

Фотоуправляемая магниторезонансная пластичность γ -облученных кристаллов KCl:Fe

Р. Б. Моргунов¹⁾

Учреждение Российской академии наук Институт проблем химической физики
142432 Черноголовка, Московская обл., Россия

Поступила в редакцию 9 июня 2010 г.

Обнаружено фотоуправляемое резонансное уменьшение микротвердости, вызванное приложением взаимно перпендикулярных постоянного и микроволнового магнитных полей в γ -облученных кристаллах KCl:Fe. Установлено, что магнитоупругость кристаллов γ -KCl:Fe, не подвергавшихся фотоэкспозиции, обусловлена резонансным влиянием магнитных полей на два типа примесных центров: 1) центры, содержащие ионно-вакансионные пары $Fe^{2+}-v_c$, 2) центры, содержащие ионы Fe^+ . Освещение кристаллов γ -KCl:Fe F -светом (с длиной волны $\lambda = 500-600$ нм) приводит к перестройке спектра электронного парамагнитного резонанса, детектируемого по изменению микротвердости. Влияние F -света на спектры магниторезонансной пластичности заключается в подавлении спектров ионов $Fe^{2+}-v_c$ с эффективными g -факторами 7.0 и 3.5 в результате их рекомбинации с F -электронами и восстановления до центров Fe^+ с g -факторами 2.2 и 4.1.

1. Введение. Магнитоупругость кристаллов в постоянном магнитном поле, обусловленная спин-зависимым взаимодействием дефектов структуры, была обнаружена группой Альшица (подробный обзор см. в [1]). Магниторезонансная пластичность (изменение пробега дислокаций и других характеристик пластичности в постоянном и микроволновом магнитных полях, удовлетворяющих условиям парамагнитного резонанса) была обнаружена в кристаллах NaCl в работе [2]. В дальнейшем различными группами авторов это явление было обнаружено как в различных ионных [2–8], так и в полупроводниковых кристаллах [9, 10]. обстоятельный анализ этих явлений дан в недавнем обзоре [11]. Возможность влияния скрещенных постоянного и микроволновых полей на пластичность кристаллов в условиях парамагнитного резонанса является прямым доказательством влияния спин-зависимых процессов на подвижность дислокаций в кристаллах. Главную часть магнитоупругого эффекта связывают с влиянием магнитного поля на эволюцию пар дефектов, генерируемых вблизи ядра движущихся дислокаций [1, 11]. Эти эффекты теоретически рассмотрены и интерпретированы в [1, 11–14]. Другая существенная часть магнитоупругого эффекта связана с влиянием магнитного поля на спин-зависимую кинетику агрегирования примеси в кристаллической решетке ионных кристаллов [15–17]. Процесс термоактивированного блуждания парамагнитных точечных дефектов (ионов примеси) в кристаллической решетке спин-

зависимый, поскольку он сопровождается их встречами и образованием так называемых “контактных” пар (димеров), эволюция спинов в которых управляется магнитным полем, как и конечный результат их встречи (распад или дальнейшее укрупнение). От мультиплетности таких пар, управляемой магнитным полем, зависит вероятность того, образуется ли устойчивая пара с обменно-связанными спинами или снова распадется на исходные компоненты [15]. Как правило, величина наблюдаемых эффектов значительно превышает величину $\sim \mu_B g B / kT \sim \sim 1\%$, ожидаемую для термализованных носителей спинов в парах (μ_B – магнетон Бора, g – “ g -фактор”, $B \sim 1$ Тл – индукция магнитного поля, k – постоянная Больцмана, $T \sim 300$ К – температура). Это связано с тем, что время жизни контактных пар оказывается короче времени спин-решеточной релаксации, то есть спиновая подсистема в паре ионов не успевает термализоваться. В результате, в экспериментах при комнатной температуре наблюдаются изменения пробега дислокаций на 50–100%, а также соответствующие изменения микротвердости кристаллов H на $\sim 5-15\%$ под действием постоянного и микроволнового магнитных полей в условиях резонанса. Поскольку магнитное поле влияет на процесс агрегации и взаимодействия примеси, его присутствие не обязательно в процессе пластической деформации. Именно этот тип магнитоупругости обсуждается в данной работе.

Идентификация типа парамагнитных центров, ответственных за спин-зависимую магнитоупругость в ионных кристаллах, часто затруднена тем,

¹⁾ e-mail: morgunov2005@yandex.ru

что даже небольшие концентрации ионов примеси могут оказывать более существенное влияние на подвижность дислокаций, чем основная примесь (обычно Ca^{2+}), если ионный радиус примесных ионов сильно отличается от радиуса ионов кристаллической матрицы. В кристаллах, в которых парамагнитная примесь вводится преднамеренно в высоких концентрациях (например, примесь Eu^{2+} в [16, 17]), ее участие в магнитопластичности кристаллов не вызывает сомнений. Однако в “химически чистых” и даже “спектрально чистых” ионных кристаллах, в которых наблюдаются магнитопластические эффекты [2–4], идентификация ионов затруднена тем, что в них присутствуют ионы Fe^+ , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Cu^{2+} , Mn^{2+} , Ca^{2+} и др. примерно в равных количествах. Поэтому в большинстве случаев тип примесных ионов, определяющих магнитопластичность кристаллов, не установлен. Эта проблема в настоящее время решена только для кристаллов NaCl:Eu , в которых ионы Eu^{2+} обладают весьма характерным спектром ЭПР, который трудно спутать со спектром других ионов [5, 6, 8]. В данной работе будет показано, что легко идентифицируемыми спектрами обладает примесь железа в ионных кристаллах.

Спектры ЭПР, детектируемые по изменению пластичности в слабо легированных кристаллах, часто весьма сходны со стандартными спектрами ЭПР ионов железа (автор признателен Ю.Н. Молину, обратившему внимание на это обстоятельство). Ранее было показано [18–23], что в γ - или X -облученных ионных кристаллах ионы железа могут иметь различную степень ионизации – Fe^+ , Fe^{2+} или Fe^{3+} , а также характеризоваться различной симметрией кристаллического поля в зависимости от наличия вакансий в ближайшей позиции или включенности ионов в сложные комплексы. В [18–23] эти состояния эффективно различали с помощью g -факторов ионов, полученных стандартным методом ЭПР (по поглощению микроволновой мощности). Поэтому эффект магниторезонансной пластичности может быть использован для установления типа примеси, которой обусловлен магнитопластический эффект, а также ее электронного состояния (степени ионизации, спин-орбитального взаимодействия и расщепления уровней в кристаллическом поле). Одновременное присутствие в кристалле дефектов, способных поставлять электроны в зону проводимости под действием света (F -центров), является удобным методом управления зарядовым состоянием примеси. Цель настоящей работы заключалась в идентификации типа ионов, возбуждение парамагнитного резонанса в которых приводит к изменению пластических свойств кристаллов $\gamma\text{-KCl:Fe}$, а

также в создании условий для управления концентрацией этих ионов при фотостимулированной ионизации F -центров.

2. Методика экспериментов и образцы.

Монокристаллы KCl , облученные γ -источником (10^4 рад), содержали примесь Ca ($5 \cdot 10^{-2}$ ат.%), Cu ($5 \cdot 10^{-3}$ ат.%), Fe ($5 \cdot 10^{-2}$ ат.%), Mg (10^{-2} ат.%). (Автор признателен Y. Tanimoto за помощь в анализе химического состава.) Для экспериментов из слитка выкалывали образцы размером $2 \times 5 \times 5$ мм³. Микротвердость по Виккерсу $H = 1.8544 2P/d^2$ определяли с помощью приставки к оптическому микроскопу Neophot-3. Для измерения H использовали нагрузку на алмазную пирамидку $P = 10$ г, которая в исходных кристаллах (в контрольных образцах, не подвергавшихся действию света или магнитного поля) приводила к образованию квадратного отпечатка с диагональю $d = 61$ мкм на поверхности (001). Коридор допустимых значений длины диагонали $\Delta d = 1$ мкм определяли путем накопления 10–15 отпечатков, сделанных в разных местах поверхности. Затем вычисляли относительную погрешность $\Delta d/d = 1.5\%$ и соответствующую ей погрешность измерения микротвердости $\Delta H/H = 3\%$. При микротвердости контрольных кристаллов $H_0 = 120$ МПа это соответствует ошибке $\Delta H = 3.5$ МПа. Эта величина была одинаковой для разных образцов, и в дальнейшем она показана на рисунках в качестве коридора допустимых значений H . Микротвердость в контрольных измерениях H_0 , одинаковая в различных образцах, показана на рисунках штриховой линией. Аналогичным образом упомянутые величины вычисляли для кристаллов, подвергнутых действию света или магнитного поля.

Образцы, которые вначале служили контрольными, затем подвергали действию взаимно перпендикулярных постоянного и микроволнового магнитного полей в ЭПР спектрометре Bruker ESR-300. При этом значение постоянного магнитного поля B поддерживалось неизменным с точностью ~ 1 Э (развертка не включалась), а направление поля было вдоль кристаллографической оси [001]. Микроволновое магнитное поле создавало пучности стоячей волны в цилиндрическом резонаторе и имело частоту $\nu = 9.530$ ГГц, которую определяли при измерении эталонного спектра ЭПР на калибровочных образцах MnCl_2 1:50, CaCO_3 и DPPH (дифенилпикрилгидразил). Мощность микроволнового поля 10 Вт соответствовала напряженности микроволнового поля $B_1 = 1$ Э. После выдержки образцов в этих условиях в течение 15–20 мин снова измеряли микротвердость H . Следующий образец выдерживали уже при другом постоянном магнит-

ном поле, а затем для него определяли микротвердость. Для разных образцов значение постоянного магнитного поля выбирали из диапазона 0.05–0.4 Тл. Таким образом, ступенчатое сканирование спектра ЭПР с шагом $\Delta B \sim 50\text{--}70$ Э происходило путем измерения микротвердости образцов при последовательно возрастающих значениях постоянного магнитного поля и неизменном микроволновом магнитном поле.

Поскольку свет мог приводить к “выжиганию” F -центров, то все описанные выше процедуры производили в затемнении со слабой красной подсветкой. В тех экспериментах, в которых нужно было возбудить F -электроны в зону проводимости, использовали свет электрической лампы и светофильтры, пропускающие свет в диапазоне длин волн $\lambda = 500\text{--}600$ нм, перекрывающем максимум полосы поглощения F -центров $\lambda = 555$ нм. Такое освещение было предназначено для того, чтобы инициировать перераспределение концентраций ионов Fe^+ , Fe^{2+} или Fe^{3+} путем рекомбинации F -электронов с ними, и, таким образом, определить, какие из типов ионов участвуют в магнитоупругости кристаллов.

3. Результаты. В кристаллах, не подвергавшихся действию F -света (в “темновых” кристаллах), наблюдалась немонотонная зависимость микротвердости от индукции постоянного магнитного поля B , которое действовало совместно с перпендикулярным ему микроволновым полем (рис.1, зависимость \bullet). Путем аппроксимации зависимости $H(B)$ лоренцевыми линиями (рис.1) и пересчета резонансных значений поля в g -факторы по формуле $g = h\nu/\mu_B B$ было установлено, что наблюдаемые на ней четыре минимума отвечают g -факторам 7.0 ± 0.2 , 4.1 ± 0.2 , 3.5 ± 0.2 и 2.2 ± 0.2 . После облучения кристаллов F -светом в течение 10 мин зависимость $H(B)$ имеет два минимума при $g = 4.1 \pm 0.2$ и $g = 2.2 \pm 0.2$ (рис.1, зависимость \circ).

Далее будет показано, что минимумы магниторезонансной пластичности отвечают возбуждению парамагнитного резонанса в примесно-вакансионных диполях $\text{Fe}^{2+} - v_c$ (линии при $g = 7.0$ и $g = 3.5$) и в ионах Fe^+ (линии при $g = 4.1$ и $g = 2.2$). Магниторезонансные спектры магнитоупругости, обусловленные диполями $\text{Fe}^{2+} - v_c$, под действием F -облучения исчезают, а спектры, обусловленные ионами Fe^+ , остаются. Полученные данные не говорят о том, что в магнитоупругости участвуют изолированные диполи $\text{Fe}^{2+} - v_c$ или ионы Fe^+ . Очевидно, эти типы парамагнитных дефектов входят в более сложные комплексы, такие как димеры или тримеры. Возбуждение магнитного резонанса в одном ио-

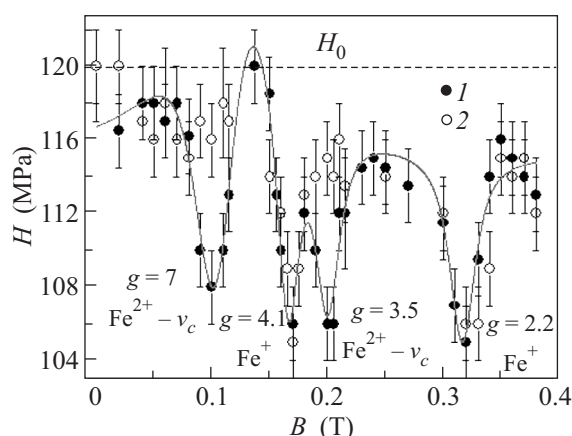


Рис.1. Зависимость микротвердости H в γ -облученных кристаллах KCl от индукции постоянного магнитного поля B , которое было использовано для создания парамагнитного резонанса в комплексах точечных дефектов совместно с микроволновым полем: \bullet – в отсутствие подсветки, \circ – после 10 с фотоэкспозиции кристаллов F -светом. Сплошной линией показана аппроксимация зависимости \bullet четырьмя линиями лоренцевой формы. Штриховой прямой показано значение микротвердости H_0 “темновых” кристаллов, не подвергавшихся действию магнитных полей

не димера способно изменить кинетику его распада или превращения в тример [5–8, 15]. Поэтому полученные в этой работе спектры магниторезонансной пластичности свидетельствуют о том, что резонанс возбуждается в двух типах парамагнитных дефектов, которые могут быть компонентами более сложных комплексов.

Отметим, что минимумы микротвердости, наблюдаемые после фотоэкспозиции кристаллов, не являются более глубокими по сравнению с темновыми кристаллами (рис.1). Это может быть связано как с тем, что количество центров, содержащих Fe^+ , не изменилось в результате фотоэкспозиции, так и с нелинейностью зависимости магниторезонансного разупрочнения от количества центров. Данные, представленные на рис.2, позволяют предполагать, что в наших опытах реализуется вторая возможность, то есть существует насыщение зависимости магниторезонансного разупрочнения от концентрации центров Fe^+ . Зависимость микротвердости H от текущего времени t на рис.2 получена на одном и том же кристалле. В начальные моменты времени (до обработки в магнитном поле и фотоэкспозиции) микротвердость кристалла была равна H_0 (совпадала с контрольными значениями на других образцах). После приложения постоянного магнитного поля 2 Тл в течение 20 с (обозначено буквами F) микротвердость

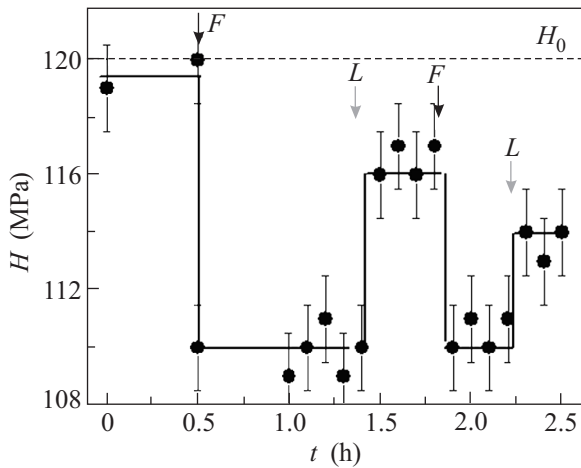


Рис.2. Зависимость микротвердости кристаллов H , измеренной между чередующимися экспозициями в постоянном магнитном поле $B = 2$ Тл (длительностью 20 с) и фотоэкспозициями (длительностью 5 с), от текущего времени t . Штриховой прямой показано значение микротвердости H_0 “темновых” кристаллов, не подвергавшихся действию магнитного поля. Вертикальными стрелками показаны короткие экспозиции в магнитном поле F и фотоэкспозиции L

уменьшалась до 110 МПа. Последующая фотоэкспозиция кристаллов F -светом (обозначена символом L) приводила к увеличению микротвердости до уровня, несколько меньшего, чем исходный H_0 . Повторное приложение магнитного поля снова приводило к уменьшению микротвердости до 110 МПа. Из рис.2 видно, что упрочнение и разупрочнение кристаллов светом и магнитным полем можно было повторять несколько раз. Поскольку влияние света на микротвердость и другие параметры пластичности необратимо [8], полученные результаты свидетельствуют о том, что под действием света рождаются магниточувствительные центры, которые впоследствии могут быть преобразованы постоянным магнитным полем. F -свет регенерирует чувствительность микротвердости кристаллов к магнитному полю (рис.2). Следовательно, в экспериментах с магниторезонансной пластичностью в фотоэкспонированных кристаллах количество центров при $g = 4.1$ и $g = 2.2$ увеличивается при облучении F -светом, не приводя при этом к более глубокому разупрочнению кристаллов (остальные центры при $g = 3.5$ и $g = 7.0$ в фотооблученных кристаллах отсутствуют). Постепенная деградация эффекта в течение нескольких итераций (рис.2) связана с тем, что F -электроны участвуют сразу в нескольких процессах, помимо процесса $(\text{Fe}^{2+} - v_c) + e^- \rightarrow \text{Fe}^+ - v_c \rightarrow \text{Fe}^+$, обсуждаемого далее.

4. Обсуждение. В кубических кристаллах KCl:Fe идентификация тонкой структуры спектров ЭПР ионов железа облегчается тем, что спектры всех типов ионов и их ассоциатов с вакансиями ранее изучены, и им дана исчерпывающая теоретическая интерпретация [18–23]. Известно, что в ионных кристаллах с кубической симметрией линии ЭПР вблизи g -факторов $g \approx 6$ и $g \approx 4$ обусловлены ионами Fe^{2+} [18–23]. Свободный ион Fe^{2+} с оболочкой d^6 имеет основное состояние 5D_4 . В октаэдрическом кристаллическом поле низшим является орбитальный триплет Γ_5 , уровни которого удалены от других уровней на $\sim 200 - 300 \text{ см}^{-1}$ и недостижимы для микроволновых квантов с энергией $\sim 1 \text{ см}^{-1}$. Поэтому можно считать, что переходы ЭПР такого иона описываются спин-гамильтонианом для эффективного спина $S = 1$ [18, 19]:

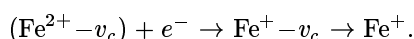
$$\hat{H} = g\mu_B \mathbf{B} \mathbf{S}, \quad g = g_S + g_L - 18\lambda/5\Delta. \quad (1)$$

Параметры λ (спин-орбитальное взаимодействие $\sim 100 \text{ см}^{-1}$) и Δ (расщепление в кристаллическом поле $\sim 2.5 - 3 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$) теоретически рассчитаны и определены экспериментально для ионов переходных металлов в ионных кристаллах [18, 19]. Расщепление орбитального уровня на $2S + 1 = 3$ компоненты происходит под действием спин-орбитального взаимодействия $\sim \lambda^2/\Delta \sim 1 \text{ см}^{-1}$, по порядку величины сопоставимого с зеемановской энергией и спин-спиновым взаимодействием. Поэтому для иона Fe^{2+} в классических спектрах ЭПР может наблюдаться $2S = 2$ перехода между $2S + 1 = 3$ уровнями. Теоретический расчет g -фактора из спин-гамильтониана (1) для иона Fe^{2+} , захватившего вакансию v_c , приводит к величине 3.43 в решетке NaCl .

В экспериментальных классических спектрах ЭПР разрешенные переходы $\Delta M = \pm 1$ для этого спин-гамильтониана наблюдаются при $g = 3.4277$ в кристаллах KCl:Fe [19, 20] и близких значениях g -фактора в других ионных кристаллах с кубической симметрией (MgO , NaCl , LiCl), если магнитное поле направлено вдоль $[001]$ [19]. Это значение g -фактора близко к установленному нами значению $g = 3.5 \pm 0.2$ в кристаллах, не подвергавшихся фотоэкспозиции (рис.1). Известно, что в кристаллах KCl:Fe , NaCl:Fe и MgO:Fe , помимо этой линии, наблюдается также резонансная линия вблизи удвоенного значения g -фактора [18]. В наших экспериментах наблюдается линия при $g = 7.0 \pm 0.2$ (рис.1). Эта линия отвечает запрещенным переходам $\Delta M = \pm 2$ в ионах Fe^{2+} , наблюдавшимся ранее в кубических ионных кристаллах вблизи $g = 6.86$ [18]. Переход $\Delta M = \pm 2$ в кристаллическом поле кубической симметрии запре-

щен, однако в ионных кристаллах он наблюдается, если имеет место искажение кубической симметрии. В [18] показано, что такое искажение может быть вызвано присутствием вакансии v_c , обеспечивающей электронейтральность центра $Fe^{2+} - v_c$. Это подтверждает, что две линии магнитрезонансной пластичности темновых кристаллов при $g = 3.5$ и $g = 7.0$ (рис.1) обусловлены возбуждением резонанса в $Fe^{2+} - v_c$ центрах.

После облучения кристаллов F -светом две линии при $g = 3.5$ и $g = 7.0$ полностью исчезают (см. рис.1), что объясняется рекомбинацией F -электронов с центрами $Fe^{2+} - v_c$. В результате должны были бы получиться центры $Fe^+ - v_c$. Однако, как показано в [19–23], такие центры при комнатной температуре неустойчивы, поскольку вакансии v_c очень быстро покидают их. Это случается уже при температурах 120–140 К [20–23]. Таким образом, в результате фотовозбуждения F -электронов в зону проводимости наблюдается исчезновение $Fe^{2+} - v_c$ центров и соответствующих линий в спектре магнитопластического резонанса. Таким образом, инициируемые светом процессы и состояния примеси железа можно представить в виде последовательности:



Обсудим теперь применимость известных из литературы данных об ионах Fe^+ для описания остальной части спектра – двух линий при $g = 4.1$ и $g = 2.2$, которые наблюдаются в спектрах магнитрезонансной пластичности как до, так и после фотовозбуждения кристаллов. Центры Fe^+ с оболочкой d^7 устойчивы при комнатной температуре в ионных кристаллах. В конфигурации $t_{2g}^5 e_g^2$ в кубическом окружении они имеют орбитальное взаимодействие $d_{x^2-y^2} e_g$ с четырьмя соседними эквивалентными ионами Cl^- в плоскости (100). Эти центры в октаэдрическом окружении (в отсутствие вакансии) дают резонансную линию при $g = 4.4$ в NaCl, $g = 4.35$ в NaF, $g = 4.25$ в LiF [19]. В кристаллах KCl:Fe центры Fe^+ дают линию при $g = 4.07$ [20], что хорошо согласуется с g -фактором наблюдаемой нами линии при $g = 4.1 \pm 0.2$ (рис.1). Отметим, что в различных типах ионных кристаллов с кубической решеткой наблюдаются близкие значения g -факторов обеих линий ЭПР Fe^{2+} , что позволяет надежно идентифицировать их независимо от типа кристалла.

Наконец, линия при $g = 2.2$ (рис.1) может объясняться как резонансом в центрах Fe^+ , так и другими типами ионов (например, ионами Fe^{3+} , которые являются менее эффективными ловушками для F -электронов, чем Fe^{2+}). Подавляющее большинство

парамагнитных дефектов (не обязательно связанных с ионами железа) имеет резонансные линии вблизи $g = 2$. Поэтому самостоятельная идентификация этой линии затруднена. Однако в сочетании с приведенными выше данными о спектрах ЭПР ионов железа, а также с учетом того, что эта линия не исчезает после облучения светом, ее тоже можно приписать возбуждению резонанса в дефектах, содержащих ионы Fe^+ .

В заключение отметим, что неравновесная концентрация метастабильных парамагнитных дефектов в исследуемых кристаллах, обычно создаваемая термообработкой [8, 15], принципиально необходима для наблюдения и существования магнитопластического эффекта. В данной работе термообработка образцов отсутствовала, но ее роль выполняло предварительное γ -облучение, создававшее неравновесную концентрацию магниточувствительных дефектов в образцах. Приведенный выше анализ спектров может быть применен для интерпретации ранее полученных данных [2–4], согласно которым в закаленных необлученных кристаллах NaCl также наблюдаются спектры магнитрезонансной пластичности, содержащие несколько линий с g -факторами вблизи значений 2.1, 3.8 и 5.7. Эти, полученные ранее результаты, могут также объясняться парамагнитным резонансом центров, содержащих ионы железа.

5. Выводы. Обнаружено резонансное уменьшение микротвердости, вызванное приложением скрещенных постоянного и микроволнового магнитных полей в γ -облученных кристаллах KCl:Fe. В кристаллах, не подвергавшихся фотоэкспозиции, наблюдаются четыре минимума микротвердости, которые отвечают g -факторам: 7.0 ± 0.2 , 4.1 ± 0.2 , 3.5 ± 0.2 и 2.2 ± 0.2 . После освещения кристаллов F -светом в них наблюдается два резонансных минимума микротвердости, которые отвечают g -факторам 4.1 ± 0.2 и 2.2 ± 0.2 . Влияние F -света на спектры магнитного резонанса, детектируемого по изменению микротвердости γ -KCl:Fe, заключается в подавлении спектров ионов $Fe^{2+} - v_c$ с эффективными g -факторами 7 и 3.5 в пользу центров Fe^+ с g -факторами 2.2 и 4.1.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант #10-03-00314 а). Автор признателен А.Л.Бучаченко за помощь в обсуждении экспериментальных результатов.

1. В. И. Альшиц, Е. В. Даринская, М. В. Колдаева, Е. А. Петржик, Кристаллография **48**, 838(2003).
2. Yu. I. Golovin and R. B. Morgunov, Chemistry reviews. Gordon and Breach Publishing Group. **23**, Part2, 23 (1998).

3. Ю. И. Головин, Р. Б. Моргунов, В. Е. Иванов и др., Письма в ЖЭТФ **68**, 400 (1998).
4. Ю. И. Головин, Р. Б. Моргунов, ЖЭТФ **115**, 605 (1999).
5. Yu. I. Golovin, R. B. Morgunov, and A. A. Baskakov, Molecular Physics **100**, 1291 (2002).
6. R. B. Morgunov, Yu. A. Ossipyan, and Y. Tanimoto, *Magneto-Science: Magnetic Field Effects on Materials: Fundamentals and Applications*, KODANSHA Springer, Eds. M. Yamaguchi and Y. Tanimoto, 2006, стр.281.
7. В. И. Альшиц, Е. В. Даринская, В. А. Морозов и др., Письма в ЖЭТФ **91**, 97 (2010).
8. Р. Б. Моргунов, УФН **174**, 131 (2004).
9. Ю. А. Осипьян, Р. Б. Моргунов, А. А. Баскаков и др., Письма в ЖЭТФ **79**, 158 (2004).
10. M. Bardylevich, V. Kveder, V. Orlov, and Yu. Ossipyan, Phys. Stat. Sol.(c) **2**, 1869 (2005).
11. V. I. Alshits, E. V. Darinskaya, M. V. Koldaeva, and E. A. Petrzhik, *Dislocations in solids a tribute to F.R.N.Nabarro*, Ed. J. P. Hirth, **14**, chapter 86, 333 (2008).
12. А. Л. Бучаченко, ЖЭТФ **132**, 827 (2007).
13. А. Л. Бучаченко, ЖЭТФ **132**, 673 (2007).
14. А. Л. Бучаченко, ЖЭТФ **129**, 909 (2006).
15. Р. Б. Моргунов, А. Л. Бучаченко, ЖЭТФ **136**, 505 (2009).
16. Р. Б. Моргунов, С. З. Шмурак, А. А. Баскаков, Й. Танимото, ЖЭТФ **124**, 840 (2003).
17. Р. Б. Моргунов, С. З. Шмурак, А. А. Баскаков и др., Письма в ЖЭТФ **76**, 366 (2002).
18. С. А. Альтшулер, Б. М. Козырев, *Электронный парамагнитный резонанс соединений промежуточных групп*, М.: Наука, 1972, с.429.
19. В. Лоу, *Парамагнитный резонанс в твердых телах*, М.: Изд. иностранной литературы, 1962, с.110.
20. E. Voesman, F. Callens, J. Haes et al., Solid State Commun. **77**, 931 (1991).
21. W. Low, Phys. Rev. **101**, 1827 (1956).
22. S. V. Nistor, M. Velter-Stefanescu, and D. C. Mateescu, Solid State Commun. **53**, 989 (1985).
23. S. V. Nistor, I. Ursu, and M. Velter-Stefanescu, Phys. Rev. B **35**, 4594 (1987).