

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



Б-73

10/11 '75
P14 - 8295

511/2-75
Я.Боганч, Ш.Деме, Й.Дюлаи, А.Надь, В.М.Назаров,
А.Чеке, Ю.С.Язвickий

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕАКЦИИ $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОБЕГА ИОНОВ БОРА,
ИМПЛАНТИРОВАННЫХ В КРЕМНИЙ

1974

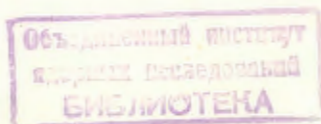
ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

Я.Боганч, Ш.Деме, Й.Дюлаи, А.Надь, В.М.Назаров,
А.Чёке, Ю.С.Язвицкий

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕАКЦИИ $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОБЕГА ИОНОВ БОРА,
ИМПЛАНТИРОВАННЫХ В КРЕМНИЙ

Направлено в журнал "Magyar Kémikusok Lapja"
(ВНР)

и на Международную конференцию по внедрению ионов
в полупроводники (ПНР, 9-12 сентября 1974 года).



Богач Я., Деме Ш., Дюлай Й., Надь А.,
Назаров В.М., Чёке А., Язвический Ю.С.

P14 - 8295

Использование реакции $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ для определения пробега ионов бора, имплантированных в кремний

Описывается методика определения пробегов (\bar{R}_p) имплантированных в кремний ионов бора без разрушения образца. Определены значения пробегов в области энергий имплантации 20-80 кэВ. Точность определения \bar{R}_p составляет $\pm 200 \text{ \AA}$. Полученные значения \bar{R}_p хорошо согласуются с теоретическими значениями пробегов, рассчитанными по теории LSS, и с данными других экспериментов.

Препринт Объединенного института ядерных исследований.
Дубна, 1974

Bogacs J., Deme S., Gyulai J., Nagy A.,
Nazarov V.M., Csoké A., Yazvitsky Yu.S.

P14 - 8295

A Method for the Determination of Boron Ranges in Ion-Implanted Silicon by the $^{10}\text{B}(n,\alpha)$ Nuclear Reaction

A non-destructive technique for the determination of boron ranges in ion-implanted silicon is briefly described. The values of the boron ranges in the random silicon in the energy region 20-80 keV were determined with an accuracy of $\pm 200 \text{ \AA}$. The values obtained have been compared to LSS theory and to other experiments.

Preprint. Joint Institute for Nuclear Research.
Dubna, 1974

При изготовлении полупроводников из Si в качестве примесного элемента p-типа широко используется бор. В последнее время для его введения в образец начали применять метод ионной имплантации. Определение зависимости пробега от энергии имплантируемых ионов имеет важное значение при проектировании и изготовлении полупроводниковых приборов.

Расчеты пробегов ионов B в кремнии были выполнены Гиббсом^{/2/} на основе теории Линхарда, Шарфа и Шкиота^{/1/} /теория LSS/. Известен также ряд работ по экспериментальному определению пробегов ионов бора при имплантации^{/3-16/}. Однако в области малых энергий, важной для практических целей, достаточно точных /с точностью лучше $\pm 200 \text{ \AA}$ / экспериментальных данных явно не хватает. Подавляющее большинство этих работ выполнено косвенными /электрическими/ методами^{/4/}, которые дают сведения о распределении в матрице только электрически активного бора, но не всего бора. Кроме того, эти методы требуют больших затрат труда и последовательной шлифовки слоев матрицы, т.е. приводят к разрушению исследуемых образцов, что далеко не всегда допустимо на практике.

В настоящей работе описывается методика определения пробега ионов бора в кремнии, основанная на реакции $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$. Измеряются потери энергии α -частиц, выходящих из матрицы. Они непосредственно связаны с глубиной нахождения примесных атомов и не зависят от их электрического состояния. Используемая методика не требует послойного снятия матрицы, что дает возможность проведения многократных измерений на одном и том же образце. Большое сечение реакции $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$

/по сравнению с другими (n, α) реакциями на тепловых нейтронах/ позволяет выполнять измерения пробегов практически в любых материалах матрицы.

При потоке тепловых нейтронов 10^6 нейтр./см².сек были определены пробеги ионов с поверхностной концентрацией около 10^{15} атомов.см⁻². Имплантация бора проводилась при энергии ионов 20, 40, 60 и 80 кэВ в ЦИФИ /Будапешт/. Измерения были выполнены на импульсном реакторе ИБР-30^{/18/} ЛНФ.

Описание эксперимента и методики

Схема измерительной установки показана на рис. 1. Исследуемый образец и детектор альфа-частиц помещались в общую камеру, откачиваемую до давления 10^{-2} мм рт.ст. Камера устанавливалась в пучок нейтронов на расстоянии 10 м от активной зоны реактора. Детектор альфа-частиц размещался параллельно плоскости образца. Расстояние между детектором и образцом равнялось 15 см. Для проверки калибровки измерительного тракта по энергии и для мониторингирования пучка служила мишень ⁶LiF в виде кольца толщиной 0,06 мг.см⁻² /см. рис. 1/.

В качестве детектора использовался поверхностно-барьерный кремниевый детектор с рабочей поверхностью 1 см² и удельным сопротивлением 400 Ом.см. Детектор при напряжении смещения 60 В имел разрешение по энергии 60 кэВ для альфа-частиц ²⁴¹Am. Благодаря малой толщине чувствительного слоя, при достаточно высокой напряженности поля, низкоомные детекторы позволяют значительно снизить гамма-фон.

Блок-схема измерительного тракта показана на рис. 1. В спектрометрическом тракте применялась стандартная аппаратура, разработанная в ОИЯИ^{/17/}. В эксперименте осуществлялся амплитудный анализ /2048 каналов/ импульсов во временном окне, соответствующем времени попадания тепловых нейтронов в исследуемый образец /см. рис. 2/.

Обработка спектров проводилась в режиме of-line на

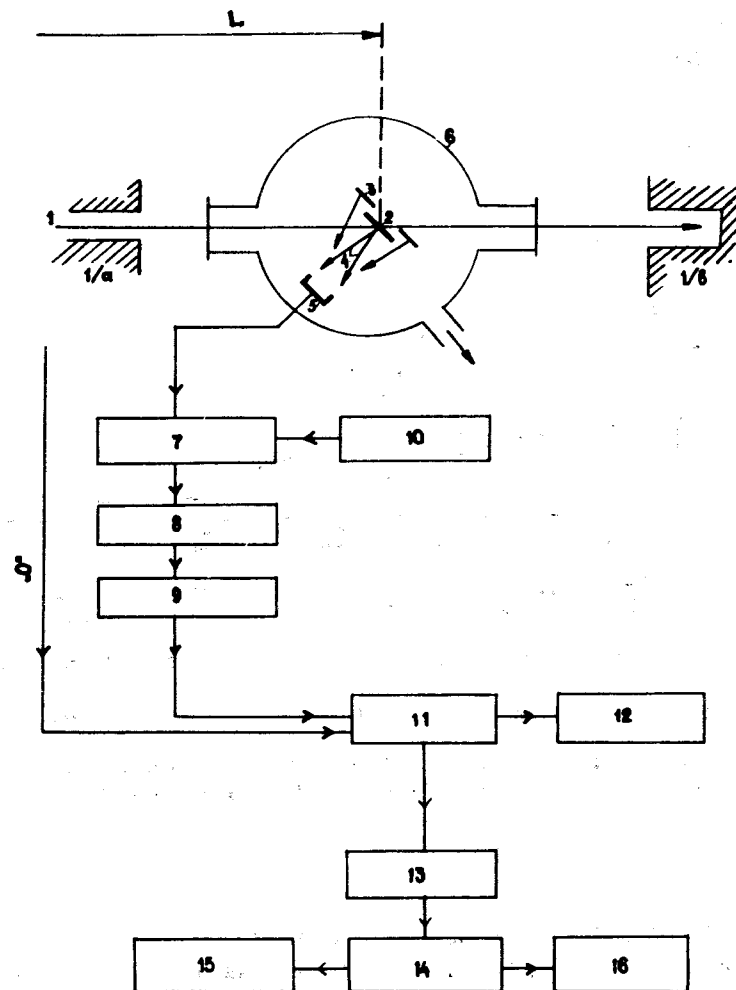


Рис. 1. Блок-схема измерительной установки. 1 - нейтронный пучок, 1а - коллиматор, 1в - ловушка пучка, 2 - образец, 3 - мишень ⁶LiF, 4 - заряженные частицы, 5 - детектор, 6 - вакуумная камера, 7 - предусилитель, 8 - усилитель с формировкой, 9 - эмиттерный повторитель, 10 - генератор, 11 - амплитудный анализатор с временным окном, 12 - графикопостроитель, 13 - магнетрон, 14 - БЭСМ-4, 15 - ОСК, 16 - цифровая печать, "О" - стартовый сигнал, L - пролетная база /10 м/.

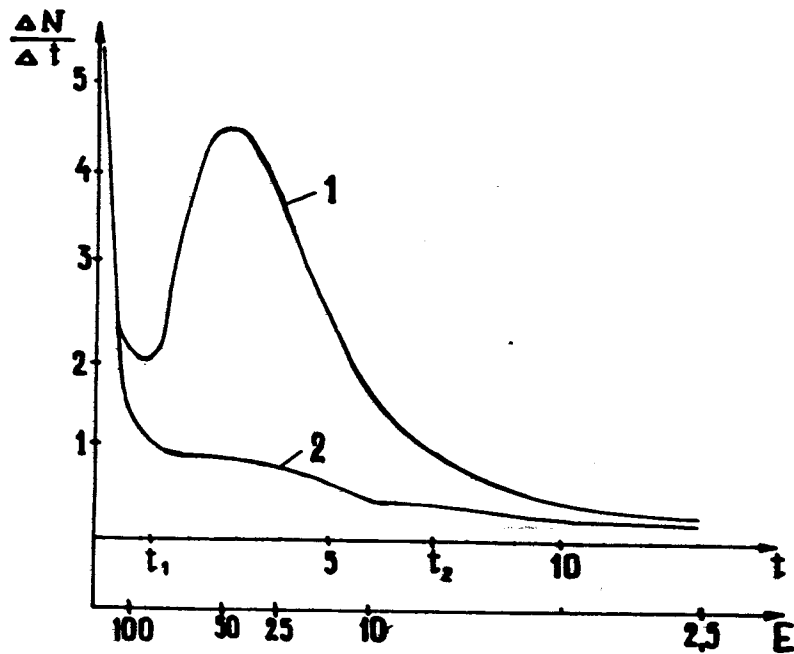


Рис. 2. Спектр нейтронов /1/ и фона /2/ в шкале времени пролета. $\frac{\Delta N}{\Delta t}$ - число отсчетов в канале в относительных единицах длительностью 128 мксек, t - время пролета в мксек, $t_2 - t_1$ - временное окно, E - энергия нейтронов, МэВ.

ЭВМ БЭСМ-4 с помощью стандартной математической программы. Эта программа определяла положение пиков, соответствующих альфа-частицам с энергией $/1471 - \Delta E_\alpha /$ кэВ и тритонам с энергией 2730 кэВ/см. рис. 3/. Ошибки в определении положения пиков включали в себя коррекцию на χ^2 :

$$\sigma_{\text{факт.}} = \sigma_{\text{расч.}} \cdot \sqrt{\frac{\chi^2}{N - m}}, \quad /1/$$

где N - число обработанных точек, m - число степеней свободы.

В качестве основного калибровочного образца использовался тонкий слой естественного бора, нанесенного вакуумным распылением на алюминиевую подложку. Толщина этого слоя по потерям энергии α -частиц была эквивалентна глубине проникновения ионов бора в кремний при энергии имплантации 10 кэВ.

Измерительный тракт дополнительно контролировался источником ^{241}Am и спектрометрическим генератором. На рис. 3 показан калибровочный спектр от тонких слоев металлического бора и ^6LiF . Пики, указанные на рисунке, соответствуют энергиям ядерных частиц, образовавшихся в реакциях $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ и $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$.

На рис. 4 показаны аппаратные спектры от образцов кремния с энергиями имплантации 10 и 80 кэВ и контрольные пики от тритонов. Смещение альфа-линии пропорционально потерям энергии (ΔE_α) альфа-частиц в образце кремния. Определение ΔE_α производилось по формуле

$$\Delta E_\alpha = (E_{10} - E_i) - B_{10} = \frac{(E_{02} - E_{01}) + (A_1 - A_2)}{k_{02} - k_{01}} (k_{10} - k_i), \quad /2/$$

где E_{10} - 1471 кэВ; E_i - измеренная энергия альфа-частиц в образце; E_{02}, E_{01} - энергия тритонов /2730 кэВ/ и альфа-частиц /2050 кэВ/; k_{10}, k_i, k_{01} и k_{02} - номера каналов, соответствующих вышеуказанным пикам; B_{10} - потери энергии /~ 10 кэВ/ в калибровочном образце; A_1, A_2 - потери энергии в образце ^6LiF .

По измеренным значениям ΔE_α определялась усредненная величина проекции (\bar{R}_p) фактического пробега на ось пучка ионов по формуле

$$\bar{R}_p = \int_{E_{10}}^{E_{10} - \Delta E_\alpha} (dE/dx)^{-1} \cdot dE. \quad /3/$$

Удельные потери энергии альфа-частиц для кремния брались из работы /10/, в которой были обобщены экспериментальные значения потерь в виде следующего выражения:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_\alpha = 243,7 + 0,243E + [(-3,074 \cdot 10^{-4}) E^2] + 1,232 \cdot 10^{-7} \cdot E^3 + [(-1,686 \cdot 10^{-11})] \cdot E^4, \quad /4/$$

где E - в кэВ; x - в мкм.

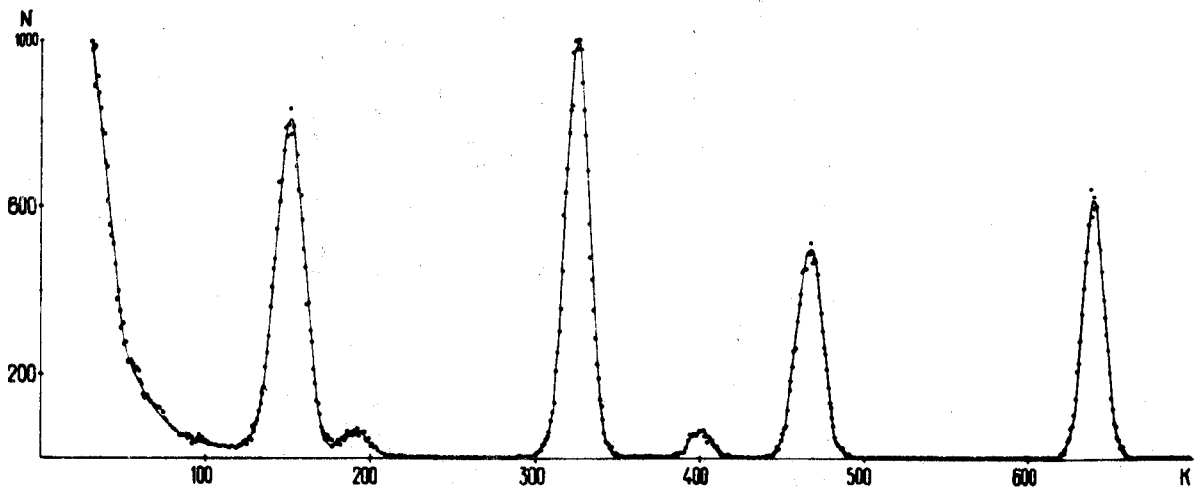


Рис. 3. Аппаратурные спектры, полученные от образцов ${}^6\text{LiF}$ и естественного В. N - число отсчетов в канале за 1 час измерений. k - номер канала амплитудного анализатора. Первые четыре пика (слева направо) соответствуют частицам ${}^7\text{Li}$, 839 кэВ/94%/; ${}^7\text{Li}$, 1014 кэВ/6%/; ${}^4\text{He}$, 1471 кэВ/94%/; ${}^4\text{He}$, 1777 кэВ/6%/ от реакции ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$; последние пики соответствуют частицам ${}^4\text{He}$, 2050 кэВ и ${}^3\text{H}$, 2730 кэВ от реакции ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$.

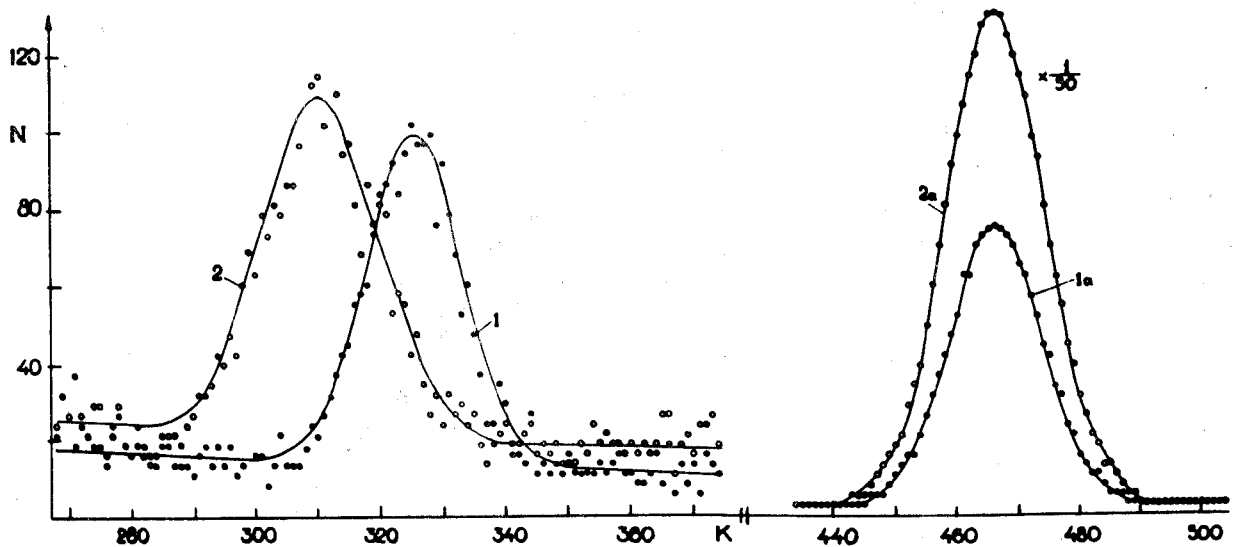


Рис. 4. Амплитудные спектры, полученные от образцов с энергиями имплантации ионов бора 10 кэВ /1/ и 80 кэВ /2/. N - число отсчетов в канале /за 15 часов измерений/, k - номер канала амплитудного анализатора, 1а, 2а - контрольные пики от ${}^6\text{LiF}$ -мишени.

После численного интегрирования выражения /3/ в районе энергии альфа-частиц 1500 ± 100 кэВ получаем более простое выражение для определения пробега ионов бора в кремнии:

$$\bar{R}_p = 4,012 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta E_\alpha - 6 \cdot 10^{-7} (\Delta E_\alpha)^2. \quad /5/$$

На рис. 5 показаны полученные в данной работе экспериментальные значения \bar{R}_p для ионов бора в деориентированном кремнии. На этом же рисунке приведены теоретические значения \bar{R}_p , полученные Гиббсом^{/2/}. Обозначения на рисунке дополнительно см в таблице.

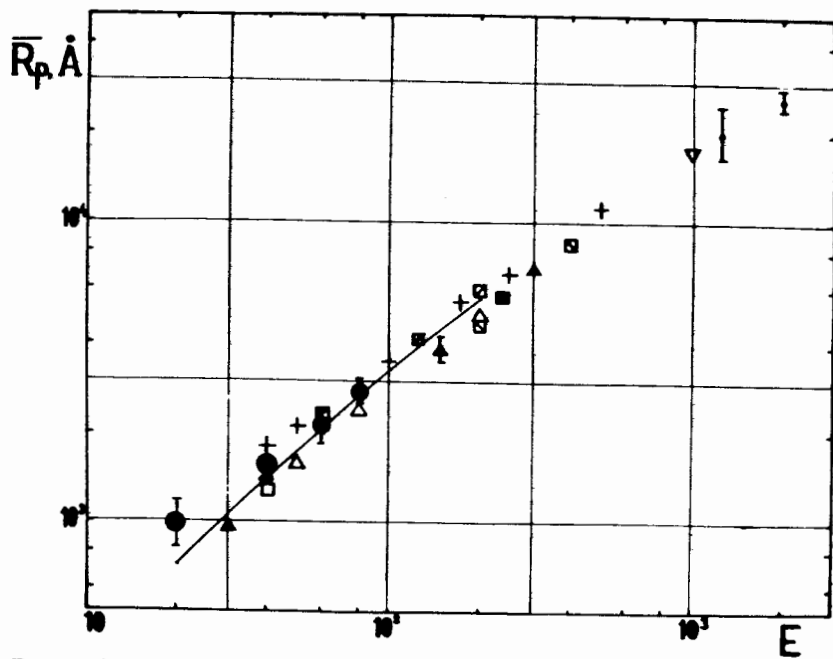


Рис. 5. Пробеги ионов бора в кремнии в зависимости от энергии имплантации. \bar{R}_p - пробег ионов, Å, E - энергия имплантации, кэВ. • - результаты, полученные в данной работе. Остальные обозначения - см. таблицу.

Таблица

Пояснение к рисунку 5

Обозначение	Автор (год публ.)	Номер ссылки	Метод	Доза (атом/см ²)	Термообработка		
					во время имплант.	после имплант. темпер. (°C)	время (мин)
1	2	3	4	5	6	7	8
Δ Seidel	(1971)	/3/	CV	10^{12}	без обр.	850	30
* Blamires	(1968)	/4/	R	10^{15}	без обр.	1000	30
V Lecrosnier	(1970)	/5/	R	10^{15}	77°K	700	30
□ Fairfield	(1969)	/6/	R	10^{15}	без обр.	900	30
□ Davies	(1968)	/7/	CV	10^{12}	77°K	650	20
□ IBM	(1972)	/8/	H				
□ Bontemps	(1971)	/9/	$^{11}B(p,\alpha)^8Be$	10^{15}			
+ Ziegler	(1972)	/10/	$^{10}B(n,\alpha)^7Li$	$3 \cdot 10^{15}$	без обр.		без обр.
• Buchanan	(1967)	/11/	M	10^{14}	без обр.	700	

Таблица (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8
•	настоящая работа		$^{10}\text{B}(\text{n},\alpha)^7\text{Li}$	$6 \cdot 10^{15}$	без обр.		без обр.

CV - измерение дифференциальной емкости,

R - измерение поверхностного сопротивления,

H - измерение эффекта Холла в сочетании с послойным травлением материала,

M - микроскопная техника.

Относительная ошибка при вычислении \bar{R}_p в наших измерениях в основном связана с ошибками определения ΔE_α . Точность определения положения пиков $/k_{10}, k_i, k_{02}$ и $k_{01}/$ составляла $\pm 0,5$ канала. Стабильность измерительного тракта во время измерений была не хуже $\pm 0,3$ канала. Таким образом, ΔE_α находилась с точностью $\pm 1,0$ канала, что соответствует пробегу ионов $\pm 200 \text{ \AA}$.

Выводы

Измерения на импульсном реакторе ИБР-30 показали, что при использовании методики времени пролета можно определять \bar{R}_p при потоке тепловых нейтронов всего 10^6 нейтр./см².сек¹ на образцах с концентрацией ^{10}B 10^{15} атом.см⁻². Точность определения R_p в основном ограничивалась разрешением примененного детектора. В пределах $\pm 200 \text{ \AA}$ полученные в данной работе значения хорошо согласуются с теоретическими значениями пробегов, рассчитанными по теории LSS.

Литература

1. J.Linhard, M.Scharff, H.Schiott. *Kgl. Danske Vid. Selskab. Mat.-Fys. Medd.*, 33, (1963).
2. J.F.Gibbons. *Proc. IEEE*, 55, 295 (1968).
3. T.E.Seidel. *Second International Conference on Ion Implantation in Semiconductors, Garmish, Springer-Verlag, New York*, 47 (1971).
4. N.G.Blamires et al. *Phys.Lett.*, 28A, 178 (1968).
5. D.P.Lecrosnier et al. *Proc. Conf. on Ion Implantation Reading, Peter Peregrinus, Stevenage*, 102 (1970).
6. J.M.Fairfield et al. *Transaction of the Metallurgical Society of AIME*, 245, 469 (1969).
7. D.E.Davies. *Applied Physics Letters*, 13, 243 (1968).
8. IBM, *Appl.Phys.Lett.*, 21, 16 (1972).
9. A.Bontemps, E.Ligeon. *Rapport CEA-N-1492, Grenoble*, 1971.
10. J.F.Ziegler, G.W.Cole, J.E.E.Baglin. *J.Appl.Phys.*, 43, 3809 (1972).
11. B.Buchanan et al. *International Conference of Applications of Ion Beams to Semiconductor Technology, Grenoble, CEA*, 649, 1967.
12. M.A.Nikolett et al. *Science*, 177, 841 (1972).
13. C.F.Williamson, J.P.Boujot, J.Picard. *Report CEA-R*, 3042 (1966).
14. H.Bichsel, C.Tschalar. *Nuclear Data Tables*, A3, 343 (1967).

15. L.C.Northcliffe, R.F.Schilling. *Nuclear Data Tables*, A7, 233 (1970).
16. I.V.Mitchel et al. *International Conference on Applications of Nuclear Data*, Paris, IAEA, 1973.
17. А.А.Омельяненко, К.Г.Родионов, Хен Еен Гынь. Комплекс транзисторных блоков для нейтронной спектроскопии. *ОИЯИ*, 2280, Дубна, 1965.
18. В.В.Голиков, Ж.А.Козлов, А.К.Кулькин, Л.Б.Пикельнер, В.Т.Руденко, Э.И.Шарапов. *ОИЯИ*, 3-5736, Дубна, 1971.

Рукопись поступила в издательский отдел
1 октября 1974 года.