

## Аннигиляция позитронов в поликристаллических металлах

© В.И. Графутин, В.Л. Гришкин, Г.Г. Мясичева, Ю.А. Новиков\*, Ю.В. Фунтиков

Институт теоретической и экспериментальной физики Российской академии наук,  
101000 Москва, Россия

\* Институт общей физики Российской академии наук,  
117942 Москва, Россия

(Поступила в Редакцию 8 августа 1997 г.  
В окончательной редакции 18 ноября 1997 г.)

На образцах магния, алюминия, меди, цинка, индия, свинца и висмута проведена проверка обнаруженной ранее эмпирической закономерности  $\theta_p^6/I_p = aK$ , где  $\theta_p$  — граничный угол параболической компоненты угловых распределений аннигиляционных фотонов в металлах,  $I_p$  — интегральный вклад этой компоненты,  $K = 1, 2, 3, \dots$  — целая величина,  $a$  — константа, не зависящая от вида металла. Получено подтверждение существования этой закономерности. Определенно значение безразмерной константы  $a$ , которое в пределах ошибок совпало с предыдущим измерением. Показано, что значение величины  $K$  для одного и того же металла, но разных образцов может быть разным. Делается предположение, что это связано с разной дефектностью образцов.

Метод аннигиляции позитронов получил широкое распространение благодаря простоте интерпретации получаемой информации. Так, при измерении угловых распределений аннигиляционных фотонов (УРАФ) [1,2] удается определить распределение электронов по импульсам в твердом теле. В случае использования экспериментальной установки, реализующей параллельно-щелевую геометрию регистрации аннигиляционных фотонов, импульсная плотность электронов  $n_e$  связана с УРАФ исследуемого вещества  $f(\theta)$  выражением

$$f(\theta) = A_\theta \int_{p_z - \frac{1}{2}\Delta p_z}^{p_z + \frac{1}{2}\Delta p_z} dp_z \int_{-\Delta p_y}^{+\Delta p_y} dp_y \int_{-\infty}^{+\infty} n_e(p_x, p_y, p_z) dp_x, \quad (1)$$

где  $A_\theta$  — нормировочная константа,  $\Delta p_y, \Delta p_z$  — разрешения установки по проекции импульса электрона  $p_y$  и  $p_z$ , удовлетворяющие условиям  $\Delta p_y \gg 2p_{\max}$ ,  $\Delta p_z \ll p_{\max}$ ,  $p_{\max}$  — максимальная величина импульса электрона в веществе,  $\theta$  — отклонение угла разлета аннигиляционных фотонов от  $180^\circ$ ,  $p_z = \theta mc$ ,  $m$  — эффективная масса электрона в твердом теле,  $c$  — скорость света. Поэтому при исследовании изотропных веществ импульсную плотность электронов ( $z$ -компоненту) можно определить по экспериментальным данным УРАФ

$$n_e(p_z) = \frac{A_\theta}{\theta} \frac{df(\theta)}{d\theta}. \quad (2)$$

Наиболее удобно это проиллюстрировать на примере аннигиляции позитронов в поликристаллических металлах, в которых отсутствуют (усреднены) эффекты анизотропии электронного распределения.

В металлах [3] электроны разделяются на две группы: электроны проводимости (свободные электроны) и электроны, входящие в состав остовов атомов (связанные электроны). Электроны проводимости имеют импульс-

ное распределение

$$n_e(p) = \left[ \exp\left(\frac{p^2/2m - \varepsilon_F}{k_B T}\right) + 1 \right]^{-1}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_F$  — энергия Ферми,  $k_B$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура. При низких температурах

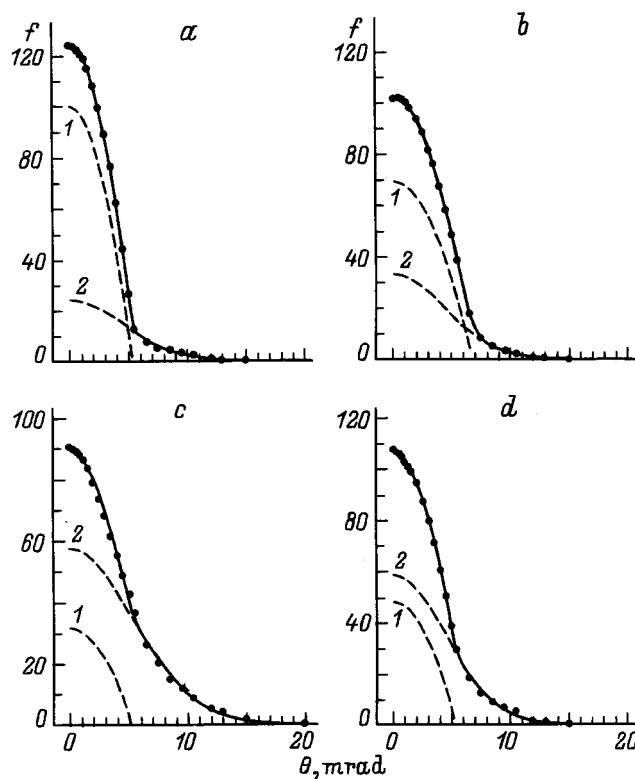


Рис. 1. Угловые распределения аннигиляционных фотонов в образцах магния (а), алюминия (б), меди (с) и индия (д). Штриховые линии соответствуют их разложению на параболическую (1) и гауссовскую (2) компоненты. Сплошная линия — сумма этих компонент.

**Таблица 1.** Удельное число свободных электронов  $Z_c$  и энергии Ферми  $\varepsilon_F$  исследованных металлов

Металл	Теория		Эксперимент	
	$Z_c$	$\varepsilon_F, \text{eV}$	$Z_c \pm \Delta Z_c$	$\varepsilon_F \pm \Delta \varepsilon_F, \text{eV}$
Mg	2	7.12	$2.107 \pm 0.012$	$7.37 \pm 0.03$
Al	3	11.66	$3.10 \pm 0.02$	$11.92 \pm 0.05$
			$2.98 \pm 0.02$ [4]	$11.60 \pm 0.05$ [4]
Cu	1	7.01	$1.01 \pm 0.03$	$7.04 \pm 0.12$
			$1.20 \pm 0.02$ [4]	$8.92 \pm 0.12$ [4]
Zn	2	9.40	$1.76 \pm 0.02$	$8.62 \pm 0.08$
In	3	8.62	$2.45 \pm 0.04$	$7.53 \pm 0.07$
Sn	4	10.22	$3.56 \pm 0.06$	$9.44 \pm 0.11$
Pb	4	9.45	$2.77 \pm 0.07$	$7.40 \pm 0.13$
Bi	5	9.89	$4.18 \pm 0.07$	$8.77 \pm 0.09$

это распределение близко к прямоугольному. Поэтому в УРАФ  $f(\theta)$  поликристаллических металлов должна наблюдаться параболическая составляющая

$$f_p(\theta) = \begin{cases} (3I_p/4\theta_p^3) (\theta_p^2 - \theta^2) & |\theta| \leq \theta_p, \\ 0, & |\theta| > \theta_p. \end{cases} \quad (4)$$

Она действительно хорошо видна в УРАФ всех металлов даже при комнатной температуре. На рис. 1 приведены УРАФ некоторых поликристаллических металлов, исследованных в настоящей работе. Оставшаяся после вычитания параболы зависимость  $f_g(\theta)$  обычно достаточно хорошо описывается гауссовской кривой

$$f_g(\theta) = (I_g/\sqrt{2\pi}\theta_g) \exp(-\theta^2/2\theta_g^2). \quad (5)$$

Поэтому УРАФ поликристаллических и аморфных металлов описываются суммой параболической и гауссовой кривых  $f(\theta) = f_p(\theta) + f_g(\theta)$ . При этом в силу нормировки УРАФ металла  $\int_{-\pi/2}^{\pi/2} f(\theta)d\theta = 1$  выполняется соотношение  $I_p + I_g = 1$ , связывающее относительные вклады параболической и гауссовской компонент.

Используя параметр  $\theta_p$ , определяемый из эксперимента, можно получить импульс Ферми данного металла  $p_F = \theta_p mc$ , энергию Ферми

$$\varepsilon_F = \theta_p^2 \frac{mc^2}{2} \quad (6)$$

и удельное число свободных электронов (число электронов проводимости, приходящихся на один атом металла)

$$Z_c = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{mc}{h}\right)^3 \frac{A}{\rho N_A} \theta_p^3. \quad (7)$$

Здесь  $N_A$  — число Авогадро,  $A$  — атомный вес,  $\rho$  — плотность вещества,  $h$  — постоянная Планка.

Необходимо отметить, что, согласно современным представлениям, удельное число электронов проводимости определяется номером группы периодической системы элементов, а энергия Ферми является константой

вещества

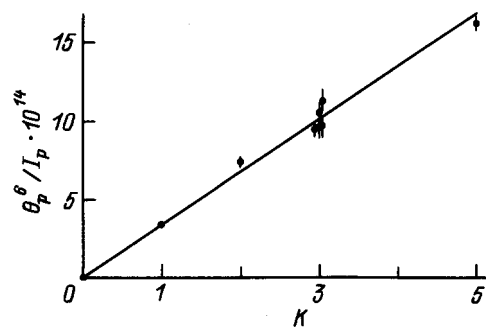
$$\varepsilon_F = \frac{h^2}{8m} \left(\frac{3}{\pi} \frac{N_A}{A} \rho Z_c\right)^{2/3}. \quad (8)$$

Однако эксперименты показали, что энергия Ферми, определенная из опыта, и ее теоретическое значение (8) сильно различаются. Кроме того, удельное число свободных электронов меняется от образца к образцу. Обычно это объясняют тем, что часть электронов (и позитронов) захватывается в дефектах металлов и не вносит вклада в параболическую компоненту УРАФ. Это объяснение вполне разумно и не вызывает возражений. В табл. 1 приведены значения  $Z_c$  и  $\varepsilon_F$  для металлов, исследованных в настоящей работе.

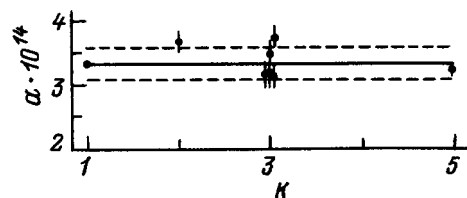
Недавно в [4] была обнаружена новая закономерность аннигиляции позитронов в поликристаллических металлах. Она заключается в том, что из параметров параболической компоненты, определяемых из эксперимента, можно составить выражение, которое квантуется

$$\theta_p^6 / I_p = aK, \quad (9)$$

где  $K = 1, 2, 3, \dots$  — целые числа,  $a$  — параметр, не зависящий от вида металла. В [4] было высказано предположение, что именно величина  $K$ , а не  $Z_c$  определяет удельное число свободных электронов в металле. В настоящей работе была предпринята попытка проверить правильность закономерности (9) на другой установке и с другими образцами металлов.



**Рис. 2.** Зависимость (9) для исследованных металлов. Прямая линия соответствует величине  $a = 3.3 \cdot 10^{-14}$ . Экспериментальные точки при  $K = 3$  для наглядности сдвинуты относительно своего истинного положения.



**Рис. 3.** Значения параметра  $a$  при разных  $K$ . Экспериментальные точки при  $K = 3$  для наглядности сдвинуты относительно своего истинного положения. Сплошная линия соответствует среднему значению, а штриховые ограничивают интервал погрешностей.

**Таблица 2.** Параметры разложения УРАФ исследованных металлов на параболическую и гауссовскую компоненты

Металл	Парабола		Гауссиан	
	$\theta_p$ , mrad	$I_p$ , %	$\theta_g$ , mrad	$I_g$ , %
Mg	$5.370 \pm 0.010$	$71.7 \pm 0.5$	$4.63 \pm 0.05$	$28.0 \pm 0.5$
Al	$6.830 \pm 0.015$	$62.9 \pm 1.3$	$4.36 \pm 0.05$	$36.6 \pm 1.3$
	$6.738 \pm 0.015$ [4]	$85.1 \pm 0.6$ [4]	$6.4 \pm 0.4$ [4]	$14.9 \pm 2.4$ [4]
Cu	$5.25 \pm 0.04$	$22.0 \pm 0.8$	$5.36 \pm 0.04$	$77.2 \pm 0.8$
	$5.566 \pm 0.025$ [4]	$38.4 \pm 0.9$ [4]	$6.31 \pm 0.16$ [4]	$59 \pm 5$ [4]
Zn	$5.81 \pm 0.03$	$34.0 \pm 1.3$	$4.64 \pm 0.04$	$65.7 \pm 1.3$
In	$5.43 \pm 0.03$	$34.7 \pm 0.9$	$4.43 \pm 0.03$	$65.0 \pm 0.9$
Sn	$6.08 \pm 0.03$	$53.6 \pm 2.1$	$4.77 \pm 0.11$	$45.8 \pm 2.0$
Pb	$5.38 \pm 0.05$	$25.2 \pm 1.4$	$4.23 \pm 0.04$	$74.6 \pm 1.4$
Bi	$5.86 \pm 0.03$	$38.3 \pm 1.8$	$4.33 \pm 0.05$	$61.1 \pm 1.8$

Измерения УРАФ проводились на установке Института теоретической и экспериментальной физики, реализующей параллельно-щелевую геометрию регистрации аннигиляционных фотонов. Установка прошла модернизацию, заключающуюся в автоматизации эксперимента и регистрации загрузок обоих детекторов одновременно с регистрацией совпадений [2], что позволяет вводить поправки в кривые УРАФ, обусловленные поглощением фотонов в исследуемом образце. Источником позитронов служил радиоактивный изотоп  $^{22}\text{Na}$  активностью 100 мКи. Число совпадений в максимуме составило  $\sim 20\,000$ . Исследуемые образцы размером  $\sim 10 \times 20 \times 10$  мм были вырезаны из целых кусков металла и не подвергались никаким обработкам. Для исследования были выбраны Mg, Al, Cu, Zn, In, Sn, Pb и Bi. Два металла из этого списка (Al и Cu) были изучены в [4], но тогда исследовались другие образцы.

На рис. 1 для примера показаны измеренные УРАФ в магнии, алюминии, меди и индии и их разложения на параболическую и гауссовскую компоненты (штриховые линии). Сплошная линия является суммой этих компонент. Она хорошо описывает эксперимент. В табл. 2 приведены параметры разложения УРАФ исследованных металлов, а также данные [4] для алюминия и меди. Обращает на себя внимание то, что значения  $\theta_p$ ,  $I_p$ ,  $\theta_g$ ,  $I_g$ , полученные в настоящей работе и взятые из [4], существенно различаются как для алюминия, так и для меди. В связи с тем что в работах использовались разные образцы металла, такие различия можно объяснить разной дефектностью образцов.

**Таблица 3.** Значения параметра  $K$  исследованных металлов

Металл	$K \pm \Delta K$	
	Настоящая работа	Данные [4]
Mg	$1.00 \pm 0.08$	
Al	$4.8 \pm 0.4$	$2.94 \pm 0.06$
Cu	$2.8 \pm 0.3$	$2.06 \pm 0.08$
Zn	$3.4 \pm 0.3$	
In	$2.2 \pm 0.2$	
Sn	$2.8 \pm 0.3$	
Pb	$2.9 \pm 0.3$	
Bi	$3.2 \pm 0.3$	

На основе данных, представленных в табл. 2, была осуществлена проверка закономерности (9), которая показана на рис. 2. Видно, что линейная зависимость  $\theta_p^6/I_p$  от  $K$  достаточно хорошо выполняется. Рис. 3 демонстрирует значения безразмерного параметра  $a$  из выражения (9), который, как это было и в [4], не зависит от вида металла. Его среднее значение  $a = (3.3 \pm 0.2) \cdot 10^{-14}$  в пределах двух суммарных ошибок совпадает со значением  $a = (3.74 \pm 0.05) \cdot 10^{-14}$ , полученным в [4].

В табл. 3 приведены значения параметра  $K$  из (9) для исследованных в настоящей работе металлов и данные [4] для алюминия и меди. Как видно из этой таблицы, все значения  $K$  в пределах ошибок являются целыми числами. При этом оказалось, что пять металлов (Cu, Zn, Sn, Pb и Bi) из восьми дают значение  $K = 3$ . Отметим, что значения  $Z_c$  для этих металлов лежат в диапазоне 1–5 (теория) и 1–4 (эксперимент).

Необходимо обратить внимание также на различные величины  $K$  для алюминия и меди, полученные на разных образцах и установках, хотя в обоих случаях значения  $K$  целые. Это указывает на то, что при изменении свойств конкретного образца металла (например, дефектности образца) может меняться величина  $K$ , оставаясь при этом всегда целым значением.

Таким образом, эксперименты, представленные в настоящей работе, подтверждают существование эмпирической закономерности (9). Однако ее физическая природа остается неясной. В связи с этим необходимо продолжить исследования аннигиляции позитронов в металлах, в том числе в металлах с разными дефектами и разной степенью дефектности.

## Список литературы

- [1] Positrons in Solids / Ed. P. Hautojarvi. Springer-Verlag, Berlin (1979). 255 p.
- [2] Ю.А. Новиков, М.К. Филимонов, В.П. Шантарович. ПТЭ, 3, 43 (1988).
- [3] С.В. Вонсовский, М.И. Кацнельсон. Квантовая физика твердого тела. Наука, М. (1983). 336 с.
- [4] Ю.А. Новиков, А.В. Раков, В.П. Шантарович. ФТТ 36, 6, 1710 (1994).