

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ ПОЗИТРОННОЙ АННИГИЛЯЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЕФЕКТОВ В ПЛАСТИНАХ КРЕМНИЯ P-ТИПА

В.И.Графутин, В.В.Калугин<sup>+</sup>, Г.Г.Мясищева, Е.П.Светлов-Прокопьев, С.П.Тимошенко<sup>+</sup>, Ю.В.Фунтиков, Н.О.Хмелевский

Институт Теоретической и Экспериментальной Физики им. А.И.Алиханова, 117218 Москва, Россия  
Московский Государственный институт электронной техники, 124498, Москва, Зеленоград, Россия

Важными вопросами, которые можно решать с помощью метода позитронной аннигиляционной спектроскопии (ПАС) [1,2], являются исследования механизмов и динамики возникновения, превращения и исчезновения дефектов в физике твердого тела и радиационной физике материалов, используемых в атомной и электронной промышленности, на различных стадиях технологического процесса их получения.

В связи с этим рассмотрены общие подходы, используемые для определения концентраций и структуры дефектов твердого тела методом позитронной аннигиляционной спектроскопии. Методом измерения углового распределения аннигиляционных фотонов (УРАФ) исследован процесс аннигиляции позитронов в пластинах кремния различных марок, облученных протонами.

Нами исследовались монокристаллические пластины кремния p-типа с ориентацией  $\langle 111 \rangle$  с различными методами обработки поверхности (шлифованные, полированные и зеркальные), толщиной (340-500) мкм, легированные бором и облученные протонами с энергией 3 МэВ и флюенсом ( $5,15 \cdot 10^{15} - 4,3 \cdot 10^{16}$ )  $\text{см}^{-2}$ . Экспериментальные кривые УРАФ необлученных и облученных пластин кремния разлагались на параболическую  $I_p$  и гауссовскую  $I_g$  компоненты. Оказалось, что значения  $I_p$  и  $I_g$  для необлученных и облученных образцов довольно значительно отличаются. В то же время эти значения  $I_p$  и  $I_g$  одинаковых образцов для одних и тех же условий облучения близки друг другу. В бездефектных кристаллах кремния аннигиляция позитронов, характеризуемая параболической компонентой  $I_p$ , может быть объяснена аннигиляцией позитронов из уилеровских состояний типа  $(e^+e_2^-)$  [1-3] в валентной зоне кремния. В свою очередь гауссовская компонента  $I_g$  – обусловлена аннигиляцией позитронов из уилеровских состояний типа  $(e^+e_2^-)$  в области остовов положительных ионов кремния. Показано, что анализ этих компонент, в принципе, позволяет определить среднюю концентрацию позитрончувствительных мест (дефектов) в дефектной области облученного протонами кремния, сопоставимой по протяженности со средним пробегом позитронов.

Для этого, исходя из данных измерения УРАФ, определяли вначале разность между  $I_g$  (облуч), то есть облученными пластинами кремния, и  $I_g$  (необлуч) (исходной необлученной пластиной). Принимая короткое время жизни позитронов в кремнии  $\tau_1 = 2,2 \cdot 10^{-10} \text{ с}$  [1,2], вычисляли по формуле (1) значения  $\bar{k}_d$  для трех серий образцов с различными параметрами облучения протонами и обработками поверхности

$$\Delta I_g = I_g(\text{необл}) - I_g(\text{обл}) \sim \bar{k}_d \tau_1, \quad (1)$$

то есть среднее значение скорости захвата составляет величину

$$\bar{k}_d \sim \Delta I_g / \tau_1, \quad (2)$$

В свою очередь величина  $\bar{k}_d$  определяется известными выражениями [1,2]

$$\bar{k}_d = \bar{\sigma}_+ v \bar{N}_d = 4\pi D_+ \bar{R}_d \bar{N}_d. \quad (3)$$

Здесь  $\bar{\sigma}_+$  - среднее значение сечения захвата дефектами объемных позитронных состояний;  $v$  - скорость термализованных объемных позитронных состояний Уилера;  $\bar{N}_d$  - средняя

концентрация дефектов в области кристалла, чувствительных к термализованным объемным позитронным состояниям Уилера,  $D_+$  - коэффициент диффузии объемных позитронных состояний Уилера. Таким образом, из приведенных выражений можно определить величины  $k_d$ ,  $\bar{N}_d$  и  $\bar{R}_d$ , если известны такие параметры, как  $\lambda_1$ ,  $D_+$ ,  $\bar{\sigma}_+(i)$  и  $\nu$ .

В рамках ловушечного центра захвата позитронов средние значения величин концентраций радиационных дефектов  $\bar{N}_d$  по определенным величинам  $\bar{k}_d$  в свою очередь рассчитывалась по формуле (3) со значениями  $\bar{\sigma}_+ \sim 10^{-15} \text{ см}^2$ ,  $\nu \sim 1,5 \cdot 10^6 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$  [1,2]. Оказалось, что средние концентрации радиационных дефектов  $\bar{N}_d$  в протонированных пластинах кремния в приповерхностных слоях с определенными значениями  $\bar{k}_d$  получились заключенными в пределах  $\bar{N}_d \sim 8 \cdot 10^{16} - 8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Приведенные результаты измерений  $\bar{N}_d$  методом УРАФ в протонированных пластин кремния хорошо согласуются с данными более ранних работ для образцов кремния n-типа [1,2]. Наблюдаются также значительные вариации величин  $\bar{N}_d$  в зависимости от условий и параметров облучения протонами и от степени обработки поверхности. На основании вышеизложенного можно полагать, что в исследованных нами пластинах кремния, облученных протонами, обнаруживаются прежде всего радиационные дефекты типа вакансий V (моно-, би-, тетра- и гексавакансии и т.д.) и междоузельных атомов I и их скоплений, то есть разупорядоченных областей (PO)<sub>v</sub> и (PO)<sub>i</sub>, формирующие поры и дислокационные петли соответственно [1,2,4]. Именно эти дефекты являются эффективными центрами захвата позитронов.

Далее, исходя из данных УРАФ по необлученным образцам, определяли вначале значения  $(\Delta I_p)_1 = I_p(\text{p-тип, пол.}) - I_p(\text{p-тип, зерк.})$ ,  $(\Delta I_p)_2 = I_p(\text{n-тип, шлиф.}) - I_p(\text{p-тип, зерк.})$ ,  $(\Delta I_p)_3 = I_p(\text{n-тип, зерк.}) - I_p(\text{p-тип, зерк.})$  для трех серий образцов с различными параметрами и условиями обработками поверхности. Принимая короткое время жизни позитронов в кремнии  $\tau_1 = 2,2 \cdot 10^{-10} \text{ с}$ , вычисляли по формулам (1)-(3) значения  $(\bar{k}_p)_i$  для этих трех серий образцов с различными параметрами и условиями обработками поверхности. В рамках ловушечного центра захвата позитронов увеличение средних значений величин концентраций объемных электронных состояний  $(\bar{N}_p)_i$  по сравнению с образцом кремния р-типа с зеркальной поверхностью по определенным величинам  $(\bar{k}_p)_i$  в свою очередь рассчитывалась по формуле (3) со значениями  $\bar{\sigma}_+ \sim 10^{-15} \text{ см}^2$ ,  $\nu \sim 1,5 \cdot 10^6 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$  [1,2]. Оказалось, что вариации увеличения средних концентраций объемных электронных состояний в пластинах кремния с определенными значениями  $(\bar{k}_p)_i$  получились заключенными в пределах  $\bar{N}_p \sim 1,3 \cdot 10^{16} - 2,4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Наблюдаются также значительные вариации величин  $(\bar{N}_p)_i$  в зависимости от параметров и условий обработки поверхности образцов. В частности, в образцах кремния n-типа, где свободными носителями являются электроны, увеличение значения  $\bar{N}_p$  по сравнению с образцом р-типа с зеркальной поверхностью, где свободными носителями являются дырки, на порядок превышают аналогичное увеличение значения  $\bar{N}_p$  для образцов кремния р-типа с поверхностью, подвергнутой шлифованию, что согласуется с моделью образования комплексов Уилера в металлах и полупроводниках [1-3]. Эти интересные факты нуждаются в дальнейших исследованиях.