Паньков А.А. Встраиваемый оптоволоконный механофотолюминесцентный датчик сложного деформированного состояния для мониторинга вибраций полимерных композитных конструкций // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – № 4. С. 87–100. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.4.09

Pan'kov A.A. Built-In Fiber-Optic Mechanophotoluminescent Sensor of Complex Deformed State for Monitoring Vibrations of Polymer Composite Structures. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2023, no. 4, pp. 87-100. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.4.09

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 4, 2023
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2023.4.09
УДК 531.787.5

ВСТРАИВАЕМЫЙ ОПТОВОЛОКОННЫЙ МЕХАНОФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ ДАТЧИК СЛОЖНОГО ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ВИБРАЦИЙ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

А.А. Паньков

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 09 марта 2023 г.
Одобрена: 17 августа 2023 г.
Принята к публикации:
31 августа 2023 г.

Ключевые слова:

оптоволоконный датчик, механолюминесценция, фотолюминесценция, капсулированные наночастицы, информативный световой поток, численное моделирование.

АННОТАЦИЯ

Разработана математическая модель функционирования встраиваемого оптоволоконного механо(упруго)фотолюминесцентного (MFL) датчика сложного напряженно-деформированного состояния для мониторинга вибраций полимерных композитных конструкций. Датчик включает в себя один или несколько световодов, легированных множеством однородно распределенных по объему световода сферическими MFL-наночастицами типа «ядро/оболочка» – упругомеханолюминесцентное (EML) ядро с фотолюминесцентной (FL) оболочкой, здесь EML-эффект – светоотдача материала при его упругой (неразрушающей) деформации. FL-оболочка каждой капсулированной частицы трансформирует информативное «внутреннее» ML-излучение ядра во «внешний» информативный FL-световой поток внутри световода. Результирующее значение FL-светового потока от FL-светоотдач всех частиц регистрируется на выходе из каждого световода. Дополнительная функция оболочки – локализация (в границах каждой частицы) информационного свечения EML-ядра, что, как следствие, улучшает пространственную разрешимость датчика для диагностирования существенно неоднородных (по длине датчика) деформационных полей. MFL-датчик предназначен для диагностирования компонент тензора амплитуд гармонических макродеформаций рассматриваемой локальной композитной области – окрестности встроенного датчика по результатам измерений информативных фотолюминесцентных FL-световых потоков на выходах из световодов датчика. Регулирование и настройка выходящих (в рабочем торце «вход/выход» датчика) и регистрируемых информативных FL-световых потоков осуществлена посредством использования варьируемого входящего управляющего светового потока, в частности, одинакового для всех световодов датчика. Установлено, что с использованием одиночного световода «кварц/MFL-частицы» (датчик давления) искомый «спектр» амплитуд давления – функции плотности распределения значений амплитуд по продольной оси датчика является решением интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода по результатам измерений (на выходе из световода) информативного результирующего FL-светового потока как функции управляющего входящего (ML) светового потока. Результаты численного моделирования получены для зависимости величины светового FL-потока от управляющего ML-потока для случаев однородного и неоднородного (но с «равномерным» спектром) распределений диагностируемой величины амплитуды давления по длине датчика.

© ПНИПУ

© **Паньков Андрей Анатольевич** – д.ф.-м.н., проф., e-mail: a_a_pankov@mail.ru, iD: 0000-0001-8477-5206.

Andrey A. Pan'kov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, e-mail: a_a_pankov@mail.ru, iD: 0000-0001-8477-5206.

Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

BUILT-IN FIBER-OPTIC MECHANOPHOTOLUMINESCENT SENSOR OF COMPLEX DEFORMED STATE FOR MONITORING VIBRATIONS OF POLYMER COMPOSITE STRUCTURES

A.A. Pan'kov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 09 March 2023
Approved: 17 August 2023
Accepted for publication:
31 August 2023

Keywords:

fiber optic sensor, mechanoluminescence, photoluminescence, capsulated nanoparticles, informative light flux, numerical modeling.

ABSTRACT

A mathematical model of an embedded fiber-optic mechanical (elastic) photoluminescent (MFL) sensor of a complex stressed-deformed state for monitoring vibrations of polymer composite structures has been developed. The sensor includes one or more light guides doped with many spherical MFL nanoparticles (uniformly distributed over the volume of the light guide) of the "core/shell" type. The latter is an elastomechanoluminescent (EML) core with a photoluminescent (FL) shell. Here the EML effect is the light output of the material with its elastic (non-destructive) deformations. The FL-shell of each capsulated particle transforms the informative "internal" ML-radiation of the core into an "external" informative FL-light flux within the light guide. The resulting value of the FL-light flux from all particles is recorded at the output of each light guide. An additional function of the shell is the localization (within the boundaries of each particle) of the information glow of the EML-core, which, as a result, improves the spatial resolution of the sensor to diagnose significantly heterogeneous (along the length of the sensor) deformation fields. The MFL-sensor is designed to diagnose the components of the harmonic macrodeformation amplitude tensor of the local composite region under consideration, i.e. the vicinity of the built-in sensor based on the measurement results of informative photoluminescent FL-light fluxes at the outputs from the light guides of the sensor. Control and adjustment of the output (in the working end "input/output" of the sensor) and recorded informative FL-light fluxes is carried out by using a variable input control light flux, in particular, the same for all light guides of the sensor. It was found that in case of using the single "quartz/MFL particle" light guide (pressure sensor), the desired "spectrum" of pressure amplitudes (the density function of the distribution of amplitude values along the longitudinal axis of the sensor) is a solution of the Fredholm integral equation of the 1st kind based on the results of measurements (at the output from the light guide) of the informative resulting FL-light flux as a function of the control incoming (ML) light flux flow. The results of the numerical modeling are obtained for the dependence of the light FL flux value on the control ML flux for cases of uniform and non-uniform (but with a "uniform" spectrum) distributions of the diagnosed pressure amplitude value along the sensor length.

© PNRPU

Введение

Многие современные датчики физико-механических величин основаны на эффекте люминесценции чувствительных элементов – люминофоров, при этом в зависимости от характера возбуждения материала люминесценция имеет различные типы: механолюминесценция (ML) – светоотдача под действием механической нагрузки, давления, трения; фотолюминесценция (FL) – под действием света; электролюминесценция – при прохождении электрического тока, хемилюминесценция – под действием энергии химических реакций и другие [1–8]. В датчиках на основе ML-эффекта – светоотдачи при механическом воздействии, люминесценция проявляется в силу различных физических явлений, в частности, в результате пластических деформаций чувствительного элемента [9–12] или в результате электроупругого взаимодействия пьезоэлектрических и электролюминесцентных элементов структуры композитных материалов [13; 14]. Для визуализации и мониторинга динамической вибрационной нагрузки в датчике [14] ML-эффект проявляется как результат взаимодействия пьезоэлектрического и электролюминесцентного эффектов для различных элементов структуры и, как результат, информативная интенсивность свечения люминофора датчика зависит от величины и частоты вибрации. По сравнению с датчиками, основанными на электрических принципах, такими как пьезоэлектрические [15–23], пьезорезистивные, емкостные и трибоэлектрические [24], в частности, тактильные оптические датчики на основе ML-материалов являются автономными и невосприимчивыми к электромагнитным помехам, паразитным емкостям, тепловым шуму и сложности соединения проводов, связанным с электрическими устройствами, а также обеспечивают возможность визуального дистанционного измерения давления в реальном времени [25]. В настоящее время интенсивно разрабатываются технологии создания люминесцентных волоконно-оптических световодов [26–30] и на их основе датчиков [31–34] температурных и силовых полей. Люминесцентные волоконно-оптические световоды используют в лазерной технике [35; 36], при этом современные технологии синтеза допускают возможность регулирования размера наночастиц и равномерного распределения их по объему световода. В работах [37–39] исследованы инфракрасные спектры люминесценции и оптических потерь таких световодов. Исследование люминесценции световодов с

сердцевиной из фосфорогерманосиликатного стекла, легированного висмутом, дано в [40]. В работе [41] рассмотрены наноструктурированные оболочки из наночастиц золота и флуоресцентного красителя на сферических частицах из диоксида кремния и полистирола различного диаметра, синтезированные методом послойной адсорбции. Люминесцентный оптоволоконный датчик [42] для измерения температуры (с быстрым откликом и высокой чувствительностью) основан на преобразовании ультрафиолетового излучения в фотолюминесцентный сигнал видимого диапазона посредством легирующих термочувствительных нанокристаллов с учетом известной зависимости интенсивности их фотолюминесценции от температуры. Люминесцентные световоды исследовались также в [43; 44].

Открытие упругомеханолюминесцентных (EML) материалов: $ZnS:Mn^2$ (желтый) [45] и $SrAl_2O_4:Eu^2$ (зеленый) [46] вызвало значительный рост числа исследований по упругой (неразрушающей) деформации ML-материалов и их применению [47]. Упругомеханолюминесцентные материалы в сравнении с известными ML имеют многочисленные преимущества, такие как восстанавливаемость (стабильность) рабочих характеристик, интенсивная яркость и линейная зависимость между интенсивностью света и давлением, что обусловливает широкое использование EML-материалов в качестве чувствительных элементов в оптических системах мониторинга в реальном времени напряженного состояния и обнаружения повреждений в конструкциях, мониторинга состояния здоровья человека [48–53]. Наиболее перспективные EML-материалы основаны на пьезоэлектрических материалах, таких как ZnS, CaZnOS, $(Ba, Ca)TiO_3$ [45; 54–56]. Значительное повышение интенсивности красной EML наблюдалось в пьезоэлектрических полупроводниковых люминофорах посредством дополнительного легирования их ионами Nd^3. В [57] исследованы пьезолюминесцентные наночастицы – квантовые точки ZnS:Mn со средним размером зерен от 4,2 до 7,2 нм в виде пьезоэлектрика (ZnS), легированного электролюминесцентными атомами (Mn). Сенсорные устройства с использованием частиц ZnS:Mn разрабатывались таким образом, что включали в себя устройство и экспериментальные исследования характеристик индикаторного полимерного покрытия (датчика давления) с использованием внутреннего слоя из частиц ZnS:Mn как для одноточечной динамической регистрации давления, так и для двумерного планарного отображения (визуализации) давления в диапазоне 0,6–50 МПа без внешнего источника питания (в частности в [58]). Здесь пьезолюминесцентный эффект реализуется в результате пьезопотенциального индуцированного излучения света от легирующего элемента (Mn), так как при механической нагрузке возникающее в ZnS электрическое поле возбуждает легирующие ионы (Mn^{2+}) и при возвращении возбужденного иона (Mn^{2+}) в исходное состояние излучается фотон в виде видимого света желтого цвета. Экспериментально выявлено быстрое время отклика (менее 10 мс), высокое пространственное разрешение (100 мкм), стабильность люминесцентных характеристик после тысяч циклов испытаний, что делает перспективным применение таких устройств при тактильной визуализации давления в реальном времени, использование в интеллектуальных сенсорных сетях, системах безопасности и человеко-машинных интерфейсах.

Возможность изготовления и применения капсулированных по типу «ядро/оболочка» фотолюминесцентных сферических частиц исследована в [59; 60], в частности, когда ядро – фотолюминесцентный сульфидный люминофор с красным спектром свечения, а капсула – термически и химически инертная оксисульфидная оболочка [59], которая защищает ядро от негативного влияния УФ (преобразуя его в оранжевый и красный спектры светоотдачи) и обеспечивает стабильность характеристик ядра. Такие фотолюминесцентные капсулированные частицы с двойным красным излучением авторы [59] рекомендуют использовать в качестве спектрального преобразования для культивирования растений. В [60] исследованы механолюминесцентные капсулированные наночастицы, в которых оболочка обеспечивает значительное увеличение механолюминесценции и дает возможность создания механолюминесцентных капсулированных частиц с настраиваемыми свойствами люминесценции, такими как цвет, интенсивность и мультистимуляционный отклик, посредством корректировки компонентов, толщин, количества и возможных перестановок слоев многослойной оболочки (капсулы). Отмечена актуальность изучения механизмов механолюминесценции, морфологии, анизотропии, в частности, предпочтительной пьезоэлектрической ориентации наноматериалов и динамических особенностей их свойств. Технология синтеза капсулированных люминесцентных наночастиц описана в [60; 61], в большинстве случаев ML-частицы смешиваются с полимерной матрицей (PDMS, Ecoflex, смола и т.д.) с образованием полимерного композиционного ML-материала.

Разработана математическая модель функционирования встраиваемого оптоволоконного механо(упруго)фотолюминесцентного (EML) датчика [62] сложного напряженно-деформированного состояния для мониторинга вибраций полимерных композитных конструкций. Исследование основано на схеме функционирования известного оптоволоконного пьезоэлектролюминесцентного (PEL) датчика [20; 21] такого же назначения, в котором механолюминесцентный эффект возникает в результате взаимодействия пьезоэлектрических и электролюминесцентных элементов, при этом в новой конструкции EML-датчика использован управляющий световой поток (вместо управляющего электрического напряжения на протяженных электродах PEL-датчика), что дает существенные преимущества, в частности, невосприимчивость к электромагнитным помехам.

1. Устройство и принцип функционирования MFL-датчика сложного напряженного состояния

Рассматриваем представительную микронеоднородную область полимерного композита со встроенным оптоволоконным MFL-датчиком (рис. 1, *a*) сложного напряженного состояния. Датчик (см. рис. 1, *a*) включает в себя некоторое число, в частности, $n = 6$, сонаправленных однотипных (легированных монодисперсными сферическими MFL-наночастицами типа «ядро/оболочка») световодов «кварц/MFL-частицы» (рис. 1, *b*, *c*), где EML-ядро (1-я фаза), FL-оболочка (2-я фаза), кварц (3-я фаза), и предназначен для диагностирования компонент $\hat{\varepsilon}^*_{mn}$ тензора амплитуд $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^*$ гармонических макродеформаций $\boldsymbol{\varepsilon}^*$ вибраций рассматриваемой локальной композитной области – окрестности встроенного датчика. Упругое (армирующее) волокно в центре датчика (см. рис. 1, *a*) предназначено для обеспечения механической прочности датчика, при этом выбором характеристик (например, вида анизотропии и значений модулей упругих свойств) волокна можно управлять характером распределения по измерительным элементам – различным MFL-световодам датчика действующей со стороны композитной окрестности механической нагрузки, т.е. ее напряженно-деформированного состояния $\boldsymbol{\sigma}^*$, $\boldsymbol{\varepsilon}^*$ с учетом $\sigma^*_{ij} = C^*_{ijmn}\varepsilon^*_{mn}$, где $\mathbf{C}^*$ – тензор эффективных упругих свойств композита [63–66].

Отметим, что упругое волокно датчика (см. рис. 1, *a*) может быть заменено на дополнительный 7-й MFL-световод для повышения точности диагностирования. Выбором характеристик упругого буферного слоя датчика также можно управлять деформированным состоянием световодов, но основное назначение буферного слоя – трансляция на световоды и, как следствие, измерительные MFL-частицы датчика лишь диагностируемой макроскопической составляющей напряженно-деформированного состояния ($\boldsymbol{\varepsilon}^*$) композитной окрестности встроенного в полимерную композитную конструкцию оптоволоконного MFL-датчика. То есть буферный слой – механический «фильтр» от «паразитного» влияния на измерительные элементы (MFL-частицы) датчика быстро осциллирующих пульсаций напряженно-деформированного состояния микронеоднородной композитной окрестности, в частности, пульсаций микронапряжений на внешней (контактирующей с композитной окрестностью) цилиндрической поверхности корпуса датчика.

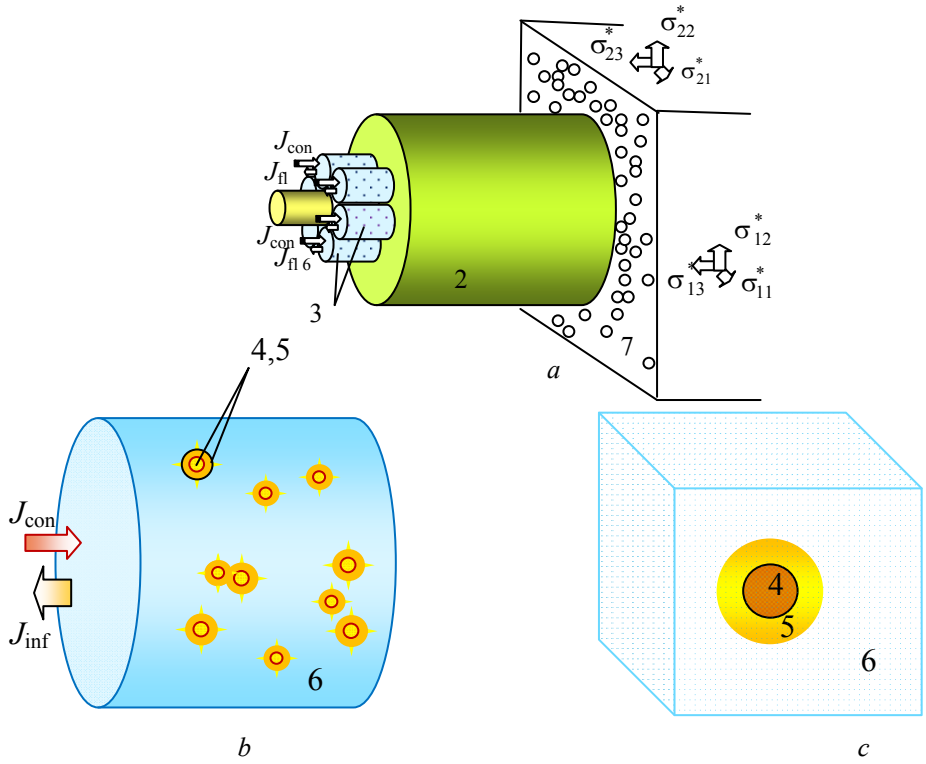


Рис. 1. Встраиваемый оптоволоконный MFL-датчик сложного напряженного состояния (*a*) и фрагменты световода «кварц/MFL-частицы» (*b*, *c*), где *1* – упругое волокно (элемент корпуса); *2* – буферный слой (корпус); *3* – световод; *4* – EML-частица (ядро); *5* – FL-оболочка; *6* – светопрозрачная среда (кварц); *7* – композитная окрестность; J_{con}, J_{inf} – входящий управляющий (J_{con}) и FL-информативный выходящий (J_{inf}) световые потоки

Fig. 1. Built-in optical fiber MFL-sensor of complex stress state (*a*) and fragments of light guide "quartz/MFL-particles" (*b*, *c*), where: *1* – elastic fiber; *2* – buffer layer; *3* – light guide; *4* – EML-particles (core); *5* – FL-shell; *6* – translucent medium (quartz); *7* – composite neighborhood; incoming control (J_{con}) and FL-informative output (J_{inf}) light flux

Считаем, что на фотолюминесцентную (FL) оболочку (2-я фаза) каждой MFL-частицы k-го ($k=\overline{1,n}$) световода воздействует результирующий световой ML-поток «спектра механолюминесценции»

$$\tilde{J}_{(k)\mathrm{ml}} = k_{\circ} J_{\mathrm{con}} + \tilde{J}_{(k,1)\mathrm{ml}}(\omega, \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^{*}). \quad (1)$$

в виде суммы «внутреннего» (т.е. со стороны EML-ядра (1-й фазы)) результирующего информативного

$$\tilde{J}_{(k,1)\mathrm{ml}} = L_{ij}(\omega)\hat{\varepsilon}_{(k,1)ij}(\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^{*}) \quad (2)$$

и «внешнего» управляющего $k_{\circ}J_{\mathrm{con}}$ (т.е. с внешней стороны оболочки MFL-частицы) световых ML-потоков (рис. 1), где $L_{ij}(\omega)$ – компоненты тензора механолюминесценции $\mathbf{L}(\omega)$ как функции круговой частоты ω, $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{k,1}$ – амплитуда деформаций EML-ядра, $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^{*}$ – искомая амплитуда макродеформаций вибраций композитной конструкции. Величина $k_{\circ}J_{\mathrm{con}}$ – малая часть управляющего ML-светового потока (видеоимпульса), которая поглощается FL-оболочкой, где $k_{\circ}$ – известный «коэффициент поглощения» одиночной частицы, значение которого зависит, в частности, от оптических свойств и отношения диаметров оболочки частицы и световода. Считаем, что ядро и оболочка MFL-частицы характеризуются изотропными упругими свойствами, при этом относительное объемное содержание MFL-частиц в световоде $v_{\circ}$ – малая величина (т.е. $v_{\circ} \prec 0,3$), частицы расположены на относительно больших расстояниях между собой и, как результат, взаимодействием частиц (т.е. взаимодействием их деформационных возмущений) можно пренебречь [65], и имеем одинаковые значения амплитуд $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{k,1}$ деформаций EML-ядер всех частиц на каждом локальном участке световода Δl с одинаковым значением диагностируемой величины $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^{*}$. На практике величину Δl приравниваем, в частности, к ширине «видеоимпульса» величиной J_{con} (варьируемое значение), управляющего импульсного ML-светового потока на входе каждого световода датчика (см. рис. 1, *a*).

Светоотдача FL-оболочек MFL-частиц в каждом *k*-м световоде происходит под воздействием соответствующего светового потока «ML-спектра» (1) с результирующей величиной $\tilde{J}_{(k)\mathrm{ml}} > \tilde{J}_{\min}$, где $\tilde{J}_{\min}$ – известное пороговое значение. Фотолюминесценция FL-оболочек может происходить лишь при наличии ($J_{\mathrm{con}} \neq 0$) управляющего светового сигнала и лишь в тех FL-оболочках, через которые в данный момент проходит управляющий «видеоимпульс» интенсивностью J_{con}, так как $J_{(k,1)\mathrm{ml}}(\omega, \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^{*}) < \tilde{J}_{\min}$. В результате на участке Δl *k*-го световода происходит генерация (светоотдача) FL-оболочками результирующего фотолюминесцентного светового потока величиной

$$\Delta J_{(k,2)\mathrm{fl}} = \Phi_{\mathrm{fl/ml}}(\tilde{J}_{(k)\mathrm{ml}}) c_{\circ} \Delta l \quad (3)$$

с учетом, что световой поток светоотдачи одиночной FL-оболочки

$$J_{\mathrm{fl}} = \Phi_{\mathrm{fl/ml}}(\tilde{J}_{\mathrm{ml}}), \quad (4)$$

где $\Phi_{\mathrm{fl/ml}}(\tilde{J}_{\mathrm{ml}})$ – зависимость величины J_{fl} светоотдачи одиночной FL-оболочки от значений $\tilde{J}_{\mathrm{ml}}$ результирующего ML-светового потока (1), $c_{\circ}$ – число MFL-частиц на единицу длины световода. Например, для «S-образного» вида функции $\Phi_{\mathrm{fl/ml}}(\tilde{J}_{\mathrm{ml}})$ свечение отсутствует ($\Phi_{\mathrm{fl/ml}} = 0$) при $\tilde{J}_{\mathrm{ml}} \prec \tilde{J}_{\min}$, начало фотолюминесценции при $\tilde{J}_{\mathrm{ml}} = \tilde{J}_{\min}$, а насыщенное свечение ($\Phi_{\mathrm{fl/ml}} = \Phi_{\max}$) при $\tilde{J}_{\mathrm{ml}} \geq \tilde{J}_{\max}$.

Нахождение диагностируемой величины $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^{*}$ осуществляем по результатам совокупности измерений на выходах из всех n световодов величин $\Delta J_{(k,2)\mathrm{fl}}$ фотолюминесцентных световых потоков встроенного в деформируемую полимерную композитную конструкцию оптоволоконного MFL-датчика (см. рис. 1, *a*) сложного напряженного состояния.

2. Математическая модель деформирования световода «кварц/MFL-частицы»

Рассмотрим основные соотношения математической модели функционирования произвольного *k*-го световода «кварц/MFL-частицы» (см. рис. 1, *b*, $k=\overline{1,n}$) в составе оптоволоконного MFL-датчика (см. рис. 1, *a*). Считаем, что каждому «элементарному» участку Δl оптоволоконного MFL-датчика с постоянным значением диагностируемой величины $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^{*}$ его композитной окрестности соответствует макроскопический участок *k*-го MFL-световода – это представительная микронеоднородная область $\Delta\mathbf{V}_k$ (длиной Δl) «кварц/MFL-частицы» с компонентами

$$\hat{\varepsilon}^{*}_{(k)ij} = \chi_{(k)ijmn}\hat{\varepsilon}^{*}_{mn} \quad (5)$$

тензора амплитуды $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^{*}_{k}$ макродеформаций $\boldsymbol{\varepsilon}^{*}_{k}$. Значения тензоров $\boldsymbol{\chi}_k$ считаются известными и определяются с учетом особенностей взаимного расположения световодов «кварц/MFL-частицы», анизотропии и упругих свойств армирующего волокна и корпуса оптоволоконного MFL-датчика (см. рис. 1, *a*) в результате численного моделирования или экспериментально. Для всех $k=\overline{1,n}$ представительная область $\Delta\mathbf{V}_k$ – это светопрозрачная изотропная среда (кварц) – матрица, в которой статистически однородно распределены монодисперс-

ные сферические капсулированные MFL-частицы (см. рис. 1, *b*, *c*), r_3 – продольная ось световода. Таким образом, величину светоотдачи EML-ядра в (1) для каждой капсулированной частицы описываем линейной зависимостью

$$\tilde{J}_{(k,1)\text{ml}} = L_{ij}\chi_{(k)ijmn}\hat{\varepsilon}^*_{mn} \tag{6}$$

от диагностируемых величин $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^*$ с учетом (2), (3).

В результате искомые компоненты $\hat{\varepsilon}^*_{mn}$ тензора амплитуд $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^*$ макродеформаций (композитной окрестности встроенного оптоволоконного MFL-датчика) находим по результатам измерений информативных величин $\Delta J_{\text{fl}(k)}$ (3) FL-световых потоков на выходах из всех *n* световодов датчика через последовательное вычисление величин $\tilde{J}_{(k,1)\text{ml}}$ (с использованием известной функции свечения $\Phi_{\text{fl/ml}}(\tilde{J}_{\text{ml}})$ (3), (4)) и решения системы шести линейных алгебраических уравнений

$$a_{(k)mn}\hat{\varepsilon}^*_{mn} = b_{(k)}, \tag{7}$$

где $k = \overline{1,n}$, $n = 6$, коэффициенты

$$a_{(k)mn} \equiv L_{ij}\chi_{(k)ijmn},\ b_{(k)} \equiv \tilde{J}_{(k,1)\text{ml}} \tag{8}$$

с учетом равенства (6), $a_{(k)mn}$ являются характеристиками датчика и не зависят от его нагружения, т.е. от диагностируемой величины $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^*$.

Частный случай (датчик давления). Датчик в виде одиночного (n = 1) световода «кварц/MFL-частицы» (см. рис. 1, *b*) может быть использован для диагностирования функции $\hat{p}(r_3)$ амплитуд давления и/или «спектра» $f_p(\tau)$ амплитуд давления – функции плотности распределения значений $\hat{p} \in (\tau_{\min}, \tau_{\max})$ по продольной оси r_3 датчика. Гармоническое давление p с неоднородной по оси r_3 амплитудой $\hat{p}(r_3)$ действует на внешнюю цилиндрическую поверхность световода (см. рис. 1, *b*).

Считаем, что на макроуровне элементарного участка Δl световода реализуется плоское деформированное состояние; тензоры «макронапряжений» $\boldsymbol{\sigma}^*$ и «макродеформаций» $\boldsymbol{\varepsilon}^*$ имеют вид

$$\boldsymbol{\sigma}^* = -p\boldsymbol{\delta}',\ \boldsymbol{\varepsilon}^* = \frac{1}{2}\theta^*\boldsymbol{\delta}' \tag{9}$$

в плоскости r_1r_2 поперечного сечения световода, где θ^* – относительное изменение объема при плоском (r_1r_2) деформировании, $\boldsymbol{\delta}'$ – символ Кронекера (двумерный). В результате имеем выражение тензора деформации

$$\boldsymbol{\varepsilon}^* = -\frac{p}{2k^*_{12}}\boldsymbol{\delta}' \tag{10}$$

через диагностируемую величину p с учетом равенства $\theta^* = -p/k^*_{12}$, где k^*_{12} – эффективный объемный модуль плоской деформации световода «кварц/MFL-частицы». На микроуровне, т.е. для элементов структуры: кварца и сферических MFL-частиц представительного фрагмента световода $\Delta\mathbf{V}$ реализуется сложное трехмерное напряженно-деформированное состояние, в отличие от плоского деформированного состояния световода на макроуровне. В рассматриваемом случае формула (1) преобразуется к виду

$$\tilde{J}_{\text{ml}} = k_\circ J_{\text{con}} + k_L\hat{p} \tag{11}$$

с учетом (2) возможного представления величины

$$L_{ij}\hat{\varepsilon}_{(k,1)ij} = k_L\hat{p}, \tag{12}$$

при этом коэффициент k_L является характеристикой датчика (т.е. не зависит от значения $\hat{p}$), в общем является функцией $k_L(\omega)$, что обусловлено зависимостью $L_{ij}(\omega)$, и может быть найдена $k_L \equiv L_{ij}\hat{\varepsilon}_{(k,1)ij}/\hat{p}$ известными методами механики композитов [63–66] для случая $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^* = -\dfrac{\hat{p}}{2k^*_{12}}\boldsymbol{\delta}'$ (10).

В результате искомую величину амплитуды давления $\hat{p}$ на локальном участке Δl световода (датчика) находим по результатам измерения информативной величины ΔJ_{fl} (3) FL-светового потока на выходе из световода (датчика) через последовательное вычисление величины $\tilde{J}_{\text{ml}}$ и далее искомой величины давления (11)

$$\hat{p} = (\tilde{J}_{\text{ml}} - k_\circ J_{\text{con}})/k_L \tag{13}$$

при использовании управляющего «видеоимпульса» величиной J_{con}, движущегося вдоль световода от его входа (общего «входа/выхода» световода).

Спектр $f_p(\tau)$ распределения значений давления $p \in (\tau_{\min}, \tau_{\max})$ по длине датчика может быть найден при использовании постоянного (однородного по длине датчика) управляющего светового потока с варьируемой величиной J_{con}. На выходе из световода осуществляем регистрацию интегральных значений

$$J_{\text{fl}} = \int_{\text{l}} \Delta J_{\text{fl}}$$

информативной величины $J_{\text{fl}} = J_{\text{fl}}(J_{\text{con}})$ FL-светового потока

$$J_{\text{fl}}(J_{\text{con}}) = \int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} G_{\text{fl/ml}}(k_\circ J_{\text{con}} + k_L\tau) f_p(\tau) d\tau \tag{14}$$

с учетом равенства «геометрической вероятности» $\Delta l/l = f_p(\tau)d\tau$, где Δl – длина участка световода со

значениями $\hat{p} \in (\tau, \tau + d\tau)$, l – полная длина световода (датчика), ядро

$$G_{\text{fl/ml}}(\tilde{J}_{\text{ml}}) \equiv lc_{\circ}\Phi_{\text{fl/ml}}(\tilde{J}_{\text{ml}}) \qquad (15)$$

– величина результирующего фотолюминесцентного FL-светового потока на выходе из световода при его однородном (по всей длине $l = \sum \Delta l_i$) нагружении, т.е. при одинаковом значении $\tilde{J}_{\text{ml}} = \text{const}$ инициирующего ML-светового потока (11) для всех $n_{\circ} \equiv lc_{\circ}$ составных MFL-частиц световода. Ядро $G_{\text{fl/ml}}(J_{\text{con}}, \tau) \equiv G'_{\text{fl/ml}}(s)$ интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода (14) имеет «разностный» аргумент $s = J_{\text{con}} - \tau'$, где новый параметр интегрирования $\tau' \equiv -\tau k_L / k_{\circ}$, функция $G'_{\text{fl/ml}}(s) \equiv G_{\text{fl/ml}}(k_{\circ}s)$. При однородном распределении по длине световода диагностируемой величины $\hat{p}_0 = \text{const}(r_3)$, тогда искомый спектр $f_p(\tau) = \delta(\tau - \hat{p}_0)$ и, как следствие, интегральное уравнение (14) преобразуется к виду

$$G_{\text{fl/ml}}(k_{\circ}J_{\text{con}} + k_L\hat{p}_0) = J_{\text{fl}}(J_{\text{con}}), \qquad (16)$$

из которого может быть найдена искомая величина $\hat{p}_0$ по измеренным значениям однозначной функции $J_{\text{fl}}(J_{\text{con}})$. Отметим, что, задавая известные значения $\hat{p}_0$, может быть определен вид самой функции $G_{\text{fl/ml}}(\tilde{J}_{\text{ml}})$ – ядра интегрального уравнения (14). Функции $G_{\text{fl/ml}}(\tilde{J}_{\text{ml}})$, $J_{\text{fl}}(J_{\text{con}})$ имеют область значений $(0; G_{\max})$, где $G_{\max} \equiv lc_{\circ}\Phi_{\max}$ – максимальное значение интегрального FL-светового потока $J_{\text{fl}}(J_{\text{con}})$ (на выходе из световода при насыщенном FL-свечении всех $n_{\circ} = lc_{\circ}$ MFL-частиц) и/или ядра $G_{\text{fl/ml}}(\tilde{J}_{\text{ml}})$ (15), (16) для «S-образного» вида «функции свечения» $\Phi_{\text{fl/ml}}(\tilde{J}_{\text{ml}})$, для которого $\Phi_{\max}$ – FL-поток насыщенного свечения одиночной MFL-частицы при $\tilde{J}_{\text{ml}} \geq \tilde{J}_{\max}$.

Интегральное уравнение (14) может быть записано в «нормированном» виде

$$f_{\text{fl}}(J_{\text{con}}) = \int_{-\infty}^{\infty} g_{\text{fl/ml}}(k_{\circ}J_{\text{con}} + k_L\tau) f_p(\tau) d\tau, \qquad (17)$$

где

$$f_{\text{fl}}(J_{\text{con}}) \equiv J'_{\text{fl}}(J_{\text{con}}) / G_{\max},$$

$$g_{\text{fl/ml}}(\tilde{J}_{\text{ml}}) \equiv \frac{k_{\circ}}{G_{\max}} G'_{\text{fl/ml}}(\tilde{J}_{\text{ml}}) = \frac{k_{\circ}c_{\circ}l}{G_{\max}} \Phi'_{\text{fl/ml}}(\tilde{J}_{\text{ml}}),$$

производные

$$J'_{\text{fl}}(J_{\text{con}}) \equiv dJ_{\text{fl}} / dJ_{\text{con}},$$

$$\Phi'_{\text{fl/ml}}(\tilde{J}_{\text{ml}}) \equiv d\Phi'_{\text{fl/ml}} / d\tilde{J}_{\text{ml}},$$

$$G'_{\text{fl/ml}}(\tilde{J}_{\text{ml}}) \equiv dG_{\text{fl/ml}} / d\tilde{J}_{\text{ml}} = lc_{\circ}d\Phi_{\text{fl/ml}} / d\tilde{J}_{\text{ml}}$$

с учетом (15). Выполняются равенства

$$\int_0^{\infty} f_{\text{fl}}(J_{\text{con}}) dJ_{\text{con}} = \int_0^{\infty} g_{\text{fl/ml}}(\tilde{J}_{\text{ml}}) d\tilde{J}_{\text{ml}} = \int_{-\infty}^{\infty} f_p(\tau) d\tau = 1,$$

и для частного случая $f_p(\tau) = \delta(\tau - \hat{p}_0)$ из интегрального уравнения (17) следует формула

$$g_{\text{fl/ml}}(k_{\circ}J_{\text{con}} + k_L\hat{p}_0) = f_{\text{fl}}(J_{\text{con}})$$

- аналог равенства (16) для экспериментального определения (по измеренному «FL-спектру» $f_{\text{fl}}(J_{\text{con}})$ FL-светового потока на выходе из световода) функции $g_{\text{fl/ml}}(\tilde{J}_{\text{ml}})$ – ядра интегрального уравнения (17) с учетом заданного значения $\hat{p}_0$.

3. Результаты численного моделирования

Для датчика давления (см. рис. 1, *b*) численное моделирование (рис. 2, 3) результирующего информативного FL-светового потока $J_{\text{fl}}(J_{\text{con}})$ на выходе из световода как функции входящего управляющего светового ML-потока J_{con} осуществим при заданной «S-образной» функции свечения $\Phi_{\text{fl/ml}}(\tilde{J}_{\text{ml}})$ и/или $G_{\text{fl/ml}}(\tilde{J}_{\text{ml}})$ (15), параметрах $\tilde{J}_{\min} = 3$лм, $\tilde{J}_{\max} = 6$лм, $G_{\max} = 4{,}5$ лм, $k_{\circ} = 0{,}001$, $k_L = 0{,}002$ лм/кПа для различных случаев равномерного распределения по длине световода (датчика) диагностируемой величины $\hat{p}$ с функцией плотности вероятностей $f_p(\tau)$ на интервале значений $(\tau_{\min}, \tau_{\max})$. На рис. 2, *a*, даны результаты численного моделирования FL-светового потока $J_{\text{fl}}(J_{\text{con}})$ для предельного случая $\tau_{\min}, \tau_{\max} \to \hat{p}_0$, т.е. когда имеем однородное распределение (по длине световода) диагностируемой величины давления $\hat{p}_0$, при этом выполняется равенство (16) и, как следствие, графики функции $J_{\text{fl}}(J_{\text{con}})$ для различных значений $\hat{p}_0$ могут быть получены «растяжением» (с коэффициентом $k_{\circ}$) и «смещением» (на величину $k_L\hat{p}_0$) по оси абсцисс (J_{con}) графика заданной «функции свечения» – ядра $G_{\text{fl/ml}}(\tilde{J}_{\text{ml}})$ (15) интегрального уравнения (14).

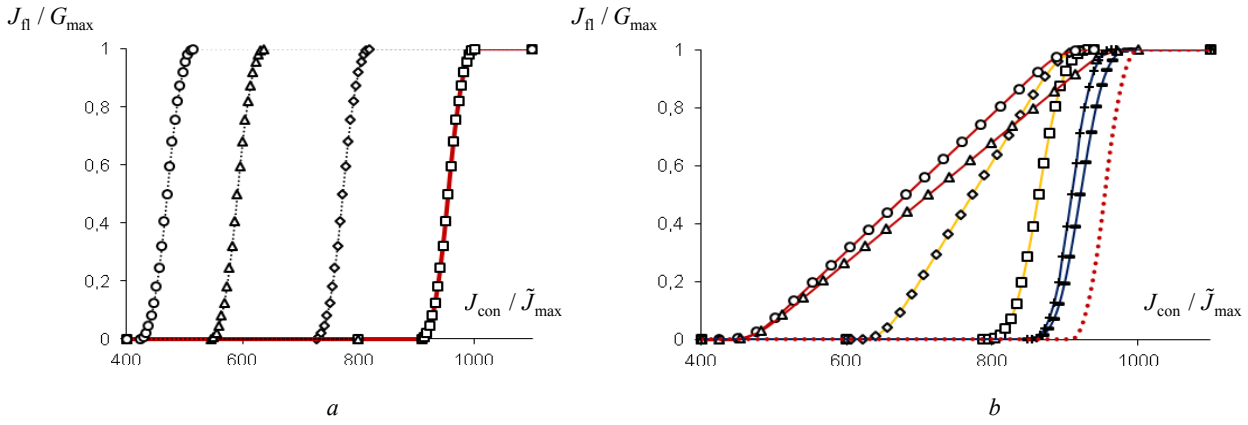


Рис. 2. Зависимости светового FL-потока J_{fl} от управляющего ML-потока J_{con} при значении $\hat{p}_0$ =800 (○), 600 (Δ), 300 (◊), 0 (□) [кПа] (*a*), равномерном законе распределения на интервале $(\tau_{min};\tau_{max})$ для случаев (100;800) (○), (0;800) (Δ), (100;500) (◊), (100;200) (□), (50;100) (+), (0;100) (—), $\hat{p}_0$ =0 (пунктирная линия) [кПа] (*b*)

Fig. 2. Dependence of light FL-flux J_{fl} on control ML-flux J_{con} with value $\hat{p}_0$ = 800 (○), 600 (Δ), 300 (◊), 0 (□) [kPa] (*a*), uniform distribution law over the interval $(\tau_{min};\tau_{max})$ for cases (100; 800) (○), (0;800) (Δ), (100;500) (◊), (100;200) (□), (50;100) (+), (0;100) (—), $\hat{p}_0$ = 0 (dotted line) [kPa] (*b*)

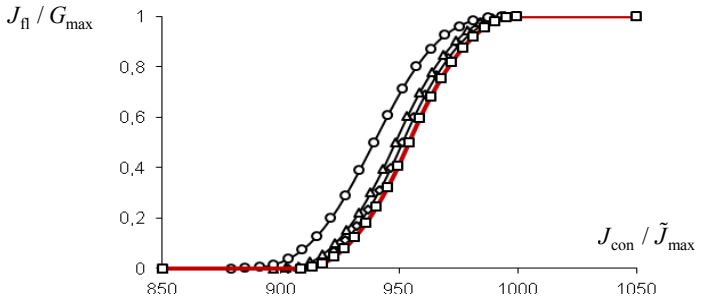


Рис. 3. Зависимости светового FL-потока $J_{fl}(J_{con})$ при равномерном законе распределения на интервале (1;50) (○), (1;20) (Δ), (1;10) (◊), (1;1,001) или $\hat{p}_0$ ≈1 (□) [кПа]

Fig. 3. Dependence of light FL-flux $J_{fl}(J_{con})$ at uniform distribution law over interval (1; 50) (○), (1;20) (Δ), (1;10) (◊), (1; 1.001) or $\hat{p}_0$ ≈1 (□) [kPa]

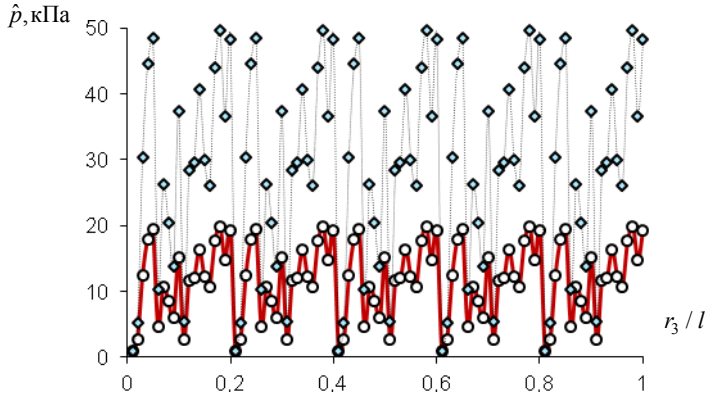


Рис. 4. Примеры равномерного распределения диагностируемой величины $\hat{p}$ на интервале (1;20) (○), (1;50) (◊) [кПа]

Fig. 4. Examples of uniform distribution of the diagnosed value $\hat{p}$ over the interval (1; 20) (○), (1;50) (◊) [kPa]

На рис. 2, *b*, рис. 3 приведены графики найденных функциональных зависимостей $J_{\text{fl}}(J_{\text{con}})$ при равномерном законе распределения диагностируемой величины $\hat{p}_0$ на различных интервалах $(\tau_{\min};\tau_{\max})$ значений (рис. 4).

Заключение

Разработана математическая модель функционирования встраиваемого оптоволоконного механо(упруго)фотолюминесцентного MFL-датчика сложного напряженно-деформированного состояния для мониторинга вибраций полимерных композитных конструкций. Световод включает в себя множество однородно распределенных по объему сферических MFL-наночастиц «ядро/оболочка» в виде капсулированного фотолюминесцентной FL-оболочкой упругомеханолюминесцентного EML-ядра, что позволяет локализовать информационное свечение EML-ядра и, как следствие, улучшить пространственную разрешимость датчика для диагностирования существенно неоднородных (по длине датчика) деформационных полей. MFL-датчик предназначен для диагностирования компонент $\hat{\varepsilon}^{*}_{mn}$ тензора амплитуд $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^{*}$ гармонических макродеформаций $\boldsymbol{\varepsilon}^{*}$ рассматриваемой локальной композитной области – окрестности встроенного датчика по результатам измерений информативных фотолюминесцентных FL-световых потоков $\Delta J_{\text{fl}(k)}$ (3) на выходах из световодов датчика (7), (8). Регулирование и настройка выходящих (в рабочем торце датчика) и регистрируемых информативных FL-световых потоков $\Delta J_{\text{fl}(k)}$ осуществлена посредством использования варьируемого входящего управляющего светового потока, в частности J_{con}, одинакового для всех световодов датчика. Установлено, что с использованием датчика давления в виде одиночного световода «кварц/MFL-частицы» (см. рис. 1, *b*) искомый «спектр» $f_p(\tau)$ амплитуд давления – функции плотности распределения значений амплитуд $\hat{p} \in (\tau_{\min},\tau_{\max})$ по продольной оси r_3 датчика является решением интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода (14), (17) с ядром (15) по результатам измерений (на выходе из световода) информативной функции $J_{\text{fl}} = J_{\text{fl}}(J_{\text{con}})$ результирующего FL-светового потока. Результаты численного моделирования (см. рис. 2, 3) получены для зависимости величины светового FL-потока J_{fl} от управляющего ML-потока J_{con} для случаев однородного (со спектром в виде $f_p(\tau) = \delta(\tau - \hat{p}_0)$) и неоднородного (с «равномерным» на интервале $(\tau_{\min};\tau_{\max})$ спектром) распределений диагностируемой величины амплитуды давления $\hat{p}$ по длине датчика.

Библиографический список

1. Luminescence: From Theory to Applications / Cornelis R. Ronda (Editor). – Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008. – 276 p.

2. Luminescence Trilogy: Complete Collection / J.L. Weil (Goodreads Author). – Kindle Edition, Published by Dark Magick Publishing, LLC., 2018. – 707 p.

3. Макарова Н.Ю., Татмышевский К.В. Механолюминесцентные датчики внутренних напряжений композитных конструкций для современной аэрокосмической техники // Авиакосмическое приборостроение. – 2007. – № 4. – С. 26–32.

4. Макарова Н.Ю. Тактильные сенсоры роботов на основе механолюминесцентных датчиков. – М.: Изд-во LAPLambertAcademicPublishing, 2011. – 200 с.

5. Сычев М.М. Научные основы управления свойствами композиционных пленок для электролюминесцентных устройств: автореф. дис. … д-ра техн. наук. – СПб., 2013. – 41 с.

6. Князев А.А., Шамсутдинова Р.Д., Галяметдинов Ю.Г. Люминесцентные свойства композитов на основе полимера PFO, допированного мезогенным комплексом самария // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – № 17. – С. 137–139.

7. Неорганический композит «стекло-люминофор» на основе высокопреломляющей свинцово-силикатной матрицы для белых светодиодов / В.А. Асеев, Ю.В. Тузова, А.Ю. Бибик, Е.В. Колобкова, Я.А. Некрасова, Н.В. Никоноров, М.А. Швалева, А.Е. Романов, В.Е. Бугров // Физика и механика материалов. – 2014. – Т. 21, № 3. – С. 242–247.

8. Люминесцентные наноматериалы, допированные редкоземельными ионами, и перспективы их биомедицинского применения (обзор) / И.Н. Бажукова, В.А. Пустоваров, А.В. Мышкина, М.В. Улитко // Оптика и спектроскопия. – 2020. – Т. 128, № 12. – С. 1938–1957.

9. Макарова Н.Ю. Моделирование выходного сигнала механолюминесцентного датчика динамического давления // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. – 2015. – № 6. – С. 187–200.

10. Татмышевский К.В. Механолюминесцентный чувствительный элемент: математическая модель и основные характеристики // Датчики и системы. – 2005. – № 1. – С. 10–15.

11. Татмышевский К.В. Научные основы расчета и проектирования механолюминесцентных чувствительных элементов датчиков импульсного давления: автореф. дис. … д-ра техн. наук. – М., 2010. – 33 с.

12. Томышев К.А., Баган В.А., Астапенко В.А. Распределённые волоконно-оптические датчики давления для применения в нефтегазовой промышленности // Труды МФТИ. – 2012. – № 2. – С. 64–72.

13. Крауя У.Э., Янсонс Я.Л. Механолюминесценция композитных материалов: методы, аппаратура и результаты исследований / Латв. АН, Ин-т механики полимеров, НИИ физики твердого тела Латв. ун-та. – Рига: Зинатне, 1990. – 152 с.

14. Novel mechano-luminescent sensors based on piezoelectric/electroluminescent composites / Y. Jia, X. Tian, Z. Wu, X. Tian, J. Zhou, Y. Fang, C. Zhu // Sensors. – 2011. – No. 4. – P. 3962–3969.

15. Фрайден Дж. Современные датчики: справочник. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.

16. Новомейский Д.Н., Телегин А.М., Сёмкин Н.Д. Использование пьезодатчиков для определения места удара высокоскоростных частиц о поверхность космического аппарата //

Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2015. – № 2. – С. 61–65.

17. Вандышев Г.К., Зюрюкин Ю.А. Анализ особенностей работы пьезоэлектрического датчика давления на резистивную нагрузку // Радиотехника и электроника. – 2001. – № 3. – С. 372–376.

18. Богуш М.В., Пикалев Э.М. Анализ функции преобразования пьезоэлектрических датчиков давления методом конечных элементов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – Т. 79, № 2. – С. 74–84.

19. Вопросы синтеза и анализа метрологических моделей пьезоэлектрических датчиков быстропеременных давлений / П.Г. Михайлов, Е.А. Мокров, В.В. Скотников, Д.А. Тютюников, В.А. Петрин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – Т. 7, № 1. – С. 35–43.

20. Пат. RU № 2630537.Волоконно-оптический датчик давления / Паньков А.А., опубл. 11.09.2017 Бюл. № 26; заявка № 2016136058 от 06.09.2016 г.

21. Пат. RU № 2643692. Волоконно-оптический датчик объемного напряженного состояния / Паньков А.А., опубл.: 05.02.2018 Бюл. № 4; заявка № 2017111405 от 04.04.2017 г.

22. Пат. RU № 2684001. Датчик вибраций / Паньков А.А., опубл.: 03.04.2019 Бюл. № 10; заявка № 2017137934 от 30.10.2017 г.

23. Pan'kov A.A. Piezoelectroluminescent fiber-optic sensors for temperature and deformation fields // Sensors and Actuators A: Physical. – 2019. – Vol. 288. – pp. 171-176.

24. A bionic stretchable nanogenerator for underwater sensing and energy harvesting / Y. Zou, P. Tan, B. Shi [et al.] // Nature Communications. – 2019. – No. 10:2695. – P. 1–10.

25. Tactile sensors for advanced intelligent systems / C. Wang, L. Dong, D. Peng [et al.] // Advanced Intelligent Systems. – 2019. – Vol. 1, no. 8:1900090. – P. 1–24.

26. Синтез наноразмерных люминофоров Gd_2O_3: Nd_3+ полимерно-солевым методом их основных характеристик / А.С. Матросова, Н.К. Кузьменко, С.К. Евстропьев, В.А. Асеев, Д.П. Данилович, Н.В. Никоноров, А.И. Игнатьев, В.В. Демидов, К.В. Дукельский // Оптика и спектроскопия. – 2021. – Т. 129, № 5. – С. 650–657. DOI: 10.21883/OS2021.05.50893.1853-21

27. Hollow Antiresonant Optical Fiber Modified with Thin Films Containing Highly-Luminescent Gd_2O_3:Nd_3+Nanophosphors / V. Demidov A.S., Matrosova, S.K. Evstropiev, N.K. Kuzmenko, V.A. Aseev, N.V. Nikonorov, K.V. Dukelskii // 2021 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and European Quantum Electronics Conference, CLEO/Europe-EQEC. – 2021. DOI: 10.1109/CLEO/Europe-EQEC52157.2021.9541892

28. Кварцевые волоконные световоды, активированные нанокристаллами YAG: Nd^{3+} / С.К. Евстропьев, В.А. Асеев, В.В. Демидов, Н.К. Кузьменко, А.С. Матросова, А.В. Хохлов, А.В. Комаров, К.В. Дукельский, Н.В. Никаноров, К.В. Орешкина // Квантовая электроника. – 2019. – Т. 49, № 12. – С. 1145–1148.

29. Пат. RU № 2665332. Светоизлучающее устройство с элементом спектрального преобразования / Хикмет Р.А.М., Ван Боммел Т., Де Бур Д.К.Г., опубл. 29.08.2018 Бюл. № 25; заявка № 2016124100 от 05.11.2014 г.

30. Пат. RU № 2690174. Управление цветом люминесцентного световода / Ван Боммел Т., Хикмет Р.А.М., опубл. 31.05.2019 Бюл. № 16; заявка № 2017115418 от 01.10.2015 г.

31. Organic phosphor based fiber-optic sensor for detection of UV radiation / A.S. Matrosova, V.A. Ananyev, G.A. Pchelkin, D.N. Shurupov, S.K. Evstropiev, V.M. Volynkin, V. Demidov, N.V. Nikonorov // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2086, no. 1. – Art. no 012155. DOI: 10.1088/1742-6596/2086/1/012155

32. Люминесцентный волоконно-оптический датчик температуры на основе нанокристаллов CE:YAG и многомодового волоконного световода / А.С. Матросова, Д.В. Булыга, Р.В. Садовничий, Г.А. Пчелкин, Д.Н. Шурупов, В.В. Демидов, С.К. Евстропьев, Н.В. Никоноров, К.В. Дукельский, Ю.Ф. Подрухин, А.А. Слобожанинов // Фотон-Экспресс. – 2021. – Т. 174, № 6. – С. 282–283. DOI: 10.24412/2308-6920-2021-6-282-283

33. Люминесцентные волоконно-оптические датчики на основе нанолюминофоров YAG : R3+ (R = Ce, Dy, Yb) для измерения температуры в диапазоне 20–500 °С / С.К. Евстропьев, В.В. Демидов, Д.В. Булыга, Р.В. Садовничий, Г.А. Пчелкин, Д.Н. Шурупов, Ю.Ф. Подрухин, А.С. Матросова, Н.В. Никоноров, К.В. Дукельский // Квантовая электроника. – 2022. – Т. 52, № 1. – С. 94–99.

34. YAG : R3+(R = Ce, Dy, Yb) nanophosphor-based luminescent fibre-optic sensors for temperature measurements in the range 20-500 C / S.K. Evstropiev, V. Demidov, D.V. Bulyga, R.V. Sadovnichii, G.A. Pchelkin, D.N. Shurupov, Y.F. Podrukhin, A.S. Matrosova, N.V. Nikonorov, K.V. Dukelskii // Quantum Electronics. – 2022. – Vol. 52, № 1. – С. 94–99. DOI: 10.1070/QEL17971

35. Фирстова Е.Г. Оптические свойства волоконных световодов с сердцевиной из стеклообразных SiO_2 и GeO_2, легированных висмутом: дис. … канд. физ.-мат. наук: 01.04.21. – М.: ИОФ РАН, 2015. – 138 с.

36. Мещанкин Д.В. Световоды с активно формируемыми характеристиками для генерации сверхкоротких световых импульсов и флуоресцентного зондирования: дис. … канд. физ.-мат. наук: 01.04.21. – М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2017. – 117 с.

37. Люминесценция кристаллов Cr^{2+}:$A^{II}B^{VI}$ в халькогенидных волоконных световодах в среднем ИК-диапазоне / Р.А. Миронов, Э.В. Караксина, А.О. Забежайлов, Р.М. Шапошников, М.Ф. Чурбанов, Е.М. Дианов // Квантовая электроника. – 2010. – Т. 40, № 9. – С. 828–829.

38. Study of thermal stability and luminescence quenching properties of bismuth-doped silicate glasses for fiber laser applications / V.G. Truong, L. Bigot, A. Lerouge, M. Douay // Appl. Phys. Lett. – 2008. – Vol. 92, no. 4. – P. 041908.

39. High efficiency Bi-doped fiber laser / I. Razdobreev, L. Bigot, V. Pureur, G. Bouwmans, M. Douay, A. Jurdyc // Proc. LPHYS'06, Lausanne, Switzerland, 24-28 July 2006. – 2006.

40. 2W bismuth doped fiber lasers in wavelength range 1300–1550 nm and variation of Bi-doped fiber parameters with core composition / S.V. Firstov, I.A. Bufetov, V.F. Khopin, A.V. Shubin, A.M. Smirnov, L.D. Iskhakova, N.N. Vechkanov, A.N. Guryanov, E.M. Dianov // Las. Phys. Lett. – 2009. – Vol. 6, no. 9. – P. 665.

41. Ноздрюхин Д.В., Горин Д.А., Ященок А.М. Исследование влияния размера сферических частиц, содержащих оболочки золота/краситель на оптоакустический сигнал // Тезисы докладов всероссийской конференции по волоконной оптике (ВКВО-2021), г. Пермь 5-8 октября 2021 года. – Пермь, 2021. – С. 306.

42. Люминесцентный волоконно-оптический датчик температуры на основе нанокристаллов CE:YAG и многомодового волоконного световода / А.С. Матросова, Д.В. Булыга, Р.В. Садовничий, Г.А. Пчелкин, Д.Н. Шурупов, В.В. Демидов, С.К. Евстропьев, Н.В. Никоноров, К.В. Дукельский, Ю.Ф. Подрухин, А.А. Слобожанинов // Тезисы докладов Всероссийской конференции по волоконной оптике (ВКВО-2021), г. Пермь 5-8 октября 2021 года. – Пермь, 2021. – С. 282–283.

43. Высоколюминесцентный в ближней ИК области полый антирезонансный световод для лазерной и сенсорной техники / А.С. Матросова, Н.К. Кузьменко, В.А. Асеев, С.К. Евстропьев, А.В. Хохлов, В.В. Демидов, Н.В. Никоноров // Тезисы докладов Всероссийской конференции по волоконной оптике (ВКВО-2021), г.Пермь 5-8 октября 2021 года. – Пермь, 2021. – С. 75–76.

44. Влияние тантала на люминесцентные свойства алюмосиликатных стёкол, легированных висмутом / Е.А. Пластинин, Л.Д. Исхакова, В.В. Вельмискин, А.В. Харахордин, С.В. Фирстов, С.Л. Семенов // Тезисы докладов Всероссийской конференции по волоконной оптике (ВКВО-2021), г.Пермь 5-8 октября 2021 года. – Пермь, 2021. – С. 50–51.

45. Artificial skin to sense mechanical stress by visible light *emission* / C.N. Xu, T. Watanabe, M. Akiyama, X.G. Zheng // Applied Physics Letters. – 1999. – Vol. 74. – P. 1236–1238.

46. Direct view of stress distribution in solid by mechanoluminescence / C.N. Xu, T. Watanabe, M. Akiyama, X.G. Zheng // Applied Physics Letters. – 1999. – Vol. 74. – P. 2414–2416.

47. Trap-controlled mechanoluminescent materials / J.C. Zhang, X.S. Wang, G. Marriott, C.N. Xu // Progress in Materials Science. – 2019. – Vol. 103. – P. 678–742.

48. An intense elastico-mechanoluminescence material CaZnOS: Mn2þ for sensing and imaging multiple mechanical stresses / J.C. Zhang, C.N. Xu, S. Kamimura, Y. Terasawa, H. Yamada, X.S. Wang // Opt. Express. – 2013. – Vol. 21. – P. 12976–12986.

49. Creating recoverable mechanoluminescence in piezoelectric calcium niobates through Pr3þ doping / J.C. Zhang, Y.Z. Long, X. Yan, X.S. Wang, F. Wang // Chemistry of Materials. – 2016. – Vol. 28. – P. 4052–4057.

50. Mechanically induced light emission and infrared-laser-induced upconversion in the Er-doped CaZnOS multifunctional piezoelectric semiconductor for optical pressure and temperature sensing / H.L. Zhang, D.F. Peng, W. Wang, L. Dong, C.F. Pan // Journal of Physical Chemistry C. – 2015. – Vol. 119. – P. 28136–28142.

51. Sheet sensor using SrAl2O4: Eu mechanoluminescent material for visualizing inner crack of high-pressure hydrogen vessel / Y. Fujio, C.N. Xu, Y. Terasawa, Y. Sakata, J. Yamabe, N. Ueno, N. Terasaki, A. Yoshida, S. Watanabe, Y. Murakami // Int. J. Hydrogen Energy. – 2016. – Vol. 41. – P. 1333–1340.

52. Optical evaluation of in situ crack propagation by using mechanoluminescence of SrAl2O4: Eu2, Dy3 / S. Timilsina, K.H. Lee, Y.N. Kwon, J.S. Kim // Journal of the American Ceramic Society. – 2015. – Vol. 98. – P. 2197–2204.

53. Wu W.Z., Wen X.N., Wang Z.L. Taxel-addressable matrix of vertical-nanowire piezotronic transistors for active and adaptive tactile imaging // Science. – 2013. – Vol. 340. – P. 952–957.

54. Mechanically excited multicolor luminescence in lanthanide ions / Y.Y. Du, Y. Jiang, T.Y. Sun, J.X. Zhao, B.L. Huang, D.F. Peng, F. Wang // Advanced Materials. – 2019. – Vol. 31. – P. 1807062.

55. Intrinsic oxygen vacancies mediated multi-mechano-responsive piezoluminescence in undoped zinc calcium oxysulfide / C. Pan, J.C. Zhang, M. Zhang, X. Yan, Y.Z. Long, X.S. Wang // Applied Physics Letters. – 2017. – Vol. 110. – P. 233904.

56. Electro-mechano-optical conversions in Pr3-doped BaTiO3-CaTiO3 ceramics / X.S. Wang, C.N. Xu, H. Yamada, K. Nishikubo, X.G. Zheng // Advanced Materials. – 2005. – Vol. 17. – P. 1254–1258.

57. Photoluminescence of ZnS: Mn quantum dot by hydrothermal method / Y. Hu, Z. Wei, B. Wu [et al.] // AIP Advances. – 2018. – Vol. 8. – P. 015014.

58. Dynamic pressure mapping of personalized handwriting by a flexible sensor matrix based on the mechanoluminescence process / X. Wang, H. Zhang, R. Yu, L. Dong, D. Peng, A. Zhang, Y. Zhang, H. Liu, C. Pan, Z.L. Wang // Advanced Materials. – 2015. – Vol. 27, no. 14. – P. 2324–2331. DOI: 10.1002/adma.201405826

59. CaS:Eu^{2+}@CaZnOS:Mn^{2+}: A dual-UV/green-excited and dual-red-emitting spectral conversion with all-weather resistance / X. Wang, J. He, Z. Qiu, Q. Mi, J. Xu, S. Ai, W. Zhou, Y. Liu, S. Lian // Ceramics International. – 2020. – Vol. 46, no. 7. – P. 9734–9740.

60. Wang C., Peng D., Pan C. Mechanoluminescence materials for advanced artificial skin // Science Bulletin. – 2020. – Vol. 65. – P. 1147–1149.

61. Пат. RU № 2674135. Покрытая люминесцентная частица, люминесцентный преобразующий элемент, источник света, осветительное устройство и способ изготовления покрытой люминесцентной частицы / Петерс М.П.Й., Ван Дремел Г.В.Г., Шмидт П.Й., Хендрикс Р.Я., Хоэлен Х.Г.А., Вег Р.Т., Ван Боммел Т., опубл. 04.12.2018 Бюл. № 34, заявка № 2015140756 от 25.02.2014 г.

62. Пат. RU № 2799986. Волоконно-оптический датчик механических напряжений / Паньков А.А., опубл. 14.07.2023 Бюл. № 20, заявка № 2022129729 от 16.11.2022 г.

63. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. – М.: Мир, 1982. – 334 с.

64. Победря Б.Е. Механика композиционных материалов. – М.: Изд–во Моск. университета, 1984. – 336 с.

65. Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика деформирования и разрушения структурно неоднородных тел. – М.: Наука, 1984. – 115 с.

66. Паньков А.А. Пьезокомпозиты и датчики: моногр.: в 3 ч. – Ч. 1. Статистическая механика пьезокомпозитов. – Пермь: Изд-во Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2022. – 234 с.

References

1. Luminescence: From Theory to Applications / Cornelis R. Ronda (Editor). – Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008, 276 p.

2. Luminescence Trilogy: Complete Collection / J.L. Weil (Goodreads Author). – Kindle Edition, Published by Dark Magick Publishing, LLC., 2018, 707 p.

3. Makarova N.Yu., Tatmyshevskij K.V. Mekhanolyuminescentnye datchiki vnutrennih napryazhenij kompozitnyh konstrukcij dlya sovremennoj aerokosmicheskoj tekhniki [Mechanoluminescent internal stress sensors of composite structures for modern aerospace engineering] // *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2007, № 4, pp. 26-32.

4. Makarova N.YU. Taktil'nye sensory robotov na osnove mekhanolyuminescentnyh datchikov [Tactile sensors of robots based on mechanoluminescent sensors]. Izd-vo LAPLambert-AcademicPublishing, 2011, 200 p.

5. Sychev M.M. Nauchnye osnovy upravleniya svojstvami kompozicionnyh plenok dlya elektrolyuminescentnyh ustrojstv [Scientific basis for controlling the properties of composite films

for electroluminescent devices]: avtoref. dis. … dok. tekhn. nauk. – S.-Peterburg, 2013, 41 p.

6. Knyazev A. A., SHamsutdinova R. D., Galyametdinov YU. G. Lyuminescentnye svojstva kompozitov na osnove polimera PFO, dopirovannogo mezogennym kompleksom samariya [Luminescent properties of composites based on the PFO polymer doped with the mesogenic samarium complex] // *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2013, № 17, pp. 137-139.

7. Aseev V.A., Tuzova YU.V., Bibik A.YU., Kolobkova E.V., Nekrasova YA.A., Nikonorov N.V., SHvaleva M.A., Romanov A.E., Bugrov V.E. Neorganicheskij kompozit «steklolyuminofor» na osnove vysokoprelomlyayushchej svincovosilikatnoj matricy dlya belyh svetodiodov [Inorganic composite "glass-phosphor" based on highly refractive lead-silicate matrix for white LEDs] // *Fizika i mekhanika materialov*, 2014, T.21, №3, pp. 242-247.

8. Bazhukova I.N., Pustovarov V.A., Myshkina A.V., Ulitko M.V. Lyuminescentnye nanomaterialy, dopirovannye redkozemel'nymi ionami, i perspektivy ih biomedicinskogo primeneniya (obzor) [Luminescent nanomaterials doped with rare earth ions and prospects for their biomedical application (review)] // *Optika i spektroskopiya*, 2020, T. 128, № 12, pp. 1938-1957.

9. Makarova N.YU. Modelirovanie vyhodnogo signala mekhanolyuminescentnogo datchika dinamicheskogo davleniya [Simulation of output signal of mechanoluminescent sensor of dynamic pressure] // *Nauka i Obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana. Elektron. zhurn.,* 2015, № 6, pp. 187-200.

10. Tatmyshevskij K.V. Mekhanolyuminescentnyj chuvstvitel'nyj element: matematicheskaya model' i osnovnye harakteristiki [Mechanoluminescent sensitive element: mathematical model and main characteristics] // *Datchiki i sistemy*, 2005, № 1, pp. 10-15.

11. Tatmyshevskij K.V. Nauchnye osnovy rascheta i proektirovaniya mekhanolyuminescentnyh chuvstvitel'nyh elementov datchikov impul'snogo davleniya [cientific basis of calculation and design of mechanoluminescent sensitive elements of pulse pressure sensors]: avtoref. dis. … dok. tekhn. nauk. Moscow, 2010, 33 p.

12. Tomyshev K.A., Bagan V.A., Astapenko V.A. Raspredelyonnye volokonno-opticheskie datchiki davleniya dlya primeneniya v neftegazovoj promyshlennosti [Distributed fiber-optic pressure sensors for use in the oil and gas industry] // *Trudy MFTI*, 2012, № 2, pp. 64-72.

13. Krauya U.E. Mekhanolyuminescenciya kompozitnyh materialov: Metody, apparatura i rezul'taty issledovanij [Mechanoluminescence of Composite Materials: Methods, Instrumentation and Research Results] / U.E. Krauya, Y.L. YAnsons; Latv. AN, In-t mekhaniki polimerov, NII fiziki tverdogo tela Latv. un-ta. – Riga: Zinatne, 1990, 152 p., https://search.rsl.ru/ru/record/01001566602

14. Jia Y., Tian X., Wu Z., Tian X., Zhou J., Fang Y., Zhu C. Novel mechano-luminescent sensors based on piezoelectric/electroluminescent composites // Sensors, 2011, No. 4, pp. 3962-3969.

15. Frajden Dzh. Sovremennye datchiki. Spravochnik [Modern sensors. Reference book]. M.: Tekhnosfera, 2005, 592 p.

16. Novomejskij D.N., Telegin A.M., Syomkin N.D. Ispol'zovanie p'ezodatchikov dlya opredeleniya mesta udara vysokoskorostnyh chastic o poverhnost' kosmicheskogo apparata [Use of piezoelectric sensors to determine the impact of high-speed particles on the surface of a spacecraft] // *Fizika volnovyh processov i radiotekhnicheskie sistemy*, 2015, № 2, pp. 61-65.

17. Vandyshev G.K., Zyuryukin YU.A. Analiz osobennostej raboty p'ezoelektricheskogo datchika davleniya na rezistivnuyu nagruzku [Analysis of the peculiarities of the piezoelectric pressure sensor for resistive load] // *Radiotekhnika i elektronika,* 2001, № 3, pp. 372-376.

18. Bogush M.V., Pikalev E.M. Analiz funkcii preobrazovaniya p'ezoelektricheskih datchikov davleniya metodom konechnyh elementov [Analysis of the conversion function of piezoelectric pressure sensors by finite element method] // *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki,* 2008, Vol. 79, № 2, pp. 74-84.

19. Mihajlov P.G., Mokrov E.A., Skotnikov V.V., Tyutyunikov D.A., Petrin V.A. Voprosy sinteza i analiza metrologycheskih modelej p'ezoelektricheskih datchikov bystroperemennyh davlenij [Questions of synthesis and analysis of metrological models of piezoelectric sensors of fast alternating pressures] // *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol',* 2014, Vol. 7, № 1, pp. 35-43.

20. Patent RU № 2630537.Volokonno-opticheskij datchik davleniya [Fiber Optic sensor of Pressure] / Pan'kov A.A., opubl. 11.09.2017 Byul. № 26; zayavka № 2016136058 ot 06.09.2016 g.

21. Patent RU № 2643692. Volokonno-opticheskij datchik ob"emnogo napryazhennogo sostoyaniya [Fiber optic sensor of complex volumetric stress] / Pan'kov A.A., opubl.: 05.02.2018 Byul. № 4; zayavka № 2017111405 ot 04.04.2017 g.

22. Patent RU № 2684001. Datchik vibracij [Vibration sensor] / Pan'kov A.A., opubl.: 03.04.2019 Byul. № 10; zayavka № 2017137934 ot 30.10.2017 g.

23. Pan'kov A.A. Piezoelectroluminescent fiber-optic sensors for temperature and deformation fields // Sensors and Actuators A: Physical, 2019, vol. 288, pp. 171-176.

24. Zou Y, Tan P, Shi B, et al. A bionic stretchable nanogenerator for underwater sensing and energy harvesting // Nat Commun., 2019, No. 10:2695, pp. 1-10.

25. Wang C, Dong L, Peng D, et al. Tactile sensors for advanced intelligent systems // Adv. Intell. Syst., 2019, Vol. 1, No.8:1900090, pp. 1-24.

26. Matrosova A.S., Kuz'menko N.K., Evstrop'ev S.K., Aseev V.A., Danilovich D.P., Nikonorov N.V., Ignat'ev A.I., Demidov V.V., Dukel'skij K.V. Sintez nanorazmernyh lyuminoforov Gd2O3 : Nd3+ polimerno-solevym metodom ih osnovnyh harakteristik [Synthesis of nanoscale phosphors Gd2O3: Nd3 + by the polymer-salt method of their main characteristics] // *Optika i spektroskopiya*, 2021, T. 129, № 5, pp. 650-657. DOI: 10.21883/OS2021.05.50893.1853-21

27. Demidov V., Matrosova A.S., Evstropiev S.K., Kuzmenko N.K., Aseev V.A., Nikonorov N.V., Dukelskii K.V. Hollow Antiresonant Optical Fiber Modified with Thin Films Containing Highly-Luminescent Gd2O3:Nd3+Nanophosphors / 2021 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and European Quantum Electronics Conference, CLEO/Europe-EQEC 2021, DOI: 10.1109/CLEO/Europe-EQEC52157.2021.9541892

28. Evstrop'ev S.K., Aseev V.A., Demidov V.V., Kuz'menko N.K., Matrosova A.S., Hohlov A.V., Komarov A.V., Dukel'skij K.V., Nikanorov N.V., Oreshkina K.V. Kvarcevye volokonnye svetovody, aktivirovannye nanokristallami YAG:Nd^{3+} [Quartz fiber light guides, activated nanocrystals YAG: Nd^{3+}] // *Kvantovaya elektronika*, 2019, T. 49, № 12, pp. 1145-1148.

29. Patent RU № 2665332. Svetoizluchayushchee ustrojstvo s elementom spektral'nogo preobrazovaniya [Light emitting device with spectral conversion element] / Hikmet R.A.M., Van Bommel T., De Bur D.K.G., opubl. 29.08.2018 Byul. № 25; zayavka № 2016124100 ot 05.11.2014 g.

30. Patent RU № 2690174. Upravlenie cvetom lyuminescentnogo svetovoda [Luminescent Light Guide Color Management] / Van Bommel T., Hikmet R.A.M., opubl. 31.05.2019 Byul. № 16; zayavka № 2017115418 ot 01.10.2015 g.

31. Matrosova A.S., Ananyev V.A., Pchelkin G.A., Shurupov D.N., Evstropiev S.K., Volynkin V.M., Demidov V., Nikonorov N.V. Organic phosphor based fiber-optic sensor for detection of UV radiation [Organic phosphor based fiber-optic sensor for detection of UV radiation] // *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, Vol. 2086, № 1. Art.no 012155. DOI: 10.1088/1742-6596/2086/1/012155

32. Matrosova A.S., Bulyga D.V., Sadovnichij R.V., Pchelkin G.A., SHurupov D.N., Demidov V.V., Evstrop'ev S.K., Nikonorov N.V., Dukel'skij K.V., Podruhin YU.F., Slobozhaninov A.A. Lyuminescentnyj volokonno-opticheskij datchik temperatury na osnove nanokristallov CE:YAG i mnogomodovogo volokonnogo svetovoda [Luminescent fiber-optic temperature sensor based on CE: YAG nanocrystals and multimode fiber light guide] // *Foton-Ekspress*, 2021, № 6 (174), pp. 282-283. DOI: 10.24412/2308-6920-2021-6-282-283

33. Evstrop'ev S.K., Demidov V.V., Bulyga D.V., Sadovnichij R.V., Pchelkin G.A., SHurupov D.N., Podruhin YU.F., Matrosova A.S., Nikonorov N.V., Dukel'skij K.V. Lyuminescentnye volokonno-opticheskie datchiki na osnove nanolyuminoforov YAG : R3+ (R = Ce, Dy, Yb) dlya izmereniya temperatury v diapazone 20–500 °C [Fluorescent fiber optic sensors based on nanoluminophors YAG: R3 + (R = Ce, Dy, Yb) for measuring temperature in the range of 20-500 ° C] // *Kvantovaya elektronika*, 2022, T. 52, № 1, pp. 94-99. http://www.mathnet.ru/php…7971&option_lang=rus

34. Evstropiev S.K., Demidov V., Bulyga D.V., Sadovnichii R.V., Pchelkin G.A., Shurupov D.N., Podrukhin Y.F., Matrosova A.S., Nikonorov N.V., Dukelskii K.V. YAG : R3+(R = = Ce, Dy, Yb) nanophosphor-based luminescent fibre-optic sensors for temperature measurements in the range 20-500 C // *Quantum Electronics*, 2022, Vol. 52, № 1, pp. 94-99. DOI: 10.1070/QEL17971

35. Firstova E.G. Opticheskie svojstva volokonnyh svetovodov s serdcevinoj iz stekloobraznyh SiO2 i GeO2, legirovannyh vismutom [Optical properties of fiber light guides with a core of glass-shaped SiO2 and GeO2 doped with bismuth]: Dis. … kand. fiz.-mat.nauk: 01.04.21 / E.G. Firstova. – Moskva, IOF RAN, 2015. – 138 p.

36. Meshchankin D.V. Svetovody s aktivno formiruemymi harakteristikami dlya generacii sverhkorotkih svetovyh impul'sov i fluorescentnogo zondirovaniya [Light guides with actively formed characteristics for the generation of ultra-short light pulses and fluorescent sensing]: Dis. … kand. fiz.-mat.nauk: 01.04.21 / D.V. Meshchankin. – Moskva, MGU imeni M.V. Lomonosova, 2017. – 117 p.

37. Mironov R.A., Karaksina E.V., Zabezhajlov A.O., SHaposhnikov R.M., CHurbanov M.F., Dianov E.M. Lyuminescenciya kristallov Cr2+:AIIBVI v hal'kogenidnyh volokonnyh svetovodah v srednem IK-diapazone [Luminescence of Cr^{2+} crystals: AIIBVI in chalcogenide fiber light guides in the middle IR range] // *Kvantovaya elektronika*, 2010, T. 40, № 9, pp. 828–829.

38. Truong V.G., Bigot L., Lerouge A., and Douay M. Study of thermal stability and luminescence quenching properties of bismuth-doped silicate glasses for fiber laser applications // Appl. Phys. Lett., 2008, Vol.92, № 4, P.041908.

39. Razdobreev I., Bigot L., Pureur V., Bouwmans G., Douay M., Jurdyc A. High efficiency Bi-doped fiber laser // Proc. LPHYS'06, Lausanne, Switzerland, 24-28 July 2006.

40. Firstov S.V., Bufetov I.A., Khopin V.F., Shubin A.V., Smirnov A.M., Iskhakova L.D., Vechkanov N.N., Guryanov A.N., Dianov E.M. 2W bismuth doped fiber lasers in wavelength range 1300 – 1550 nm and variation of Bi-doped fiber parameters with core composition // Las. Phys. Lett., 2009, Vol. 6, № 9, P.665.

41. Nozdryuhin D.V., Gorin D.A., YAshchenok A.M. Issledovanie vliyaniya razmera sfericheskih chastic, soderzhashchih obolochki zolota/krasitel' na optoakusticheskij signal [Study of the influence of the size of spherical particles containing gold shells/dye on the optoacoustic signal] / Tezisy dokladov Vserossijskoj konferencii po volokonnoj optike (VKVO-2021), g.Perm' 5-8 oktyabrya 2021 goda, 441 p.; pp. 306.

42. Matrosova A.S., Bulyga D.V., Sadovnichij R.V., Pchelkin G.A., SHurupov D.N., Demidov V.V., Evstrop'ev S.K., Nikonorov N.V., Dukel'skij K.V., Podruhin YU.F., Slobozhaninov A.A. Lyuminescentnyj volokonno-opticheskij datchik temperatury na osnove nanokristallov ce:yag i mnogomodovogo volokonnogo svetovoda [Luminescent fiber-optic temperature sensor based on ce: yag nanocrystals and multimode fiber light guide] / Tezisy dokladov Vserossijskoj konferencii po volokonnoj optike (VKVO-2021), g.Perm' 5-8 oktyabrya 2021 goda, 441 p.; pp. 282-283.

43. Matrosova A.S., Kuz'menko N.K., Aseev V.A., Evstrop'ev S.K., Hohlov A.V., Demidov V.V., Nikonorov N.V. Vysokolyuminescentnyj v blizhnej IK oblasti polyj antirezonansnyj svetovod dlya lazernoj i sensornoj tekhniki [High-luminescent in the near infrared region hollow anti-resonance light guide for laser and sensory technology] / Tezisy dokladov Vserossijskoj konferencii po volokonnoj optike (VKVO-2021), g.Perm' 5-8 oktyabrya 2021 goda, 441 p.; pp.75-76.

44. Plastinin E.A., Iskhakova L.D., Vel'miskin V.V., Harahordin A.V., Firstov S.V., Semenov S.L. Vliyanie tantala na lyuminescentnye svojstva alyumosilikatnyh styokol, legirovannyh vismutom [Influence of tantalum on luminescent properties of aluminosilicate glass doped with bismuth] / Tezisy dokladov Vserossijskoj konferencii po volokonnoj optike (VKVO-2021), g.Perm' 5-8 oktyabrya 2021 goda, 441 p.; pp.50-51.

45. Xu C.N., Watanabe T., Akiyama M., Zheng X.G. Artificial skin to sense mechanical stress by visible light emission // Appl. Phys. Lett., 1999, Vol. 74, pp. 1236-1238.

46. Xu C.N., Watanabe T., Akiyama M., Zheng X.G. Direct view of stress distribution in solid by mechanoluminescence // Appl. Phys. Lett., 1999, Vol. 74, pp. 2414-2416.

47. Zhang J.C., Wang X.S., Marriott G., Xu C.N. Trap-controlled mechanoluminescent materials // Prog. Mater. Sci., 2019, Vol. 103, pp. 678-742.

48. Zhang J.C., Xu C.N., Kamimura S., Terasawa Y., Yamada H., Wang X.S. An intense elastico-mechanoluminescence material CaZnOS: Mn2þ for sensing and imaging multiple mechanical stresses // Opt. Express, 2013, Vol. 21, pp. 12976-12986.

49. Zhang J.C., Long Y.Z., Yan X., Wang X.S., Wang F. Creating recoverable mechanoluminescence in piezoelectric calcium niobates through Pr3þ doping // Chem. Mater., 2016, Vol. 28, pp. 4052-4057.

50. Zhang H.L., Peng D.F., Wang W., Dong L., Pan C.F. Mechanically induced light emission and infrared-laser-induced upconversion in the Er-doped CaZnOS multifunctional piezoelectric semiconductor for optical pressure and temperature sensing // J. Phys. Chem. C, 2015, Vol. 119, pp. 28136-28142.

51. Fujio Y., Xu C.N., Terasawa Y., Sakata Y., Yamabe J., Ueno N., Terasaki N., Yoshida A., Watanabe S., Murakami Y. Sheet sensor using SrAl2O4: Eu mechanoluminescent material for visualizing inner crack of high-pressure hydrogen vessel // Int. J. Hydrogen Energy, 2016, Vol. 41, pp. 1333-1340.

52. Timilsina S., Lee K.H., Kwon Y.N., Kim J.S. Optical evaluation of in situ crack propagation by using mechanoluminescence of SrAl2O4: Eu2, Dy3 // J. Am. Ceram. Soc., 2015, Vol. 98, pp. 2197-2204.

53. Wu W.Z., Wen X.N., Wang Z.L. Taxel-addressable matrix of vertical-nanowire piezotronic transistors for active and adaptive tactile imaging // Science, 2013, Vol. 340, pp. 952-957.

54. Du Y.Y., Jiang Y., Sun T.Y., Zhao J.X., Huang B.L., Peng D.F., Wang F. Mechanically excited multicolor luminescence in lanthanide ions // Adv. Mater., 2019, Vol. 31, pp. 1807062.

55. Pan C., Zhang J.C., Zhang M., Yan X., Long Y.Z., Wang X.S. Intrinsic oxygen vacancies mediated multi-mechano-responsive piezoluminescence in undoped zinc calcium oxysulfide // Appl. Phys. Lett., 2017, Vol. 110, pp. 233904.

56. Wang X.S., Xu C.N., Yamada H., Nishikubo K., Zheng X.G. Electro-mechano-optical conversions in Pr3-doped BaTiO3-CaTiO3 ceramics // Adv. Mater., 2005, Vol. 17, pp. 1254-1258.

57. Hu Y., Wei Z., Wu B., et al. Photoluminescence of ZnS: Mn quantum dot by hydrothermal method // AIP Advances, 2018, Vol. 8, pp. 015014; https://doi.org/10.1063/1.5010833

58. Wang X., Zhang H., Yu R., Dong L., Peng D., Zhang A., Zhang Y., Liu H., Pan C., Wang Z.L. Dynamic pressure mapping of personalized handwriting by a flexible sensor matrix based on the mechanoluminescence process // Adv. Mater., 2015, Vol. 27, No. 14, pp. 2324-2331, doi: 10.1002/adma.201405826.

59. Wang X., He J., Qiu Z., Mi Q., Xu J., Ai S., Zhou W., Liu Y., Lian S. CaS:Eu^{2+}@CaZnOS:Mn^{2+}: A dual-UV/green-excited and dual-red-emitting spectral conversion with all-weather resistance // Ceramics International, 2020, Vol. 46, No. 7, pp. 9734-9740.

60. Wang C., Peng D., Pan C. Mechanoluminescence materials for advanced artificial skin // Science Bulletin, 2020, Vol. 65, pp. 1147-1149.

61. Patent RU № 2674135. Pokrytaya lyuminescentnaya chastica, lyuminescentnyj preobrazuyushchij element, istochnik sveta, osvetitel'noe ustrojstvo i sposob izgotovleniya pokrytoj lyuminescentnoj chasticy [Coated luminescent particle, luminescent converting element, light source, lighting device and method of manufacturing coated luminescent particle] / Peters M.P.J., Van Dremel G.V.G., SHmidt P.J., Hendriks R.YA., Hoelen H.G.A., Veg R.T., Van Bommel T., opubl. 04.12.2018 Byul. № 34, zayavka № 2015140756 ot 25.02.2014 g.

62. Patent RU № 2799986. Volokonno-opticheskij datchik mekhanicheskih napryazhenij [Fiber optic mechanical stress sensor] / Pan'kov A.A., opubl. 14.07.2023 Byul. № 20, zayavka № 2022129729 ot 16.11.2022 g.

63.Kristensen R. Vvedenie v mekhaniku kompozitov [Introduction to the mechanics of composites]. Moscow: Mir, 1982, 334 p.

64. Pobedrya B.E. Mekhanika kompozicionnyh materialov [Mechanics of composite materials]. Moscow: Izd–vo Mosk. universiteta, 1984, 336 p.

65.Sokolkin YU.V., Tashkinov A.A. Mekhanika deformirovaniya i razrusheniya strukturno neodnorodnyh tel [Mechanics of deformation and destruction of structurally heterogeneous bodies]. Moscow: Nauka, 1984, 115 p.

66. Pan'kov A.A. P'ezokompozity i datchiki: monografiya v 3-h chastyah / CHast' 1. Statisticheskaya mekhanika p'ezokompozitov [Piezocomposites and sensors: monograph in 3 parts / Part 1. Statistical mechanics of piezocomposites]. Perm': Izd-vo Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta, 2022, 234 p.

Финансирование. Результаты получены при выполнении государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (проект № FSNM-2023-0006).

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Вклад автора 100 %.

Funding. The results were obtained while fulfilling the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation to carry out fundamental scientific research (project No. FSNM-2023-0006).

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Author's contribution is 100 %