

УДК 53.082.53

## СВЕРХШИРОКОПОЛОСНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА ТЕЛЛУРИДА КАДМИЯ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВОЛОКОННОМ СЕНСОРЕ

© 2022 г. Т. В. Долматов<sup>1,\*</sup>, В. В. Букин<sup>1</sup>, член-корреспондент РАН С. В. Гарнов<sup>1</sup>, О. А. Герасимчук<sup>2</sup>, Ю. Ю. Поповский<sup>2</sup>, В. В. Неуструев<sup>2</sup>, К. Ю. Сахаров<sup>3</sup>, О. В. Михеев<sup>3</sup>

Поступило 09.12.2021 г.

После доработки 09.12.2021 г.

Принято к публикации 14.12.2021 г.

В работе представлена относительно простая оптоволоконная система для измерения электромагнитных полей высокой мощности. В системе используется полностью диэлектрический первичный преобразователь с электрооптическим кристаллом CdTe в качестве преобразователя электрического поля. Волоконный сенсор малых размеров преобразует напряженность электрического поля в модуляцию оптической мощности. В работе измеряется и оценивается теоретически время нарастания переходной характеристики электрооптического датчика. Представленная система может использоваться при измерениях сверхширокополосных электромагнитных полей большой мощности.

*Ключевые слова:* эффект Погкельса, электрооптика, мощные электромагнитные поля, сверхширокополосное измерение поля

DOI: 10.31857/S2686740022020031

Исследования по измерению интенсивного электрического поля важны для множества областей, таких как техника высокого напряжения, технология генераторов электромагнитных импульсов и физика высоких энергий. Хотя антенны по-прежнему широко используются в измерениях электрического поля, они обладают определенными недостатками из-за их проводящей конструкции, например, сильное возмущение измеряемого поля, чрезмерные потери в кабельных линиях, отсутствие гальванической развязки и значительные размеры (порядка наибольшей длины волны для сверхширокополосных антенн). Оптоволоконные электрооптические (ЭО) датчики не имеют перечисленных недостатков, будучи полностью диэлектрическими и широкополосными по своей природе. Диэлектрическая конструкция делает такие датчики малоинвазивными, гальванически изолированными, а также не-

восприимчивыми к электрическим пробоям. ЭО-датчики имеют очень широкий диапазон рабочих частот, который в основном определяется материалом ЭО среды и ее размерами.

Линейный электрооптический эффект (также известный как эффект Погкельса), присутствующий в ряде кристаллических материалов, позволяет модулировать состояние поляризации света внешним электрическим полем, приложенным к материалу. Этот факт, а также широкое развитие волоконной связи, позволяет создавать датчики электрического поля с полностью диэлектрическими первичными преобразователями.

Было опубликовано значительное количество работ о создании таких датчиков и измерительных систем [1–4], а также обширные исследования по выбору электрооптических материалов [5, 6]. Основная цель данной работы – реализация относительно простой схемы датчика ЭО для системы измерения мощных сверхширокополосных импульсов электромагнитного поля.

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия

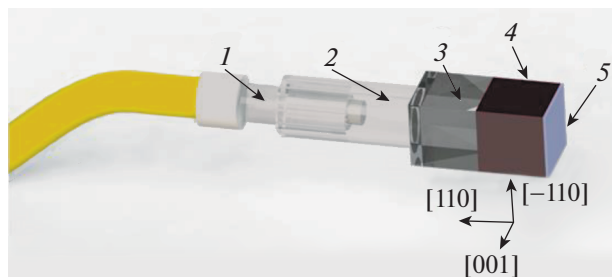
<sup>2</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва, Россия

<sup>3</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия

\*E-mail: timohodik@gmail.com

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Описываемый датчик электрического поля основан на электрооптическом кристалле теллурида кадмия (CdTe) размером  $5 \times 5 \times 5$  мм, вырезанным вдоль оси [110]. Теллурид кадмия имеет наи-



**Рис. 1.** Схема оптоволоконного первичного преобразователя электрического поля. 1 – волоконный коллиматор РМ, 2 – стеклянная трубка, 3 – куб поляризационного светоделителя, 4 – кристалл CdTe, 5 – волновая пластина  $\lambda/8$  с высокоотражающим диэлектрическим покрытием. Дополнительно показана ориентация осей кристалла CdTe.

большой электрооптический отклик среди других кубических кристаллов и является изотропным в отсутствие электрических полей. Отсутствие естественного двулучепреломления в кубических кристаллах упрощает оптическую систему, поскольку снимает необходимость компенсировать температурный дрейф двулучепреломления. Первичный преобразователь датчика электрического поля, показанный на рис. 1, состоит из волоконного коллиматора с сохранением поляризации (РМ), поляризационного куба-светоделителя  $5 \times 5 \times 5$  мм, кристалла CdTe и волновой пластины  $5 \times 5$  мм  $\lambda/8$  с оптической осью на диагонали и зеркальным покрытием с одной стороны. Датчик склеен с помо-

щью оптического клея NOA61 УФ-отверждения. Простота сборки первичного преобразователя обеспечивается совпадением размеров оптических элементов, и при склейке элементы достаточно хорошо ориентируются по граням благодаря поверхностному натяжению УФ-клея. Единственный этап, требующий юстировки, – склейка коллиматора и сборки поляризатора – кристалл – волновая пластина.

Компонента электрического поля вдоль оси кристалла  $[-110]$  вызывает изменение состояния поляризации падающего света из-за электрооптического эффекта в CdTe. Это изменение поляризации затем преобразуется в изменение мощности с помощью поляризационного куба. Волновая пластина добавляет начальный фазовый сдвиг, чтобы обеспечить линейный отклик датчика. Используя матричное исчисление Джонса [7], выходной вектор Джонса датчика может быть записан как

$$X_{out} = Pol.R^{-1}.Cr.W.M.W.Cr.R.Pol.X, \quad (1)$$

с матрицами соответствующих элементов, приведенными в табл. 1.

Модуль  $X_{out}$  дает мощность света, отраженного от датчика:

$$|X_{out}| = P(E_{ext}) = P_0 \sin\left(\frac{\pi}{4} + \gamma(E_{ext})\right)^2, \quad (2a)$$

$$\begin{aligned} \gamma(E_{ext}) &= \frac{2\pi\alpha L n^3 r_{41} E_{ext}}{\lambda} = \\ &= S E_{ext} = 5.07 \times 10^{-7} \left[\frac{M}{B}\right] E_{ext}, \end{aligned} \quad (26)$$

где  $\gamma$  – величина фазового набег в кристалле CdTe, вызванного электрическим полем,  $L = 5$  [мм] – длина кристалла,  $n^3 r_{41} = 92.6$  [пм/В] – ЭО-отклик кристалла,  $\lambda = 1550$  [нм] – длина волны света,  $E_{ext}$  [В/м] – напряженность внешнего электрического поля и  $\alpha = 0.27$  – коэффициент ослабления электрического поля в кристалле CdTe, рассчитанный методом конечных элементов.

Выражение (2a) можно (в окрестности  $E_{ext} = 0$ , т.е. в линейном режиме) записать как

$$P(E_{ext}) = \frac{P_0}{2} + \delta P \approx \frac{P_0}{2} + P_0 S E_{ext}, \quad (3a)$$

$$\frac{\delta P}{P_0} = S E_{ext}, \quad (36)$$

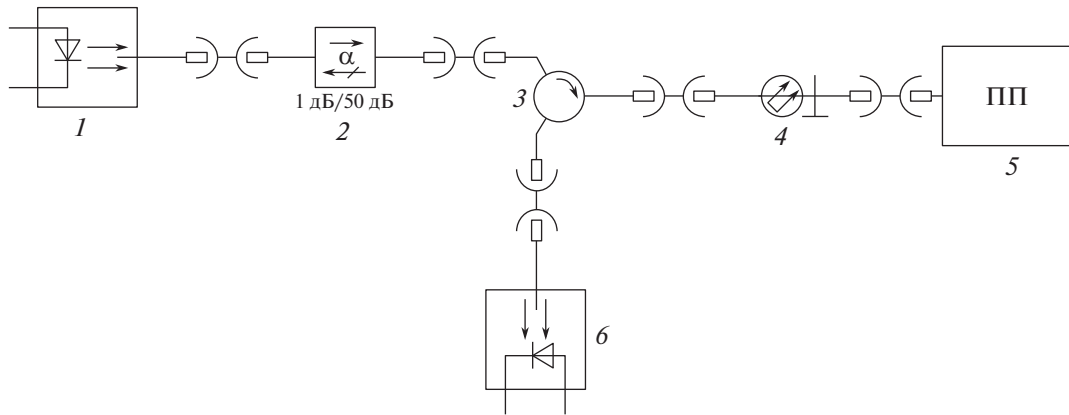
где  $S = 5.07 \times 10^{-7}$  [м/В] представляет указанную чувствительность датчика. В эксперименте  $\delta P$  и  $\frac{P_0}{2}$  получают из переменного и постоянного фототока соответственно.

На рис. 2 изображена схема измерительного стенда с ЭО первичным преобразователем. Стенд

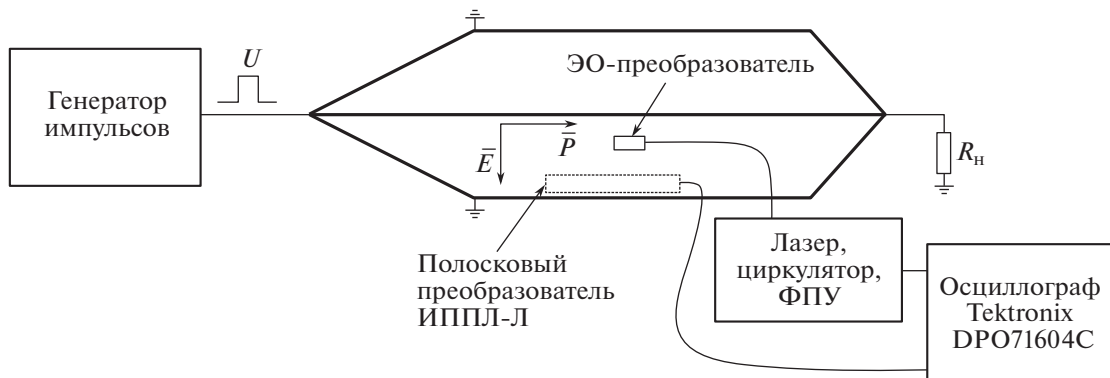
**Таблица 1.** Матрицы Джонса компонентов датчика

Обозначение	Описание	Матрица/Вектор Джонса
X	Вектор падающего излучения	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$
Pol	Поляризатор	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$
R	Матрица поворота на $45^\circ$ <sup>1</sup>	$\begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{pmatrix}$
Cr	Двулучепреломление кристалла CdTe	$\begin{pmatrix} e^{i\gamma/2} & 0 \\ 0 & e^{-i\gamma/2} \end{pmatrix}$
W	Двулучепреломление пластинки $\lambda/8$	$\begin{pmatrix} e^{i\pi/8} & 0 \\ 0 & e^{-i\pi/8} \end{pmatrix}$
M	Зеркало	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$

<sup>1</sup>Матрица поворота учитывает оси кристалла и волновой пластины, выровненные под углом  $45^\circ$  к поляризации входящего света.



**Рис. 2.** Схема измерительного стенда: 1 – лазерный модуль, 2 – оптоволоконный изолятор, 3 – оптоволоконный циркулятор, 4 – оптоволоконный кабель с сохранением поляризации, 5 – первичный преобразователь, 6 – фотоприемное устройство.



**Рис. 3.** Схема эксперимента. Полеобразующая система запитывалась генератором высоковольтных импульсов. Напряженность электрического поля внутри линии регистрировалась с помощью полоскового и электрооптического преобразователей. На схеме указаны направления вектора напряженности электрического поля ( $E$ ) и вектора Пойнтинга ( $P$ ).

состоит из одночастотного лазера Thorlabs SFL1550P с контроллером CLD1015, изолятора IO-G-1550-APC, циркулятора CIR1550PM-APC, первичного преобразователя электрического поля и фотоприемного устройства (ФПУ) производства НПФ «ДИЛАЗ» с усилителем 20 дБ (время нарастания 70 пс). Сигнал с фотоприемного устройства регистрировался осциллографом Tektronix DPO71604C (время нарастания 25 пс).

Первичный преобразователь помещался в полеобразующую линию [8], представляющую собой симметричную полосковую линию высотой 20 см, в которой воспроизводились электромагнитные импульсы напряженностью 150 кВ/м и длительностью переднего фронта 76 пс с частотой повторения 1 кГц. Также в полеобразующую линию помещался эталонный измерительный преобразователь полоскового типа (ИППЛ-Л, время нарастания 36 пс, коэффициент преобразования  $1.49 \times 10^{-4}$  В/(В/м)). Схема эксперимента приведена на рис. 3.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 4 представлены осциллограммы откликов электрооптического и полоскового преобразователей на электрическое поле волны в полеобразующей системе. Сигнал фототока  $P_0/2$  ЭО датчика составил 1.5 В, таким образом, чувствительность ЭО преобразователя составила  $1.52 \times 10^{-6}$  В/(В/м).

На рис. 4а отклик полоскового преобразователя длится около 10 нс, что соответствует максимальному времени регистрации для данного преобразователя. Также можно видеть неоднородность на вершине отклика, соответствующую волне, отраженной от активной нагрузки полеобразующей системы. Заметим, что отраженная волна имеет разную полярность для двух преобразователей. Это связано с тем, что полосковые преобразователи корректно работают для волн, распространяющихся только в одном направлении (падающих на преобразователь спереди), в то время как отраженная волна падает на полосковый преобразователь сзади. Электрооптический

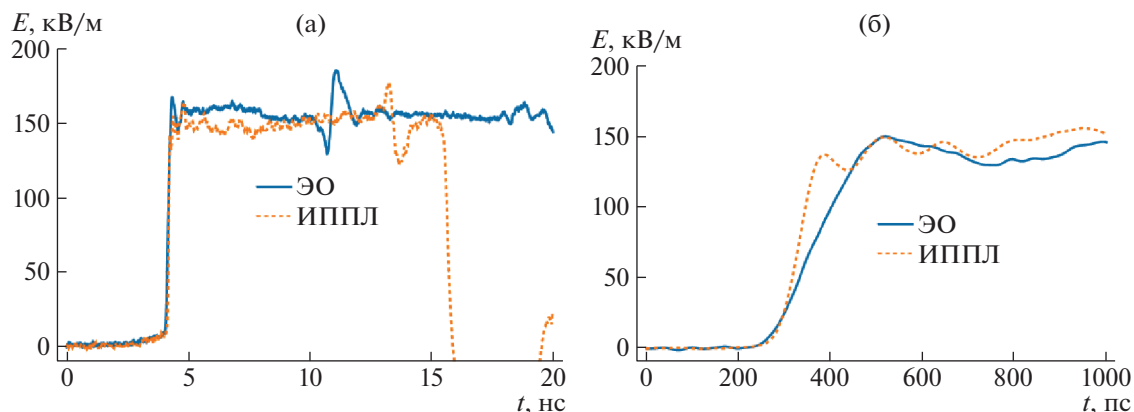


Рис. 4. Осциллограммы напряженности электрического поля, зарегистрированные с помощью полоскового и электрооптического преобразователя: а – на развертке 20 нс; б – на развертке 1 нс.

преобразователь лишен этих недостатков, и корректно отображает отраженную волну. Измеренное время нарастания переходной характеристики электрооптического преобразователя составило 140 пс, что хорошо согласуется с расчетным собственным временем нарастания ЭО-преобразователя, составившего 100 пс. Погрешность измерения напряженности электрического поля с помощью ЭО-датчика составляет не более 10% и определяется преимущественно неравномерностью вершины переходной характеристики и точностью калибровки.

### ВЫВОДЫ

Экспериментально подтверждено, что представленный ЭО-датчик позволяет с приемлемой точностью измерять напряженность и временные параметры мощных импульсных электромагнитных полей с короткими фронтами (150 пс и более). Представленная ЭО-система относительно проста в сборке и эксплуатации, а также стабильна относительно температурных изменений благодаря использованию изотропного ЭО-кристалла. ЭО-датчик позволяет проводить измерения параметров мощных электромагнитных полей в относительно небольших пространствах, практически не искажая поле и не провоцируя электрических пробоев. Аналоговая информация от ЭО-датчика может передаваться на значительные расстояния (до сотни метров) без искажений благодаря использованию оптоволоконных кабелей.

### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение 075-15-2020-790).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Togo H.* Flexibility and Sensitivity Enhancement in Optical Electric-Field Sensor with Bulk Electro-Optic Crystal. Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba, Japan, March 2010.
2. *Bernier M., Gaborit G., Duvillaret L., Paupert A., Lasserre J.-L.* Electric field and temperature measurement using ultra wide bandwidth pigtailed electro-optic probes // *Appl. Opt.* 2008. V. 47. P. 2470–2476.
3. *Gaeremynck Y., Gaborit G., Duvillaret L., Ruaro M., Le-coche F.* Two electric-field components measurement using a 2-port pigtailed electro-optic sensor // *Appl. Phys. Lett.* 2011. V. 99. P. 141102–1–3.
4. *Gaborit G., Jarrige P., Gaeremynck Y., Warzecha A., Bernier M., Lasserre J.-L., Duvillaret L.* Pockels' Effect-Based Probe for UWB and HPEM Measurements. *Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics.* 2014. V. 10. P. 411–421.
5. *Duvillaret L., Rialland S., Coutaz J.* Electro-optic sensors for electric field measurements. I. Theoretical comparison among different modulation techniques // *J. Opt. Soc. Am. B.* 2002. V. 19. P. 2692–2703.
6. *Duvillaret L., Rialland S., Coutaz J.* Electro-optic sensors for electric field measurements. II. Choice of the crystals and complete optimization of their orientation // *J. Opt. Soc. Am. B.* 2002. V. 19. P. 2704–2715.
7. *Fowles G.R.* Introduction to Modern Optics. 2nd ed. Dover Publications, Inc: 31 East 2nd Street, Mineola, N.Y., USA, 1989. P. 33–52.
8. *Sakharov K.Y., Mikheev O.V., Turkin V.A., Sukhov A.V., Dobrotvorsky M.I.* Get 148–2013: State Primary Special Standard of Units of Electric and Magnetic Pulse Field Strengths with Pulse Rise Time in the Range from 0.1 to 10.0 ns // *Measurement Techniques.* 2019. № 10 (61). P. 967–972.  
<https://doi.org/10.1007/s11018-019-01534-z>

## ULTRA-WIDEBAND ELECTRIC FIELD MEASUREMENT SYSTEM USING CdTe-BASED DIELECTRIC FIBER TIP SENSOR

**T. V. Dolmatov<sup>a</sup>, V. V. Bukin<sup>a</sup>, Corresponding Member of the RAS S. G. Garnov<sup>a</sup>, O. A. Gerasimchuk<sup>b</sup>,  
Y. Y. Popovskiy<sup>b</sup>, V. V. Neustruev<sup>b</sup>, K. Y. Sakharov<sup>c</sup>, and O. V. Miheev<sup>c</sup>**

<sup>a</sup>*Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>b</sup>*Dukhov Automatics Research Institute, Moscow, Russia*

<sup>c</sup>*All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, Moscow, Russia*

A relatively simple fiber sensor system for high-power electromagnetic field measurements is presented. The system utilizes an all-dielectric fiber tip sensor head with CdTe electro optic (EO) crystal as an electric field transducer. The fiber sensor of small size converts electric field strength into modulation of light power. The rise time of the EO sensor is measured and evaluated theoretically. The system can be used for ultra-wideband high-power electric field low-intrusive measurements.

*Keywords:* pockels effect, electro-optics, high-power electromagnetic fields, ultra-wideband field measurement