

# Термо- и фотостимулированные процессы поляризации и деполяризации в $\text{CdI}_2:\text{Ag}$

© С.С. Новосад, Б.М. Каливошка

Львовский национальный университет им. Ивана Франко,  
Львов, Украина

E-mail: novosadss@rambler.ru

(Поступила в Редакцию 30 июля 2008 г.)

Обнаружены токи термоградиентной поляризации и деполяризация электрретного состояния, возникающего в фотохромном кристалле  $\text{CdI}_2:\text{Ag}$  при одностороннем охлаждении образца в темноте от 325 до 90 К при наличии градиента температуры, направленного вдоль кристаллографической оси  $C_6$ . Кристалл, поляризованный в поле термоградиентной эдс, при 90 К характеризуется фоточувствительностью в прикраевой, примесной и инфракрасной областях спектра. Обнаружено, что электрретное состояние формируется в  $\text{CdI}_2:\text{Ag}$  также при комнатной температуре в процессе фотолиза при облучении образцов интегральным светом ксеноновой лампы. Предложены модели светочувствительных центров, образующихся как при легировании  $\text{CdI}_2$  из расплава примесью  $\text{Ag}^+$ , так и в процессе протекания термо- и фотостимулированных химических реакций. Рассматривается механизм фотохромного эффекта, включающий изменение зарядового состояния примесных ионов серебра.

PACS: 61.80.-x, 72.15.Jf, 77.22.Ej

## 1. Введение

Исследование термо- и фотостимулированных электрических процессов зачастую проводится после одностороннего охлаждения кристаллов, когда тепловой поток отводится от одного края образца. В процессе такого охлаждения при наличии градиента температуры по толщине образца в полупроводниковых кристаллах может возникать диффузионный ток [1–3]. В случае электронного полупроводника на торце образца с большей температурой возникает положительный объемный заряд, поскольку электроны диффундируют от „горячей“ области к „холодной“. В дырочном полупроводнике, наоборот, возникает отрицательный объемный заряд [4–6]. Диффузия носителей продолжается до тех пор, пока в связи с их перемещением не возникает электрическое поле (термоэдс), которое уравнивает действующие на заряды силы. Существенное влияние на образование термоэдс при низких температурах имеет также эффект захвата электронов фононами [6,7]. При одностороннем охлаждении образцов в поле термоэдс возможна их поляризация, обусловленная внутренним разделением и локализацией неравновесных электронов и дырок на центрах захвата [2,8].

Теоретическая модель явления термостимулированного направленного движения носителей заряда в облученных диэлектриках в поле температурного градиента рассмотрена в работе [2]. Авторами доказана возможность использования этого явления для обнаружения и изучения радиационных дефектов. В [9] обнаружено, что перенос неравновесных носителей заряда к поверхности кристалла за счет градиента температуры по толщине образца приводит к возбуждению термоградиентной люминесценции.

Интерес к изучению оптических и электрофизических свойств кристаллов на основе иодистого кадмия обус-

ловлен перспективами их практического применения в качестве люминофоров [10], фотохромных материалов [11,12] и фотоэлектретов [13,15]. Влияние поля термоэдс на электронные явления в люминесцентных и светочувствительных кристаллах на основе иодистого кадмия очень мало исследовано. В предыдущих наших работах [16,17] сообщалось, что при одностороннем охлаждении кристаллов  $\text{CdI}_2$  и  $\text{CdI}_2:\text{Cu}$  в темноте от 295 до 90 К при наличии в них градиента температуры, направленного вдоль кристаллографической оси  $C_6$ , наблюдается поляризация образцов и в них формируется электрретное состояние (ЭС). Обнаруженный новый тип ЭС назван нами термоградиентным электрретным состоянием (ТгЭС). Также выявлено, что ЭС образуется в  $\text{CdI}_2$  и  $\text{CdI}_2:\text{Cu}$  при комнатной температуре в процессе фотолиза при облучении образцов интегральным светом ксеноновой лампы ДКсЭл-1000. Этот тип ЭС был назван фотохромным электрретным состоянием. Возможно и другое, более удачное название — фотолизное электрретное состояние (ФтЭС).

В [18] установлено, что тушение люминесценции облученных кристаллов  $\text{CdI}_2:\text{Ag}$  вызвано безызлучательной рекомбинацией генерированных возбуждением носителей заряда на продуктах фотолиза. О выявленных ТгЭС и ФтЭС в  $\text{CdI}_2:\text{Ag}$  ранее кратко сообщалось в [19]. В настоящей работе более детально рассматриваются результаты исследования термо- и фотостимулированной поляризации и деполяризации ЭС в кристаллах  $\text{CdI}_2:\text{Ag}$ .

## 2. Методика экспериментов

Кристалл  $\text{CdI}_2:\text{Ag}$  был выращен методом Бриджмена–Стокбаргера из соли квалификации „чда“, дополнительно очищенной комплексным методом [20]. Концентрация

легирующей примеси  $AgI$  в шихте составляла около 0.5 mol.%. Образцы изготавливались методом скалывания по плоскости спайности и вырезались лезвием бритвы в виде пластин размером  $\sim 10 \times 10 \times 1$  mm. Спектры поглощения исследовались с помощью спектрофотометра Spesord M-40. Методика формирования и измерения ТгЭС в кристаллах  $CdI_2:Ag$  была аналогична описанной в работах [16,17]. В качестве источника оптического возбуждения использовали ксеноновую лампу ДКсЭл-1000. Окраска кристаллов производилась при комнатной температуре (295 K) в атмосфере воздуха путем облучения образцов интегральным светом от этой лампы. При этом образцы располагались на расстоянии  $\sim 20$  см от источника излучения. Исследования проводились в металлическом криостате в условиях вакуума  $\sim 10^{-4}$  Торг. При изучении электретенных свойств  $CdI_2:Ag$  образцы помещались между изолированными контактами измерительного конденсатора и закреплялись на кристаллодержателе. Одностороннее охлаждение образцов с градиентом температуры по толщине образца, направленным вдоль оси  $C_6$ , осуществлялось неравномерно со скоростью 0.3–0.5 K/s. С учетом результатов работы [3] можно полагать, что при охлаждении образца с такой скоростью разница температур между его плоскими поверхностями может достигать 25 K. Нагревание образцов осуществлялось со скоростью  $\sim 0.1$  K/s. Свет от ксеноновой лампы направлялся параллельно кристаллографической оси  $C_6$  кристалла. Вектор напряженности внешнего электрического поля ( $\sim 2 \cdot 10^3$  V/cm) при формировании ЭС в  $CdI_2:Ag$  был параллелен направлению распространения света. Спектры фотодеполяризации (спектральную чувствительность) измеряли при постоянном числе квантов возбуждающего света для разных длин волн в диапазоне 300–550 nm, что достигалось путем варьирования ширины щелей монохроматора. В длинноволновой области (до 1800 nm) измерения проводились при постоянной ширине щелей монохроматора 0.02–0.03 mm. Токи поляризации и деполяризации в диапазоне  $10^{-11}$ – $10^{-13}$  А регистрировались с помощью электрометрического вольтметра ВК2-16 с эталонным сопротивлением  $R_e = 10^{12}$   $\Omega$  и записывались потенциометром КСП-4. Для уменьшения влияния неконтролируемых подсветок в области максимальной фоточувствительности на результаты исследования спектры фотодеполяризации измерялись со стороны длинных волн. Температура образцов контролировалась дифференциальной медь-константановой термопарой. Термоэдс термопары измерялась с помощью вольтметра В7-21А.

### 3. Результаты и обсуждение

При исследовании оптических спектров выявлено, что активация  $CdI_2$  примесью  $AgI$  приводит к появлению дополнительного слабого поглощения в виде „плеча“ в красной области [20]. После облучения образца с обеих сторон при 295 K светом от ксеноновой лампы

в течение 10 min в спектре наблюдается фотоиндуцированное сплошное бесструктурное поглощение с оптической плотностью  $\Delta D = 0.1$ –0.3. Исходные оптические характеристики  $CdI_2:Ag$  восстанавливаются после отжига образца при температурах 450–470 K.

Кривая тока поляризации предварительно прогретого до 450 K кристалла  $CdI_2:Ag$  при понижении температуры от 325 до 90 K представлена основным широким максимумом в области 110 K и инверсией тока при температуре около 180 K (рис. 1, кривая 1). Кривая тока термостимулированной деполяризации (ТСД) ЭС, возникшего в процессе охлаждения образца, характеризуется размытой структурой с рядом максимумов вблизи 170, 260 и 290 K (рис. 1, кривая 2). Эти результаты с учетом результатов работ [3,16,17] позволяют заключить, что при одностороннем охлаждении образцов в темноте при наличии в них градиента температуры, направленного вдоль кристаллографической оси  $C_6$ , в  $CdI_2:Ag$  также формируется ТгЭС.

В спектре фотодеполяризации (ФД) ТгЭС  $CdI_2:Ag$  при 90 K обнаруживаются широкая асимметричная по-

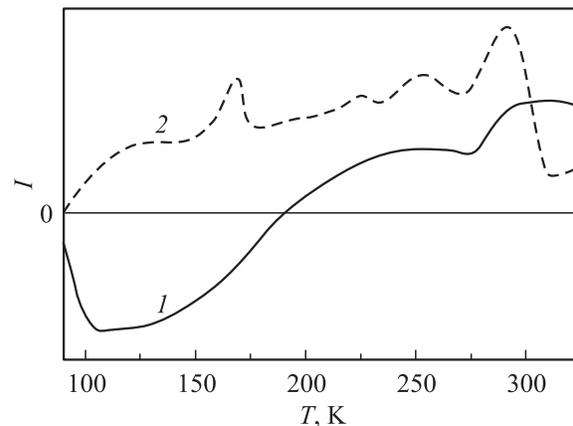


Рис. 1. Кривые тока термоградиентной поляризации (1) и ТСД ТгЭС (2) при охлаждении и нагревании кристалла  $CdI_2:Ag$ .

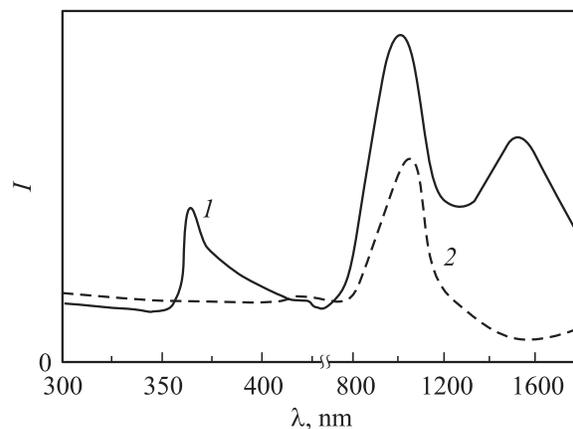
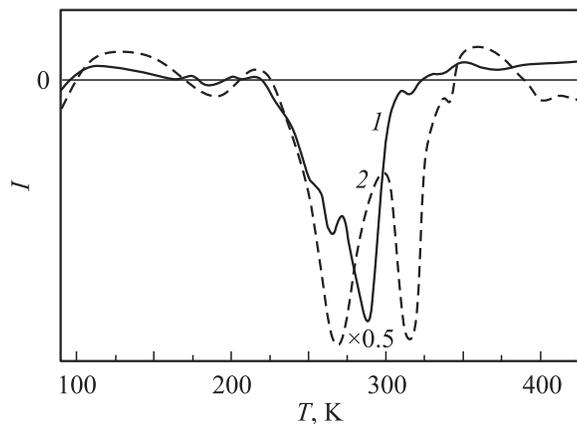


Рис. 2. Спектры ФД ТгЭС при 90 K до (1) и после (2) дополнительного облучения светом из области 365 nm в течение 5 min неокрашенного кристалла  $CdI_2:Ag$ .



**Рис. 3.** Кривые ТСД кристалла  $\text{CdI}_2:\text{Ag}$ , поляризованного в темноте внешним электрическим полем в процессе охлаждения от 295 до 90 К, до (1) и после (2) окрашивания при 295 К.

лоса в области 365–450 нм и полосы с максимумами около 1000 и 1500 нм (рис. 2, кривая 1). Аналогичные полосы также обнаружены в спектрах ФД фотоэлектретного состояния кристалла при этой температуре. Дополнительное облучение  $\text{CdI}_2:\text{Ag}$  светом из области 365 нм в течение 5 мин при 90 К приводит к уменьшению величины тока ФД ТгЭС и исчезновению максимумов 365 и 1500 нм (рис. 2, кривая 2). Длительное аналогичное облучение полностью разрушает ТгЭС. Оптическое облучение материала в области полос 1000 и 1500 нм также разрушает ЭС, образованное при охлаждении образца.

Спектр ФД предварительно облученного (окрашенного) в течение 15 мин интегральным светом ксеноновой лампы при 295 К  $\text{CdI}_2:\text{Ag}$  после одностороннего охлаждения до 90 К содержит аналогичные полосы с меньшей (примерно в 2–2.5 раза) интенсивностью. Дополнительное действие света из области 365 нм на окрашенный образец при 90 К также приводит к ослаблению его фоточувствительности. Полученные результаты исследования спектров ФД ТгЭС  $\text{CdI}_2:\text{Ag}$  качественно коррелируют с результатами исследований спектров ФД ТгЭС  $\text{CdI}_2$  [16].

Обнаружено, что ФгЭС также образуется в  $\text{CdI}_2:\text{Ag}$  при комнатной температуре в процессе его облучения с одной стороны светом ксеноновой лампы при отсутствии внешнего электрического поля. При этом облучаемая поверхность образца заряжается отрицательно. Кривая тока ТСД облученного таким образом кристалла представлена пиками в областях 395 и 450 К. В случае повторного нагревания кристалла от 295 до 470 К на кривой тока ТСД данные пики не наблюдаются, а регистрируется ток противоположного знака незначительной, почти постоянной величины.

Кривая тока ТСД предварительно прогретого до 450 К кристалла  $\text{CdI}_2:\text{Ag}$ , поляризованного в темноте внешним электрическим полем в процессе охлаждения от

295 до 90 К, кроме слабого фонового тока с отдельными максимумами в низкотемпературной области содержит интенсивный неэлементарный пик при 290 К и слабые пики в областях 268 и 315 К (рис. 3, кривая 1). Предварительное облучение кристалла светом ксеноновой лампы при 295 К приводит к существенному ослаблению пика 290 К и относительному усилению пиков 268 и 315 К (рис. 3, кривая 2). На кривых ТСД аналогично поляризованных электрическим полем образцов неактивированного кристалла  $\text{CdI}_2$  и кристалла  $\text{CdI}_2$  с изовалентной примесью  $\text{Pb}^{2+}$  до и после аналогичного оптического облучения при 295 К обнаруживаются пики в основном в области температур 310–340 К.

Учитывая результаты исследований [12,14,21], дополнительное поглощение  $\text{CdI}_2:\text{Ag}$ , наблюдаемое в виде „плеча“ в прикраевой области до 450 нм, можно связать с междоузельными атомами кадмия  $\text{Cd}_i^0$ . Отсутствие в спектрах поглощения примесных полос, связанных с переходами  $4d^{10}-4d^95s^1$  в  $\text{Ag}^+$ , вызвано тем, что возбужденные состояния таких центров попадают в зону проводимости матрицы кристалла.

Авторами [22] обнаружено, что при охлаждении кристалла  $\text{CdS}$  в темноте на температурной зависимости проводимости в области 300–80 К наблюдается участок резкого нарастания тока; при этом величина тока тем больше, чем больше скорость охлаждения образца. Обнаруженный эффект аномальной температурной зависимости проводимости имеет место как в чистых, так и в активированных кристаллах  $\text{CdS}$  независимо от способа их выращивания. Рост тока при охлаждении кристаллов может быть связан с увеличением концентрации электронов проводимости. Проведенные в [23] исследования также показали, что при изменении температуры с градиентом, направленным вдоль кристаллографической оси  $C$ , в образцах  $\text{CdS}$  наблюдается эмиссия электронов с базисных граней. Характерным является то, что эффекты аномальной температурной зависимости проводимости и эмиссии электронов при охлаждении образцов коррелируют.

В работе [24] было показано, что парамагнитными центрами в монокристаллах  $\text{CdS}$  и  $\text{CdS}:\text{Cu}$  являются донорно-акцепторные (ДА) пары, роль акцептора в которых играет  $V_{\text{Cd}}$  или  $\text{Cu}_{\text{Cd}}$ , а донорами могут быть примесные атомы или собственные точечные дефекты, например  $\text{Cu}_i$  или  $\text{Cd}_i$ . Облучение разрушает ДА-пары, присутствующие в исходных кристаллах. Электронное облучение монокристаллов  $\text{CdS}:\text{Cu}$  ведет к образованию акцепторов  $\text{Cu}_{\text{Cd}}$  и доноров  $\text{Cd}_i$ . Последние, объединяясь в преципитаты, образуют глубокие уровни с  $E = 0.95-1.0$  эВ, играющие роль быстрых центров ( $s$ -центров) рекомбинации. Увеличение собственной фотопроводимости после отжига при 100–150°С в облученных  $\text{CdS}:\text{Cu}$  свидетельствует об отжиге части  $s$ -центров, т. е. о распаде преципитатов  $\text{Cd}_i$ .

Дополнительными исследованиями по методике, описанной в [23], также обнаружено, что при одностороннем охлаждении образцов  $\text{CdI}_2:\text{Ag}$  наибольшая эмиссия

электронов наблюдается именно в низкотемпературной области 273–77 К с приблизительно в 5 раз большей интенсивностью, чем в  $CdI_2$ . Эмиссия электронов из кристаллов также обнаруживается в процессе их нагревания от 77 до 160 К.

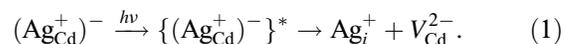
Из полученных результатов следует, что эффект поляризации образцов в темноте в процессе понижения температуры от 295 до 90 К с градиентом температуры, направленным вдоль оси  $C_6$ , обнаруживается как в чистых, так и в активированных ионами  $Cu^+$  и  $Ag^+$  кристаллах  $CdI_2$ . С учетом данных работ [22,23], это дает основание полагать, что в процессе охлаждения в образцах  $CdI_2 : Ag$  аналогично случаю  $CdI_2$  [16] обнаруженные токи поляризации обусловлены направленным движением термогенерированных неравновесных носителей заряда в поле температурного градиента по толщине образца. В исследуемом кристалле ТгЭС также формируется вследствие автолокализации и локализации генерированных охлаждением неравновесных носителей заряда на центрах захвата, связанных с собственными и примесными дефектами. По мере нагревания кристалла происходит термодеполяризация образованного ТгЭС как за счет появления нового термоградиентного поля противоположного направления, так и в результате освобождения носителей из ловушек.

Максимум в спектре ФД ТгЭС кристалла  $CdI_2 : Ag$ , наблюдаемый в области 365 нм, может быть связан с переходом от объемной к поверхностной рекомбинации генерированных возбуждением неравновесных носителей заряда. В данном случае под действием оптического возбуждения ионизируется не активатор, а анионы основного вещества. Фоточувствительность  $CdI_2 : Ag$  в более длинноволновой примесной области до 450 нм может быть обусловлена фототермической ионизацией центров  $Cd_i^0$  [12,25]. Два пика фоточувствительности в инфракрасной (ИК) области спектра были обнаружены ранее в спектрах ФД ТгЭС неактивированного  $CdI_2$  [16]. Фоточувствительность образцов  $CdI_2 : Ag$  в этой области связывается с фототермической ионизацией центров  $F$ - и  $F'$ -типа. Деполяризация  $CdI_2 : Ag$  при облучении светом из ИК-области имеет в основном объемный характер. В этом случае освобожденные из ловушек электроны преимущественно рекомбинируют с дырочными центрами  $I_2^-$ , локализованными вблизи  $(Ag_{Cd}^+)^-$ -центров. Различную чувствительность электронных центров  $F$  и  $F'$ , ответственных за максимумы ФД ФтЭС  $CdI_2 : Ag$  1000 и 1500 нм, к свету из области 365 нм можно объяснить разным их зарядовым состоянием, а также неодинаковым распределением по толщине образца.

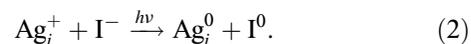
В случае оптического облучения при 90 К  $CdI_2 : Ag$  в прикрасной области генерированные возбуждением неравновесные носители заряда разрушают внутреннее электрическое поле ЭС, образованного в поле температурного градиента образца. По этой причине сильно ослабляется фоточувствительность материала.

При 295 К в окрашенном кристалле  $CdI_2 : Ag$  (подобно  $CdI_2$  [16] и  $CdI_2 : Cu$  [17]) обнаруживается ФтЭС, связанное с фотолизом и с пространственным разделением и локализацией фотогенерированных носителей заряда разного знака при наличии поля Дембера [26]. Можно полагать, что образование ФтЭС эквивалентно электронной стадии фотолизного процесса [20]. При захвате неравновесных носителей заряда происходит фотодиссоциация светочувствительных центров как типов  $\{(Ag_{Cd}^+)^- - Cd_i^+\}$ ,  $\{(Ag_{Cd}^+)^- - Ag_i^+\}$ , так и типа  $\{(Ag_{Cd}^+)^- - V_i^+\}$ . В первых двух случаях фотодырки локализируются на ионах галоида возле центров  $(Ag_{Cd}^+)^-$ , а электроны захватываются центрами  $Cd_i^+$  и  $Ag_i^+$  с образованием коллоидных частиц  $nCd^0$  и  $nAg^0$  [25,27]. Процессы, связанные с фотостимулированным разрушением аналогичных центров  $\{(Cu_{Cd}^+)^- - Cu_i^+\}$  и  $\{(Au_{Cd}^+)^- - Cd_i^+\}$  в кристаллах  $CdI_2 : Cu$  и  $CdI_2 : Au$ , рассматривались в работах [17,28].

В третьем случае фотостимулированная диссоциация ДА-комплексов  $\{(Ag_{Cd}^+)^- - V_i^+\}$ , вероятно, протекает по механизму возбуждения примесных центров  $(Ag_{Cd}^+)^-$  и их атермической диффузии [25]. При этом образование френкелевских пар дефектов происходит по схеме



Оптическую окраску  $CdI_2 : Ag$  можно записать как химическую реакцию



После ионизации ионов  $I^-$  фотоэлектроны захватываются междоузельными центрами  $Ag_i^+$  с образованием частиц  $Ag_i^0$ , а фотодырки локализируются на вакансиях кадмия  $V_{Cd}^{2-}$ , ассоциированных с анионными вакансиями  $V_i^+$ . Образование коллоидных частиц  $nCd^0$  и  $nAg^0$  происходит вблизи линейных дефектов кристалла, являющихся центрами коагуляции. Эти продукты фотолиза ответственны за поглощение и рассеивание света в области прозрачности матрицы.

Из полученных результатов следует, что кривая тока ТСД термоэлектретного состояния (ТЭС) до окрашивания образца  $CdI_2 : Ag$  характеризуется в основном одним пиком. После окрашивания на кривой тока ТСД ТЭС доминируют два других пика. Это дает основание полагать, что основными светочувствительными центрами в исследованном материале являются ДА-пары  $\{(Ag_{Cd}^+)^- - V_i^+\}$ , которые обуславливают пик ТСД, связанный с дипольной релаксацией при 290 К. Образованные в процессе оптической окраски новые центры  $\{(V_{Cd}^{2-} - I^0) - V_i^+\}$  могут быть ответственны за усиление пика ТСД при 268 К. Возникшие в процессе фотостимулированного распада ассоциатов  $\{(Ag_{Cd}^+)^- - V_i^+\}$  изолированные  $V_i^+$ -центры, вероятно, обуславливают увеличение интенсивности пика ТСД около 315 К, имеющего объемно-зарядовый характер.

Учитывая данные работ [16,17,28,29], можно полагать, что термическое обесцвечивание  $\text{CdI}_2:\text{Ag}$  в области температур, совпадающей с возникшим после окрашивания образца пиком ТСД 440–470 К, связано с рекомбинацией дырок, термоделокализованных из центров  $\{(V_{\text{Cd}}^{2-} - I^0) - V_{\text{I}}^+\}$ , с частицами коллоидных кластеров  $n\text{Ag}^0$ . При этом в результате рекомбинации образуются ионы  $\text{I}^-$  и  $\text{Ag}^+(n-1)\text{Ag}^0$ . Последующая ионная стадия заключается в отрыве  $\text{Ag}^+$  от положительно заряженной гранулы. Образованные центры  $\text{Ag}^+$  после миграции встраиваются в вакантные узлы катионов  $\text{Cd}^{2+}$ , ассоциированные с анионными вакансиями. Этому процессу содействуют статические поля возобновленных ионов  $\text{I}^-$  и центров  $V_{\text{Cd}}^{2-}$ . В результате это приводит к „рассасыванию“ коллоидных частиц атомов серебра и образованию светочувствительных комплексов примесью-дефект  $\{(\text{Ag}_{\text{Cd}}^+)^- - V_{\text{I}}^+\}$ . Протекание таких термостимулированных электронно-ионных процессов приводит к восстановлению исходных спектральных характеристик  $\text{CdI}_2:\text{Ag}$ .

#### 4. Заключение

Обнаружены токи термоградиентной поляризации и деполяризации ТгЭС, возникающего в фотохромном кристалле  $\text{CdI}_2:\text{Ag}$  при охлаждении в темноте от 325 до 90 К в поле температурного градиента. Поляризованный при охлаждении кристалл характеризуется фоточувствительностью в прикраевой, примесной и ИК-областях спектра. В процессе облучения интегральным светом ксеноновой лампы при комнатной температуре в  $\text{CdI}_2:\text{Ag}$  образуется ФтЭС. Образование такого ЭС эквивалентно электронной стадии фотолизного процесса. Предполагается, что основными светочувствительными центрами в  $\text{CdI}_2:\text{Ag}$  являются ДА-пары  $\{(\text{Ag}_{\text{Cd}}^+)^- - V_{\text{I}}^+\}$ , которые обуславливают пик ТСД, связанный с дипольной релаксацией при 290 К. После окрашивания кристалла в основном обнаруживаются дипольные центры  $\{(V_{\text{Cd}}^{2-} - I^0) - V_{\text{I}}^+\}$ , ответственные за пик ТСД при 268 К, и  $V_{\text{I}}^+$ -центры, обуславливающие пик ТСД при 315 К, имеющий объемно-зарядовый характер. Термическое обесцвечивание облученного  $\text{CdI}_2:\text{Ag}$  происходит в области температур 440–470 К в результате рекомбинации дырок, термоделокализованных из центров  $\{(V_{\text{Cd}}^{2-} - I^0) - V_{\text{I}}^+\}$ , с частицами коллоидных кластеров  $n\text{Ag}^0$ .

#### Список литературы

- [1] А.Б. Лыскович, С.А. Пирого. УФЖ **31**, 4, 595 (1986).
- [2] А.В. Андрущенко, С.Е. Ковалев, А.Н. Панова. В сб.: Науч. тр. ВНИИ монокристаллов, сцинтилляционных материалов и особо чистых хим. веществ. Харьков (1980). Т. 6. С. 73.
- [3] А.В. Гальчинский, Я.М. Захарко, И.Б. Катерняк. УФЖ **37**, 8, 1249 (1992).
- [4] А.Ф. Иоффе. Полупроводниковые термоэлементы. Изд-во АН СССР, М.–Л. (1960). 188 с.
- [5] Я. Тауц. Фото- и термоэлектрические явления в полупроводниках. ИЛ, М. (1962). 253 с.
- [6] К.В. Шалимова. Физика полупроводников. Энергоатомиздат, М. (1985). 392 с.
- [7] А.М. Конин. ФТП **31**, 6, 692 (1997).
- [8] Б.А. Гороховатский. Основы термодеполяризационного анализа. Наука, М. (1981). 173 с.
- [9] A. Mevid, V. Sotnikov. Book of abstracts the 4th Int. Conf. infrared. phys. Zurich (1988). P. 45.
- [10] S.S. Novosad, I.S. Novosad, V.E. Goncharuk, L.V. Kostyk. Functional Mater. **11**, 4, 735 (2004).
- [11] S. Novosad, M. Rudka, B. Kalivoshka, I. Matvijishyn, S. Charambura. Book of abstracts the 6th Eur. Conf. on luminescent detectors and transformers of ionizing radiation (LUMDETR). Lviv (2006). P. 186.
- [12] С.С. Новосад. УФЖ **45**, 11, 1311 (2000).
- [13] А.Б. Лыскович, О.Б. Кушнир, А.В. Гальчинский. Изв. АН СССР. Неорганич. материалы **19**, 11, 1823 (1983).
- [14] И.М. Болеста, А.В. Гальчинский, И.В. Китык. ФТТ **37**, 5, 1536 (1995).
- [15] С.С. Новосад, Р.О. Ковалюк. Неорганич. материалы **33**, 11, 1393 (1997).
- [16] Б.М. Каливошка, С.С. Новосад. Фіз. і хім. твердого тіла **6**, 4, 555 (2005).
- [17] С.С. Новосад, Б.М. Каливошка. Фіз. і хім. твердого тіла **8**, 4, 753 (2007).
- [18] S.S. Novosad, A.V. Lyskovich, Ya.A. Pastyrski, V.M. Kostyuk. Functional Mater. **7**, 1, 62 (2000).
- [19] S.S. Novosad, V.M. Kalivoshka. Book of abstracts the Int. Conf. „Crystal materials-2007“ (ICCM-2007). Kharkov (2007). P. 152.
- [20] Широкозонные слоистые кристаллы и их физические свойства / Под ред. А.Б. Лысковича. Вища шк., Львов (1982). 148 с.
- [21] И.М. Болеста, И.В. Китык, В.И. Ковалиско, Р.М. Турчак. УФЖ **39**, 11–12, 1084 (1994).
- [22] Н.Е. Кореунская, И.В. Маркевич, Е.П. Шульга. УФЖ **33**, 11, 1673 (1988).
- [23] Б.З. Цибуляк. Автореф. канд. дис. Львов. ун-т им. Ивана Франко, Львов (2006). 20 с.
- [24] Г.Е. Давидюк, В.В. Божко, Л.В. Булатецкая. ФТП **42**, 10, 1263 (2008).
- [25] Физика соединений  $A^{II}B^{VI}$  / Под ред. А.Н. Георгобиане, М.К. Шейнкмана. Наука, М. (1986). 320 с.
- [26] V.M. Kostyuk, A.V. Lyskovich, I.M. Matviishyn, S.S. Novosad. Functional Mater. **7**, 2, 220 (2000).
- [27] А.М. Гурвич. Введение в физическую химию кристаллофосфоров. Высш. шк., М. (1982). 376 с.
- [28] S.S. Novosad, V.M. Kalivoshka. Book of abstracts the XIVth Int. Seminar on physics and chemistry of solids. Lviv (2008). P. 52.
- [29] Т.В. Панченко, К.Ю. Стрелец. ФТТ **50**, 10, 1824 (2008).