

ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ АБСОЛЮТНЫХ РАССТОЯНИЙ МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНОЙ НИЗКОКОГЕРЕНТНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

© 2021 г. В. Т. Потапов^{а,*}, Н. М. Жамалетдинов^а

^а Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
Россия, 141190, Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1

*e-mail: v_potapov38@mail.ru

Поступила в редакцию 20.01.2021 г.

После доработки 25.01.2021 г.

Принята к публикации 03.02.2021 г.

Исследованы возможности повышения точности измерений волоконно-оптических датчиков абсолютных расстояний нанометрового диапазона, использующих спектральный метод волоконно-оптической низкокогерентной интерферометрии. Экспериментально показана возможность измерения расстояния с погрешностью не более ± 15 нм в диапазоне 20–250 мкм.

DOI: 10.31857/S003281622104008X

Известно, что на основе интерферометров Фабри–Перо (и.Ф.П.) как могут быть, так и уже создаются волоконно-оптические датчики различных физических величин с миниатюрными чувствительными элементами [1–6]. Принцип действия датчиков основан на измерении базы и.Ф.П., т.е. расстояния между его зеркалами, в зависимости от внешних воздействий (температуры, давления, вибраций, магнитного поля и т.д.). К настоящему времени известно большое количество работ, в которых предложены и реализованы оптические методы измерений абсолютных расстояний, в том числе и базы и.Ф.П. Одним из практических и перспективных решений проблемы абсолютных и дистанционных измерений расстояний и перемещений является метод спектральной волоконно-оптической низкокогерентной интерферометрии. К основным достоинствам этого метода относятся достаточно высокая точность измерений, которая практически не зависит от флуктуаций оптической мощности в линии, возможность дистанционных измерений и создания миниатюрных чувствительных элементов волоконно-оптических датчиков.

Методы спектральной волоконно-оптической низкокогерентной интерферометрии, предназначенные для определения геометрических характеристик объектов, основаны на измерении автокорреляционной функции зондирующего излучения после его взаимодействия с образцом (или чувствительным элементом датчика). В работе [6] описан достаточно простой волоконно-оптический датчик для измерения абсолютных значений

расстояний и перемещений, реализующий этот метод. Датчик обеспечивает точность измерений базы и.Ф.П. (расстояний между торцом волокна и отражающей поверхностью) с погрешностью ± 50 нм в диапазоне 20–250 мкм. Такая погрешность существенно ограничивает область применения датчика и возможность разработки новых измерительных систем на его основе.

В настоящей работе обсуждаются источники этой погрешности и пути ее снижения. Экспериментально показана возможность снижения этой погрешности до значений ± 15 нм в указанном выше диапазоне, что позволит создавать высокоточные датчики физических величин, конвертируемых в перемещения.

Схема макета волоконно-оптического датчика, реализующего спектральный метод волоконно-оптической низкокогерентной интерферометрии, приведена на рис. 1, и она идентична схеме, описанной в [6]. В качестве источника широкополосного излучения использован суперлюминесцентный светодиод SLD-471, сигнал от которого по оптическому волокну подается на и.Ф.П., образованный торцом волокна и отражающей поверхностью, и анализируется с помощью миниспектрометра, представляющего собой дифракционную решетку (эшелетт), согласованную с матрицей на основе прибора с зарядовой связью (п.з.с.) с помощью объективов.

Спектр излучений SLD-471 показан на рис. 2. На этом же рисунке приведен зарегистрированный миниспектрометром типичный спектр отра-

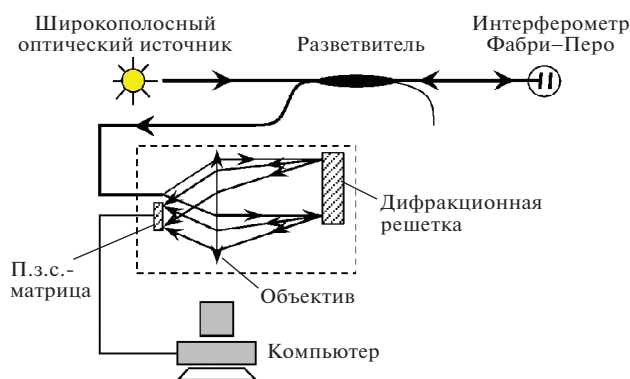


Рис. 1. Схема макета волоконно-оптического датчика для измерения расстояний.

жения и.Ф.П., образованного торцами двух оптических волокон, расположенных на расстоянии $d \approx 124.24$ мкм. Согласно рисунку, отраженный сигнал SLD-471 промодулирован некоторой частотой f , которая определяется базой d и.Ф.П. и длиной волны λ излучения. Изменение базы (расстояния между торцами волокна) приводит к изменению частоты f , т.е. периодичности появления пиков сигнала (максимумов и минимумов) на кривой, и к смещениям спектральных кривых.

Следует заметить, что при фиксированной базе и.Ф.П. периодичность пиков, а следовательно, и частота модуляции f будут различными для разных длин волн λ : в коротковолновой части спектра частота f_1 выше, а периодичность пиков меньше, а в длинноволновой наоборот — частота f_2 будет ниже, а периодичность больше.

Это связано с тем, что дифракционная решетка пространственно распределяет (разрешает) падающее на нее излучение по длинам волн, а не по фазе. Максимумы спектра будут расположены на длинах волн:

$$\lambda_m = 2nd/m, \quad (1)$$

где n — показатель преломления среды и.Ф.П., d — база и.Ф.П., m — целое число.

Очевидно, что базу d и.Ф.П. можно вычислить из спектральной кривой отражения (кривая 2 на рис. 2), определив частоту модуляции f , которая обусловлена числом максимумов и их положением на кривой, путем фурье-преобразования сигнала с п.з.с.-матрицы. Однако, как было показано в [6], этого недостаточно для получения удовлетворительной точности измерений, так как источник SLD-471 излучает в достаточно широком спектральном диапазоне ($\Delta\lambda \approx 60$ нм). В этом случае при заданном значении d максимумы на спектральной кривой отражения расположены неэквидистантно, т.е. расстояние между максимумами будет зависеть от длины волны и, напри-

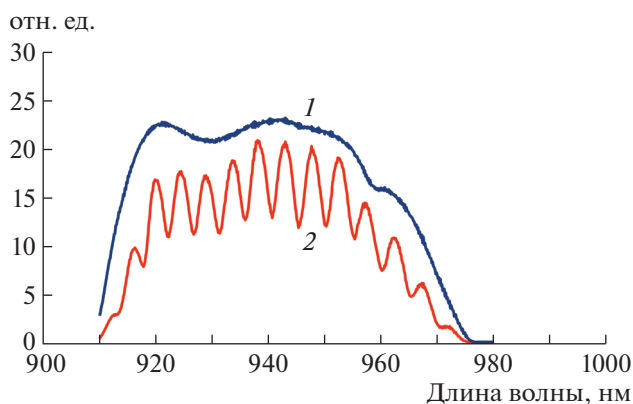


Рис. 2. Спектры: 1 — излучения светодиода SLD-471 (1), 2 — отражения и.Ф.П., образованного торцами световодов, расположенных на расстоянии ≈ 124.24 мкм.

мер, для двух соседних максимумов на длинах волн λ_1 и λ_2 будет равно:

$$r = 2nd/\lambda_1 - 2nd/\lambda_2 \approx 2nd(\lambda^2/\Delta\lambda). \quad (2)$$

Следовательно, путем преобразования Фурье мы получаем некоторое среднее значение частоты, по которому невозможно определить точное значение d . Оценки показывают, что данным методом можно получить относительную точность измерений порядка нескольких процентов.

В [6] предложен и реализован порядок получения значений базы из спектральной кривой отражения и.Ф.П. по положениям максимумов (минимумов). Этот метод позволил в первом приближении измерять значения базы и.Ф.П. с погрешностью ± 50 нм в диапазоне 30–250 мкм. Дальнейшие экспериментальные исследования показали, что, наряду с неэквидистантностью, эта погрешность обусловлена также систематической ошибкой, связанной с несовершенством миниспектрометра, а именно с неточностью измерения длин волн, соответствующих максимумам и минимумам спектральной кривой. Поэтому для уменьшения этой погрешности необходимо сравнивать спектральные кривые по значительно большему числу точек, включая максимумы и минимумы кривых, и находить усредненные значения базы и.Ф.П. при соответствующих минимальных расхождениях спектральных кривых.

С этой целью в процессе измерений базы и.Ф.П. миниспектрометром регистрируется спектральная кривая отражения и.Ф.П. с некоторой базой $d_{\text{и.Ф.П.}}$. Далее, для определения этой базы проводятся следующие операции. В диапазоне спектра рабочих длин волн (спектра SLD-471) $\lambda_{01} - \lambda_{02}$ рассчитывается спектр кривых отражения базы и.Ф.П. с заданным интервалом Δd в диапазоне измерений d . В нашем случае мы полагали $\Delta d = 10$ нм. Путем сравнения расчетных кривых с экспери-

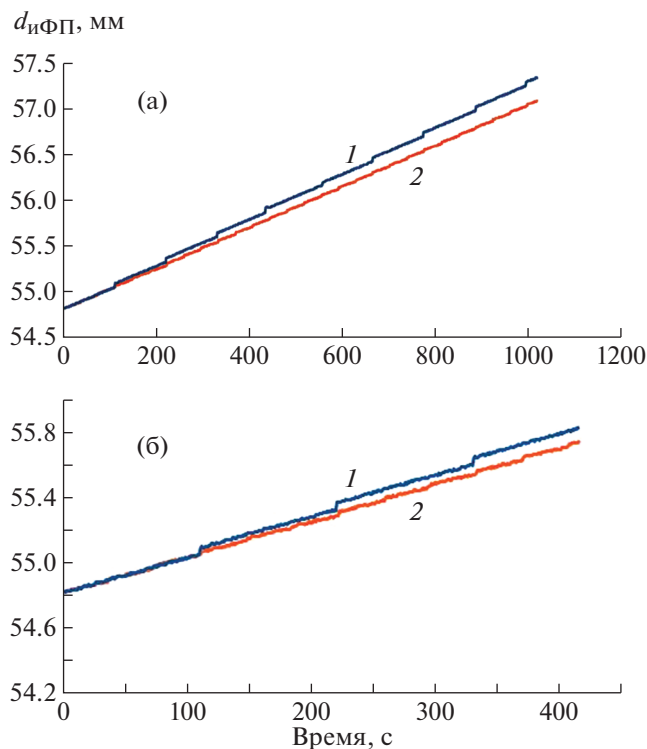


Рис. 3. Зависимости от времени $d_{иФП}$ в интервалах 54.8–57.9 мкм (а) и 54.8–55.9 мкм (б), полученные: 1 – путем вычисления по частоте интерференционных пиков; 2 – путем более точного расчета спектра с интервалом $\Delta d = 10$ нм.

ментальной выбирается наиболее близкая к эксперименту кривая и по ней определяется значение измеренной $d_{иФП}$.

Очевидно, что полученные таким образом значения базы $d_{иФП}$ определяются с точностью $\pm \Delta d$, которая будет зависеть от точности измерения длин волн λ и среднего отклонения (дисперсии) сравниваемых кривых по большому числу точек. Полученные значения Δd будут определять систематическую погрешность измерения расстояний датчика. Следует заметить, что при обработке результатов эти отклонения могут быть в сторону как коротких, так и длинных волн. Поэтому ошибка Δd может иметь как положительные, так и отрицательные значения, что и наблюдалось в эксперименте. Вследствие этого в процессе непрерывного измерения на кривой зависимости $d_{иФП}$ от времени появляются выбросы (скачки) с амплитудой $\approx \Delta d$, что подтверждается экспериментально (рис. 3). Это и является систематической ошибкой измерений.

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости $d_{иФП}$ от времени, полученные двумя способами: кривые 1 соответствуют значениям, вычисленным по частоте интерференционных пи-

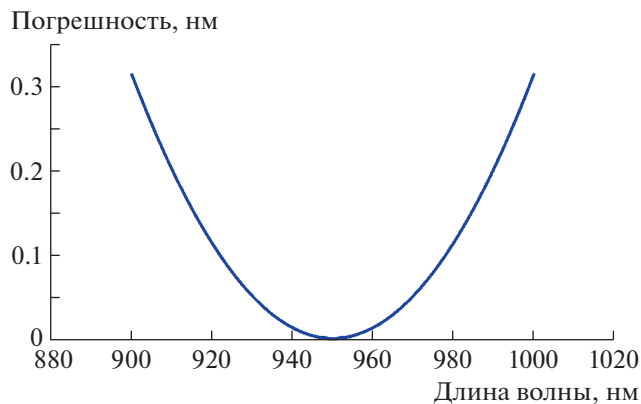


Рис. 4. Погрешность измерения длины волны миниспектрометром, полученная при калибровке. Миниспектрометр при калибровке настраивался на длину волны, соответствующую центру спектра SLD-471.

ков, кривые 2 получены путем более точного вычисления с заданным интервалом $\Delta d = 10$ нм. На рис. 3а приведены результаты измерений $d_{иФП}$ в интервале 54.8–57.9 мкм, на рис. 3б – в интервале 54.8–55.9 мкм. Анализ этих кривых показал, что на кривой 1 наблюдаются выбросы (ступеньки) с амплитудой ≈ 50 нм, тогда как на кривой 2 величина этих выбросов составляет лишь ≈ 15 нм.

Очевидно, что свой вклад в систематическую ошибку вносит и ошибка измерения длин волн миниспектрометром. С целью компенсации этой ошибки проводилась калибровка миниспектрометра волоконно-оптического датчика (фактически п.з.с.) с помощью оптического спектроанализатора Ando AQ6377, погрешность измерения длин волн которого не более ± 0.05 нм. Результаты этой калибровки приведены на рис. 4, где показана кривая зависимости погрешности измерения длины волны используемого нами миниспектрометра по спектру SLD. При калибровке миниспектрометр настраивали на центральную длину волны спектра SLD-471, равную 945 нм, а затем сравнивали спектры, регистрируемые спектроанализатором и миниспектрометром на других длинах волн. В итоге нам удалось реализовать точность измерений, равную ± 15 нм в диапазоне 20–250 мкм, что практически совпадает с величиной пороговой чувствительности, полученной в [6].

Этот результат позволяет нам сделать вывод, что на основе простого миниспектрометра возможно создание микроминиатюрных волоконно-оптических сенсоров физических величин, конвертируемых в перемещение или изменение оптических путей света в среде, обладающих достаточно высокой чувствительностью, большим динамическим диапазоном, высоким пространственным разрешением и возможностью дистанционных измерений. В частности, в ближайшее время пер-

спективным является создание датчика температуры в диапазоне от комнатных до криогенных на основе кремниевых микрорезонаторов и других материалов, коэффициент преломления которых зависит от температуры.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность ООО “Т-8” за предоставление спектроанализатора Ando AQ6377 для проведения экспериментов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена по плану госзадания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bing Yu, Dae Woong Kim, Jiang Deng, Hai Xiao, Anbo Wang* // *Appl. Optics*. 2003. V. 42. № 16. P. 60.
2. *Rao Y.J., Jackson D.* // *Meas. Sci. Technol.* 1996. V. 7. № 7. P. 981.
<https://doi.org/10.1088/0957-0233/7/7/001>
3. *Ниева П.* // *Датчики и системы*. 2008. № 5. С. 38.
4. *Oh Ki D., Ranade J., Arya V., Wang A., Claus R.O.* // *SPIE*. 1998. V. 3538. P. 136.
5. *Иванов В.В., Маркелов В.А., Новиков М.А., Уставщиков С.С.* // *Письма в ЖТФ*. 2004. Т. 30. Вып. 9. С. 82.
6. *Потапов В.Т., Жамалетдинов М.Н., Жамалетдинов Н.М., Мамедов А.М., Потапов Т.В.* // *ПТЭ*. 2013. № 5. С. 103.
<https://doi.org/10.7868/S0032816213040277>