

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ДІЙСНИХ ВЕЛИЧИН ЗБІЛЬШЕННЯ (МАСШТАБУ) ЦИФРОВИХ РЕМ-ЗОБРАЖЕНЬ, ОТРИМАНИХ НА РЕМ JCM-5000 (NEOSCOPE) ФІРМИ JEOL

© Іванчук О., 2012

С помощью измерений цифровых РЭМ-изображений специального тест-объекта с разрешением $r=1425$ лин/мм, полученных на РЭМ JCM-5000 (NeoScope), определены их истинные увеличения (масштаб) вдоль осей x и y РЭМ-снимков в диапазоне увеличений РЭМ от $1000x$ до $40000x$ (крат). Установлено, что масштабные искажения цифровых РЭМ-изображений, полученных на этом типе РЭМ, не превышают $\pm 1\%$ независимо от величины увеличения и осей снимка.

Using measurements of digital SEM image of a special test object with a resolution of $r = 1425$ lin/mm, obtained by SEM JCM-5000 (NeoScope), determined their actual increase (scale) along the axes x and y -SEM images in the range SEM increases from 1000^x to 40000^x . Found that large-scale distortion of digital SEM images obtained on this type of SEM does not exceed $\pm 1\%$, regardless of size increase and make the picture.

Постановка проблеми. В останні роки у наукових лабораторіях України появились сучасні растрові електронні мікроскопи (РЕМ), зокрема і відомої на світовому ринку РЕМ фірми JEOL (Японія). Наукові дослідження мікроповерхонь різноманітних дослідних об'єктів у високотехнологічних галузях виробництва (машинобудування, нанотехнології, мікроелектроніка тощо) потребують отримання кількісних параметрів цих поверхонь з високою точністю на мікронному і субмікронному рівнях. Тому важливою є проблема досліджень величин і характеру масштабних і геометричних спотворень, притаманних цифровим РЕМ-зображенням. Досліджень метричних характеристик цифрових РЕМ-зображень, отриманих на сучасному РЕМ JCM-5000 (NeoScope) фірми JEOL (Японія) в Україні ще не було. Отже, автор поставив перед собою завдання вирішити цю проблему і дати відповідні рекомендації дослідникам, які використовують цей мікроскоп.

Зв'язок із важливими науковими і практичними завданнями. Кафедра фотограмметрії та геоінформатики Інституту геодезії Національного університету “Львівська політехніка”, де автор працює, має значні наукові досягнення з розробки теорії та практики застосування сучасних цифрових методів стереофотограмметрії, зокрема і в дослідженнях об'єктів за допомогою растрових електронних мікроскопів. Одним із важливих напрямів наукової тематики кафедри є і розробка теорії та практики цифрової РЕМ-фотограмметрії.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, присвячених розв'язанню цієї проблеми. Технологія отримання кількісних параметрів мікроповерхонь будь-яких дослідних об'єктів за вимірами їх стереозображень, отриманих на РЕМ, передбачає обов'язкове дослідження метричних характеристик цих знімків. А саме – встановлення величин та характеру їх масштабних і геометричних спотворень, а також методів їх подальшого врахування. Найпростішими і водночас найефективнішими з них є методи апроксимації геометричних спотворень поліномами, зокрема поліномом загального виду третього ступеня [9].

Розв'язанням такого роду задач займалися і займаються науковці як за кордоном, так і в Україні. Зокрема, A. Boyde, R. Burkhardt, S.K. Ghosh, P. Howell, D.F. Maune, S. Murray, H. Nagaraja,

H.F.Ross [1, 2, 3, 4, 5], в Росії – Є.І. Калантаров, М.Ж. Сагиндикова, В.М. Соколов, М.П. Шебатінов [8, 9], в Україні – В.М. Мельник, В.Я. Фінковський, А.В. Шостак [9, 10, 11, 12] та інші.

Невирішені частини загальної проблеми. Такого роду сучасні растрові електронні мікроскопи з цифровим записом, як РЕМ JCM-5000 (NeoScope) фірми JEOL (Японія) ще ніколи до цього часу в Україні метрично не досліджувались. Передбачається подальше поширення такого типу мікроскопів в Україні, тому важливо знати метричні характеристики РЕМ-зображень, отриманих на них. Від цього, значною мірою, залежить точність встановлення кількісних характеристик дослідних мікроповерхонь у багатьох сучасних високотехнологічних галузях науки і виробництва, а отже, надійність і ефективність створених деталей, вузлів, механізмів, плат тощо.

Постановка завдання. Отримати цифрові РЕМ-зображення еталонного тест-об'єкта з роздільною здатністю $r=1425$ лін/мм на РЕМ JCM-5000 (NeoScope) в діапазоні збільшень від 1000^x до 40000^x (крат). Встановити характер та величини масштабних і геометричних спотворень цих зображень за їх вимірами на цифровій фотограмметричній станції (ЦФС) з використанням пакета програм "Dimicros" [6].

Виклад основного матеріалу та результати досліджень

1. Основні технічні характеристики РЕМ JCM-5000 (NeoScope)

JCM-5000 – сучасний настільний растровий електронний мікроскоп, який дуже поширений у наукових лабораторіях та на виробництві в багатьох країнах світу, а тепер і в Україні. РЕМ має високу роздільну здатність, велику глибину фокусування, простий в користуванні, має невеликі габарити, вагу і порівняно невисоку вартість. Основні характеристики приладу наведені у табл. 1.

Характеристики приладу

 <p>Рис. 1. РЕМ JCM-5000 (NeoScope)</p>	Режими роботи	високовакуумний режим, низьковакуумний режим
	Прискорююча напруга	5, 10 або 15 кВ
	Діапазон збільшень	від 10^x до $40\,000^x$ (крат)
	Максимальний розмір зразка	діаметр – до 70 мм, висота – до 50 мм
	Катод	W (вольфрам), касетного типу
	Система відкачування повітря	турбомолекулярний насос + ротаційний насос
	Програмне забезпечення	для MS Windows Vista
	Формат запису файлів	TIFF або JPEG
	Вага приладу	близько 85 кг
	Розміри	492 мм х 458 мм х 434 мм
	Енергоспоживання	не більше 1,1 кВА

2. Коротка характеристика тест-об'єкта

Для встановлення дійсних значень збільшень РЕМ-зображень був використаний тест-об'єкт, який являє собою так звану "голографічну ґратку" – рівномірно розміщеного на скляній пластині шару "напівпровідник-метал" у вигляді кулеподібних напівсфер (рис. 2). Технологія отримання матеріалу "напівпровідник-метал" була вперше запропонована у Київському інституті напівпровідників НАНУ в лабораторії проф. М.Т. Костишина і канд. техн. наук П.Ф. Романенка і використовувалась для записування голограм просторових об'єктів [7]. Було запропоновано ідею створення цього тест-об'єкта на цьому технологічному матеріалі, оскільки він дає змогу записувати зображення з високою роздільною здатністю – до 5000 елементів на мм. Так і було отримано цей тест-об'єкт під дією пучків лазерного випромінювання у вигляді регулярної матриці – сплаву срібла з напівпровідником – арсеном сірки ($Ag-As_2S$) з різними роздільними здатностями, зокрема, 1370

лін/мм, 1425 лін/мм, 3530 лін/мм. Один з цих голографічних тест-об'єктів з розділенням 1425 лін/мм і був використаний для експерименту (див. рис. 2).

3. РЕМ-знімання

На РЕМ JCM-5000 (NeoScore) було отримано 12 знімків тест-об'єкта у цифровому форматі JPEG з фіксованими значеннями збільшень, встановлених на шкалі приладу: 1000^{\times} , 2000^{\times} , 5000^{\times} , 8000^{\times} , 10000^{\times} , 15000^{\times} , 20000^{\times} , 24000^{\times} , 27000^{\times} , 30000^{\times} , 34000^{\times} , 40000^{\times} . Розміри РЕМ-зображень 117,76 мм x 99,36 мм (1280 x 1080 пікселів). Розмір піксела – 0,092 мм.

4. Вимірювання РЕМ-зображень тест-об'єкта

Вимірювання РЕМ-зображень тест-об'єкта виконувалось на цифровій фотограмметричній станції (ЦФС) в програмному середовищі “Dimicros” за програмою “Test-Measuring”. Вимірювання величин дійсних збільшень РЕМ-зображень тест-об'єкта виконувались тричі вздовж осей x і y знімка за схемою, наведеною у роботах [6]. Так були отримані середні значення збільшень і їх відхилення від встановлених на шкалі РЕМ. Результати експерименту наведені в табл. 1, 2.

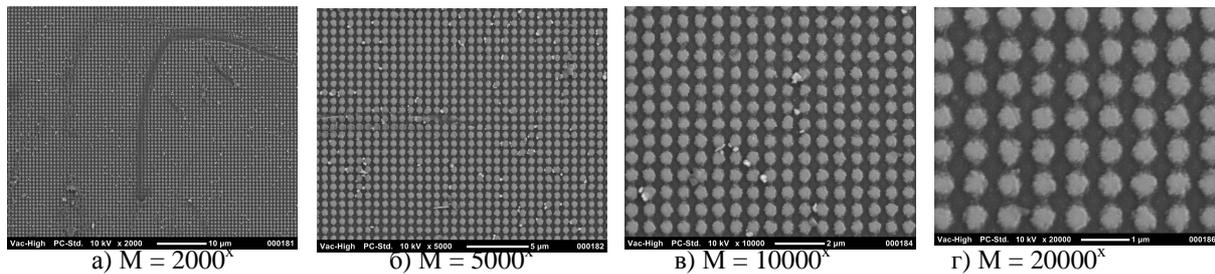


Рис. 2. Цифрові РЕМ-знімки тест-об'єкта з роздільною здатністю $r = 1425$ лін/мм за різних збільшень M

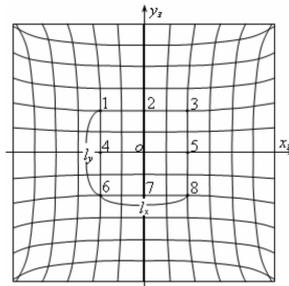


Рис. 3. Схема розташування точок під час калібрування збільшень РЕМ-зображень

Таблиця 1

Виміряні збільшення вздовж осі x РЕМ-знімка та їх відхилення від встановлених на шкалі РЕМ

№ з/п	$M_{x \text{ РЕМ}}$	M_{x1}	M_{x2}	M_{x3}	$M_{x \text{ ср}}$	$\Delta M_{x \text{ ср}}, \%$	$\Delta M_{x \text{ min}}, \%$	$\Delta M_{x \text{ max}}, \%$
1	1000^{\times}	1007,88	1005,16	1002,44	1005,16	+0,52	+0,24	+0,79
2	2000^{\times}	1994,02	1994,02	1999,45	1995,83	-0,21	-0,03	-0,30
3	5000^{\times}	4966,03	4989,94	4966,03	4974,00	-0,52	-0,20	-0,68
4	8000^{\times}	7921,74	7954,34	7954,34	7943,47	-0,71	-0,57	-0,98
5	10000^{\times}	10019,00	10019,00	9953,80	9997,27	-0,03	+0,19	-0,46
6	15000^{\times}	14908,96	14952,43	14887,23	14916,21	-0,56	-0,32	-0,75
7	20000^{\times}	19885,86	19842,39	19820,66	19849,64	-0,75	-0,57	-0,90
8	24000^{\times}	23863,03	23906,50	23841,30	23870,28	-0,54	-0,40	-0,66
9	27000^{\times}	26949,14	26818,74	26949,14	26905,67	-0,35	-0,19	-0,67
10	30000^{\times}	29904,85	29861,39	29883,12	29883,12	-0,39	-0,32	-0,46

11	34000 ^x	34142,82	34012,43	34142,82	34099,36	+0,29	+0,04	+0,42
12	40000 ^x	39902,12	40075,98	39989,05	39989,05	-0,03	-0,03	-0,25
Середнє відхилення середніх значень $\Delta M_{x\text{cp}}$ від M_{PEM} , %						0,41	0,26	0,61

Таблиця 2

**Виміряні збільшення вздовж осі у РЕМ-знімка
та їх відхилення від встановлених на шкалі РЕМ**

№ з/п	$M_{y\text{PEM}}$	M_{y1}	M_{y2}	M_{y3}	$M_{y\text{cp}}$	$\Delta M_{y\text{cp}}$, %	$\Delta M_{y\text{min}}$, %	$\Delta M_{y\text{max}}$, %
1	1000 ^x	1007,88	1005,16	1007,88	1006,97	+0,70	+0,52	+0,79
2	2000 ^x	2004,89	2010,32	2004,89	2006,70	+0,34	+0,24	+0,52
3	5000 ^x	5020,36	5022,77	5020,36	5021,16	+0,42	+0,41	+0,46
4	8000 ^x	7997,81	7997,81	7997,81	7997,81	-0,03	-0,03	-0,03
5	10000 ^x	10062,46	10062,46	10040,73	10055,22	+0,55	+0,41	+0,62
6	15000 ^x	14974,16	15061,09	14974,16	15003,14	+0,02	+0,12	-0,41
7	20000 ^x	19907,59	19885,86	19907,59	19900,35	-0,50	-0,46	-0,57
8	24000 ^x	23754,37	23841,30	23797,83	23797,83	-0,84	-0,66	-1,02
9	27000 ^x	26797,01	26970,88	26905,68	26891,19	-0,40	-0,11	-0,75
10	30000 ^x	29904,85	29839,66	29839,66	29861,39	-0,46	-0,32	-0,54
11	34000 ^x	34099,36	33903,76	34034,16	34012,43	+0,04	+0,10	+0,29
12	40000 ^x	39945,58	39858,65	39858,65	39887,67	-0,28	-0,14	-0,35
Середнє відхилення середніх значень $\Delta M_{y\text{cp}}$ від M_{PEM} , %						0,38	0,29	0,53

Висновки

1. Дійсні величини збільшень (масштабу) РЕМ зображень, отриманих на РЕМ JCM-5000 (NeoScore), відхиляються від встановлених на шкалі РЕМ не більше ніж на $\pm 1\%$ вздовж обох осей знімка, тобто в межах точності їх визначення за тест-об'єктом в усьому робочому діапазоні збільшень мікроскопа від 1000^x до 40000^x (крат).

2. РЕМ JCM-5000 (NeoScore) можна вважати надійним в метричному відношенні приладом, який не потребує постійного калібрування збільшень перед РЕМ-зніманням дослідних зразків.

3. Масштабні спотворення РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ JCM-5000 (NeoScore) не перевищують $\pm 1\%$ від встановлених на шкалі РЕМ, незалежно від величини збільшення та осей знімка.

1. Boyde A., Ross H.F. *Photogrammetry and Scanning electron microscopy* // *Photogrammetric Record*. – 1975. – Vol.8. – №46. – P.408–457. 2. Burkhardt R. *Untersuchungen zur kalibrirung eines Elektronen mikroskopes* // *Mitt. geod. Inst. Techn. Univ. Graz*. – 1980. – № 35. 3. Ghosh S. K. *Photogrammetric calibration of a scanning electron microscope* // *Photogrammetria*. – 1975. – V.31. – №31. – P.91–114. 4. Ghosh S. K., Nagaraja H. *Scanning Electron Micrography and Phtogrammetry* // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. – 1976. – Vol.42. – № 5. – P.649–657. 5. Howell P. *A practical method for the correction of distortions in SEM photogrammetry* // *Proc. Of the Annual Scanning Electron Microscope Symposium. Chicago, Illinois*. – 1975. – P.199–206. 6. Іванчук О., Хрунін І. *Структура та функції програмного комплексу “Dimicros” для опрацювання РЕМ-зображень на цифровій фотограмметричній станції* // *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. – Львів, 2008. Вип. I(23). – С.193–197. 7. Костышин М.Т., Мустафин К.С. *Квантовая электроника*. – 1982. – Вып.23. – С.29–33. 8. Калантаров Е.И., Сагындыкова М.Ж. *Фотограмметрическая калибровка электронных микроскопов* // *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*. – 1983. – №4. – С.76–80. 9. Мельник В.Н., Соколов В.Н., Иванчук О.М., Тумская О.В., Шебатинов М.П. *Калибровка геометрических искажений РЭМ-снимков* // *Рук. деп. в ВИНТИ*. – 1984. – №528. – С. 18. 10. Мельник В.М. *Растрово-електронна стереомікрофракторафія: Монографія* / Мельник В.М.,

Шостак А.В. – Луцьк: Вежа, 2009. – 469 с. 11. Финковский В.Я., Мельник В.Н., Иванчук О.М. К теории фотограмметрической обработки РЭМ-снимков // Геодезия и картография. – 1984. – №2. – С.29–33. 12. Шостак А.В. Методи і моделі мікрофотограмметрії у прикладних наукових дослідженнях: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – К., 2012. – 28 с.