

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2022.2.06

УДК 681.518.3:681.785.45

К.П. Латкин^{1,2}, В.П. Первадчук¹, Ю.А. Константинов²¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия²Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения
Российской академии наук, Пермь, Россия

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ КОНТРОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ АКТИВНОЙ ПРИМЕСИ В ПРЕФОРМАХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ

Контроль качества между этапами производства активных волоконных световодов является важной частью ввиду сложности самого процесса в целом. Базовый этап производства стеклянных заготовок волоконного световода, представляющий собой реализацию метода модифицированного химического парофазного осаждения, несмотря на высокотехнологичность, является трудноконтролируемым на предмет равномерности осаждения всех примесей и требует тщательного контроля на выходе. Частью подобного контроля является автоматизированный комплекс люминесцентной фотометрии сердцевин, позволяющий определять однородность концентрации активной примеси. В свою очередь, вычислительная база и система управления являются здесь основополагающими для получения адекватных результатов измерения. **Цель исследования:** разработать вычислительную систему и сопутствующую ей систему управления автоматизированным комплексом контроля однородности концентрации активной примеси в заготовках для получения адекватных результатов и их повторяемости. **Методы:** реализация предмета исследования методом программной инженерии при имеющейся механико-оптической системе с необходимыми датчиками и двигателями. Сами результаты измерений корректируются при использовании отдельных вычислительных блоков, берущих за основу результаты моделирования физических процессов. **Результаты:** предложены результаты измерений заготовки упомянутым комплексом с целью иллюстрации повторяемости измерений и потенциальных возможностей системы. Обсуждаются итоги проведенных исследований, а также место системы в комплексе контроля производства активных волоконных световодов в целом. **Практическая значимость:** результаты данного исследования лежат в основе реальной системы, интенсивно используемой на производстве активных волоконных световодов. Измерения, осуществляемые системой управления, вкпе с корректирующими вычислениями позволяют осуществлять отбраковку некондиционных заготовок активных волоконных световодов до последующих дорогостоящих этапов производства. Такой подход позволяет значительно удешевить производство на фоне высокой стоимости сырья и эксплуатации оборудования.

Ключевые слова: системы управления, активные волоконные световоды.

K.P. Latkin^{1,2}, V.P. Pervadchuk¹, Yu.A. Konstantinov²

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

THE SYSTEM CONTROLLING ACTIVE DOPHANT CONCENTRATION IN FIBER PREFORMS

Quality control within the stages of active optical fibers production is an important part due to the complexity of the process itself as a whole. The basic stage in the production of glass fiber preforms, which is the implementation of the modified chemical vapor deposition method. Despite its high technology, it is difficult to control for the deposition uniformity of all dopants and requires careful control at the output. A part of such control is an automated complex for luminescent photometry of the core, which makes it possible to determine the homogeneity of the active dopant concentration. In turn, the computing base and the control system are fundamental here for obtaining adequate measurement results. Purpose: To develop a computer system and an accompanying control system for the monitoring of active dopant concentration uniformity in a preform to obtain adequate results and their repeatability. Methods: implementation of the subject of research by the method of software engineering with the existing mechanical-optical system with the necessary sensors and engines. The measurement results themselves are corrected using separate computing modules, which are based on the results of physical processes simulations. Results: The results of preform measurements by the mentioned system are proposed in order to illustrate the repeatability of measurements and the potential capabilities of the system. The results of the studies carried out are discussed, as well as the place of the system in the active optical production control measures as a whole. Practical relevance: The results of this study form the basis of a real system that is actively used in the production of active optical fibers. The measurements performed by the control system, coupled with corrective calculations, allow for the rejection of substandard active fiber preforms before the subsequent expensive production steps. This approach can significantly reduce the cost of production against the background of the high cost of raw materials and equipment operation.

Keywords: control systems, active optical fibers.

Введение

Производство специальных волоконных световодов – одна из сфер промышленности, требующая тщательного подхода ко всем этапам получения конечного продукта [1–3]. Результатом последнего из них являются протяжённые структуры из кварцевого стекла (волоконные световоды или оптические волокна), способные проводить по своей сердцевине излучение, самый распространённый диапазон которого расположен в ближней инфракрасной области (740–2000 нм). Фундаментальным явлением, лежащим в основе принципа действия большинства волоконных световодов, является полное внутреннее отражение. Благодаря наличию протяжённой вдоль длины волокна сердцевины диаметром порядка 10 мкм с незначительно повышенным показателем

преломления $\Delta n \sim 0,005$ через такую конструкцию можно проводить оптический сигнал. Свет в таком случае будет постоянно испытывать полное внутреннее отражение и не покидать пределы сердцевины [4].

Однако стоит отметить, что существует множество более сложных в исполнении вариантов волоконных световодов, функционал которых не ограничен передачей оптического сигнала [5, 6]. К такому типу можно отнести специальные активные волоконные световоды [7]. Благодаря наличию специальной присадки (примеси), зачастую являющейся редкоземельным металлом, световод способен как поглощать излучение в определённом спектральном диапазоне, так и излучать его, но уже на другой длине волны.

Ключевыми в создании подобного волоконного световода являются этап создания оптической заготовки (преформы) цилиндрической формы и процесс вытяжки [8, 9]. В результате последнего заготовка диаметром порядка 15 мм масштабируется до относительно тонкого волоконного световода диаметром порядка 250 мкм с сопутствующим переносом свойств на результирующий продукт. Здесь важно отметить, что процесс создания заготовки, являющийся модифицированным химическим парофазным осаждением (MCVD) стекломассы на стенках специально подготовленной кварцевой трубы, очень сложен. Такие факторы, как качество реагентов и трубы, технологический режим работы станка, опыт оператора (человеческий фактор), могут влиять на характеристики получаемой заготовки. Одним из таких важных свойств является однородность распределения активной присадки по длине преформы, о которой в дальнейшем и будет идти речь. В рамках данной статьи речь идёт о следующих примесях: ионы эрбия (Er^{3+}) и ионы иттербия (Yb^{3+}). Данные о спектральных линиях поглощения (линиях накачки) и излучения (линиях люминесценции) представлены в таблице [10, 11].

Спектральные линии поглощения и излучения активных примесей

Примесь	Линии поглощения, нм	Линии излучения, нм
Er^{3+}	980	1480–1590
Yb^{3+}	915 976	978–982 1030–1040

Себестоимость такой преформы высока из-за дороговизны реагентов, используемых в процессе MCVD ионов редкоземельных металлов [12–14]. По этой причине наличие промежуточного контроля таких заготовок на предмет однородности концентрации активной примеси способно сократить затраты посредством отбраковки некондиционных экземпляров до этапа вытяжки. Из рассуждений, представленных выше, вполне очевидно, что контроль распределения присадки редкоземельного металла в оптическом волокне является достаточно важной задачей. Попытки оценить распределение эрбия в уже вытянутых оптических волокнах вполне успешно были реализованы ещё в 80-х гг. прошлого века [15]. В установке использовался принцип оптической рефлектометрии частотной области, что дало возможность исследовать волокна с достаточно высоким разрешением. Однако ввиду высокого коэффициента поглощения оптического излучения в зоне частотной перестройки лазера исследовать можно было лишь непротяжённые участки активного волокна, ограничивающиеся метрами. А это делает неприменимым исследование сразу нескольких километров волокна, вытянутых из преформы. Позже подобные исследования были перенесены из частотной во временную область. В работе [16] авторы использовали полностью волоконный рефлектометр на основе иттербиевого импульсного лазера с пассивным гольмиевым затвором. Это позволило исследовать волокна длиной до километра. Однако такое измерение концентрации можно признать лишь косвенным: длина волны зондирующего импульса лежала на склоне кривой поглощения эрбия, и на получаемую величину оказывали влияние многочисленные другие присадки, в том числе загрязнения. Еще один заслуживающий внимания метод – измерение характеристик эрбиевых волокон с помощью микроскопии [17, 18]. Однако данный подход, как и оба предыдущих описанных метода, характеризуют распределение активной присадки уже после вытяжки волокна: такое тестирование вряд ли можно назвать эффективным с точки зрения экономии материальных и временных ресурсов. В 2010-х гг. авторы настоящей работы представили первые (по их информации) публикации, посвящённые контролю распределения активного эрбия вдоль заготовки волоконного световода [19–22]. Макетная установка позволяла исследовать преформы сразу после изготовления, но обладала рядом недостатков, главным из которых можно назвать невысокую повторяе-

мость измерений, обусловленную высокой чувствительностью измерительной схемы к внешним факторам. В 2018 г. британские исследователи представили лабораторное устройство, позволяющее исследовать одновременно профиль показателя преломления преформы и профиль распределения эрбия в любой точке [23]. Это решение позволило не только фактически выполнить поставленную задачу, но и совместить её с другой важнейшей операцией контроля качества. Профиль показателя преломления и профиль распределения активного реагента в одном и том же сечении заготовки – бесценная информация для исследователя или технолога. Однако данный метод также оказался не лишённым недостатков. Основной из них – использование синтетической иммерсионной (погружной) жидкости, чистка от которой оптических деталей занимает время и требует ручных манипуляций. Также необходимо отметить, что многие марки иммерсионной жидкости являются ядами и могут легко воспламениться. Особенно этот риск повышается, когда используются высокомоощные диоды накачки. Таким образом, перед авторами стояла следующая задача: необходимо было создать высокоточный, максимально изолированный от внешних факторов автоматизированный измерительный комплекс, позволяющий без использования погружных жидкостей производить измерение концентрации активных присадок (в данном случае эрбия) по длине преформы волоконного световода до его вытяжки. Такая система была реализована авторами. Ниже приводится её описание (рис. 1).

Излучение диода накачки *1* (см. рис. 1) с длиной волны $\lambda = 980$ нм доводится через оптическую систему до объёмного ответвителя *2*. Ответвитель является фрагментом промышленной заготовки без активных примесей, усечённым до цилиндра высотой порядка 2 см. Благодаря неизбежному рэлеевскому рассеянию в массиве кварцевого стекла часть излучения рассеивается разнонаправленно. Ввиду отсутствия зависимости протекания данного явления от поляризации излучения лазерный режим диода не влияет на процент рассеиваемой мощности. Данный факт позволяет часть этого излучения отводить посредством ровной поверхности *3* с коэффициентом отражения *R* к фотоприёмнику опорного канала *4*. Последний, в свою очередь, регистрирует динамически изменяющуюся в связи с множеством неконтролируемых факторов мощность накачки.

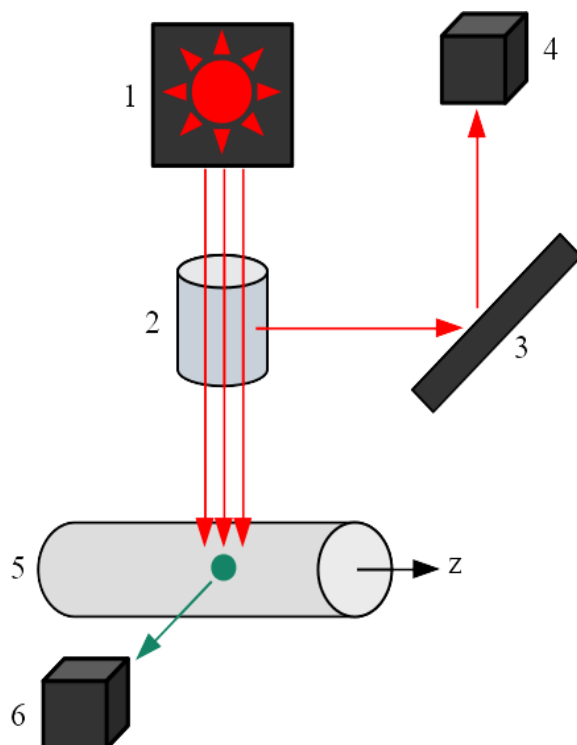


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема автоматизированной системы контроля однородности концентрации активной примеси: 1 – диод накачки со встроенной системой термостабилизации, 2 – ответвитель излучения, работающий на рэлеевском рассеянии, 3 – поверхность, перенаправляющая излучение к фотоприёмнику опорного канала, 4 – фотоприёмник опорного канала, 5 – измеряемая преформа, 6 – фотоприёмник измерительного канала

Люминесценция как явление, лежащее в основе измерений, позволяет оптически активной сердцевине заготовки 5 под действием оптической накачки излучать на длине волне $\lambda = 1529$ нм (для эрбиевого стекла), $\lambda = 1035$ нм (для иттербиевого стекла). Подобно рассеянию Рэля излучение люминесценции распространяется в пределах всего пространственного угла. Незначительная часть этого излучения охватывается рабочей областью фотоприёмника 6, который и осуществляет основные измерения. Из-за того, что интенсивность люминесценции прямо пропорциональна сосредоточенности исследуемых активных ионов в среде, измерения фотоприёмника 6 после пересчёта дают точные данные о концентрации активной примеси в данной точке. Совокупность измерений в каждой точке оси Z даёт представление

об однородности концентрации $C(Z)$ (единицы измерения: м^{-3} или ppm), которая позволяет судить о кондиционности преформы. Таким образом, указанный способ измерений не является разрушающим для заготовок и учитывает их геометрию и незначительный диаметр рабочей сердцевины.

1. Методы и оборудование

Система управления комплексом контроля концентрации активной примеси вдоль заготовки в самом простом виде может быть представлена в виде структурной схемы (рис. 2).

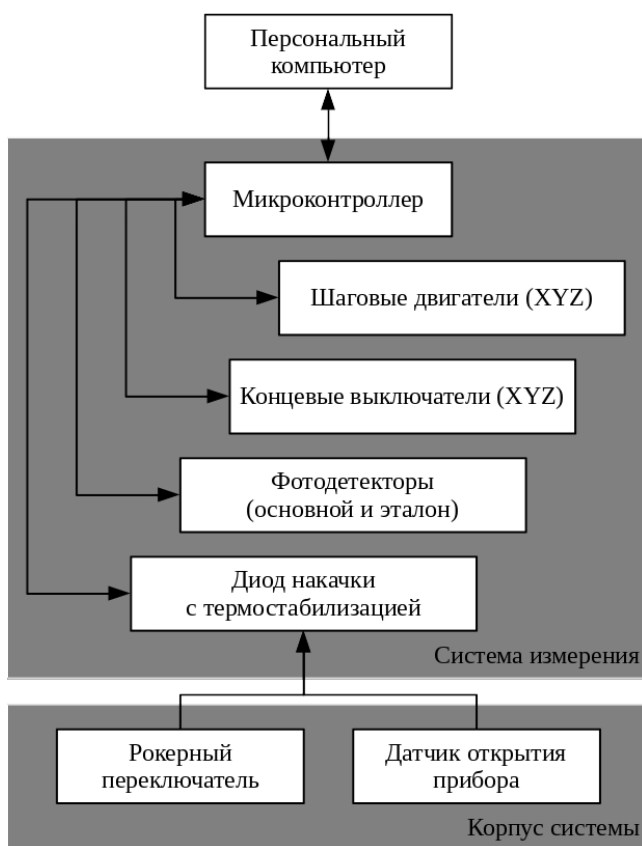


Рис. 2. Структурная схема измерительной системы

Основным звеном автоматизированной системы управления является микроконтроллер, который на низком уровне интерпретирует формализованные управляющие сигналы (команды), посылаемые персональным компьютером, в конкретные действия.

Для достижения повторяемости результатов в систему были включены два шаговых двигателя (XU), которые в рамках одного поперечного сечения настраивают фотоприёмник и диод накачки на максимум излучения, который соответствует юстировке системы точно на оптическую ось сердцевины. Шаг движения по обеим осям имеет порядок 10–15 мкм (фотоприёмник – 10 мкм/шаг, накачка – 15 мкм/шаг), что позволяет достаточно точно настроить систему на подобную структуру диаметра того же порядка (рис. 3).

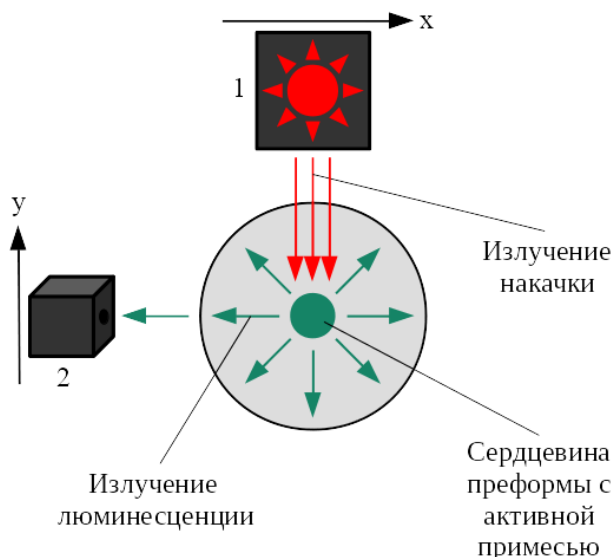


Рис. 3. Принципиальная оптическая схема прибора (поперечный разрез преформы): 1 – диод накачки, способный двигаться вдоль оси X относительно преформы, 2 – фотоприёмник измерительного канала, способный двигаться вдоль оси Y относительно преформы

Посредством метода двоичного поиска с постепенным уменьшением скорости двигателей реализован поиск максимума. Найденная таким способом координата считается оптимальной точкой для дальнейшего исследования преформы. В иных случаях отклонение луча диода от оптической оси сердцевины повлечёт за собой уменьшение мощности.

Ограничивают движение преформы концевые выключатели, находящиеся на крайних возможных положениях системы по каждой из осей (XUZ) и также контролируемые микроконтроллером.

Каналы системы представляют собой фотодетекторы, чувствительные к излучению в инфракрасном диапазоне. Фотодетектор измеритель-

ного канала регистрирует излучение люминесценции на длине волны 1550 нм. Фотодетектор опорного канала фиксирует мощность люминесценции при постоянном коэффициенте ответвления, обеспечиваемом инвариантностью рэлеевского рассеяния по отношению к оптической поляризации излучения накачки в данном оптическом элементе.

Все оптические элементы, включая границы раздела сред и переизлучающую сердцевину преформы, имеют статические линейные коэффициенты отражения/пропускания/переизлучения. Важно здесь и то, что отсутствуют оптические эффекты насыщения, например режим генерации. Путём моделирования данных оптических процессов было получено, что мощность излучения на фотодетекторе опорного канала P_{ref} , как и мощность люминесценции P_{lum} , прямо пропорциональна мощности накачки P_{pump} :

$$P_{ref} \sim P_{pump}, \quad P_{lum} \sim P_{pump}.$$

Учитывая вышеизложенные факты, можно значительно уменьшить влияние флуктуаций мощности накачки. Для этого вычислительная система фиксирует значение мощности накачки на опорном канале $P_{ref}(0)$ в начале своей работы. Затем в течение всего времени измерений t система считает коэффициент увеличения мощности накачки на опорном канале:

$$\Gamma(t) = \frac{P_{ref}(t)}{P_{ref}(0)}.$$

Благодаря обозначенной ранее пропорциональности мощности люминесценции $P_{lum}(t)$ и мощности накачки $P_{ref}(t)$ система компенсирует получаемую мощность люминесценции следующим образом:

$$P_{\text{compensated}}(t) = \frac{P_{lum}(t)}{\Gamma(t)}. \quad (1)$$

Эталоном системы является заготовка с известной концентрацией контролируемой активной примеси (рис. 4). Отличие её от обычной преформы в том, что вместо процесса вытягивания её сегментируют на три части. Затем две крайних сегмента измеряются разрушающим методом на рентгенооскопе с дальнейшим получением концентрации активной примеси. Если размер целевой центральной части заготовки на-

большой, то можно считать её концентрацию C_{standart} равной среднему арифметическому концентраций ранее отделенных и измеренных боковых сегментов (C_{leftPart} , $C_{\text{rightPart}}$).

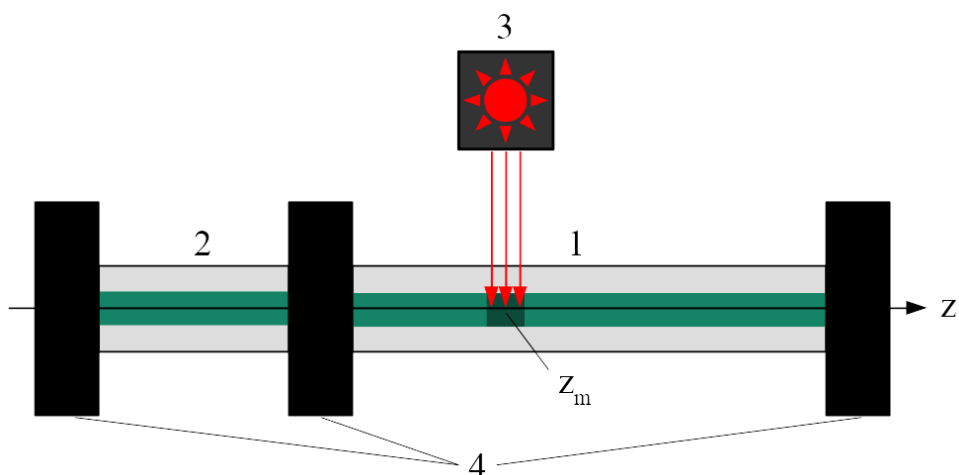


Рис. 4. Схема измерений при наличии эталона заготовки: 1 – измеряемая заготовка, 2 – эталон заготовки, находящийся на той же оси Z, что и измеряемая заготовка, 4 – крепления для заготовок; Z_m – координата измеряемой области на оси Z

Система управления, предварительно прогрев диод в течение часа и осуществив измерения начальной мощности накачки на опорном канале $P_{\text{ref}}(0)$, делает измерения на эталоне заготовки и получает мощность люминесценции P_{standart} , соответствующую концентрации эталона C_{standart} . Для повышения точности измерения производится усреднение по 20–30 точкам, после чего вычисляется коэффициент перевода:

$$M = \frac{C_{\text{standart}}}{P_{\text{standart}}}$$

Используя полученную из математического моделирования пропорциональность измеренной мощности люминесценции $P_{\text{compensated}}(Z)$ и концентрации люминесцирующей примеси в данной точке $C(Z)$, применяется следующая формула для расчёта результатов в единицах измерения концентрации (m^{-3} или ppm):

$$C(Z) = P_{\text{compensated}}(Z)M. \quad (2)$$

Вычислительный блок и система управления реализованы в виде микропрограммы контроллера и программы ErGO System для персонального компьютера, написанной на языке C# (рис. 5).

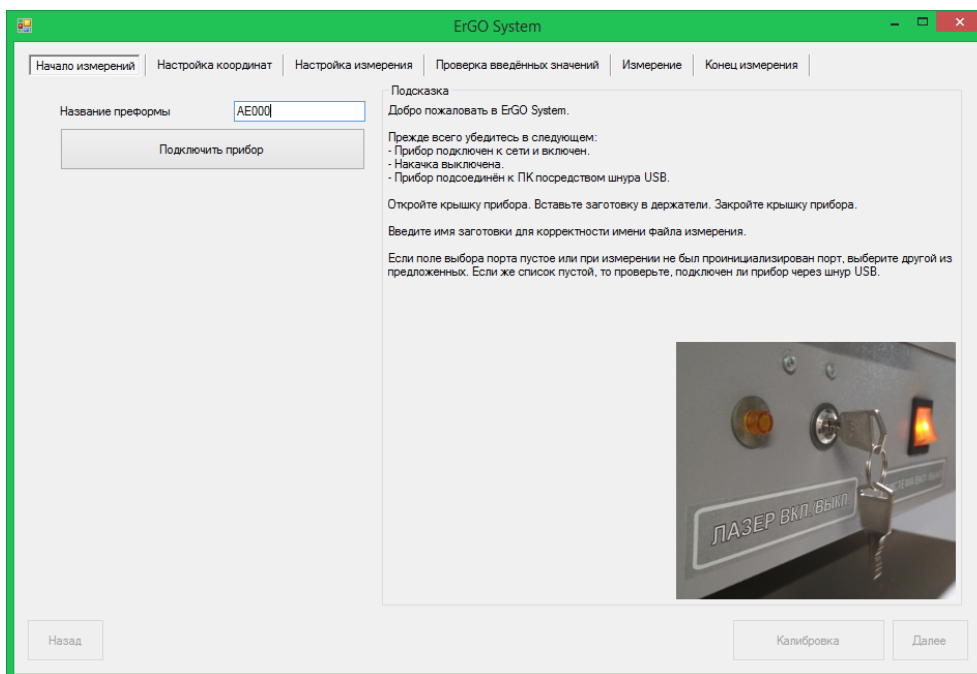


Рис. 5. Скриншот окна ErGO System

Результаты выводятся в виде табличного файла со всеми входными данными об измерении с подробным поэтапным логированием.

2. Результаты

Результатами тестирования подобной вычислительной системы можно считать повторяемость результатов и их адекватность. В качестве тестовых образцов использовались специально изготовленные заготовки с неравномерным распределением примеси вдоль длины.

Ниже представлены графики четырёх измерений одной эрбиевой заготовки (рис. 6). Исходя из расчёта стандартного отклонения, погрешность измерения составляет 195 ppm (2,09–4,36 %). Также система управления может реализовать режим полного измерения, предоставляя полные данные о промежуточных замерах. Пример такого измерения в единицах напряжения на фотоприёмнике (мВ) проиллюстрирован на рис. 7.

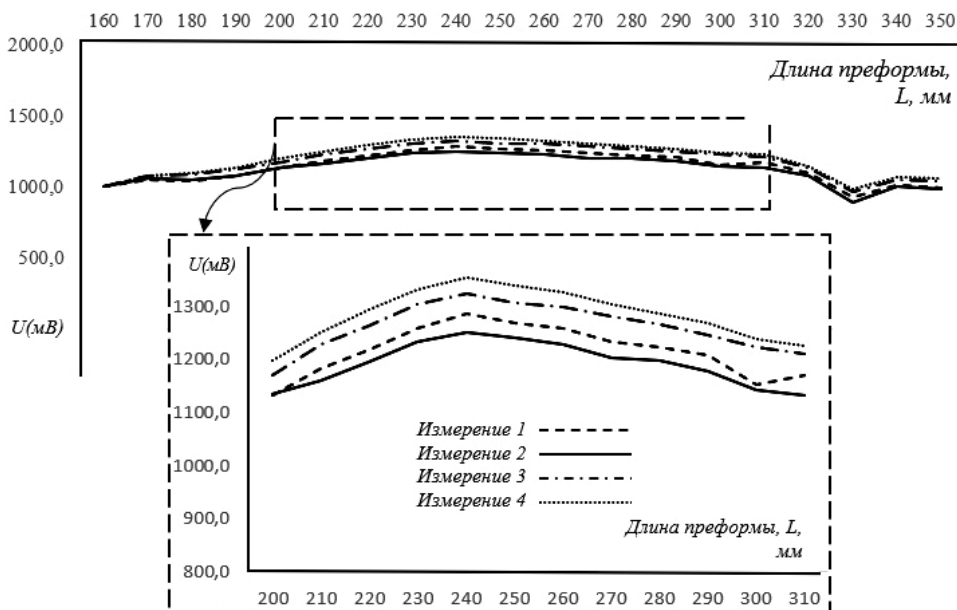


Рис. 6. Графики четырёх измерений распределения концентрации ионов эрбия в сердцевине заготовки вдоль её длины

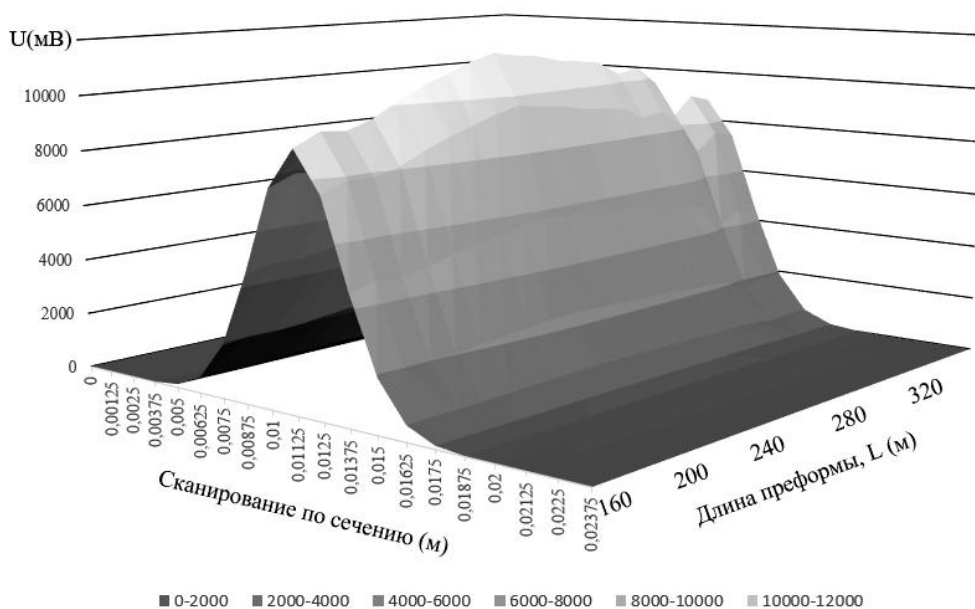


Рис. 7. Визуальная обработка файла данных режима полного измерения; ось Y – радиальная координата цилиндрической поверхности заготовки; ось аппликата представляет из себя показания фотоприёмника без пересчёта в концентрацию

Заключение

Как показывают результаты, представленные выше, система управления автоматизированным оптомеханическим комплексом позволяет реализовать контроль качества заготовок активных волоконных световодов. Благодаря вычислительной системе, разработанной с целью уменьшения погрешности измерений, удалось достичь повторяемости с относительной погрешностью до 5 %. Это значение показывает, что корректировка компенсирует значительные изменения мощности накачки и позволяет получать адекватные результаты.

Наличие эталона с известной концентрацией активной примеси позволило производить оценку абсолютной концентрации (ppm) вместо условных единиц фотоприёмника. Подобный подход даёт возможность контролировать уже конкретные характеристики осаждения примеси в сложно управляемом процессе MCVD, а главное, повышать осведомлённость о качестве заготовки в процессе отбраковки.

Необходимо также уделить внимание месту разработки в общем комплексе мер контроля параметров процессов и параметров полуфабрикатов на производстве оптического волокна. Авторами ранее был разработан комплекс дополнительных методов контроля состава активных волоконных световодов и их сырья на различных этапах производства – от исследования материала для изготовления опорной трубы из синтетического кварца [24] и осаждения реагентов методом MCVD до контроля самих активных волокон методом рефлектометрии [25].

Все установки собраны в лаборатории ПФИЦ УРО РАН и имеют перспективу широкого применения в лабораториях промышленных предприятий, серийно выпускающих активные волоконные световоды. Так, при эксплуатации на промышленном производстве активных волоконных световодов кластера «Фотоника» (г. Пермь), начиная с первых (макетных) версий установок (2015 г.) и заканчивая эксплуатацией отдельных установок в промышленной лаборатории (с 2018 г.), коллективу авторов удалось: создать и модифицировать точные и гибкие спектрометрические методы точечного и распределенного (трехмерного) детектирования примесей в исходных материалах для волоконной оптики и оптических деталей, постепенно увеличив точность с индикаторной (погрешность >20 %) до метрологически удовлетворительных значений (погрешность <5 %); сократить цикл итераций; впервые создать метод исследования высоколегированных активных волоконных

световодов на принципах рефлектометрии временной области в режиме полностью волоконного устройства; существенно снизить время цикла производства и затраты на материалы.

Библиографический список

1. Doping of silica glass with fluorine by the modified chemical vapor deposition method / A. Andreev, V. Bureev, M. Eronyan, I. Kryukov, T. Mazunina, M. Serkov // *Glass Physics and Chemistry*. – 2013. – № 39. – P. 285–286. DOI: 10.1134/S1087659613030024

2. Влияние структуры пористого слоя кварцевого стекла на процесс изготовления активных оптических волокон методом пропитки / А.С. Вахрушев, Д.И. Нурмухаметов, О.Л. Вохмянина, И.С. Азанова, М.В. Яшков // *Прикладная фотоника*. – 2020. – Т. 7, № 1. – С. 55–61. DOI: 10.15593/2411-4367/2020.1.05

3. Повышение оптических и прочностных свойств активного кварцевого волоконного световода / М.К. Цибиногина, Я.М. Шарипов, М.К. Осипчук, К.Д. Пищальников, К.И. Гагарина, И.А. Перетрухина // *Прикладная фотоника*. – 2020. – Т. 7, № 1. – С. 49–54. DOI: 10.15593/2411-4367/2020.1.04

4. Hui R. *Introduction to fiber-optic communications*. – Cambridge: Academic Press, 2020. – 123 p.

5. Новые области применения систем волоконно-оптических датчиков / А.А. Ларин, М.Ю. Федотов, С.В. Бухаров, В.И. Резниченко // *Прикладная фотоника*. – 2017. – № 4. – С. 311–324. DOI: 10.15593/2411-4367/2017.04.06

6. Pevac S., Lenardič B., Donlagic D. Miniature, all-silica, fiber optics sensors produced by selective etching of phosphorus doped silica glass // *Proceedings*. – 2018. – 2(13). – P. 1095. DOI: 10.3390/proceedings2131095

7. Erbium- and magnesium-codoped silica-based transparent glass ceramic core fiber made by FCVD and flash vaporization / J. Lupi, M. Ude, S. Trzesien, B. Lenardič, H. Guillon, W. Blanc, B. Dussardier // *International Conference on Fibre Optics and Photonics*. – 2014. – Paper T2B.6. DOI: 10.1364/PHOTONICS.2014.T2B.6

8. Linear stability analysis of nonisothermal glass fiber drawing / J. Philippi, M. Bechert, Q. Chouffart, C. Waucquez, B. Scheid // *Physical Review Fluids*. – 2022. – Vol. 7. – P. 043901. DOI: 10.1103/PhysRevFluids.7.043901

9. Multimaterial and flexible devices made by fiber drawing / A. Stefani, B. Kuhlmei, M. Large, J. Hayashi, S. Farajikhah, I. Rukhlenko, A. Runge, S. Fleming // 22nd International Conference on Transparent Optical Networks. – 2020. – P. 1–3. DOI: 10.1109/ICTON51198.2020.9203327

10. Курков А.С., Дианов Е.М. Непрерывные волоконные лазеры средней мощности // Квантовая электроника. – 2004. – № 34:10. – С. 881–900.

11. Усилительные свойства активных световодов с высокой концентрацией ионов эрбия / А.Ю. Плоцкий, А.С. Курков, М.Ю. Яшков, М.М. Бубнов, М.Е. Лихачев, А.А. Сысолятин, А.Н. Гурьянов, Е.М. Дианов // Квантовая электроника. – 2005. – Т. 35, № 6. – С. 559–562.

12. Анализ производства и потребления редкоземельных металлов в странах ЕС и БРИКС / А.Е. Череповицын, С.В. Федосеев, А.Б. Тесля, Е.Ю. Выболдина // Цветные металлы. – 2015. – № 5 (869). – С. 5–10. DOI: 10.17580/tsm.2015.05.01

13. Sen R., Dhar A. An improved method of fabricating rare earth doped optical fiber // Selected Topics on Optical Fiber Technology. – 2012. – P. 83–94. DOI: 10.5772/28734

14. Пелконен, Я. Производство заготовок для вытяжки оптических волокон // Фотоника. – 2015. – № 4 (52). – С. 38–40.

15. High-resolution distributed-gain measurements in erbium-doped fibers / J.P. Von Der Weid, R. Passy, B. Huttner, O. Guinard, N. Gisin // IEEE Photonics Technol. Lett. – 1998. – Vol. 10, № 7. – P. 949–951. DOI: 10.1109/68.681280

16. Полностью волоконный рефлектометр временной области для измерения длины активных эрбиевых волоконных световодов / М.Е. Белокрылов, Ю.А. Константинов, К.П. Латкин, Д. Клод, Д.А. Селезнев, А.А. Степин, Ю.А. Конин, В.А. Щербакова, Р.Р. Кашина // Приборы и техника эксперимента. – 2020. – № 4. – С. 45–50. DOI: 10.31857/S0032816220050018

17. Micro-characterisation of erbium-doped fibers using a Raman confocal microscope / F. Sidirolou, S.T. Huntington, A. Roberts, G.W. Baxter // Optics Express. – 2005. – 13. – P. 5506–5512. DOI: 10.1364/OPEX.13.005506

18. Sidirolou F., Roberts A., Baxter G.W. Investigation of erbium dopant distribution in silica optical fibers with fluorescence-based measurements using a near-field scanning microscope // Optical Engineering. – 2014. – 53(12). – P. 126104. DOI: 10.1117/1.OE.53.12.126104

19. Special Optical Fiber Preform Layers 3D-Reconstruction / Y.A. Konstantinov, K.P. Latkin, F.L. Barkov, A.S. Smirnov, M.M. Poskrebyshev, V.P. Pervadchuk, D.B. Vladimirova, Y.A. Konin, A.I. Garanin, V.V. Burdin // *Scientific Visualization*. – 2017. – Vol. 9, № 4. – P. 47–58. DOI: 10.26583/sv.9.4.05

20. Метод измерения абсолютной концентрации ионов эрбия в преформе активного волокна / К.П. Латкин, А.С. Смирнов, Ю.А. Константинов, В.В. Бурдин // *Вестник Перм. федерал. исслед. центра*. – 2018. – № 4. – С. 21–26. DOI: 10.7242/1998-2097/2018.4.3

21. Автоматизированные распределенные методы исследования анизотропных волоконных световодов, легированных ионами эрбия / Ф.Л. Барков, В.В. Бурдин, А.С. Смирнов, К.П. Латкин, Ю.А. Константинов, Я.Д. Токарева, М.В. Ременникова // *Наука и современность*. – 2016. – С. 96–101.

22. Оценка мощности люминесценции сердцевины заготовки волоконных световодов для измерения концентрации активных ионов / К.П. Латкин, В.В. Бурдин, Ю.А. Константинов, А.С. Смирнов, В.П. Первадчук // *Фотон-экспресс*. – 2019. – № 6 (158). – С. 170–171. DOI: 10.24411/2308-6920-2019-16085

23. Vivona M., Zervas M.N. Instrumentation for simultaneous non-destructive profiling of refractive index and rare-earth-ion distributions in optical fiber preforms // *Instruments*. – 2018. – 2(4), 23. DOI: 10.3390/instruments2040023

24. Разработка оптического метода анализа концентрации гидроксильных групп в образцах из чистого кварца в области длины волны 1400 нм / В.В. Бурдин, Д. Клод, Ю.А. Константинов, А.С. Смирнов, В.П. Первадчук // *Прикладная фотоника*. – 2018. – Т. 5, № 4. – С. 420–434. DOI: 10.15593/2411-4367/2018.4.09

25. Многостадийный контроль качества активных волоконных световодов / В.В. Бурдин, Ю.А. Константинов, Д. Клод, К.П. Латкин, М.Е. Белокрылов, А.И. Кривошеев, М.К. Цибиногина // *Приборы и техника эксперимента*. – 2021. – № 5. – С. 138–146. DOI: 10.31857/S0032816221050037

References

1. Andreev A., Bureev V., Eronyan M., Kryukov I., Mazunina T., Serkov M. Doping of silica glass with fluorine by the modified chemical vapor deposition method. *Glass Physics and Chemistry*, 2013, no. 39, pp. 285-286. DOI: 10.1134/S1087659613030024
2. Vakhrushev A.S., Nurmukhametov D.I., Vokhmianina O.L., Azanova I.S., Iashkov M.V. Vliianie struktury poristogo sloia kvartseвого стекла na protsess izgotovleniia aktivnykh opticheskikh volokon metodom propitki [The Influence of the Porous Layer Structure of Quartz Glass on the Active Optical Fibers Manufacturing Process by Impregnation Method. Applied Photonics]. *Prikladnaia fotonika*, 2020, vol. 7, no. 1, pp. 55-61. DOI: 10.15593/2411-4367/2020.1.05
3. Tsibinogina M.K., Sharipov Ia.M., Osipchuk M.K., Pishchal'nikov K.D., Gagarina K.I., Peretrakhina I.A. Povyshenie opticheskikh i prochnostnykh svoystv aktivnogo kvartseвого volokonного svetovoda [Improving optical and mechanical properties of the active optical fiber]. *Prikladnaia fotonika*, 2020, vol. 7, no. 1, pp. 49-54. DOI: 10.15593/2411-4367/2020.1.04
4. Hui R. Introduction to fiber-optic communications. Cambridge: Academic Press, 2020, 123 p.
5. Larin A.A. Fedotov, M.Iu., Bukharov S.V., Reznichenko V.I. Novye oblasti primeneniia sistem volokonno-opticheskikh datchikov [New applications systems of fiber-optical sensors]. *Prikladnaia fotonika*, 2017, no. 4, pp. 311-324. DOI: 10.15593/2411-4367/2017.04.06
6. Pavec S., Lenardič B., Donlagic D. Miniature, all-silica, fiber optics sensors produced by selective etching of phosphorus doped silica glass. *Proceedings*, 2018, 2(13), 1095 p. DOI: 10.3390/proceedings2131095
7. Lupi J., Ude M., Trzesien S., Lenardič B., Guillon H., Blanc W., Dussardier B. Erbium- and magnesium-codoped silica-based transparent glass ceramic core fiber made by FCVD and flash vaporization. *International Conference on Fibre Optics and Photonics*, 2014, Paper T2B.6. DOI: 10.1364/PHOTONICS.2014.T2B.6
8. Philippi J., Bechert M., Chouffart Q., Waucquez C., Scheid B. Linear stability analysis of nonisothermal glass fiber drawing, *Physical Review Fluids*, 2022, vol. 7, 043901 p. DOI: 10.1103/PhysRevFluids.7.043901
9. Stefani A., Kuhlmeier B., Large M., Hayashi J., Farajikhah S., Rukhlenko I., Runge A., Fleming S. Multimaterial and flexible devices made by fiber drawing. *22nd International Conference on Transparent Optical Networks*, 2020, pp. 1-3. DOI: 10.1109/ICTON51198.2020.9203327

10. Kurkov A.S., Dianov E.M. Nepreryvnye volokonnye lazery srednei moshchnosti [CW fiber lasers of medium power]. *Kvantovaia elektronika*, 2004, no. 34:10, pp. 881-900.

11. Plotskii A.Iu., Kurkov A.S., Iashkov M.Iu., Bubnov M.M., Likhachev M.E., Sysoliatin A.A., Gur'ianov A.N., Dianov E.M. Usilitel'nye svoistva aktivnykh svetovodov s vysokoi kontsentratsiei ionov erbiia [Amplifying properties of heavily erbium-doped active fibres]. *Kvantovaia elektronika*, 2005, vol. 35, no. 6, pp. 559-562.

12. Cherepovitsyn A.E., Fedoseev S.V., Teslia A.B., Vyboldina E.Iu. Analiz proizvodstva i potrebleniia redkozemel'nykh metallov v stranakh ES i BRIKS [Analysis of the production and consumption of rare earth metals in the EU and BRICS countries]. *Tsvetnye metally*, 2015, no. 5 (869), pp. 5-10. DOI: 10.17580/tsm.2015.05.01

13. Sen R., Dhar A. An improved method of fabricating rare earth doped optical fiber. *Selected Topics on Optical Fiber Technology*, 2012, pp. 83-94. DOI: 10.5772/28734

14. Pelkonen Ia. Proizvodstvo zagotovok dlia vytyazhki opticheskikh volokon [Manufacturing of preforms for the drawing to optical fibers]. *Fotonika*, 2015, no. 4 (52), pp. 38-40.

15. Von Der Weid J.P., Passy R., Huttner B., Guinard O., Gisin N. High-resolution distributed-gain measurements in erbium-doped fibers. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1998, vol. 10, no. 7, pp. 949-951. DOI: 10.1109/68.681280

16. Belokrylov M.E., Konstantinov Iu.A., Latkin K.P., Klod D., Seleznev D.A., Stepin A.A., Konin Iu.A., Shcherbakova V.A., Kashina R.R. Polnost'iu volokonnyi reflektometr vremennoi oblasti dlia izmereniia dliny aktivnykh erbievykh volokonnykh svetovodov [An All-Fiber Time Domain Reflectometer for Measuring the Length of Active Erbium Doped Optical Fibers]. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 2020, no. 4, pp. 45-50. DOI: 10.31857/S0032816220050018

17. Sidirolou F., Huntington S.T., Roberts A., Baxter G.W. Micro-characterisation of erbium-doped fibers using a raman confocal microscope. *Optics Express*, 2005, 13, pp. 5506-5512. DOI: 10.1364/OPEX.13.005506

18. Sidirolou F., Roberts A., Baxter G.W. Investigation of erbium dopant distribution in silica optical fibers with fluorescence-based measurements using a near-field scanning microscope. *Optical Engineering*, 2014, 53(12), 126104 p. DOI: 10.1117/1.OE.53.12.126104

19. Konstantinov Y.A., Latkin K.P., Barkov F.L., Smirnov A.S., Poskrebyshev M.M., Pervadchuk V.P., Vladimirova D.B., Konin Y.A., Garanin A.I., Burdin V.V. Special Optical Fiber Preform Layers 3D-Reconstruction. *Scientific Visualization*, 2017, vol. 9, no. 4, pp. 47-58. DOI: 10.26583/sv.9.4.05

20. Latkin K.P., Smirnov A.S., Konstantinov Iu.A., Burdin V.V., Metod izmereniia absolutnoi kontsentratsii ionov erbiia v preforme aktivnogo volokna [Method for evaluating the absolute concentration of erbium ions in the active fiber preform]. *Vestnik Permskogo federal'nogo issledovatel'skogo tsentra*, 2018, no. 4, pp. 21-26. DOI: 10.7242/1998-2097/2018.4.3

21. Barkov F.L., Burdin V.V., Smirnov A.S., Latkin K.P., Konstantinov Iu.A., Tokareva Ia.D., Remennikova M.V. Avtomatizirovannye raspredelennye metody issledovaniia anizotropnykh volokonnykh svetovodov, legirovannykh ionami erbiia [Computer-aided distributed methods for measuring anisotropic optical erbium-doped fibers]. *Nauka i sovremennost'*, 2016, pp. 96-101.

22. Latkin K.P., Burdin V.V., Konstantinov Iu.A., Smirnov A.S., Pervadchuk V.P. Otsenka moshchnosti liuminesentsentsii serdtseviny zagotovki volokonnykh svetovodov dlia izmereniia kontsentratsii aktivnykh ionov [Evaluation of luminescence power of an optical fibers preform core to measure active ions concentration]. *Foton-Ekspress*, 2019, no. 6 (158), pp. 170-171. DOI: 10.24411/2308-6920-2019-16085

23. Vivona M., Zervas M.N. Instrumentation for Simultaneous Non-Destructive Profiling of Refractive Index and Rare-Earth-Ion Distributions in Optical Fiber Preforms. *Instruments*, 2018, 2(4), 23 p. DOI: 10.3390/instruments2040023

24. Burdin V.V., Klod D., Konstantinov Iu.A., Smirnov A.S., Pervadchuk V.P. Razrabotka opticheskogo metoda analiza kontsentratsii gidroksil'nykh grupp v obraztsakh iz chistogo kvartsa v oblasti dliny volny 1400 nm [Development the optical method of analyzing the hydroxyl groups concentration in pure quartz samples at the wavelength region of 1400 nm]. *Prikladnaia fotonika*, 2018, vol. 5, no. 4, pp. 420-434. DOI: 10.15593/2411-4367/2018.4.09

25. Burdin V.V., Konstantinov Iu.A., Klod D., Latkin K.P., Belokrylov M.E., Krivosheev A.I., Tsibinogina M.K. Mnogostadiinyi kontrol' kachestva aktivnykh volokonnykh svetovodov [Multistage quality control of active fiber light guides]. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 2021, no. 5, pp. 138-146. DOI: 10.31857/S0032816221050037

Сведения об авторах

Латкин Павлович Константин (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры «Общая физика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: latkin.k.p@ya.ru).

Первадчук Владимир Павлович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Прикладная математика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: pervadchuk@mail.ru).

Константинов Юрий Александрович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, заведующий лабораторией фотоники Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (614990, Пермь, ул. Ленина, 13а, e-mail: yuri.al.konstantinov@ro.ru).

About the authors

Konstantin I. Latkin (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer Department of General Physics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: latkin.k.p@ya.ru).

Vladimir P. Pervadchuk (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor Department of Applied Mathematics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: pervadchuk@mail.ru).

Yuri A. Konstantinov (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences Head of Photonics Laboratory at Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (614990, Perm, 13a, Lenina str., e-mail: yuri.al.konstantinov@ro.ru).

Поступила: 12.05.2022 Одобрена: 31.05.2022 Принята к публикации: 12.09.2022

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания № АААА-А19-119042590085-2.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье.

Вклад авторов. Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Латкин, К.П. Система управления процессом контроля концентрации активной примеси в преформах волоконных световодов / К.П. Латкин, В.П. Первадчук, Ю.А. Константинов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2022. – № 42. – С. 111–131. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.2.06

Please cite this article in English as:

Latkin K.P., Pervadchuk V.P., Konstantinov Yu.A. The system controlling active dopant concentration in fiber performs. *Perm national research polytechnic university bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2022, no. 42, pp. 111-131. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.2.06