

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 535.015, 535.417, 681.787

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГО-ОПТИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА
ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЯЮЩЕГО ВОЛОКНА МЕТОДОМ
СПЕКТРАЛЬНОГО ОПРОСА ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО
ИНТЕРФЕРОМЕТРА

©2026 г. А. И. Головченко, А. В. Петров*, О. И. Котов

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29*

**E-mail: petrov_avi@spbstu.ru*

Поступила в редакцию 02.06.2026

После доработки 15.07.2026

Принята к публикации 24.08.2026

Предложен метод определения упруго-оптического коэффициента двулучепреломляющих волокон, основанный на спектральном опросе одноволнового поляризационного интерферометра. Разработана физико-математическая модель, описывающая сигнал интерферометра при аксиальном растяжении исследуемого волокна. Показано, что анализ сдвига спектральной передаточной функции совместно с независимым определением длины биений поляризационных мод позволяет разделить геометрический и упруго-оптический вклады в изменение разности фаз поляризационных мод и таким образом определить упруго-оптический коэффициент. Экспериментальная апробация на волокне типа PANDA растягиваемого участка для двух значений длины дала результат $k = 6.8 \cdot 10^{-3}$, по порядку величины согласующийся с известными литературными данными.

Ключевые слова: двулучепреломляющее волокно, поляризационный интерферометр, спектральный опрос, упруго-оптический коэффициент, длина биений, осевое растяжение, PANDA.

1. ВВЕДЕНИЕ

Волоконные световоды с сильным линейным двулучепреломлением (ДЛП), в частности волокна типа PANDA, широко применяются при создании волоконно-оптических датчиков физических величин — деформации, температуры, давления и вибрации [1–3]. Высокая стабильность поляризационных характеристик, достигаемая за счет встроенных напрягающих элементов в оболочке, делает их предпочтительным выбором для прецизионных измерительных систем [4].

Одним из базовых чувствительных элементов на основе ДЛП-волокон является поляризационный интерферометр [1], принцип действия которого заключается в регистрации разности фаз между двумя ортогональными поляризационными модами. При аксиальном растяжении волокна данная разность фаз претерпевает изменения, что позволяет осуществлять количественную оценку внешнего воздействия. Для демодуляции сигналов подобных интерферометров широкое распространение получил метод спектрального опроса, подразумевающий регистрацию интерференционной картины в заданном спектральном диапазоне с последующим анализом ее трансформации [5–7].

Изменение разности фаз поляризационных мод при аксиальной деформации ДЛП-волокна определяется совместным действием двух физических механизмов: геометрическим удлинением оптического пути и упруго-оптическим эффектом, связанным с изменением собственного двулучепреломления материала под действием механических напряжений [8]. Количественной мерой последнего служит упруго-оптический коэффициент (или коэффициент деформационной чувствительности двулучепреломления) k , характеризующий скорость изменения разности показателей преломления с ростом относительной деформации [9, 10]. Тот факт, что в результирующем интерференционном сигнале оба механизма дают вклад одновременно и аддитивно по фазе, делает прямое измерение этого коэффициента нетривиальной задачей. Без привлечения дополнительных методических приемов оказывается затруднительным как выделить искомую характеристику материала из экспериментальных данных, так и обеспечить прецизионное проектирование датчиков на основе подобных интерферометров [11].

Несмотря на то, что теоретические основы упруго-оптических явлений в анизотропных волокнах хорошо проработаны [8], существующие методы экспериментального определения упруго-оптического коэффициента требуют применения сложного специализированного оборудования: полярископов [12], перестраиваемых лазеров с анализом частоты биений [13] или систем цифровой голографии и томографии [14, 15]. Кроме того, большинство известных подходов ориентированы на измерение интегральных характеристик двулучепреломления [3, 11, 16], в которых неразличимы два физически разнородных вклада: геометрическое удлинение оптического пути и упруго-оптический эффект. Получаемые в таких измерениях коэффициенты характеризуют не собственно материал, а совместный отклик волокна на деформацию, что не позволяет выделить упруго-оптический коэффициент в чистом виде.

Определение точного значения упруго-оптического коэффициента k представляет не только фундаментальный, но и значительный практический интерес, поскольку данный параметр лежит в основе функционирования широкого класса поляриметрических волоконно-

оптических датчиков деформации. В частности, данная величина напрямую определяет чувствительность таких датчиков [3, 11] и используется в качестве ключевого входного параметра при их численном моделировании и проектировании [17], поэтому ее знание необходимо для их калибровки. Более того, в работе [18] при теоретическом анализе высокочувствительного датчика на основе эффекта Вернье авторы были вынуждены использовать литературное значение данной величины, поскольку его прямое измерение отсутствовало. Эти примеры наглядно демонстрируют существующий запрос на простые и надежные методы определения упруго-оптического коэффициента, восполнению которого и посвящена настоящая работа.

В настоящей работе предложен альтернативный относительно простой в реализации метод измерения упруго-оптического коэффициента ДЛП-волокна, основанный исключительно на спектральном опросе одноволоконного поляризационного интерферометра. Разработана физико-математическая модель, описывающая трансформацию спектральной передаточной функции интерферометра при аксиальном растяжении. Показано, что анализ сдвига интерференционной картины в спектральной области позволяет эффективно разделить геометрический и упруго-оптический вклады и определить искомый упруго-оптический коэффициент k .

2. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

2.1. Базовая теория поляризационного интерферометра

На рис. 1 представлена принципиальная схема одноволоконного поляризационного интерферометра (ОПИ).

Рис. 1. Принципиальная схема одноволоконного поляризационного интерферометра

Широкополосный источник излучает свет в диапазоне длин волн $[\lambda_0; \lambda_0 + \Delta\lambda]$. После прохождения поляризатора 2 линейно поляризованный свет распространяется по одной из осей подводящего ДЛП-волокна, согласованной с поляризатором. Соединение 3 ориентирует оси исследуемого волокна под углом 45° относительно плоскости поляризации вводимого излучения, обеспечивая равное возбуждение обеих ортогональных поляризационных мод. После прохождения исследуемого волокна и соединения 4 в отводящем ДЛП-волокне формируются две ортогональные поляризационные моды, каждая из которых возникает в результате интерференции двух поляризационных мод, возбужденных в исследуемом волокне. Выходной поляризатор 5, установленный за отводящим волокном, выделяет одну из

поляризационных мод, в результате чего на оптическом спектроанализаторе 6 формируется результирующий интерференционный сигнал.

Выходной сигнал интерферометра $I(\lambda)$ описывается стандартным выражением для двухлучевой интерференции [19]:

$$I(\delta L, \delta \lambda) = 1 + A \cos[\Delta \beta (\lambda_0 + \delta \lambda) (L + \delta L)], \quad (1)$$

где $\Delta \beta = \beta_x - \beta_y = (2\pi/\lambda) (n_x - n_y)$ – разность постоянных распространения поляризационных мод, L – полная длина исследуемого волокна, δL – удлинение исследуемого волокна, $\delta \lambda$ – изменение длины волны относительно λ_0 , A – коэффициент, учитывающий амплитуду и потери.

При аксиальном растяжении участка волокна длиной L_S происходит, во-первых, геометрическое удлинение волокна на величину δL , а во-вторых, изменение собственного двулучепреломления материала, обусловленное упруго-оптическим эффектом.

Разложив аргумент косинуса в ряд Тейлора по малым изменениям длины волокна δL и длины волны $\delta \lambda$, оставляя только величины первого порядка малости, получим выражение

$$I(\delta L, \delta \lambda) = 1 + A \cos \left[\Delta \beta_0 L + \Delta \beta_0 \delta L + L \frac{\partial(\Delta \beta_0)}{\partial(\delta L)} \delta L - \Delta \beta_0 L \frac{\delta \lambda}{\lambda_0} \right]. \quad (2)$$

Отметим, что выражение (2) получено с учетом того, что коэффициенты преломления n_x и n_y и их разность $(n_x - n_y)$ очень слабо зависят от длины волны в рассматриваемом диапазоне длин волн, т. е. справедливо соотношение [20]

$$\frac{d(n_x - n_y)}{d\lambda} \approx 0. \quad (3)$$

Строго говоря, при использовании спектрального метода опроса измеряемой величиной является не фазовое, а групповое двулучепреломление [21]. Однако в рамках развиваемой модели дисперсионными эффектами в исследуемом спектральном диапазоне можно пренебречь, что позволяет использовать упрощенное соотношение (3).

Следует отметить, что абсолютное удлинение δL не является характеристикой собственно материала волокна, поскольку при фиксированной внешней нагрузке оно пропорционально длине растягиваемого участка L_S . Для описания отклика самого волокна на механическое воздействие в механике деформируемого твердого тела и волоконно-оптической тензометрии общепринятой величиной является относительная деформация $\varepsilon = \delta L/L_S$. Эта безразмерная характеристика не зависит от геометрических размеров образца и традиционно используется при определении упруго-оптических констант материалов [10]. Переходя в выражении (2) от абсолютного удлинения δL к относительной деформации ε , получаем

$$I(\varepsilon, \delta\lambda) = 1 + A \cos \left[\Delta\beta_0 L + \Delta\beta_0 L_S \varepsilon + L_S \frac{\partial(\Delta\beta_0)}{\partial\varepsilon} \varepsilon - \Delta\beta_0 L \frac{\delta\lambda}{\lambda_0} \right]. \quad (4)$$

Количественной мерой упруго-оптического эффекта в ДПП-волокнах служит упруго-оптический коэффициент k , традиционно определяемый в механике оптических волокон как производная разности эффективных показателей преломления по относительной деформации [9, 22]:

$$k = \frac{\partial(\Delta n)}{\partial\varepsilon}. \quad (5)$$

С учетом этого перепишем выражение (4) в окончательном виде:

$$I(\varepsilon, \delta\lambda) = 1 + A \cos \left[\Delta\beta_0 L + \Delta\beta_0 L_S \varepsilon + \frac{2\pi}{\lambda_0} k L_S \varepsilon - \Delta\beta_0 L \frac{\delta\lambda}{\lambda_0} \right]. \quad (6)$$

Проанализируем физический смысл слагаемых в аргументе косинуса. Первое слагаемое определяет постоянную фазовую составляющую, не зависящую от внешних воздействий. Второе слагаемое описывает вклад геометрического удлинения волокна в изменение разности фаз поляризационных мод. Третье слагаемое описывает вклад упруго-оптического эффекта. Четвертое слагаемое формирует спектральную передаточную функцию (СПФ) интерферометра – зависимость выходной интенсивности от длины волны.

На рис. 2а представлены рассчитанные в соответствии с выражением (6) зависимости интенсивности выходного сигнала от величины относительной деформации ε (для удобства представления экспериментальных данных значения относительной деформации на рисунках выражены в мкм/м). Для наглядности на рис. 2б приведены кривые, иллюстрирующие вклад каждого из механизмов по отдельности: сплошная линия соответствует изменению фазы только за счет геометрического удлинения волокна, штриховая линия – только за счет упруго-оптического эффекта. Видно, что результирующая зависимость (красная линия) представляет собой одночастотный гармонический сигнал, пространственный период которого формируется совместным действием обоих факторов. При этом геометрический вклад, определяемый длиной биений поляризационных мод Λ_b , задает относительно медленное изменение фазы с ростом ε , тогда как упруго-оптический вклад, характеризуемый коэффициентом k , приводит к значительно более быстрому набегу фазы на единицу деформации. Итоговая частота осцилляций определяется суммой этих двух составляющих в аргументе косинуса.

Рис. 2. а – Зависимость интенсивности на выходе

Таблица 1. Используемые при расчетах параметры

Параметр	Значение
----------	----------

Длина волны λ_0 , нм	1550
Разность постоянных распространения $\Delta\beta$, рад/м	$2.036 \cdot 10^3$
Упруго-оптический коэффициент k	$6.8 \cdot 10^{-3}$
Длина исследуемого волокна L , м	1.3

Из приведенных рассуждений следует, что величина упруго-оптического коэффициента k может быть в принципе определена путем анализа частоты осцилляций интерференционного сигнала при вариации деформации ε . Проблема, однако, заключается в том, что в реальном эксперименте регистрируется результирующий сигнал поляризационного интерферометра, в котором оба механизма изменения фазы – геометрический и упруго-оптический – действуют одновременно и неразделимы в рамках измерения интенсивности на фиксированной длине волны. Непосредственное выделение вклада, связанного исключительно с k , из наблюдаемой зависимости $I(\varepsilon)$ представляет собой нетривиальную задачу. В следующем разделе будет показано, что переход к спектральному опросу интерферометра и анализу сдвига его спектральной передаточной функции позволяет эффективно решить данную проблему, обеспечивая независимое определение упруго-оптического коэффициента.

2.2. Определение упруго-оптического коэффициента методом спектрального опроса

При реализации спектрального опроса при помощи широкополосного источника света и оптического спектроанализатора на выходе ОПИ формируется зависимость интенсивности света от длины волны, представляющая собой гармоническую функцию, формируемую четвертым слагаемым выражения (6). Данная зависимость называется спектральной передаточной функцией одноволоконного поляризационного интерферометра. Период СПФ $\Delta\lambda_b$ однозначно связан с длиной биений поляризационных мод Λ_b исследуемого волокна следующим образом [23]:

$$\Lambda_b = L \frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_0}. \quad (7)$$

Приложение аксиальной нагрузки (изменение ε) приводит к смещению СПФ по шкале длин волн (рис. 3). Величина фазового сдвига СПФ $\delta\varphi$ определяется суммой обоих механизмов изменения фазы на длине растягиваемого участка L_S :

$$\delta\varphi = \left(\Delta\beta_0 + \frac{2\pi}{\lambda_0} k \right) L_S \varepsilon. \quad (8)$$

Таким образом, располагая экспериментально измеренной зависимостью фазового сдвига СПФ от деформации и зная длину биений поляризационных мод Λ_b (легко определяемую по периоду самой СПФ в отсутствие растяжения, рис. 3), можно рассчитать

величину упруго-оптического коэффициента k , исключив из суммарного фазового набег вклад, обусловленный чисто геометрическим удлинением волокна.

Учитывая, что $\varepsilon = \delta L/L_S$, можно получить выражение для упруго-оптического коэффициента в виде

$$k = \frac{\lambda_0}{2\pi} \left(\frac{\delta\varphi}{\varepsilon L_S} - \frac{2\pi}{\Lambda_b} \right) = \frac{\lambda_0}{2\pi} \left(\frac{\delta\varphi}{\delta L} - \frac{2\pi}{\Lambda_b} \right). \quad (9)$$

Рис. 3. Спектральная передаточная функция одноволоконного поляризационного интерферометра, рассчитанная в соответствии с формулой (6) для двух значений

3. ЭКСПЕРИМЕНТ

Мы экспериментально исследовали предложенный метод измерения упруго-оптического коэффициента. В данном разделе описаны процедура эксперимента и полученные результаты.

3.1. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 4.

Рис. 4. Схема экспериментальной установки:

В экспериментальной установке в качестве широкополосного источника света (ШИС) использовался суперлюминесцентный диод Exalos EXS210066-01 (выходная мощность равна 5 мВт, диапазон длин волн составляет 1460–1610 нм (FWHM)) с волоконным одномодовым выходом. В качестве оптического спектроанализатора (ОСА) мы использовали I-MON 512 USB (диапазон длин волн равен 1510–1595 нм, спектральное разрешение составляет 170 пм, скорость сканирования равна 1000 спектров/с).

Исследуемое волокно – стандартное ДЛП-волокно типа PANDA. В схеме использовались коммерческие волоконно-оптические поляризаторы с рабочим диапазоном длин волн 1550 ± 40 нм, поляризационной экстинкцией не менее 30 дБ, вносимыми потерями не более 0.5 дБ и обратными потерями не менее 50 дБ. Соединения 3 и 4, обеспечивающие поворот плоскости поляризации на угол $\psi = 45^\circ$ относительно осей исследуемого волокна, выполнялись с помощью аппарата для сварки оптических волокон Fujikura FSM-100P+, который обеспечивает точность установки угла поворота осей ДЛП в пределах $\pm 1^\circ$, что гарантирует уровень перекрестных помех ниже –40 дБ для волокон типа PANDA. Подробный анализ влияния возможных рассогласований поляризационных углов элементов схемы на выходной интерференционный сигнал выполнен авторами ранее в работе [19]; в настоящем эксперименте указанные выше точностные характеристики обеспечивают пренебрежимо малый уровень соответствующих погрешностей.

Свет от ШИС сначала проходит через волоконно-оптический поляризатор, далее через отрезок волокна, сваренный под углом $\psi = 45^\circ$ к основным осям, затем поступает в исследуемое волокно. Для получения интерференционной картины свет снова минует оптический элемент, поворачивающий оси на 45° , и волоконно-оптический поляризатор. Далее выходной сигнал поступает на ОСА, обеспечивающий получение СПФ.

Аксиальное растяжение исследуемого волокна осуществлялось линейным транслятором Standa 7TF2 с микрометрической точностью.

Все измерения проводились в лабораторных условиях при фиксированной комнатной температуре $((23 \pm 1)^\circ\text{C})$. Длительность одного цикла измерений (регистрация СПФ и растяжение волокна) не превышала десяти секунд, в течение которых температурным дрейфом двулучепреломления можно было пренебречь.

Алгоритм обработки включал следующие шаги.

1. Регистрация последовательности спектральных передаточных функций, соответствующих различным значениям приложенной деформации ϵ .

2. Применение быстрого преобразования Фурье к каждой зарегистрированной СПФ. По положению спектральной компоненты, соответствующей интерференции поляризационных мод, определялся период СПФ $\Delta\lambda_b$, по которому, согласно формуле (7), рассчитывалась длина биений Λ_b .

3. Для той же спектральной компоненты определялось значение ее аргумента (фазы). Фазовый сдвиг $\delta\phi$ вычислялся как изменение аргумента выделенной спектральной компоненты при переходе от недеформированного состояния волокна к деформированному.

3.2. Результаты эксперимента

На рис. 5 представлены зависимости выходного сигнала интерферометра от величины относительной деформации ϵ для двух различных значений длины растягиваемого участка L_S . Характер зависимостей близок к гармоническому, что соответствует теоретической модели. При этом период сигнала на единицу деформации закономерно уменьшается с увеличением базы растяжения L_S . Данное наблюдение имеет понятную физическую интерпретацию. При одном и том же абсолютном удлинении δL , задаваемом линейным транслятором, механическое напряжение в волокне оказывается существенно выше на более коротком участке, поскольку прикладываемая деформация распределяется на меньшую длину материала. Это приводит к тому, что относительная деформация $\epsilon = \delta L/L_S$ достигает больших значений и, как следствие, одной и той же разности фаз между поляризационными модами соответствует большее приращение ϵ , что проявляется в увеличении периода по оси абсцисс.

Рис. 5. Экспериментально измеренные зависимости сигнала

На рис. 6 представлены примеры экспериментально полученных СПФ для двух значений относительной деформации ε . Видно, что растяжение волокна приводит к смещению СПФ. По периоду СПФ с использованием соотношения (7) была определена длина биений поляризационных мод $\Lambda_{b0.4} = \Lambda_{b0.8} = 2.9$ мм, что соответствует теоретическим представлениям – длина биений поляризационных мод не зависит от длины растягиваемого участка волокна.

Полученное значение длины биений $\Lambda_b = 2.9$ мм соответствует двулучепреломлению $\Delta n_0 = \lambda_0/\Lambda_b \approx 5.34 \cdot 10^{-4}$. Данная величина хорошо согласуется с типичными паспортными значениями для коммерческих ДЛП-волокон типа PANDA (длина биений от 2.5 до 4.5 мм, фазовое двулучепреломление от $3.4 \cdot 10^{-4}$ до $6.2 \cdot 10^{-4}$).

Рис. 6. Экспериментально измеренная

На рис. 7 показаны экспериментальные зависимости фазового сдвига СПФ от относительной деформации ε . Зависимости строго линейны в исследованном диапазоне деформаций. Тангенс угла наклона этих прямых был использован для расчета упруго-оптического коэффициента согласно формуле (9). Для обеих длин растягиваемого участка волокна его значение оказалось идентичным в пределах погрешности и составило $k = 6.8 \cdot 10^{-3}$. Данный результат подтверждает фундаментальное положение о том, что k является характеристикой самого материала и не зависит от геометрических параметров эксперимента.

Рис. 7. Экспериментально измеренные зависимости фазы

Представляет интерес сопоставить полученное значение с известными из литературы данными. В работе [11] для волокна типа PANDA на длине волны примерно 1550 нм была экспериментально измерена деформационная чувствительность поляризметрического датчика $S = 28000$ рад/($\varepsilon \cdot \text{м}$). Данный параметр определяется в работе [11] как $S = (1/L) d(\Delta\Phi)/d\varepsilon$, он характеризует суммарный отклик датчика на деформацию, включающий как геометрический, так и упруго-оптический вклады. В обозначениях настоящей работы та же производная может быть записана как $d(\Delta\Phi)/d\varepsilon = (2\pi/\lambda_0)(\Delta n_0 + k)L_s$, откуда следует связь $k = (\lambda_0 S/2\pi) - \Delta n_0$. Принимая начальное двулучепреломление $\Delta n_0 \approx 5.34 \cdot 10^{-4}$ (что соответствует длине биений $\Lambda_b \approx 2.9$ мм), получаем оценку $k \approx 6.4 \cdot 10^{-3}$. Это значение хорошо согласуется с нашим результатом $k = 6.8 \cdot 10^{-3}$, что подтверждает корректность предлагаемого метода.

3.3. Оценка погрешности измерения

Строгий расчет погрешности определения упруго-оптического коэффициента k предложенным методом представляет собой нетривиальную задачу, поскольку итоговая

погрешность складывается из нескольких независимых вкладов, каждый из которых требует отдельного анализа. Ниже мы приводим оценку основных источников погрешности и их влияния на точность определения искомого коэффициента.

1. Погрешность определения длины растягиваемого участка L_S . Данная величина задавалась положением магнитных зажимов, фиксирующих волокно на микрометрических подвижках. Ширина каждого зажима вдоль оси волокна составляла около 10 мм. Вследствие конечной ширины зажимов эффективная длина участка волокна, подвергающегося растяжению, может быть определена с точностью до нескольких миллиметров. При номинальной длине $L_S \approx 1$ м это приводит к относительной погрешности определения L_S на уровне десятых долей процента (примерно 0.1–0.3%), и эта погрешность непосредственно транслируется в погрешность определения k .

2. Погрешность измерения фазового сдвига СПФ. Для извлечения фазового сдвига $\delta\varphi$ из спектральной передаточной функции использовалось быстрое преобразование Фурье с последующим выделением спектральной компоненты, соответствующей интерференции поляризационных мод, и построением фазового спектра. Точность определения $\delta\varphi$ при таком подходе ограничена спектральным разрешением используемого оптического спектроанализатора (170 пм) и отношением сигнал/шум регистрируемых спектров. Применение алгоритма развертки фазы к фазовому спектру позволяет отслеживать изменение $\delta\varphi$ в пределах, существенно превышающих 2π , без накопления дополнительной ошибки. По нашим оценкам, основанным на анализе повторяемости результатов при многократных измерениях, относительная погрешность определения $\delta\varphi$ не превышает 1–2%.

3. Погрешность определения начального двулучепреломления Δn_0 . Величина Δn_0 вычисляется через длину биений поляризационных мод Λ_b , которая, в свою очередь, определяется по периоду СПФ. Точность измерения Λ_b зависит от спектрального разрешения ОСА и числа периодов СПФ, укладывающихся в рабочий спектральный диапазон (около 80 нм). При длине исследуемого волокна $L \approx 1.3$ м и типичном значении $\Lambda_b \approx 3$ мм в пределах диапазона сканирования укладывается несколько десятков периодов СПФ, что обеспечивает относительную погрешность определения Λ_b на уровне 1–2%. Данная погрешность входит в итоговую погрешность определения k через формулу (9).

4. Инструментальная погрешность транслятора. Аксиальное растяжение волокна осуществлялось линейным транслятором Standa 7TF2, паспортная точность позиционирования которого составляет около 5 мкм. При характерных значениях удлинения $\delta L = 500$ –1000 мкм относительная погрешность измерения удлинения не превышает 0.5–1.0%, что также вносит вклад в итоговую погрешность.

5. Влияние температурных эффектов. Как отмечалось выше, все измерения проводились при фиксированной комнатной температуре, а длительность одного цикла измерений не превышала десяти секунд. Известно, что температурный коэффициент двулучепреломления для волокон типа PANDA составляет порядка $\gamma_T \approx -5 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. При возможных колебаниях температуры в пределах $\pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$ за время измерения относительное изменение двулучепреломления не превышает 0.1%, что пренебрежимо мало по сравнению с другими источниками погрешности.

Суммируя перечисленные вклады, можно заключить, что относительная погрешность определения упруго-оптического коэффициента k предложенным методом по порядку величины не превышает нескольких процентов. Более детальный анализ погрешности, включающий статистическую обработку результатов многократных измерений, является предметом дополнительных исследований.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлены результаты теоретического и экспериментального исследований метода определения упруго-оптического коэффициента (коэффициента деформационной чувствительности двулучепреломления) волокна типа PANDA, основанного на спектральном опросе одноволоконного поляризационного интерферометра.

Разработана физико-математическая модель, описывающая трансформацию интерференционного сигнала при аксиальном растяжении волокна. Показано, что результирующее изменение разности фаз поляризационных мод формируется под совместным действием двух механизмов: геометрического удлинения оптического пути и упруго-оптического эффекта. Предложенный подход позволяет решить проблему выделения упруго-оптического вклада из суммарного фазового набеге без привлечения сложного оборудования. Для этого используется независимое определение длины биений поляризационных мод Λ_b по периоду спектральной передаточной функции интерферометра. Зная Λ_b и измеряя сдвиг спектральной передаточной функции при деформации, можно рассчитать геометрический вклад и, исключив его, получить искомое значение упруго-оптического коэффициента k .

Экспериментальная апробация метода проведена с использованием стандартного ДПП-волокна типа PANDA при двух различных длинах растягиваемого участка. Измеренное значение коэффициента k составило $6.8 \cdot 10^{-3}$ и оказалось одинаковым для обеих конфигураций, что подтверждает его независимость от геометрических параметров эксперимента и согласуется с выводами разработанной модели. Сопоставление полученных результатов с известными литературными данными демонстрирует хорошее численное согласие, что также подтверждает корректность разработанного подхода.

Предложенный метод отличается простотой реализации и не требует использования специализированных лазерных систем или сложных голографических схем, что делает его пригодным для широкого применения в лабораторной и производственной практике. Полученные результаты могут быть востребованы при проектировании, калибровке и оптимизации волоконно-оптических датчиков деформации, давления и температуры на основе двулучепреломляющих световодов [24–29], а также при входном контроле характеристик оптических волокон.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pendão C., Silva I.* Sensors. 2022. V. 22. P. 7554. <https://doi.org/10.3390/s22197554>
2. *Zhou L., Wang L., Hu S.* Proceedings of SPIE 7656. The International Society for Optical Engineering. 2010. P. 76562V. <https://doi.org/10.1117/12.863884>
3. *Woliński T.R., Lesiak P., Domański A.W.* Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences. 2008. V. 56. P. 125.
4. *Rashleigh S. J.* Light. Technol. 1983. V. 1. P. 312. <https://doi.org/10.1109/JLT.1983.1072121>
5. *Petrov A., Golovchenko A., Bisyarin M., Ushakov N., Kotov O.* Photonics. 2024. 11. P. 423. <https://doi.org/10.3390/photonics11050423>
6. *Naeem K., Chung Y., Kim B.H. J.* Light. Technol. 2020. V. 38. P. 5177. <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.3000232>
7. *Liu Z., Wu C., Tse M.-L.V., Tam H.-Y. J.* Light. Technol. 2014. V. 32. P. 2113. <https://doi.org/10.1109/JLT.2014.2319818>
8. *Sakai J., Kimura T.* IEEE J. Quantum Electron. 1981. V. 17. № 6. P. 1041. <https://doi.org/10.1109/JQE.1981.1071213>
9. *Varnham M.P., Barlow A.J., Payne D.N., Okamoto K.* Electron. Lett. 1983. V. 19. P. 699. <http://doi.org/10.1049/el:19830476>
10. *Feng T., Ding D., Li Z., Yao X.S. J.* Light. Technol. 2017. V. 35. P. 4937. <https://doi.org/10.1109/JLT.2017.2763985>
11. *Wolinski T.R., Lesiak P., Kozlik M., Domanski A.W., Nasilowski T., Thienpont H.* Proc. SPIE 5952, Optical Fibers: Applications. 2005. P. 59520K. <https://doi.org/10.1117/12.625692>
12. *Saunders M.J.* Rev. Sci. Instrum. 1976. V. 47. P. 496. <https://doi.org/10.1063/1.1134662>
13. *Yu X., Hu Y., Chen X., Zhang J., Liu S., Gao Y.* Appl. Opt. 2018. V. 57. P. 2033. <https://doi.org/10.1364/AO.57.002033>
14. *Chu P.L., Whitbread T.* Appl. Opt. 1982. V. 21. P. 4241. <https://doi.org/10.1364/AO.21.004241>

15. Abe T., Mitsunaga Y., Koga H. J. Opt. Soc. Am. A. 1986. V. 3. P. 133.
<https://doi.org/10.1364/JOSAA.3.000133>
16. Zhang F., Lit J.W.Y. Appl. Opt. 1993. V. 32. P. 2213. <https://doi.org/10.1364/AO.32.002213>
17. Anelli F., Abbate G., Jantzen S.L. et al. IEEE: 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Bari, Italy, 2020. P. 1.
<https://doi.org/10.1109/ICTON51198.2020.9203460>
18. Lu D., Ma L., Yang C. et al. Opt. Express 2023. V. 31. P. 22189.
<https://doi.org/10.1364/OE.493875>
19. Головченко А.И., Петров А.В., Темкина В.С., Арчелков А.Б., Цибиногина М.К., Котов О.И. НТВ СПбГПУ. Физико-математические науки. 2025. Т. 18. № 1. С. 182.
<https://doi.org/10.18721/JPM.18115>
20. Goward J. Optical Communication Systems. New York: Prentice-Hall, 1993.
21. Моршнев С.К., Губин В.П., Старостин Н.И., Пржиялковский Я.В., Сазонов А.И. Фотоника. 2018. Т. 12. № 6(74). С. 616. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.2018.12.6.616.633>
[Morshne S.K., Gubin V.P., Starostin N.I., Prshiyalkovsky Ya.V., Sazonov A.I. Photonics Russia 2018. V. 12. № 6(74). 616.]
22. Ohtsuka Y., Tanaka S. Fiber Integr. Opt. 1990. V. 9. P. 245.
<https://doi.org/10.1080/01468039008202913>
23. Kikuchi K., Okoshi T. Opt. Lett. 1983. V. 8. P. 122. <https://doi.org/10.1364/OL.8.000122>
24. Butter C.D., Hocker G.B. Appl. Opt. 1978. V. 17. P. 2867.
<https://doi.org/10.1364/AO.17.002867>
25. Hocker G.B. Appl. Opt. 1979. V. 18. P. 1445. <https://doi.org/10.1364/AO.18.001445>
26. Fürstenau N., Schmidt W., Goetting H.-C. Appl. Opt. 1992. V. 31. P. 2987.
<https://doi.org/10.1364/ao.31.002987>
27. Barlow A., Payne D. IEEE J. Quantum Electron. 1983. V. 19. P. 834.
<https://doi.org/10.1109/JQE.1983.1071934>
28. Guan R., Zhu F., Gan Z., Huang D., Liu S. Opt. Fiber Technol. 2005. V. 11. P. 2401985.
<https://doi.org/10.1016/j.yofte.2004.10.002>
29. Namihira Y. J. Light. Technol. 1985. V. 3. P. 1078. <https://doi.org/10.1109/JLT.1985.1074296>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Принципиальная схема одноволоконного поляризационного интерферометра: 1 – широкополосный источник света (ШИС); 2, 5 – поляризатор; 3, 4 – устройство поворота плоскости поляризации; 6 – оптический спектроанализатор (ОСА). Синим цветом обозначено одномодовое волокно, зеленым – подводящее и отводящее ДПП-волокна, желтым – исследуемое ДПП-волокно. Длина исследуемого волокна L , длина растягиваемого участка L_S .
- Рис. 2.** а – Зависимость интенсивности на выходе одноволоконного поляризационного интерферометра от относительной деформации. б – Зависимости интенсивности света на выходе одноволоконного поляризационного интерферометра от ε с учетом влияния только второго слагаемого (сплошная линия) и только третьего слагаемого (штриховая линия).
- Рис. 3.** Спектральная передаточная функция одноволоконного поляризационного интерферометра, рассчитанная в соответствии с формулой (6), для двух значений относительной деформации ε
- Рис. 4.** Схема экспериментальной установки: 1 – широкополосный источник света (ШИС); 2, 5 – поляризатор; 3, 4 – устройство поворота плоскости поляризации; 6 – оптический спектроанализатор (ОСА). Синим цветом обозначено одномодовое волокно, зеленым – подводящее и отводящее ДПП-волокна, желтым – исследуемое ДПП-волокно. Длина исследуемого волокна L , длина растягиваемого участка L_S
- Рис. 5.** Экспериментально измеренные зависимости сигнала одноволоконного поляризационного интерферометра от величины относительной деформации ε для двух длин растягиваемого участка. Длина волны $\lambda = 1550$ нм
- Рис. 6.** Экспериментально измеренная спектральная передаточная функция одноволоконного поляризационного интерферометра для двух значений относительной деформации ε .
- Рис. 7.** Экспериментально измеренные зависимости фазы спектральной передаточной функции от относительной деформации для двух различных длин растягиваемого участка L_S .

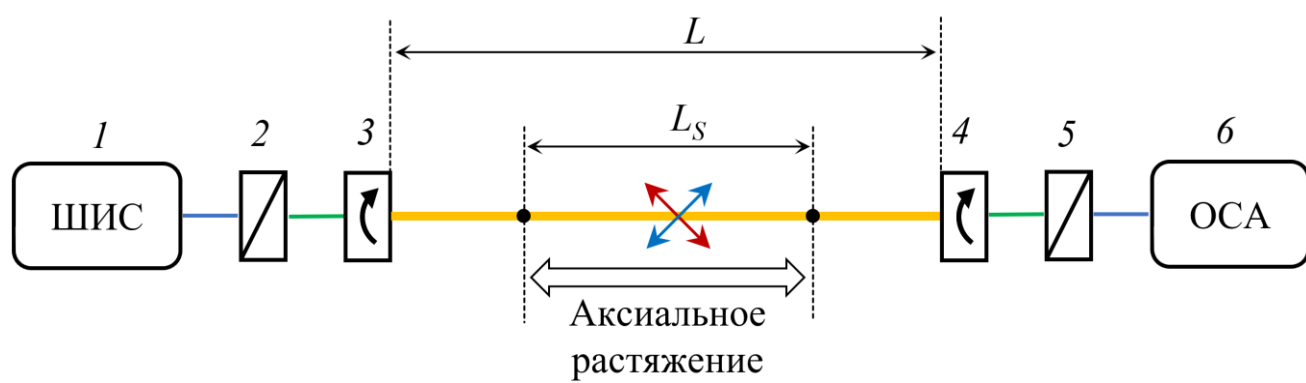


Рис. 1.

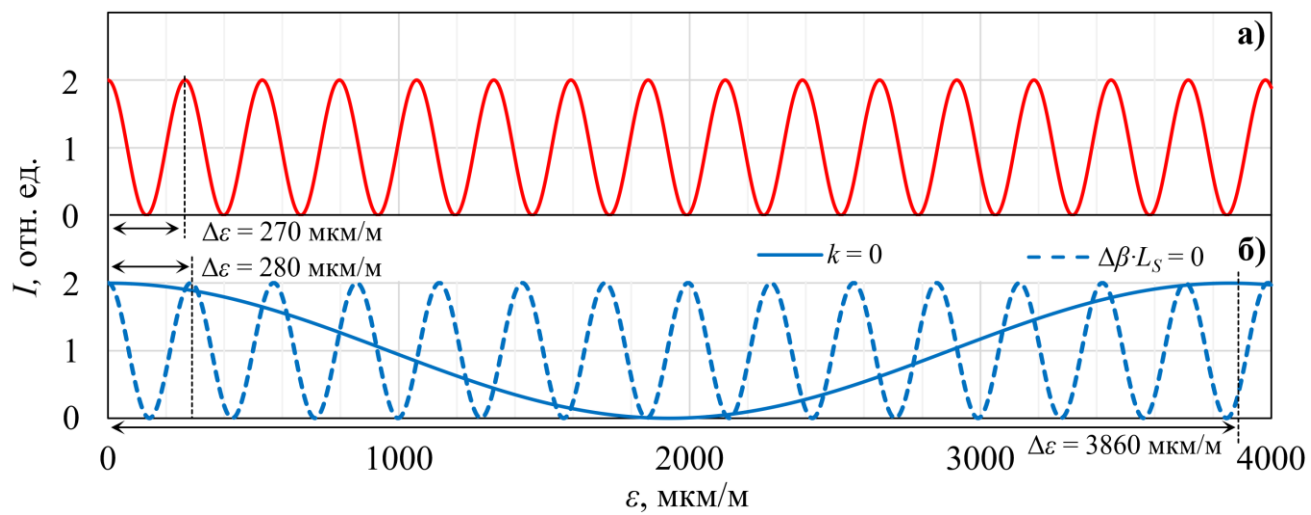


Рис. 2.

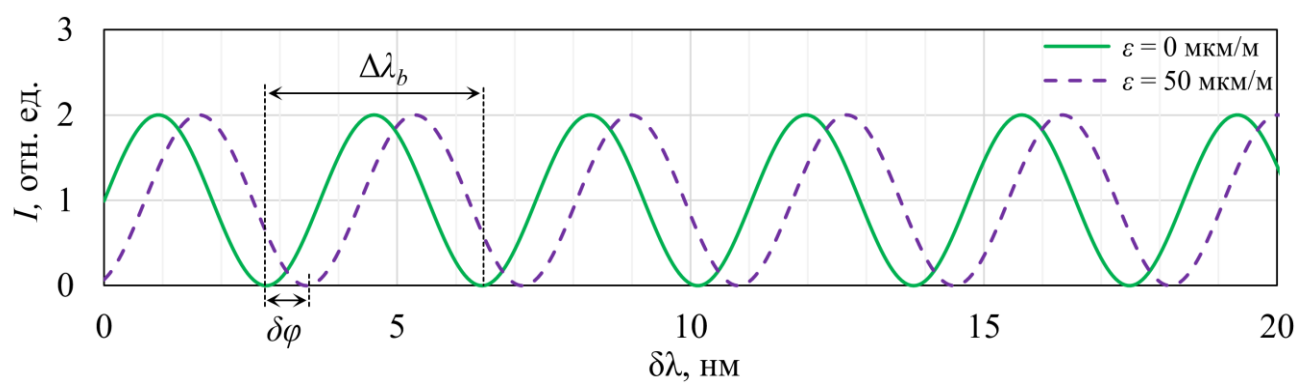


Рис. 3.

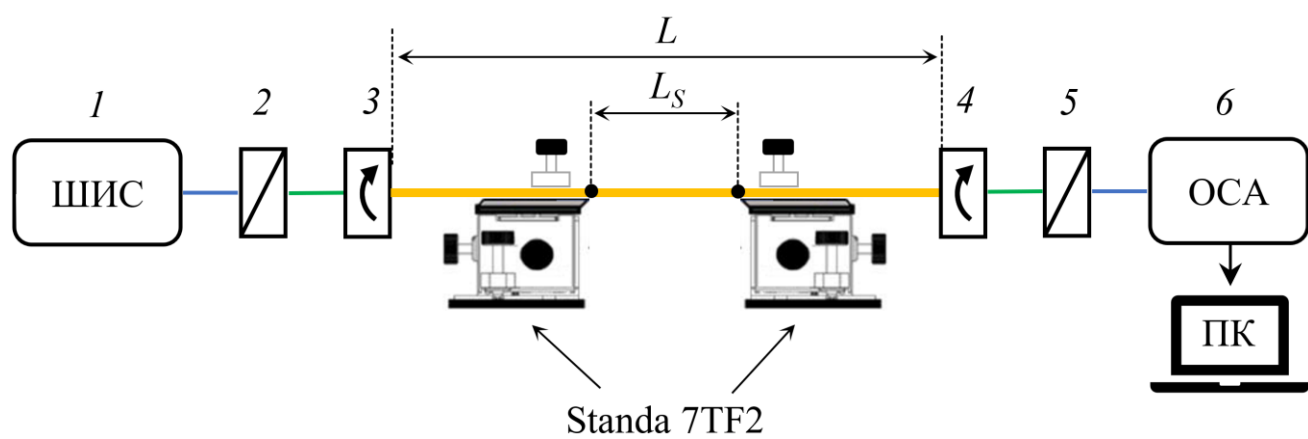


Рис. 4.

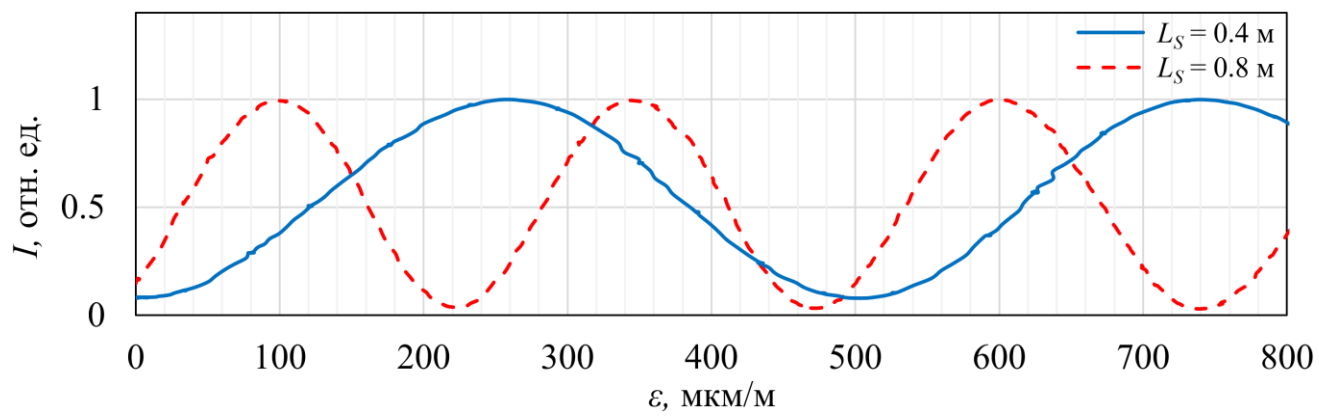


Рис. 5.

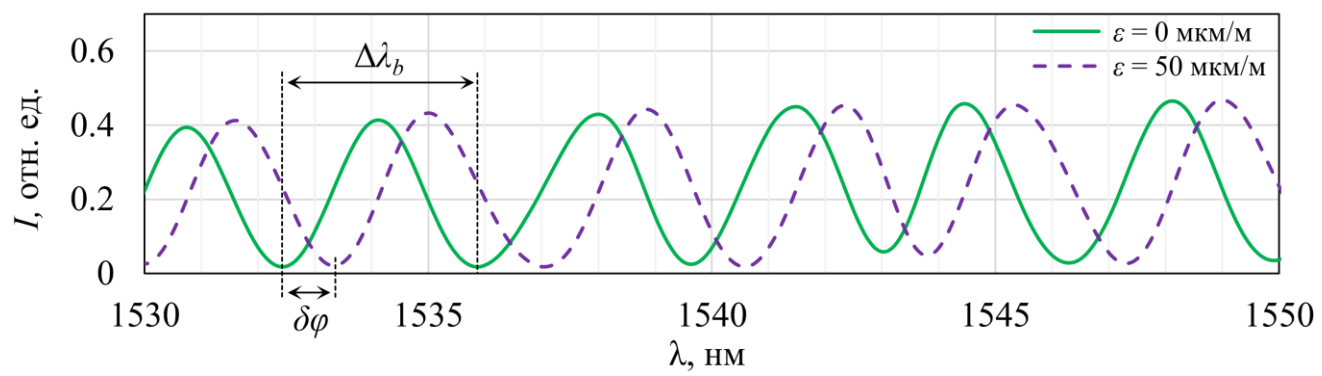


Рис. 6.

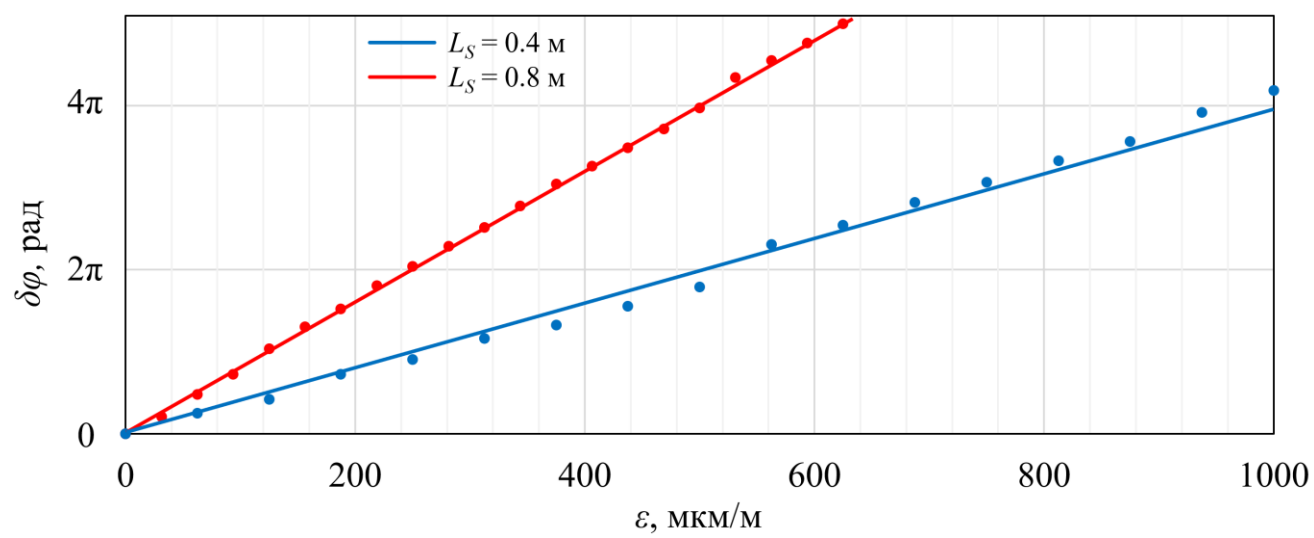


Рис. 7.