

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 681.782.473

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОПОРНОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА
ДЛЯ УСТРОЙСТВА ОПРОСА ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ
ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН¹

© 2026 г. А. В. Шипицын ^{a,b,*}, А. А. Журавлев ^b, А. В. Сосунов ^a

^aПермский государственный национальный исследовательский университет

Россия, 614990, Пермь, ул. Букирева, 15

^bПермская научно-производственная приборостроительная компания

Россия, 614 990, Пермь, ул. 25 Октября, 106

*shipik.artem@mail.ru

Поступила в редакцию 20.04.2026

После доработки 01.06.2026

Принята к публикации 06.07.2026

Исследованы характеристики перестраиваемого опорного интерферометра на основе LiNbO₃ для устройства опроса интерферометрических датчиков на основе эффекта Вернье. Выполнено математическое моделирование спектрального отклика интегрального интерферометра Маха–Цендера с анализом влияния базы (разницы длин оптических путей) и длины волны на спектр пропускания. Результаты моделирования близки к экспериментальным данным. Получены значения свободного спектрального диапазона (FSR) – 5 нм, контраста интерференционной картины $K = 14$ дБ, чувствительности к электрическому напряжению $S_U = 1.63$ нм/В и вносимых оптических потерь 14.7 дБ. Исследованы основные характеристики интерферометра для практического применения в сенсорных системах.

Ключевые слова: опорный интерферометр; интерферометрические датчики, устройство опроса, база интерферометра.

1. ВВЕДЕНИЕ

Волоконно-оптические датчики физических величин получили широкое распространение в промышленности, авиации, медицине и научных исследованиях благодаря их высокой чувствительности, устойчивости к электромагнитным помехам и возможности работы в экстремальных условиях [1]. Актуальной задачей является создание компактных,

¹ Международная конференция “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2026”, Россия, Пермь, 26–28 мая 2026 г.

высококочувствительных и стабильных устройств опроса, способных обеспечивать надежную обработку сигналов без применения дорогостоящих и сложных систем. Для решения данной задачи предлагается устройство опроса интерферометрических датчиков, работающее на основе эффекта Вернье, где ключевым элементом выступает опорный интерферометр [2]. Опорные интерферометры обеспечивают высокую чувствительность к внешним воздействиям и позволяют регистрировать малые изменения фазы оптического сигнала. В работе исследован интегральный интерферометр Маха–Цендера на основе LiNbO_3 с отоженными протонообменными волноводами, системой электродов и разностью длин оптических путей в плечах порядка 466 мкм (рис. 1, 2). Разница длин оптических путей достигается за счет радиуса изгиба волноводов. К отоженным протонообменным волноводам интерферометра пристыковано анизотропное волокно типа PANDA для ввода/вывода оптического излучения. Особое внимание уделено спектральным характеристикам, вносимым оптическим потерям и электрооптической чувствительности. Для реализации устройства опроса к опорному интерферометру предъявляются следующие требования. Свободный спектральный диапазон (FSR) должен составлять порядка 4-6 нм, что является конструктивно выбранным параметром для обеспечения требуемой чувствительности и удобства регистрации сигнала. Контраст интерференционной картины должен составлять не менее 10 дБ для устойчивого детектирования экстремумов интерференционной картины, вносимые оптические потери не должны превышать 20 дБ, исходя из оптической мощности системы, которая должна оставаться выше минимального значения, детектируемого фотодетектором. Вызванный напряжением спектральный сдвиг оптической волны должен превышать разрешение системы регистрации, поэтому в качестве ориентировочного требования принята электрооптическая чувствительность S_U не ниже 1 нм/В.

Рис. 1. Опорный интерферометр

Рис. 2. Схема интегрального опорного интерферометра Маха–Цендера

2. МЕТОДЫ

Математическое моделирование и численный анализ проводились с использованием программирования в среде Python. Интерференционная картина опорного интерферометра Маха–Цендера описывалась формулой

$$I_{out} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\varphi) \quad (1)$$

где I_{out} – интенсивность на выходе интерферометра, I_1, I_2 – интенсивности интерферирующих волн, $\Delta\varphi$ – изменение фазы.

Изменение фазы световых пучков определяется по формуле

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi n \Delta l}{\lambda} \quad (2)$$

где n – показатель преломления LiNbO_3 , Δl – физическая разность длин плеч интерферометра, λ – длина волны.

Свободный спектральный диапазон рассчитывался по формуле

$$\text{FSR} = \frac{\lambda^2}{\Delta l n}, \quad (3)$$

где λ – длина волны оптического излучения.

Электрооптическая чувствительность моделировалась через изменение показателя преломления волновода под действием электрического поля (эффект Поккельса):

$$\Delta n = - \frac{n_e^3 r_{33} \Gamma}{2} E, \quad (4)$$

где E – напряженность электрического поля в области волновода, $r_{33}=30.9$ пм/В – электрооптический коэффициент кристалла, Γ – интеграл перекрытия электрического и оптического полей в поперечном сечении волновода.

Программные расчеты выполнялись в диапазоне длин волн 1500–1600 нм, мощность оптического излучения задавалась равной 1 мВт, разница длин оптических путей световых пучков в плечах интерферометра составляла 466 мкм. Электрооптическая чувствительность рассчитывалась в диапазоне напряжений от 0 до 25 В.

Экспериментальная часть включала исследование интегрального интерферометра на основе LiNbO_3 с базой 466 мкм. Спектр пропускания, FSR и вносимые оптические потери измерялись с использованием оптической платформы Keysight 816B со встроенным перестраиваемым монохроматическим лазером и фотоприемным модулем. Монохроматическое излучение поступало на вход интерферометра и перестраивалось в диапазоне длин волн 1500–1600 нм, выходная оптическая мощность регистрировалась фотоприемным модулем. Далее из графика зависимости выходной мощности от длины волны находились основные перечисленные спектральные характеристики интерферометра. Электрооптическая чувствительность измерялась с использованием суперлюминесцентного диода в качестве широкополосного источника излучения, оптического спектроанализатора

Yokogawa AQ6370D и источника питания Gwinstek GPP-74323 для подачи напряжения на электроды интерферометра в диапазоне от 0 до 25 В. Зависимость сдвига одного из экстремумов интерференционной картины определялась по длине волны от поданного напряжения на систему электродов.

Приборные погрешности: перестраиваемый лазер Keysight 816B – погрешность установки длины волны ± 0.05 нм, фотоприемный модуль – погрешность измерения мощности $\pm 2.5\%$, спектроанализатор Yokogawa AQ6370D – погрешность по длине волны ± 0.02 нм, источник напряжения Gwinstek GPP-74323 – погрешность ± 0.1 В. Суммарная погрешность определения положения экстремумов спектра (шаг перестройки лазера 0.2 нм с учетом аппроксимации) принята равной ± 0.2 нм, что дает погрешность FSR, расной ± 0.3 нм. Погрешность контраста интерференционной картины оценена в ± 0.5 дБ, погрешность вносимых потерь как ± 0.3 дБ. Чувствительность определялась по линейной зависимости сдвига спектра от напряжения, среднеквадратичное отклонение точек от прямой составило 0.07 нм, поэтому погрешность составляет примерно ± 0.07 нм/В. Все измерения проведены не менее трех раз, воспроизводимость результатов находилась в пределах указанных погрешностей.

Вносимые оптические потери интегрального интерферометра оценивались в канальных одномодовых волноводах методом волокно-волокно (fiber-to-fiber) на длине волны 1550 нм с использованием измерителя мощности, встроенного в оптическую платформу Keysight 816B. Сначала измерялась опорная мощность лазера, которая составила 1 мВт. Затем волноводы интерферометра стыковались с двумя оптическими волокнами, и измерялась оптическая мощность на выходе. Стоит учесть, что помимо структурных дефектов волноводов (рассеяние), во вносимых потерях учитываются потери, зависящие от полировки торца кристалла LiNbO_3 , и потери при стыковке оптического волокна с волноводом.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Для опорного интерферометра с базой 466 мкм получены следующие характеристики: свободный спектральный диапазон $\text{FSR} = 5$ нм, контраст интерференционной картины $K = 14$ дБ, вносимые оптические потери 14.7 дБ. Моделирование подтвердило зависимость FSR от длины волны и базы интерферометра. Установлена чувствительность опорного интерферометра при воздействии внешнего электрического поля ($S_U = 1.63$ нм/В). Пироэффект вызывает температурную нестабильность, требующую компенсации для прецизионных измерений. Полученные результаты моделирования показали высокую степень соответствия экспериментальным данным: $\text{FSR} = 5.15$ нм, $S_U = 1.7$ нм/В.

Рис. 3. Сравнительный анализ полученных результатов с помощью математического моделирования и экспериментального метода.

Полученные характеристики вполне согласуются с данными по аналогичным интегральным устройствам. Вносимые потери 14.7 дБ с учетом полировки и стыковки, контраст $K = 14$ дБ и электрооптическая чувствительность $S_U = 1.63$ нм/В соответствуют значениям для интегральных устройств на основе LiNbO_3 с отоженными протонообменными волноводами на объемной подложке [3, 4].

4. ВЫВОДЫ

Опорный интерферометр на основе LiNbO_3 демонстрирует совокупность спектральных характеристик (свободный спектральный диапазон порядка нескольких нанометров, высокий контраст интерференционной картины, достаточная чувствительность при умеренных оптических потерях), которые обеспечивают его пригодность для использования в системе опроса интерферометрических датчиков, основанной на эффекте Вернье.

Полученные параметры обосновывают перспективность применения данного интерферометра в качестве ключевого элемента устройства опроса. Также рассмотренное устройство может применяться в качестве компактного оптического спектрометра или активного оптического фильтра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sosunov A., Shipitsin A., Zhitkov M. et al. Sensors: 2026, V. 26. № 5. P. 1619. <https://doi.org/10.3390/s26051619>
2. Gomes A., Bartelt H. Optical Vernier effect: recent advances and developments. Laser Photon. Rev. 2021. V. 15. № 7. C. 2000588. <https://doi.org/10.1002/lpor.202000588>
3. Wooten E.L., Kissa K.M., Yi-Yan A. et al. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2000. V. 6. № 1. P. 69. <https://doi.org/10.1109/2944.826874>
4. Kostritskii S.M., Korkishko Yu.N., Fedorov V.A. et al. Proc. SPIE, Integrated Optics: Theory and Applications. 2005. V. 5956. P. 266. <https://doi.org/10.1117/12.620459>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Опорный интерферометр.

Рис. 2. Схема интегрального опорного интерферометра Маха–Цендера.

Рис. 3. Сравнительный анализ полученных результатов с помощью математического моделирования и экспериментального метода: **а** – чувствительность опорного интерферометра, **б** – математическая модель чувствительности опорного интерферометра, **в** – спектр пропускания опорного интерферометра, **г** – математическая модель спектра пропускания опорного интерферометра.

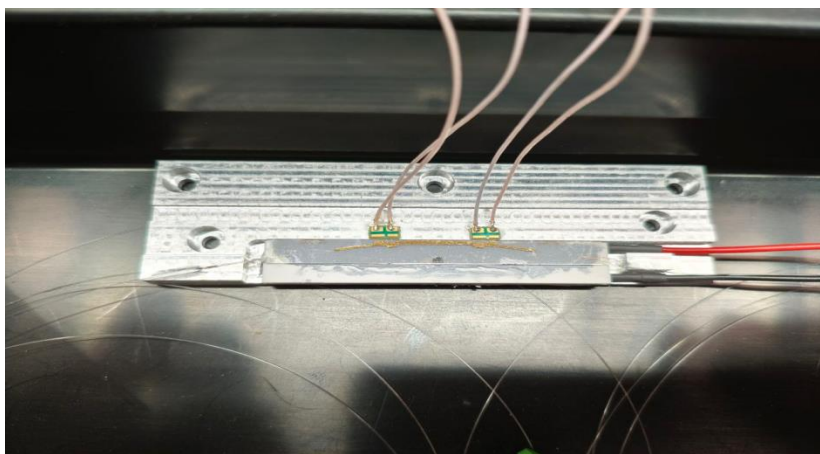


Рис. 1.

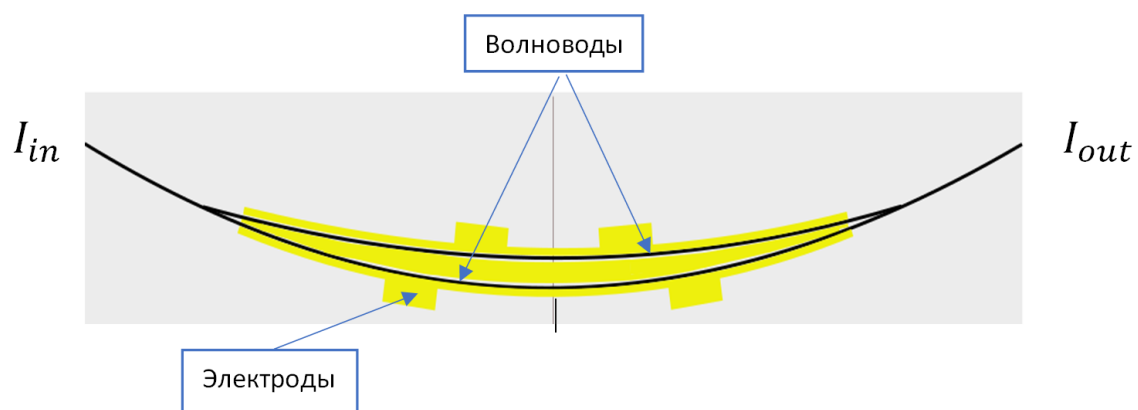


Рис. 2.

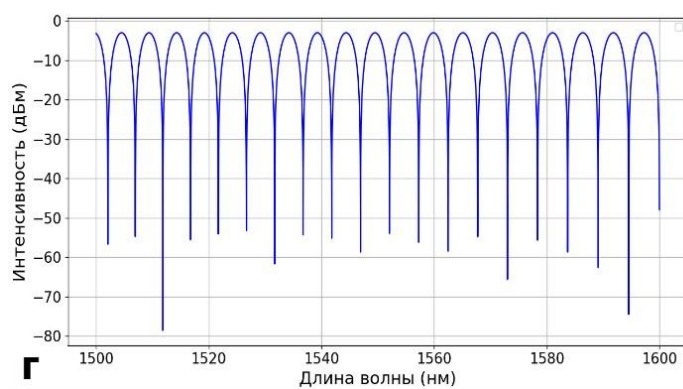
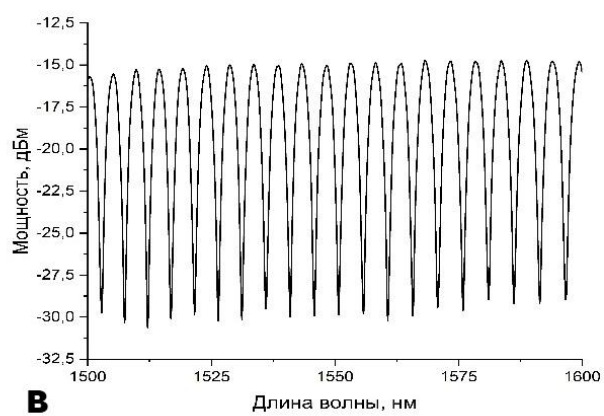
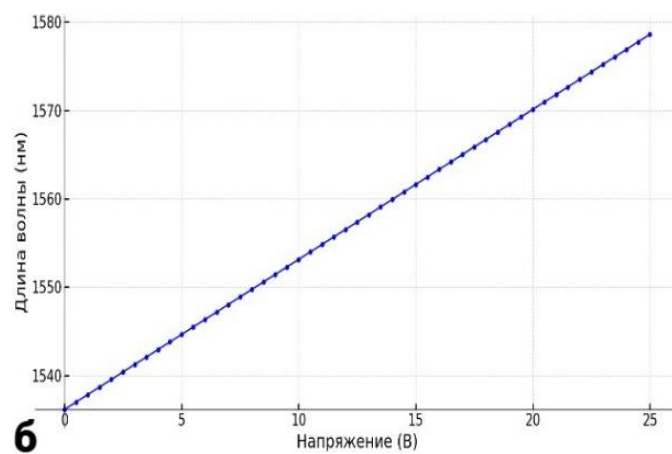
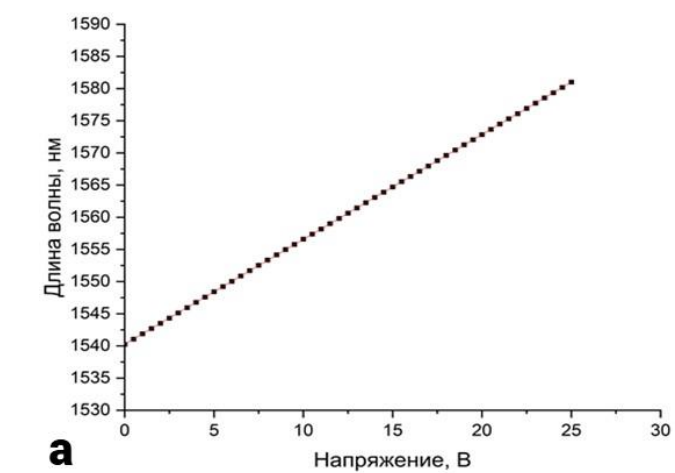


Рис. 3.