УДК 62-97/-98
DOI: 10.15587/2312-8372.2015.44395

Гордієнко В. І.,
Качур Н. В.,
Маркіна О. М.,
Маслов В. П.

РОЗРОБКА ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТОПОЛОГІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ОПТИЧНИХ ШКАЛ ТА СІТОК

Розроблено науково-технічний підхід для створення інтегральної вимірювальної системи для технологічного аудиту та контролю геометричних розмірів топологічних елементів оптичних шкал та сіток. Проаналізовано чинники, які впливають на величину корисного сигналу та експериментально показано переваги LED-екрану як освітлювача перед галогенною лампою в розробленій вимірювальній системі. Проведені експерименти дозволили визначити оптимальні умови вимірювань.

Ключові слова: *оптична система, геометричний розмір, мікроскоп, міра, шкали та сітки, LED-екран.*

1. Вступ

Останні десятиріччя знаменуються значними успіхами в розвитку можливостей оптичної мікроскопії. Яскравим прикладом цього є присудження в 2014 році Нобелівської премії з хімії вченим E. Betzig, W. Moerner, S. Hell за розробку способу флуоресцентної мікроскопії надвисокої роздільної здатності.

Збільшення потреби в телевізійних системах вимірювання пов'язано з розвитком нано- та мікротехнологій. До властивостей таких систем належать: зручність поєднання телевізійної (цифрової) камери практично з будь-яким комп'ютером; високою швидкодію, що дозволяє обробляти сигнали від нерухомих, малорухомих і об'єктів, що швидко рухаються, як у реальному, так і зміненому часі; швидкий розвиток елементної бази, якою займаються десятки провідних фірм світу (EDMUND OPTICS, SONY, NOVUS, ZEISS, HITACHI, SAMSUNG, GUPPY, STINGRAY, ZYGO, LEICA, GEOL). Такі системи широко використовуються в мікроелектроніці та оптичному виробництві, зокрема, для технологічного аудиту та контролю топологічних елементів оптичних шкал та сіток [1].

В той же час ці системи мають високу вартість і для вітчизняних підприємств в складних економічних умовах не доступні. Для зменшення собівартості нової вимірювальної системи бажано, щоб використовувались прилади, деталі, вузли, що вже є на підприємствах прецизійного приладобудування (оптичні мікроскопи, оптичні фільтри, об'єктиви, окуляри, міри тощо).

Таким чином робота присвячена вирішенню актуальної задачі створення доступних для більшості оптичних підприємств і дослідних лабораторій систем вимірювання та контролю геометричних розмірів оптичних деталей в мікронному діапазоні.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Оптичні мікроскопи постійно вдосконалюють останнім часом за рахунок нових рішень по конструкції об'єктивів та освітлювачів. Так, наприклад, в роботі [2] запропоновано конфокальний мікроскоп, що складається з двох детекторів. Така конструкція виключає як коливання джерела світла та виникнення електронного шуму від зондів, а також збільшує осьову роздільну здатність, а також з 1 мм діаметру зонда з аксіальною роздільною здатністю 5 нм. Такий мікроскоп може застосовуватись для вимірювання невеликих нерівних поверхонь в обмеженому просторі, запропонована система датчиків може бути встановлена на координатній вимірювальній машині для безконтактного виміру розмірів і шорсткості поверхні, і включена в центр обробки з ЧПУ для контролю якості на лінії.

Використання світлодіодів у конфокальних мікроскопах дозволяє збільшити повторюваність і точність вимірювань [3].

В роботі [4] описана експериментальна установка, яка використовує напівпровідниковий лазерний пристрій в якості джерела світла. Лазерний промінь, який входить в мікроскоп, ексцентричний з головною віссю оптичної системи. Розфокусований сигнал потрапляє на симетричний кремнієвий фотоелемент для зміни відбитого світла, викликаного положенням диференціального посилювача і обробленого за допомогою мікропроцесора. Потім електричний сигнал посилюється і приводить в дію двигун постійного струму, який переміщує платформу для автоматичного фокусування мікроскопа. Результат експериментів показує ± 0,1 мкм точність автофокусування.

Нові науково-технічні рішення по вдосконаленню мікроскопів викладено у монографії [5] та статтях [6–8].

Але сучасні мікроскопи та системи вимірювання геометричних розмірів з мікронною точністю мають високу вартість і для вітчизняних підприємств в складних економічних умовах не доступні. Для зменшення собівартості нової вимірювальної системи бажано, щоб використовувались прилади, деталі, вузли, що вже є на підприємствах прецизійного приладобудування (оптичні мікроскопи, оптичні фільтри, об'єктиви, окуляри, міри тощо).

3. Об'єкт, мета та задачі дослідження

Об'єктом дослідження є процес вимірювання геометричних параметрів топологічних елементів оптичних шкал та сіток з використанням інтегрованої системи, яка містить мікроскоп типу Біолам, оптичні фільтри, об'єктиви, окуляри, міри тощо.

Метою даної роботи є створення та підвищення точності телевізійної вимірювальної системи на базі мікроскопу Біолам для контролю геометричних розмірів топологічних елементів оптичних шкал і сіток.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Розробити науково-технічний підхід для створення інтегральної вимірювальної системи на базі доступних для вітчизняних підприємств оптичних мікроскопів типу Біолам та камер Novus-130 BH для технологічного аудиту та контролю геометричних розмірів топологічних елементів оптичних шкал та сіток;
2. Проаналізувати чинники, які впливають на величину корисного сигналу та експериментально показати переваги LED-екрану як освітлювача перед галогенною лампою в розробленій вимірювальній системі.
3. Провести експерименти, що дозволять визначити оптимальні умови вимірювань та зменшити похибку вимірювання топологічних елементів оптичних шкал та сіток.

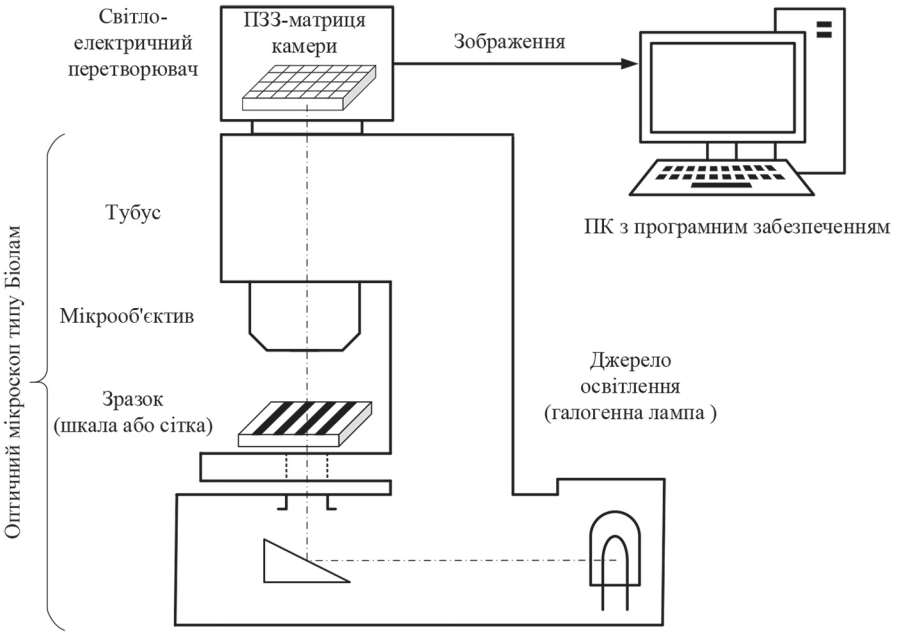

Рис. 1. Узагальнена структурна схема інтегрованої телевізійної вимірювальної системи

4. Методика досліджень

Авторами було обрано напрямок створення цифрових вимірювальних систем шляхом інтеграції таких складових, як оптичні мікроскопи, цифрові телевізійні камери на ПЗЗ-матрицях, програмного забезпечення для створення та аналізу зображення об'єкту вимірювання на дисплеї комп'ютера [8–10]. При такому підході потрібно також вирішувати задачі по вибору освітлювачів, оптичних фільтрів та мір. Після створення такої інтегрованої системи необхідно провести її дослідження щодо оптимізації методики вимірювання з метою зменшення.

Для інтегрованої системи на базі оптичного мікроскопу типу Біолам було використано цифрову камеру Novus-130 BH з ПЗЗ-матрицею, що складається з 752 × 582 пикселей, горизонтальна роздільна здатність 600 ТВЛ, чутливість 0,01 люкс/F1,2-0,05 люкс/F1,2, відношення сигнал/шум більше 48 Дб (рис. 1).

В якості освітлювача використовували галогенну лампу та дисплейний LED-екран. Виходячи з того, що чутливість ПЗЗ-матриці найвища в червоному оптичному діапазоні, були використані світлові фільтри з галогенною лампою, а в LED-екрані одночасно випромінюють голубий, зелений та червоний світлодіоди і тому для цього джерела світлофільтри не використовували.

Методика досліджень базувалась на вивченні величини корисного сигналу та контрастності цифрового зображення. Використовували метод світлового ножа, тобто вивчали корисний сигнал при переміщенні об'єкта дослідження (штриха міри на просвіт за ГОСТ 15114-78), коли при скануванні штриха колір зображення змінюється від чорного до білого.

Крім того, авторами статті також була вперше застосована розроблена методика дослідження контрасту з використанням двох поляризаційних фільтрів при зміні від положення їх схрещування до паралельності осей.

Результати експериментів з встановлення світлосигнальної характеристики інтегральної вимірювальної системи наведено на рис. 2.

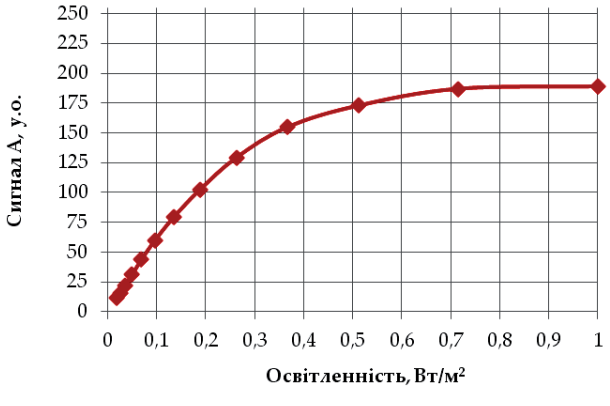

Рис. 2. Світлосигнальна характеристика інтегрованої вимірювальної системи

З експериментальних результатів (рис. 2) були обрані оптимальні режими для вимірювань:

1. Робочий діапазон сигналів має бути наступним: A = 20...105 у. о.
2. Робочий діапазон просторово-частотної характеристики: $f_{\text{твс}}$ = 15...60 мм$^{-1}$.

5. Результати дослідження чинників, які впливають на величину корисного сигналу інтегрованої системи контролю топологічних елементів оптичних шкал та сіток

Порівняння експериментальних даних показало, що при використанні LED-дисплею (в стані включення) мобільного телефону в порівнянні з галогенною лампою зростає чутливість на 40 % та відношення сигнал/шум на 50 % при однаковому куті нахилу експериментальних кривих, який обумовлений квантовою ефективністю матеріалу ПЗЗ-матриці (рис. 3). LED-дисплей розташовували безпосередньо на предметному столику мікроскопа, а досліджуваний зразок (міри, шкали або сітки) клали на нього.

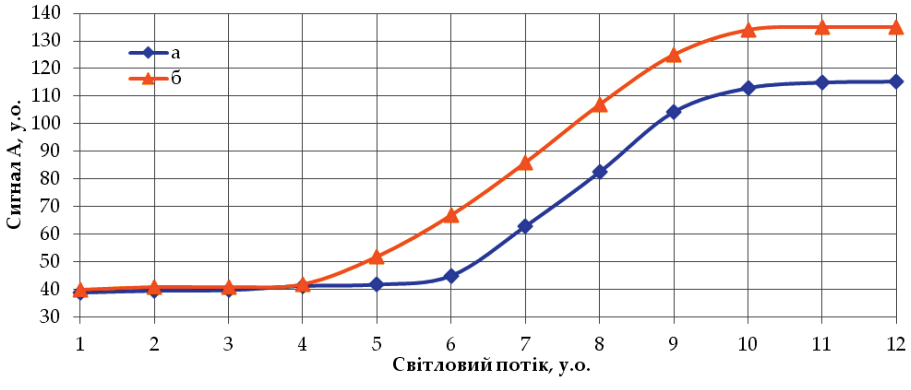

Рис. 3. Залежність сигналу в ТВС від світлового потоку джерела освітлення: *а* — галогенна лампа JC; *б* — рідкокристалічний дисплей HTC

Експерименти показали ефективність цього рішення також при боковому положенні екрану для отримання зображення об'єкту дослідження на відбиття.

LED-екрани можуть також бути гнучкими на органічній підкладці, що дозволяє створювати об'ємні (циліндричні або іншої конфігурації) освітлювачів, в середині яких буде розташовано об'єкт дослідження. Для перевірки цього в експериментах плоский екран розташовувався по сторонам паралелепіпеда, що дозволяло освітлювати об'єкт в більшому тілесному куту.

Таким чином, LED-екран має конструкційні та експлуатаційні переваги в порівнянні з галогенними джерелами освітлення, а також забезпечує універсальність використання в мікроскопії.

Були проведені дослідження впливу технології виготовлення мір на результати вимірювань. Міри досліджували на мікроскопі атомних сил (рис. 4, *а*, *б*).

При виготовленні міри ЛОМО методом механічного прорізання матеріал покриття створював навали по границям штрихів, а використання променевих технологій (фірма BRUKER) дозволяло уникнути цього недоліку.

У випадку міри ЛОМО існувала невизначеність того, як фокусувати зображення штриха в мікроскопі. Невизначеність дорівнювала висоті навалу і склала майже 40 нм (рис. 5).

Експериментально було визначено, що розфокусування на рівні 0,1 мкм для міри ЛОМО давало похибку вимірювання на рівні 0,1–0,06 мкм (табл. 1).

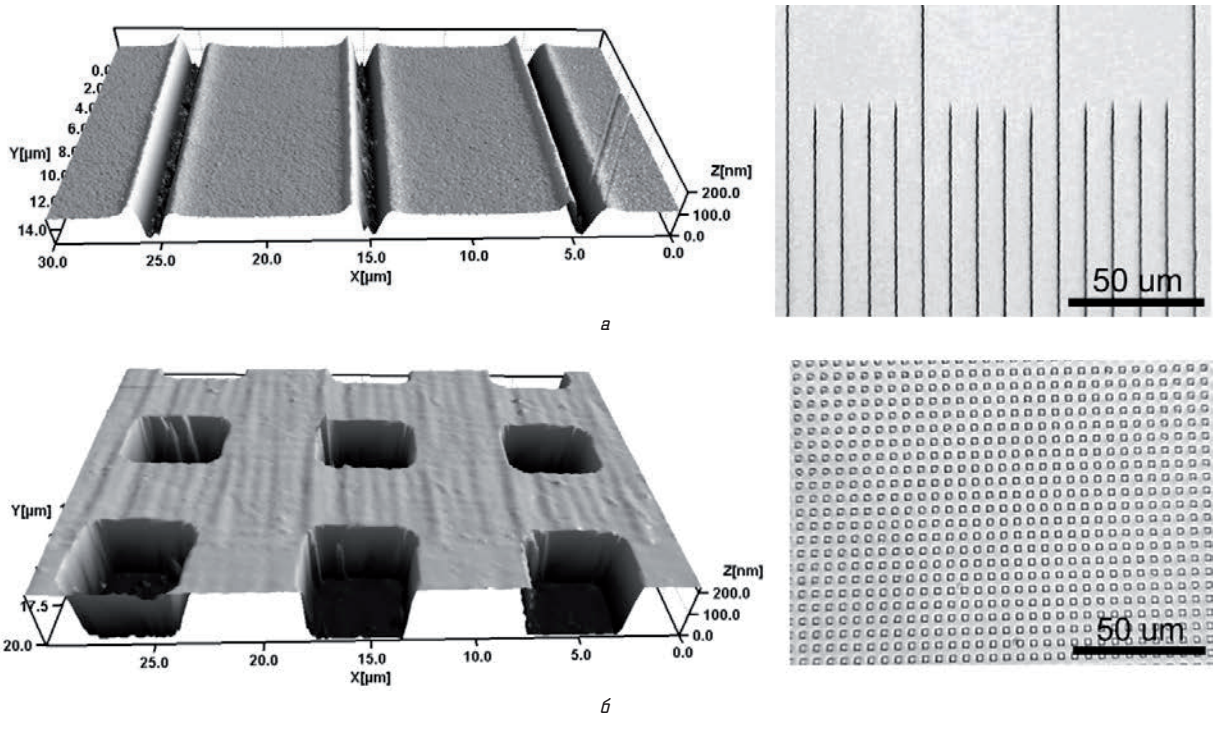

Рис. 4. Тривимірне зображення на атомно-силовому мікроскопі фрагменту поверхні міри і оптичне цифрове зображення міри ЛОМО (*а*); та міри для калібрування сканера зондового мікроскопу фірми BRUKER (*б*)

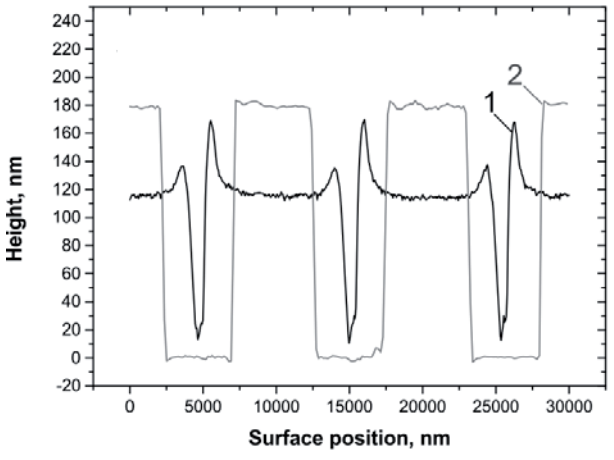

Рис. 5. Вікно програми до атомно-силового мікроскопу: профілі рельєфу штрихів міри ЛОМО на відбиття (крива 1) та міри BRUKER (крива 2)

Таблиця 1

Вплив розфокусування на точність вимірювання

Міра	Період при об'єктиві 25х, мкм	
	у фокусі	розфокусування на рівні 0,1 мкм
ЛОМО (на відбивання)	10,002 ± 0,008	9,942 ± 0,053
Bruker (на відбивання)	5,045 ± 0,009	5,051 ± 0,010
ЛОМО (на пропускання)	10,007 ± 0,006	10,011 ± 0,012

Проведені дослідження дозволили зменшити похибку вимірювання геометричних розмірів топологічних елементів шкал та сіток розробленою інтегрованою системою:

— 2 % за рахунок застосування LED-дисплею;

— 0,5 % за рахунок використання світлових фільтрів, що відповідають максимуму спектральної характеристики ПЗЗ-матриці;

— 2 % за рахунок визначення оптимальних умов калібрування та використання нових об'єкт-мікрометрів (мір).

Це дозволило вимірювати елементи розміром 6–10 мкм з похибкою ±0,5 мкм.

6. Обговорення результатів експериментальних досліджень

Для аналізу експериментальних графіків (рис. 3), що мають загальний вигляд «*S*-кривої» з відповідним нахилом, авторами статті було використано логістичний підхід залежності результату від ресурсу, який має такий же вигляд [9]. В даному випадку величина корисного сигналу залежить від величини світлового потоку від джерела освітлення і може бути аналітично представлена у вигляді:

$$\frac{dN}{d\Phi} = rN\frac{K-N}{K},\ K \to N_{\max}, \tag{1}$$

де $\frac{dN}{d\Phi}$ — похідна величини корисного сигналу в залежності від світлового потоку; r — коефіцієнт квантової ефективності, що характеризує властивість створення електронного сигналу при освітленні фоточутливого шару матеріалу ПЗЗ — матриці, N — величина корисного сигналу, K — максимальне значення корисного сигналу.

Подальші перетворення:

$$\frac{K\cdot dN}{N(K-N)} = rd\Phi, \tag{2}$$

$$\frac{1}{N(K-N)} = \frac{1}{KN} + \frac{1}{K(K-N)}, \tag{3}$$

$$\left(\frac{1}{N} + \frac{1}{K-N}\right)dN = rd\Phi, \tag{4}$$

після інтегрування:

$$\int\left(\frac{1}{N} + \frac{1}{K-N}\right)dN = \int rd\Phi + A, \tag{5}$$

$$\ln N - \ln(K-N) = rt + \ln a,\ \ln a = A, \tag{6}$$

$$\frac{N}{K-N} = ae^{r\Phi},\ \Phi = \Phi_0,\ N = N_0,\ a = \frac{N_0}{K-N_0}, \tag{7}$$

де N_0 — рівень шумів (темновий струм на ПЗЗ-матриці):

$$N(\Phi) = \frac{aKe^{r\Phi}}{1+ae^{r\Phi}},\ N_0 = \frac{aK}{a+e^{-r\Phi_0}}, \tag{8}$$

$$N(\Phi) = \frac{K}{1+\exp(b-r\Phi)},\ b = \ln\frac{1}{a} = \ln\frac{K-N_0}{N_0}, \tag{9}$$

де b — коефіцієнт, який характеризує контрастність.

Аналіз (9) дозволяє зробити загальний висновок, що корисний сигнал ПЗЗ-матриці визначається властивостями фоточутливого матеріалу (квантова ефективність), з якого вона зроблена, а проведені авторами даної роботи експерименти дозволяють також виявити залежність від типу джерела освітлення. Зокрема, що використання LED-екрану має суттєві переваги для однієї і тієї ж ПЗЗ-матриці.

При цьому експерименти дозволили виявити переваги та недоліки відомих мір для калібрування, а також вплив розфокусування мікроскопу у розробленій системі вимірювання та контролю геометричних розмірів топологічних елементів оптичних шкал та сіток.

Таким чином, проведені експерименти підтвердили запропонований авторами підхід до створення інтегрованої системи з доступних складових, що є вже на багатьох підприємствах оптико-електронної промисловості для вимірювання з достатньої точністю та контролю для вирішення задач технічного аудиту виробництва прецизійних деталей.

Автори планують вдосконалити розроблену систему шляхом використання досконаліших за параметром

роздільної здатності оптичного мікроскопу та телевізійних камер з високою квантовою ефективністю та контрастністю.

7. Висновки

1. Розроблено науково-технічний підхід для створення інтегральної вимірювальної системи для технологічного аудиту та контролю геометричних розмірів топологічних елементів оптичних шкал та сіток.

2. Проаналізовано чинники, які впливають на величину корисного сигналу та експериментально показано переваги LED-екрану як освітлювача перед галогенною лампою в розробленій вимірювальній системі.

3. Проведені експерименти на інтегральній вимірювальній системі з використанням мікроскопу типу Біолам та телевізійної камери Novus-130 BH дозволили визначити оптимальні умови та зменшити похибку вимірювання топологічних елементів оптичних шкал та сіток на 4,5 % і вимірювати елементи розміром 6–10 мкм з похибкою ±0,5 мкм.

Література

1. Маслов, В. П. Підвищення точності вимірювання лінійних розмірів мікродефектів в деталях з оптично прозорих матеріалів за допомогою телевізійних засобів [Текст] / В. П. Маслов // Методи та прилади контролю якості. — 2012. — № 29. — С. 96–101.
2. Tan, J. Differential confocal optical system using gradient-index lenses [Text] / J. Tan // Optical Engineering. — 2003. — Vol. 42, № 10. — P. 2868–2871. doi:10.1117/1.1602459
3. Youk, Y. A Confocal Scanning Optical Microscope System for Measuring Refractive Index Profiles of Specialty Optical Waveguides [Text] / Y. Youk, D. Y. Kim // Microscopy and Microanalysis. — 2005. — Vol. 11, № S02. — P. 726–727. doi:10.1017/s1431927605505269
4. Li, Q. Autofocus system for microscope [Text] / Q. Li, B. Lifen, X. Shifu, Ch. Luyun // Optical Engineering. — 2002. — Vol. 41, № 6. — P. 1289–1294. doi:10.1117/1.1473639
5. Török, P. Optical Imaging and Microscopy [Text] / P. Török, F.-J. Kao // Optical Sciences. — Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. — 497 p. doi:10.1007/978-3-540-69565-3
6. Huang, B. Super-resolution optical microscopy: multiple choices [Text] / B. Huang // Current Opinion in Chemical Biology. — 2010. — Vol. 14, № 1. — P. 10–14. doi:10.1016/j.cbpa.2009.10.013
7. Yazdanfar, S. Simple and robust image-based autofocusing for digital microscopy [Text] / S. Yazdanfar, K. B. Kenny, K. Tasimi, A. D. Corwin, E. L. Dixon, R. J. Filkins // Optics Express. — 2008. — Vol. 16, № 12. — P. 8670–8677. doi:10.1364/oe.16.008670
8. Shimobaba, T. Real-time digital holographic microscopy using the graphic processing unit [Text] / T. Shimobaba, Y. Sato, J. Miura, M. Takenouchi, T. Ito // Optics Express. — 2008. — Vol. 16, № 16. — P. 11776–11781. doi:10.1364/oe.16.011776
9. Спосіб визначення геометричних розмірів мікромасштабних прозорих об'єктів [Текст]: пат. 95615 Україна: МПК G01N 15/10 (2006.01) / Маркіна О. М. Качур Н. В., Маслов В. П.; заявники та патентовласники Маркіна О. М., Качур Н. В., Маслов В. П. — № u 2014 08497, заявл. 25.07.2014; опубл. 25.12.2014, Бюл. № 24. — 3 с.
10. Maslov, V. Logistic Approach to the Dependence of Efficiency of Scientific-and-Technical Projects on Resources [Text] / V. Maslov // Journal of Business and Management Sciences. — 2013. — Vol. 1, № 2. — P. 14–17. doi:10.12691/jbms-1-2-1

РАЗРАБОТКА ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ОПТИЧЕСКИХ ШКАЛ И СЕТОК

Разработан научно-технический подход для создания интегральной измерительной системы для технологического аудита и контроля геометрических размеров топологических элементов оптических шкал и сеток. Проанализированы факторы, влияющие на величину полезного сигнала и экспериментально показано преимущества LED-экрана как осветителя перед галогенной лампой в разработанной измерительной системе. Проведенные эксперименты позволили определить оптимальные условия измерений.

Ключевые слова: оптическая система, геометрический размер, микроскоп, мера, шкалы и сетки, LED-экран.

Гордієнко Валентин Іванович, *доктор технічних наук, головний конструктор, заступник генерального директора, НВК «Фотоприлад», Черкаси, Україна,* ***e-mail: sokol@photopribor.ck.ua****.*

Качур Наталія Володимирівна, *молодший науковий співробітник, відділ фізико-технологічних основ сенсорного матеріалознавства, Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України, Київ, Україна,* ***e-mail: natalykachur@gmail.com****.*

Маркіна Ольга Миколаївна, *старший викладач, кафедра наукових, аналітичних та екологічних приладів і систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна,* ***e-mail: o.n.markina@gmail.com****.*

Маслов Володимир Петрович, *доктор технічних наук, доцент, старший науковий співробітник, завідувач відділу фізико-технологічних основ сенсорного матеріалознавства, Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України, Київ, Україна,* ***e-mail: vladmaslov@mail.ru****.*

Гордиенко Валентин Иванович, *доктор технических наук, главный конструктор, заместитель генерального директора, НПК «Фотоприбор», Черкассы, Украина.*

Качур Наталия Владимировна, *младший научный сотрудник, отдел физико-технологических основ сенсорного материаловедения, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАН Украины, Киев, Украина.*

Маркина Ольга Николаевна, *старший преподаватель, кафедра научных, аналитических и экологических приборов и систем, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина.*

Маслов Владимир Петрович, *доктор технических наук, доцент, старший научный сотрудник, заведующий отделом физико-технологических основ сенсорного материаловедения, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАН Украины, Киев, Украина.*

Gordienko Valentin, *RPC «Photoprylad», Cherkasy, Ukraine,* ***e-mail: sokol@photopribor.ck.ua****.*

Kachur Nataliya, *V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine,* ***e-mail: natalykachur@gmail.com****.*

Markina Olga, *National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine,* ***e-mail: o.n.markina@gmail.com****.*

Maslov Volodymyr, *V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine,* ***e-mail: vladmaslov@mail.ru***