

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



С342а

Б-73

15/1-79

P11 - 11800

146/2-79

Я.Боганч, А.Надь, А.Сабо

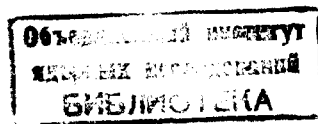
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОБЕГОВ  $\alpha$ -ЧАСТИЦ  
В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ВЕЩЕСТВАХ

**1978**

P11 - 11800

Д.Боганч, А.Надь, А.Сабо

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОБЕГОВ  $\alpha$  -ЧАСТИЦ  
В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ВЕЩЕСТВАХ



Боганч Я., Надь А., Сабо А.

P11 - 11800

Определение пробегов  $\alpha$ -частиц в многокомпонентных веществах

Описан математический (на основе  $dE/dx$ ) метод расчета пробегов ( $\bar{R}_p$ )  $\alpha$ -частиц в различных многокомпонентных веществах. Целью работы являлось определение концентрации и распределения бора в тонких поверхностных слоях полупроводников, стекловидных металлов и биологических материалов. Значения  $\bar{R}_p$  в зависимости от потери энергии  $\alpha$ -частиц и химических составов исследуемых материалов представлены в таблицах. Установлено, в каких пределах лежат значения  $\bar{R}_p$  для различных соединений.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Bogáncs J., Nagy A., Szabo A.

P11 - 11800

Calculation of  $\alpha$ -Particle Ranges in Multicomponent Substances

A method for calculating  $\alpha$ -particle ranges ( $\bar{R}$ ) in multicomponent substances is described on the basis of  $dE/dx$ . The aim of the present work is to obtain the B concentration and its distribution in thin skin surfaces of semiconductors, glass metals and biological objects.  $R_p$  values versus  $\alpha$ -particle energy losses and chemical compounds of substances under investigation are shown in tables. The  $\bar{R}_p$  limits for different compounds are given.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1978

## ВВЕДЕНИЕ

В предыдущих работах /1-6/ были изложены результаты исследований по определению концентрации и распределения бора в кремнии. Используемая методика основана на измерении потерь энергии  $\alpha$ -частиц, освобождающихся в реакции  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ .  $^{10}\text{B}^+$  вводился в образцы путем ионной бомбардировки в области энергии имплантации 20-80 кэВ.

Для определения пробегов ( $\bar{R}_p$ ) ионов бора, имплантированных в кремнии, использовалась приближенная формула:

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

где  $\Delta E_\alpha$  - измеренные потери энергии  $\alpha$ -частиц /кэВ/, формула применима для  $\Delta E_\alpha \leq 100$  кэВ;  $\bar{R}_p$  - в мкм. В более общем виде

$$\bar{R}_p = \int_{E_0}^{E_0 - \Delta E_\alpha} (dE/dx)^{-1} dE. \quad /1/$$

Для расчета тормозной способности ( $dE/dx$ ) различных материалов значения тормозных сечений ( $\epsilon_\alpha$ ) были заимствованы из работы /7/:

$$\epsilon_\alpha = \frac{dE}{dS} = \frac{1}{N} \cdot \frac{dE}{dx} = \sum_{n=0}^5 a_n E^n,$$

где  $dE/dS$  - потеря энергии, отнесенная к поверхностным плоскостям /атом·см<sup>-2</sup>/, N - число атомов в одном см<sup>3</sup> материала,  $a_n$  - коэффициенты полуэмпирического полинома.

Так как в работе /7/ величины  $\epsilon_a$  даны в единицах  $\text{эВ} \cdot 10^{-15} \cdot \text{атом} \cdot \text{см}^{-2}$ , то при расчетах тормозных способностей ( $dE/dx$ ) были применены переводные коэффициенты. Так, например, в случае кремния:  $N = 5,024 \cdot 10^{22} \text{ атом} \cdot \text{см}^{-3}$ , а коэффициенты для  $\alpha$ -частиц  $a_0 = 291,24$ ,  $a_1 = 0,2843$ ,  $a_2 = -3,9016 \cdot 10^{-4}$ ,  $a_3 = 1,8292 \cdot 10^{-7}$ ,  $a_4 = -3,8303 \cdot 10^{-11}$ ,  $a_5 = 3,0119 \cdot 10^{-15}$ .

На практике часто встречаются задачи, решение которых требует определений пробегов заряженных частиц в многокомпонентных веществах. Так, например, перед нами ставилась задача определения концентрации и распределения бора по глубине в различных полупроводниковых ( $\text{Si}$ ,  $\text{SiO}_2$ ) материалах и так называемых стекловидных металлах, имеющих общий элементный состав  $\text{Fe}_a \text{Ni}_b \text{Cr}_c \text{P}_d \text{V}_e$  ( $a + b + c \approx 80$ ,  $d + e \approx 20$ ).

Наряду с этими веществами изучалось стекло марки ЗС-5 для вакуумных ламп и приборов, имеющее следующий состав:  $\text{SiO}_2$ -68%,  $\text{B}_2\text{O}_3$ -20%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -3%,  $\text{Na}_2\text{O}$ -4% и  $\text{K}_2\text{O}$ -5%. Этому составу соответствует приблизительно "химическое соединение"  $\text{Si}_{212} \text{Al}_{10} \text{Na}_{24} \text{K}_{20} \text{O}_{625} \text{B}_{109}$ .

Измерялась также концентрация бора в растительном веществе - листьях кукурузы. Приблизительный химический состав -  $\text{H}_{51} \text{C}_{23} \text{O}_{26}$  был затем, уже после определения концентрации бора, уточнен:  $\text{C}_{23} \text{O}_{26} \text{H}_{50} \text{B}$ .

### МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ $\bar{R}_p$ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ

Расчет  $\bar{R}_p$  для многокомпонентных веществ проводится методом численного интегрирования, который можно иллюстрировать на примере  $\text{SiO}_2$ . Для проведения расчетов в табл. 1 даны исходные константы для интересующих нас элементов /7/.

Величина  $dE/dx$  для  $\text{SiO}_2$  определяется по формуле:

$$\frac{dE}{dx} = n' \left( 2 \sum_{i=0}^5 a_i E^i + \sum_{i=0}^5 b_i E^i \right),$$

$a_i$  - исходные константы для кислорода, взятые из табл. 1,  $b_i$  - исходные константы для кремния, взятые

из табл. 1,  $n'$  - число "молекул" в одном  $\text{см}^3$ , поделенное на величину  $10^{22}$ :

$$n' = \frac{A \cdot S}{M} \cdot 10^{-22},$$

где  $A$  - число Авогадро,  $S$  - удельный вес,  $M$  - молекулярный вес.

В случае  $\text{SiO}_2$   $n' = 2,197 \text{ молекул} \cdot \text{см}^{-3}$ . Коэффициенты полумпирического полинома для  $\text{SiO}_2$  получены следующим образом:

$$c_0 = 2,197 / 2 \cdot 2,590 \cdot 10^1 + 5,797 \cdot 10^1 / = 241,16,$$

$$c_1 = 2,197 / 2 \cdot 7,330 \cdot 10^{-2} + 5,659 \cdot 10^{-2} / = 0,44600,$$

$$c_2 = 2,197 / 2 \cdot -8,050 \cdot 10^{-5} + -7,766 \cdot 10^{-5} / = -5,2434 \cdot 10^{-4},$$

$$c_3 = 2,197 / 2 \cdot 3,517 \cdot 10^{-8} + 3,641 \cdot 10^{-8} / = 2,3453 \cdot 10^{-7},$$

$$c_4 = 2,197 / 2 \cdot -7,100 \cdot 10^{-12} + -7,624 \cdot 10^{-12} / = -4,7947 \cdot 10^{-11},$$

$$c_5 = 2,197 / 2 \cdot 5,462 \cdot 10^{-16} + 5,995 \cdot 10^{-16} / = 3,7171 \cdot 10^{-15}.$$

$$\text{Формула } \frac{dE}{dx} \text{ для } \text{SiO}_2: \frac{dE}{dx} = \sum_{i=0}^5 c_i E^i.$$

$$\frac{dE}{dx} = 241,16 E^0 + 0,4460 E^1 - 5,2434 \cdot 10^{-4} E^2 + 2,3453 \cdot 10^{-7} E^3 - 4,7547 \cdot 10^{-11} E^4 + 3,7171 \cdot 10^{-15} E^5.$$

Расчеты  $\bar{R}_p$  на основе полученных  $dE/dx$  проводились на ЭВМ БЭСМ-6 по приведенной ниже программе.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Таблица 2 показывает полученные величины  $\bar{R}_p$  для  $\text{SiO}_2$  в мкм. Первая величина соответствует энергии /1471-1/ кэВ, а последняя - /1471-300/ кэВ.

На рисунке показаны зависимости  $R_p$  от потерь энергий  $\alpha$ -частиц в некоторых материалах.

Для остальных исследуемых нами веществ значения  $\bar{R}_p$  даны в табл. 3.

Из табл. 2 и 3 и рисунка видно, в каких пределах лежат значения  $\bar{R}_p$  для различных соединений.

## ПРОГРАММА

```

C
C PROGRAM FOR THE CALCULATION OF MAIN PROJECTED RANGE
C FOR L(L) KEV ALPHA PARTICLES IN SIO2
C RESULTS ARE GIVEN IN MICRON
C
C   DIMENSION RESO(300,2)
C   EXTERNAL FUNCT
C   COMMON/BLOC1/ A(2,6),KK
C
C   DATA(((A(I,J),I=1,2),J=1,6)=241.16,1.,0.44600,1.,-5.2434E-4,1.,
C * 2.3453E-7,1.,-4.7947E-11,1.,3.7171E-15,1.)
C   DO 4 J=1,2
C   KK=J
C   E01=1471.
C   E1=E01
C   DO 4 I=1,300
C   A0=E01
C   E1=E1-1.
C   REPS1=0.005
C   AEPS1=1.E-18
C   H1=0.1
C   CALL SIMPS(A0,E1,H1,REPS1,AEPS1,FUNCT,R,RES,IH ,IABS)
C   RESO(1,J)=RES
4   CONTINUE
C   PRINT 8
8   FORMAT(1H1,///40X,40HMAINRP IN THE CASE OF ZIEGLER,S POLINOME//)
C   PRINT 10,(RESO(I,1),I=1,300)
10  FORMAT(10(1X,E11.4))
C   END
C   FUNCTION FUNCT(R)
C   COMMON/BLOC1/ A(2,6),KK
C   FUNCT=0.
C   Z=-1.
C   DO 2 I=1,6
C   Z=Z+1
C   FUNCT=FUNCT+A(KK,I)*(R**Z)
2   CONTINUE
C   FUNCT=-1./FUNCT
C   RETURN
C   END

```

Таблица I  
Константы для определения  $\bar{R}_p$

Порядковый номер	Элемент	$E^0$	$E^1$	$E^2$	$E^3$	$E^4$	$E^5$
5	B	$2,608 \cdot 10^1$	$2,934 \cdot 10^{-2}$	$-3,808 \cdot 10^{-5}$	$1,719 \cdot 10^{-8}$	$-3,507 \cdot 10^{-12}$	$2,709 \cdot 10^{-16}$
6	C	$1,595 \cdot 10^1$	$6,935 \cdot 10^{-2}$	$-7,659 \cdot 10^{-5}$	$3,379 \cdot 10^{-8}$	$-6,859 \cdot 10^{-12}$	$5,291 \cdot 10^{-16}$
8	O	$2,590 \cdot 10^1$	$7,330 \cdot 10^{-2}$	$-8,050 \cdot 10^{-5}$	$3,517 \cdot 10^{-8}$	$-7,100 \cdot 10^{-12}$	$5,462 \cdot 10^{-16}$
11	Na	$3,329 \cdot 10^1$	$3,227 \cdot 10^{-2}$	$-2,979 \cdot 10^{-5}$	$1,088 \cdot 10^{-8}$	$-1,918 \cdot 10^{-12}$	$1,339 \cdot 10^{-16}$
13	Al	$5,594 \cdot 10^1$	$6,773 \cdot 10^{-4}$	$-4,752 \cdot 10^{-6}$	$3,401 \cdot 10^{-10}$	$2,662 \cdot 10^{-13}$	$-4,046 \cdot 10^{-17}$
14	Si	$5,797 \cdot 10^1$	$5,659 \cdot 10^{-2}$	$-7,766 \cdot 10^{-5}$	$3,641 \cdot 10^{-8}$	$-7,624 \cdot 10^{-12}$	$5,995 \cdot 10^{-16}$
15	P	$4,729 \cdot 10^1$	$7,415 \cdot 10^{-2}$	$-8,848 \cdot 10^{-5}$	$4,009 \cdot 10^{-8}$	$-8,329 \cdot 10^{-12}$	$6,570 \cdot 10^{-16}$
19	K	$4,869 \cdot 10^1$	$1,351 \cdot 10^{-1}$	$-1,454 \cdot 10^{-4}$	$6,175 \cdot 10^{-8}$	$-1,208 \cdot 10^{-11}$	$9,000 \cdot 10^{-16}$
24	Cr	$5,064 \cdot 10^1$	$1,108 \cdot 10^{-1}$	$-1,156 \cdot 10^{-4}$	$4,910 \cdot 10^{-8}$	$-9,690 \cdot 10^{-12}$	$7,290 \cdot 10^{-16}$
26	Fe	$4,436 \cdot 10^1$	$1,375 \cdot 10^{-1}$	$-1,431 \cdot 10^{-4}$	$6,102 \cdot 10^{-8}$	$-1,203 \cdot 10^{-11}$	$9,011 \cdot 10^{-16}$
28	Ni	$4,159 \cdot 10^1$	$9,779 \cdot 10^{-2}$	$-9,119 \cdot 10^{-5}$	$3,732 \cdot 10^{-8}$	$-7,482 \cdot 10^{-12}$	$5,893 \cdot 10^{-16}$

Таблица 2

Значения  $\bar{R}_p$  для  $\text{SiO}_2$  в зависимости от потери энергии  $\alpha$ -частиц  $\Delta E = 10(j-1) + i$  /кэВ/,  $j$  - номер строки,  $i$  - номер столбца.

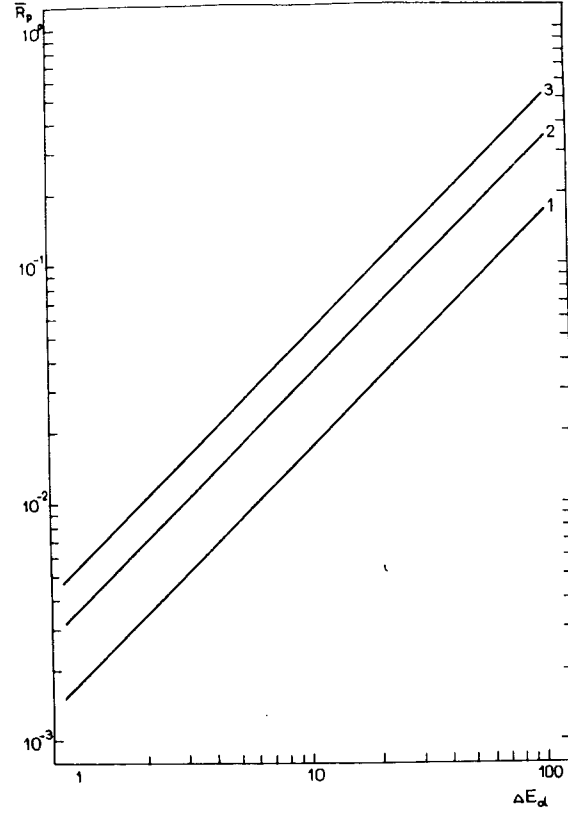
$j \setminus i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	3.2227-03	6.4443-03	9.6650-03	1.2885-02	1.6103-02	1.9321-02	2.2537-02	2.5753-02	2.8968-02	3.2181-02
2	3.5394-02	3.8605-02	4.1816-02	4.5025-02	4.8234-02	5.1441-02	5.4648-02	5.7853-02	6.1058-02	6.4261-02
3	6.7464-02	7.0665-02	7.3866-02	7.7065-02	8.0264-02	8.3461-02	8.6658-02	8.9853-02	9.3048-02	9.6241-02
4	9.9434-02	1.0263-01	1.0582-01	1.0901-01	1.1219-01	1.1538-01	1.1857-01	1.2175-01	1.2494-01	1.2812-01
5	1.3130-01	1.3449-01	1.3767-01	1.4085-01	1.4402-01	1.4720-01	1.5038-01	1.5355-01	1.5673-01	1.5990-01
6	1.6308-01	1.6625-01	1.6942-01	1.7259-01	1.7576-01	1.7892-01	1.8209-01	1.8526-01	1.8842-01	1.9158-01
7	1.9475-01	1.9791-01	2.0107-01	2.0423-01	2.0739-01	2.1055-01	2.1370-01	2.1686-01	2.2001-01	2.2317-01
8	2.2632-01	2.2947-01	2.3263-01	2.3578-01	2.3892-01	2.4207-01	2.4522-01	2.4837-01	2.5151-01	2.5466-01
9	2.5780-01	2.6094-01	2.6408-01	2.6722-01	2.7036-01	2.7350-01	2.7664-01	2.7978-01	2.8291-01	2.8605-01
10	2.8918-01	2.9231-01	2.9544-01	2.9857-01	3.0170-01	3.0483-01	3.0796-01	3.1109-01	3.1421-01	3.1734-01
11	3.2046-01	3.2359-01	3.2671-01	3.2983-01	3.3295-01	3.3607-01	3.3919-01	3.4231-01	3.4542-01	3.4854-01
12	3.5165-01	3.5477-01	3.5788-01	3.6099-01	3.6410-01	3.6721-01	3.7032-01	3.7343-01	3.7654-01	3.7964-01
13	3.8275-01	3.8585-01	3.8895-01	3.9206-01	3.9516-01	3.9826-01	4.0136-01	4.0446-01	4.0755-01	4.1065-01
14	4.1375-01	4.1684-01	4.1994-01	4.2303-01	4.2612-01	4.2921-01	4.3230-01	4.3539-01	4.3848-01	4.4157-01
15	4.4465-01	4.4774-01	4.5082-01	4.5391-01	4.5699-01	4.6007-01	4.6315-01	4.6623-01	4.6931-01	4.7239-01
16	4.7547-01	4.7854-01	4.8162-01	4.8469-01	4.8777-01	4.9084-01	4.9391-01	4.9698-01	5.0005-01	5.0312-01
17	5.0619-01	5.0926-01	5.1232-01	5.1539-01	5.1845-01	5.2152-01	5.2458-01	5.2764-01	5.3070-01	5.3376-01
18	5.3682-01	5.3988-01	5.4294-01	5.4599-01	5.4905-01	5.5210-01	5.5516-01	5.5821-01	5.6126-01	5.6431-01
19	5.6736-01	5.7041-01	5.7346-01	5.7651-01	5.7955-01	5.8260-01	5.8564-01	5.8869-01	5.9173-01	5.9477-01
20	5.9781-01	6.0085-01	6.0389-01	6.0693-01	6.0997-01	6.1301-01	6.1604-01	6.1908-01	6.2211-01	6.2514-01
21	6.2818-01	6.3121-01	6.3424-01	6.3727-01	6.4030-01	6.4332-01	6.4635-01	6.4938-01	6.5240-01	6.5543-01
22	6.5845-01	6.6147-01	6.6450-01	6.6752-01	6.7054-01	6.7356-01	6.7657-01	6.7959-01	6.8261-01	6.8562-01
23	6.8864-01	6.9165-01	6.9467-01	6.9768-01	7.0069-01	7.0370-01	7.0671-01	7.0972-01	7.1273-01	7.1573-01
24	7.1874-01	7.2175-01	7.2475-01	7.2775-01	7.3076-01	7.3376-01	7.3676-01	7.3976-01	7.4276-01	7.4576-01
25	7.4876-01	7.5175-01	7.5475-01	7.5775-01	7.6074-01	7.6373-01	7.6673-01	7.6972-01	7.7271-01	7.7570-01
26	7.7869-01	7.8168-01	7.8467-01	7.8765-01	7.9064-01	7.9363-01	7.9661-01	7.9959-01	8.0258-01	8.0556-01
27	8.0854-01	8.1152-01	8.1450-01	8.1748-01	8.2046-01	8.2343-01	8.2641-01	8.2939-01	8.3236-01	8.3533-01
28	8.3831-01	8.4128-01	8.4425-01	8.4722-01	8.5019-01	8.5316-01	8.5613-01	8.5910-01	8.6206-01	8.6503-01
29	8.6799-01	8.7096-01	8.7392-01	8.7688-01	8.7984-01	8.8280-01	8.8577-01	8.8872-01	8.9168-01	8.9464-01
30	8.9760-01	9.0055-01	9.0351-01	9.0646-01	9.0942-01	9.1237-01	9.1532-01	9.1827-01	9.2122-01	9.2417-01

Таблица 3

Значения  $\bar{R}_p$  в зависимости от потери энергии

Химический состав	$\bar{R}_p$ [мкм]			
	1 кэВ	10 кэВ	100 кэВ	300 кэВ
$B_{20} Fe_{80}$	$1,6376 \cdot 10^{-3}$	$1,6358 \cdot 10^{-2}$	$1,6180 \cdot 10^{-1}$	$4,7449 \cdot 10^{-1}$
$B_{17} Fe_{83}$	$1,6138 \cdot 10^{-3}$	$1,6120 \cdot 10^{-2}$	$1,5945 \cdot 10^{-1}$	$4,6766 \cdot 10^{-1}$
$Ni_{36} Fe_{32} Cr_{14} P_{12} B_6$	$1,6238 \cdot 10^{-3}$	$1,6223 \cdot 10^{-2}$	$1,6081 \cdot 10^{-1}$	$4,7382 \cdot 10^{-1}$
$Fe_{40} Ni_{40} B_{20}$	$1,6000 \cdot 10^{-3}$	$1,5987 \cdot 10^{-2}$	$1,5863 \cdot 10^{-1}$	$4,6845 \cdot 10^{-1}$
$Fe_{80} P_{10} B_{10}$	$1,6510 \cdot 10^{-3}$	$1,6492 \cdot 10^{-2}$	$1,6312 \cdot 10^{-1}$	$4,7837 \cdot 10^{-1}$
$Si_{212} B_{109} Al_{10} Na_{24} K_{20} O_{625}$	$2,4899 \cdot 10^{-3}$	$2,4885 \cdot 10^{-2}$	$2,4747 \cdot 10^{-1}$	$7,3372 \cdot 10^{-1}$

Зависимость пробегов ионов бора /в мкм/ от потери энергии /кэВ/  $\alpha$ -частиц. 1 -  $Fe_{40}Ni_{40}P_{14}B_6$ ,  $\rho = 7,4 \text{ г.см}^{-3}$ ; 2 - Si,  $\rho = 2,3 \text{ г.см}^{-3}$ ; 3 -  $H_{50}C_{23}O_{26}B$ ,  $\rho = 1,0 \text{ г.см}^{-3}$ .



Например, отношение величины  $\bar{R}_p$  при потере энергии 100 кэВ в случае  $B_{20}Fe_{80}$  и Si

$$\frac{\bar{R}_p(B_{20}Fe_{80})}{\bar{R}_p(Si)} = \frac{0,16180}{0,34067} = 0,475.$$

Таким образом, пробег  $\alpha$ -частиц с энергией 1,47 МэВ в кремнии составляет приблизительно 5 мкм, в металлических стеклах - только  $2 \pm 2,5$  мкм.

В рамках данной работы мы не обсуждаем причин расхождений рассчитанных по формуле /1/ значений и экспериментальных данных. Эти вопросы подробно дискутируются в работах /8-22/.

Отметим, что концентрация бора в измеренных образцах, определенная на основе расчетных  $dE/dx$ , хорошо согласуется с теоретическим содержанием бора, рассчитанным по химическому составу.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Боганч Я. и др. ОИЯИ, P14-8295, Дубна, 1974.
2. Боганч Я. и др. *Isotopenpraxis*, 1975, 11(12), p.429-432.
3. Боганч Я. и др. ОИЯИ, P3-10777, Дубна, 1977.
4. Nagy A. e.a. *Izotoptechnika*, 1977, 20, pp.53-71.
5. Nagy A.Z. e.a. *J.Radioanal.Chem.*, 1977, 38, pp.19-27.
6. Bogancs J. e.a. *Radiochem. Radioanal. Lett.*, 1978, 32 (1-2), p.71-82.
7. Ziegler J.F., Chu W.K. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 1974, 13 (5).
8. Bichsel H., Tschalaer G. *Nuclear Data Tables*, 1967, A3, p.343.
9. Northcliffe L.C., Schilling R.F. *Nuclear Data Tables*, 1970, A7, p.233.
10. Armstrong T.W., Chandler K.C. *Calculation of Stopping Power and Ranges for Muons, Charged Pions, Protons and Heavy Ions*. ORNL, 1973, CCC-228.
11. Немец О.Ф., Гофман Ю.В. *Справочник по ядерной физике*. "Наукова думка", Киев, 1975.
12. Ziegler J.F., Cole G.W., Baglin J.E.E. *J.Appl.Phys.*, 1972, 43, p.3809.
13. Eisen F.H. e.a. *Radiat. Eff.*, 1972, 13, p.93.
14. Thompson D.A., Macintosh W.D. *J.Appl.Phys.*, 1971, 42, p.396.
15. Chu W.K., Powers D. *Phys. Rev.*, 1969, 187, p.478.
16. Inokuti M. *Rev.Mod. Phys.*, 1972, 43, p.297.
17. Cheshire I.M., Poate I.M. *Atomic Collision Phenomena in Solids*. North-Holland, Amsterdam, 1970, p.351.
18. Janni J.F. *Air Force Weapons Lab. Report AFWL-TR-65*, 1966, p.150.
19. Bourland P.D., Chu W.K., Powers D. *Phys. Rev.*, 1971, B3, p.3625.

20. Rousseau C.C., Chu W.R., Powers D. *Phys. Rev.*, 1971, A4, p.1066.
21. Feng J.S.Y. e.a. *Thin Solid Films*, 1973, 19, p.195.
22. Linhard J., Winther A. *Kgl. Danske Videnskab. Selskab. Mat. Fys. Medd.*, 1964, 34, No. 4.

Рукопись поступила в издательский отдел  
25 июля 1978 года.