

ПОГЛОЩЕНИЕ ПОЗИТРОНОВ В КРЕМНИИ

А.Д. Мокрушин, Д.В. Хвостов

На основе измерения профиля внедрения позитронов источника Na^{22} в кремниевый монокристаллический поглотитель конечной толщины получено значение массового коэффициента поглощения $\mu^4 = 39 \text{ см}^2/\text{г}$. Не обнаружено аномального прохождения позитронов в кремнии.

Попадающие в вещество быстрые позитроны аннигилируют в основном после достижения надтепловых энергий¹. Вследствие относительно малой диффузионной длины позитронов² можно получить профиль внедрения позитронов в массивный образец, измеряя число аннигиляций в тонком слое в зависимости от расстояния слоя до поверхности образца. В работе³ на основе измерения профилей получены значения коэффициентов поглощения позитронов от источника Cu^{64} в широком круге веществ. Аналогичные исследования для источников с различной границей β^+ -спектра подтвердили⁴ обнаруженную ранее методом пропускания позитронов^{5,6} зависимость коэффициента поглощения от порядкового номера исследуемого элемента. При этом⁴ было показано, что более подходящим параметром спектра позитронов является не граничная энергия E_{max} , а некоторая средняя энергия \bar{E} , зависящая, в частности, от материала подложки источника.

В ряде работ Дехтяра с сотрудниками^{7,9} приводятся результаты аннигиляционных экспериментов, интерпретированные авторами как следствие аномального прохождения позитронов от источника Na^{22} через пластины монокристаллического кремния. Так, в⁷ сообщается, что за пластиной толщиной в несколько сотен микрон регистрируется поток позитронов, почти на порядок превосходящий значение, рассчитанное по полученным в^{3,4} коэффициентам поглощения. Далее, косвенно оцененный в⁸ коэффициент поглощения позитронов в кремнии оказался примерно вдвое меньше приведенных в^{3,4} значений. В⁹ анализируются результаты измерений интенсивности потока позитронов, регистрируемых за пластинками кремния различной толщины. Эти результаты не согласуются с общепринятым экспоненциальным законом прохождения позитронов, хотя в предыдущей работе⁸ авторы при анализе данных исходили именно из этого закона.

В этой ситуации нам представлялось целесообразным провести измерения профиля внедрения позитронов от источника Na^{22} в монокристаллическую пластину кремния конечной толщины.

Профиль измерялся по методике, аналогичной описанной в^{3,4}. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. Толщина защиты и стенок коллиматоров выбрана такой, чтобы скорость счета случайных совпадений была много меньше фона. Фоновая скорость счета совпадений (измеряемая в отсутствие образца) составляла менее 1% от максимальной скорости счета совпадений аннигиляционных квантов. Разрешающее время схемы совпадений ~ 150 нсек. Использовались плоско-параллельные коллиматоры с шириной щелей 25, 50 и 100 мкм. Объектом исследования служил бездислокационный монокристалл кремния

p-типа. Параллельно грани (111) вырезалась пластинка квадратного сечения со стороной 2 см и толщиной 400 мкм. Нарушенный в процессе механической обработки поверхностный слой был удален полирующим химическим травлением.

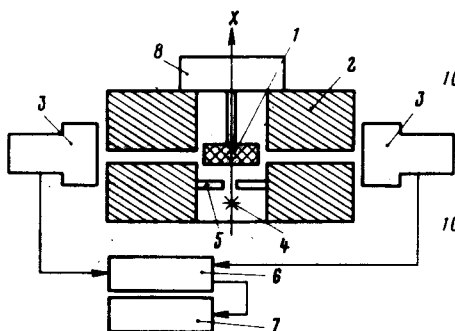


Рис. 1

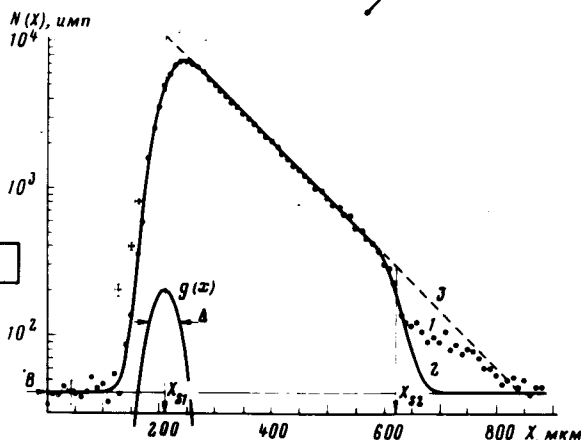


Рис. 2

Рис.1. Схема установки по измерению профилей внедрения позитронов: 1 - образец, 2 - свинцовый коллиматор, 3 - сцинтилляционные детекторы, 4 - источник позитронов, 5 - диафрагма пучка, 6 - схема совпадений, 7 - пересчетный прибор, 8 - устройство перемещения образца

Рис.2. Профиль внедрения позитронов в кремний: 1 - экспериментальный профиль для щели шириной 50 мкм, 2 - подгоночная кривая (формула 3), 3 - асимптотика данных с наклоном $\alpha^+ = 91 \text{ см}^{-1}$. $g(x)$ - функция разрешения, B - уровень фона, X_{S1} - координата передней по отношению к источнику позитронов поверхности образца, X_{S2} - координата задней поверхности образца

На рис.2 приведен экспериментальный профиль внедрения позитронов, полученный с шириной коллимирующих щелей 50 мкм - зависимость 1. Он представляет собой зависимость скорости счета совпадений аннигиляционных квантов $N(x)$ от перемещения образца относительно неподвижных коллиматоров. Почти по всей толщине образца наблюдается экспоненциальный закон поглощения. Более сильное уменьшение $N(x)$ вблизи X_{S2} соответствует задней (по отношению к источнику) поверхности образца. Нарастание $N(x)$ вблизи X_{S1} происходит тем сильнее, чем меньше ширина коллимирующих щелей.

По аналогии с работами^{3,4} экспериментальный профиль $N(x)$ для образца конечной толщины можно аппроксимировать сверткой экспоненты с функцией разрешения $g(x' - x)$:

$$N(x) = B + C \int_{X_{S1}}^{X_{S2}} e^{-\alpha^+ x} g(x' - x) dx', \quad (1)$$

где α^+ - линейный коэффициент поглощения позитронов, B - фон, C - константа.

Если в качестве функции разрешения взять гауссову кривую

$$g(x' - x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-(x' - x)^2 / 2\sigma^2}, \quad (2)$$

то результат свертки (1) принимает следующий вид:

$$N(x) = B + C e^{-\alpha^+ x} \left[\Phi\left(\frac{x - X_{S1}}{\sigma} - \alpha^+ \sigma\right) - \Phi\left(\frac{x - X_{S2}}{\sigma} - \alpha^+ \sigma\right) \right], \quad (3)$$

где $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-t^2/2} dt$ — интеграл вероятности; $2\sigma = \Delta$; Δ — ширина щели.

Сплошная кривая 2 на рис.2, рассчитанная по формуле (3), представляет результат свертки (1) при $a^+ = 91 \text{ см}^{-1}$ и $B = 40$ (счет в максимуме превышал 8000 импульсов). Наблюдается хорошее согласие расчета с опытом почти во всем исследованном диапазоне x . Превышение экспериментальных точек над расчетной кривой при $x \gg X_{S2}$ обусловлено вкладом позитронов, аннигилирующих в держателе образца.

Показанное на рис.2 положение передней поверхности образца X_{S1} определялось из естественного предположения о равенстве площадей под экспериментальной зависимостью (после вычитания фона) и под ее экстраполяцией на "идеальное" геометрическое разрешение (фигура 3 треугольной формы на рис.2). При этом разность $X_{S2} - X_{S1}$ хорошо согласуется с толщиной пластинки. Предлагаемый способ определения положения передней поверхности образца нам кажется более предпочтительным, чем описанные в работах^{3,4} способы.

Измерения профиля при ширине щелей коллиматоров 25, 50 и 100 мкм дали для a^+ соответствующие значения: $91,5 \pm 1$; $91,0 \pm 0,7$ и $93,3 \pm 0,6 \text{ см}^{-1}$. Две более узкие щели демонстрируют хорошее согласие в величине a^+ , а незначительное увеличение a^+ для широкой щели объясняется ограниченностью приведенной выше аппроксимации в области $\Delta < 1/a^+ < |X_{S2} - X_{S1}|$. Приняв $a^+ = 91 \text{ см}^{-1}$, получаем массовый коэффициент поглощения $\mu^+ = a^+/p = 39 \text{ см}^2/\text{г}$. Это значение согласуется с результатами более ранних измерений как по методу пропускания, так и путем измерения профиля. Таким образом, наши измерения не обнаружили аномального прохождения позитронов через монокристаллические пластинки кремния, о котором сообщается в работах Дехтяря с сотрудниками. Более того, приведенные в их последней работе⁹ экспериментальные точки, демонстрируют наличие некоего постоянного "фона", который может быть обусловлен, например, рассеянием позитронов на краях образца. При учете этого "фона" в данных работы⁹ получается обычная экспоненциальная зависимость коэффициента пропускания от толщины образца, дающая нормальный коэффициент поглощения позитронов в кремнии.

В свете изложенного мы пришли к выводу, что в настоящее время не имеется достаточных оснований для обсуждения механизмов аномального прохождения позитронов, проводимого в работах^{7,9-11}.

Литература

1. Гольданский В.И. Физическая химия позитрона и позитрония. М.: Наука, 1968.
2. Brandt W. Appl. Phys., 1974, 5, 1.
3. Brandt W., Paulin R. Phys. Rev., 1977, B15, 2511.
4. Mourino M., Löpl H., Paulin R. Phys. Lett., 1979, 71A, 106.
5. Rupaal A.S., Spanel L.E. Phys. Rev., 1972, A9, 283.
6. Spanel L.E., Rupaal A.S., Patrick J.R. Phys. Rev., 1973, B9, 4072.
7. Дехтяр И.Я., Мадатова Э.Г., Силантьев В.И., Адонкин В.Т. Письма в ЖЭТФ, 1976, 23, 691.
8. Дехтяр И.Я. и др. Phys. Stat. Sol., 1979, a54, к 71.
9. Дехтяр И.Я. и др. ФТТ, 1981, 23, 926.
10. Дехтяр И.Я., Адонкин В.Т., Мадатова Э.Г., Силантьев В.И., Длубек Г. Письма в ЖЭТФ, 1977, 26, 366.
11. Дехтяр И.Я., Мадатова Э.Г., Адонкин В.Т., Лихторович С.П., Рустамов Ш.А. Письма в ЖЭТФ, 1977, 26, 305.