

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ДЛИНЫ КОГЕРЕНТНОСТИ В ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ ЧАСТИЧНО КОГЕРЕНТНОГО СВЕТА

Евгений Владимирович Сысоев

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, научный сотрудник тел. (383) 306-62-12, e-mail: evsml@mail.ru

Родион Владимирович Куликов

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, научный сотрудник тел. (383) 306-62-12, e-mail: rstalcker@ngs.ru

Сынару Артуровна Сыева

Новосибирский государственный технический университет, 630087, Россия, г. Новосибирск, ул. Немировича-Данченко, 136, студент, e-mail: evsml@mail.ru

Исследовано влияние числовой апертуры оптической системы микроинтерферометра Линника на контраст интерферограмм. Показано, что увеличение числовой апертуры приводит к уменьшению эффективной длины когерентности. Приведены результаты моделирования и натуральных экспериментов.

Ключевые слова: длина когерентности, интерферометр Линника, интерференция света, частично-когерентный свет

THE EFFECTIVE COHERENCE LENGTH DEFINITION IN PARTIALLY COHERENT LIGHT INTERFEROMETER

Evgeny V. Sysoev

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 41, Russkaya St., Novosibirsk, 630058, Russia, Senior Researcher, phone: (383) 306-62-12, e-mail: uic@ngs.ru

Rodion V. Kulikov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 41, Russkaya St., Novosibirsk, 630058, Russia, Researcher, phone: (383) 306-62-12, e-mail: rstalcker@ngs.ru

Synaru A. Syeva

Novosibirsk State Technical University, 136, Nemirovich-Danchenko St., Novosibirsk, 630087, Russia, student, e-mail: evsml@mail.ru

The influence of numerical aperture of the Linnik interferometer optical system on the interferogram contrast was investigated. It was shown that the numerical aperture growth leads to effective coherence length decreasing. The modeling and full-scale experiments results were presented.

Keywords: coherence length, Linnik interferometer, light interference, partially coherent light.

Введение

Интерференционные системы широко используются для высокоточных измерений в различных областях науки, метрологии и промышленного производства. При проектировании таких систем решается много задач по учету различных факторов, влияющих на снижение погрешности измерений. К одним из них можно отнести выбор подходящего источника света и его свойств, таких как эффективная длина волны и временная когерентность (длина когерентности).

Длина когерентности источника света определяет диапазон измерения в методах фазосдвигающей интерферометрии [1, 2]. В методах вертикально сканирующей интерферометрии, к которым относится метод дифференциальных интерферограмм [3, 4], длина когерентности определяет толщину слоя когерентности. Например, в работе [5] было показано, что чем больше длина когерентности, тем больше погрешность измерений, выполняемых методом дифференциальных интерферограмм.

В данной работе рассматривается влияние числовой апертуры оптической системы микроинтерферометра Линника [6] на результат интерференции частично когерентного света.

Теоретическая часть

На рис. 1 показана схема микроинтерферометра Линника. В процессе измерения производится перемещение основной части интерферометра относительно поверхности измеряемого объекта. Это приводит к тому, что диаметр пятна света, формируемого микрообъективом, увеличивается (рис. 2).

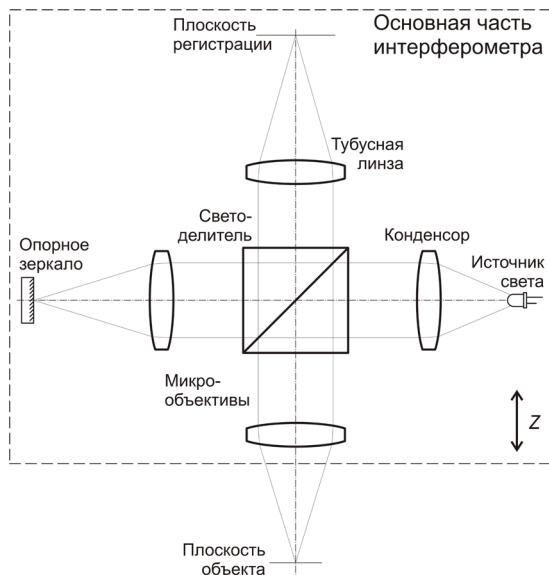


Рис. 1. Схема микроинтерферометра Линника

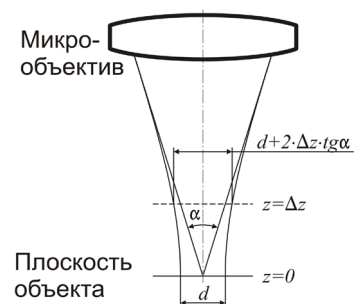


Рис. 2. Изменение диаметра пятна света, формируемого микрообъективом

В результате изменяется не только оптическая разность хода света, но и соотношение интенсивностей между опорным и измерительным плечом, что ведет к падению амплитуды регистрируемого интерференционного сигнала. Таким образом, эффективная длина когерентности, которую можно измерить по полученному интерференционному сигналу, будет отличаться от исходной длины когерентности используемого в интерферометре источника света. Соответственно, это отличие будет тем сильнее, чем больше величина числовой апертуры микробъективов интерферометра.

Для проверки исследуемого влияния, была реализована программная модель формирования интерференции частично когерентного света. В основе модели используется выражение (1), которое описывает зависимость интенсивности света от оптической разности хода между интерферирующими пучками света:

$$I(z, \lambda, l_c, NA) = \frac{I_1}{s(\lambda, NA)} + \frac{I_2}{S(\lambda, NA, z)} + 2 \cdot \sqrt{\frac{I_1}{s(\lambda, NA)} \cdot \frac{I_2}{S(\lambda, NA, z)}} \cdot \exp\left[-\left(2 \cdot \sqrt{\ln 2} \cdot \frac{z}{l_{\text{коз}}}\right)^2\right] \cdot \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} \cdot z\right), \quad (1)$$

где $s(\lambda, NA) = 0,25\pi \cdot d^2(\lambda, NA)$ – площадь дифракционного пятна в опорном плече, $S(\lambda, NA, z) = \pi \cdot 0,25 \left(d(\lambda, NA) + \left| 2 \cdot z \cdot \text{tg}(0,5 \cdot \arcsin(NA)) \right| \right)^2$ – площадь дифракционного пятна в измерительном плече, $d(\lambda, NA) = \lambda / (2NA)$ – диаметр дифракционного пятна. В приведённом выше выражении I – интенсивность интерференции света, I_1 – интенсивность опорного плеча интерферометра, I_2 – интенсивность измерительного плеча интерферометра, z – оптическая разность хода света между опорным и измерительным плечом, λ – эффективная длина волны, используемого в интерферометре источника света, $l_{\text{коз}}$ – исходная длина когерентности источника света, NA – числовая апертура микробъектива.

Первые два слагаемых выражения (1) описывают освещенность участка поверхности в опорном и измерительном плече, соответственно. Первое слагаемое показывает, что плоскость опорного зеркала находится в рабочей плоскости микробъектива. Второе слагаемое отражает тот факт, что освещенность в измерительном плече зависит от z , и в плоскость регистрации с участка измеряемой поверхности может приходиться отличное от опорного плеча количество света (рис. 2).

Используя выражение (1), для заданных параметров моделирования формируется массив значений интерференционного сигнала. На рис. 3 показан результат формирования интерференционного сигнала в диапазоне $z \in [-10; 10]$ мкм с шагом $\Delta z \approx 20$ нм для $\lambda = 467,18$ нм, $l_{\text{коз}} = 4,5$ мкм для $NA = 0,15$, $NA = 0,3$ и $NA = 0,45$ при $I_1 = I_2 = 1$. Эффективная длина когерентности $l_{\text{эф}}$ определяется как ширина интерференционного сигнала на полувысоте огибающей интерферо-

граммы. В данном примере эффективная длина когерентности $l_{эф}$ при числовых апертурах микрообъектива $NA = 0,15; 0,3; 0,45$ составила соответственно 3,8 мкм; 2,7 мкм и 1,7 мкм.

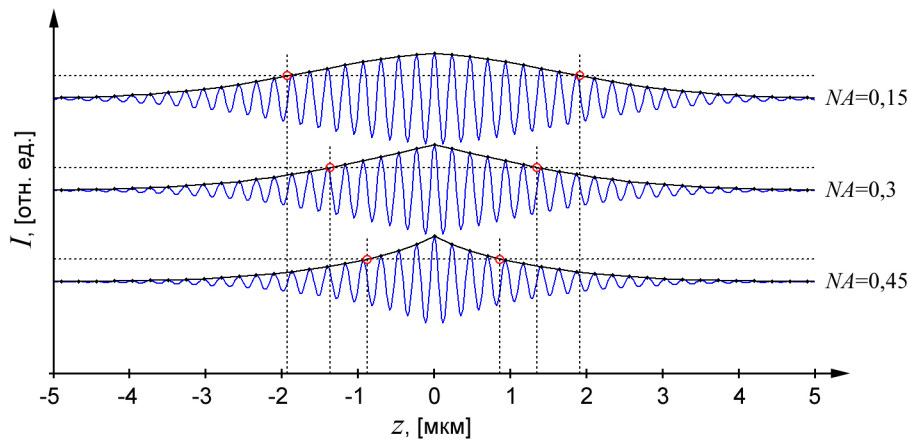


Рис. 3. Моделирование интерференционного сигнала. Изменение эффективной длины когерентности для числовых апертур $NA = 0,15$, $NA = 0,3$ и $NA = 0,45$

На рис. 4 показана полученная в процессе моделирования зависимость эффективной длины когерентности от числовой апертуры в диапазоне от 0,05 до 0,95 с шагом 0,05.

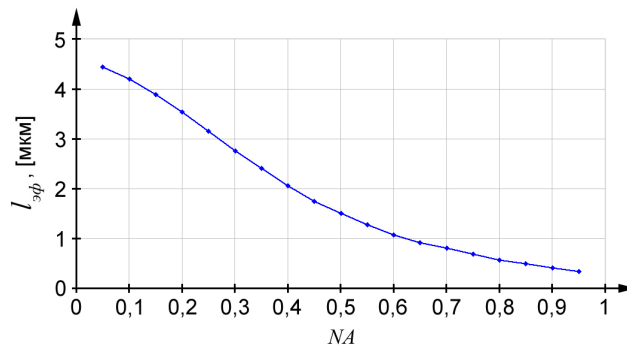


Рис. 4. Зависимость изменения эффективной длины когерентности для синего светодиода ($\lambda = 467,18$ нм) от NA в программной модели

Полученная зависимость показывает, что с увеличением NA эффективная длина когерентности уменьшается.

Эксперимент

Натурные эксперименты проводились для трех источников света – светодиода с длинами волн $\lambda = 467,18$ нм, $\lambda = 534,47$ нм, $\lambda = 630$ нм. Интерферометр, каждый раз перенастраивался на новую пару микрообъективов. Для этого ис-

пользовался набором микрообъективов фирмы Olympus, серия MPLFLN: 5x $NA = 0,15$, 10x $NA = 0,3$, 20x $NA = 0,45$, и фирмы Zeiss, серия Epiplan Apochromat: 10x $NA = 0,3$, 20x $NA = 0,6$, 50x $NA = 0,95$.

Для каждого из вариантов запоминался один кадр с локализованными на нем интерференционными полосами, ориентированными вертикально. Далее, применялся фильтр, и устранялась фоновая составляющая. По отфильтрованному сигналу формировалась огибающая с узлами в максимумах интерференционных полос (рис. 5). Эффективная длина когерентности вычислялась следующим образом:

$$l_{эф} = (N_2 - N_1) \cdot \lambda / (2 \cdot \Delta N), \quad (2)$$

где N_1, N_2 – значения по оси номера пикселя первого и второго пересечения огибающей с линией уровня, соответственно, ΔN – количество пикселей между соседними максимумами интерференционного сигнала. Конечное значение эффективной длины когерентности вычислялось, как среднеарифметическое по выбранному количеству сечений в кадре.

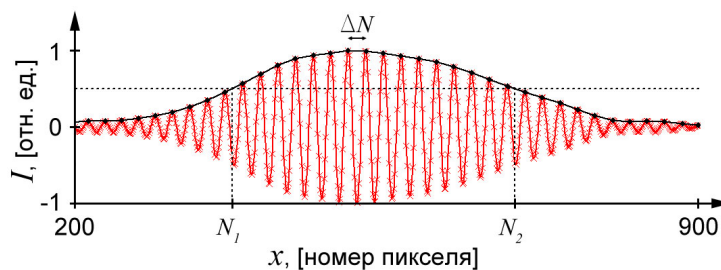


Рис. 5. Вычисление эффективной длины когерентности

На рис. 6-8 приведены результаты моделирования и натуральных экспериментов.

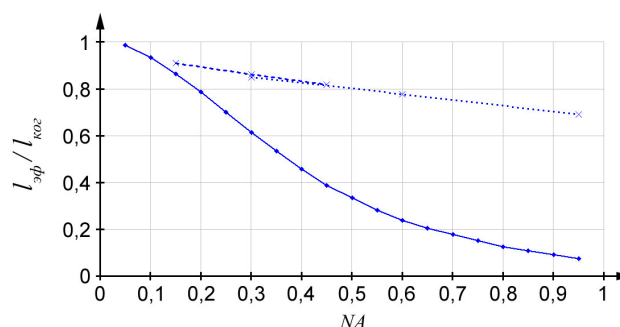


Рис. 6. Зависимость изменения эффективной длины когерентности синего светодиода ($\lambda = 467,18$ нм) от NA в программной модели – сплошная линия, и в натурном эксперименте для микрообъективов Olympus – штриховая линия и Zeiss – пунктирная линия

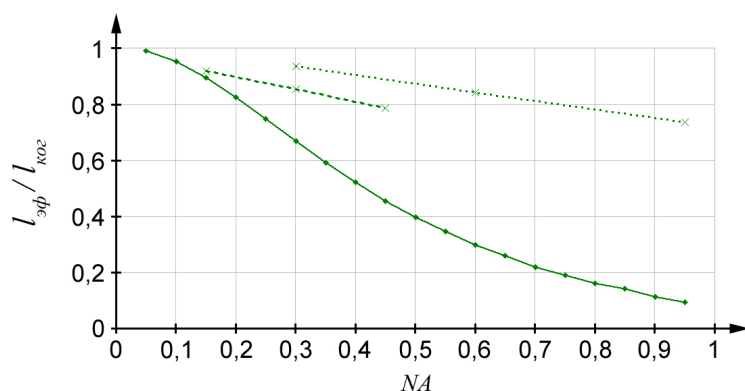


Рис. 7. Зависимость изменения эффективной длины когерентности зеленого светодиода ($\lambda = 534,47$ нм) от NA в программной модели – сплошная линия и в натурном эксперименте для микрообъективов Olympus – штриховая линия и Zeiss – пунктирная линия

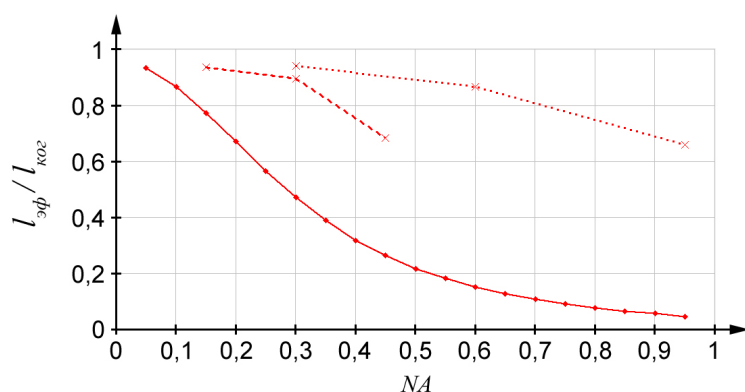


Рис. 8. Зависимость изменения эффективной длины когерентности красного светодиода ($\lambda = 630$ нм) от NA в программной модели – сплошная линия и в натурном эксперименте для микрообъективов Olympus – штриховая линия и Zeiss – пунктирная линия

Заключение

Результаты проведенных экспериментов показали, что процесс формирования интерференционных явлений, наблюдаемых в микроинтерферометре Линника, зависит от числовой апертуры микрообъективов.

В натуральных экспериментах имеется более резкий спад. Это может быть обусловлено, тем, что моделирование выполнялось без учета перекрестного влияния оптического сигнала соседних точек. Общий характер изменения показывает уменьшение эффективной длины когерентности в зависимости от NA . Особенно этот эффект заметен на объективах с большой числовой апертурой, и уменьшение эффективной длины когерентности достигает $20 \div 30\%$ и более.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сысоев Е. В. Метод частичного сканирования коррелограмм для измерения микрорельефа поверхностей // Автометрия. – 2007. – Т. 43, № 1. – С. 107.
2. Сысоев Е. В., Выхристюк И. А., Куликов Р. В., Поташников А. К., Разум В. А., Степнов Л. М. Интерференционный микроскоп-профилометр // Автометрия. – 2010. – Т. 46, № 2. – С. 119–128.
3. Сысоев Е. В., Голубев И. В., Чугуй Ю. В., Шахматов В. А. Измерения локальных отклонений профиля поверхности на основе интерференции частично когерентного света // Автометрия. – 2004. – Т. 40, № 5. – С. 4–13.
4. Сысоев Е. В., Голубев И. В. Способ измерения профиля поверхности. Патент РФ № 2245515, 2005.
5. Сысоев Е. В., Выхристюк И. А., Куликов Р. В., Поташников А. К., Широков В. В. Зависимость погрешности измерений интерференционного профилометра от длины когерентности света // ГЕО–Сибирь–2011. Т. 5. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, нанотехнологии. Ч. 1: сб. матер. VII Междунар. науч. конгресса «ГЕО–Сибирь–2011», 19-29 апреля 2011 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2011. – С. 98–99.
6. Линник В. П. Прибор для интерференционного исследования микропрофиля поверхности – «микропрофилометр» // Докл. АН СССР. – 1945. – Т. 49, № 9. – С. 656–657.

© Е. В. Сысоев, Р. В. Куликов, С. А. Сыева, 2021