

УДК 539.107.6

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СТРАГГЛИНГА ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕГРИРОВАННОГО ПАКЕТА BEAM EXPERT

Л. Е. Кузьмин, А. М. Казанцев

*Методом обратного рассеяния исследован энергетический страгглинг ионов  $^{14}\text{N}^+$  при энергии 0,6–0,8 МэВ в тонких слоях Au и Si с использованием модифицированного интегрированного пакета для ядерного микроанализа BEAM EXPERT. Полученные результаты в 3–4 раза превышают рассчитанные по теории Линдхарда–Шарфа.*

Точная информация о разбросе потерь энергии ионов при прохождении через тонкие слои твердых тел необходима для определения профилей концентрации элементов методами обратного резерфордского рассеяния (ОРР) и обратного рассеяния тяжелых ионов (ОРТИ). В случае ОРР обычно используют легкие ионы  $\text{H}^+$ ,  $\text{He}^+$  при достаточно больших энергиях,  $\sim 1–3 \text{ МэВ}$  ( $0,25–3 \text{ МэВ}/\text{а.е.м.}$ ), когда энергетический страгглинг  $\Omega^2$  (дисперсия потерь энергии) определяется формулой Бора [1]:

$$\Omega_B^2 = 4\pi Z_1^2 e^4 N Z_2 t^2, \quad (1)$$

где  $Z_1$  и  $Z_2$  – атомные номера иона и атома мишени,  $N$  – число атомов мишени в  $\text{см}^3$ ,  $t$  – толщина пройденного слоя.

Использование (1) в интегрированном пакете для ядерного микроанализа BEAM EXPERT [2] показало достаточно высокую точность определения профилей концентрации методом ОРР в слоях толщиной 0,1–1 мкм с разрешением по глубине 10–20 нм [3].

Метод ОРТИ при энергиях ионов  $\leq 1 \text{ МэВ}$  ( $0,01–0,1 \text{ МэВ}/\text{а.е.м.}$ ) применялся преимущественно только для определения примесей на поверхности [4], из-за неопределенности ряда параметров взаимодействия ионов с веществом, главным образом страгглинга. Устранение этих причин даст возможность применения ОРТИ для анализа

ультракоротких слоев с разрешением  $\sim 1 - 2$  нм, ввиду существенного увеличения потерь энергии  $S$  с ростом массы иона. С этой целью нами была модифицирована математическая модель описания спектров ОРР, положенная в основу BEAM EXPERT [2], и созданы банки данных по  $S(E)$  для различных  $Z_1$  и  $Z_2$  из [5]. С использованием данной модели разработана новая версия BEAM EXPERT 1.6, включающая моделирование спектров ОРТИ для заданных профилей концентрации и решение обратной задачи – восстановление профилей концентрации из экспериментальных данных. Стратглинг введен переменным параметром в виде

$$\Omega^2 = \gamma^2 \Omega_B^2 \quad (2)$$

где  $\gamma$  – коэффициент, определяемый из эксперимента.

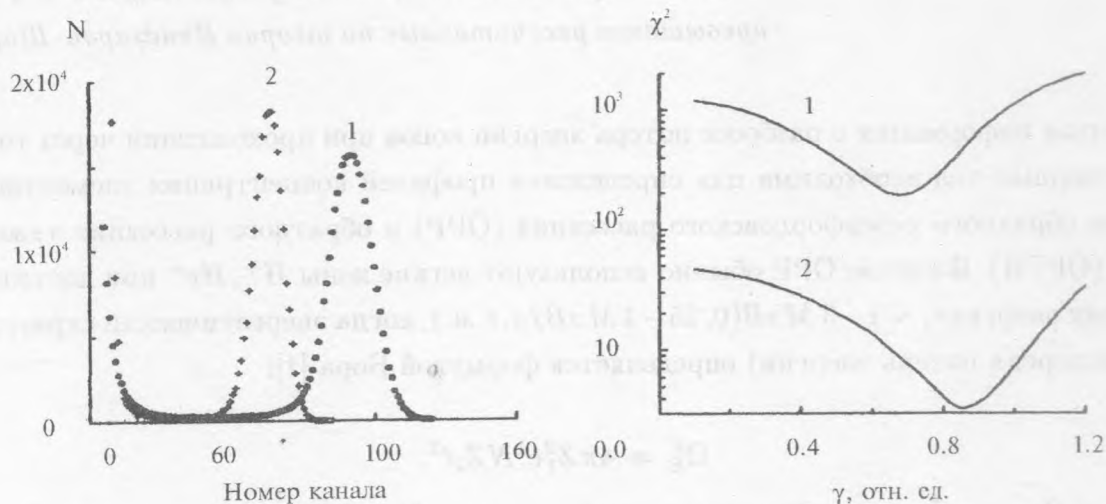


Рис. 1. Энергетические спектры обратно рассеянных ионов  $^{14}N$  для структур Au-Si (1) и Si(Te) (2) при  $E_0 = 0,9$  МэВ.  $N$  – число отсчетов на канал.

Рис. 2. Зависимость  $\chi^2(\gamma)$  при сравнении модельных и экспериментальных спектров для Au-Si (1) и Si(Te) (2).

Для расчета стратглинга при скоростях иона  $v$ , сравнимых или меньших скорости Бора  $v_0$ , что имеет место в ОРТИ, обычно используют теорию Линдахарда-Шарфа [6] или Чу-Майера [7], однако даже для ионов гелия в области энергий  $\sim$

0,3 – 0,7 МэВ/а.е.м. экспериментальные результаты оказываются выше теоретических более чем в два раза [8, 9]. Использование безразмерного параметра  $x = v^2/(v_0^2 Z_2)$  в универсальной функции Линдхарда–Шарфа  $L(x) = 1,36x^{1/2} - 0,016x^{3/2}$  учитывает зависимость  $\Omega_{L-s}^2 = \Omega_B^2 L(x)/2$  от  $Z_2$ . Эта зависимость подтверждается экспериментально [8, 9].

Исследования проводили на пучках  $^{14}N^+$  с начальной энергией 0,5 – 1 МэВ (0,035 – 0,07 МэВ/а.е.м.). Поскольку после рассеяния энергии ионов скачкообразно уменьшается с кинематическим коэффициентом  $k$  [10], страгглинг определяли при средней энергии  $E = (E_0 + E_2)/2$ , где  $E_2$  – энергия ионов на вылете из мишени. В качестве мишени использовали пленку Au толщиной 30 нм на кремнии (Au–Si) и ионно-имплантированный теллуром Si при энергии 100 кэВ и дозе  $10^{15} \text{ см}^{-2}(\text{Si}(\text{Te}))$ . Спектры обратно рассеянных ионов  $^{14}N$  регистрировали поверхностно-барьерным кремниевым детектором с разрешением 28 кэВ (рис. 1).

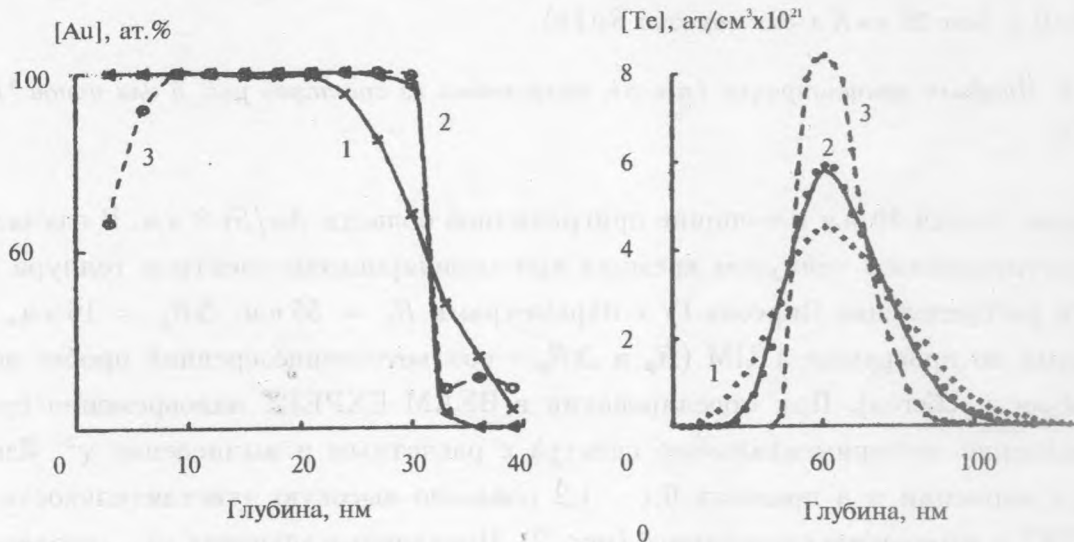


Рис. 3. Профили концентрации Au в структуре Au-Si, полученные при значениях  $\gamma = 0,1$  (1), 0,65 (2), 1,0 (3).

Рис. 4. Профили концентрации Te в Si(Te), полученные при значениях  $\gamma = 0,1$  (1), 0,85 (2), 1 (3). Сплошная кривая – расчет по программе TRIM.

Моделирование спектров для Au в структуре Au-Si проводили при фиксированной

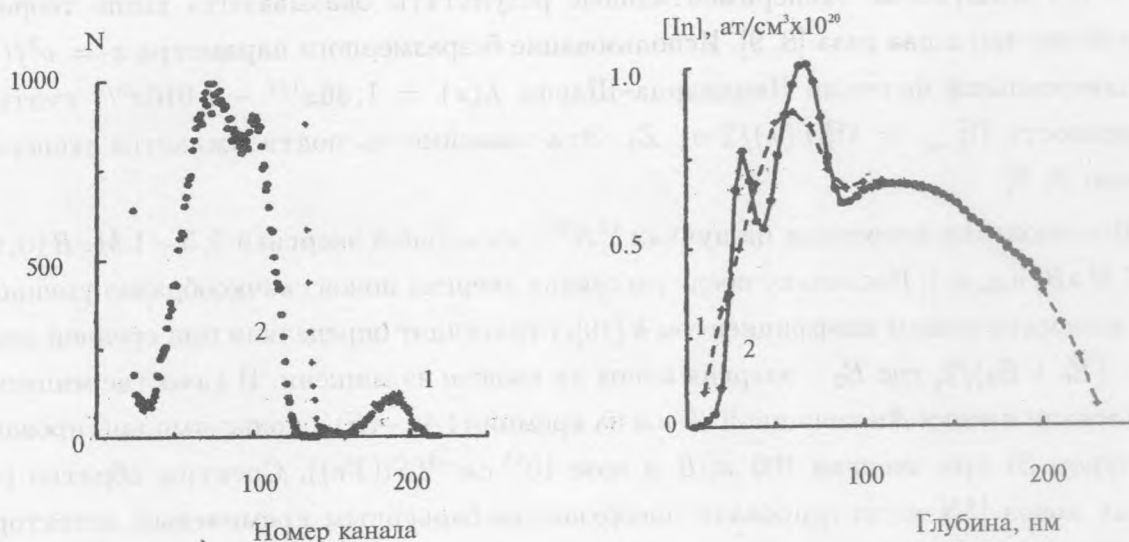


Рис. 5. Энергетические спектры обратного рассеяния ионов  ${}^4\text{He}$  (1) и  ${}^{14}\text{N}$  (2) при  $E_0 = 0,9 \text{ МэВ}$  и дозе  $20 \text{ мкКл}$  для образца  $\text{Si}(\text{In})$ .

Рис. 6. Профили концентрации  $\text{In}$  в  $\text{Si}$ , полученные из спектров рис. 5 для ионов  ${}^4\text{He}$  (1) и  ${}^{14}\text{N}$  (2).

толщине пленки  $30 \text{ нм}$  и толщине приграничной области  $\text{Au}/\text{Si}$   $2 \text{ нм}$ . В случае ионно-имплантированного теллуrom кремния при моделировании спектров теллура использовали распределение Пирсона-IV с параметрами  $R_p = 55 \text{ нм}$ ,  $\Delta R_p = 16 \text{ нм}$ , рассчитанными по программе TRIM ( $R_p$  и  $\Delta R_p$  – соответственно средний пробег ионов  $T_e$  и разброс пробегов). При моделировании в BEAM EXPERT одновременно проводится сравнение экспериментального спектра с расчетным и вычисление  $\chi^2$ . Изменение  $\chi^2$  при вариации  $\gamma$  в пределах  $0,1 - 1,2$  показало высокую чувствительность BEAM EXPERT к изменению страгглинга (рис. 2). Полученные значения  $\gamma_{min}^2$ , соответствующие  $\chi_{min}^2$  и рассчитанные согласно [6] приведены в таблице 1. Для оценки правильности определения  $\gamma_{min}^2$  проводили восстановление профилей концентрации из спектров рис. 1 при различных значениях  $\gamma$ . Как видно из рисунков 3, 4, лучшее согласие заданных и экспериментально измеренных профилей концентрации наблюдается при  $\gamma$ , соответствующих  $\chi_{min}^2$ .



Т а б л и ц а 1

Экспериментальные и расчетные значения относительного страгглинга  $\Omega^2/\Omega_B^2$  ионов  $^{14}\text{N}$  в золоте и кремнии при  $E = 0,6 - 0,8 \text{ МэВ}$

	$\Omega^2/\Omega_B^2 \text{ Au}$	$\Omega^2/\Omega_B^2 \text{ Si}$
Линдхард-Шарф	0,11	0,24
Эксперимент, $\gamma_{\min}^2$	0,42	0,72

Таким образом, полученные экспериментальные значения  $\Omega^2$  превышают расчетные в 3-4 раза, однако тенденция увеличения  $\Omega^2$  с уменьшением  $Z_2$  (табл. 1) сохраняется. Для сравнения возможностей методов ОРР ( $\text{He}$ ) и ОРТИ ( $^{14}\text{N}$ ) нами были измерены при одинаковых условиях профили концентрации атомов  $\text{In}$  имплантированных в  $\text{Si}$  в образце  $\text{Si}(\text{In})$  при энергиях 40, 120 и 300  $\text{кэВ}$  с суммарной дозой  $10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Профили концентрации  $\text{In}$  в  $\text{Si}$  должны представлять суперпозицию трех распределений Пирсона-IV с параметрами  $R_p$  и  $\Delta R_p - 29, 65, 139$  и  $9, 20, 40 \text{ нм}$ , соответственно. Как видно из рис. 5, 6, метод ОРТИ позволяет выявить все три распределения в профиле концентрации в отличие от ОРР.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект N 94-03-08663.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Б о р Н. Прохождение атомных частиц через вещество. М., Физматгиз, 1950.
- [2] К о г а н D. L., К а з а н т с е в A. M., and К у з м и н L. E. Nucl. Instrum. Methods, **B88**, 495 (1994).
- [3] К а з а н ц е в A. M., К о г а н Д. Л., К у д и н о в Б. С., К у з ь м и н Л. Е., П р е с н я к О. С. ЖАХ, **48**, N 5, 71 (1993).
- [4] D o y l e B. L. et al. Nucl. Instrum. Methods, **B85**, 111 (1994).
- [5] Z i e g l e r J. F., B i e r s a c k J. P., and L i t t m a r k U. The Stopping and Ranges of Ions in Solids. Pergamon Press, N. Y., 1988.
- [6] L i n d h a r d J. and S c h a r f M. Mat. -Fyz. Medd. Dan. Vid. Selsk. **27**, N 15, 1 (1953).
- [7] C h u i W, K. and M a y e r J. W. Report of the Catania Seminar. Italy, 1974.
- [8] H o f f m a n G. E. and P o w e r s D. Phys. Rev., **A13**, 2042 (1976).
- [9] S t o g n e r t J. P. et al. Rad. Eff., **10**, 111 (1982).

[10] Немец О. Ф., Гофман Ю. В. Справочник по ядерной физике. Киев, Наукова Думка, 1975.

Институт ядерных исследований РАН

Поступила в редакцию 22 июня 1995 г.