

УДК 535

DOI: 10.33764/2618-981X-2019-8-139-148

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПРЕЦИЗИОННЫХ ДАТЧИКОВ ПОЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ ЛАЗЕРНОГО СИНТЕЗА МИКРО- И НАНОСТРУКТУР

Марина Андреевна Завьялова

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, научный сотрудник, тел. (383)306-58-66, e-mail: mzav@tdisie.nsc.ru

Петр Сергеевич Завьялов

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, кандидат технических наук, зав. лабораторией, директор, тел. (383)306-62-24, e-mail: zavyalov@tdisie.nsc.ru

Марк Владимирович Савченко

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, программист, тел. (383)306-59-40, e-mail: savchenko_mark@bk.ru

В статье представлены особенности проектирования прецизионных бесконтактных датчиков положения для оперативного контроля высокоскоростного лазерного синтеза микро- и наноструктур. В результате программного моделирования датчика автофокусировки на основе асимметрии волнового фронта зондирующего излучения установлено влияние положения ножа Фуко на рабочий диапазон, который может быть увеличен в 10 раз. Расчет и оптимизация волоконного конфокального датчика на основе метода хроматического кодирования показали, что погрешность определения положения поверхности может быть снижена в несколько раз за счет введения в его схему специальной аподизирующей маски.

Ключевые слова: датчик положения, микроструктурирование поверхности, метод Фуко, конфокальный метод.

FEATURES OF DESIGNING OPTICAL PRECISION POSITION SENSORS FOR OPERATIONAL CONTROL OF LASER SYNTHESIS OF MICRO AND NANOSTRUCTURES

Marina A. Zavyalova

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, 41, Russkaya St., Novosibirsk, 630058, Russia, researcher, phone: (383)306-58-66, e-mail: mzav@tdisie.nsc.ru

Petr S. Zavyalov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, 41, Russkaya St., Novosibirsk, 630058, Russia, Ph. D., Head of Laboratory, Director, phone: (383)306-62-24, e-mail: zavyalov@tdisie.nsc.ru

Mark V. Savchenko

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, 41, Russkaya St., Novosibirsk, 630058, Russia, Programmer, phone: (383)306-59-40, e-mail: savchenko_mark@bk.ru

The design features of precision contactless position sensors for the operational control of high-speed laser synthesis of micro- and nanostructures is described. As a result of software simulation of the autofocus sensor based on the asymmetry of the wave front of the probing radiation, the influence of the Foucault knife position on the working range, which can be increased 10 times, has been established. The calculation and optimization of the fiber confocal sensor based on the chromatic coding method showed that the error in determining the surface position can be reduced several times by introducing a special apodizing mask into its scheme.

Key words: position sensor, surface microstructuring, Foucault method, confocal method.

Введение

Задача систем автоматической фокусировки излучения на рабочих поверхностях заключается в совмещении без участия глаза оператора плоскости наилучшей фокусировки лазерного пучка с поверхностью обрабатываемой детали [1–3]. Как правило, такие системы используются в лазерных технологических установках с короткофокусным объективом и состоят из чувствительного элемента – датчика расстояния и привода, смещающего объектив. Так же в их состав входит пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД) регулятор – устройство с обратной связью, которое формирует управляющий сигнал, являющийся суммой трех слагаемых: первое пропорционально разности входного сигнала и сигнала обратной связи (сигнал рассогласования), второе – интеграл сигнала рассогласования, третье – производная сигнала рассогласования. Системы автоматической фокусировки обеспечивают высокоскоростное зондирование поверхности и за счет обратной связи позволяют обеспечивать постоянный зазор между объективом и поверхностью [4]. Важной особенностью таких систем является повышение требований к датчикам с ростом апертуры фокусирующего объектива. К тому же задача проектирования усложняется для случаев записи дифракционной структуры на трехмерных поверхностях, что актуально на данном этапе развития высокотехнологичной элементной базы [5–8]. Наиболее важными требованиями, предъявляемыми к датчикам автофокусировки, являются высокое быстродействие (до 1 МГц) и разрешение (погрешность должна быть снижена до 0,1–0,01 мкм). Кроме того, для двухканальных вариантов лазерных комплексов необходим новый подход к проектированию таких датчиков, позволяющий увеличить рабочий диапазон до нескольких десятков микрометров. Это связано с тем, что любой микрообъектив имеет хроматическую aberrацию и при использовании двух длин волн, например, в видимом и ИК-диапазонах, фокальные плоскости могут быть существенно разнесены. Коммерческие прецизионные датчики, позволяющие определять положение поверхности с необходимой точностью [9–12], не могут быть внедрены в лазерные технологические установки с короткофокусным объективом. Это связано с тем, что его рабочий отрезок составляет всего 0,7 мм и менее, а зондирующее излучение необходимо направлять через тот же объектив, что и записывающий пучок. Толчком к развитию новых методов послужила высокоразрешающая конфокальная микроскопия [13]. При применении конфокаль-

ного метода в оптической схеме датчика автофокусировки удалось существенно расширить его диапазон – до сотен микрометров при значительном увеличении его точности.

Целью работы является исследование оптимальных режимов работы прецизионного бесконтактного датчика на основе метода ножа Фуко для контроля положения обрабатываемых поверхностей в ходе лазерных технологических процессов, а так же расчет и оптимизация измерительной схемы конфокального датчика на основе метода хроматического кодирования, исследование влияния параметров схемы на погрешность измерений.

Датчик автофокусировки на основе метода ножа Фуко

Датчик автофокусировки на основе ножа Фуко относится к оптическим бесконтактным датчикам и позволяет контролировать положение обрабатываемой поверхности в ходе лазерных технологических процессов при скорости ее вращения до 30 об./сек. Принцип действия, подробно описанный в [14, 15] основан изменении уровня отраженного зондирующего сигнала при смещении поверхности за счет введения в оптическую схему асимметрии с помощью непрозрачного ножа Фуко с резким краем. При перекрытии пучка на двухэлементном фотоприемнике возникает сигнал, пропорциональный смещению поверхности заготовки относительно фокальной плоскости рабочего микрообъектива.

С целью оптимизации рабочего диапазона датчика были проведены его расчет и моделирование с помощью программного пакета для проектирования оптических систем Zemax. Модель двухэлементного фотоприемника была реализована путем специальной программной расшивки дифракционного изображения с помощью инструмента Diffraction Image Analysis, в котором для вычисления изображения на выходе оптической системы используется функция Optical Transfer Function (OTF). OTF учитывает дифракционные эффекты, влияющие на формирование изображения. Обработка данных позволила по-

строить аналитическую модель разностного сигнала $I_{\text{раз}} = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}$ (где I_1 и I_2 – сила тока в мкА с K_1 и K_2 элементов фотоприемника). Для этого полученное изображение экспортировалось в программный пакет Excel, производилась его обработка – отдельно вычислялось среднее значение яркости в верхней части матрицы данных и отдельно – в нижней. Тем самым моделировалась работа двухэлементного фотоприемника, в котором измеряются два сигнала I_1 и I_2 . По полученным значениям I_1 и I_2 вычислялся результирующий сигнал $I_{\text{раз}}$.

В результате программного моделирования были выявлено влияние на диапазон измерения положения ножа Фуко, а именно расстояния L между ножом и рабочим микрообъективом (рис. 1, а). На рис. 1 (б, в) показан ход лучей в случае смещения поверхности заготовки к рабочему микрообъективу (б) и от него (в).

Видно, что в зависимости от расходимости пучка, излучение фокусируется либо на верхней, либо на нижней части двухэлементного фотоприемника.

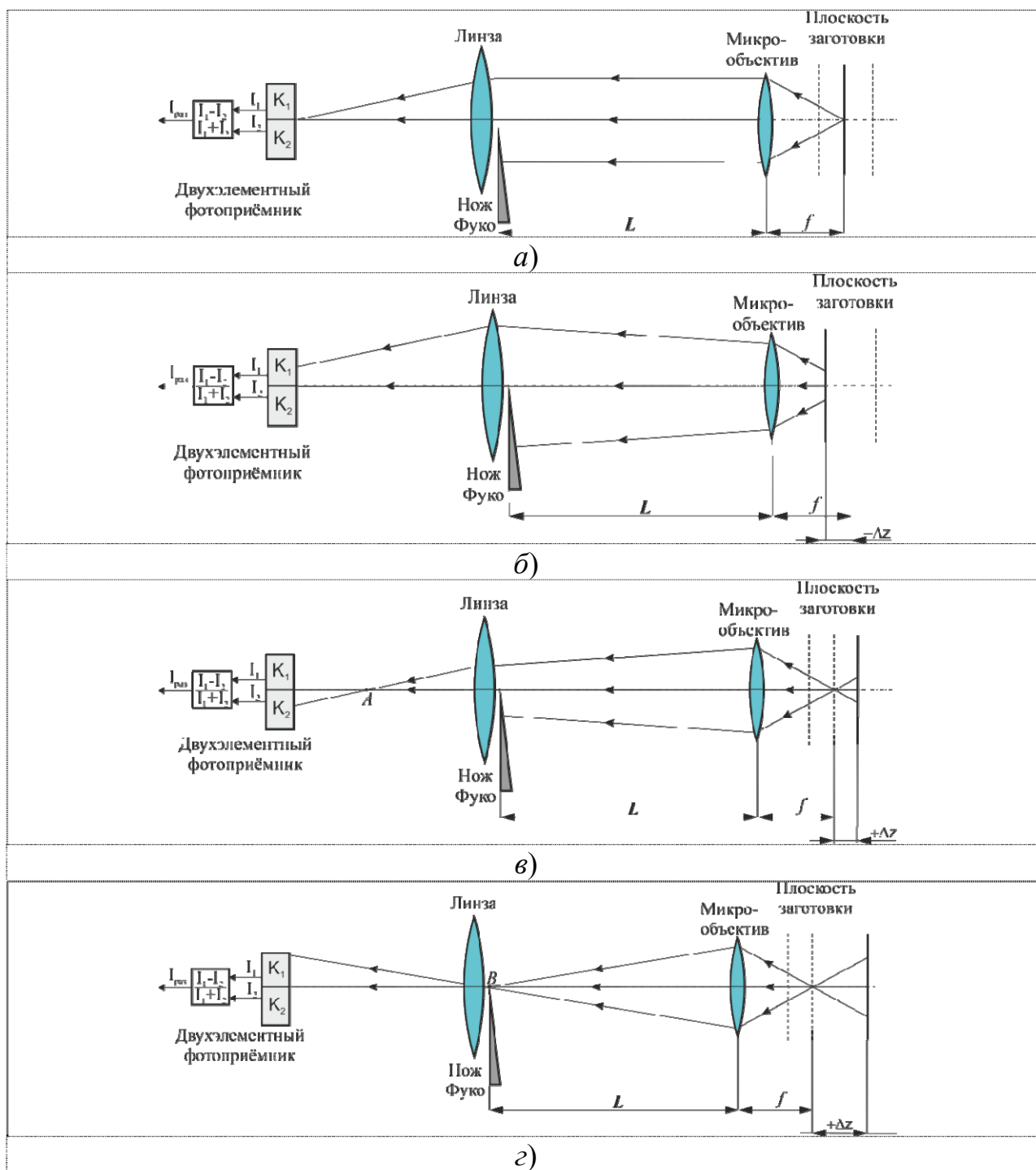


Рис. 1. Обратный ход лучей в схеме датчика положения на основе метода ножа Фуко при различных смещениях плоскости заготовки относительно фокальной плоскости микрообъектива:

а) без смещения; б) смещение плоскости заготовки к микрообъективу; в) смещение плоскости заготовки от микрообъектива; з) смещения плоскости заготовки от микрообъектива при $\Delta z = 200$ мкм

Однако, при больших смещениях поверхности в направлении от микрообъектива $+\Delta z$ пучок после объектива может сфокусироваться в плоскости ножа Фуко и далее – на верхнем квадранте K_1 (рис. 1, z). Это приведет к инверсии сигнала и ошибочному определению направления смещения, поскольку в этом случае $I_1 > I_2$. Поэтому для увеличения рабочего диапазона нож Фуко нужно располагать как можно ближе к микрообъективу, либо уменьшать расстояние между линзой и микрообъективом. Например, расчеты показали, что при уменьшении этого расстояния со 180 мм (такое расстояние изначально было заложено при проектировании круговых лазерных систем [4]) до 50 мм рабочий диапазон L увеличивается в 10 раз (с 20 мкм до 200 мкм). Вблизи рабочего микрообъектива поместить нож Фуко достаточно проблематично ввиду расположения там оптических элементов для прохождения записывающего лазерного пучка.

Оценка погрешности автофокусировки производилась по величине сигнала рассогласования системы автофокусировки (АФ). На рабочем столе шпинделя с помощью вакуумного прижима была закреплена стандартная стеклянная подложка ППХ 102×102А ТУ11–79. С помощью индикаторной головки на радиусе 45 мм измерялся полный размах биения поверхности подложки за один оборот шпинделя. Подложка юстировалась таким образом, чтобы величина этих биений L была в пределах ± 5 мкм. Затем шпиндель раскручивался до скорости 10 об./сек. Сначала измерялся размах сигнала рассогласования $\Delta Diff = V_1$ с выхода ДАФ при отключенной системе АФ. Как видно из рис. 2 $V_1 = 2\,300$.

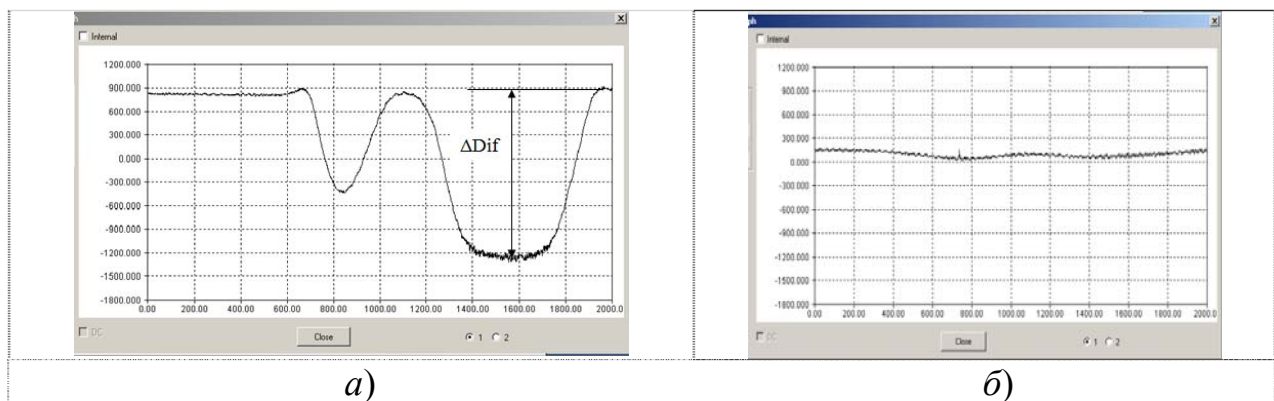


Рис. 2. Амплитуда сигнала рассогласования $\Delta Diff$ с выхода датчика автофокусировки:

а) при отключенном ПИД-регуляторе; б) при включенном ПИД-регуляторе

Затем включался регулятор системы ДАФ и снова измерялся размах сигнала рассогласования $\Delta Diff = V_2$. Как видно из рис. 2, б, значение составило $V_2 = 150$. Погрешность автофокусировки ΔAF в мкм вычислялась как $\Delta AF = L * V_2 / V_1$ и составила $\Delta AF = 0,2$ мкм.

Волоконный конфокальный датчик на основе метода хроматического кодирования

Оптические бесконтактные конфокальные датчики контроля положения оценивают спектральное распределение интенсивности оптических сигналов, отраженных от измеряемых поверхностей [16–18]. Для этих целей используется полихроматический зондирующий сигнал в сочетании с гиперхроматическими объективами (ГХО) [19], которые фокусируют спектральные компоненты на различных расстояниях вдоль направления распространения света. Использование специальной точечной (или конфокальной) диафрагмы, ограничивающей поток фонового рассеянного света из точек вне фокальной плоскости объектива, позволяет выделить излучение с узким спектром, в котором центральная длина волны является хроматическим кодом расстояния до поверхности, а ее изменение пропорционально смещению поверхности. В работе [20] было показано, что введение дополнительной аподизирующей маски в оптическую схему ГХО позволяет уменьшить в три раза ширину спектрального распределения выходного сигнала при падении его уровня в 2,5 раза за счет фильтрации узкой области выходного зрачка, в котором распространяется полихроматический сигнал. Тем самым, согласно теоретическому моделированию, можно повысить продольное разрешение конфокального датчика.

Для экспериментального подтверждения данных моделирования датчика была разработана схема, представленная на рис. 3.

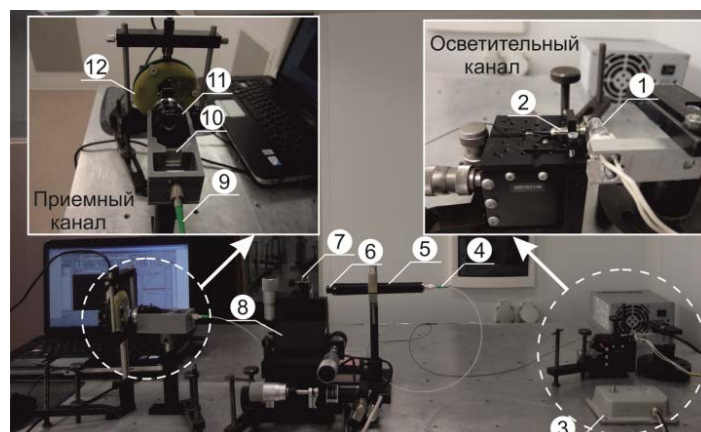


Рис. 3. Внешний вид волоконного конфокального датчика на основе метода хроматического кодирования:

1 – галогенная лампа DL150 (Dedolight, Германия); 2, 4, 9 выходы волоконного каплера FCMM50-50A-FC (Thorlabs, Германия); 3 – устройство для контроля эффективности ввода излучения в волокно (КТИ ИП СО РАН, г. Новосибирск); 5 – головка конфокального датчика; 6 – гиперхроматический объектив (КТИ ИП СО РАН, г. Новосибирск); 7 – держатель KM100CL (Thorlabs, Германия) с тестируемым образцом; 8 – трехкоординатный столик ZSS 33.200.1.2 (Phytron, Германия); 10 – дифракционная решетка GT13-06V (Thorlabs, Германия); 11 – объектив MVL25M23 (Navitar, Япония); 12 – видеокамера КЦ-1310 (КТИ ИП СО РАН, г. Новосибирск)

Свет от галогенной лампы (1) DL150 (Dedolight, Германия) собирается в торец (2) волоконного каплера FCMM50-50A-FC (Thorlabs, Германия) с диаметром сердечника 50 мкм и числовой апертурой $NA = 0,22$. Для контроля эффективности ввода света в волокно разработано устройство (3), позволяющее измерять мощность потока на одном из его выходов (4). Свет в волокне проходит через светоделитель в каплере (место спайки двух волокон), часть его направляется на выход волокна (4) в головку волоконного конфокального датчика (5). ГХО (фокусное расстояние – 24 мм, увеличение – $0,2^{\times}$) фокусирует излучение в линию спектрально разделенных фокусов длиной 300 мкм. Один из фокусов совпадает с плоскостью тестируемого образца (7), который смещается с помощью трехкоординатного столика ZSS 33.200.1.2 и контролируется интерферометром (модель RLE-10-SX-CX, RENISHAW).

Отраженный или обратно рассеянный свет проходит ГХО второй раз, и только одна длина волны в фокусе тестируемой поверхности фокусируется на торец волокна (4). Свет этой длины волны эффективно вводится в волокно, тогда как все другие длины волн подвергаются расфокусировке и сильному ослаблению. Длина волны прошедшего света является кодом расстояния между ГХО и тестируемым образцом. После прохождения каплера спектральное распределение мощности сигнала анализируется в приемном канале, состоящем из дифракционной решетки (10) GT13-06V с разрешением 600 линий/мм (Thorlabs, Германия), объектива (11) MVL25M23 (Navitar, Япония) с фокусным расстоянием 25 мм и относительным отверстием 1,4, а также видеокамеры (12) КЦ-1310 (КТИ НП СО РАН, г. Новосибирск) на базе монохромных матриц фирмы Micron с разрешением 1280×1024 пикселей. Спектральное распределение мощности при смещении тестируемого образца (7) регистрируется и обрабатывается (вычитается фоновое значение спектральной мощности сигнала).

Дальнейшая обработка состоит из трех этапов. На первом этапе результат вычитания обрабатывается размытием по Гауссу (длина ядра 3, ширина ядра 5, сигма 2). Размытие применяется для снижения влияния шумов на исходный результат. На втором этапе происходит вычитание заданной константы для выделения значимых пикселей. Значение константы, используемое в экспериментах, равно 18. На третьем этапе применяется алгоритм выделения пика. Всего было исследовано три алгоритма: поиск ярчайшей точки, центр масс и линейная аппроксимация дифференциального сигнала. Полученные координаты пика используются для оценки погрешности измерений.

Алгоритм поиска ярчайшей точки берет в качестве пика самый яркий пиксель из имеющихся. Из-за отсутствия какой-либо дальнейшей обработки является самым быстрым из имеющихся алгоритмов, но при этом повышается погрешность измерения.

Алгоритм поиска центра масс принимает за пик центр масс яркостей пикселей, вычисленный по формуле $r_c = \frac{\sum m_i \times r_i}{\sum m_i}$, где r_c – координаты центра масс,

r_i – координаты пикселя, m_i – яркость пикселя. Данный алгоритм несколько медленнее алгоритма поиска ярчайшей точки, но при этом его точность выше.

Алгоритм линейной аппроксимации дифференциального сигнала (LFDS) выполняется в три этапа. На первом этапе вычисляется разностная аппроксимация первой производной по формуле $\frac{df(x)}{dx} = \frac{f(x + \Delta) - f(x - \Delta)}{2\Delta}$, где $\frac{df(x)}{dx}$ – значение производной в точке x , $f(x)$ – значение функции в точке x , d – шаг аппроксимации. Затем полученный массив значений производных в точках используется для линейной аппроксимации методом наименьших квадратов. И наконец, на третьем этапе, вычисляется координата точки пересечения полученной прямой с нулем, которая и является искомым пиком. Данный алгоритм самый трудоемкий по времени из всех представленных, однако его точность при этом является лучшей.

В результате экспериментальных исследований установлено, что использование аподизирующей маски позволяет снизить погрешность измерения расстояния до поверхности в три и более раз. При отсутствии аподизирующей маски в центральной части ГХО среднеквадратичное отклонение (СКО) составляет 0,9 мкм в линейном измерительном диапазоне 225 мкм. Введение аподизирующей маски диаметром 0,2D (D – диаметр ГХО), СКО уменьшается до 0,29 мкм при сокращении линейного диапазона до 120 мкм.

Обсуждение результатов

В результате программного моделирования оптической схемы датчика автоматической фокусировки с введенным астигматизмом пучка в программе для проектирования оптических систем Zemax установлено, что к инверсии разностного сигнала на фотоприемнике и ошибочному определению смещения приводит фокусировка излучения в плоскости ножа Фуко. Показано, что путем изменения расстояния между ножом Фуко и рабочим микрообъективом можно увеличить рабочий диапазон датчика в 10 раз. Проведено исследование погрешности определения положения поверхности данным датчиком, которое составило 0,2 мкм при скорости вращения заготовки 10 оборотов/с.

Для волоконного конфокального датчика с хроматическим кодированием установлено, что использование аподизирующей маски диаметром 0,2D позволяет повысить продольное разрешение в 3 раза при сокращении линейного измерительного диапазона в ~ 2 раза.

Заключение

В настоящее время в КТИ НП СО РАН разработана линейка оптических прецизионных датчиков для оперативного контроля лазерного синтеза микро- и наноструктур: датчик на основе метода ножа Фуко [10] и волоконный конфокальный датчик на основе хроматического кодирования [12]. Они выполняют

функции по удержанию обрабатываемой поверхности в процессе высокоскоростной обработки (до 10 м/с) с погрешностью менее 0,2 мкм и менее в измерительном диапазоне 100–300 мкм. Кроме того, конфокальный датчик позволяют выполнять как прецизионное позиционирование исполнительных элементов для формирования микро- и наноструктур высокого качества с глубиной до нескольких десятков микрометров, так и измерение их профиля. Его внедрение в лазерные комплексы позволит повысить как разрешающую способность, так и расширить их функционал.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. J. Luo, Y. Liang, G. Yang. Dynamic scan detection of focal spot on nonplanar surfaces: theoretical analysis and realization // *Optical Engineering*. – 2011– 50 (7). – P. 073601.
2. Daniela Radtke and Uwe D. Zeitner. Laser-lithography on non-planar surfaces // *OPTICS EXPRESS*. – 2007. – Vol. 15, № 3.
3. Taisheng Wang, Weixing Yu, Dengying Zhang, et al.,—Lithographic fabrication of diffractive optical elements in hybrid sol-gel glass on 3-D curved surfaces // *Optics Express*. – 2010. – Vol. 18, issue 24. –P. 25102–25107.
4. Круговая лазерная записывающая система для формирования фазовых и амплитудных микроструктур на сферических поверхностях / А. Г. Верхогляд, М. А. Завьялова, А. Е. Каличкин, С. А. Кокарев, В. П. Корольков // *Датчики и системы*. – 2015. – № 9–10. – С. 45–52.
5. Налимов А. Г., Ковалев А. А., Котляр В. В., Сойфер В. А. Моделирование трехмерного устройства нанофотоники для ввода излучения в планарный волновод // *Компьютерная оптика*. – 2009. – Т. 33, № 1. – С. 4–9.
6. H. C. Ko, M. P. Stoykovich, J. Song, V. Malyarchuk, W. M. Choi, C.-J. Yu, J. B. Geddes 3rd, J. Xiao, S. Wang, Y. Huang, and J. A. Rogers. A hemispherical electronic eye camera based on compressible silicon optoelectronics // *Nature*. –2008. – 454 (7205). – P. 748–753.
7. K.-H. Jeong, J. Kim, and L. P. Lee. Biologically inspired artificial compound eyes // *Science*. – 2006. – 312 (5773). – P. 557–561.
8. Грейсук Г. И., Ежов Е. Г., Сидякина З. А., Степанов С. А. Высокоэффективные рельефно-фазовые дифракционные элементы на криволинейных поверхностях вращения // *Компьютерная оптика*. – 2013. Т. 37, № 1. – С. 45–50.
9. Tiziani H. J., Wegner M., Steudle D. Confocal principle for macro- and microscopic surface and defect analysis // *Opt. Eng.* – 2000. – Vol. 39, № 1. – P. 32–39.
10. Шпейзман В. В., Песчанская Н. Н. Использование интерферометрического метода измерения величины и скорости перемещений для неразрушающего контроля материала // *Физика твердого тела*. – 2007. – Т. 49, № 7. – С. 1201–1205.
11. <https://riftek.com/ru/products/~show/sensors/laser-triangulation-sensor>.
12. <https://teko-com.ru/katalog/opticheskie-datchiki/>.
13. Handbook of Biological Confocal Microscopy / J.B. Pawley. – 3rd ed. – Berlin : Springer, 2006. – P. 985. – ISBN 0-387-25921-X. – DOI:10.1007/978-0-387-45524-2.
14. Handbook of Optics. MacGraw-Hill Companies, Inc. – 1995. – Vol. VI. – P. 31.
15. Верхогляд А. Г., Завьялова М. А., Корольков В. П. Датчик автоматической фокусировки для круговых лазерных записывающих систем // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2014» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.)*. – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 1. – С. 117–122.
16. Ruprecht, C. Pruss, H.J. Tiziani, W. Osten, P. Lücke, A. Last, J. Mohr, P. Lehmann: Confocal microoptical distance-sensor: principle and design / *SPIE Proceedings. Optical Measurement Systems for Industrial inspection*. – 2005. –Vol. 5856. – P. 128–135.

17. Tiziani H. J., Wegner M., Steudle D. Confocal principle for macro- and microscopic surface and defect analysis // *Opt. Eng.* – 2000. – Vol. 39, № 1. – P. 32–39.
18. Разработка конфокального датчика 3D поверхности на основе метода дифракционного хроматического кодирования для целей терагерцовой спектроскопии / А. Г. Верхогляд, М. А. Завьялова, Б. А. Князев, М. А. Макаров, М. Ф. Ступак // *Сибирский физический журнал*. – 2010. – Т. 5, № 4. – С. 117–122.
19. Завьялова М. А., Завьялов П. С. Моделирование и расчет гиперхроматических объективов для волоконных конфокальных датчиков поверхности на основе метода хроматического кодирования // *Фотоника*. – 2017. № 5 (65). – С. 80–90. – DOI: 10.22184/1993-7296.2017.65.5.80.90.
20. Завьялова М. А., Завьялов П. С., Елесин А. Г. Повышение разрешения волоконного конфокального датчика поверхности на основе метода хроматического кодирования // *Приборы*. – 2018. – № 11. – С. 1–5.

© М. А. Завьялова, П. С. Завьялов, М. В. Савченко, 2019