

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СКАНИРУЮЩЕГО ОПТИЧЕСКОГО МИКРОСКОПА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В настоящее время получение трехмерных изображений в разных отраслях промышленности, например, при изготовлении микро-электро-механических систем, печатных плат и микросхем, анализе поверхностей различных материалов является актуальной технической задачей. В работе рассматривается новый теневой метод для получения изображений профиля поверхностей. Представлена геометрическая модель для определения высоты профиля поверхности и ширины перехода светлого-темного поля по методу теневой проекции профиля. Выполнен анализ теоретически рассчитанных и экспериментально полученных результатов измерений.

Ключевые слова: оптический микроскоп, теневой метод, профиль поверхности, математическая модель.

A. FESENKO, V. BOROVYTSKY

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

MATHEMATICAL APPARATUS FOR SCANNING OPTICAL MICROSCOPE TO OBTAINING 3D IMAGES

Nowadays obtaining 3D images of different surfaces are recently used in wide field of industries – micro-electro-mechanical systems, printed circuit boards and chips, analyzing surfaces of various materials and other. The paper presents the new shadow-sectioning method for imaging the surface profile. Proposed geometric model to determine the height and width of the surface profile of the light-dark region of the field in the shadow-sectioning method. The analysis of the theoretically calculated and experimental results.

Key words: optical microscope, 3D image, shadow method, mathematical model.

Введение

Нынешние темпы развития технологий имеют выраженный тренд к миниатюризации, что привело к появлению микро-электро-механических систем, расширению применения микро-оптических компонентов, создания электронных микрокомпонентов, покрытий и т.д., изготавливаемых литографией, травлением, спеканием и другими технологическими процессами. Такого рода элементы с размерами от долей микрона до сотен микрон и возникает необходимость контролировать процесс их изготовления с помощью оптической микроскопии. Однако традиционная оптическая микроскопия была ориентирована на оценку геометрических параметров (координат, размеров) объектов в двумерной системе координат – в плоскости, перпендикулярной оптической оси микроскопа. В настоящее время все актуальнее становится интерес к трехмерным изображениям в оптической микроскопии.

Существующие современные методы формирования трехмерных изображений [1], такие как интерференционный, голографический, конфокальный и др. наряду со своими преимуществами обладают недостатками:

- высокая цена оборудования (интерференционные микроскопы - от 10 000 \$, лазерные конфокальные сканирующие микроскопы - от 60 000 \$, конфокальные микроскопы – от 10 000 \$);
- чувствительность к внешним воздействиям – вибрациям, нагреву и т.п.;
- сложность управления, сложность и ограничения цифровой обработки изображений и др.

В работе [2] был предложен теневой метод измерения трехмерного профиля поверхности, который может быть реализован простой и экономичной конструкцией в виде модуля. Этот модуль можно использовать на обычном оптическом микроскопе (ОМ).

Для проектирования такого модуля необходимо произвести расчеты осевых расстояний, реальных размеров источника излучения и границы перехода между светлым и темным полями. В работе рассматривается геометрическая модель, которая описывает нахождение высоты профиля поверхности и переход между светлым и темным полем.

Рассмотрим измерение высоты профиля поверхности (рис. 1). Как видно из рисунка, проекция высоты профиля поверхности, находящейся под углом к оси микроскопа, в предметную плоскость ОМ, находится по формуле 1.

$$y_h = \frac{h}{\cos(\alpha_2)} \quad (1),$$

Для того, чтобы определить разность высоты профиля, на образец проецируется тень лезвия. Таким образом, на объекте формируется светлое и темное поле. Граница полей будет проходить по поверхности образца. Разница высоты разных зон профиля, для разных его зон, будет определяться исходя из измеренного расстояния между его зонами, другими словами, по искривлению границы полей в плоскости изображения микроскопа. Для реализации данного метода полагаем, что выполняется условие $\alpha_1 = \alpha_2 = 45^\circ$.

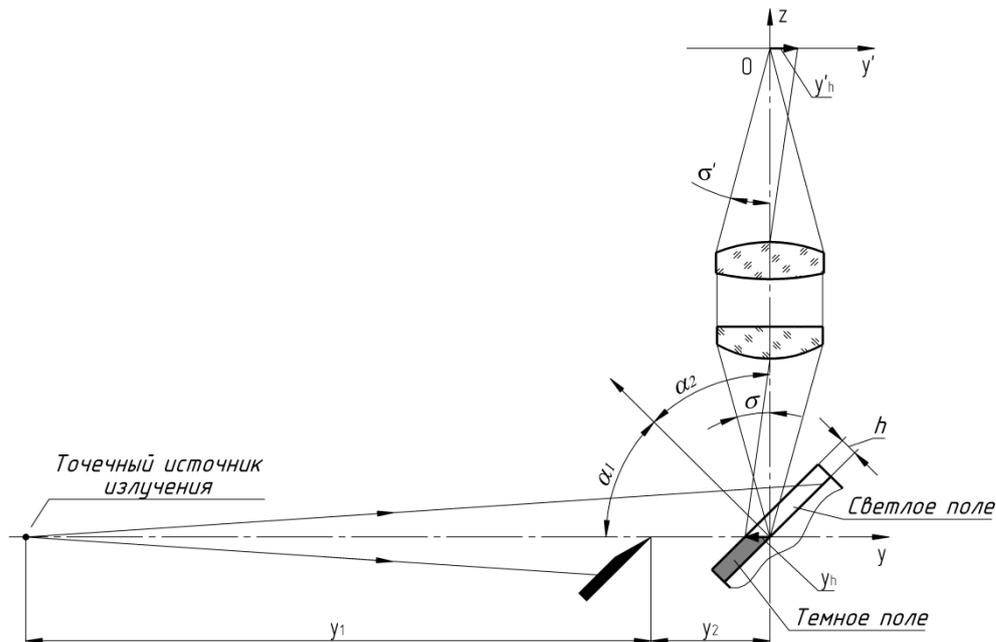


Рис. 1. Теневого метод получения профиля поверхности

Определим высоту профиля поверхности в плоскости изображения микроскопа:

$$y'_h = \beta \cdot y_h = \frac{\beta \cdot h}{\cos(\alpha_2)} \quad (2),$$

В современных ОМ используют цифровые камеры на основе ПЗС-матриц, размер фоточувствительных элементов (ФЧЭ) которых варьируется от 1 до 10 мкм. Таким образом, стоит задача определения количества ФЧЭ, приходящихся на высоту профиля.

$$N_{\pi} = \frac{y'_h}{Y_p} = \frac{\beta \cdot h}{Y_p \cdot \cos(\alpha_2)} \quad (3),$$

где Y_p – период фоточувствительных элементов вдоль оси y' .

Также из формулы 3 можно определить теоретическую минимально различимую высоту профиля поверхности, равную одному ФЧЭ:

$$h_{min} = \frac{Y_p \cdot \cos(\alpha_2)}{\beta} \quad (4)$$

Данное значение не учитывает погрешностей, возникающих при оценке ширины перехода между светлым и темным полями, т.к. источник излучения считается точечным.

Следовательно, становится актуальным расчет ширины перехода и количество ФЧЭ, приходящиеся на этот переход (рис. 2). Рассчитаем величину проекции на плоскость предметов микроскопа перепада освещенности на поверхности образца, т.е. Δy_h и Δy_0 (рис. 2а, 2б).

Как видно из рис. 2б, для нахождения данных значений можно воспользоваться геометрическими соотношениями для треугольников, для чего введем обозначения:

$$|KO| = h, \quad |BO| = y_h, \quad |AO| = y_2, \quad |C'D'| = \Delta y_h, \quad |L'M'| = \Delta y_0.$$

Необходимо найти $|C'D'|$ и $|L'M'|$ – проекции перехода светлого и темного поля на плоскость предметов микроскопа на разных высотах.

$$\xi = \arctg\left(\frac{d_{ср}}{2 \cdot y_1}\right) \quad (5),$$

Для нахождения крайних точек данных отрезков, запишем уравнения прямых, содержащих отрезки: AL, AM, CD и LM (рис. 3):

$$z_{AM}(y) = \operatorname{tg} \xi \cdot (y + y_2);$$

$$z_{AL}(y) = -\operatorname{tg} \xi \cdot (y + y_2);$$

$$z_{LM}(y) = \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \cdot y = \operatorname{ctg}(\alpha) \cdot y;$$

$$z_{CD}(y) = \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \cdot \left(y + \frac{h}{\cos \alpha}\right) = \operatorname{ctg}(\alpha) \cdot \left(y + \frac{h}{\cos \alpha}\right).$$

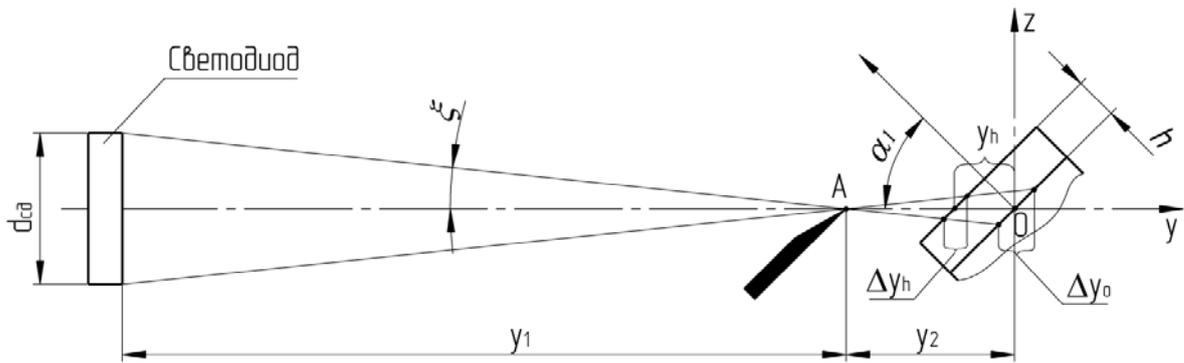


Рис. 2. Основные геометрические соотношения в теновом методе

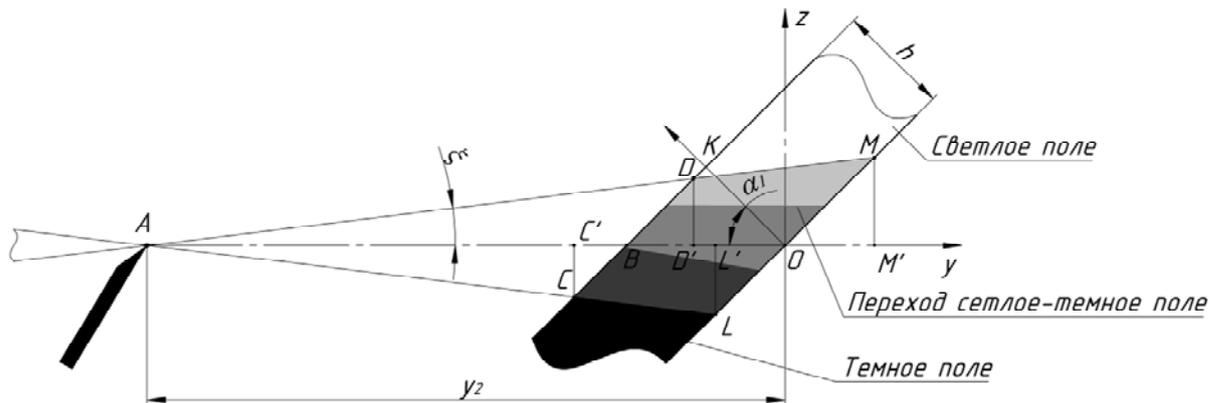


Рис. 3. Схема хода лучей для определения ширины перехода между светлым и темным полями

Находим координаты Y точек C' , D' , L' и M' , являющиеся проекциями точек C , D , L и M на ось y , через уравнения прямых AM и CD по формулам (6) – (12).

$$tg\xi \cdot (y'_D + y_2) = tg\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \cdot \left(y'_D + \frac{h}{\cos\alpha}\right) \quad (6)$$

$$y'_D = \frac{\sin\xi \cdot \sin\alpha \cdot y_2 - \cos\xi \cdot h}{\cos(\alpha + \xi)} \quad (7)$$

$$-tg\xi \cdot (y'_C + y_2) = tg\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \cdot \left(y'_C + \frac{h}{\cos\alpha}\right) \quad (8)$$

$$y'_C = -\frac{\sin\xi \cdot \sin\alpha \cdot y_2 + \cos\xi \cdot h}{\cos(\alpha - \xi)} \quad (9)$$

$$tg\xi \cdot (y'_M + y_2) = tg\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \cdot y'_M \quad (10)$$

$$y'_M = \frac{\sin\xi \cdot \sin\alpha \cdot y_2}{\cos(\alpha + \xi)} \quad (11)$$

$$-tg\xi \cdot (y'_L + y_2) = tg\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \cdot y'_L \quad (12)$$

$$y'_L = -\frac{\sin\xi \cdot \sin\alpha \cdot y_2}{\cos(\alpha - \xi)} \quad (13)$$

Подставляя определенные координаты точек (7, 9, 11, 13) в уравнения для нахождения длины прямых Δy_h и Δy_0 (14) и (15):

$$\begin{aligned} \Delta y_h = |C'D'| &= |y'_C - y'_D| = \left| -\frac{\sin\xi \cdot \sin\alpha \cdot y_2 + \cos\xi \cdot h}{\cos(\alpha - \xi)} - \frac{\sin\xi \cdot \sin\alpha \cdot y_2 - \cos\xi \cdot h}{\cos(\alpha + \xi)} \right| =; \\ &= \left| \frac{h \cdot \sin(2\xi) \cdot \sin\alpha - \frac{y_2^2}{2} \sin(2\xi) \cdot \sin(2\alpha)}{\cos^2(\alpha) + \cos^2(\xi) - 1} \right| \quad (14) \end{aligned}$$

$$\Delta y_0 = |L'M'| = |y'_L - y'_M| = \left| -\frac{\sin\xi \cdot \sin\alpha \cdot y_2}{\cos(\alpha - \xi)} - \frac{\sin\xi \cdot \sin\alpha \cdot y_2}{\cos(\alpha + \xi)} \right| = \quad (15)$$

$$= \left| \frac{\frac{1}{2} \gamma_2 \cdot \sin(2\xi) \cdot \sin(2\alpha)}{\sin^2(\alpha) + \sin^2(\xi) - 1} \right|$$

Для расчета соответствующего ширине перехода количества ФЧЭ в изображении воспользуемся выражениями (12) и (13):

$$\Delta N_h = \frac{\beta \cdot \Delta y_h}{Y_p}, \tag{16}$$

$$\Delta N_0 = \frac{\beta \cdot \Delta y_0}{Y_p} \tag{17}$$

Подставив выведенные значения из формул 10 и 11 в 12 и 13, получим:

$$\Delta N_h = \frac{\beta \cdot \left| \frac{h \cdot \sin(2\xi) \cdot \sin \alpha - \frac{Y_2}{2} \cdot \sin(2\xi) \cdot \sin(2\alpha)}{\cos^2(\alpha) + \cos^2(\xi) - 1} \right|}{Y_p} \tag{18}$$

$$\Delta N_0 = \frac{\beta \cdot \left| \frac{\frac{1}{2} \gamma_2 \cdot \sin(2\xi) \cdot \sin(2\alpha)}{\sin^2(\alpha) + \sin^2(\xi) - 1} \right|}{Y_p} \tag{19}$$

Таким образом, выражения (18) и (19) позволяют рассчитать количество ФЧЭ приходящихся на ширину перехода между светлым и темным полями.

По приведенным формулам можно построить графики (рис. 4) зависимостей от выходных данных, таких как: 1) размера светодиода, 2) расстояния от светодиода до лезвия, 3) расстояния от лезвия до образца.

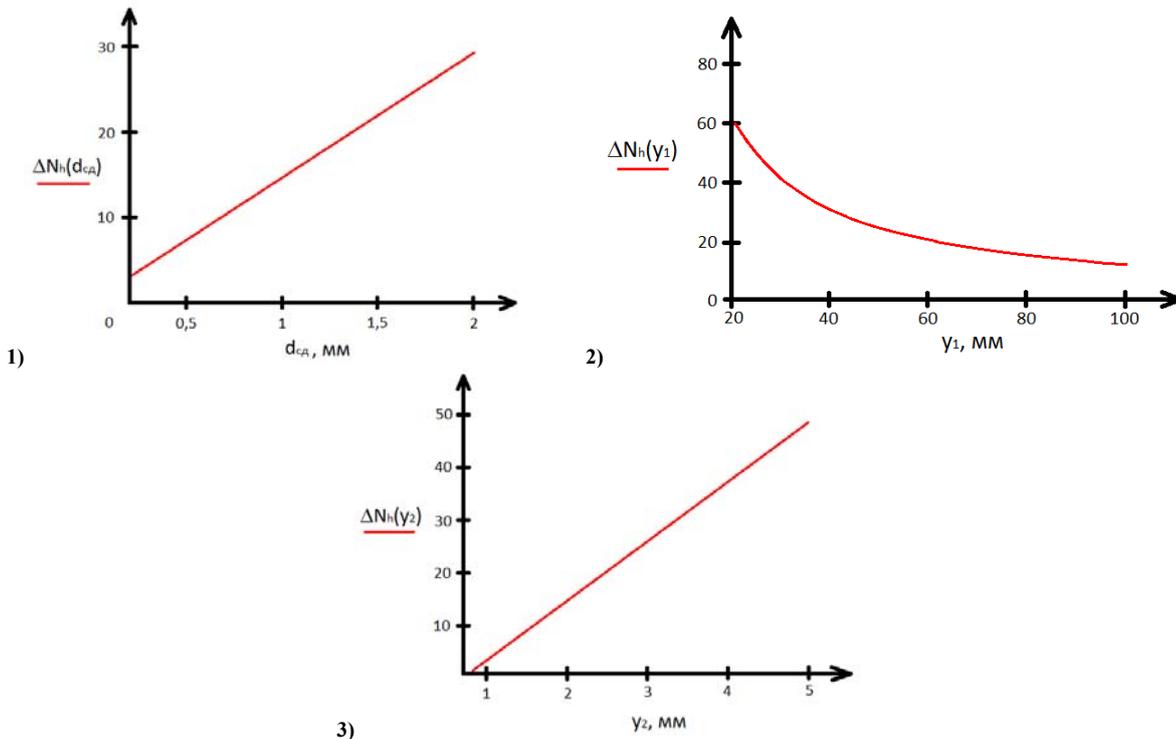


Рис. 4. Графики зависимостей количества ФЧЭ, приходящихся на переход между светлым и темным полями к: а) размера светодиода; б) расстояния от светодиода до лезвия; в) расстояния от лезвия до образца.

Таблица 1

Параметры модуля для оптического микроскопа

Расстояние от светодиода до ножа Фуко	y_1	110 мм
Расстояние от ножа Фуко до исследуемого образца	y_2	1,5 мм
Размер излучающей площадки светодиода	d_{cv}	1,5 мм
Угол падения излучения на исследуемый объект	S_1	45°
Длина волны излучения	λ	0,53 мкм
Габариты		220x65x55 мм
Питание		5 В

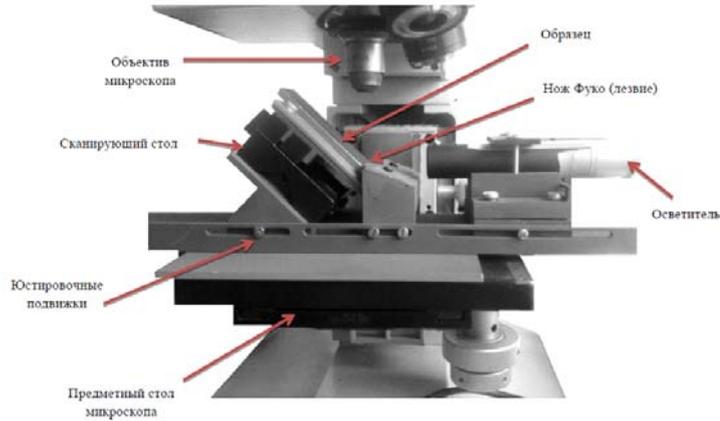


Рис. 5. Фотография модуля для получения трехмерного профиля поверхности теньвым методом

Модуль для получения трехмерного профиля поверхности теньвым методом и изображения, полученные на нем, показаны на рис. 5 и 6. Также на рис. 6 приведены графики, показывающие ширину перехода светлого-темного поля, соответствующие зоне, обозначенной белой линией на изображении объекта.

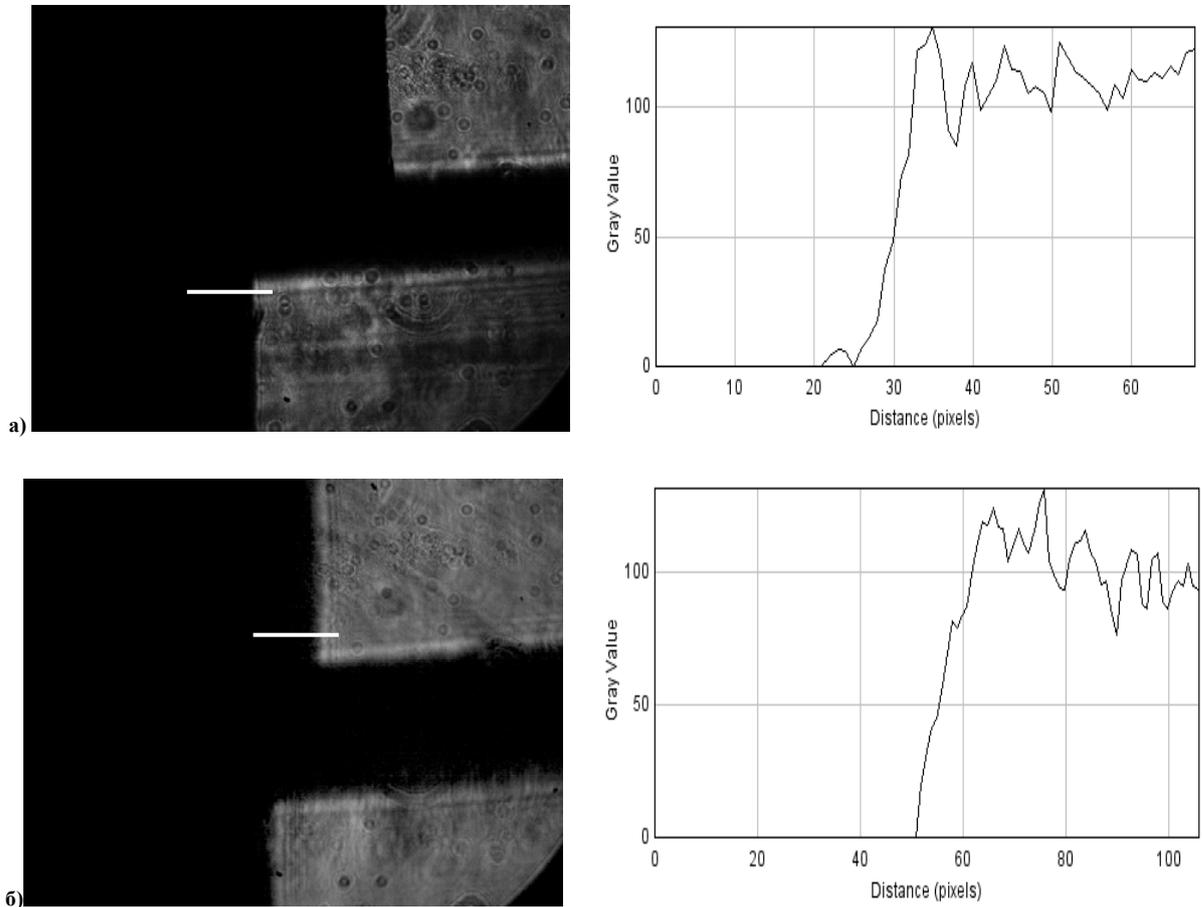


Рис. 6. Пример полученных изображений концевых мер длины с перепадом высот: а) 0,5 мм; б) 0,1 мм; в) 0,02 мм (слева) и графики реальной ширины перехода темного-светлого поля

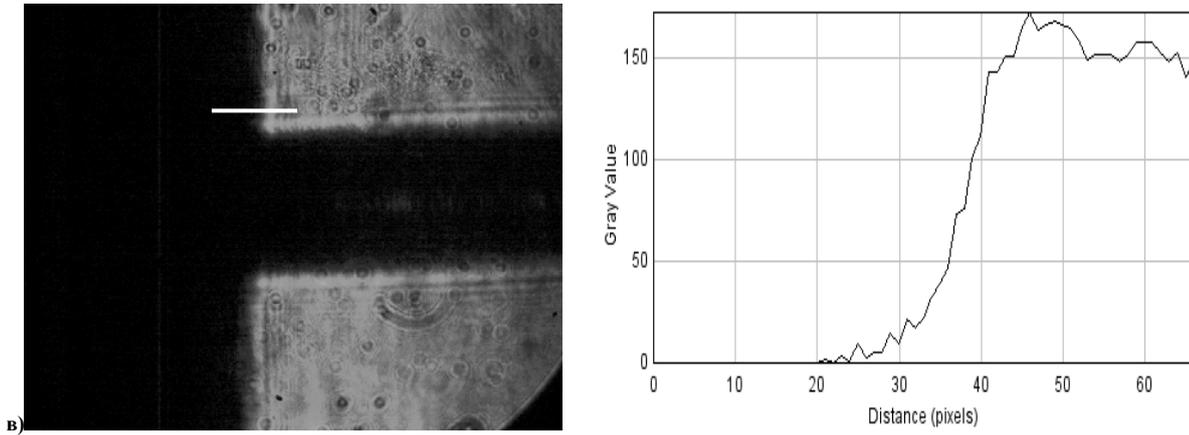


Рис. 6. Пример полученных изображений концевых мер длины с перепадом высот: а) 0,5 мм; б) 0,1 мм; в) 0,02 мм (слева) и графики реальной ширины перехода темно-светлого поля (продолжения)

В табл. 2 приведены расчетные и измеренные количества ФЧЭ, приходящиеся на переход светлого и темного полей, при разных расстояниях от источника до лезвия и фиксированном расстоянии от лезвия до образца.

Таблица 2

Расчетные и экспериментально измеренные величины ширины перехода светлого-темного поля

y_1 , мм	Расчетное кол-во ФЧЭ	Экспериментальное кол-во ФЧЭ	Абсолютное отклонение	Относительное отклонение, %
110	7 (6,931)	7	0	0%
120	6 (6,353)	6	0	0%
130	6 (5,856)	6	0	0%
140	5 (5,446)	6	1	16%
150	5 (5,083)	6	1	16%

Как видно из табл. 2. расчетные данные сходятся с экспериментальной частью с минимально возможной погрешностью равной величине дискретизации цифрового изображения в 1 пиксел. Это подтверждает достоверность предложенной математической модели.

Выводы

В работе представлен математический аппарат, который позволяет рассчитать высоту профиля поверхности и ширину перехода светлого-темного поля по методу теневой проекции профиля в цифровом ОМ. Экспериментальные исследования подтвердили достоверность теоретических исследований.

Литература

1. Фесенко А.В. Современное состояние оптической микроскопии для получения трехмерных изображений / А.В. Фесенко, В.Н. Боровицкий // Измерительная и вычислительная техника в технологических процессах. – 2015.– №1.– с. 62-72.
2. Фесенко А.В. Новый теневой метод получения профиля поверхности в оптической микроскопии / А.В. Фесенко, В.Н. Боровицкий // Измерительная и вычислительная техника в технологических процессах. – 2015.– №2.– с. 222-226.
3. G. Holst. CCD arrays, cameras and displays / SPIE Press.– JCD Publishing.– 1998.– pp. 378.

References

1. Fesenko A.V. Sovremennoe sostojanie opticheskoj mikroskopii dlja poluchenija trehmernyh izobrazenij. / Fesenko A.V., Borovytsky V.N // Izmeritel'naja i vychislitel'naja tehnika v tehnologicheskix processah. – 2015. – №1. – pp. 62-72.
2. Fesenko A.V. Novyj tenevoj metod poluchenija profila poverhnosti v opticheskoj mikroskopii. / Fesenko A.V., Borovytsky V.N // Izmeritel'naja i vychislitel'naja tehnika v tehnologicheskix processah. – 2015. – №2. – pp. 222-226.
3. G. Holst. CCD arrays, cameras and displays / SPIE Press.– JCD Publishing.– 1998.– pp. 378

Рецензія/Peer review : 11.11.2015 р. Надрукована/Printed : 12.12.2015 р.