

УДК 535.343.2

**П.К. Горбенко**, канд. физ.-мат. наук**А.А. Ковтун**, канд. физ.-мат. наук**А.В. Рогоза**, канд. физ.-мат. наук**Ю.Е. Шоломий**, студент

Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КРИСТАЛЛАХ KCl  
ЧИСТЫХ И С ПРИМЕСЬЮ ИОНОВ  $Li^+$  И  $Na^+$** **П.К. Горбенко**, канд. физ.-мат. наук**А.О. Ковтун**, канд. физ.-мат. наук**О.В. Рогоза**, канд. физ.-мат. наук**Ю.Є. Шоломій**, студент

Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

**ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІАЦІЙНИХ ДЕФЕКТІВ У КРИСТАЛАХ KCl ЧИСТИХ ТА  
З ДОМІШКОЮ ІОНІВ  $Li^+$  ТА  $Na^+$** **Petr Gorbenko**, PhD in Physico-mathematical Sciences**Anatoliy Kovtun**, PhD in Physico-mathematical Sciences**Aleksandr Rogoza**, PhD in Physico-mathematical Sciences**Yuriy Sholomiy**, student

Chernigov National Technological University, Chernigov, Ukraine

**THE RESEARCH INTO RADIATIONAL DEFECTS IN HIGH PURITY KCl  
CRYSTALS AND KCl CRYSTALS WITH  $Li^+$  AND  $Na^+$  ADMIXTURE**

Приведены экспериментальные данные о дырочных центрах кристаллов KCl высокой чистоты, а также о дырочных центрах, связанных с примесью ионов  $Li^+$  и  $Na^+$ . Показано, что свободные галоидные вакансии диффундируют в кристалле уже при низких температурах.

**Ключевые слова:** ионы  $Li^+$ , ионы  $Na^+$ , дырочные центры, галоидные вакансии.

Наведені експериментальні дані про діркові центри кристалів KCl високої чистоти, а також про діркові центри, що пов'язані з домішкою іонів  $Li^+$  та  $Na^+$ . Показано, що вільні галоїдні вакансії дифундують у кристалі вже при низьких температурах.

**Ключові слова:** іони  $Li^+$ , іони  $Na^+$ , діркові центри, галоїдні вакансії.

Experimental data of research into hole centers of crystals of high purity and crystals with  $Li^+$  and  $Na^+$  admixture are represented. Also it is shown that free halide vacancies diffuse at low temperature.

**Key words:**  $Li^+$  ion,  $Na^+$  ion, hole center, halide vacancies.

**Вступление.** Данная работа является продолжением комплексных исследований [1; 2] структуры и свойств радиационных дефектов в щелочно-галоидных кристаллах (ЩГК).

Кенциг считал, что известная  $V_1$  – полоса оптического поглощения (365 нм), появляющаяся при температуре 77 К в кристаллах KCl, соответствует  $V_k$  – центрам [3]. Несколько позже [4; 5] установлено, что  $V_1$  – полоса соответствует оптическому поглощению  $H_A(Na^+)$  центров. Поэтому одной из задач этой работы есть установление соответствия оптического спектра и спектра электронного парамагнитного резонанса (ЭПР)  $V_k$  – центра в кристаллах KCl высокой чистоты.

Авторы работы [6] предположили, что ионная проводимость в ЩГК при высоких температурах обусловлена свободными галоидными вакансиями. Несколько позже Лидьярд показал [7], что энергия образования дефектов по Френкелю совпадает с энергией активации ионной проводимости, что опровергает ранее упомянутое предположение. Таким образом, возникает необходимость установить интервал температур, при которых происходит диффузия галоидных вакансий, и определить энергию диффузии, поскольку это важно для объяснения многих ионных процессов, связанных с накоплением и превращением радиационных дефектов в ЩГК.

**Методы и результаты.** Нами использовался метод ЭПР для контроля дырочных центров, которые, диффундируя и аннигилируя с  $F$  – центрами, образуют свободные

вакансии. Изменение концентрации электронных центров определялось оптическим методом.

Приготовление образцов и методы эксперимента описаны в работах [1; 2]. Кристаллы для оптических исследований окрашивались при 77 К рентгеновскими лучами, а для измерения спектров ЭПР – облучением от источника с дозами  $(1,5-2) \cdot 10^7$  рад. Измерение спектров ЭПР проводили при 77 К на супергетеродинном спектрометре с низкочастотной модуляцией [8]. Ориентация образцов производилась по естественным плоскостям при закреплении их в кристаллодержателе с угломерным устройством. Более точная ориентация кристаллов производилась по спектрам ЭПР. Для исследования термической стабильности парамагнитных центров использовалось нагревательное устройство, смонтированное в криостате. Нагрев образцов осуществлялся импульсным методом в интервале  $77 \div 300$  К.

1. Оптический спектр и спектр ЭПР  $V_k$  – центров в кристаллах  $KCl$  высокой чистоты.

Наряду с ЭПР-спектром  $F$  – центров в случае кристаллов  $KCl$ , облученных при 77 К, наблюдался другой сложный ЭПР-спектр, приведенный на рис. 1. При этом условия для регистрации этого спектра подбирались так, чтобы избавиться от спектра ЭПР  $F$  – центров. Константы приведенного спектра полностью совпадают с константами спектра  $V_k$  – центров в кристаллах  $KCl$  [3]. При оптических исследованиях (рис. 2) в спектрах данных кристаллов не была обнаружена полоса поглощения в области частот, предсказанных теорией для  $V_k$  – центра [9]. По-видимому, сила осциллятора  $V_k$  – центра очень мала по сравнению с силой осциллятора  $F$  – центра, так как, согласно закону электронейтральности, концентрация  $V_k$  – центров одного порядка с концентрацией  $F$  – центров ( $N_F \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ).

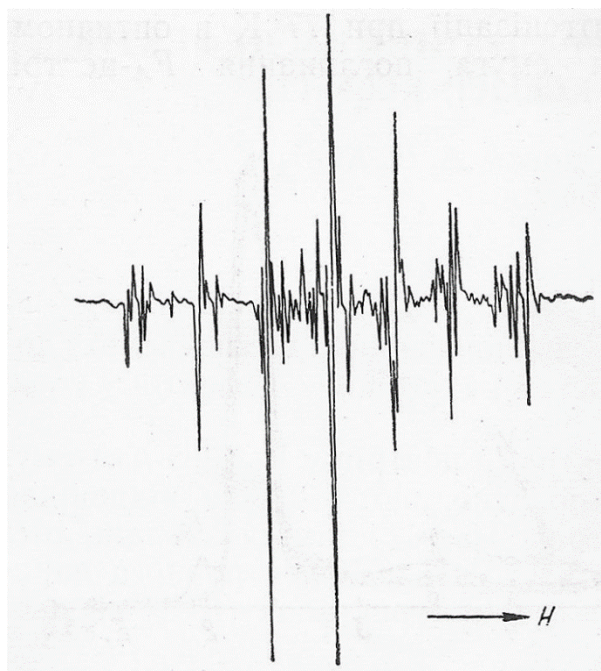


Рис. 1. Спектр ЭПР  $V_k$  – центров  $\gamma$  – облученных кристаллов  $KCl$ . Магнитное статическое поле ориентировано вдоль направления  $\langle 110 \rangle$  кристалла

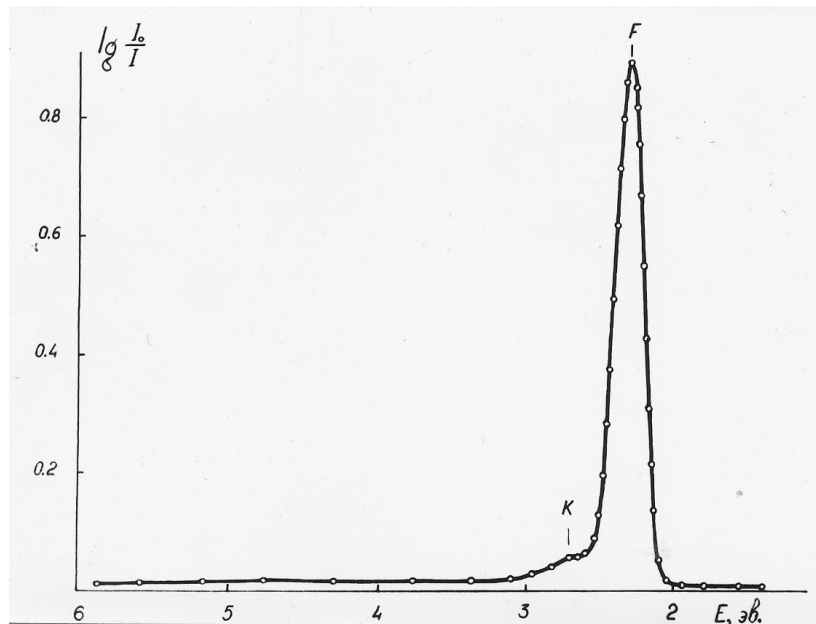


Рис. 2. Спектр статического поглощения кристаллов  $KCl$  при 77 К после четырёхчасового облучения рентгеновскими лучами при 77 К

## 2. О диффузии термодинамически неравновесных галоидных вакансий.

В опытах использовались чистые кристаллы  $KCl$  и с примесью ионов  $Li^+$  и  $Na^+$ . С помощью метода ЭПР обнаружено, что при импульсном нагреве кристаллов  $KCl$   $V_k$  – центры исчезают в интервале температур 110÷170 К и возникают свободные галоидные вакансии, которые можно обнаружить по характеру накопления F-центров [1]. Действительно, наблюдается двухстадийный характер накопления F-центров в кристалле, нагретом сначала до температуры  $\square$  170 К и охлажденном затем до 77 К (рис. 3, б). Наличие нелинейной стадии накопления свидетельствует о наличии в кристалле свободных галоидных вакансий, появляющихся вследствие диффузии и аннигиляции  $V_k$  – центров с F – центрами. При прогреве кристалла до 290 К и дальнейшем облучении его рентгенолучами при 77 К характер накопления F – центров линейный (рис. 3, в), т. е. аналогичный характеру накопления F – центров при первичном облучении (рис. 3, а). Таким образом, опыт показал, что при нагревании кристаллов, содержащих свободные галоидные вакансии, от 223 до 290 К последние исчезают в результате либо их диффузии к дефектам, либо диффузии дефектов к свободным галоидным вакансиям с последующей их аннигиляцией.

В работе [10] показано, что ионы  $Li^+$  захватывают галоидные вакансии, что приводит к образованию  $F_A$  – центров в процессе облучения рентгенлучами кристалла при 77 К. Поэтому нами использовались кристаллы  $KCl$  с примесью ионов  $Li^+$  и с примесью ионов  $Na^+$ . На кристаллах  $KCl:LiCl$ , облученных при 77 К, наблюдается спектр ЭПР  $V_k$  – центров, которые при нагреве кристалла до  $\square$  170 К превращаются в  $V_{KA}$  – центры, исчезающие при температуре 170÷230 К, что согласуется с данными работы [11]. При дальнейшем нагреве кристалла  $KCl:LiCl$ , содержащего свободные галоидные вакансии, до температуры 263 К и последующей рентгенизации при 77 К в оптическом спектре поглощения наблюдается полоса поглощения  $F_A$  – центров (рис. 4, в). Следовательно, в результате нагрева кристаллов  $KCl$  и  $KCl:LiCl$ , содержащих свободные галоидные вакансии, от 223 до 263 К происходит их диффузия. Температурная стабильность  $V_{KA}$  – центров в кристаллах  $KCl:NaCl$  практически не отличается от температурной стабильности  $V_k$  – центров в чистых кристаллах  $KCl$ .

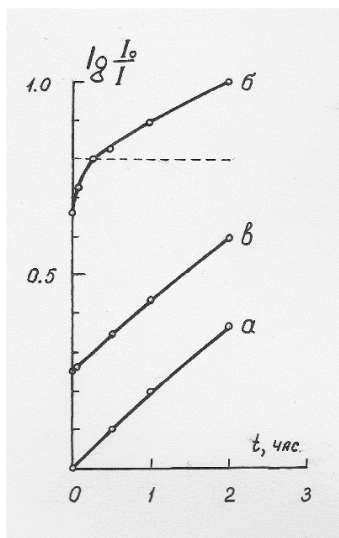


Рис. 3. Накопление во времени  $F$  – центров в чистых кристаллах  $KCl$  при 77 К:  
 а – накопление при первичном облучении рентгенолучами; б – после нагревания до 223 К;  
 в – после нагревания до 293 К. Пунктирной линией показана оптическая плотность  $F$  – центров после четырехчасового накопления

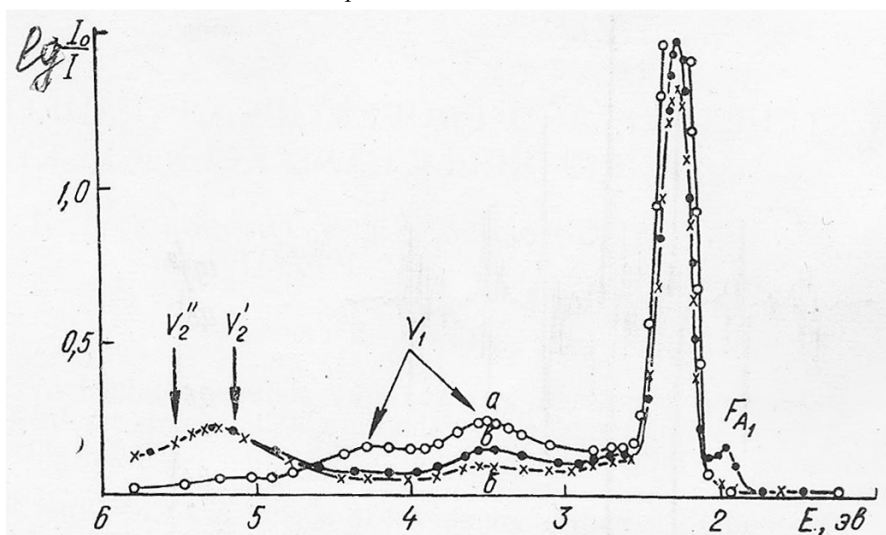


Рис. 4. Спектры оптического поглощения кристаллов  $KCl + 1$  мол. % в шилте при 77 К:  
 а – после рентгенизации в течение 1 часа при 213 К; б – после нагревания до 263 К и охлаждения до 77 К; в – после повторной рентгенизации в течение 15 минут при 77 К

Энергия диффузии вакансий определялась методом люминесценции. Пик термолюминесценции, связанный с диффузией вакансий в кристаллах  $KCl$ , соответствует температуре 305 К. Вычисленная энергия составляет  $(0,385 \pm 0,036)$  эВ.

**Выводы.** Из приведенных результатов следует, что свободные галоидные вакансии диффундируют уже при низких температурах, чего не предполагалось ранее [6].

#### Список использованных источников

1. Горбенко П. К. Структура и превращение дырочных центров в кристаллах  $KCl$  и  $KCl+NaCl$  / П. К. Горбенко, Н. П. Калабухов, А. А. Ковтун // УФЖ. – 1972. – Том 17, № 11. – С. 1866–1872.
2. О дефектах, генерируемых рентгеновским излучением в кристалле  $KCl$  / П. К. Горбенко, Н. М. Ежов, А. А. Ковтун, А. Н. Телятник // УФЖ. – 1973. – Том 18, № 7. – С. 1068–1074.
3. Känzig, W. Phys. Rev., 99, 1890, 1955.
4. Delbecq C., Hutchinson E., Scheemaker D., Yasaitis E.L., Yuster P.H., Phys Rev., 187, 1103, 1969.

5. Горбенко П. К. Структура и превращение дырочных центров в кристаллах KCl:NaCl / П. К. Горбенко, А. А. Ковтун // ФТТ. – 1972. – Том 14, № 4. – С. 1225–1227.
6. Мотт Н. Электронные процессы в ионных кристаллах / Н. Мотт, Р. Генри. – М., 1950.
7. Лидьярд А. Ионная проводимость кристаллов / А. Лидьярд. – М., 1962.
8. Рубан М. А. Авторское свидетельство № 219862 / М. А. Рубан // Официальный бюллетень Комитета по делам изобретений и открытий. – 1968. – № 19, 96.
9. Guckers E.F., Halvetica Phys. Acta, 41, 493, 1968.
10. Горбенко П. К. Превращение электронных центров в кристаллах KCl+LiCl / П. К. Горбенко, Н. П. Калабухов, А. А. Ковтун // УФЖ. – 1973. – Том 18, № 7. – С. 1107–1111.
11. Schoemaker, D. Phys. Rev. B, Solid State, 7, 786, 1972.

УДК 621.9.048.4

**А.М. Єрошенко**, канд. техн. наук

**Є.М. Кремчанін**, магістрант

Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

### ПРОГРАМУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОЇ ОБРОБКИ В СЕРЕДОВИЩІ DELSCAM

**А.М. Єрошенко**, канд. техн. наук

**Е.Н. Кремчанін**, магістрант

Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

### ПРОГРАММИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ В СРЕДЕ DELSCAM

**Andrii Yeroshenko**, PhD in Technical Sciences

**Yevhen Kremchanin**, Master's Degree student

Chernihiv National Technological University, Chernihiv, Ukraine

### PROGRAMMING ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING IN THE ENVIRONMENT DELSCAM

*Розглянуто програмування електроерозійної обробки в середовищі програмних продуктів компанії DELSCAM. Показано на конкретному прикладі, що для виробництва прес-форм для виготовлення пластмасових виробів використовується як остаточна – електроерозійна обробка. Створено 3-D модель пластмасового виробу, прес-форми, електрода.*

**Ключові слова:** прес-форма, електроерозійна обробка, електрод.

*Рассмотрено программирование электроэрозионной обработки в среде программных продуктов компании DELSCAM. Показано на конкретном примере, что для изготовления пресс-форм для изготовления пластмассовых изделий используется как окончательная – электроэрозионная обработка. Создана 3-D модель пластмассового изделия, пресс-формы, электрода.*

**Ключевые слова:** пресс-форма, электроэрозионная обработка, электрод.

*Article dedicate programming EDM machining of medium software companies DELSCAM. Shown by way of example, that for manufacturing molds for manufacturing plastic products used as final - electro-discharge machining. Creates a 3-D model of plastic products, mold, electrode.*

**Key words:** mold, electro-discharge machining, electrode.

**Постановка проблеми.** Здавалося б, що з розвитком фрезерування на верстатах з ЧПК проблему з формою, розмірами та якістю оброблених поверхонь вирішено, але все рівно знайдуться якісь поверхні, які важко отримати за допомогою фрезерування. Особливо це стосується поверхонь, які мають внутрішні радіуси округлень на багато менші, ніж радіус фрези. А також це стосується остаточної якості обробленої поверхні. Тому для отримання остаточної якості поверхні використовується електроерозійна обробка на верстатах з ЧПК.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Електроерозійна обробка (англ. EDM — Electric discharge machining) є різновидом електрофізичної обробки і характеризується тим, що зміна форми, розмірів та якості поверхні заготовки з електропровідного матеріалу відбувається під дією електричних (іскрового чи дугового) розрядів.