

Оптический волноводный датчик высокочастотных электрических полей

И. А. Гончаренко, А. В. Ильюшенок, В. Н. Рябцев

*Университет гражданской защиты МЧС Беларуси, Минск;
e-mail: v.reabtsev@gmail.com*

В работе рассмотрена структура датчика высокочастотных внешних электрических полей на основе микрокольцевых резонаторов с использованием оптических волноводов с двумя горизонтальными или вертикальными щелями, заполненными электрооптическим полимером. Определены значения оптимальных разнесений щелей и их ширины, при которых достигается максимальная чувствительность датчика. Датчик позволяет измерять переменные электрические поля с частотой до 10 ГГц в диапазоне от 100 до 16×10^6 В/м с точностью до 150 В/м.

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

Введение

Технология измерений высокочастотных электрических полей является важным методом выявления их характеристик, оценки эффективности электромагнитной защиты [1–3]. Обычные системы измерения электромагнитных волн используют активные металлические зонды, которые вызывают возмущения измеряемых электромагнитных волн и делают датчики очень чувствительными к электромагнитным шумам [4]. Перспективными являются электрооптические методы, где измеряемые электрические величины преобразуются в параметры оптического излучения. По надежности, простоте конструкции и компактности датчики на основе волноводных структур превосходят датчики на основе объемных оптических элементов [5, 6]. Наибольшей чувствительностью обладают оптические датчики электрического поля на базе интерферометров Маха-Цендера или кольцевых резонаторов [7–9].

Датчик электрических полей на основе микрокольцевых резонаторов с использованием оптических щелевых волноводов с заполнением жидким кристаллом (ЖК) [9], позволяет измерять напряженность электрического поля с точностью до 1 В/м. Однако быстродействие датчика ограничено временем отклика ЖК, что не позволяет измерять напряженность переменных электрических полей с частотами более 100 КГц.

Быстродействие датчика можно повысить за счет применения электрооптических полимеров (ЭОП) [10]. Точность измерения напряженности электрического поля датчиком составляет порядка 300 В/м, т. е. на порядок хуже, чем у аналогичного устройства с использованием ЖК [9]. Чувствительность датчика можно повысить за счет использования волновода с двумя щелями [11].

В работе проведена оптимизация параметров датчика высокочастотных электрических полей на основе микрокольцевых резонаторов с использованием оптических волноводов с двумя горизонтальными или вертикальными щелями, заполненными электрооптическим полимером, с целью достижения максимальной чувствительности.

1. Оптимизация параметров датчика

Для оценки влияния разнесения щелей на чувствительность и измерительный диапазон датчика проведены расчеты интенсивности сигнала на выходе микрокольцевого резонатора на основе волноводов с постоянной шириной щелей и различным их разнесением. Наклон кривой, описывающей данную зависимость, характеризует чувствительность датчика. На рис. 1, а представлен пример зависимости сигналов на выходе резонаторов на основе волноводов с двумя вертикальными щелями шириной 2×100 нм и разнесением 100, 200, 300 и 400 нм от напряженности внешнего электрического поля. На

рис. 1, б представлена подобная зависимость для резонаторов на основе волноводов с двумя горизонтальными щелями шириной 2×100 нм и разнесением щелей 50, 100, 150 нм.

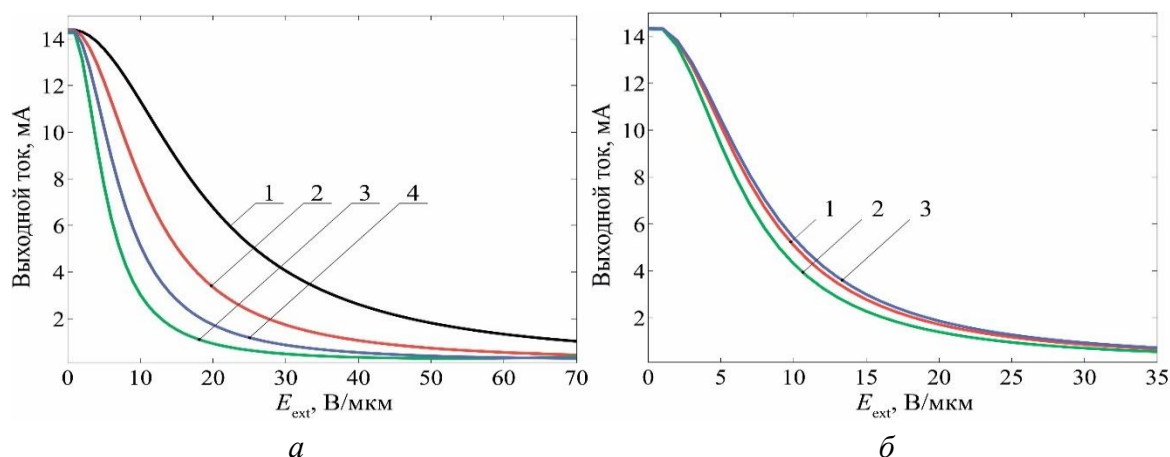


Рис. 1. – Зависимость сигналов на выходе резонаторов на основе волноводов с двумя заполненными ЭОП вертикальными (а) щелями шириной 2×100 нм и разнесением 100 (кривая 1), 200 (2), 300 (3) и 400 (4) нм и горизонтальными (б) щелями шириной 2×100 нм и разнесением 50 (1), 100 (2), 150 (3) нм от напряженности внешнего электрического поля.

Как видно из рис. 1, а, наибольшей чувствительностью к изменениям напряженности внешнего электрического поля ($1,25 \text{ мА/В/мкм}$) обладают датчики на основе волноводов с разнесением вертикальных щелей порядка 300 нм. Уточненные расчеты показывают, что оптимальное разнесение щелей в волноводе составляет 330 нм. При этом чувствительность датчиков с разнесением щелей от 300 до 350 нм варьируется в диапазоне от $1,25$ до $1,29 \text{ мА/В/мкм}$, т.е. различается на пренебрежимо малую величину, что указывает на устойчивость структуры кольцевого резонатора с двумя вертикальными щелями к несовершенству его изготовления. Для волноводов с шириной вертикальных щелей 2×25 , 2×50 и 2×150 нм максимальная чувствительность достигается при разнесении щелей 300, 320 и 335 нм соответственно.

Как следует из рис. 1, б, наибольшей чувствительностью к изменениям напряженности внешнего электрического поля (порядка $1,11 \text{ мА/В/мкм}$) обладают датчики на основе волноводов с горизонтальными щелями, разнесенными на 100 нм. Уточненные расчеты показывают, что такое разнесение щелей в волноводе является оптимальным. При этом чувствительность датчика с разнесением щелей от 80 до 120 нм различается на пренебрежимо малую величину ($0,02 \text{ мА/В/мкм}$), что указывает на устойчивость структуры кольцевого резонатора с двумя горизонтальными щелями к несовершенству его изготовления. Для волноводов с шириной горизонтальных щелей 2×50 , 2×150 и 2×200 нм максимальная чувствительность достигается при разнесении щелей 90, 100 и 105 нм соответственно.

Дальнейшего повышения чувствительности датчика можно добиться варьированием шириной щелей. На рис. 2 представлены интенсивности сигналов на выходе кольцевых резонаторов на основе волноводов с заполненными ЭОП щелями различной ширины и оптимальным разнесением щелей при различных значениях напряженности внешнего электрического поля.

Как видно из рис. 2, а, максимальной чувствительностью к изменению напряженности внешнего электрического поля ($1,27 \text{ мА/В/мкм}$) обладают датчики на основе волноводов с шириной вертикальных щелей 2×50 нм. При этом чувствительность датчиков с шириной щели от 2×50 до 2×80 нм различается на пренебрежимо малую величину

(0,005 мА/(В/мкм)). Таким образом, чувствительность датчика на базе кольцевого резонатора радиусом 32 мкм на основе волноводов с двумя вертикальными щелями с заполнением ЭОП может достигать 1,30 мА/(В/мкм). Изменение напряженности электрического поля на 1 В/м вызывает изменения тока фотодиода в таком датчике примерно на 1,30 нА. Параметры источника и приемника оптического излучения аналогичны использованным в работе [9], где темновой ток фотоприемника равен 20 нА. Очевидно, что такой датчик не позволяет отслеживать изменения напряженности внешнего электрического поля менее чем на 150 В/м (при соотношении сигнал / шум равным 10). При этом диапазон измерений напряженности внешних электрических полей находится в пределах от 100 до 16×10^6 В/м.

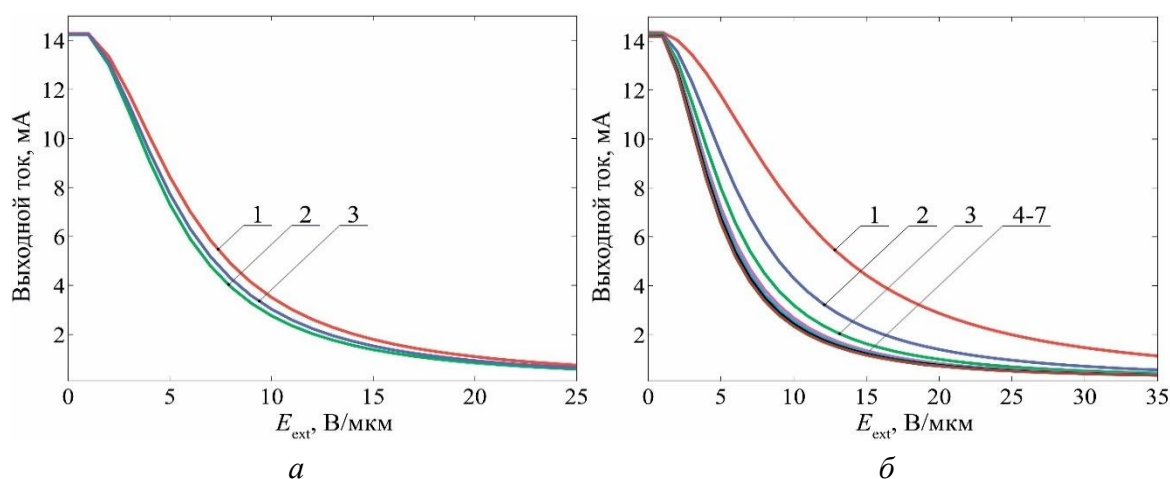


Рис. 2. – Зависимость сигналов на выходе резонаторов на основе волноводов с двумя заполненными ЭОП вертикальными (а) щелями с разнесением 300 нм и шириной 2×25 (1), 2×50 (2), 2×100 (3) нм и горизонтальными (б) щелями с разнесением 100 нм и шириной 2×50 (1), 2×100 (2), 2×150 (3), 2×200 (4), 2×220 (5), 2×240 (6), 2×260 (7) нм от напряженности внешнего электрического поля.

Как следует из рис. 2, б, чувствительность датчика основе волноводов с двумя горизонтальными щелями к вариациям напряженности внешнего электрического поля повышается при увеличении ширины щелей. Увеличение ширины щелей начиная от 2×200 нм приводит к незначительному изменению чувствительности датчика. При ширине щелей порядка 2×260 нм чувствительность достигает практически предельного значения (1,32 мА/(В/мкм)). Таким образом, чувствительность датчика на базе кольцевого резонатора радиусом 32 мкм на основе волноводов с двумя горизонтальными щелями с заполнением ЭОП может достигать 1,32 мА/(В/мкм). Изменение напряженности электрического поля на 1 В/м вызывает изменения тока фотодиода примерно на 1,32 нА. Таким образом, датчик на основе волновода с двумя горизонтальными щелями с заполнением ЭОП может быть использован для измерений напряженности внешних электрических полей с точностью до 150 В/м в пределах от 100 до 16×10^6 В/м.

Заключение

В работе проведена оптимизация структуры датчика напряженности высокочастотных внешних электрических полей на базе микрокольцевых резонаторов с использованием волноводов с двумя вертикальными или горизонтальными щелями. Датчик позволяет измерять переменные электрические поля с частотой до 10 ГГц за счет использования активного органического полимера SEO125 в качестве чувствительного электрооптического материала. Использование двух щелей позволяет повысить чувствительность датчика. При оптимальных размерах и разнесении щелей точность измерения

напряженности внешнего электрического поля датчиком достигает 150 В/м. При этом диапазон измерений составляет $100 \div 16 \times 10^6$ В/м.

Литература

1. Bieler M., Hein G., Pierz K., Siegner U., Koch M. Ultrafast electric field measurements in semiconductors by spectral integration over electric field-induced Franz–Keldysh oscillations. *Appl. Phys. Lett.* 2005. Vol. 87, № 4. P. 042102–042104.
2. Han C., Lv F., Sun C., Ding H. Silica microwire-based interferometric electric field sensor. *Opt. Lett.* 2015. Vol. 40, № 16. P. 3683–3686.
3. Pfeifer T., Heiliger H.-M., Löffler T., Ohlhoff C., Meyer C., Lupke G., Roskos H.G., Kurz H. Optoelectronic on chip characterization of ultrafast electric devices: measurement techniques and applications. *IEEE J. Select. Top. Quant. Electron.* 1996. Vol. 2, № 3. P. 586–604.
4. Zhao Y., Zhang Y.-N., Lv R.-Q., Lithe J. Electric field sensor based on photonic crystal cavity with liquid crystal infiltration. *JLT.* 2017. Vol. 35, № 16. P. 3440–3446.
5. 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. *JLT.* 2014. Vol. 32, № 20. P. 3774–3784.
6. Park D.H., Pagan V.R., Murphy T.E., Luo J., Jen A.K.-Y., Herman W.N. Free space millimeter wave-coupled electro-optic high speed nonlinear polymer phase modulator with in-plane slotted patch antennas. *Opt. Express.* 2015. Vol. 23, № 7. P. 9464–9476.
7. 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 Trans. Electronics.* 2002. Vol. 85, № 4. P. 961–968.
8. Chen L., Reano R.M. Compact electric field sensors based on indirect bonding of lithium niobate to silicon microrings. *Opt. Express.* 2012. Vol. 20, № 4. P. 4032–4038.
9. Гончаренко И.А., Рябцев В.Н. Измерение напряжённости электрических полей с помощью кольцевых резонаторов на базе щелевых волноводов с жидкокристаллическим заполнением. *Изм. техника.* 2018. Т. 61, № 1. С. 41–45.
10. Гончаренко И.А., Рябцев В.Н., Ильюшонок А.В., Навроцкий О.Д. Датчик напряженности высокочастотных электрических полей на основе щелевых волноводов с заполнением электрооптическим полимером. *Вест. Ун-та гражданской защиты МЧС Беларуси.* 2020. Т. 4, № 4. С. 378–388.
11. Гончаренко И.А., Ильюшонок А.В., Рябцев В.Н. Датчик напряженности высокочастотных электрических полей на основе оптических волноводов с несколькими щелями. *Приборостроение–2020: материалы 13-й Междунар. науч.-техн. конф., 18–20 ноября 2020, Минск, Беларусь.* С. 28–30.

Optical waveguide sensor of high frequency electric field

I. A. Goncharenko, A. V. Il'yushonok, V. N. Reabtsev

*University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of Belarus, Minsk;
e-mail: v.reabtsev@gmail.com*

In the paper the structure of the high frequency external electric field sensor on the base on ring microresonators that consist of double vertical and horizontal slot waveguides filled with electro-optic polymer is analyzed. The values of optimal slot width and separation are determined, which make it possible to achieve the maximal sensor sensitivity. The sensor allows measuring the alternating electric fields with the frequency up to 10 GHz in the range from 100 to 16×10^6 V/m with the accuracy up to 150 V/m.

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