

## МИКРОВИЗОРЫ – НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ МИКРОСКОПОВ

© 2009 г. Н. Р. Белашенков, канд. физ.-мат. наук; Т. Ф. Калинина;  
А. И. Лопатин, канд. физ.-мат. наук; Н. Б. Скобелева; Т. В. Тютрюмова

ОАО “ЛОМО”, Санкт-Петербург

E-mail: belashenkov@gmail.com

Представлены результаты разработки нового поколения цифровых микроскопов ОАО “ЛОМО” – микровизоров. Приведены технические характеристики микровизоров проходящего и отраженного света. Показаны перспективы применения новых приборов для лабораторного анализа, научных исследований и образования.

*Ключевые слова:* дальнометрия, оптические головки самонаведения.

Коды OCIS: 100.2960, 110.0180.

*Поступила в редакцию 28.04.2009.*

В настоящее время общей тенденцией развития наблюдательной техники является переход к цифровым системам регистрации и обработки изображений. В современной микроскопии эта задача обычно решается путем комплектования классического светового микроскопа универсальной видеокамерой (аналоговой или цифровой) и сохранения полученного изображения в компьютере для его последующей обработки. При этом в микроскопе используются оба канала – визуальный (окулярный) и цифровой (видеокамера–компьютер). Однако на пути широкого профессионального применения такого решения стоят две проблемы. Во-первых, универсальные видеокамеры не обеспечивают требуемого во многих профессиональных областях качества цветопередачи, а во-вторых, громоздкий комплекс, состоящий из микроскопа, адаптера, видеокамеры и внешнего компьютера, не всегда может быть использован на практике.

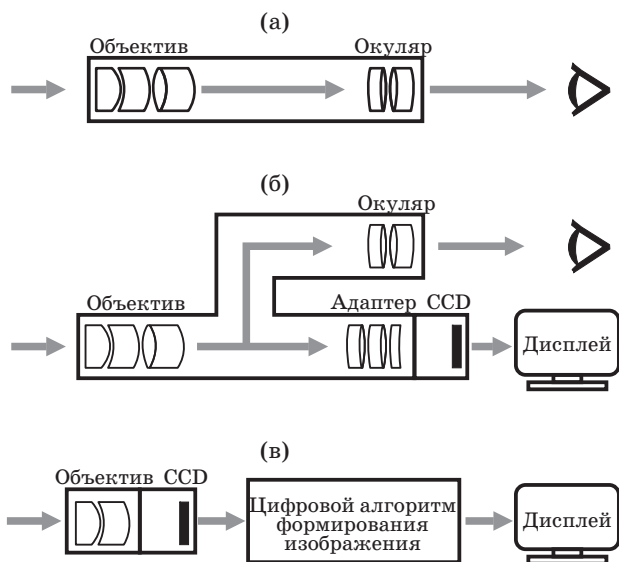
Крупнейшие мировые производители микроскопов, такие как Carl Zeiss, Nikon, Leica, Olympus, в 1990-х годах разработали и предложили модели приборов, построенных на основе классических микроскопов с дополнительными видеоканалами. В это же время компании, специализирующиеся на производстве ПЗС-матриц и микропроцессорной техники, такие как Sony и Intel, вступили с ними в конкуренцию в данном секторе рынка, выпустив пилотные образцы микроскопов с цифровой регистрацией изображения.

Развитие нано- и биотехнологий, задачи стоящие перед генной инженерией, потреб-

ность получения оперативной и достоверной информации о характеристиках микрообъектов в широком спектральном диапазоне, переоснащение научно-исследовательских и учебных лабораторий современным оборудованием обеспечивают востребованность цифровых микроскопов различного назначения в ближайшем десятилетии.

В течение последних лет специалистами ОАО “ЛОМО” проведены комплексные исследования и разработано принципиально новое поколение цифровых микроскопов, получивших название МИКРОВИЗОРЫ. Создание микровизоров – функционально законченных цифровых систем для наблюдения объектов микромира, не требующих внешнего компьютера для хранения и обработки информации, а также окулярного канала для субъективного (визуального) контроля изображения, – стало возможным только после решения двух важных проблем: обеспечения адекватной цветопередачи и создания специализированных аппаратных средств для обработки информации.

Тенденции развития принципов формирования и регистрации изображений в современных микроскопах иллюстрирует рис. 1. Для классического оптического микроскопа характерна схема визуального наблюдения изображения объекта глазом человека (рис. 1а). Безусловным достоинством такой схемы является достоверность характеристик наблюдаемого изображения, включая форму и цвет объекта. Однако отсутствие возможности документи-

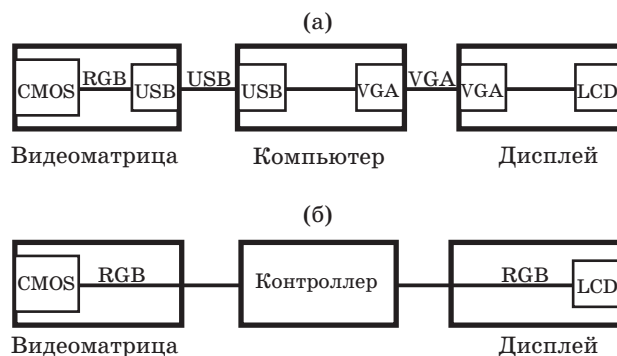


**Рис. 1.** Тенденции развития принципов формирования и регистрации изображений в микроскопах. а – микроскопы с визуальным каналом наблюдения, б – микроскопы с видеоканалом, в – микроскопы без визуального канала (микровизоры).

рования изображения ограничивает область применения классических микроскопов в условиях возрастающих потребностей в обмене информацией, в том числе с использованием телекоммуникационных сетей. Для устранения этого недостатка схема классического светового микроскопа может быть модифицирована за счет включения дополнительного оптоэлектронного канала регистрации изображения с использованием современных матричных фотоэлектронных приемников изображения на основе ПЗС- (CCD)<sup>1</sup> или КМОП- (CMOS)<sup>2</sup> структур (рис. 1б). В таких системах необходимым элементом является компьютер, предназначенный для регистрации цифровых данных об изображении и отображения этих данных на экране дисплея. Использование компьютера неизбежно порождает искажение цветовых характеристик объекта из-за обилия неконтролируемых погрешностей преобразования цветовых характеристик в каналах передачи данных, а также неоднозначность отображения визуальной информации на дисплее компьютера, связанную с наличием разнообразных нестандартизованных настроек цветовой гаммы дисплея. Устранить указанную неоднозначность позволяет предлагаемая схема микровизора (рис. 1в),

<sup>1</sup> CCD – Charge coupling device.

<sup>2</sup> CMOS – Complementary metal-oxide-semiconductor.



**Рис. 2.** Схема преобразования изображения. а – в микроскопе с видеоканалом, б – в микровизоре.

в которой исключен визуальный канал наблюдения, а информация об изображении поступает непосредственно с выхода фотоэлектронного приемника на встроенное в микровизор устройство отображения информации через специализированный контроллер. При таком построении функциональной схемы прибора регистрируемые микровизором данные являются объективными и не содержат цветовых и иных артефактов. Кроме того, использование специализированного быстродействующего процессора, реализующего цифровой алгоритм преобразования изображения, обеспечивает возможность управления параметрами освещения объекта и осуществления специальных режимов контрастирования изображения в режиме “on-line”.

Схемы преобразования изображения, приведенные на рис. 2, иллюстрируют принципиальное отличие микровизора от цифрового микроскопа с дополнительным видеоканалом. В цифровом микроскопе с дополнительным видеоканалом (рис. 2а) RGB-сигнал, получаемый с выхода CMOS- или CCD-матрицы, подвергается преобразованию для передачи по каналу USB<sup>3</sup> (или IEEE1394), затем декодируется компьютером и в формате VGA передается на монитор, где вновь преобразуется из формата VGA в сигналы RGB для непосредственного отображения на мониторе. Последовательность преобразований сигнала в микровизоре значительно короче и включает только трансляцию RGB-сигнала с CMOS- или CCD-матрицы на монитор и при необходимости его обработку, осуществляемую встроенным контроллером. Из этого следует, что при должной схемотехнической реализации канала передачи данных можно обеспечить уменьшение иска-

<sup>3</sup> USB – Universal serial bus.

жений получаемой информации и повышение надежности работы прибора в целом.

Исключение визуального канала открывает принципиально новые возможности построения оптических схем микровизоров. Вместо традиционных бинокулярных и тринокулярных насадок микровизор содержит видеонасадку, в корпусе которой располагаются фотоэлектронный приемник изображения, электронные схемы регистрации и обработки изображения, а также жидкокристаллический дисплей. Существенное изменение системы освещения микрообъектов в микровизорах достигается за счет использования управляемых светодиодных осветителей. Исключение визуального канала наблюдения в микровизоре существенным образом улучшает эргономические характеристики цифровых микроскопов, снижает утомляемость оператора во время рутинных лабораторных исследований, а также значительно упрощает процесс обучения специалистов за счет коллективного наблюдения и обсуждения результатов микроскопических исследований.

В настоящее время на “ЛОМО” разработаны микровизоры различного назначения. Под брендом МИКРОВИЗОРЫ ОАО “ЛОМО” приступило к серийному выпуску микроскопов со сквозным оптико-цифровым каналом регистрации, обработки и воспроизведения микроизображений с техническими характеристиками, удовлетворяющими профессиональным требованиям, предъявляемым к приборам данного класса. Серийно выпускаются микровизоры проходящего света (модели серии  $\mu$ Vizo-100) [1] и металлографический микровизор отраженного света (модель  $\mu$ Vizo-MET). Ведется работа по созданию люминесцентного микровизора со светодиодным осветителем. Внешний вид этих приборов представлен на рис. 3, а технические характеристики выпускаемых серийно микровизоров приведены в таблице. Серийные и экспериментальные приборы работают в отраженном и проходящем свете, включая поляризованное излучение, в расширенном спектральном диапазоне, обеспечивают адекватную цветопередачу, обладают высокими эргономическими характеристиками, имеют современный дизайн. Встроенное программное обеспечение позволяет реализовать различные методики обработки изображения, проведение рутинных исследований, а также обеспечивает совместимость микровизоров с телекоммуникационными системами передачи информации.

Рассмотрим технические характеристики цифровой системы формирования изображе-

ния микровизоров первого поколения (к ним относятся микровизоры серий  $\mu$ Vizo-100 и  $\mu$ Vizo-MET). В качестве приемника излучения в этих приборах используется CMOS-матрица с разрешением  $1280 \times 1024$  пкс и диагональю  $1/2''$ ,

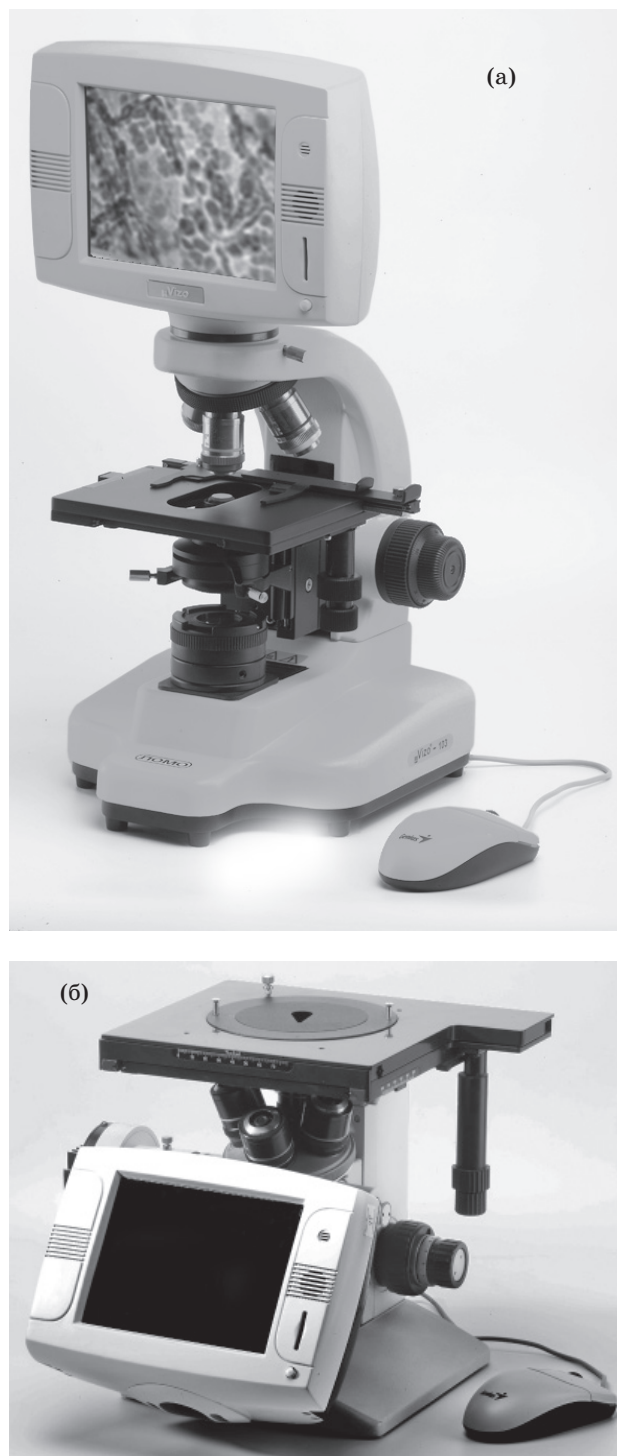


Рис. 3. Внешний вид микровизоров. а – микровизор проходящего света (модель  $\mu$ Vizo-103), б – микровизор отраженного света (модель  $\mu$ Vizo-MET).

Технические характеристики микровизоров

Характеристика	Микровизоры			
	μVizo-101	μVizo-102	μVizo-103	μVizo-MET-221 μVizo-MET-222
Линейное увеличение микровизора – в режиме цифрового увеличения “×1” – в режиме цифрового увеличения “×2”	80–2000 160–4000	100–1000 200–2000	63–1250 125–2500	50, 100, 200, 500, 1000 100, 200, 400, 1000, 2000
Линейное поле зрения в плоскости объекта, мм – в режиме цифрового увеличения “×1” – в режиме цифрового увеличения “×2”	2,0–0,08 1,0–0,04	1,6–0,16 0,8–0,08	2,54–0,13 1,27–0,07	3,3–0,16 1,6–0,08
Цифровое увеличение видеонасадки	в режиме “×1”–20; в режиме “×2”–40			
Комплект сменных объективов	Ахроматы 4\0,10; 10\0,25; 40\0,65; 100\1,25	Улучшенные ахроматы 10\0,30; 25\0,50; 40\0,65; 100\1,25	План- и полупланахроматы 5\0,10; 20\0,45; 63\0,85; 100\1,25	Планахроматы с увеличенными рабочими отрезками 5\0,12; 10\0,20; 20\0,35; 50\0,60; 100\0,75
Методы исследования	Светлое поле			Светлое поле, темное поле, поляризованный свет, метод ДИК*
Револювер	Четырехгвездный			
Предметный столик	Двухкоординатный с препаратоводителем, перемещение, мм – в продольном направлении от 0 до 80, – в поперечном направлении от 0 до 50, цена деления шкал и нониусов, мм от 1,0 и 0,1			
Видеосистема	Видеоматрица – 1/2"; 1280×1024 пкс Монитор 6,4"; VGA; 640×480 пкс			
Источник света	Регулируемые параметры: яркость, контраст, резкость, оттенок Сохранение данных: карта памяти стандарта SD или MMC Выход на внешний компьютер и принтер: USB, 640×480 пкс Выход на внешний монитор или видеопроектор: VGA			
Электроснабжение	Светодиод мощностью 2 Вт			Светодиод мощностью 5 Вт
	Сеть переменного тока напряжением 220 ± 22 В, частотой 50 Гц через сетевой адаптер постоянного тока напряжением 12 В			

\* ДИК – дифференциально-интерференционный контраст.

а в качестве дисплея – TFT LCD с разрешением 640×480 пкс и диагональю 6,4". При этом в микровизорах этих моделей возможны два режима отображения информации: 1) “пиксел-в-пиксел”, при котором один пиксел матрицы проецируется на один пиксел монитора, и 2) “матрица-в-матрицу”, при котором четыре пиксела матрицы проецируются на один пиксел монитора. Очевидно, что в первом случае достигается бóльшая разрешающая способность системы (при этом на мониторе отображается только часть поля зрения матрицы размером 640×480 пкс), а во втором – большее поле зрения и в определенной степени лучшая цветопередача, так как 4 разноцветных (из-за наличия фильтра Байера) пиксела матрицы проецируются на 1 цветной пиксел монитора. Таким образом, данное соотношение разрешений является достаточно сбалансированным для компактного моноблочного прибора, такого как микровизор. Для проекции изображения, формируемого объективом микроскопа на матрицу, служит тубусная линза. Суммарное линейное увеличение оптико-цифровой системы микровизора может достигать 2500<sup>×</sup> при использовании встроенного монитора.

В рамках развития идеологии систем со сквозным оптико-цифровым каналом на “ЛОМО” ведутся работы по созданию принципиально новой системы – микровизора  $\mu$ Vizo-201 [2]. Идеология этого изделия предполагает объединение в одном компактном устройстве возможностей нескольких классических микроскопов. Использование системы с оптико-цифровым каналом позволяет создать прибор, обладающий возможностями работы в проходящем и отраженном свете как с верхним, так и с нижним расположением столика. На едином оригинальном штативе микровизора расположены два столика, оригинальная вращающаяся оптическая система револьвер + видеоголовка и система освещения. Таким образом, этот микровизор обладает возможностями микроскопов прямого и инвертированного наблюдения. Очевидно, что подобное решение является весьма привлекательным для лабораторий, выполняющих широкий диапазон микроскопических исследований, так как позволяет заменить одним прибором целый ряд микроскопов.

В рамках работы над проектом  $\mu$ Vizo-201 созданы два комплекта безрефлексных, свободных от натяжений объективов с независимой абберационной коррекцией и с выравненным положением зрачков, рассчитанных на оптическую длину тубуса “бесконечность”:

– планахроматы с увеличенными рабочими расстояниями ОПХ-5ПБ-0-И, ОПХ-10ПБ-0-И, ОПХ-20ПБ-0, ОПХ-50ПБ-0, ОПХ-100ПБ-0-02;

– планапохроматы ОПА-5ПБ-0-И (увеличение 5<sup>×</sup>, числовая апертура 0,14) и ОПА-50ПБ-0-И (увеличение 50<sup>×</sup>, числовая апертура 0,9). Эти объективы рассчитаны специально для работы в оптико-цифровой системе совместно с CMOS-матрицей в качестве приемника излучения. С помощью второго комплекта объективов предполагается реализовать возможность уменьшения количества применяемых объективов – весь диапазон увеличений, полей зрения и предельной разрешающей способности покрывается всего двумя новыми видеообъективами.

Оптическая система микровизора  $\mu$ Vizo-201 состоит из видеообъектива и тубусной линзы и характеризуется следующими параметрами: увеличением  $\beta$ , входной апертурой  $A$  и критерием качества изображения. В качестве критерия качества изображения удобно принять интегральное по полю значение системной функции передачи модуляции (ФПМ)  $T_c$ , представляющей собой произведение ФПМ оптической системы  $T_o$  и ФПМ приемника  $T_{пр}$  на частоте разрешения  $\mu$ . Если принять  $\mu = \mu_{пр}$ , где  $\mu_{пр}$  – предельная частота, равная  $\mu_{пр} = 1/4a$ , и  $a$  – размер пиксела, то значение  $T_c \geq 0,1-0,15$ . Полагаем, что  $T_{пр}(\mu_{пр}) = 0,6$ , тогда  $T_o(\mu_{пр}) \geq 0,16-0,3$ . Отсюда находим значение задней апертуры оптической системы  $A' \geq 0,035$ . Соответственно, передняя апертура может быть определена из соотношения  $A = \beta A'$ . Выбор увеличения  $\beta$  связан с выбором фокусного расстояния тубусной линзы  $f_{тл}$ . Для согласования полей на объекте с размером матрицы  $2y' = 9$  мм необходимо принять  $f_{тл} = 72$  мм, однако для микровизора  $\mu$ Vizo-201 принят компромиссный вариант с  $f_{тл} = 82$  мм [3]. Таким образом, реальные характеристики видеообъективов, а именно увеличение и апертура, соответственно равны:

для ОПА-50ПБ-0-И  $\beta = 50$ ,  $A = 0,9$  при работе с тубусной линзой  $f_{тл} = 160$  мм, что возможно в серийных микроскопах, и  $\beta = 26$ ,  $A = 0,9$  при работе с тубусной линзой  $f_{тл} = 82$  мм в микровизоре  $\mu$ Vizo-201;

для ОПА-5ПБ-0-И  $\beta = 5$ ,  $A = 0,14$  при работе с тубусной линзой  $f_{тл} = 160$  мм и  $\beta = 2,6$ ,  $A = 0,14$  при работе с тубусной линзой  $f_{тл} = 82$  мм в микровизоре  $\mu$ Vizo-201.

Видеообъективы имеют коррекцию типа “план” и сохраняют ее при переходе от  $f_{тл} = 160$  мм на  $f_{тл} = 82$  мм, т. е. при увеличении угла поля зрения в пространстве изображений. Кроме того, для получения неискаженных цветных

изображений хроматизм увеличения не должен превышать 0,1%. Отсюда видно, что коррекция aberrаций оптической системы микровизора является планархроматической с повышенным требованием по хроматизму увеличения.

Работы по созданию люминесцентного микровизора ведутся по двум основным направлениям: разработка оптико-цифровой системы с высокой чувствительностью (за счет использования режима накопления матрицы) и создание светодиодных источников освещения на базе узкополосных светодиодов мощностью 5–20 Вт. Применение светодиодов в люминесцентном осветителе позволит снизить энергопотребление и существенно (в десятки раз) увеличить срок службы по сравнению с применяемыми лампами.

Еще одним направлением исследований является создание оптико-цифровой системы с адекватной цветопередачей. Как известно, цветовые характеристики объектов микроскопических исследований являются важным источником информации об их свойствах. За счет воздействия различных факторов (спектральный состав источника излучения, оптические характеристики деталей оптической схемы микроскопа, спектральные характеристики приемника излучения, спектральные характеристики монитора, разрядность преобразователей, несовершенство алгоритмов обработки и т. п.) цвет изображения в видеомикроскопе может существенно отличаться от цвета изображения в микроскопе (который также не является адекватным цвету объекта из-за вышеперечисленных факторов). Нами предложен оригинальный способ решения данной проблемы – последовательное освещение объекта излучением трех различных спектральных диапазонов

(RGB) со съемкой каждого кадра черно-белой CMOS-камерой, последующей математической обработкой полученных сигналов и отображением результата на калиброванном дисплее [4].

Таким образом, разрабатываемые и серийно выпускаемые ОАО «ЛОМО» модели микровизоров представляют собой линейку оптико-цифровых систем с улучшенными эргономическими и эксплуатационными характеристиками для проведения микроскопических исследований в широких областях медицины, науки, техники и образования. Эти приборы открывают возможность внедрения современных информационных технологий управления режимами формирования, получения, обработки и передачи изображений микрообъектов, в том числе с использованием телекоммуникационных систем передачи данных в локальных и глобальных сетях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Елкин А.В., Белашенков Н.Р., Лопатин А.И., Калинина Т.Ф.* Микровизор // Патент России № 66893. 2007.
2. *Елкин А.В., Калинина Т.Ф., Лопатин А.И., Соболев Ю.В., Струкова О.М., Немкова О.Н., Степанов В.И.* Микровизор // Патент России № 69270. 2007.
3. *Волкова М.А., Натаровский С.Н., Скобелева Н.Б.* Выбор линейного увеличения адаптера телеканала микроскопа // Оптический журнал. 2005. Т. 72. № 11. С. 58–62.
4. *Белашенков Н.Р., Лопатин А.И., Никифоров В.О., Гуров И.П., Мельников А.В.* Осветительная система для микроскопа с регулируемой цветовой температурой излучения // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49. № 10. С. 67–70.