

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОЗИТРОНОВ С ПОВЕРХНОСТЬЮ МОНOKРЕМНИЯ

В.И.Гольданский, Ю.А.Новиков, А.В.Раков, В.П.Шантарович

Обнаружено существование связанных состояний позитронов на поверхности кремния. Показано, что эти состояния возможны лишь для дырочного кремния, полученного легированием бором (КДБ), причем начиная с плотности носителей $p \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$, и объясняются изменением знака работы выхода позитронов φ_+ при изменении концентрации носителей.

В последнее время появился ряд работ^{1–3}, в которых сообщалось о наблюдении в угловых распределениях аннигиляционных фотонов (УРАФ) некоторых металлов узких пиков при $\theta = 0$ мрад (θ – отклонение угла разлета аннигиляционных γ -квантов от π). Появление такого пика связывается с заселением стационарных состояний в одномерной потенциальной яме на поверхности металла⁴ при условии, что работа выхода позитронов из металла $\varphi_+(Me) \geq 0$. В случае $\varphi_+(Me) < 0$ заселение связанного состояния возможно при использовании конвертора³ если выполняется соотношение связывающее работы выхода позитронов из металла и конвертора $\varphi_+(Conv)$

$$0 > \varphi_+(Conv) > \varphi_+(Me).$$

В связи с этим большой интерес вызывает исследование взаимодействия позитронов с поверхностью полупроводников. Дело в том, что полупроводники обладают уникальной способностью менять свои электронные свойства при введении в них малых добавок других веществ (легирование). При этом может меняться и знак заряда носителей.

Электронные свойства полупроводников плавно меняются в зависимости от концентрации легирующей примеси, а изменение вероятности появления пика в УРАФ полупроводников (β_S) должно проявляться в узком интервале значений φ_+ (при переходе φ_+ через ноль).

Максимальный интегральный вклад пика определяется вероятностью выхода позитронов на поверхность⁵

$$P_S = \frac{L/l}{1 + L/l}, \quad (1)$$

где $L = \sqrt{D\tau}$ – длина диффузии позитронов, D – коэффициент диффузии, а τ – время жизни позитронов, l – толщина поглощения позитронов в исследуемом веществе.

Для эксперимента были выбраны образцы монокремния типа КЭФ (кремний электронный, легированный фосфором) и КДБ (кремний дырочный, легированный бором) с ориентацией поверхности (100) и удельным сопротивлением 4,5 Ом·см (КЭФ-4,5), 15 Ом·см (КЭФ-15), 12 кОм·см (высокоомный, компенсированный), 4 Ом·см (КДБ-4) и 1 Ом·см (КДБ-1). Образцы имели размеры $15 \times 30 \times 0,3$ мм³. Измерения УРАФ производились на установке с параллельно-щелевой геометрией (угловое разрешение 0,7 мрад). Источником позитронов служил изотоп ²²Na активностью 10 мКюри. В процессе измерения применялась оптимизация⁶.

На рис. 1 представлены разности УРАФ ($\Delta f(\theta) = f_2(\theta) - f_1(\theta)$), причем в качестве $f_1(\theta)$ всегда использовались УРАФ кремния типа КЭФ-4,5 (в связи с работами^{1–3, 6} этот тип кремния был измерен с очень высокой точностью $\sim 0,2\%$ в максимуме УРАФ), а $f_2(\theta)$ – КЭФ-15 (рис. 1а), высокоомного кремния (рис. 1б), КДБ-4 (рис. 1в) и КДБ-1 (рис. 1г). Видно, что для всех образцов кремния кроме КДБ-1 в пределах ошибки $\Delta f(\theta) = 0$. Для пары КДБ-1 – КЭФ-4,5 $\Delta f(\theta)$ имеет вид узкого пика в районе $\theta = 0$ мрад. В предположении, что этот пик определяется аннигиляцией позитронов (или атомов позитрония) из поверхностных состояний КДБ-1, а его величина определяется диффузией позитронов к поверхности,

получим (при $\varphi_{+}(\text{Si}) = 110 \text{ мкм}^{-5}$)

$$L (\text{КДБ-1}) = 0,38 \pm 0,11 \text{ мкм},$$

что в пределах ошибки совпадает с величиной $L = 0,49 \pm 0,08 \text{ мкм}$, полученной из данных работы ⁴.

Таким образом, наши экспериментальные результаты подтверждают пороговый характер появления пика в УРАФ кремния при изменении концентрации легирующей примеси. Этот порог лежит в области дырочного кремния (для ориентации поверхности (100)) при концентрации дырок $p \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Следовательно, в $p\text{-Si}(100)$ при $p > 10^{16} \text{ см}^{-3} \varphi_{+}(\text{Si}) > 0$, то есть все позитроны, достигшие поверхности, заселяют поверхностные состояния. В $n\text{-Si}(100)$, $i\text{-Si}(100)$ и $p\text{-Si}(100)$ с $p < 10^{16} \text{ см}^{-3} \varphi_{+}(\text{Si}) < 0$, и все позитроны, вышедшие на поверхность, покидают кремний и выходят в вакуум.

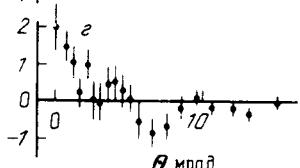
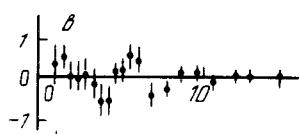
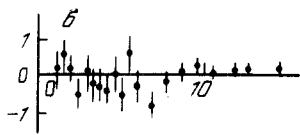
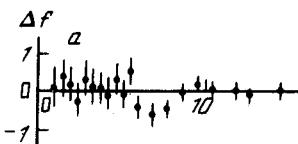


Рис. 1

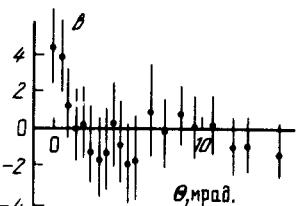
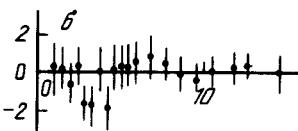


Рис. 2

Рис. 1. Разности УРАФ $\Delta f(\theta) = f_2(\theta) - f_1(\theta)$ (в отн. ед.), где в качестве $f_1(\theta)$ использовались УРАФ КЭФ-4,5, а $f_2(\theta)$ — КЭФ-15 (а), высокоомного кремния (б), КДБ-4 (в) и КДБ-1 (г)

Рис. 2. Разности УРАФ $\Delta f(\theta)$ (в отн. ед.), где в качестве $f_1(\theta)$ использовались УРАФ КЭФ-4,5, а $f_2(\theta)$ — УРАФ образца с пленкой хрома на подложке из КЭФ-4,5 в измерениях без конвертора (а) и с конверторами из КДБ-1 (100) (б) и КЭФ-4,5 (100) (в)

В этой связи УРАФ кремния может быть представлены в следующем общем виде

$$f(\theta) = (1 - \beta_S) f_B(\theta) + \beta_S f_S(\theta), \quad (2)$$

где $f_B(\theta)$ — УРАФ кремния без учета поверхности (совпадает с УРАФ КЭФ для ориентации поверхности (100)); $f_S(\theta)$ — УРАФ при аннигиляции из поверхностных состояний; β_S — вероятность заселения поверхностных состояний.

$$\beta_S = \begin{cases} 0, & \text{при } \varphi_{+} < 0 \\ P_S, & \text{при } \varphi_{+} \geq 0 \end{cases} .$$

Для подтверждения этого вывода были проведены эксперименты с конвертором. В качестве конвертора использовались пластины Si(100) типа КЭФ-4,5 и КДБ-1 толщиной 300 мкм и 200 мкм соответственно. Измерения УРАФ проводились для образца с пленкой хрома толщиной 0,3 мкм на подложке КЭФ-4,5 (100).

На рис. 2 показаны разности УРАФ $\Delta f(\theta)$, где в качестве $f_1(\theta)$ использовались КЭФ-4,5 (700), а $f_2(\theta)$ – УРАФ образца с пленкой хрома в измерениях без конвертора (рис. 2a) и с конверторами из КДБ-1 (100) (рис. 2б) и КЭФ-4,5 (100) (рис. 2в). Хорошо видно, что в измерениях без конвертора (рис. 2a) узкого пика в УРАФ хрома нет, что объясняется¹ отрицательной работой выхода позитронов из хрома ($\varphi_+(Cr) = (-1,7 \pm 0,2)$ эВ²). Нет пика и в измерениях с конвертором КДБ-1 (рис. 2б), как это и следует из представленных выше результатов по измерению УРАФ КДБ-1. В том случае, когда в качестве конвертора используется КЭФ-4,5 (100), пик в $\Delta f(\theta)$ есть (рис. 2в). Согласно^{3, 5}, его относительный вклад в УРАФ хрома описывается выражением

$$\beta = \frac{L/l}{1 - L/l} , \quad (3)$$

где β – вероятность аннигиляции из поверхностных состояний пленки хрома. В отличие от (1), в (3) L – длина диффузии, а l – длина поглощения позитронов в конверторе, а не в веществе, УРАФ которого измеряется. Отсюда получим

$$L (\text{КЭФ-4,5}) = 0,43 \pm 0,14 \text{ мкм},$$

что хорошо совпадает с данными работы⁴ и с представленными выше нашими результатами для L (КДБ-1).

Таким образом, взаимодействие позитронов с поверхностью монокремния с ориентацией поверхности (100) имеет два механизма. Первый, который реализуется в n -Si, i -Si и p -Si с $p < 10^{16} \text{ см}^{-3}$ заключается в эмиссии медленных позитронов, достигших поверхности, в вакуум. Второй проявляется для p -Si с $p > 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и заключается в захвате в поверхностные состояния позитронов, вышедших на поверхность монокремния.

Литература

1. Валиев К.А., Гольданский В.И., Новиков Ю.А. и др. Письма в ЖЭТФ, 1987, 45, 296.
2. Aravin L.G., Valiev K.A., Goldanskii V.I. et al. Proceedings of the European Meeting on Positron Studies of Defects (PSD-87), 1987, GDR, 2, part 2, p. 39.
3. Новиков Ю.А., Раков А.В., Шантарович В.П. ДАН СССР, 1988 (в печати).
4. *Positrons in Solids*, ed. P. Hautojärvi, Berlin, 1979, (Topics in Current Physics, 12).
5. Новиков Ю.А., Раков А.В., Шантарович В.П. Препринт ИОФАН СССР, 1988.
6. Аравин Л.Г., Новиков Ю.А., Филимонов М.К., Шантарович В.П. Поверхность, 1987, №4, с. 77.
7. Mills A.P., Platzman P.M., Brown B.L. Phys. Rev. Lett., 1978, 41, 1076.