



# ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПО ОТРАЖЕНИЮ СВЕТА

А.В.Князьков, д.ф.-м.н., [kniazkov@rphf.spbstu.ru](mailto:kniazkov@rphf.spbstu.ru),  
Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого, Санкт-Петербург

Проведен анализ оценки изменений механических напряжений в упруго-оптической сегнетокерамике по изменению коэффициента отражения монохроматического поляризованного света, падающего на поверхность среды. Рассмотрен случай нормального падения света.

## ВВЕДЕНИЕ

Под действием механической нагрузки изотропные материалы становятся оптически анизотропными. Возникающие деформации вызывают наведенное двойное лучепреломление. При этом направления главных осей эллипсоида диэлектрической проницаемости материала совпадают с направлениями главных осей эллипсоида напряжений. В случае одностороннего сжатия это направление сжатия становится выделенным и играет роль оптической оси. Оптические свойства деформированного таким образом тела соответствуют свойствам одноосного кристалла. Разность показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей  $\Delta n = n_o - n_e$  является мерой возникшей анизотропии и пропорциональна механическому напряжению  $\sigma$ :

$$\Delta n = n_o - n_e = k\sigma. \quad (1)$$

Оптические методы определения механического напряжения в прозрачных средах основаны на измерении разности фазовых задержек обыкновенно и необыкновенно поляризованных световых волн, прошедших напряженную среду в различных интерферометрических схемах (поляризационно-оптические схемы) [1-3]. Для поглощающих сред интенсивность прошедших волн с измеряемой фазой может оказаться недостаточной для проведения достоверных измерений. С другой стороны, световые волны, падающие на границу раздела сред, всегда испытывают отражение от границы, величина которого определяется показателями преломления  $n_{o,e}$ . Коэффициент отражения  $R$  согласно законам Френеля

# EVALUATION OF CHANGES IN THE STRESS STATE OF MATERIALS BY MEANS LIGHT REFLECTION

*Kniazkov A. V. Doctor of Physical and Mathematical Sciences, [kniazkov@rphf.spbstu.ru](mailto:kniazkov@rphf.spbstu.ru), Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg*

The analysis of mechanical stress changes evaluation in elasto-optic ferroelectric ceramics on reflection index variation of monochromatic polarized light incident on medium surface is performed. Normal incidence of light is considered.

## INTRODUCTION

Under the influence of mechanical stress the isotropic substances become optically anisotropic substances. Occurring strains cause the guided double refraction. At that principal axes directions of material dielectric capacitance ellipsoid match the principal axes directions of stress ellipsoid. In case of one-sided compression this direction of compression becomes separated and acts as an optical axis. Optical characteristics of the body deformed this manner correspond to characteristics of uniaxial crystal. The refraction indexes difference for ordinary and extraordinary beams of  $\Delta n = n_o - n_e$  is a measure of occurred anisotropy degree and is proportional to mechanical stress of  $\sigma$ :

$$\Delta n = n_o - n_e = k\sigma. \quad (1)$$

Optical methods of mechanical stress detection in transparent media are based on measurement of phase delay difference for ordinary and extraordinary polarized light waves passed through the stressed medium in interferometric arrangements (polarization-optical arrangements) [1-3]. For the absorbing media the intensity of passed waves with the measured phase can be insufficient for carrying out meaningful measurements. On the other hand, light waves incident on medium border always pass through reflection from border and its value is defined by  $n_{o,e}$  refraction indexes. Reflection index  $R$  according to Fresnel laws in case of normal waves incidence and without regard to medium capacitance is as follows:



в случае нормального падения волн и без учета преломности среды выглядит следующим образом:

$$R_{o,e} = \left( \frac{n_{o,e} - 1}{n_{o,e} + 1} \right)^2. \quad (2)$$

В работах [4, 5] нами был предложен метод измерения электрооптических коэффициентов наведенного двулучепреломления материалов по анализу отраженного света. Эти работы легли в основу разработки нового отражательного метода оценки изменений напряженного состояния в материалах по изменению разности коэффициентов отражения ортогонально поляризованных волн.

Коэффициент отражения световой волны с поляризацией, параллельной оптической оси, определяется обыкновенным показателем преломления  $n_o$ . А для ортогональной ориентации плоскости поляризации по отношению к оптической оси среды коэффициент отражения определяется необыкновенным показателем преломления  $n_e$ . В отражательной геометрии, чтобы измерить  $\Delta n$ , по разности коэффициентов отражения  $\Delta R = R_o - R_e$ , понадобятся две ортогонально поляризованные волны или одна циркулярно-поляризованная волна. В результате связь между  $\Delta n$  и  $\Delta R$  будет определяться выражением

$$\Delta n = \frac{(1+n)^3}{4(n-1)} \Delta R. \quad (3)$$

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Остаточные механические напряжения в образцах создавались переменным электрическим полем в процессе реполяризации и вследствие микропробоев. Для формирования электрического поля были использованы планарные электроды (рис.1). Известно, что оптическая индикатриса остаточного двулучепреломления и индикатриса эллипсоида

$$R_{o,e} = \left( \frac{n_{o,e} - 1}{n_{o,e} + 1} \right)^2. \quad (2)$$

The method of electrooptical indices measurement of guided double refraction of materials according to reflected light analysis was offered by us in the works [4, 5]. These works provide the basis for new reflective method development concerning changes evaluation of in the stress state of materials by means reflection indices difference of orthogonally polarized waves.

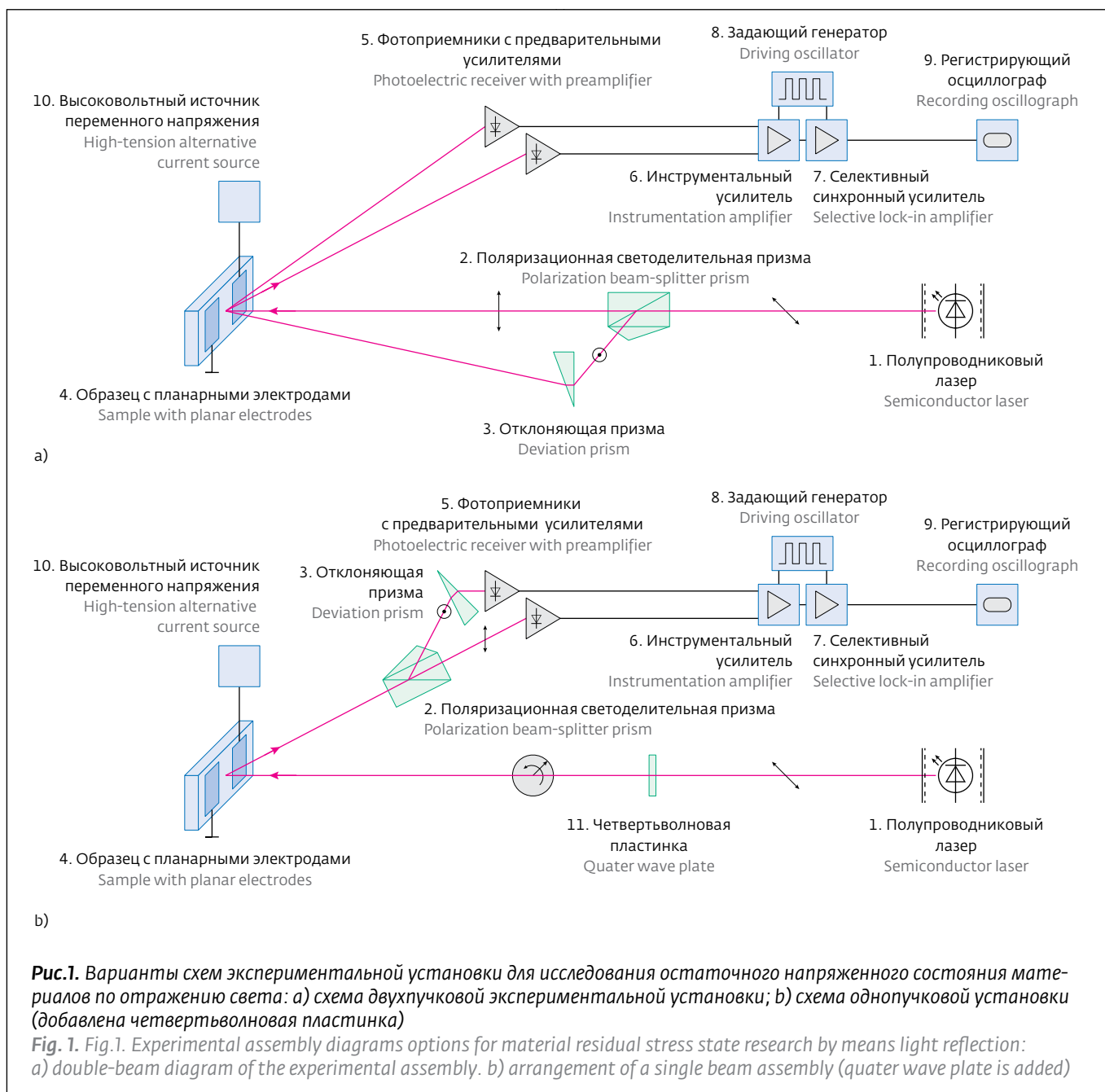
The light wave reflection index with parallel optical axis polarization is determined by  $n_o$  ordinary refraction index. The reflection index is determined by an unordinary refraction index of  $n_e$  for polarization plane orthogonal orientation, in relation to medium optical axis. It necessary to use two orthogonally polarized waves or one circularly polarized wave in reflective geometry to measure  $\Delta n$  on reflection indices difference of  $\Delta R = R_o - R_e$ . As a result the relation between  $\Delta n$  and  $\Delta R$  shall be defined by the following formula:

$$\Delta n = \frac{(1+n)^3}{4(n-1)} \Delta R. \quad (3)$$

### EXPERIMENT PROCEDURE

Residual mechanical stresses in samples were caused by alternating electric field in course of repolarization and owing to micro break ups. Electrode planars were used to form an electric field (fig. 1). It is known that the optical indicatrix of residual double refraction and stress ellipsoid indicatrix should have the optical axes guided on the electric field generated during repolarization.

Two options of experimental assembly diagram performance to research residual materials stress



напряжений будут иметь оптические оси, ориентированные по электрическому полю, создаваемому в процессе реполяризации.

Два варианта исполнения схемы экспериментальной установки исследования остаточного напряженного состояния материалов по отражению света при падении, близком к нормальному, показаны на рис.1а, б. В обеих схемах источником света служил полупроводниковый лазер 1, линейная поляризация которого имела плавную азимутальную подстройку в области 45°. На рис.1а показана двухпучковая схема формирования ортогонально поля-

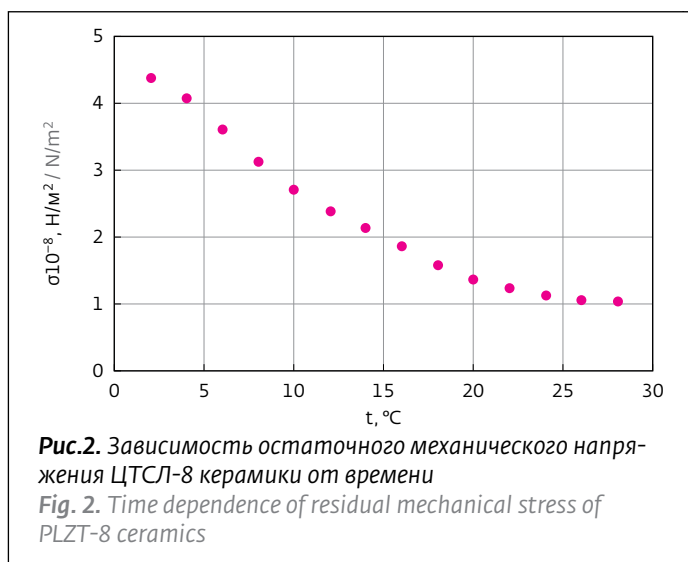
state on light reflection at near-normal incidence are shown in figs.1a, b. In both arrangements the semiconductor laser 1 was a light source and its linear polarization had the smooth azimuth adjustment at the level of 45°. Double beam arrangement of orthogonally polarized incident beams generation is shown in Fig. 1a. The laser emission was split by polarizing prism 2 into two orthogonally polarized beams of equal intensity. Nomarski prism creating two orthogonally polarized beams with the same direction can be used as polarizing prism. If Nomarski prism



ризованных падающих пучков. Излучение лазера расщеплялось поляризационной призмой 2 на два ортогонально поляризованных пучка равной интенсивности. В качестве такой призмы может быть использована призма Номарского, формирующая два ортогонально поляризованных пучка, идущих в одном направлении. Если в качестве такой призмы призма Номарского не использовалась, то один из пучков отклонялся обычной призмой 3 для пересечения со вторым пучком на образце 4 в зазоре между планарными электродами. Отражаясь, пучки попадали на фотоприемники 5 с предварительными усилителями. Сигналы фотоприемников вычитались и усиливались инструментальным усилителем с модулируемым коэффициентом усиления 6. Далее разность сигналов усиливалась селективным синхронным усилителем 7. Управление усилением инструментального и синхронного усилителей осуществлялось низкочастотным задающим генератором 8. Результирующий сигнал регистрировался осциллографом 9. На планарные электроды образца 4 подавалось высоковольтное переменное напряжение источника 10. На рис.1б представлена однопучковая схема с циркулярно-поляризованной волной, формируемой четвертьволновой пластинкой 11. Отраженный пучок расщеплялся поляризационной при-

has not been used as polarizing prism, one of beams was deviated by a common prism 3 for intersection with the second one on the sample 4 in a gap between planar electrodes. Reflected beams were incident on photoelectric receiver 5 with preamplifiers. Photoelectric receivers' signals were interfered and amplified with the instrumentation amplifier having modulated amplification factor 6. Further the signals difference was amplified with the help of selective lock-in amplifier 7. Amplification control for instrumentation and lock-in amplifiers was carried out by means of the low frequency driving oscillator 8. The resulting signal was registered by means of oscillograph 9. High-tension alternating voltage of a source 10 was applied on sample planar electrodes 4. A single beam arrangement with circularly polarized wave generated with a quarter wave plate 11 is provided in Fig. 1b. The reflected beam was split by a polarizing prism 2 into two orthogonally polarized beams. Remaining arrangement parts are similar to those used in the first diagram.

The experimental evaluation of materials stress state by means light reflection was carried out on transparent ferroelectric ceramics samples of solid plumbum lanthanum zirconate-



змой 2 на два ортогонально поляризованных пучка. Остальные детали схемы аналогичны тем, которые использованы в первой схеме.

Экспериментальная оценка напряженного состояния материалов по отражению света проводилась на образцах прозрачной сегнетокерамики твердого раствора цирконата-титаната свинца, легированного лантаном (ЦТСЛ-8, керамика) состава 8/65/35 с планарными электродами, зазор между которыми был 3 мм. Источником 1 служил лазерный модуль KLM-F635-3-5 ( $\lambda = 635$  нм) с выходной мощностью излучения 3 мВт. В качестве фотоприемников 5 использовались фотодиоды с трансимпедансными усилителями OPT101. Преобразование постоянного разностного сигнала фотодатчиков в переменный сигнал осуществлялось инструментальным усилителем AD620, коэффициент усиления которого периодически изменялся ключом CD4066. Окончательное усиление переменного сигнала производилось селективным нановольтметром Unipan 233. Задающий генератор 8 работал на частоте 65 Гц. Остаточное механическое напряжение в образцах создавалось переменным электрическим напряжением высоковольтного источника 10 на частоте 85 Гц. Электрическое поле в образцах превышало значение 5 кВ/см, при котором начинались микропробои. Перед последующей серией измерений образцы керамики термически деполаризовались.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Коэффициент пропорциональности  $k$  механического напряжения величине наведенного двулучепреломления (1) для ЦТСЛ-керамики вычислялся с использованием результатов работы [6] из функциональной зависимости разности фазовых задержек обыкновенно

titanate solution (PLZT-8 ceramics) with 8/65/35 content having planar electrodes with 3 mm gap. Laser module KLM-F635-3-5 ( $\lambda = 635$  nm) with 3 mW beam output power was used as a source 1. Photodiodes with transimpedance amplifiers OPT101 were used as photoelectric receivers 5. Conversion of photosensors constant differential signal to a variable signal was carried out by instrumentation amplifier AD620 and its amplification factor was changed occasionally with the help of CD4066 key. The final amplification of variable signal was made by the selective nanovoltmeter Unipan 233. The driving oscillator 8 operated at 65 Hz frequency. Residual mechanical stress in samples was generated with a variable voltage of high-tension source 10 at a frequency of 85 Hz. The electric field in samples exceeded value of 5 kW/cm with which micro break up began. Before the subsequent series of measurements the ceramics samples were thermally depolarized.

## RESULTS AND DISCUSSION

The proportionality factor  $k$  of mechanical stress to the guided double refraction (1) for PLZT-ceramics was calculated with the use of works results [6] according to dependence of phase delays difference of ordinary and extraordinary polarized light waves passed through the stressed medium from relative elongation of medium relating to elasticity coefficient value of 72 GPa [7] and amounted to  $10^{-11}$  m<sup>2</sup>/N.

The typical dependence of residual stress state change of PLZT-8 ceramics after removal of voltage applied to planar electrodes on reflective surface is shown in Fig. 2. The researched PLZT-8 ceramics compositions had the partial ferro-rigid properties causing the possibility of samples polarization by alternating field. Residual polarization of ceramics caused residual double refraction and, respectively, residual stress state. Residual polarization led also to linearization of quadratic electro-optical effect observed earlier. Micro break ups causing microcracks also increased the stressed state.

## CONCLUSION

Thus, the possibility of residual materials stress state measurement on change by means of light reflection from their surface caused by refraction index change is shown experimentally in the work for the first time. This method can be used for quick evaluation of nontransparent material stress state.



и необыкновенно поляризованных световых волн, прошедших напряженную среду, от относительного удлинения среды. С учетом значения модуля упругости 72 ГПа [7] коэффициент составил  $10^{-11} \text{ М}^2/\text{Н}$ .

На рис.2 показана типичная зависимость изменения остаточного напряженного состояния ЦТСЛ-8 керамики после снятия электрического напряжения, прикладываемого к планарным электродам на отражающей поверхности. Исследуемые составы ЦТСЛ-8 керамики обладали частичными сегнето-жесткими свойствами, что обуславливало возможность поляризации образцов переменным полем. Остаточная поляризация керамики вызвала остаточное двулучепреломление и, соответственно, остаточное напряженное состояние. Остаточная поляризация приводила также к линеаризации квадратичного электрооптического эффекта, наблюдаемого нами ранее. Микропробой, вызывающие микротрещины, также усиливали напряженное состояние.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в настоящей работе впервые экспериментально показана возможность измерения остаточного напряженного состояния материалов по изменению отражения света от их поверхности, вызванного изменением показателя преломления. Этот метод может быть использован для быстрой оценки напряженного состояния непрозрачных материалов.

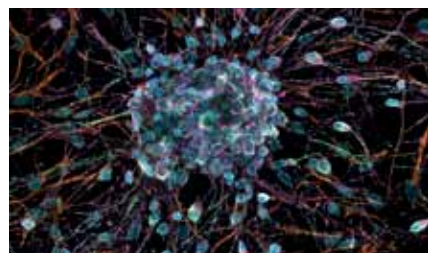
## ЛИТЕРАТУРА

1. **Frocht M.M.** Photoelasticity. N.Y.: John Wiley and Sons, 1941, v.1, p.411.
2. **Александров А.Я., Ахметзянов М.Х.** Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. – М.: Наука, 1973.  
**Aleksandrov A.Ja., Ahmetzjanov M.H.** Poljarizacionno-opticheskie metody mehaniki deformiruemogo tela. – М.: Nauka, 1973.
3. **Стрельчук Н.А., Хесин Г.Л.** Метод фотоупругости. В 3-х т. Т. 2. Методы поляризационно-оптических измерений. Динамическая фотоупругость. – М.: Стройиздат, 1975.  
**Strel'chuk N.A., Hesin G.L.** Metod fotouprugosti. V 3-h t. T. 2. Metody poljarizacionno-opticheskikh izmerenij. Dinamicheskaja fotouprugost'. – М.: Strojizdat, 1975.
4. **Князьков А.В.** Оценка электрооптики сегнетокерамики цирконата-титаната свинца ЦТС и ЦТСЛ по измерению модуляции отражения света. – ЖТФ, 2016, т. 86, № 4, с. 151–154.  
**Knjaz'kov A.V.** Ocenka jelektrrooptiki segnetokeramiki cirkonata-titanata svinca CTS i CTSЛ po izmereniju moduljaciji otrazhenija sveta. – ZhTF, 2016, t. 86, № 4, s. 151–154.
5. **Князьков А.В.** Reflective method of electro-optic coefficients estimation. – Applied Physics B, 2015, v.118, № 2, p.231–234.
6. **Liu Q.D., Fleck N.A., Huber J.E., Chu D.P.** Birefringence measurements of creep near an electrode tip in transparent PLZT. – J. of the European Ceramic Society, 2009, v.29, p.2289–2296.
7. **Spierings G.A.C.M., Dormans G.J.M., Moors W.G.J., Ulenaers M.J.E., Larsen P.K.** Stresses in Pt/Pb (Zr, Ti) O<sub>3</sub>/Pt thin-film stacks for integrated ferroelectric capacitors. – J. of Appl. Phys., 1995, v.78, p.1926–1933.

## LASER WORLD OF PHOTONICS 2017: БИОЧИПЫ И МАЛОИНВАЗИВНАЯ ХИРУРГИЯ

LASER World of PHOTONICS

Тематика экспозиции ведущей мировой выставки LASER World of PHOTONICS (26–29 июня 2017 года в Мюнхене) будет тесно переплетена с темой медицинского прогресса. В центре внимания – методы фотоники в медицине. Фотоника используется при исследованиях живых клеток, мозговых процессов или патологических изменений тканей. В этих направлениях инструментарием исследователя стал метод визуализации тканей, который включает в себя оптическую когерентную томографию (ОКТ). Метод позволяет медицинским специали-



стам взглянуть вглубь на несколько миллиметров ниже поверхности ткани в режиме реального времени с помощью ИК-лазера. Оптические системы обеспечивают трехмерное сканирование с микроскопическим разрешением, не подвергая пациентов воздействию вредного излучения.

Методы фотоники проникают в перспективную молодую область исследований – оптогенетику. Функции мозга и когнитивные процессы все более и более начинают поддаваться контролю. Для этой цели ученые вводят специальные белки в области головного мозга, которые избирательно реагируют на лазерное излучение. С помощью фемтосекундных лазеров можно наблюдать деятельность даже отдельных нейронов. При разработке новых лекарств оптические методы позволяют быстрее диагностировать болезни, сокращая время борьбы с мультирезистентными микробами. В среднесрочной перспективе фотонная диагностика проложит путь к персонализирован-

ной медицине, индивидуально подобранной для пациента.

Миниатюрные биочипы, переносимые имплантаты и малоинвазивная хирургия используются для диагностики органов пациента или в качестве миниатюрных эндоскопов. Минимально инвазивные методы развиваются быстрыми темпами. Например, в области мультифотонной томографии, которая дает трехмерные представления о коже и ткани глаза, используются фемтосекундные лазеры. Для операций лазеры применяют вместо ручных скальпелей. Концентрированный световой пучок также используется для машинной трансплантации роговицы с точностью до микронного уровня.

Вы узнаете больше о приложениях в области биофотоники и медицинских технологий, если посетите выставку LASER World of PHOTONICS 2017 в Мюнхене с 26 по 29 июня.

[www.world-of-photonics.com](http://www.world-of-photonics.com)