

*За результатами експериментальних досліджень особливостей процесу кристалізації напівпровідникових кристалів та сполук на їх основі обґрунтовано фізичну модель процесу та запропоновано методика реєстрації початкового моменту фазового перетворення розплаву у кристал. Розроблено методика синтезу та структурне й алгоритмічне рішення вбудованих в технологічну систему інтелектуальних само адаптивних комп'ютерних засобів для удосконалення процесу управління печами для вирощування кристалів CdTe методом Бріджмена*

*Ключові слова: напівпровідники, CdTe, метод Бріджмена, моделювання технологічного процесу, самоадаптивні комп'ютерні засоби*

*По результатам экспериментальных исследований особенностей процесса кристаллизации полупроводниковых кристаллов CdTe и соединений на их основе, обоснована физическая модель процесса и предложена методика регистрации начального момента фазового превращения расплава в кристалл. Разработана методика синтеза и структурное и алгоритмическое решение встроенных в технологическую систему интеллектуальных самоадаптивных компьютерных средств для усовершенствования процесса управления печами для выращивания кристаллов CdTe методом Бриджмена*

*Ключевые слова: полупроводники, CdTe, метод Бриджмена, моделирование технологического процесса, самоадаптивные компьютерные средства*

# МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, МЕТОДИКА ТА КОМП'ЮТЕРНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИРОЩУВАННЯ НАПІВПРОВІДНИКІВ МЕТОДОМ БРІДЖМЕНА

**Г. І. Воробець**

Кандидат фізико-математичних наук, доцент\*

E-mail: g.vorobets@chnu.edu.ua

**Р. В. Рогов**

Асистент\*

E-mail: roman\_rogov@mail.ru

**О. В. Копач**

Кандидат хімічних наук, доцент\*\*

E-mail: g.vorobets@chnu.edu.ua

\*Кафедра комп'ютерних систем та мереж  
\*\* Кафедра неорганічної хімії твердого тіла  
та нанодисперсних матеріалів\*\*\*

\*\*\*Чернівецький національний університет  
ім. Юрія Федьковича  
вул. Університетська, 28, м. Чернівці,  
Україна, 58000

## 1. Вступ

Якість і структурна досконалість напівпровідникових кристалів CdTe та багатокомпонентних сполук на їх основі є вирішальним фактором, що впливає на технічні параметри та електрофізичні характеристики напівпровідникових сенсорів, які використовують в електроніці, у тому числі в засобах реєстрації електромагнітного випромінювання видимого та інфрачервоного діапазону хвиль, а також детекторів рентгенівського і радіаційного випромінювання [1, 2]. Основною проблемою у процесі синтезу таких кристалів традиційним методом у двозонній печі є низький, порівняно з іншими матеріалами, відсоток отримання якісних монокристалічних злитків, та недостатня відтворюваність їх властивостей. Це впливає на вартість високо досконалих кристалів, яка може досягати десятків тисяч доларів, а відповідно і на вартість електронних компонент на їх основі.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В умовах дослідного лабораторного і дрібносерійного виробництва кристали CdTe, як правило, вирощують методом Бріджмена у вертикальних дво- або трizonних печах. Особливістю цієї методики є застосування стаціонарного температурного поля, фіксований профіль розподілу температури в якому задається конструктивними параметрами: намоткою нагрівальних елементів та геометричними розмірами конструкції. Часова стабільність температурного поля підтримується за законами пропорційно-інтегрального (ПІ) чи пропорційно-інтегрально-диференційного (ПІД) регулювання з допомогою мікропроцесорних систем [3, 4]. Однак, порівняно з іншими методиками, наприклад методом Чохральського [5] – витягування кристалу з розплаву, традиційний метод Бріджмена є більш чутливим до умов процесу. Це зумовлено тим, що кристалізація зразка відбувається за рахунок переміщення ампули з розплавленою шихтою з

високотемпературної області ( $T > T_{кр}$ ) в низькотемпературну область з температурою меншою за температуру кристалізації ( $T_{кр}$ ) напівпровідника, а активація процесу кристалізації відбувається спонтанно, за рахунок охолодження «зародкової» частини розплаву до  $T < T_{кр}$  при переміщенні ампули в низькотемпературну область. Зрозуміло, що за рахунок конвективних процесів у нагрітому повітрі навколо ампули геометрична точка печі, яка повинна відповідати умовній точці кристалізації (УТК) розплаву може зміщуватись у просторі. Крім того, відсутність явно вираженого центру кристалізації може приводити до т.зв. переохолодження розплаву, що утруднює реєстрацію моменту часу початку кристалізації. Зміщення ампули за межі УТК приводить до реалізації такого стану розплаву, коли умови початку кристалізації можуть реалізуватись одночасно в кількох точках розправу, розташованих, як правило, біля стінок ампули. В кращому випадку така ситуація приводить до одночасного росту кількох моноблоків кристалу, в гіршому – кристалізується полікристалічна фаза напівпровідника, яка непридатна для її застосування в процесі виготовлення сенсорів. Слід також зауважити, що некерований синтез кристалів складних сполук може приводити до порушення термодинамічної рівноваги парів компонент в ампулі та її руйнування.

Для підвищення керованості процесу синтезу кристалів даним методом, використовують комп'ютеризовані системи керування, аналогічні [5, 6], а сам процес сповільнюють у часі від кількох годин до кількох діб. Тому актуальним є завдання розробки та удосконалення технічних моделей власне самого процесу синтезу кристалів і способів реєстрації фазових перетворень розплаву-кристалу, а також способів синтезу та удосконалення комп'ютерних засобів (КЗ) для підвищення функціональності і керованості технологічним процесом вирощування кристалів методом Бріджмена. Одним з методів вирішення таких задач може бути застосування само адаптивних вбудованих КЗ для кібер фізичних систем [7–9].

### 3. Ціль та задачі дослідження

Метою даної роботи є встановлення коректної моделі процесу початку фазової трансформації розплаву шихти в ампулі та методу реєстрації початку кристалізації CdTe, а також розробку підходів та технічних рішень для синтезу самоадаптованих вбудованих КЗ для інтелектуального управління процесом синтезу напівпровідникових кристалів.

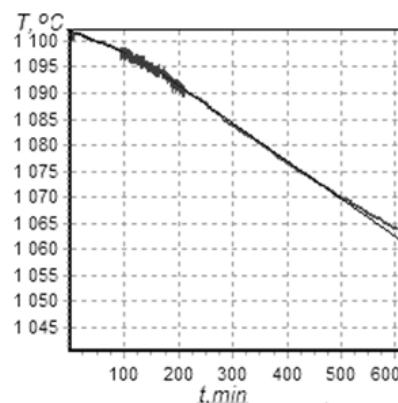
Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- провести ґрунтовний аналіз експериментальних досліджень процесу синтезу кристалів;
- встановити адекватну фізичну модель процесу синтезу та провести її якісну і кількісну оцінку;
- запропонувати методику та технічні рішення для удосконалення технологічного процесу росту кристалів;
- визначити підходи для створення технічних комп'ютерних засобів інтелектуального управління технологічним процесом, що б дозволило покращити відтворюваність параметрів кристалів та прогнозувати коректність протікання технологічного процесу.

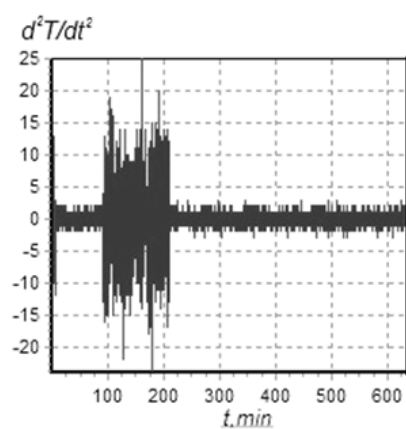
### 4. Експериментальні дослідження процесу кристалізації твердих розчинів кадмій телуриду та їх аналіз

Для встановлення адекватної моделі фізичних перетворень у процесі кристалізації CdTe із розплаву шихти в ампулі, було проаналізовано результати експериментальних досліджень температурно-часових залежностей  $T=f(t)$  (рис. 1) для точки передбачуваної кристалізації (ТПК), розміщеної у вершині ампули (рис. 2, точка В).

Порівняльний аналіз масиву залежностей  $T=f(t)$  для кристалів CdTe, CdZnTe та CdTe легованого In, Sn, Ge показує, що при рівномірному переміщенні ампули в печі, для всіх типів кристалів вказані залежності можна описати двома, наближеними до лінійних, ділянками (рис. 1, а) в областях температур вище ( $T > T_{кр}$ ) і нижче ( $T < T_{кр}$ ) температури кристалізації  $T_{кр} \approx 1092$  °С, характерної для CdTe. Враховуючи, що швидкість переміщення ампули в активній зоні печі є сталою, лінійні ділянки залежностей  $T=f(t)$  можна трактувати квазістаціонарними процесами охолодження розплаву шихти в ампулі у високотемпературній області печі та охолодженням кристалу в низькотемпературній зоні. Відмінність кута нахилу лінійних ділянок очевидно зумовлена різними значеннями коефіцієнтів теплоємності розплаву і кристалу.



а



б

Рис. 1. Типова залежності температури охолодження ампули з CdTe від часу  $T=f(t)$  (а) у двозонній печі, та відповідна залежність другої похідної від часу (б)

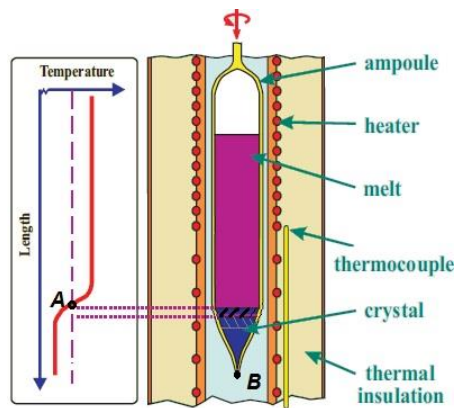


Рис. 2. Схема двозонної печі для вирощування кристали CdTe методом Бріджмена

Другою особливістю залежностей  $T=f(t)$  є наявність ділянок «підвищених шумів» реєстрації температури, які присутні на всіх залежностях зразу ж після досягнення ампулою УТК на межі високо- і низькотемпературних зон печі (рис. 2, верхня пунктирна лінія). Амплітудні коливання температурних шумів на таких ділянках можуть досягати від  $\Delta T=0,5$  °C, що може бути виявлено і на лінійних ділянках залежностей  $T=f(t)$ , і до  $\Delta T=3\div 5$  °C. З віддаленням ТПК (точка В на рис. 2) від УТК (точка А на рис. 2) амплітуда температурного шуму, як правило, зменшується. В окремих випадках на деяких залежностях  $T=f(t)$  для різних типів матеріалів можуть проявлятися додаткові сплески шуму меншої амплітуди. Для більш чіткої ідентифікації і виявлення шумових ділянок застосували методику диференціювання експериментальних характеристик.

**5. Обґрунтування моделі процесу кристалізації та її опис**

На нашу думку, виникнення температурних шумів можна трактувати проявом нерівноважних явищ у процесі кристалізації розплаву CdTe. Згідно теоретичних міркувань [1], процес росту кристалу повинен відбуватися лінійно зі зміщенням ампули нижче УТК (точка А і верхня пунктирна лінія на рис. 2). Однак, кристалізація елементарного об'єму розплаву, що знаходиться між двома пунктирними лініями на рис. 2, повинна супроводжуватись значним виділенням теплоти. Це рівносильно появі додаткового площинного локального джерела тепла нижче межі розділу розплав-кристал. Враховуючи, що градієнт температури в печі має однозначну спрямованість з високо- до низькотемпературної області, тепловий фронт від новоутвореного джерела розповсюджуватиметься до попередньо кристалізованих ділянок у напрямку до точки В, де розташовано термочутливий елемент для контролю температури кристалу. Хоч температурні залежності коефіцієнтів тепературопровідності  $k$  для кристалу і розплаву CdTe є різними (відповідно  $k_k=15.07/T$  Вт/см·К і  $k_p=2\cdot 10^{-5}\cdot T\cdot(2.213-3.654\cdot 10^{-3}\cdot T+1.52\cdot 10^{-6}\cdot T^2)$  [10, 11]), проте при підвищенні температури кристалу до температури плавлення/кристалізації вони стають одного порядку. Тому тепловий

фронт від додаткового джерела рухатиметься в кристал переважно тільки за рахунок градієнта температури величиною в одиниці градуса. Беручи до уваги величину питомої теплоємності кристалічного CdTe ( $c=0.205+3.6\cdot 10^{-5}\cdot T$ , Дж/г·К) та швидкість переміщення ампули ( $v\approx 0.5\div 5$  мм/хв) інерційність прояву температурного шуму практично в точці його реєстрації практично не спостерігатиметься.

В той же час, амплітуди коливань температури можуть досягати значень величини градієнта температури у перехідному шарі. Це видно з наступних міркувань, що слідують з порівняння вказаної вище питомої теплоємності кристалу CdTe та його питомої теплоти плавлення/кристалізації  $\lambda_m=209$  Дж/г [11, 12]. Для цього оцінимо величини кількості теплоти яка виділяється при кристалізації елементарно інтервалу розчину  $dx$ , розташованого між пунктирними лініями на рис. 2, та енергію, потрібну для нагрівання, а можливо і плавлення, аналогічного попередньо кристалізованого інтервалу.

Оскільки зародкова область ампули має конусоподібну форму, то кількість теплоти, яка виділяється при кристалізації інтервалу  $dx$ , розташованого між  $n$ -им та  $(n+1)$ -им відліком визначається співвідношенням:

$$Q = \lambda_m m = \lambda_m \rho_p V_n = \lambda_m \rho_p \pi \int_{x_n}^{x_{n+1}} (ax)^2 dx,$$

де  $m$  – маса розплаву що кристалізується,  $\rho_p$  – густина розплаву,  $V_n$  – об'єм новоутвореної частини кристалу на інтервалі лінійної координати від  $x_n$  до  $x_{n+1}$  відмітки на осі довжини кристалу,  $a$  – коефіцієнт конусності ампули.

Аналогічний вираз можна записати для кількості теплоти необхідної для плавлення попередньо кристалізованої ділянки на інтервалі від  $x_{n-1}$  до  $x_n$ . Різницю між вказаними величинами можна оцінити параметром  $\Delta Q=2\pi a^2 x^3$ . Тобто, за проведеними оцінками кількість теплоти яка витрачається на повторне нагрівання і плавлення попередньо кристалізованої ділянки компенсується енергією яка виділяється при кристалізації наступної частини розплаву. Це і приводить до додаткової температурної нестабільності границі розділу розплав/кристал, що детектується проявом «температурних шумів» при вимірюванні температури в ТПК.

Повторні температурні шуми ймовірно можуть мати місце при виникненні на межі розплаву/кристалу додаткових центрів кристалізації, які далі стають зародками нових блоків вирощуваного кристалу.

**6. Застосування апарату нечіткої логіки та вбудованих самоадаптивних комп'ютерних засобів для інтелектуального управління процесом синтезу кристалів**

Результати статистичної обробки масивів даних для залежностей  $T=f(t)$  показують, що крім основних, тобто інформаційних температурних шумів мають місце і випадкові коливання температури, замовлені слабо контрольованими конвективними процесами в печі, а також електромагнітними завадами мережі

живлення. Інформативними параметрами щодо стабільності процесу синтезу кристалів є відхилення температурних шумів  $\Delta T$  в заданих межах від середнього значення, а також малі тривалості таких відхилень. Проте, навіть незначні відхилення порядку 0,1–0,5%, але які тривають протягом подовженого інтервалу часу можуть бути ознакою некоректності проходження технологічного процесу. Крім того, вказані параметри можуть по різному проявлятися для певних режимів опускання ампули в печі та типів вирощуваних кристалів.

Результати експертного опитування фахівців підтверджують дані статистичного аналізу і приводять до висновку, що параметри «відхилення» та «тривалість відхилення», а також показник «аварійності» на основі якого і приймається рішення про стан процесу і подальше його проходження є більше якісними, ніж кількісними. А тому використання апарату нечіткої логіки і лінгвістичних змінних є зручним способом опису даної задачі, та спрощує використання вбудованих апаратно-програмних засобів для управління технологічним процесом недостатньо кваліфікованими у галузі програмування спеціалістами.

Таким чином, для визначення робочого стану системи застосовуємо вказані дві лінгвістичні змінні – «відхилення» та «тривалість відхилення», які трактуватимемо згідно наступних умов.

«Відхилення температури» визначається терм-множиною  $a = \{a_1, a_2, a_3\}$ , де  $a_1$  – мале відхилення;  $a_2$  – середнє відхилення;  $a_3$  – велике відхилення. «Тривалість відхилення» опишемо терм-множиною  $b = \{b_1, b_2, b_3\}$ , де  $b_1$  – мала тривалість;  $b_2$  – середня тривалість;  $b_3$  – велика тривалість. Функції належності кожної з терм-множин є подібними і визначаються за класичним підходом. Вихідним значенням, що також входить до множини базових параметрів системи є так зване значення аварійності процесу. Аварійність стану системи – це певна безрозмірна величина, що є функцією вказаних параметрів і обчислюється у долях, або відсотках:

$$y = f(\epsilon, t); \epsilon = \frac{\Delta T}{T} \cdot 100\% = (0.1-0.5)\%; y = 1-100.$$

«Аварійність» визначається терм-множинами  $C = \{c_1, c_2\}$ , де  $c_1$  – мала;  $c_2$  – велика аварійність.

Функція належності для останньої змінної є синглетон. В залежності від знаку параметра у може бути зростаючою, або спадаючою і описується експоненційною залежністю. Нечіткий вивід відбувається за алгоритмом Мамдані. У відповідності з цим методом будуватиметься набір правил.

1. IF A is  $a_1$  and B is  $b_1$  THEN C is  $c_1$ .
2. IF A is  $a_2$  and B is  $b_1$  THEN C is  $c_1$ .
3. IF A is  $a_3$  and B is  $b_1$  THEN C is  $c_1$ .
4. IF A is  $a_1$  and B is  $b_2$  THEN C is  $c_2$ .
5. IF A is  $a_2$  and B is  $b_2$  THEN C is  $c_2$ .
6. IF A is  $a_3$  and B is  $b_3$  THEN C is  $c_2$ .
7. IF A is  $a_1$  and B is  $b_3$  THEN C is  $c_2$ .
8. IF A is  $a_2$  and B is  $b_3$  THEN C is  $c_2$ .
9. IF A is  $a_3$  and B is  $b_3$  THEN C is  $c_2$ .

Дефазифікація відбувається за методом центра мас. Отримавши чітке значення у рівня аварійності

можна приймати рішення щодо подальшого ходу технологічного процесу.

Отримані логічні висновки є ввідними даними для управління рухом ампули в активній зоні печі та її температурними режимами. Розширення функціональних можливостей вбудованих комп'ютерних засобів, можна досягти використовуючи алгоритми динамічної програмної адаптації системи до умов процесу. Для збільшення номенклатури обслуговуваних технологічних об'єктів доцільно використовувати нейромережний метож навчання комп'ютерного модуля. Це дозволяє ссинтезувати програмно реконфігуровану комп'ютеризовану систему управління разом зі зменшенням апаратних ресурсів.

Реалізація само адаптивного вбудованого в технологічний комплекс спеціалізованого апаратно-програмного забезпечення може бути виконано за клієнт-серверною технологією у вигляді мережевої системи для автоматизації процесу синтезу напівпровідникових кристалів методом Бріджмена [13, 14]. Структурна схема клієнтської частини показана на рис. 3.

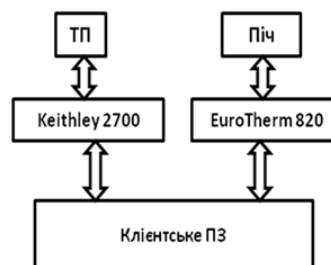


Рис. 3. Узагальнена структура клієнтської частини мережевої системи управління процесом синтезу кристалів CdTe методом Бріджмена

В якості вузлів спряження комп'ютерних засобів з інформаційними сенсорами та силовими приводами використовуються високоточні вимірювальні перетворювачі серії Keithley 2700 (в тому числі, як аналогово-цифровий перетворювач сигналу з термопар), а також регулятори типу EuroTherm 820, як пристрої контролю і управління температурними режимами технологічної печі.

Серверна частина забезпечує централізоване управління декількома технологічними об'єктами, а також контроль за всіма установками іншого типу, які можуть динамічно конфігуруватися в мережі. Серверна частина реалізує систему підтримки прийняття рішень, на основі математичного апарату нечіткої логіки, що описаний вище. В свою чергу клієнтська частина комплексу призначена для вирішення задачі попередньої калібровки печі, а також підтримки технологічного процесу у випадку втрати зв'язку із сервером. В якості каналу зв'язку використано засоби звичайної локальної мережі, однак з додатковим резервним каналом для забезпечення певного рівня надійності системи.

## 7. Висновки

Проведені дослідження дають можливість стверджувати, що причиною температурного шуму в околі

температури кристалізації CdTe та сполук на його основі є нерівноважні процеси на границі розділу фаз розплав/кристал. Модельні оцінки реальних теплових процесів у зоні кристалізації, та статистичний аналіз такого шуму показують, що даний шумовий сигнал може бути використаний в якості інформативного параметра для контролю початку кристалізації розплаву. Для покращення процесу управління технологічною системою вирощування напівпровідникових кристалів на основі методу Бріджмена ефективним може бути застосування математичного апарату нечіткої логіки, та вбудованих в систему само адаптивних комп'ютерних засобів. Функціональність та надійність системи підвищується за рахунок застосування мережевої системи доступу до об'єктів управління, динамічного конфігурування елементів структурних елементів системи та клієнт-серверної технології.

Таким чином в результаті проведеного дослідження на основі аналізу експериментальних досліджень вста-

новлено адекватну фізичну модель процесів фазової трансформації розплаву у кристал у CdTe та проведеної її якісну і кількісну оцінку. Запропоновано методику та технічні рішення для адаптивного керування та удосконалення технологічного процесу росту кристалів на основі застосування методів нечіткої логіки, що дозволило прогнозувати критичні та некоректні стани системи, зокрема відсутність кристалізації і настання стану переохолодженого розплаву, а відповідно заощадити час і кошти на повторні експерименти. Визначено підходи для створення технічних комп'ютерних засобів інтелектуального управління технологічним процесом, що дозволило покращити відтворюваність параметрів кристалів та прогнозувати коректність протікання технологічного процесу, а також зменшити собівартість синтезованого матеріалу. Моніторинг процесу охолодження кристалу дозволив вже на етапі синтезу прогнозувати ймовірність зародження додаткових моноблоків та провести оцінки їх характеристик розмірів.

#### Література

1. Lachish, U. CdTe and CdZnTe Crystal Growth and Production of Gamma Radiation Detectors [Electronic resource] / U. Lachish. – Available at: <http://urila.tripod.com/crystal.htm>
2. Шляхов, И. Н. Применение детекторов на основе полупроводниковых соединений CdTe и CdZnTe в задачах анализа источников  $\gamma$ -излучения [Текст]: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук / И. Н. Шляхов. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники. – Харьков, 2012. – 20 с.
3. Новий економічний ПІД-регулятор ОВЕН ТРМ500 [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://www.svaltera.ua/press-center/news/8798.php>
4. Пекуровський, Г. В. Налаштування параметрів ПІД-регулятора при синтезі адаптивної системи автоматичного управління активною компенсацією вібрації [Текст] / Г. В. Пекуровський, О. В. Барабаш // Системи озброєння і військова техніка. – 2012. – № 4(32). – С. 139–142.
5. Petrenko, V. R. Automation of management by the technological processes to produce bulk Cz-Si single crystals [Text]: avtor. dis. ... doctor of technical sciences : 05.13.07 / V. R. Petrenko. – National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute, 2009. – 39 p.
6. Moskalenko, V. V. The intelligent system of support decision for automation of growing of scintillation monocrystals from the melt [Text] : Thesis for ... candidate of technical sciences: 05.13.07 / V. V. Moskalenko. – Kharkiv, 2014. – 16 p.
7. Bolchini, C. A Framework to Model Self-Adaptive Computing Systems [Text] / C. Bolchini, M. Carminati, A. Miele, E. Quintarelli // Proc. NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems, 2013. – P. 71–78. doi: 10.1109/ahs.2013.6604228
8. Cámara, J. Assurances for Self-Adaptive Systems: Principles, Models, and Techniques [Text] / J. Cámara, R. de Lemos, C. Ghezzi, A. Lopes // Verlag, Berlin, Heidelberg. – 2013. – Vol. 7740. – P. 340.
9. Rajkumar, R. Cyber-Physical Systems: The Next Computing Revolution [Text] / R. Rajkumar, L. Insup, S. Lui, J. Stankovic // Design Automation Conference (DAC), 2010 47<sup>th</sup> ACM/IEEE, Anaheim, USA, 2010. – P. 731–736.
10. Bell, R. O. Calculated Temperature Distribution During Laser Annealing in Silicon and Cadmium Telluride [Text] / R. O. Bell, M. Toulemonde, P. Siffert // Applied Physics. – 1979. – Vol. 19, Issue 3. – P. 313–319. doi: 10.1007/bf00900475
11. Жвавий, С. П. Численное моделирование динамики фазовых переходов в CdTe, инициируемых наносекундным излучением эксимерного лазера [Текст] / С. П. Жвавий, Г. Л. Зыков // Физика и техника полупроводников. – 2006. – Т. 40, Вып. 6. – С. 652–655.
12. Zanio, K. Semiconductors and Semimetals. Vol. 13. Cadmium Telluride [Text] / K. Zanio. – N. Y.: Academic Press, 1978. doi: 10.1016/s0080-8784(08)60064-2
13. Рогов, Р. В. Структурно-логічна організація серверного програмного забезпечення для управління технологічними мережами [Текст] / Р. В. Рогов, Г. І. Воробець, О. І. Воробець // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2012. – Вип. 81, № 05. – С. 205–208.
14. Mazurenko, M. I. WEB- system dynamical reconfiguration based on metric analysis of vulnerability databases OTS-components [Text] / M. I. Mazurenko, V. S. Kharchenko, A. V. Gorbenko // Radioelectronic and computer systems. – 2014. – Vol. 5, Issue 69. – P. 135–139.