

# Датчик напряженности высокочастотных электрических полей на основе оптических волноводов с двумя щелями, заполненными электрооптическим полимером

И.А.Гончаренко, В.Н.Рябцев

*Рассмотрена структура датчика высокочастотных внешних электрических полей на основе микрокольцевых резонаторов с использованием оптических волноводов с двумя горизонтальными или вертикальными щелями, заполненными электрооптическим полимером. С помощью метода линий рассчитаны постоянные распространения и распределения полей мод таких волноводов. Показано, что в волноводах с двумя заполненными электрооптическим полимером щелями достигается большая интенсивность оптического излучения в области щелей по сравнению с волноводами с одной щелью, что позволяет повысить чувствительность датчика. Установлены расстояния между щелями и значения их ширины, при которых достигается максимальная чувствительность датчика. Датчик позволяет измерять переменные электрические поля с частотами до 10 ГГц в диапазоне  $100-16 \times 10^6$  В/м с точностью до 150 В/м.*

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

## 1. Введение

Датчики электрических полей широко востребованы при детектировании мощных СВЧ волн и электромагнитных импульсов, при анализе внешних электромагнитных помех, проверке электромагнитной совместимости, диагностике высокочастотных электронных схем, исследовании влияния электромагнитного излучения на здоровье человека и т. д. [1–3]. В области электромагнитных исследований определение характеристик высокочастотных электрических полей является важным методом оценки эффективности электромагнитной защиты [4–6]. Для систем измерения высокочастотных электрических полей необходимы как быстродействующие сенсорные модули, так и модули обнаружения высокочастотного сигнала [7, 8].

Оптические датчики электрического поля имеют значительные преимущества перед их электронными аналогами благодаря малым размерам, меньшему весу, высокой чувствительности, широкому спектральному диапазону, защищенности от электромагнитных помех [2, 5]. Принцип действия полностью оптических датчиков электрического поля основан на использовании электрооптического эффекта. Приложенное высокочастотное электрическое поле модифицирует показатель преломления электрооптической среды, что приводит к модуляции тестирующего оптического сигнала. Таким образом информация о параметрах электрических полей преобразуется в оптический формат [9]. По надежности, простоте конструкции и компактности датчики на основе волно-

водных структур превосходят датчики на основе объемных оптических элементов [10–13].

Наибольшей чувствительностью обладают оптические датчики электрического поля на базе интерферометров Маха–Цендера или кольцевых резонаторов [12, 14–16].

Датчики электрических полей на основе микрокольцевых резонаторов с использованием оптических волноводов с горизонтальной и вертикальной щелями, заполненными жидким кристаллом (ЖК) [16], позволяют измерять напряженность электрического поля с точностью до 1 В/м в диапазоне  $1-10^6$  В/м. Быстродействие датчиков ограничено временем отклика ЖК и варьируется от десятков до сотен микросекунд. Это позволяет измерять с их помощью переменные электрические поля с частотами до десятков килогерц.

Повысить быстродействие датчика можно путем использования вместо ЖК электрооптических полимеров, которые позволяют измерять переменные электрические поля с частотой  $1-10$  ГГц [11, 17]. В частности в работе [11] экспериментально продемонстрирована возможность определения напряженности переменного электрического поля с частотой до 8.4 ГГц при использовании активного органического полимера SEO125.

Нами предложен датчик высокочастотных электрических полей с использованием микрокольцевых резонаторов на основе щелевых оптических волноводов, щели которых заполнены электрооптическим полимером SEO125 [18]. Датчик позволяет измерять переменные электрические поля с частотой до 10 ГГц. Чувствительность датчика ограничена параметрами фотоприемника, в частности величиной темнового тока. При использовании фотоприемника с темновым током 20 нА датчик дает возможность измерять изменения напряженности электрического поля порядка 300 В/м (при отношении сигнал/шум, равном 10). Таким образом, чувствительность датчика с электрооптическим полимером на порядок хуже, чем у аналогичного устройства с использованием ЖК [16]. Это

И.А.Гончаренко, В.Н.Рябцев. Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, Беларусь, 220118 Минск, ул. Машиностроителей, 25; e-mail: igor02@tut.by; v.ryabtsev@gmail.com

Поступила в редакцию 5 августа 2021 г., после доработки – 14 сентября 2021 г.

объясняется тем, что изменения показателя преломления полимера под действием электрического поля на несколько порядков меньше, чем у ЖК.

В ряде работ теоретически и экспериментально показано, что использование волноводов с несколькими вертикальными [19–23] или горизонтальными [19, 24, 25] щелями позволяет увеличить локализацию оптического излучения в области щелей, в результате чего повышается чувствительность датчика. В частности в работе [19] указано, что использование волновода с несколькими горизонтальными щелями на 56% повышает коэффициент локализации мощности оптического излучения в слоях с низким показателем преломления. В работе [21] установлено, что вариации эффективного показателя преломления моды волновода с несколькими вертикальными щелями на 20% больше, чем в случае волновода с одной щелью. В работе [23] показана возможность повышения в 2.5 раза чувствительности датчика показателя преломления за счет использования волновода решетчатой структуры с двумя вертикальными щелями.

В настоящей работе рассмотрена возможность повышения чувствительности датчика высокочастотных электрических полей на основе микрокольцевых резонаторов при использовании оптических волноводов с двумя горизонтальными или вертикальными щелями, заполненными электрооптическим полимером.

## 2. Структурная схема датчика

Основу датчика составляет замкнутый кольцевой резонатор микронных размеров на базе полосковых волноводов. Для ввода и вывода оптического излучения в резонатор служат прямые полосковые волноводы, соединенные с волноводом резонатора спадающими полями. Если длина волны оптического излучения, распространяющегося по входному волноводу, совпадает с резонансной длиной волны микрорезонатора, то такое излучение поступает в кольцевой волновод. Излучение на других длинах волн продолжает распространяться по входному волноводу. Ответвленное в кольцевой волновод излучение переходит из него в выходной волновод. Таким образом, в выходной волновод проходит излучение в узком спектральном диапазоне, центральная длина волны которого соответствует резонансной длине волны микрорезонатора. Ширина диапазона задается коэффициентом связи кольцевого и прямых волноводов и параметрами микрорезонатора.

Любые изменения эффективного показателя преломления для моды кольцевого волновода 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, который состоит из полосок материала с высоким показателем преломления, разделенных областью материала с низким показателем преломления – щелью. Размеры щели меньше длины волны распространяющегося по волноводу оптического излучения. Такие щели могут располагаться вертикально [26, 27] либо горизонтально [28, 29] в виде слоистой структуры. Поскольку на границе раздела материалов с разными показателями преломления электрические поля непрерывны, поле моды в области щели относительно велико.

Таким образом, изменение показателя преломления материала щели существенно влияет на направляющие свойства волновода, что позволяет повысить чувствительность датчика.

Для измерения внешних электрических полей щели волновода можно заполнять электрооптическим веществом, например электрооптическим полимером. Если такой волновод внести во внешнее электрическое поле, показатель преломления электрооптического полимера  $n$  изменится пропорционально величине электрического поля:

$$n = n_0 - \frac{1}{2} n_0^3 r_{33} E_{\text{ext}},$$

где  $n_0$  – показатель преломления полимера в отсутствие электрического поля;  $r_{33}$  (м/В) – электрооптический коэффициент полимера;  $E_{\text{ext}}$  (В/м) – напряженность приложенного электрического поля [9]. Для полимера SEO125 показатель преломления  $n_0$  для длины волны 1550 нм равен 1.63, а оценочная величина электрооптического коэффициента  $r_{33}$  составляет 100 пм/В [11]. Изменение показателя преломления электрооптического полимера в свою очередь приведет к изменению эффективного показателя преломления  $n_{\text{eff}}$  для направляемой моды щелевого волновода, в результате чего изменится интенсивность 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 кольцевого волновода микрорезонатора с вертикальными и горизонтальными щелями, заполненными электрооптическим полимером, представлена на рис.1. Щелевой волновод выполнен из  $\text{Si}_3\text{N}_4$  или кремния и расположен на кремниевой подложке. Для получения условия полного внутреннего отражения между волноводом и подложкой находится буферный слой  $\text{SiO}_2$  с показателем преломления, меньшим показателя преломления волновода. Активный органический полимер SEO125 заполняет вертикальные или горизонтальные щели кольцевого волновода. Такой полимер обладает малыми оптическими потерями для излучения с длиной волны 1550 нм, большим электрооптическим коэффициентом и хорошей временной стабильностью [11]. Общая

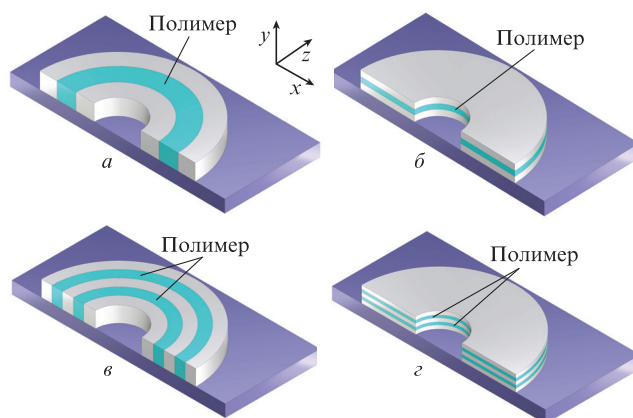


Рис.1. Структуры микрокольцевого резонатора на основе волноводов с одной и двумя вертикальными (а, в) и горизонтальными (б, з) щелями с заполнением электрооптическим полимером.

ширина щелевого волновода составляет 1000 нм, высота – 300 нм.

Быстродействие устройства определяется временем установления стационарного режима в кольцевом микрорезонаторе и временем отклика электрооптического материала. Время установления стационарного режима для кольцевого волновода с радиусом изгиба 32 мкм составляет примерно 25 пс, что соответствует частоте 40 ГГц [30]. В то же время электрооптические полимеры позволяют измерять переменные электрические поля с частотой 1–10 ГГц [11, 17], а следовательно, время их отклика ограничивает быстродействие датчика.

### 3. Чувствительность датчика

Расчет эффективного показателя преломления и распределения полей мод изогнутых щелевых волноводов с щелями, заполненными электрооптическим полимером, проводился с помощью метода линий [31,32], модифицированного для исследуемой структуры. При расчетах потери при вводе оптического излучения в волновод и выводе из него и потери в материале не учитывались.

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 1550 нм. Оптическое излучение на выходе из кольцевого резонатора преобразовывалось в электрический сигнал рпн-фотодиодом ФД161 на основе соединения InGaAs. Токовая чувствительность фотодиода на рабочей длине волны 1550 нм была не менее 0.8 А/Вт, темновой ток не превышал 20 нА [16].

На рис.2 представлены сигналы на выходах резонаторов на базе изогнутых волноводов с одной и двумя вертикальными (рис.2,а) и двумя горизонтальными (рис.2,б) щелями, заполненными электрооптическим полимером, при различных напряженностях внешнего электрического поля. Наклон кривых, описывающих зависимость выходного сигнала от интенсивности воздействия электри-

ческого поля, характеризует чувствительность датчика. Для корректного сравнения ширина щели в волноводах с одной щелью принята равной суммарной ширине щелей в волноводах с двумя щелями, что обеспечивает одинаковый объем электрооптического материала.

Как видно из рисунка, чувствительность датчика на основе волновода с двумя щелями выше, чем у датчика на основе волновода с одной щелью при одинаковом заполнении электрооптическим полимером. Данная закономерность характерна как для горизонтально-, так и для вертикально-щелевых волноводов.

### 4. Оптимизация параметров датчика

Мы оценили чувствительность и измерительный диапазон датчика при различных ширинах щелей и расстояниях между ними для волноводов с вертикальными и горизонтальными щелями.

#### 4.1. Микрокольцевой резонатор на основе волновода с вертикальными щелями

Для анализа влияния расстояния между щелями на чувствительность и измерительный диапазон датчика проведены расчеты эффективных показателей преломления для направляемых мод изогнутых волноводов с постоянной шириной щелей и различными расстояниями между ними и интенсивностей сигналов на выходе микрокольцевых резонаторов на основе таких волноводов. В качестве примера на рис.3 представлены зависимости  $n_{\text{eff}}$  волноводов с двумя вертикальными щелями шириной 100 нм, разнесенными на 100, 200, 300 и 400 нм, и сигналов на выходе резонаторов на их основе от напряженности внешнего электрического поля.

Как видно из рисунка, эффективный показатель преломления для моды волновода со щелями, разнесенными на 300 нм, наиболее резко реагирует на изменение внешнего электрического поля. В результате датчики на основе таких волноводов обладают наибольшей чувствительностью ( $1.25 \text{ mA} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{mkm}^{-1}$ ). Уточненные расчеты показывают, что оптимальное разнесение вертикальных щелей в волноводе составляет 330 нм. При этом чувстви-

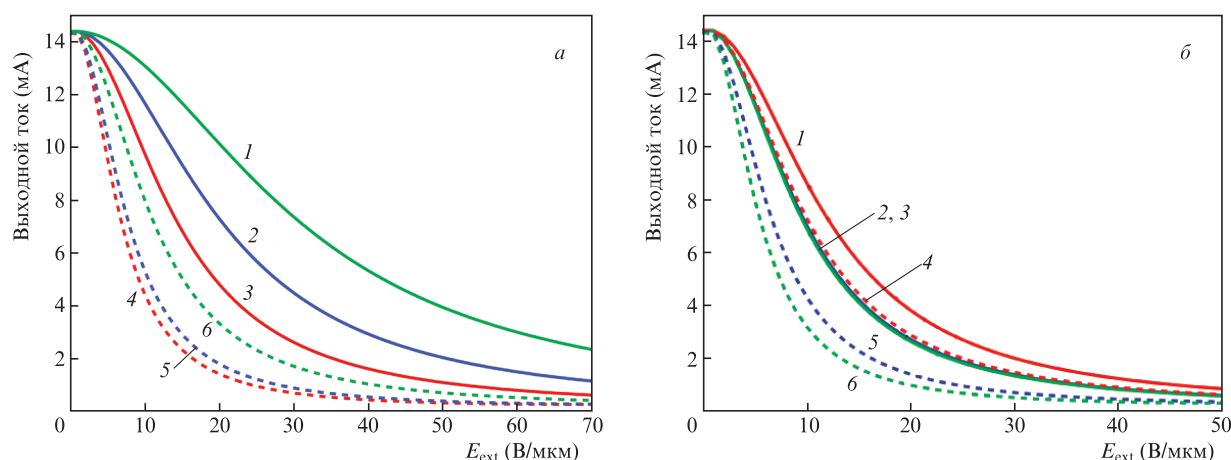


Рис.2. Зависимости от напряженности электрического поля сигнала на выходе кольцевого резонатора радиусом 32 мкм на основе волновода с одной и двумя вертикальными (а) и двумя горизонтальными (б) щелями, заполненными электрооптическим полимером: а – кривые 1–3 соответствуют волноводу с одной щелью с ширинами 50, 100 и 200 нм, кривые 4–6 – волноводу с двумя щелями, разнесенными на 200 нм, с ширинами 25, 50 и 100 нм соответственно; б – кривые 1–3 соответствуют волноводу с одной щелью с ширинами 100, 200 и 300 нм, кривые 4–6 – волноводу с двумя щелями, разнесенными на 100 нм, с ширинами 50, 100 и 150 нм соответственно.

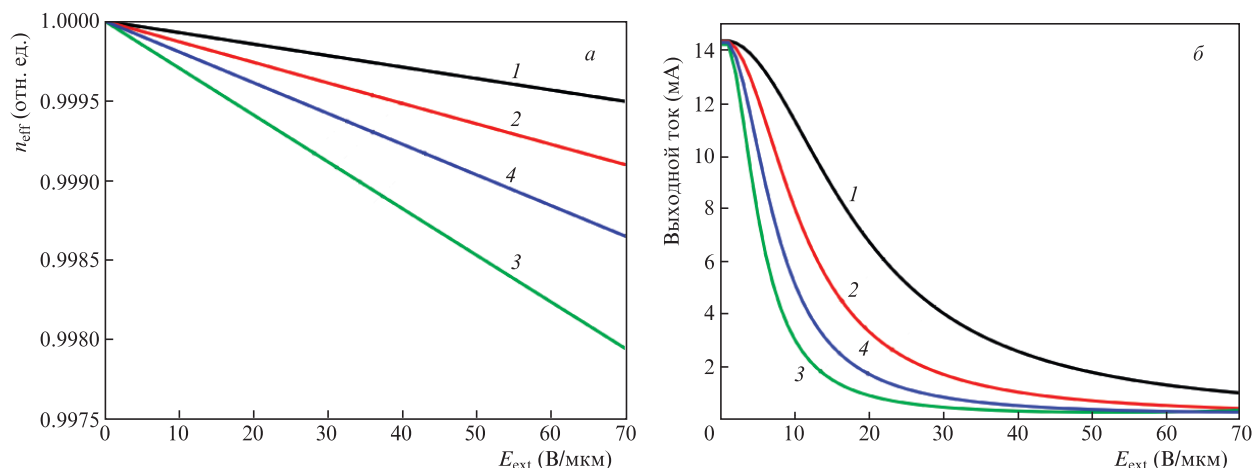


Рис.3. Зависимости нормированных эффективных показателей преломления для направляемых мод изогнутых волноводов с двумя заполненными электрооптическим полимером вертикальными щелями шириной 100 нм, разнесенными на 100 (1), 200 (2), 300 (3) и 400 нм (4) (а) и сигналов на выходе резонаторов на их основе (б) от напряженности внешнего электрического поля.

тельность датчиков с разнесением щелей на 300–350 нм варьируется в диапазоне  $1.25\text{--}1.29 \text{ мА} \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{мкм}^{-1}$ , т.е. различается на пренебрежимо малое значение, что указывает на устойчивость структуры кольцевого резонатора с двумя вертикальными щелями к несовершенству его изготовления.

Для волноводов с двумя щелями с ширинами 25, 50 и 150 нм максимальная чувствительность достигается при разнесении щелей на 300, 320 и 335 нм соответственно. Наличие оптимального расстояния между щелями можно объяснить с помощью анализа распределений амплитуд электрических полей мод в поперечном сечении кольцевого волновода (рис.4).

Из рисунка следует, что при малом расстоянии между щелями (менее 200 нм) распределение полей моды соответствует распределению поля супермоды двух связанных волноводов. При этом интенсивность поля волноводной моды в области щели мала (кривая 1). Распределение полей мод в волноводе с большим расстоянием между щелями (свыше 400 нм) подобно распределению полей моды обычного полоскового волновода, роль которого играет центральная часть волновода с двумя щелями (кривая 3). Таким образом, в области щелей, запол-

ненных электрооптическим полимером, интенсивность поля моды незначительна по сравнению с интенсивностью в центральной области волновода. При оптимальном разнесении щелей (~300 нм) распределение полей мод подобно распределению полей супермод трех связанных волноводов, при этом интенсивность поля моды в области щелей весьма велика (кривая 2). Это приводит к наибольшему изменению эффективного показателя преломления для моды волновода при изменении показателя преломления электрооптического полимера под действием электрического поля и обеспечивает наибольшую чувствительность датчика на основе такого волновода.

Дальнейшего повышения чувствительности датчика можно добиться варьированием ширины щелей. На рис.5 представлены зависимости от напряженности внешнего электрического поля показателя преломления  $n_{\text{eff}}$  для мод волноводов с заполненными электрооптическим полимером вертикальными щелями различной ширины с оптимальным расстоянием между ними 300 нм и сигналов на выходе кольцевого резонатора на основе таких волноводов. Видно, что эффективный показатель преломления для моды волновода с ширинами щелей 50 нм наиболее резко реагирует на изменение внешнего электрического поля. В результате датчики на основе таких волноводов достигают максимальной чувствительности ( $1.27 \text{ мА} \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{мкм}^{-1}$ ). При этом чувствительности датчиков с ширинами щелей от 50 до 80 нм различаются на пренебрежимо малое значение ( $0.005 \text{ мА} \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{мкм}^{-1}$ ), что также указывает на устойчивость анализируемой структуры к несовершенству ее изготовления.

На рис.6 представлены распределения амплитуд полей мод в волноводах с двумя вертикальными щелями, разнесенными на 300 нм. Видно, что интенсивность поля моды в области щели малой ширины (25 нм) велика. При этом объем полимера мал и чувствительность датчика к изменениям электрического поля незначительна. Объем электрооптического полимера, заполняющего щели с ширинами 100 нм, достаточно велик. Однако поле моды в области щелей мало, и эффективный показатель преломления для моды слабо зависит от вариаций показателя преломления полимера. Комбинация интенсивности поля моды и объема электрооптического полимера оптимальна для щели шириной 50 нм. В этом случае возникают наибольшие изменения эффективного показателя преломле-

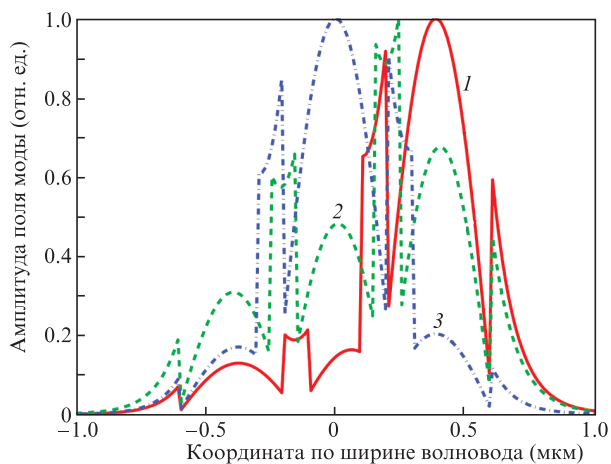


Рис.4. Распределения амплитуд электрических полей направляемых мод в поперечном сечении волноводов с двумя заполненными электрооптическим полимером вертикальными щелями шириной 100 нм, разнесенными на 200 (1), 300 (2) и 400 нм (3).

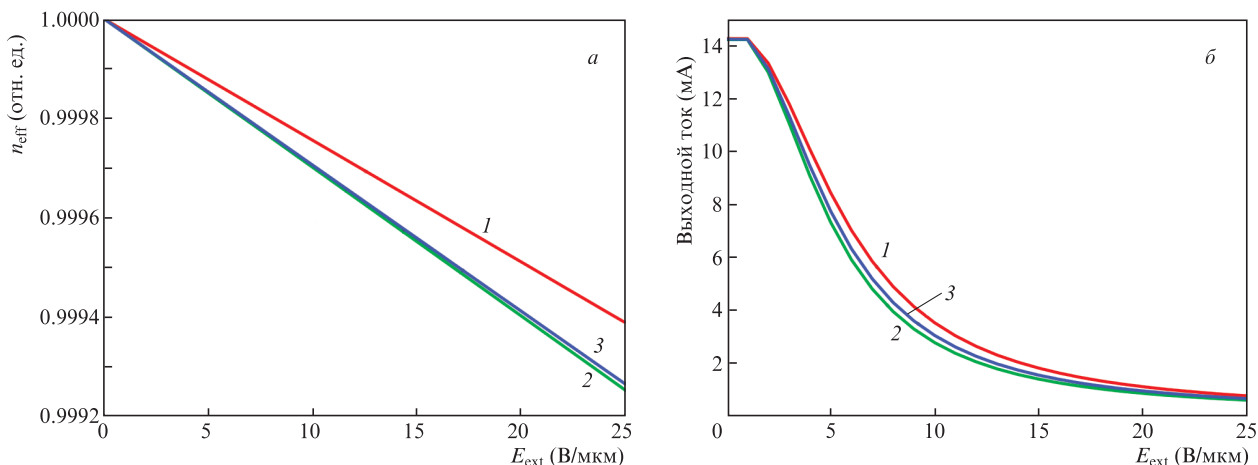


Рис.5. Зависимости нормированных эффективных показателей преломления для направляемых мод изогнутых волноводов с двумя заполненными электрооптическим полимером вертикальными щелями, разнесенными на 300 нм, с ширинами 25 (1), 50 (2), 100 нм (3) (а) и сигналов на выходе резонаторов на основе таких волноводов (б) от напряженности внешнего электрического поля.

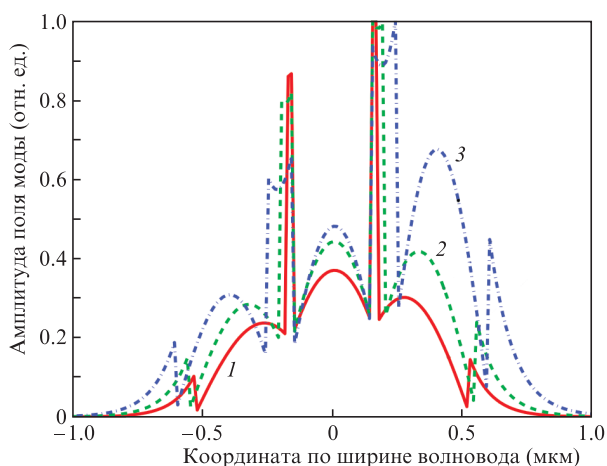


Рис.6. Распределения амплитуд полей направляемых мод в поперечном сечении волноводов с двумя заполненными электрооптическим полимером вертикальными щелями, разнесенными на 300 нм, с ширинами 25 (1), 50 (2) и 100 нм (3).

ния для моды при вариации показателя преломления полимера под влиянием внешнего электрического поля.

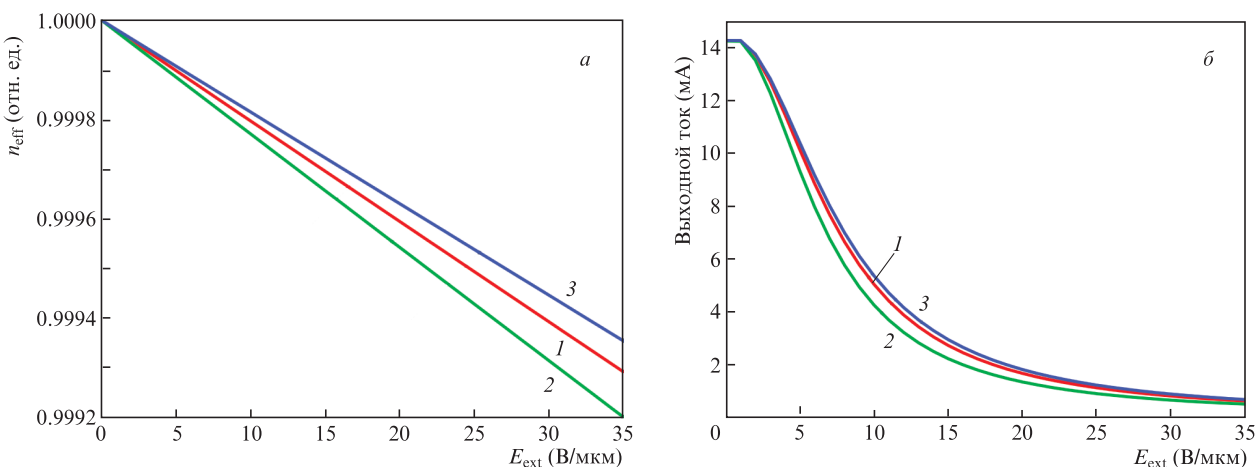


Рис.7. Зависимости нормированных эффективных показателей преломления для направляемых мод изогнутых волноводов с двумя заполненными электрооптическим полимером горизонтальными щелями с ширинами 100 нм, разнесенными на 50 (1), 100 (2), 150 нм (3) (а), и сигналов на выходе резонаторов на их основе (б) от напряженности внешнего электрического поля.

Таким образом, чувствительность датчика на базе кольцевого резонатора радиусом 32 мкм на основе волноводов с двумя вертикальными щелями, заполненными полимером, может достигать  $1.30 \text{ mA} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ . Изменение напряженности электрического поля на 1 В/м вызывает изменения тока фотодиода в таком датчике примерно на 1.30 нА. Поскольку темновой ток фотоприемника составляет  $\sim 20 \text{ nA}$ , очевидно, что такой датчик не позволяет отслеживать изменения напряженности внешнего электрического поля менее чем на 150 В/м (при отношении сигнал/шум, равном 10). При это диапазон измерений напряженности внешних электрических полей составляет  $100 - 16 \times 10^6 \text{ V/m}$ .

#### 4.2. Микрокольцевой резонатор на основе волновода с горизонтальными щелями

Аналогичный анализ был проведен для датчиков на основе волноводов с двумя горизонтальными щелями. На рис.7 представлены зависимости эффективных показателей преломления для направляемых мод изогнутых волноводов с двумя горизонтальными щелями шириной 100 нм, разнесенными на 50, 100 и 150 нм, и сигналов на

выходе резонаторов на их основе от напряженности внешнего электрического поля.

Как видно из рисунка, эффективный показатель преломления моды волновода с горизонтальными щелями, разнесенными на 100 нм, наиболее резко реагирует на изменение внешнего электрического поля. Датчики на основе таких волноводов обладают наибольшей чувствительностью (~1.11 мА·В<sup>-1</sup>·мкм<sup>-1</sup>). Уточненные расчеты показывают, что такое расстояние между щелями в волноводе является оптимальным. При этом чувствительности датчиков с расстоянием между щелями от 80 до 120 нм различаются на пренебрежимо малое значение (0.02 мА·В<sup>-1</sup>·мкм<sup>-1</sup>), что свидетельствует об устойчивости структуры кольцевого резонатора с двумя горизонтальными щелями к несовершенству его изготовления.

Для волноводов с ширинами щелей 50, 150 и 200 нм максимальная чувствительность достигается при расстояниях между щелями 90, 100 и 105 нм соответственно.

Наличие оптимального с точки зрения чувствительности датчика расстояния между щелями объясняется аналогично случаю волновода с вертикальными щелями, что следует из рис.8, где представлены распределения полей мод в волноводе с двумя горизонтальными щелями,

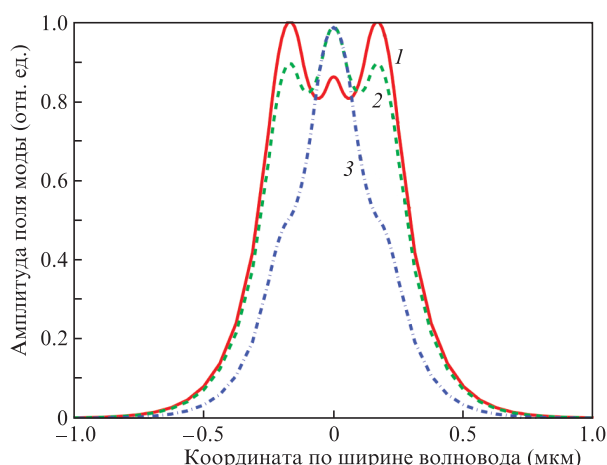


Рис.8. Распределения амплитуд электрических полей направляемых мод в поперечном сечении волноводов с двумя заполненными электрооптическим полимером горизонтальными щелями, разнесенными на 100 нм, с ширинами 100 нм, разнесенными на 50 (1), 100 (2) и 150 нм (3).

разнесенными на 100 нм. Распределения полей мод в волноводах с малым (менее 50 нм), средним (оптимальным, ~100 нм) и большим (свыше 150 нм) расстояниями между щелями подобны соответственно распределениям полей супермод двух связанных волноводов, трех связанных волноводов и моды обычного полоскового волновода, роль которого играет центральная часть волновода с двумя горизонтальными щелями.

На рис.9 представлены зависимости  $n_{eff}$  для мод волноводов с заполненными электрооптическим полимером горизонтальными щелями различной ширины и оптимальными расстояниями между ними (100 нм) и сигналов на выходе кольцевого резонатора на основе таких волноводов от напряженности внешнего электрического поля. Видно, что при увеличении ширины щелей чувствительность датчика повышается, но, начиная с 200 нм, это приводит лишь к незначительному ее изменению. При ширинах ~260 нм чувствительность достигает предельного значения (1.32 мА·В<sup>-1</sup>·мкм<sup>-1</sup>). Как следует из рис.10, при ширинах щелей, превышающих 200 нм, распределения полей мод волноводов с расстояниями между щелями 100 нм остаются практически неизменными.

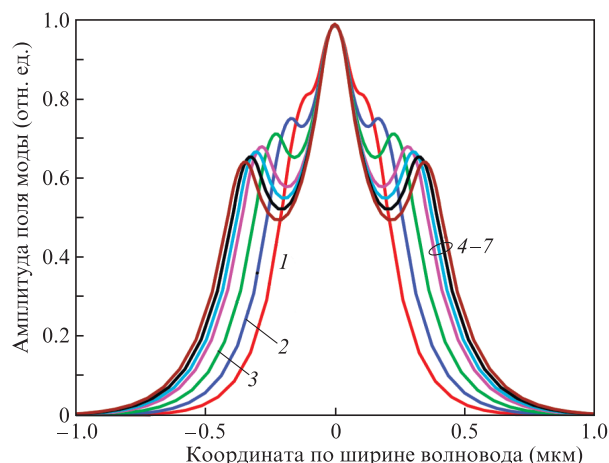


Рис.10. Распределения амплитуд полей направляемых мод в поперечном сечении волноводов с двумя заполненными электрооптическим полимером горизонтальными щелями, разнесенными на 100 нм, с ширинами 50 (1), 100 (2), 150 (3), 200 (4), 220 (5), 240 (6) и 260 нм (7).

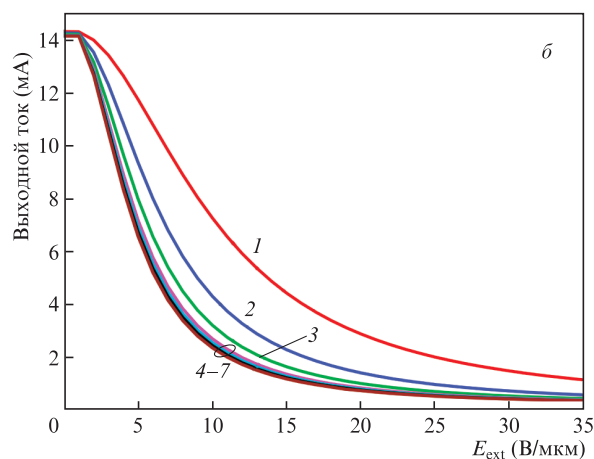
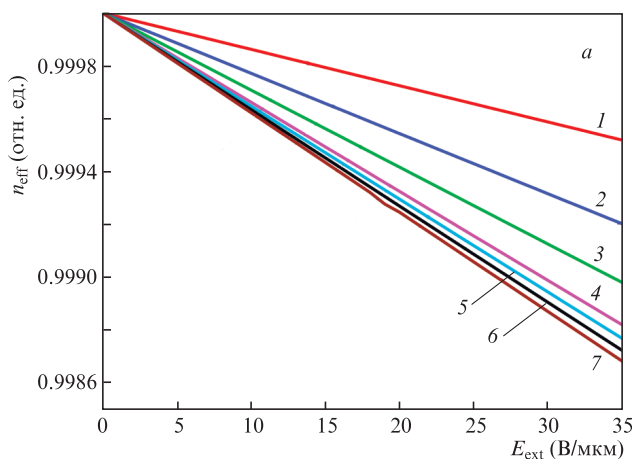


Рис.9. Зависимости нормированных эффективных показателей преломления для направляемых мод изогнутых волноводов с двумя заполненными электрооптическим полимером горизонтальными щелями, разнесенными на 100 нм, с ширинами 50 (1), 100 (2), 150 (3), 200 (4), 220 (5), 240 (6), 260 нм (7) (а) и сигналов на выходе резонаторов на их основе (б) от напряженности внешнего электрического поля.

Таким образом, чувствительность датчика на базе кольцевого резонатора радиусом 32 мкм на основе волновода с двумя горизонтальными щелями, заполненными электрооптическим полимером, может достигать  $1.32 \text{ мА} \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{мкм}^{-1}$ . Изменение напряженности электрического поля на 1 В/м вызывает изменения тока фотодиода в таком датчике примерно на 1.32 нА. Следовательно, датчик на основе волновода с двумя горизонтальными щелями, заполненными электрооптическим полимером, может быть использован для измерений напряженности внешних электрических полей с точностью до 150 В/м в пределах  $100 - 16 \times 10^6 \text{ В/м}$ .

## 5. Заключение

В работе показано, что в волноводах с двумя вертикальными или горизонтальными щелями достигается большая интенсивность оптического излучения в области щелей, заполненных электрооптическим полимером, чем в волноводах с одной щелью. Это позволяет повысить в два-три раза чувствительность датчика высокочастотных электрических полей на базе кольцевых микрорезонаторов.

Существует оптимальное расстояние между щелями, при котором чувствительность датчика наибольшая. Для волноводов с вертикальными щелями оно составляет  $\sim 320 \text{ нм}$ , для горизонтально-щелевых волноводов  $\sim 100 \text{ нм}$ . Дальнейшего повышения чувствительности датчика можно достичь путем варьирования ширины щелей. Максимальная чувствительность вертикально-щелевых волноводов с двумя щелями к воздействию внешнего электрического поля возможна при ширине щелей 50 нм. Для горизонтально-щелевых волноводов максимальная чувствительность достигается при ширине щелей 260 нм.

Чувствительности датчиков на основе волноводов с двумя вертикальными щелями с расстояниями между ними 300–350 нм и ширинами 50–80 нм различаются на пренебрежимо малую величину. Чувствительности датчиков на основе волноводов с двумя горизонтальными щелями различаются на пренебрежимо малую величину при расстояниях между щелями от 80 до 120 нм. Это указывает на устойчивость структуры кольцевого резонатора с двумя вертикальными или горизонтальными щелями к несовершенству его изготовления.

Датчик позволяет измерять переменные электрические поля с частотой до 10 ГГц за счет использования активного органического полимера SEO125 в качестве чувствительного электрооптического материала. Чувствительность датчика ограничена параметрами фотоприемника, в частности величиной темнового тока. При использовании фотоприемника с темновым током 20 нА датчик позволяет измерять изменения напряженности электрического поля порядка 150 В/м. При этом диапазон измерений составляет  $100 - 16 \times 10^6 \text{ В/м}$ .

1. Bottauscio O., Chiampi M., Crotti G., Giordano D., Wang W.C., Zilberti L. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **62**, 1436 (2013).
2. Passaro V.M.N., Dell'Olio F., De Leonardis F. *Progr. Quantum Electron.*, **30**, 45 (2006).
3. Ilchenko V.S., Savchenkov A.A., Matsko A.B., Maleki L. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **14**, 1602 (2002).
4. Bieler M., Hein G., Pierz K., Siegner U., Koch M. *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 042102 (2005).
5. Han C., Lv F., Sun C., Ding H. *Opt. Lett.*, **40**, 3683 (2015).
6. Pfeifer T., Heiliger H.-M., Löffler T., Ohlhoff C., Meyer C., Lupke G., Roskos H.G., Kurz H. *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.*, **2**, 586 (1996).
7. Sun S., Xu L., Cao Z., Zhou H., Yang W. *Measur. Sci. Technol.*, **25**, 075010 (2014).
8. Skold M., Raybon G., Adamiecki A.L., Winzer P.J., Sunnerud H., Westlund M., Konczykowska A., Jorge F., Dupuy J.-Y., Buhl L.L., Andrekson P.A. *IEEE Photon. Techn. Lett.*, **25**, 504 (2013).
9. Lu H., Li Y., Zhang J. *Sensors*, **21**, 3672 (2021).
10. Al-Tarawni M.A.M., Bakar A.A.A., Zain A.R.M., Tarawneh M.A., Ahmade S.H. *Opt. Eng.*, **56**, 107105 (2017).
11. Zhang X., Hosseini A., Subbaraman H., Wang S., Zhan Q., Luo J., Jen A.K.-Y., Chen R.T. *J. Lightwave Technol.*, **32**, 3774 (2014).
12. Zhang J., Chen F., Sun B. *IEEE Photon. Techn. Lett.*, **26**, 275 (2014).
13. Park D.H., Pagan V.R., Murphy T.E., Luo J., Jen A.K.-Y., Herman W.N. *Opt. Express*, **23**, 9464 (2015).
14. Tajima K., Kobayashi R., Kuwabara N., Tokuda M. *IEICE Trans. Electr.*, **85**, 961 (2002).
15. Chen L., Reano R.M. *Opt. Express*, **20**, 4032 (2012).
16. Goncharenko I., Marciniak M., Reabtsev V. *Appl. Opt.*, **56**, 7629 (2017).
17. Lin C.-Y., Wang A.X., Lee B.S., Zhang X., Chen R.T. *Opt. Express*, **19**, 17372 (2011).
18. Гончаренко И.А., Рябцев В.Н., Ильюшонок А.В., Навроцкий О.Д. *Вестник Ун-та гражданской защиты МЧС Беларуси*, **4**, 378 (2020).
19. Feng N.N., Michel J., Kimerling L.C. *IEEE J. Quantum Electron.*, **42**, 883 (2006).
20. Iqbal M., Zheng Z., Liu J. *Proc. ICMMT*, **2**, 878 (2008).
21. Vivien L., Marris-Morini D., Griol A., Gylfason K.B., Hill D., Álvarez J., Sohlström H., Hurtado J., Bouville D., Cassan E. *Opt. Express*, **16**, 17237 (2008).
22. Goncharenko I., Kireenko V., Marciniak M. *Opt. Eng.*, **53**, 071802 (2014).
23. Kazanskiy N.L., Khonina S.N., Butt M.A. *Sensors*, **20**, 3416 (2020).
24. Sun R., Dong P., Feng N., Hong C., Michel J., Lipson M., Kimerling L. *Opt. Express*, **15**, 17967 (2007).
25. Yoo H.G., Fu Y., Riley D., Shin J.H., Fauchet P.M. *Opt. Express*, **16**, 8623 (2008).
26. Almeida V.R., Xu Q., Barrios C.A., Lipson M. *Opt. Lett.*, **29**, 1209 (2004).
27. Passaro V.M.N., Dell'Olio F., Casamassima B., De Leonardis F. *Sensors*, **7**, 508 (2007).
28. Cheng N.C., Ma Y.F., Fu P.H., Chin C.C., Huang D.W. *Appl. Opt.*, **54**, 436 (2015).
29. Viphavakit C., Komodromos M., Themistos C., Mohammed W.S., Kalli K., Rahman B.M.A. *Appl. Opt.*, **54**, 4881 (2015).
30. Goncharenko I.A., Esman A.K., Kuleshov V.K., Pilipovich V.A. *Opt. Commun.*, **257**, 54 (2006).
31. Pregla R. *J. Lightwave Technol.*, **14**, 634 (1996).
32. Goncharenko I.A., Helfert S.F., Pregla R. *Int. J. Electron. Commun. (AEÜ)*, **59**, 185 (2005).