

## КОМПЛЕКСЫ УИЛЕРА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Е.П. Светлов-Прокопьев

ФГУП ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И.Алиханова,  
Московский институт электронной техники (технический университет), Москва

В статье рассмотрены два случая взаимодействия позитронов и позитрония со свободными носителями в полупроводниках.

Рассмотрены два предельных случая взаимодействия позитронов и позитрония со свободными носителями в полупроводниках. Первый, когда тепловая энергия позитрона  $kT \gg E_{D,A}$ , где  $E_{D,A}$  - энергия ионизации мелких доноров ( $D$ ) либо мелких акцепторов ( $A$ ),  $k$  - постоянная Больцмана,  $T$  - температура. В этом случае свободные позитроны естественно взаимодействуют с валентными электронами и свободными носителями (электронами в полупроводниках  $n$ - типа и дырками в полупроводниках  $p$ - типа): а)  $[e^+] + [e^-] \rightarrow Ps$ ; б)  $[e^+] + [e^-] \rightarrow 2\gamma$  (двухквантовая аннигиляция при столкновениях квазичастиц) и в) процесс «*pick – off*» - аннигиляции позитрония ( $Ps$ ) на валентных электронах. В полупроводниках  $p$ - типа возможен процесс взаимодействия квазипозитрона с дырками  $h$  в валентной зоне, причем взаимодействие этих квазичастиц естественно будет сводиться лишь к упругому рассеянию. В полупроводниках  $n$ - типа  $Ps$  участвовать в следующих основных процессах: а)  $[Ps]_{s,t} + e^-(\uparrow) \leftrightarrow [Ps]_{r,s} + e^-(\downarrow)$  (орто-пара конверсия  $Ps$ ; б)  $[Ps] + e^- \rightarrow [Pse^-]$  (отрицательный ион  $Ps$ , существование и свойства которого были впервые предсказаны Уилером); в)  $[Ps]_{s,t} + e^- \rightarrow 2\gamma + e^-$  (процесс «*pick – off*» - аннигиляции квази-  $Ps$  на свободных носителях и валентных электронах). В полупроводниках  $p$ - типа возможно также следующих процессов: а)  $[Ps] + h \rightarrow [Psh]$  (своеобразный комплекс Уиллера, состоящий из электрона, позитрона и дырки). Существование комплексов Уилера  $[Pse^-]$  и  $[Psh]$  при комнатных температурах вполне реально, ибо энергии их связей составляют величины порядка нескольких десятых долей эВ. В другом предельном случае  $kT \ll E_{D,A}$  в полупроводниках  $n$ - и  $p$ - типа наряду с процессами рассеяния, «*pick – off*» - аннигиляции и орто-пара конверсии возможные процессы захвата позитронов и  $Ps$  нейтральными и заряженными донорами и акцепторами с образованием сложных комплексов Уилера:  $[A^- e^+]$ ,  $[D^+ - Ps]$ ,  $[A^- - Ps]$ ,  $[D^0 - Ps]$  и  $[A^0 - Ps]$ , где  $[A^-]$  - символ акцептора, а  $[D^0]$  - донора. Таким образом, все квазипозитронные и квазипозитрониевые состояния, а также комплексы Уилера могут быть разбиты на две основные группы: а) делокализованные состояния и б) локализованные состояния. Наряду с этим возможно существование комплексов Уилера  $[Ps - Ex]$ ,  $[Ps - Ex^\pm]$ ,  $[Psh - Ex]$ ,  $[Pse^- - Ex]$ ,  $[Psh - Ex^\pm]$  и  $[Pse^- - Ex^\pm]$ , где  $Ex$  - символ экситона. Существование комплексов Уилера такого типа возможно в интервале температур  $1 \div 4$  К в полупроводниках  $n$ - и  $p$ -типа ( $Ge$ ,  $Si$ ,  $GaAs$ ,  $CdS$  и др.) с высокой концентрацией экситонов. Расчеты основных характеристик аннигиляционных спектров комплексов Уилера показали, что времена жизни позитронов несколько "удлиняются", а полуширины кривых УРАФ сужаются, что дает возможность наблюдать их в экспериментах.

Экспериментальные данные по исследованию позитронных временных спектров полупроводников (см., например, [1-3]) показали, что в этих объектах наблюдается, как правило, лишь одно короткое время жизни позитронов  $\tau_1$  с интенсивностью  $I_1$ , близкой к 100%. При этом отмечалось, что существенной разницы во временах жизни  $\tau_1$  для собственного полупроводника  $i$ - типа, полупроводников  $n$ - и  $p$ - типов не наблюдалось. Впервые разницу в указанных выше различных типах полупроводников удалось установить в [4]. В этой работе были исследованы временные аннигиляционные спектры высокоомных образцов кремния  $i$ - типа и низкоомных образцов кремния  $n$ - и  $p$ - типов, легированных фосфором и бором. Было

показано, что во всех образцах наблюдается лишь одна компонента  $I_1$  со временем жизни  $\tau_1$  в пределах от 0,233 нс (собственный полупроводник  $i$ - типа) до 0,245 нс (легированный кремний). Из данных этой работы следовало также, что различие в  $\tau_1$  практически не наблюдалось между кремнием  $n$ - и  $p$ - типов. Кроме того величины  $\tau_1$  в пределах экспериментальной погрешности совпадали для кристаллов кремния, полученных методом зонной плавки и по методу Чохральского. Величины времен жизни в кремнии с собственной проводимостью (как для метода безтигельной зонной плавки, так и для метода Чохральского) были меньшими, чем в легированных образцах. Это изменение в величинах  $\tau_1$  равно примерно  $6 \pm 9$  % и лежит за пределами экспериментальной погрешности (порядка 2 %).

Этот факт говорит о том, что мелкие примесные центры донорного или акцепторного типа в полупроводниках, являющихся «поставщиками» электронов в зоне проводимости или дырок в валентной зоне, при достаточно высоких концентрациях оказывают существенное влияние на аннигиляционные временные спектры, а следовательно и на свойства квазипозитронных и квазипозитрониевых состояний [1-3]. Поэтому представляет интерес рассмотреть вопрос о процессах взаимодействия квазипозитронов ( $e^+$ ) и квази- $Ps$  [1-3,5] ( $Ps$  - химический символ атома позитрония [6]) с носителями и другими системами в полупроводниках и основные свойства образующихся квазипозитронных и квазипозитрониевых состояний.

Рассмотрим два предельных случая. Первый, когда тепловая энергия позитрона  $kT \gg E_{D,A}$ , где  $E_{D,A}$  - энергия ионизации мелких доноров ( $D$ ) либо мелких акцепторов ( $A$ ),  $k$  - постоянная Больцмана,  $T$  - температура. Рассмотрим процессы, в которых участвуют свободные термализованные позитроны и квази- $Ps$  в этом случае.

В этом случае свободные квазипозитроны естественно взаимодействуют с валентными электронами и свободными носителями (электронами в полупроводниках  $n$ - типа и дырками в полупроводниках  $p$ - типа): а)  $[e^+] + [e^-] \rightarrow Ps$ ; б)  $[e^+] + [e^-] \rightarrow 2\gamma$  (двухквантовая аннигиляция при столкновениях квазичастиц) и в) процесс «*pick - off*» - аннигиляции квази- $Ps$  на валентных электронах, рассмотренный в [7-9].

Сечения процессов образования квази- $Ps$  и аннигиляции позитронов при столкновениях со свободными электронами можно оценить по методу работы [10]. Например, при энергии позитрона равной 13,6 эВ вероятность образования квази- $Ps$  уже в 43 раза больше вероятности аннигиляции при свободных столкновениях. В свою очередь оценки [1] показали, что сечение образования квази- $Ps$  и сечение аннигиляции на валентных электронах также сопоставимы с результатами [10].

В полупроводниках  $p$ - типа возможен процесс взаимодействия квазипозитрона с дырками  $h$  в валентной зоне, причем взаимодействие этих квазичастиц естественно будет сводиться лишь к упругому рассеянию.

В полупроводниках  $n$ - типа квази- $Ps$  может участвовать в следующих основных процессах: а)  $[Ps]_{s,t} + e^- (\uparrow) \leftrightarrow [Ps]_{t,s} + e^- (\downarrow)$  (орто-пара конверсия квази- $Ps$ , рассмотренная в [11]); б)  $[Ps] + e^- \rightarrow [Pse^-]$  (отрицательный ион квази- $Ps$ , существование и свойства которого были впервые предсказаны Уилером [12]); в)  $[Ps]_{s,t} + e^- \rightarrow 2\gamma + e^-$  (процесс «*pick - off*» - аннигиляции квази- $Ps$  на свободных носителях и валентных электронах).

В полупроводниках  $p$ - типа возможно также следующих процессов: а)  $[Ps] + h \rightarrow [Psh]$  (своеобразный комплекс Уиллера [12], состоящий из электрона, позитрона и дырки); б)  $[Ps]_{s,t} + h (\uparrow) \leftrightarrow [Ps]_{t,s} + h (\downarrow)$ . Вопрос орто-пара-конверсии  $Ps$  на дырках здесь не рассматривается в силу принципа тождественности этих квазичастиц (позитрона и дырки) в кристалле. Действительно, заряд позитрона и дырки одинаков, но эффективные скалярные массы не равны. Интересно отметить, что в образцах  $p$ - типа возможен процесс «оптической аннигиляции  $Ps$  по схеме: в)  $[Ps] + h \rightarrow$  оптические кванты  $+e^+$  и  $\gamma$ ). Однако, по-видимому, вероятность этого процесса очень мала по сравнению с процессом «*pick - off*» - аннигиляции квази- $Ps$  на свободных носителях и валентных электронах кристалла.

Существование комплексов Уилера  $[Pse^-]$  и  $[Psh]$  при комнатных температурах вполне реально, ибо энергии их связей составляют величины порядка несколько десятых долей эВ [12]. Их времена жизни в отношении аннигиляционного распада с учетом процесса «*pick – off*» - аннигиляции близки короткому времени жизни  $\tau_1$ , наблюдаемому в полупроводниках [1-3].

В другом предельном случае  $kT \ll E_{D,A}$  в полупроводниках *n*- и *p*- типа наряду с процессами рассеяния, «*pick – off*» - аннигиляции и орто-пара конверсии возможные процессы захвата квазипозитронов и квази-*Ps* нейтральными и заряженными донорными и акцепторными состояниями с образованием сложных комплексов Уилера:  $[A^- e^+]$ ,  $[D^+ - Ps]$ ,  $[A^- - Ps]$ ,  $[D^0 - Ps]$  и  $[A^0 - Ps]$ , где  $[A]$  - символ акцептора, а  $[D]$  - донора.

Таким образом, все квазипозитронные и квазипозитрониевые состояния, а также комплексы Уилера могут быть разбиты на две основные группы: а) делокализованные состояния и б) локализованные состояния. В табл.1 приведена условная классификация этих состояний и их аналоги, как это, например, было сделано Лампертом [13] для комплексов, включающих в свой состав электрон ( $e^-$ ) дырки ( $h$ ) и экситоны  $Ex$ .

Изложим ниже основные положения теории позитронных состояний в дефектных кристаллах полупроводников. Вначале рассмотрим полупроводники с мелкими примесными центрами с достаточно идеальной кристаллической решеткой (т.е. реальные полупроводники) [1-3, 5, 14-16]. В таких полупроводниках наибольший интерес представляет взаимодействие позитронов  $e^+$  и атома *Ps* со свободными носителями, локализованными и делокализованными комплексами, такими как нейтральные доноры  $D^0$ ; акцепторы  $A^0$ ; экситоны  $Ex$ ; заряженные доноры  $D^+$  и акцепторы  $A^-$ ; ионы экситона  $Ex^-$ ; биэкситоны  $Ex_2$ ;  $Ex$ , связанные с  $D^0$ ,  $A^0$ ,  $D^+$ ,  $A^-$  и т.д. В этом случае могут образовываться довольно своеобразные комплексы Уилера [2, 17], включающие в свой состав  $e^+$  и *Ps*. Из аннигиляционных характеристик таких комплексов также можно, в принципе, получить полезную информацию об электронно-дырочных комплексах в полупроводниках. Приведем основные сведения о делокализованных комплексах Уилера [2, 17].

*Комплексы  $[Pse^-]$  и  $[Psh]$ .* Заметим, что  $e^-$  и  $h$  - символы носителей - электронов и дырок в полупроводниках соответственно. Для оценок свойств этих комплексов можно принять, что  $m_p = m_n$ , т.е.  $m_p/m_n = 1$ . Здесь и далее  $m_n, m_p, m_h$  - эффективные массы электрона, позитрона и дырки соответственно. Расчеты дают [5,13] для системы  $[Pse^-]$  энергию диссоциации относительно распада на  $e^-$  и *Ps*  $D_0 = 0,04$  эВ. Время жизни этого комплекса относительно двухквантового аннигиляционного распада по оценкам [1-3] составляет величину  $5 \cdot 10^{-10}$  с. Для комплекса  $[Psh]$  могут встретиться случаи: а)  $m_h/m_n \gg 1$  и  $m_h \gg m_p$  (эта система похожа по своим свойствам на квазиатомную систему атом водорода плюс позитрон ( $He^+$ ) [15]; энергия диссоциации такой системы составляет величину  $\leq 0,1$  эВ); б)  $m_h/m_n \ll 1$  и  $m_h/m_p \ll 1$  (в этом случае можно рассматривать движение легкой дырки в поле неподвижного диполя конечной длины [18-20]; энергия диссоциации такой системы не превышает величину нескольких сотых долей электрон-вольта). Вероятнее всего в обоих случаях время жизни комплекса  $[Psh]$  относительно самоаннигиляции не превышает величину порядка  $5 \cdot 10^{-10}$  с [15].

*Комплексы Уилера  $[Ps - Ex]$ ,  $[Ps - Ex^\pm]$ ,  $[Psh - Ex]$ ,  $[Pse^- - Ex]$ ,  $[Psh - Ex^\pm]$  и  $[Pse^- - Ex^\pm]$ .* Существование комплексов Уилера такого типа возможно в интервале температур  $1 \div 4$  К в полупроводниках *n*- и *p*-типа (*Ge, Si, GaAs, CdS* и др.) с высокой концентрацией экситонов. Система  $[Ps - Ex]$  является аналогом как молекулы ( $Ps_2$ ) [17,21,22], так и биэкситона  $[Ex_2]$  (см., например, [23-25]). В простейшем приближении  $m_p = m_h = m_n$ . Этот комплекс можно рассматривать как модель из атомов *Ps*, в которой каждый атом действует, как электрический диполь конечной длины, что приводит к притяжению между диполями [21]. В этом приближении энергия связи такой системы составляет величину 0,55 эВ, а межатомное рас-

стояние -  $14,2 \text{ \AA}$ . Вариационные расчеты по Оре [26], Хиллерасу и Оре [27] дают энергии связи 0,135 и 0,11 эВ соответственно, а Шармы [22] – 0,948 эВ. Заметим, что время жизни комплекса относительно самоаннигиляции в этом случае также не должно превышать величину порядка 0,5 нс [1]. Таким образом, в этом приближении можно с полной уверенностью говорить о возможности существования комплекса [Ps – Ex] в полупроводниках (по аналогии с работой [23] для случая  $m_p = m_h = m_n$ ).

Рассмотрим некоторые другие случаи, которые могут встретиться для условий существования комплексов [Ps – Ex]. Это случай  $m_h \sim m_p$  и  $m_h \gg m_n$ ,  $m_p \gg m_n$ . Такого рода системы ближе по своим свойствам к молекуле водорода  $H_2$ . В другом предельном случае  $m_n \gg m_h$  и  $m_n \gg m_p$  имеем аналогию с молекулой антиводорода  $\bar{H}_2$ . Ее характеристики примерно такие же, как и молекулы  $H_2$ . Общий случай  $m_h \neq m_p \neq m_n$  для комплекса [Ps – Ex] может быть рассмотрен вариационным методом, как это делалось для  $Ex_2$  [24,25]. Расчеты экситонных молекул для случаев анизотропных "легких" электронных масс  $m_n$  и "тяжелых" дырок с анизотропной эффективной массой  $m_h$  показали возможность существования этих молекул, а следовательно, по аналогии с ними комплексов Уилера [Ps – Ex] для различных величин  $m_n$ ,  $m_p$  и  $m_h$ .

Приведем основные результаты для комплексов Уилера [Ps – Ex]. Имея значения общей энергии системы  $E$  для различных значений  $\sigma = m_n / m_p = m_n / m_h$ , дадим общий анализ процессов связывания и распада комплексов Уилера этого типа. В частности, энергия связи комплекса [Ps – Ex] в отношении распада на Ps и Ex будет равна

$$E_{[Ps-Ex]} = -E - E_{Ps} - E_{Ex} = -E - 2E_{Ex}, \quad (1)$$

где  $E_{Ps} = E_{Ex} = (1/2)(1 + \sigma)$  – энергия связи атома позитрония и экситона.

Расчеты энергий связи комплексов Уилера [Ps – Ex $^\pm$ ], [Psh – Ex], [Pse $^-$  – Ex], [Psh – Ex $^\pm$ ] и [Pse $^-$  – Ex $^\pm$ ] еще более сложны по сравнению с расчетами комплексов [Ps – Ex]. Однако асимптотические случаи  $m_p/m_n \gg 1$  и  $m_h/m_n \gg 1$  либо, наоборот,  $m_n/m_h \gg 1$  и  $m_n/m_p \gg 1$  показывают, что такие образования можно рассматривать как квазимолекулярные системы, подобные  $H_2^-$ ,  $H_2^+$ ,  $H_2^{2-}$ ,  $H_2^{2+}$ . Сопоставление свойств таких квазимолекулярных систем с обычными молекулярными ионами дает основание полагать, что в некоторых случаях такие системы могут быть динамически стабильными. Далее рассмотрим некоторые локализованные комплексы в полупроводниках, включающие в свой состав позитроны и атом Ps.

*Мелкие акцепторные позитронные состояния.* Позитроны при низких температурах могут захватываться на мелкие акцепторные уровни. Такого рода состояния обычно рассматриваются в приближении метода эффективной массы (МЭМ) с поправками на ход потенциала в непосредственной близости от примесного центра. В этом случае энергия связи позитрона не превышает, как правило, нескольких сотых долей электрон-вольта.

*Комплексы Уилера [D $^0$  – e $^+$ ] или [D $^+$  – Ps], [A $^0$  – e $^+$ ] или [A $^-$  – Ps], [D $^0$  – Ps] и [A $^0$  – Ps].* Оценим основные параметры комплексов Уилера такого типа в приближении МЭМ. Вначале проведем оценки для случая комплексов [D $^+$  – Ps] и [A $^-$  – Ps]. Как было показано [17], энергия связи этих комплексов зависит от параметра  $\sigma = m_n/m_p$  и описывается выражением

$$E(\sigma) = E_0 \exp(-\sigma/2). \quad (2)$$

Зная экспериментальное значение  $E(0) = E(H_2) = -1,20522$  (а.е. МЭМ), можно легко построить зависимость  $E(\sigma)$  от  $\sigma$ . Полученные в экспериментах значения энергий связи систем [D $^+$  – Ex $^-$ ] для ряда полупроводников  $A^2B^6$  и  $GaAs$  расходятся в области значений энергий, вычисленных по формуле (2) для систем Уилера. При этом из оценок нижней и верхней границ энергий связи критическая величина определяется неравенством  $0,462 \leq \sigma \leq 0,576$ .

Выражение для энергий систем [D $^0$  – Ps] и [A $^0$  – Ps] в приближении МЭМ определяется следующим образом:

$$E(\sigma) = E(0) \cdot \exp(-\sigma/3). \quad (3)$$

Отсюда легко получить зависимость  $E(\sigma)$  от  $\sigma$ , если использовать экспериментальные значения  $E(0) = E(H_2) = -1,34779$  (а.е. МЭМ). Условия стабильности этого типа комплексов выражаются неравенством  $2,15 \leq \sigma_F \leq 12$ . Сопоставление расчетных значений  $E$  по формуле (4.8) и экспериментальных значений энергий для комплексов  $[D^0 - Ex]$ ,  $[A^0 - Ex]$  или  $[D^0 - Ps]$ ,  $[A^0 - Ps]$  решает положительным образом возможность их существования в полупроводниках, по крайней мере, при низких температурах. Например, в  $CdS$  при  $\sigma \approx 0,172$  энергия связи комплексов  $E(D^+ - Ps) = 32,1$  мэВ, а  $E(D^0 - Ps) = 34,9$  мэВ. Дальнейшее усложнение комплексов Уилера вида  $[Ps' - (Ex)_n]$  приводит, по существу, к необходимости расчета аннигиляции позитронов в конденсированных экситонных каплях (Л.В.Келдыш, 1971 г.) [119, 130].

Расчеты основных характеристик аннигиляционных спектров комплексов Уилера показали [2,17], что времена жизни позитронов несколько "удлиняются", а полуширины кривых УРАФ сужаются. Однако эти эффекты не столь значительны и поэтому экспериментальное наблюдение комплексов Уилера представляет собой довольно трудную задачу, так как все измерения следует проводить при температурах жидкого гелия и на установках с максимальным разрешением. Все же проблема комплексов Уилера в полупроводниках и других веществах настолько важна, что будущие эксперименты в этом направлении неизбежны.

Таблица 1 Возможные типы позитронных и позитрониевых состояний и комплексы Уилера в полупроводниках

Тип состояния	Аналоги	Возможный температурный интервал наблюдения
<b>I. Нелокализованные состояния</b>		
$[e^+]$ - квазипозитроны $[Ps](e^- e^+)$ - квазипозитроний Комплексы Уилера $[Ps]^- (e^- e^+ e^-)$ - отрицательный ион $[Ps]$ $[Psh]^- (e^+ e^- h)$ - положительный ион $[Ps]$ $[Ps - Ex], [Ps - Ex^\pm],$ $[Psh - Ex], [Pse^- - Ex],$ $[Psh - Ex^\pm], [Pse^- - Ex^\pm],$ $[Ps - (Ex)_n]$	$h$ - дырки $[Ex]$ - экситоны  Ионы $[Ex]$  Молекулы $[Ps]$ и $[Ex]$  Ионы молекул $[Ps]$ и $[Ex]$	Комнатная Комнатная и ниже  Комнатная и ниже  От комнатной до температуры жидкого гелия
<b>II. Локализованные комплексы Уилера</b>		
$[(A^-)e^+]$ $[D^+ - Ps], [A^- - Ps],$ $[D^0 - Ps], [A^0 - Ps],$	Акцепторные состояния Экситоны, связанные с заряженными и нейтральными донорами и акцепторами	От комнатной до температуры жидкого гелия

### Литература

1. Прокопьев Е.П., Кузнецов Ю.Н., Хашимов Ф.Р. Основы позитроники полупроводников. М., 1976. 343 с. - Деп. в ЦНИИ "Электроника". Р-2073. РИ.77.06.3412.
2. Прокопьев Е.П. Введение в теорию позитронных процессов в полупроводниках и ионных кристаллах. М., 1979. 384 с. - Деп. в ЦНИИ "Электроника". Р-2837. МРС ВИМИ "Техника, технология, экономика". №27. 1980. Сер."ЭР".
3. Арефьев К.П., Воробьев С.А., Прокопьев Е.П. Позитроника в радиационном материаловедении ионных структур и полупроводников. М.: Энергоатомиздат, 1983. 88 с.
4. P.Sen, C.Sen // J. Phys. 1974. Vol.C7. P.2776.
5. Е.П.Прокопьев, С.П.Тимошенко, В.И.Графутин, Г.Г.Мясищева, Ю.В.Фунтиков.

Позитроника ионных кристаллов, полупроводников и металлов. М.: Ред.-изд. отдел МИЭТ (ТУ), 1999. 176 с.

6. В.И.Гольданский. Физическая химия позитронов и позитрония. М.: Наука, 1968.
7. Прокопьев Е.П. Об аномальных свойствах атома позитрония (Ps) в ионных кристаллах и полупроводниках // Физика твердого тела. 1977. Т.19. Вып.2. С.472-475.
8. Прокопьев Е.П. Позитроний и его свойства в полупроводниках и щелочно-галогидных кристаллах // Химия высоких энергий. 1978. Т.12. Вып.2. С.172-174.
9. W.Brandt, J.Reinheimer // Phys. Rev. 1970. Vol.V8. P.3104.
10. Д.Иваненко, А.Соколов // ДАН СССР. 1978. Т.239. С.1082.
11. Варисов А.З., Кузнецов Ю.Н., Прокопьев Е.П. Почему в полупроводниках наблюдается одно короткое время жизни позитронов/ ДАН СССР. 1978. Т.239. №5. С.1082-1085.
12. J.Wheeler // Ann. N. Y. Acad. Sci, 1946. Vol,48. P.219.
13. M.A.Lampert // Phys. Rev. Lett. 1958. Vol.1, P.450.
14. Кузнецов Ю.Н., Прокопьев Е.П., Варисов А.З. Основы теории позитронных состояний в ионных кристаллах. - М., 1978. - 292 с. - Деп. в ЦНИИ "Электроника", P-2382. Сб. ВИМИ "Военная техника и экономика". Сер. общетехническая. - № 14. - 1978.
15. Варисов А.З., Арефьев К.П., Воробьев А.А., Кузнецов Ю.Н., Прокопьев Е.П. Позитроны в конденсированных средах. - М., 1977. - 489 с. - Деп. в ЦНИИ "Электроника". P-2317. Сб. ВИМИ "Военная техника и экономика". Сер. общетехническая. - № 9. - 1978.
16. Прокопьев Е.П. Исследования в области физики медленных позитронов. Позитронная аннигиляция - новый метод изучения строения вещества. - М., 1986. - 86 с. - Деп. в ЦНИИ "Электроника". P-4367. Сб. реф. НИОКР, обзоров. Сер. "ИМ". - №12. - 1987.
17. Прокопьев Е.П. Комплексы Уилера в полупроводниках. - М., 1979. - 12 с. - Деп. в ЦНИИ "Электроника". P-2757. МРС ВИМИ Техника, технология, экономика- 28. - 979.
18. В.Н.Абакумов, В.И.Перель, И.Н.Ясиевич // ФТП. 1978. Т.12. С.3.
19. В.Н.Абакумов, И.Н.Ясиевич // ЖЭТФ. 1976. Т.71. С.657.
20. В.Н.Абакумов, В.И.Перель, И.Н.Ясиевич // ЖЭТФ. 1977. Т.72. С.674.
21. G.T.Hill // NuovoCimento. 1972. Vol.10B. P.511.
22. R.R.Sharma // Phys. Rev. 1968. Vol.171. P.36.
23. J.R.Haynes // Phys. Rev. Lett. 1966. Vol.17. P.860.
24. O.Akimoto, E.Nanamura // J. Phys. Soc. Japan. 1972. Vol.33. P.1537.
25. O.Akimoto // J. Phys. Soc. Japan. 1973. Vol.35. P.973.
26. A.Ore // Univ. Bergen Arbook. №9, №12. 1949.
27. E.Hylleraas, A.Ore // 1947. Vol.71. P.493.
28. Л.В.Келдыш // УФН. 1970. Т.100. С.514.
29. Л.В.Келдыш // В сб. Экситоны в полупроводниках. М.: Наука, 1971. С.5.

## ШАЛА ӨТКІЗГІШТЕРДЕГІ УИЛЕР КОМПЛЕКСТЕРІ

Е.П. Светлов-Прокопьев

Мақалада шала өткізгіштердегі бос тасымалдаушыларымен позитрон және позитронийдің әсерлесуінің екі жағдайы қарастырылған.

## COMPLEXES OF UILERS IN SEMICONDUCTORS

E.P. Svetlov – Prokop'ev

In article two cases of interaction of positrons and positroni with free carriers in semiconductors are considered.