

# Влияние пластической деформации на стимулированную $F$ -светом ИК-фотопроводимость в окрашенных кристаллах NaCl

© Е.В. Коровкин, Т.А. Лебекина

Институт физики твердого тела Российской академии наук,  
142432 Черноголовка, Московская обл., Россия

E-mail: korovkin@issp.ac.ru,  
tlebyod@issp.ac.ru

(Поступила в Редакцию 8 января 2002 г.  
В окончательной редакции 14 марта 2002 г.)

Обнаружено, что пластическая деформация окрашенных гамма-облучением образцов NaCl приводит к появлению в спектре ИК-фотопроводимости, стимулированной возбуждающим  $F$ -центры светом ( $F$ -светом), полосы, простирающейся по энергии фотонов от 0.65 до 1.11 eV и далее и имеющей два отчетливых максимума при 0.74 и 0.88 eV. Хорошее согласие положения первого из них со спектром ИК-гашения фотопластического эффекта дает основание для предположения о том, что он связан с дислокационным электронным уровнем.

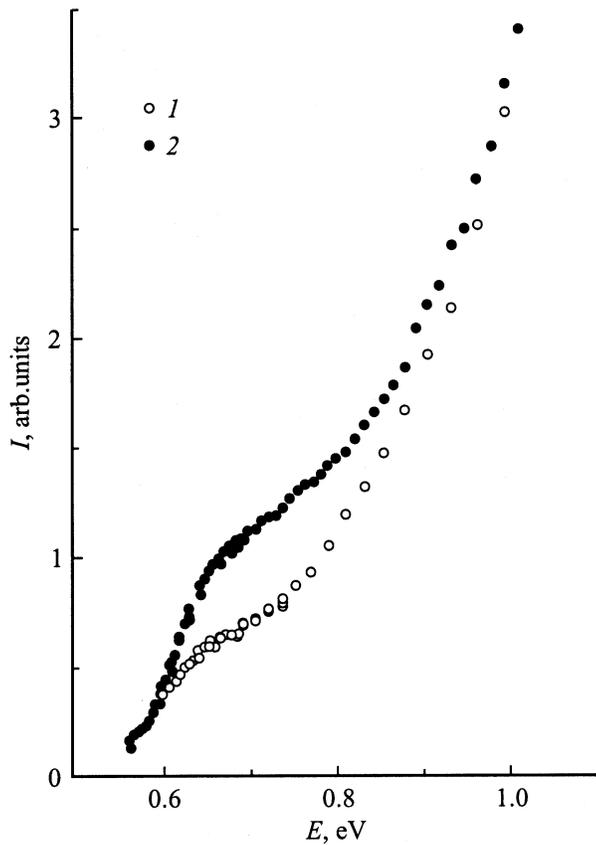
**1.** Фотопластический эффект (ФПЭ, увеличение деформирующего напряжения при освещении образца светом) обнаружен в окрашенных щелочно-галогидных кристаллах (ЩГК) в 1964 г. [1] и интенсивно изучался в последующие годы [2–13]. Исследования ФПЭ в ЩГК, выполненные с использованием метода дислокационного внутреннего трения [2,3], показали, что за ФПЭ в ЩГК ответственна перестройка в системе точечных дефектов — создание фотостопоров. В то же время многие исследования [2,3,7–9] указывают на то, что существуют два способа образования фотостопоров. Первый, когда электроны, освобожденные под действием света из  $F$ -центров, захватываются соответствующими точечными дефектами во всем освещенном светом объеме образца. Дислокации, двигаясь по кристаллу, могут встретиться с некоторыми из этих фотостопоров, что приведет к увеличению требуемого для их движения напряжения. Кроме этого реализуется другой механизм. Освобожденные из  $F$ -центров электроны захватываются на дислокации. Далее, передвигаясь по дислокациям и вместе с дислокациями по кристаллу, эти электроны встречаются с такими же дефектами. При этом образуются фотостопоры уже сразу на линии дислокации, что делает этот механизм более эффективным. В 1971 г. Ермаковым и Надгорным был обнаружен эффект инфракрасного гашения (ИКГ) ФПЭ в ЩГК [4], спектральному максимуму которого соответствовала энергия ИК-фотона около 0.7 eV, что по предложенной авторами модели ИКГ ФПЭ соответствовало глубине залегания дислокационного электронного уровня. Конечно, можно было бы предположить, что ИК-свет действует не на дислокационный электрон, а непосредственно на фотостопоры, разрушая их, но, как было показано в [3], фотостопоры разрушаются оранжевым светом (620 nm), а не ИК-светом.

Попытка применить для изучения дислокационного электронного уровня метод фотопроводимости (ФП) была предпринята нами в 1987 г. Наблюдались ожидаемый

эффект увеличения ФП при дополнительной подсветке ИК-светом и существование стимулированной  $F$ -светом (светом, возбуждающим  $F$ -центры) ИК-фотопроводимости (ИК-ФП). Оказалось, однако, что эти эффекты были связаны не с дислокациями в образце, а с наличием в исследованных кристаллах ЩГК (NaCl, KCl, KBr) специфических электронных ловушек поляронного типа, изучение которых было выполнено нами [14–16]. Эти исследования привели также к необходимости значительно усовершенствовать используемую методику ФП в ЩГК и других диэлектриках. В настоящей работе предпринята вторая попытка обнаружить и исследовать дислокационный электронный уровень в NaCl с помощью методики ФП.

**2.** Предполагается, что наличие дислокационного электронного уровня может привести к наличию в образцах, содержащих большое количество дислокаций, стимулированной  $F$ -светом ИК-ФП в районе энергии фотонов около 0.7 eV. Из работы [15] стало ясно, что наблюдение этого явления следует проводить при  $T > 90$  К (для NaCl), так как при меньшей температуре наличие ранее обнаруженных ловушек препятствуют его наблюдению. При  $T > 90$  К в NaCl время жизни этих ловушек становится столь малым, что к моменту наблюдения ИК-ФП после предварительной обработки образца  $F$ -светом (временной интервал не менее 1 s) они уже успеют термически опустошиться. В то же время оказалось, что в районе комнатной температуры при измерениях появляются токи, связанные с опустошением более глубоких, чем исследованные ранее, ловушек, а также токи, связанные с переориентацией существующих в кристалле диполей. Таким образом, пригодный для работы диапазон сузился до 100–200 К.

Для исследований использовались окрашенные гамма-облучением до дозы  $10^7$  rad образцы NaCl сечением  $4 \times 4$  mm и длиной 11–12 mm. Пластическая деформация осуществлялась сжатием вдоль длинной оси образца на испытательной машине типа „Инстрон“ со



**Рис. 1.** Спектры стимулированной  $F$ -светом ИК-фотопроводимости. 1 — недеформированный образец NaCl, 2 — тот же образец после пластической деформации ( $\varepsilon = 10\%$ ) сжатием.

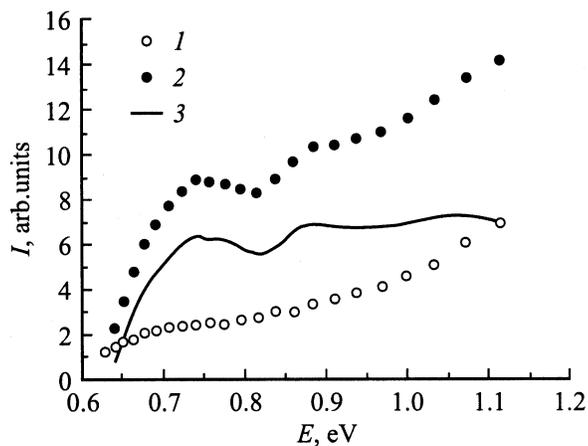
скоростью  $20 \mu\text{m}/\text{min}$  до степени деформации 10–15% при комнатной температуре. Спектры стимулированной  $F$ -светом ИК-ФП образцов, содержащих значительное количество дислокаций (пластическая деформация 10%) и не содержащих таковых (не деформированных пластически), измеренных при  $T = 140 \text{ K}$  в обычном [16] режиме, представлены на рис. 1. Режим каждого измерения состоял из освещения образца  $F$ -светом (вольфрамовая лампа СИ-8, фильтры СС-8 и СЗС-25) в течение 10 s, фиксации сигнала ИК-фотопроводимости (монохроматический свет в диапазоне 0.6–1.2 eV) в течение 7 s и опустошении оставшихся занятыми электронных состояний под действием мощного ИК-света (лампа СИ-8, фильтр ИКС-1) в течение 5 s. Из рисунка видно, что на спектре деформированного образца имеется особенность при энергии фотона 0.7 eV, свидетельствующая о наличии пика в этом месте, наблюдаемого на фоне резкого подъема сигнала при движении в сторону больших энергий. Такой же резкий подъем имеется и на спектре недеформированного образца. Предположив, что за этот подъем ответственны электронные ловушки, лежащие в диапазонах оранжевого, красного и ближнего ИК-света, мы предприняли попытку улучшить результат за счет уменьшения концентрации этих ловушек.

Для этого процедура каждого измерения после освещения образца  $F$ -светом была усложнена включением дополнительной его засветки с целью опустошения нежелательных ловушек. Кроме того, процесс измерения был оптимизирован выбором температуры, спектров и длительностей освещения образца как светом возбуждения (ранее  $F$ -свет), так и светом дополнительной обработки. Спектр света возбуждения был расширен в сторону более длинных волн, до 690 nm на уровне 50% пропускания и до 740 nm на уровне 10% пропускания, чтобы одновременно с возбуждением  $F$ -центров разрушить нежелательные ловушки (вместо суммы фильтров СС-8 и СЗС-25 был использован фильтр СЗС-25 толщиной 5 mm). При этом было бы желательно иметь резкий спад пропускания в диапазоне 800–1000 nm, чтобы не разрушать исследуемые состояния в ИК-диапазоне. К сожалению, фильтров, прозрачных в видимой области и имеющих более резкий, чем фильтр СЗС-25, спад пропускания в этом диапазоне, не существует.

Спектр света дополнительной обработки формировался добавлением к светофильтру СЗС-25 светофильтра ОС-14, что позволяло не пропускать свет короче 580 nm и таким образом предотвратить выброс электронов с  $F$ -центров. Поскольку наша автоматизированная установка не позволяла менять более двух комплектов светофильтров (возбуждение  $F$ -светом, дополнительная обработка и опустошение ловушек производилось освещением образца от одной и той же лампы СИ-8 за счет смены фильтров), пришлось отказаться от процедуры опустошения ловушек после каждого произведенного измерения. Отдельным опытом было найдено, что отсутствие этой процедуры не влияет на получаемый результат, по крайней мере в интересующем нас диапазоне 0.6–1.2 eV. Данный факт указывает на то, что достигаемая за длительное время возбуждения образца  $F$ -светом (30 s) концентрация заполненных состояний, интересующих нас, практически не зависит от их начальной концентрации, оставшейся от предыдущего измерения.

Ввиду весьма длительной процедуры измерения всего спектра контроль при отработке оптимального режима осуществлялся измерением сигнала в двух точках спектра: 0.75 и 0.94 eV. Измерением параметров режима добивались минимальной крутизны подъема спектральной кривой в этом диапазоне и достаточно большой величины самого сигнала. Последнее было очень важно, так как ресурс чувствительности был весь выбран — использовалась самая чувствительная шкала электрометра ( $10^{-12} \text{ A}$  на всю шкалу) и максимальное напряжение источника питания (500 eV).

Оптимальная длительность возбуждения была определена в 30 s. Вариация в небольших пределах ( $\pm 5 \text{ s}$ ) длительности возбуждения образца  $F$ -светом относительно найденной (30 s) не изменяла крутизну подъема, а влияла только на величину сигнала — при увеличении длительности возбуждения сигнал увеличивался. Однако при увеличении длительности свыше 30 s рост



**Рис. 2.** Спектры стимулированной  $F$ -светом ИК-фотопроводимости, снятые с дополнительной обработкой оранжевым светом. 1 — недеформированный образец NaCl, 2 — тот же образец после 14.65% пластической деформации сжатием, 3 — разность спектров 2 и 1.

становился медленным, и необходимость не увеличивать сильно длительность всего цикла измерения побудила остановиться на этой величине. Оптимальным временем обработки мы выбрали 20 с.

Изменение температуры в диапазоне 100–400 К практически не влияло на крутизну подъема, но влияло на величину сигнала — отклонение температуры от оптимальной (113 К) приводило к его уменьшению.

3. На рис. 2 представлены результаты измерений, выполненные на одном образце, который сначала исследовался при  $T = 113$  К в качестве недеформированного (кривая 1), затем после отогрева до комнатной температуры образец был извлечен из криостата, продеформирован со скоростью  $20 \mu\text{m}/\text{min}$  до степени деформации 14.65% и снова исследован при той же температуре и в том же режиме измерений, как и в предыдущий раз (кривая 2). Результаты измерений, выполненные на многих других образцах, практически не отличались от данных, представленных на рис. 2, особенно в диапазоне 0.6–0.95 eV. Представленные результаты выполнены при ширине щели монохроматора 1 mm. В качестве монохроматора использовался спектрофотометр ИКС-21 с призмой из LiF. Измерения, выполненные на деформированных образцах с шириной щели монохроматора 0.6 и 2 mm, дали аналогичные спектральные характеристики в диапазоне 0.6–0.95 eV и только при больших энергиях (0.95–1.2 eV) наблюдались расхождения — увеличение щели приводило к более крутому росту фототока при увеличении энергии фотонов. Таким образом, представленные на рис. 2 спектральные кривые в диапазоне 0.6–0.95 eV истинны, т. е. не зависят от используемой щели монохроматора.

Из рис. 2 видно, что в спектре пластически деформированного образца появляются два максимума при энергии фотонов 0.74 и 0.88 eV. Если предположить,

что максимуму в 0.74 eV соответствует определенное электронное состояние, дающее спектр фотопроводимости в виде более или менее симметричного колокола, то можно оценить полуширину этого спектра, так как низкоэнергетический спад его хорошо определен. Его полуширина оказывается около 0.15 eV.

4. Известно, что пластическая деформация приводит к созданию большого количества точечных дефектов и их комплексов, многие из которых могут играть роль электронных ловушек — обычная фотопроводимость в  $F$ -полосе падает в деформированном образце по сравнению с недеформированным, что объясняется уменьшением среднего пробега электрона из-за появления большого количества дополнительных ловушек. Поэтому мы не можем утверждать, что обнаруженные пики ИК-ФП имеют отношение к дислокационным электронным уровням, а не к таким ловушкам. Тем не менее неплохое согласие в положении одного из них с аналогичными величинами спектра ИК-гашения ФПЭ [4] дает возможность предположить это.

## Список литературы

- [1] J. Nedeau. *J. Appl. Phys.* **35**, 669, (1964).
- [2] Г.А. Ермаков, Е.В. Коровкин, Я.М. Соифер. *ФТТ* **16**, 697 (1974).
- [3] Г.А. Ермаков, Е.В. Коровкин, Я.М. Соифер. *ФТТ* **16**, 1756 (1974).
- [4] Г.А. Ермаков, Э.М. Надгорный. *Письма в ЖТФ* **14**, 45 (1971).
- [5] J. Deputat, Z. Pawlowski. *Bull. Acad. Polon. Sci., ser. Techn.* **13**, 69 (1965).
- [6] J.M. Cabrera and F. Agullo-Lopez. *J. Appl. Phys.* **45**, 1013 (1974).
- [7] Е.В. Коровкин. *ФТТ* **21**, 1785 (1979).
- [8] Е.В. Коровкин. *ФТТ* **23**, 2545 (1981).
- [9] Е.В. Коровкин. *ФТТ* **24**, 524 (1982).
- [10] Е.В. Коровкин. *Письма в ЖЭТФ* **35**, 481 (1982).
- [11] T. Kataoka, T. Jamada. *Proc. Yamada Conference IX on Dislocations in Solids. Tokyo, August 27–31 (1984)*. P. 467.
- [12] T. Higihara, T. Okada. *Proc. Yamada Conference IX on Dislocations in Solids. Tokyo, August 27–31 (1984)*. P. 471.
- [13] T. Higihara, Y. Hayashiuchi, T. Okada. *Proc. Yamada Conference IX on Dislocations in Solids. Tokyo, August 27–31 (1984)*. P. 475.
- [14] Е.В. Коровкин, Т.А. Лебекина. *ФТТ* **33**, 2483 (1991).
- [15] Е.В. Коровкин, Т.А. Лебекина. *ФТТ* **33**, 2822 (1991).
- [16] Е.В. Коровкин, Т.А. Лебекина. *ФТТ* **42**, 1412 (2000).