

Волоконно-оптический безлинзовый микроскоп*Власов Н. Г., Каленков Г. С., Каленков С. Г., Штанько А. Е.*

vlasovng@rol.ru, kalenkov@mami.ru

Москва, МГТУ «МАМИ»

Описаны принципы построения безлинзовых цифровых микроскопов оптического диапазона.

Метод фазовых шагов первоначально был предложен для автоматизации интерференционных измерений на элементной базе современных цифровых средств обработки изображений, и позволил не только повысить информационную емкость измерений, но и в ряде случаев повысить их точность [1, 2].

Очень скоро стало понятно, что область применения метода значительно шире, чем предполагалось ранее. Так, еще в 1994 году в наших лекциях [3, 4] на Школе по когерентной оптике и голографии мы отметили, что в данном методе осуществляется цифровая запись волнового поля, и он является, таким образом, своеобразным компьютерным аналогом голографической записи, позволяющим осуществить все варианты голографической интерферометрии с компенсацией аберраций оптических элементов, с возможностью сравнения изделий по размерам и форме, причем информация об одном из них может задаваться математически и храниться в памяти компьютера. Было отмечено также, что на основе фазовых шагов можно обобщить известный метод фазового контраста Цернике, применявшийся в основном в микроскопии фазовых объектов, и использовать его для визуализации фазовых объектов с произвольным значением фазы. Метод фазовых шагов является также хорошей основой для решения фазовой проблемы [4, 5].

Перспективность применения голографии в микроскопии была отмечена еще Д. Габором, показавшим, что если записывать волновой фронт в электронных волнах, а восстанавливать в оптическом диапазоне, то, с учетом геометрии схемы, можно получить увеличение $\cong 10^6$. Отсутствие когерентных источников надолго задержало реализацию идей Д. Габора, однако разработка высокоразрешающих ПЗС-матриц, содержащих несколько миллионов элементов (пикселей) сделало вполне реальным развитие голографии в видимом диапазоне [6], основанное на записи голограмм на ПЗС-матрицы и на цифровом восстановлении изображений.

Перспективность названного подхода обусловлена самой природой явления дифракции: чем меньше предмет, тем больше угловые размеры его дифракционной картины. Таким образом, в дальней зоне можно получать распакованную, то есть растянутую по пространственным координатам информацию об исследуемом объекте. При согласовании, на ос-

нове теоремы отсчетов, информационной емкости картины дифракции и разрешения ПЗС-матрицы можно, после ввода полученной голограммы в компьютер, восстановить в нем изображение и вывести на монитор с соответствующим увеличением.

Недостатком такой цифровой голографической регистрации является необходимость разрешения несущей пространственной частоты, образованной интерференцией объектного и опорного волновых полей. Она должна быть сравнительно высокой для того, чтобы при восстановлении пространственно отделить информативный плюс первый от других порядков дифракции [7]. От названного недостатка свободна запись пространственных распределений амплитуды и фазы волнового поля, выполненная на основе метода фазовых шагов. Перспективность такого подхода для реализации микроскопии видимого диапазона показана в [8]. В настоящей работе будет продемонстрировано, что безлинзовые микроскопы среднего увеличения могут быть созданы на базе недорогих цифровых фотоаппаратов, в которых, как ни парадоксально, излишним и даже мешающим элементом является их объектив.

Метод регистрации амплитуды и фазы волнового поля, использованный в настоящей работе, состоит в следующем. Пусть в плоскости приемной светочувствительной матрицы накладываются два поля. Первое — объектное, получено в результате дифракции волны на структуре микрообъекта, второе представляет собой опорную сферическую волну, центр кривизны которой расположен в пределах самого объекта. Результат интерференции двух волн регистрируется матрицей. Регистрацию производят несколько раз, меняя каждый раз фазу опорной волны. В данной работе использован алгоритм записи фазы волнового поля тремя последовательными экспозициями с изменением в промежутке между ними фазы опорной волны на 120° . Фазу $\varphi(x, y)$ объектного волнового поля вычисляют с помощью простых соотношений [1]

$$\varphi(x, y) = \arctan[B(x, y)/A(x, y)],$$

где

$$\begin{aligned} A(x, y) &= 2I_1(x, y) - I_2(x, y) - I_3(x, y), \\ B(x, y) &= [I_2(x, y) - I_3(x, y)], \end{aligned}$$

I_1, I_2, I_3 — интенсивности, зарегистрированные каждым элементом приемной матрицы в ходе трех экспозиций. Дополнительно необходимо произвести проверку знака величины A .

$$\varphi = \begin{cases} \arctg[B/A], & \text{если } A > 0; \\ \arctg[B/A] + \pi, & \text{если } A < 0. \end{cases}$$

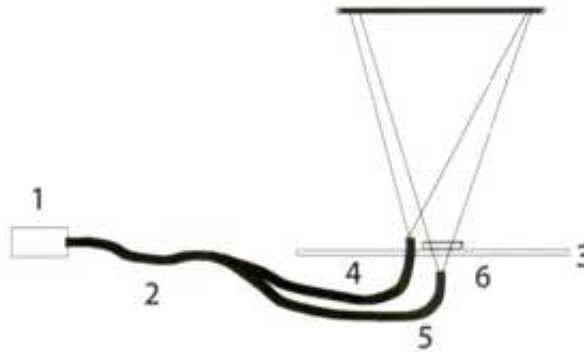


Рис. 1. Оптическая схема записи цифровых голограмм микрообъектов с использованием волоконно-оптических элементов.

Для определения амплитуды объектного поля производят еще одну, четвертую экспозицию, в ходе которой регистрируют интенсивность I_4 одной лишь объектной волны (опорную волну перекрывают непрозрачным экраном). Распределение амплитуды объектного поля находят как $\sqrt{I_4(x, y)}$.

Описанный метод регистрации волнового поля был реализован с помощью устройства, основанного на обычных оптических элементах, входящих в комплект оптической скамьи [9, 10]. В настоящем докладе описан безлинзовый цифровой микроскоп на световодах. Устройство состоит из источника когерентного излучения, оптически сопряженной с ним системы световодов, формирующих две когерентные сферические волны, предметного столика и регистрирующей приемной матрицы. Источником излучения служит одномодовый полупроводниковый лазер ближнего ИК диапазона.

Система формирования двух когерентных сферических волн выполнена из одномодового световода 2 с разветвителем Y-типа. Излучающие торцы световодов располагаются у предметного стекла 3. Торце 4, пропущенный через отверстие в предметном стекле, излучает опорную волну. Излучение, исходящее из другого торца 5, расположенного под предметным стеклом, проходит через объект 6, лежащий на стекле 3, и образует объектную волну. Обе волны попадают на приемную матрицу 7, расположенную над предметным стеклом. Устройство снабжено юстирующими приспособлениями, позволяющими плавно изменять взаимное расположение излучающих торцов световодов. Одно из изображений, восстановленное с помощью обратного преобразования Фурье, приведено на Рис. 2

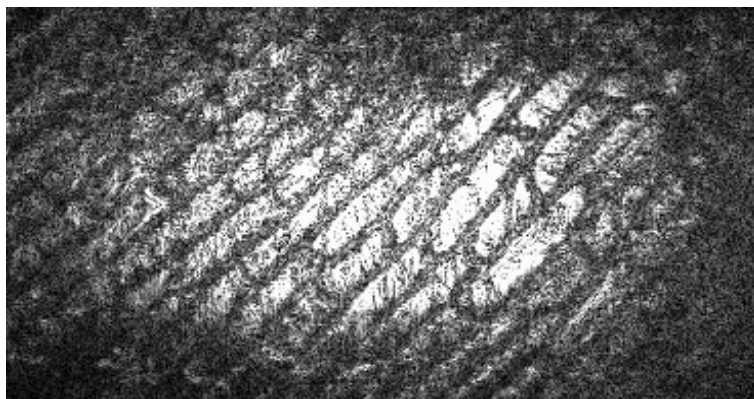


Рис. 2. Восстановленное изображение клеток лука.

В работах [9–14] представлены результаты наших последних исследований по цифровой микроскопии и её применениям.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 06-07-89304.

Литература

- [1] Reid G. T. Automatic Fringe Pattern Analysis // A Review, Optics and Lasers Engineering — 1986. — V. 7. — Pp. 53–68.
- [2] Ryszard T. Review of methods for automatic analysis of fringes in hologram interferometry // SPIE, Interferometric Metrology — 1987. — V. 816. — Pp. 140–148.
- [3] Власов Н. Г., Штанько А. Е. Метод фазовых шагов // 23-я Школа по когерентной оптике и голографии — 1995. — С. 5–11.
- [4] Власов Н. Г., Каленков С. Г., Сажин А. В. Решение фазовой проблемы на основе модифицированного метода фазового контраста и фазовых шагов // 23-я Школа по когерентной оптике и голографии — 1995. — С. 13–16.
- [5] Vlasov N. G., Kalenkov S. G., Sazhin A. V. Solution of phase problem // Laser phys.
- [6] Marron J. C., Schioeder K. C. // Appl. Opt. — 1992. — V. 31. — P. 255.
- [7] Кольер Р., Беркхарт К. Оптическая голография. — М.: Мир, 1973. — 686 с.
- [8] Yamaguchi I., Kato J., Ohta S., Mizuno J. Image formation in phase-shifting digital microscopy // Appl. Opt. — 2001. — V. 40. № 34. — Pp. 6177–6186.
- [9] Vlasov N. G., Kalenkov S. G., Krilov D. V., Shtanko A. E. Non-lens Digital Microscopy // Proceedings of SPIE — 2005. — V. 40. — Pp. 158–163.
- [10] Каленков С. Г., Власов Н. Г., Крылов Д. В., Штанько А. Е. Безлинзовая цифровая микроскопия // Естественные и технические науки — 2004. — Т. 3. № 12. — С. 117–120.

- [11] *Власов Н. Г., Дугин В. В., Каленков С. Г.* Новый подход к улучшению продольного разрешения оптических систем // Сб. тр. Научн. сессии МИФИ — 2004. — № 4. — С. 240–242.
- [12] *Власов Н. Г., Штанько А. Е.* Ассоциативная память с произвольной опорной волной // Сб. тр. Научн. сессии МИФИ — 2005. — Т. 4. — С. 240–241.
- [13] *Власов Н. Г., Штанько А. Е., Воробьев С. П.* Способ голографической защиты от подделки малотиражных документов // Голография ЭКСПО-2005 — 2005. — С. 25–26.
- [14] *Власов Н. Г., Каленков Г. С., Штанько А. Е.* Одномерный метод фазовых шагов // Научн. конф. МГТУ «Станкин» — 2005. — С. 229–231.