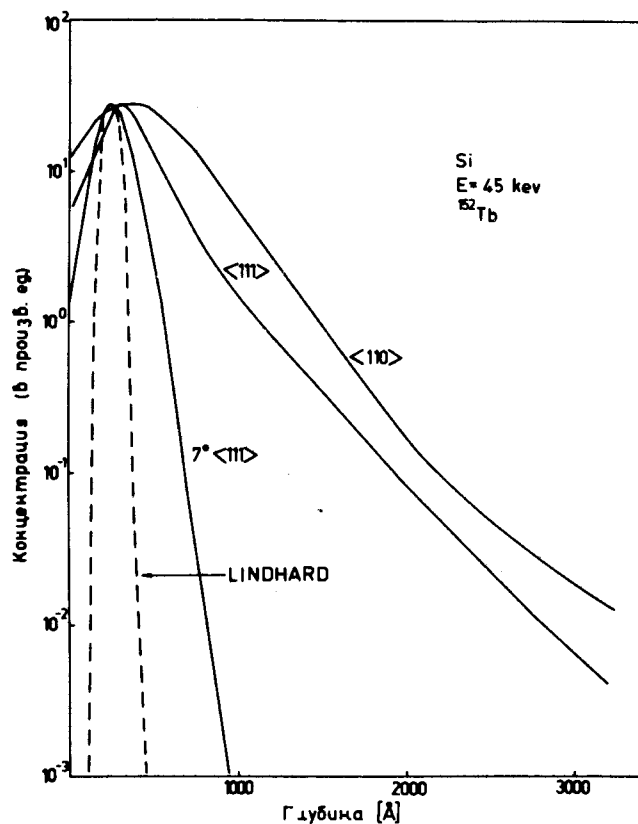


Рис. 6. Профили концентрации ионов ^{152}Tb , внедренных в кремний в разных направлениях. Ионное внедрение проводилось при энергии 40 кэВ и дозах порядка 10^{10} см^{-2} .

Условия обмена

Препринты и сообщения ОИЯИ рассылаются бесплатно, на основе взаимного обмена, университетам, институтам, лабораториям, библиотекам, научным группам и отдельным ученым более 50 стран.

Мы ожидаем, что получатели изданий ОИЯИ будут сами проявлять инициативу в бесплатной посылке публикаций в Дубну. В порядке обмена принимаются научные книги, журналы, препринты и иного вида публикации по тематике ОИЯИ.

Единственный вид публикаций, который нам присылать не следует, - это репринты /оттиски статей, уже опубликованных в научных журналах/.

В ряде случаев мы сами обращаемся к получателям наших изданий с просьбой бесплатно прислать нам какие-либо книги или выписать для нашей библиотеки научные журналы, издающиеся в их странах.

Отдельные запросы

Издательский отдел ежегодно выполняет около 3000 отдельных запросов на высылку репринтов и сообщений ОИЯИ. В таких запросах следует обязательно указывать индекс запрашиваемого издания.

Адреса

Письма по всем вопросам обмена публикациями, а также запросы на отдельные издания следует направлять по адресу:

101000 Москва,
Главный почтамт, п/я 79.
Издательский отдел
Объединенного института
ядерных исследований.

Адрес для посылки всех публикаций в порядке обмена, а также для бесплатной подписки на научные журналы:

101000 Москва,
Главный почтамт, п/я 79.
Научно-техническая библиотека
Объединенного института
ядерных исследований.