

10777

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



12/4-77
P3 - 10777

Б-73

4188/2-77

Я.Боганч, Й.Дюлаи, А.Надь, В.М.Назаров,
З.Шереш, А.Сабо

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕАКЦИИ $^{10}\text{B}(n, \alpha) ^7\text{Li}$
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АТОМОВ БОРА В КРЕМНИИ

1977

РЗ - 10777

Я.Боганч, Й.Дюлаи, А.Надь, В.М.Назаров,
З.Шереш, А.Сабо

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕАКЦИИ $^{10}\text{B}(n, \alpha) ^7\text{Li}$
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АТОМОВ БОРА В КРЕМНИИ

Направлено в ПТЭ

Институт
научных исследований
БИБЛИОТЕКА

Боганч Я. и др.

P3 - 10777

Использование реакции $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ для определения распределения атомов бора в кремнии

В работе описывается методика определения пробега (\bar{R}_p) и распределения ионов бора в кремнии без разрушения образца. Полученные значения \bar{R}_p и $\Delta\bar{R}_p$ хорошо согласуются с теоретическими значениями пробегов и с экспериментальными данными других авторов. Изучалась зависимость количества имплантированного бора от энергии имплантации.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Preprint Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

Bogants J. et.al.

P3 - 10777

Application of $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ Reaction for Determination of Distribution of Boron Implanted in Silicon

The method of determination of the (\bar{R}_p) runs and distributions of boron ions, implanted in silicon, without a sample's destruction is being described in the work. The obtained values of \bar{R}_p and $\Delta\bar{R}_p$ are in good agreement with theoretical values of the runs and with the data of other authors. The dependence of quantity of implanted boron upon an energy of implantation was being studied.

The investigation has been performed at the Neutron Physics Laboratory, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1977

При изготовлении полупроводниковых приборов из кремния в качестве примесного элемента р-типа широко используется бор. Для его введения в образец часто применяют метод ионной имплантации.

Определение зависимости пробега и распределения по глубине ионов бора в кремнии от энергии имплантации имеет важное значение при проектировании и изготовлении полупроводниковых приборов.

Расчёты пробегов (\bar{R}_p) и "распределения" ($\Delta\bar{R}_p$) ионов бора в кремнии были выполнены Д.К.Брайсом /1/. Известен также ряд работ по экспериментальному определению пробегов /2-18/ в области средних и больших энергий имплантации. Однако в области малых энергий (10-100 кэВ), важной для практических целей, достаточно точных экспериментальных данных явно не хватает. Большинство работ выполнено электрическими методами /3/, которые дают сведения о распределении только электрически активного, но не всего бора. Кроме того, эти методы требуют больших затрат труда и последовательного удаления слоев матрицы, т.е. приводят к разрушению исследуемых образцов, что далеко не всегда допустимо на практике.

В настоящей работе описывается методика определения пробега и распределения ионов бора в кремнии, основанная на измерении потери энергий альфа-частиц, возникающих в реакции $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$, при прохождении их через материал матрицы. Потери непосредственно связаны с глубиной нахождения атомов бора и не зависят от их электрического состояния. Используемая методика не требует разрушения матрицы, что дает возможность

проводить многократное изучение одного и того же образца. Большое сечение реакции (по сравнению с другими (n, α) реакциями на тепловых нейтронах) позволяет выполнить измерения практически в любых материалах матрицы и обеспечивает высокую чувствительность и при сравнительно низких нейтронных потоках.

В настоящей работе определены пробеги и распределения ионов бора в образцах с поверхностной концентрацией около 10^{15} атомов·см⁻² в области энергий имплантации 20 – 80 кэВ. Имплантация бора проводилась в ЦИФИ (Будапешт), а измерения были выполнены на импульсном реакторе ИБР-30^{/18/} Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Экспериментальная установка и измерительный тракт

Схема экспериментальной установки и измерительного тракта показана на рис. 1. Исследуемый образец ($S = 5 - 10$ см²) и кремниевый детектор помещались в общую камеру, откачиваемую до давления 10^{-2} мм рт.ст. Камера устанавливалась в пучок нейтронов на расстоянии 15 м от активной зоны реактора. Детектор размещался параллельно плоскости образца на расстоянии 5 см от него. Для проверки калибровки измерительного тракта по энергии и для мониторинга пучка служила мишень ⁶LiF толщиной 0,06 мг·см⁻².

Для регистрации заряженных частиц использовался поверхностно-барьерный кремниевый детектор с рабочей поверхностью 1,2 см² и удельным сопротивлением 1500 Ом·см. При напряжении смещения 100 В энергетическое разрешение детектора для альфа-частиц ²⁴¹Am составляло 18,7 кэВ.

В спектрометрическом тракте применялась стандартная аппаратура, разработанная в ОИЯИ^{/17/}. Амплитудный анализ осуществлялся во временном окне, соответствующем энергетическому интервалу 0,01–0,10 эВ. Амплитудные спектры стабилизировались в двух точках с помощью генератора точных амплитуд.

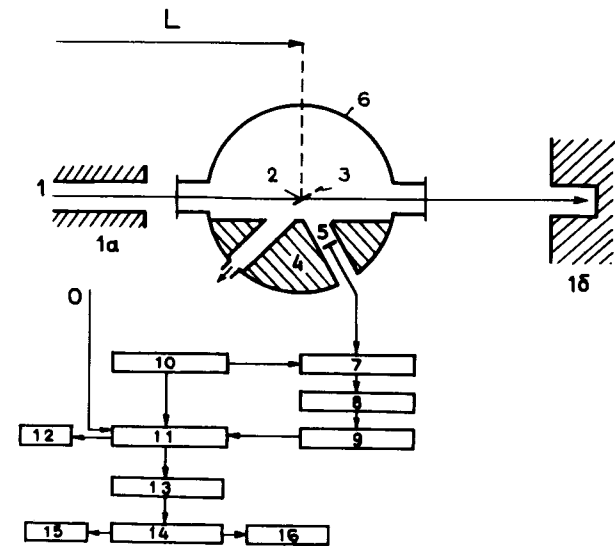


Рис. 1. Блок-схема измерительной установки. 1 – нейтронный пучок, 1а – коллиматор, 1б – ловушка пучка, 2 – образец, 3 – монитор ⁶LiF, 4 – внутренняя свинцовая защита, 5 – детектор, 6 – вакуумная камера, 7 – предусилитель, 8 – усилитель с формировкой, 9 – эмиттерный повторитель, 10 – генератор стабилизации, 11 – амплитудный анализатор с временным окном, 12 – графопостроитель, 13 – магнитофон, 14 – БЭСМ-4, 15 – ОСК, 16 – цифropечать, "0" – стартовый сигнал, L – пролетная база (15 м).

Методика и проведение измерений

Как известно из ряда работ^{/9,19,20,21,23,24,25/}, ядерная реакция ¹⁰B(n, α)⁷Li широко используется для определения содержания бора в различных материалах. Во всех этих работах некоторые трудности были вызваны высоким фоном, что вообще характерно для измерений в нейтронных пучках на тепловых стационарных реакторах.

В работе ^{22/} были показаны перспективы применения импульсных реакторов в активационном анализе, в частности теоретически обосновано, что с использованием метода времени пролета на импульсных реакторах возможно уменьшение фона на 1-2 порядка по сравнению с фоном на стационарных реакторах.

Сравнительно низкий фон в импульсном режиме в сравнении со стационарным и его характер (см. рис.2) в области малых энергий α -частиц позволил определить количество и распределение бора в имплантированных образцах кремния с хорошей чувствительностью.

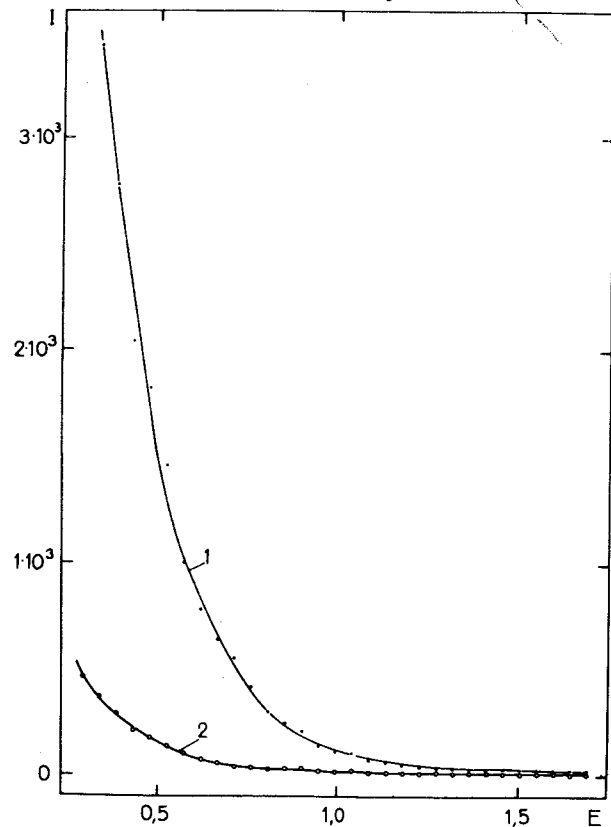


Рис.2. Соотношение фонов в импульсном (2) и стационарном режиме (1) при одинаковых интегральных потоках тепловых нейтронов. 1 - число импульсов, E - энергия заряженных частиц (МэВ).

Количественное определение бора осуществлялось сравнением с эталонами, количество бора в которых известно с точностью $\pm 2\%$. Эталоны готовились из соединения $(C_5B_9H_{11})_2Co \cdot Cs$, спиртовой раствор которого наносился на алюминиевые подложки диаметром 30 мм. Определялась зависимость интегрального числа зарегистрированных детектором альфа-частиц от количества бора (рис.3). Из рис.3 видно, что линейная зависимость в данных условиях сохраняется в пределах 0,5-50 мкг (0,002 - 0,2 мг соединения на cm^2). Дальнейшее увеличение количества бора приводит к сильному увеличению самопоглощения альфа-частиц. Минимальное определяемое количество бора в данных условиях составляет 0,5 мкг. В качестве примера покажем аппаратный спектр эталона с количеством бора 6,4 мкг (рис.4).

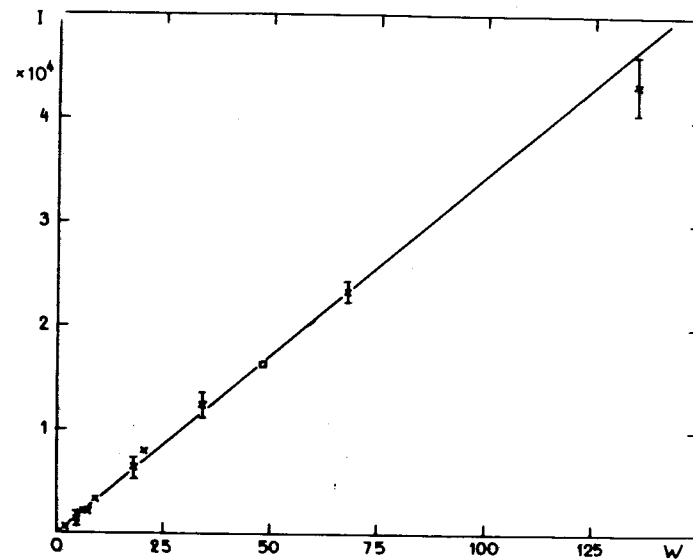


Рис.3. Зависимость числа импульсов альфа-частиц (1) от количества бора (в мкг).

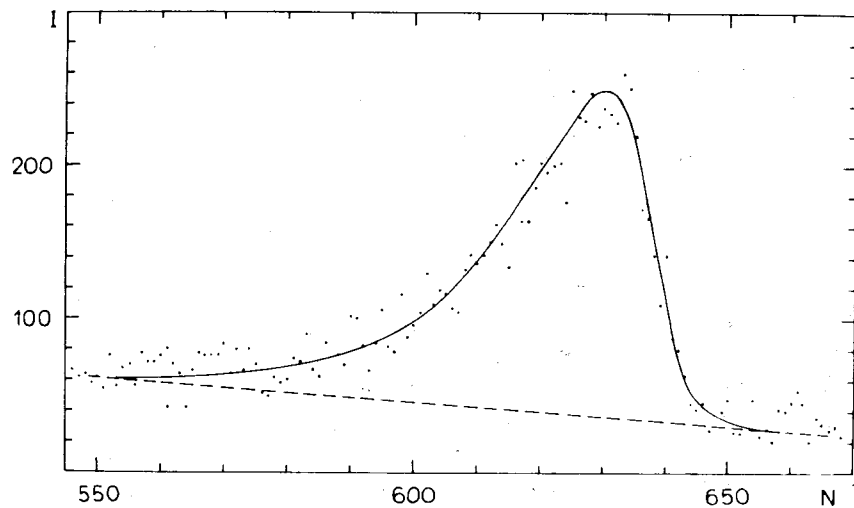


Рис. 4. Аппаратурный спектр альфа-частиц эталона с количеством бора 6,4 мкг.

При определении пробега \bar{R}_p и распределения ионов бора в качестве основного калибровочного источника использовался тонкий слой (300 - 400 Å) естественно-го бора, нанесенного вакуумным распылением на алюминиевую подложку (аналогичным образом готовилась мишень для монитора). Калибровка по энергии проводилась по линиям заряженных частиц и ядер, возникающих в реакциях ${}^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ и ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$ при энергиях соответственно 2,05 и 2,73 МэВ, а также 0,839 и 1,471 МэВ. В измерениях учитывалось самопоглощение указанных частиц в слоях бора и ${}^6\text{LiF}$. На рис. 5 показан калибровочный спектр по энергии от тонких слоев бора и монитора. Пики соответствуют ядерным частицам образующихся в реакциях ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$ и ${}^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$.

В качестве примера, на рис. 6 показан аппаратурный спектр альфа-частиц, полученный от образца кремния, в который были имплантированы ионы ${}^{10}\text{B}$.

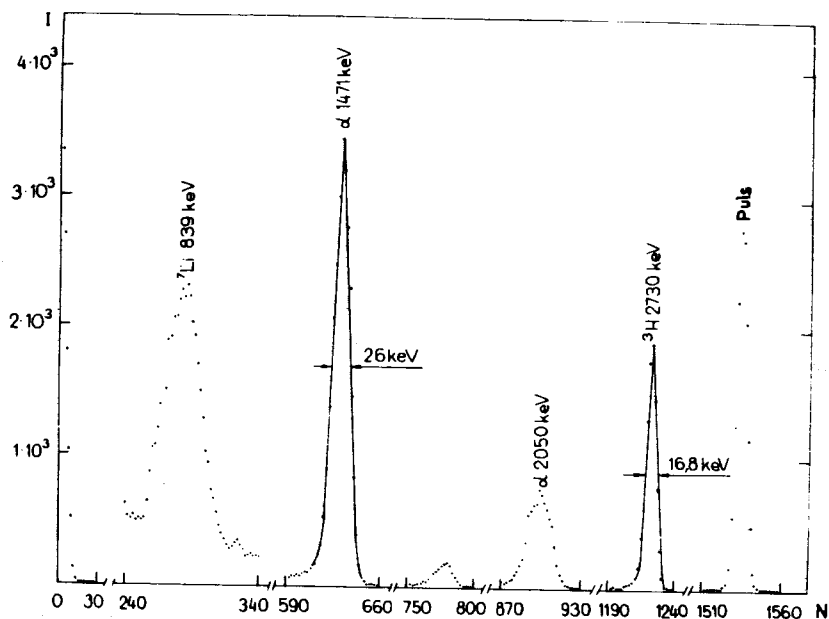


Рис. 5. Амплитудный спектр, полученный от образцов монитора и "тонкого бора".

Обработка результатов измерений

Обработка спектров проводилась на ЭВМ БЭСМ-4 и БЭСМ-6.

На ЭВМ БЭСМ-4 с помощью стандартной математической программы^{/26/} определялись положения и площади пиков. Пробег (\bar{R}_p) находился по формуле

$$\bar{R}_p = 3,46 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta E_\alpha,$$

где ΔE_α - потеря энергии α -частиц.

$$\Delta E_\alpha = \frac{2730 - 1471}{K_T - K_{\text{Т.б.}}} (K_{\text{Т.б.}} - K_1) + \Delta E'_\alpha, \quad (1)$$

где K_i , $K_{T.б.}$ - номера каналов, соответствующих пикам α -частиц в исследуемых образцах и "тонком боре", K_T - номер канала, соответствующего пику тритонов, $\Delta E'_\alpha \approx 10$ кэВ - потеря энергий альфа-частиц в "тонком боре".

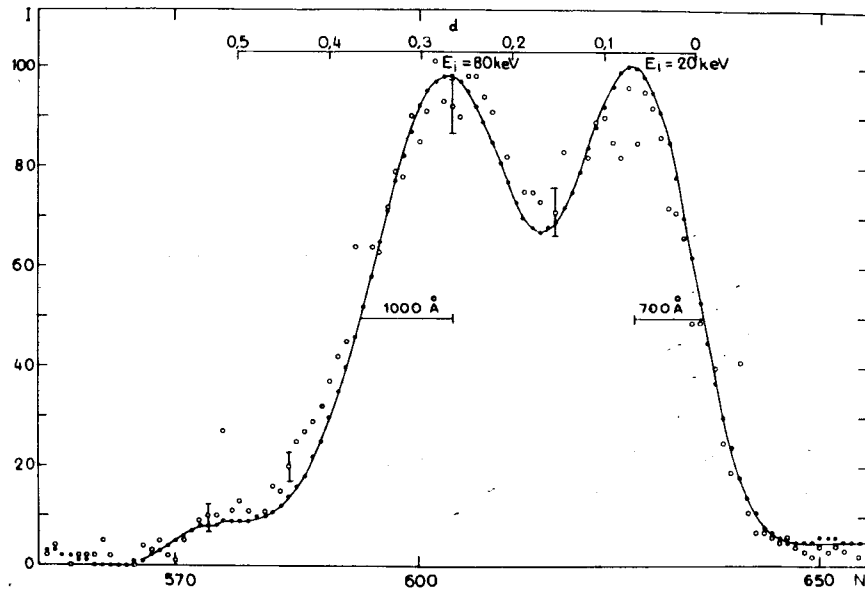


Рис. 6. Аппаратурный спектр образца кремния, имплантированного ионами ^{10}B . Энергии имплантированных ионов - 20 и 80 кэВ, дозы - $2000 \text{ мкКл}\cdot\text{см}^{-2}$. Обозначения: \circ - экспериментальные точки; - - - - - расчетная кривая, полученная методом деконволюции; I - число импульсов в относительных единицах; N - номер канала; d - глубина в микронах.

Площади пиков, соответствующих бору, были приведены к общему монитору нейтронов, и с помощью калибровочной кривой (рис. 3) в образцах определялось количество имплантированного бора.

Распределение атомов бора получено в результате обработки аппаратурных спектров на ЭВМ БЭСМ-6 методом деконволюции (деконволюция - операция, обратная операции свертки). Математической основой программы деконволюции является преобразование Фурье^{/10,27/}. За эталонный спектр был принят спектр "тонкого бора". Частота обрезания определялась автоматически с помощью анализа Стюдента^{/27/}. Сглаживание спектров проводилось методом Ланцоша^{/28/}.

В качестве примеров на рис. 6 и 7 показаны аппаратурные спектры и результаты математической обработки методом деконволюции.

Результаты измерений

Указанная выше методика была использована для определения параметров ионной имплантации (дозы и энергии имплантации), а также для изучения влияния отжига и повторных имплантаций на распределение атомов бора в кремнии. В области энергий имплантации 20-80 кэВ находили зависимость \bar{R}_p и $\Delta\bar{R}_p$ от энергии имплантации (рис. 8). Из рисунка видно, что результаты наших измерений хорошо согласуются с теоретическими данными по \bar{R}_p и наблюдается некоторое - на наш взгляд, однако, несущественное - расхождение экспериментальных и теоретических значений $\Delta\bar{R}_p$ при энергии имплантации 10 - 50 кэВ. К сожалению, для этой энергетической области нет других экспериментальных данных, на основе которых можно было бы отстаивать правильность теории или результатов эксперимента для данной области энергий.

Определенное нами количество имплантированного в кремний бора D_N было сравнено с данными (D_E), которые были получены путем измерения тока в ходе процесса имплантаций (дозы в $\text{мкКл}\cdot\text{см}^{-2}$) (рис. 9). В настоящее время мы не можем дать правильного объяснения расхождения между D_N и D_E . По-видимому, допущена какая-то систематическая ошибка в методе электрических измерений.

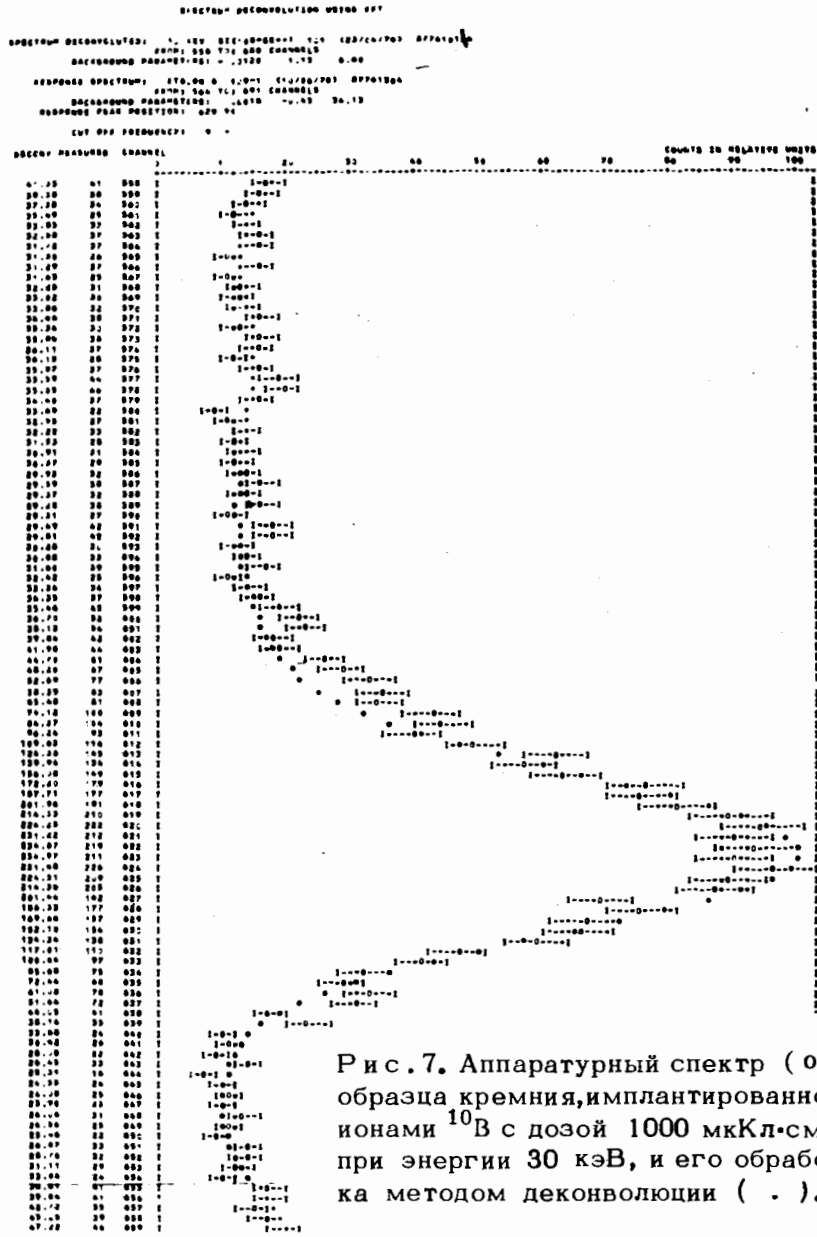


Рис. 7. Аппаратурный спектр (o) образца кремния, имплантированного ионами ^{10}B с дозой $1000 \text{ мкКл}\cdot\text{см}^{-2}$ при энергии 30 кэВ, и его обработка методом деконволюции (·).

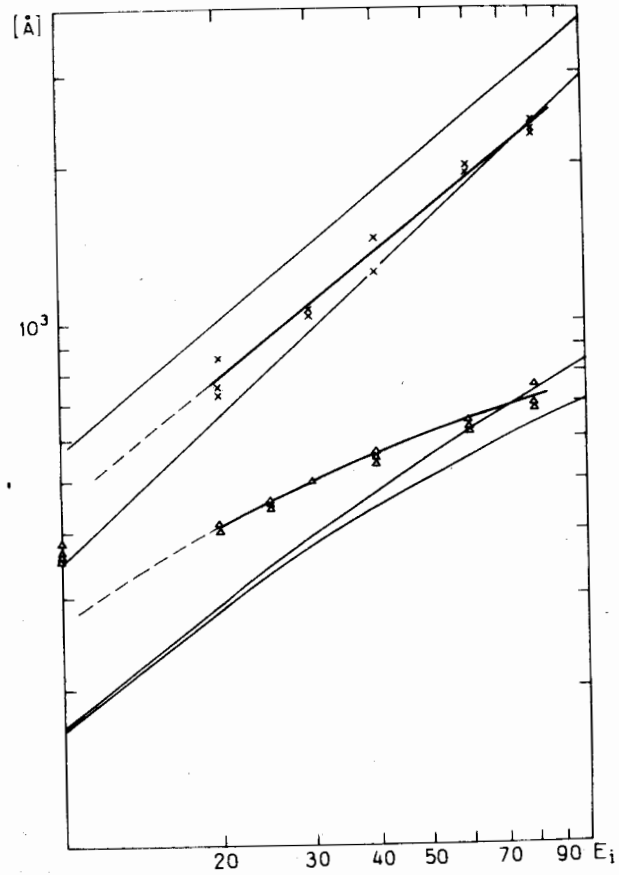


Рис. 8. Зависимость \bar{R}_p и $\Delta\bar{R}_p$ от энергии имплантаций. $-x-x-x-\bar{R}_p$ - по нашим измерениям, $-\Delta-\Delta-\Delta \Delta\bar{R}_p$ - по нашим измерениям, $-----$ - теоретические кривые по Брайсу.

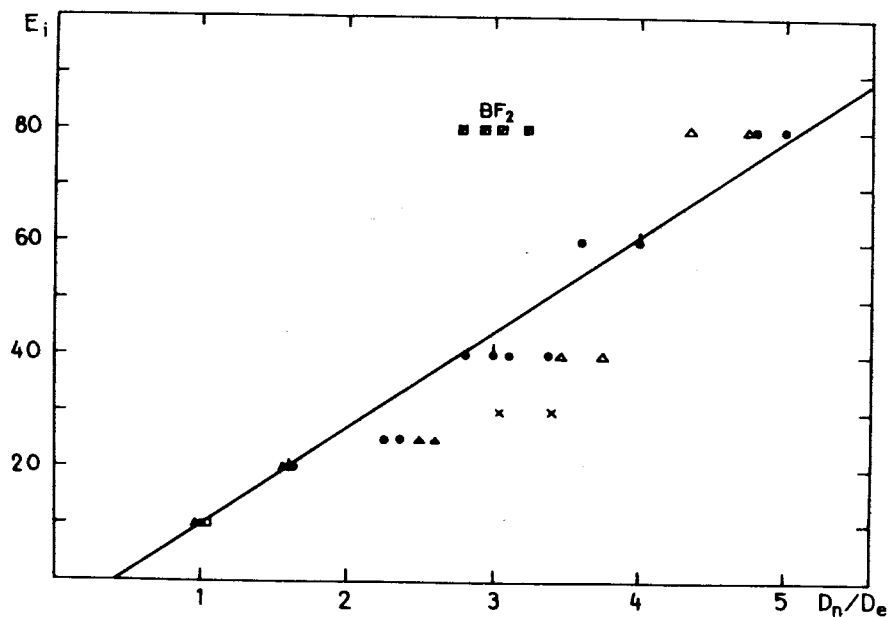


Рис.9. Отношение доз для различных энергий имплантаций (E_i), определяемых ядерно-физическим методом (D_N) и методом электрических измерений (D_E). $D_E = 2000 \text{ мкКл}\cdot\text{см}^{-2}$. Обозначения: образцы с различными энергиями имплантации, но имеющие одинаковые размеры, на рисунке обозначены одинаковыми знаками. \circ - контрольные измерения, выполненные чехословацкими учеными в Институте АН ЧССР на тех же образцах, \times - образцы были приготовлены в ИАЭ им.Курчатова.

На рис.10 показано распределение имплантированных атомов бора в кремнии для одинаковых доз ($2000 \text{ мкКл}\cdot\text{см}^{-2} = 1,25 \cdot 10^{16} \text{ В атомов}\cdot\text{см}^{-2}$), но различных энергий.

Было также изучено перераспределение имплантированных атомов бора под влиянием отжига (рис.11 и 12). Для определения воспроизводимости наших результатов составлена таблица, в которой показаны данные измерений одного и того же образца с поверхностью $7,8 \text{ см}^2$ и дозой имплантации $2000 \text{ мкКл}\cdot\text{см}^{-2}$. Время измерений, как и во всех экспериментах, составляло 10-20 ч. Дисперсия определялась по формуле

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

По данным таблицы видно, что дисперсия восьми параллельных измерений - 4,6%. Отметим, что определение содержания бора в других образцах обычно проводилось два раза (поверхность образцов $3,5 \pm 10 \text{ см}^2$) и расхождение результатов не превышало 15%.

Таблица

Проверка воспроизводимости измерений

№ параллельных измерений	число импульсов		$x = \frac{10^4 x_i}{\text{монитор}}$
	бора x_i	монитора	
1	1785	17500	1020
2	2791	29074	962
3	344	3544	971
4	2607	24637	1058
5	1302	11795	1103
6	2794	28929	966
7	2182	20435	1068
8	2056	20212	1017

$$\bar{x} = 1021; \quad s = 47 = 4,6\%; \quad x = 1021 \pm 47$$

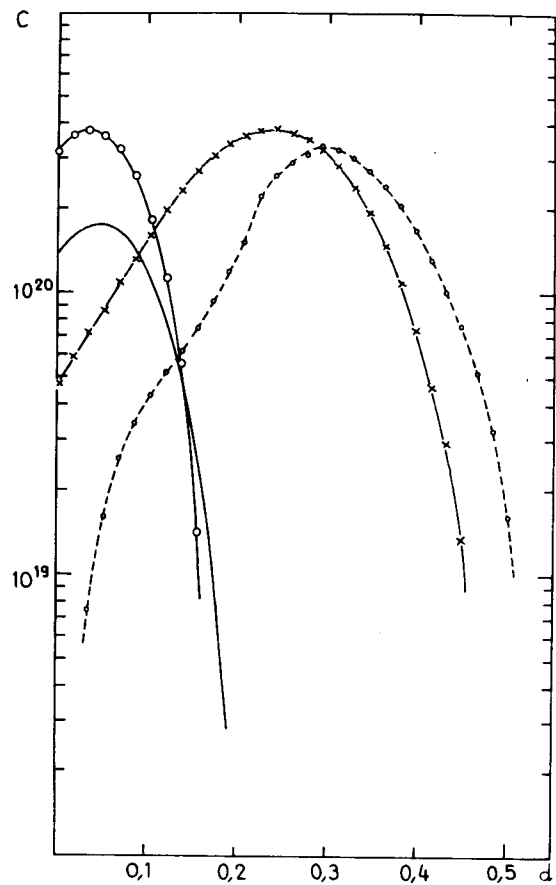


Рис.10. Распределение атомов бора в кремнии. Доза имплантации - $2000 \text{ мкКл}\cdot\text{см}^{-2}$.

————— - 10 кэВ
 -x-x-x- - 60 кэВ
 -o-o-o- - 80 кэВ

—o-o-o- - 80 кэВ - BF_2^+ ,
 с - концентрация ^{10}B (атом/ см^3), d - глубина (мкм).

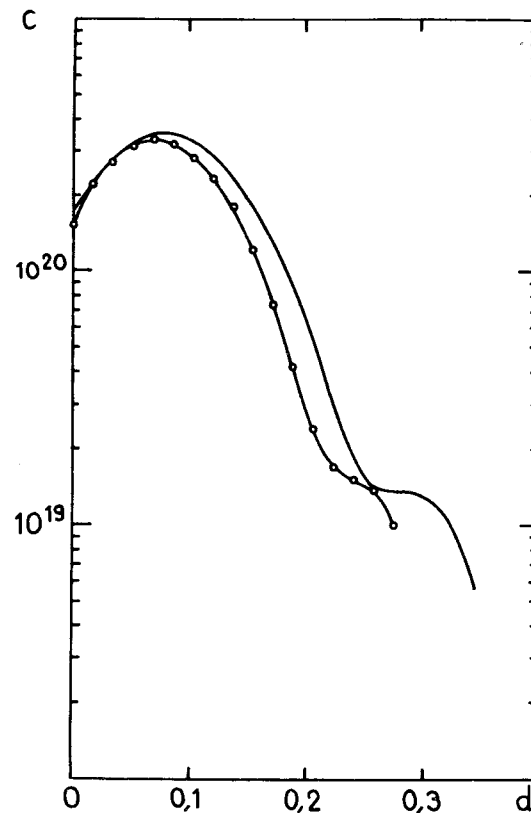


Рис.11. Влияние отжига на распределение атомов бора в кремнии. $E_i = 25 \text{ кэВ}$; $D_E = 2000 \text{ мкКл}\cdot\text{см}^{-2}$, с - концентрация ^{10}B (атом/ см^3), d - глубина (мкм), -o-o-o- - без отжига. ————— - отжиг в инертной атмосфере при 400°C в течение 30 мин.

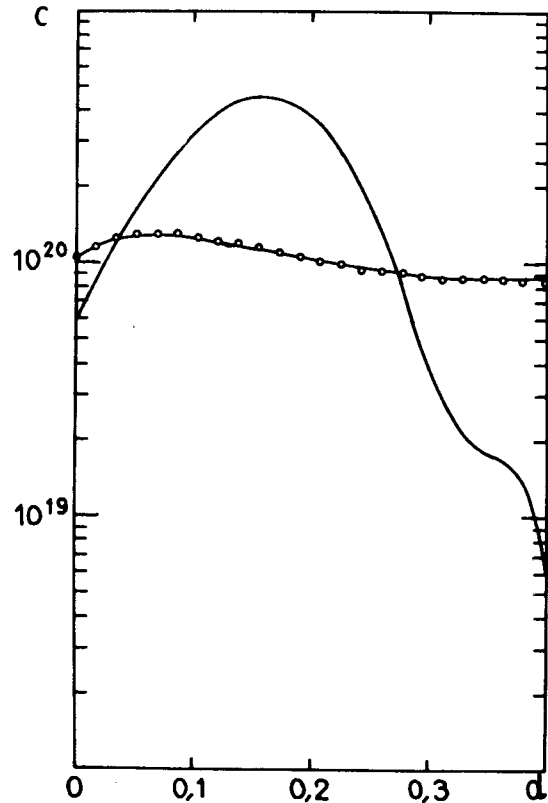


Рис. 12. Влияние отжига на распределение атомов бора в кремнии. $E_i = 40$ кэВ, $D_E = 2000$ мкКл/см², c - концентрация ¹⁰B (атом/см³); d - глубина (мкм), — — — без отжига, —○—○— отжиг в инертной атмосфере при 900°С в течение 30 мин.

Выводы

Измерения на импульсном реакторе ИБР-30 показали, что при использовании метода времени пролета можно определять \bar{R}_p и распределение бора при потоке тепловых нейтронов всего 10^6 нейтронов/см²·с на образцах с концентрацией 10^{15} ¹⁰B . атомов·см⁻² . Полученные значения \bar{R}_p хорошо согласуются с теоретическими значениями пробегов . Точность определения \bar{R}_p составляет ± 200 Å .

Литература

1. Brice D.K. Ion Implantation Range and Energy Position Distributions. Vol. 1., IFI/Plenum, New York, 1975.
2. Gibbons I.F. Proc. IEEE, v. 55, 295, Harwell, 1968.
3. Seidel T.E. In.: Proc. Second International Conference of Ion Implantation in Semiconductors, Garmish, Springer Verlag, New York, 47, 1971.
4. Blamires N.G. e.a. Phys.Lett., 1968, 28A, 178.
5. Lecrosnier D.P. e.a. In.: Proc. Conf. on Ion Implantation Reading, Peter Peregrinus, Stevenage, 102, New York-London, 1970.
6. Fairfield J.M. e.a. Transact. of the Metallurg. Soc. of AIME, 245, 469, 1969.
7. Davies D.E. Appl.Phys.Lett., 1968, 13, 243.
8. IBM. Appl. Phys.Lett., 1972, 21, 16.
9. Bontemps A., Ligeon E. Rapport CEA-N-1492, Grenoble, 1971.
10. Ziegler J.F., Cole G.W., Baglin J.E.E. J.Appl.Phys., 1972, 43, 3809.

11. Buchanan B. e.a. In: Proc. Int. Conf. of Appl. of Ion Beam to Semicond. Tech., Grenoble, CEA, 649, 1967.
12. Nikolett M.A. e.a. Science, 1972, 177, 841.
13. Williamson C.F., Boujot J.P., Picard J. Report CEA-R, 3042, 1966.
14. Bichsel H., Tshalear. Nuclear Data Tables, 1967, A3, 343.
15. Northcliffe L.C., Schilling R.F. Nuclear Data Tables, 1970, A7, 233.
16. Mitchel I.V. e.a. In: Proc. Int. Conf. on Appl. of Nucl. Data, Paris, IAEA, 1973.
17. Омеляненко А.А. Родионов К.Г., Хен Вен Гынь. ОИЯИ, 2280, Дубна, 1965.
18. Голиков В.В. и др. ОИЯИ, 3-5736, Дубна, 1971.
19. Garbrah B.W., Whitley J.E. Anal.Chem., 1967, 39/3/, 345.
20. Garbrah B.W., Whitley J.E. Glass Technol., 1967, 8, 154.
21. Comar D. e.a. Nucl.Appl., 1969, 6, 344.
22. Bogancs J. e.a. Izotoptechnika, 1971, 14, 493.
23. Боганч Я. и др. Isotopenpraxis, 1975, 11/12/, 429.
24. Боганч Я. и др. ОИЯИ, P14-8295, Дубна, 1974.
25. Kvitek J., Hnatowicz V., Kotas P. Radiochem.Radioan.Lett., 1976, 24/3/, 205.
26. Злоказов В.Б., Нефедьева Л.Ф. ОИЯИ, 10-5966, Дубна, 1971.
27. Cooley J.W., Tukey J.W. Math.Comput., 1965, 19, 297.
28. Lanczos C. Applied Analysis, N.Y., 1961.

Рукопись поступила в издательский отдел
23 июня 1977 года.