

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 квазипозитронные 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 τ_1 с интенсивностью I_1 , близкой к 100%. При этом отмечалось, что существенной разницы во временах жизни τ_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 τ_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 τ_1 практически не наблюдалось между кремнием n - и p - типов. Кроме того величины τ_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 τ_1 равно примерно 6 ± 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 γ). 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 τ_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 - $14,2 \overset{\circ}{\text{Å}}$. 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 Уиллера [Ps – Ex] для различных величин m_n , m_p и m_h .

Приведем основные результаты для комплексов Уиллера [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 Уиллера 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 Уиллера [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 σ . 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 σ , 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
I. Нелокализованные состояния		
$[e^+]$ - квазипозитроны	h - дырки	Комнатная
$[Ps](e^- e^+)$ - квазипозитроний	$[Ex]$ - экситоны	Комнатная и ниже
Комплексы Уилера		
$[Ps]^- (e^- e^+ e^-)$ - отрицательный ион $[Ps]$	Ионы $[Ex]$	Комнатная и ниже
$[Psh]^- (e^+ e^- h)$ - положительный ион $[Ps]$		
$[Ps - Ex], [Ps - Ex^\pm],$	Молекулы $[Ps]$ и $[Ex]$	От комнатной до температуры жидкого гелия
$[Psh - Ex], [Pse^- - Ex],$	Ионы молекул $[Ps]$ и $[Ex]$	
$[Psh - Ex^\pm], [Pse^- - Ex^\pm],$		
$[Ps - (Ex)_n]$		
II. Локализованные комплексы Уилера		
$[(A^-)e^+]$	Акцепторные состояния	От комнатной до температуры жидкого гелия
$[D^+ - Ps], [A^- - Ps],$	Экситоны, связанные с заряженными и нейтральными донорами и акцепторами	
$[D^0 - Ps], [A^0 - Ps],$		

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", Р-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". Р-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". Р-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". Р-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.Hanamura // 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.