•

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ

А. Д. ЩЕЛОКОВ

В связи с широким применением ионизирующих излучений в технике, в медицине, в сельском хозяйстве и в научных исследованиях, вопрос о влиянии ионизирующих излучений на различные свойства материалов приобрел важное значение. В частности, большой интерес представляет вопрос об изменении электропроводности изоляторов в сфере излучений, где одни изоляторы теряют свои изолирующие свойства [1—10,12,13] другие, наоборот, улучшают их при длительном облучении [11].

В данной работе изучалось изменение электропроводности кристаллов NaCl в сфере действия рентгеновского излучения в зависимости от температуры.

Методика измерений

Электропроводность NaCl измерялась электрометром СГ—IM (комбинация струнного электрометра с квадрантным) методом постоянного отклонения согласно схеме, изображенной на рис. 1.



Рис. 1. Схема измерительной установки О-образец с электродами; Т-дифференциальная термопара; в-охранное кольцо: Uoбр - напряжение, подаваемое на образец: П₁-переключательреле, R^{*}-измерительные сопротивления от 10⁵ до 10¹² ом; Эструнный электрометр СГ-1М; П₂-переключатель; Б₁ и Б₂-батарен БАС - 80; г - предохранительные сопротивления по 3 мом; К-ключреле для заземления нити электрометра; КЭ-корпус электрометра; R-сопротивление 10¹⁰ ом, замыкающее выпрямитель при отключении его от образца; µА-микроамперметр; Rg-пучок рентгеновских лучей. Образцы готовились из естественных монокристаллов NaCl формы, изображенной на рис. 2.

Образец указанной формы выбирался из тех соображений, чтобы свести к минимуму токи утечки через ионизированный воздух между электродами при облучении.

Полщина образца 0,48 мм.

Электроды с обеих сторон образца аб были из аквадага. Охранным кольцом являлась полоска шириной в 2—3 мм, охватывающая кристалл, кругом по поверхности в плоскости, параллельной плоскости образца аб, изготовленная также из аквадага. Площадь электрода $S = 2,9 \ cm^2$.



Рис. 2. Вид образца в продольном (а) и поперечном (б) сечении. Д-диаметр образца; d-толщина образца; аб - собственно образец, подвергаемый испытанию; в-охранное кольцо из аквадага, опоясывающее образец по периметру поперечного сечения; П-полевой электрод; И-измерительный электрод (оба электрода из аквадага); Т-термопара в углублении образца; Rg-пучок рентгеновских лучей. Общий размер образца примерно 25 × 25 × 40 мм.

Температура образца измерялась дифференциальной термопарой, один конец которой был вставлен в тело образца, помещенного в электропечь.

Источником рентгеновских лучей были рентгеновские установки УРС—70 до 70 кв и РУП—2 до 200 кв. Окно рентгеновской трубки закрывалось свинцовой пластиной толщиной 1,5 см с отверстием для выхода лучей диаметром около 6 мм. Пучок рентгеновских лучей, выходящих из этого отверстия, перекрывался с помощью реле свинцовой шторкой толщиной 1,5 см. Источником напряжения, подаваемого на образец, был выпрямитель с электронной стабилизацией до 2,5 кв. Температурная зависимость электропроводности NaCl определялась при облучении и без облучения.

С целью исключения влияния фототоков образец был защищен от видимого света.

Результаты измерений и их анализ

На рис. 3 и 4 приведены зависимости логарифма электропроводности от обратной величины абсолютной температуры для NaCl. Условия, при которых получены эти кривые, приведены в табл. 1. Все измерения проводились по установившемуся току.

Кривые рис. 3, а также и рис. 4 A, A_1 и A_2 сняты при напряженности электрического поля $E = 20,9 \ \kappa B/CM$, при нагревании, кривые B и B_1 —при поле $E = 41,8 \ \kappa B/CM$, при остывании. Кривые A и B получены при отсутствии рентгеновского облучения, т. е. —обычные известные в литературе кривые температурной зависимости проводимости ионных кристаллов [1,2,3]. Электропроводность без облучения для щелочно-галоидных кристаллов, как известно, обусловлена ионами [14, 15, 16, 17], поэтому кривые A и B представляют температурную зависимость ионной проводимости NaCl, которая подчиняется закону [14, 15, 16, 17 и др.]

$$\sigma_i = A_i e^{-\frac{W_i}{kT}}.$$
 (1)

Кривые рис. З A_1 , A_2 , B_1 получены при облучении рентгеновскими лучами в 70 кв 10 ма (A_1) и 20 ма (A_2) и в 200 кв 15 ма (B_1) .

Сравнение кривых A_1 , A_2 и B_1 при облучении с кривыми A и B без облучения ясно показывает, что рентгеновские лучи значительно повышают проводимость \circ NaCl при температурах, близких к комнатной, например, при $t = +17^{\circ}$ С проводимость возрастает примерно в 3000 раз во время облучения при напряжении на трубке в 70 кв и токе через трубку 20 ма.

Рис З. Электропроводность монокристалла NaCl в зависимости от температуры при облучении рентгеновскими лучами А-без облучения при $E = 20,9 \ \kappa s[cm; A_1]$ и $A_2 =$ при облучении рентгеновскими лучами в 70 кв при силе тока трубки 10 ма (A₁) и 20 ма (A₂) при Е = 20,9 кв см без фильтра В-без облучения при E = 4, 8 кв см; B_1 при облучении 200 кв 15 ма при E =41,8 кв см, фильтр 0,7 мм Cu + 3 мм Al. 175°С и 119°С-температуры, выше которых влияние рентгеновских лучей незаметно. Кривые, обозначенные буквой А, сняты при нагревании образца; кривые, обозначенные В,-при снижении температуры. Самая нижняя точка кривой А (...) результат нескольких измерений перед началом опыта.



По мере повышения температуры возрастание проводимости при облучении уменьшается и при некоторой температуре (119°С и 175°С) совершенно исчезает, При более высоких температурах проводимость при облучении и без облучения практически одинакова.

Зависимость $\log \circ$ от $\frac{1}{T}$ при облучении рентгеновскими лучами испытывает перегиб в области температур $60 \div 120^{\circ}$ С, а при более низких температурах стремится снова к прямой, но со значительно меньшим наклоном.

Наличие этого перегиба говорит о различии в механизме проводимости при высоких и низких температурах, если NaCl облучается рентгеновскими лучами.

Естественно предполагать, что при рентгеновском облучении в NaCl, помимо ионов, создающих ток в отсутствии облучения (ионный ток), возникают другие носители зарядов со значительно меньшей энергией активации W_R чем Wi в (1) (малый наклон кривой при низких температурах, рис. 3).

В NaCl новыми носителями зарядов в данном случае могут быть, повидимому, только электроны, срываемые за счет энергии рентгеновских квантов с орбит атомов Na и Cl и переводимые на уровни, близкие к зоне проводимости, откуда они тепловым движением переводятся в зону проводимости.

Рис. 4. Зависимость электронной составляющей проводимости NaCl, возбуждаемой рентгеновским облучением, от температуры. Поле: для A, A', и A" $E = 20.9 \ \kappa B/cm$, для B и B' — $E = 41.8 \ \kappa B/cm$. Рентгеновское облучение: напряжение на трубке для A' и A" — 70 κB для B' — 200 κB , сила тока трубки: A'--10 ма, A" — 20 ма, B' — 15 ма. Кривые построены из данных графиков на рис. 3. При 70 κB рентген-лучи без фильтра, при 200 κB лучи фильтровались фильтром 0,7 мм Cu + 3 мм Al. Для сравнения даны кривые A и B для ионной составляющей, перенесенные с рис. 3.



Следовательно, при облучении общая проводимость σ_{oba} складывается из ионной проводимости σ_i и добавляемой рентгеновскими лучами электронной проводимости σ_R , то есть.

$$\sigma_{o \delta A} = \sigma_i + \sigma_R. \tag{2}$$

Зная из опыта σ_{oba} (кривые A_1, A_2 и B_1 , рис. 3) и σ_i ; (кривые A и B) по (2), легко найти σ_R .

На рис. 4 представлены графики зависимости $\log \sigma_R$ от $\frac{1}{T}$ в преде-

лах температур $+90 \div +30$ °С. Все три графика представляют собой прямые с малым наклоном, следовательно, закон изменения σ_R от T выражается такой же формулой, как и σ_i (1), а именно

$$\sigma_R = A_R e^{-\frac{W_R}{kT}},\tag{3}$$

где A_R и W_R значительно меньше A_i и W_i (табл. 1). Суммарная проводимость при облучении выразится

$$\sigma_{o6a} = A_l e^{-\frac{Wl}{kT}} + A_R e^{-\frac{W_R}{kT}}, \qquad (4)$$

где W_i и W_R — энергии активации соответственно для ионной и электронной составляющих проводимости;

A_i и A_R — коэффициенты, не зависящие или слабо зависящие от 7.

Ионной составляющей проводимости σ_i соответствуют кривые A и B на рис. 4, а также на рис. 3. Электронной составляющей проводимости σ_R , добавляемой рентгеновскими лучами к σ_i , соответствуют кривые A', A'' и B'.

В сумме эти два члена (4) в полулогарифмическом масштабе дают кривые A_1, A_2 и B_1 , рис. 3.

Рис. 3 и 4 показывают, что при низких температурах преобладает второй член формулы (4), т-е $\sigma_R \gg \sigma_i$, при высоких температурах преобладает 1 член формулы (4), т.е. $\sigma_R \ll \sigma_i$.

При высоких температурах ток, вызываемый рентгеновским излучением, хотя он и значительно больше, чем при низких температурах, не обнаруживается указанным выше методом по той причине, что ионный ток во много раз больше тока, возбуждаемого облучением, и последний невозможно отделить от ионного.

Поэтому при высоких температурах не наблюдается влияния рентгеновских лучей на электропроводность.

При низких температурах, наоборот, ионная составляющая общего тока, которая значительно быстрее убывает с температурной, становится незаметной по сравнению с электронным током.

Ионный ток очень быстро растет с температурой, электронный же слабо зависит от *T*, последнее говорит в пользу того, что о_R обусловливается электронами.

Электронная составляющая σ_R возрастает примерно пропорционально интенсивности *I* рентгеновского излучения. Это видно из того, что при увеличении тока рентгеновской трубки с 10 до 20 ма, т.е. в 2 раза. (интенсивность рентгеновских лучей пропорциональна току трубки), кривая *A'* поднимается до положения *A''* (рис. 4), т. е. σ_R возрастает в 1,9 раза. При этом энергия активации W_R (наклон кривой) в пределах ошибки измерения не изменяется (табл. 1).

Линейную зависимость σ_R и независимость W_R от интенсивности облучения можно объяснить следующим образом.

Из теории электропроводности кристаллов известно, что электропроводность (без облучения) выражается [14] формулой

$$\sigma = \frac{n_0 \delta^2 q^2 \gamma}{6kT} \cdot e^{-\frac{W}{kT}},\tag{5}$$

где

n₀ — концентрация носителей зарядов, δ — длина свободного пробега частиц,

q — величина заряда частицы,

у — частота колебаний частиц,

W-энергия активации частицы,

k и *T* — постоянная Больцмана и абс. температура.

Увеличение интенсивности облучения при неизменной жесткости (длиневолны λ) не может изменить ни одну из величин в (5), кроме n_0 — концентрации носителей зарядов, в нашем случае—электронов. Концентрация n_0 пропорциональна интенсивности облучения J

$$n_0 = aJ, \tag{6}$$

где *а* — коэффициент пропорциональности, зависящий от вещества. Значит и

$$A_R \sim J, \tag{7}$$

так как из сравнения (3) с (5)

$$A_R = \frac{n_0 \delta^2 q^{2_V}}{6kT}.$$
(8)

Следовательно, при T = const и $\lambda = \text{const}$

$$\sigma_R = CJ, \tag{9}$$

	œ	7	6	, ლ	4 r	రు	2		H X
<u>.</u>	B'	B_1	В	A"	Ą	A_2	A_1	Α	Обозначение кривой на рис. 3 и 4
	z	\$	$17 \div 250$	3	17÷100	z	3	$17 \div 250$	Пределы изменения температуры в °С
	z	•	41,8	z	7	3	3	20,9	Напряженность поля Е в образце в кв/см.
	200	200	Без об.	70	70	70	70	Без обл	напряжение на трубке в кв
	15	15	лучения	20	10	20	10	тучения	ток трубки в ма обл
	3	РУП-2		e	1	ž	УР С -70		источник рентгенов-
	2	30 см		, u	2	2	15 см		примерное расстоя- ние от фокуса трубки до образца
	+3 .n.n Al	0,7 <i>мм</i> Cu +		•	3	3	Без фильтра		фильтр для рентген- лучей
	i	+119°C	ł	I	I	+175°C	+175°C		Предельная температу- ра, до которой заметно влияние облучения
	0 11		0,79	0,0395	0,036			0,81	Энергия активации в электрон-вольтах
To,o.10	43510-14		63.10^{-4}	1,78.10 ¹⁴	0,94.10 ⁻¹⁴		~	3,16.10 ⁴	Предэкспоненциальный коэффициент А в <u>1</u> <i>ом. см</i>
суммарная электрон- ная		суммарная	ионная	пая	Суммарная электрон-		CVMMADHAG	ионная	Характер проводимости

9**68** :

где *С* — коэффициент пропорциональности, равный

$$C = \frac{a\delta^2 q^2 v}{6kT} e^{-\frac{W}{kT}}.$$
 (10)

Энергия же активации электронов W_R (а также уровни, на которых закрепляются электроны) при ионизации атомов ренгеновским квантом $h = h \frac{c}{\lambda}$ должна быть при прочих равных условиях зависима только от энергии кванта $h \gamma$, а следовательно,—от длины волны λ рентгеновского излучения, т. е.

$$W_R = t(\lambda). \tag{11}$$

В табл. 1 приведены вычисленные по наклону кривых значения энергии активации для низких температур ($+90 \div + 30^{\circ}$ С) для ионной и электронной составляющих проводимости при облучении, а также приведены значения коэффициентов A. Зная их, согласно (4), можно написать для иллюстрации уравнения кривых A_1 , A_2 и B_1 (рис. 3) зависимости проводимости от температуры при действии рентгеновского излучения для естественных монокристаллов каменной соли (табл. 2).

Таблица 2

кри- 3	сть ого ряже- ила нтге- бки.	ТЬ ИИ ИМИ	Ионная (юг	составля- цая о _і	Электронна щая		
Обозначение вой на рис.	Напряженно электрическу поля E , нап иле U_{mp} и с тока J_{mp} ре новской тру	Проводимос при облучен рентгеновски лучами	Аі в <u>1</u> ом.см	$B_i = \frac{W_i}{K}$	A_R $\beta \frac{1}{om.cm}$	$B_R = \frac{W_R}{k}$	Обозначени формул
A ₁	20,9 кв/см 70 кв 10 ма	Собл —	3 ,2.10 ⁻⁴	$\times e^{-9500. \frac{1}{T}}$	+ 0,94.10 ⁻¹⁴	$\times e^{-\frac{424}{T}}$	(12a)
A_2	20,9 кв/см 70 кв 20 ма	50бл =	3,2.10 ⁻⁴	$\times e^{-9500.1}$	+1,78.10 ⁻¹⁴	$\left \times e - \frac{464}{T} \right $	(126)
B ₁	41,8 кв/см 200 кв 15 ма	5 <i>06л</i> —	6 3,0 .10 ⁻⁴	$\times e^{-9120.1}T$	+43,5.10-14	$\times e^{-\frac{1270}{T}}$	(126)

Изменение интенсивности J облучения не изменяет в пределах ошибки измерения энергию активации W_R электронной составляющей проводимости (A' и A'' на рис. 4—параллельны). Уменьшение же жесткости рентгеновских лучей с 200 до 70 кв, т. е. в 2,85 раза с одновременным уменьшением напряженности поля в 2 раза, уменьшает энергию активации с 0,11 до 0,038 эв (средний результат), т. е. в 2,9 раза. Можно думать, что это уменьшение W_R вызвано только изменением жесткости (т. е. длины волны λ) рентгеновских лучей.

Выводы

1. Рентгеновские лучи при низких температурах повышают электропроводность естественных монокристаллов NaCl на 2—3 порядка. Относительное увеличение проводимости уменьшается с ростом температуры и с уменьшением интенсивности рентгеновских лучей.

2. Добавочная проводимость, вызываемая в NaCl рентгеновскими лучами (электронная проводимость), в зависимости от температуры подчиняется экспоненциальному закону, и для нее энергия активации значительно меньше, чем для ионной проводимости.

3. Общая проводимось NaCl при облучении рентгеновскими лучами в зависимости от температуры выражается экспоненциальной двухчленной формулой.

4. Энергия активации электронной составляющей проводимости не зависит от интенсивности рентгеновских лучей. Предэкспоненциальный коэффициент для электронной проводимости пропорционален интенсивности рентгеновских лучей.

В заключение выражаю благодарность А. А. Воробьеву за ценные обсуждения и советы, а также В. А. Соколову за просмотр статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. P. Curie, Compt. rend., 134, 420, 1902.

2. H. Becquerel, Compt. rend., 136, 1173, 1903.

A. Becker, Ann. d. Phys., 12, 124, 1903.
 A. Becker, Ann. d. Phys., 13, 394. 1904.
 A. Joffe, Ann. d. Phys., 20, 964, 1906.

6. А. Ф. Иоффе, Электропроводность диэлектрических кристаллов, М. 1924.

6. А. Ф. Иоффе, Электропроводность диэлектрических кристаллов, М. 1924.
7. В. Д. Кузнецов, В. П. Воскресенский и П. И. Михеев, Ж. Р. Ф. -Х.О.,
ч. физич., т. LIX (вып. 3-4), стр. 315-326, 1927.
8. В. М. Тышкевич, Ann. d. Phys., В. 6, Н. 5, S. 622, 1930.
9. F. C. Armistead, I. C. Pennoc, L. Mead, Phys. Rev., 76, N 6, 860, 1949.
10. S. Mayburg and W. L. Lawrence, J. Appl. Phys., 23, 1006, 1952...
11. J. H. Coleman and D. Bohm; J. Appl. Phys., 24, 497, 1953.
12. J. F. Fawler and F. T. Farmer, Nature, v. 171, № 4362, p. 1020, 1953...
13. J. Fawler and F. T. Fermer, Nature, V. 174, № 4420, p. 136, 1954.

14. Г. И. Сканави, Физика диэлектриков, М.-Л., 1949. 15. Н. Мотт и Р. Герни. Электронные процессы в ионных кристаллах. И. Л. Москва, 1950.

16. B. Hochberg und A. Walter Z. S. f. Phys., 64, 392, 1930.

17. Флексиг. Электропроводность неметаллических кристаллов, 1936.

18. П. С. Тартаковский. Внутренний фотоэффект в диэлектриках, ГИТ-ТЛ М.-Л. 1940.

Томский политехнический институт