

В.П. Маслов, д.т.н., с.н.с.
Н.В. Качур, м.н.с.

Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України

СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ОПТИЧНИХ МЕТОДІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ВНУТРІШНІХ НАПРУЖЕНЬ ТА ДЕФЕКТІВ В ОПТИЧНИХ МАТЕРІАЛАХ

Технологічний рівень суспільства визначається наявністю не лише досконалих технологій отримання нових речовин, матеріалів та виробів, але й відповідних інформаційних методів і засобів контролю. В роботі експериментально доведена можливість використання дисплейних екранів комп'ютера як джерела поляризованого випромінювання. Показано, що спеціальний прилад ПКС-250, який має обмеження геометричних розмірів деталей до 250 мм, що контролюються за наявності внутрішніх напружень, можливо замінити на дисплейний екран розміром, що відповідає завданням контролю. Для прецизійних вимірювань внутрішніх напружень та їх розподілу в оптичних деталях запропоновано використання поляризаційно-модуляційного способу. Проаналізовано перспективність телевізійно-інформаційних вимірювальних систем для контролю внутрішніх дефектів в деталях із оптичних матеріалів. Важливим чинником, який дозволяє телевізійним вимірювальним засобам займати провідне місце серед аналогічних засобів, є наявність в їх структурі обчислювальних засобів (комп'ютера) та використання потужною арсеналу програмного забезпечення.

Ключові слова: оптичні методи неруйнівного контролю, внутрішні напруження та дефекти, оптичні матеріали, телевізійно-інформаційні вимірювальні системи.

Постановка проблеми. Інформаційна здатність оптичних приладів залежить, в першу чергу, від якості матеріалів, з яких зроблено прецизійні деталі інформаційного каналу. Тому розвиток методів неруйнівного контролю внутрішніх напружень та дефектів в оптичних матеріалах є актуальною проблемою.

Метою цієї статті є аналіз та дослідження сучасних перспективних оптичних методів контролю внутрішніх напружень та дефектів у оптичних матеріалів.

Типові дефекти оптичних матеріалів. В процесі виготовлення вихідних оптичних стекел та вирощування оптичних кристалів під дією технологічних факторів (температурних, механічних тощо) в них можуть утворюватися дефекти та внутрішні напруження. Розрізняють точкові, лінійні, поверхневі та об'ємні дефекти.

Розрізняють такі точкові дефекти в кристалах, як вакансії – не зайняті частинками вузли кристалічної ґратки (рис. 1 (1)); міжвузловини (рис. 1 (2)) – домішкові атоми (рис. 1 (4, 5, 6)) у вузлах ґратки або між вузлами, а також власні атоми або іони кристала, що змістилися зі своїх нормальних положень у вузлах решітки [4].

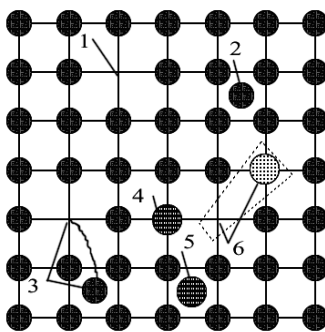


Рис. 1. Типи точкових дефектів у кристалах: 1 – вакансія, 2 – міжвузловий атом, 3 – дефект Френкеля, 4 – домішковий атом заміщення, 5 – домішковий атом включення, 6 – атом заміщення з великою валентністю

Зазвичай у структурі будь-якого кристала всі види точкових дефектів присутні одночасно, але внаслідок різниці в енергії утворення концентрація одних дефектів більша за інші.

В стехіометричних кристалах завжди домінують щонайменше два види точкових дефектів: пара вакансій, що утворилися при переході різних атомів або іонів з об'єму кристала на його поверхню (дефект Шотткі), або пара вакансія – міжвузловий атом, що утворюється при переході атома (іона) з

вузла ґратки в міжвузлове положення (дефект Френкеля) (рис. 1 (3)). В будь-якому кристалі за температури, що відрізняється від 0 К, існує певна термодинамічно рівноважна концентрація точкових дефектів. Залежно від виду та концентрації, точкові дефекти можуть суттєво впливати на оптичні властивості кристалів (смуги поглинання, розсіювання тощо).

Дислокації (лінійні дефекти) бувають двох видів: крайові та гвинтові [4]. Крайова дислокація являє собою край атомної площини, яка обривається всередині кристала, не доходячи до його поверхні. Рух дислокацій в кристалах відповідає за процеси пластичної деформації. Пластичне зміщення в кристалі відбувається не одночасним переміщенням всіх атомів (іонів), що лежать в одній площині, а послідовним переміщенням крайової дислокації від однієї групи атомів до іншої. В результаті дислокація (межі зони зміщення) «виходить» на поверхню кристала – відбувається елементарний пластичний зсув, довжина котрого дорівнює величині зсуву та називається вектором Бюргерса; площина, що проходить через цей вектор та лінію дислокації, називається площиною ковзання. Дислокації можуть переміщуватися не лише шляхом обміну місцями атомів неповної площини з атомами сусідньої заповненої атомної площини, але й в результаті переміщення краю неповної площини вгору чи вниз – шляхом приєднання або відриву вакансій від краю площини. Перешкодою для руху дислокації та подальшого розвитку пластичної деформації в кристалі є вакансії, міжвузлові атоми, домішкові атоми, ділянки в пружно напруженому стані, що утворюються іншими дислокаціями. Дислокації, що гальмуються перешкодами, можуть накопичуватися в кристалі вкрай неоднорідно, утворюючи різкі локальні концентрації напружень, що слугують зародками мікротріщин. Так звані бездислокаційні кристали, в яких щільність дислокацій на декілька порядків менша від щільності дислокацій у реальних кристалів (зазвичай 10^6 см⁻² дислокацій), відрізняються виключною міцністю і високими оптичними властивостями. При перетині дислокацій утворюються точкові дефекти, дислокації сприяють адсорбції домішкових атомів, вони полегшують дифузійні процеси, розсіюють електрони тощо. В той же час наявність внутрішніх напружень, які утворюються оптично прозорих матеріалах в результаті технологічних факторів, суттєво впливають на міцнісні та поляризаційні характеристики матеріалів.

Об'ємні дефекти – пори, бульбашки, об'ємні включення домішкових твердих фаз [3, 11]. Утворюються як в кристалах, отриманих в нерівноважних умовах, в результаті, наприклад, асоціації вакансій або домішкових атомів, так і при виготовленні оптичних стекел. Наявність тримірних дефектів погіршує властивості кристалів і скла, зокрема, збільшують розсіяння та зменшують прозорість, а внутрішні напруження створюють похибки при проходженні поляризованого світла через прецизійні деталі, виготовлені з цих матеріалів.

Тому актуальним завданням неруйнівного оптичного контролю оптичних матеріалів є розроблення перспективних методів контролю наявності дефектів та внутрішніх напружень в оптичних матеріалах.

Відомі методи оптичного контролю. Відповідно до ГОСТ 23479-79, відомі методи оптичного контролю поділяються на:

- метод оптичного випромінювання, що пройшло через зразок. Загальновідомим способом визначення параметрів оптичного випромінювання, що пройшло через зразок є фотометричний спосіб [1]. Він полягає тому, що дослідний зразок просвічують світловим потоком та за відношенням потужності світлового потоку, що поглинута зразком, до потужності первинного світлового потоку визначають повні втрати, що містять втрати і на поглинання та на розсіяння, за якими оцінюють якість зразка. Недоліком даного способу є неможливість визначення окремо коефіцієнту розсіювання і коефіцієнту об'ємного поглинання, невисока розрізняюча здатність способу через те, що при його здійсненні необхідно використовувати фотометр, помилка вимірювання якого складає 0,5 %, це дозволяє вимірювати втрати лише для матеріалів, які мають високий коефіцієнт поглинання;

- метод відбитого оптичного випромінювання – заснований на реєстрації параметрів оптичного випромінювання, відбитого від об'єкта контролю;

- метод розсіяного оптичного випромінювання – заснований на реєстрації оптичного випромінювання, розсіяного на дефектах об'єкта контролю;

- метод власного оптичного випромінювання – заснований на реєстрації параметрів власного випромінювання об'єкта контролю;

- метод індукованого оптичного випромінювання – заснований на реєстрації параметрів оптичного випромінювання, що генерується об'єктом контролю при сторонньому впливі;

- спектральний метод – заснований на аналізі спектра оптичного випромінювання після його взаємодії з об'єктом контролю;

- когерентний метод – заснований на зміні ступенів когерентності оптичного випромінювання після його взаємодії з об'єктом контролю;

- амплітудний метод – заснований на реєстрації інтенсивності оптичного випромінювання після його взаємодії з об'єктом контролю;

- часовий метод – заснований на реєстрації часу проходження оптичного випромінювання через об'єкт контролю;

- геометричний метод – заснований на реєстрації напряму оптичного випромінювання після його взаємодії з об'єктом контролю;
- поляризаційний метод – заснований на реєстрації ступеня поляризації оптичного випромінювання після його взаємодії з об'єктом;
- фазовий метод – заснований на реєстрації фази оптичного випромінювання після його взаємодії з об'єктом контролю;
- інтерференційний метод – заснований на аналізі інтерференційної картини, що отримується при взаємодії когерентних хвиль, опорної та модульованої об'єктом контролю;
- дифракційний метод – заснований на аналізі дифракційної картини, що отримується при взаємодії когерентного оптичного випромінювання з об'єктом контролю;
- рефракційний метод – заснований на аналізі параметрів заломлення оптичного випромінювання об'єктом контролю;
- абсорбційний метод – заснований на аналізі параметрів поглинання оптичного випромінювання об'єктом контролю;
- візуально-оптичний метод – заснований на спостереженні об'єкта контролю або його зображення за допомогою оптичних або оптико-електронних приладів;
- фотохімічний метод – заснований на аналізі параметрів фотохімічних процесів, що виникають при взаємодії оптичного випромінювання з об'єктом контролю;
- оптико-акустичний метод – заснований на аналізі параметрів оптико-акустичного ефекту, що виникає при взаємодії оптичного випромінювання з об'єктом контролю;
- фотолюмінісцентний метод – заснований на аналізі параметрів люмінесценції, що виникає при взаємодії оптичного випромінювання з об'єктом контролю;
- електрооптичний метод – поляризаційний метод оптичного контролю, заснований на додатковому впливі на об'єкт контролю зовнішнього електричного поля;
- магнітооптичний метод – поляризаційний метод, що заснований на додатковому впливі на об'єкт контролю магнітного поля;
- метод узгодженої фільтрації оптичного випромінювання – заснований на аналізі зображення об'єкта контролю за допомогою оптичного узгодженого фільтру;
- метод різницевого оптичного зображення – заснований на реєстрації відмінностей в зображеннях об'єкта контролю та контрольного зразка;
- метод фотоелектричного оптичного випромінювання – заснований на аналізі параметрів фотоелектричного ефекту, що виникає при опромінуванні об'єкта контролю оптичним випромінюванням;
- метод спекл-інтерферометрії – заснований на використанні просторової кореляції інтенсивності дифузно-когерентного оптичного випромінювання для отримання інтерференційних топограм об'єкта контролю;
- метод спекл-структур оптичного випромінювання – заснований на аналізі спекл-структур, що утворюються при відбитті когерентного оптичного випромінювання від шорсткості поверхні об'єкта контролю;
- метод муарових смуг – заснований на аналізі топограм об'єкта контролю, що отримуються за допомогою оптично сполучених растрів;
- голографічний метод оптичного неруйнівного контролю.

В даній роботі наведено результати досліджень з вдосконалення поляризаційного методу на зразках сапфіру, скла та склокераміки.

Вдосконалення поляризаційного методу. Відомий прилад поляризаційного контролю ПКС-250 (ЛОМО, Росія), що вимірює механічні напруження методом Сенармона, має обмеження до 250 мм по діаметру деталі, що контролюється. Крім того, він досить дорогий та контроль можна проводити лише у стаціонарних умовах при горизонтальному положенні деталей. Технічні характеристики приладу ПКС-250 надано у таблиці 1.

Таблиця 1

Технічні характеристики полярископа-поляриметра ПКС-250М

| | |
|---|------|
| Межа вимірювання різниці ходу при подвійному променезаломленні з чвертьхвильовою фазовою пластинкою, нм | 540 |
| Ціна ділення ноніусу | 10 |
| Величина відліку по ноніусу | 0,10 |
| Світловий діаметр матового екрану, мм | 300 |
| Світловий діаметр аналізатора, мм | 250 |
| Межа допустимої основної похибки приладу при вимірювання різниці ходу компенсатором Сенармона, нм | ±10 |

| | |
|------------------------------|-------------|
| Габаритні розміри, мм | 566x561x900 |
| Висота столу від підлоги, мм | 680 |
| Маса, кг | 35 |

Метод Сенармона полягає в наступному [12]. В схрещеному полярископії, повертаючи синхронно поляризатор та аналізатор, досягають гашення світла в n -тій точці зразка, що досліджується, тим самим визначаючи напрям головних напружень в цій точці. Між зразком, що досліджується, та аналізатором розміщують чвертьхвильову пластинку її орієнтують її під кутом 45° до знайдених напрямів головних напружень в даній точці досліджуваного зразка. Суміщають головні напрями поляризаторів з напрямом чвертьхвильової пластинки. Це положення приймають за початок відліку кутів, повертають аналізатор, знов досягаючи гашіння світла в заданій точці.

Отож, цей спосіб має фізичне обмеження на розмір деталі, що контролюється, та достатньо складний у реалізації.

Тому ми розглянули можливість використання більш дешевого та значно більшого за геометричними розмірами джерела поляризованого випромінювання.

Поставлене завдання досягається тим, що у відомому оптичному способі контролю механічних напружень в оптичних матеріалах, який полягає в освітленні досліджуваного зразка поляризованим світлом з наступною обробкою інформації з використанням аналізатора, як поляризоване світло може бути використане відбите сонячне світло [7].

За необхідності документації візуальна інформація може бути сфотографована на цифрову камеру з поляризаційним фільтром. На рисунку 2 показане загартоване скло, що сфотографоване на цифрову камеру з поляризаційним фільтром.

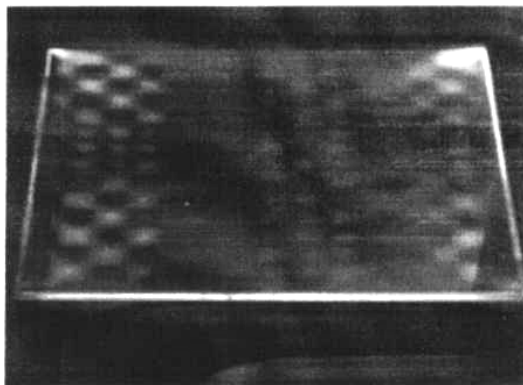
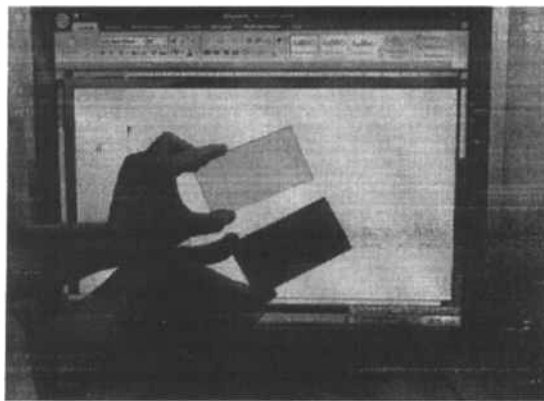


Рис. 2. Зображення загартованого листового скла 500x500x5 мм в поляризованому сонячному світлі

Можна побачити напруження, що виникло в наслідок локального обдуву форсунками при загартуванні нагрітого скла.

Але через те, що наявність та інтенсивність сонячного світла залежить від погодних умов, виникла необхідність розроблення великогабаритних енергозберігаючих джерел поляризованого світла. В результаті проведених досліджень було запропоновано використання як джерела поляризованого світла рідкокристалічного дисплею [2].

На рисунку 3 показано, що дисплейний екран комп'ютера має надійний поляризаційний ефект, тому що два однакові плівкові аналізатори показують дві крайні позиції – повне пропускання світла та його «вимикання».



*Рис. 3. Поляризація випромінювання дисплейного екрану
(верхній аналізатор в положенні пропускання, нижній – «вимкнення»)*

Розглянутий метод є простим для використання, але не дозволяє проводити кількісну оцінку існуючих механічних напружень. Більш точним методом оцінки механічних напружень є поляризаційно-модуляційний спосіб контролю.

Поляризаційно-модуляційний спосіб контролю. В роботі [9] досліджувалась можливість використання методу поляризаційно-модуляційної спектрометрії для вирішення поставленого завдання. Цей метод був у свій час детально досліджений та узагальнений в монографії [10]. Всі модуляційні методи поєднують одна й та ж сама функціональна риса, що полягає у фізичному диференціюванні відповідної функціональної характеристики того чи іншого явища. Потреба у даній процедурі продиктована необхідністю подолання труднощів, що виникають при аналізі слабо виражених особливостей досліджуваної характеристики, чи за наявності в ній постійної складової – «фону». Тому процедура диференціювання функціональних залежностей, що виконана на фізичному рівні, а не на етапі математичної обробки експериментальних результатів, є достовірним та додатковим, а деколи і новим високочутливим джерелом інформації про властивості досліджуваного об'єкта.

Однак така характеристика випромінювання як стан поляризації, має, з точки зору диференціальної спектроскопії, суттєву відмінність від інших способів модуляції. Вона полягає, перш за все, у тому, що поляризація, як просторова характеристика хвилі, виражається сукупністю значень – компонентами вектора Максвелла–Джонса або вектора Стокса. Таким чином, на відміну від модуляцій інших фізичних величин, що оперують з єдиним параметром, поляризаційна модуляція (ПМ) характеризується двомірним впливом на хвилю. Ця несуттєва, на перший погляд, обставина значно ускладнює як техніку експерименту, так й інтерпретацію отриманих за допомогою ПМ результатів. Частково у цьому і полягає причина того, що у період загального розповсюдження диференційних методів, коли практично у всіх фізичних науково-дослідних лабораторіях розвивалися модуляційні методики з використанням різноманітних фізичних величин, ПМ залишалася поза увагою. На рисунку 4 показана найбільш ефективна конструкція модулятора поляризації, в якій використано один з самих надійних способів одержання нероз'ємних безклеєвих з'єднань оптичних елементів – глибокий оптичний контакт, який оснований на силах молекулярного зчеплення комплектуючих поверхонь.

Структурна схема пристрою, який використовувався в роботі, наведено на рисунку 5.

*Рис. 4. Модулятор поляризації оптичного випромінювання:
1 – п'єзорезонатор (кристалічний кварц); 2 – динамічна фазова пластинка. Азимут
електричного поля хвилі, що модулюється, становить 45°
щодо напрямку акустичної хвилі стискування–розтягування*

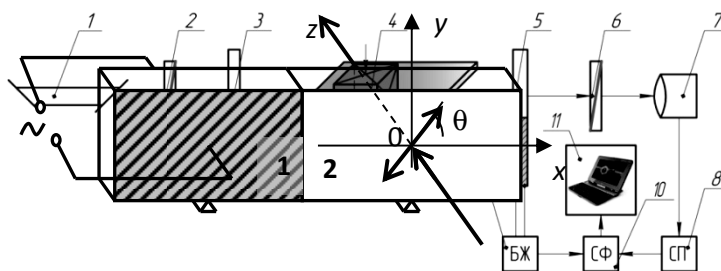


Рис. 5. Структурна схема пристрою для визначення абсолютних значень внутрішніх механічних напружень сапфірових вікон: 1 – напівпровідниковий гелієвий лазер; 2 – лінійний поляризатор; 3 – чвертьхвильова фазова пластинка $\lambda/4$ (компенсує початковий сигнал); 4 – контрольний зразок у вигляді сапфірового кубика; 5 – модулятор-поляризатор; 6 – лінійний поляризатор; 7 – фотодетектор; 8 – селективний підсилювач (UNIPAN); 9 – блок живлення; 10 – синхронно-фазовий нано-вольтметр; 11 – персональний комп'ютер (ПК)

Напівпровідниковий лазер (HLDP-650-A501 (виробник HUEY JANN, Китай) з довжиною хвилі $\lambda = 650$ нм) 1 з лінійним-поляризатором 2 на виході слугує джерелом випромінювання. Отримане в результаті лінійно-поляризоване світло спрямовували на контрольний зразок 4, який одночасно був zdeформований калібрувальним зусиллям. Рівномірний тиск по перерізу зразка встановлювали медичними важками. Еліптично поляризоване світло, яке пройшло через зразок, перетворювалось фотопружним модулятором 5 та лінійним поляризатором 6, і спрямовувалося на фотодетектор 7. Він генерував на частоті модуляції сигнал, пропорційний V-компоненті вектора Стокса, який підсилювали селективним пристроєм 8 і реєстрували синхронно-фазовим нано-вольтметром 9. Потім інформативний сигнал обробляли на ПК 11.

При куті 45° між напрямком деформації та віссю лінійного поляризатора лінійно поляризоване випромінювання найбільш ефективно перетворюється в циркулярне. Кут α між відносною оптичною віссю зразка і ортогональними компонентами визначається рівністю $E_x = E_y$ ($\alpha = \pi/2$).

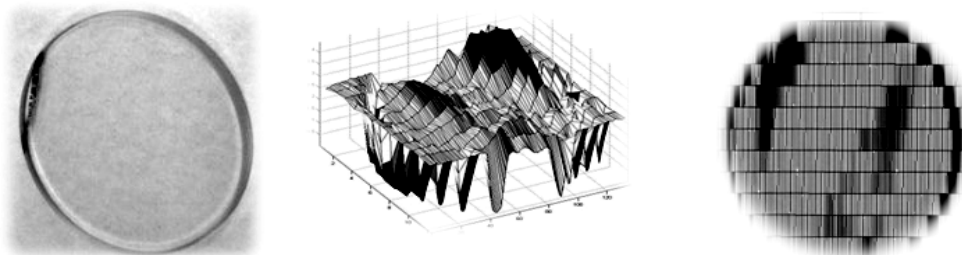


Рис. 6. Результати досліджень зразка сапфірових вікон

Залежно від величини анізотропії виникала циркулярна компонента певної величини, яка відповідала значенню внутрішніх механічних напружень.

Висока чутливість методу, яка досягає показника в 0,001 Па, дозволила пояснити причину невідповідності досліджених зразків вимогам лазерних систем, а саме: на зміну геометрії фронту лазерного випромінювання, яке пройшло через дані вікна, впливає величина і нерівномірність розподілу внутрішніх мікронапружень по площині цих вікон. На рисунку 6 та в таблиці 2 показано результати досліджень сапфірового лазерного вікна поляризаційно-модуляційним методом.

Таблиця 2

Максимальні (стиснення) та мінімальні (розтягнення) значення внутрішніх механічних напружень в оптичних сапфірових вікнах

| № зразка | $\delta_{\max+}$ (стиснення) | $\delta_{\max-}$ (розтягнення) |
|------------|------------------------------|--------------------------------|
| Зразок № 1 | 855 Па | -480 Па |
| Зразок № 2 | 900 Па | -500 Па |
| Зразок № 3 | 500 Па | -520 Па |
| Зразок № 4 | 460 Па | -415 Па |
| Зразок № 5 | 900 Па | -580 Па |

Телевізійний спосіб контролю. Останнім часом в технологічно розвинених країнах значного поширення набули телевізійні інформаційно-вимірювальні системи (ТІВС), за допомогою яких інформація про структуру, стан та властивості об'єктів різної природи, яка міститься в їх випромінюванні, перетворюється в зображення та аналізується. ТІВС фактично знаменують собою новий рівень вимірювальних технологій і потенційно найбільше відповідають сучасним вимогам контролю багатьох технологічних процесів. ТІВС надають унікальну можливість проводити вимірювання геометричних, динамічних та енергетичних параметрів об'єктів в реальному масштабі часу з високим просторовим розрізненням шляхом аналізу як власного випромінювання, так і того, що відбулося або пройшло через об'єкт. На базі телевізійної системотехніки, зокрема, виникли відеомікроскопія та телевізійна пірометрія, без яких досягнення багатьох галузей науки і техніки були б значно скромнішими. ТІВС широко використовуються для охорони, в наукових дослідженнях, промислових технологіях, екології, медичній діагностиці, астрономії та космічному матеріалознавстві, транспорті, криміналістичній експертизі, біотехнології, мікроелектроніці, військовій справі тощо.

Загальна методика застосування ТІВС полягає в формуванні зображення, перетворенні його в цифровий код та використанні алгоритмів, які забезпечують необхідну точність вимірювання енергетичних і геометричних параметрів об'єктів контролю. Телевізійне зображення може існувати як розподіл освітленості на чутливій поверхні світлоелектричного перетворювача (СЕН), як розподіл зарядів, як сформована законом розгортки послідовність аналогових електричних сигналів, як цифровий масив (цифрове зображення), як розподіл яскравості екрану. Термін світлоелектричний перетворювач склався історично і використовується переважно в телевізійній техніці, на відміну від терміна оптикоелектричний перетворювач, який має більш широке застосування. СЕН, як основний компонент ТІВС, істотно впливає на функціональні можливості ТІВС, зокрема, визначає спектральний діапазон (разом із оптичною системою), діапазон лінійності та ступінь неідентичності піксел, тобто точність вимірювання [5].

Важливим чинником, який дозволяє телевізійним вимірювальним засобам займати провідне місце серед аналогічних засобів, є наявність в їх структурі обчислювальних засобів (комп'ютера) та використання потужною арсеналу програмного забезпечення. Програмні засоби забезпечують керування процесом формування телевізійного зображення, введення його до комп'ютера, обробку, визначення заданих характеристик, поточну корекцію роботи ТІВС, формування банку даних, в тому числі і банку цифрових зображень.

Концепція застосування ТІВС для дослідження геометричних, динамічних та енергетичних параметрів об'єктів базується на припущенні про СЕНГ як про первинний вимірювальний перетворювач, що складається з упорядкованої сукупності ідентичних і незалежних мікроперетворювачів випромінювання (піксел). Реально таке припущення не завжди відповідає дійсності, вимога незалежності сусідніх піксел виконується тільки при роботі СЕНГ в діапазоні лінійності, а вимога ідентичності забезпечується програмною корекцією [6]. Значне спрощення контролю може бути здійснено завдяки використанню еталонних зразків для порівняльних випробувань.

З точки зору наукових та технологічних досліджень, ТІВС викликає особливу цікавість як технічний засіб з потенційно високим розрізненням. Також перспективною є можливість використання такої системи для створення псевдооб'ємного зображення наявних дефектів у оптично прозорих зразках.

Висновки. Експериментально доведена можливість використання дисплейних екранів комп'ютера як джерела поляризованого випромінювання. Тим самим показано, що спеціальний прилад ПКС-250, який має обмеження до 250 мм геометричних розмірів деталей, що контролюються за наявністю внутрішніх напружень, можливо замінити на дисплейний екран розміром, що відповідає задачам контролю. Для прецизійних вимірювань внутрішніх напружень та їх розподілу в оптичних деталях запропоновано використання поляризаційно-модуляційного способу. Показана перспективність телевізійно-інформаційних вимірювальних систем для контролю внутрішніх дефектів в деталях із оптичних матеріалів.

Список використаної літератури:

1. *Афанасьев В.А.* Оптические измерения : учебник / *В.А. Афанасьев.* – М. : Высшая школа, 1981. – 229 с.
2. Пат. України на корисну модель № 78911 від 10.04.2013 р. Застосування плоского дисплейного або телевізійного екрану в стані включення в електричну мережу живлення персонального комп'ютера або телевізора як джерела поляризаційного випромінювання / *Є.Ф. Венгер, В.П. Маслов, О.І. Семенець, Н.В. Качур, С.М. Куцовий.* – Бюл. № 7. – 2013.
3. *Зубаков В.Г.* Технология оптических деталей : учебник / *В.Г. Зубаков, М.Н. Семибратов, С.К. Штандель* ; под ред. *М.Н. Семибратова.* – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1985. – 368 с.
4. *Мильвидский М.Г.* Структурные дефекты в кристаллах полупроводников / *М.Г. Мильвидский, В.Б. Освенский.* – М. : Металлургия, 1984. – 256 с.

5. *Маслов В.П.* Підвищення точності вимірювання лінійних розмірів мікродефектів в деталях з оптично прозорих матеріалів за допомогою телевізійних засобів / *В.П. Маслов* // *Методи та прилади контролю якості.* – 2012. – № 2 (29). – С. 96–101.
6. *Порєв Г.В.* Концептуальні аспекти використання приладів з електронним розгортанням зображення для аналізу оптичних полів / *Г.В. Порєв, В.А. Порєв* // *Наукові вісті НТУУ «КПІ».* – 2001. – № 1. – С. 56.
7. Пат. України на корисну модель № 82800 від 12.08.2013 р. Спосіб контролю авіаційного органічного скла / *О.І. Семенець, В.Я. Дереча, В.Ф. Самойленко, Є.Ф. Венгер, В.П. Маслов, Н.В. Качур.* – Бюл. № 15.
8. Химическая технология стекла и ситаллов / *М.В. Артамонова, М.С. Асланова, И.М. Бужинский и др.* ; ред. *Н.М. Павлушин.* – М. : Стройиздат, 1983. – 432 с.
9. Комплексні дослідження якості сапфірових вікон сучасними неруйнівними методами / *Б.К. Сердега, І.Є. Матяш, П.М. Литвин та ін.* // *Вісник НТУУ «КПІ»* / Серія : Приладобудування. – 2012. – Вип. 43. – С. 54–60.
10. *Сердега Б.К.* Модуляційна поляриметрия : монографія / *Б.К. Сердега.* – К. : Наукова думка, 2011. – 260 с.
11. *Сулім А.В.* Производство оптических деталей / *А.В. Сулим.* – М. : Высшая школа, 1975. – 316 с.
12. *Хетенъ М.* Фотоупругость и фотопластичность / *М.Хетенъ* // *Механика* : сб. сокр. пер. – 1961. – Т. 65, № 1. – С. 119–145.

МАСЛОВ Володимир Петрович – доктор технічних наук, завідувачий відділом, Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України.

Наукові інтереси:

- оптика;
- матеріалознавство.

Тел.: +38(044)535–58–30.

E-mail: maslov@isp.kiev.ua.

КАЧУР Наталія Володимирівна – молодший науковий співробітник, Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України.

Наукові інтереси:

- оптика;
- взаємодія світла з оптичними матеріалами;
- оптичний контроль.

E-mail: natalykachur@gmail.com.

Стаття надійшла до редакції 23.04.2014