

16/II-70

Г-611

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P13 - 4848



Б.М. Головин, В.И. Никаноров, А.Ф. Писарев

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

О РЕГИСТРАЦИИ ТРЕКОВ  
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ  
В ЩЕЛОЧНО-ГАЛОИДНЫХ КРИСТАЛЛАХ

1969

P13 - 4848

Б.М. Головин, В.И. Никаноров, А.Ф. Писарев

О РЕГИСТРАЦИИ ТРЕКОВ  
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ  
В ЩЕЛОЧНО-ГАЛОИДНЫХ КРИСТАЛЛАХ

8200/2 пр

ИЗДАТЕЛЬСТВО АТОМЭНЕРГЕТИКИ  
МОСКВА

P13-4848

Головин Б.М., Никаноров В.И., Писарев А.Ф.

О регистрации треков заряженных частиц в щелочно-галогидных кристаллах

Для регистрации треков заряженных частиц в щелочно-галогидных кристаллах предлагается возбуждать и затем регистрировать люминесценцию F-центров, образованных частицами вдоль их следов.

Сообщения Объединенного института ядерных исследований  
**Дубна, 1969**

Golovin B.M., Nikanorov V.I., Pisarev A.F.

P13-4848

On the Recording Charged Particle Tracks in the  
Alkali-Halide Crystals

For the recording of charged particle tracks in the alkali-halide crystals it is suggested to excite and then to detect the luminescence of F-centers, produced by particles along their tracks.

Communications of the Joint Institute for Nuclear Research.  
**Dubna, 1969**

Одним из развивающихся в последние годы направлений ядернофизической методики являются способы регистрации треков заряженных частиц в твердых телах. Так, использование сцинтилляторов и электронно-оптических преобразователей привело к созданию сцинтилляционных камер с рабочим объемом из однородного сцинтиллятора /1,2,3/ или из пластмассовых сцинтиллирующих волокон /4,5/. Значительное развитие получили также методы регистрации следов тяжелых заряженных частиц в твердых веществах, основанные на декорировании /6,7/ и травлении /8,9/.

В настоящей работе рассмотрен новый способ обнаружения следов заряженных частиц в твердом теле - оптический метод выявления пространственного распределения в щелочно-галоидных кристаллах F-центров, образованных заряженными частицами.

Известно, что, проходя через ионные кристаллы, заряженные частицы образуют вдоль своего пути центры окраски, в частности F-центры. Так, например, протоны с энергией 350-400 Мэв создают на 1 см своего пути около 3000 F-центров в кристалле NaCl /10,11/. При тех же условиях в кристалле KCl образуется около 1000 F-центров. Устойчивость F-центров при подходящих условиях позволяет рассматривать такой кристалл как устройство, запоминающее информацию о прошедших ядерных частицах.

Для считывания накопленной информации может быть использована способность этих центров окраски во многих кристаллах люминесцировать при освещении светом с длинами волн, соответствующими полосе погло-

шения F-центров. Тот факт, что можно выбрать такие условия, при которых в процессе возбуждения и последующего люминесцентного высвечивания F-центры не разрушаются, позволяет многократно повторять цикл возбуждения и высвечивания одних и тех же центров и таким образом увеличить интегральный выход регистрируемого излучения.

В интересующих нас условиях основным процессом, конкурирующим с люминесцентным высвечиванием возбужденных F-центров, является их термоионизация. Доля ( $\eta_L$ ) возбужденных F-центров, переходящих на основной уровень посредством люминесценции, выражается следующей формулой:

$$\eta_L = \frac{1}{1 + \frac{\tau_R}{\tau_0} e^{-\Delta E / kT}} \quad (1)$$

а их доля ( $\eta_1$ ), разрушающаяся посредством термической ионизации, определяется выражением

$$\eta_1 = \frac{1}{1 + \frac{\tau_0}{\tau_R} e^{+\Delta E / kT}} \quad (2)$$

Здесь  $\tau_R$  - радиационное время жизни возбужденного состояния,  $\tau_0$  - частотный фактор,  $\Delta E$  - глубина возбужденного уровня F-центра относительно дна зоны проводимости,  $k$  - постоянная Больцмана,  $T$  - абсолютная температура.

Из формул (1), (2) следует, что с охлаждением кристалла выход люминесценции возрастает, а процесс термоионизации возбужденных F-центров становится менее интенсивным.

Отметим, что для предотвращения потерь F-центров за счет фотоионизации с основного состояния, энергии ( $h\nu$ ) возбуждающих фотонов должны удовлетворять условию  $h\nu < E_M + \Delta E$ , где  $E_M$  - разность энергий возбужденного и основного уровней F-центра.

Предлагаемый метод регистрации следов заряженных частиц иллюстрируется схемой рис. 1.

Под действием света импульсного источника часть F-центров в кристалле возбуждается и затем испускает люминесцентное излучение.

Последнее регистрируется системой, состоящей из проектирующего объектива, электронно-оптического преобразователя и фотоаппарата.

Для улучшения отношения сигнал/шум возможно использование коммутирующей системы, "закрывающей" усилитель яркости на время включения источника света и "очувствляющей" его на время высвечивания F-центров в промежутках между возбуждающими световыми импульсами.

Циклы возбуждения F-центров и их высвечивания многократно повторяются и прекращаются после того, как регистрирующее устройство накопит достаточно полную информацию о частицах, прошедших через кристалл.

Устойчивость F-центров в кристалле обеспечивается тем, что в процессе облучения и при последующем хранении кристалл затемняется и все время находится при такой температуре, когда процессы термоионизации с возбужденного уровня F-центра подавлены.

Допустимое число циклов возбуждения /K/ можно оценить, потребовав, чтобы число шумовых электронов, испущенных фотокатодом ЭОП'а за суммарное время, в течение которого ЭОП открыт, было меньше некоторой заданной величины  $\delta$ . Так, полагая, что после каждого возбуждающего импульса ЭОП открыт в течение времени  $\tau_R$  и шумовой ток с фотокатода соответствует испусканию  $n_\phi$  электронов  $\cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ , получим для K оценку

$$K < \frac{\delta}{\tau_R n_\phi} \quad (3)$$

Полагая для простоты, что используется монохроматический возбуждающий свет с длиной волны, соответствующей максимуму поглощения F-полосы, количество ( $n_L$ ) зарегистрированных квантов люминесцентного излучения (в расчете на 1 см длины трека в кристалле) может быть оценено по формуле

$$n_L = \sigma_m n_0 n \frac{\Omega}{4\pi} \nu \eta K \quad (4)$$

где  $\sigma_m$  - эффективное сечение поглощения возбуждающего света,  $n_0$  - число возбуждающих световых квантов, падающих на  $1 \text{ см}^2$  кристалла за время, соответствующее длине одного светового импульса,  $n$  - число

F-центров на 1 см длины трека в кристалле,  $\frac{\Omega}{4\pi}$  - относительный телесный угол объектива, проектирующего трек на фотокатод ЭОП'a,  $\eta$  - квантовый выход фотокатода ЭОП'a для люминесцентного излучения F-центров,  $\nu$  - квантовый выход люминесценции, K - число циклов возбуждения-излучения F-центров. (Формула (4) написана в предположении, что длительность импульса возбуждающего света значительно меньше  $\tau_R$ ).

Эффективное сечение  $\sigma_m$  можно определить, используя значения коэффициента поглощения  $a_m$  в максимуме F-полосы:

$$a_m = \frac{a_m}{N_0}, \quad (5)$$

где  $N_0$  - количество F-центров в 1 см<sup>3</sup> кристалла.

Предложенный опыт может быть видоизменен таким образом, чтобы возбуждающее облучение производилось не короткими импульсами, а непрерывно. В этом случае перед фотокатодом ЭОП'a следует установить светофильтр, задерживающий возбуждающий свет, но прозрачный для люминесценции F-центров. Подобрать такой фильтр вполне возможно, т.к. поглощение и люминесцентное испускание F-центров лежат в разных спектральных областях.

Отметим одну особенность предлагаемого метода: облучение кристалла ядерными частицами может производиться вдали от системы считывания. Это дает возможность одну систему считывания использовать для последовательного просмотра ряда облученных кристаллов.

В качестве примера рассмотрим условия регистрации следов частиц в кристалле KCl. Максимум F-полосы поглощения этого кристалла при 0°K соответствует 2,3 эв ( $\lambda \approx 5400 \text{ \AA}$ ) и сдвигается в длинноволновую область при возрастании температуры, достигая 2,21 эв при 300°K. Максимум спектра люминесценции расположен около 1,2 эв ( $\lambda \approx 10000 \text{ \AA}$ ) и так же, как и спектр поглощения, обнаруживает некоторую температурную зависимость. Квантовая эффективность люминесценции KCl высока и для достаточно чистых образцов достигает величины 0,5-0,8 [12]. Параметры  $\tau_0$ ,  $\tau_R$ ,  $\Delta E$ , входящие в формулы (1), (2), для этого кристалла можно принять равным [13,14]:  $\frac{1}{\tau_0} = 4,03 \cdot 10^{12} \text{ сек}^{-1}$ ;

$\tau_R = 0,577$  мксек;  $\Delta E = 0,15$  эв, что приводит при  $T = 60^\circ\text{K}$  к отношению  $\eta_L/\eta_i = 1,7 \cdot 10^6$ . Эта оценка свидетельствует о том, что при достаточно низких температурах процессом термоионизации F-центров в возбужденном состоянии можно пренебречь.

Приняв согласно /12/ для KCl в рассматриваемых нами условиях коэффициент поглощения равным

$$a_m = 9,26 \cdot 10^{17} \left( \frac{f N_0}{H} \right), \quad (6)$$

где  $f$  — сила осциллятора,  $H = 0,193$ , и полагая  $f = 1$ , получим в соответствии с (5) оценку эффективного сечения поглощения:

$$\sigma_m = 4,8 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2. \quad (7)$$

Зададимся численными значениями остальных величин, входящих в (4):  $n_L = 10 \text{ см}^{-1}$ ,  $\frac{\Omega}{4\pi} = 10^{-3}$ ,  $n = 10^3$ ,  $\nu = 0,5$  /13/,  $\eta = 10^{-3}$  и воспользуемся этой формулой, чтобы найти необходимую для выполнения опыта интенсивность возбуждающего света в импульсе:

$$n_0 = \frac{n_L}{\sigma_m n \frac{\Omega}{4\pi} \nu \eta K} \approx 2,5 \cdot 10^{14} \frac{\text{фотон}}{\text{см}^2 \text{ импульс}}. \quad (8)$$

Для типичного фотокатода электронно-оптического преобразователя темновой ток можно считать равным  $n_\phi \approx 10$  электрон/см<sup>2</sup>·сек. Приняв в формуле (3)  $\delta = 1$  электрон/см<sup>2</sup>·сек, найдем допустимое число повторений возбуждения-излучения F-центров:

$$K \leq 17 \cdot 10^4. \quad (9)$$

Очевидно, что при выбранном значении числа циклов возбуждения суммарное число возбуждающих квантов, прошедших через 1 см<sup>2</sup> поверхности кристалла за время считывания информации, будет равно

$$N = K n_0 = 4,25 \cdot 10^{19} \text{ фотон/см}^2, \quad (10)$$



При выполнении варианта опыта с непрерывным возбуждающим облучением для получения оценки интенсивности возбуждающего света можно воспользоваться полученным выше результатом (10). Приняв, что продолжительность накопления информации, как и раньше, равна  $t = 0,1$  сек, получим следующую оценку необходимой интенсивности  $J$  возбуждающего F-центры света:

$$J = K n_0 / t = 4,25 \cdot 10^{20} \frac{\text{фотон}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек}} \quad (11)$$

При технической реализации рассмотренного выше трекового прибора, несомненно, возникнет ряд трудностей, связанных, например, с созданием световых пучков высокой интенсивности, охлаждением элементов установки и т.п., однако все они не кажутся непреодолимыми и можно надеяться, что регистрация треков частиц в щелочно-галоидных кристаллах будет практически осуществлена.

#### Л и т е р а т у р а

1. Е. Завойский, Г.Смолкин, А. Плахов, М. Бутслов. ДАН СССР, 100, 241 (1955).
2. K. Lai, L. Jones, M. Perl. Phys.Rev.Letters, 7, 125 (1961).
3. Каскадные электронно-оптические преобразователи и их применение. Сб. статей, "Мир", Москва, 1965.
4. О. Савченко. ПТЭ, 4, 142 (1959).
5. H. Bridge, H. Burrowes, D. Caldwell, D. Hill, R. Schluter. Report of CERN Conference on High Energy Accelerators and Instruments, 1959.
6. C. Childs, L. Slifkin. Phys.Rev.Letters, 9, 354 (1962).
7. C. Childs, L. Slifkin. Rev.Sci.Instruments, 34, 101 (1963).
8. P. Price, R. Walker. Phys.Rev.Letters, 8, 217 (1962).
9. P. Price, R. Walker. J. Appl. Phys., 33, 3407 (1962).
10. K. Kobayashi. Phys.Rev., 102, 348 (1956).

11. Р. Смолуховский. *Международная конференция по мирному использованию атомной энергии, том 7, стр. 676,*  
Гос. научно-техн. изд-во химич. лит-ры, М., 1958.
12. J. Markham, F. Centers in *Alkali Halides, New York and London,*  
1966.
13. R. Swank, F. Brown. *Phys. Rev.,* 130, 34 (1963).
14. R. Swank, F. Brown. *Phys. Rev. Letters,* 8, 10 (1962).

Рукопись поступила в издательский отдел  
9 декабря 1960 года.

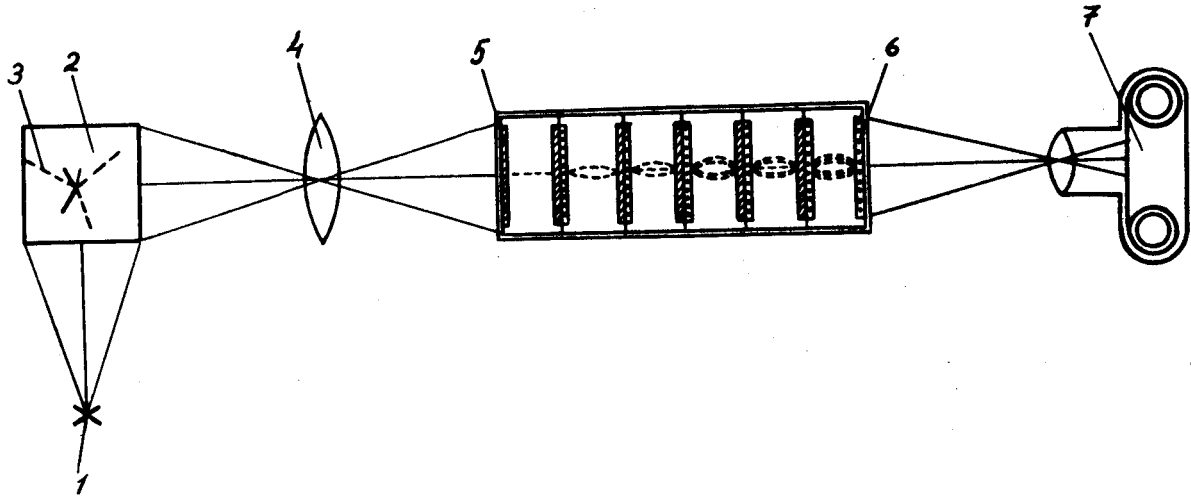


Схема регистрации треков заряженных частиц в ионных кристаллах.  
 1 - импульсный источник света; 2 - облученный ядерными частицами ионный кристалл; 3 - след частицы в кристалле, состоящий из образованных ею F-центров; 4 - проектирующий объектив; 5 - фотокатод ЭОП'а; 6 - экран ЭОП'а; 7 - фотоаппарат.