

УДК 538.958

DOI 10.25587/2222-5404-2024-21-2-77-83

Разработка модели цифрового голографического микроскопа для исследования структур в оптическом диапазоне

А. Г. Федоров ✉, *В. В. Платонов, Л. Л. Жондорова, Л. Н. Федорова*

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

✉ ag.fedorov@s-vfu.ru

Аннотация. Один из современных и актуальных методов исследования структур объектов основан на голографическом способе регистрации сигналов (голографическая микроскопия). Основным достоинством такого метода является возможность получения полной информации об исследуемом объекте. Другими словами, данный метод позволяет регистрировать не только амплитуду, но и фазу волны. Это достигается благодаря схеме записи, где фаза волны является некоторой модуляцией интенсивности. Данное преимущество делает голографическую микроскопию эффективным инструментом для всестороннего исследования частиц/микрочастиц в газах, жидкостях и твердых материалах в виде тонких пленок или в достаточно прозрачных материалах для волн оптического диапазона (считается, что формирование голографических изображений в таких микроскопах возможно в случае, когда волна, прошедшая без взаимодействия, составляет порядка 70% и более). В рамках данной работы рассматривается схема осевой голографии (голография Габора). Несомненным достоинством осевой голографии является ограничение только диапазоном длин волн. Другими словами, изменение длины волны когерентного источника дает возможность исследования широкого спектра объектов. Так, например, осевая голография реализуется в низкоэнергетических электронных микроскопах, которая позволяет исследовать атомарную структуру объекта. В случае, когда источником является лазер (оптический диапазон), голографический микроскоп дает широкий спектр возможностей исследования микромира, начиная от различных бактерий и заканчивая различными мелкоструктурными частицами. Предлагается разработка модели цифрового голографического микроскопа для исследования структур в оптическом диапазоне, на основе метода осевой голографии Габора. Данная модель микроскопа разработана на платформе «Raspberry Pi Zero 2W».

Ключевые слова: осевая голография, цифровой голографический микроскоп, Raspberry Pi, голографическое изображение, ПЗС-матрица, приближение Френеля, приближение Фраунгофера.

Для цитирования: Федоров А. Г., Платонов В. В., Жондорова Л. Л., Федорова Л. Н. Разработка модели цифрового голографического микроскопа для исследования структур в оптическом диапазоне. *Вестник СВФУ*. 2024, Т. 21, №2. С. 77–83. DOI: 10.25587/2222-5404-2024-21-2-77-83

Development of a digital holographic microscope model for the investigate of structures in the optical range

A. G. Fedorov ✉, *V. V. Platonov, L. L. Zhondorova, L. N. Fedorova*

M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

✉ ag.fedorov@s-vfu.ru

Abstract. One of the modern and relevant methods for investigating the structures of objects is based on the holographic method of recording signals (holographic microscopy). The main advantage of this method is the ability to obtain complete information about the object. In other words, this method makes it possible to record not only the amplitude, but also the phase of the wave. This is achieved thanks to a recording scheme in which the phase of the wave is some modulation of the intensity. This

advantage makes holographic microscopy an effective tool for the investigate of particles/microparticles in gases, liquids and solid materials in the form of thin films or in sufficiently transparent materials for optical waves (one of the main limitations of the holographic recording scheme is to investigate only objects with high transmissivity, i.e. the reference wave is must be about 70% or more of the total wave). Within the framework of this work, we consider the scheme of in-line holography (Gabor holography). The undoubted advantage of the in-line holographic investigation method is that it is limited only by the wavelength range. In other words, by changing the wavelength of the source, a wide range of objects can be examined. For example, in-line holography is used in low energy electron microscopes, which allows the atomic structure of an object to be studied. In the case when the source is a laser (optical range), a holographic microscope provides a wide range of possibilities for investigation the micro-objects, from various bacteria to various fine-structured particles. We developed a model of a digital holographic microscope for the study of structures in the optical range, based on the Gabor in-line holography method. This model of the microscope is developed on the Raspberry Pi Zero 2W platform.

Keywords: In-line holography, digital holographic microscope, Raspberry Pi, holographic image, CCD, Fresnel approximation, Fraunhofer approximation.

For citation: Fedorov AG, Platonov VV, Zhondorova LL, Fedorova LN. Development of a digital holographic microscope model for the investigate of structures in the optical range. *Vestnik of NEFU*. 2024, Vol. 21, No. 2. Pp. 77–83. DOI: 10.25587/2222-5404-2024-21-2-77-83

Введение

Впервые понятие голографии было предложено Д. Габором в 1948 г. [1] как один из способов решения проблемы регистрации фазы волны. В этой работе Габор предложил способ записи изображений, где фаза является модуляцией интенсивности. Такой способ регистрации Габор назвал голографическим способом регистрации объектов, а полученные изображения – голографическими изображениями. По сути, голографические изображения представляют собой интерференционные картины.

В настоящее время голографический метод регистрации, который был предложен Габором, известна как осевая голография. Схематически, его можно представить в виде рис. 1.

Как видно из рисунка, на плоскости объекта часть волны U_{in} взаимодействует с объектом (U_{obj} – объектная волна), часть проходит без взаимодействия (U_{ref} – опорная волна). На некотором расстоянии z от плоскости объекта располагается экран, где объектная и опорная волны интерферируют между собой, формируя интерференционную картину (голографическое изображение), схематически можно представить в виде рис. 2.

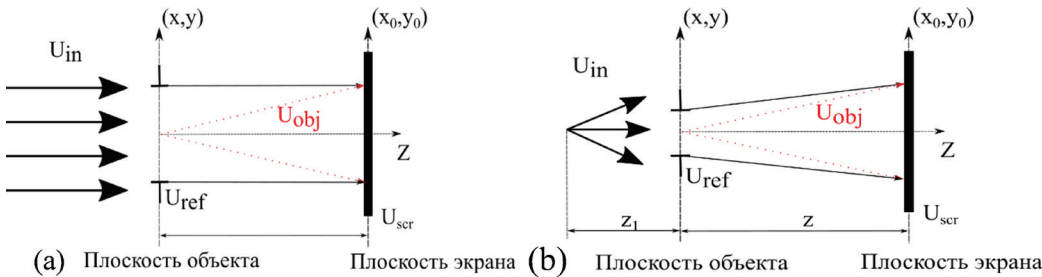


Рис. 1. Схема осевой голографии Габора. Падающая волна, U_{in} : а) плоская; б) сферическая
Fig. 1. Schematic of axial Gabor holography. The incident wave, U_{in} : a. plane; b. spherical

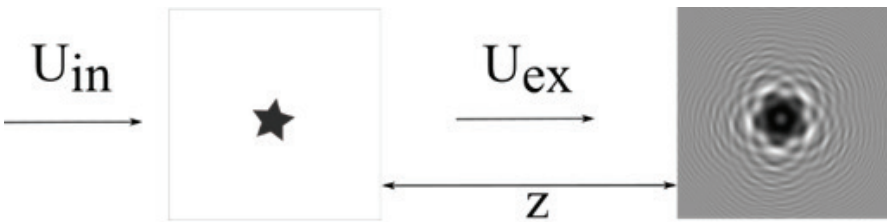


Рис. 2. Формирование голографического изображения
Fig. 2. Formation of holographic image

Осевая голография реализуется как с плоскими волнами рис. 1 (а), так и со сферическими рис. 1 (б), но следует отметить, что в случае сферических волн, на разрешающую способность будут влиять aberrации самого микроскопа. Эти колебания будут значимыми в случае, когда осевая голография Габора реализуется в безлинзовых низкоэнергетических электронных микроскопах [2, 3]. Данный недостаток можно обойти, поставив линзу между источником и плоскостью объекта, как сделано в работе [4].

В цифровых голографических микроскопах (оптический диапазон длин волн) источником служат лазеры, которые излучают когерентные, плоские волны. В этом случае голографические изображения менее подвержены к aberrациям, возникающим за счет колебаний самого микроскопа. Помимо этого, математический аппарат основывается на приближении Фраунгофера. В случае сферических волн необходимо применить приближение Френеля с достаточно сложными математическими расчетами.

Целью данной работы является разработка модели цифрового голографического микроскопа, схема которой представлена на рис. 1 (а). Разработка таких микроскопов обоснована тем, что из года в год растет потребность в компактных и переносных приборах с возможностью измерения параметров исследуемых образцов на микроуровне в полевых условиях, что актуально для многих отраслей науки и промышленности. В связи с этим разработка компактных, точных, относительно дешевых и точных цифровых микроскопов является актуальной задачей.

Материалы и методы исследования

На основе рис. 1. предлагается следующая схема цифрового голографического микроскопа, представленная на рис. 3.

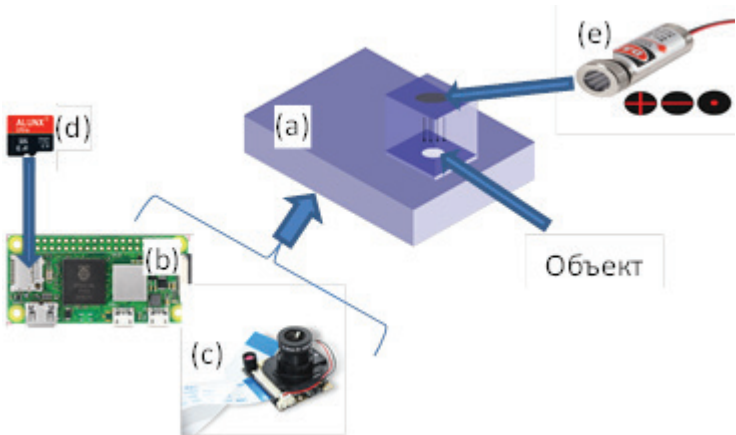


Рис. 3. Схема цифрового голографического микроскопа
Fig. 3. Schematic diagram of a digital holographic microscope

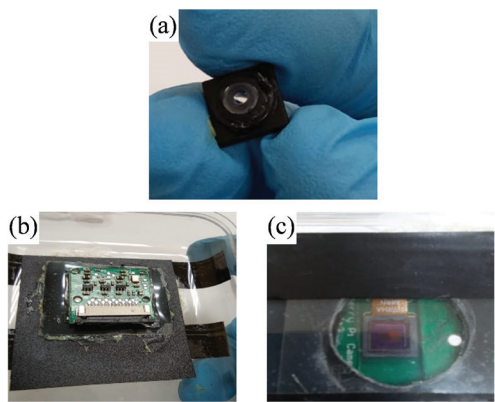


Рис. 4. ПЗС-матрица закрепляется на корпус: а) линза; б) ПЗС-камера вид сзади; в) ПЗС-камера вид спереди

Fig. 4. The CCD is fixed to the body: a. lens; b. CCD camera rear view; c. CCD camera front view

Цифровой голографический микроскоп можно собрать на плате фирмы «Raspberry Pi», в частности применялась модель «Raspberry Pi Zero 2W» с объемом памяти в 512 Мб (рис. 3 б). Карта памяти служит для хранения зарегистрированных изображений и представляет собой классическую карту памяти, фирмы «ALUNX» (рис. 3 d). Объем памяти составляет 32 Гб. Скорость записи – от 10 Мб/с до 20 Мб/с. Скорость чтения – от 20 Мб/с до 40 Мб/с; она необходима для установки операционной системы. Источником служит лазер, изготовленный «NODEMCU LUA» (рис. 3 е). Длина волны излучения – 650 нм. В плоскости экрана расположена камера, изготовленная «Raspberry Pi», модель «OV5647 5MP 1080P» (рис. 3 с). Объект располагается между источником и камерой. Все комплектующие собираются на любой непрозрачной коробке (рис. 3 а).

Для функционирования всей системы предварительно была скачана операционная система (ОС) для плат «Raspberry Pi Zero 2W» с официального сайта (<https://www.raspberrypi.com/software/>). Скачивание осуществляется с другого компьютера и устанавливается на карту памяти (рис. 3 d), поскольку плата «Raspberry Pi Zero 2W» сама по себе является компьютером, не имеющим встроенной настройки.

С камеры физическим образом отделяется линза (рис. 4 а), оставляя только ПЗС-матрицу, которая крепится непосредственно к корпусу, как показано на рис. 4.

Результаты

Для проверки цифрового голографического микроскопа был проведен ряд натурных исследований. Первая серия исследований проводилась для дифракционной решетки с периодом 1/100 (рис. 5).

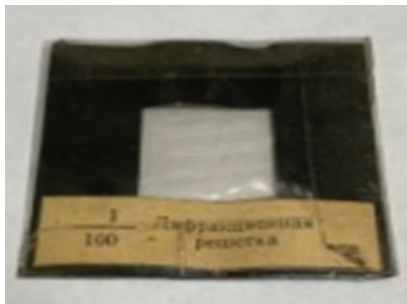


Рис. 5. Дифракционная решетка
Fig. 5. Diffraction grating

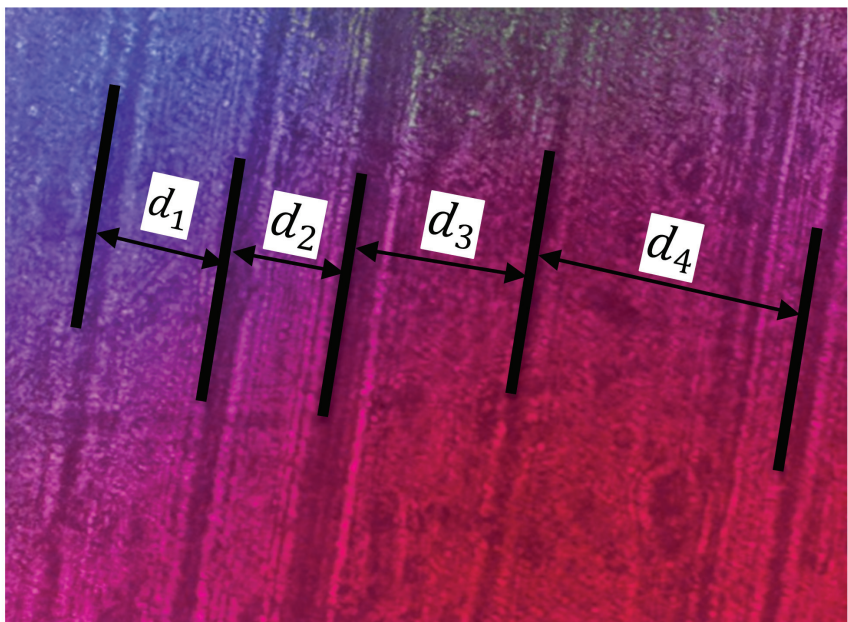


Рис. 6. Изображение дифракционной решетки, полученной на цифровом голографическом микроскопе

Fig. 6. Diffraction grating image obtained with a digital holographic microscope

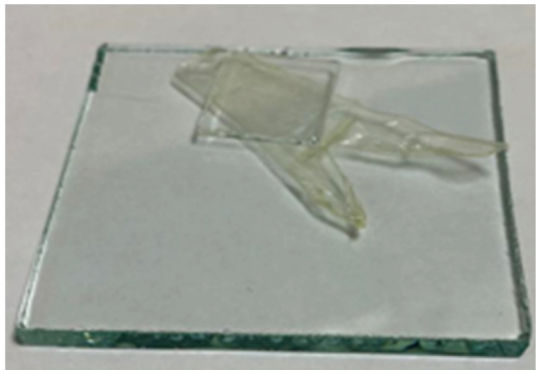


Рис. 7. Эпидермальная корка луковицы

Fig. 7. Epidermal onion peel

Регистрация изображений осуществлялась со следующими геометрическими параметрами: расстояние экран-объект: $z = 3 \text{ mm}$, объект-источник: $Z = 50 \text{ mm}$.

На рис. 6 представлен результат регистрации. По рисунку видно, что прослеживаются интерференционные полосы, которые, возможно, являются штрихами дифракционной решетки, но неравномерные расстояния d_i , ($i=1, \dots, 4$) между интерференционными полосами предполагают, что это не изображение дифракционной решетки. Дальнейшее обоснование требует дополнительных исследований, результаты которых будут опубликованы в следующих работах авторов.

Следующая серия экспериментов была связана с эпидермисом лука (рис. 7). Отметим, что эпидермис лука не проходил предварительное окрашивание.

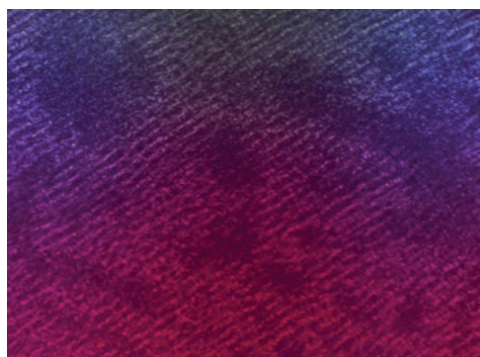


Рис. 8. Изображение луковой шелухи

Fig. 8. Image of onion husks

Регистрация изображений осуществлялась с такими же параметрами, как и в предыдущем примере. Результат регистрации представлен на рис. 8.

Из рисунка можно проследить регулярность клеток, которая является общей характеристикой компактного расположения клеток в эпидермисе лука. Форма клеток эпидермиса луковичи, а также наличие межклеточных пространств не прослеживаются. Отметим, что плотная упаковка клеток является типичной характеристикой для растительных тканей.

Обсуждение

Целью данной работы являлись разработка модели цифрового голографического микроскопа и проверка работоспособности, т. е. регистрация изображений. В связи с этим в ходе натурных исследований не были учтены следующие этапы:

1. Сравнение полученных результатов с помощью других оптических микроскопов.
2. Градуировка.
3. Предварительная обработка таких изображений, как удаление фона.
4. Восстановление голографических изображений.

Вышеописанные этапы планируется учесть в следующих работах авторов. В частности, с математическим аппаратом для реализации пунктов 3 и 4 можно ознакомиться по работам одного из авторов настоящей работы [5, 6, 7].

Результаты данной работы показали возможность разработки цифрового голографического микроскопа на основе разработанной модели.

Заключение

В рамках данной работы:

1. Разработана модель цифрового голографического микроскопа для исследования структур объектов в оптическом диапазоне.
2. Представлены результаты натурных исследований для дифракционной решетки с периодом $1/100$ и для эпидермальной корки луковичи.
3. Непосредственным достоинством этой схемы являются его компактность, универсальность и относительная простота сборки. Также следует отметить, что такую схему можно применить и обобщить для разработки новых методов с коротковолновыми излучениями по исследованию физико-механических свойств объектов, а также исследованию роста кристаллов.

Л и т е р а т у р а

1. Gabor D. A new microscope principle. Nature, 1948;161:777–778.
2. Egorov NV, Trofimov VV, Antonov SR, et al. Studying the Electrophysical Parameters of a Holographic Microscope. Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2014;8(4):745–747.

3. Egorov NV, Karpov AG, Antonova LI, et al. Technique for Investigating the Spatial Structure of Thin Films at a Nanolevel. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2011;5(5):992–995.
4. Latychevskaya, Longchamp JN, Escher C, Fink HW. Holography and coherent diffraction with low-energy electrons: A route towards structural biology at the single molecule level. *Ultramicroscopy*, 2015;159:395–402.
5. Fedorov AG, Trofimov VV, Karpov AG. Two-step propagation for the numerical reconstruction of holographic image. *AIP Conference Proceedings* 2528, 020043, 2022. doi: <https://doi.org/10.1063/5.0106270>
6. Федоров А. Г. Численные методы и алгоритмы восстановления голографических изображений с произвольным выбором физических размеров плоскости объекта и наблюдения / А. Г. Федоров, В. В. Трофимов, А. Г. Карпов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. – 2022. – Т. 18. – Вып. 1. – С. 99–110
7. Федоров А. Г. К вопросу об исследовании атомной структуры / А. Г. Федоров, Л. И. Антонова ; под ред. Н. В. Смирнова, Г. Ш. Тамасяна // Процессы управления и устойчивость : Труды 41-й международной научной конференции студентов и аспирантов. – Санкт-Петербург : Издат. дом СПбГУ, 2010. – С. 243–247.

References

1. Gabor D. A new microscope principle. *Nature*, 1948;161:777–778.
2. Egorov NV, Trofimov VV, Antonov SR, et al. Studying the Electrophysical Parameters of a Holographic Microscope. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2014;8(4):745–747.
3. Egorov NV, Karpov AG, Antonova LI, et al. Technique for Investigating the Spatial Structure of Thin Films at a Nanolevel. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2011;5(5):992–995.
4. Latychevskaya, Longchamp JN, Escher C, Fink HW. Holography and coherent diffraction with low-energy electrons: A route towards structural biology at the single molecule level. *Ultramicroscopy*, 2015;159:395–402.
5. Fedorov AG, Trofimov VV, Karpov AG. Two-step propagation for the numerical reconstruction of holographic image. *AIP Conference Proceedings* 2528, 020043, 2022. doi: <https://doi.org/10.1063/5.0106270>
6. Fedorov AG, Trofimov VV, Karpov AG. Numerical methods and algorithms for restoration of holographic images with arbitrary choice of physical dimensions of the object and observation plane. *Vestnik of Saint-Petersburg University. Applied mathematics. Informatics. Control processes*, 2022;18(1):99–110.
7. Fedorov AG. On the question about the study of atomic structure. *Control processes and stability: Proceedings of the 41st International Scientific Conference of Students and Postgraduates*. Saint-Petersburg: Publishing House of SPbSU, 2010:243–247.

ФЕДОРОВ Артур Григорьевич – к. т. н., доцент кафедры теоретической физики ФТИ, СВФУ.

E-mail: ag.fedorov@s-vfu.ru

Artur G. FEDOROV – Cand. Sci. (Technology), Associate Professor of the Department of Theoretical Physics, Institute of Physics and Technologies, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.

ПЛАТОНОВ Валентин Васильевич – студент 4 курса, группы БА-Ф-19-2 ФТИ, СВФУ.

Valentin V. PLATONOV – 4th year Undergraduate Student, Institute of Physics and Technologies, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.

ЖОНДОРОВА Любовь Леонидовна – студент 3 курса, группы Ф-21-1 ФТИ, СВФУ.

Lubov L. ZHONDOROVA – 3rd year Undergraduate Student, Institute of Physics and Technologies, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.

ФЕДОРОВА Любовь Константиновна – ведущий инженер кафедры теоретической физики ФТИ, СВФУ.

Lubov K. FEDOROVA – Leading Engineer of the Department of Theoretical Physics, Institute of Physics and Technologies, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.