

$$u_z^{(1)}(x) + u_z^{(2)}(x) = (e - e_1) \cdot h_2(x)$$

та залежності (20) і (22), виразимо напруження $\sigma_{zz}^{(k)}$ так:

$$\frac{\sigma_{zz}^{(k)}}{G} = \frac{2\varepsilon(1 + \mu_1)[(1 - 2\mu_1) - \mu_1(1 - 2\mu)] \varepsilon}{(1 - 2\mu_1) - \mu_1(1 - 2\mu)\varepsilon + 2\lambda_2\varepsilon(1 - \mu)(1 - \mu_1)} \cdot (e - e_1). \quad (23)$$

Тоді обчислюємо переміщення $u_z^{(1)}$ у тілі

$$u_z^{(1)}(x) = \frac{2\lambda_2\varepsilon(1 - \mu)(1 - \mu_1)(e - e_1)}{(1 - 2\mu_1) - \mu_1(1 - 2\mu)\varepsilon + 2\lambda_2\varepsilon(1 - \mu)(1 - \mu_1)} \cdot h_2(x), \quad |x| \leq a. \quad (24)$$

та КІН K_I

$$K_I = \frac{2(1 - \mu_1)(e_1 - e)G_1\sqrt{\pi a}}{(1 - 2\mu_1) - \mu_1(1 - 2\mu)\varepsilon + 2\lambda_2\varepsilon(1 - \mu)(1 - \mu_1)} \cdot \sqrt{\frac{th(2\pi a/d)}{(2\pi a/d)}}.$$

Для конфігурації (19) радіус заокруглення у вершинах $x = \pm a$ дорівнює

$$\rho_2 = \frac{a}{\lambda_2^2} \cdot \frac{th(2\pi a/d)}{(2\pi a/d)}, \text{ відтак можна обчислити концентрацію залишкових напружень у тілі біля включень}$$

$$\sigma_{zz}^{(3)} \Big|_{x=\pm(a+0)} = \frac{4\lambda_2 G_1(1 - \mu_1)(e_1 - e)}{(1 - 2\mu_1) - \mu_1(1 - 2\mu)\varepsilon + 2\lambda_2\varepsilon(1 - \mu)(1 - \mu_1)}. \quad (25)$$

Висновки. Маючи формули для обчислення напружень у включеннях $\sigma_{zz}^{(k)}$ та напружень $\sigma_{zz}^{(3)}$ у місцях найбільшої концентрації, можна за допомогою критеріїв міцності досліджувати міцність і працездатність тіл, що містять податливі чужорідності, якщо тіла піддавалися попередньому пластичному деформуванню.

Література

1. Андрейків О.С. Залишкові напруження в металах біля включень після пластичного деформування / О.С. Андрейків, М.М. Стадник, І.Я. Горбачевський // Доповіді АН УРСР. – Сер.: А. – К., 1981. – № 2. – С. 42-44.
2. Панасюк В.В. Распределение напряжений около трещин в пластинах и оболочках / В.В. Панасюк, М.П. Саврук, А.П. Дацьшин. – К.: Вид-во "Наук. думка", 1976. – 444 с.
3. Eshelby J.N. Elastic inclusion and inhomogeneities / J.N. Eshelby // Progress in Solid Mechanics. – 1961. – Vol. 2. – Pp. 88-140.
4. Стадник М.М. Определение напряженно-деформированного состояния в теле с системой упругих туннельных включений / М.М. Стадник, И.Я. Горбачевский. – Львов: Изд-во ФМИ АН УССР. – 1986. – Препринт АН УССР № 110. – 52 с.

Стадник М.М., Горбачевский И.Я. Подход к определению концентрации остаточных напряжений в телах с упругими туннельными включениями

Предложен подход к определению концентрации напряжений в упругих телах с туннельными чужеродностями, что поддаются предварительной механической обработке за предел текучести, после чего освобождаются от внешних усилий. В пределах подхода получены в замкнутом виде решения задач для тел с изолированным или взаимодействующими включениями.

Ключевые слова: упругое тело, податливое включение, системы включений, перемещение, математические разрезы, граничная задача, коэффициент интенсивности напряжений.

Stadnyk M.M., Horbachevskyy I.Ya. Approach to the determination of the concentration of residual stresses in bodies with elastic tunnel inclusions

An approach to the determination of residual stress concentration in elastic solids with tunnel inhomogeneities that have been under pre-plastic deformation is proposed. The closed form solutions of problems for bodies with isolated and interacting inclusions were obtained.

Keywords: elastic body, non-rigid inclusion, systems of inclusions, displacements, mathematical slits, boundary problem, stress intensity factors.

УДК 535.343.2 Проф. З.П. Чорний, д-р фіз.-мат. наук; ст. викл. І.Б. Пірко; доц. В.М. Салапак, канд. фіз.-мат. наук; асист. М.В. Дячук; доц. О.Р. Онуфрієв, канд. фіз.-мат. наук – НЛТУ України, м. Львів

КІНЕТИКА НАРОСТАННЯ ЦЕНТРІВ ЗАБАРВЛЕННЯ В ІОННИХ КРИСТАЛАХ. IV. F-ЦЕНТРИ В КРИСТАЛАХ CaF₂-O²⁻

Досліджено радіаційні параметри кристалів CaF₂-O²⁻, опромінених іонізуючою радіацією за T=350° К. Розраховано кінетику наростання (F-O)-комплементарних пар центрів забарвлення та їх граничну концентрацію у кристалі. Показано, що гранична концентрація F-центрів в 25-30 разів вища порівняно з граничною концентрацією F_A-центрів і в 4 рази вища за граничну концентрацію M_A⁺-центрів.

Ключові слова: кристали, центри забарвлення, радіація.

Вступ. Радіаційні властивості кристалів флюоритів, легованих киснем, інтенсивно досліджували протягом останніх 50 років [1-5]. Оскільки структура генерованих радіацією центрів забарвлення залежить від температури, за якої опромінюється кристал, такі дослідження здійснювали за низьких температур або за кімнатної температури. У цій роботі дослідження зосереджені на специфіці перебігу радіаційних процесів за температур, вищих за кімнатну температуру.

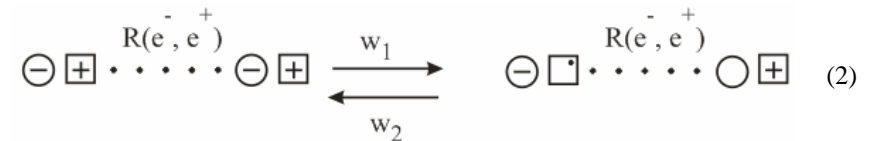
1. Радіаційні процеси в кристалах CaF₂-O²⁻

Кисень входить у ґратку кристала у вигляді O²⁻-іонів заміщення [5, 6, 7]. Надлишковий негативний заряд домішкового іона компенсує позитивно заряджена вакансія іона фтору, яка утворює з іоном кисню домішково-вакансійний диполь (ДВД) типу ⊖ ⊕, де ⊖ – іон кисню, ⊕ – вакансія фтору. За T < 150 К ДВД нерухомі в ґратці кристала флюорита [6], в області температур T=150-300 К існує ротація ДВД [6], а за T > 300 К – їх термодисоціація:

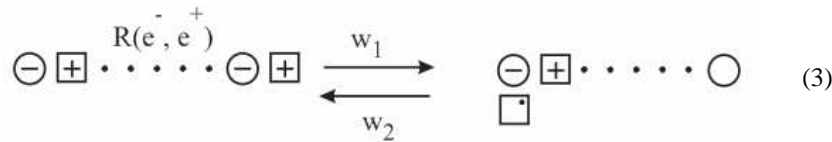


Зміна структури дорадіаційних дефектів обумовлює зміну в структурі центрів забарвлення в процесі нагріву кристала:

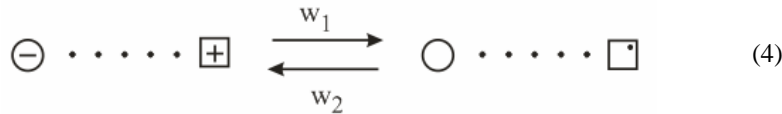
- за T < 150 К радіаційні процеси описуються таким рівнянням [7]:



- в області температур T=150-300 К утворення центрів забарвлення протікає за схемою [8]:



• за $T > 300$ К генерація центрів забарвлення відбувається за схемою:



У рівняннях (1-4) використано такі позначення.

- \ominus – O^{2-} -іон, який заміщує F^- -іон;
- \oplus – вакансія іона фтору;
- $\ominus \oplus$ – домішково-вакансійний диполь;
- \square – F-центр;
- $\ominus \square$ – F_A -центр;
- \circ – O^- – іон;
- $\circ \oplus$ – $O^-(1)$ -комплекс;
- $\oplus \square$ – M^+ -центр;
- $\ominus \oplus$ – M_A^+ -центр;
- \square – M_A^+ -центр;
- $\cdots \cdots$ – крапками позначені іони основи кристала;
- $R(e^-, e^+)$ – квант радіації, який генерує електронно-діркову пару (e^- , e^+);
- w_1 – ймовірність утворення комплементарної пари центрів забарвлення при генерації в ґратці кристала (e^- , e^+)-пари;
- w_2 – ймовірність радіаційного висвітлення (руйнування) комплементарної пари центрів забарвлення.

Розрахунки радіаційних характеристик кристалів CaF_2-O^{2-} , опромінені за $T < 300$ К (рівняння 2, 3), представлені в роботах [7, 8]. У цій роботі вперше виконано розрахунки за умови, що кристали CaF_2-O^{2-} опромінюються іонізуючою радіацією за $T > 300$ К, тому радіаційні процеси описуються рівнянням (4). Результати розрахунків наведено в табл. 1.

Табл. 1. Радіаційні параметри кристалів CaF_2-O^{2-} , опромінені за $T=350$ К

№	C , мол. %	l	w_1	w_2	C/C_0	n	n_0	E , eB
1	0,1	8 b	0,348	0,071	0,833	$8,33 \cdot 10^{18}$	$1 \cdot 10^{19}$	43,0
2	0,03	12 b	0,352	0,030	0,921	$2,76 \cdot 10^{18}$	$3 \cdot 10^{18}$	42,6
3	0,0125	16 b	0,354	0,017	0,954	$1,19 \cdot 10^{18}$	$1,25 \cdot 10^{18}$	42,4

w_1 і w_2 – ймовірність утворення $[F-O^-]$ -комплементарної пари центрів забарвлення та їх радіаційного руйнування; l – довжина іонного ланцюга $O^{2-} \dots V_a^+$; C_0 – концентрація іонів кисню в кристалі; C – гранична концентрація центрів забарвлення; n – концентрація центрів забарвлення на стадії насичення; n_0 – концентрація O^{2-} -іонів у кристалі; E – енергія утворення однієї комплементарної пари центрів забарвлення.

2. Кінетика наростання F-центрів

Із результатів, наведених в табл. 1, випливає, що концентрація F-центрів у процесі опромінення кристала змінюється в діапазоні $C/C_0 = 0-0,90$. За методикою [9] розрахована кінетика їх накопичення в кристалі. Результати розрахунків наведено в табл. 2-4 і зображені на рис. 1-4.

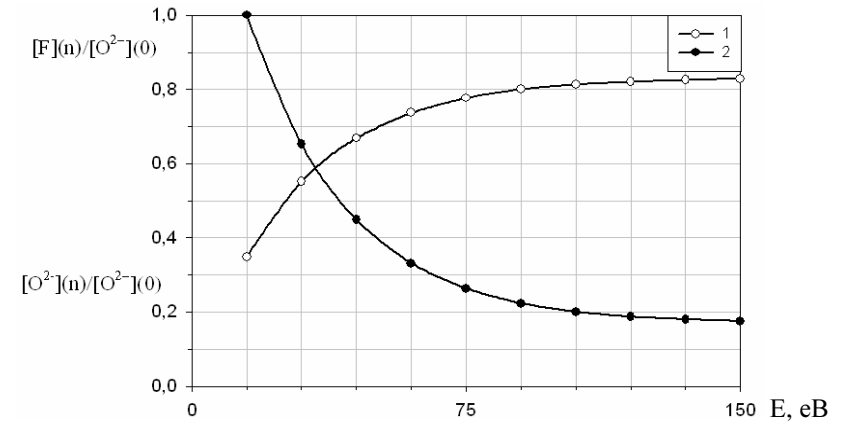


Рис. 1. Кінетика наростання F-центрів ($[F](n)/[O^{2-}](0)$) (крива 1) та радіаційного руйнування O^{2-} іонів ($[O^{2-}](n)/[O^{2-}](0)$) (крива 2) у кристалах $CaF_2-0,1$ мол. % O^{2-} ($T=350$ К)

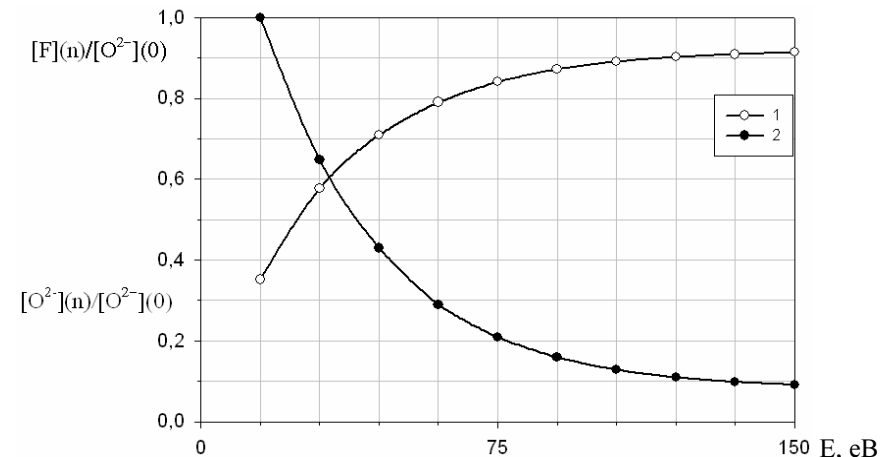


Рис. 2. Кінетика наростання F-центрів ($[F](n)/[O^{2-}](0)$) (крива 1) та радіаційного руйнування O^{2-} іонів ($[O^{2-}](n)/[O^{2-}](0)$) (крива 2) у кристалах $CaF_2-0,03$ мол. % O^{2-} ($T=350$ К)

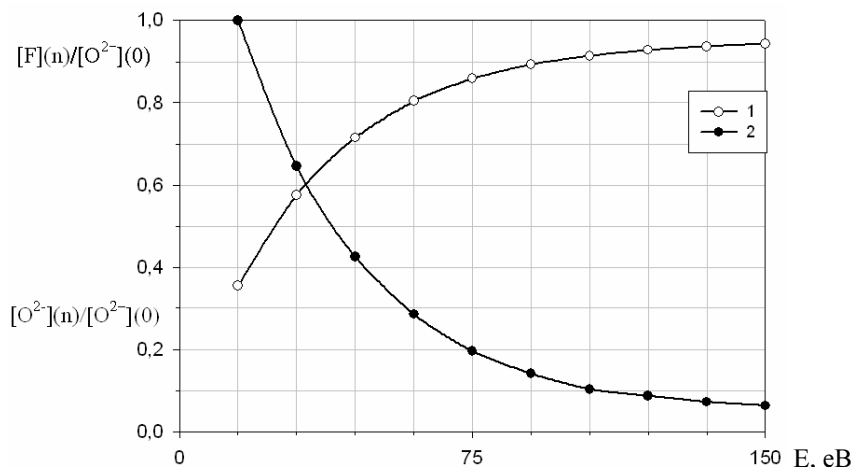


Рис. 3. Кінетика наростання F-центрів ($[F](n)/[O^{2-}](0)$) (крива 1) та радіаційного руйнування O^{2-} іонів ($[O^{2-}](n)/[O^{2-}](0)$) (крива 2) у кристалах $CaF_2-0,0125$ мол. % O^{2-} ($T=350$ K)

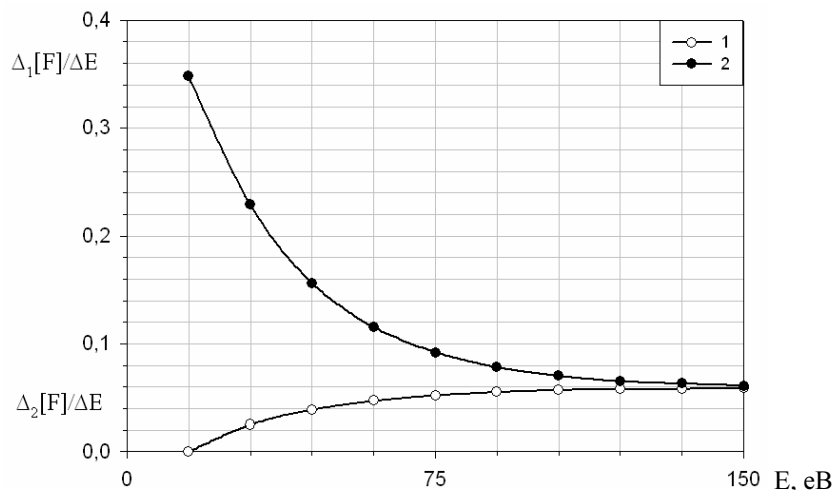


Рис. 4. Швидкість наростання (крива 1) та висвічування (крива 2) концентрації F-центрів у процесі опромінення кристала $CaF_2-0,1$ мол. % O^{2-} ($T=350$ K)

Табл. 2. Результати розрахунків кривої наростання центрів забарвлення у кристалах $CaF_2-0,1$ мол. % O^{2-} , опромінені рентгенівськими променями за $T=350$ K

n	$[O^{2-}](n)/[O^{2-}](0)$	$\Delta_1[F]/\Delta E$	$\Delta_2[F]/\Delta E$	$[F](n)/[O^{2-}](0)$
1	1,000	0,348	0,000	0,348
2	0,652	0,229	0,025	0,552
3	0,448	0,156	0,039	0,669
4	0,331	0,115	0,047	0,737

5	0,263	0,092	0,052	0,777
6	0,223	0,078	0,055	0,800
7	0,200	0,070	0,057	0,813
8	0,187	0,065	0,058	0,820
9	0,180	0,063	0,058	0,825
10	0,175	0,061	0,059	0,829

n – число ізодоз опромінення, поглинутої ($O^{2-} \dots V_a^+$)-фрагментом кристала; $[O^{2-}](0)$ і $[O^{2-}](n)$ – концентрація O^{2-} в кристалі до його опромінення та після опромінення n-ΔE дозою радіації відповідно; $[F](n)$ – концентрація F-центрів після опромінення n-ΔE дозою радіації; $\Delta_1[F]/\Delta E$ та $\Delta_2[F]/\Delta E$ – швидкість наростання F-центрів та їх радіаційного руйнування; $E = 15 \cdot n$ (eV).

Табл. 3. Результати розрахунків кривої наростання центрів забарвлення в кристалах $CaF_2-0,03$ мол. % O^{2-} , опромінені рентгенівськими променями за $T=350$ K

n	$[O^{2-}](n)/[O^{2-}](0)$	$\Delta_1[F]/\Delta E$	$\Delta_2[F]/\Delta E$	$[F](n)/[O^{2-}](0)$
1	1,000	0,352	0,000	0,352
2	0,648	0,228	0,011	0,578
3	0,492	0,149	0,017	0,710
4	0,290	0,102	0,021	0,791
5	0,209	0,074	0,024	0,841
6	0,159	0,056	0,025	0,872
7	0,128	0,045	0,026	0,891
8	0,109	0,038	0,027	0,902
9	0,098	0,034	0,027	0,909
10	0,091	0,032	0,027	0,914

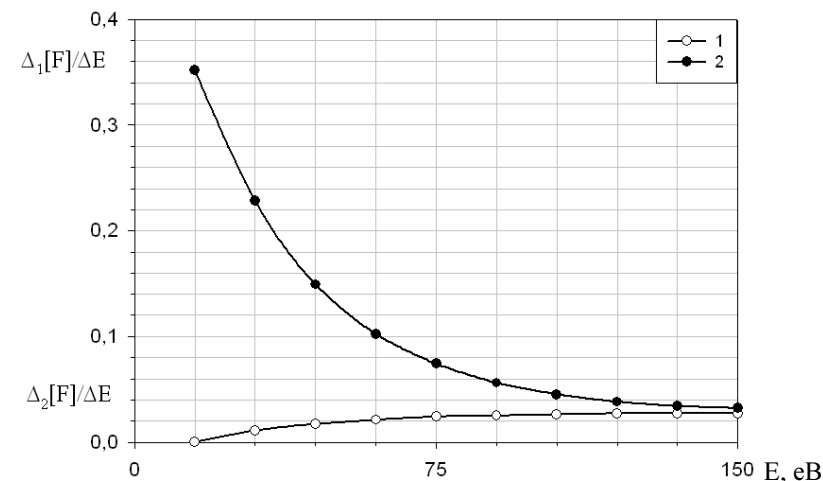


Рис. 5. Швидкість наростання (крива 1) та висвічування (крива 2) концентрації F-центрів у процесі опромінення кристала $CaF_2-0,03$ мол. % O^{2-} ($T=350$ K)

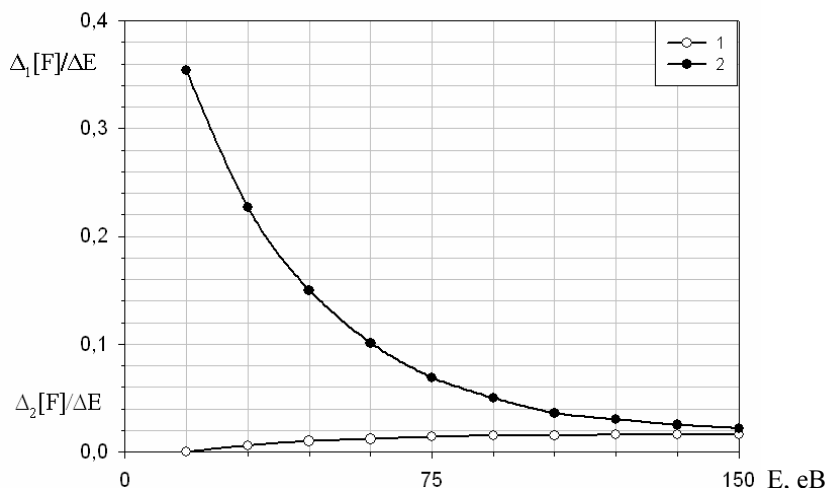


Рис. 6. Швидкість наростання (крива 1) та висвічування (крива 2) концентрації F-центрів у процесі опромінення кристала $\text{CaF}_2\text{-}0,0125$ мол. % O^{2-} ($T=350$ K)

Табл. 4. Результати розрахунків кривої наростання центрів забарвлення в кристалах $\text{CaF}_2\text{-}0,0125$ мол. % O^{2-} , опромінених рентгенівськими променями за $T=350$ K

n	$[\text{O}^{2-}](n)/[\text{O}^{2-}](0)$	$\Delta_1[F]/\Delta E$	$\Delta_2[F]/\Delta E$	$[F](n)/[\text{O}^{2-}](0)$
1	1,000	0,354	0,000	0,354
2	0,646	0,227	0,006	0,575
3	0,425	0,150	0,010	0,715
4	0,285	0,101	0,012	0,804
5	0,196	0,069	0,014	0,859
6	0,141	0,050	0,015	0,893
7	0,103	0,036	0,015	0,914
8	0,086	0,030	0,016	0,928
9	0,072	0,025	0,016	0,937
10	0,063	0,022	0,016	0,943

Висновки. У процесі опромінення кристала утворення центрів забарвлення не впливає на його електронейтральність, оскільки електронні та діркові центри забарвлення виникають парно. У кристалах $\text{CaF}_2\text{-O}^{2-}$, опромінених за $T < 300$ K, у створенні кожної комплементарної пари центрів забарвлення (рівняння 2 і 3) задіяна одна пара ДВД. За $T > 300$ K має місце термодисоціація ДВД (рівняння 1) і за даних умов комплементарна пара центрів забарвлення утворюється внаслідок локалізації носіїв заряду на компонентах ДВД і тому в процесі задіяний лише один домішковий іон (рівняння 4). Отже, ефективність перебігу реакції (4) є вищою порівняно з реакціями (2, 3). Із врахуванням величини співвідношень $w_1/(w_1+w_2)$ у реакціях (2, 3, 4) (табл. 1) впливає, що гранична концентрація F-центрів на стадії насичення (рівняння 4) в 25-30 разів вища, порівняно з граничною концентрацією F_A -центрів (рівняння 2) і майже в 4 рази вища за граничну концентрацію M_A^+ -центрів (рівняння 3), тобто кристали $\text{CaF}_2\text{-O}^{2-}$ за $T > 300$ K є надчутливими радіаційними матеріалами.

Література

- Hayes W. Crystals with fluorite structure / W. Hayes, A.M. Stoneham. – Oxford. – 1974. – 448 p.
- Smakula A. Color centers in calcium fluoride and barium fluoride crystals / A. Smakula // Phys. Rev. – 1950. – Vol. 77, № 4. – Pp. 408-409.
- Раух Р. Фотолуминесценция центров окраски в кристаллах щелочноземельных флюоритов / Р. Раух // Известия АН СССР. – Сер.: Физическая. – 1973. – Т. 37, № 3. – С. 595-598.
- Архангельская В.А. Люминесценция, термо- и фотохимия возмущенных центров окраски в кристаллах типа флюорита со щелочными примесями / В.А. Архангельская // Известия АН СССР. – Сер.: Физическая. – 1982. – Т. 46, № 2. – С. 295-299.
- Jacobs P.W. Thermal depolarisation in crystals of calcium fluoride doped with oxygen / P.W. Jacobs, S.H. Ong // Journ. Phys. Chem. Sol. – 1980. – Vol. 41, № 5. – Pp. 431-441.
- Чорний З.П. Ионные термотоки в радиационно окрашенных кристаллах CaF_2 / З.П. Чорний, С.И. Качан, Г.А. Щур, С.П. Дубельт // Известия ВУЗов. – Сер.: Физическая. – 1988. – № 6. – С. 116-117.
- Чорний З.П. Моделювання радіаційних властивостей іонних кристалів / З.П. Чорний, І.Б. Пірко, В.М. Салапак, М.В. Дячук // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2008. – Вип. 18.1. – С. 220-226.
- Чорний З.П. Іонні ланцюги з точковими дефектами дипольного типу: повторне опромінення / З.П. Чорний, І.Б. Пірко, В.М. Салапак, М.В. Дячук // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2009. – Вип. 19.7. – С. 275-285.
- Чорний З.П. Кінетика радіаційного утворення центрів забарвлення в іонних кристалах. І. Кристали з домішково-вакансійними диполями. Генерація F_A -центрів / З.П. Чорний, І.Б. Пірко, В.М. Салапак, М.В. Дячук // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2013. – Вип. 23.11. – С. 175-180.

Чорний З.П., Пірко І.Б., Салапак В.М., Дячук Н.В., Онуфрив О.Р. Кінетика наростання центрів окраски в іонних кристалах. IV. F-центри в кристалах $\text{CaF}_2\text{-O}^{2-}$

Исследованы радиационные параметры кристаллов $\text{CaF}_2\text{-O}^{2-}$, облученных ионизирующей радиацией при $T=350$ K. Рассчитана кинетика нарастания (F-O)-комплементарных пар центров окраски и их предельная концентрация в кристалле. Показано, что предельная концентрация F-центров в 25-30 раз выше по сравнению с предельной концентрацией F_A -центров и в 4 раза выше предельной концентрации M_A^+ -центров.

Ключевые слова: кристаллы, центры окраски, радиация.

Chornij Z.P., Pirko I.B., Salapak V.M., Djachuk N.V., Onoufrif O.R. Kinetics of growth of color centers in ionic crystals. IV. F-centers in crystals of $\text{CaF}_2\text{-O}^{2-}$

Radiation parameters crystals $\text{CaF}_2\text{-O}^{2-}$, exposed to ionizing radiation at $T=350$ K. Calculated kinetics of growth (F-O)-complementary pairs of color centers and their maximum concentration in the crystal. It is shown that the limiting concentration of F-centers are 25-30 times higher compared to the limiting concentration of F_A -centers and 4 times higher than the maximum concentration of M_A^+ centers.

Keywords: crystals, color centers, radiation.

УДК 631:331.4 Доц. А.М. Дейнека, д-р екон. наук – НЛТУ України, м. Львів; асист. В.М. Степанішин – НУ "Львівська політехніка"

ЕФЕКТИВНІСТЬ ПЛАНУВАННЯ ЗАХОДІВ З ОХОРОНИ ПРАЦІ НА ЛІСОГОСПОДАРСЬКИХ ПІДПРИЄМСТВАХ НА ОСНОВІ ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКУ ВИРОБНИЧОГО ТРАВМАТИЗМУ

Проведено дослідження стану виробничого травматизму на підприємствах лісової галузі та ефективності планування заходів і використання коштів на охорону праці на