

КОГЕРЕНТНЫЙ ЭФФЕКТ ДЛЯ ФОТОРОЖДЕНИЯ СИММЕТРИЧНЫХ e^+e^- -ПАР В КРИСТАЛЛАХ ГЕРМАНИЯ И КРЕМНИЯ

М.Ю.Андреяшкин, А.Ю.Басай, С.А.Воробьев, В.Н.Забавев, Б.Н.Калинин,
Ю.П.Кунашненко, Ю.Л.Пивоваров

Научно-исследовательский институт ядерной физики Томского политехнического
института
634050, Томск

Поступила в редакцию 22 августа 1991 г.

После переработки 28 февраля 1992 г.

Экспериментально доказано существование когерентного эффекта типа Б для фоторождения симметричных e^+e^- -пар в $\langle 111 \rangle$ кристалле германия и $\langle 100 \rangle$ кремния.

Когерентные эффекты типа Б (импульс фотона \vec{k} параллелен кристаллографической оси) для фоторождения e^+e^- -пар в кристаллах заключаются, как предсказано в ^{1,2}, в появлении своеобразной структуры (когерентных максимумов) в зависимости выхода пар от энергии фотона ω . Когерентные максимумы для фоторождения e^+e^- -пар возникают при совпадении переданного кристаллу импульса \vec{q} с одним из векторов обратной решетки \vec{g} . Это является общим для многих процессов следствием суммирования амплитуд процесса по всем атомам кристалла с учетом периодичности их расположения.

Обсудим кратко кинематику процесса. Для исследуемого процесса фоторождения симметричных пар (энергии электрона и позитрона равны), можно записать

$$\omega = \sqrt{\vec{p}_+^2 + m^2} + \sqrt{\vec{p}_-^2 + m^2} = 2\sqrt{\vec{p}^2 + m^2} \quad (1)$$

$$\vec{q} = \vec{k} - (\vec{p}_+ + \vec{p}_-) = \vec{g} \quad (2)$$

где m - масса покоя электрона (позитрона) и $\vec{p}_+(\vec{p}_-)$ - импульсы электрона (позитрона) и $p = |\vec{p}_+| = |\vec{p}_-|$. Как следует из (2), минимальная энергия для возникновения когерентного эффекта будет при $\vec{p}_- = \vec{p}_+ = \vec{p}$. Подставляя значение $\vec{p} = (\vec{k} - \vec{g})/2$ из (2) в равенство (1), с учетом $\vec{k} = \omega\vec{n}$, получаем

$$\omega = \sqrt{(\vec{k} - \vec{g}) + 4m^2} + \sqrt{(\omega - g_{\parallel})^2 + g_{\perp}^2 + 4m^2} \quad (3)$$

где $\vec{g} = (g_{\parallel}, g_{\perp})$ и $g_{\perp} = 0$ (эффект типа Б) следует, что когерентные максимумы для процесса фоторождения типа Б симметричных пар возникают при энергиях фотонов

$$\omega = \omega_n = \frac{4m^2 + g_{\parallel}^2}{2(g_{\parallel})}, \quad g_{\parallel} = g_n = \frac{2\pi n}{a}, \quad n = 1, 2, \dots, \quad (4)$$

где a - период решетки кристалла. Дополнительным условием является отличие от нуля (для данного g_n) структурного фактора. Поскольку величина n ограничена сверху ($n \leq 8$) из-за фактора Дебая-Валлера (тепловых колебаний атомов кристалла), то $g_n \ll m$ и возникает простая формула для положения когерентных максимумов:

$$\omega = \omega_n \simeq \frac{m^2 a}{\pi n}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (5)$$

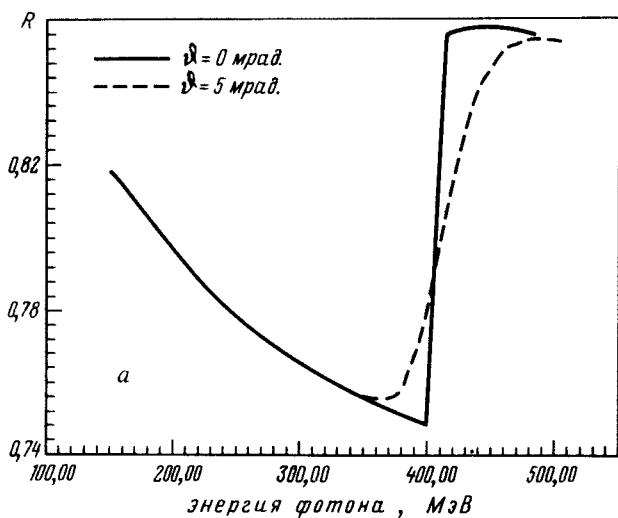
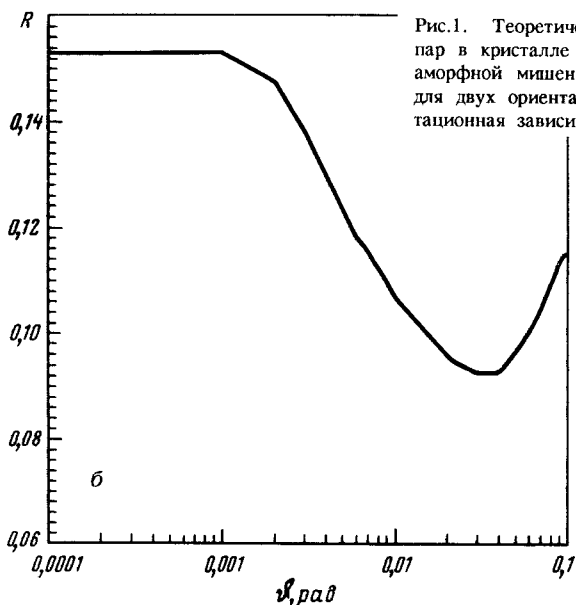


Рис.1. Теоретическое отношение сечений фоторождения пар в кристалле Ge ($T = 273 \text{ К}$, $Z = 32$, $a = 5,66 \text{ \AA}$) и в аморфной мишени: *a* - зависимость от энергии фотона для двух ориентаций $\vartheta = 0 \text{ мрад}$ и $\vartheta = 5 \text{ мрад}$; *б* - ориентационная зависимость для энергии фотона $\omega = 430 \text{ МэВ}$



На рис.1*a* приведена зависимость отношения сечений когерентного фоторождения симметричных пар типа Б в кристалле германия к сечению в аморфной мишени, рассчитанная по стандартным формулам когерентного фоторождения пар³. Положение максимумов хорошо описывается формулой (5). На рис.1*б* - ориентационная зависимость этого же отношения, откуда следует, что когерентный эффект типа Б для фоторождения e^+e^- -пар в кристалле можно наблюдать до углов разориентаций фотонов с осью порядка $\vartheta \sim 100 \text{ мрад}$.

На рис.2 представлена схема эксперимента. Электроны ускорялись в Томском синхротроне до энергии $E = 900 \text{ МэВ}$, сбрасывались на аморфную мишень (АК) Та, толщиной $0,18 \text{ мм}$. Пучок тормозного излучения после прохождения коллиматоров (К1 К2) с апертурой $0,2 \times 0,2 \text{ мрад}$ попадал на монокристалл (КК). Кристалл закреплялся в двухкоординатном гониометре (Г) между полюсами парного магнитного спектрометра СП-57. Образованные пары регистрировались сцинтилляционными счетчиками (С), результаты подавались

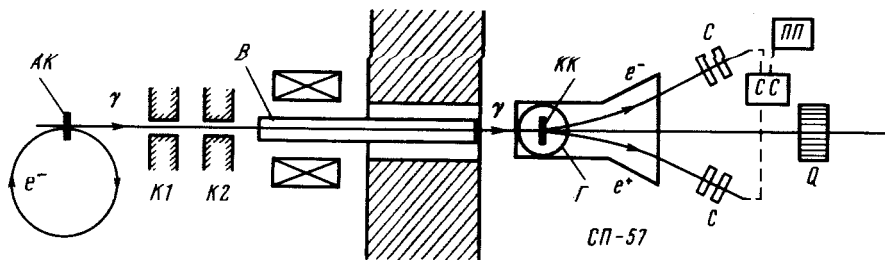


Рис.2. Схема экспериментальной установки

на пересчетный прибор (ПП). Мониторинг осуществлялся квантометром (Q). Точность ориентации кристалла составляла порядка $5 \cdot 10^{-3}$ рад. Энергетический диапазон регистрации гамма квантов $\omega = 40 \div 900$ МэВ. Энергетическое разрешение было не хуже 2%. Процедура ориентации мишени и измерения выходов e^+e^- -пар была автоматизирована. Установка обеспечивала счет порядка 50 симметричных пар в секунду при токе электронного пучка $I = 10^{10}$ электрон/с.

Для наблюдения эффекта были выбраны кристаллы Ge (толщиной 0,18 мм) и Si (толщиной 0,35 мм) ориентированные осями $\langle 111 \rangle$ и $\langle 100 \rangle$, соответственно. Энергетический диапазон вблизи теоретических пиков $\omega \simeq 430$ МэВ для Ge и $\omega \simeq 250$ МэВ обеспечивал высокую (98%) эффективность работы парного магнитного спектрометра.

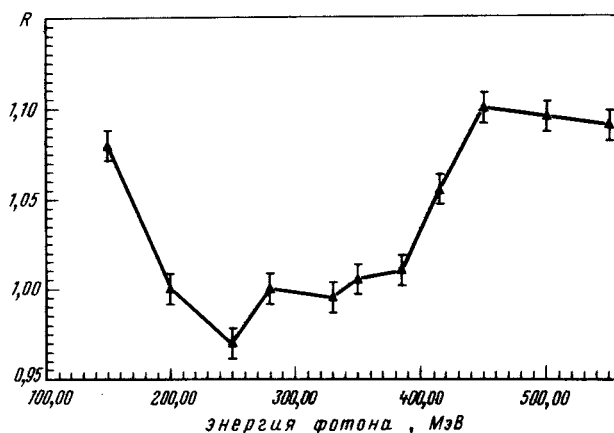


Рис.3. Экспериментально измеренное отношение выхода пар равной энергии в ориентированном осью $\langle 111 \rangle$ кристалле Ge к выходу в разориентированном кристалле, в зависимости от энергии падающего фотона

Для кристалла Ge на рис.3 представлено экспериментально измеренное отношение выхода пар равной энергии в ориентированном кристалле и в разориентированном кристалле в зависимости от энергии фотона. Поведение кривой на рис.3 согласуется с результатами расчетов (рис.1а) с учетом точности ориентации мишени. Результаты эксперимента позволяют сделать

статистически обоснованный вывод об экспериментальном подтверждении существования когерентного эффекта типа Б для фоторождения симметричных пар в $\langle 111 \rangle$ Ge. Положение максимума в районе $\omega \simeq 430$ МэВ согласуется с формулой (4) с учетом того, что для $\langle 111 \rangle$ оси Ge $a = 5,66 \text{ \AA}$, а структурный фактор этой оси запрещает максимумы с $n = 2l$, $l = 1, 3, 5, \dots$

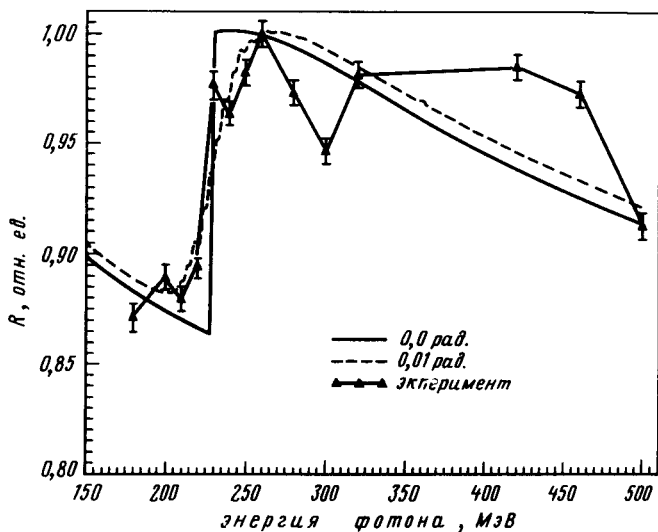


Рис.4. Экспериментально измеренный и теоретически рассчитанный выход пар равной энергии в ориентированном осью $\langle 100 \rangle$ кристалле Si ($T = 273 \text{ К}$, $Z = 14$, $a = 5,43 \text{ \AA}$) в зависимости от энергии падающего фотона. Кривые нормированы на максимум. Теоретические кривые представлены для двух ориентаций $\vartheta = 0$ мрад и $\vartheta = 10$ мрад

Данные эксперимента и теории для кристалла Si представлены на рис.4, где представлена зависимость выхода симметричных e^+e^- -пар для фоторождения на $\langle 100 \rangle$ оси Si от энергии фотона (кривые нормированы на максимум). В выходе пар наблюдается максимум (относительная величина $\sim 12\%$) вблизи $\omega \simeq 250$ МэВ, (расчетное значение по формуле (4), $\omega \simeq 240$ МэВ), что также согласуется с предсказаниями теории ^{1,2} относительно величины и положения максимума.

Следует указать на то, что процедура ориентации монокристалла на пучке тормозного излучения является довольно трудоемкой. Поэтому на первом этапе измерений мы ограничились ориентацией оси с точностью $\vartheta \sim 5 \cdot 10^{-3}$ рад. Это не позволило исследовать влияние каналирования на этот процесс (критический угол каналирования Φ для e^+ - и e^- -пар с энергиями 225 МэВ в $\langle 111 \rangle$ Ge МэВ и 125 в $\langle 100 \rangle$ Si порядка 1 мрад). Влияние взаимодействия e^+ - и e^- -пар в конечном состоянии с осями кристалла, как указывалось в ¹, может изменить положение, величину и форму когерентных пиков (5), что возможно и наблюдается на рис.4.

В дальнейшем представляет также интерес экспериментальное исследование процесса когерентного фоторождения e^+e^- -пар в кинематике позитрония ($\vec{p}^+ = \vec{p}^-$), когда резонансные эффекты проявятся более ярко ⁴, а также исследование фоторождения несимметричных пар: в последнем случае, как показывают расчеты, максимумы должны сместиться в область более высоких энергий.

Ранее экспериментальное указание на существование эффекта когерентного фоторождения e^+e^- -пар было получено в ⁵, при измерении полного выхода

пар.

Авторы выражают благодарность N.Cue за обсуждения и А.П.Потылицыну за полезные обсуждения и помощь в работе.

-
1. N.Cue and J.C.Kimball, Phys. Lett. A **57**, 1935 (1986).
 2. С.М.Дарбинян и др., Препринт ЕФИ-1007(58)-87, 1987.
 3. М.А.Тер-Микаэлян, Влияние среды на электромагнитные процессы при высоких энергиях. Ереван: Изд. АН Арм.ССР, 1969.
 4. Ю.П.Кунашенко, Ю.Л.Пивоваров, ЯФ **51**, 627 (1990).
 5. Р.О.Авакян и др., Письма в ЖЭТФ **51**, 349 (1990).