

## ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В ОБЛУЧЕННЫХ ПРОТОНАМИ И РЕНТГЕНОВСКИМИ ЛУЧАМИ КРИСТАЛЛАХ КВг и КJ

Ю. М. АННЕНКОВ

Исследования оптических свойств щелочных галоидов привели к выводу, что различные виды ионизирующего излучения генерируют одинаковые центры окраски.

Подобного единства не наблюдается при рассмотрении диэлектрических характеристик щелочно-галоидных кристаллов. Результатом взаимодействия реакторного излучения с кристаллами КВг является интенсивный максимум на кривой термического изменения  $\text{tg}\delta$  [1].

Данные работы [2] свидетельствуют об уменьшении величины угла диэлектрических потерь в диапазоне звуковых частот после воздействия рентгеновских лучей на монокристаллы КСl.

Если же рентгенизованные кристаллы освещать светом в F-полосе поглощения, то в температурной зависимости диэлектрических потерь, измеренной на сверх высоких частотах, возникает ряд пиков [3, 4].

Одной из причин несоответствия между экспериментальными данными многих авторов можно считать различия в условиях опыта, что не позволяет проследить изменения диэлектрических характеристик щелочно-галоидных кристаллов после воздействия на них различными видами излучения.

Сравнительно недавно опубликованные результаты работы В. В. Краснопевцева [5] свидетельствуют о присутствии релаксационных диэлектрических потерь в кристаллах КВг после электронной бомбардировки, которые проявляются в максимуме  $\text{tg}\delta$  при температурах выше  $100^\circ\text{C}$ .

При объяснении диэлектрической релаксации в КВг, облученном электронами, В. В. Краснопевцев допускает существование в междоузлиях положительных и отрицательных ионов, образованных в результате многократной ионизации ионов анионной субрешетки. Следуя моделированию центров окраски по Варли [6], автор предлагает релаксаторы в виде ассоциированных  $V_3$ -центров и междоузельных катионов. Высказанная точка зрения о конфигурации квазидиполей, вызывающих увеличение  $\text{tg}\delta$  в облученных кристаллах, имеет ряд уязвимых мест.

$V_4$ -полоса поглощения, которую Варли отождествляет с присутствием в решетке междоузельных ионов металла, экспериментально наблюдается только при низких температурах.

Кроме того ряд авторов [7] более вероятной считают модель  $V_3$  центра в виде молекулярного иона галоида типа  $X_3^-$ , ориентированного в направлении [011] и занимающего 2 анионные и одну катионную вакансии. Химически это эквивалент  $H$ -центра плюс катионная вакансия и дырка. Подобный центр малоэффективен как ловушка для положительного заряда.

Возможно изучение диэлектрических потерь в нарушенных другими видами ионизирующего излучения щелочно-галоидных кристаллах позволит внести ясность в обсуждаемый вопрос.

Мы исследовали влияние рентгеновского и протонного облучения на угол диэлектрических потерь в кристаллах  $KBr$  и  $KJ$ . Энергия протонов составляла 4,1 Мэв, а поглощенная кристаллами доза изменялась от  $2 \cdot 10^{22}$  эв/см<sup>3</sup> до  $5 \cdot 10^{23}$  эв/см<sup>3</sup>. Облучение рентгеновскими лучами проводилось на установке РУП-2, поглощенная энергия варьировалась в пределах  $5 \cdot 10^{19}$  эв/см<sup>3</sup> —  $2 \cdot 10^{21}$  эв/см<sup>3</sup>.

С увеличением температуры  $tg \delta$  в ненарушенных радиацией кристаллах  $KBr$  и  $KJ$  меняется монотонно, увеличиваясь с ростом температуры.

На рис. 1 представлены температурные зависимости диэлектрических потерь для монокристаллов  $KBr$ , измеренные до и после облучения ионизирующим излучением.

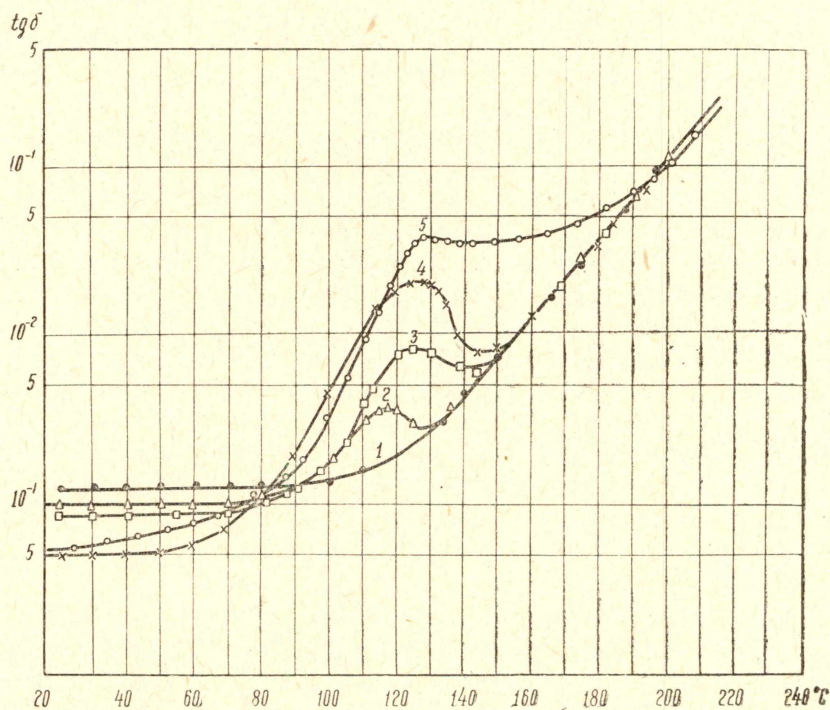


Рис. 1. Температурные зависимости  $tg \delta$  при 1000 гц для 1 — необлученных кристаллов  $KBr$ , облученных рентгеновскими лучами:  
 2 —  $1,3 \cdot 10^{20}$  эв/см<sup>3</sup>,  
 3 —  $5,2 \cdot 10^{20}$  эв/см<sup>3</sup>,  
 4 —  $1,6 \cdot 10^{21}$  эв/см<sup>3</sup>,  
 5 — облученных протонами ( $2,0 \cdot 10^{23}$  эв/см<sup>3</sup>).

Протонная бомбардировка исследуемых кристаллов приводит к уменьшению  $tg \delta$  в области низких температур и появлению интенсивного максимума при 130—135°C.

Следует подчеркнуть, что изменение интегрального потока протонов при выбранных условиях облучения не влияет на исследуемые свойства облученного бромистого калия.

Рентгенизация кристаллов КВг вызывает картину радиационного изменения диэлектрических потерь, аналогичную протонной бомбардировке.

Однако увеличение дозы рентгеновских лучей, поглощенной кристаллами, стимулирует рост амплитуды максимума и смещение пика в сторону высоких температур. При поглощенных дозах, больших  $1,4 \cdot 10^{21}$  эв/см<sup>3</sup>, смещение температуры максимума прекращается и его величина соизмерима с эффектом после протонного облучения.

Широкий температурный пик  $\text{tg} \delta$ , появляющийся после воздействия протонами на кристаллы КJ, находится в пределах 125—135°C (рис. 2). Амплитуда максимума увеличивается, насыщаясь при дозах больших  $1 \cdot 10^{23}$  эв/см<sup>3</sup>.

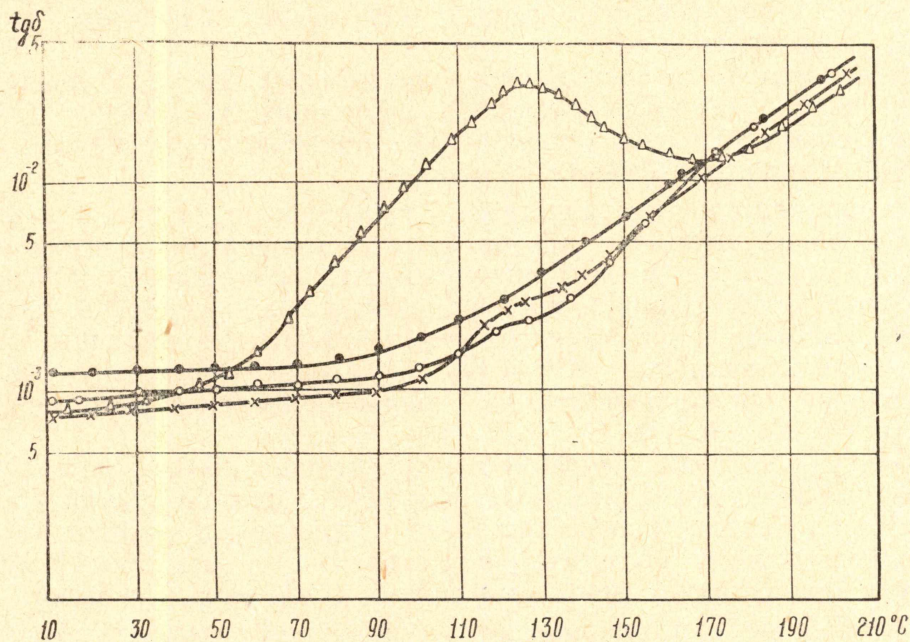


Рис. 2. Зависимости  $\text{tg} \delta$  от температуры при 100 гц для  $\text{KJ}$  кристаллов: ●—●—●—●—необлученных кристаллов КJ; облученных рентгеновскими лучами  
 ○—○—○—○— $1,3 \cdot 10^{21}$  эв/см<sup>3</sup>  
 ×—×—×—×— $2,6 \cdot 10^{21}$  эв/см<sup>3</sup>,  
 △—△—△—△—облученных протонами ( $2,5 \cdot 10^{23}$  эв/см<sup>3</sup>).

(Цифрами указаны значения энергии излучения, поглощенной кристаллом).

В температурном интервале 20—70°C угол потерь в облученных протонами кристаллах меньше, чем в необлученных.

Рентгенизация иодистого калия приводит к уменьшению диэлектрических потерь в широкой области температур вплоть до 170°C. Только при поглощении кристаллом энергии рентгеновских лучей  $1,3 \cdot 10^{21}$  эв/см<sup>3</sup> удается заметить появление температурного максимума  $\text{tg} \delta$  в той же области кривой, где наблюдается интенсивный пик угла потерь для КJ после протонного облучения.

Положение температурных максимумов  $\text{tg} \delta$ , наблюдаемых в окрашенных кристаллах КВг и КJ, смещаются в сторону больших темпе-

ратур в соответствии с энергией активации релаксационного процесса, равной соответственно 2,0 эв и 2,8 эв.

Рентгеновское облучение приводит в основном к появлению  $V_3$  и  $F$  полос поглощения, которые становятся более интенсивными в случае протонной бомбардировки. Нагревание кристаллов KBr и KJ до 200°C полностью устраняет максимумы  $tg\delta$  и окраску.

Как указывалось, температурный максимум  $tg\delta$ , возникающий после облучения протонами кристаллов KJ, уменьшается при значениях поглощенной энергии меньших, чем  $10 \cdot 10^{22}$  эв/см<sup>3</sup>. Доза рентгеновских лучей изменялась от  $5 \cdot 10^{19}$  эв/см<sup>3</sup> до  $2 \cdot 10^{21}$  эв/см<sup>3</sup>. Следовательно, максимальная энергия рентгеновского излучения, поглощенная образцом, еще не достаточна, чтобы интенсивно генерировать дефекты, вызывающие появление ярко выраженного температурного максимума  $tg\delta$ , имеющего место после протонной бомбардировки.

Поглощение энергии рентгеновских лучей  $2,5 \cdot 10^{21}$  эв/см<sup>3</sup> для KBr достаточно, чтобы насытить процесс образования дефектов, ответственных за увеличение  $tg\delta$ .

Следовательно, сопоставление радиационных изменений диэлектрических свойств ионных кристаллов различного химического состава с поглощенной дозой излучения может привести к неверным количественным оценкам эффекта облучения.

Экспериментальные результаты, приведенные на рис. 1 и рис. 2, наглядно показывают, что протонная бомбардировка и рентгенизация вызывают появление в щелочно-галогидных кристаллах одинаковых дефектов в концентрациях, пропорциональных запасенной энергии.

Энергия активации релаксационных процессов, имеющих место в облученных кристаллах KBr и KJ, составляет значительную величину и больше для монокристаллов с меньшей энергией решетки (2,0 эв для KBr 2,8 эв. для KJ).

Сравнение энергии активации для ориентации поляризующихся дефектов в облученных KBr и KJ с подобной характеристикой релаксационного процесса, вызванного ассоциированными парами вакансий [8], свидетельствует об усложнении структуры квазидиполей при переходе к кристаллам с меньшими силами связи между ионами.

Уменьшение электропроводности щелочно-галогидных кристаллов после рентгеновского [9] и протонного [10] облучения позволяет полагать, что основной частью релаксирующих квазидиполей являются катионные вакансии.

Вероятнее всего квазидиполи представляют из себя катионные вакансии, захваченные определенными ловушками, размеры которых больше в KJ, чем в KBr.

Наши результаты по изучению диэлектрических потерь в облученных протонами кристаллах KJ и высвеченных белым светом свидетельствуют о незначительном влиянии электронных центров окраски на величину максимума  $tg\delta$ .

Однако представлять ловушку катионных вакансий (или междоузельных ионов, как это следует из работы Краснопевцева) в виде  $V_2$  или  $V_3$ -центров вряд ли возможно.

В случае облученных протонами и рентгеновскими лучами монокристаллов NaCl мы не наблюдали релаксационного максимума  $tg\delta$ , аналогично температурному пику диэлектрических потерь для нарушенных радиаций кристаллов KBr и KJ, несмотря на то, что концентрация дырочных центров в хлористом натрии была больше, чем в KBr и KJ [8].

Возможно, присутствие V-центров необходимо, но недостаточно для образования сложных квазидиполей в облученных щелочно-галлоидных кристаллах. Дополнительные условия, вероятно, соблюдаются только в более рыхлых кристаллах (KBr, KJ). Совместное изучение температурной стабильности дырочных центров окраски и дефектов, вызывающих релаксацию в облученных KBr и KJ, а также исследование диэлектрических потерь в аддитивно окрашенных кристаллах позволит с большей уверенностью провести моделирование поляризующихся комплексов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Краснопевцев. ФТТ, т. 3, в. 1, 214, 1961.
  2. Л. А. Голубева, Т. И. Никитинская. Доклад на 22 совещании по физике щелочно-галлоидных кристаллов, Рига, 1961.
  3. И. И. Ежик, С. Т. Шавло. Изв. вузов, физика, № 4, 140, 1959.
  4. И. И. Ежик, С. Т. Шавло. Изв. вузов, физика, № 5, 13, 1960.
  5. В. В. Краснопевцев. ФТТ, 5, 2261, 1963.
  6. I. Varley H. O. Journ. Nucl. Energy, 1, 130, 1959.
  7. R. Christy. Phelps, Phys Rev., 124, 1053, 1961.
  8. Ю. М. Анненков. Статья в настоящем сборнике.
  9. R. Christy, Fukushima, Phys. Rev., 118, 1222, 1960.
  10. Kobayashi K., Rev., 102, 348, 1956.
-