ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2025, № 2, с. 131–135

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 621.3.049.76

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО СДВИГУ ПОЛОС ИНТЕРФЕРЕНЦИИ В МИКРОИНТЕРФЕРОМЕТРЕ ФАБРИ–ПЕРО НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВОЙ ПЛАСТИНЫ

© 2025 г. В. Т. Потапов[a,*], Н. М. Жамалетдинов[a], В. В. Моисеев[a,]**

[a] *Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук*
Россия, 141190, Фрязино, Московская обл., пл. Введенского, 1
** e-mail: v_potapov38@mail.ru*
*** e-mail: mvv_8824@live.ru*

Поступила в редакцию 23.10.2024 г.
После доработки 13.12.2024 г.
Принята к публикации 13.01.2025 г.

Описан волоконно-оптический датчик температуры с чувствительным элементом на основе кремниевого микроинтерферометра Фабри–Перо, температура которого измеряется по сдвигу интерференционных полос вследствие зависимости коэффициента преломления кремния от температуры. Интерферометр Фабри–Перо представляет собой кремниевую пластину размерами 500×500 мкм^2 толщиной 20 мкм, расположенную на торце одномодового волокна. Коэффициент преобразования такого интерферометра равняется примерно 1 нВт/°С при чувствительности порядка $5 \cdot 10^{-3}$ °С.

DOI: 10.31857/S0032816225020164, **EDN:** GLBBVR

В настоящее время известно несколько способов измерения температуры и типов волоконно-оптических датчиков (ВОД) на основе микроинтерферометров Фабри–Перо различных типов, в том числе на основе тонких полупроводниковых пластин и пленок, использующих эффект сдвига края собственной зоны проводимости [1–4] и сдвига интерференционных полос в микроинтерферометре Фабри–Перо, формируемом в пластине полупроводника [5–7]. Метод измерения температуры на основе сдвига интерференционной полосы с помощью микрорезонатора Фабри–Перо в виде поликристаллических пленок кремния толщиной 400–800 нм, наносимых на торцы оптических волокон, описан в работах [6, 7].

Спектры отражения и пропускания света этих пленок в диапазоне длин волн 0.8–1.6 мкм имеют ярко выраженную интерференционную структуру с достаточно широкими интерференционными полосами в соответствующих диапазонах волн. Измеряя сдвиг полосы интерференции на фиксированной длине волны в зависимости от температуры пленки, авторы работы [6] получили температурную чувствительность, примерно равную 3 К. Отмечается, что чувствительность метода может быть повышена за счет сужения полос интерференции путем выбора толщины пленки кремния и подбора типа оптического волокна. Ширина интерференционной полосы интерферометра Фабри–Перо (ИФП) на основе кремниевой пластины толщиной 20 мкм составляет примерно 10 нм. При ширине линии генерации лазера 100 МГц, что в настоящее время достаточно легко реализуются на практике, спектральная ширина линии генерации лазера составляет не более 0.01 нм, что позволяет достаточно точно сканировать полосу интерференции и получать значительно более высокую чувствительность ВОД температуры.

Интенсивность света $I_{отр}$, отраженного от плоскопараллельной пластины ИФП, описывается выражением

$$I_{отр} = I_0 \frac{4R\sin^2\left(\delta/2\right) + \left(\sqrt{R_1} - \sqrt{R_2}\right)^2}{(1+R)^2 + 4R\sin^2\left(\delta/2\right)}, \quad (1)$$

где I_0 – интенсивность падающего света, R_1 и R_2 – константы (коэффициенты отражения от граней пластины кремния), $R = \sqrt{R_1}\cdot\sqrt{R_2}$, $\delta = 4\pi nl/\lambda$ – фазовый сдвиг между интерферирующими лучами, n – коэффициент преломления кремния, l – толщина пластины, λ – длина волны излучения.

Чувствительность ИФП к температуре определяется зависимостью фазового сдвига от температуры:

$$\frac{d\delta}{dT} = \delta\left(\frac{1}{l}\frac{dl}{dT} + \frac{1}{n}\frac{dn}{dT}\right) = \frac{4\pi nl}{\lambda}\left(\frac{1}{l}\frac{dl}{dT} + \frac{1}{n}\frac{dn}{dT}\right). \quad (2)$$

Известно, что для кристаллического кремния величина $\frac{1}{n}\frac{dn}{dt}$ более, чем на порядок, превышает величину коэффициента теплового расширения $\frac{1}{l}\frac{dl}{dT}$ [6, 7], поэтому можно считать, что фазовый сдвиг в кремниевом ИФП обусловлен только зависимостью n от температуры

$$\frac{d\delta}{dT} = \frac{4\pi\ln(T)}{\lambda} = \frac{4\pi l}{\lambda}\left(n_0 + \frac{dn}{dT}\cdot\Delta T\right) = \frac{4\pi\ln_0}{\lambda}\left(1 + \frac{1}{n_0}\frac{dn}{dt}\right), \quad (3)$$

где n_0 – значения коэффициента преломления кремния при начальной температуре кремниевой пластины. Из формулы (3) следует, что первый член выражения $4\pi n_0 l/\lambda$ от температуры не зависит, и он фактически определяет рабочую точку (начальную фазу), от которой начинается отсчет изменения фазы δ в зависимости от температуры.

На рис. 1 приведены рассчитанные по формуле (1) интерференционные кривые излучения одночастотного полупроводникового лазера на длинах волн 1.551 и 1.1550 мкм в кремниевой пластине толщиной l = 20 мкм и спектральная ширина линии этого лазера. На рис. 1 видно, что смещение интерференционной полосы на 1 нм приводит к изменению интенсивности отраженного света примерно на 30%.

На рис. 2 приведены расчетные температурные зависимости относительной интенсивности отраженного от кремниевой пластины (ИФП) света.

На рис. 3 приведена схема установки для измерения температуры методом сдвига интер-

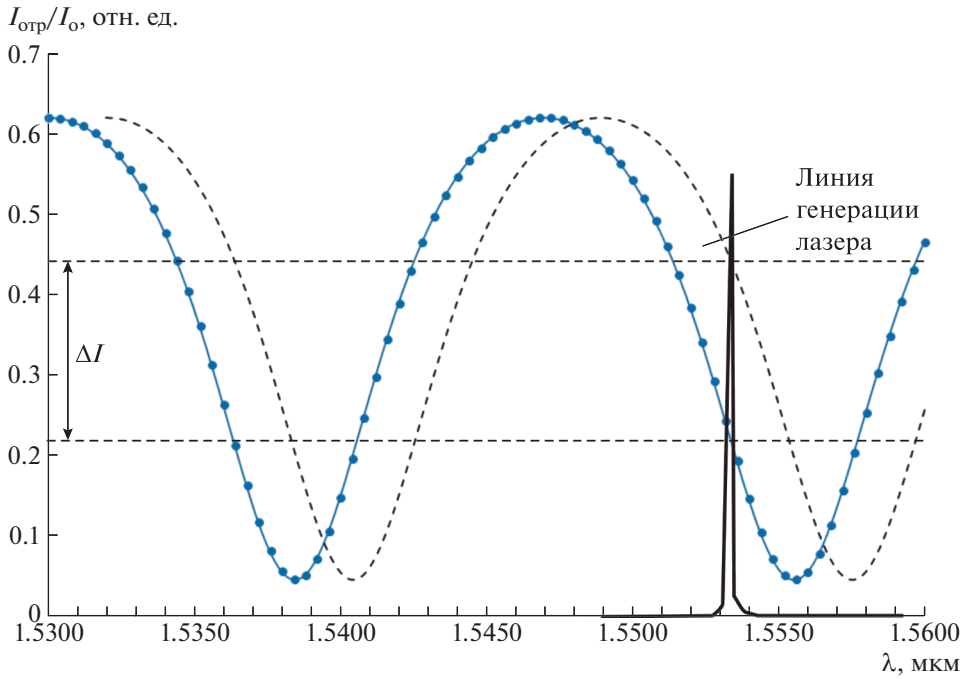

Рис. 1. Интерференционные кривые излучения одночастотного полупроводникового лазера.

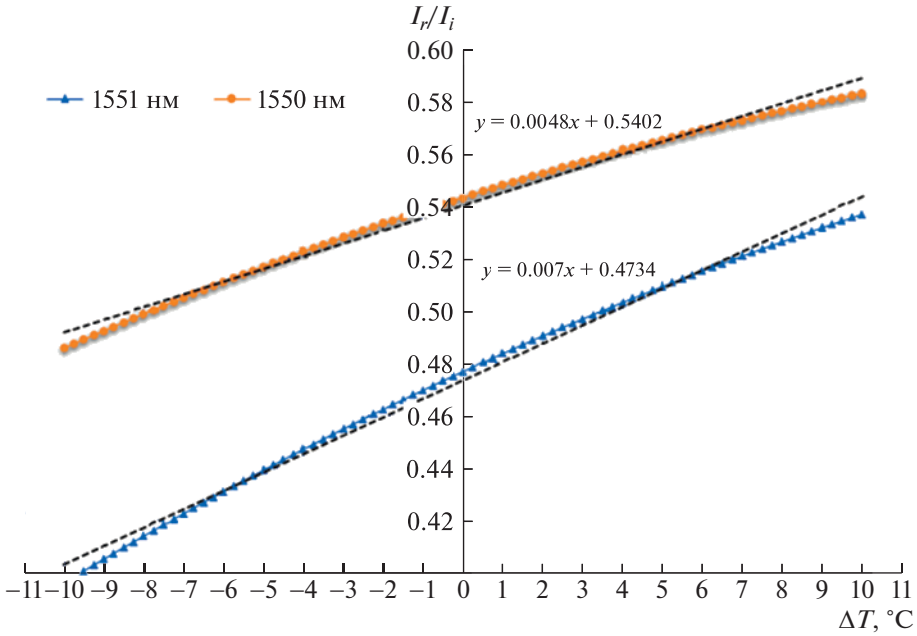

Рис. 2. Относительные зависимости интенсивностей отраженного излучения лазера от температуры кремниевой пластины толщиной 20 мкм, рассчитанные для двух длин волн.

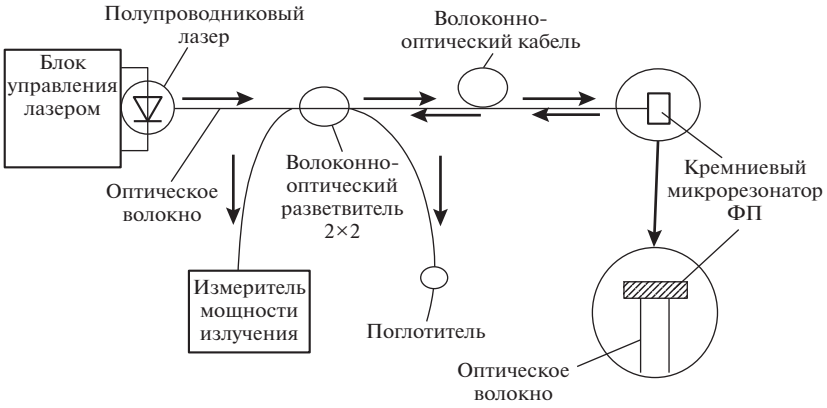

Рис. 3. Схема измерения температуры на основе кремниевого микрорезонатора Фабри–Перо.

ференционных полос в кремниевом ИФП. Излучение полупроводникового одночастотного лазера через волоконно-оптический разветвитель поступает на пластину кремния. Отраженный от пластины свет через волоконно-оптический разветвитель поступает на фотоприемное устройство, в качестве которого на начальном этапе использовался измеритель мощности оптического излучения KI 7600A (KingFisher INT) [8] с чувствительностью около 1 нВт, а позже вместо измерителя мощности – балансный фотоприемник KY-BPRM-BW-1-FA [10] со значением эквивалентной шумовой мощности, равной примерно $3 \cdot 10^{-12}$ Вт/$\sqrt{\text{Гц}}$. В обоих случаях чувствительность данного ИФП к температуре была не хуже $5 \cdot 10^{-3}$ °C.

На рис. 4 представлена фотография торца волокна с наклеенной полупроводниковой пластиной, служащей чувствительным элементом датчика температуры.

В качестве источника излучения использовался одночастотный полупроводниковый лазер фирмы NKT Photonics (США), используемый в широкополосной оптической связи и перестраиваемый в достаточно широком спектральном диапазоне волн (1530–1650 нм).

На рис. 5 приведены результаты измерений интерференционных кривых ИФП (кремниевой

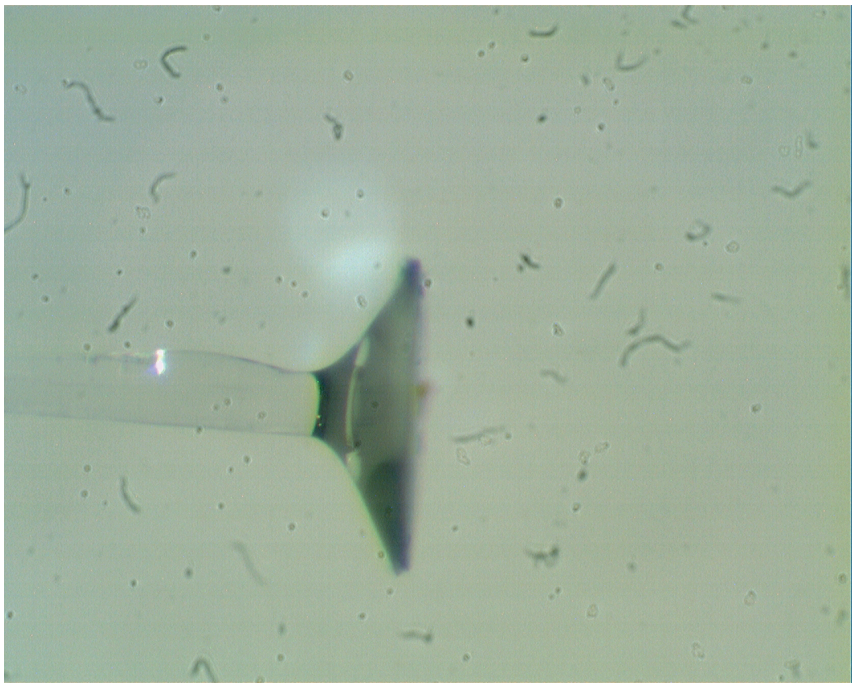

Рис. 4. Фотография торца волокна с наклеенной полупроводниковой пластиной.

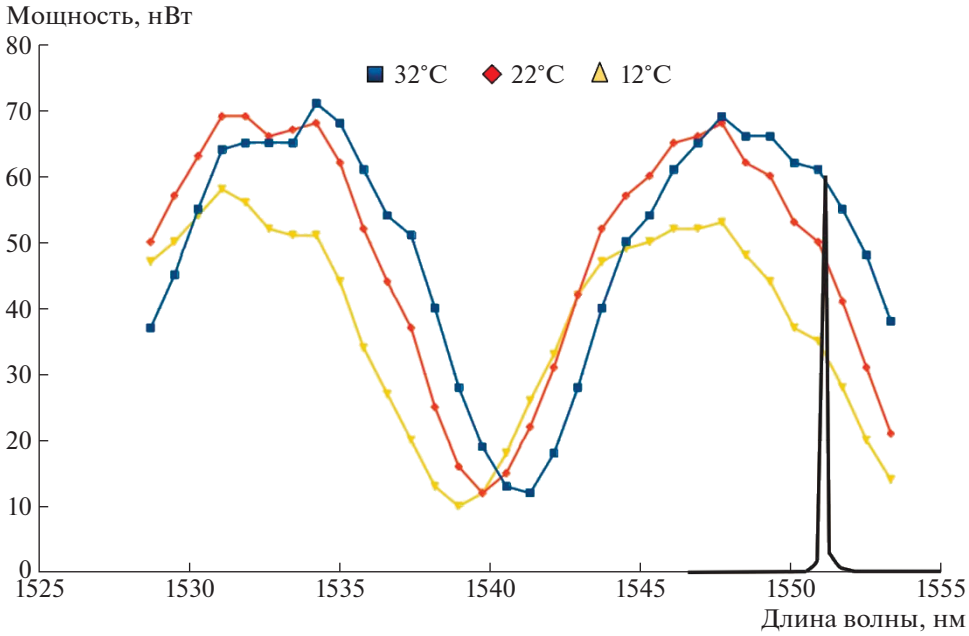

Рис. 5. Интерференционные кривые пластины кремния толщиной 20 мкм при различных температурах.

пластины толщиной примерно 20 мкм) при трех различных температурах. Можно сделать вывод, что при спектральной ширине линии излучения лазера, составляющей примерно 0.01 нм [9], изменение мощности излучения на входе фотоприемного устройства составляет примерно 10 нВт при изменении температуры кремниевого ИФП на 10 °C, т. е. коэффициент преобразования ИФП равен примерно 10^{-9} Вт/°C.

ВОД температуры с таким миниатюрным чувствительным элементом и такой чувствительностью представляет интерес для ряда задач измерительной техники, в частности для контроля температуры нагрева взрывоопасных газов, в

медицине и биологии, где требуется контроль температуры в малогабаритных объектах, а также в криогенной технике.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Егоров Ф.А., Неугодников А.П., Потапов В.Т., Поспелов И.И.* // Датчики и системы. 2006. № 6. С. 20.
2. *Kyuma K., Tai Sh., Sawada T., Nunoshita M.* // IEEE J. Quantum Electronics. 1982. V. 18. P. 676.
3. *Fukano H., Ooshima K.* // Jpn. J. Appl. Phys. 2024. V. 63. P. 1. https://doi.org/10.35848/1347-4065/ad3d68
4. *Jiahua Yang, Biao Yin, Xiaopeng Dong, Weixiong Huang, Yi Zou* // J. Light. Technol. 2022. V. 40. № 16. P. 5729. https://doi.org/10.1109/JLT.2022.3181626
5. Потапов *В.Т., Жамалетдинов Н.М.* // ПТЭ. 2022. № 3. С. 77.
6. *Schultheis L., Amstutz H., Kaufmann M.* // Opt. Lett. 1988. V. 13. № 9. P. 782. https://doi.org/10.1364/OL.13.000782
7. *Berthold J.W., Reed S.E., Sarkis R.G.* // Opt. Eng. 1991. V. 30. № 5. P. 524. https://doi.org/10.1117/12.55838
8. https://kingfisher.com.au/ media/2314/7600-rs232-brochure.pdf
9. https://nolatech.ru/files/datasheets/ru/DFB-1550-14BF.pdf
10. http://en.kyphotonics.com/prod_view.aspx?TypeId=142&Id= 183&FId=t3:142:3