

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Данная статья представляет собой обзор методов получения трехмерных изображений с помощью оптических микроскопов ввиду их большого количества. Рассматриваются методы теневого сечения профиля, методы с пространственной модуляцией освещения, конфокальные и интерференционные. Предлагается ввести классификацию методов. Рассматриваются принципы работы и схемы построения приборов. Ввиду преимуществ конфокальных и интерференционных методов их основным недостатком является стоимость оборудования, что в свою очередь наталкивает на модернизацию уже существующих микроскопов в микроскопы для получения трехмерных изображений путем незначительных доработок или дополнительным портативным модулем.

Ключевые слова: оптический микроскоп, трехмерное изображение, сканирование.

A. FESENKO, V. BOROVYTSKY

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

SURVEY OF MODERN OPTICAL MICROSCOPY FOR 3D IMAGE OBTAINING

This article provides an overview of methods for obtaining three-dimensional images with an optical microscope because of their large number. The methods of shadow-sectional profile, methods with light spatial modulation, confocal and interferometric methods are considered in this article. It is proposed a classification of 3D methods. Principles and schemes of microscopes are discussed. In spite of the advantages of confocal and interferometric methods their main disadvantage is the cost of the equipment, which in turn suggests to the modernization of existing microscopes to obtain three-dimensional images by small modifications or add-on module.

Key words: optical microscope, 3D image, scanning.

Введение

В современных оптических микроскопах (ОМ) применяется как визуальное наблюдение за объектом, так и его регистрация с последующим сохранением в цифровом виде. Преимущества регистрации цифровых изображений:

- удобство хранения;
- скорость записи, просмотра и копирования;
- возможность цифровой обработки;
- цифровое управление;
- преднастройки и др.

Цифровым изображением называют дискретизированный по амплитуде и по пространственным координатам сигнал [1]. Цифровое изображение может быть как двумерным, так и трехмерным. Обычно изображение представляется как массив целых чисел. Трехмерное изображение – как трехмерный массив целых чисел. Основным интерес получения трехмерных изображений состоит в том, что оно несет в себе гораздо больше информации, чем двумерное.

Основная часть

Известно, что ОМ используется для наблюдения прозрачных, полупрозрачных и непрозрачных объектов. Наблюдение прозрачных объектов осуществляется в проходящем свете, а наблюдение полупрозрачных и непрозрачных объектов в отраженном. В случае прозрачного или полупрозрачного объекта, трехмерное изображение формируется как набор двумерных изображений при заданном шаге перемещений вдоль оптической оси микроскопа. Такой набор изображений называют стеком изображений (рис. 1. а.). Для непрозрачных объектов формируется карта поверхности, при чем, каждой координате (x,y) соответствует лишь одна координата z (рис. 1. б.).

ОМ формирует увеличенное изображение предмета. Обычно ведущие производители микроскопов используют стандартный ряд микрообъективов с разным увеличением: 5^x , 10^x , 20^x , 40^x , 100^x и разными апертурами. Это позволяет наблюдать в поле зрения объекты больших размеров или локальные части объектов для рассмотрения их микроэлементов.

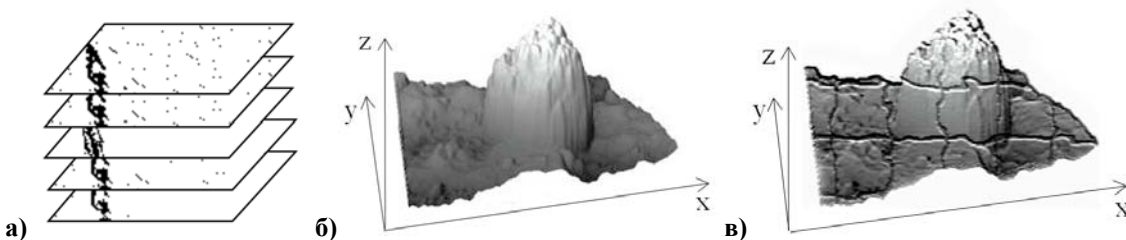


Рис. 1. а) Стек изображений; б) Карта поверхности образца; в) карта поверхности образца с нанесенным на нее изображением.

Наиболее распространенной схемой ОМ является схема с бесконечной длиной тубуса. Такая схема

позволяет вносить дополнительные элементы (светоделители, светофильтры и др.) в параллельном ходе лучей, что не вносит существенных искажений в результирующее изображение. В ОМ можно выделить два канала – канал подсветки и изображающий канал (рис. 2). На схеме ОМ на рис. 2 канал окуляра не указывается. В ОМ канал подсветки обычно строится по схеме Келлера [2], для создания равномерного освещения в плоскости предмета.

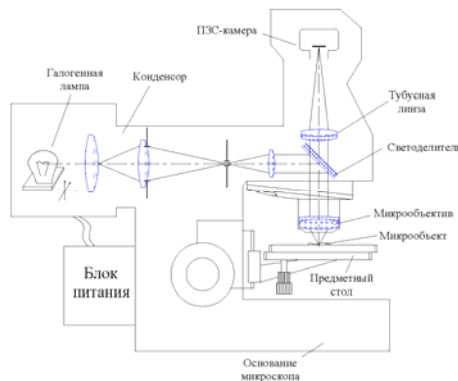


Рис. 2. Схема оптического микроскопа



Рис. 3. Оптический микроскоп Leica Steel Expert 2.0

Источник света проектируется коллективом в плоскость апертурной диафрагмы конденсора, установленном в его переднем фокусе. Конденсор проектирует источник в плоскость входного зрачка объектива микроскопа. Изображающий канал состоит из объектива, светоделителя, тубусной линзы, цифровой камеры (или другого приемника излучения) и, если используется, визуального канала. Светоделитель используется для направления светового потока из канала подсветки в объектив, когда микроскоп работает на отражение, и вводится в параллельном ходе лучей изображающего канала. Тубусная линза формирует изображение объекта в плоскости цифровой камеры и/или окуляра. Параметры этого компонента у разных производителей стандартизированы, некоторые из них приведены в табл. 1.

ОМ позволяет наблюдать двумерное изображение объекта. В зависимости от объектива, его числовой апертуры, можно оценить его глубину резко-изображаемого пространства [3]. Чем больше апертура – тем меньше глубина, следовательно, тем больше его разрешающая способность вдоль оптической оси микроскопа. Использование высокоапертурных объективов позволяет получать трехмерные изображения; путем получения набора цифровых изображений с постоянным шагом вдоль оптической оси (рис. 4) и затем путем цифровой обработки набора изображений составляется стэк изображений.

Табл. 1

Производитель	Фокусное расстояние тубусной линзы (мм)	Парфокальное расстояние (мм)	Резьбовое соединение микрособъектива
Leica	200	45	M25
Nikon	200	60	M25
Olympus	180	45	RMS
Zeiss	164,5	45	RMS

К достоинствам такого микроскопа можно отнести: простоту конструкции, возможность тонкой фокусировки вдоль оптической оси (в т.ч. и моторизированной), а также большое количество программного обеспечения для обработки исходных изображений и генерирования трехмерных.



Рис. 4. Процесс формирования трехмерного изображения в микроскопе



Рис. 5. Классификация методов получения трехмерных изображений в оптической микроскопии

Поскольку этим методом затруднительно получать трехмерные изображения в связи с небольшим продольным разрешением, является актуальным рассмотрение других методов получения трехмерных изображений.

Для классификации оптических микроскопов построения трехмерных изображений предлагается разделить их по принципу работы (рис. 5) на микроскопы, формирующие увеличенное изображение предмета (микроскопы с равномерным и неравномерным освещением) и микроскопы, использующие интерференционную картину (интерференционные и голографические микроскопы).

Оптические микроскопы с равномерным освещением поля зрения

Типичной схемой оптического микроскопа с увеличенным изображением, равномерным освещением и наклонной к образцу оптической осью является двойной микроскоп Линника [4, 5]. Этот микроскоп позволяет получить сечение рельефа исследуемой поверхности. Произведя сканирование по одной оси и обработку изображений можно получить трехмерную карту распределения неровностей поверхности. Схема состоит из двух каналов – осветительного и приемного.

Принцип работы метода (рис. 6): осветитель равномерно освещает щелевую диафрагму, расположенную в фокусе объектива осветительного канала. Изображение щели проецируется объективом на исследуемую поверхность. Это изображение щели рассматривается с помощью наблюдательного микроскопа. В визуальном варианте прибора, наблюдательный канал состоит из объектива и окуляр-микрометра, в цифровом варианте – из объектива и цифровой камеры.

В этом микроскопе наблюдается изображение светящейся щели на темном фоне. В случае отсутствия неровностей – щель видна как ровная светящаяся полоса, при наличии неровностей – полоса искривляется, принимая вид неровности.

Преимуществами этой схемы являются: невысокая стоимость прибора, простота конструкции, возможность исследования большого количества образцов. Недостатки – применим для исследуемых поверхностей с классами чистоты 4–9, визуальный вариант прибора дает только профиль поверхности, без карты неровности и не имеет дальнейшей обработки изображения, сложная юстировка прибора для получения изображения щели.

Примером прибора, построенного по этой схеме, может быть микроскоп МИС-11 (рис. 7).

Другой метод получения профиля поверхности – теневая проекция профиля [5, 6]. Как и двойной микроскоп Линника, этот метод позволяет определять профиль исследуемой поверхности. Основное отличие от двойного микроскопа Линника – это измерение более грубых классов чистоты поверхностей, что часто необходимо в деревообрабатывающей или текстильной промышленности. Принципиальное отличие в схеме метода в том, что осветитель освещает точечную диафрагму, которая находится в фокусе коллиматора (рис. 8.). Параллельный пучок, вышедший из коллиматора, направлен на исследуемую поверхность. Перед поверхностью установлено лезвие (нож Фуко), формирующий на поверхности границу светлого и темного поля. В случае плоской поверхности, граница представляется ровной. При наличии рельефа – происходит искривление границы. Микрообъектив микроскопа проецирует изображение границы светлого и темного поля на приемник излучения (фотокамеру), цифровой прибор, или в плоскость сетки окуляр-микрометра, визуальный прибор.

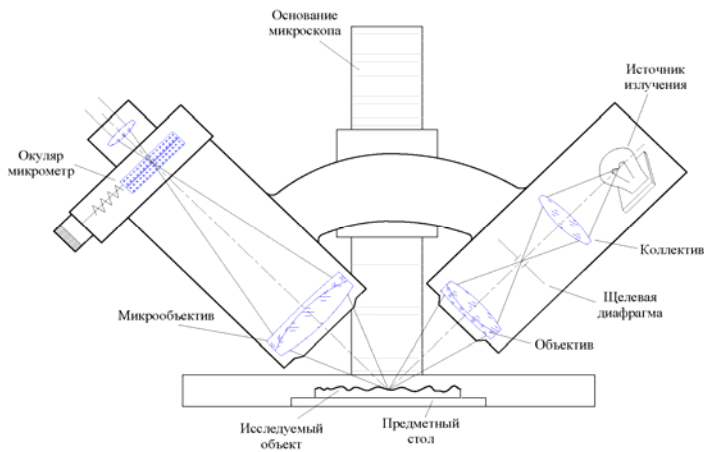


Рис. 6. Схема двойного микроскопа Линника

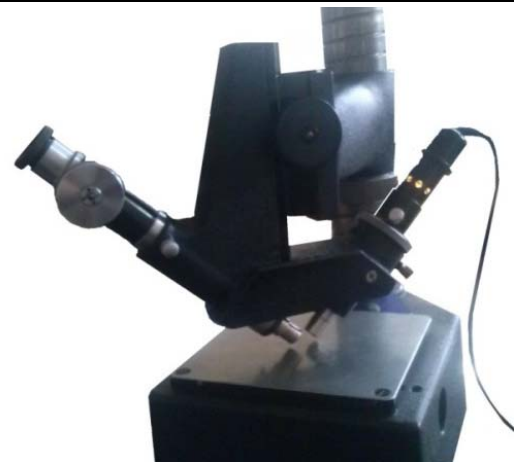


Рис. 7. Двойной микроскоп Линника МСS-11.

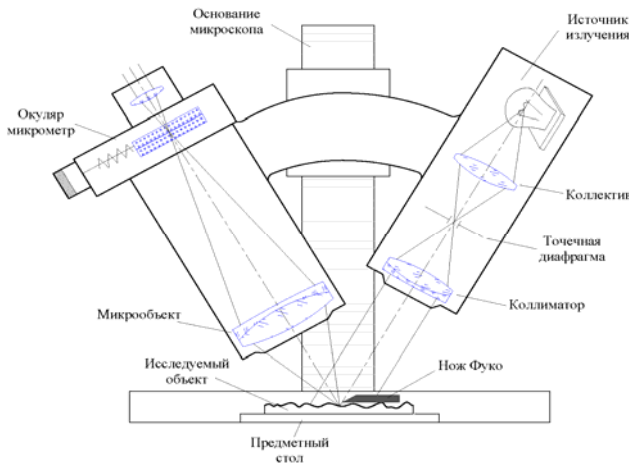


Рис. 8. Схема теневого метода

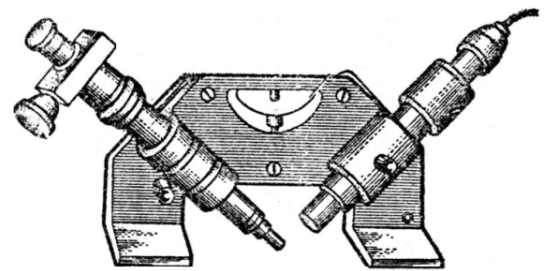


Рис. 9. Теневой микроскоп ТСП-4

К достоинствам теневого метода можно отнести простоту конструкции и работы, низкую стоимость, возможность приспособить оптический микроскоп для получения трехмерных изображений, путем сканирования. Недостатки метода – невысокое увеличение, сложность настройки.

К оптическим микроскопам с равномерным освещением относятся и микроскопы с оптической осью, перпендикулярной к плоскости образца. К данному типу микроскопов относятся оптические приборы с малой глубиной резкости [7]. Обычно этого добиваются, используя в оптических микроскопах объективов с высокой апертурой. Данная схема полностью повторяет работу оптического микроскопа, однако ввиду субъективности суждения и невозможности человеку

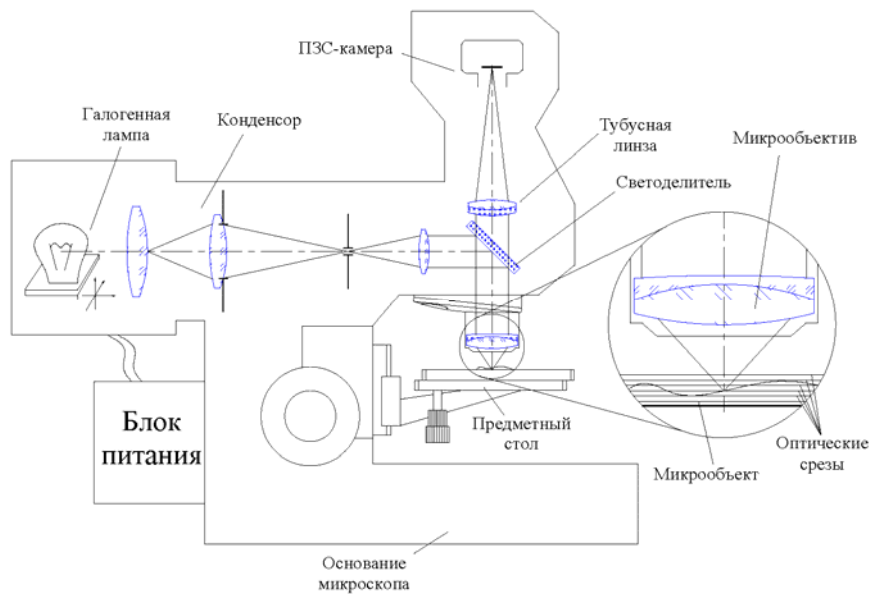


Рис. 10. Схема оптического микроскопа с оптической осью, перпендикулярной к образцу

представить пространственную поверхность по двумерному изображению – используется цифровая камера для послойной регистрации изображений (рис. 10). Затем каждый снимок проходит цифровую обработку, в результате которой определяются зоны, находящиеся не в пределах глубины резкости (рис. 4). Произведя обработку каждого такого изображения, с определением резко изображаемых зон, и сложив их воедино

(процесс расширения глубины резкого пространства) – формируется трехмерное изображение.

Главное преимущество микроскопа с малой глубиной резко-изображаемого пространства в том, что это экономичный метод получения трехмерных изображений. Для его осуществления необходим обычный микроскоп с цифровой камерой и соответственным программным обеспечением. Главным недостатком данных микроскопов являются фоновые засветки, которые искажают картину.

Типичным оптическим микроскопом, позволяющим получать трехмерные изображения, является микроскоп фирмы KEYENCE VHX2000 (USA) (рис. 11).

Схема построения микроскопа с малой глубиной резкости: блок осветителя включает в себя источник излучения и оптическую систему, построенную по схеме Келлера для равномерного освещения в пространстве предмета. В изображающем канале микроскопа используется высокоапертурный объектив, который, в паре с тубусной линзой, строит изображение в плоскости цифровой камеры.



Рис. 11. Трехмерный микроскоп KEYENCE VHX2000

Оптические микроскопы с неравномерным освещением

Довольно широкое распространение получили методы с пространственной модуляцией освещения (ПМО) [8, 9, 10]. Сущность ПМО заключается в том, что поверхность или объем образца освещаются неравномерно. В большинстве случаев используется гармоническая модуляция (одномерная, двумерная или трехмерная).

Принцип работы микроскопа. Канал подсветки микроскопа построен по схеме Келлера. В плоскости полевой диафрагмы располагается транспарант – объект, создающий пространственную модуляцию освещения (периодическая структура с высокой пространственной частотой) (рис. 12). Транспарант располагается в фокальной плоскости коллиматора. Далее в параллельном ходе лучей стоит светоделитель и объектив микроскопа. Таким образом, в плоскости предмета наблюдается объект с модулированным освещением. Если объект находится в фокусе микроскопа – наблюдается высокий контраст этой структуры; если же объект не в фокусе – происходит существенное понижение контраста модулированного освещения. Изображающий канал микроскопа с ПМО аналогичен обычному оптическому микроскопу. Изображение регистрируется цифровой камерой, после чего происходит его цифровая обработка – находятся зоны с наибольшим контрастом. Сделав набор таких изображений вдоль оптической оси микроскопа (стэк изображений) – можно цифровым путем воссоздать трехмерный профиль поверхности.

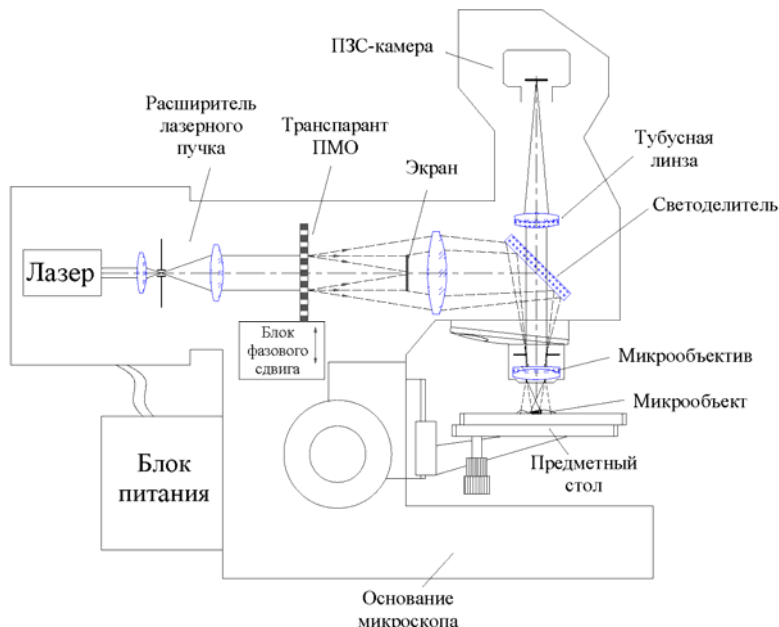


Рис. 12. Схема микроскопа с пространственной модуляцией освещения

Обычно микроскопы с ПМО строятся на базе оптических микроскопов, включающих в себя отдельный портативный модуль ПМО (рис. 13).

Примером такого микроскопа может быть Zeiss Axio CSM 700 (рис. 14).

К достоинствам такого микроскопа можно отнести хорошее разрешение (поперечное и продольное), модульную систему и возможность получения цветного изображения. Этот модуль не существенно удорожает стоимость оптического микроскопа (его стоимость \$4000-\$10000). Однако его использование

возможно лишь на современных и дорогих микроскопах, нет универсальности установки между разными производителями; также трудоемкость получения набора изображений и дальнейшая их цифровая обработка.



Рис. 13. Отдельный модуль ПМО



Рис. 14. Микроскоп с ПМО Zeiss Axio CSM 700

Конфокальные микроскопы

В 1950-х гг., Марвин Мински предложил схему конфокального микроскопа. Он считал, что если отсесть лучи, идущие со всего поля зрения и оставить только лучи из элементарной площадки, можно повысить контраст результирующего изображения. Принцип работы первого прототипа конфокального микроскопа заключался в следующем: световой поток от источника проходил через точечную диафрагму, которая стояла в фокусной плоскости объектива. Объектив фокусировал изображение диафрагмы в пространство исследуемого образца, на котором некая часть поглощалась, а остальная рассеивалась. Затем часть от рассеянных лучей поступала в объектив микроскопа, в плоскости изображения которого располагалась точечная (конфокальная) диафрагма. Она отсекала лучи идущие из других аксиальных плоскостей. Лучи, которые прошли через конфокальную диафрагму формировали освещенность на фотоприемном устройстве. Изображение рассматривалось на экране в режиме текущего времени, без его регистрации. В современных конфокальных микроскопах, ввиду малого потока излучения, проходящего через конфокальную диафрагму, в качестве приемника излучения используется ФЭУ [11].

Исходя из принципа работы конфокального микроскопа – наблюдения одной точки пространства в один момент времени, получения изображения всего поля зрения является довольно длительным процессом. Для получения изображения в конфокальном микроскопе производят сканирование. Для построения трехмерного изображения необходимо произвести сканирование в разных аксиальных плоскостях.

Сканирование производят путем перемещения предметного стола с образцом или перенаправлением лучей, с помощью поворотных зеркал. Второй вариант оказался более эффективным ввиду большей скорости сканирования, что легко производится с помощью электромагнитного механизма [12].

Основные функциональные возможности конфокальной микроскопии на сегодняшний день были реализованы по мере прогресса в информатике, когерентной оптике, точной механике, лазерной технике.

Широкое распространение получил лазерный сканирующий конфокальный микроскоп (ЛСКМ) (рис. 15). Обычно, конфокальная схема является дополнением к оптическому микроскопу. Принцип работы ЛСКМ заключается в следующем: предварительно настроив на резкое изображение объекта на оптическом микроскопе, включается конфокальный модуль. Лазерное коллимированное излучение расширяется, проходя через светоделитель, оно попадает на систему сканирования, реализованную в виде зеркал. Далее поток излучения направляется через полевую диафрагму в тубусную линзу. Параллельный пучок поступает в объектив, который собирает излучение в фокусе системы. Отразившись от объекта, излучение снова поступает в объектив, проходит через тубусную линзу и оптическую систему, из которой выходит параллельный пучок. Проходит через модуль сканирования и поступает на светоделитель. Далее излучение поступает светоделителя на объектив, в фокусе которого расположена конфокальная диафрагма, за которой расположен ФЭУ. Для получения трехмерного изображения производится послойное сканирование.

Основными преимуществами ЛСКМ по сравнению с обычной световой микроскопией являются:

- Выше контрастность изображения, ниже фоновые засветки.
- Разрешающая способность выше (латеральная в 1.4 раза, аксиальная – в зависимости от размера конфокальной диафрагмы).
- Использование лазеров разных оптических диапазонов.
- Возможность получать «оптические срезы» для трехмерной реконструкции изображения.
- К недостаткам конфокальной микроскопии можно отнести:
- Сложность в настройке и использование точной механики, что существенно повышает

стоимость (>\$50 тыс.).

- Чувствительность к вибрациям, необходимо использование виброизолирующей системы.
- Длительное время получения одного трехмерного изображения.

Эти возможности конфокального микроскопа обеспечивали послойное наблюдение образцов с последующей трехмерной реконструкцией топографии поверхности.

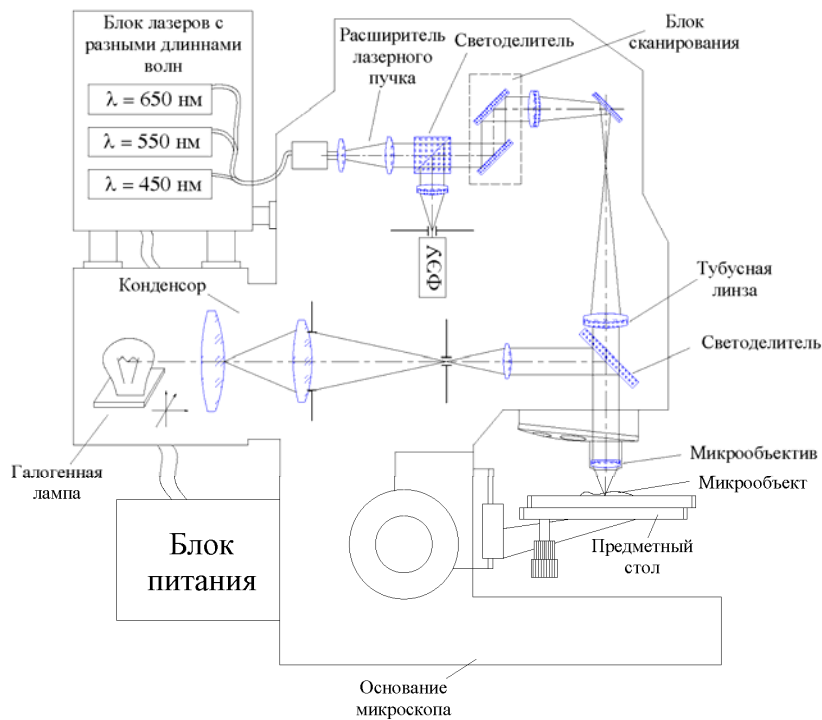


Рис. 15. Схема лазерного сканирующего конфокального микроскопа

Примером ЛСКМ может быть микроскоп фирмы Zeiss модель LSM 700 (рис. 16).

В связи с тем, что в конфокальном микроскопе используется метод сканирования одной точкой – необходимо значительное время для построения одного изображения. Для решения этой задачи было предложено сканирование набором точек. Для такого сканирования обычно используют диск Нипкова [13].

Эта схема может быть реализована как отдельный модуль к оптическому микроскопу или как встроенный модуль в оптическом микроскопе. Принцип работы конфокального микроскопа заключается в следующем (рис. 17): Режим обычного оптического микроскопа используется для предварительного наведения системы на резкое изображение предмета. Затем используют конфокальный модуль. Канал подсветки, построенный по схеме Келлера, освещает диск Нипкова, находящийся в оптически сопряженной плоскости с объективом микроскопа. В плоскости предмета создается изображение из набора точек. В приемном канале изображение предмета строится в оптически сопряженной с объективом плоскости, где расположен диск Нипкова. Этот диск существенно ограничивает поток лучей от неосвещенных зон. Излучение, прошедшее через диск проецируется оптической системой в цифровую камеру. Поскольку в один момент времени анализируется большое количество элементов (точек), принято использовать многоэлементный приемник на основе ПЗС матрицы.



Рис. 16. Конфокальный микроскоп Zeiss LSM 700.

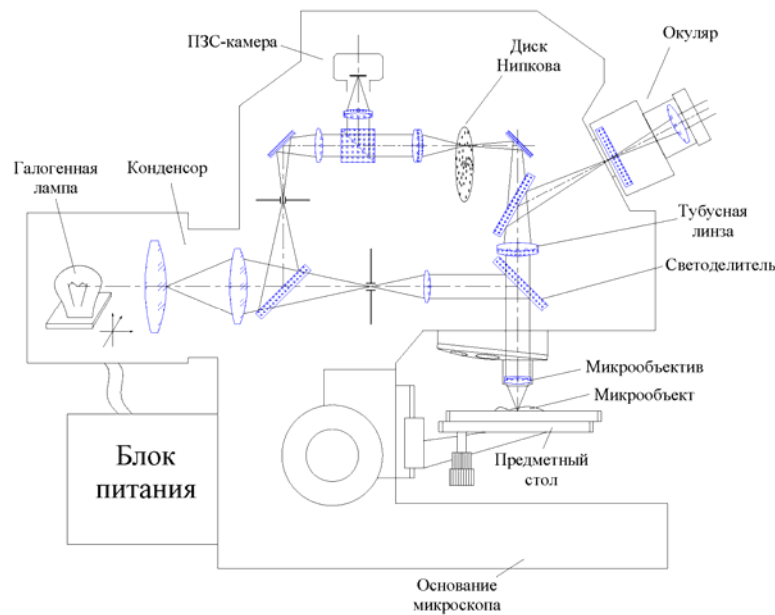


Рис. 17. Схема конфокального микроскопа с диском Нипкова

К достоинствам этой схемы можно отнести высокое аксиальное разрешение, возможность визуального наблюдения изображения объекта. Недостатки:

- Малый коэффициент пропускания и малый контраст.
- Сложность конструкции микроскопа.
- Сложность управления диском.
- Большие потери излучения при прохождении через диск.

Ввиду его недостатков, конфокальный микроскоп с диском Нипкова практически не используется. Примером такого микроскопа может быть Axiotron 2 фирмы Carl Zeiss (рис. 18).



Рис. 18. Конфокальный микроскоп с диском Нипкова Axiotron 2 (Carl Zeiss)

Еще один метод получения трехмерных изображений по конфокальному принципу был предложен в лаборатории научно-исследовательского отдела радиотехнических систем при кафедре радиоэлектронных устройств и систем Института телекоммуникаций, радиоэлектроники и электронной техники (Львовская политехника). Ими был разработан и изготовлен лабораторный макет сканирующего телевизионного оптического микроскопа на основе электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) высокой разрешающей способности [14, 15]. Суть данного метода заключается в том, что вместо обычного осветителя (по схеме Келлера) в плоскость коллектива устанавливается экран электронно-лучевой трубки. Изображение с экрана ЭЛТ проецируется оптической системой и объективом микроскопа в пространство предметов (рис. 19). Изображающий канал полностью аналогичен оптическому микроскопу. ЭЛТ позволяет задавать любые комбинации сигнала, в том числе и производить сканирование по всему полю. Процесс сканирования позволяет поэлементно проанализировать всё поле объекта. Для воспроизведения изображения часть светового потока, которая прошла через объект или отбилась от него и оптическую систему, которая аналогична обычному оптическому микроскопу, преобразовывают в электрический сигнал цифровой камерой с ПЗС матрицей. Преимуществом такого микроскопа является то, что это экономический аналог лазерного конфокального микроскопа. К недостаткам относятся: ЭЛТ не может быть высокой яркости как галогенная лампа, следовательно, низкий контраст; сложность конструкции; надёжность, так как ЭЛТ имеет ограниченный срок службы.

Еще один конфокальный метод получения трехмерных изображений – метод линейного сканирования. Принцип работы микроскопа, построенного по этому методу, схож с лазерным сканирующим конфокальным микроскопом (рис. 20). Система подсветки микроскопа построена так, что в пространстве предметов проецируется изображение равномерно освещенной щелевой диафрагмы (или же используется цилиндрическая линза). В приемном канале вместо конфокальной диафрагмы устанавливается щелевая диафрагма, отсекающая лучи из других аксиальных плоскостей. Для получения полного изображения производят послышное сканирование по одному направлению. Данная схема обладает высшей скоростью получения изображения, однако имеют значительно меньшее разрешение. Примером линейного конфокального микроскопа может быть Nikon LiveScan (рис. 21).

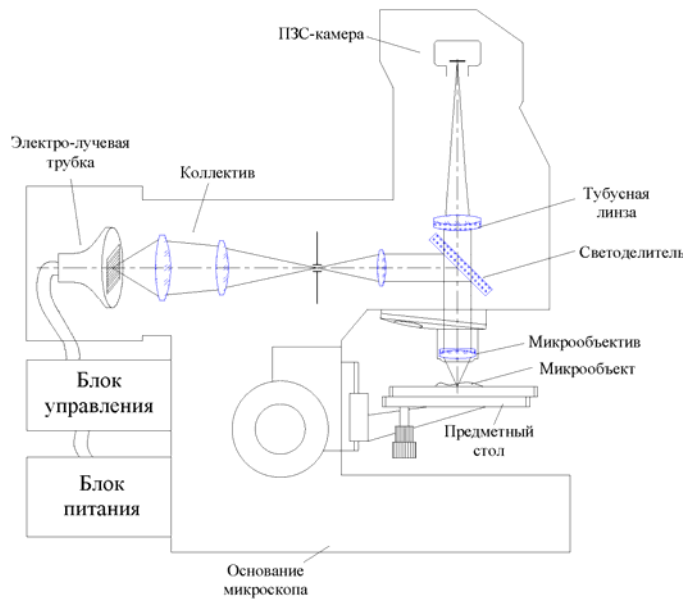


Рис. 19. Схема конфокального микроскопа на основе электронно-лучевой трубки

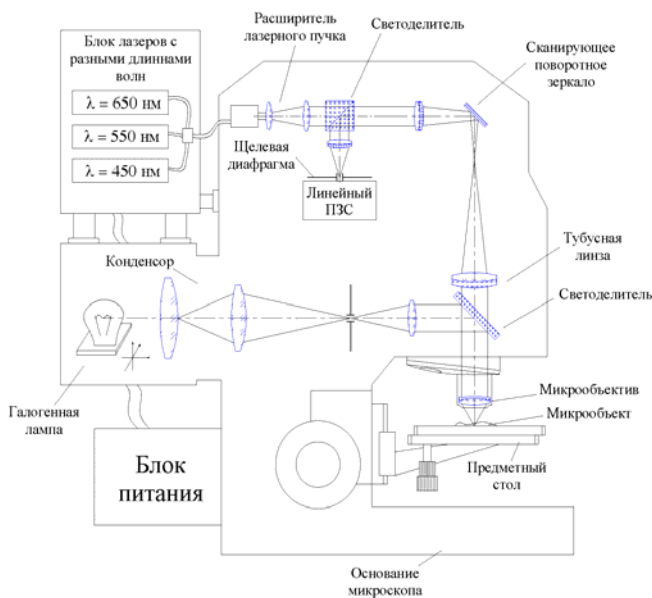


Рис. 20. Схема конфокального микроскопа с линейным сканированием



Рис. 21. Конфокальный микроскоп с линейным сканированием Nikon LiveScan

Интерференционные и голографические микроскопы

Данный вид микроскопов получил широкое распространение для получения трехмерных изображений поверхности. Описание и принципы работы интерференционных и голографических микроскопов детально описаны в работе [16].

Выводы

Рассмотрены методы получения трехмерных изображений, их особенности, схемы и принципы работы. Наиболее распространенные являются интерференционные методы получения трехмерных изображений, ввиду их высокой разрешающей способности. Наиболее качественные изображения можно получить на лазерном сканирующем конфокальном микроскопе. В большинстве случаев, стоимость современных микроскопов для получения трехмерных изображений достаточно высока – интерференционные микроскопы от \$35000, конфокальные от \$50000, микроскопы с малой глубиной резкости от \$25000. Микроскопы теневого профиля и двойной микроскоп Линника не позволяют получать изображения с высокой пространственным разрешением, однако их цена и стоимость их модернизации (и модернизация визуальных оптических микроскопов для работы по методу теневого сечения) для получения трехмерных изображений существенно меньше стоимости других видов микроскопов. Учитывая экономический интерес и современный уровень технологий (для осуществления сканирования) можно считать целесообразным модернизацию недорогих оптических микроскопов в

Литература

1. Карташев В.Г. Основы теории дискретных сигналов и цифровых фильтров / В.Г. Карташев. – М.: Высшая школа, 1982. – 109 с.
2. Borovytskyi V.. Comparison analysis of illumination systems for digital light microscope according to uniformity of irradiance distribution // Proc. of SPIE 59420Z-9 – 2012.
3. Скворцов Е.Г. Микроскопы / Е.Г. Скворцов, В.А. Панов, Н.И. Поляков, Л.А. Федин. – Л.: Машиностроение, 1969. – 512с.
4. Фридман Я.Б. Строение и анализ изломов металлов / Я.Б. Фридман, Т.А. Гордеева, А.М. Зайцев. – М.: Гос. научно-техн. изд-во машиностроит. лит, 1960. – 160с.
5. Егоров В.А. Оптические и щуповые приборы для определения шероховатости поверхности / В.А. Егоров. – М.: Машиностроение, 1965. – 220 с.
6. Суханов В.Г. Круглопильные станки для распиловки древесины / В.Г. Суханов. – М.: Лесная промышленность, 1984. – 96 с.
7. Будников Н.С. Компьютерная реконструкция рельефа поверхности методом оптической томографии. / Н.С. Будников, В.Е. Котомина, Т.В. Шаргавнина // Физика твердого тела. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2012. – №4. – с. 91-95.
8. Боровицкий В.Н. Применение пространственной модуляции освещения в оптической микроскопии / В.Н. Боровицкий, В.В. Черная // Оптико-электронные приборы и компоненты в лазерных и энергетических технологиях. – 2011. – № 2. – с. 158-166.
9. Banch H. Optical sections by means of "structures illumination", background and application of fluorescence microscopy / Hubert Banch, Jorg Schaffer // Photonik International. – 2006.
10. Krizek P. Spatial light modulator in fluorescence microscopy / Pavel Krizek, Guy M. Hagen // Microscopy: Science, Technology, Application and Education. – Vol. 3. – FORMATEX. – 2010. – pp. 1366-1377.
11. Robert H. Webb. Confocal optical microscopy. – Rep. Prog. Phys. 59. – IOP Publishing Ltd – 1996. – pp. 427–471.
12. Denis Semwogerere, Eric R. Weeks. Confocal Microscopy. – Encyclopedia of Biomaterials and Biomedical Engineering. – Taylor & Francis. – 2005. – DOI: 10.1081/E-EBBE-120024153.
13. Nicolas George. Confocal microscope systems – a comparison of technologies. – Bioscience Technology – Tools & Techniques. – № 11. – 2003.
14. Шклярський В.І. Особливості роботи телевізійного сканувального оптичного мікроскопа у кадровому режимі вимірювання швидкості руху мікрооб'єкта / В.І. Шклярський, Ю.М. Матієшин // Вісник Національного університету “Львівська політехніка” “Радіоелектроніка та телекомунікації”. – 2008. – №618. – с. 22-30.
15. Баланюк Ю.В. Сканувальний телевізійний оптичний ультрафіолетовий мікроскоп для дослідження біологічних мікрооб'єктів / Ю.В. Баланюк, А.Д. Педан, В.І. Шклярський // Вісник Національного університету “Львівська політехніка” “Радіоелектроніка та телекомунікації”. – 2009. – №645. – с. 243-252.
16. Черная В.В. Сравнительный анализ современных голографических и интерференционных микроскопов / В.В. Черная, В.Н. Боровицкий // Измерительная и вычислительная техника в технологических процессах. – № 2. – 2010. – ISSN 2219-9365.
17. Лукашева Н.Н. Прижизненная отражательная конфокальная лазерная сканирующая микроскопия: история создания, принцип работы, возможности применения в дерматологии / Лукашева Н.Н., Ткаченко С.Б., Потекаев Н.Н., Кузьмина Т.С., Василевская Е.А. // Клиническая дерматология и венерология. – № 5. – 2008. – с. 10-15.
18. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – М. – 1973.
19. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. – М.: Машиностроение. – 2001.
20. W. B. Amos, J. G. White. How the Confocal Laser Scanning Microscopy entered Biological Research. – Biology of the Cell. – 2003. – № 97. – pp. 335-342.

References

1. Kartashev V.G. Osnovy teorii diskretnykh signalov i cifrovyykh fil'trov. – M.: Vysshaya shkola, 1982. – pp. 109.
2. V. Borovytskyi. Comparison analysis of illumination systems for digital light microscope according to uniformity of irradiance distribution // Proc. of SPIE 59420Z-9 – 2012.
3. Scvortsov E.G., Panov V.A., Poljakov N.I., Fedin L.A. Microscopy. – L.: Mashinostroenie, 1969. – pp. 512.
4. Fridman J.B., Gordeeva T.A., Zaicev A.M. Stroenie i analiz izlomov metallov. – M.: Gos. nauchn.-techn. izd. mashinostr. lit., 1960. – pp. 160.
5. Egorov V.A. Opticheskie i shhupovye pribory dlya opredeleniya sherohovatosti poverhnosti. – M.: Mashinostroenie, 1965. – pp. 220.
6. Sukhanov V.G. Kruglopilnye stanki dlya raspilovki drevesiny. – M.: Lesnaya promyshlennost, 1984. – pp. 96.
7. Budnikow N.S. Kompyuternaya rekonstrukciya relefa poverhnosti metodom opticheskoy tomografii. / N.S. Budnikow, V.E. Kotomina, T.V. Shargavnina // Fizika tverdogo tela. Vestnik Nizhegorodskogo Universiteta im. N.I. Lobachevskogo. – 2012. – №4. – pp. 91-95.

8. Borovytsky V.N. Primenenie prostranstvennoj modulyacii osvesheniya v opticheskoy mikroskopii/ V.N. Borovytsky, V.V. Chorna // Optiko-elektronnyye pribory i komponenty v lazernykh i energeticheskikh tekhnologiyah. – 2011. – № 2. – pp. 158-166.
9. Banch H. Optical sections by means of "structures illumination", background and application of fluorescence microscopy / Hubert Banch, Jorg Schaffer // Photonik International. – 2006.
10. Krizek P. Spatial light modulator in fluorescence microscopy / Pavel Krizek, Guy M. Hagen // Microscopy: Science, Technology, Application and Education. – Vol. 3. – FORMATEX. – 2010. – pp. 1366-1377.
11. Robert H. Webb. Confocal optical microscopy. – Rep. Prog. Phys. 59. – IOP Publishing Ltd – 1996. – pp. 427–471.
12. Denis Semwogerere, Eric R. Weeks. Confocal Microscopy. – Encyclopedia of Biomaterials and Biomedical Engineering. – Taylor & Francis. – 2005. – DOI: 10.1081/E-EBBE-120024153.
13. Nicolas George. Confocal microscope systems – a comparison of technologies. – Bioscience Technology – Tools & Techniques. – № 11. – 2003.
14. Shkljarsky V.I. Osoblivosti roboti televizijnogo skanuvalnogo optichnogo mikroskopa u kadrovomu rezhimi vimiryuvannya shvidkosti ruhu mikroobjekta/ V.I. Shkljarsky, Y.M. Matieshin // Visnuk Nacionalnogo universitetu "Lvivska politexnika" "Radioelektronika ta telekomunikacii". – 2008. – №618. – pp. 22-30.
15. Balanuk Y.V. Skanuvalnij televizijnij optichnij ultrafioletovij mikroskop dlya doslidzhennya biologichnih mikroobjektiv / Y.V. Balanuk, A.D. Pedan, V.I. Shkljarsky // Visnuk Nacionalnogo universitetu "Lvivska politexnika" "Radioelektronika ta telekomunikacii". – 2009. – №645. – pp. 243-252.
16. Chorna V.V. Sravnitelnyj analiz sovremennykh golograficheskikh i interferencionnykh mikroskopov / V.V. Chorna, V.N. Borovytsky // Izmeritel'naya i vychislitel'naya tekhnika v tekhnologicheskikh processah. – № 2. – 2010. – ISSN 2219-9365.
17. Lukasheva N.N. Prizhiznennaya otrazhatelnaya konfokalnaya lazernaya skaniryushchaya mikroskopiya: istoriya sozdaniya, princip raboty, vozmozhnosti primeneniya v dermatologii/ Lukasheva N.N., Tkachenko S.B., potekaev N.N., Kuzmina T.S., Vasilevskaja E.A. // Klinicheskaya dermatologiya i venerologiya. – № 5. – 2008. – pp. 10-15.
18. GOST 2789-73. Sherohovatosť poverhnosti. Parametry i harakteristiki. – M. – 1973.
19. Anuriev V.I. Spravochnik konstruktora-mashinostroitel'ya. – M.: Mashinostroenie. – 2001.
20. W. B. Amos, J. G. White. How the Confocal Laser Scanning Microscopy entered Biological Research. – Biology of the Cell. – 2003. – № 97. – pp. 335-342.

Рецензія/Peer review : 5.1.2015 р. Надрукована/Printed :24.1.2015 р.
Стаття рецензована редакційною колегією

УДК 621.377.39

С.Й. ШАМАНСЬКИЙ, С.В. БОЙЧЕНКО
Національний авіаційний університет, Київ

РОЗРАХУНОК МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛІЧИЛЬНИКА СТІЧНИХ ВОД ЗМІННОГО ПЕРЕПАДУ ТИСКУ

В статті запропоновано принципову схему вимірювання кількості стічних вод за допомогою лічильника кількості рідини, побудованого на поєднанні стандартного звужуючого пристрою (стандартної діафрагми) як первинного перетворювача та обчислювального пристрою (інтегратора). Розраховано також метрологічні характеристики запропонованого лічильника.

Ключові слова: звужуючий пристрій, лічильник стічних вод, похибка вимірювання, стандартна діафрагма

S. I. SHAMANSKYI, S. V. BOICHENKO
National Aviation University, Kyiv

CALCULATION OF METROLOGICAL PERFORMANCE OF A SEWAGE WATER METER WITH THROTTLE DEVICE

There are proposed basic principles of measurement of sewage water amount with new sewage water meter in this paper. The meter is based on a combination of a standard throttle device (standard diaphragm) as a sensor and a calculation device (integrator). Metrological performance of the proposed sewage water meter is also estimated.

Keywords: measurement accuracy, throttle device, sewage water meter, standard diaphragm.

Вступ

Недостатньо очищені стічні води, що скидаються сьогодні системами водовідведення у поверхневі та підземні потоки, є джерелом механічних, хімічних та біологічних забруднень останніх [1]. Важливою передумовою життя заходів з підвищення екологічної безпеки водовідвідних систем є вимірювання витрат стічних вод. Це дає можливість забезпечення більш надійного моніторингу негативних впливів на гідросферу та екологічного навантаження на неї.

Постановка задачі

Методів та приладів вимірювання витрати рідини існує досить багато. Є і такі, що можуть бути застосовані в системах водовідведення [2]. Однак на сьогодні завдання організації обліку стічних вод в цих системах ускладнюється відсутністю простих та надійних лічильників кількості рідини, які здатні з достатнім рівнем точності вимірювати кількості та витрати забруднених рідин [3]. Будь-який лічильник кількості складається з первинного перетворювача (витратоміра) та обчислювача (інтегратора). У цьому контексті серед значного різноманіття витратомірів, що використовуються для визначення витрати та кількості рідких середовищ, важливе місце займають витратоміри змінного перепаду тиску, а саме з використанням стандартних звужуючих пристроїв як первинних перетворювачів [4]. Вони мають такі переваги як: можливість проводити вимірювання витрати будь-яких, у тому числі багатофазних середовищ при будь-яких тисках та температурах; можливість застосування стандартних вторинних приладів з