

Возможный спектр позитронных состояний в пористом кремнии

© В.И. Графутин, Е.П. Прокопьев, С.П. Тимошенко*, Г.Г. Мяснищева, Ю.В. Фунтиков

Институт теоретической и экспериментальной физики,
117259 Москва, Россия

* Московский институт электронной техники (Технический университет),
103498 Москва, Россия

E-mail: grafutin@vitep5.itep.ru

(Поступила в Редакцию 15 июня 2000 г.)

В окончательной редакции 28 ноября 2000 г.)

Рассмотрена кинетическая схема превращений и аннигиляционных распадов позитронных и позитрониевых состояний в объеме кристалла, кристаллическом скелете, на поверхности и в объеме пор пористого кремния. Получены формулы, связывающие интенсивности временных компонент аннигиляционного распада со скоростями распадов и превращений позитронных и позитрониевых состояний в объеме пор. Оценки скорости взаимодействия с поверхностью пор с образованием поверхностного состояния атома позитрония дали значение $10^7 - 10^8 \text{ s}^{-1}$, а среднего значения радиуса пор — $\approx 2 \text{ nm}$.

Пористый кремний, получаемый анодированием монокристаллического кремния в кислых спиртовых растворах HF, нашел широкое применение в технологии производства полупроводниковых приборов, светоиспускающих устройств и микромеханических приборов и устройств [1]. Структура и свойства пористого кремния (удельная поверхность и специфическая монокристаллическая структура) зависят, в первую очередь, от режимов анодирования и термообработки. Для исследования свойств пористого кремния, в частности дефектов типа открытых объемов, довольно широкое применение нашел метод аннигиляции позитронов [1–6].

Первые исследования [1] показали, что в пористом кремнии имеется компонента с временами жизни, заключенными в пределах от 400 до 600 ps. Интенсивность этой компоненты очень сильно зависит от условий анодирования, температуры отжига и свойств пористого кремния. В работе [4] была обнаружена долгоживущая временная компонента с временем жизни в несколько десятков ps, интенсивность которой зависела от размеров пор. Наличие этой компоненты обычно объясняется образованием ортопозитрония (орто-Ps) внутри пористого слоя. В той же работе были проведены измерения узкого пика, обусловленного распадом парапозитрония (пара-Ps). В работе [5] по измеренным временам жизни орто-Ps рассчитан средний радиус пор. Их значения оказались равными $\sim 1 \text{ nm}$. В [2] проведено зондирование пучком моноэнергетических позитронов слоя пористого кремния толщиной $10 \mu\text{m}$ и сделан вывод об образовании позитрония на поверхности пор. Интенсивность и время жизни позитрониевой компоненты сильно зависели от температуры образца и от температуры отжига. В работе [3] методами угловой и временной спектроскопии получены сведения о количестве и размере пор в пористом кремнии на поликристаллической подложке. Показано, что в распределении пор по размерам имеется максимум порядка 10^{19} cm^{-3} при радиусах примерно 7 \AA . Распределение ности асимметричный характер и вытянуто в сторону больших радиусов. В [6] пористый кремний

исследовался с помощью моноэнергетического пучка медленных позитронов. Наблюдались большие значения параметра формы доплеровского уширения аннигиляционной линии (ДУАЛ), которые соответствуют аннигиляции позитронов внутри пористого слоя и соответствуют распаду пара-Ps. С учетом плотности пористого слоя были вычислены его толщины, удовлетворительно согласующиеся с результатами эллипсометрических измерений. Эксперименты [6] показали, что на поверхности пор имеется слой SiO_2 значительной толщины.

Следует отметить, что в этих работах дан подробный анализ позитронных и позитрониевых состояний в объеме пор, в кристалле подложки и кристаллическом скелете пор анализ не проводился. В настоящей работе с целью систематизации свойств и понимания проблемы в целом этот анализ проводится, т.е. исследуется кинетика превращений и аннигиляционных распадов позитронных и позитрониевых состояний, свойственная материалам с развитой поверхностью [7–14].

1. Позитронные и позитрониевые состояния в пористом кремнии

Теория позитронных состояний в пористых системах с развитой поверхностью [15–19] и в бездефектных кристаллах кремния [20] рассматривалась в ряде работ. Развитые в этих работах представления (особенно в [14,15,20]) наряду с возможной концепцией позитронных состояний в бездефектных кристаллах кремния [20] могут быть применены и к пористому кремнию. Будем рассматривать пористый кремний как систему, состоящую из двух подсистем: 1) объем монокристаллической подложки и кристаллического скелета стенок пор и 2) поверхность и объем пористого окисленного поверхностного слоя, покрытого SiO_2 [2,4,5], и собственно объем пор. В объеме монокристаллического кремния и кристаллического скелета пористого кремния, согласно [19,20], в общем случае в начальный момент времени могут наблюдаться

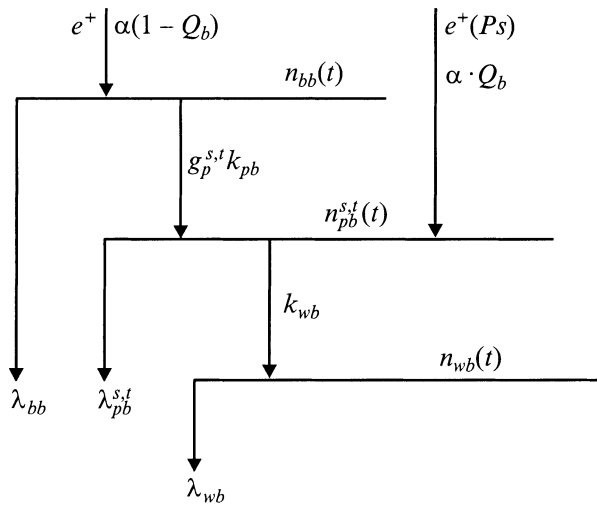


Рис. 1. Кинетическая схема превращений и аннигиляционного распада позитронных и позитрониевых состояний в кристалле кремния и кристаллическом скелете пористого кремния.

квазисвободные позитроны и атомы Ps, конвертирующие на свободных носителях в комплексы Уилера $Ps^-(e^-e^+e^-)$ [21]. Внутри пористого слоя, согласно [1–7], обнаружены позитроны и позитроний в объеме пор и поверхностные состояния атома Ps. Рассмотрим последовательно условия образования и свойства этих состояний в дегазированных полупроводниках *n*-типа [14] с тем, чтобы исключить эффекты взаимодействия орто-Ps с молекулами кислорода воздуха. Будем считать, что поверхность пор покрыта

слоем SiO_2 , так что нормальный позитроний (в отличие от квазипозитрония в объеме кристалла) образуется на поверхности полупроводникового окисла. В этом случае из условий образования и динамической стабильности атома Ps [19] следует, что в пористом кремнии возможен достаточно высокий выход Ps.

Свойства позитронных и позитрониевых состояний в объеме монокристалла кремния рассматривались в [20]. Особое внимание было уделено комплексам Уилера и квазисвободным позитронам, аннигиляция которых в полупроводниковых монокристаллах кремния дает время жизни в объеме $\tau_b \approx 2.24 \cdot 10^{-10}$ s, удовлетворительно согласующееся с экспериментальным значением $\tau_1 \approx (2.22 \pm 0.02) \cdot 10^{-10}$ s. Позитроны и позитроний, испускаемые с поверхности окисного слоя пор, взаимодействуют с поверхностью пор. Основываясь на экспериментальных данных [1–7] и изложенных выше представлениях о позитронных и позитрониевых состояниях в пористом кремнии, будем полагать, что основными типами состояний в некий момент времени *t* являются: свободные квазипозитроны в объеме монокристаллического слоя и кристаллического скелета пористого кремния с концентрацией $n_{bb}(t)$, доля которых $\alpha(1 - Q_b)$, где α — доля позитронов, аннигилирующих в объеме кристалла от их общего количества, Q_b — выход позитрония в объеме кристалла в процессе замедления позитронов; свободные квазипозитроны либо аннигилируют двухквантовым образом со скоростью λ_{bb} , либо совершают переходы в позитрониевые состояния $n_{pb}^{s,t}(t)$ со скоростями $g_p^{s,t} k_{pb}$ ($g_p^{s,t}$ — статистические веса пара (*s*)- и орто (*t*)-состояний, $g_p^s = 1/4$, $g_p^t = 3/4$), распадающиеся со скоростями $\lambda_{pb}^{s,t}$. Позитроний в объеме

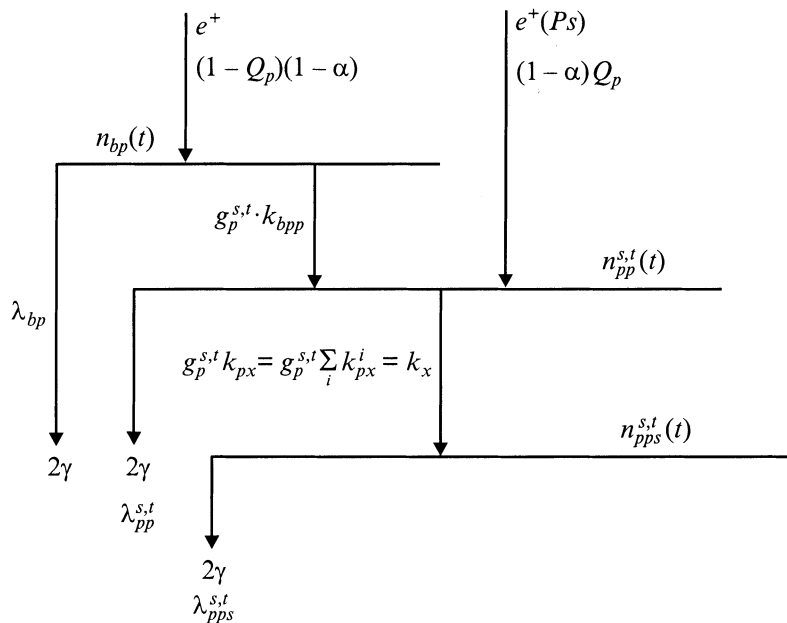


Рис. 2. Кинетическая схема превращений и аннигиляционного распада позитронных и позитрониевых состояний в пористом кремнии.

кристалла может конвертировать на свободных носителях в комплексы Уилера $n_{wb}(t)$ со скоростью k_{wb} , распадающиеся двухквантовым образом с константой скорости λ_{wb} . Схема аннигиляционных распадов и превращений позитронных и позитрониевых состояний представлена на рис. 1.

На рис. 2 в свою очередь представлена схема превращений и аннигиляционных распадов позитронных и позитрониевых состояний в объеме пор и на поверхности пористого кремния. Здесь основными типами позитронных и позитрониевых состояний являются позитронные $n_{bp}(t)$ (доля которых $(1 - \alpha)(1 - Q_p)$) и позитрониевые $n_{pp}^{s,t}(t)$ (доля которых $(1 - \alpha)Q_p$) состояния в объеме пор, где $(1 - \alpha)$ — доля позитронов, аннигилирующих в объеме пор и на поверхности пористого кремния от их общего количества, Q_p — выход позитрония в объеме пор и на поверхности пористого кремния в процессе замедления позитронов. Свободные позитроны $n_{bp}(t)$ взаимодействуют с поверхностью поры со скоростью $g_p^{s,t}k_{bpp}$ и образуют атомы Ps $n_{pp}^{s,t}(t)$ либо аннигилируют двухквантовым образом при столкновениях со скоростями λ_{bp} ; атомы Ps $n_{pp}^{s,t}(t)$ в свою очередь при взаимодействии с поверхностью поры либо образуют поверхностное состояние атома Ps $n_{pps}^{s,t}(t)$ со скоростями $g_p^{s,t}k_{px} = g_p^{s,t} \sum_i k_{px}^i = k_x$ (k_{px}^i — скорость взаимодействия i -типа), либо распадаются со скоростями $\lambda_{pp}^{s,t}$ при столкновениях с поверхностью. Поверхностные состояния атома Ps распадаются со скоростями $\lambda_{pps}^{s,t}$.

2. Кинетика превращений и аннигиляционных распадов позитронных и позитрониевых состояний в пористом кремнии

С учетом рассмотренных выше позитронных и позитрониевых состояний (рис. 1,2) система кинетических уравнений их превращений и аннигиляционных распадов записывается следующим образом [22,23].

Для процесса в объеме кристалла и кристаллическом скелете пор имеем

$$\frac{dn_{bb}}{dt} = -(\lambda_{bb} + k_{bp})n_{bb} = -\mu_{bb}n_{bb}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dn_{pb}^{s,t}}{dt} &= g_p^{s,t}k_{bpb}n_{bb} - (\lambda_{pb}^{s,t} + k_{wb})n_{pb}^{s,t} \\ &= g_p^{s,t}k_{bpb}n_{bb} - \mu_{pbb}^{s,t}n_{pb}^{s,t}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{dn_{wb}}{dt} = g_p^{s,t}k_{wb}n_{pb}^{s,t} - \lambda_{wb}n_{wb}. \quad (3)$$

Система уравнений (1)–(3) для объема кристалла и кристаллического скелета пор дополняется начальными

условиями при $t = 0$

$$\begin{aligned} n_{bb}(0) &= \alpha(1 - Q_b)n_0, \quad n_{pb}^s(0) + n_{pb}^t(0) = \alpha Q_b n_0, \\ n_{pb}^s(0) &= \frac{1}{4}\alpha Q_b n_0, \quad n_{pb}^t(0) = \frac{3}{4}\alpha Q_b n_0, \\ n_{wb}(0) &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Для процесса в объеме пор пористого кремния и на его поверхности наиболее вероятными являются процессы, описываемые следующими уравнениями:

$$\frac{dn_{bp}}{dt} = -(\lambda_{bp} + k_{bpp})n_{bp} = -\mu_{bp}n_{bp}, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{dn_{pp}^s}{dt} &= g_p^s k_{bpp} n_{bp} - g_p^s (\lambda_{pp}^s + k_{px}) n_{pp}^s \\ &= g_p^s k_{bpp} n_{bp} - g_p^s \mu_{ppx}^s n_{pp}^s, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{dn_{pp}^t}{dt} &= g_p^t k_{bpp} n_{bp} - g_p^t (\lambda_{pp}^t + k_{px}) n_{pp}^t \\ &= g_p^t k_{bpp} n_{bp} - g_p^t \mu_{ppx}^t n_{pp}^t, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\frac{dn_{pps}^s}{dt} = g_p^s k_x n_{pps}^s - \lambda_{pps}^s n_{pps}^s, \quad (8)$$

$$\frac{dn_{pps}^t}{dt} = g_p^t k_x n_{pps}^t - \lambda_{pps}^t n_{pps}^t. \quad (9)$$

Система уравнений (5)–(9) дополняется начальными условиями

$$\begin{aligned} n_{bp}(0) &= (1 - \alpha)(1 - Q_p)n_0, \\ n_{pp}^s(0) + n_{pp}^t(0) &= (1 - \alpha)Q_p n_0, \\ n_{pp}^s(0) &= \frac{1}{4}(1 - \alpha)Q_p n_0, \quad n_{pp}^t(0) = \frac{3}{4}(1 - \alpha)Q_p n_0, \\ n_{pps}^s(0) &= n_{pps}^t(0) = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Согласно [22,23], наблюдаемый временной спектр в случае системы уравнений (1)–(3) содержит четыре компоненты

$$\begin{aligned} n_b(t) &= -\frac{1}{\alpha n_0} \frac{dn_b}{dt} = \mu_{bb} I_{bp} \exp(-\mu_{bb} t) \\ &+ \mu_{pbb}^{s,t} I_{pb}^{s,t} \exp(-\mu_{pbb}^{s,t} t) + \lambda_{wb} I_{wb} \exp(-\lambda_{wb} t), \end{aligned} \quad (11)$$

где I_i^j — интенсивности τ_i^j -компонент во временных спектрах аннигиляции,

$$\tau_i^j = 1/\mu_i^j.$$

Решая систему уравнений (1)–(3) с начальными условиями (4), получим из (11) значения I_i^j , констант распада μ_i^j и λ_i^j для различных τ_i^j -компонент во временных спектрах аннигиляции

$$\begin{aligned} I_{bb} &= \alpha(1 - Q_b) \left(1 - g_p^s \frac{k_{bp}}{\mu_{bb} - \lambda_{pb}^s} - g_p^t \frac{k_{bp}}{\mu_{bb} - \lambda_{pb}^t} \right), \\ \frac{1}{\tau_{bb}} &= \mu_{bb} = \lambda_{bb} + k_{bp}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$I_{pb}^s = g_p^s \alpha Q_b \left(1 - \frac{k_{wb}}{\mu_{pbb}^s - \lambda_{wb}} \right) + \alpha (1 - Q_b) g_p^s \frac{k_{bp}}{\mu_{bb}^s - \lambda_{pb}^s},$$

$$\frac{1}{\tau_{pbb}^s} = \mu_{pbb}^s = \lambda_{bb}^s + k_{wb}, \quad (13)$$

$$I_{pb}^t = g_p^t \alpha Q_b \left(1 - \frac{k_{wb}}{\mu_{pbb}^t - \lambda_{wb}} \right) + \alpha (1 - Q_b) g_p^t \frac{k_{bp}}{\mu_{bb}^t - \lambda_{pb}^t},$$

$$\frac{1}{\tau_{pbb}^t} = \mu_{pbb}^t = \lambda_{bb}^t + k_{wb}, \quad (14)$$

$$I_{wb} = g_p^s \alpha Q_b \frac{k_{wb}}{\mu_{pbb}^s - \lambda_{wb}} + g_p^t Q_b \frac{k_{wb}}{\mu_{pbb}^t - \lambda_{wb}},$$

$$\lambda_{wb} = \frac{1}{\tau_{wb}}. \quad (15)$$

В случае, описываемом системой уравнений (5)–(9), наблюдаемый временной спектр в объеме пористого кремния и на поверхности пор содержит пять компонент

$$n_p(t) = -\frac{1}{(1-\alpha)n_0} \frac{dn_p}{dt} = \mu_{bp} I_{bp} \exp(-\mu_{bp} t)$$

$$+ \mu_{ppx}^s I_{pp}^s \exp(-\mu_{ppx}^s t) + \mu_{ppx}^t I_{pp}^t \exp(-\mu_{ppx}^t t)$$

$$+ \lambda_{pps}^s I_{pps}^s \exp(-\lambda_{pps}^s t) + \lambda_{pps}^t I_{pps}^t \exp(-\lambda_{pps}^t t). \quad (16)$$

Решая систему уравнений (5)–(9) с начальными условиями (10), находим по (16) значения I_i^j , скоростей распада μ_i^j и λ_i^j для различных τ_i^j -компонент во временных спектрах аннигиляции

$$I_{bp} = (1-\alpha)(1-Q_p) \left(1 - g_p^s \frac{k_{bpp}}{\mu_{pp}^s} - g_p^t \frac{k_{bpp}}{\mu_{pp}^t} \right),$$

$$\frac{1}{\tau_{bp}} = \mu_{bp} = \lambda_{bp} + k_{bp}, \quad (17)$$

$$I_{pp}^s = g_p^s (1-\alpha) Q_e \left(1 - \frac{k_x}{\mu_{ppx}^s - \lambda_{pps}^s} \right)$$

$$+ (1-\alpha)(1-Q_p) g_p^s \frac{k_{bpp}}{\mu_{bp}^s - \lambda_{pp}^s},$$

$$\frac{1}{\tau_{ppx}^s} = \mu_{ppx}^s = \lambda_{pp}^s + k_{px}, \quad (18)$$

$$I_{pp}^t = g_p^t (1-\alpha) Q_p \left(1 - \frac{k_x}{\mu_{ppx}^t - \lambda_{pps}^t} \right)$$

$$+ (1-\alpha)(1-Q_p) g_p^t \frac{k_{bpp}}{\mu_{bp}^t - \lambda_{pp}^t},$$

$$\frac{1}{\tau_{ppx}^t} = \mu_{ppx}^t = \lambda_{pp}^t + k_{px}, \quad (19)$$

$$I_{pps}^s = g_p^s (1-\alpha) Q_p \frac{k_x}{\mu_{ppx}^s - \lambda_{pps}^s}, \quad \frac{1}{\tau_{ppx}^s} = \lambda_{pps}^s, \quad (20)$$

$$I_{pps}^t = g_p^t (1-\alpha) Q_p \frac{k_x}{\mu_{ppx}^t - \lambda_{pps}^t}, \quad \frac{1}{\tau_{ppx}^t} = \lambda_{pps}^t. \quad (21)$$

Таким образом, согласно (12)–(15) и (17)–(21), временной спектр аннигиляции в пористом кремнии содержит девять компонент с временами жизни τ_i^j . В то же время в большинстве экспериментов по аннигиляции [1–7] указывается, что временной спектр разрешается на три компонента: $\tau_1(I_1)$, $\tau_2(I_2)$, $\tau_3(I_3)$. Согласно [5], для ряда образцов пористого кремния значения этих компонент соответственно равны $\tau_1 \approx 230$ ps ($I_1 = 47$ –91%), $\tau_2 \approx 580$ –1030 ps ($I_2 = 3$ –7%), а значения $\tau_3(I_3)$ существенно образом зависят от способа приготовления образцов. Так, для образцов, полученных при плотности тока ~ 100 mA/cm², имеем $\tau_3 = 25800$ –36300 ps ($I_3 = 6$ –18%), а для образцов, полученных при плотности тока ~ 10 mA/cm², эти параметры равны $\tau_3 = 4500$ –5300 ps ($I_3 = 1$ –2%). В кривых углового распределения аннигиляционных фотонов установлено наличие узкой компоненты I_N и уменьшение параметра S спектров доплеровского уширения по сравнению с параметром S для объемного кремния.

Поэтому, исходя из этих экспериментальных данных, согласно [22,23], в (12)–(15), (17)–(21) можно выделить три блока времен жизни: τ_M , $\tau_3 = \tau_{pps}^t = 1/\lambda_{pps}^t$, $\tau_2 = \tau_{ppx}^t = 1/\mu_{ppx}^t$, равные

$$\tau_1 = \tau_M = \frac{\tau_b I_b + \tau_{bp} I_{bp} + \tau_{pps}^s I_{pps}^s + \tau_{pp}^s I_{pp}^s}{I_b + I_{bp} + I_{pps}^s + I_{pp}^s}, \quad (22)$$

где τ_b — объемное время жизни в бездефектных кристаллах кремния, а I_b определяется выражением

$$I_b \equiv \alpha = I_{bb} + I_{pb}^s + I_{pb}^t + I_w. \quad (23)$$

Согласно изложенному выше, долгоживущие компоненты в объеме пористого кремния $\tau_3(I_3)$, $\tau_2(I_2)$ соответственно равны

$$\tau_3 = 1/\lambda_3 = \tau_{pps}^t = 1/\lambda_{pps}^t, \quad (24)$$

$$I_3 = I_{pps}^t = g_p^t (1-\alpha) Q_p \frac{k_x}{\mu_{ppx}^t - \lambda_{pps}^t}, \quad (25)$$

$$\tau_2 = 1/\lambda_2 = \tau_{ppx}^t = 1/\mu_{ppx}^t = 1/(\lambda_{pp}^t + k_x), \quad (26)$$

где

$$\lambda_{pp}^t = \lambda_{pp0}^t + \lambda_p. \quad (27)$$

Здесь $\lambda_{pp0}^t = 0.714 \cdot 10^7$ s⁻¹ — скорость 3γ-аннигиляции орто-Ps в объеме поры, в общем случае зависящая при малых радиусах от ее размера [9], λ_p — скорость pick-off-аннигиляции орто-Ps при столкновении со стенкой поры, $k_x = g_p^{s,t} k_{px} = g_p^{s,t} \sum_i k_{px}^i$ — скорость взаимодействия орто-Ps с поверхностью поры и скорости орто-пара конверсии Ps на поверхностных парамагнитных центрах. Интенсивность I_2 равна

$$I_2 = I_{pp}^t = g_p^t (1-\alpha) Q_p \left(1 - \frac{k_x}{\mu_{ppx}^t - \lambda_{pps}^t} \right)$$

$$+ (1-\alpha)(1-Q_p) \frac{k_{bpp}}{\mu_{bp}^t - \lambda_{pp}^t}. \quad (28)$$

Из выражений (25) и (28) при $k_{bpp} \rightarrow 0$ следует, что

$$I_2 + I_3 = g_p'(1 - \alpha)Q_p. \quad (29)$$

Подставляя (29) в (25), получаем

$$\frac{I_3}{I_2 + I_3} = \frac{k_x}{\mu_{ppx}' - \lambda_{pps}'} = \frac{k_x}{\lambda_2 - \lambda_3}, \quad (30)$$

или

$$k_x = (\lambda_2 - \lambda_3) \frac{I_3}{I_2 + I_3}. \quad (31)$$

Таким образом появляется возможность прямого определения по экспериментальным данным $\tau_3(I_3)$, $\tau_2(I_2)$ скорости взаимодействия орто- Ps с поверхностью с образованием поверхностного состояния атома Ps . Скорость $\lambda_2 = 1/\tau_2$, исходя из (24), (27), можно записать в виде

$$\lambda_2 = \lambda_{pp0}' + \lambda_p + k_x, \quad (32)$$

где λ_p и k_x — скорость pick-off-аннигиляции и скорость образования поверхностного состояния атома Ps соответственно.

Квантовомеханические расчеты величины $\lambda_2 = 1/\tau_2$, проведенные в [9], позволили установить зависимость λ_2 от радиуса поры R_0 , равного примерно среднему экспериментальному значению \bar{r}_{por}

$$\lambda_2 = 2[1 - R/R_0 + (2\pi)^{-1} \sin(2\pi R/R_0)], \quad (33)$$

где

$$R = R_0 - R_W, \quad R_W = 1.656 \text{ \AA}.$$

Здесь R_W — эффективный размер области аннигиляции позитрония в стенках пор.

Это дало возможность по формулам (31) и (33) оценить на основании экспериментальных данных [2,5] значения $k_x \approx 10^7 - 10^8 \text{ s}^{-1}$ и $\bar{r}_{por} \approx 2 \text{ nm}$, согласующиеся с данными других авторов [2]. Таким образом, значению радиуса поры $\approx 2 \text{ nm}$ из выражения (33) соответствует значение $\lambda_2 \approx 10^9 \text{ s}^{-1}$. Сравнивая это значение с величиной $k_x \approx 10^8 \text{ s}^{-1}$, можно заключить, что химическое взаимодействие ортопозитрония в поре приводит к уменьшению времени жизни приблизительно на 10%.

Список литературы

- [1] R.M. de la Cruz, R. Pareja. In: Positron Annihilation / Ed. by L. Dorikens-Vanpraet, M. Dorikens, D. Segers. World Scientific, Singapore (1989). P. 702.
- [2] R. Suzuki, T. Mikado, H. Ohgaki, M. Chiwaki, T. Yamazuki. Phys. Rev. **B49**, 24, 17 484 (1994).
- [3] В.П. Шантарович, И.Б. Кевдина, Ю.А. Новиков, В.К. Джейн, А. Гупта. ФТТ **38**, 9, 2686 (1996).
- [4] Y. Itoh, H. Murakami, A. Kinoshita. Appl. Phys. Lett. **63**, 20, 2789 (1993).
- [5] Y. Itoh, H. Murakami, A. Kinoshita. Hyperfine Interactions **84**, 1, 121 (1994).
- [6] A.P. Knights, G. Kowalski, A.S. Saleh, A. Towner, M.I. Patel, P.C. Rice-Ewans. J. Appl. Phys. **78**, 7, 4411 (1995).
- [7] Y.C. Yeap. Microchem. J. **42**, 1, 72 (1990).
- [8] R.V. Gregory. J. Appl. Phys. **70**, 9, 4665 (1991).
- [9] Е.П. Прокопьев. Тез. докл. 47 Международного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Наука, СПб (1996). С. 377.
- [10] В.П. Шантарович, Ю.П. Ямпольский, И.Б. Кевдина. Химия высоких энергий **28**, 1, 53 (1990).
- [11] И.Б. Кевдина, Ю.М. Сивергин, В.П. Шантарович. Химия высоких энергий **30**, 2, 145 (1990).
- [12] В.П. Шантарович, В.И. Клейнер, А.Ю. Алентьев, И.Б. Кевдина, З.К. Азаматова, М.К. Филимонов. Химия высоких энергий **32**, 1, 34 (1998).
- [13] В.П. Шантарович, Ю.А. Новиков, З.К. Азаматова. ФТТ **40**, 1, 164 (1998).
- [14] A.V. Goldanskii, V.A. Onishuk, V.P. Shantarovich. Phys. Stat. Sol. (a) **108**, 2, 550 (1987).
- [15] Г.М. Бартенев, А.З. Варисов, В.И. Гольданский, Е.П. Прокопьев, А.Д. Цыганов. ДАН СССР **197**, 3, 510 (1971).
- [16] Е.П. Прокопьев. Кинетика и катализ **18**, 3, 776 (1977).
- [17] А.О. Татур. Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. М. (1972).
- [18] А.О. Татур, А.Д. Мокрушин. ФТТ **14**, 10, 3060 (1972).
- [19] Е.П. Прокопьев, С.П. Тимошенко, В.И. Графутин, Г.Г. Мясичева, Ю.В. Фунтиков. Позитроника ионных кристаллов, полупроводников и металлов. Ред.-изд. отдел МИЭТ, М. (1999). 176 с.
- [20] Е.П. Прокопьев. Химическая физика **18**, 5, 45 (1999).
- [21] J.A. Wheeler. Ann. N.Y. Acad. Sci. **48**, 1, 219 (1946).
- [22] Е.П. Прокопьев. Деп. в ЦНИИ "Электроника", рег. № P-5154. М. (1989). 46 с.
- [23] Е.П. Прокопьев. Деп. в ЦНИИ "Электроника" рег. № P-5172. М. (1989). 37 с.