

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2020.4-4.378>

УДК 681.586.5::614.825

ДАТЧИК НАПРЯЖЕННОСТИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЩЕЛЕВЫХ ВОЛНОВОДОВ С ЗАПОЛНЕНИЕМ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИМ ПОЛИМЕРОМ

Гончаренко И.А., Рябцев В.Н., Ильюшонок А.В., Навроцкий О.Д.

Цель. Разработать структуру и принципы функционирования оптического датчика напряженности высокочастотных внешних электрических полей.

Методы. На основе метода линий рассчитаны постоянные распространения и распределения полей мод полосковых волноводов с вертикальными и горизонтальными щелями, заполненными электрооптическим полимером SEO125.

Результаты. Предложена структура и принципы функционирования датчика высокочастотных внешних электрических полей на базе кольцевых микрорезонаторов на основе волноводов с горизонтальной и вертикальной щелями, заполненными электрооптическим полимером. Датчик позволяет измерять переменные электрические поля с частотой до 10 МГц. Чувствительность датчика ограничена параметрами фотоприемника, в частности, величиной темнового тока. При использовании фотоприемника, рассмотренного в работе, датчик позволяет измерять изменения напряженности электрического поля порядка 30 В/м.

Область применения исследований. Определение пожароопасных и поражающих проявлений электрического поля при ликвидации чрезвычайных ситуаций вблизи установок, находящихся под напряжением.

Ключевые слова: кольцевой микрорезонатор, щелевой волновод, оптический датчик, электрооптический полимер, эффективный показатель преломления, напряженность электрического поля.

(Поступила в редакцию 12 октября 2020 г.)

Введение

Измерения электрических полей играют значительную роль в различных областях науки и техники, например при мониторинге электрических полей в медицинской аппаратуре, баллистическом контроле, измерениях электромагнитной совместимости, тестировании СВЧ интегральных схем, обнаружении направленных атак энергетического оружия. Датчики электрических полей весьма перспективны для использования при детектировании СВЧ-волн высокой мощности, электромагнитных импульсов, анализе внешних электромагнитных помех, проверке электромагнитной совместимости, исследованиях влияния электромагнитного излучения на здоровье человека и т.д.

Сведения о напряженности электрических полей требуются и в других областях – в нефтяной (при перекачке, транспортировке и хранении нефтепродуктов), химической, текстильной и электронной промышленности (т. е. там, где возникает вероятность появления электрических зарядов, приводящих к взрыву или пожарам). Подобные датчики полезны Министерству по чрезвычайным ситуациям, например, при ликвидации последствий разрушений зданий и сооружений, где аварии на коммунально-энергетических сетях могут стать причиной поражения электрическим током, возникновения пожаров вследствие коротких замыканий и возгораний газа. Применение подобных устройств бесконтактного измерения напряженности электрических полей позволит работникам МЧС и аварийно-спасательным службам оперативно и качественно проводить разведку местности, выявлять потенциально опасные участки, способствует успешной ликвидации чрезвычайных ситуаций и уменьшению материального ущерба. Обычные системы измерения электромагнитных волн используют активные металлические зонды, которые вызывают возмущения измеряемых электромагнитных волн и делают датчики очень чувствительными к электромагнитным шумам.

Оптические датчики электрического поля имеют значительные преимущества перед их электронными аналогами благодаря малым размерам, меньшему весу, более высокой чувствительности, широкому спектральному диапазону, защищенности канала передачи данных от воздействия помех [1]. Наибольшей чувствительностью обладают оптические датчики электрического поля на базе интерферометров Маха – Цендера или кольцевых резонаторов [2; 3].

В работе рассматривается структура и принцип работы оптического датчика высокочастотных электромагнитных полей на основе микрокольцевых резонаторов на базе оптических волноводов с горизонтальной и вертикальной щелью, заполненной электрооптическим полимером (ЭОП).

Структурная схема и принципы функционирования датчика. Основу датчика составляет замкнутый кольцевой резонатор микронных размеров на основе полосковых волноводов.

Коэффициент пропускания резонатора T (относительная интенсивность сигнала на выходе резонатора) в стационарном состоянии определяется выражением [4]:

$$T = \frac{E_1^2}{E_0^2} = \frac{k_1^2 k_2^2}{1 - 2r_1 r_2 \alpha \cos \varphi + r_1^2 r_2^2 \alpha^2}, \quad (1)$$

где E_0 и E_1 – амплитуды оптического сигнала соответственно на входе и выходе резонатора, В/м; r_1, r_2 – коэффициенты передачи поля соответственно на входном и выходном волноводах; k_1, k_2 – коэффициенты связи кольцевого волновода резонатора с входным и выходным волноводами; $r_1^2 + k_1^2 = 1, r_2^2 + k_2^2 = 1$; α – коэффициент потерь оптической волны в резонаторе; φ – набег фазы сигнала в резонаторе:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} L_p n_{\text{эф}}; \quad (2)$$

$n_{\text{эф}}$ – эффективный показатель преломления моды волновода; λ – длина волны излучения, м; $L_p = 2\pi R$ – геометрическая длина резонатора, м; R – радиус резонатора, м. Таким образом, коэффициент пропускания является функцией эффективного показателя преломления моды волновода резонатора $n_{\text{эф}}$.

Резонансная длина волны кольцевого резонатора зависит от эффективного (волноводного) показателя преломления $n_{\text{эф}}$ моды щелевого волновода как:

$$\lambda_{\text{рез}} = \frac{L_p}{m} n_{\text{эф}}, \quad (3)$$

где m – порядок резонаторной моды ($m = 1, 2, \dots$).

Любые изменения эффективного (волноводного) показателя преломления приводят к изменению резонансной длины волны. В результате интенсивность выходного сигнала на несущей длине волны, совпадающей с резонансной длиной волны невозмущенного резонатора, изменяется.

Микрокольцевой резонатор может быть создан на базе щелевого волновода. В этом случае щель в таком волноводе можно заполнить веществом, чувствительным к определенному параметру, и использовать в качестве датчиков. Для измерения электрических полей наиболее перспективными выглядят оптические схемы с использованием электрооптических материалов. Ранее нами была рассмотрена схема датчика электрического поля с использованием жидких кристаллов (ЖК) [3].

Щелевой волновод состоит из двух полосок материала с высоким показателем преломления, разделенных областью (щелью) материала с низким показателем преломления, размеры щели меньше длины волны. Такие щели могут располагаться вертикально [5; 6]

либо горизонтально [7; 8] в виде слоистой структуры. Поскольку электрические поля неразрывны на границе раздела материалов с разными показателями преломления, можно достичь большой оптической интенсивности в области щели. Щель в таком волноводе можно заполнить веществом, чувствительным к определенному параметру. Поле моды в области щели относительно велико, поэтому изменения показателя преломления материала щели сильно влияют на направляющие свойства волновода. Таким образом, можно увеличить чувствительность датчика.

Если щелевой волновод с заполнением ЭОП внести во внешнее электрическое поле, показатель преломления ЭОП изменится пропорционально величине электрического поля на величину:

$$\Delta n = n_0 - \frac{1}{2} n_0^3 r_{33} E_{\text{ext}}, \quad (4)$$

где n_0 – показатель преломления полимера в отсутствие электрического поля; r_{33} – электрооптический коэффициент полимера, м/В; E_{ext} – напряженность приложенного внешнего электрического поля, В/м. Для полимера SEO125 для длины волны 1550 нм показатель преломления равен $n_0 = 1,63$, а оценочная величина электрооптического коэффициента составляет $r_{33} = 100$ пм/В [9]. Это, в свою очередь, приведет к изменению эффективного показателя преломления направляемой моды щелевого волновода.

Изменения $n_{\text{эф}}$ приводят к изменениям интенсивности выходного сигнала на несущей длине волны, совпадающей с резонансной длиной волны невозмущенного резонатора. Таким образом, измеряя интенсивность выходного оптического сигнала на выходе резонатора, можно определять напряженность внешнего электрического поля.

Структурная схема микрокольцевого резонатора на основе волноводов с вертикальной (а) и горизонтальной (б) щелью с заполнением ЭОП представлена на рисунке 1. Щелевой волновод выполняется из Si_3N_4 или кремния и расположен на кремниевой подложке. Для того чтобы получить условие полного внутреннего отражения, между волноводом и подложкой располагается буферный слой SiO_2 с показателем преломления, меньшим показателя преломления волновода. Электрооптический полимер SEO125 заполняет вертикальную или горизонтальную щель кольцевого волновода. Для ввода и вывода оптического сигнала из кольцевого резонатора используются прямые оптические волноводы, связанные с кольцевым волноводом через спадающие поля и расположенные на той же подложке. Общая ширина щелевого волновода составляла 1000 нм, высота – 300 нм.

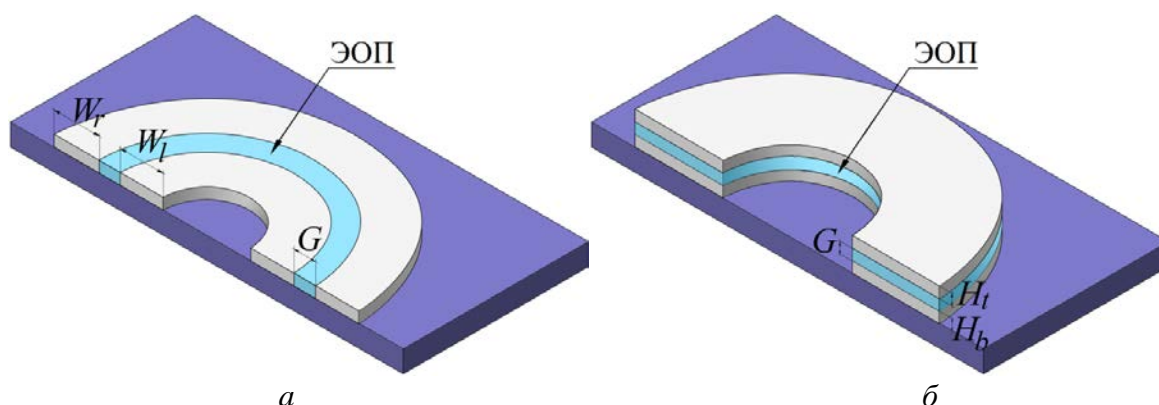


Рисунок 1. – Структуры микрокольцевого резонатора на основе волноводов с вертикальной (а) и горизонтальной (б) щелью с заполнением ЭОП, где G – ширина щели, W_r , W_l – ширина правой и левой полоски, H_t , H_b – толщина верхней и нижней полоски щелевого волновода

Быстродействие датчика. Быстродействие устройства определяется временем установления стационарного режима в кольцевом микрорезонаторе и временем отклика электрооптического материала.

Амплитуда электрического поля E_1 , циркулирующего в резонаторе оптического сигнала, в момент времени t определяется выражением [10]:

$$E_1(t) = -jk_1 E_0 + r_1 r_2 \alpha E_1(t - \tau) e^{j\varphi}, \quad (5)$$

где τ – время полного прохождения оптического сигнала по резонатору, с.

Изменение интенсивности оптического сигнала $E_1 E_1^*$ на выходе кольцевого резонатора с радиусом изгиба 32 мкм представлено на рисунке 2. Как следует из рисунка, через определенный временной интервал интенсивность оптического сигнала в резонаторе достигает насыщения, и в резонаторе устанавливается стационарный режим. Время установления стационарного режима составляет 25 пс. Это соответствует частоте порядка 40 МГц.

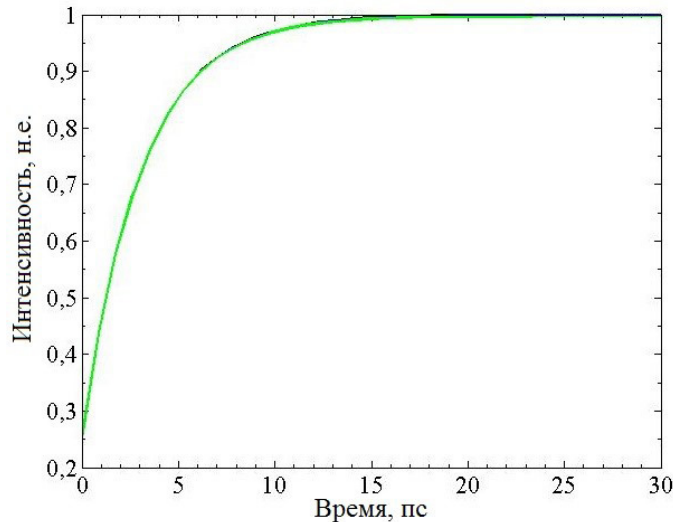


Рисунок 2. – Зависимость интенсивности оптического сигнала в волноводном кольцевом резонаторе с радиусом 32 мкм и коэффициентом связи 0,5 от времени

Время отклика ЖК может быть рассчитано с помощью выражений из работы [11]. При напряжении порядка 10 В и ширине слоя ЖК (ширине щели), равном 100 и 300 нм, время отклика для нематического жидкого кристалла 5СВ составляет порядка 0,1 мс. Таким образом, датчики на базе кольцевых микрорезонаторов на основе щелевых волноводов с ЖК заполнением позволяют измерять переменные электрические поля с частотами лишь до десятков кГц, поскольку их быстродействие ограничено временем отклика ЖК.

Для того чтобы увеличить быстродействие датчика, вместо ЖК можно использовать электрооптические полимеры. Такие материалы позволяют измерять переменные электрические поля с частотой 1–10 ГГц [9; 12]. В частности, в работе [9] экспериментально продемонстрирована возможность определения напряженности переменного электрического поля с частотой до 8,4 ГГц с использованием активного органического полимера SEO125. Такой полимер обладает малыми оптическими потерями для излучения с длиной волны 1550 нм, большим электрооптическим коэффициентом и хорошей временной стабильностью.

Чувствительность и измерительный диапазон датчика. Расчет эффективного показателя преломления и распределение полей мод изогнутых щелевых волноводов с заполнением ЭОП проводился с помощью метода линий [13; 14], модифицированного для исследуемой структуры. При проведении расчетов не учитывались потери на входе/выходе оптического излучения в волновод и потери на излучение.

Зависимость нормализованного эффективного показателя преломления основных мод волноводов с вертикальной и горизонтальной щелями, заполненными ЭОП, от приложенного электрического поля представлена на рисунке 3. Как видно из рисунков, эффективный показатель преломления моды волновода и, соответственно, оптическая длина кольцевого

резонатора изменяются пропорционально величине напряженности электрического поля, воздействующего на резонатор.

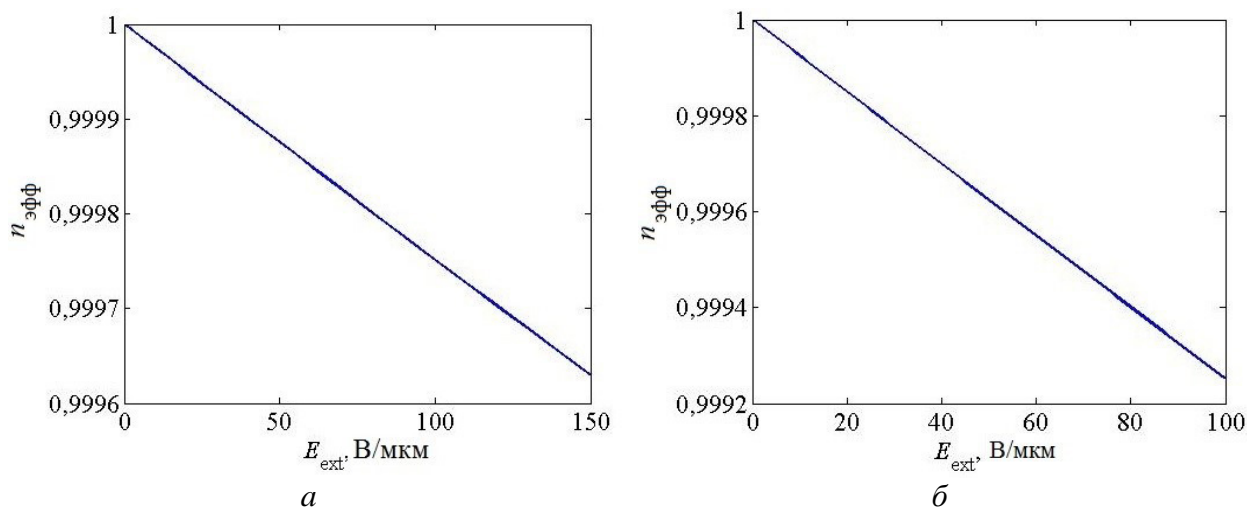


Рисунок 3. – Зависимость нормализованного эффективного показателя преломления основной моды изогнутого волновода с вертикальной (а) и горизонтальной (б) щелями с заполнением ЭОП от напряженности внешнего электрического поля

Для оценки чувствительности датчика проанализирована зависимость интенсивности сигнала на выходе резонатора от напряженности внешнего электрического поля при различных параметрах резонатора. В качестве начальных параметров оптического излучения использовались параметры полупроводникового лазера FU-68PDF-V510M с выходной оптической мощностью 15 мВт на длине волны 1,5 мкм. Оптическое излучение на выходе из кольцевого резонатора преобразовывалось в электрический сигнал р-і-п фотодиодом ФД161 на основе соединения InGaAs. Токовая чувствительность такого фотодиода на рабочей длине волны 1,5 мкм не менее 0,8 А/Вт, темновой ток – не более 20 нА.

На рисунке 4 представлена зависимость сигнала на выходе резонатора на базе изогнутого волновода с вертикальной щелью с заполнением ЭОП при различных радиусах резонатора от напряженности внешнего электрического поля.

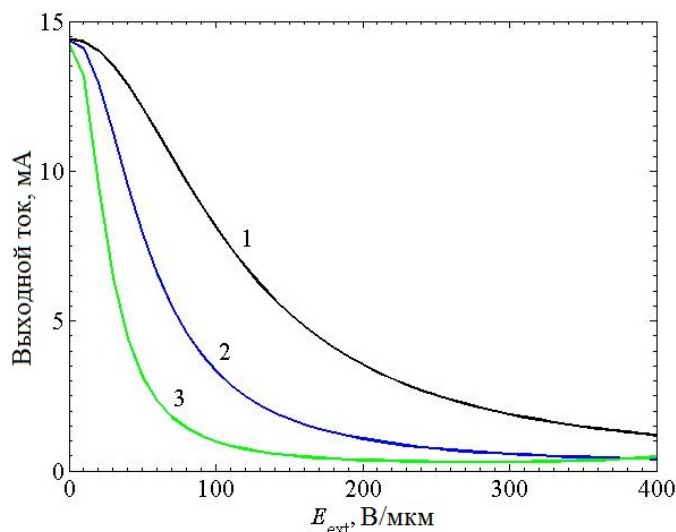


Рисунок 4. – Зависимость сигнала на выходе кольцевого резонатора на основе волновода с вертикальной щелью с заполнением ЭОП от напряженности электрического поля. Ширина щели 400 нм, радиус изгиба волновода 16 (1), 32 (2), 64 (3) мкм

Наклон кривых, описывающих зависимость выходного сигнала от интенсивности воздействия электрического поля, характеризует чувствительность датчика. Чувствительность и измерительный диапазон датчика на основе волновода с вертикальной щелью с заполнением ЭОП с шириной щели 400 нм и различными радиусами резонатора представлены в таблице 1. Как видно из рисунка и таблицы, чувствительность микрорезонатора к электрическому полю увеличивается при увеличении радиуса резонатора (его оптической длины). При этом диапазон измерения уменьшается. Датчики на основе вертикальных щелевых волноводов с заполнением ЭОП могут быть использованы для измерения внешних электрических полей в пределах от 10 до 3×10^8 В/м. Изменение напряженности электрического поля на 1 В/м вызывает изменение тока фотодиода в таком датчике примерно на 0,2 нА (чувствительность датчика равна 0,2 нА/(В/м)). Поскольку темновой ток фотоприемника порядка 20 нА, очевидно, что такой датчик не позволяет отслеживать изменения напряженности внешнего электрического поля менее чем на 100 В/м. Таким образом, датчик на основе волновода с вертикальной щелью может быть использован для измерений напряженности электрического поля с точностью до 200–500 В/м.

Таблица 1. – Параметры датчика на основе волновода с вертикальной щелью с заполнением ЭОП с шириной щели 400 нм

Радиус резонатора, мкм	16	32	64
Диапазон измерений, В/мкм	10...300	10...130	10...50
Чувствительность, нА/(В/м)	0,043	0,102	0,283

На рисунке 5 показана зависимость сигнала на выходе кольцевого микрорезонатора на базе волновода с горизонтальной щелью, заполненной ЭОП, от напряженности внешнего электрического поля. Чувствительность и измерительный диапазон датчика на основе волновода с горизонтальной щелью с заполнением ЭОП с высотой щели 400 нм и различными радиусами резонатора представлены в таблице 2.

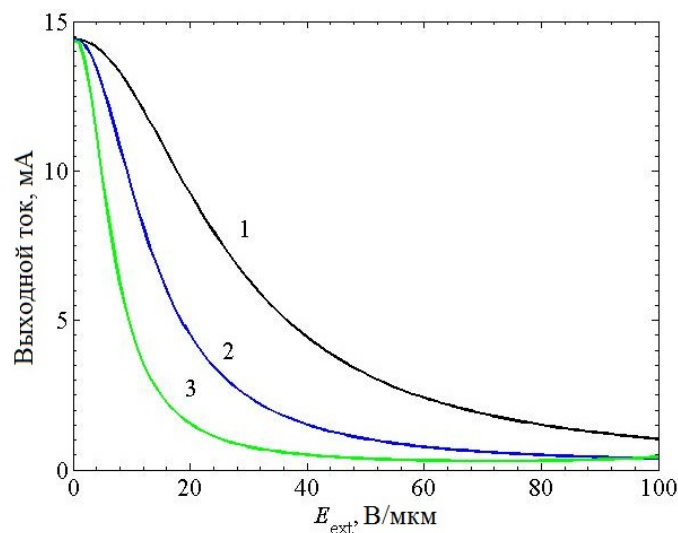


Рисунок 5. – Зависимость сигнала на выходе кольцевого резонатора на основе волновода с горизонтальной щелью с заполнением ЭОП от напряженности электрического поля. Высота щели 400 нм, радиус резонатора 16 (1), 32 (2), 64 (3) мкм

Таблица 2. – Параметры датчика на основе волновода с горизонтальной щелью с заполнением ЭОП с высотой щели 400 нм

Радиус резонатора, мкм	16	32	64
Диапазон измерений, В/мкм	1...47	1...24	1...12
Чувствительность, нА/(В/м)	0,237	0,474	0,982

Как видно из рисунка и таблицы, датчики на основе горизонтальных щелевых волноводов более чувствительны к электрическому полю, чем вертикальные щелевые волноводы. Возможная причина этого – большие размеры горизонтальной щели и, следовательно, большее количество заполняющего ее ЭОП. При изменении напряженности электрического поля на 1 В/м ток фотодиода в таком датчике изменяется примерно на 1 нА (чувствительность датчика равна 1 нА/(В/м)). Таким образом, датчик позволяет отслеживать изменение интенсивности электрического поля порядка 30–50 В/м. Однако ширина диапазона измерений значительно уже в сравнении с датчиком с вертикальной щелью (порядка 2×10^7 В/м). При этом диапазон измерений может быть смещен выбором параметров резонатора или несущей длины волны оптического излучения. Таким образом, волноводы с вертикальной щелью можно использовать для грубого определения напряженности электрического поля, а резонаторы с горизонтально-щелевыми волноводами – для более точного ее измерения.

Заключение

В работе предложена структура и принципы функционирования датчика высокочастотных внешних электрических полей на базе кольцевых микрорезонаторов на основе волноводов с горизонтальной и вертикальной щелями, заполненными ЭОП. Использование резонатора позволяет повысить чувствительность датчика. Горизонтально-щелевые волноводы более чувствительны к напряженности электрического поля, чем волноводы с вертикальной щелью. Однако волноводы с вертикальной щелью позволяют определять электрические поля в большем диапазоне величин напряженности. Таким образом, датчик может быть сконструирован одновременно из резонаторов на базе вертикально- и горизонтально-щелевых волноводов. Волноводы с вертикальной щелью можно использовать для грубого определения напряженности электрического поля (десятичные разряды), а резонаторы с горизонтально-щелевыми волноводами – для более точного ее измерения (единичные разряды).

Датчик позволяет измерять переменные электрические поля с частотой до 10 МГц. Чувствительность датчика ограничена параметрами фотоприемника, в частности величиной темнового тока. При использовании фотоприемника, рассмотренного в работе, датчик позволяет измерять изменения напряженности электрического поля порядка 30 В/м. Чувствительность датчика с ЭОП на порядок хуже, чем у аналогичного устройства с использованием ЖК [3]. Это объясняется тем, что изменения показателя ЭОП под воздействием электрического поля на несколько порядков меньше, чем у ЖК. Однако устройство с ЭОП позволяет измерять поля с частотой до 10 МГц, тогда как датчик с ЖК – лишь до десятка кГц. Тем не менее разрешение предложенного устройства значительно выше, чем разрешение датчиков на основе нерезонансных структур и сравнимо с разрешением датчиков, использующих резонансные структуры (антенны, кольцевые резонаторы).

Датчик позволяет определять пожароопасные и поражающие проявления электрического поля при ликвидации чрезвычайных ситуаций вблизи установок, находящихся под напряжением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Passaro, V.M.N. Electromagnetic field photonic sensors / V.M.N. Passaro, F. Dell'Olio, F. De Leonardis // *Progress in Quantum Electronics*. – 2006. – Vol. 30, iss. 2–3. – P. 45–73. DOI: 10.1016/j.pquantelec.2006.08.001.
2. Tajima, K. Development of optical isotropic E-field sensor operating more than 10GHz using Mach-Zehnder interferometers / K. Tajima, R. Kobayashi, N. Kuwabara, M. Tokuda // *IEICE Trans. Electron.* – 2002. – Vol. 85, iss. 4. – P. 961–968.
3. Goncharenko, I. Electric field sensing with liquid-crystal-filled slot waveguide microring resonators / I. Goncharenko, M. Marciniak, V. Reabtsev // *Applied Optics*. – 2017. – Vol. 56, iss. 27. – P. 7629–7635. DOI: 10.1364/AO.56.007629.
4. Rabiei, P. Polymer micro-ring filters and modulator / P. Rabiei, W.H. Steier, Cheng Zhang, L.R. Dalton // *J. Lightwave Technology*. – 2002. – Vol. 20, iss. 11. – P. 1968–1974. DOI: 10.1109/JLT.2002.803058.

5. Almeida, V.R. Guiding and confining light in void nanostructure / V.R. Almeida, Q. Xu, C. A. Barrios, M. Lipson // *Optics Letters*. – 2004. – Vol. 29, iss. 11. – P. 1209–1211. DOI: 10.1364/OL.29.001209.
6. Passaro, V.M.N. Guided-wave optical biosensors / V.M.N. Passaro, F. Dell’Olio, B. Casamassima, F. De Leonardis // *Sensors*. – 2007. – Vol. 7. – P. 508–536. DOI: 10.3390/s7040508.
7. Cheng, N.C. Horizontal slot waveguides for polarization branching control / N.C. Cheng, Y.F. Ma, P.H. Fu, C.C. Chin, D.W. Huang // *Applied Optics*. – 2015. – Vol. 54, iss. 3. – P. 436–443. DOI: 10.1364/AO.54.000436.
8. Viphavakit, C. Optimization of a horizontal slot waveguide biosensor to detect DNA hybridization / C. Viphavakit, M. Komodromos, C. Themistos, W.S. Mohammed, K. Kalli, B.M.A. Rahman // *Applied Optics*. – 2015. – Vol. 54, iss. 15. – P. 4881–4888. DOI: 10.1364/AO.54.004881.
9. Zhang, X. Integrated photonic electromagnetic field sensor based on broadband bowtie antenna coupled silicon organic hybrid modulator / X. Zhang, A. Hosseini, H. Subbaraman, S. Wang, Q. Zhan, J. Luo, A. K.-Y. Jen, R.T. Chen // *J. Lightwave Technology*. – 2014. – Vol. 32, iss. 20. – P. 3774–3784. DOI: 10.1109/JLT.2014.2319152.
10. Ibrahim, T.A. Lightwave switching in semiconductor microring devices by free carrier injection / T.A. Ibrahim, W. Cao, Y. Kim, J. Li, J. Goldhar, P.-T. Ho, C.H. Lee // *J. Lightwave Technol.* – 2003. – Vol. 21, iss. 12. – P. 2997–3003. DOI: 10.1109/JLT.2003.819800.
11. Shenoy, M.R. An electrically-controlled nematic liquid crystal core waveguide with a low switching threshold / M.R. Shenoy, M. Sharma, A. Sinha // *J. Lightwave Technology*. – 2015. – Vol. 33, iss. 10. – P. 1948–1953. DOI: 10.1109/JLT.2015.2404337.
12. Lin, Che-Yun. High dynamic range electric field sensor for electromagnetic pulse detection / Che-Yun Lin, Alan X. Wang, Beom Suk Lee, Xingyu Zhang, Ray T. Chen // *Optics Express*. – 2011. – Vol. 19, iss. 18. – P.17372–17377. DOI: 10.1364/OE.19.017372.
13. Pregla, R. The method of lines for the analysis of dielectric waveguide bends / R. Pregla // *J. Lightwave Technology*. – 1996. – Vol. 14, iss.4. – P. 634–639. DOI: 10.1109/50.491403.
14. Гончаренко, И.А. Метод расчета изогнутых микроструктурированных волноводов с несколькими сердцевинами / И.А. Гончаренко, В.Н. Рябцев // *Весті НАН Беларусі. Серыя фіз.-мат. навук*. – 2015. – № 4. – С. 87–95.

Датчик напряженности высокочастотных электрических полей на основе щелевых волноводов с заполнением электрооптическим полимером

Sensor of high frequency electric fields intensity on the base of slot waveguides with electro-optic polymer filling

Гончаренко Игорь Андреевич

доктор физико-математических наук,
профессор

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра естественных
наук, профессор

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: igor02@tut.by

ORCID: 0000-0002-8063-8068

Igor' A. Goncharenko

Grand PhD in Physics and Mathematics Sciences,
Professor

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Natural Sciences, Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

e-mail: igor02@tut.by

ORCID: 0000-0002-8063-8068

Рябцев Виталий Николаевич

кандидат технических наук

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра автоматиче-
ских систем безопасности, начальник кафедры

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: v.reabtsev@ucp.by

ORCID: 0000-0002-2830-591X

Vitaly N. Ryabtsev

PhD in Technical Sciences

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Automatic Safety Systems,
Head of the Chair

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

e-mail: v.reabtsev@ucp.by

ORCID: 0000-0002-2830-591X

Ильюшонко Александр Васильевич

кандидат физико-математических наук,
доцент

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра естественных
наук, заведующий кафедрой

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: iav@tut.by

ORCID: 0000-0001-7523-4483

Alexander V. Il'yushonok

PhD in Physics and Mathematics Sciences,
Associate Professor

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Natural Sciences, Head of the Chair

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

e-mail: iav@tut.by

ORCID: 0000-0001-7523-4483

Навроцкий Олег Дмитриевич

кандидат технических наук

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
автоматических систем безопасности, доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: onav@tut.by

ORCID: 0000-0002-4137-2519

Oleg D. Navrotskiy

PhD in Technical Sciences

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Automatic Safety Systems,
Associate Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

e-mail: onav@tut.by

ORCID: 0000-0002-4137-2519

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2020.4-4.378>

SENSOR OF HIGH FREQUENCY ELECTRIC FIELDS INTENSITY ON THE BASE OF SLOT WAVEGUIDES WITH ELECTRO-OPTIC POLYMER FILLING

Goncharenko I.A., Reabtsev V.N., Il'yushonok A.V., Navrotskiy O.D.

Purpose. Development of the structure and operation principles of high frequency electric fields intensity optical sensor.

Methods. Method of lines was used for calculation of propagation constants and mode electric fields distribution of strip waveguides with vertical and horizontal slots filled with electro-optical polymer SEO125.

Findings. The structure and operation principles of high frequency electric fields intensity sensor on the base of slot waveguides with vertical and horizontal slots filled with electro-optical polymer are proposed. Sensor makes it possible measuring the variable electric fields with frequencies up to 10 MHz. The sensor sensitivity order is of 30 V/m.

Application field of research. Determination of fire-dangerous and injurious factors of electric field during emergencies elimination.

Keywords: ring microresonator, slot waveguide, optical sensor, electro-optical polymer, effective index, electric field intensity.

(The date of submitting: October 12, 2020)

REFERENCES

1. Passaro V.M.N., Dell'Olio F., Leonardis F. De. Electromagnetic field photonic sensors. *Progress in Quantum Electronics*, 2006. Vol. 30, Iss. 2–3. P. 45–73. DOI: 10.1016/j.pquantelec.2006.08.001.
2. Tajima K., Kobayashi R., Kuwabara N., Tokuda M. Development of optical isotropic E-field sensor operating more than 10GHz using Mach-Zehnder interferometers. *IEICE Trans. Electron*, 2002. Vol. 85, Iss. 4. P. 961–968.
3. Goncharenko I., Marciniak M., Reabtsev V. Electric field sensing with liquid-crystal-filled slot waveguide microring resonators. *Applied Optics*, 2017. Vol. 56, Iss. 27. P. 7629–7635. DOI: 10.1364/AO.56.007629.
4. Rabiei P., Steier W.H., Zhang Cheng, Dalton L.R. Polymer micro-ring filters and modulator. *J. Lightwave Technology*, 2002. Vol. 20, Iss. 11. P. 1968–1974. DOI: 10.1109/JLT.2002.803058.
5. Almeida V.R., Xu Q., Barrios C.A., Lipson M. Guiding and confining light in void nanostructure. *Optics Letters*, 2004. Vol. 29, Iss. 11. P. 1209–1211. DOI: 10.1364/OL.29.001209.
6. Passaro V.M.N., Dell'Olio F., Casamassima B., Leonardis F. De. Guided-wave optical biosensors. *Sensors*, 2007. Vol. 7. P. 508–536. DOI: 10.3390/s7040508.
7. Cheng N.C., Ma Y. F., Fu P. H., Chin C. C., Huang D.W. Horizontal slot waveguides for polarization branching control. *Applied Optics*, 2015. Vol. 54, Iss. 3. P. 436–443. DOI: 10.1364/AO.54.000436.
8. Viphavakit C., Komodromos M., Themistos C., Mohammed W. S., Kalli K., Rahman B. M. A. Optimization of a horizontal slot waveguide biosensor to detect DNA hybridization. *Applied Optics*, 2015. Vol. 54, iss. 15. P. 4881–4888. DOI: 10.1364/AO.54.004881.
9. Zhang X., Hosseini A., Subbaraman H., Wang S., Zhan Q., Luo J., Jen A. K.-Y., Chen R. T. Integrated photonic electromagnetic field sensor based on broadband bowtie antenna coupled silicon organic hybrid modulator. *J. Lightwave Technology*, 2014. Vol. 32, Iss. 20. P. 3774–3784. DOI: 10.1109/JLT.2014.2319152.
10. Ibrahim T.A., Cao W., Kim Y., Li J., Goldhar J., Ho P.-T., Lee C.H. Lightwave switching in semiconductor microring devices by free carrier injection. *J. Lightwave Technol*, 2003. Vol. 21, Iss. 12. P. 2997–3003. DOI: 10.1109/JLT.2003.819800.
11. Shenoy M.R., Sharma M., Sinha A. An electrically-controlled nematic liquid crystal core waveguide with a low switching threshold. *J. Lightwave Technology*, 2015. Vol. 33, Iss. 10. P. 1948–1953. DOI: 10.1109/JLT.2015.2404337.
12. Lin Che-Yun., Wang Alan X., Lee Beom Suk, Zhang Xingyu, Chen Ray T. High dynamic range electric field sensor for electromagnetic pulse detection. *Optics Express*, 2011. Vol. 19, Iss. 18. P.17372–17377. DOI: 10.1364/OE.19.017372.

13. Pregla R. The method of lines for the analysis of dielectric waveguide bends. *J. Lightwave Technology*, 1996. Vol. 14, Iss. 4. P. 634–639. DOI: 10.1109/50.491403.
14. Goncharenko I.A., Ryabtsev V.N. Metod rascheta izognutykh mikrostrukturirovannykh volnovodov s neskol'kimi serdtsevinami [Method for calculating bent microstructured multi-core waveguides and]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics Series*, 2015. No. 4. Pp. 87–95. (rus)