

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОИОНИЗАЦИИ ПОЛЯРОННЫХ СОСТОЯНИЙ В КРИСТАЛЛАХ KCl

© *Е.В.Коровкин, Т.А.Лебедкина*

Институт физики твердого тела Российской академии наук,
142432 Черноголовка, Московская обл., Россия
(Поступила в Редакцию 11 января 1996 г.)

Исследован процесс термоионизации связанных полярных состояний в кристаллах KCl в температурном интервале 105–122 К. Наблюдение за изменением во времени концентрации этих состояний осуществлялось методом ИК-фотопроводимости. Показано, что сложный характер полученных кривых объясняется наличием еще двух других типов электронных ловушек в этом кристалле. Определена энергия активации процесса термоионизации связанных полярных состояний (0.303 eV). Определены также характеристики двух других типов ловушек.

Ранее на основе метода фотопроводимости [1] в гамма-облученных кристаллах NaCl при гелиевой температуре были обнаружены локализованные (связанные) электронные состояния (электронные ловушки), спектр фотоионизации которых лежал в ИК-диапазоне и был подробно исследован [2]. Проведенные далее исследования оптического поглощения [3], вызываемого этими ловушками, и процесса термического опустошения их, выполненные как методом фотопроводимости [4], так и методом оптического поглощения [3], дали основание полагать, что мы имеем дело с полярными состояниями. Исследования спектров *F*-стимулированных оптического поглощения [5] и фотопроводимости [6] в кристаллах KCl и KBr показали, что аналогичные состояния имеются также и в этих кристаллах.

Полученный в этих работах весьма характерный спектр оптического поглощения в кристаллах KCl показал, что исследованные нами электронные состояния изучались ранее методом оптического поглощения Якобсом с сотрудниками [7,8]. Между нашими данными и данными работы [7] имеются некоторые расхождения. Так, например, для энергии активации термического опустошения этих ловушек в NaCl в работе [7] была получена величина 0.22 eV, а в наших исследованиях она составляла 0.164 eV [3,4]. Принимая во внимание тот факт, что мы исследовали этот процесс двумя методами (оптического поглощения и фотопроводимости) и получили при этом отличное совпадение, мы больше доверяем нашим данным. Предпринятая далее нами попытка изучения процесса термического опустошения электронных состояний

в кристаллах КСl и КВг не дала надежных результатов вследствие недостаточной точности измерений в этом случае, но подтвердили наличие резкого излома на кривых $\ln \tau - (1/T)$ для кристаллов КВг, полученного в [7].

Целью данной работы является исследование процесса термического опустошения связанного поляронного состояния в кристалле КСl, ставшее возможным после модернизации методики (автоматизация, компьютеризация, математическая обработка данных непосредственно в процессе измерений), позволившей резко повысить точность измерений.

1. Методика эксперимента

Наблюдение за изменением концентрации заполненных ловушек со временем после их заполнения производилось методом ИК-фотопроводимости. Для этого помещенный в криостат образец подвергался для каждого единичного измерения последовательному воздействию трех импульсов света: 1) заполняющего ловушки (F -свет, лампа СИ-8, сумма светофильтров СЗС-25 и ЗС-1) длительностью 10 s; 2) тестирующего (глобар, монохроматор, λ составляет от 1.0 до 2.5 μm длительностью 7 s; 3) очищающего образец от заполненных ловушек (лампа СИ-8, светофильтр ИКС-1) длительностью 5 s. Тестирующий импульс сопутствовал собственно измерению фотопроводимости. Для этого до данного импульса производились следующие операции: открытие закрытых сразу после заполняющего ловушки импульса света холодных заслонок, исключающих непреднамеренную засветку образца тепловым излучением, подключение источника постоянного напряжения к измерительной цепи и открытие через некоторое время, необходимое для угасания емкостных экстрактов, входа электрометра. Сразу же после тестирующего импульса света производилось закрытие входа электрометра и отключение источника напряжения.

Интервал времени между заполняющим и тестирующим импульсами света мог изменяться от минимального, равного 11 s, что принималось за начальную отсчетную точку $t = 0$, до $t = 2000$ s. Из-за неконтролируемого воздействия процессов измерения на состояние как ловушек в образце, так и электрической поляризации образца дальнейшие измерения процесса термоопустошения ловушек не производились и образец очищался от заполненных ловушек импульсом интенсивного ИК-света. После этого вновь создавалось состояние образца, идентичное предыдущему, для чего длительность и интенсивность заполняющего ловушки импульса света поддерживались с необходимой точностью постоянными, и следующее измерение осуществлялось при другом, если было необходимо, времени выдержки образца от момента создания до момента измерения t . В каждой точке t измерение повторялось дважды с разной полярностью источника напряжения для избежания накопления поляризации образца. После этого переходили к измерению кривой термоопустошения при другом значении t .

2. Эксперимент

Измерение кривых термического опустошения производилось при длине волны тестирующего света 1.5 μm , что соответствовало максимальному сигналу фотопроводимости. Пример полученных данных для ряда температур приведен на рис. 1,2 в координатах

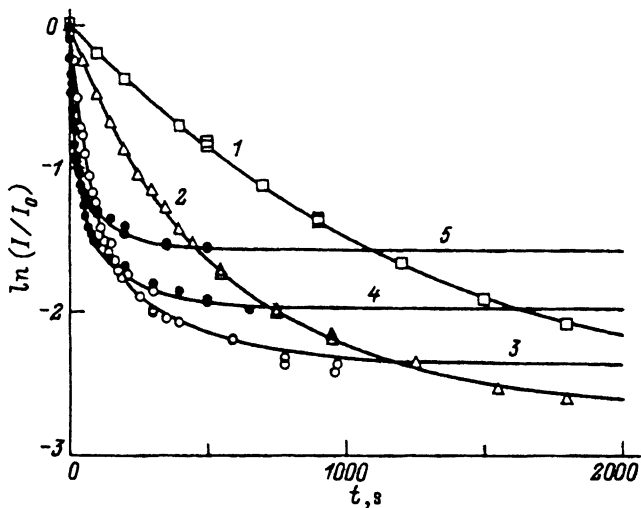


Рис. 1. Кривые термоионизации электронных ловушек в кристаллах KCl для различных температур.

$T(K)$: 1 — 106.7, 2 — 110.3, 3 — 113.3, 4 — 117.4, 5 — 120.

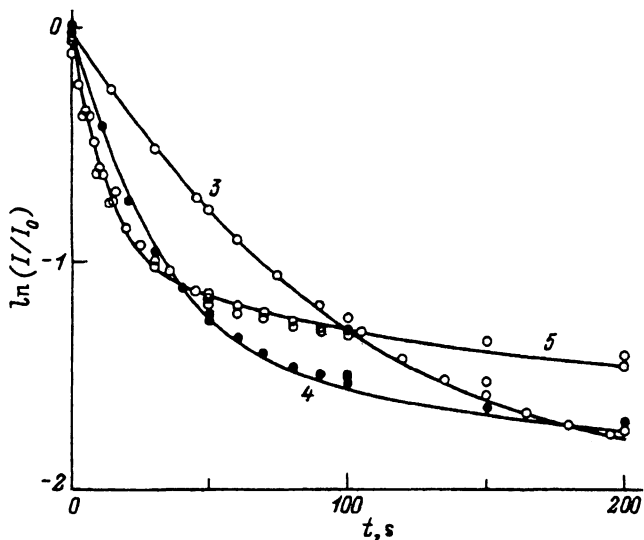


Рис. 2. Фрагмент рис. 1 в увеличенном масштабе.

$\ln(I(t)/I(0)) - t$, где t — сигнал фотопроводимости, $I(0)$ — величина этого сигнала при $t = 0$. Видно, что кривые не могут быть описаны одной экспонентой. Неудачной оказалась также попытка описать процесс гиперболой (такую зависимость наблюдали авторы работы [7]): характер кривой существенно зависел от длины волны тестирующего света, что указывало на наличие нескольких типов ловушек с различными спектрами фотоионизации.

Поэтому была предпринята попытка представить полученные данные как сумму двух экспонент, т.е. предполагалось, что кроме интересующих нас поляронных состояний (далее ловушки a -типа) суще-

ствуют ловушки другого типа (далее ловушки b -типа), которые, как и ловушки a -типа, заполняются при возбуждении F -центров F -светом и разрушаются ИК-светом, а также термически, но с иной энергией активации этого процесса. Результат оказался удовлетворительным для ловушек a -типа: полученные таким образом данные для времени жизни ловушек a -типа $\tau(a)$ хорошо укладывались на прямую в координатах $\ln \tau - (1/T)$, давая энергию активации $H(a) = 0.3 \text{ eV}$, но неудовлетворительными для ловушек b -типа: данные для $\tau(b)$ плохо укладывались на прямую, давая большой разброс.

Тогда для получения данных, позволяющих точнее определять $\tau(b)$, была предпринята попытка определить такую длину волны тестирующего света, чтобы вклад ловушек b -типа в результирующий сигнал фотопроводимости был больше.

Для этого была измерена спектральная характеристика фотопроводимости при температуре $T = 118.8 \text{ K}$, при которой $\tau(a) = 12 \text{ s}$. Причем тестирование ИК-светом производилось не при $t = 0$, а при $t = 30 \text{ s}$, т.е. тогда, когда ловушки a -типа почти полностью опустошились, а вклад их в сигнал фотопроводимости пренебрежимо мал. Спектральная характеристика дала резкое увеличение сигнала при уменьшении длины волны в исследуемом ($1.0\text{--}2.5 \mu\text{m}$) диапазоне длин волн. После чего для $\lambda = 1 \mu\text{m}$ (согласно сделанному выше предположению, для данной длины волны тестирующего света мы должны получить максимальный в доступном диапазоне длин волн вклад ловушек b -типа) были измерены кривые термоопустошения ловушек для ряда температур. По техническим причинам измерения велись с постоянно открытыми холодными заслонками. Полученные кривые прекрасно разлагались на сумму двух экспонент, одна из которых соответствовала ловушкам a -типа, а другая представляла собой экспоненту с одинаковым для всех температур временем $\tau = 5000 \text{ s}$.

Отсюда стало ясно, что мы имеем более сложный случай, чем предполагалось, а именно имеются три типа ловушек. Кроме a - и b -типов имеется также c -тип, имеющий время жизни в исследуемом интервале температур ($105\text{--}123 \text{ K}$), по крайней мере в несколько раз больше 5000 s , т.е. тип практически стабильных при этих температурах ловушек. Наблюдаемое время жизни 5000 s определяется разрушением этих ловушек ИК-светом (непреднамеренное тепловое излучение, проникающее через окна криостата вследствие открытых холодных заслонок), что и приводит к независимости времени жизни от температуры. Максимум спектра фотоионизации для ловушек c -типа мы не достигли, так как он соответствует длине волны меньше $1 \mu\text{m}$. Вклад же от ловушек b -типа в сигнал при длине волны тестирующего света $1 \mu\text{m}$ пренебрежимо мал, что и определило его отсутствие на полученных при $\lambda = 1 \mu\text{m}$ кривых.

Специальный эксперимент показал, что ловушки c -типа, как и ловушки a - и b -типов, практически полностью разрушаются под действием используемого в измерениях импульса очищающего ИК-света. В противном случае для получения корректных данных пришлось бы подобрать новые параметры этого импульса: длительность, интенсивность, спектр.

Таким образом, обработку полученных данных термического опустошения ловушек следует производить, опираясь на формулу

$$I(t)/I(0) = a \exp(-t/\tau(a)) + b \exp(-t/\tau(b)) + c$$

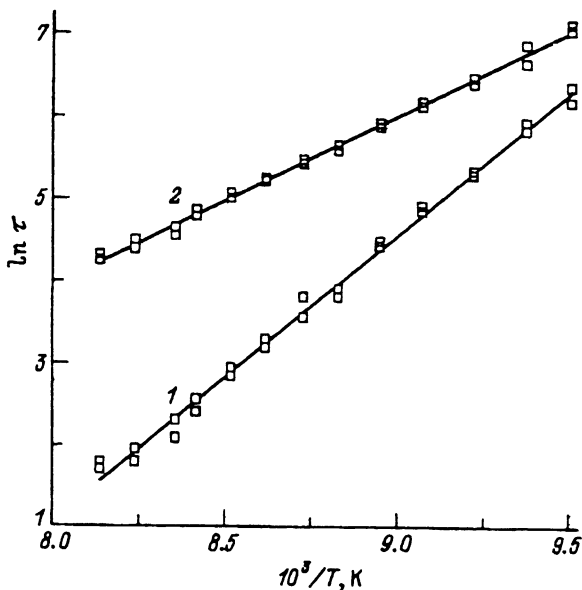


Рис. 3. Зависимость времени жизни от температуры для ловушек. 1 — *a*-тип (поляронов), 2 — *b*-тип.

при условии $a + b + c = 1$, где $I(t)$ — сигнал фотопроводимости, a , b , c — коэффициенты, отражающие вклад ловушек соответственно *a*-, *b*- и *c*-типов в сигнал фотопроводимости, и, следовательно, амплитуды соответствующих экспонент, $\tau(a)$ и $\tau(b)$ — времена жизни ловушек *a*- и *b*-типов соответственно.

Результаты обработки оказались хорошими. Кривые, построенные по этой формуле с подобранными параметрами a , b , c , $\tau(a)$ и $\tau(b)$, хорошо совпали с экспериментальными точками (рис. 1,2), причем зависимости от температуры не только $\tau(a)$, но и $\tau(b)$ в координатах $\ln \tau - (I/T)$ хорошо укладывались на прямые (рис. 3), дав для ловушек *a*-типа величину энергии активации $H(a) = 0.303 \text{ eV}$, а для ловушек *b*-типа — $H(b) = 0.18 \text{ eV}$.

Таким образом, в проведенном исследовании были получены следующие результаты.

1) Показано, что процесс термического опустошения связанных поляронных состояний в кристалле KCl описывается экспоненциальной зависимостью с энергией активации этого процесса $H(a) = 0.303 \text{ eV}$ и характерной частотой $\omega(a) = 0.57 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1}$.

2) Определенная нами величина $H(a)$ для KCl отличается от таковой, определенной в работе [7] (0.33 eV), как это было и в случае NaCl (0.164 и 0.22 eV соответственно), что связано, по-видимому, с тем, что в работе [7] обработка данных велась в предположении о гиперболической зависимости, описывающей процесс термораспада этих состояний.

3) Найдено, что кроме поляронных состояний в кристалле KCl имеются еще два других типа электронных ловушек, дающих ИК-фотопроводимость (опустошаемых ИК-светом). Один из них характеризуется следующими параметрами: энергией активации термо-

опустошения $H(b) = 0.18 \text{ eV}$, характерной частотой этого процесса $\omega(b) = 0.38 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$; спектр фотоионизации лежит при $\lambda > 1 \mu\text{m}$ (при $\lambda = 1 \mu\text{m}$ эти ловушки дают пренебрежимо малый вклад в сигнал фотопроводимости, далее этот сигнал растет при увеличении λ до $1.5 \mu\text{m}$ и мало изменяется в диапазоне $1.5\text{--}2.5 \mu\text{m}$). Максимум спектра фотоионизации другого типа лежит при $\lambda < 1 \mu\text{m}$, и в исследуемом интервале температур эти ловушки практически стабильны.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 95-02-06105а).

Список литературы

- [1] Е.В. Коровкин, Т.А. Лебедкина. ФТТ **29**, 9, 2807 (1987).
- [2] Е.В. Коровкин, Т.А. Лебедкина. ФТТ **33**, 8, 2481 (1991).
- [3] Е.В. Коровкин, Т.А. Лебедкина. ФТТ **33**, 10, 2822 (1991).
- [4] Е.В. Коровкин, Т.А. Лебедкина. ФТТ **33**, 1, 120 (1991).
- [5] Е.В. Коровкин, Т.А. Лебедкина. ФТТ **35**, 3, 642 (1993).
- [6] Е.В. Коровкин, Т.А. Лебедкина. ФТТ **37**, 11, 3536 (1995).
- [7] G. Jacobs. Phys. Stat. Sol. (b) **129**, 755 (1985).
- [8] G. Hoebeek, J. Provoost, S. Jacobs. Phys. Stat. Sol. (b) **115**, K33 (1983).