

Научная статья

УДК: 681.586.5

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-12-56-61>

Измерение напряжённости высокочастотных электрических полей: применение кольцевого волновода с двумя заполненными электрооптическим полимером щелями

Игорь Андреевич Гончаренко¹, Виталий Николаевич Рябцев²✉

^{1, 2} Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь

¹igor02@tut.by, <https://orcid.org/0000-0002-8063-8068>

²v.reabtsev@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-2830-591X>

Аннотация. Рассмотрена задача повышения чувствительности измерительного преобразователя высокочастотных внешних электрических полей. Показано, что решить эту задачу можно путём применения кольцевого волновода с двумя горизонтальными или вертикальными щелями, заполненными электрооптическим полимером. Рассмотрена структура измерительного преобразователя кольцевого волновода с двумя горизонтальными или вертикальными щелями. В волноводах с двумя щелями достигается большая интенсивность оптического излучения в области щелей по сравнению с волноводами с одной щелью. Определены значения оптимальных расстояний между щелями и их ширины, при которых достигается максимальная чувствительность измерительного преобразователя. В результате использования активного органического полимера SEO125 и волноводов с двумя щелями рассматриваемый преобразователь позволяет измерять напряжённость переменных электрических полей частотой 0–10 ГГц в диапазоне 150–16·10⁶ В/м с разрешающей способностью до 150 В/м. Измерительный преобразователь можно использовать для детектирования высокочастотных волн, электромагнитных импульсов, а также анализа внешних электромагнитных помех, диагностики высокочастотных электронных схем.

Ключевые слова: кольцевой микрорезонатор, щелевой волновод, измерительный преобразователь, электрооптический полимер, эффективный показатель преломления, напряжённость электрического поля

Для цитирования: Гончаренко И. А., Рябцев В. Н. Измерение напряжённости высокочастотных электрических полей: применение кольцевого волновода с двумя заполненными электрооптическим полимером щелями // Измерительная техника. 2021. № 12. С. 56–61.
<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-12-56-61>

Measurement of the intensity of high frequency electric field: application of ring waveguide with two slots filled with electro-optic polymer

Igor A. Goncharenko¹, Vitaly N. Reabtsev²✉

^{1, 2} University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

¹igor02@tut.by, <https://orcid.org/0000-0002-8063-8068>

²v.reabtsev@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-2830-591X>

Abstract. The possibility of increasing the sensitivity of measurement transducer of the high frequency external electric field is analyzed. The increasing is possible by using the ring waveguides with two vertical and horizontal slots filled with electro-optic polymer. The structure of the measurement transducer is considered. In waveguides with two slots the intensity of propagating optical radiation in the slot region is higher than in single slot waveguides. The values of optimal slot width and separation are determined, which make it possible to achieve the maximal transducer sensitivity. The measurement transducer allows measuring the alternating electric fields with the frequency from 0 to 10 GHz in the range from 150 to 16·10⁶ V/m with the resolution up to 150 V/m due to using the active organic polymer SEO125 and double slot waveguide. The measurement transducer can be applied for detecting the high-frequency waves electromagnetic pulses, analyses of external electromagnetic interference and diagnosis of high-frequency electronic circuits.

Keywords: ring microresonator, slot waveguide, measurement transducer, electro-optic polymer, effective index, electric field intensity

Введение. В области электромагнитных исследований выявление характеристик высокочастотных электрических полей является важным методом оценки эффективности электромагнитной защиты [1–3]. Датчики электрических

полей весьма перспективны для использования при детектировании мощных сверхвысокочастотных (СВЧ) волн, электромагнитных импульсов, а также при анализе внешних электромагнитных помех, проверке электромагнитной

совместимости, диагностике высокочастотных электронных схем, исследовании влияния электромагнитного излучения на здоровье человека и т. д. [4–6]. В обычных системах измерения электромагнитных волн используются активные металлические зонды, которые вызывают возмущения измеряемых электромагнитных волн, в результате такие датчики чувствительны к электромагнитным шумам [7]. С точки зрения защищённости от электромагнитных помех перспективными являются электрооптические методы, основанные на преобразовании измеряемых электрических величин в параметры оптического излучения и применении оптических каналов связи для передачи измерительной информации из зоны высокого напряжения в низковольтную часть измерительного устройства. Кроме того, преимуществами этих методов являются высокое быстродействие, надёжная естественная электрическая изоляция между высоковольтной и вторичной измерительными цепями вследствие их полной электрической развязки [5].

По надёжности, простоте конструкции и компактности датчики на основе волноводных структур превосходят датчики на основе объёмных оптических элементов [8–11]. Наибольшей чувствительностью обладают оптические датчики электрического поля на базе интерферометров Маха-Цендера или кольцевых резонаторов [10, 12–14].

Датчик электрических полей на основе микрокольцевых резонаторов с использованием оптических волноводов с горизонтальной и вертикальной щелями, заполненными жидким кристаллом, позволяет измерять напряжённость электрического поля с разрешающей способностью 1 В/м в диапазоне 1–10⁶ В/м [14]. Однако такие датчики не позволяют измерять напряжённость переменных электрических полей с частотами более 100 кГц, поскольку быстродействие датчика ограничено временем отклика жидкого кристалла.

Быстродействие датчика можно повысить, если применить электрооптические полимеры (ЭОП). В работе [9] экспериментально продемонстрирована возможность определения напряжённости переменного электрического поля с частотой до 8,4 ГГц с использованием активного органического полимера SEO125.

В работе [15] рассмотрена схема измерительного преобразователя на основе кольцевого волновода с одной щелью, который обладает малой чувствительностью. Предложенный преобразователь позволяет измерять напряжённость электрического поля с разрешением порядка 300 В/м при отношении сигнал/шум 10, что на порядок меньше, чем у аналогичного устройства с использованием жидкого кристалла [14].

Цель настоящей работы – повышение чувствительности измерительного преобразователя высокочастотных электрических полей на основе микрокольцевых резонаторов за счёт использования оптических волноводов с двумя горизонтальными или вертикальными щелями, заполненными ЭОП, и оптимизация параметров волноводов для достижения максимальной чувствительности.

Принцип работы измерительного преобразователя.

Схема измерительного преобразователя на основе волновода с вертикальными щелями и распределение поля моды в поперечном сечении волновода представлены на рис. 1, а. Основу измерительного преобразователя составляет замкнутый кольцевой резонатор микрометровых размеров на базе оптических полосковых волноводов с двумя горизонтальными или вертикальными щелями. Структуры

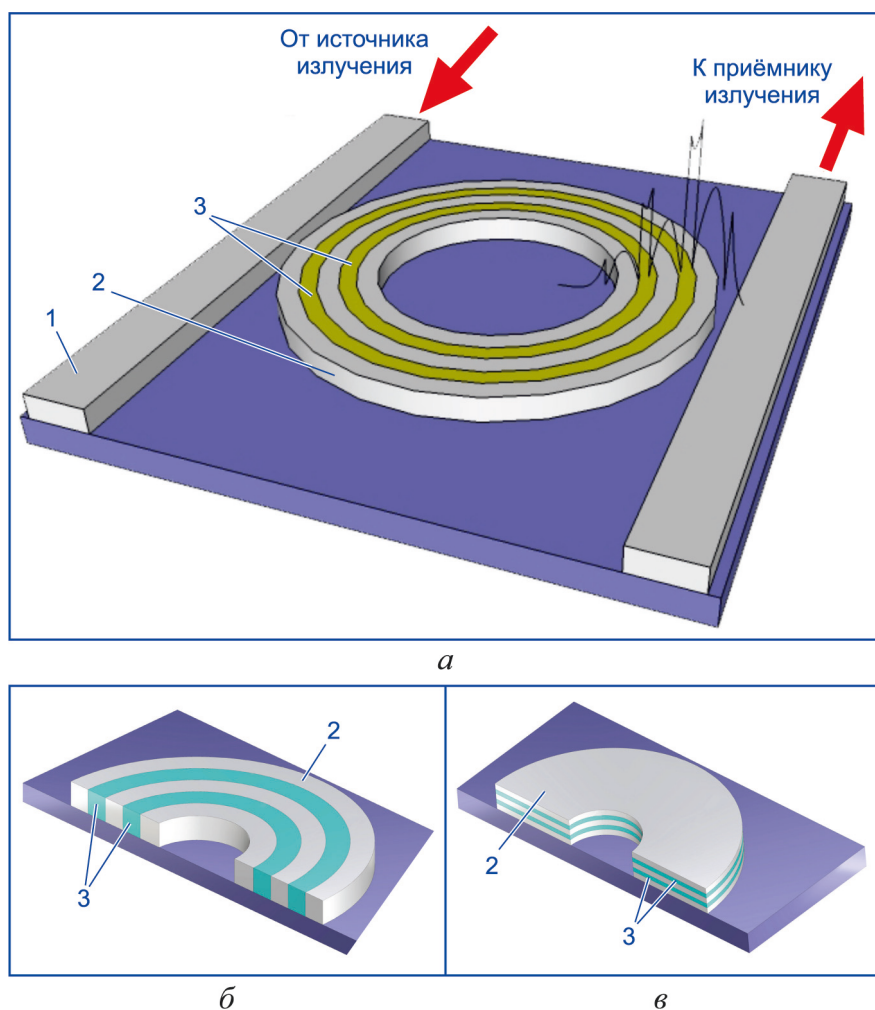


Рис. 1. Схема измерительного преобразователя на основе волновода с вертикальными щелями и распределение поля моды в поперечном сечении волновода (а); структуры кольцевых волноводов с двумя вертикальными (б) и горизонтальными (в) щелями, заполненными ЭОП:

1 – полосковые волноводы; 2 – кольцевой волновод; 3 – щели, заполненные ЭОП

Fig. 1. Structural diagram of the measurement transducer on the base of waveguide with vertical slots and transverse mode field distribution (a). Structures of the ring waveguides with double vertical (b) and horizontal (c) slots filled with electro-optic polymer: 1 – strip waveguides; 2 – ring waveguide; 3 – electro-optic polymer filled slots

кольцевого волновода с вертикальными и горизонтальными щелями показаны в разрезе на рис. 1, б, в. Для ввода оптического излучения в резонатор и вывода из него используются прямые полосковые волноводы, соединённые с волноводом резонатора за счёт спадающих полей. Для измерения внешних электрических полей щель волновода заполнена активным органическим полимером SEO125. Такой полимер обладает большим электрооптическим коэффициентом, хорошей временной стабильностью и малыми оптическими потерями при излучении длиной волны 1550 нм [9]. Излучение длиной волны 1550 нм, так называемое «третье

окно прозрачности», является основным в волноводных оптических устройствах и оптической связи.

Если щелевой волновод с заполнением ЭОП внести во внешнее электрическое поле, то показатель преломления n ЭОП изменится пропорционально электрическому полю:

$$n = n_0 - n_0^3 r_{33} E_{\text{вн}} / 2,$$

где n_0 – показатель преломления полимера в отсутствии электрического поля; r_{33} – электрооптический коэффициент полимера; $E_{\text{вн}}$ – напряжённость приложенного внешнего электрического поля [16].

Для полимера SEO125 показатель преломления n_0 на длине волны 1550 нм равен 1,63, а электрооптический коэффициент r_{33} – 100 пм/В [9]. Изменение показателя преломления ЭОП, в свою очередь, приведёт к изменению эффективного показателя преломления $n_{\text{эфф}}$ направляемой моды щелевого волновода.

Быстродействие измерительного преобразователя определяется временем переключения кольцевого микрорезонатора и временем отклика электрооптического материала при изменении напряжённости внешнего электрического поля. За время переключения кольцевого микрорезонатора принимается время, за которое оптический сигнал на выходе резонатора достигает постоянного значения (время установления стационарного режима). Время установления стационарного режима в кольцевом волноводом радиусом изгиба 32 мкм составляет примерно 25 пс, что соответствует частоте 40 ГГц [17]. В то же время электрооптические полимеры позволяют оценивать переменные электрические поля частотой 1–10 ГГц [9, 18]. Таким образом, быстродействие устройства ограничивается временем отклика ЭОП.

Оптимизация параметров измерительного преобразователя. Авторы настоящей статьи оценили чувствительность и диапазон измерений измерительного преобразователя при различных значениях ширины щелей и расстояния между ними для волноводов с двумя вертикальными и горизонтальными щелями, заполненными ЭОП.

Для оценки чувствительности измерительного преобразователя проанализирована зависимость интенсивности сигнала на выходе резонатора от напряжённости внешнего электрического поля при различных параметрах резонатора. Наклон кривой, описывающей данную зависимость, характеризует чувствительность преобразователя. В качестве источника оптического излучения использовали полупроводниковый лазер FU-68PDF-V510M выходной оптической мощностью 15 мВт на длине волны 1550 нм. Оптическое излучение на выходе из кольцевого резонатора преобразовывалось в электрический сигнал $p-i-n$ -фотодиодом ФД161 на основе соединения InGaAs. Токовая чувствительность фотодиода на рабочей длине волны 1550 нм не менее 0,8 А/Вт, темновой ток – не более 20 нА [14].

Расчёт эффективного показателя преломления и распределение полей мод изогнутых щелевых волноводов с заполнением ЭОП проводили с помощью модифицированного для исследуемой структуры метода линий [19, 20].

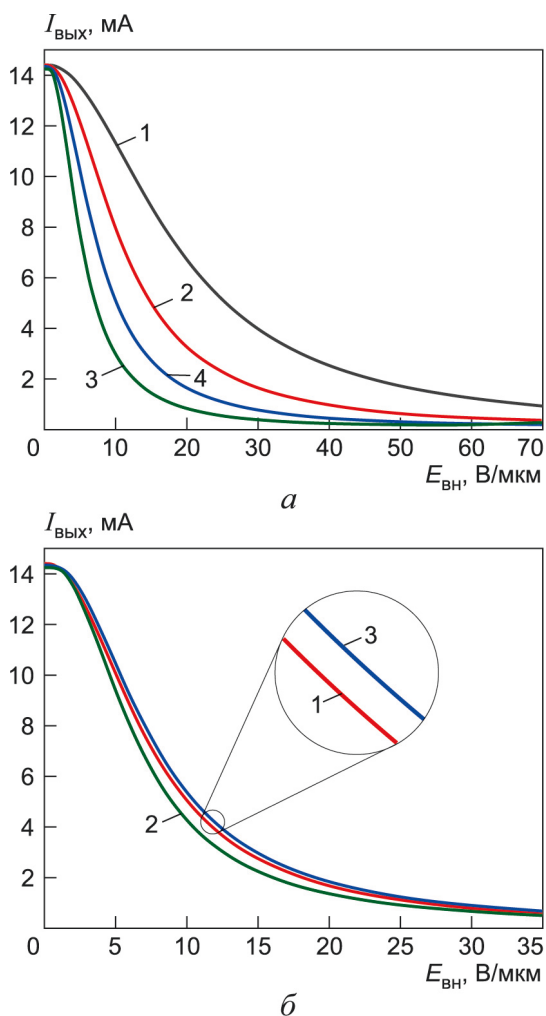


Рис. 2. Зависимость силы тока фотодиода $I_{\text{вых}}$ на выходе резонаторов на основе волноводов с двумя заполненными ЭОП вертикальными (а) и горизонтальными (б) щелями шириной 100 нм каждая от напряжённости $E_{\text{вн}}$ внешнего электрического поля: а – расстояние между щелями 100; 200; 300; 400 нм – соответственно кривые 1–4; б – расстояние между щелями 50; 100; 150 нм – соответственно кривые 1–3

Fig. 2. Dependence of the current strength of photodetector I_{out} on output of the resonators based on vertical (a) and horizontal (b) double slot waveguides with each slot width 100 nm with electro-optic polymer filling on external electric field intensity E_{ext} : а – slot separation 100, 200, 300 and 400 nm – curves 1–4 respectively; б – slot separation 50, 100 and 150 nm – curves 1–3 respectively

В [21] показано, что чувствительность измерительного преобразователя на основе волновода с двумя щелями выше, чем преобразователя на основе волновода с одной щелью при одинаковом заполнении ЭОП. Данная закономерность характерна как для горизонтально-щелевых, так и для вертикально-щелевых волноводов.

Для оценки влияния расстояния между щелями на чувствительность и диапазон измерений преобразователя рассчитаны интенсивности сигнала на выходе микрокольцевого резонатора на основе волноводов с постоянной шириной щелей и различным расстоянием между ними.

В качестве примера на рис. 2, *а* представлена зависимость сигналов на выходе резонаторов на основе волноводов с двумя вертикальными щелями от напряжённости внешнего электрического поля. Ширина каждой щели 100 нм, расстояние между щелями 100; 200; 300; 400 нм. На рис. 2, *б* показана подобная зависимость для резонаторов на основе волноводов с двумя горизонтальными щелями шириной 100 нм каждая и расстоянием между ними 50; 100; 150 нм. Согласно рис. 2, *а* наибольшей чувствительностью к изменениям напряжённости внешнего электрического поля ($1,25 \text{ мА} \cdot \text{мкВ}^{-1}$) обладают преобразователи на основе волноводов с расстоянием между вертикальными щелями порядка 300 нм. Уточнённые расчёты показывают, что оптимальное расстояние между щелями в волноводе составляет 330 нм. При этом чувствительность преобразователей с расстоянием между щелями 300–350 нм варьируется в диапазоне $1,25\text{--}1,29 \text{ мА} \cdot \text{мкВ}^{-1}$ т. е. различается на пренебрежимо малое значение, что указывает на устойчивость структуры кольцевого резонатора с двумя вертикальными щелями к несовершенству его изготовления.

Для волноводов, ширина каждой из двух вертикальных щелей которых составляет 25; 50 и 150 нм, максимальная чувствительность достигается при расстоянии между щелями 300, 320 и 335 нм соответственно.

Как следует из рис. 2, *б*, наибольшей чувствительностью к изменениям напряжённости внешнего электрического поля (порядка $1,11 \text{ мА} \cdot \text{мкВ}^{-1}$) обладают преобразователи на основе волноводов с расстоянием между горизонтальными щелями 100 нм. Уточнённые расчёты показывают, что такое расстояние между щелями в волноводе является оптимальным. При этом чувствительность преобразователей с расстоянием между щелями 80–120 нм различается пренебрежимо мало ($0,02 \text{ мА} \cdot \text{мкВ}^{-1}$), что указывает на устойчивость структуры кольцевого резонатора с двумя горизонтальными щелями к несовершенству его изготовления.

Для волноводов с шириной каждой из двух горизонтальных щелей 50; 150; 200 нм максимальная чувствительность достигается на расстоянии между щелями 90; 100; 105 нм соответственно.

Дальнейшего повышения чувствительности измерительного преобразователя можно добиться варьированием шириной щелей.

На рис. 3 представлены интенсивности сигналов на выходе кольцевых резонаторов на основе волноводов с заполненными ЭОП вертикальными и горизонтальными щелями

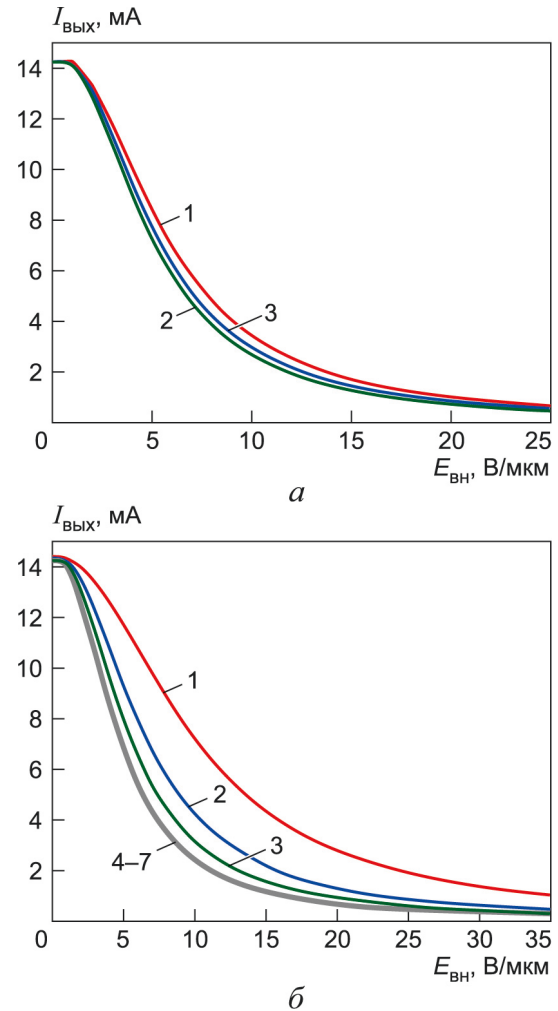


Рис. 3. Зависимость силы тока фотодиода $I_{\text{вых}}$ на выходе резонаторов на основе волноводов с двумя заполненными ЭОП вертикальными (*а*) и горизонтальными (*б*) щелями от напряжённости $E_{\text{вн}}$ внешнего электрического поля:

а – расстояние между щелями 300 нм, ширина каждой щели 25; 50; 100 нм – соответственно кривые 1–3; *б* – расстояние между щелями 100 нм, ширина каждой щели 50; 100; 150; 200; 220; 240; 260 нм – соответственно кривые 1–7

Fig. 3. Dependence of the current strength of photodetector I_{out} on output of the resonators based on vertical (*a*) and horizontal (*b*) double slot waveguides with electro-optic polymer filling on external electric field intensity E_{ext} :

a – slot separation 300 nm, each slot width 25, 50 and 100 nm – curves 1–3 respectively; *b* – slot separation 100 nm, each slot width 50, 100, 150, 200, 220, 240 and 260 nm – curves 1–7 respectively

различной ширины и оптимальным расстоянием между щелями 300 нм при различных значениях напряжённости внешнего электрического поля. Максимальной чувствительностью к изменению напряжённости внешнего электрического поля ($1,27 \text{ мА} \cdot \text{мкВ}^{-1}$) обладают измерительные преобразователи на основе волноводов с шириной каждой из двух вертикальных щелей 50 нм (см. рис. 3, *а*). При этом отличие чувствительности преобразователей с шириной каждой из двух щелей 50–80 нм пренебрежимо мало ($0,005 \text{ мА} \cdot \text{мкВ}^{-1}$), что также указывает на устойчивость анализируемой структуры

к несовершенству изготовления. Таким образом, чувствительность измерительного преобразователя на базе кольцевого резонатора радиусом 32 мкм на основе волноводов с двумя вертикальными щелями с заполнением ЭОП при оптимальных значениях ширины щелей и расстояния между ними может достигать $1,30 \text{ мА} \cdot \text{мкм} \cdot \text{В}^{-1}$. Изменение напряжённости электрического поля на 1 В/м вызывает изменения тока фотодиода в таком преобразователе примерно на 1,30 нА. Поскольку темновой ток фотоприёмника составляет порядка 20 нА, то такой преобразователь не позволяет отслеживать изменения напряжённости внешнего электрического поля менее чем на 150 В/м (при соотношении сигнал-шум 10). При этом диапазон измерений напряжённости внешних электрических полей находится в пределах $150\text{--}16 \cdot 10^6 \text{ В/м}$.

Из рис. 3, б следует, что чувствительность измерительного преобразователя на базе кольцевого резонатора радиусом 32 мкм на основе волноводов с двумя горизонтальными щелями к вариациям напряжённости внешнего электрического поля повышается при увеличении ширины щелей. Увеличение ширины каждой из двух щелей (начиная от 200 нм) приводит к незначительному изменению чувствительности преобразователя. При ширине каждой из двух щелей порядка 260 нм чувствительность достигает практически предельного значения $1,32 \text{ мА} \cdot \text{мкм} \cdot \text{В}^{-1}$. Изменение напряжённости электрического поля на 1 В/м вызывает изменения тока фотодиода примерно на 1,32 нА. Таким образом, измерительный преобразователь на основе волновода с двумя горизонтальными щелями с заполнением ЭОП можно использовать для измерений напряжённости внешних электрических полей с разрешающей способностью 150 В/м в диапазоне $150\text{--}16 \cdot 10^6 \text{ В/м}$.

Заключение. Использование оптических волноводов с двумя вертикальными или горизонтальными щелями, заполненными электрооптическим полимером, позволяет повысить чувствительность измерительного преобразователя напряжённости внешних высокочастотных электрических полей на базе микрокольцевых резонаторов. Максимальная чувствительность $1,29 \text{ мА} \cdot \text{мкм} \cdot \text{В}^{-1}$ преобразователя на основе волноводов с двумя вертикальными щелями достигается при ширине щелей 50 нм и расстоянии между ними 330 нм. Для волноводов с двумя горизонтальными щелями максимальная чувствительность $1,32 \text{ мА} \cdot \text{мкм} \cdot \text{В}^{-1}$ измерительного преобразователя достигается при ширине щелей 260 нм и расстоянии между ними 100 нм. При оптимальных значениях ширины каждой щели и расстояния между ними измерительный преобразователь позволяет измерять напряжённость внешнего электрического поля с разрешающей способностью 150 В/м при отношении сигнал/шум 10. При этом диапазон измерений составляет $150\text{--}16 \cdot 10^6 \text{ В/м}$.

Список источников

1. Bieler M., Hein G., Pierz K., Siegner U., Koch M., *Applied Physics Letters*, 2005, vol. 87, no. 4, pp. 042102–042104. <https://doi.org/10.1063/1.2000333>

2. Chunyang Han, Fangxing Lv, Chen Sun, and Hui Ding, *Optics Letters*, 2015, vol. 40, no. 16, pp. 3683–3686. <https://doi.org/10.1364/OL.40.003683>
3. Pfeifer T., Heiliger H.-M., Löffler T., Ohlhoff C., Meyer C., Lupke G., Roskos H. G., Kurz H., *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1996, vol. 2, no. 3, pp. 586–604. <https://doi.org/10.1109/2944.571758>
4. Bottauscio O., Chiampi M., Crotti G., Giordano D., Wang W., Zilberti L., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2013, vol. 62, no. 1, pp. 1436–1442. <https://doi.org/10.1109/TIM.2012.2230812>
5. Passaro V. M. N., Dell'Olio F., De Leonardis F., *Progress in Quantum Electronics*, 2006, vol. 30, no. 2–3, pp. 45–73. <https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2006.08.001>
6. Ilchenko V. S., Savchenkov A. A., Matsko A. B., Maleki L., *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, vol. 14, no. 11, pp. 1602–1604. <https://doi.org/10.1109/LPT.2002.803916>
7. Yong Zhao, Ya-nan Zhang, Ri-qing Lv, Jin Li, *Journal of Lightwave Technology*, 2017, vol. 35, no. 16, pp. 3440–3446. <https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2576500>
8. Musab A. M. Al-Tarawni, A. Ashrif A. Bakar, Ahmad Rifqi Md Zain, Mou'ad A. Tarawneh, Sahrim Hj. Ahmad, *Optical Engineering*, 2017, vol. 56, no. 10, 107105. <https://doi.org/10.1117/1.OE.56.10.107105>
9. Zhang X., Hosseini A., Subbaraman H., Wang S., Zhan Q., Luo J., Jen A. K.-Y., Chen R. T., *Journal of Lightwave Technology*, 2014, vol. 32, no. 20, pp. 3774–3784. <https://doi.org/10.1109/JLT.2014.2319152>
10. Zhang J., Chen F., Sun B., *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, vol. 26, no. 3, pp. 275–277. <https://doi.org/10.1109/LPT.2013.2292567>
11. Park D. H., Pagan V. R., Murphy T. E., Luo J., Jen A. K.-Y., Herman W. N., *Optics Express*, 2015, vol. 23, no. 7, pp. 9464–9476. <https://doi.org/10.1364/OE.23.009464>
12. Tajima K., Kobayashi R., Kuwabara N., Tokuda M., Development of Optical Isotropic E-Field Sensor Operating More than 10 GHz Using Mach-Zehnder Interferometers, *IEICE Transactions on Electronics*, 2002, vol. E85C, no. 4, pp. 961–968.
13. Chen L., Reano R. M., *Optics Express*, 2012, vol. 20, no. 4, pp. 4032–4038. <https://doi.org/10.1364/OE.20.004032>
14. Гончаренко И. А., Рябцев В. Н. Измерение напряжённости электрических полей с помощью кольцевых резонаторов на базе щелевых волноводов с жидкокристаллическим заполнением // Измерительная техника. 2018. № 1. С. 41–45. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2018-1-41-45>
15. Гончаренко И. А., Рябцев В. Н., Ильюшенок А. В., Навроцкий О. Д. Датчик напряжённости высокочастотных электрических полей на основе щелевых волноводов с заполнением электрооптическим полимером // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2020. Т. 4, № 4. С. 378–388. <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2020.4-4.378>
16. Seng F., Yang Z., King R., Shumway L., Stan N., Hammond A., Warnick K. F., Schultz S., *Applied Optics*, 2017, vol. 56, no. 17, pp. 4911–4916. <https://doi.org/10.1364/AO.56.004911>
17. Goncharenko I. A., Esman A. K., Kuleshov V. K., Pilipovich V. A., *Optics Communications*, 2006, vol. 257, no. 1, pp. 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2005.07.024>

18. Lin C.-Y., Wang A. X., Lee B. S., Zhang X., Chen R. T., *Optics Express*, 2011, vol. 19, no. 18, pp. 17372–17377. <https://doi.org/10.1364/OE.19.017372>

19. Pregla R., *Journal of Lightwave Technology*, 1996, vol. 14, no. 4, pp. 634–639. <https://doi.org/10.1109/50.491403>

20. Goncharenko I. A., Helfert S. F., Pregla R., *International Journal of Electronics and Communications (AEÜ)*, 2005, vol. 59, no. 3, pp. 185–191. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2004.11.012>

21. Гончаренко И. А., Ильющонок А. В., Рябцев В. Н. Датчик напряженности высокочастотных электрических полей на основе оптических волноводов с несколькими щелями // Материалы 13-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение-2020», Минск, Республика Беларусь, 18–20 ноября 2020. Минск: БНТУ, 2020. С. 28–30.

References

1. Bieler M., Hein G., Pierz K., Siegner U., Koch M., *Applied Physics Letters*, 2005, vol. 87, no. 4, pp. 042102–042104. <https://doi.org/10.1063/1.2000333>

2. Chunyang Han, Fangxing Lv, Chen Sun, and Hui Ding, *Optics Letters*, 2015, vol. 40, no. 16, pp. 3683–3686. <https://doi.org/10.1364/OL.40.003683>

3. Pfeifer T., Heiliger H.-M., Löffler T., Ohlhoff C., Meyer C., Lupke G., Roskos H. G., Kurz H., *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1996, vol. 2, no. 3, pp. 586–604. <https://doi.org/10.1109/2944.571758>

4. Bottauscio O., Chiampi M., Crotti G., Giordano D., Wang W., Zilberti L., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2013, vol. 62, no. 1, pp. 1436–1442. <https://doi.org/10.1109/TIM.2012.2230812>

5. Passaro V. M. N., Dell'Olio F., De Leonardis F., *Progress in Quantum Electronics*, 2006, vol. 30, no. 2–3, pp. 45–73. <https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2006.08.001>

6. Ilchenko V. S., Savchenkov A. A., Matsko A. B., Maleki L., *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, vol. 14, no. 11, pp. 1602–1604. <https://doi.org/10.1109/LPT.2002.803916>

7. Yong Zhao, Ya-nan Zhang, Ri-qing Lv, Jin Li, *Journal of Lightwave Technology*, 2017, vol. 35, no. 16, pp. 3440–3446. <https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2576500>

8. Musab A. M. Al-Tarawni, A. Ashrif A. Bakar, Ahmad Rifqi Md Zain, Mou'ad A. Tarawneh, Sahrim Hj. Ahmad, *Optical Engineering*, 2017, vol. 56, no. 10, 107105. <https://doi.org/10.1117/1.OE.56.10.107105>

9. Zhang X., Hosseini A., Subbaraman H., Wang S., Zhan Q., Luo J., Jen A. K.-Y., Chen R. T., *Journal of Lightwave Technology*, 2014, vol. 32, no. 20, pp. 3774–3784. <https://doi.org/10.1109/JLT.2014.2319152>

10. Zhang J., Chen F., Sun B., *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, vol. 26, no. 3, pp. 275–277. <https://doi.org/10.1109/LPT.2013.2292567>

11. Park D. H., Pagan V. R., Murphy T. E., Luo J., Jen A. K.-Y., Herman W. N., *Optics Express*, 2015, vol. 23, no. 7, pp. 9464–9476. <https://doi.org/10.1364/OE.23.009464>

12. Tajima K., Kobayashi R., Kuwabara N., Tokuda M., Development of Optical Isotropic E-Field Sensor Operating More than 10 GHz Using Mach-Zehnder Interferometers, *IEICE Transactions on Electronics*, 2002, vol. E85C, no. 4, pp. 961–968.

13. Chen L., Reano R. M., *Optics Express*, 2012, vol. 20, no. 4, pp. 4032–4038. <https://doi.org/10.1364/OE.20.004032>

14. Goncharenko I. A., Ryabtsev V. N., *Measurement Techniques*, 2018, vol. 61, pp. 55–61. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1387-4>

15. Goncharenko I. A., Reabtsev V. N., Il'yushonok A. V., Navrotsky O. D., *Journal of Civil Protection*, 2020, vol. 4, no. 4, pp. 378–388. (In Russ.) <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2020.4-4.378>

16. Seng F., Yang Z., King R., Shumway L., Stan N., Hammond A., Warnick K. F., Schultz S., *Applied Optics*, 2017, vol. 56, no. 17, pp. 4911–4916. <https://doi.org/10.1364/AO.56.004911>

17. Goncharenko I. A., Esman A. K., Kuleshov V. K., Pilipovich V. A., *Optics Communications*, 2006, vol. 257, no. 1, pp. 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2005.07.024>

18. Lin C.-Y., Wang A. X., Lee B. S., Zhang X., Chen R. T., *Optics Express*, 2011, vol. 19, no. 18, pp. 17372–17377. <https://doi.org/10.1364/OE.19.017372>

19. Pregla R., *Journal of Lightwave Technology*, 1996, vol. 14, no. 4, pp. 634–639. <https://doi.org/10.1109/50.491403>

20. Goncharenko I. A., Helfert S. F., Pregla R., *International Journal of Electronics and Communications (AEÜ)*, 2005, vol. 59, no. 3, pp. 185–191. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2004.11.012>

21. Goncharenko I. A., Il'yushonok A. V., Ryabtsev V. N., Sensor of the Intensity of High-Frequency Electric Fields on the Base of Multi-Slot Optical Waveguides, *Proceedings of 13 International Scientific and Technical Conference "Instrumentation-2020"*, Minsk, Republic of Belarus, November, 18–20, 2020, Minsk, BNTU, 2020, pp. 28–30. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 27.07.2021; одобрена после рецензирования 29.09.2021; принята к публикации 20.10.2021.
The article was submitted 27.07.2021; approved after reviewing 29.09.2021; accepted for publication 20.10.2021.