

## ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ОБЛУЧЕННЫХ ПРОТОНАМИ КРИСТАЛЛАХ КВг

Ю. М. АННЕНКОВ

(Представлена научным семинаром лаборатории диэлектриков и полупроводников)

Современный уровень развития радиационной физики щелочно-галлоидных кристаллов достигнут в основном благодаря методам высокочастотной спектроскопии и люминесцентного анализа. При этом о широком круге ионных явлений экспериментаторы судят косвенно.

Метод изучения электрических свойств кристаллов дает непосредственную информацию о развитии ионных процессов. Однако в области изучения радиационного изменения электрических свойств кристаллов имеются лишь единичные работы [1, 2, 3].

Энергия излучения запасается в кристалле не только при образовании центров окраски, но и при генерации более сложных нарушений, которые могут проявляться в диэлектрическом поглощении.

При исследовании влияния ионизирующих видов облучения на диэлектрические потери в щелочно-галлоидных кристаллах мы фиксировали по одному интенсивному максимуму в температурных зависимостях  $\text{tg}\delta$  для КВг и КЖ. Настоящая работа имеет целью на примере кристаллов КВг более детально изучить природу радиационных дефектов, ответственных за наблюдаемое диэлектрическое поглощение.

Исследовались температурно-частотные зависимости  $\text{tg}\delta$  в звуковом диапазоне частот и электропроводность в интервале температур (20—200)°С.

Облучение проводилось протонами с энергией 4,5 Мэв с двух сторон образца, причем толщина кристалла выбиралась такой, чтобы обеспечить равномерное по объему окрашивание. Интегральная доза изменялась от  $1 \cdot 10^{14}$  протон/см<sup>2</sup> до  $7 \cdot 10^{15}$  протон/см<sup>2</sup>.

Типичные результаты влияния протонной бомбардировки на электрические свойства кристаллов КВг приведены на рис. 1. Облучение снижает диэлектрические потери ниже 120°С и вызывает появление максимума  $\text{tg}\delta$  в интервале температур (140—170)°С. Увеличение дозы облучения приводит к росту  $\text{tg}\delta$  и некоторому смещению его положения в высокотемпературную область.

Наиболее интересную информацию о типе диэлектрического поглощения можно получить при рассмотрении температурно-частотных зависимостей  $\text{tg}\delta$ .

На рис. 1 представлены зависимости эффекта радиационного изменения  $\text{tg}\delta$  от температуры при нескольких частотах. С увеличением

частоты электрического поля положение максимума несколько смещается в сторону больших температур, а амплитуда его уменьшается.

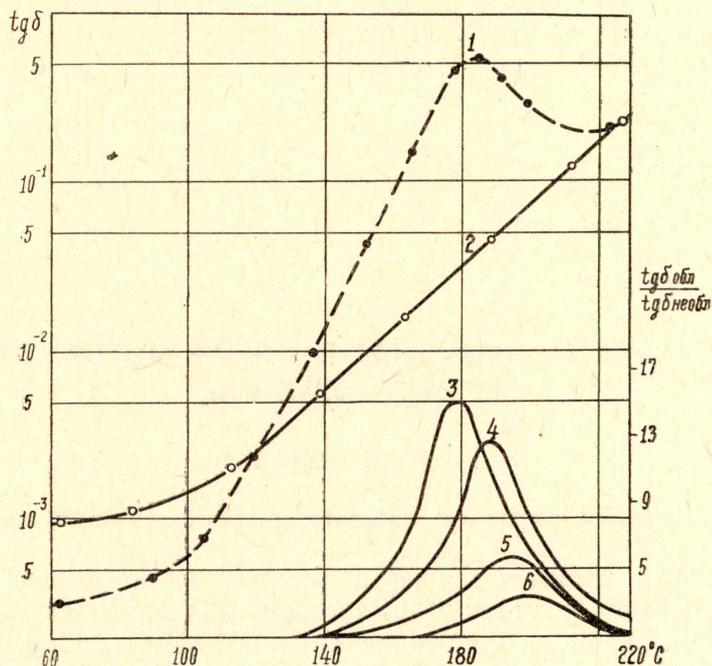


Рис. 1. Изменение  $\text{tg}\delta$  от температуры при частоте 50 гц для необлученных кристаллов KBr (2) и облученных протонами образцов (1). Зависимость радиационного эффекта изменения  $\text{tg}\delta$  от температуры при разных частотах: 3—50 гц, 4—100 гц, 5—1000 гц, 6—5000 гц. Доза облучения составляла  $1 \cdot 10^{15}$  протон/см<sup>2</sup>.

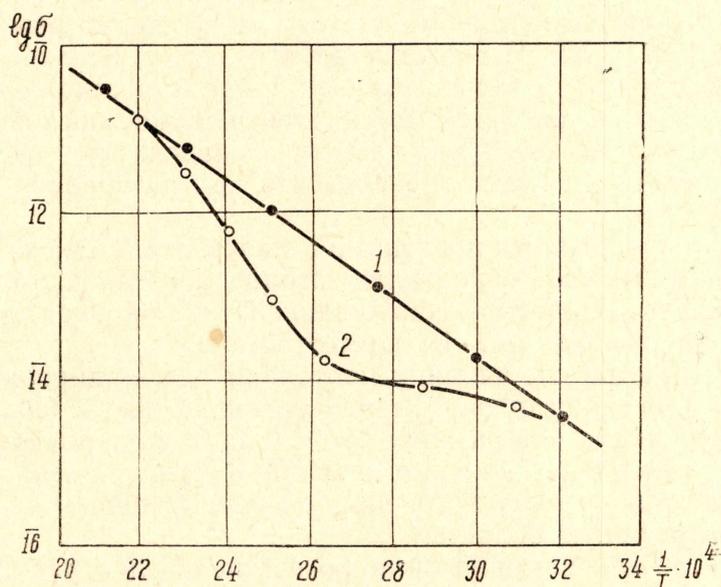


Рис. 2. Зависимость логарифма электропроводности от температуры для KBr. 1 — необлученные кристаллы, 2 — кристаллы, облученные дозой  $1 \cdot 10^{15}$  протон/см<sup>2</sup>.

Электропроводность исследуемых кристаллов после облучения уменьшается в интервале температур (20—180)°С. При более высоких температурах значения электрического сопротивления облученных и не нарушенных излучением образцов совпадают (рис. 2).

Следовательно, можно считать, что радиационное изменение ионной проводимости кристаллов не ответственно за появление максимума  $\text{tg}\delta$ .

С другой стороны, в области термического разрушения центров окраски возможно появление электронной составляющей тока. С целью выяснить роль электронной проводимости кристалла в возникновении диэлектрического поглощения исследовались кривые термообесцвечивания  $F$  и  $V_2$ -полос. Скорость нагревания образцов КВг при изучении термообесцвечивания и электрических свойств поддерживалась постоянной и равнялась (0,8—1,0)°С в мин. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что максимальная скорость разрушения  $F$  и  $V_2$ -полос в кристаллах КВг приходится на интервал температур (60—100)°С (рис. 3), а максимум диэлектрических потерь имеет место при более

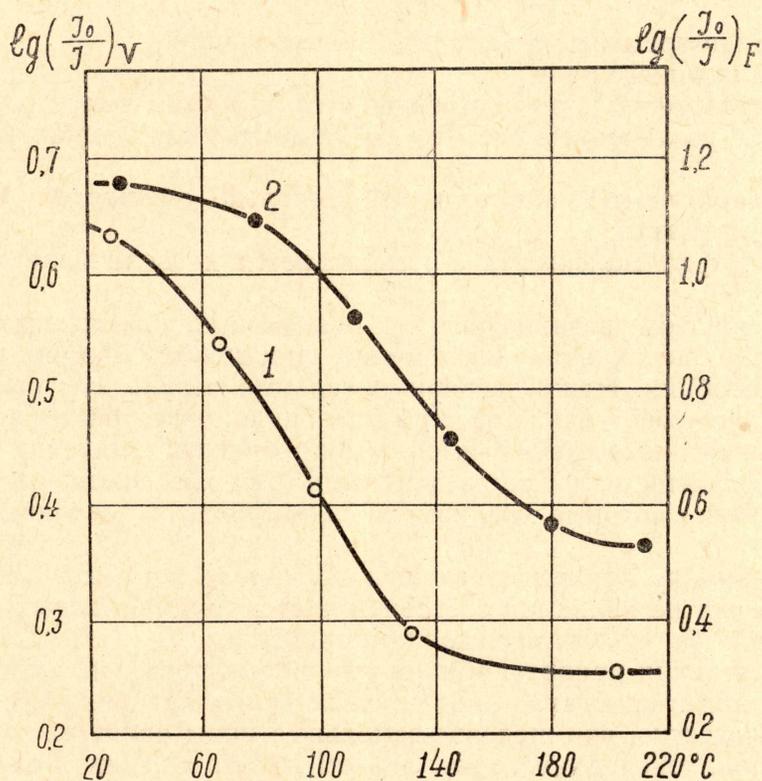


Рис. 3. Кривые термообесцвечивания  $F$  и  $V_2$ -полос поглощения для кристаллов КВг.  
1 —  $F$ -полоса (620  $\mu\mu$ ), 2 —  $V_2$ -полоса (230  $\mu\mu$ ).

высоких температурах. Следовательно, увеличение  $\text{tg}\delta$  в предварительно облученных кристаллах КВг связано только с поляризационными явлениями. Наблюдаемое диэлектрическое поглощение невозможно объяснить релаксационной поляризацией, обусловленной ориентационными переходами [4].

Действительно, в случае дебаевских потерь амплитуда пика не зависит от частоты поля:

$$\text{tg}\delta_{\text{макс}} = \frac{\epsilon_0 - \epsilon_\infty}{2 \cdot \sqrt{\epsilon_0 \cdot \epsilon_\infty}},$$

где  $\epsilon_0$  — статическая диэлектрическая проницаемость,

$\varepsilon_\infty$  — высокочастотная диэлектрическая проницаемость.

Для описания таких видов поляризации, как электронное и ионное смещение, широко используется модель гармонического осциллятора. При частотах электромагнитного поля, близких к собственной частоте колебания осциллятора, наблюдается поглощение энергии. При этом мнимая часть диэлектрической проницаемости выражается следующим образом [5]:

$$\varepsilon'' = \frac{1}{2}(\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty) \cdot \left[ \frac{\omega \cdot \tau}{1 + (\omega + \omega_0)^2 \tau^2} + \frac{\omega \cdot \tau}{1 + (\omega - \omega_0)^2 \tau^2} \right].$$

Формула для максимального значения  $\varepsilon''$  имеет вид:

$$\varepsilon''_{\text{макс}} = \frac{1}{2} (\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty) \cdot \sqrt{1 + \omega_0^2 \tau^2},$$

где  $\omega_0$  — собственная частота осциллятора,

$\tau$  — постоянная времени установления поляризации,

$\omega$  — частота внешнего поля.

В предположении, что  $\tau$  уменьшается с ростом температуры и  $\omega \cdot \tau$  близко к 1, с увеличением частоты соблюдаются следующие закономерности:

а) температурный максимум  $\varepsilon''$  несколько смещается в сторону больших температур;

б) амплитуда максимума  $\varepsilon''$  уменьшается и увеличивается его полуширина.

Таким образом, возникающее в облученных кристаллах КВг диэлектрическое поглощение качественно описывается формулами резонансной абсорбции. Наши экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что собственная частота колебаний дефектов, ответственных за резонансное поглощение, имеет очень низкое значение — меньше 50 гц. Это позволяет предполагать осцилляторы сложными ионными образованиями, которые становятся электрически активными после облучения.

Из данных по термообесцвечиванию кристаллов КВг следует, что центры окраски не являются составной частью радиационных дефектов, ответственных за диэлектрическое поглощение.

Для выяснения природы обнаруженной абсорбции мы использовали метод введения в кристаллы КВг двухвалентных катионно-замещающих примесей. Известно, что щелочно-земельные ионы являются акцепторами для дырок, генерируемых излучением. Поэтому если в образовании осцилляторов участвуют локализованные дырки, то введение ионов стронция в кристалл должно изменить амплитуду резонансного пика  $\text{tg}\delta$ .

Показано, что небольшие добавки  $\text{Sr}^{++}$  уменьшают высоту максимума диэлектрических потерь, наведенного облучением, а при концентрациях примеси больших  $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ M}\%$  резонансный пик диэлектрических потерь исчезает и появляется новая область поглощения (рис. 4). При низких частотах прослежено смещение максимума, а так же характерное для релаксационных процессов изменение действительной части диэлектрической проницаемости. Энергия активации релаксационной поляризации составляет 1,2 эв.

Когда релаксация смещается в область температур (90—110)°С, наблюдается резкое уменьшение максимума, что вызвано разрушением релаксаторов. Тот факт, что пик  $\text{tg}\delta$  увеличивается с ростом концентрации примеси  $\text{Sr}^{++}$  в кристалле и не наблюдается для системы

$KBr + Pb^{++}$ , позволяет считать диполь состоящим из иона  $Sr^{++}$  и одной или двух дырок, локализованных вблизи примесного иона. Учитывая близость температур разрушения релаксаторов и  $V_2$ -центров, более вероятной моделью диполя можно считать  $V_2$ -центр, локализованный на катионной вакансии возбужденного комплекса.

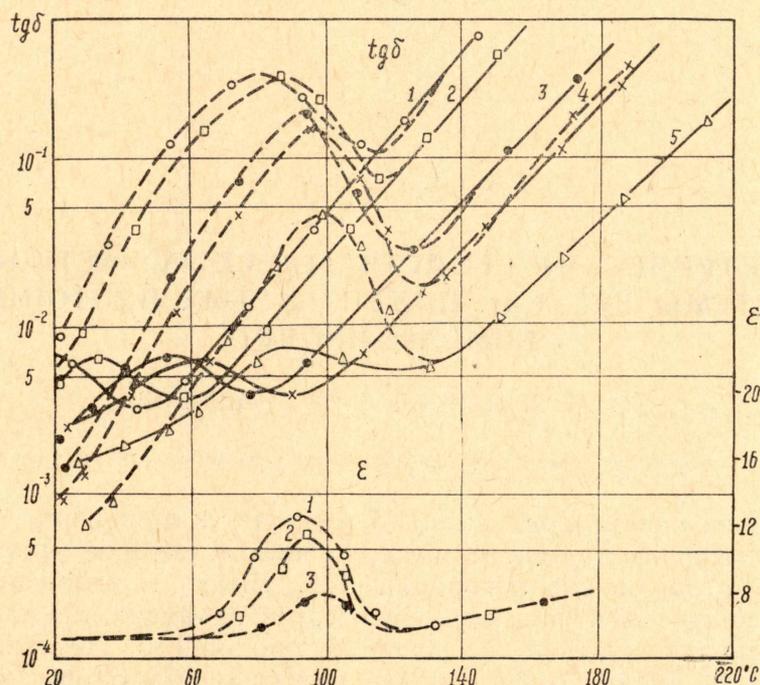


Рис. 4. Температурные зависимости  $tg\delta$  и  $\epsilon$  для кристаллов  $KBr + 3,8 \cdot 10^{-2} M\% Sr^{++}$ . Сплошные линии соответствуют необлученным образцам, пунктирные линии соответствуют облученным дозой  $1 \cdot 10^{15}$  протон/см<sup>2</sup> кристаллам.  
1 — 50 гц, 2 — 100 гц, 3 — 500 гц, 4 — 1000 гц, 5 — 5000 гц.

Мы приходим к следующим выводам:

1. Диэлектрическое поглощение, возникающее в облученных кристаллах  $KBr$ , не является следствием «загрязнения» кристаллов примесями, а типично для собственной структуры соединения.

2. В состав образований, ответственных за резонансное поглощение в предварительно облученных кристаллах  $KBr$ , входят локализованные дырки. Вероятно, это сложные агрегаты вакансий, захватившие несколько дырок. Подтверждением существования в кристаллах агрегатов вакансий, способных локализовать на себе дырки, является изменение радиационного уменьшения электропроводности щелочно-галогидных кристаллов при введении в них дырочно-акцепторных примесей [6].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Краснопевцев. ФТТ, 5, 8, 2261, 1963.
2. В. В. Краснопевцев. ФТТ, 3, 214, 1961.
3. Б. В. Будылин, А. А. Воробьев. Действие излучений на ионные структуры. Госатомиздат, Москва, 1962.
4. Ю. М. Анненков. Изв. ТПИ, т. 140, 1965.
5. Г. Фрелих. Теория диэлектриков. И. Л., Москва, 1960.
6. М. И. Игнатьева, Е. К. Завадовская, И. Я. Мелик-Гайказян. ФТТ, 5, 2775, 1963.