

## Разработка автономного малогабаритного цифрового микроскопа с регулировкой увеличения до 1250 крат

Д.В. Шевченко,<sup>1\*</sup> В.В. Давыдов<sup>1,2†</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича  
Россия, 191186, Санкт-Петербург, Набережная реки Мойки, д. 61  
(Поступила в редакцию 30.05.2023; подписана в печать 07.07.2023)

В статье обоснована необходимость разработки компактного мобильного цифрового микроскопа высокого разрешения для проведения исследований. Рассмотрены недостатки современных конструкций мобильных цифровых микроскопов. Определены требования по обеспечению необходимым характеристикам в малогабаритном микроскопе по разрешающей способности, контрасту изображения и размеру. Разработана и собрана конструкция компактного мобильного цифрового микроскопа. Введено условие для обеспечения необходимого увеличения микроскопа. Выполнена оценка параметров микроскопа для обеспечения кратности 1250 крат. Представлены изображения различных объектов с разрешением по изображению от 2 мкм до 90 нм. Проведено сопоставление полученных результатов с параметрами лабораторных микроскопов для исследования различных сред.

PACS: 07.60.??; УДК: 681.723.

Ключевые слова: наноструктуры, цифровой микроскоп, изображение, разрешение, различные материалы.

### ВВЕДЕНИЕ

В современном мире невозможно представить научную деятельность во многих направлениях без оптических измерительных приборов [1–5]. Эти приборы необходимы для проведения различных научных исследований [6–11]. Особое место среди них занимают микроскопы различного назначения и их модификации [12–16]. В случае изъятия этого инструмента из деятельности человека закроются многие лаборатории, которые связаны с медициной, биологией, геологией и многим другим. Микроскопия обеспечивает многие передовые открытия в различных разделах науки, особенно не оценим её вклад в разработку и апробацию новых лекарственных препаратов [11–13, 17–20].

В настоящее время разработаны конструкции микроскопов, которые позволяют получить следующие результаты. Для светового микроскопа можно видеть предметы, расстояние между которыми составляет до 0.2 мкм. Это требует увеличения до 1000 крат. Различные конструкции цифровых микроскопов позволяют получить разрешение до 0.1–0.005 мкм. Это требует увеличения от 1200 крат и выше. С повышением кратности увеличивается размер конструкции микроскопа, а также возрастает сложность его эксплуатации. В условиях стационарной лаборатории это существенной роли не играет. Развитие технологий в области электроники, химии, пищевой промышленности, ухудшение экологии потребовали мобильного оборудования различного назначения [12, 13, 21–23]. Среди

такого оборудования, которое должно работать от автономного источника питания и легко транспортироваться, есть микроскоп. Оптимальным вариантом для экспресс-контроля состояния различных сред, объектов (например, микросборка) или поверхностей является цифровой микроскоп. Информацию о результатах исследований можно сразу записывать в компьютер и анализировать, а также передавать на расстоянии. Для решения основных задач экспресс-контроля необходимо разрешение в получаемом изображении порядка 0.1 мкм.

Современные конструкции цифровых микроскопов, которые позволяют получить такие увеличения, имеют ряд значительных недостатков [13–15, 21, 23, 24]. Как правило, они габаритны и обладают большим весом, что делает их мобильность крайне низкой. В ряде случаев конструкция микроскопа сложно монтируется и требует калибровки оптической части после сборки (после транспортировки). Данную операцию без специальных средств выполнить невозможно. Кроме того, стоимость многих микроскопов достаточно высока, что ограничивает их доступность для большого числа пользователей. В нашей работе предложен один из вариантов решения данной проблемы.

### 1. КОНСТРУКЦИЯ МИКРОСКОПА И ПРИНЦИП РАБОТЫ

На основе анализа различных промышленных конструкций цифровых микроскопов, в первую очередь разработки 2022 г. (например, компании Optika (модель Stormoff)) была разработана следующая конструкция мобильного малогабаритного цифрового микроскопа (рис. 1, 2).

\* dv@shevmail.ru

† davydov\_vadim66@mail.ru

Разработанная модель предполагает возможность замены объектива, что позволяет регулировать увеличительную способность микроскопа без потери качества изображения. Ещё одним конструктивным преимуществом является тот факт, что микроскоп можно легко разобрать на небольшие части, компактно упаковать и переместить на большие расстояния. Также к достоинствам можно отнести электрическое питание от компьютера (ноутбука). С помощью программного обеспечения можно приблизить или отдалить изображение, увеличить контраст его исследуемой части. Вся информация выводится на экран компьютера в реальном времени, она легко может быть сохранена и передана на расстояние.

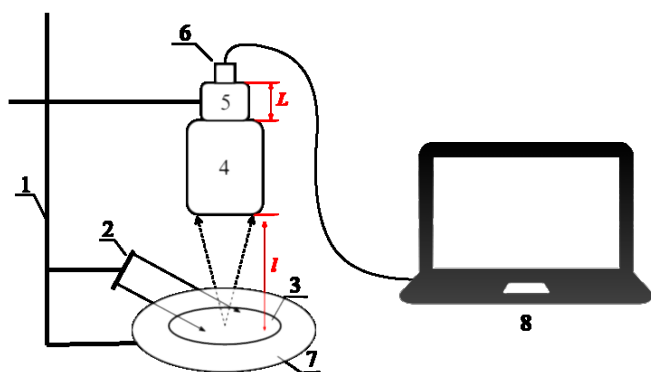


Рис. 1. Структурная схема цифрового микроскопа: 1 — модульный штатив, 2 — светодиодная матрица; 3 — исследуемый объект; 4 — объектив; 5 — переходной цилиндр; 6 — светочувствительная матрица; 7 — предметный столик; 8 — ноутбук/компьютер, считывающий изображение

Особенностью разработанной нами конструкции является то, что расстояние  $l$  (между объективом 4 и объектом 3) можно изменять в пределах 220 мм, одновременно можно изменять расстояние  $L$  между объективом 4 и матрицей 6 (регулируя длину переходного цилиндра). Это позволяет получать максимальную кратность при увеличении изображения объекта. Также конструкция переходного цилиндра предусматривает установку в нем перед матрицей 6 окуляра (при необходимости). Благодаря этому можно дополнительно увеличивать кратность изображения в 2–3 раза при сохранении его контраста. Отсутствие в конструкции поворотных призм и дополнительных линз, которые есть в классических микроскопах, исключает при формировании изображения объекта призмные и дифракционные искажения, часть бликов, связанных с многократным отражением световых лучей, и параллакс.

Исследуемый объект 3 размещается на предметном столике 7. В зависимости от объекта формирование изображения на матрице 6 можно реализовать или в отраженном, или в проходящем свете. Выбором объектива, расстояний  $L$  и  $l$  обеспечивается необходимая разрешающая способность в изображении и кратность



Рис. 2. Конструкция микроскопа

увеличения. С матрицы 6 изображение в цифровом виде поступает на компьютер в реальном времени. По наблюдаемому изображению можно осуществлять настройку оптической части микроскопа и регулировать мощность источников света для получения максимального контраста в изображении.

## 2. РАСЧЁТ КРАТНОСТИ МИКРОСКОПА

Для определения параметров микроскопа была разработана схема распространения оптических лучей при наличии в микроскопе объектива, окуляра и корректирующей линзы на фоточувствительной матрице (рис. 3).

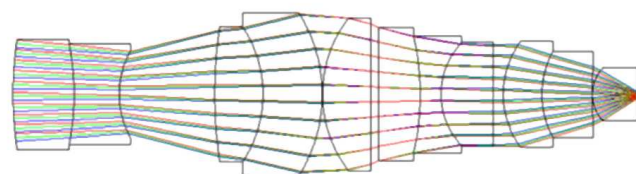


Рис. 3. Ход лучей в оптической системе

Для исключения влияния линзовых aberrаций, дифракционных искажений и параллакса на четкость наблюдаемого изображения, из конструкции микроскопа были удалены окуляр и корректирующая линза. В этом случае увеличение микроскопа определяется только объективом. Максимальное полезное увеличение объектива может быть найдено по формуле:



Рис. 4. Изображение объекта (серьги), полученное с помощью микроскопа (а) и размер объекта (б)

$$M_{\max} = 1000 \cdot NA \quad (1)$$

где  $NA$  — числовая апертура объектива.

Максимальная числовая апертура среди объективов, которые могут использоваться в нашей конструкции, равна 1.25. Соответственно, максимальная кратность увеличения в таком случае, согласно (1), составляет 1250 крат. Для обеспечения сфокусированного изображения при такой кратности должно выполняться условие:

$$\frac{L}{l} = M \quad (2)$$

где  $L$  — расстояние между объективом и матрицей;  $l$  — расстояние между объективом и исследуемым объектом;  $M$  — увеличение микроскопа.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С использованием микроскопа были получены изображения, представленные на рис. 4, а, рис. 5.

В исследовании расстояние  $L$  составляло 160 мм, поэтому для достижения максимальной кратности в 1250 крат, по условию (2), расстояние  $l$  равнялось 0.13 мм. На рис. 6. показано изображение крови человека, полученное при такой кратности микроскопа.

Разрешающая способность микроскопа была оценена исходя из известных размеров исследуемых объектов и их полученных изображений. Глаз человека сможет различить два объекта на мониторе, расстояние между которыми будет больше ширины двух пикселей. В нашем исследовании использовался монитор с разрешением  $1920 \times 1080$  и диагональю  $23.6''$ . В таком случае ширина двух пикселей примерно равна 0.54 мм. Тогда, зная реальный размер объекта, можно составить

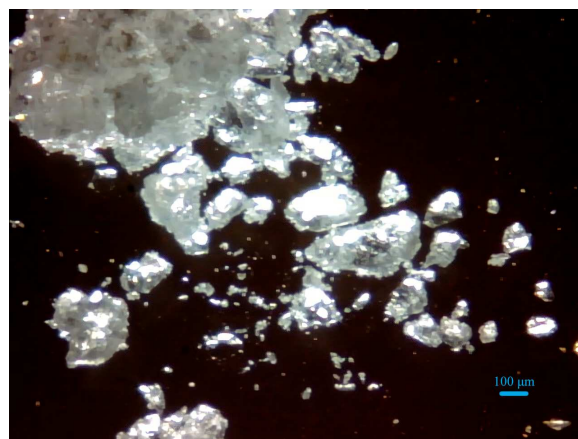


Рис. 5. Кристаллы сахара под микроскопом

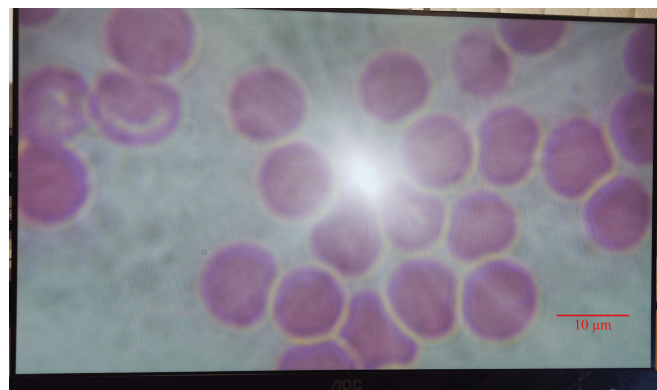


Рис. 6. Кровь человека при максимальном увеличении

пропорцию, из которой находится разрешающая способность микроскопа. Для разработанной конструкции она равна 90 нм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили установить возможности применения разработанной конструкции микроскопа для получения различных изображений: структур, дефектов и мелких деталей на поверхности предметов. Кратность микроскопа может быть изменена в широком диапазоне при необходимости. Это становится возможным благодаря конструктивным особенностям микроскопа, которые позволяют менять объектив, а также регулировать длину переходного цилиндра и расстояние между объектом и объекти-

вом. Максимальная кратность микроскопа составляет 1250 крат, что даёт возможность исследовать структуры порядка микрометров в отраженном свете и сотен нанометров в проходящем свете. Полученное условие для обеспечения необходимой кратности подтверждается результатами экспериментальных исследований. В результате расчетов и экспериментов было установлено, что для достижения максимального увеличения микроскопа необходимо обеспечить шаг перестройки смещения столика в 0.01 мм, что допустимо для современных механических систем.

- [1] *Popovskiy N.I., Davydov V.V., Rud V.Y.* // J. Phys.: Conf. Ser. **2086**, N 1. 012163. (2021).
- [2] *Vologdin V.A., Velichko E.N.* // J. Phys.: Conf. Ser. **741**, N 1. 012095. (2016).
- [3] *Reznikov B., Rodin S., Stepanenkov G., Vakorina D.* // Proceedings of the 2022 International Conference on Electrical Engineering and Photonics. 158. (2022).
- [4] *Wardal W.J., Mazur K.E., Roman K., Roman M., Majchrzak M.* // Energies. **14**. 8584. (2021).
- [5] *Kosolapov V.M., Cherniavskih V.I., Zarudny V.A. et al.* // Agronomy. **12**. 76. (2022).
- [6] *Davydov V.V., Nikolaev D.I., Moroz A.V.* // Measurement Techniques. **64**, N 4. 305. (2021).
- [7] *Davydov V.V., Moroz A.V., Nikolaev D.I.* // Measurement Techniques. **129**, N 7. 954. (2021).
- [8] *Naumova V., Kurkova A., Zaitceva A., Davydov R.* // IEEE Proceedings of International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EEExPolytech-2022). Accession Number: 22329593. P. 151. (2022).
- [9] *Yakusheva M.A., Davydov R.V., Isakova D.D.* // IEEE Proceedings 8th International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT-2022). Accession Number: 21992034. P. 145. (2022).
- [10] *Mazing M.S., Zaitceva A.Y., Davydov R.V.* // J. Phys.: Conf. Ser. **2086**, N 1. 012116. (2021).
- [11] *Davydov V.V., Kruzhalov S.V., Grebenikova N.M., Smirnov K.J.* // Measurement Techniques. **61**, N 4. 365. (2018).
- [12] *Lozano M., Gamarra B., Hernando R., Ceperuelo D.* // Annals of Anatomy. **239**. 151827. (2022).
- [13] *Garcna-Bonillo C., Texidy R., Gilabert-Porres J., Borrrys S.* // Heliyon. **8**, N 10. 1. (2022).
- [14] *Новиков А.И., Пронькин А.В.* // Компьютерная Оптика. **45**, № 5. 713. (2021).
- [15] *Грейсух Г.И., Ежов Е.Г., Антонов А.И.* // Компьютерная Оптика. **43**, № 4. 544. (2018).
- [16] *Андреев Л.Н., Ежова В.В., Цыганок Е.А., Кожина А.Д.* // Оптический журнал. **89**, № 6. 12. (2022).
- [17] *Андреев Л.Н., Цыганок Е.А., Сошникова Е.Б., Кожина А.Д.* // Оптика и спектроскопия. **130**, № 8. 1293. (2022).
- [18] *Мазур Я.В., Вознесенская А.О.* // Оптический журнал. **89**, № 2. 36. (2022).
- [19] *Туан Ле.З., Зьонг Та.В., Ту Ле.А. и др.* // Оптический журнал. **89**, № 6. 48. (2022).
- [20] *Кезели А.Р., Джанелидзе Д.О., Ломаивили Н.И., Хомерики М.С.* // Оптический журнал. **88**, № 6. 76. (2021).
- [21] *Лившиц И.Л., Тоцилина Т.В., Фаенле О., Волкова С.Л.* // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. **21**, № 1. 40. (2021).
- [22] *Мишин С.В.* // Оптический журнал. **89**, № 6. 29. (2022).
- [23] *Скиданов Р.В., Ганчевская С.В., Васильев В.С., Подлипнов В.В.* // Оптика и спектроскопия. **129**, № 4. 443. (2021).
- [24] *Hsu J.W.P.* // Materials Science and Engineering Reports. **33**, N 1. 56. (2001).

## Development of the compact autonomous digital microscope with magnification adjustment up to 1250x

D.V. Shevchenko<sup>1,a</sup>, V.V. Davydov<sup>1,2,b</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St.-Petersburg, 195251, Russia <sup>2</sup>The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, St.-Petersburg, 191186, Russia  
E-mail: <sup>a</sup>dv@shevmail.ru, <sup>b</sup>davydov\_vadim66@mail.ru

In this study, the need to develop a compact mobile high-resolution digital microscope for the research is substantiated. Disadvantages of modern mobile digital microscopes designs are considered. The requirements for providing the necessary characteristics in a compact microscope in terms of resolution, image contrast and size are determined. The design of the low-cost compact mobile digital microscope is developed and assembled. The condition to ensure necessary magnification is introduced. According to this condition, various parameters of the microscope are evaluated

and compared with laboratory microscopes parameters. The results of studies of different objects are presented with the resolution from 2  $\mu\text{m}$  to 90 nm.

PACS: 07.60.-j.

*Keywords:* nanostructures, digital microscope, image, resolution, different materials.

*Received 30 May 2023.*

#### **Сведения об авторах**

1. Шевченко Даниил Васильевич — студент; e-mail: dv@shevmail.ru.
2. Давыдов Вадим Владимирович — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (812) 494-44-14, e-mail: davydov\_vadim66@mail.ru.