

# БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНА УСТАНОВКА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕНТГЕНОЛЮМІНЕСЦЕНЦІ ТА ТЕРМОСТИМУЛЬОВАНОЇ ЛЮМІНЕСЦЕНЦІ

Б. М. ГУНДА

<sup>1</sup> Інститут електронної фізики НАН України, 88016, м. Ужгород, вул. Університетська, 21

Розроблена та виготовлена автоматизована установка для дослідження оптичних та люмінесцентних характеристик матеріалів, яка дає можливість проводити вимірювання ТСЛ в широкому діапазоні температур (20-500 °С) та швидкостей лінійного нагрівання (0.01 - 5 °С/сек); вимірювання температурних залежностей РЛ в діапазоні температур 20-500 °С; спектральні дослідження поглинання, ТСЛ та РЛ у видимому та УФ діапазоні спектру. Ефективна реєстрація у широкому динамічному діапазоні інтенсивностей забезпечується використанням спеціально підібраних ФЕУ та методики лічби фотонів. Управління експериментальною установкою здійснюється за допомогою виготовленого адаптера та розробленого пакету програмного забезпечення. Введення результатів вимірювань в ЕОМ дає можливість їх оперативної обробки. Проведений ряд контрольних експериментів по перевірці роботи установки з використанням зразків з дозиметричного комплексу ДТУ-01 свідчить про достовірність отримуваних результатів.

## Вступ

За допомогою поєднання методик термостимульованої люмінесценції (ТСЛ) і рентгенолюмінесценції (РЛ) можливе ефективне вивчення локальних рівнів прилипання та рекомбінації, які обумовлені наявністю домішок та порушеннями кристалічної структури [1-3, 6, 7]. З цією метою запропонована експериментальна установка для проведення комплексних оптичних та люмінесцентних досліджень.

### 1. Вимоги до експериментальної установки

Методики ТСЛ та РЛ висувають ряд вимог до вимірювальної установки та її окремих блоків та вузлів. Перша з них полягає у необхідності вимірювання, зберігання і обробки великих масивів експериментальної інформації. При реєстрації кривої ТСЛ на протязі 300 секунд в середньому проводиться 700-1000 вимірів значень температури, інтенсивності та часу, що становить 2-3 тисячі

п'ятизначних чисел. Дослідження спектрів пропускання та РЛ теж приводять до великих об'ємів інформації. Тому необхідно використовувати ЕОМ для зберігання результатів та управління експериментами, яка поряд з цим дозволяє досягти більшої точності вимірів і високої повторюваності умов експерименту.

Ряд вимог стосуються температурних режимів установки. Дослідження температурних залежностей РЛ вимагають швидкої стабілізації будь-якого значення температури в інтервалі 20-500 °С [1,2]. Для проведення вимірів методом ТСЛ дуже важливо підтримувати сталу величину швидкості нагрівання [3]. Недотримання цієї вимоги приводить до суттєвих спотворень кривої ТСЛ і, як наслідок, невірної інтерпретації одержаних результатів. При низьких температурах (-196±20 °С) та малих швидкостях нагрівання (0,001-0,3 °С/сек) [4, 5] забезпечити постійну швидкість нагрівання досить просто. Особливістю використання методики ТСЛ для термолюмінесцентної дозиметрії є високі тем-

ператури (20-500 °С) та великі швидкості нагрівання (2-10 °С/сек) [6, 7]. Щоб забезпечити такі високі швидкості нагрівання, необхідно підвести велику електричну потужність до кристалотримача і зробити його якомога меншої маси [8]. Окрім того, він повинен мати хорошу теплопровідність та необхідну конфігурацію для однорідного розподілу температури по об'єму зразка, а також не випромінювати у видимій області (щоб не перешкоджати проведенню високочутливих оптичних досліджень).

Значні проблеми виникають при реєстрації люмінесцентного свічення. Згідно літературних даних [6, 7] по дослідженню ТСЛ та РЛ дозиметричних матеріалів, вимірювання проводяться в діапазоні температур 20-500 °С, тому слід очікувати, що низька інтенсивність РЛ може бути додатково ослаблена температурним гасінням. З іншого боку, з ростом температури інтенсивність ТСЛ спочатку експоненціально зростає, а досягнувши максимуму, так же швидко спадає [1, 3], що вимагає дуже високої швидкодії

нал/шум дає можливість тільки використання методики лічби фотонів [9] і введення результатів вимірів у ЕОМ.

Важливою умовою є забезпечення постійного взаємного розміщення ФЕУ, люмінофора і джерела опромінення, що разом із вимогами повного затемнення вимірювальної камери і зручної зміни зразка, представляють досить непросту інженерно-конструкторську задачу [10], яка додатково ускладнюється необхідністю врахування норм радіаційної безпеки. Для проведення спектральних досліджень РЛ і пропускання у видимій та УФ області спектру до складу установки повинен входити монохроматор з великою світлосилою і хорошою роздільною здатністю.

Установка повинна давати можливість проведення вимірів інтегральної ТСЛ, температурної залежності РЛ, спектрів ТСЛ та РЛ, температурної залежності пропускання. Функціональну схему запропонованої багатоцільової автоматизованої установки представлено на рис. 1.

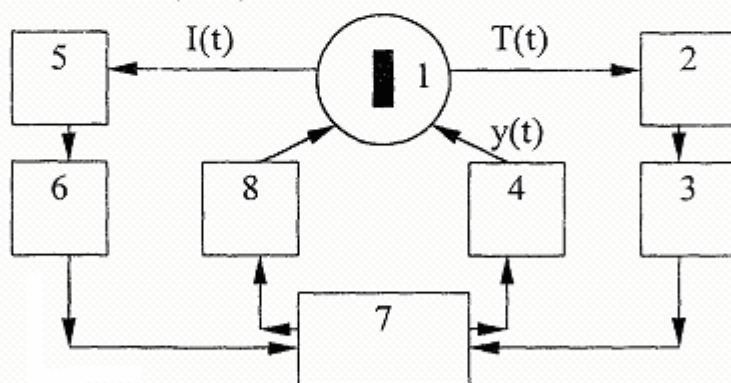


Рис.1. Функціональна схема автоматизованої вимірювальної установки.

1- вимірювальна камера із зразком; 2- датчик температури; 3- АЦП; 4- виконуючі пристрої нагріву і охолодження; 5- ФЕУ; 6- блок реєстрації інтенсивності; 7- ЕОМ; 8- рентгенівська трубка.

реєструючої системи. При великих дозах опромінювання інтенсивності різних максимумів ТСЛ можуть відрізнятися у  $10^4$  разів. Забезпечити такий широкий динамічний діапазон реєстрації інтенсивностей при високій швидкодії та задовільному співвідношенні сиг-

З врахуванням функціональної схеми та вищезгаданих вимог, в установці можна виділити оптичну систему, систему вимірювання і регулювання температури, систему автоматизації вимірів та управління.



## 2. Оптична система установки

Оптична система установки складається із оптико-механічної частини, фотоприймача і реєструючої підсистеми (рис. 2).

Оптико-механічна частина виконує наступні функції: а) фокусування вимірюваного потоку світла на фотоприймач; б) спектральну розгортку досліджуваного світла; в) подавання на фотоприймач еталонного потоку світла; г) періодичну комутацію досліджуваного і еталонного потоків світла відповідно до вибраного методу вимірювання; д) послаблення світлового потоку при наближенні до верхньої межі динамічного

діапазону реєструючої системи.

Для вимірювання спектрів пропускання та спектральної чутливості установки використовується оптична система, зображена на рис. 2.а. Комбіноване джерело світла (3) дає можливість зручної зміни лампи розжарювання на водневу лампу при переході із видимої в УФ область спектру. Випромінювання ламп збирається кварцовим конденсором (4) і фокусується на вхідну щілину монохроматора МДР-23 (6). Монохроматичне світло падає на зразок (1), закріплений на кристалотримачі у вимірювальній камері (2). Інтенсивність пропущеного зразком світла визначається ФЕУ (7) за допомо-

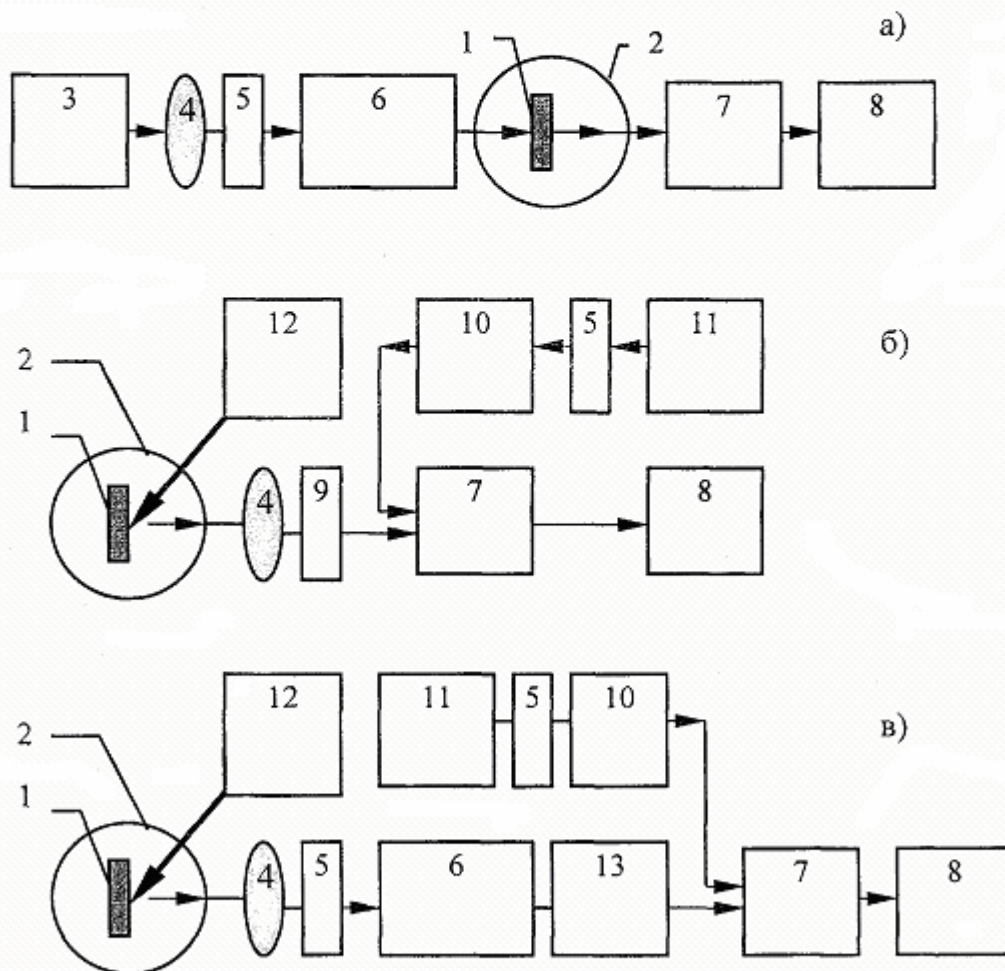


Рис. 2. Оптична система установки при дослідженнях спектрів пропускання (а), інтегральної РЛ і ТСЛ (б) та спектрів РЛ і ТСЛ (в).

1- зразок; 2- вимірювальна камера; 3- комбіноване джерело світла, 4- конденсор; 5- світлофільтри; 6- монохроматор; 7- ФЕУ; 8- реєструюча підсистема; 9- електромеханічна діафрагма; 10- затвор світла; 11- джерело еталонного світла; 12- рентгенівська трубка; 13- модулятор.

гою реєструючої підсистеми (8), яка більш детально описана нижче. Слід відмітити, що інтенсивності світлових потоків при дослідженні спектрів пропускання досить високі.

При вимірюванні РЛ і ТСЛ в інтегральному світлі використовується оптична система, зображена на рис. 2. б. При збудженні випромінюванням рентгенівської трубки (12) зразка (1), встановленого в спеціальному кристалотримачі, виникає рентгенолюмінесцентне свічення, яке з допомогою коліматора (4) фокусується на ФЕУ (7). Зміна температури кристалотримача з допомогою нагрівника дозволяє проводити температурні дослідження РЛ. Для дослідження ТСЛ зразок опромінюється протягом певного часу рентгенівським випромінюванням, а після нагрівається з заданою швидкістю. Люмінесцентне свічення, що виникає в процесі нагрівання, з допомогою коліматора (4) фокусується на ФЕУ (7). Інтенсивності при цих вимірах набагато більші від фону і змінюються у великому динамічному діапазоні, що накладає жорсткі вимоги на лінійність світлової характеристики реєструючої системи. При наближенні інтенсивності до верхньої межі динамічного діапазону світловий пучок ослаблюється за допомогою електромеханічної діафрагми (9), управління якою здійснюється з ЕОМ.

На рис. 2. в приведена схема оптичної системи для спектральних досліджень РЛ і ТСЛ. Оскільки люмінесцентне свічення при проходженні через монохроматор (6) сильно послаблюється, саме ця схема висуває високі вимоги до чутливості фотоприймача і реєструючої підсистеми.

При переході в область граничних вимірів, коли величина світлового потоку стає співрозмірна з його квантовими флуктуаціями [11] і з сумарним еквівалентом теплового та інших шумів вимірювальних кіл, виникають серйозні проблеми практичної реалізації вимірів з задовільною точністю. Найбільш дос-

товірною методикою, що дозволяє проводити граничні виміри оптичних потоків з врахуванням квантових флуктуацій і значним ослабленням шумів, є статистична лічба окремих фотонів у часі з використанням ФЕУ в якості приймального перетворювача [12].

В якості одноелектронних фотоприймачів в установці використовуються спеціально відібрані прилади із серійних фотоелектронних помножувачів, які задовільняють слідувачим вимогам [13]: а) мають максимальний квантовий вихід в потрібному спектральному діапазоні; б) мінімальну швидкість лічби шумових імпульсів (по можливості мінімальну площу фотокатода); в) високоефективний перший диод; г) хороше часове розділення; д) плато в лічильній характеристиці. Переліченим вимогам у спектральному інтервалі 200-830 нм задовільняють ФЕУ-106, які характеризуються числом темнових імпульсів  $10-100 \text{ с}^{-1}$  та тривалістю одноелектронного імпульсу на напіввисоті близько 10 нс [14]. В спектральному діапазоні 300-830 нм аналогічні характеристики мають також ФЕУ-136 та ФЕУ-79. Згідно [15], ФЕУ-79 мають значно меншу інтенсивність темного сигналу, ніж ФЕУ-106, і серед них можна знайти біля 2% екземплярів, для яких число темнових імпульсів менше за  $10 \text{ с}^{-1}$ .

Із збільшенням напруги живлення кількість темнових імпульсів за одиницю часу збільшується, тому напруга живлення ФЕУ вибирається з метою оптимізації відношення сигнал/шум [14, 15]. Ефективним способом зменшення швидкості лічби темнових імпульсів і покращення співвідношення сигнал/шум є охолодження фотоприймача за допомогою термоелектричних холодильників або рідкого азоту [14, 15], але використання охолоджуючого пристрою значно ускладнює конструкцію фотореєструючої системи. При вимірюванні спектральних залежностей ТСЛ і РЛ в нашій установці використовується термоелектричний хо-



лодильник з охолодженням гарячих спаїв проточною водою.

Для точних фотометричних вимірів особливою проблемою є стабільність характеристик ФЕУ, тому їх дослідження є невід'ємною частиною експерименту [15]. Для зменшення темнового струму і покращення стабільності проводилися тренування ФЕУ високими напругами. Також сприятливо впливає на стабільність характеристик експлуатація ФЕУ при малих засвітках на протязі тривалого періоду.

Реєструюча підсистема складається із підсилювача імпульсів, амплітудного дискримінатора і лічильника. Оскільки умови нашого експерименту не накладають особливих вимог на параметри підсилювача, ми використали стандартний підсилювач, що входить до складу комплексу термостатування ФЕУ.

В загальному випадку відношення сигнал/шум є функцією не тільки напруги живлення ФЕУ, а і рівнів дискримінації одноелектронних імпульсів. Амплітудний відбір імпульсів дозволяє покращити співвідношення сигнал/шум і знизити вплив завад. В якості амплітудного дискримінатора в установці використовується блок БР-1. Методика вибору робочих параметрів дискримінаторів приведені в [14, 15].

Сигнал, зформований пристроями амплітудного відбору, представляє собою послідовність імпульсів, статистично розподілених по часу виникнення. Відомі два шляхи здійснення лічби імпульсів:

- а) лічба вихідних імпульсів ФЕУ на протязі певного часу ( $t = \text{const}$ );
- б) вимірювання часу надходження певного числа імпульсів ( $N = \text{const}$ ).

Перевага першого шляху виражається у широкому діапазоні вимірювань і жорсткості циклу роботи. Другий шлях характеризується постійною точністю ( $\Delta N = 1/\sqrt{N}$ ), але його недоліком є те, що при малих інтенсивностях сигналу час набору необхідної кількості імпульсів  $N$  суттєво зростає. Через жорсткі часові обмеження при проведенні вимірів ТСЛ

в установці використовується метод  $t = \text{const}$ .

Лічильні системи для реєстрації нормованих імпульсів в залежності від поставлених перед ними задач суттєво відрізняються [15]. Їх основними частинами є: один або декілька лічильників, інтенсиметр, блоки індикації та управління, блоки для зв'язку з ЕОМ. Розміри і вага реєструючих пристроїв лічильників фотонів значно зменшуються, а управління вимірами стає більш гнучким при використанні в них мікропроцесорних комплектів. Наприклад, для реалізації програмно-доступного двохканального лічильника і одного таймера достатньо використати одну мікросхему КР580ВИ53 (програмований таймер мікропроцесорного комплексу серії КР580). Особливістю цієї мікросхеми є відносно невисока швидкодія (максимальна швидкість лічби 2 МГц). У наших дослідженнях інтенсивності не перевищували  $3 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ , тому імпульсні сигнали після дискримінації у БР-1 подавалися безпосередньо на один із лічильників мікросхеми КР580ВИ53. Більш детально робота лічильника описана нижче.

Використання ЕОМ в лічильниках фотонів дозволяє в деяких випадках значно підвищити точність вимірів, за рахунок автоматизації скоротити час на виконання допоміжних операцій, спростити послідовуючу обробку результатів, здійснити управління блоками реєструючої системи. На основі калібровки лічильника фотонів світловими потоками відомої інтенсивності в пам'яті ЕОМ може бути сформований масив поправочних коефіцієнтів, з допомогою яких здійснюється врахування нелінійності світлової характеристики із-за прорахунків імпульсів [15].

Для вимірювання ТСЛ та РЛ важливим параметром є довгочасова стабільність квантової ефективності реєстрації оптичної системи установки, яку контролюють світловими потоками відомої інтенсивності або опорними джерелами



слабого світлового випромінювання. В якості таких джерел частіше всього використовуються радіолюмінесцентні джерела, світлодіоди [15] або лампи розжарювання [16]. Опорні джерела на світлодіодах зручні тим, що дозволяють в широких межах регулювати інтенсивність світлового потоку. Проте параметри світлодіодів сильно залежать від температури, тому при точних вимірах необхідне термостатування випромінювача. В установці використовуються два світлодіоди АЛ307В, які встановлюються у вимірювальній камері або безпосередньо в корпусі термоелектричного холодильника ФЕУ.

### 3. Система вимірювання та регулювання температури

До системи вимірювання та регулювання температури ставиться ряд вимог [1, 8, 10, 17]:

- вимірювання температури в діапазоні 20-500 °С з точністю  $\pm 0,1$  °С;
- забезпечення лінійної розгортки температури з постійною швидкістю, що задається в межах 0,01-5 °С/сек при нелінійності, не вищій 0,5%.
- стабілізація будь-якої заданої температури в діапазоні 20-500 °С з точністю  $\pm 0,1$  °С;
- можливість підрегулювання максимальної потужності нагрівного елемента;
- включення в систему пристрою швидкого охолодження.

Крім високих вимог до точності вимірювань, канал вимірювання температури повинен бути малоінерційним (постійна часу термодатчика не більше 0,1 сек), а маса датчика повинна бути набагато менша за масу зразка, яка становить приблизно 0,1 г [18]. Крім того, конструкція системи повинна забезпечити хороший тепловий контакт термодатчика із зразком і виключити теплові втрати через провідники датчика. По малоінерційності найбільш придатними термодатчиками є термопари, оскільки на відміну від термометрів опору, вони ма-

ють набагато меншу масу. Для досліджуваного температурного інтервалу в установці використовується хромель-алюмельова термопара. Вона має відносно високу чутливість (40 мкВ/°С) [19], а максимальна ЕРС при 500 °С становить 20 мВ. Вимірювання сигналу термопари здійснюється за допомогою цифрового вольтметра В7-34А, який має сталу часу вимірювань 0,25 сек і для постійних напруг діапазону 0,1-20 мВ дає похибку, не більшу за 0,05 %. Температура холодного кінця термопари під час вимірювань стабілізується з точністю  $\pm 0,1$  °С. Для зменшення неоднорідності температури по товщині зразка, дослідження проводилися на тонких зразках (0,5 або 1 мм) і використовувалися спеціальні конструкції нагрівача.

Точність регулювання температури зразка визначається багатьма факторами, а саме: 1) інерційними властивостями кристалотримача і нагрівного елемента, 2) точністю вимірювання температури, 3) методом регулювання, 4) теплофізичними властивостями досліджуваного матеріалу, 5) тепловим контактом між кристалотримачем і зразком. Останні два фактори суттєво проявляються при високих температурах і великих швидкостях нагрівання. Тому термодатчик зворотнього зв'язку регулювання, як правило, встановлюється безпосередньо на тримачеві зразка, а контроль температури зразка здійснюється другим датчиком, що дозволяє в процесі експлуатації встановити похибку регулювання, зумовлені вибраним способом кріплення зразка до тримача [18]. У певному наближенні температуру зразка можна прийняти рівною температурі тримача і вимірювання проводити одною термопарою, що трохи спрощує вимірювальну установку.

Параметри температурних режимів установки для дослідження ТСЛ та РЛ такі, що для їх реалізації, в принципі, неможливо використати системи регулювання, в контурі яких активно приймає участь оператор. Обов'язковим стає використання систем автоматичного регу-



лювання температури (САРТ). Відомо багато схем автоматичного регулювання [20]. Вони відрізняються як використаними методами регулювання, так і схемними рішеннями деяких вузлів регуляторів з однаковим методом регулювання. Але ні одна із них без суттєвих переробок не може бути використана як елемент автоматизованої установки. Тому із описаних конструкцій запозичено лише методи регулювання і деякі принципи побудови окремих вузлів регулятора.

Як відомо [17, 21], класична САРТ складається із таких основних пристроїв: датчика, що вимірює температуру; задаючого, порівнюючого і обчислювального блоку; підсилюючого пристрою і регулюючих органів (нагрівник). Найбільш важливим і найбільш складним вузлом САРТ є задаючий пристрій, який формує закон зміни температури [17].

Перспективним напрямком розвитку САРТ є заміна спеціалізованих електронних пристроїв на мікропроцесорні пристрої, тобто створення замість пристрою з “жорсткою” логікою програмованого пристрою, функціональні можливості якого визначаються виконуваною програмою і можуть бути легко змінені шляхом зміни програми [17]. Такий підхід до розробки САРТ приводить до значного спрощення функціональної схеми установки та конструкції електронного обладнання і переносить центр ваги на програмне забезпечення. Слідуючи цим шляхом, для каналу управління температурою в установці використано 12-розрядний цифроаналоговий перетворювач Ф4810 з підсилювачем потужності на виході (силовий блок РИФ-101). Останній дає можливість при зміні вхідного сигналу в межах 0,1-10 В одержати пропорційну зміну вихідного сигналу від 10 до 180 В при струмах до 50 А. При необхідності струм у колі навантаження обмежується регулятором максимального значення струму, що розміщений на передній панелі силового блоку.

Через те, що швидкості нагрівання при дослідженні ТСЛ високі, а крім регу-

лювання температури потрібно проводити ще й виміри інтенсивності і часу, особливої уваги при розробці програм потребували процедури регулювання швидкості нагрівання та стабілізації температури. При швидкостях нагрівання 3-5 °С/сек практично неможливим стає підтримування з високою точністю лінійної швидкості нагрівання методами двохпозиційного чи пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) регулювання [21]. Тому в установці використовується метод статичного регулювання [22], який має перевагу перед названими вище методами ще й у тому, що потребує значно менших часових затрат. Він полягає у такому послідовному збільшенні потужності нагрівача, при якому швидкість нагрівання залишається сталою у всьому діапазоні температур, тому для вибраних швидкостей нагрівання проводився експериментальний підбір значень потужності в точках регулювання з допомогою одної з розроблених тест-програм.

Для режиму стабілізації температури в установці використовується пропорційно-інтегрально-диференціальний закон, параметри якого визначалися згідно методики [23]. Для можливості швидкого переходу від вищої температури до нижчої, а також зменшення перерегулювання [21] при швидкому переході з одєї стабілізованої температури до більш високої, використовується охолоджуючий пристрій. Він складається із вентилятора і гнучкого металорукава, з допомогою якого потік повітря кімнатної температури спрямовується на кристалотримач. Управління роботою охолоджуючого пристрою здійснює ЕОМ. Описана САРТ дає можливість вже через 400 сек стабілізувати будь-яку температуру в діапазоні 20-500 °С з точністю  $\pm 0.1$  °С.

#### 4. Система автоматизації вимірів та управління

Відомі різні підходи до конструювання систем автоматизації експеримен-

тальних установок на базі ІВМ. Найбільш поширеними із них є використання системи КАМАК і системи приладів та пристроїв, що мають зв'язок з міжнародним приладовим інтерфейсом згідно стандарту МЭК-625 (інша назва стандарту HP-IB, IEEE-488, КОП) [24]. Недоліками цих систем є інформаційна та конструктивна надлишковість КАМАК-апаратури, відсутність дешевих і надійних контролерів зв'язку КАМАК - ІВМ, а також мала кількість керуючих пристроїв для системи КОП. Ці причини значно ускладнюють конструювання експериментальних установок на базі ЕОМ типу ІВМ. Інтенсивний розвиток апаратного та програмного забезпечення, відкрита архітектура ІВМ-сумісних ЕОМ привели до виникнення і значного поширення іншого способу малої автоматизації експерименту – за рахунок спеціалізованих контро-

лерів вводу-виводу дискретних та аналогових сигналів безпосередньо в ІВМ. Одним із пристроїв цього типу є розроблений нами контролер DDA-120, який має функціонально повний набір вузлів для збору дискретної імпульсно-потенціальної інформації, її попередньої обробки, виводу сигналів управління на виконуючі пристрої, а також для зв'язку з керуючою ЕОМ ІВМ РС.

Його технічні характеристики слідуючі: 30 адресних портів; 48 (6 по 8) ліній вводу-виводу; 48 (6 по 8) ліній вводу; 24 (3 по 8) ліній виводу; 9 програмованих 16-розрядних двійкових таймерів; 4 входи переривань.

Блок-схема контролера зображена на рис. 3. Він складається із двох блоків: інтерфейсного блоку з гальванічною розв'язкою, що встановлюється у вільний слот материнської плати ІВМ РС та бло-

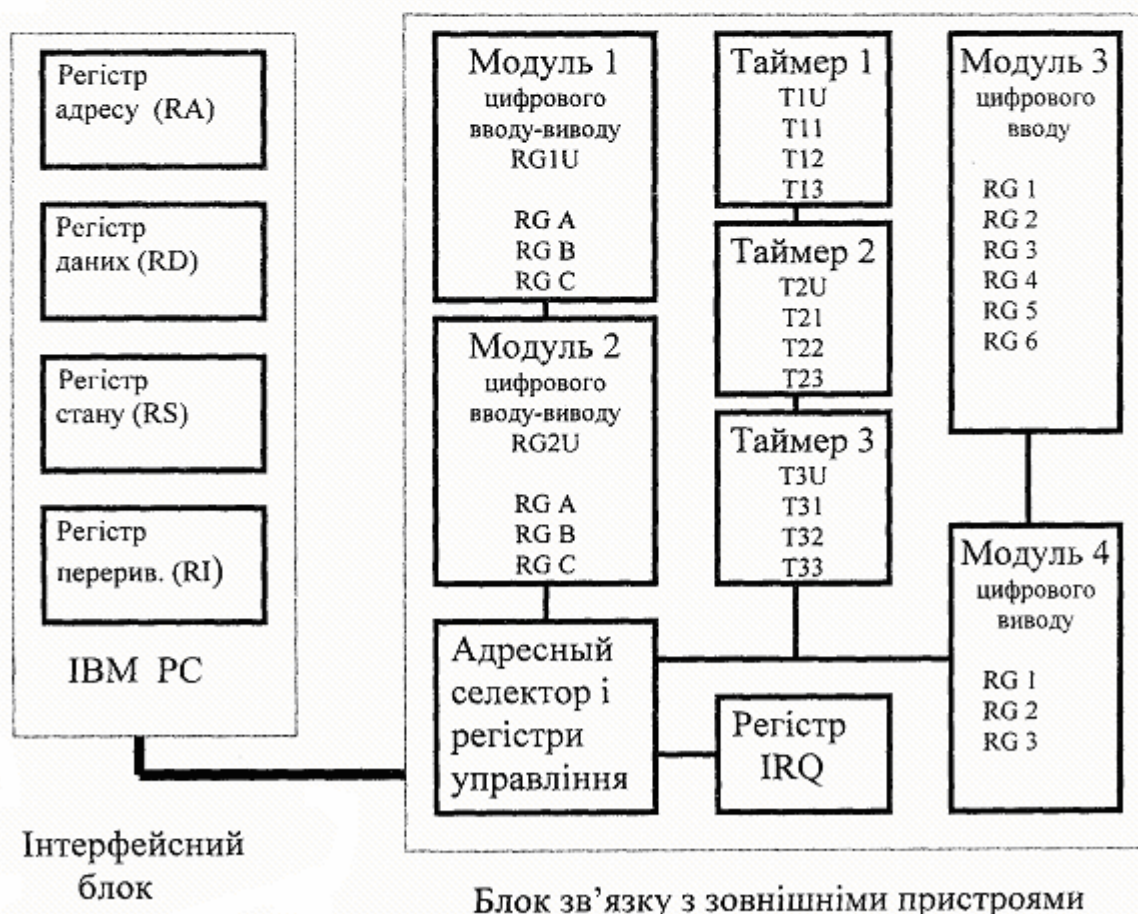


Рис. 3. Блок-схема контролера DDA-120.



ку для зв'язку із зовнішніми пристроями (БЗЗП), виконаного в окремому корпусі.

У логічному плані інтерфейсний блок контролера представлений для персональної ЕОМ двома регістрами вводу-виводу даних RA та RD, через які у відповідній послідовності передаються

відповідно, підключений до неї зовнішній пристрій.

На базі описаного контролера проведена автоматизація установки для дослідження оптичних та люмінесцентних властивостей в твердих тілах. Блок-схема управління установкою зображена

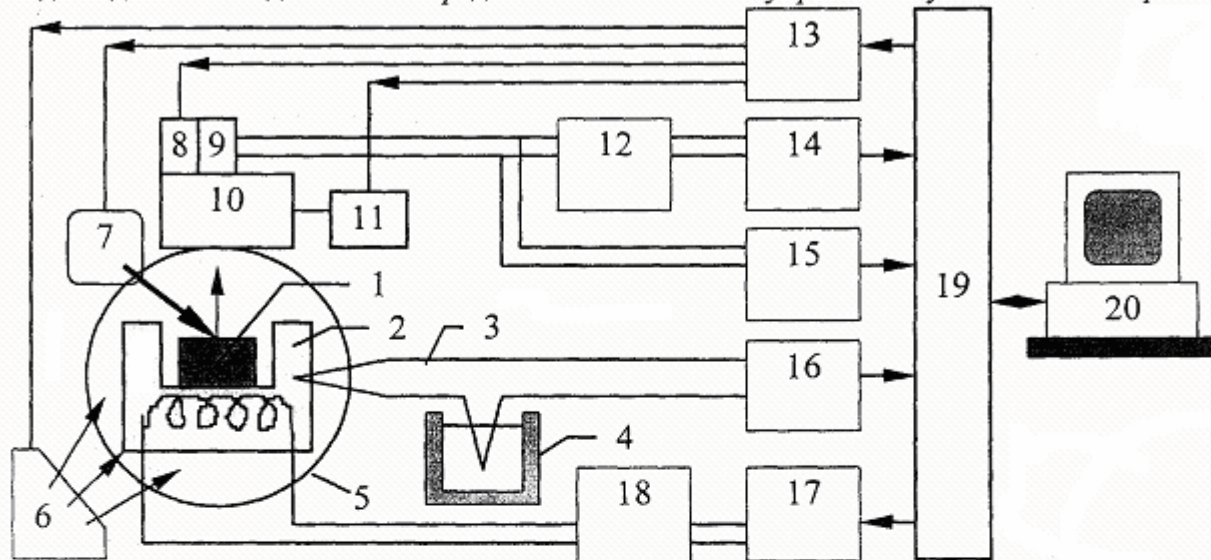


Рис. 4. Блок-схема управління установкою для дослідження оптичних та люмінесцентних властивостей твердих тіл.

1-досліджуваний зразок; 2-кристалотримач з нагрівачем; 3- термопара; 4 - термостат холодного спаю термопари; 5-вимірювальна камера; 6-охолоджуючий пристрій; 7- рентгенівська трубка з електро-механічною заслонкою; 8- джерело світла для контролю чутливості ФЕУ з комутуючим пристроєм; 9- ФЕУ в корпусі термоелектричного холодильника; 10- монохроматор МДР-23; 11- блок ручного управління монохроматором; 12- імпульсний підсилювач; 13- блок управління; 14- дискримінація (БР-1); 15- вольтметр-електрометр В7-30; 16- мікрвольтметр В7-34; 17- ЦАП; 18- підсилювач потужності; 19- адаптер DDA-120; 20- IBM PC.

адресні та інформаційні повідомлення, регістром стану зовнішнього пристрою RS, в якому відображається готовність зовнішнього пристрою до виконання слідуєчої команди, а також регістром управління перериваннями RI. Схематично інтерфейсний блок виконує роль дешифратора адресів (RA, RD, RS, RI) та підсилювача шини даних IBM PC, а також гальванічно розв'язує ЕОМ від зовнішніх пристроїв. Адресний селектор і регістри управління блоку для зв'язку із зовнішніми пристроями дають можливість вибирати необхідну для роботи мікросхему модулів 1-4 або таймерів 1-3 і

на рис. 4.

Основними частинами установки є вимірювальна система, яка забезпечує реєстрацію сигналів, система регулювання температури, яка забезпечує реалізацію вибраного закону нагрівання та система управління режимами роботи установки [25].

Вимірювальна система реєструє три параметри: температуру, час та інтенсивність. Для реєстрації температури, що вимірюється термопарою, використано цифровий мікрвольтметр В7-34А. З його виходу "ЦПУ" TTL сигнал по 24 лініях вводиться в порти RG1-RG3

модуля 3. Час вимірюється з точністю до мілісекунд програмно за допомогою звертання до системного таймера. Інтенсивність вимірюється в режимі лічби фотонів. Сигнал із фотоелектронного помножувача подається на вхід імпульсного підсилювача, а далі у приладі БР-1 дискримінується і приводиться до стандартної форми TTL імпульсів. 16-ти розрядний лічильник T12 таймера 1 здійснює їх підрахунок. Електрометричний вольтметр В7-30, підключений до портів RG4-RG6 модуля 3, дає можливість перевірити при необхідності темновий струм ФЕУ або проводити реєстрацію інтенсивностей у струмовому режимі.

Для управління системою нагрівання в установці використано 12-ти розрядний цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) Ф-4810, підключений до портів RG1-RG2 модуля 4. Сигнал із виходу ЦАП подається на підсилювач потужності, а далі на нагрівний елемент. Застосування ЦАП дозволяє реалізувати режими стабілізації певної температури і лінійного закону нагрівання та обійтися без складного і дорогого аналогового блоку, який задає закон нагрівання [17].

Для зміни режимів роботи установки (опромінення зразка, контроль чутливості ФЕУ, охолодження) служить блок управління, підключений до порта RG3 модуля 2. Вісім ліній цього порта через узгоджуючу мікросхему керують ключовими транзисторами, в якості навантаження яких виступають реле. При надходженні сигналу по лінії 1 відкривається заслонка рентгенівської трубки і здійснюється опромінення. Реле на лінії 2 включає і виключає опорне джерело світла для контролю чутливості ФЕУ. Реле на лінії 3 керує роботою охолоджувального пристрою. З допомогою реле 6 і 7 здійснюється управління монохроматором МДР-23.

Використаний для автоматизації контролер ДДА-120 має резерв можливостей (48 ліній вводу-виводу та 8 таймерів залишилися незадіяними), що дає мож-

ливість вдосконалити установку в майбутньому.

### 5. Програмне забезпечення для управління та обробки результатів вимірів

Розробка всього програмного забезпечення проводилася на мові TURBO PASCAL, оскільки ця мова має потужні обчислювальні та графічні можливості.

Програмне забезпечення, необхідне для експлуатації установки, складається із:

- а) драйверів для обміну інформацією та управління підключеними до ДДА-120 приладами;
- б) підпрограм первинної обробки результатів вимірів;
- в) програм управління експериментом та виводу контрольної інформації;
- г) програм кінцевої обробки результатів вимірів;
- д) тест-програм для контролю роботи, градування і настройки вузлів установки.

Драйвери для вимірювальних приладів (В7-34, В7-30, БР-1) побудовані як функції, тобто при зверненні програми до них отримується числове значення вимірюваної приладом величини. Для керуючих приладів (ЦАП і блок управління реле) драйвери зроблені як процедури, при зверненні до яких виконується дія (встановлюється задане значення напруги на виході ЦАП, включається або виключається вибране реле). Всі драйвери зібрані в одному модулі DDA.PAS.

Підпрограми первинної обробки результатів вимірів здійснюють:

- корекцію помилок, які можуть виникати при перевантаженні приладу, при зчитуванні значення з приладу або внаслідок випадкових флуктуацій вимірюваної величини;
- перетворення вимірюваного значення у відповідну фізичну величину (наприклад, напруги у температуру) і перевірку виходу величини за межі заданого діапазону;



- корекцію характеристик вимірювальних приладів (нелінійність термопари і системи лічби фотонів при великих інтенсивностях).

Для реалізації методик дослідження ТСЛ, спектральних та температурних залежностей РЛ розроблено відповідні програми управління експериментом. При написанні програм витриманий модульний принцип програмування, що значно покращує їх сприйняття і розуміння та дозволяє з мінімальними зусиллями вносити зміни в процедури і функції без переробки усїєї програми. Контрольна інформація в процесі вимірювань виводиться на екран, що дає можливість експериментатору слідкувати за зміною досліджуваних величин, а при необхідності коректувати параметри або припинити вимірювання. Результати вимірювань зберігаються у вигляді файлів на жорсткому диску ЕОМ.

Кінцева обробка результатів вимірів включає процедури побудови залежностей досліджуваних величин, згладжування експериментальних кривих і визначення з них фізичних параметрів.

Для контролю, відлагодження роботи вузлів і градування установки розроблені відповідні тест-програми.

## 6. Контрольні експерименти та оцінка похибок вимірювань

Джерелами похибок при вимірюванні слабих світлових потоків можуть бути [18]:

- статистичні флуктуації потоку фотонів і квантового виходу приймача світла;
- нелінійності приймача світла;
- дрейф чутливості приймача;
- дрейф і флуктуації темного сигналу приймача;
- похибки вимірювального приладу.

У більшості наших досліджень інтенсивності сигналів були такі, що статистичними флуктуаціями потоку фотонів і квантового виходу приймача світла можна було знехтувати. Дрейф чутливості приймача контролювався

опорним джерелом світла (див. вище). Оцінкою нестабільності може служити середньоквадратичне відхилення показів лічильника фотонів, що реєструє світловий потік від опорного джерела. Дрейф і флуктуації темного сигналу приймача у процесі вимірів складають менше 3 %.

Світлова характеристика лічильників фотонів повинна бути лінійна в області декількох порядків зміни інтенсивності. При високих інтенсивностях (порядку  $10^5 \text{ c}^{-1}$ ) може спостерігатися нелінійність із-за накладання імпульсів [16]. Для перевірки лінійності реєструючої системи в установці використано метод двох регульованих джерел світла [15]. Із результатів таких експериментів слідує, що до інтенсивностей  $10^5 \text{ c}^{-1}$  світлові характеристики лінійні. При перевищенні цієї інтенсивності спостерігається відхилення від лінійності. Після введення коректуючої поправки у програму вимірювання інтенсивності область лінійності розширилася до  $3 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$ .

Спектри РЛ і ТСЛ можуть суттєво спотворюватися через дисперсію і спектральну залежність коефіцієнта пропускання монохроматора, а також спектральну чутливість фотоприймача. Тому нами проведені контрольні експерименти по визначенню спектральної чутливості системи реєстрації.

Число відліків реєструючої системи можна представити в слідуючому вигляді:

$$N(\lambda) = k \cdot I(\lambda) \cdot M(\lambda) \cdot \sigma(\lambda) \cdot d\lambda/dl.$$

Тут  $N(\lambda)$ -число відліків реєструючої системи;  $M(\lambda)$ -коефіцієнт пропускання монохроматора. Функція  $\sigma(\lambda)$  характеризує спектральну чутливість приймача випромінювання. Величина  $d\lambda/dl$  є оберненою до лінійної дисперсії монохроматора. В коефіцієнт  $k$  ввійшли всі інші незалежні від  $\lambda$  величини, включаючи і чутливість установки. Шуканою величиною в попередній формулі є  $I(\lambda)$ . Для її знаходження використано метод порівняння із еталонним джерелом світла [1], у якого відома функція розподілу енергії ви-

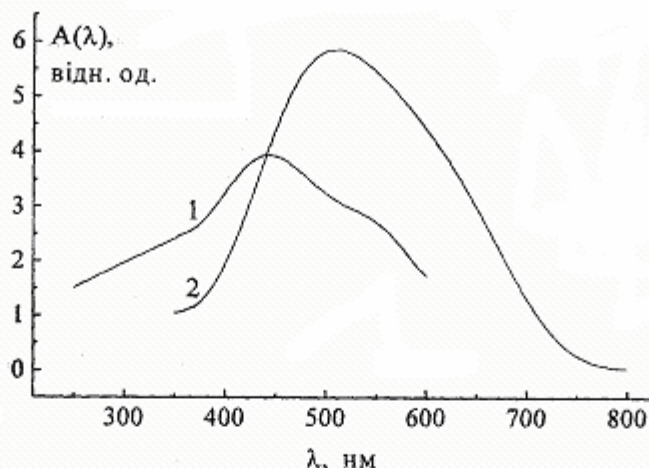


Рис. 5. Спектральна чутливість монохроматора МДР-23 та ФЕУ-106.  
(1- ґратка 200-500 нм, 2- ґратка 350-1000 нм)

промінювання по довжинах хвиль  $I_{\text{ст}}(\lambda)$ . В якості такого джерела використано вольфрамову лампу розжарювання із відомою кольоровою температурою СИ-8-200У, яка живиться від стабілізованого блоку живлення П138. Спектральний розподіл свічення лампи  $I_{\text{ст}}(\lambda)$  розраховано по формулі Планка з врахуванням поправки на сірість вольфраму. Для того, щоб проградувати установку, вхідна щілина освітлювалася градуйованою еталонною лампою і проводилися виміри  $N(\lambda)$ . Спектральна чутливість  $A(\lambda)$  визначається як частка від ділення  $N(\lambda)$  на  $I_{\text{ст}}(\lambda)$ ,

$$A(\lambda) = N(\lambda) / I_{\text{ст}}(\lambda).$$

Після цього корекцію довільного спектру  $I(\lambda)$  проводять по формулі

$$I(\lambda) = N(\lambda) / A(\lambda).$$

Експериментально одержані криві  $A(\lambda)$  для двох дифракційних ґраток монохроматора МДР-23 та ФЕУ-106 приведені на рис. 5. Слід відмітити, що такі виміри необхідно проводити після кожної заміни ФЕУ.

При проведенні температурних досліджень можливі систематичні і випадкові похибки вимірювань температури. Систематичні похибки домінують при визначенні абсолютної температури зразка, випадкові – невеликих різниць темпе-

ратур. З метою врахування і усунення систематичних похибок проводилася калібровка термометри при температурах від 0 до 100 °С і програмна корекція нелінійності термометри, а також визначався максимальний температурний градієнт на зразку при різних температурах і швидкостях нагрівання. Холодний кінець термометри термостатувався з точністю  $\pm 0,1$  °С.

Число випадкових похибок внаслідок шумів у термометрах і вхідних ланцюгах вимірювальних приладів, а також випадкових похибок відліку значно зменшилося внаслідок використання підпрограми первинної обробки результатів вимірів. При високих швидкостях нагрівання суттєвим стає вклад динамічних похибок внаслідок скінченної сталої часу встановлення теплової рівноваги в системі зразок-термометр.

Перевірку лінійності закону нагрівання можливо здійснити для кожного виміру ТСЛ, оскільки у файлі зберігаються всі три вимірювані величини: температура, час, інтенсивність. Як свідчать результати експериментів, швидкість в процесі нагрівання підтримувалася сталою з точністю 0,1-0,5 %.

Апробацію установки здійснено на зразках з комплекту дозиметричної установки ДТУ-01. Спектри РЛ та криві ТСЛ



цих зразків приведені на рис. 6 та 7. Одержані результати добре узгоджуються із літературними даними [26, 6, 7].

б) дослідження температурних залежностей РЛ в широкому діапазоні температур (20-500 °С)

в) спектральні дослідження поглинання, ТСЛ та РЛ у видимому та УФ

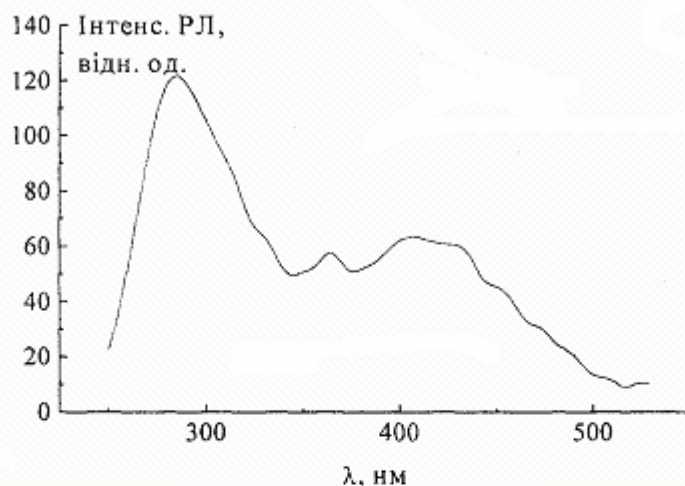


Рис. 6. Спектр рентгенолюмінесценції зразків з комплекту ДТУ-01.

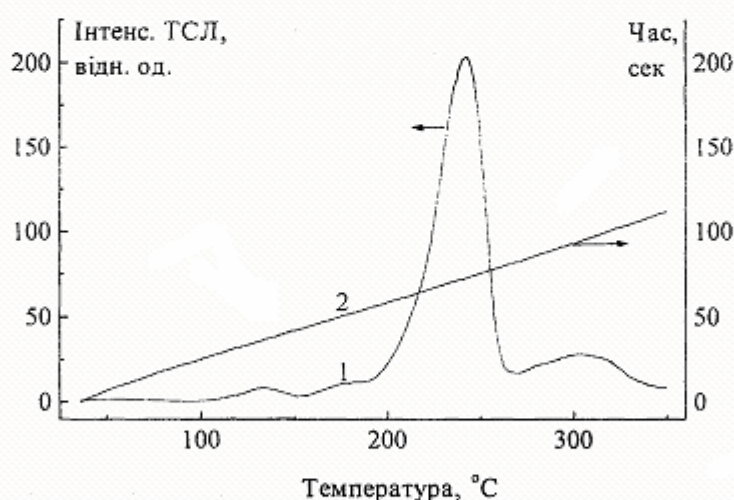


Рис. 7. Термостимульована люмінесценція зразків з комплекту ДТУ-01 (1) та зміна температури на протязі часу нагрівання (2).

### Висновки

Розроблена та виготовлена автоматизована установка для дослідження оптичних та люмінесцентних характеристик матеріалів, яка дає можливість проводити:

а) дослідження ТСЛ в широкому діапазоні температур (20-500 °С) та швидкостей лінійного нагрівання (0.01 - 5 °С/сек);

діапазоні спектру.

Ефективна реєстрація у широкому динамічному діапазоні інтенсивностей забезпечується використанням спеціально підібраних ФЕУ та методики лічби фотонів.

Використання цифроаналогового перетворювача у каналі управління температурою дозволяє з високою точністю забезпечити лінійність закону нагрівання

та стабілізацію будь-якої температури в робочому діапазоні.

Управління експериментальною установкою здійснюється за допомогою спеціально розробленого пакету програмного забезпечення. Введення результатів вимірювань в ЕОМ дає можливість їх оперативної обробки.

Проведений ряд контрольних експериментів по перевірці роботи установки з використанням зразків з комплекту ДГУ-01 свідчить про достовірність отримуваних результатів.

Автор висловлює щирю подяку за допомогу при розробці установки та відлагодженні методик Пуга П.П. та Соломону А. М.

1. Таращан А.Н. Люминесценция минералов. К. Наук. Думка, 1978. 296 с.
2. Парфианович И.А., Саломатов В.Н. Люминесценция кристаллов. М. Наука, 1988, 247 с.
3. Сердюк В.В., Ваксман Ю.Н. Люминесценция полупроводников. - К.; Одесса, Выща шк., 1988, 200 с.
4. Блинные Г.П. Голонжа В.Н., Гуменюк А.Ф. Энергетический спектр ловушек в кристаллах CsCdCl<sub>3</sub>/ Оптика и спектроскопия, том 69, вып.5, 1990, с. 1054- 1058.
5. Гуменюк А.Ф., Дегода В.Я. Особенности кинетики фосфоресценции кристаллов ИАГ:Nd<sup>3+</sup> при рентгеновском возбуждении. УФЖ, т. 32, №2, 1987, с.208-211.
6. S. W. S. McKeever, M. Moscovitch and P. D. Townsend Thermoluminescence dosimetry materials: properties and uses, Nuclear Technology Publishing, Ashford, (1995), 214 p.
7. Proceedings of the 12th International Conference on Solid State Dosimetry, (Burgos, Spain), Nuclear Technology Publishing, Ashford, (1998), 120 p.
8. Тале И.А. Термоактивационная спектроскопия люминесцирующих твердых тел. Изв. АН СССР, Сер. Физ., 1981, т. 45, №2, с. 245-252.
9. Гимадова Т.И., Кеирим-Маркус И.Б., Лукьянова Г.П. Современное состояние термолюминесцентной дозиметрии. Сб. «Люминесцентные приемники и преобразователи ионизирующего излучения». Наука, Сиб. Отд., Новосибирск, 1985, с. 41-48.
10. Зариньш М. Я. Управление температурой в кристатах. Методы и аппаратура для исследования люминесценции: Сборник научных трудов / Отв. ред. Я. Янсонс.-Рига: ЛГУ им П. Стучки, 1985. -151 с. (с. 99-128)
11. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. М. 1981. 640 с.
12. Я. Л. Янсонс. Применение фотоэлектронных умножителей для счета фотонов. Методы и аппаратура для исследования люминесценции: Сборник научных трудов / Отв. ред. Я. Янсонс.-Рига: ЛГУ им П. Стучки, 1985. -151 с. (с. 3-39).
13. Лимеж Г.К. Счетчик фотонов. Кибернетизация научного эксперимента. Ученые записки ЛГУ. Рига , 1971, 230 с.(с. 216-228).
14. Гарденак Э.Э. Системы счета фотонов для регистрации изменений слабых и быстроменяющихся потоков. Методы и аппаратура для исследования люминесценции: Сборник научных трудов / Отв. ред. Я. Янсонс.-Рига: ЛГУ им П. Стучки, 1985. -151 с. (с. 58-98)
15. Гулаков И.Р., Холондырев С.В. Метод счёта фотонов в оптико-физических измерениях. Минск: Университетское, 1989. –254 с.
16. Плаудис А.Э., Тале И.А. Научно-исследовательская система для проведения исследований комплексом люминесцентных методов. Кибернетизация научного эксперимента. Ученые



- записки ЛГУ. Рига , 1971, 230 с.(с. 66-94).
17. Гороховатский Ю.А., Бордовский Г.А. Термоактивационная токовая спектроскопия высокоомных полупроводников и диэлектриков.- М.: Наука, 1991.
  18. Тале И.А. Пути создания и требования к НИС для спектрально-кинетических люминесцентных исследований. Кибернетизация научного эксперимента. Ученые записки ЛГУ. Рига , 1971, 230 с.(с. 33-65).
  19. Температурные измерения. Справочник. Герашенко О.А., Гордов А.Н., Еремина А.К. и др.; Отв. ред. Герашенко О.А.; АН УССР, Ин-т проблем энергосбережения. - Киев: Наукова думка, 1989, 704 с.
  20. Курбак А.І., Ярошук Л.Д. Программування та розрахунок автоматичних систем. К.: ВШ, 1992, 366 с.
  21. Саган С. А. Тлумачний словник з автоматизації виробничих процесів. К.: Вища школа, 1997, 220 с.
  22. Александров А.Л., Брылов В.М., Ждан А.Г. Установка для исследования термостимулированной проводимости. ПТЭ, 1974, №1, с. 228-230.
  23. Горохов В.М., Гомельский Н.С. Новые регуляторы системы "Теплоавтомат". М.: 1965, 233 с.
  24. Алишов Н.И. и др. Справочник по персональным ЭВМ.-К: Техника, 1990.
  25. Hunda V.M., Puga P.P. A setup for studying thermostimulated processes in solids // Proceedings of the International Autumn School-Conference for Young Scientists "Solid State Physics: Fundamentals & Applications", Uzhgorod, Ukraine, September 18-26, 1995.-Kiev, 1995.
  26. Непомнящих А.И., Раджабов Е.А. Егранов А.В. Центры окраски и люминесценция кристаллов LiF. Новосибирск: Наука, 1984, 115 с.

## A MULTIFUNCTIONAL SETUP FOR X-RAY LUMINESCENT AND THERMOSTIMULATED LUMINESCENT STUDIES

**Hunda B. M.**

Institute of Electron Physics, Ukr. Nat.Acad.Sci  
21 Universitetska st., Uzhgorod 88016, Ukraine

An automated setup for optical and luminescent studies of materials is elaborated and constructed, enabling TSL measurements in a broad temperature range (20-500 °C) and linear heating rates (0.1-5 °C/s), XL temperature dependence measurements in the temperature range 20-500 °C, spectral studies of absorption, TSL and XL in the visible and UV range. Effective registration in the broad dynamical range is achieved by using specially chosen phototubes and photon counting technique. The automated setup is controlled by a constructed adapter and special software. The input of the measured data into the computer enables fast processing. A number of test experiments checking the setup operation, is performed, using a known dosimetric material LiF:Mg,Ti, providing the evidence for the obtained results versatility.