Интернет-журнал «Наукоедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 7, №1 (2015) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol7-1>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/87TVN115.pdf>

DOI: 10.15862/87TVN115 (<http://dx.doi.org/10.15862/87TVN115>)

УДК 537: 621.38

Журавлев Антон Александрович

ОАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания»

Россия, Пермь

Инженер-электроник 3 кат.

E-mail: antonzhuravlev.89@gmail.com

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=643299

Вольхин Игорь Львович

ФГБОУ ВПО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

Физический факультет

Россия, Пермь

Кандидат физико-математических наук, доцент

E-mail: volkhin@psu.ru

Первадчук Владимир Павлович

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Факультет прикладной математики и механики

Россия, Пермь

Зав. кафедрой Прикладной математики

Доктор технических наук, профессор

E-mail: pervadchuk@mail.ru

Измерение характеристик диэлектрического интегрально-оптического сенсора напряженности электрического поля в 10 ГГц диапазоне частот

Аннотация. Статья посвящена измерению характеристик диэлектрических интегрально-оптических сенсоров напряженности электрического поля в сверхвысокочастотном диапазоне длин волн. В качестве материала для изготовления сенсора был использован монокристаллический ниобат лития. Введено понятие чувствительности диэлектрических интегрально-оптических сенсоров напряженности электрического поля. Разработана блок-схема установки для измерения чувствительности, полосы пропускания и рабочей частоты диэлектрического интегрально-оптического сенсора напряженности электрического поля в 10 ГГц диапазоне частот. Изготовлен оригинальный волновод Н-образного сечения асимметричной конструкции с регулярными неоднородностями. Это позволило использовать сверхвысокочастотный генератор малой мощности (1 Вт) для имитации условий распространения СВЧ-волны, излучаемой радиолокационной станцией в свободное пространство: высокая напряженность электрического поля, порядка 100 кВ/м, в режиме бегущей волны в частотном диапазоне 10 ГГц. Была измерена чувствительность, полоса пропускания и рабочая частота сенсора, которые составили 1,79 мкВт·м/кВ, 1,7 ГГц и 10,3 ГГц соответственно. По результатам измерения установлено, что чувствительность на частотах от 9,5 до 10,3 ГГц монотонно возрастает, проходит через максимум на частоте 10,3 ГГц, а затем монотонно убывает до частоты 11,5 ГГц. Спад чувствительности сенсора на границах полосы пропускания связан с неоптимальным соотношением длины волны излучения и геометрическими размерами областей электрооптического взаимодействия сенсора.

Ключевые слова: интегральная оптика; сенсор; напряженность электрического поля; ниобат лития; измерение; чувствительность; полоса пропускания.

Статья подготовлена при финансовой поддержке программы кооперации Высшей школы и организаций, реализующих комплексные проекты в сфере высоких технологий Комплексный проект «Разработка базовой технологии и создание производства фотонных интегральных схем для приборов, систем и комплексов оптоэлектронного навигационного приборостроения» Договор №02.G25.31.0113.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Журавлев А.А., Вольхин И.Л., Первадчук В.П. Измерение характеристик диэлектрического интегрально-оптического сенсора напряженности электрического поля в 10 ГГц диапазоне частот // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №1 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/87TVN115.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/87TVN115

Интегральная оптика является быстроразвивающимся направлением науки, техники и технологии. Создано множество вариантов исполнения сенсоров на основе интегрально-оптических устройств для измерения влажности [1], температуры [2], загрязненности воды [3], анализа состава газов [4], силы электрического тока [5, 6], напряженности электрического поля [7 – 9]. Особенно эффективно использование интегрально-оптических сенсоров в условиях с экстремальными значениями измеряемых величин, в частности на сверхвысоких частотах (СВЧ) для измерения больших напряженностей электрических полей. Особый интерес представляют диэлектрические сенсоры напряженности электрического поля из-за малых вносимых искажений в распределение измеряемого электрического поля и возможности применения в условиях больших напряженностей, например, в составе радарных систем [2, 10]. Монокристаллы ниобата лития являются широко распространенным синтетическим материалом, используемым для создания интегрально-оптических устройств [11]. Поэтому он и был выбран в качестве основы для изготовления интегрально-оптического сенсора напряженности электрического поля.

Авторами настоящей статьи ранее были предложены алгоритмы расчета конструкции диэлектрических интегрально-оптических сенсоров напряженности электрического поля СВЧ-диапазона (СВЧ-ДИОСНЭП) на основе монокристалла ниобата лития [12]. Полученные результаты были использованы при изготовлении опытной партии сенсоров МЗМ-Z-018 на ОАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания». Основными характеристиками таких сенсоров являются чувствительность, полоса пропускания и рабочая частота, которые необходимо измерять экспериментально в производственных условиях для контроля качества. В настоящей работе под величиной чувствительности СВЧ-ДИОСНЭП понимается изменение мощности оптического излучения на выходе СВЧ-ДИОСНЭП при помещении его в электрическое поле напряженностью 100 кВ/м, при условии, что рабочая точка СВЧ-ДИОСНЭП находится в середине линейного участка передаточной характеристики, а мощность оптического излучения на входе равна 100 мВт. Под полосой пропускания – область частот в пределах которой чувствительность СВЧ-ДИОСНЭП изменяется на –3 дБ относительно максимальной; под рабочей частотой – частота, на которую рассчитан сенсор и на которой он имеет максимальную чувствительность.

Проблема состоит в том, что для измерения этих характеристик необходимо создавать высокие напряженности электрического поля (порядка 100 кВ/м) в режиме бегущей волны, имитирующие условия распространения СВЧ-излучения в ближней и дальней зонах радиолокационных станций. Для этого обычно используют мощные СВЧ-генераторы [13], совместно с которыми применяют громоздкие и дорогостоящие безэховые камеры [14] необходимые для минимизации паразитных отражений СВЧ-излучения и защиты обслуживающего персонала от его негативного воздействия. Однако перестройка мощных СВЧ-генераторов по частоте затруднена, что не позволяет проводить измерения полосы пропускания сенсора.

В настоящей работе разработана оригинальная блок-схема установки для измерения основных характеристик диэлектрических интегрально-оптических сенсоров напряженности электрического поля СВЧ-диапазона (см. Рис. 1), указанных выше.

ИП – источник питания, ДЛД – драйвер лазерного диода,
ДТЭП – драйвер термоэлектрического преобразователя, Р – радиатор,
И – источник лазерного излучения, ВОУ – волоконно-оптический усилитель,
В – волноводный тракт, Н – согласованная волноводная нагрузка,
КВП – коаксиально-волноводный переход, К – коаксиальный кабель,
У – усилитель СВЧ-мощности, НО – направленный ответвитель,
Г – генератор СВЧ-сигнала, ДЧ – делитель частоты, ОСЦ – осциллограф,
ОВх – оптический вход, ТГ – вход триггера, ЭВх – электрический вход,
АОК – анализатор оптических компонентов, ЭВых – электрический выход

Рис. 1. Блок-схема установки для исследования электрооптических характеристик СВЧ-ДИОСНЭП (составлено авторами)

Блок-схема экспериментальной установки имеет три функциональные части:

- 1) оптическую для генерации входного оптического излучения СВЧ-ДИОСНЭП;
- 2) СВЧ для создания гармонических колебаний в СВЧ-диапазоне и создания высокой напряженности СВЧ-поля бегущей волны в области расположения чувствительных элементов СВЧ-ДИОСНЭП;
- 3) измерительную для детектирования и контроля мощности оптического сигнала на выходе СВЧ-ДИОСНЭП.

В качестве источника лазерного излучения (И, см. Рис. 1) был выбран узкополосный («одночастотный») лазерный источник Thorlabs SFL1550S, работающий на длине волны 1550

нм. Для стабилизации характеристик в корпусе источника предусмотрено наличие термоэлектрического элемента Пельтье и терморезистора. Для управления мощностью источника лазерного излучения и её стабилизации использовались: драйвер лазерного диода (ДЛД) Thorlabs TLD001 и драйвер термоэлектрического преобразователя (ДТЭП) Thorlabs TTC001. В качестве источника питания (ИП) применялся лабораторный стабилизированный источник GW Instec GPS-4303. Для компенсации оптических потерь на соединителях и в оптических канальных волноводах СВЧ-ДИОСНЭП, а также для достижения мощности оптического излучения $P_{\text{вх}} = 100$ мВт оптическое излучение усиливалось волоконного оптическим усилителем Volius (BOY).

Таким образом, на входе СВЧ-ДИОСНЭП при помощи оптической части установки для исследования электрооптических характеристик создается оптическое излучение с длиной волны $\lambda = 1550$ нм, мощностью 100 мВт стабилизированное по этим двум параметрам во времени.

Для генерации СВЧ-излучения в установке использовался аналоговый генератор сигналов Agilent Technologies E8257D (Г). СВЧ-сигнал с генератора (Г), подавался через направленный ответвитель (НО) по коаксиальному тракту на усилитель СВЧ-мощности (У) и на электрический вход осциллографа (ЭВх) и схему тактирования. Усилитель СВЧ-мощности необходим для компенсации электрических потерь в СВЧ-тракте установки и обеспечения оптимальных условий в области тестирования СВЧ-ДИОСНЭП. В качестве усилителя мощности СВЧ-излучения (У) использовался усилитель Agilent Technologies 83020A. Для передачи СВЧ-энергии из коаксиального тракта в волноводный тракт был использован коаксиально-волноводный переход ПКВ1-13Р-21×10 производства ЗАО НПФ «МИКРАН». В установке для исследования электрооптических характеристик СВЧ-ДИОСНЭП применялась уникальная конструкция волноводного тракта [15].

В установке использовались два взаимодополняющих подхода к измерениям в СВЧ-области спектра: измерения во временной области и измерения в частотной области. Для исследования СВЧ-ДИОСНЭП во временной области применялся стробоскопический осциллограф (ОСЦ) Agilent 86100D с измерительным модулем Agilent 86116C. Для исследования СВЧ-ДИОСНЭП в частотной области использовался анализатор оптических компонентов (АОК) Agilent 4373C.

При исследовании чувствительности СВЧ-ДИОСНЭП, он помещался внутрь Н-образного волновода асимметричной конструкции с регулярными неоднородностями [15] и фиксировался в нем с помощью тонкого диэлектрического скотча. Фотография волновода со снятой крышкой и установленным СВЧ-ДИОСНЭП приведена на Рис. 2.

1 – основание волновода; 2 – крышка волновода; 3 – верхний трапецидальный выступ;
4 – нижний трапецидальный выступ; 5 – прорези для вывода оптического волокна;
6 – регулярные неоднородности; 7 – СВЧ-ДИОСНЭП; 8 – направляющие шпильки;
9 – диэлектрический скотч

Рис. 2. Фотография волновода Н-образного сечения асимметричной конструкции с регулярными неоднородностями со снятой крышкой и установленным СВЧ-ДИОСНЭП (сделана авторами)

Входное и выходное оптические волокна СВЧ-ДИОСНЭП закреплялись с помощью скотча (9) в месте расположения прорезей (5). Положение СВЧ-ДИОСНЭП относительно волновода, а также параллельность нижнего и верхнего выступов обеспечивалась с помощью направляющих шпилек (8), установленных в крышке и основании волновода. Крышка закреплялась при помощи винтов, что обеспечивало минимальные зазоры и хороший электрический контакт между ней и основанием волновода. Волновод с установленным СВЧ-ДИОСНЭП подключался к контрольно-измерительной аппаратуре, как показано на Рис. 2. Исследование электрооптических характеристик сенсора проводилось в два этапа:

- 1) во временной области (Рис. 1 соединения показаны красными линиями);
- 2) в частотной области (Рис. 1 соединения показаны синими линиями).

При измерении чувствительности СВЧ-ДИОСНЭП во временной области на генераторе (Г) устанавливалась частота 10 ГГц и амплитуда +16 дБм. Выходной сигнал генератора дополнительно усиливался усилителем мощности до $P_{\text{вых}}^{\text{эл}} = 1,4$ Вт. Потери в коаксиальном кабеле составляют $\alpha_1 = 1,2$ дБ, а в коаксиально-волноводном переходе $\alpha_2 = 0,3$ дБ (согласно паспортным данным). Таким образом, мощность на входе в Н-образный волновод асимметричной конструкции с регулярными неоднородностями с учетом потерь равна $P_{\text{в}} = 1$ Вт. По оптическому сигналу осциллографа отслеживался отклик СВЧ-ДИОСНЭП на подаваемый СВЧ-сигнал. С помощью встроенных средств осциллографа проводилось измерение размаха $\Delta I_{\text{вых}}$ оптического сигнала.

Чувствительность СВЧ-ДИОСНЭП рассчитывалась по формуле, предложенной нами

$$S = \Delta I_{\text{вых}} / E,$$

где E – напряженность электрического поля в месте расположения чувствительных элементов сенсора. Волновое сопротивление коаксиально-волноводного перехода $R_{\text{КВП}} = 50$ Ом, при этом напряжение на Е-границах волновода:

$$U_{\text{КВП}} = \sqrt{P_{\text{в}} \cdot R_{\text{КВП}}} = \sqrt{1 \cdot 50} = 7,1 \text{ В.}$$

Расстояние между Е-границами волновода равно 10 мм, следовательно, напряженность электрического поля на входе в Н-образный волновод асимметричной конструкции с регулярными неоднородностями равна 7,1 В/см, что соответствует $E = 710$ В/м. Нами были проведены расчеты спектрального хода коэффициентов усиления напряженности электрического поля K_E в волноводе Н-образного сечения асимметричной конструкции с регулярными неоднородностями в области расположения чувствительных элементов сенсора. Результаты расчета приведены на Рис. 3 (черная линия $K_E = F(f)$ волновод без сенсора, красная линия $K_E' = F(f)$ волновод с установленным сенсором).

Рис. 3. Частотный ход коэффициента усиления напряженности электрического поля в волноводе Н-образного сечения асимметричной конструкции с регулярными неоднородностями (выполнен авторами)

Из анализа Рис. 3 следует, что коэффициент усиления напряженности электрического поля в волноводе Н-образного сечения асимметричной конструкции с регулярными неоднородностями в области расположения чувствительных элементов сенсора на частоте 10 ГГц составлял 9. Таким образом, напряженность электрического поля в области расположения чувствительных элементов сенсора составляла 6,4 кВ/м.

Для измерения полосы пропускания СВЧ-ДИОСНЭП генератор перестраивался по частоте от 7,5 до 11,0 ГГц с шагом 100 МГц. Значение разброса $\Delta I_{\text{вых}}$ оптического сигнала в каждой точке заносилось в таблицу, после чего рассчитывалась чувствительность и строился график зависимости чувствительности от частоты $S = F(f)$. Рабочей частотой СВЧ-ДИОСНЭП f_c считалась частота, на которой достигается максимальная чувствительность S . Полоса пропускания определялась на уровне –3 дБ на графике $S = F(f)$.

Результаты исследования характеристик диэлектрического интегрально-оптического сенсора напряженности электрического поля СВЧ-диапазона во временной области представлены на Рис. 4. Осциллограмма электрического сигнала $U = F(t)$ на выходе генератора (Г) обозначена черной линией. Осциллограмма оптического сигнала на выходе СВЧ-ДИОСНЭП $I_{\text{вых}} = F(t)$ изображена красной линией.

Рис. 4. Осциллограммы электрического и оптического сигналов (получены авторами)

На Рис. 5 представлена частотная зависимость чувствительности СВЧ-ДИОСНЭП $S = F(f)$, рассчитанная по методике, описанной в [16–18].

Рис. 5. Частотная зависимость чувствительности СВЧ-ДИОСНЭП (получена авторами)

Из Рис. 5 видно, что полоса пропускания СВЧ-ДИОСНЭП на уровне -3 дБ составляет

$$\Delta f = f_v - f_n = 11,2 - 9,5 = 1,7 \text{ ГГц},$$

где f_v и f_n — верхняя и нижняя границы полосы пропускания соответственно. Максимальная чувствительность СВЧ-ДИОСНЭП достигается на частоте $f_c = 10,3$ ГГц и составляет $S = 1,79$ мкВт·м/кВ.

По результатам измерения установлено, что чувствительность на частотах от 9,5 до 10,3 ГГц монотонно возрастает, проходит через максимум на частоте 10,3 ГГц, а затем монотонно убывает до частоты 11,5 ГГц. Спад чувствительности сенсора на границах полосы пропускания связан с неоптимальным соотношением длины волны излучения и геометрическими размерами областей электрооптического взаимодействия сенсора [17].

В результате выполнения работы была разработана блок-схема установки для измерения характеристик диэлектрического интегрально-оптического сенсора напряженности электрического поля в 10 ГГц диапазоне частот. Изготовлен оригинальный волновод Н-образного сечения асимметричной конструкции с регулярными неоднородностями. Это позволило использовать СВЧ-генератор малой мощности (1 Вт) и создать условия, имитирующие условия распространения СВЧ-волны, излучаемой радиолокационной станцией в свободное пространство (высокая напряженность электрического поля, порядка 100 кВ/м, в режиме бегущей волны в частотном диапазоне 10 ГГц). Была измерена чувствительность, полоса пропускания и рабочая частота сенсоров МЗМ-Z-018 производства ОАО «ПНППК», которые составили 1,79 мкВт·м/кВ, 1,7 ГГц и 10,3 ГГц соответственно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Noor M. Y. M Optical humidity sensor based on air guided photonic crystal fiber / Noor M. Y. M., Skinner I., Peng G. D., Khalili N. // Photonic Sensors. — Vol. 2. — № 3. — 2011. — С. 281–288.
2. Liao C. R. Review of femtosecond laser fabricated fiber Bragg gratings for high temperature sensing / Liao C. R., Wang D. N. // Photonic Sensors. — Vol. 3. — № 2. — 2013. — С. 97–101.
3. Sader E. Design of an optical water pollution sensor using a single-layer guided-mode resonance filter / Sader E., Sayyed-Ahmad A. // Photonic Sensors. — Vol. 3. — № 3. — 2013. — С. 224–230.
4. Борисов А. Г. Газовый оптический сенсор на основе планарного многомодового волновода / Борисов А. Г., Маханько Е. С., Чилинкина Т. Д., Иванова О. М., Крутоверцев С. А. // Известия высших учебных заведений. Электроника. — № 2. — 2008. — С. 61–65.
5. Кострицкий С. М. Волоконно-оптический сенсор тока / Кострицкий С. М., Дикевич А. А., Коркишко Ю. Н., Федоров В. А., Прилуцкий В. Е., Пономарев В. Г., Морев И. В. // Фотон-Экспресс. — № 6. — 2007. — С. 177–178.
6. Long Fei Application of the Pockels effect to electric current measurement / Long Fei, Zhng Jianhuan, Yuan Zhiwei, Xie Chunrong // Optoelectronic devices and integration II. — 2007. — С. 68381H-6.
7. Ogawa O. LiNbO₃ optical waveguide electric field sensor with low temperature dependence / Ogawa O., Watanabe T., Aizawa M., Sowa T., Ichizono S., Ito A. // Optics & Laser technology. — Vol. 27. — № 4. — 1995. — с. xii.
8. Hidaka Naomi Log-periodic dipole antenna array-type optical electric field sensor / Hadaka Naomi, Kobayashi Ken, Sugama Hideaki, Usui Ryo, Tanabe Yoshihiro, Hashimoto Osamu // IEICE Transactions on electronics. — Vol. E88-C. — № 1. — 2005. — с. 98.
9. Dolmatov V. Electro-optical sensor for measuring amplitude-time characteristics the electric field strength of ultra-wideband electromagnetic pulses / Dolmatov V., Brendel V. M., Bukin V. V., Garnov S. V., Loza O. T., Sadovskii S. P., Chizhov P. A. // Physics of wave phenomena. — Vol. 22. — № 4. — 2014. — С. 227–231.
10. Chadderdon S. Improvements in electric-field sensor sensitivity by exploiting a tangential field condition / Chadderdon S, Woodard L, Perry D, Selfridge R. H, Schultz S. M. // Applied Optics. — Vol. 52. — Issue 23. — 2013. — С. 5742–5747.
11. Wong, K. K. Properties of lithium niobate / под ред. K. K. Wong. — London: INSPEC, The Institution of Electrical Engineers, 2002. — 417 с.
12. Журавлев А. А. Метод расчета электрооптических характеристик широкополосного интегрально-оптического модулятора интенсивности оптического излучения / Журавлев А. А., Братишко С. А., Первадчук В. П. // Фотон-Экспресс. — №6 (110). — 2013. — С. 159–160.
13. Gopalakrishnam G. K. Performance and modeling of broadband LiNbO₃ traveling wave optical intensity modulators / Gopalakrishnam G. K., Burns W. K., McElhanon R. W., Bulmer C. H. // Journal of Lightwave Technology. — Vol. 12. — Issue 10. — 1994. — С. 1807–1819.

14. Ameya, M. Anechoic chamber evaluation using microwave optical transceiver in frequency range of 1 GHz to 18 GHz / Ameya, M., Kurokawa, S., Miyazaki, N., Masahito, M., more authors // Wireless Information Technology and Systems (ICWITS): 2010 IEEE International Conference on. — 2010. — С. 1–4.
15. Заявка 2014112876 Российская Федерация, МПК7 В 64 G 1/00. Волновод Н-образного сечения асимметричной конструкции с регулярными неоднородностями / Андреев А. Г., Ермаков В. С., Журавлев А. А., Вольхин И. Л.; заявитель ОАО «ПНППК» – № 2014112876; заявл. 02.04.2014; – 4 с.
16. Журавлев А. А. Методика определения чувствительности интегрально-оптического сенсора напряженности электрического поля высокой частоты / Журавлев А. А., Вольхин И. Л., Шевцов Д. И., Первадчук В. П. // Вестник Пермского университета. Сер.: Физика. — №3 (25). — 2013. — С. 78–82.
17. Anton A. Zhuravlev Applying of microwave asymmetrical double-ridged waveguide for measuring of the integrated optical electrodeless electric field sensor sensitivity / Anton A. Zhuravlev, Igor L. Volkhin, Roman S. Ponomarev, Anna N. Smirnova, Denis I. Shevtsov, Vladimir P. Pervadchuk // Review of Scientific Instruments. — Vol. 85. — №5. — 2014. — с. 054708.
18. Zhuravlev, A.A. Measuring of microwave electric field sensor sensitivity / Zhuravlev, A.A., Volkhin I. L., Kotelnikov, E.A. // Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo), 2014 24th International Crimean Conference. – 7-13 Sept. 2014. – P. 902 – 903.

Рецензент: Шевцов Денис Игоревич, к.ф.-м.н., начальник отдела интегральной оптики и технологий ОАО «ПНППК».

Zhuravlev Anton Aleksandrovich

Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company
Russia, Perm
E-mail: antonzhuravlev.89@gmail.com

Volkhin Igor Lvovich

Perm State University
Russia, Perm
E-mail: volkhin@psu.ru

Pervadchuk Vladimir Pavlovich

Perm National Research Polytechnic University
Russia, Perm
E-mail: pervadchuk@mail.ru

Measurement of integrated optic electrodeless electric field sensor characteristics in 10 GHz frequency range

Abstract. Article devoted to the measurement of the electrodeless electric field integrated-optical sensors characteristics in the microwave range. Lithium niobate single crystal was used as a material for the manufacture of the sensor. The concept of sensitivity of electrodeless electric field integrated-optical sensors was allowed. The block diagram of equipment for measuring of sensitivity, bandwidth and operating frequency in the 10 GHz frequency range was designed. Original asymmetric double-ridged waveguide with regular inhomogeneities was done. This allowed to use the low power (about 1 W) microwave generator for simulation of radar field propagation: electric field intensity about 100 kV/m, traveling wave mode in the frequency range of 10 GHz. As a result sensitivity 1.79 uW·m/kV, bandwidth 1.7 GHz and operation frequency 10.3 GHz was measured. In the frequency range from 9.5 GHz to 10.3 the sensitivity increase monotonically, passes through a maximum at the frequency of 10.3 GHz, and then decreases monotonically to a frequency of 11.5 GHz. Recession of the sensor sensitivity on the borders of the bandwidth associated with sub-optimal ratio of the electric field wavelength and the geometrical dimensions of the polling areas of the sensor.

Keywords: integrated optics; sensor; electric field; lithium niobate; measurement; sensitivity; bandwidth.

REFERENCES

1. Noor M. Y. M Optical humidity sensor based on air guided photonic crystal fiber / Noor M. Y. M., Skinner I., Peng G. D., Khalili N. // Photonic Sensors. — Vol. 2. — № 3. — 2011. — S. 281–288.
2. Liao C. R. Review of femtosecond laser fabricated fiber Bragg gratings for high temperature sensing / Liao C. R., Wang D. N. // Photonic Sensors. — Vol. 3. — № 2. — 2013. — C. 97–101.
3. Sader E. Design of an optical water pollution sensor using a single-layer guided-mode resonance filter / Sader E., Sayyed-Ahmad A. // Photonic Sensors. — Vol. 3. — № 3. — 2013. — C. 224–230.
4. Borisov A. G. Gazovyy opticheskiy sensor na osnove planarnogo mnogomodovogo volnovoda / Borisov A. G., Makhan'ko E. S., Chilinkina T. D., Ivanova O. M., Krutovertsev S. A. // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika. — № 2. — 2008. — S. 61–65.
5. Kostritskiy S. M. Volokonno-opticheskiy sensor toka / Kostritskiy S. M., Dikevich A. A., Korkishko Yu. N., Fedorov V. A., Prilutskiy V. E., Ponomarev V. G., Morev I. V. // Foton-Ekspress. — № 6. — 2007. — S. 177–178.
6. Long Fei Application of the Pockels effect to electric current measurement / Long Fei, Zhng Jianhuan, Yuan Zhiwei, Xie Chunrong // Optoelectronic devices and integration II. — 2007. — S. 68381N-6.
7. Ogawa O. LiNbO₃ optical waveguide electric field sensor with low temperature dependence / Ogawa O., Watanabe T., Aizawa M., Sowa T., Ichizono S., Ito A. // Optics & Laser technology. — Vol. 27. — № 4. — 1995. — s. xii.
8. Hidaka Naomi Log-periodic dipole antenna array-type optical electric field sensor / Hadaka Naomi, Kobayashi Ken, Sugama Hideaki, Usui Ryo, Tanabe Yoshihiro, Hashimoto Osamu // IEICE Transactions on electronics. — Vol. E88-C. — № 1. — 2005. — s. 98.
9. Dolmatov V. Electro-optical sensor for measuring amplitude-time characteristics the electric field strength of ultra-wideband electromagnetic pulses / Dolmatov V., Brendel V. M., Bukin V. V., Garnov S. V., Loza O. T., Sadovskii S. P., Chizhov P. A. // Physics of wave phenomena. — Vol. 22. — № 4. — 2014. — C. 227–231.
10. Chadderdon S. Improvements in electric-field sensor sensitivity by exploiting a tangential field condition / Chadderdon S, Woodard L, Perry D, Selfridge R. H, Schultz S. M. // Applied Optics. — Vol. 52. — Issue 23. — 2013. — S. 5742–5747.
11. Wong, K. K. Properties of lithium niobate / pod red. K. K. Wong. — London: INSPEC, The Institution of Electrical Engineers, 2002. — 417 s.
12. Zhuravlev A. A. Metod rascheta elektroopticheskikh kharakteristik shirokopolosnogo integral'no-opticheskogo modulyatora intensivnosti opticheskogo izlucheniya / Zhuravlev A. A., Bratishko S. A., Pervadchuk V. P. // Foton-Ekspress. — №6 (110). — 2013. — S. 159–160.
13. Gopalakrishnam G. K. Performance and modeling of broadband LiNbO₃ traveling wave optical intensity modulators / Gopalakrishnam G. K., Burns W. K., McElhanon R. W., Bulmer C. H. // Journal of Lightwave Technology. — Vol. 12. — Issue 10. — 1994. — S. 1807–1819.

14. Ameya, M. Anechoic chamber evaluation using microwave optical transceiver in frequency range of 1 GHz to 18 GHz / Ameya, M., Kurokawa, S., Miyazaki, N., Masahito, M., more authors // Wireless Information Technology and Systems (ICWITS): 2010 IEEE International Conference on. — 2010. — S. 1–4.
15. Zayavka 2014112876 Rossiyskaya Federatsiya, MPK7 V 64 G 1/00. Volnovod N-obraznogo secheniya asimmetrichnoy konstruktssii s regul'yarnymi neodnorodnostyami / Andreev A. G., Ermakov V. S., Zhuravlev A. A., Vol'khin I. L.; zayavitel' OAO «PNPPK» – № 2014112876; zayavl. 02.04.2014; – 4 s.
16. Zhuravlev A. A. Metodika opredeleniya chuvstvitel'nosti integral'no-opticheskogo sensora napryazhennosti elektricheskogo polya vysokoy chastoty / Zhuravlev A. A., Vol'khin I. L., Shevtsov D. I., Pervadchuk V. P. // Vestnik Permskogo universiteta. Ser.: Fizika. — №3 (25). — 2013. — S. 78–82.
17. Anton A. Zhuravlev Applying of microwave asymmetrical double-ridged waveguide for measuring of the integrated optical electrodeless electric field sensor sensitivity / Anton A. Zhuravlev, Igor L. Volkhin, Roman S. Ponomarev, Anna N. Smirnova, Denis I. Shevtsov, Vladimir P. Pervadchuk // Review of Scientific Instruments. — Vol. 85. — №5. — 2014. — c. 054708.
18. Zhuravlev, A.A. Measuring of microwave electric field sensor sensitivity / Zhuravlev, A.A., Volkhin I. L., Kotelnikov, E.A. // Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo), 2014 24th International Crimean Conference. – 7-13 Sept. 2014. – P. 902 – 903.