

## ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ С ПОМОЩЬЮ КРЕМНИЕВЫХ МИКРОИНТЕРФЕРОМЕТРОВ ФАБРИ–ПЕРО МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНОЙ НИЗКОКОГЕРЕНТНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

© 2022 г. В. Т. Потапов<sup>а,\*</sup>, Н. М. Жамалетдинов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>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 24.11.2021 г.

После доработки 13.12.2021 г.

Принята к публикации 18.12.2021 г.

Описан волоконно-оптический датчик температуры с чувствительным элементом на основе кремниевой плоскопараллельной пластины толщиной 36 мкм, представляющей собой интерферометр Фабри–Перо, база которого изменяется вследствие изменения коэффициента преломления кремния с температурой и измеряется методом волоконно-оптической низкокогерентной интерферометрии. Полученная экспериментально чувствительность составила ~1.5 К в диапазоне температур 77–300 К.

DOI: 10.31857/S0032816222030120

Интерферометрические методы, основанные на измерении базы (длины оптического пути) интерферометров Фабри–Перо, широко используются при создании датчиков физических величин различных типов [1–4]. В последние годы значительный интерес представляют разработки датчиков на основе микроинтерферометров Фабри–Перо (и.Ф.П.), согласуемых с оптическими волокнами, – волоконно-оптических датчиков [3, 4]. В качестве чувствительных элементов (сенсоров) в таких датчиках могут использоваться и.Ф.П. из различных материалов, база которых (длина пути интерферирующих лучей) зависит от внешних условий (температуры, давления, типа материала и т.д.) и может измеряться различными способами. В работе [3] в качестве чувствительного элемента волоконно-оптического датчика использовалась пленка поликристаллического кремния толщиной 675 нм, сформированная на торце волокна и представляющая собой и.Ф.П., база которого (оптическая толщина пленки, нанесенной на торец волокна) изменялась в зависимости от коэффициента преломления кремния, зависящего, в свою очередь, от температуры, что приводило к изменению коэффициента отражения от пленки. При этом коэффициент отражения измерялся амплитудным методом, т.е. по изменениям интенсивности отраженного света на определенной длине волны. Полученная таким образом чувствительность составила ~3 К в диа-

пазоне температур от 303 до 673 К и ограничивалась флуктуациями мощности излучения.

В настоящей работе приведены результаты измерения температуры с помощью низкоконтрастного и.Ф.П., представляющего собой пластину из кристаллического кремния толщиной ~36 мкм, зависимость оптической толщины которой от температуры измеряется методом спектральной низкокогерентной волоконно-оптической интерферометрии. Пластина была вырезана из слитка монокристаллического кремния, отшлифована и стравлена методом плазмохимического травления до требуемой толщины.

Методы волоконно-оптической низкокогерентной интерферометрии с успехом применяются для дистанционных измерений с высокой степенью точности оптической толщины прозрачных плоскопараллельных образцов и малых расстояний [4, 5]. Эти методы основаны на корреляционных свойствах излучения с продольной длиной когерентности, много меньшей длин оптических путей интерферирующих лучей, а именно на измерении автокорреляционной функции зондирующего излучения после его взаимодействия с образцом. Как правило, в качестве источников излучения в методах волоконно-оптической низкокогерентной интерферометрии применяются суперлюминесцентные светодиоды с длиной когерентности, не превышающей 20–30 мкм. Главным достоинством этих методов является возможность измерений абсолютных значений длин оп-

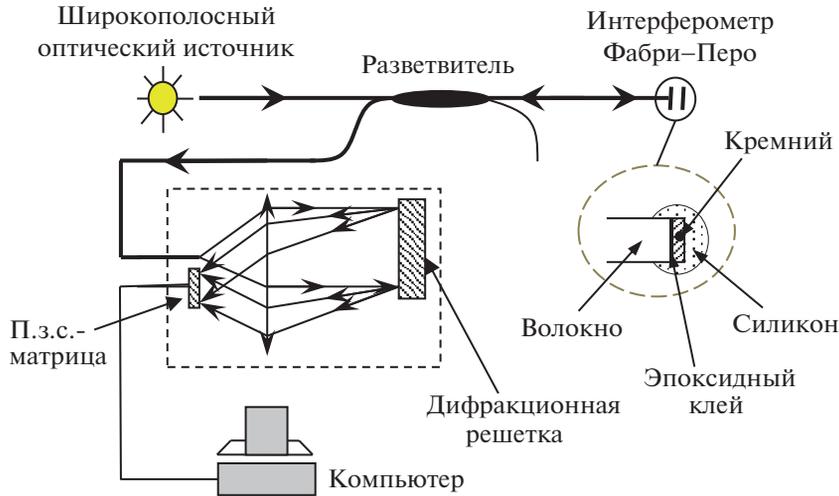


Рис. 1. Схема измерения температуры кремниевого интерферометра Фабри-Перо.

тических путей в образцах при достаточной точности измерений, которая практически не зависит от флуктуаций оптической мощности в линии и нестабильностей частоты излучений источника.

Автокорреляционная функция может быть измерена либо с помощью опорного интерферометра с модулируемой разностью плеч (например, интерферометра Маха-Цандера) [4, 5], либо спектральным методом [2, 5]. Спектральный метод заключается в измерении спектра мощности зондирующего излучения на выходе образца с последующей математической обработкой результатов. Он является более простым и доступным в реализации и, несмотря на меньшую точность измерений по сравнению с методом опорного интерферометра, вполне может быть применен для создания целого ряда датчиков физических величин. Чувствительность и.Ф.П. к температуре определяется изменением оптического пути света в и.Ф.П., в частности в кремниевой пластине, в зависимости от температуры.

Оптический путь или база и.Ф.П. могут быть измерены несколькими методами, в частности методом, описанным в работе [6], который заключается в сравнении экспериментально полученных спектров с расчетными спектральными кривыми и нахождении базы и.Ф.П. по результатам этого сравнения. Оптический путь или база и.Ф.П. определяется как произведение коэффициента преломления  $n$  среды и.Ф.П. на толщину пластины  $l$ . Произведение  $nl$  является в нашем случае экспериментально измеряемой величиной и определяет фазу  $\Phi$  отраженных от и.Ф.П. световых волн и ее зависимость от температуры  $d\Phi/dT$  в соответствии с известным соотношением:

$$\frac{d\Phi}{dT} = \frac{4\pi nl}{\lambda} \left( \frac{1}{n} \frac{dn}{dT} + \frac{1}{l} \frac{dl}{dT} \right) = \Phi_0 \left( \frac{1}{n} \frac{dn}{dT} + \frac{1}{l} \frac{dl}{dT} \right), \quad (1)$$

где  $l$  – толщина пластины Si,  $n$  – коэффициент преломления кремния,  $\lambda$  – длина волны света,  $T$  – температура.

Для кристаллического кремния в рамках простой зонной модели основной вклад в изменения фазы (оптического пути света) в и.Ф.П. дает изменение коэффициента преломления кремния в зависимости от температуры  $\frac{1}{n} \frac{dn}{dT}$ , которое более чем на порядок превышает изменения базы за счет температурного расширения образца кремния  $\frac{1}{l} \frac{dl}{dT}$ . Согласно данным работы [7], для кремния температурный коэффициент преломления составляет примерно  $4.3 \cdot 10^{-5}$ , а коэффициент температурного расширения –  $2.6 \cdot 10^{-6}$ . Поэтому можно считать, что в кремнии при температурах  $\leq 400$  К основное влияние на фазу будет оказывать зависимость коэффициента преломления от температуры.

На рис. 1 приведена схема на основе кремниевого и.Ф.П. для измерения температуры. Схема аналогична описанной ранее в работе [6] и примененной для измерения расстояний. Отраженный от и.Ф.П. сигнал передается по оптическому волокну на вход миниспектрометра, который выполнен по автоколлимационной схеме, т.е. свет, отраженный от и.Ф.П., проходит через объектив дважды. Отраженный от дифракционной решетки (эшелетта) свет регистрируется п.з.с. (прибор с зарядовой связью) матрицей. В качестве этого регистратора используется простой фотоаппарат (фотокамера) с цифровым выходом.

В качестве источника излучения в схеме используется суперлюминесцентный диод SLD (superluminescent diode) с центральной длиной вол-

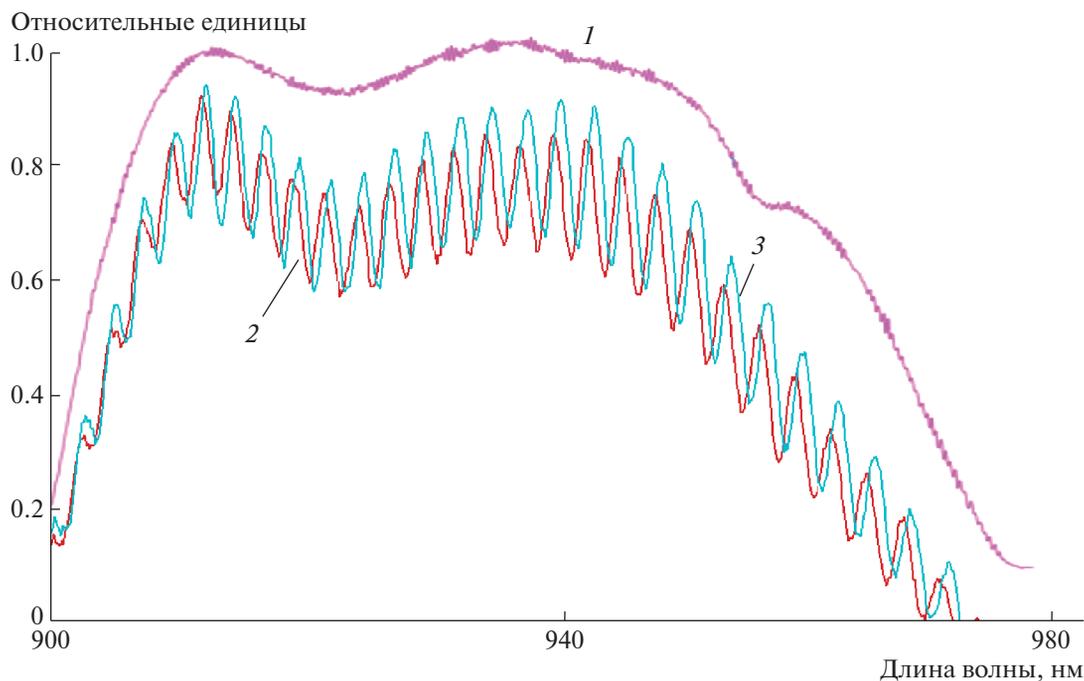


Рис. 2. Спектры отражения SLD-471 (1) и кремниевой пластины (2, 3), полученные при температурах 293 К (2) и 246 К (3).

ны  $\lambda_0 = 940$  нм, спектр излучения которого, как известно, имеет гауссово распределение. Тогда интенсивность отраженного от и.Ф.П. сигнала будет описываться произведением гауссовой функции источника на функцию спектра отражения и.Ф.П. и может быть представлена в виде

$$I(\lambda) \sim I_0 \exp[-(\lambda - \lambda_0)^2 / (2\Delta\lambda^2)] (1 - V \cos(4\pi n l / \lambda)), \quad (2)$$

где  $I_0$  – мощность излучения на входе волоконного тракта;  $V$  – константа, характеризующая видность интерференции и зависящая от величины потерь излучения и эффективности связи между и.Ф.П. и оптическим волокном;  $\lambda_0$  и  $\Delta\lambda$  – центральная длина волны и ширина спектра излучения SLD соответственно;  $n$  – коэффициент преломления среды.

На рис. 2 показаны спектр излучения SLD (кривая 1) и спектры сигналов, отраженных от и.Ф.П. (кремниевой пластины толщиной  $l \approx 36$  мкм), полученные при температурах 293 К (кривая 2) и 246 К (кривая 3). Как видно из рис. 2, кривые 2 и 3 представляют собой спектр излучения SLD, промодулированный интерференционной картиной, образующейся в и.Ф.П., и описываются выражением (2). Очевидно, что информация о базе и.Ф.П. и ее зависимости от температуры заключается именно в интерференционной части спектра, которая, как следует из приведенного выше, в основном определяется зависимостью коэффициента преломления  $n$  кремния от температуры. Таким образом, основная проблема при измерениях

температуры заключается в выделении интерференционной части сигнала и его корректной обработке.

В нашей предыдущей работе [6] описан порядок и алгоритм нахождения спектра отражения и.Ф.П. и определения автокорреляционной функции и приведены факторы, влияющие на точность и пределы измерений базы и.Ф.П. Суть этой процедуры заключалась в измерении спектра отражения и.Ф.П. с помощью миниспектрометра (схема на рис. 1), выделении из него интерференционной части  $I(\lambda)$ , преобразовании масштаба оси с целью

получения периодической функции  $I(\nu) \equiv I(\lambda^{-1})$ , где  $\nu = 1/\lambda$  – волновое число. Преобразованный таким образом сигнал умножался на весовую функцию, а затем, путем прямого и обратного дискретных преобразований Фурье, находился спектр сигнала, отраженного от и.Ф.П. Далее для определения базы и.Ф.П. рассчитывался набор спектров отражения и.Ф.П. с шагом  $\Delta(nl)$ , не превышающим минимального значения предельного разрешения миниспектрометра. В нашем случае эта величина составила  $\Delta(nl) \approx 10$  нм. Из полученного набора спектров путем сравнения был выбран наиболее близкий к экспериментально зарегистрированному спектр и определялись значения базы и.Ф.П. и соответствующие этой базе значения  $n$ .

На рис. 3 представлены зависимости базы  $L = ln$  и.Ф.П. и коэффициента преломления  $n$

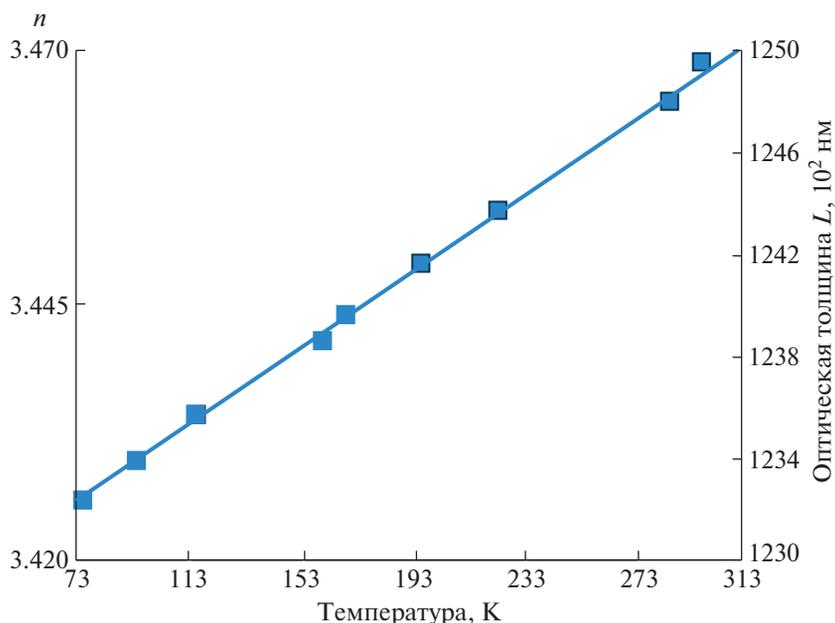


Рис. 3. Зависимости коэффициента преломления кремния и базы и.Ф.П. от температуры.

кремния от температуры. В этом эксперименте температура измерялась с помощью платинового термометра сопротивления типа С420 фирмы Heraeus, точность измерений которого в диапазоне температур 77–423 К составляла  $\pm 0.5$  К. Согласно рис. 3, в диапазоне температур  $\sim 73$ –293 К коэффициент преломления  $n$  кремния растет с ростом температуры с градиентом  $dn/dT \approx 2.5 \cdot 10^{-4}$ . Отсюда получаем относительное значение температурного коэффициента преломления, равное  $\frac{1}{n} \frac{dn}{dT} \approx 7 \cdot 10^{-5}$ . Эта величина примерно на 40%

превышает значения  $\frac{1}{n} \frac{dn}{dT}$ , приведенные в работе [7]. На наш взгляд, это связано с учетом влияния температурного расширения кремния, которое, по оценкам, может составить примерно 10%, а также с погрешностями измерений температуры и физической толщины пластины кремния.

Тем не менее, полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности создания достаточно простых волоконно-оптических датчиков температуры на основе описанного метода для диапазона низких температур. Полученная экспериментально чувствительность метода составила примерно 1.5 К в диапазоне температур 73–293 К при времени регистрации 1 с. Чувстви-

тельность метода может быть повышена в несколько раз за счет увеличения базы и.Ф.П. (толщины пластины Si) и сужения полосы частот (снижения быстродействия).

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bing Yu, Dae Woong Kim, Jiangdong Deng, HaiXiao, Anbo Wang // Applied Optics. 2003. V. 42. № 16. P. 3241. <http://doi.org/>  
<https://doi.org/10.1088/0957-0233/7/01>
2. Beheim G. // Electron. Lett. 1986. V. 22. P. 238.
3. Shulteis L., Amstutz H., Kaufman M. // Optic Letters. 1988. V. 13. № 9. P. 782.
4. Choi Han-Sun, Taylor H.F., Lee Ch.I. // Optic Letters. 1997. V. 22. № 23. P. 1814.
5. Rao Yun-Jiang, Jackson D.A. // Meas. Sci Technol. 1996. V. 7. P. 981.
6. Потопов В.Т., Жамалетдинов Н.М. // ПТЭ. 2021. № 4. С. 47. <https://doi.org/10.31857/S003281622104008X>
7. Yu P.Y., Cardona M. // Phys. Rev. B. 1970. V. 2. № 8. P. 3193.