

DOI: 10.21122/2220-9506-2026-17-2-177-186

Измерение межмодовой дисперсии в коротких отрезках многомодовых волоконных световодов

А.В. Поляков, А.А. Каваленя

Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь

Поступила 14.10.2025

Принята к печати 22.04.2026

На практике зачастую встаёт задача измерения межмодовой дисперсии в коротких отрезках (от единиц до десятков метров) многомодовых волоконных световодов. Используемые способы на основе интерферометров Маха–Цендера обладают типичными недостатками, присущими интерферометрическим методам измерений. Цель работы – разработка и экспериментальная реализация рециркуляционного метода определения межмодовой дисперсии в коротких отрезках многомодовых волоконных световодов и оценка погрешности измерений. Проведены исследования рециркуляционного способа измерения межмодовой дисперсии в многомодовых волоконных световодах. Данный метод заключается в измерении разности частот рециркуляции, которые формируются «быстрыми» модами, распространяющимися вдоль оптической оси волоконного световода, и наиболее «медленными», распространяющимися под максимальным углом к оси. Разработан экспериментальный стенд оптоэлектронной рециркуляционной системы, обеспечивающий циркуляцию одиночного оптического импульса с периодическим восстановлением по амплитуде, форме и длительности. Получены зависимости относительной долговременной нестабильности частоты рециркуляции при изменении величины постоянной составляющей тока накачки полупроводникового инжекционного лазера и порога срабатывания компаратора. Установлено, что частота рециркуляции стабилизируется не ранее, чем через 20 мин после запуска рециркуляции в условиях эксперимента, при этом достигается максимальное значение относительной долговременной нестабильности не более $3,5 \cdot 10^{-6}$ при длине многомодового волоконного световода 50 м. При анализе учитывалось изменение задержки срабатывания лавинного фотодиода, связанное с увеличением коэффициента лавинного умножения. Показана эффективность предлагаемого метода при определении межмодовой дисперсии коротких отрезков многомодовых волоконных световодов, для тестового градиентного волокна *Corning Inficor 600 50/125* погрешность составила 7 %. Используя полученные данные и решая обратную задачу по восстановлению профиля показателя преломления, получено, что для данного типа многомодового волоконного световода параметр профиля показателя преломления равняется $\alpha = 1,96$.

Ключевые слова: многомодовый волоконный световод, межмодовая дисперсия, оптоэлектронная рециркуляционная система, частота рециркуляции, погрешность

Адрес для переписки:

Поляков А.В.
Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь
e-mail: polyakov@bsu.by

Address for correspondence:

Polyakov A.V.
Belarusian State University,
Nezavisimosti Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: polyakov@bsu.by

Для цитирования:

А.В. Поляков, А.А. Каваленя.
Измерение межмодовой дисперсии в коротких отрезках
многомодовых волоконных световодов.
Приборы и методы измерений.
2026. Т. 17. № 2. С. 177–186.
DOI: 10.21122/2220-9506-2026-17-2-177-186

For citation:

A.V. Polyakov, A.A. Kavalenia.
Measurement of Intermode Dispersion in Short Sections of Multimode
Optical Fiber Guides.
Devices and Methods of Measurements.
2026;17(2):177–186. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2026-17-2-177-186

DOI: 10.21122/2220-9506-2026-17-2-177-186

Measurement of Intermodal Dispersion in Short Sections of Multimode Optical Fiber Guides

A.V. Polyakov, A.A. Kavalenia

Belarusian State University,
Nezavisimosti Ave., 4, Minsk 220030, Belarus

Received 14.10.2025

Accepted for publication 22.04.2026

Abstract

Measuring the intermodal dispersion in short sections (from units to tens meters in length) of multimode optical fibers is often an actual task. Methods used based on Mach–Zehnder interferometers have typical disadvantages inherent for interferometric measurement methods. Purpose of the paper was to develop and experimentally implement a recirculation method for determining the intermodal dispersion in short sections of multimode optical fibers and to estimate the measurement error. The recirculation method for measuring the intermodal dispersion of multimode optical fibers has been studied. This method consists of measuring the difference in recirculation frequencies, which are formed by the "fast" modes propagating along the optical axis of the fiber and the "slowest" ones propagating at the maximum angle to the axis. An experimental stand of an optoelectronic recirculation system has been developed, providing circulation of a single optical pulse with periodic restoration in amplitude, shape and duration. Dependences of the relative long-term instability of the recirculation frequency with a change in the value of the constant component of the pump current of a semiconductor injection laser and the comparator response threshold have been obtained. It was found that the recirculation frequency stabilizes no earlier than 20 min after the start of recirculation under the experimental conditions, while the maximum value of the relative long-term instability was achieved no more than $3.5 \cdot 10^{-6}$ at a length of multimode optical fibers as 50 m. The analysis took into account change in the response delay of the avalanche photodiode associated with the increase in the avalanche multiplication coefficient. Efficiency of the proposed method in determining the intermodal dispersion of short sections of multimode optical fibers was shown; for the test gradient fiber Corning Infcir 600 50/125, the error was 7 %. Using the obtained data and solving the inverse problem of restoring the refractive index profile, it was found that for this type of multimode optical fibers, the refractive index profile parameter was equal to $\alpha = 1.96$.

Keywords: multimode optical fiber, intermodal dispersion, optoelectronic recirculation system, recirculation frequency, error

Адрес для переписки:

Поляков А.В.
Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь
e-mail: polyakov@bsu.by

Address for correspondence:

Polyakov A.V.
Belarusian State University,
Nezavisimosti Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: polyakov@bsu.by

Для цитирования:

А.В. Поляков, А.А. Каваленя.
Измерение межмодовой дисперсии в коротких отрезках
многомодовых волоконных световодов.
Приборы и методы измерений.
2026. Т. 17. № 2. С. 177–186.
DOI: 10.21122/2220-9506-2026-17-2-177-186

For citation:

A.V. Polyakov, A.A. Kavalenia.
Measurement of Intermodal Dispersion in Short Sections of Multimode
Optical Fiber Guides.
Devices and Methods of Measurements.
2026;17(2):177–186. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2026-17-2-177-186

Введение

Несмотря на повсеместное применение одномодовых волоконных световодов, существуют целый ряд областей, где использование многомодовых волоконных световодов (ММВС) остаётся по-прежнему актуальным. Прежде всего, это внутриобъектовые телекоммуникационные сети передачи и сбора данных [1], в том числе использующие возможности пространственного разделения информационных каналов [2], а также чувствительные элементы различных волоконно-оптических датчиков (ВОД) [3–5]. При этом длина отрезков ММВС колеблется от единиц километров [2] до десятков сантиметров [5]. Наряду с оптическими потерями, одной из основных характеристик ММВС выступает межмодовая дисперсия (ММД), которая является доминирующей в таких волокнах и определяет ширину полосы пропускания ММВС. Часто производители не указывают точно значение пропускной способности, например, для ММВС стандарта OM2 принимается диапазон 400–600 МГц·км для $\lambda = 850$ нм. Возможна ситуация, когда документация на данное волокно отсутствует. В результате, возникает задача определения ММД для конкретного образца, поскольку, особенно для градиентных ММВС, межмодовая дисперсия сильно зависит от значения параметра профиля показателя преломления.

Наиболее распространёнными методами измерения межмодовой дисперсии являются следующие. Измерение ширины полосы пропускания волокна основано на измерении импульса отклика и определяется как минимальная частота, при которой модуль передаточной функции ММВС уменьшается до уровня 0,5 [6, 7]. Возможен упрощённый импульсный метод измерений, когда фиксируется только длительность входного и выходного импульса, при этом длительность входного импульса должна составлять 100–400 пс [8]. Альтернативным методом определения ширины полосы пропускания является частотный метод [9–11], при котором измеряется зависимость от частоты глубины синусоидальной модуляции мощности светового сигнала на входе и выходе световода и затем полоса пропускания ММВС определяется как самая низкая частота модуляции, при которой амплитудно-

частотная характеристика уменьшается на 3 дБ от значения на нулевой частоте. Однако указанные методы обеспечивают приемлемую точность измерений при исследовании ММВС длиной от нескольких сотен метров до километра и более, а также достаточно сложны в техническом исполнении. Для определения межмодовой дисперсии для коротких отрезков ММВС используется метод дифференциальной времени задержки [12, 13], заключающийся в измерении задержки между модами при точечном возбуждении волокна узким пучком лазера, смещающимся вдоль торца световода. При использовании для увеличения чувствительности интерферометров Маха–Цендера возникают присущие интерференционным методам измерений проблемы: чувствительность к механическим воздействиям, вибрациям, температуре, дрейф нуля за счёт относительных измерений.

Наряду с широко используемыми в ВОД амплитудными, фазовыми, спектральными оптическими методами измерений в работе [14] представлены физические принципы функционирования и структурные схемы построения нового класса частотных ВОД рециркуляционного типа. Их принцип действия опирается на то, что частота рециркуляции одиночных оптических импульсов в замкнутой оптоэлектронной рециркуляционной системе (ОЭРС), где импульсы периодически восстанавливаются по амплитуде и длительности, зависит от изменения параметров волоконного световода (ВС) под воздействием контролируемой физической величины. В данной конфигурации волокно одновременно выполняет функции чувствительного элемента и канала передачи информации.

Цель работы – разработка и экспериментальная реализация рециркуляционного метода определения межмодовой дисперсии коротких отрезков многомодовых волоконных световодов и оценка погрешности измерений.

Экспериментальная установка

Для измерения межмодовой дисперсии, которая является преобладающим видом дисперсии в многомодовых волокнах, нами был разработан рециркуляционный метод [15, 16], пригодный для коротких волоконных световодов (ВС) длиной 10–500 м. Основой

метода служит изменение частоты рециркуляции одиночного импульса при взаимном осевом смещении торцов исследуемого и зондирующего ВС. В экспериментальной части применялся волоконно-оптический датчик, построенный на базе оптоэлектронной рециркуляционной системы с периодическим восстановлением амплитуды и длительности импульсов на каждом цикле рециркуляции (рисунок 1). В отличие от автоколебательных рециркуляционных систем, предложенная схема исключает затягивающее влияние центральной частоты резонансного усилителя на частоту автоколебаний, устраняет один из ключевых источников погрешности (селективный усилитель), а частота рециркуляции определяется суммарной временной задержкой всех элементов контура.

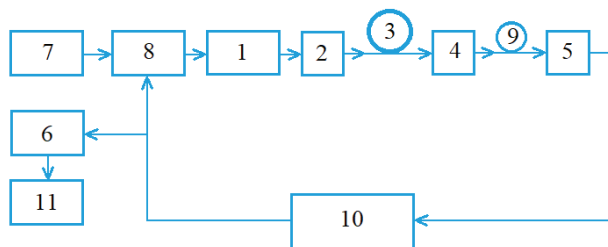


Рисунок 1 – Блок-схема волоконно-оптического измерительного устройства рециркуляционного типа: 1 – модулятор тока; 2 – инжекционный лазер; 3 – измеряемый волоконный световод; 4 – селектор мод; 5 – фотоприёмник; 6 – частотомер; 7 – формирователь импульса; 8 – блок регенерации; 9 – зондирующий световод; 10 – пороговое устройство, 11 – ЭВМ или микропроцессор

Figure 1 – Block diagram of a recirculation type fiber optic measuring device: 1 – current modulator; 2 – injection laser; 3 – measured optical fiber; 4 – mode selector; 5 – photodetector; 6 – frequency meter; 7 – pulse shaper; 8 – regeneration unit; 9 – probing fiber; 10 – threshold device, 11 – computer or microprocessor

Устройство функционирует следующим образом. Для запуска процесса рециркуляции используется формирователь импульса 7, по сигналу с которого блок регенерации 8 создаёт заданный по амплитуде, длительности и форме импульс. Данный импульс после усиления модулятором тока 1 совместно с током постоянного смещения представляет собой ток накачки инжекционного лазера (ИЛ) 2. Смещение в предпороговый режим с помощью источника постоянного тока предназначено

для уменьшения задержки между импульсом тока накачки и излучением ИЛ. Сгенерированный оптический импульс посредством соединительных муфт вводится в измеряемый волоконный световод 3, по которому распространяется в виде набора пространственных мод. Далее эти моды разделяются селектором мод 4, после чего выбранная мода направляется в зондирующий световод 9 и затем поступает на фотоприёмник 5. Сигнал с выхода фотоприёмника 5 подаётся на пороговое устройство 10, где при пересечении заданного порога формируется управляющий импульс для блока регенерации 8. Это обеспечивает замыкание контура и завершение цикла рециркуляции. Частота рециркуляции фиксируется частотомером 6 и далее передаётся на обработку микропроцессору 11. В каждом цикле рециркуляции выполняется так называемая 2R-регенерация (*re-amplification + re-shaping*), т. е. восстановление формы, амплитуды и длительности информационного импульса.

В качестве источника излучения использовали AlGaAs/GaAs многомодовый полупроводниковый ИЛ на двойной гетероструктуре, изготовленный на ФГУП «НИИ Полюс». Медный тепло-отвод применялся для охлаждения лазерного кристалла, активной термостабилизации ИЛ не проводили. Лазер обладал следующими характеристиками: величина порогового тока $I_{th} = 31$ мА, при $I = 1,2I_{th}$ мощность излучения $P_L = 2$ мВт, при этом центральная длина волны генерации $\lambda = 825$ нм, ширина спектра излучения на полувысоте составляла 1 нм. В качестве фотоприёмника применялся Si-ЛФД серии КОФ 102В производства ОАО «ИНТЕГРАЛ», обладавший максимумом спектральной чувствительности $S = 0,9$ А/Вт при $M = 1$ в области $\lambda = 830$ нм, напряжением пробоя $U_{br} = 140$ В и максимальным коэффициентом лавинного умножения $M = 30$ при напряжении смещения $U_d = 0,9U_{br}$. Для формирования выходного сигнального напряжения лавинного фотодиода (ЛФД) применялось нагрузочное сопротивление $R_l = 50$ Ом, обеспечивающее согласование с последующими электронными компонентами. Пороговым устройством являлся компаратор напряжения для сравнения аналоговых величин K597CA1 (импортный аналог Am685) с перестраиваемым порогом. Формирователь

восстановленных импульсов представлял собой цифровую схему. Для преобразования ЭСЛ-сигналов, поступающих с выхода компаратора, в ТТЛ-уровни цифровых микросхем применялась специализированная микросхема согласования уровней K1500ПУ125 (зарубежный аналог – F100125). Инжекционный лазер обеспечивал генерацию импульсов накачки длительностью 50 нс на полувысоте с фронтом $\tau_f = 2$ нс. Амплитуда импульсов I_i изменялась дискретно в диапазоне (0–20) мА, при этом предусматривалась плавная регулировка постоянного смещения I_0 . Значение постоянного смещения ограничивалось пороговым током ИЛ. Введение постоянного смещения позволяло снизить задержку генерации излучения ИЛ и повысить стабильность его частотных и временных характеристик. Контроль формы импульсов тока инжекции осуществлялся электронным осциллографом *Agilent Infini-Vision MSO-X 2022A* по величине падения напряжения на измерительном резисторе $R_i = 1$ Ом. Оптический ввод и вывод излучения реализовывали посредством непосредственной стыковки ВС с инжекционным лазером и ЛФД с использованием соединительных разъёмов и микрометрических юстировочных механизмов. В качестве частотомера применялся электронно-счётный частотомер ЧЗ-84 с временем счёта 1 с. Тестируемый отрезок волокна длиной 50 м представлял собой многомодовый кварцевый волоконный световод *Corning Inficor 600 50/125* с параболическим профилем показателя преломления, обладавший на длине волны 850 нм следующими характеристиками: потери 2,5 дБ/км, числовая апертура $NA = 0,2$, полоса пропускания $W = 400$ МГц·км.

Связь между полосой пропускания W и дисперсией τ в ММВС можно представить формулой [17]:

$$W = 0,44/\tau. \quad (1)$$

Для исследуемого волокна из (1) следует, что $\tau = 1,1$ нс/км. В свою очередь, результирующая дисперсия складывается из межмодовой дисперсии τ_i и хроматической τ_{ch} . Для ММВС 50/125 на $\lambda = 0,850$ мкм хроматическая дисперсия составляет $\tau_{ch} = 99,6$ пс/нм·км [18]. Межмодовую дисперсию можно оценить из выражения [18]:

$$\tau_i = \sqrt{\tau^2 - \tau_{ch}^2}. \quad (2)$$

Из (2) для ширины спектра излучения источника $\Delta\lambda = 1$ нм получили, что межмодовая дисперсия равна $\tau_i = 1095$ пс/км. Таким образом, вклад хроматической дисперсии составляет 9 %.

Одной из важных характеристик волоконно-оптических датчиков на основе ОЭРС является время установления t_s колебательного процесса в контуре, по достижении которого изменения частоты рециркуляции становятся незначительными. Данный параметр определяется долговременной нестабильностью частоты рециркуляции, обусловленной её систематическим дрейфом на протяжённом временном интервале. Для ВС длиной 50 м на рисунке 2 приведены экспериментальные результаты изменения частоты рециркуляции между соседними измерениями в различные моменты времени после запуска циркуляции. Из данных рисунка следует, что приблизительно через 20 мин после включения ОЭРС изменение частоты рециркуляции стабилизируется и не превышает 5–6 Гц, что и определяет время установления рециркуляционного процесса.

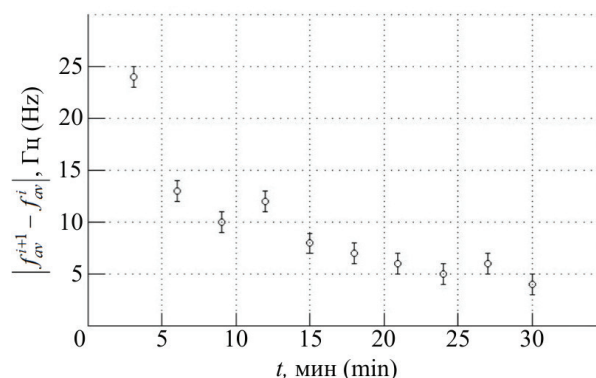


Рисунок 2 – Процесс стабилизации частоты рециркуляции

Figure 2 – The process of the recirculation frequency stabilizing

Стабильность частоты рециркуляции одиночного импульса определяется совокупностью различных физических процессов, протекающих в источнике и приёмнике излучения, а также в пороговом устройстве. Для уменьшения погрешности измерений проведены экспериментальные исследования относительной долговременной нестабильности (ОДН) χ в зависимости от режимов работы ОЭРС.

Результаты экспериментов представлены на рисунке 3, все измерения осуществлялись через 20 мин после запуска циркуляции. Из полученных графиков следует, что значения χ слабо изменяются при условии, что пороговое напряжение компаратора соответствует линейному участку фронта импульса. Увеличение U_p приводит к росту ОДН, связанному с влиянием, например, дробового шума ЛФД и амплитудными флуктуациями мощности излучения ИЛ.

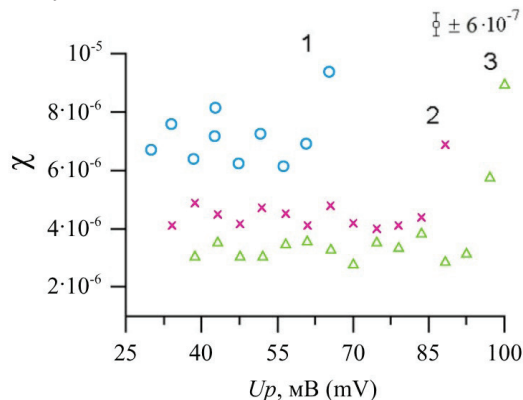


Рисунок 3 – Относительная долговременная нестабильность частоты рециркуляции при различных значениях порогового напряжения компаратора: $L = 50$ м; 1 – $I_0 = 0,75 I_{th}$; 2 – $I_0 = 0,85 I_{th}$; 3 – $I_0 = 0,9 I_{th}$

Figure 3 – Relative long-term instability of the recirculation frequency at different values of the comparator threshold voltage: $L = 50$ м; 1 – $I_0 = 0.75 I_{th}$; 2 – $I_0 = 0.85 I_{th}$; 3 – $I_0 = 0.9 I_{th}$

Увеличение стабильности частоты рециркуляции в ОЭРС и расширение диапазона перестройки U_p связано с возрастанием постоянной составляющей тока накачки ИЛ до $I_0 = 0,9 I_{th}$, при этом максимальные значения χ_{max} не превышают $3,5 \cdot 10^{-6}$. Однако дальнейшее повышение I_0 ведёт к ухудшению ОДН.

Методика измерений

Методика измерений основана на регистрации изменений частоты рециркуляции, которые обусловлены «быстрыми» модами, распространяющимися вдоль оптической оси волокна, и наиболее «медленными» модами, распространяющимися под максимальным углом к оси. Для пространственного разделения таких мод служит воздушный промежуток между выходным торцом исследуемого волокна и входным торцом зондирующего ВС,

который играет роль пространственного селектора мод.

В градиентных оптических волокнах применяется термин локальной числовой апертуры, которая максимальна на оси волокна [17]:

$$NA_L = \sin \varphi_{cr} = \frac{\sqrt{n_0^2 - n_1^2}}{\sqrt{2}}, \quad (3)$$

где φ_{cr} – критический угол; n_0 и n_1 – коэффициенты преломления на оси и оболочки ВС соответственно.

Для определения межмодовой дисперсии волоконных световодов рециркуляционным методом использовали два отрезка ВС. Первый отрезок представлял собой жёстко закреплённый исследуемый многомодовый градиентный ВС длиной $L = 50$ м с локальной числовой апертурой $NA_L = 0,20$ и диаметром сердцевины $D_1 = 50$ мкм (стандарт ITU-T G.651), в который вводился оптический импульс длительностью 50 нс на уровне полувысоты, сформированный полупроводниковым ИЛ с длиной волны $\lambda = 0,825$ мкм. Входной торец второго одномодового ВС длиной 0,5 м со стандартной числовой апертурой $NA = 0,12$ и диаметром сердцевины $D_2 = 9$ мкм находился на фиксированном расстоянии S и смещался радиально относительно оптической оси при помощи микрометрического юстировочного механизма. Согласно формуле (3), для исследуемого волокна максимальный угол ввода излучения в сердцевину не превышает $11,5^\circ$. Поскольку в многомодовом полосковом ИЛ без специальных согласующих элементов угол расходимости на уровне половинной интенсивности составлял около 15° в плоскости p - n -перехода и порядка 30° в перпендикулярной плоскости, можно считать, что все пространственные моды в многомодовом ВС возбуждались с равной вероятностью.

Задавая значения воздушного зазора S и числовой апертуры NA_L , можно рассчитать необходимое смещение зондирующего ВС [15]:

$$\Delta l = \frac{S}{\sqrt{(1/NA_L)^2 - 1}}. \quad (4)$$

Для того, чтобы пространственные моды, выходящие из исследуемого ВС под максимальным углом, достигали оптической оси короткого зондирующего волокна при наличии воздушного зазора $S = 150$ мкм между торцами

волокон, зондирующий ВС согласно (4) следует сместить на 30 мкм относительно оптической оси исследуемого ВС.

При переходе измерений от частоты рециркуляции сигналов на центральных модах к сигналам, соответствующим модам, распространяющимся под максимальными углами, наблюдается изменение времени срабатывания порогового устройства в связи с уменьшением оптической мощности, регистрируемой ЛФД. Для минимизации указанных флуктуаций ток ЛФД поддерживался постоянным корректировкой коэффициента лавинного умножения путём подстраивания напряжения обратного смещения ЛФД. Использование такого способа, с другой стороны, приводило к возрастанию времени развития лавины, что влекло за собой изменение задержки срабатывания ЛФД [19]:

$$\Delta T_{APD} = N_k k_f \Delta M h_a / v_s, \quad (5)$$

где k_f – отношение коэффициентов ионизации электронов и дырок (для Si $k_f = 0,1$); N_k – коэффициент, изменяющийся от 1/3 до 2 при изменении k_f от 1 до 10^{-3} ; h_a – ширина слоя лавинного умножения ($h_a = 0,5 \cdot 10^{-6}$ м); v_s – дрейфовая скорость насыщения ($v_s = 10^5$ м/с).

Используя калибровочную зависимость $M(U_d)$, где U_d – напряжение обратного смещения ЛФД, установили, что для поддержания постоянного значения напряжения на входе порогового устройства при смещении зондирующего ВС на 30 мкм коэффициент лавинного умножения увеличивается с $M = 10$ до $M = 25$.

Таким образом, используя полученный результат и (5), межмодовая дисперсия ММВС вычислялась по формуле:

$$\tau_m = \frac{(1/f_1 - \Delta T_{APD}) - 1/f_0}{L}. \quad (6)$$

Экспериментальные результаты зависимости частоты рециркуляции от относительного смещения зондирующего волокна представлены на рисунке 4, при этом для $\Delta l = 0$ мкм $f_0 = 3350523$ Гц, для $\Delta l = 30$ мкм $f_1 = 3349806$ Гц. Используя эти данные и формулу (6) получили, что межмодовая дисперсия тестируемого волокна равнялась $\tau_i = 1018$ пс/км, при этом относительная погрешность составила 7 %.

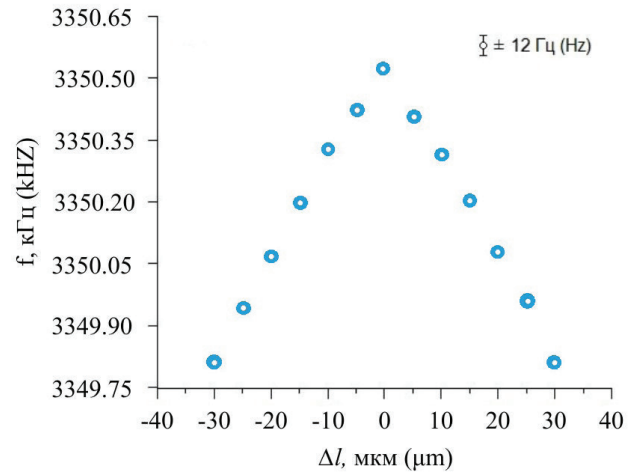


Рисунок 4 – Изменение частоты рециркуляции при смещении торца измерительного волоконного световода

Figure 4 – Change in recirculation frequency when shifting the end of the measuring optical fiber

В зависимости от значения α -профиля показателя преломления дисперсионные характеристики многомодовых градиентных ВС могут отличаться на несколько порядков [17]. Оптимальное значение параметра α , обеспечивающее минимальную межмодовую дисперсию ВС, должно быть близко к двум. Среднеквадратичная межмодовая дисперсия σ_i с учётом параметров многомодового ВС, описывается соотношениями [17]:

$$\sigma_i = \frac{LN_0\Delta}{c} \left[\frac{C_1^2\alpha^2}{(\alpha+2)(3\alpha+2)} + \frac{C_1C_2\alpha^2\Delta}{(\alpha+2)(2\alpha+1)} + \frac{C_2^2\alpha^2\Delta^2}{(\alpha+2)(5\alpha+2)} \right]^{1/2};$$

$$C_1 = (\alpha - 2 - 4\delta) / 2(\alpha + 1); C_2 = (3\alpha - 2 - 8\delta) / (3\alpha + 2); \quad (7)$$

$$\Delta = (n_0^2 - n_1^2) / 2n_0^2; N_0 = n_0 - \lambda \frac{dn_0}{d\lambda}; \delta = -\frac{n_0}{2N_0} \frac{\lambda}{\Delta} \frac{d\Delta}{d\lambda}.$$

В [20] представлены значения коэффициентов для кварцевых стёкол с наиболее распространёнными легирующими добавками, которые используются для расчёта спектральной зависимости показателя преломления согласно формуле Селмейера.

На рисунке 5 приведена рассчитанная с помощью (7) зависимость среднеквадратичной межмодовой дисперсии многомодового германиевого ВС от параметра профиля показателя преломления.

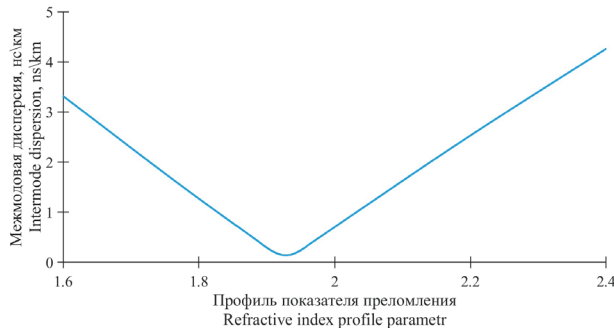


Рисунок 5 – Среднеквадратичная межмодовая дисперсия в зависимости от значения α -профиля многомодового оптоволокна

Figure 5 – Root mean square intermode dispersion as a function of the α -profile value of a multimode optical fiber

Для найденного значения $\sigma_i = 0,433$ нс/км $\alpha = 1,96$, что позволяет получить зависимость распределения показателя преломления по пространственной координате, а также оценить число пространственных мод в волокне.

Заключение

Представлены результаты измерения межмодовой дисперсии коротких отрезков многомодовых волоконных световодов рециркуляционным методом. Разработан измерительный экспериментальный стенд. Установлено, что процесс рециркуляции одиночного оптического импульса при периодической регенерации по амплитуде, форме и длительности стабилизируется через 20 мин после запуска циркуляции. Выбор значений постоянной составляющей тока накачки полупроводникового лазера и порога срабатывания компаратора позволяет получить относительную долговременную нестабильность частоты рециркуляции не более $3,5 \cdot 10^{-6}$ для длины волоконного световода 50 м, что определяет разрешающую способность измерительной системы. Для повышения точности измерений учтено время развития лавины при увеличении коэффициента лавинного умножения лавинного фотодиода. В результате погрешность измерений составила 7 % для тестового кварцевого градиентного многомодового волокна на длине волны излучения $\lambda = 0,825$ мкм и равнялась $\tau_i = 1018$ пс/км, что соответствует ширине полосы 430 МГц·км. Используя рассчитанную зависимость среднеквадратичной межмодовой дисперсии от α -профиля градиентного

многомодового волоконного световода, найдено значение $\alpha = 1,96$. Знание данной величины позволяет рассчитать пространственное распределение показателя преломления в многомодовых градиентных волоконных световодах, а также общее число мод, распространяющихся в таком волокне. Таким образом, показана эффективность использования рециркуляционного метода для определения параметров коротких отрезков многомодовых волоконных световодов.

Список использованных источников

1. Камино Дж. Стандарты внутриобъектового многомодового волокна / Дж. Камино // Первая миля. – 2019. – № 3. – С. 42–47.
DOI: 10.22184/2070-8963.2019.80.3.42.47
2. Тимофеев А.Л. Использование многомодового волокна для повышения скорости передачи информации / А.Л. Тимофеев [и др.] // Компьютерная оптика. – 2024. – Т. 48, № 5. – С. 681–688.
DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1445
3. Дмитриев А.А. Волоконно-оптический датчик вибрации на основе SMF-MMF-SMF перехода и наклонной решетки Брэгга / А.А. Дмитриев [и др.] // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2021. – Т. 21, № 6. – С. 801–807.
DOI: 10.17586/2226-1494-2021-21-6-801-807
4. Поляков А.В. Рециркуляционный метод измерения температуры волоконно-оптическим датчиком / А.В. Поляков // Проблемы физики, математики и техники. – 2019. – № 2. – С. 36–44.
5. Markvart A.A. Fiber optic SMS sensor for simultaneous measurement of strain and curvature / A.A. Markvart, L.B. Liokumovich, N.A. Ushakov // Technical Physics Letters. – 2022. – Vol. 48, No. 15. – P. 30–33. **DOI:** 10.21883/TPL.2022.15.53817.18969
6. Cheng J. Time-domain multimode dispersion measurement in a higher-order-mode fiber / J. Cheng [et al.] // Optics Letters. – 2012. – Vol. 37, No. 3. – P. 347–349.
DOI: 10.1364/OL.37.000347
7. Zheng X. A measurement method for dispersion in optical fiber communication with long distance / X. Zheng // International Journal of Future Generation Communication and Networking. – 2014. – Vol. 7, No. 6. – P. 1–12. **DOI:** 10.14257/ijfgcn.2014.7.6.01
8. Liebert A. Fiber dispersion in time domain measurements compromising the accuracy of determination of optical properties of strongly scattering media / A. Liebert [et al.] // Journal of Biomedical Optics. – 2003. – Vol. 8, No. 3. – P. 512–516.
DOI: 10.1117/1.1578088

9. Li K. Modal delay and modal bandwidth measurements of bi-modal optical fibers through a frequency domain method / K. Li [et al.] // *Optical Fiber Technology*. – 2020. – Vol. 55 – P. 102145–5.

DOI: 10.1016/j.yofte.2020.102145

10. Li, K. Measuring modal delays of few-mode fibers using frequency-domain method / K. Li, [et al.] // *Optical Fiber Technology*. – 2021. – Vol. 62. – P. 102474–8.

DOI: 10.1016/j.yofte.2021.102474

11. Chen X. Measurements of optical fibers using frequency-domain method: from single mode fiber, polarization maintaining fiber to few-mode, multi-core, and multimode fiber / X. Chen, M.-J. Li // *Proc. SPIE*. – 2024. – Vol. 12894, Next-Generation Optical Communication: Components, Sub-Systems, and Systems XIII. – P. 128940B. **DOI:** 10.1117/12.3006523

12. Ahn T.-J. High-resolution differential mode delay measurement for a multimode optical fiber using a modified optical frequency domain reflectometer / T.-J. Ahn, D.Y. Kim // *Optics Express*. – 2005. – Vol. 13, No. 20. – P. 8256–8262. **DOI:** 10.1364/opex.13.008256

13. Jin L. Measurement of differential mode group delay in few-mode fiber with correlation optical time-domain reflectometer / L. Jin, [et al.] // *Applied Optics*. – 2022. – Vol. 61, No. 13. – P. 3579–3582.

DOI: 10.1364/AO.457156

14. Поляков А.В. Рециркуляционные оптоволоконные измерительные системы / А.В. Поляков. – Минск: БГУ, 2014. – 208 с.

15. Поляков А.В. Определение дисперсионных характеристик многомодовых оптических волокон рециркуляционным способом / А.В. Поляков, С.И. Чубаров // *Датчики и системы*. – 2002. – № 3. – С. 12–15.

16. Поляков А.В. Рециркуляционный метод измерения межмодовой дисперсии в многомодовых оптических волокнах / А.В. Поляков, М.А. Ксенофонов, А.А. Каваленя // *Приборостроение–2023: Материалы 16-й межд. научно-технической конференции, Минск, 15–17 ноября 2023г.* / М-во образования Респ. Беларусь, БНТУ; редкол.: О.К. Гусев (председ.) и др. – Минск, 2023. – С. 364–365.

17. Гауэр Дж. Оптические системы связи / Дж. Гауэр. – М.: Радио и связь, 1989. – 501 с.

18. Коханенко А.П. Волоконно-оптические линии связи. Физические основы работы оптических волокон / А.П. Коханенко, Ю.В. Маслова. – Томский государственный университет, Томск, 2013. – 64 с.

19. Техника оптической связи. Фотоприемники. / под ред. У.Тсанга, пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 526 с.

20. Фатеев В.Ф. О влиянии волоконно-оптических линий связи на точность сличений стандартов частоты и времени для задач гравиметрии / В.Ф. Фатеев, О.В. Колмогоров, Е.А. Рыбаков // *Альманах современной метрологии*. – 2020. – № 3. – С. 137–152.

References

1. Camino J. Indoor Multimode Fiber Standards. First Mile. 2019;(3):42-47.

DOI: 10.22184/2070-8963.2019.80.3.42.47

2. Timofeev AL, Sultanov AK, Meshkov IK, Gizatulin AR, Bagmanov VK. Using a multimode fiber to improve data transfer rates. *Computer Optics*. 2024;48(5):681-688.

DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1445

3. Dmitriev AA, Grebnev KV, Varzhel SV, Plotnikov MYu. A fiber optic vibration sensor based on SMF-MMF-SMF structure and a tilted fiber Bragg grating. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2021;21(6):801-807.

DOI: 10.17586/2226-1494-2021-21-6-801-807

4. Polyakov AV. Recirculation method for temperature measurement by the fiber optical sensor. *Problems of physics, mathematics and technics*. 2019;(2):36-44.

5. Markvart AA, Liokumovich LB, Ushakov NA. Fiber optic SMS sensor for simultaneous measurement of strain and curvature. *Technical Physics Letters*. 2022;48(15):30-33.

DOI: 10.21883/TPL.2022.15.53817.18969

6. Cheng J, Pedersen MEV, Wang K, Xu C, Grüner-Nielsen L, Jakobsen D. Time-domain multimode dispersion measurement in a higher-order-mode fiber. *Optics Letters*. 2012;37(3):347-349.

DOI: 10.1364/OL.37.000347

7. Zheng X. A measurement method for dispersion in optical fiber communication with long distance. *International Journal of Future Generation Communication and Networking*. 2014;7(6):1-12.

DOI: 10.14257/ijfgcn.2014.7.6.01

8. Liebert A, Wabnitz H, Grosenick D, Macdonald R. Fiber dispersion in time domain measurements compromising the accuracy of determination of optical properties of strongly scattering media. *Journal of Biomedical Optics*. 2003;8(3):512-516.

DOI: 10.1117/1.1578088

9. Li K, Chen X, Mishra SK, Hurley JE, Stone JS, Li M-J. Modal delay and modal bandwidth measurements of bi-modal optical fibers through a frequency domain method. *Optical Fiber Technology*. 2020;55:102145-5.

DOI: 10.1016/j.yofte.2020.102145

10. Li K, Chen X, Hurley J, Stone J, Li M-J. Measuring modal delays of few-mode fibers using frequency-domain method. *Optical Fiber Technology*. 2021;62:1024748-8.

DOI: 10.1016/j.yofte.2021.102474

11. Chen X, Li M-J. Measurements of optical fibers using frequency-domain method: from single mode fiber, polarization maintaining fiber to few-mode, multi-core, and multimode fiber. *Proc. SPIE*. 2024; 12894, Next-Generation Optical Communication: Components,

Sub-Systems, and Systems XIII. 128940B.

DOI: 10.1117/12.3006523

12. Ahn T-J, Kim DY. High-resolution differential mode delay measurement for a multimode optical fiber using a modified optical frequency domain reflectometer. *Optics Express*. 2005;13(20):8256-8262.

DOI: 10.1364/opex.13.008256

13. Jin L, Wang Y, Zhang M, Sun Y, Hu G. Measurement of differential mode group delay in few-mode fiber with correlation optical time-domain reflectometer. *Applied Optics*. 2022;61(13):3579-3582.

DOI: 10.1364/AO.457156

14. Polyakov AV. Recirculating fiber optic measuring systems. Minsk: BSU. 2014:208 p.

15. Polyakov AV, Chubarov SI. Determination of dispersion characteristics of multimode optical fibers by the recirculation method. *Sensors and systems*. 2002;(3):12-15.

16. Polyakov AV, Ksenofontov MA, Kavaleny AA. Recirculation method for measuring intermodal

dispersion in multimode optical fibers. *Instrumentation Engineering-2023: Proc. of the 16th International Scientific and Technical Conference*, November 15-17, 2023, Minsk, Republic of Belarus. Minsk: BNTU. 2023:364-365.

17. Gower J. Optical communication systems. M.: Radio and communication. 1989:501 p.

18. Kokhanenko AP, Maslova YuV. Fiber-optic communication lines. Physical principles of optical fiber operation. Tomsk State University, Tomsk. 2013:64 p.

19. Optical communication technology. Photodetectors. / edited by U. Tsang, translated from English. Moscow: Mir. 1988:526 p.

20. Fateev VF, Kolmogorov OV, Rybakov EA. On the influence of fiber-optic communication lines on the accuracy of comparisons of frequency and time standards for gravimetry problems. *Almanac of modern metrology*. 2020;(3):137-152.