

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ИНСТРУМЕНТ РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В ПРОТОНООБМЕННЫХ КАНАЛЬНЫХ ВОЛНОВОДАХ НА ОСНОВЕ НИОБАТА ЛИТИЯ

© 2022 г. Р. С. Пономарев<sup>a,b,\*</sup>, Ю. А. Константинов<sup>a</sup>,  
М. Е. Белокрылов<sup>a,b</sup>, Д. И. Шевцов<sup>b</sup>, П. В. Карнаушкин<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН  
Россия, 614990, Пермь, ул. Ленина, 13а

<sup>b</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет  
Россия, 614990, Пермь, Комсомольский просп., 29

\*e-mail: rsponomarev@gmail.com

Поступила в редакцию 23.03.2022 г.

После доработки 26.04.2022 г.

Принята к публикации 29.04.2022 г.

Разработана система исследования пироэлектрического эффекта в интегрально-оптических модуляторах (ИОМ) на основе протонообменных канальных волноводов на подложке из ниобата лития с возможностью контроля стыковки чипа ИОМ и оптического волокна. В систему интегрирован лабораторный сертифицированный оптический рефлектометр частотной области, который обеспечил достаточную точность определения пространственной координаты исследуемого образца и высокую чувствительность при регистрации обратного рассеяния и отражения. Применение аттестованного метрологического оборудования позволяет паспортизовать температурный дрейф показателя преломления в волноводах ИОМ и качественно наблюдать вариацию фазового состояния излучения в каждой точке волновода. Применение автоматизированной системы обработки сигнала, обеспечивающей возможность наблюдения пользователем всех искомым параметров исследуемого образца при вариации пространственной координаты по длине ИОМ, позволило снизить количество рутинных исследовательских процедур при анализе данных и сосредоточиться на их содержании. Проанализированы преимущества и недостатки использования коммерческой OFDR-системы (Optical Frequency Domain Reflectometry) вместо самостоятельно изготовленного макета на основе перестраиваемого лазера. Созданный и примененный фильтр на основе алгоритма динамического нелинейного усреднения в пространстве позволил увеличить отношение сигнал/шум данных на 6–10 дБ.

DOI: 10.31857/S0032816222050202

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Современные фотонные интегральные схемы, также известные как интегрально-оптические схемы на основе канальных волноводов, полученных протонообменным способом, являются основой для создания интегрально-оптических модуляторов (ИОМ) инфракрасного излучения, широко используемых в различных направлениях оптоэлектроники (сенсоры [1–6], телекоммуникации [7–9], морская и воздушная навигация [10] и т.д.). Стоит отметить, что ИОМ также повсеместно применяются в различных задачах квантовой криптографии [11–13] и конструкциях детекторов для фотонного счета [14]. Приборы на основе ИОМ, функционирующие в данных областях, должны выдерживать значительные измене-

ния температуры, включая ее резкие перепады. Ранее в работе [15] был продемонстрирован экстремальный рост коэффициента затухания оптического сигнала в канале, а также полное прекращение каналирования излучения в нем при нагреве интегрально-оптической схемы на подложке из ниобата лития, предварительно охлажденной до  $-60^{\circ}\text{C}$ . Это может быть крайне опасным при эксплуатации ИОМ в составе навигационных приборов летательных аппаратов, постоянно подвергающихся резким перепадам температуры.

Физически прекращение каналирования излучения обусловлено тем, что контрастность волновода  $\Delta n$  относительно окружающего кристалла становится ниже критического значения. Это связано с тем, что пироэлектрический эффект

увеличивает показатель преломления подложки, не меняя показатель преломления волновода, поскольку волновод экранируется от пироэлектрического поля подвижными заряженными дефектами [16]. Подтверждение проявления данного эффекта в ходе испытания ИОМ в лабораторных условиях продемонстрировано в работе [15]. В этой же работе регистрировалась оптическая мощность излучения на выходе модулятора. В публикации [17] авторами было показано, что исследуемый эффект носит распределенный характер, т.е. каналирование излучения прекращается почти по всей длине волновода. В этой работе были применены распределенные метрологические методы на основе оптической рефлектометрии в частотной области (Optical Frequency Domain Reflectometry – OFDR), которая, в отличие от хорошо известной в отрасли телекоммуникаций оптической рефлектометрии временной области (Optical Time Domain Reflectometry – OTDR), дает возможность проводить быстрое измерение с пространственным разрешением порядка десятков микрон при отсутствии мертвых зон оптической природы [18, 19]. Принцип работы данного метода основан на фурье-преобразованиях оцифрованного сигнала, получаемого при сканировании непрерывным когерентным лазером по частоте. Пространственная координата отражателей, на которых происходит рассеяние Рэлея, пропорциональна частоте интерференционного биения прямой и обратной волн. Метод обладает высокой, в том числе поляризационной, чувствительностью, что делает его удобным для исследования компонентов и волокон, где важно состояние поляризации в разных их локациях [20, 21].

Однако, во-первых, стоит отметить, что изучение описанного эффекта происходило всего на нескольких десятках образцов, а рефлектометрическое исследование – всего на нескольких образцах. Пока не исключено, что в некоторых случаях пироэффект в ИОМ может сохранять распределенный характер, но при этом характер его распределения по длине модулятора будет иным. Или же, в предельном случае, он будет и вовсе иметь локальный точечный вид. Это требует дальнейшего изучения. Во-вторых, как уже было отмечено, данный эффект может приводить к выключению интегрально-оптических схем в условиях резких перепадов температуры. Несмотря на то что довольно эффективные технические средства борьбы с пироэффектом в ИОМ существуют и эксплуатируются, производимые серийно изделия должны выборочно подвергаться испытаниям в промышленной лаборатории. Поскольку только лишь серийные OFDR-системы обладают специальными техническими средствами (такими как, например, контролирующий линейность перестройки лазера интерферометр и малощумящие фотодетекторы) и могут быть приняты для

паспортизации сигнала по величине обратного отражения и координаты неоднородности, построение экспериментального рабочего места на данном этапе возможно только на таком оборудовании. В-третьих, проведенные ранее исследования были довольно трудоемкими: помимо сборки стенда и времени термоциклирования образцов, львиная доля времени эксперимента ушла на совершение однотипных действий при измерении и обработке полученного сигнала.

Таким образом, в рамках данного исследования ставится задача создания гибкого автоматизированного исследовательского стенда на основе аттестованного OFD-рефлектометра, обеспечивающего обработку сигнала и выдающего параметры обратного рассеяния в зоне действия пироэффекта в ИОМ. Для обеспечения полного цикла работы OFD-рефлектометра с фотонными и интегрально-оптическими схемами, а также интегрально-оптическими модуляторами необходимо также внедрить в стенд возможность контроля их стыковки со световодами, которая до этого реализовывалась только на экспериментальных макетах OFDR-систем [22, 23].

## 2. АППАРАТНАЯ ЧАСТЬ СИСТЕМЫ

Исследуемые образцы представляют собой модуляторы фазы излучения на основе протонообменных канальных волноводов, сформированных в ниобате лития X-среза. Их каналы образуют Y-разветвители. С каждой стороны от каналов Y-разветвителей размещены электроды, необходимые для подачи модулирующего напряжения. Фактически, без поданного напряжения данный ИОМ является планарным Y-разветвителем (рис. 1). До определенной координаты в чипе присутствует всего один канал, который разделяется на два в точке деления. Все три выхода предназначены для стыковки с оптическими волокнами типа “Панда”, сами волноводы являются поляризующими, поддерживая распространение только TEM-моды излучения.

Перед началом эксперимента кристаллы ИОМ тщательно очищались от возможных поверхностных загрязнителей, скрывающих действие пироэлектрического эффекта. Для проведения термоциклов использовалась программируемая камера тепла/холода Espes 712R. В камере образцы сначала медленно охлаждались до  $-60^{\circ}\text{C}$  со скоростью  $0.5^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ , а затем нагревались со скоростью  $4^{\circ}\text{C}/\text{мин}$  до  $60^{\circ}\text{C}$ . Чистое время измерения таким образом для каждого образца составляло 3 ч 17 мин.

### 2.1. Модуль для исследования пироэффекта

На рис. 2 изображена схема экспериментального стенда, предназначенного для изучения пи-

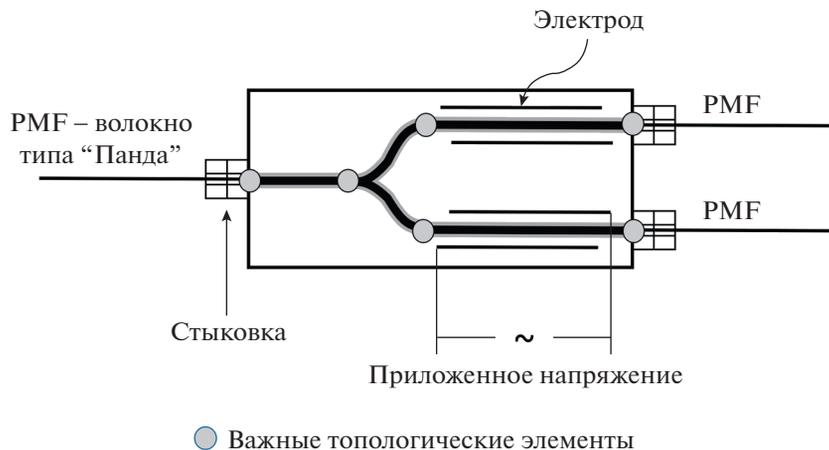
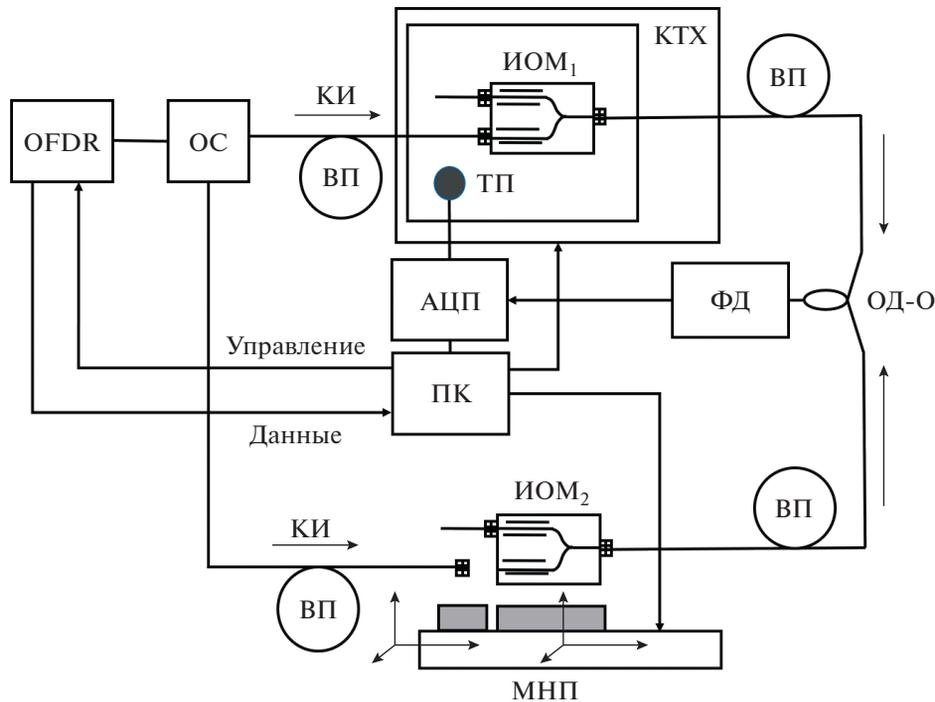


Рис. 1. Схема исследуемого образца.

роэффекта в ИОМ с дополнительной возможностью измерения обратных отражений во время стыковки чипа ИОМ и оптического волокна. В основе схемы – серийный оптический рефлектометр частотной области, аттестованный на измерение обратных отражений в изучаемой среде и имеющий функцию контроля перестройки лазера по частоте излучения. Контроль перестройки лазера необходим для осуществления нелинейного преобразования Фурье с последующим восстановлением значений координаты отражающего события в оптической линии. Также необходимо, чтобы рефлектометр управлялся с персонального компьютера, операционная система которого предусматривает многозадачную эксплуатацию приложений, в том числе пользовательских. В идеале желательно наличие собственной среды разработки и/или компонентов средств разработки SDK (Software Development Kit), интегрируемых в популярные языки программирования. Большинству этих требований удовлетворяют все современные OFDR-системы. Команды по управлению этими рефлектометрами исходят от специального программного обеспечения под управлением распространенных операционных систем (например, Microsoft Windows), а данные об обратном рассеянии поступают через внутренний аналого-цифровой преобразователь (АЦП) на компьютер, который в дальнейшем можно использовать для цифровой обработки сигнала и получения данных с других АЦП.

Когерентное, сканирующее по длине волны излучение (КИ) поступает с рефлектометра по одномодовому патч-корду на оптический свитч (ОС). Последний коммутирует два ответвления линии: первое обеспечивает доставку зондирующего излучения через волоконный пигтейл (ВП) в исследуемое устройство ИОМ<sub>1</sub>, второе ведет к линии контроля стыковки модулятора и ВП. Оп-

тический свитч может быть механическим, в том числе не автоматизированным, т.е. фактически ручным. Основные требования к нему: обеспечение коэффициента затухания зондирующего излучения  $\leq 3$  дБ, а также использование соединений типа APC (угловая полировка) для снижения уровня обратных отражений. ИОМ<sub>1</sub> помещен в камеру тепла/холода (КТХ) модели Espec 712 (Япония). Камера должна обеспечивать изменение температуры в диапазоне  $\pm 60^\circ\text{C}$  с постоянной заданной скоростью. Выполненные ранее эксперименты показали, что для появления желаемого эффекта необходима скорость нагрева не менее  $4^\circ\text{C}/\text{мин}$  во всем диапазоне температур [15, 17]. Для проведения корректного измерения ИОМ<sub>1</sub> уже должен быть состыкован как минимум с двумя ВП. Использование выходного, а не входного ВП для зондирования обусловлено достаточно большой длиной входного ВП (около 7 м), что приводит к непопаданию исследуемого устройства в зону функционирования рефлектометра некоторых популярных метрологических OFDR-систем. Выходной ВП передает прошедшее через модулятор излучение на оптический делитель-объединитель ОД-О с соотношением мощности в плечах 1/1, после которого оно доставляется на фотодетектор ФД. Принятое детектором излучение оцифровывается АЦП и поступает на обработку в персональный компьютер (ПК). Это необходимо для того, чтобы в большом объеме полученных с OFD-рефлектометра данных по прописи с ФД можно было легко установить временные промежутки действия пироэффекта. В этом случае пороговый алгоритм возвращает некоторой булевой переменной, поставленной в соответствие отсчетам на шкале времени, значение *true*, если выходное напряжение ФД становится ниже  $U_{\text{th}}$ , т.е. при прекращении каналирования света под действием пироэффекта. Также внутри КТХ уста-



**Рис. 2.** Принципиальная схема установки. ОС – оптический свитч; КИ – когерентное сканирующее излучение; ВП – волоконный пигтейл; ИОМ<sub>1</sub> и ИОМ<sub>2</sub> – исследуемые интегрально-оптические модуляторы; КТХ – камера тепла/холода; ОД-О – оптический делитель-объединитель; ФД – фотодетектор; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ПК – персональный компьютер; МНП – моторизованный нанопозиционер; ТП – измерительная термопара.

новлена термопара (ТП), показания которой поступают на АЦП и ПК. Термопара, расположенная в непосредственной близости от исследуемого модулятора, необходима для получения действительных значений температуры образца.

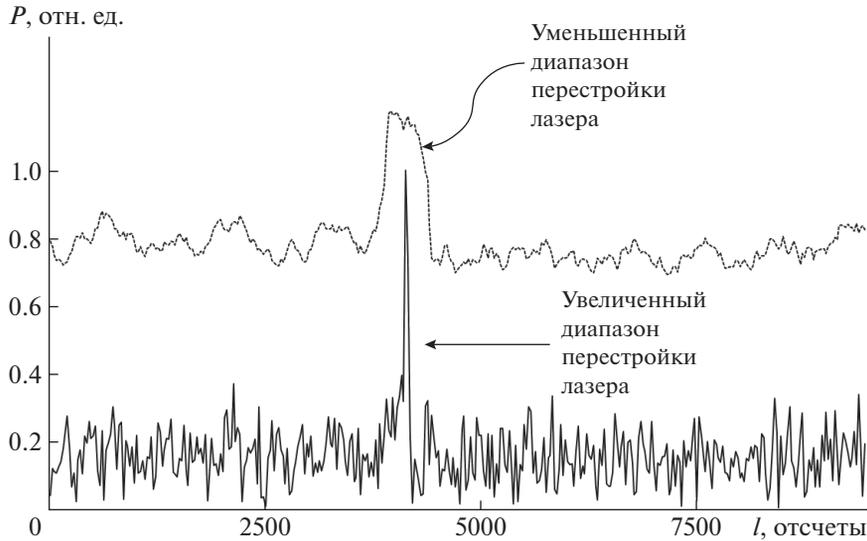
В ходе всего эксперимента ПК посылает сигнал OFD-рефлектометру о циклическом снятии рефлектограмм с их последующим сохранением. В необработанном виде эти рефлектограммы представляют собой прописи значений оптической мощности, полученных с фотодетекторов, во времени при циклических перестройках длины волны источника с 1530 до 1570 нм и обратно. Параллельно компьютер записывает значения выходного напряжения ФД и данные о температуре, поступающие с ТП. У многих лабораторных рефлектометров частотной области нет функции циклической регистрации, поэтому авторам пришлось прибегнуть к написанию скрипта автоматизации устройств ввода ПК при помощи программного обеспечения (ПО) Perfect Automation. Для более сложных задач целесообразным будет использование SDK рефлектометра.

### 2.2. Стыковка чипа ИОМ и оптического волокна по сигналу рефлектометра

Исследование характеристик волноводов в чипе ИОМ методами OFDR при его стыковке с во-

локонным пигтейлом может быть очень важно с точки зрения производства фотонных интегральных схем. Такое исследование позволяет на раннем этапе провести отбраковку чипов с дефектами волноводов, например: дефектами фотолитографии, царапинами, дефектами, вызванными неоднородностью подложки. Ранняя отбраковка чипов позволяет сэкономить значительные средства и время работы сборочного участка.

После поступления на ПК данных, пришедших на рефлектометр с точки стыковки чипа ИОМ и ВП, требуется первоначальная обработка сигнала. В конечном итоге она сводится к нелинейному преобразованию Фурье циклически поступающих пакетов данных. После этого рефлектограмма представляет собой изменяющийся во времени, дискретно заданный массив значений обратно отраженной мощности для каждой координаты линии, в том числе и зоны стыковки исследуемого ИОМ<sub>2</sub> и ВП. Помимо этой зоны, особый интерес представляет место выхода излучения из модулятора в волокно. Оба этих события проявляются на рефлектограмме локальными всплесками, ширина которых не превышает некоторой величины  $dl$ . Тогда производная мощности по координате  $dP/dl$  будет обращаться в ноль в тех областях рефлектограммы, где находятся интересующие точки. Это условие является необходимым, но не достаточным для корректного



**Рис. 3.** Пример “стыковочного” события на рефлектограмме. График пунктирной линией смещен вверх для наглядности.

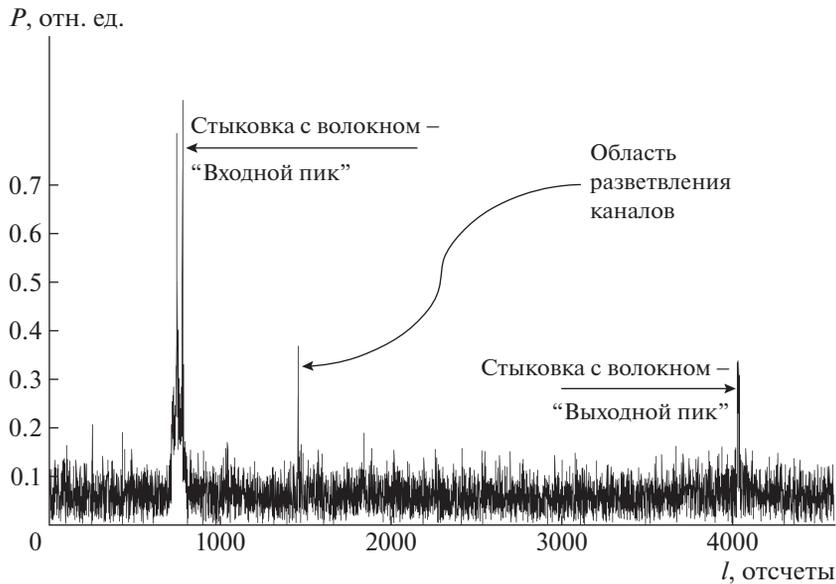
поиска входного и выходного пиков. Второе условие, которое должно выполняться, — обратно отраженная мощность в данной области не должна быть ниже некоторой величины  $P_{th}$ . Исходя из данных о двух этих пиках осуществляется управление движением моторизованного нанопозиционера (МНП), на котором установлен ВП, торец которого перемещается относительно сердцевины канала ИОМ<sub>2</sub> по осям  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ . Если зондирующее излучение не поступает в ИОМ<sub>2</sub>, на пространственной развертке видно лишь отражение от торца ВП. В момент, когда оптическое излучение из торца ВП частично поступает в ИОМ<sub>2</sub>, появляется второй пик, обусловленный отражением от выходного торца модулятора. Поиск значений координат, при которых амплитуда выходного пика максимальна, осуществляется итерационно, с применением квадратичной аппроксимации целевой функции в текущей точке поиска и максимизации этой аппроксимации. Этот подход позволяет осуществлять точную юстировку всего за 5 итераций.

Более подробно стратегия обработки сигнала для управления процессом стыковки модулятора и оптического волокна уже описана авторами в работе [22], поэтому в настоящей статье авторы не уделяют этому много внимания.

Использование лабораторного коммерческого рефлектометра для стыковки ИОМ<sub>2</sub> и ВП имеет ряд преимуществ и недостатков. К неоспоримым преимуществам стоит отнести высокое пространственное разрешение большинства серийных изделий, обусловленное широким диапазоном сканирования по длине волны излучения. Разумеется, подобный диапазон измерений можно использо-

вать и в макетной установке, представленной авторами ранее [22], однако малая скорость сканирования по диапазону в 40 нм (единицы секунд) делает труднореализуемой работу устройства в реальном времени, в то время как лабораторные OFDR-системы осуществляют полный проход нескольких десятков нанометров приблизительно за десятые доли секунды. Малое время перестройки увеличивает временное разрешение прибора. Вторая особенность, касающаяся пространственного разрешения, — это использование контроля линейности перестройки и осуществление нелинейного преобразования Фурье, которое невозможно провести в реальном времени типовым лабораторным осциллографом. Такой подход предотвращает “размазывание” сигнала по пространственной координате. Разницу в разрешении рефлектограмм, полученных с разными диапазонами перестройки лазера, легко увидеть на рис. 3. Здесь изображен фрагмент OFDR-измерения, приходящийся на область стыковки ИОМ и ВП. В одном случае использованный диапазон сканирования составляет единицы нанометров (пунктирная линия), в другом — десятки нанометров (сплошная линия).

Однако обратной стороной высокого пространственного разрешения системы является зашумленность сигнала: пики более изрезаны, менее стабильны по амплитуде. Еще одним небольшим недостатком использования лабораторной OFDR-системы является разнородность происхождения элементов программного обеспечения: одни из них поставляются с рефлектометром, другие разработаны исследователями. Это приводит к сложностям в обмене данными при обработке сигнала: созданию новых “буферных” фор-



**Рис. 4.** Отражение на рефлектограмме топологии основных элементов модулятора. Рефлектограмма получена до начала резкого нагрева ИОМ<sub>1</sub> ( $T = -60^\circ\text{C}$ ).

матов, чрезмерному задействованию постоянно-запоминающего устройства (ПЗУ) с созданием временных директорий и файлов. Все это также ведет к снижению скорости и удобства измерения.

### 3. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Обработка сигнала при исследовании пироэффекта может быть разделена на несколько этапов.

1. OFDR-система при помощи своих программно-аппаратных средств регистрирует временную развертку  $P_{\text{raw}}$  обратно рассеянного сигнала, которую с учетом сканирования по частоте можно представить как спектр, начальные значения которого приходятся на 1530 нм, а конечные — на 1570 нм. Далее вычисляется нелинейное преобразование Фурье от всего объема данных (или в некоторых случаях, требующих экономии вычислительного ресурса, от их фрагмента):

$$P_{\text{Re}} = \text{Re}[FFT_{\text{NL}}(P_{\text{raw}})], \quad (1)$$

$$P_{\text{Im}} = \text{Im}[FFT_{\text{NL}}(P_{\text{raw}})], \quad (2)$$

где  $P_{\text{Re}}$  и  $P_{\text{Im}}$  — действительные и мнимые части спектра;  $FFT_{\text{NL}}$  — нелинейное преобразование Фурье.

Тогда значения амплитудного и фазового спектров будут выглядеть как:

$$P = \sqrt{P_{\text{Re}}^2 + P_{\text{Im}}^2}, \quad (3)$$

$$P_{\phi} = -\text{arctg} \frac{P_{\text{Im}}}{P_{\text{Re}}}. \quad (4)$$

В итоге амплитудный спектр представляет собой рефлектограмму, в которой каждая гармоника отвечает за отражение или рассеяние в областях линии, координаты которых пропорциональны частоте в спектре. Эти данные позволяют наблюдать за температурным дрейфом координат важнейших топологических элементов исследуемого ИОМ<sub>1</sub>, дающих отражающие события и представленных на рефлектограмме в виде пиков. Как показали предыдущие исследования [17], разность пространственных координат входных и выходных пиков ИОМ, меняющаяся при изменениях температуры, обусловлена: вариациями показателя преломления кристалла за счет действия термооптического эффекта; флуктуациями показателя преломления из-за изменения физической длины кристалла за счет линейного теплового расширения; а также перераспределением заряженных дефектов в кристаллической решетке. В работе [17] также показано, что вклад первых двух компонентов достаточно легко оценить простыми расчетами, тогда как третий компонент, отвечающий за пироэффект, вычисляется вычитанием вклада первых двух компонентов из суммарного удлинения оптического пути. Типичная топология основных элементов модулятора представлена на рис. 4. Температурный дрейф входных и выходных пиков подробно описан в [17].

Опыт работы с рефлектограммами исследуемых образцов показывает, что зачастую недостаточно высокое отношение сигнал/шум амплитудного спектра  $P$  негативно сказывается на качестве детектирования пика (отражение по своей интенсивности может быть сравнимо с шумовой

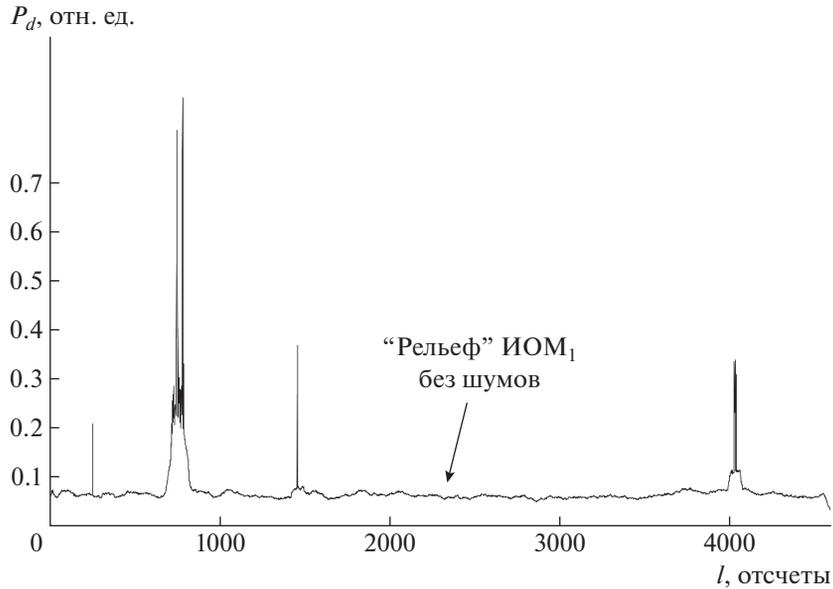


Рис. 5. Результат обработки рефлектограммы при помощи алгоритма динамического нелинейного усреднения в пространстве.

флуктуацией) и препятствует простому визуальному определению элементов топологии ИОМ<sub>1</sub> и “рельефа” рефлектограммы, т.е. тонкой структуры областей, находящихся между точками входа и выхода излучения в кристалл. В таких случаях уместно использовать фильтрацию сигнала. Оптимальный способ устранения случайных составляющих сигнала — его усреднение с накоплением данных во времени. Однако в условиях необходимости быстрой регистрации рефлектограмм на резком перепаде температур такой подход применять крайне затруднительно. Вейвлет-обработка и корреляционные методы хоть и проявили свою эффективность при обработке данных рефлектометрической техники, тем не менее, являются довольно ресурсозатратными и могут применяться в системе только на стадии постобработки. Именно поэтому для адекватной визуализации данных непосредственно во время эксперимента авторами был создан фильтр на основе алгоритма динамического нелинейного усреднения в пространстве. Подобные подходы нашли свое применение в биржевой аналитике при исследовании курсов мировых валют. По информации авторов, для обработки данных с рефлектометров в частотной области такой алгоритм применяется впервые.

Итак, сначала выбирается некоторое окно размером  $w'$  дискретных отсчетов. Оптимально, если в него будет полностью уместиться самое масштабное отражающее событие на рефлектограмме, с передним и задним фронтами. Далее, при сканировании этим окном вдоль пространственной координаты для всех точек от  $w'/2$  до  $N - w'/2$

вычисляется среднееквадратичное отклонение  $\sigma$  величин  $P$ .

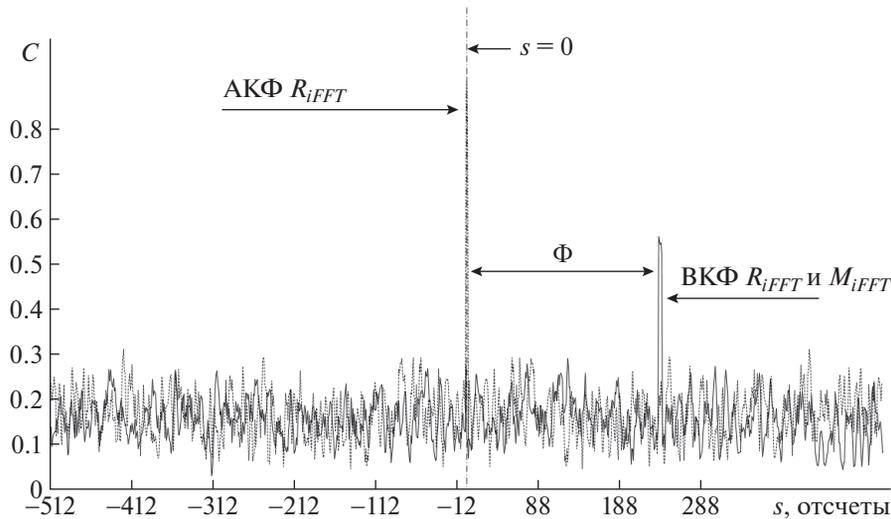
После этого содержимое окна нормируется таким образом, чтобы все его значения по длине находились в пределах от 0 до 1 ( $\sigma_{\text{norm}}$ ). Тогда усредненная рефлектограмма может быть получена следующим образом:

$$i - \frac{w_j}{2} \geq 0; \quad i - \frac{w_j}{2} < N \rightarrow P_{d(j)} = \frac{1}{w_j} \sum_{i=\frac{w_j}{2}}^{i+\frac{w_j}{2}} P_i, \quad (5)$$

$$w_j = w'(1 - \sigma_{\text{norm}}).$$

Рефлектограмма после обработки этим простым фильтром представлена на рис. 5. Согласно рисунку, пики по-прежнему четко локализуемы, а “рельеф” канала модулятора достаточно хорошо визуально различим. Эксперименты показали, что применение данного фильтра позволяет увеличить отношение сигнал/шум на 6–10 дБ.

2. На следующем этапе будет задействован фазовый спектр  $P_\Phi$ . Снятие первой рефлектограммы происходит, когда исследуемый образец находится в КТХ при стабильной температуре  $-60^\circ\text{C}$ . Это так называемое референсное измерение. Далее определяется размер сканирующего окна  $w$ , предназначенного для установления диапазонов расчета обратного преобразования Фурье  $iFFT$ . Изначально  $w$  полагается равным размеру окна, успешно использованному в предыдущий раз, однако в ходе процесса его можно изменять. Пространственные координаты первого и последнего отсчетов сканирующего окна ( $w_s$  и  $w_f$  соответ-



**Рис. 6.** Пример нахождения сдвига спектров рассеяния Рэлея в ИОМ при изменении температуры. АКФ – автокорреляционная функция, ВКФ – взаимно-корреляционная функция.

ственно) определяются следующим образом:  $w_s = i$ ,  $w_j = i + w$ , где  $i$  итерационно принимает целочисленные значения в диапазоне от 0 до  $N - w - 1$ , а  $N$  – общее число дискретных отсчетов рефлектограммы.

Далее запускается фаза термоцикла с резким температурным переходом, и стартует циклическое сохранение рефлектограмм. После каждого сохранения рефлектограммы осуществляется сканирование окном размером  $w$  по пространственной координате рефлектограммы. Для каждого значения  $i$  вычисляется  $iFFT$  и заносится в массив (вектор)  $M_{iFFT}$  размерности  $w/2$ . При расчете обратного преобразования Фурье необходимо использовать не только амплитудный, но и фазовый спектр. После снятия первой рефлектограммы аналогичные действия проводят для референсного измерения, после чего результаты сканирования рефлектограммы окном сохраняются в ПЗУ как  $R_{iFFT}$ .

3. В том же самом цикле, где осуществляется  $iFFT$ , вычисляется взаимно-корреляционная функция между  $R_{iFFT}$  и  $M_{iFFT}$ :

$$C(s) = \sum_{s=0}^w R_{iFFT}(f) M_{iFFT}(f - s), \quad (6)$$

где  $f$  – частота сигнала,  $s$  – аргумент взаимно-корреляционной функции. В работе [24] показано, что числовые значения двух этих массивов (до обработки сглаживающим фильтром) связаны:  $M_{iFFT}$  получен сдвигом элементов  $R_{iFFT}$ , равным  $\Phi$  (который локализуется максимумом взаимно-корреляционной функции) и пропорциональным температуре, деформациям материала, а также изменению фазы, вызванному пирозэффектом.

Первые два компонента можно оценить при помощи известных физических констант, связанных с материалом канала волновода ИОМ<sub>1</sub>, и вычесть их из полученного значения  $\Phi$ . Так характеризуется фаза сигнала в каждой точке исследуемого образца. Перед исследованием реальных ИОМ процесс анализа таких взаимно-корреляционной и автокорреляционной функций многократно моделировался авторами [25]. Пример определения  $\Phi$  по функции  $C(s)$  представлен на рис. 6. Взаимно-корреляционная и автокорреляционная функции реальных данных обратного рассеяния, полученные в ходе первичных экспериментов, качественно выглядят таким же образом.

Значение  $\Phi$  выводится для всех значений каждой рефлектограммы, сохраненной в течение всего термоцикла. Поскольку изменения показателя преломления материала и фазы света связаны, система фактически выдает два параметра, ассоциированные с одним и тем же явлением. Это способствует их взаимному уточнению в период эксплуатации системы.

#### 4. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА

Доходчиво описать программную реализацию обработки сигнала в рассматриваемой системе можно при помощи демонстрации рабочих окон программ, реализованных авторами в средах Delphi, Python и С# и работающих на базе операционной системы Microsoft Windows, установленной на управляющем компьютере системы. Разделим окна программ, представленные на рис. 7, на области А–І.

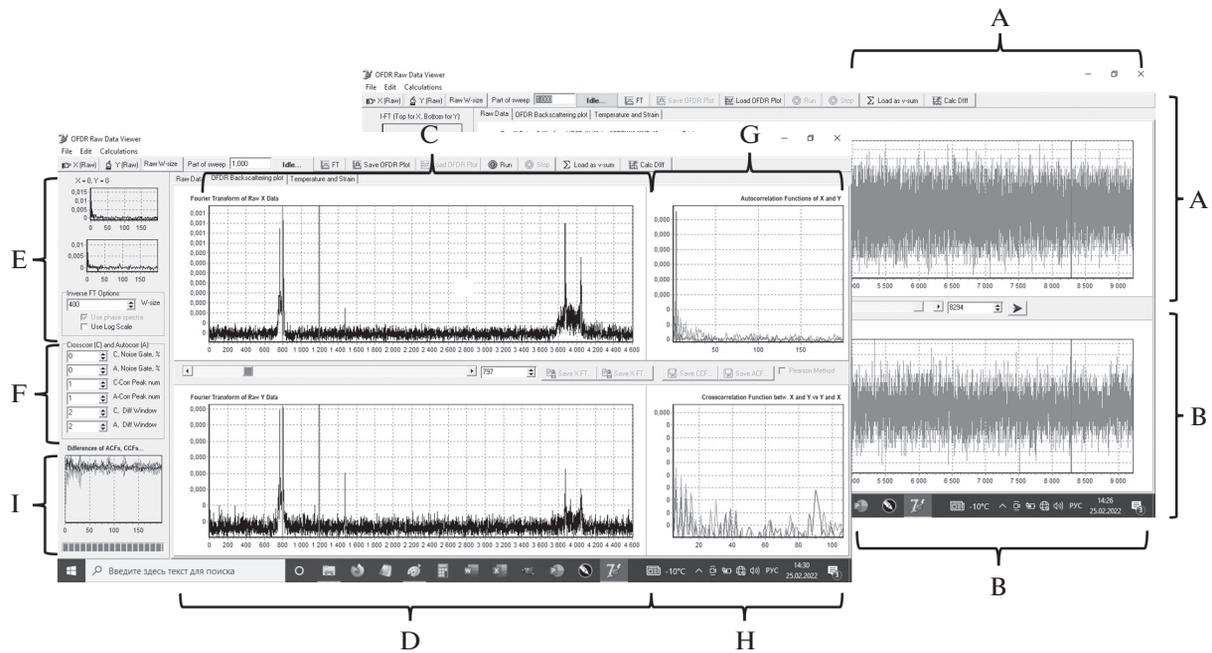


Рис. 7. Интерфейс ПО системы.

А – область интерфейса программы, в которой отображается референсное измерение в исходном виде. Серийные лабораторные рефлектометры не всегда позволяют наблюдать эти данные в главных окнах программы. В этих случаях требуется взять обратное фурье-преобразование для всех данных рефлектограммы.

В – область, где представлены аналогичные данные, соответствующие измерению при изменении температуры образца. Если в исходных данных слишком много точек (для единичного измерения >38 Мбайт), появляются передвижные маркеры, предназначенные для ручного установления диапазона исследователем.

Дальнейшие части программы представлены на следующей закладке окна.

С и D – области рабочего окна программы, в которых отображаются амплитудные спектры референсной и исследуемой рефлектограммы исследуемого ИОМ<sub>1</sub>. В каждой из этих областей расположены маркеры, положение которых можно изменять. Расстояние между этими маркерами в дискретных отсчетах равно размеру окна *iFFT*.

Е – область, где в миниатюрном исполнении представлены обратные преобразования Фурье *iFFT* в окне размером *w* для позиции первого маркера *i*. В этой же области можно вручную задать размер окна *w* в отсчетах.

F – область, в которой содержатся настройки алгоритма фильтрации корреляционных функций.

G – область, где представлена автокорреляционная функция *iFFT* референсного сигнала. Са-

ма по себе эта функция полезной информации не несет, однако используется для шумоподавления взаимно-корреляционной функции *iFFT* референсной и исследуемой в заданной точке термоцикла рефлектограммы.

H – область, где представлена взаимно-корреляционная функция *iFFT* референсной и исследуемой в заданной точке термоцикла рефлектограммы в локации ИОМ<sub>1</sub>, соответствующей позиции первого маркера. По координате пика данной функции оценивается изменение фазы излучения применительно к каждой точке модулятора.

I – область для испытания новых методов цифровой обработки сигнала. Алгоритмы подключаются отдельными модулями.

Данные всех окон динамически изменяются при передвижении маркера по рефлектограмме и могут быть сохранены отдельно как функции координаты.

## 5. ВЫВОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАБОТЫ

В данной работе ключевые фундаментальные основы, изложенные в предыдущих публикациях нашей научной группы, были применены для создания системы исследования пироэффекта в интегрально-оптических модуляторах на основе протоннообменных канальных волноводов на подложке из ниобата лития, причем на этапе как собранного устройства, так и в процессе стыковки чипа ИОМ и оптического волокна. В систему был

интегрирован лабораторный сертифицированный оптический рефлектометр частотной области, который обеспечил линейность измерения пространственной координаты исследуемого образца и высокую чувствительность при регистрации обратного рассеяния и отражения. Применение аттестованного метрологического оборудования позволило паспортизовать температурный дрейф показателя преломления и качественно наблюдать вариацию фазового состояния излучения в каждой точке волновода. Применение автоматизированной системы обработки сигнала, обеспечивающей возможность наблюдения всех искомых параметров исследуемого образца при вариации координаты пользователем, позволило радикально снизить количество рутинных исследовательских процедур при анализе данных и сосредоточиться на их содержании. Помимо этого, в работе проанализированы положительные и отрицательные стороны использования коммерческой OFDR-системы вместо самостоятельного изготовленного макета на основе перестраиваемого лазера. Одним из существенных недостатков применения коммерческого технического решения является недоступность промежуточных данных, малая гибкость приложений, необходимость создания посреднических утилит для конвертирования и загрузки информации. Именно поэтому коллектив авторов настоящей работы в ближайшем будущем планирует сосредоточиться над совершенствованием собственной установки, описанной в предыдущих работах, для достижения метрологически достоверных параметров измерения.

Необходимо также упомянуть и будущие исследования, для которых непосредственно и разрабатывалась данная система. Во-первых, дальнейшее совершенствование методов исследования пироэффекта в канале ИОМ немислимо без набора статистики. Это позволит определить, насколько корректно получаемые в ходе экспериментов величины характеризуют фазу излучения и дрейф показателя преломления в зоне действия пироэффекта. Во-вторых, несмотря на то что рассмотренная цепочка регистрации и цифровой обработки данных не вызывает видимых противоречий, необходимо отметить, что в литературе присутствует довольно много подходов с серьезными методическими различиями. Для верификации методов и последующего комплексирования данных планируется дублировать исследование на собственной OFDR-системе, осуществив внедрение в ее схему гибридного детектора [26].

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования, описанные в гл. 1, разд. 2.1, гл. 3–5 (авторы Пономарев Р.С., Константинов Ю.А., Белокрылов М.Е., Шевцов Д.И. — члены научного коллек-

тива проекта РФФИ № 19-48-590018) выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 19-48-590018 ра.

Исследования, описанные в разд. 2.2 (авторы Карнаушкин П.В., Константинов Ю.А.) выполнены как часть государственного задания по теме № АААА-А19-119042590085-2.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rao Y., Wang Z., Wu H., Ran Z., Han B. / *Photonic Sens.* 2021. V. 11. P. 1. <https://doi.org/10.1007/s13320-021-0619-4>
2. Yüksel K., Jason J., Kocal E.B., Sainz M.L.-A., Wuilpart M. // 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). 2020. P. 1. <https://doi.org/10.1109/ICTON51198.2020.9203322>
3. Wang Z., Zhang B., Xiong J., Fu Y., Lin S., Jiang J., Chen Y., Wu Y., Meng Q., Rao Y. // *IEEE Internet of Things Journal.* Aug. 2019. V. 6. Iss. 4. P. 6117. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2869474>
4. Gorshkov B.G., Yüksel K., Fotiadi A.A., Wuilpart M., Korobko D.A., Zhirmov A.A., Stepanov K.V., Turov A.T., Konstantinov Y.A., Lobach I.A. // *Sensors.* 2022. V. 22. P. 1033. <https://doi.org/10.3390/s22031033>
5. Kazuki Hoshino, Daiki Saito, Mohd Saiful Dzulkefly Zan, Yosuke Tanaka // *Proc. SPIE 11914 "SPIE Future Sensing Technologies 2021"* 2021. P. 1191409. <https://doi.org/10.1117/12.2603932>
6. Matveenko V., Kosheleva N., Serovaev G., Fedorov A. // *Sensors.* 2021. V. 21. P. 5050. <https://doi.org/10.3390/s21155050>
7. Burdin V.A., Dashkov M.V., Volkov K.A. // *J. Opt. Technol.* 2011. V. 78. P. 132. <https://doi.org/10.1364/JOT.78.000132>
8. Bourdine A.V., Burdin V.A., Janyani V., Ghunawat A.K., Singh G., Zhukov A.E. // *Photonics.* 2018. V. 5. P. 37. <https://doi.org/10.3390/photonics5040037>
9. Горлов Н.И., Богачков И.В. // ПТЭ. 2020. № 4. С. 145. <https://doi.org/10.31857/S0032816220040278>
10. Emge S., Monte T., Brunner J., Rossi J., Miller R., Ganesan K. *Advances in Open-Loop FOG Sensors. Optical Fiber Sensors. OSA Technical Digest (CD). Optica Publishing Group, 2006. Paper MC3.*
11. Roberts G.L., Pittaluga M., Minder M., Lucamarini M., Dynes J.F., Yuan Z.L., Shields A.J. // *Optics Letters.* V. 43(20). P. 5110. <https://doi.org/10.1364/OL.43.005110>
12. Gabdulkhakov I.M., Morozov O.G., Kuznetsov A.A., Burdin A.V., Tiwari M. // *Russ. Aeronaut.* 2021. V. 64. P. 577. <https://doi.org/10.3103/S1068799821030284>
13. Ruzhitskaya D.D., Zhuktova I.V., Petrov M.A., Zaitsev K.A., Acheva P.P., Zunikov N.A., Shilko A.V., Aktas D., Johlinger F., Trefilov D.O., Ponomareva A.A., Kamynin V.A., Makarov V.V. // *Journal of Information Technologies. Mechanics and Optics.* 2021. V. 21. Iss. 6. P. 837. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-6-837-847>

14. *Liang L.-Y., Liang J.-S., Yao Q., Zheng M.-Y., Xie X.-P., Liu H., Zhang Q., Pan J.-W.* // Optics Communications. 2019. V. 441. P. 185.  
<https://doi.org/10.1016/j.optcom.2019.02.057>
15. *Ponomarev R.S., Shevtsov D.I., Karnauushkin P.V.* // Appl. Sci. 2019. V. 9. P. 4585.  
<https://doi.org/10.3390/app9214585>
16. *Yevdokimov S.V., Shostak R.I., Yatsenko A.V.* // Phys. Solid State. 2007. V. 49. P. 1957.  
<https://doi.org/10.1134/S1063783407100241>
17. *Ponomarev R., Konstantinov Y., Belokrylov M., Lobach I., Shevtsov D.* // Appl. Sci. 2021. V. 11. P. 9853.  
<https://doi.org/10.3390/app11219853>
18. *Eyal Leviatan, Avishay Eyal* // Opt. Express. 2015. V. 23. P. 33318.  
<https://doi.org/10.1364/OE.23.03331819>
19. *Feng W., Wang M., Jia H., Xie K., Tu G.* // Journal of Lightwave Technology. 2022. V. 40. Iss. 3. P. 900.  
<https://doi.org/10.1109/JLT.2022.3142164>
20. *Ting Feng, Junnan Zhou, Yanling Shang, Xiaojun Chen, X. Steve Yao* // Opt. Express. 2020. V. 28. P. 31253.  
<https://doi.org/10.1364/OE.427536>
21. *Barkov F.L., Konstantinov Yu.A., Bochkova S.D., Smirnov A.S., Burdin V.V., Krivosheev A.I., Nosova E.A., Smetannikov O.Yu.* // Quantum Electron. 2019. V. 49 (5). P. 514.  
<https://doi.org/10.1070/QEL16832>
22. *Карнаушкин П.В., Константинов Ю.А.* // ПТЭ. 2021. № 5. С. 78.  
<https://doi.org/10.31857/S0032816221040182>
23. *Belokrylov M.E., Kozlov A.A., Karnauushkin P.V., Konstantinov Y.A., Ponomarev R.S., Turov A.T.* // International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications. 2022. V. 11(3). P. 167.  
<https://doi.org/10.18178/ijeetc.11.3.167-174>
24. *Zhang Z., Fan X., He Z.* // Journal of Lightwave Technology. 2019. V. 37. Iss. 18. P. 4590.  
<https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2913284>
25. *Shevtsov D., Konstantinov Yu., Belokrylov M., Ponomarev R.* // Last Mile. 2020. V. 3(88). P. 48.  
<https://doi.org/10.22184/2070-8963.2020.88.3.48.53>
26. *Shuai Wang, Xinyu Fan, Qingwen Liu, and Zuyuan He* // Opt. Express. 2015. V. 23. P. 33301.  
<https://doi.org/10.1364/OE.23.033301>