

PACS number: 61.46. + w

КІНЕТИКА УТВОРЕННЯ ЗГУСТКІВ Ag НА МІКРОКРИСТАЛАХ AgBr ПРИ НОРМАЛЬНОМУ ЛАЗЕРНОМУ ЕФЕКТІ ГЕРШЕЛЯ

Олександр Б. Півень¹, Олег Б. Півень¹, Ю.М. Лопаткін²

¹ Черкаський державний технологічний університет,
б. Шевченко, 460, 18006 Черкаси, Україна
E-mail: abpiven@ukr.net

² Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, 40007, Суми, Україна
E-mail: yu_lopatkin@ukr.net

В роботі встановлено, що при нормальному лазерному ефекті Гершеля при малому часі експозиції фотошару СП 1 (чут. 6 од.) $t_{експ} = 10^{-5}$ с згустки срібла мають аморфну будову, а при часі експозиції $t = 0,5$ с згустки срібла Ag мають кристалічну будову. Енергія кристалізації згустків Ag при одночасній дії синього і інфрачервоного (ІЧ) лазерного світла $W_{min} = 10^{-8}$ Дж.

Ключові слова: ЛАЗЕРНИЙ НОРМАЛЬНИЙ ЕФЕКТ ГЕРШЕЛЯ, ЗГУСТОК СРІБЛА, МІКРОКРИСТАЛ AgBr, НИЗЬКОЧУТЛИВИЙ ФОТОШАР, ЕНЕРГІЯ КРИСТАЛІЗАЦІЇ ЗГУСТКУ Ag 10^{-8} Дж.

*(Одержано 12.09.2011, у відредагованій формі – 06.12.2011,
опубліковано online 30.12.2011)*

1. ВСТУП

Під дією світла фотохімічне виділення срібла з мікрочисталів (МК) AgBr в фотоемульсії повинно починатися з появи окремих атомів срібла, концентрація яких поступово росте з експозицією. Одночасно ці атоми взаємодіють з утворенням молекул і далі аморфних згустків срібла. При досягненні пересичення по сріблу виникають металічні кристалічні зародки срібла критичного розміру [1], що узгоджується з термодинамічною теорією фотографічної чутливості Є.О. Галашина [2]. За цією теорією накопичення в МК AgBr вільного срібла веде до фазового переходу аморфного срібла в кристалічне. Головним фактором кристалізації за цією теорією є збільшення енергії взаємодії між атомами або молекулами срібла, які утворюють пересичену систему з електростатично збудженими електронами [3].

Вивчення фазового переходу аморфного срібла в кристалічне має велике значення для фізики твердого тіла [4-6], для запису і зчитування інформації шляхом аморфізації кристалічного срібла і кристалізації аморфного, для наукової фотографії [7, 8], так як кристалічні центри прихованого зображення (ЦПЗ), виникають із аморфних частинок срібла і відіграють основну роль в фотопроцесі [9].

Зростання пересичення по аморфному сріблу в коагуляційних центрах (КЦ), які виникають при лазерному нормальному ефекті Гершеля (ЛНЕГ), дозволяє збільшити світлочутливість фотоемульсії СП-1 чут. 6

од. в 3 рази без додаткових витрат срібла і отже економити срібло в 3 рази [10]. Доведено, що природа ЛНЕГ коагуляційна [1, 11]. Також доведена на практиці кристалізація розплавленого антрацену під дією ультрафіолетового світла з $\lambda = 365$ нм при експозиції $t = 0,1$ с [12]. Світло може кристалізувати речовину [13].

Під дією інтенсивного лазерного світла з $\lambda = 850$ нм і потужністю $P = 4$ Вт в імпульсі при поверхневій густині енергії лазерного світла $W = 312$ Дж/см² при ЛНЕГ аморфне срібло в КЦ кристалізується [11, 14]. Процеси, які проходять при ЛНЕГ з аморфним сріблом в КЦ залежать від густини поверхневої світлової енергії лазерного світла [11].

Зародок аморфного срібла, який росте, діаметром більше 1 нм обов'язково закристалізується під дією лазерного світла $\lambda = 440$ нм і потужністю $P = 10$ мВт при експозиції $t = 0,5$ с [9], що підтверджує термодинамічну теорію.

Але кінетика росту згустків срібла в фотоемульсіях під одночасною дією двох актинічного і неактинічного лазерних випромінювань для різних довжин хвиль, потужностей лазерів і експозицій досліджена недостатньо. Вивченню цього питання і присвячена ця стаття.

2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Для дослідження кінетики переходу аморфного срібла в кристалічні згустки Ag при опроміненні МК AgBr в фотошарі лазерним світлом взяли систему диференціальних рівнянь (8) з роботи [15].

Будемо вважати кожен частинку срібла кулею радіуса R , яка росте за рахунок потоків іонів і поляризованих атомів. Під дією лазерного світла виникає багато зростаючих частинок в приповерхневому шарі МК AgBr. Нехай $2R_m$ – середня відстань між двома центрами. Притягання іонів і атомів Ag до згустку який росте генерується потоком, густина якого на початку дорівнює $J_i = n_i \cdot D_i \cdot F_i \cdot (k_b \cdot T)^{-1}$, $J_a = n_a \cdot D_a \cdot F_a \cdot (k_b \cdot T)^{-1}$, де n_i , n_a – кількість блукаючих іонів і атомів Ag в одиниці об'єму МК при $T = 300$ К, D_i , D_a – коефіцієнти дифузії в МК іонів і атомів Ag ($D_i = D_a = D$), F_i – сила, яка діє на іон зі сторони електрона який закріпився, F_a – сила електрон-дипольної взаємодії між електроном який закріпився і поляризованим атомом Ag, k_b – стала Больцмана. Приймаючи до уваги, що притягання електрона, який закріпився на центрі, до іонів і поляризованих атомів срібла, змінюється нейтралізованим станом центру, яке зберігається певний час до захоплення нового електрона. Тоді вирази для сили F_a , F_i необхідно домножити на частину часу, проведеного частинкою в зарядженому стані: $F_i = \tau_i \cdot k \cdot e^2 / ((\tau_i + \tau_e) \cdot R^2)$, $F_a = \alpha \tau_i \cdot k \cdot e^2 / ((\tau_i + \tau_e) \cdot R^5)$, де $k = 9 \cdot 10^9$ м/Ф, де e – заряд електрона, τ_i – час до захоплення іона срібла електроном, який закріпився у пастці, τ_e – час до захоплення пасткою електрона, який виник, α – поляризуємість атома срібла. Дрейфові потоки на частинку, яка росте визивають перерозподіл іонів всередині кулі. Тому $J_i = -D_i \text{ grad } n_i + n_i \cdot D_i \cdot F_i \cdot (k_b \cdot T)^{-1}$, $J_a = -D_a$,

$$\frac{dR}{dt} = - \frac{J_i(t, r) + J_a(t, r)}{n_R} \Big|_{r=R(t)},$$

$\text{grad } n_a + n_a \cdot D_a \cdot F_a \cdot (k_b \cdot T)^{-1}$. Швидкість росту частинок визначалось рівнянням балансу мас де n_R – концентрація атомів в частинці, яка росте.

Рівняння

$$dn_i/dt = \sigma_V - \chi_{ie} n_i n_e - 4\pi R^2 |J_i| / (4\pi R^3_m/3 - 4\pi R^3/3) \quad (1)$$

визначає зміну в часі концентрацію іонів срібла. σ_V описує під дією лазерного випромінювання в одиниці об'єму МК AgBr за 1 с кількість іонів срібла, які виникли. Доданок $-\chi_{ie} n_i n_e$ описує, що деякі іони срібла рекомбінують з рухливими електронами під час руху до пасток, утворюючи атоми срібла, які ще не приєдналися до згустку. Останній доданок описує, що електрони, які закріпилися на пастках зустрічаються з деякою частиною іонів срібла, утворюють атоми, які ідуть на приріст об'єму згустків срібла за 1 с, для чого потік іонів на зростаючий згусток ділиться на різницю між максимальним об'ємом, і об'ємом згустку в даний момент часу.

Рівняння

$$dn_a/dt = \chi_{ie} n_i n_e - 4\pi R^2 |J_a| / (4\pi R^3_m/3 - 4\pi R^3/3) \quad (2)$$

визначає зміну концентрації атомів срібла, в одиниці об'єму МК AgBr за 1 с, які утворилися при рекомбінації іонів і електронів. Перший доданок $-\chi_{ie} n_i n_e$ визначає, що деякі іони срібла рекомбінують з рухливими електронами під час руху до пасток, утворюючи атоми срібла, які ще не приєдналися до згустку. Наступний доданок описує, що деяка частина атомів срібла поляризується і притягується полем електрона, який закріпився, і йде на зростання об'єму згустків срібла за 1 с.

Рівняння

$$dn_e/dt = \sigma_V - \chi_{ie} n_i n_e - \chi_{he} n_h n_e - n_e/\tau_e \quad (3)$$

визначає зміну концентрації електронів. σ_V описує під дією лазерного випромінювання в одиниці об'єму МК AgBr за 1 с кількість електронів срібла, які виникли. Наступний доданок $-\chi_{ie} n_i n_e$ визначає рекомбінацію електронів з частиною іонів срібла, третій доданок $-\chi_{he} n_h n_e$ визначає рекомбінацію електронів з дірками, останній доданок визначає $-n_e/\tau_e$ захоплення частини електронів пастками за 1 с.

Рівняння

$$dn_h/dt = \sigma_V - \chi_{he} n_h n_e \quad (4)$$

описує за допомогою світла в одиниці об'єму зміну концентрації дірок які утворилися. σ_V описує під дією лазерного випромінювання в одиниці об'єму МК AgBr за 1 с число дірок, які виникли. Доданок $-\chi_{he} n_h n_e$ визначає рекомбінацію електронів з дірками.

Робили припущення $\chi_{ie} = \chi_{he}$ де χ_{ie} – описує частоту рекомбінацій блукаючих іонів срібла і електронів, χ_{he} – описує частоту рекомбінацій блукаючих електронів з дірками. Підставляючи значення J_a , J_i і враховуючи перехід від R до V і $\gamma = 4 \cdot \pi \cdot D \cdot k \cdot e^2 (k_b/T)^{-1}$, $\xi = \chi_{ie} \cdot \tau_e$, в рівняннях 1 – 4 отримували систему рівнянь.

$$\begin{cases} dn_i / dt = (\sigma_V (\xi n_h + 1) / (1 + \xi (n_i + n_h))) - (\gamma n_i / (V_m - V)); \\ dn_a / dt = (\sigma_V \xi n_i / (1 + \xi (n_i + n_h))) - (\gamma n_a 4\pi\alpha / (3V (V_m - V))); \\ dn_h / dt = \sigma_V (\xi n_i + 1) / (\xi (n_i + n_h) + 1); \\ dV / dt = (\gamma (n_i + 4\pi\alpha n_a / 3V) / n_R); \end{cases} \quad (8)$$

В роботі [1] теоретично доказано, що затрати світлової енергії, яка витрачається на утворення срібного ЦПЗ W_v тим більші, чим менший розмір ЦПЗ.

За аналогією з роботою [16] вважалось необхідним створити комп'ютерні моделі (КМ) росту згустків срібла в МК AgBr фотоемульсії СП 1 чут. 6 од. ГОСТ шляхом засвічування цієї фотоемульсії світлом двох лазерів з реально існуючими параметрами, яке починалося одночасно. Перший лазер у всіх КМ мав такі параметри (λ – довжина хвилі, P – потужність): $\lambda = 440$ нм, $P = 10$ мВт, час опромінення $t = 0,5$ с. Другий лазер в КМ по чергово мав такі параметри: 1) $\lambda = 850$ нм, $P = 4$ Вт в імпульсі, 2) $\lambda_1 = 1060$ нм, $P = 10$ мВт, 3) $\lambda_2 = 1150$ нм, $P = 10$ мВт. Параметри 2) і 3) відповідають газовому лазеру з неперервним режимом генерації світла. Умови опромінення відповідають ЛНЕГ з повністю суміщеними в часі первинною і вторинною експозиціями.

Методом електронної мікроскопії було встановлено, що ЦПЗ є кристалики срібла, які складаються із десятків або декількох сотень атомів срібла, які утворилися в основному на поверхні МК AgBr [17]. Для модельних розрахунків площа МК AgBr в фотоемульсії СП 1 чут. 6 од. становила $S = 10^{-12} \text{ м}^2$ [15].

З урахуванням значення параметрів початкові умови для рішення системи рівнянь (8) були наступні: $n_i = 0$, $n_a = 10^{24} \text{ м}^{-3}$, $n_h = 0$, $R = 1,44 \cdot 10^{-10}$ м. Параметр σ_V – кількість іонів, які утворилися під дією світла і кількість звільнених дірок і електронів в одиниці об'єму МК за 1 с. Знаходили: 1) для лазерів $\lambda = 440$ нм, $\lambda = 850$ нм, $\lambda = 1060$ нм, $\lambda = 1150$ нм кількість квантів випромінюваних лазером за 1 с по формулі $N = \eta P \lambda / hc$, де h – постійна Планка, c – швидкість світла в вакуумі, $\eta = 0,5$ коефіцієнт корисної дії; 2) площу пучка світла лазера діаметром $3 \cdot 10^{-3}$ м; 3) площу умовного мікрокристалу розміром $0,5$ мкм \times $0,5$ мкм. Для лазера $\lambda = 850$ нм через пропорцію знаходили кількість квантів, які впали за час $0,036$ с; $0,072$ с; $0,144$ с; $0,216$ с; $0,288$ с; $0,504$ с 4) через пропорцію визначали кількість квантів, які упали на умовний мікрокристал; 5) кількість квантів, які упали на об'єм умовного мікрокристалу розміром $0,5$ мкм \times $0,5$ мкм \times $0,1$ мкм. За формулою $\sigma_{V_{zag.}} = \sigma_{V440} + \sigma_{V1060}$, $\sigma_{V_{zag.}} = \sigma_{V440} + \sigma_{V850}$, отримували $\sigma_{V440+1150} = 48 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$, $\sigma_{V440+1060} = 11,74 \cdot 10^{29} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$, $\sigma_{V440+850} = 3 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ для часу $0,036$ с, $\sigma_{V440+850} = 5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ для часу $0,072$ с, $\sigma_{V440+850} = 7 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ для часу $0,144$ с, $\sigma_{V440+850} = 10 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ для часу $0,216$ с, $\sigma_{V440+850} = 14 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ для часу $0,288$ с, $\sigma_{V440+850} = 2,4 \cdot 10^{29} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ для часу $0,504$ с. Складалась програма на мові програмування Turbo-Pascal 7.0. Результати числових обрахунків системи диференціальних

рівнянь (8) одержували методом Рунге-Кутта четвертого порядку.

В роботі [18] запропонована модель переходу речовини із аморфного стану в кристалічний стан, в якій мірою неупорядкованості служить концентрація вакансій n . В цій роботі описується фазовий перехід в деформованому вакансіями кристалі та приводиться залежність вільної енергії F на одиницю об'єму аморфної речовини або кристалу від концентрації вакансій n . В цій же роботі показано, що врахування парної взаємодії вакансій приводить до існування в деякому температурному інтервалі 2 мінімумів $F(n)$, перший із яких (малі n) відповідає кристалічній фазі, другий (великі n) – неупорядкованій рідкій або аморфній фазі.

Експозиція фотошару здійснювалась одночасно для двох лазерів 1) $\lambda = 440$ нм, $P = 10$ мВт протягом $t = 0,5$ с, і для $\lambda = 1060$ нм, $P = 10$ мВт безперервному режимі генерації була $t = 18$ с; 2) $\lambda = 440$ нм, $P = 10$ мВт протягом $t = 0,5$ с, $\lambda = 1150$ нм $P = 10$ мВт безперервному режимі генерації була $t = 18$ с; 3) $\lambda = 440$ нм, $P = 10$ мВт протягом $t = 0,5$ с, $\lambda = 850$ нм, $P = 4$ Вт в імпульсі $2 \cdot 10^{-7}$ с. Обрахунок проводили за формулою $t = \tau d/v$, де $\tau = 2 \cdot 10^{-7}$ с – тривалість світлового імпульсу лазера, $f = 10$ кГц – кількість імпульсів за 1 с (частота імпульсів), d/v – час, за який фотопластинка переміщувалась на довжину діаметра лазерного пучка, d – діаметр лазерного світлового пучка, v – швидкість фотопластинки приймала значення 10^{-2} м/60 с (сумарний час імпульсів був 0,036 с; 0,072 с; 0,144 с; 0,216 с; 0,288 с; 0,504 с).

На рис. 1 показані характеристичні криві для фотошару СП 1 чут. 6 од. для умови 3). Для $\lambda = 440$ нм і потужності $P = 10$ мВт і $\lambda = 850$ нм, $P = 4$ Вт в імпульсі $2 \cdot 10^{-7}$ с для нормального лазерного ЕГ при різному сумарному часі імпульсів лазерним світлом. Із збільшенням сумарного часу імпульсів характеристичні криві 2 – 6 переміщувались вправо по вісі $\lg H$, по відношенню, характеристичної кривої 1, одержаної при умовою 3) часі 0,036 с.

3. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Для кожної досліджуваної довжини світлової хвилі і потужності лазера на екран ЕОМ виводилися мінімальне і максимальне значення V об'єму згустків срібла. Ці величини та числові значення N_i і час їх утворення, заносилися в таблицю №1. Ці значення перевірялись за допомогою графіків цих величин. Наприклад, до вісі часу – $30 \cdot \lg(t)$ в точці, яка відповідає часу експозиції 0,5 с будували перпендикуляр, який продовжували до точки перетину з кривою 1 (об'єму згустку). З цієї точки перетину проводили горизонтальну пряму до перетину з віссю ординат, де є шкала побудована ЕОМ і знаходили, наприклад, число 220. Тоді по формулі $-10 \cdot \lg(V_{max}) = 220$, $\lg(V_{max}) = -22$ знаходили об'єм срібного згустку $V_{max} = 10^{-22}$ м³. Аналогічно знаходили значення по порядку величини для N_i , і заносилися в таблицю 1.

Із таблиці 1 видно, що із збільшенням сумарного часу ($t_{i,mn}$) експозиції ГЧ світлом лазера $\lambda = 850$ нм об'єм згустків Ag збільшується від $V_{min} = 1,9 \cdot 10^{-22}$ м³ до $V_{max} = 4,1 \cdot 10^{-21}$ м³. Кількість атомів N_a в згустку

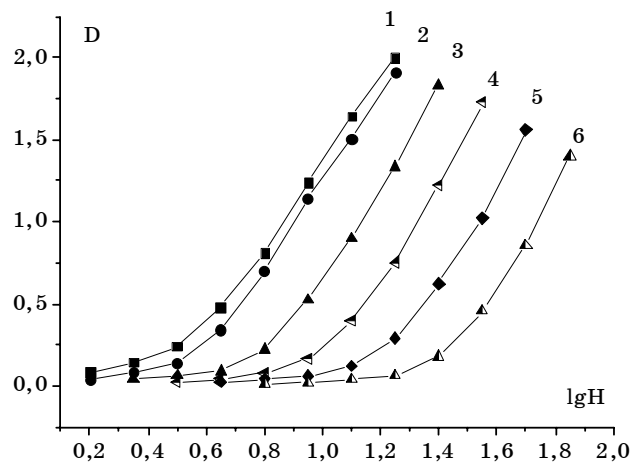


Рис. 1 – Характеристичні криві для нормального лазерного ЕГ для фотошару СП 1 (чут. 6 од). Одночасна експозиція фотошару здійснювалась лазерним світлом $\lambda = 440$ нм $P = 10$ мВт протягом $t_{440} = 0,5$ с і ІЧ лазерним світлом $\lambda = 850$ нм $P = 4$ Вт з імпульсом $2 \cdot 10^{-7}$ с. Криві: 1 – 0,5 с + сумарна експозиція імпульсами 0,036 с; 2 – 0,5 с + сумарна експозиція імпульсами 0,072 с; 3 – 0,5 с + сумарна експозиція імпульсами 0,144 с; 4 – 0,5 с + сумарна експозиція імпульсами 0,216 с; 5 – 0,5 с + сумарна експозиція імпульсами 0,288 с; 6 – 0,5 с + сумарна експозиція імпульсами 0,504 с.

Ag збільшується від $1,8 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ до $4 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ для лазерного світла $\lambda = 850$ нм при експозиції ІЧ світлом $t_{екп} = 0,504$ с, а для довжин лазерного світла $\lambda_1 = 1060$ нм, $\lambda_2 = 1150$ нм $N_{a1060} = 4,3 \cdot 10^{29} \text{ м}^{-3}$; $N_{a1150} = 2,0 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ відповідно. Для $\lambda = 850$ нм кількість іонів Ag^+ зменшується від $6,34 \cdot 10^{27} \text{ м}^{-3}$ до $8,8 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$, що узгоджується з термодинамічною теорією фотографічної чутливості про те, що частина атомів Ag^0 , які утворились за рахунок рекомбінації Ag^+ і електронів через поляризацію атомів електричним полем електрона, вони переходить у срібний згусток [19], а для $\lambda_1 = 1060$ нм, $\lambda_2 = 1150$ нм майже не змінюється і відповідно становить $3,7 \cdot 10^{29} \text{ м}^{-3}$ до $2,3 \cdot 10^{29} \text{ м}^{-3}$.

Із зростанням сумарного часу імпульсів лазерного світла $\lambda = 850$ нм енергія кристалізації згустків по порядку величини зростає 10^{-8} Дж, що узгоджується з роботою [20]. Із збільшенням енергії квантів світла і кількості їх поглинутих МК AgBr кристалізація, напевне, полегшується. В роботах [9, 15] встановлено, що частинка срібла 1 нм в діаметрі при подальшому зростанні її обов'язково закристалізується. При експозиції ІЧ лазерним світлом при часі 0,5 с по шкалі $-30 \cdot \lg(t)$ кількість іонів N_i відокремлюється від кривої дирок N_d і відбувається збільшення числа іонів срібла від $4,8 \cdot 10^{27} \text{ м}^{-3}$ до $1,47 \cdot 10^{29} \text{ м}^{-3}$. Спостерігається явище сповільнення рекомбінації іонів срібла Ag^+ та вільних електронів, так як із збуджених атомів бром утворюються молекули Br_2 [21]. Кожна молекула під час утворення приєднує два електрони з протилежними спінами і кількість електронів, які утворилися в реакції

$\text{AgBr} + h\nu \rightarrow \text{Ag}^+ + \text{Br}^- + e$ зменшується. Без електронів іони Ag^+ не можуть рекомбінувати і утворювати атоми срібла Ag^0 . Результати обрахунків представлені в таблиці 1.

Таким чином, у роботі підтверджено справедливість теоретичного висновку [1], що затрати світлової енергії, яка витрачається на утворення срібного ЦПЗ тим більші, чим менші розміри ЦПЗ і одержано її числове значення. Величина енергії кристалізації ЦПЗ при ЛНЕГ 10^{-8} Дж.

Таблиця 1 – Нормальний лазерний ефект Гершеля

Параметри лазерного світла		ΣI_{imp} сумарний час імпульсів лазерного світла (с)	Малий час експозиції лазерним світлом 10^{-5} с		Великий час експозиції лазерним світлом 0,5 с				
Довжина хвилі (λ) (нм)	P – оптична потужність в імпульсі (Вт)		V_{min} мінімальний об'єм згустку $\text{Ag} \cdot 10^{-24}$ (м ³)	Діаметр згустку в порівнянні з $d_{\text{кр}} = 10 \cdot 10^{-10}$ м, $2 \cdot R = d_{\text{кр}}$, (10^{-10} м)	Згусток срібла аморфний (А) або кристалічний (К)	Діаметр згустку в порівнянні з $d_{\text{кр}} = 10 \cdot 10^{-10}$ м, $2 \cdot R = d_{\text{кр}}$, (10^{-10} м)	V_{max} максимальний об'єм згустку $\text{Ag} \cdot 10^{-21}$ (м ³)	Кількість іонів срібла N_i при експозиції $t = 0,5$ с, (м ⁻³)	Енергія кристалізації згустку срібла для $t = 0,5$ с, $\cdot 10^{-8}$ (Дж)
850	4	0,036	14	$0,67 < d_{\text{кр}}$	А К	$620 > d_{\text{кр}}$	10	$5,87 \cdot 10^{25}$	0,25
850	4	0,072	23	$1,95 < d_{\text{кр}}$	А К	$844 > d_{\text{кр}}$	17	$4,8 \cdot 10^{27}$	0,5
850	4	0,144	32	$2,28 < d_{\text{кр}}$	А К	$1064,6 > d_{\text{кр}}$	26	$4,85 \cdot 10^{27}$	1
850	4	0,216	47	$2,05 < d_{\text{кр}}$	А К	$1149 > d_{\text{кр}}$	32	$7,78 \cdot 10^{25}$	1,5
850	4	0,288	66	$2,31 < d_{\text{кр}}$	А К	$1214,2 > d_{\text{кр}}$	40	$1,31 \cdot 10^{25}$	2
850	4	0,504	1,1	$2,46 < d_{\text{кр}}$	А К	$1340 > d_{\text{кр}}$	41,8	$8,8 \cdot 10^{24}$	3,5
1060	10^{-2}	18	5,4	$1,34 < d_{\text{кр}}$	А К	$267 > d_{\text{кр}}$	4,4	$3,78 \cdot 10^{29}$	0,3
1150	10^{-2}	18	2,3	$1,96 < d_{\text{кр}}$	А К	$198 > d_{\text{кр}}$	1,0	$1,47 \cdot 10^{29}$	0,3

4. ВИСНОВКИ

В цій роботі за результатами модельних комп'ютерних розрахунків кінетики росту згустків Ag при одночасному опроміненні актинічним і неактинічним лазерним світлом можливо зробити такі висновки:

1. При нормальному лазерному ефекті Гершеля при малому часі $t_{\text{експ}} = 10^{-5}$ с згустки срібла мають аморфну будову, а при часі $t_{\text{експ}} = 0,5$ с згустки срібла Ag мають кристалічну будову.
2. Енергія кристалізації згустків Ag при нормальному лазерному ефекті Гершеля по порядку величини становить 10^{-8} Дж.
3. Підтверджено справедливість теоретичного висновку роботи [1], що зі збільшенням затрат світлової енергії на утворення одного срібного ЦПЗ зменшується розмір ЦПЗ, і визначене його числове значення для нормального лазерного ефекту Гершеля.
4. Результати модельних розрахунків узгоджуються із положеннями теорій [1,2], а також з результатами робіт [5, 9, 17].

KINETICS OF FORMATIONS OF Ag CLOTS ON AgBr MICROCRYSTALS AT THE NORMAL LASER HERSHEL EFFECT**A.B. Piven¹, O.B. Piven¹, Yu.M. Lopatkin²**

¹ Cherkassy state technological university,
460, Shevchenko Str., 18006, Cherkassy, Ukraine
E-mail: abpiven@ukr.net

² Sumy State University,
2, Rimsky-Korsakov Str., 40007, Sumy, Ukraine
E-mail: yu_lopatkin@ukr.net

It is established that clots of silver have the amorphous structure at the normal laser Hershel effect after exposure of the photographic layer SP-1 (photosensitivity 6 standart units) with low time $t_{expos} = 10^{-5}$ sec, and at high exposure times ($t_{expos} = 0.5$ sec) they have the crystal structure. The energy of the crystallization of Ag clots equals $W_{min} = 10^{-8}$ J.

Keywords: LASER NORMAL HERSHEL EFFECT, CLOT OF SILVER, MICROCRYSTAL AgBr, LOW SENSITIVE PHOTOLAYER, ENERGY OF CRYSTALLIZATION OF CLOTS Ag 10^{-8} JOULE.

КИНЕТИКА ОБРАЗОВАНИЯ СГУСТКОВ Ag НА МК AgBr ПРИ НОРМАЛЬНОМ ЛАЗЕРНОМ ЭФФЕКТЕ ГЕРШЕЛЯ**А.Б. Пивень¹, О.Б. Пивень¹, Ю.М. Лопаткин²**

¹ Черкасский государственный технологический университет,
ул. Шевченко, 460, 18006 Черкассы, Украина
E-mail: abpiven@ukr.net

² Сумской государственный университет,
ул. Римского-Корсакова 2, 40007, Сумы, Украина
E-mail: yu_lopatkin@ukr.net

В работе установлено, что при нормальном лазерном эффекте Гершеля при малом времени экспозиции $t_{эксн} = 10^{-5}$ с фотослоя СП 1 (чув. 6 ед. ГОСТ) сгустки серебра имеют аморфное строение, а при больших экспозициях $t_{эксн} = 0,5$ с сгустки серебра имеют кристаллическое строение. Энергия кристаллизации сгустков Ag при одновременном действии синего и инфракрасного лазерного света $W_{min} = 10^{-8}$ Дж.

Ключевые слова: ЛАЗЕРНЫЙ НОРМАЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ ГЕРШЕЛЯ, СГУСТОК СЕРЕБРА, МИКРОКРИСТАЛЛ AgBr, НИЗКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ФОТОСЛОЙ, ЭНЕРГИЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ СГУСТКОВ Ag 10^{-8} Дж.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. К.В. Чибисов, *Природа фотографической чувствительности* (Москва: Наука: 1980).
2. Е.А. Галашин, *Доклады АН СРСР* **171**, 366 (1966).
3. Б.А. Безуглый, Е.А.Галашин, Т.Я. Дудкин, *Письма в ЖЭТФ* **22**, 76 (1975).
4. Т.А. Larichev, E.V. Prosvirkina, A.B. Abisheva, E.N. Kharchenko, B.A. Sechkarev, *Crystallogr. Rep.* **52**, 721 (2007).
5. J.D. Shore, D. Perchak, Y. Shnidman, *J. Chem. Phys.* **113**, 6276 (2000).

6. E.Yu. Perlin, D.I. Stasel'ko, *Opt. Spectros.* **88** #1, 50 (2000).
7. I.K. Doycho, S.A. Gevelyuk, O.O. Ptashchenko, *Opt. Appl.* **40** #2, 323 (2010).
8. B.A. Sechkarev, F.V. Titov, D.V. Djagilev, et al., *The Imaging Science Journal* **54**, 46 (2006).
9. А.М. Гусак, О.Б. Пивень, *Металлофизика* **14**, 83 (1992).
10. А.Б. Пивень, Б.Т. Пивень, О.Б. Пивень, *Вісник ЧДТУ №4*, 176 (2006).
11. М.В. Курик, Б.Т. Пивень, *ФТТ* **21**, 3441 (1979).
12. Е.А. Галашин, *Доклады АН СССР* **198**, 1360 (1971).
13. М.В. Алфимов, М.Л. Аптекарь, Е.А. Галашин, А.Е. Галашин, Открытие №351 по заявке НТО-10852 от 29.11 1983, Бюллетень «Открытия, изобретения М. №5 (1985).
14. А.Б. Пивень, Б.Т. Пивень, О.Б. Пивень, *Вісник ЧДТУ №2*, 97 (2009).
15. А.М. Гусак, Б.Т. Пивень, О.Б. Пивень, *УФЖ* **38**, 141 (1993).
16. R.K. Hailstone, R.D. Keyzer, *J. Phys. Chem. B* **105**, 7533 (2001).
17. С.Ф. Чернов, Образование новой фазы в системах с малым объемом (Москва: МАКС-ПРЕСС: 2001).
18. Е.Б. Яковлев, *Изв. АН СССР, Сер. физ.* **55**, 1362 (1991).
19. В.М. Белоус, В.Н. Толстобров, К.В. Чибисов, *Доклады АН СРСР* **236**, 645 (1977).
20. А.Б. Пивень, Б.Т. Пивень, О.Б. Пивень, *Вісник ЧДТУ №1*, 155 (2008).
21. М.М. Шахрова, Основы теории фотографических процессов (Киев: Вища школа 1985).