

ДИФРАКЦИОННАЯ ОПТИКА, ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Достижения в разработке плазмонных волноводных датчиков для измерения показателя преломления

Н.Л. Казанский^{1,2}, М.А. Бутт², С.А. Дегтярев^{1,2}, С.Н. Хонина^{1,2}

¹ ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151,

² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34

Аннотация

Оптические датчики широко используются в биомедицинской, химической и пищевой промышленности и обеспечивают высокую чувствительность к изменениям показателя преломления в окружающей среде благодаря специфическому распределению электромагнитного поля собственных мод (резонансных состояний). Чувствительность датчика сильно зависит от его материала и структуры. В этом обзоре мы сосредоточились на анализе кремниевых волноводов как перспективном компоненте миниатюризации оптических датчиков и плазмонных датчиков показателя преломления без флуоресцентной маркировки. Представлены новейшие разработки специальных типов плазмонных структур, таких как волноводы металл–изолятор–металл, и их применение в датчиках показателя преломления. Анализируются многочисленные типы плазмонных волноводов, их геометрические структуры, материалы и процессы изготовления, а также возможные энергетические потери. Важной частью обзора является обсуждение спектральных характеристик недавно предложенных датчиков показателя преломления с акцентом на их чувствительность и показатели качества.

Ключевые слова: плазмонные волноводы, структуры металл–диэлектрик–металл, резонансы Лоренца и Фано, датчики показателя преломления.

Цитирование: Казанский, Н.Л. Достижения в разработке плазмонных волноводных датчиков для измерения показателя преломления / Н.Л. Казанский, М.А. Бутт, С.А. Дегтярев, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 3. – С. 295-318. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-743.

Citation: Kazanskiy NL, Butt MA, Degtyarev SA, Khonina SN. Achievements in the development of plasmonic waveguide sensors for measuring the refractive index. Computer Optics 2020; 44(3): 295-318. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-743.

Введение

Оптические датчики обладают высокой чувствительностью к изменениям показателя преломления в окружающей среде. Возможность высокоточного определения показателя преломления важна при подборе и анализе жидких сред в химии, медицине, пищевой промышленности, для определения состава газов при контроле загрязнений и экологическом мониторинге, дистанционном измерении температуры и давления, при проектировании и изготовлении новых видов полимеров, контроле и анализе причин неработоспособности различных приборов.

Хорошо известны классические оптические датчики, основанные на изменении угла преломления, разности хода лучей и хроматической дисперсии: гониометры, рефрактометры, волоконные брегговские решётки. Все они имеют свои достоинства и недостатки. Гониометрические и интерференционные методы требуют сложных оптических схем и могут разъюстироваться при изменении условий измерений.

Волоконные брегговские решётки основаны на свойстве слоистых структур изменять спектр пропускания и отражения в зависимости от малых изменений периода решётки. Брегговские решётки недостаточно (по сравнению с плазмонными и фотонно-кристаллическими волоконными датчиками) чувствительны к малым изменениям оптических характеристик окружающей среды.

Перечисленные недостатки мотивируют исследователей изучать другие подходы к разработке датчиков. В данном обзоре анализируются оптические волноводы на основе кремниевой технологии, плазмонные резонаторы и датчики показателя преломления (ДПП).

Кремниевая технология [1] постоянно совершенствуется в связи с массовым изготовлением интегральных оптических систем, а также с развитием и широким распространением микроэлектроники [2], что обеспечивает приемлемую стоимость изготовления экспериментальных образцов. В нашем обзоре анализируется несколько видов волноводов на основе

кремния, таких как стандартные полосковые и гребенчатые волноводы, а также недавно разработанные новые конструкции волноводов – щелевые и гибридные. Стандартные конструкции волноводов (полосковые и гребенчатые) обеспечивают приемлемую локализацию света, что делает их пригодными для создания интегральных оптических схем на кристалле. Преимущество щелевых и плазмонных волноводов заключается в повышенной чувствительности к изменениям параметров окружающей среды, что дает возможность их успешного использования в сенсорных приложениях.

Усиление электрического поля в субмикронной щели с низким показателем преломления потенциально позволяет создавать микросенсоры повышенной чувствительности. Особый интерес представляет средняя инфракрасная область [3] в силу того, что она содержит ряд диапазонов длин волн света, так называемых окон воды, которые могут распространяться через атмосферу Земли, не поглощаясь молекулами воды.

Достижения в области плазмоники и технологий формирования наноструктур позволили исследователям во всем мире приступить к разработке плазмонных датчиков, основанных на поверхностном плазмонном резонансе [4]. При изменении состояния среды, в которую погружена сенсорная поверхность устройства, происходит изменение резонансного угла, интенсивности отражённого света или его фазы. Плазмонные резонаторы компактны (могут размещаться на чипе) и способны измерять очень малые изменения спектральных характеристик среды, окружающей устройство.

В отличие от полностью диэлектрических волноводов, для которых потери при распространении могут быть незначительными, присутствие металла в качестве части направляющей структуры приводит к высоким потерям в плазмонных волноводах.

Однако именно наличие металла обеспечивает максимально компактную локализацию светового поля и высокую чувствительность плазмонных датчиков. Таким образом, разработчики постоянно стремятся найти наилучший компромисс между потерями при распространении, компактностью и чувствительностью.

Анализ публикаций показывает, что плазмонные датчики, основанные на резонансе Фано, являются более высокочувствительными из-за своей острой и асимметричной формы линии и обеспечивают высокую добротность по сравнению с обычной формой линии Лоренца. Ожидается, что плазмоника будет и впредь важной составляющей в исследованиях и разработках в области интегрированной оптической связи, хранения данных, оптического зондирования, нанофотоники, биосенсорике, схемотехники и визуализации.

Плазмонные датчики – это обширная тема, однако в данном обзоре достаточно полно обсуждаются

наиболее свежие разработки в этой области, относящиеся к плазмонным датчикам без флуоресцентной маркировки и предназначенные для измерения показателя преломления.

Структура обзора организована следующим образом. В первом параграфе уделено внимание кремниевым волноводам, особенно гибриднему плазмонному волноводу, с целью показать основные достоинства и недостатки этих двух типов волноводов. Во втором параграфе описаны основные принципы работы плазмонных волноводов, а в третьем параграфе – важные факторы, влияющие на их эффективность (материал и процесс изготовления, подходы для уменьшения потерь, а также особенности, связанные с методами опроса). Четвертый параграф посвящен детальному обсуждению основных разработок плазмонных резонаторов для измерения показателя преломления и их основных характеристик, таких как чувствительность и показатель качества. В пятом параграфе на конкретном примере расчета плазмонного датчика показано применение инструментов теоретического анализа и численного моделирования, таких как COMSOL и Lumerical, предоставляющих хорошую возможность оценить оптические свойства рассматриваемых сенсоров. В шестом параграфе обсуждаются приложения плазмонных датчиков, особенно в биосенсорике, а в седьмом – дальнейшие перспективы развития плазмонных структур.

1. Кремниевые волноводы

Под устройствами интегральной оптики подразумевают объединённые на одном кристалле фотонные компоненты, такие как делители пучков, поляризаторы, ответвители, сенсоры, интерферометры и многие другие. Интеграция оптической схемы на один чип возможна благодаря тому, что большинство компонентов может быть выполнено в виде волноводов, расположенных на подложке.

Несмотря на то, что по-прежнему фотонные логические компоненты не могут конкурировать по цене с традиционными транзисторами, приложения сенсорики являются наиболее перспективными для кремниевой интегральной оптики [5].

На протяжении более 40 лет ведётся разработка, производство и исследование кремниевых фотонных устройств [1]. На рис. 1 показаны схематичные изображения различных видов волноводов.

1.1. Полосковый волновод

Полосковый волновод является одним из наиболее простых кремниевых фотонных устройств, которые применяются на протяжении многих лет в качестве лазеров, поляризаторов, модуляторов, переключателей и усилителей [6].

Полосковый волновод (рис. 1а) представляет собой кремниевое ядро, расположенное на подложке из диоксида кремния. В большинстве случаев использу-

ются полосковые волноводы, размеры которых обеспечивают распространение только одной моды [7–8]. В прямоугольном одномодовом волноводе может существовать два типа мод: TE_{00} и TM_{00} . Фазовая скорость моды определяется эффективным показателем преломления n_{eff} и равна c/n_{eff} , где c – скорость света в вакууме. Зависимость эффективных показателей пре-

ломления волновода от ширины W_{Si} и высоты волновода H_{Si} показана на рис. 2. Расчёт производился методом конечных элементов, реализованным в программном пакете COMSOL Multiphysics, что является стандартным подходом при расчёте плазмонных датчиков [9–10].

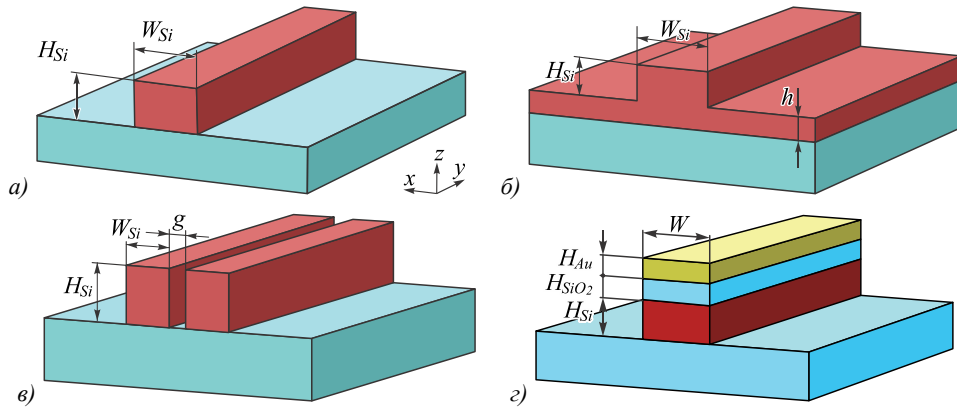


Рис. 1. Схематическое изображение различных видов волноводов: полосковые (а), гребенчатые (б), щелевые (в), гибридные (г)

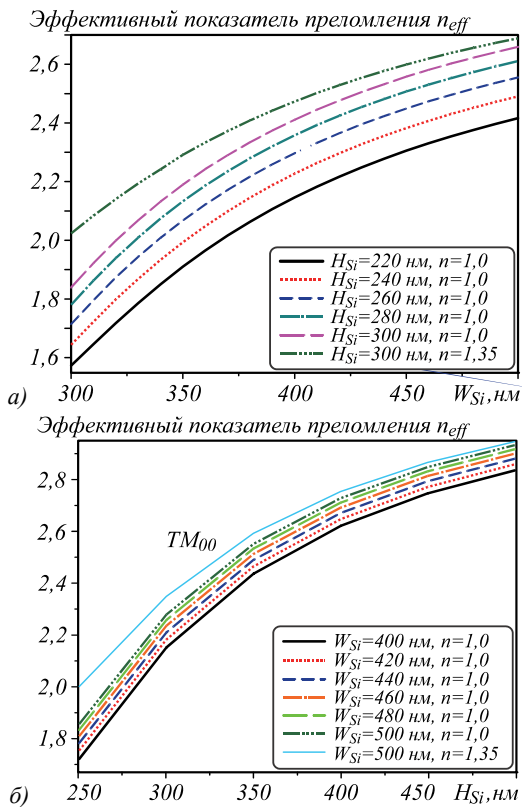


Рис. 2. Эффективный показатель преломления полоскового волновода для TE_{00} -моды (а), TM_{00} -моды (б)

1.2. Гребенчатый волновод

Гребенчатые волноводы похожи на полосковые, однако слой кремния не протравлен полностью (рис. 1б): W_{Si} – ширина гребенчатого волновода, H_{Si} – общая высота волновода, h – высота непротравленного слоя кремния. Таким образом, проводящий слой включает в себя как оставшийся непротравленный

слой, так и полоску кремния, представляющую собой полосковый волновод. Кремниевые гребенчатые волноводы с размерами, превышающими несколько нанометров, являются многомодовыми [11–14]. В 1991 году R.A. Soref с соавторами [15] показали возможность создания одномодового гребенчатого волновода, размеры которого удовлетворяют следующему дисперсионному соотношению:

$$\frac{W_{Si}}{H_{Si}} \leq 0,3 + \frac{h_r}{\sqrt{1-h_r^2}}, \quad (1)$$

где $h_r = h/H_{Si}$.

Зависимость эффективного показателя преломления мод от h показана на рис. 3 при фиксированном значении W_{Si} и H_{Si} .

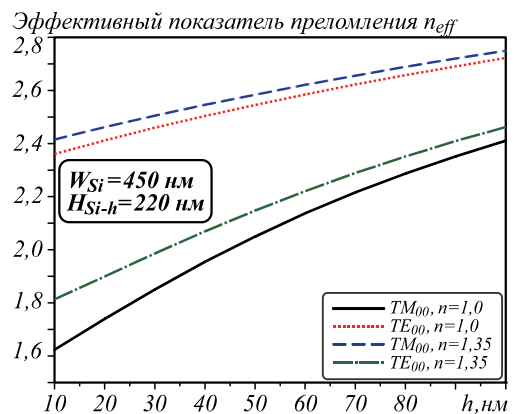


Рис. 3. Эффективный показатель преломления гребенчатого волновода для TE_{00} и TM_{00} -мод

1.3. Щелевой волновод

Щелевой волновод [16] (рис. 2в) был предложен в 2004 году. В данном волноводе свет локализуется в

материале с низким показателем преломления между двумя полосковыми волноводами с высоким показателем преломления. Проектирование данного волновода требует оптимизации параметров ширины щели (g), ширины (W_{Si}) и высоты (H_{Si}) полосковых волноводов. Благодаря большой разнице показателей преломления в щели и в обкладках волновода, нормальная компонента электрического поля испытывает скачок на границе раздела между щелью и обкладкой. При этом достигаются большие значения амплитуды напряжённости электрического поля в области щели с низким показателем преломления:

$$E_{x,g} = \frac{n_{Si}^2}{n_{clad}^2} E_{x,Si}, \tag{2}$$

где $E_{x,g}$, $E_{x,Si}$ – амплитуды напряжённости электрического поля в щели и в кремниевых обкладках соответственно.

Зависимость эффективного показателя преломления от ширины щели g при фиксированных значениях W_{Si} и H_{Si} представлена на рис. 4.

По сравнению с другими традиционными волноводными схемами щелевой волновод способен обеспечивать более высокую локализацию поля в щели [17]. Это свойство делает щелевой волновод привлекательным для приложений, основанных на взаимодействии света с веществом, таких как зондирование и нелинейная фотоника. Используя полимерный электрооптический материал в щелевом волноводе, можно получить эффект Поккельса. Несколько устройств, таких как интерферометры Маха–Цендера и кольцевые резонаторы, были реализованы с использованием щелевых волноводных фазовращателей.

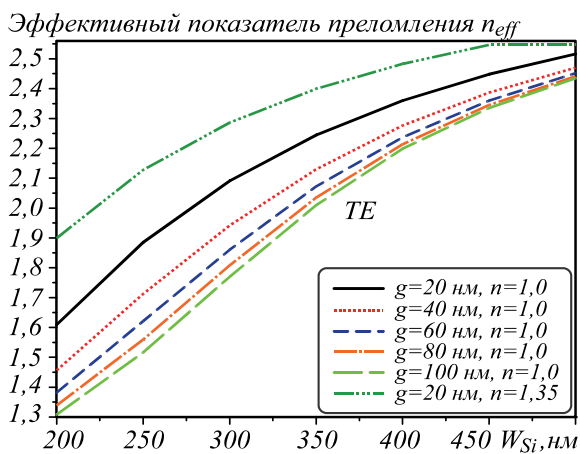


Рис. 4. Эффективный показатель преломления щелевого волновода

Эффективность ввода света в щелевой волновод обычно достигается путём согласования фазы постоянной распространения гребенчатого волновода и щелевого волновода. Проводятся интенсивные исследования по использованию и разработке щелевых волноводов для встроенных оптических датчиков [18–20].

1.4. Гибридный плазмонный волновод

Новый тип волновода, названный гибридным плазмонным волноводом, вызвал значительный интерес благодаря его способности обеспечивать как субволновую локализацию, так и большую длину распространения [20–23]. Он выглядит как волновод изолятор–металл за исключением того, что тонкий слой материала с низким показателем преломления (диоксид кремния SiO_2) расположен между металлическим слоем (золото Au или серебро Ag) и диэлектрическим слоем с более высоким показателем преломления (кремний), как показано на рис. 1з.

Теоретические исследования показали, что слой с низким показателем преломления может поддерживать компактную моду с низкими потерями, длина распространения которой сильно зависит от его толщины [20–23]. Работу гибридного плазмонного волновода можно объяснить с помощью теории связанных мод. Как правило, диэлектрическая волноводная мода ограничена кремниевой сердцевиной, тогда как металлическая поверхность поддерживает поверхностные плазмоны (ПП), которые ограничены металлической поверхностью. Когда эти две структуры находятся в непосредственной близости, диэлектрическая волноводная мода, поддерживаемая кремниевым гребнем, соединяется с ПП-модой, поддерживаемой металлической поверхностью. Благодаря модовой связи свет передаётся в область между металлом и средой с низким показателем преломления. Действительная часть n_{eff} рассчитывается при фиксированных значениях H_{Au} и W , тогда как H_{SiO_2} и H_{Si} варьируются, как показано на рис. 5.

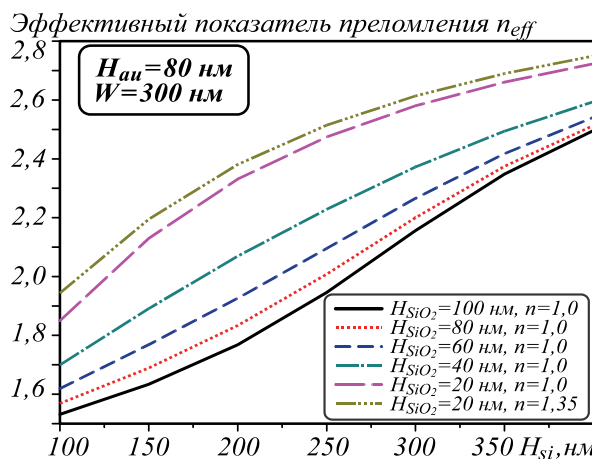


Рис. 5. Эффективный показатель преломления гибридного плазмонного волновода

1.5. Сравнительные характеристики

Ясно, что не всё излучение, распространяющееся в волноводной моде, остаётся внутри сердечника волновода. Одним из показателей качества оптических волноводов является коэффициент локализации поля:

$$\Gamma = \frac{\int_{A_{int}} Re\{[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] \cdot \mathbf{e}\} dx dy}{\int_{A_{tot}} Re\{[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] \cdot \mathbf{e}\} dx dy}, \quad (3)$$

где \mathbf{E} и \mathbf{H} – векторы напряжённостей электрического и магнитного полей соответственно, а \mathbf{e} – единичный вектор в направлении распространения света.

Таким образом, Γ определяется как отношение усреднённого по времени потока энергии через интересующую область (A_{int}) к усреднённому по времени потоку энергии через общую площадь A_{tot} . В зависимости от приложения область A_{int} может отличаться. Например, в случае полоскового и гребенчатого волноводов A_{int} представляет собой кремниевый сердечник, тогда как в случае щелевого волновода A_{int} представляет собой щель (воздух), в гибридном плазмонном волноводе A_{int} представляет собой тонкий слой SiO_2 , помещённый

между Si и Au соответственно. Принимая во внимание, что A_{tot} является интегралом потока энергии в сердечнике и оболочке, коэффициент локализации (рис. 6) полоскового, гребенчатого, щелевого и гибридного плазмонного волноводов рассчитывается в зависимости от их геометрических параметров.

Распределение электрического поля распространяющейся моды в соответствующих волноводах показано на рис. 7.

Максимальный коэффициент локализации для полоскового волновода – 0,91, для гребенчатого – 0,78, для щелевого – 0,65 и для гибридного – 0,59. Таким образом, полосковые и гребенчатые волноводы обеспечивают лучший коэффициент локализации, чем щелевой и гибридный плазмонный волноводы. При этом в щелевом и гибридном плазмонном волноводах около 40% мощности моды находится в оболочке, что делает их удобными для использования в качестве датчиков.

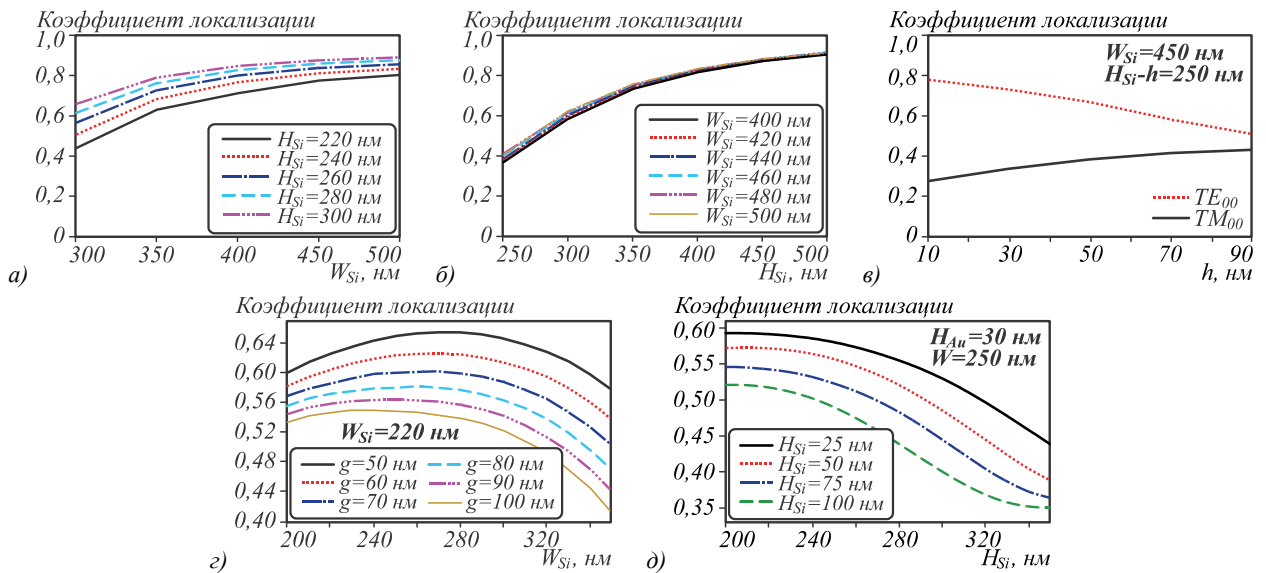


Рис. 6. Коэффициент локализации для полоскового волновода при TE-поляризации (а), полоскового волновода при ТМ – поляризации (б), гребенчатого волновода при поляризации TE- и ТМ- (в), щелевого волновода (г), гибридного плазмонного волновода (д)

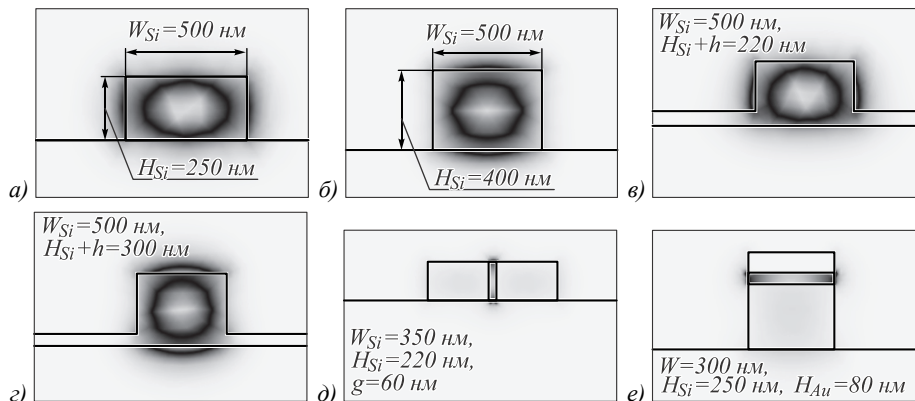


Рис. 7. Распределение мод электрического поля: полоскового волновода TE₀₀ (а), ТМ₀₀ (б); гребенчатого волновода TE₀₀ (в), ТМ₀₀ (г); щелевого волновода (д); гибридного плазмонного волновода (е)

Гибридный плазмонный волновод объединяет свойства диэлектрического и плазмонного волноводов. Далее более детально рассмотрим плазмонные волноводы.

2. Плазмонные волноводы

В последние годы было предложено множество плазмонных волноводов, включая изолятор–металл–изолятор (ИМИ) [24–25], металл–изолятор–металл (МИИ) [10, 26–28], металлические канавки, металлические полосы, металлические клинья и гибридные брэгговские волноводы [29]. Эти волноводы компактно локализируют электромагнитные волны вблизи границы раздела сред, существенно преодолевая дифракционный предел. Структуры МИИ-волноводов считаются одними из наиболее перспективных методов разработки наноразмерных интегральных фотонных схем и являются предпочтительными в областях оптической связи и обработки.

Рис. 8 иллюстрирует механизм действия плазмонных датчиков. Электромагнитное поле, созданное путём возбуждения чувствительного элемента с использованием света, генерирует ПП, которые сильно сконцентрированы на поверхности металла (рис. 8а). Когда исследуемое вещество вступает в контакт с датчиком, эффективный показатель преломления n_{eff}

МИИ-волновода изменяется, и в результате длина волны резонанса λ_{res} подвергается красному смещению (рис. 8б).

ПП очень чувствительны к изменениям показателя преломления в непосредственной близости от поверхности. Изменение показателя преломления может быть определено на основе фиксирования изменения одной из характеристик света, связанных с ПП, например, изменения λ_{res} , интенсивности или фазы.

В 2006 году Р. Гордон [30] и Дж. Дионн с соавторами [31] представили подробные аналитические исследования МИИ-волновода, а С. Божевольный с соавторами [32] экспериментально продемонстрировали канальные плазмонные субволновые волноводные компоненты, такие как интерферометры и кольцевые резонаторы.

Схема МИИ-волновода состоит из трёх слоёв (рис. 9а): диэлектрическая сердцевина из воздуха или другого материала с низким показателем преломления, находящаяся между двумя металлическими оболочками [10]. Дисперсионное соотношение для конфигураций МИИ-волноводов аналитически получено в [33] и имеет зависимость, представленную на рис. 9б.

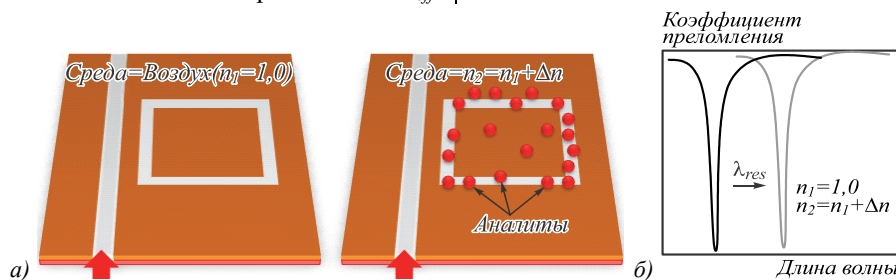


Рис. 8. Иллюстрация действия плазмонных датчиков (а), красное смещение λ_{res} из-за увеличения показателя преломления в окружающей среде (б)

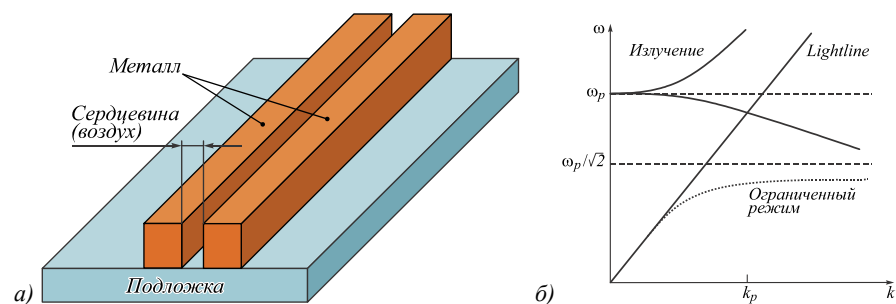


Рис. 9. Схема МИИ-волновода (а), график дисперсии слоистой структуры МИИ [33] (б)

ИМИ-волновод – это ещё одна плазмонная волноводная структура, в которой металл помещается между двумя оболочками изолятора. Такая структура используется во многих приложениях как для активных [34], так и для пассивных [35] устройств. Потери при распространении в ИМИ-волноводах значительно меньше, чем в МИИ-волноводах, поэтому они часто используются для передачи излучения ближнего инфракрасного диапазона на расстояния более 10 мкм. При строгом соблюдении условия симметрии

в таких волноводах может поддерживаться ТМ-мода. Однако отсутствие возможности локализации излучения в области, значительно меньшей длины волны, ограничивает их использование в существенно субволновых компонентах. Согласно принципу неопределённости Гейзенберга, размер диэлектрической моды волновода зависит от дифракционного предела (близко к $\lambda/2n$, где n – показатель преломления сердечника, а λ – длина волны в вакууме), поэтому уменьшение размера диэлектрического волновода менее этого

предела неизбежно приведёт к отсечке. Известно [36], что размер фокусного пятна примерно пропорционален радиусу наносферы. Таким образом, свет ограничен фокусным пятном с размером $\lambda/373$, когда радиус наносферы кремния составляет 2 нм. Это ограничение приводит к необходимости исследования новых структур и материалов волноводов. Волноводы на

основе ПП могут концентрировать свет в существенно субволновом масштабе. Соответственно, плазмонике уделяется значительное внимание из-за возможности преодоления дифракционного предела. R. Yang и Z. Lu [37] представили сравнение размеров мод ТМ для диэлектрических и плазмонных волноводов при $\lambda = 1550$ нм (см. табл. 1).

Табл. 1. Сравнение размеров мод ТМ для диэлектрических и плазмонных волноводов при $\lambda=1550$ нм. Таблица адаптирована из [37]

Тип волновода	Диэлектрик	МИМ	ИМИ	МИ
Материал	Кремний	Серебро, воздух	Серебро, воздух	Серебро, воздух
Толщина сердцевины	300 нм	30 нм	30 нм	–
Полная толщина оболочки	–	300 нм	300 нм	–
N_{eff}	2,5060	1,5788	2,7104	1,0039
Потери (дБ/см)	–	2180,5	846,5	44,0
FWHM	208 нм	46 нм	148 нм	983 нм

Недавно было экспериментально продемонстрировано несколько плазмонных волноводов, таких как волноводы с канавками, многослойные МИМ-волноводы и нанопроволоки, которые способны поддерживать распространение поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) на большие расстояния. В волноводах с металлическими канавками существуют фундаментальные моды и моды высшего порядка, которые в совокупности известны как каналные плазмон-поляритоны (КПП) [32]. Излучение может быть локализовано в различных положениях в канавке в зависимости от возбуждаемой моды. Возбуждение мод и расстояние распространения ППП можно регулировать углом наклона тэйпера (рис. 10а). Чтобы эффективно направлять ППП, глубина канавок не должна быть намного меньше глубины проникновения основной моды. Авторы [32] сообщили о разработке, изготовлении и исследовании субволновых компо-

нентов волноводов на основе КПП, таких как Y-делители, интерферометры Маха-Цендера (ИМЦ) и кольцевые резонаторы, работающие на телекоммуникационных длинах волн [Тип I, рис. 10а–ж]. Авторы [38] продемонстрировали пассивный несбалансированный ИМЦ на основе многослойного плазмонного МИМ-волновода, который может служить основой для разработки компактного электрооптического модулятора [Тип II, рис. 11а–з]. Химически синтезированные нанопроволоки обладают низкими потерями из-за их монокристаллических структур и гладких поверхностей. Основные моды проволоки описываются цилиндрическими функциями Бесселя [39], а распространение ППП на металлической проволоке может быть по спирали. Когда проволока помещается на подложку, можно наблюдать быстрые и медленные моды сверху и снизу проволоки соответственно [Тип III, рис. 12а–д].

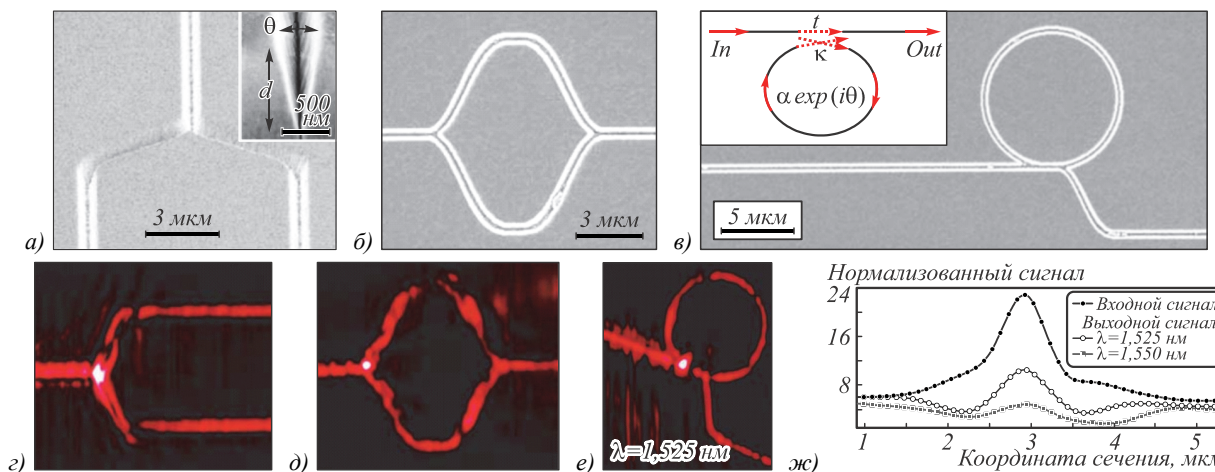


Рис. 10. Тип I: Канальные волноводы [32]: СЭМ-изображение плазмонного Y-сплиттера, ИМЦ и кольцевого резонатора соответственно (а–в); их соответствующие ближнепольные оптические изображения (г–е); нормализованные сечения, полученные с помощью оптических изображений, записанные для двух разных длин волн с нормализованным сигналом на одном уровне во входном канале (ж)

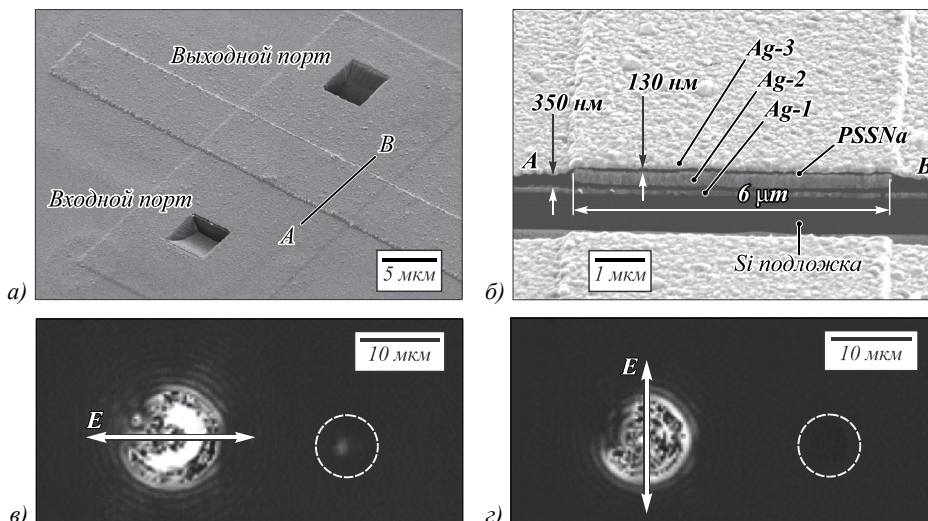


Рис. 11. Тип II [38]: МИМ-волновод: СЭМ-изображение изготовленного несбалансированного ИМЦ (а); поперечное сечение изготовленной структуры, полученной путём фрезерования волновода от точки А до точки В (б); а также ПЗС-изображения несбалансированного ИМЦ при ТМ-поляризованном (в) и ТЕ-поляризованном свете (г) на входном порте

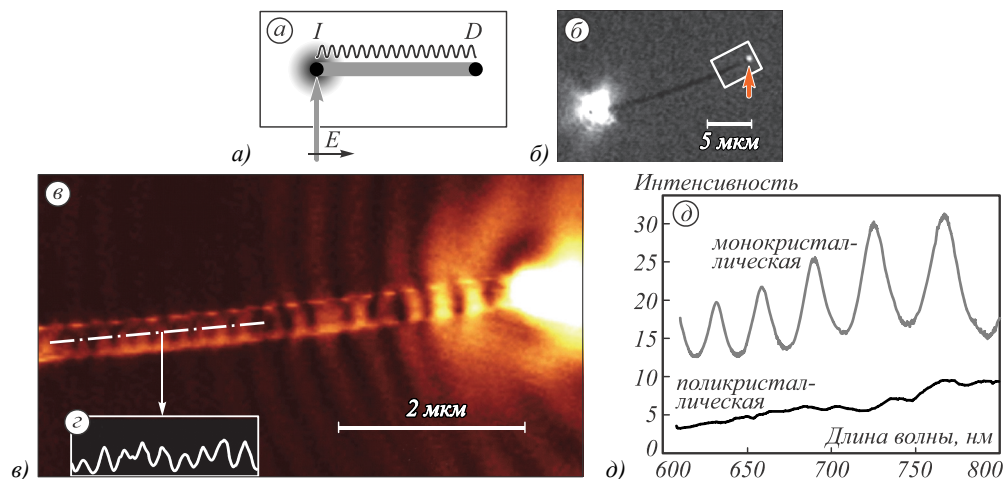


Рис. 12. Тип III [39]: Распространение поверхностного плазмона вдоль серебряной нанопроволоки длиной 18,6 мкм: иллюстрация оптического возбуждения; I – это вход, а D – дистальный конец проволоки (а); микроскопическое изображение: яркое пятно слева – сфокусированный возбуждающий свет, стрелка указывает на свет, рассеянный от дистального конца провода (б); SNOM-изображение области, соответствующей белой рамке в (б) (в); поперечный разрез длиной 2 мкм вдоль пунктирной линии проволоки в (в) (г); спектры рассеянного света от дистального торца нанопроволоки: для химически изготовленной проволоки (монокристаллическая, верхняя кривая) и литографической проволоки (поликристаллическая, нижняя кривая) (д)

3. Важные факторы, связанные с плазмонными датчиками на основе МИМ-волноводов

Прежде чем представить подробный анализ последних разработок плазмонных датчиков на основе МИМ-волноводов, дадим краткое описание наиболее широко используемых плазмонных материалов, методов изготовления, потерь при распространении и методов опроса.

3.1. Материалы и методы изготовления

В рамках модели свободных электронов (модель Друде) электроны внутри металлов считаются движущимися по прямым линиям до столкновения друг с другом. Среднее время релаксации в модели Друде

для трёхмерного электронного газа определяется частотой затухания (γ). Для благородных металлов, таких как золото (Au) или серебро (Ag), используемых в плазмонике, взаимодействия между электронами проводимости и межзонными переходами играют очень важную роль в общем затухании [40]. Потери при распространении для плазмонных металлов, которые рассматриваются как рассеянные в форме омического тепла, можно оценить по мнимым частям их диэлектрических постоянных и напряжённости электрического поля. По этой причине простым показателем качества (FOM) для выбора подходящего плазмонного материала является его удельное сопротивление. На основании данных по оптическому удель-

ному сопротивлению или диэлектрической проницаемости различных металлов [41] можно выбрать наиболее подходящий материал для различных частотных диапазонов. Для ближнего инфракрасного излучения Ag считается перспективным материалом благодаря его незначительной мнимой части диэлектрической проницаемости и превосходной электронной проводимости. Однако недостатком Ag является склонность к окислению, который ограничивает его применение и приводит к необходимости использования Au в этом диапазоне частот. Алюминий (Al) считается наиболее подходящим материалом [42] для применения в ультрафиолетовом (УФ) или глубоко ультрафиолетовом (ГУФ) диапазонах длин волн света, например для длины волны 193 нм, используемой для оптической литографии.

Микротравление полупроводников является относительно более простым, чем металлов (особенно благородных металлов) [43]. Осаждение плазмонных металлов можно проводить в вакууме с помощью методов распыления или испарения. Чтобы получить удовлетворительную однородность и качество, скорость осаждения обычно ограничена менее чем 1 нм/с. Низкая скорость осаждения не является серьёзной проблемой, поскольку в большинстве случаев необходимая высота плазмонной структуры мала.

Более быстрые темпы роста могут быть достигнуты с помощью гальванического метода [44], но качество поверхности может пострадать, что критично для плазмонных волн. Перенос рисунка с фоторезиста на металлы является сложным для благородных металлов, поскольку существует немного методов, доступных для травления Cu, Ag или Au. Однако Al может быть подвергнут плазменному травлению в средах на основе Cl_2 [45].

Подробно методы изготовления плазмонных сенсоров рассмотрены в работах [44, 46].

3.2. Потери при распространении

В отличие от диэлектрических волноводов [47–54], для которых потери при распространении могут быть незначительными, присутствие металла как части структуры делает плазмонные волноводы сильно поглощающими. На распространение управляемых ПП влияют большие омические потери, которые ограничивают максимальное расстояние распространения. Чтобы преодолеть эти потери, был предложен ряд структур с использованием массивов наноразмерных элементов [55–59]. Самая большая длина распространения 13,6 мм была получена для структуры, состоящей из тонкой металлической плёнки, расположенной на диэлектрической подложке и покрытой слоем диэлектрика [59]. Как правило, любой плазмонный волновод разрабатывается с учётом компромисса между потерями при распространении и лока-

лизацией моды. Чем меньше размер моды, тем выше потери при распространении. Формы мод, поддерживаемых плазмонными волноводами, как правило, более сложные. Расчёт формы мод плазмонных волноводов является сложной задачей и зависит от конкретных приложений [60]. Потери при распространении могут быть описаны длиной распространения ППП, на которой его интенсивность уменьшается в $1/e$ от исходного значения.

Также на распространение ППП в МИМ-волноводах влияют другие факторы, такие как ширина щели и диэлектрическая среда в ней. В сложных плазмонных схемах основные потери энергии происходят от рассеяния на стыках. Потери от нагревания также неизбежны, но по сравнению с рассеянием на стыках они малы.

3.3. Методы опроса

Плазмонные датчики могут быть классифицированы на три различные категории в зависимости от метода опроса: по интенсивности, фазе и длине волны. Разработка плазмонных сенсоров, основанных на опросе интенсивности, была продемонстрирована многочисленными исследовательскими группами [61–62].

Для возбуждения плазмонных мод требуются монохроматические источники света, такие как лазеры или суперлюминесцентные светодиоды (SLED) с узкополосными фильтрами. Эти источники света демонстрируют лучшую стабильность и более высокую интенсивность по сравнению с широкополосными источниками, что приводит к лучшему отношению сигнал/шум (SNR). Изменение интенсивности света, связанное с плазмонными модами, обычно измеряется с использованием 1D фотодиодной матрицы (PDA) или 2D детекторов, таких как приборы с зарядовой связью (CCD) или камеры на основе комплементарных структур металл–оксид–полупроводник (CMOS).

Плазмонные датчики, которые используют метод фазового опроса, стали рассматривать недавно [63–65], и были предложены различные подходы к таким оценкам. Интересным подходом является получение фазовой информации из измерений интенсивности. Наиболее часто используемый метод основан на поляриметрии, когда информация о фазе определяется по интерференции *s*- и *p*-поляризованного света с использованием поляризатора. *S*-поляризация соответствует электрическому полю, перпендикулярному плоскости падения, в то время как *p*-поляризация соответствует электрическому полю, параллельному плоскости падения. Их относительная разность фаз определяется из серии измерений интенсивности: либо с помощью угловой модуляции, полученной при вращении анализатора [63], либо с помощью фазовой модуляции, введённой жидкокристаллической перестраиваемой волновой пластиной, и анализатором с фиксированным выходом [64]. По сути, этот же принцип используется в эллипсометрии и является

хорошо разработанным методом определения характеристик тонких плёнок, что делает плазмонные датчики на основе фазового опроса коммерчески доступными [65].

Измерение изменения резонансной длины волны ($\Delta\lambda_{res}$) является наиболее распространенным методом опроса, используемым в кольцевых резонаторах на основе плазмонных структур [66]. Оптические платформы на основе опроса длины волны обычно используют полихроматический источник света, например, галогенную лампу или суперлюминесцентный диод (SLED), который охватывает весь диапазон спектра, в котором ожидается присутствие λ_{res} . Такой источник света является предпочтительным, когда используется конфигурация с фиксированным углом падения. Спектр света, соответствующий ППП, обычно изучают с использованием спектрометра на основе CCD, CMOS или PDA. Свойства используемых спектрометров влияют не только на характеристики датчика, но и на его степень миниатюризации, поскольку им требуется определённая длина пути для достаточного рассеивания света в чувствительном к положению детекторе. Миниатюризация спектроскопических оптических систем для плазмонных датчиков является одной из проблем, требующих исследований.

4. Основные разработки плазмонных МИМ-резонаторов для измерения показателя преломления

В этом параграфе мы рассмотрим наиболее широко изученные конструкции МИМ-датчиков для измерения показателя преломления, такие как кругло-кольцевые резонаторы (CRR), квадратно-кольцевые резонаторы (SRR), разрезанные квадратно-кольцевые резонаторы (SSRR), зубчато-кольцевые резонаторы, зубчатые нанополости и шестигранные полости. При разработке таких датчиков используется либо торцевая, либо боковая связь с полостью. Резонаторы с боковой связью демонстрируют относительно лучшую концентрацию излучения (меньший FWHM) по сравнению с конструкциями с торцевой связью [67]. Большинство конструкций датчиков, основанных на плазмонных МИМ-резонаторах, исследованы теоретически и численно. В настоящее время актуальной задачей является экспериментальная реализация этих конструкций и обеспечение их доступности в биомедицинских приложениях. Далее обсудим две основные характеристики плазмонных датчиков, на основе которых оценивается их производительность.

4.1. Чувствительность (S)

Наиболее широко используемая характеристика производительности плазмонных датчиков заключается в способности обнаруживать изменения показателя преломления. Количественно эта характеристика определяется как объёмная чувствительность:

$$S = \Delta\lambda_{res} / \Delta n, \tag{4}$$

где λ_{res} – длина волны, на которой происходит возбуждение ППП, а Δn – изменение показателя преломления.

Типичные значения S для различных плазмонных наноструктур, как оцененные теоретически, так и измеренные экспериментально, приведены в табл. 2. Среди других параметров чувствительность существенно зависит от типа поддерживаемой электромагнитной моды (длины затухания), резонансной длины волны, геометрии возбуждения и свойств подложки. Зависимость S от геометрических параметров кольцевых резонаторов МИМ-волноводов, окружённых однородным образцом, была исследована несколькими группами [68–87].

Плазмонные метаматериалы, состоящие из совокупности наностержней Au, используются для имитации дисперсии ППП [88], улучшая чувствительность. Когда расстояние между наностержнями значительно меньше длины волны падающего излучения, плазмонные метаматериалы поддерживают направляемую моду, которая имеет условия резонансного возбуждения, сравнимые с ППП-модой гладкой металлической плёнки. Такой метаматериал обеспечивает превосходную чувствительность 30000 нм/RIU к изменениям показателя преломления среды между стержнями.

4.2. Показатель качества (FOM)

Способность плазмонного датчика измерять незначительные изменения показателя преломления прямо пропорциональна чувствительности S и также обратно пропорциональна ширине отслеживаемой резонансной характеристики. Комбинация этих параметров часто упоминается как показатель качества:

$$FOM = S / FWHM, \tag{5}$$

где FWHM – ширина спектральных провала или пика по полуспаду.

Хотя FOM в некоторых работах [71, 78, 83, 85] очень высока, она определяется по-разному в каждой работе и обычно упоминается как FOM*.

Например, в [89] высокое значение $FOM^* = 2,33 \times 10^4$ вычисляется на фиксированной длине волны с использованием выражения:

$$FOM^* = \Delta R / (R\Delta n), \tag{6}$$

где R – интенсивность отражения в структуре датчика, ΔR – изменение интенсивности отражения из-за изменения показателя преломления (Δn) окружающей среды.

В [83] $FOM^* = 4,05 \times 10^4$ достигается с использованием выражения

$$FOM^* = \Delta T / (T\Delta n), \tag{7}$$

где T обозначает коэффициент пропускания в предлагаемых структурах, а $\Delta T / \Delta n$ – это изменение передачи на фиксированной длине волны, вызванное изменением показателя преломления. Значения FOM для ряда плазмонных датчиков приведены в табл. 2.

Табл.2. Характеристики плазмонных МИМ-резонаторов для измерения показателя преломления

№	Чувствительность, S (nm/RIU)	Показатель качества, FOM (RIU ⁻¹)	Конструкция	Ссылка
1	1060	203,8	Концентрические кольца	[68]
2	3460	–	Круглое кольцо	[69]
3	1010	–	Круглое кольцо	[70]
4	820	$3,2 \times 10^5$ (*)	Две канавки	[71]
5	1535	152	Брэгговская решетка	[72]
6	596	7,5	Двойная прямоугольная полость	[73]
7	938	$1,35 \times 10^4$ (*)	Квадратное кольцо	[74]
8	1071,4	12,5	Разрезанное кольцо	[75]
9	718	4354 (*)	Круглое кольцо	[76]
10	800	37	Круглое кольцо	[77]
11	892	$3,5 \times 10^6$ (*)	Наностержни в квадратном резонаторе	[78]
12	680	–	Т-образная	[79]
13	1200	19,7	Квадратное кольцо	[80]
14	1260,5	41,67	Полукольцевой резонатор	[81]
15	1120	$2,68 \times 10^5$ (*)	Квадратный выпуклый кольцевой резонатор	[82]
16	2000	$4,05 \times 10^4$ (*)	Круглое кольцо	[83]
17	1900	–	Асимметричные двойные графеновые слои	[84]
18	1700	$8,3 \times 10^4$ (*)	Квадратное кольцо	[85]
19	1060	176,7	Резонаторы-заглушки с металлическими прорезями	[86]
20	793,3	52,9	Двойное наностенное квадратное разрезанное кольцо	[87]

Подход к улучшению FOM за счет уменьшения спектральной ширины (FWHM) основан на резонансах Фано, которые используются для преодоления дифракционного предела в металлических наноструктурах [90]. Исследование [91] было посвящено достижению узкого FWHM посредством незначительных структурных асимметрий. Платформы резонансной асимметричной кольцевой/дисковой системы Фано демонстрируют спектрально-узкие характеристики с шириной FWHM до 9 нм и обеспечивают высокий S до 648 нм/RIU, как экспериментально продемонстрировано А. Setinc соавторами в [91]. Для достижения резонанса Фано были предложены различные виды плазмонных структур, такие как прямоугольные полости [92], плазмонные нанокластеры [93], нанощели [94] и структуры МИМ-волноводов [95].

Ожидается, что плазмонные датчики, основанные на резонансе Фано, будут очень чувствительными из-за их узкой и асимметричной формы линии [96], благодаря которой спектр пропускания быстро уменьшается от пика до впадины. FWHM спектра пропускания достаточно узок, что значительно улучшает разрешение сенсора [97].

В 2019 году появилось множество сообщений о сенсорных структурах для измерения показателя преломления, основанных на резонансе Фано, среди которых мы упоминаем лишь несколько [98–103]. Резонансные системы Фано могут потенциально превосходить более обычные резонансные системы Лоренца с точки зрения FOM; однако даже сильный контраст плазмонных спектральных характеристик может не привести на практике к улучшению способности обнаруживать меньшие изменения в объемном показателе преломления.

4.3. Примеры новых датчиков показателя преломления

В последние годы многие конструкции МИМ-резонаторов были предложены [67–104] и исследованы для зондирования показателя преломления. Набор таких конструкций представлен на рис. 13. Некоторые формируют стандартные формы линий Лоренца, другие – резонансы Фано, которые значительно улучшают FOM (рис. 14).

По сравнению с оптоволоконными датчиками [12, 105–106] плазмонные датчики относительно малы и их легко интегрировать в микросхему. Однако их чувствительность не такая высокая, как волоконных датчиков. В частности, в работе [106] был продемонстрирован фотонно-кристаллический волоконный датчик ПП с чувствительностью около 30000 нм/RIU. Следовательно, повышение чувствительности плазмонных датчиков является основной темой исследований. Чувствительность, полученная в работе [69], выше, чем у большинства ранее зарегистрированных датчиков.

Недавно был предложен квадратно-кольцевой резонатор с боковой связью с максимальным S и FOM 1320 нм/RIU и 16,7 соответственно [67]. Большинство ранее описанных плазмонных МИМ-устройств были разработаны с использованием 2D-моделирования, которое рассматривает высоту конструкции как бесконечную с целью сокращения времени расчёта. Однако 3D-анализ показал, что высота конструкции играет очень важную роль в улучшении чувствительности датчика. Была представлена конструкция плазмонного датчика, основанная на грибо-

подобных массивах Au, которая обеспечивает $S=1050$ нм/RIU [107]. Yu. Tang с соавторами сообщили о ДПП МИМ-волновода в сочетании с резонаторами, у которого $S=1125$ нм/RIU [108]. В. Вэй с соавторами сообщили о плазмонном круговом резонаторе для датчиков и фильтров показателя преломления с чувствительностью $S=1010$ нм/RIU [70]. Был представлен МИМ-волновод, связанный с асимметричным резонатором, для датчиков и приложений с замедлением излучения. Спектр пропускания датчика

имел характеристики, подобные электромагнитно индуцированной прозрачности [109]. Для этого датчика $S=806$ нм/RIU, FOM=66. На эффекте электромагнитно индуцированной прозрачности основаны многочисленные приложения, такие как сверхбыстрое переключение, оптическое хранение данных, оптическая фильтрация и оптическая нелинейность, которые обусловлены крутым изменением дисперсии и узким резонансом в окне прозрачности [110–111].

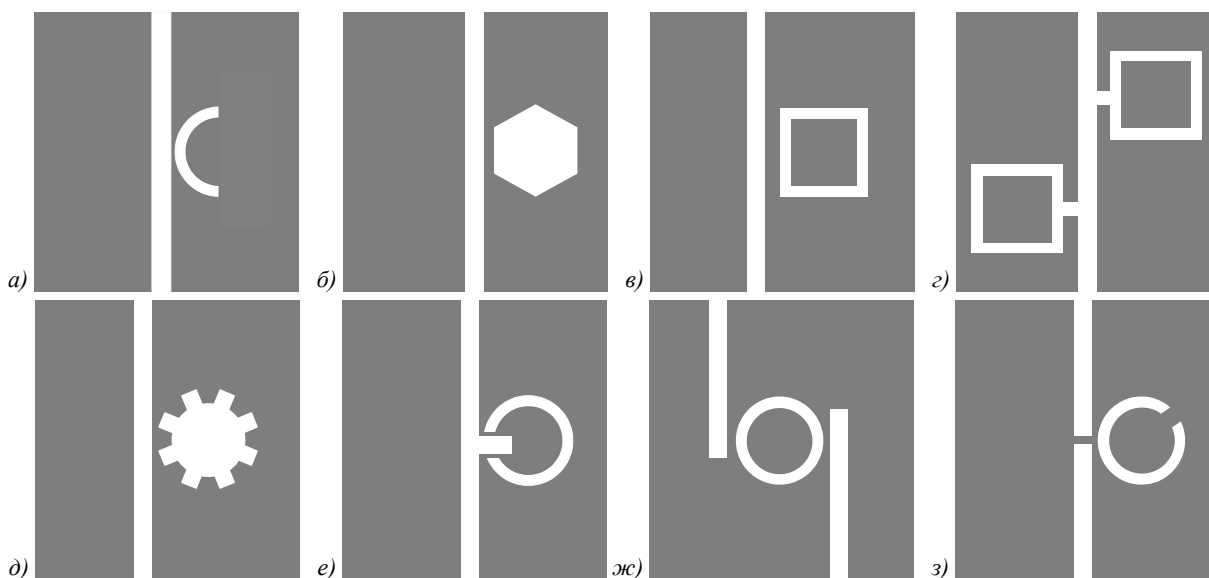


Рис. 13. Полукольцевой резонатор (а), шестиугольный резонатор с боковой связью (б), кольцевой резонатор с боковой связью (в), кольцевой резонатор с двусторонней связью (г), зубчатый резонатор (д), кольцевой резонатор с разрезом (е), кольцевой резонатор с двойной связью (ж), разрезной кольцевой резонатор с боковой связью (з)

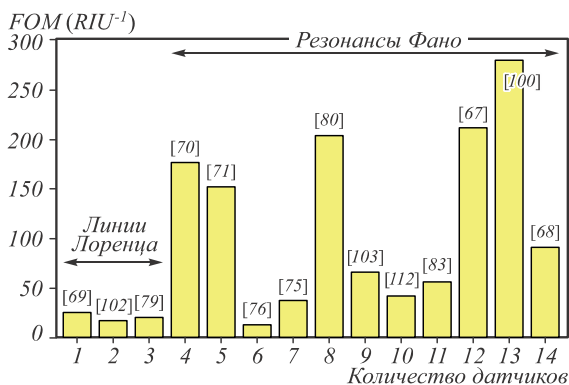


Рис. 14. FOM недавно зарегистрированных плазмонных датчиков, использующих резонанс Лоренца и Фано

Учитывая развитие высокоинтегрированных фотонных схем, большинство исследований было посвящено механизму множественных резонансов Фано в одиночных одноволновых МИМ-структурах. Композитные конфигурации на основе МИМ-волноводов, такие как композитные структуры с канавками и каскадными структурами канавок, были исследованы в нескольких работах [71, 81, 83, 101]. Двойные пики резонанса Фано с асимметричной формой линии были достигнуты в ИК-диапазоне длин волн. Ё. Чен и соавторы [112] предложили уникальный способ со-

здания двойных резонансов Фано, рассматривая два одинаковых короткозамкнутых резонатора, соединённых с прямоугольной полостью со значениями $S=1100$ нм/RIU и FOM=91. Множественные резонансы Фано были достигнуты с использованием резонатора с щелевой полостью и торцевым сопряжением с высокими значениями S и FOM [113].

Хотя данный обзор не может полностью охватить столь сложную и хорошо разработанную тему, как плазмонные сенсоры, читателям предлагается обратить внимание также на работы одной из лидирующих групп, занимающихся плазмонными волноводами, и в том числе сенсорами на их основе, – группы проф. П. Берини (Университет Оттавы, Канада) [114–116]. В частности, в обзорной работе [114] оценивается потенциал применения ПП-волноводов для объемного и поверхностного (био)химического зондирования, предполагая их использование в интегрированном оптическом датчике, таком как интерферометр Маха–Цендера. В работе [115] описано изготовление и физические характеристики волноводов и интегральных компонентов на Cytop. Это новый тип фторполимера, который в отличие от обычных кристаллических фторполимеров имеет аморфную структуру, что делает его исключительно прозрачным

(с уровнем пропускания более 95 %) для видимого света. В работе [116] предложен ПП-волновод с относительно большой дальностью действия (~ 1 мкм вместо обычного ~ 200 нм). Рассмотренный датчик изменения показателя преломления растворов состоит из золотых полос шириной 5 мкм и толщиной 22 нм, встроенных в низкоиндексный оптический фтор-полимер в полимер с жидкостными каналами, вытравленными в верхней оболочке.

Кроме того, внимания заслуживают работы Д.В. Нестеренко, С. Секката и З. Хаяши [117–119]. В работе [117] детально обсуждается плазмон-индуцированная прозрачность и резонанс Фано, проявляемые структурой сенсора поверхностного плазмонного резонанса с волноводной связью. Показана аналогия между рассмотренной электромагнитной системой и системой связанных осцилляторов, которая позволяет заключить, что вызванная плазмонами прозрачность и резонанс Фано обусловлены связью между поверхностным плазмонным поляритонном и плоской волноводной модой. В работе [118] рассмотрена структура на основе диэлектрического волновода, отделенного от металлической пленки диэлектрическим разделительным слоем с низким индексом. Показано, что степень потерь волноводной моды может контролироваться толщиной этого разделительного, что существенно влияет на ширину и высоту резонансных линий спектров отражения. При этом показана возможность достижения очень узких глубоких резонансных всплесков, приводящих к высокой чувствительности по интенсивности (~ 10⁵ раз выше, чем у обычных поверхностных плазмонных датчиков). В работе [119] предложен сенсорный чип на основе МИМ-структуры, состоящей из толстого изоляционного слоя, расположенного между металлическими слоями из разных металлов (Ag и Au). Резкий резонанс соответствует гибридной ППП-моду, локализованной вблизи границы раздела золотой пленки и водного раствора глюкозы на верхней части сенсорного чипа, а широкий резонансный провал соответствует симметричной ППП-моду МИМ-структуры. Такой чип имеет FOM в 7,5 раз больше, чем у обычного плазмонного датчика с одинаковыми золотыми металлическими слоями.

5. Пример разработки плазмонного датчика с помощью метода конечных элементов

Широкие возможности для численного моделирования электромагнитных процессов предоставляют современные программные продукты, такие как COMSOL Multiphysics [120]. Данное программное обеспечение позволяет моделировать различные физические процессы в системах со сложной пространственной геометрией. Для решения уравнений модели используется метод конечных элементов на нерегулярных сетках. Возможно наложение различных начальных и граничных условий. Манипулирование

шагом сетки позволяет повысить точность расчётов в ключевых участках расчётной области. По мнению авторов, в отличие от COMSOL Multiphysics наиболее распространённые коммерческие конкуренты – Ansys [121] и Lumerical [122] – не предоставляют столь удобного интерфейса и расчётных возможностей для моделирования электромагнитных процессов, в особенности для моделирования фотонных сенсорных устройств. Трёхмерные модели довольно высокой сложности могут создаваться как с помощью собственного интерфейса, так и с помощью методов трёхмерной компьютерной графики.

В этом параграфе мы рассматриваем подробный пример разработки с помощью метода конечных элементов плазмонного датчика показателя преломления. Исследуется многоканальный квадратно-кольцевой резонатор с двойными наноразмерными металлическими стенками в сочетании с шиной МИМ-волновода. Такое устройство можно использовать в качестве фильтра или датчика.

Резонансные моды прямоугольного контура и круглого кольца часто связаны. Однако существует общее мнение, что прямоугольный контур может более эффективно соединиться с шиной волновода в расположении с боковой связью по сравнению с круглым кольцом. Другое преимущество геометрии квадратного контура состоит в том, что он может возбуждать новые резонансные моды в изгибах прямоугольной кольцевой структуры [123]. Предложенная структура устройства настраивается путём размещения двойных металлических наностенок внутри обычного квадратного МИМ-кольца, что нарушает симметрию кольцевого МИМ-резонатора и исключает резонаторы этого типа из категории резонаторов распространяющихся волн. Резонансные моды могут быть экстраординарно возбуждены или подавлены путём правильного позиционирования наностенок. Рассмотрим влияние наностенок на фильтрующие и чувствительные характеристики на основе численного моделирования с помощью двумерного метода конечных элементов, реализованного в программном продукте COMSOL [120]. В конструкции выбраны такие параметры, как относительная диэлектрическая проницаемость (ϵ_r) серебра (Ag) и показатель преломления (n) воздуха. Для поглощения энергии уходящего электромагнитного поля вокруг конструкции устройства установлено граничное условие рассеяния (SBC). Относительная диэлектрическая проницаемость Ag подчиняется модели Друде–Лоренца следующим образом:

$$\epsilon_m(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)}, \quad (8)$$

где $\epsilon_\infty = 3,7$ – диэлектрическая проницаемость на бесконечной частоте, $\omega_p = 9,1$ эВ – объёмная плазменная частота свободных электронов проводимости,

$\gamma = 0,018$ эВ – частота столкновений электронов, ω – угловая частота падающего света в вакууме. Ag используется из-за его незначительной мнимой части относительной диэлектрической проницаемости для излучения в ближней инфракрасной области. Следовательно, его энергопотребление низкое по сравнению с Au и Al. Кроме того, слой Ag демонстрирует отличную адгезию к подложке и может быть легко нанесён заданным рисунком в разбавленной азотной кислоте (HNO₃) и воде (H₂O) с высокой селективностью травления.

Конструкция фильтра МИМ-волновода в этом исследовании состоит из четырёх разрезных квадратно-

кольцевых резонаторов со двоянными наностенками по два на каждой стороне шины волновода (рис. 15). Внешние размеры квадратов обозначены L1, L2, L3 и L4, где L1 > L2 > L3 > L4. Внутренние размеры квадратов $L_i - d$, где $i = 1, 2, 3, 4$, а d – ширина полости. Разделение между шиной волновода и кольцами обозначается буквой g , которая фиксируется на протяжении всего процесса расчёта. Двойные наностенки вставлены в кольцо, ширина стенки обозначена S . Все четыре кольца подключены к выходным портам P_i, которые передают отфильтрованную длину волны в зависимости от условий резонанса. Структурные параметры конструкции приведены в табл. 3.

Табл. 3. Структурные параметры многоканального фильтра

W _{bus} , нм	L1, нм	L2, нм	L3, нм	L4, нм	S, нм	d, нм	g, нм
30	100	90	80	70	5–25	5–20	20

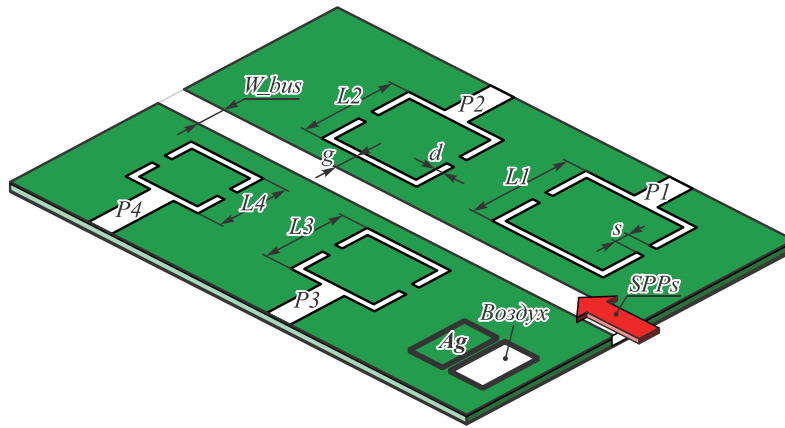


Рис. 15. Схема многоканального фильтра длин волн

Когда ТМ-поляризованная плоская волна запускается в структуру МИМ-волновода, она возбуждает ППП, которые распространяются на границе раздела металла и диэлектрика в волноводе. Поскольку ширина волновода значительно меньше длины волны падающего излучения, в этой структуре может поддерживаться только фундаментальная ТМ-мода. Распределение электрического поля в поперечном сечении МИМ-волновода показано на рис. 16а. Резонансные длины волн λ_{res} могут быть определены путём изменения эффективного показателя преломления (n_{eff}) кольцевого резонатора. n_{eff} резонатора полностью зависит от размеров МИМ-волновода, как показано на рис. 16б. n_{eff} в МИМ-структуре можно получить с помощью уравнений Максвелла и граничных условий:

$$k_d \epsilon_m \tanh\left(\frac{k_d d}{2}\right) + \epsilon_d k_m = 0, \tag{9}$$

$$k_{d,m} = \sqrt{\beta_{SPP}^2 - \epsilon_{d,m} k_o^2}, \tag{10}$$

$$n_{eff} = \frac{\beta_{SPP}}{k_o}, \tag{11}$$

где ϵ_d и ϵ_m представляют диэлектрическую проницаемость изолятора и металла; k_d и k_m – поперечные постоянные распространения диэлектрика и металла соответственно; $k_o = 2\pi/\lambda$ – волновой вектор возбуждающего излучения в свободном пространстве. Кроме того, n_{eff} также можно варьировать, вводя в окружающую среду вещество с немного более высоким показателем преломления. В результате с увеличением показателя преломления среды резонансные моды смещаются на большие длины волн. Эта возможность позволяет использовать рассмотренную конструкцию в сенсорных приложениях.

Действие многоканального фильтра, показанного на рис. 15, описывается следующим образом. Плоская волна вводится в шину волновода, которая, в свою очередь, соединяется с расщеплёнными кольцами, которые удовлетворяют условиям резонанса, возбуждая поверхностные плазмонные резонансы перед подключением резонансных мод к соответствующим выходным портам. Наностенки размещаются в центре

каждого кольца, в результате чего целочисленные моды возбуждаются в видимом и ближнем ИК-диапазонах длин волн. На рис. 17а-г показано возбуждение мод на резонансных длинах волн для соответствующих колец.

Для L1, L2, L3 и L4 передаваемые длины волн равны 838 нм, 753 нм, 675 нм и 598 нм соответственно, как показано на рис. 18а. На рис. 18б видно, что λ_{res} смещается в сторону более высоких длин волн с увеличением стороны кольца. По этой причине фильтры с различными спектрами пропускания могут быть сконструированы в видимом или ближнем ИК-диапазонах путём выбора подходящего размера L кольца. Кроме того, такая конструкция фильтра мо-

жет быть рассчитана на любое желаемое количество каналов фильтрации.

Соотношения между λ_{res} и L, S и d показаны на рис. 18б-г. На рис. 18в,г выбрано фиксированное значение ширины кольца L = 80 нм. Можно наблюдать, что λ_{res} испытывает синее смещение с увеличением S и d, в то время как красное смещение наблюдается в случае увеличения L. Многоканальные кольцевые резонаторы могут использоваться для повышения эффективности и чувствительности плазмонных фильтров. В последнее время было установлено, что кольцевые резонаторы могут поддерживать мультиполярные плазмонные резонансы в многоканальных фильтрах.

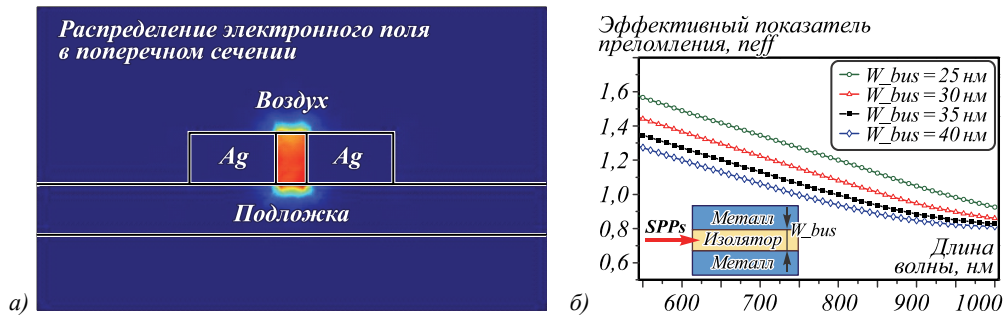


Рис. 16. Распределение электрического поля в поперечном сечении МИМ-волновода (а), действительная часть эффективного показателя преломления для ширины шины волновода 25, 30, 35, 40 нм (б)

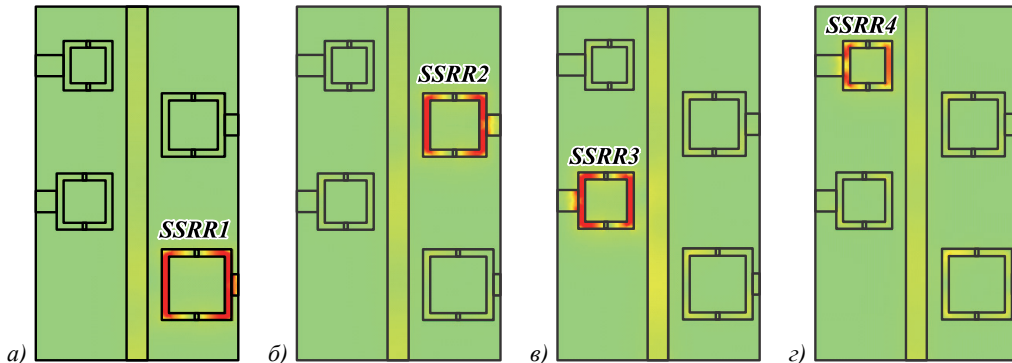


Рис. 17. Распределение электрического поля в кольцах на длине волны резонанса 838 нм (а), 753 нм (б), 675 нм (в), 598 нм (г)

6. Биологические приложения

Область ближнего ИК-диапазона между 700 – 1000 нм признана окном биологической прозрачности благодаря уменьшенному поглощению, которое обеспечивает более глубокое проникновение света в организм и способствует эффективному контролю мощности в интересующей области [124–125]. Недавно было предложено использование наноразмерных плазмонных структур для лечения онкологических заболеваний [126]. Для устранения опухолевых клеток предлагаемую фильтр-систему можно вакцинировать в организм и затем фототермически возбудить λ_{res} . Любые плазмонные устройства, которые действуют как биосенсоры для лечения рака, должны находиться в области окна биологической прозрачности. Кроме того, возможность выбора λ_{res} обеспечивает широкий спектр применяемых источников нагрева.

Поэтому нерезонансные моды также могут быть интересным вариантом для использования в таких приложениях. Например, нерезонансные моды для SSRR с L = 80 нм можно исследовать путём помещения наностенок в другое положение в кольце, как показано на рис. 19. Размер кольца может быть дополнительно уменьшен, чтобы сместить нерезонансные моды ниже 1000 нм. Это позволит уменьшить размер наноструктуры для более эффективного клеточного поглощения.

Из результатов моделирования, показанных на рис. 18, видно, что возбуждение нецелых мод в структуре резонатора с регулярным квадратным кольцом маловероятно. Однако, точно размещая металлические наностенки в кольце, можно возбуждать не только явные резонансные моды квадратного кольцевого резонатора, но и интересные нецелые резонансные моды. Это явление можно использовать

для более эффективной разработки перестраиваемых фильтров. В недавних исследованиях была предложена круговая комплементарная структура резонатора с расщеплённым кольцом, в которой нецелочисленные резонансные моды оказываются чрезвычайно чувствительными к размеру наностенок и могут легко

управляться путём изменения ширины и положения наностенок [127]. Поэтому для рассматриваемой структуры (рис. 15) дополнительно исследовано влияние структурных параметров L , g , S и положение наностенок (рис. 19).

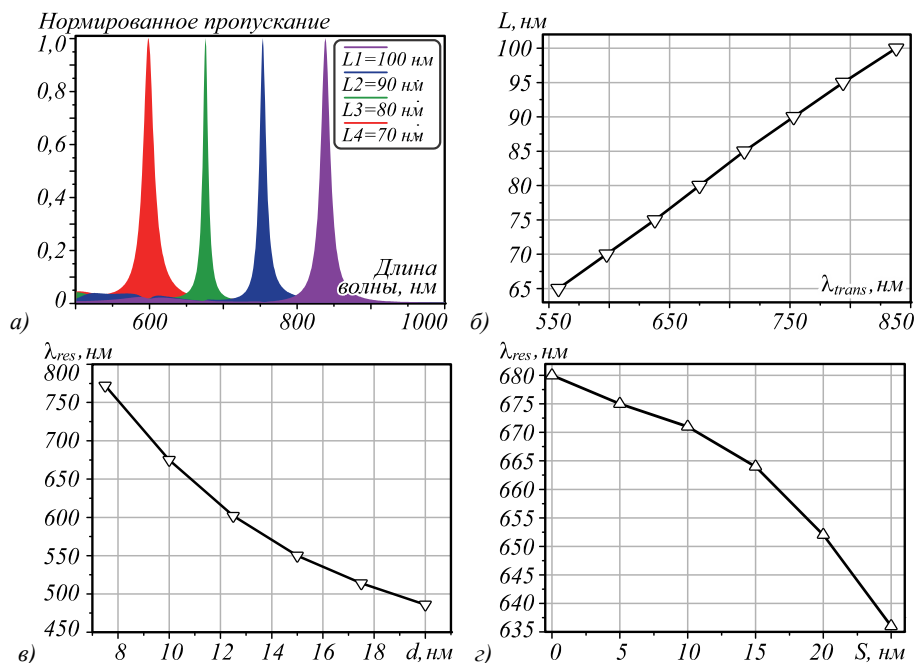


Рис. 18. Нормированное пропускание фильтра от P1, P2, P3 и P4 (а), зависимость λ_{trans} от длины стороны кольца (б), зависимость λ_{res} от зазора между шиной волновода и кольцом (в), зависимость λ_{res} от ширины наностенок (г)

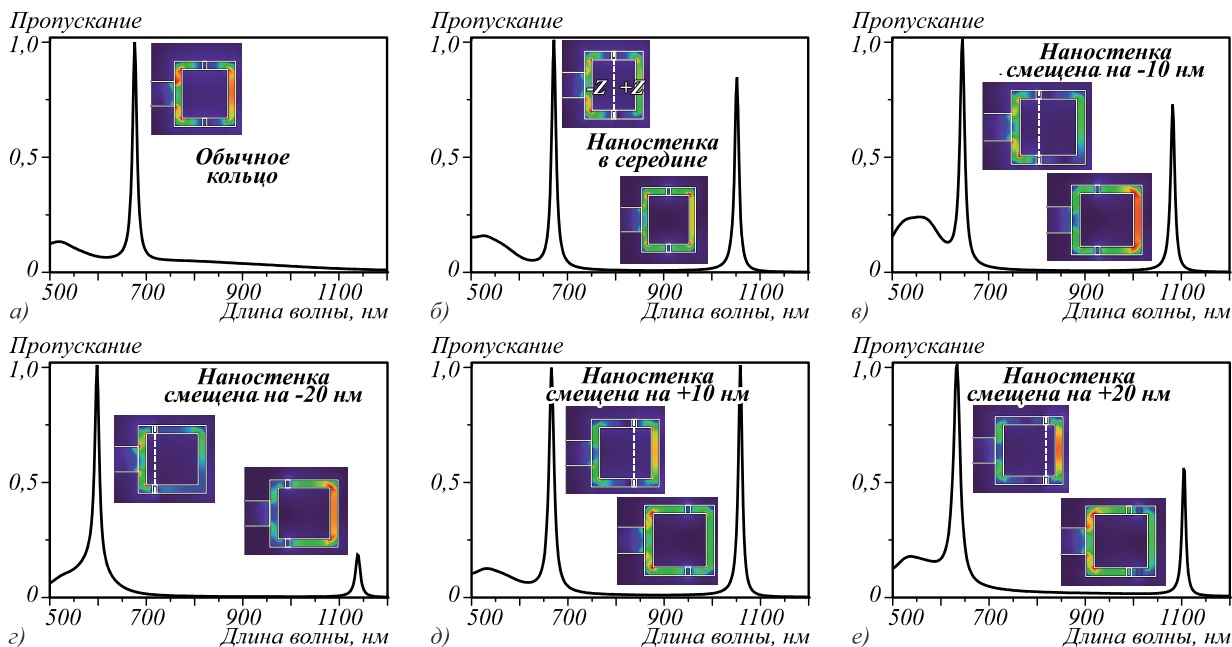


Рис. 19. Резонантный режим обычного кольцевого резонатора (а); резонансные моды для разрезного квадратно-кольцевого резонатора с двойными наностенками, которые размещены в середине (б), смещены на -10 нм от середины (в), смещены на -20 нм от середины (г), смещены на $+10$ нм от середины (д), смещены на $+20$ нм от середины (е)

Сначала рассчитан спектр пропускания регулярно-го кольца, и получается только целочисленная мода при $\lambda_{res} = 676$ нм, как показано на рис. 19а. После этого двойные наностенки помещаются в середине,

что ведёт к формированию целой и нецелой мод при 672 нм и 1054 нм соответственно. Пик передачи нецелой моды немного ниже, чем целой моды (рис. 19б). Затем наностенки смещаются. Поскольку положение

наностенок смещено на -10 нм, т.е. влево (рис. 19б), целая мода демонстрирует синее смещение и появляется при 646 нм, в то время как нецелая мода перемещается на 1082 нм с пониженным пропусканием (рис. 19в). При дальнейшем перемещении наностенок влево (-20 нм) резонанс целой моды демонстрирует дальнейшее синее смещение ($\lambda_{res} = 598$ нм), в то время как нецелая мода сильно подавляется и появляется при 1138 нм (рис. 19г). На рис. 19д, е показан спектр передачи, когда наностенки перемещаются вправо. Равная мощность передачи получается для целой и нецелой мод, когда наностенки смещены на $+10$ нм.

Кроме применения в качестве фильтра, предлагаемая конструкция может использоваться в биосенсорных приложениях. λ_{res} могут быть сдвинуты на более высокие длины волн путём введения более высокого показателя преломления в окружающей среде. Тогда предлагаемая структура может функционировать как модифицируемый датчик и фильтр одновременно. Чувствительность S (формула (4)), показатель качества FOM (формула (5)) и добротность Q используются для количественного определения производительности ДПП. Добротность определяется по следующей формуле:

$$Q = \lambda_{res} / \text{FWHM}, \tag{12}$$

где FWHM – полная ширина на половине максимума пика λ_{res} .

Чтобы оценить чувствительность S рассматриваемой конструкции, окружающая среда была заполнена веществом с различным показателем преломления: $n = 1,3; 1,35; 1,4; 1,45; 1,5$ и рассчитан спектр пропускания, полученный из P1, P2, P3 и P4, как показано на рис. 20. При увеличении показателя преломления среды наблюдается значительное красное смещение λ_{res} . Этот эффект показывает, что изменение показателя преломления в резонаторе обеспечивает дополнительные средства для контроля фильтрующих характеристик структуры.

Производительность датчика в рассмотренной конструкции оценивалась по S , FOM и Q . Как видно из рис. 21а-в, S , Q -фактор и FOM возрастают линейно с размером кольца. Наилучшие полученные значения характеристик $S = 793,3$ нм/RIU, $Q = 82,1$ и FOM = 52,9. Лучшие спектральные характеристики датчика обобщены в табл. 4.

Табл. 4. Спектральные характеристики структуры

	SSRR 1	SSRR 2	SSRR 3	SSRR 4
Чувствительность (нм/RIU)	793,3	711,4	626	537,8
Q -factor	82,1	73,8	65,9	57,7
FOM	52,9	47,4	41,7	35,9

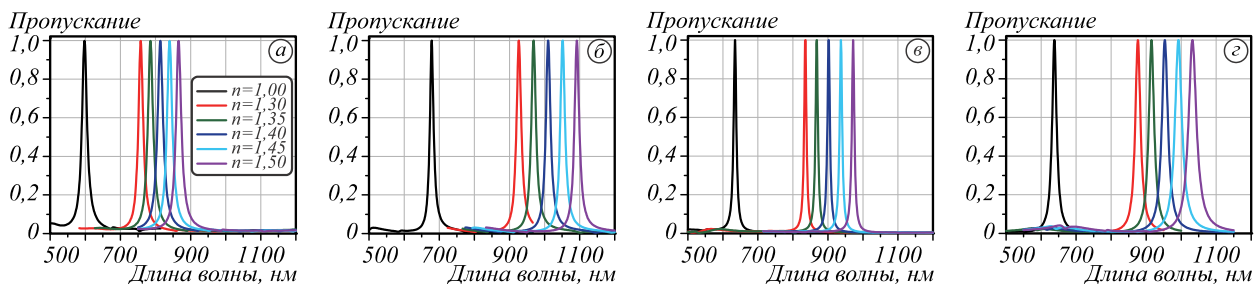


Рис. 20. Спектр пропускания для структуры на рис. 15 для различных значений n . Пропускание для P1 (а), P2 (б), P3 (в), P4 (г)

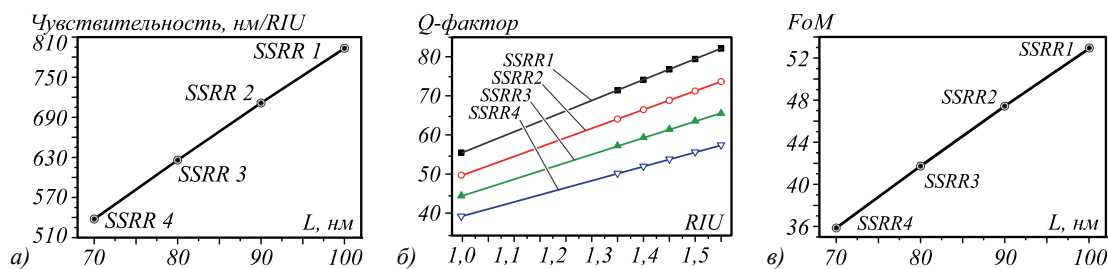


Рис. 21. Зависимость чувствительности от L (а), зависимость Q -фактора от RIU (б), зависимость FoM от L (в)

7. Перспективы плазмонных сенсоров

За последние десять лет наноплазмонные датчики достигли значительного прогресса от концептуальной идеи до рабочих устройств. Очевидно, что эта технология обладает высокой чувствительностью, компактностью, возможностями мультиплексирования, которые могут быть реализованы и применены в широком спектре областей как в исследовательских, так и в бытовых устройствах. Химия функциональных

поверхностей все чаще становится центральной точкой в разработке наноплазмонных датчиков, предназначенных для диагностики на месте оказания медицинской помощи. Новые концептуальные конструкции были раскрыты для дальнейшего упрощения наноплазмонных датчиков, среди которых достижения в области бумажных подложек для метаматериала [128], которые потенциально могут быть использованы для количественного анализа в приложениях биохимического зондирования.

Создана высокочувствительная методика обнаружения без меток, основанная на асимметричных резонансах Фано в плазмонных нанотвердотелах, что также важно для диагностики в местах оказания медицинской помощи. На основе экстраординарного светопропускания с помощью высококачественного фактора ~ 200 субрадиантных темных мод было продемонстрировано значение FOM, равное 162, превышающее стандарт плазмонных датчиков в конфигурации Кречмана [129]. Примерами недавнего прогресса является формирование рисунка на основе химии связывания аналита нанозвездами [130–131], нанополумесяцами [132–133], нанотреугольниками [134] и др. В сочетании с поверхностной химией, правильное проектирование плазмонных наноструктур может обеспечить значительное повышение и «локализацию» чувствительности [135]. Ожидается, что взаимодействие нескольких наноплазмонных резонансов в одной структуре приведет к созданию наноплазмонных сенсоров со способностью разрешать трёхмерную структуру аналита [136].

Более широкое применение различных схем наноплазмонной детекции наиболее перспективно в материаловедении. Заметим, что наиболее продвинутыми и коммерчески успешными платформами плазмонной сенсорики являются структуры, которые используют тонкие плёнки благородных металлов для распространения ППП [137]. Это реализуется, например, в плазмонных нанопроводах.

С точки зрения исследования фундаментальных свойств наноплазмонных сенсоров крайне важно, чтобы появились последовательные прогностические модели, которые явно свяжут оптические и сенсорные свойства наноплазмонных структур.

Ожидается дальнейшее развитие еще одной практической стороны – масштабируемых технологий производства, которые могут производить большие массивы наноплазмонных структур. В то же время для дальнейшего снижения цены за чип в наноплазмонной сенсорики требуется нанотехнология промышленного масштаба, нацеленная на формат мультиплексированных массивов. В ближайшие годы, вероятно, будут появляться разработки с более быстрыми, компактными и более дешёвыми сенсорными структурами, основанными на плазмонике, с использованием последних достижений, таких как сквозной нанопоток и высокочувствительные резонансы Фано.

Тем не менее, внедрение этих инноваций в биомедицинские устройства является проблемой для промышленности. В будущем биосенсоры будут более универсальными и подходящими для повседневной медицинской диагностики. Недорогие биосенсоры также необходимы для быстрой диагностики инфекционных заболеваний.

Разнообразие разработанных датчиков и различные сенсорные схемы позволяют предположить, что можно найти плазмонное решение для ряда биохимических

или биомедицинских проблем – от фундаментальных исследований взаимодействия белок – белок и динамики отдельных белков до диагностики заболеваний путём обнаружения фрагментов ДНК в сложных биологических образцах при фемтомолярных концентрациях.

Заключение

Достижения в плазмонике и нанотехнологиях сделали актуальными исследования в области плазмонных датчиков. Разработчиками были предложены для использования и продемонстрированы потенциально привлекательные свойства различных плазмонных мод, таких как локализованные поверхностные плазмоны (LSP), связанные моды LSP-PSP, поверхностные решёточные резонансы и резонансы Фано, поддерживаемые структурами металл–диэлектрик или металл–диэлектрик–металл. Этот обзор в основном сфокусирован на плазмонных волноводах, материалах, методах изготовления и методах опроса. Разработка плазмонных датчиков является обширной темой, поэтому мы сосредоточились, в первую очередь, на новейших датчиках показателя преломления на основе кремниевых структур и плазмонных волноводах металл–изолятор–металл. В отличие от диэлектрических волноводов, в которых потери при распространении могут быть незначительными, присутствие металла как части направляющей структуры вызывает большие потери в плазмонных волноводах. В общем, любой плазмонный волновод имеет компромисс между потерями при распространении и локализацией моды. Продемонстрированы конструкции плазмонных резонаторов, имеющие превосходную чувствительность до 596 нм/RIU и до 3460 нм/RIU в зависимости от режимов возбуждения SPP. Ожидается, что плазмонные датчики, основанные на резонансе Фано, будут высокочувствительными из-за их острых и асимметричных форм линий и предлагают высокую добротность по сравнению с обычными формами линий Лоренца. Ожидается, что с учётом все более значительных открытий, основанных на управлении поверхностными плазмонными волнами в субволновом или глубокосубволновом режимах, плазмоника будет и впредь доминировать в исследованиях и разработках в области интегрированной оптической связи, хранения данных, оптической сенсорики и технологиях формирования изображений.

Благодарности

Обзор подготовлен в рамках выполнения гранта РФФИ № 19-17-50131-Экспансия и государственного задания ФНИИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (соглашение № 007-ГЗ/Ч3363/26).

Литература

1. **Reed, G.T.** Silicon photonics: The state of the art / G.T. Reed, A.P. Knights. – Wiley-Interscience, 2008. – 354 p. – ISBN: 978-0-470-02579-6.

2. **Alferov, Zh.I.** The semiconductor revolution in the 20th century / Zh.I. Alferov // *Russian Chemical Reviews*. – 2013. – Vol. 82, Issue 7. – P. 587-596. – DOI: 10.1070/RC2013v082n07ABEH004403.
3. **Butt, M.A.** An evanescent field absorption gas sensor at mid-IR 3.39 μm wavelength / M.A. Butt, S.A. Degtyarev, S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy // *Journal of Modern Optics*. – 2017. – Vol. 64, Issue 18. – P. 1892-1897. – DOI: 10.1080/09500340.2017.1325947.
4. **Homola, J.** Surface plasmon resonance biosensors / J. Homola, S. Yee, D. Myszka. – In: *Optical biosensors: Present and future* / ed. by F.S. Ligler, Ch. Taitt. – Chap. 7. – Amsterdam: Elsevier, 2002. – P. 207-251. – DOI: 10.1016/B978-044450974-1/50007-0.
5. **Butt, M.A.** Optical elements based on silicon photonics / M.A. Butt, S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy // *Computer Optics*. – 2019. – Vol. 43, Issue 6. – P. 1079-1083. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-1079-1083.
6. **Dong, P.** Low loss shallow-ridge silicon waveguides / P. Dong, [et al.] // *Optics Express*. – 2010. – Vol. 18, Issue 14. – P. 14474-14479. – DOI: 10.1364/OE.18.014474.
7. **Penades, J.S.** Suspended silicon mid-infrared waveguide devices with subwavelength grating metamaterial cladding / J. Soler Penades, A. Ortega-Moñux, M. Nedeljkovic, J.G. Wangüemert-Pérez, R. Halir, A.Z. Khokhar, C. Alonso-Ramos, Z. Qu, I. Molina-Fernández, P. Cheben, G.Z. Mashanovich // *Optics Express*. – 2016. – Vol. 24, Issue 20. – P. 22908-22916. – DOI: 10.1364/OE.24.022908.
8. **Rickman, A.G.** Silicon-on-insulator optical rib waveguide loss and mode characteristics / A.G. Rickman, G.T. Reed, F. Namavar // *Journal of Lightwave Technology*. – 1994. – Vol. 12, Issue 10. – P. 1771-1776. – DOI: 10.1109/50.337489.
9. **Degtyarev, S.A.** 3D-simulation of silicon micro-ring resonator with Comsol / S.A. Degtyarev, V.V. Podlipnov, P. Verma, S.N. Khonina // *Proceedings of SPIE*. – 2016. – Vol. 10224. – 102241L. – DOI: 10.1117/12.2266783.
10. **Kazanskiy, N.L.** Plasmonic sensors based on Metal-insulator-metal waveguides for refractive index sensing applications: A brief review / N.L. Kazanskiy, S.N. Khonina, M.A. Butt // *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. – 2020. – Vol. 117. – P. 113798. – DOI: 10.1016/j.physe.2019.113798.
11. **Butt, M.A.** Conditions of a single-mode rib channel waveguide based on dielectric $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ / M.A. Butt, E.S. Kozlova, S.N. Khonina // *Computer Optics*. – 2017. – Vol. 41(4). – P. 494-498. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-4-494-498.
12. **Egorov, A.V.** Using coupled photonic crystal cavities for increasing of sensor sensitivity / A.V. Egorov, N.L. Kazanskiy, P.G. Serafimovich // *Computer Optics*. – 2015. – Vol. 39(2). – P. 158-162. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-2-158-162.
13. **Butt, M.A.** Modelling of Rib channel waveguides based on silicon-on-sapphire at 4.67 μm wavelength for evanescent field gas absorption sensor / M.A. Butt, S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy // *Optik*. – 2018. – Vol. 168. – P. 692-697. – DOI: 10.1016/j.ijleo.2018.04.134.
14. **Khonina, S.N.** Evanescent field ratio enhancement of a modified ridge waveguide structure for methane gas sensing application / S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy, M.A. Butt // *IEEE Sensors Journal*. – 2020. – Vol. 20. – DOI: 10.1109/JSEN.2020.2985840.
15. **Soref, R.A.** Large single-mode rib waveguides in GeSi-Si and Si-on-SiO₂ / R.A. Soref, J. Schmidtchen, K. Petermann // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. – 1991. – Vol. 27, Issue 8. – P. 1971-1974. – DOI: 10.1109/3.83406.
16. **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, Issue 11. – P. 1209-1211. – DOI: 10.1364/OL.29.001209.
17. **Wang, X.** Silicon photonic slot waveguide Bragg gratings and resonators / X. Wang, S. Grist, J. Flueckiger, N.A.F. Jaeger, L. Chrostowski // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21, Issue 16. – P. 19029-19039. – DOI: 10.1364/OE.21.019029.
18. **Butt, M.A.** Numerical analysis of a miniaturized design of a Fabry-Perot resonator based on silicon strip and slot waveguides for bio-sensing applications / M.A. Butt, S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy // *Journal of Modern Optics*. – 2019. – Vol. 66, Issue 11. – P. 1172-1178. – DOI: 10.1080/09500340.2019.1609613.
19. **Butt, M.A.** A serially cascaded micro-ring resonator for simultaneous detection of multiple analytes / M.A. Butt, S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy // *Laser Physics*. – 2019. – Vol. 29, Issue 4. – P. 046208. – DOI: 10.1088/1555-6611/ab0371.
20. **Butt, M.A.** Highly sensitive refractive index sensor based on hybrid plasmonic waveguide microring resonator / M.A. Butt, S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy // *Waves in Random and Complex Media*. – 2020. – Vol. 30, Issue 2. – P. 292-299. – DOI: 10.1080/17455030.2018.1506191.
21. **Butt, M.A.** Device performance of standard strip, slot and hybrid plasmonic μ -ring resonator: a comparative study / M.A. Butt, S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy // *Waves in Random and Complex Media*. – 2020. – 10 p. – DOI: 10.1080/17455030.2020.1744769.
22. **He, X.** Ultralow loss graphene-based hybrid plasmonic waveguide with deep-subwavelength confinement / X. He, [et al.] // *Optics Express*. – 2018. – Vol. 26, Issue 8. – P. 10109-10118. – DOI: 10.1364/OE.26.010109.
23. **Zenin, V.A.** Hybrid plasmonic waveguides formed by metal coating of dielectric ridges / V.A. Zenin, [et al.] // *Optics Express*. – 2017. – Vol. 25, Issue 11. – P. 12295-12302. – DOI: 10.1364/OE.25.012295.
24. **Butt, M.A.** Enhancement of evanescent field ratio in a silicon strip waveguide by incorporating a thin metal film / M.A. Butt, S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy // *Laser Physics*. – 2019. – Vol. 29, Issue 7. – P. 076202. – DOI: 10.1088/1555-6611/ab1414.
25. **Butt, M.A.** Sensitivity enhancement of silicon strip waveguide ring resonator by incorporating a thin metal film / M.A. Butt, S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy // *IEEE Sensors Journal*. – 2020. – Vol. 20, Issue 3. – P. 1355-1362. – DOI: 10.1109/JSEN.2019.2944391.
26. **Butt, M.A.** Plasmonic refractive index sensor based on metal-insulator-metal waveguides with high sensitivity / M.A. Butt, S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy // *Journal of Modern Optics*. – 2019. – Vol. 66, Issue 9. – P. 1038-1043. – DOI: 10.1080/09500340.2019.1601272.
27. **Butt, M.A.** An array of nano-dots loaded MIM square ring resonator with enhanced sensitivity at NIR wavelength range / M.A. Butt, S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy // *Optik*. – 2020. – Vol. 202. – P. 163655. – DOI: 10.1016/j.ijleo.2019.163655.
28. **Kazanskiy, N.L.** Enhancing the sensitivity of a standard plasmonic MIM square ring resonator by incorporating nanodots in the cavity / N.L. Kazanskiy, M.A. Butt // *Photonics Letters of Poland*. – 2020. – Vol. 12, Issue 1. – P. 1-3. – DOI: 10.4302/plp.v12i1.902.

29. **Butt, M.A.** Label-free detection of ambient refractive index based on plasmonic Bragg gratings embedded resonator cavity sensor / M.A. Butt, S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy // *Journal of Modern Optics*. – 2019. – Vol. 66, Issue 19. – P. 1920-1925. – DOI: 10.1080/09500340.2019.1683633.
30. **Gordon, R.** Light in a subwavelength slit in a metal: propagation and reflection / R. Gordon // *Physical Review B*. – 2006. – Vol. 73, Issue 15. – 153405. – DOI: 10.1103/PhysRevB.73.153405.
31. **Dionne, J.A.** Plasmon slot waveguides: towards chip-scale propagation with subwavelength-scale localization / J.A. Dionne, L.A. Sweatlock, H.A. Atwater, A. Polman // *Physical Review B*. – 2006. – Vol. 73, Issue 3. – 035407. – DOI: 10.1103/PhysRevB.73.035407.
32. **Bozhevolnyi, S.I.** Channel plasmon subwavelength waveguide components including interferometers and ring resonators / S.I. Bozhevolnyi, V.S. Volkov, E. Devaux, J.-Y. Laluet, T.W. Ebbesen // *Nature*. – 2006. – Vol. 440, Issue 7083. – P. 508-511. – DOI: 10.1038/nature04594.
33. **Economou, E.N.** Surface plasmons in thin films / E.N. Economou // *Physical Review*. – 1969. – Vol. 182, Issue 2. – P. 539-554. – DOI: 10.1103/PhysRev.182.539.
34. **Nikolajsen, T.** Surface plasmon polariton based modulators and switches operating at telecom wavelengths / T. Nikolajsen, K. Leosson, S.I. Bozhevolnyi // *Applied Physics Letters*. – 2004. – Vol. 85, Issue 24. – P. 5833-5835. – DOI: 10.1063/1.1835997.
35. **Charbonneau, R.** Passive integrated optics elements based on long-range surface plasmon polaritons / R. Charbonneau, C. Scales, I. Breukelaar, [et al.] // *Journal of Lightwave Technology*. – 2006. – Vol. 24, Issue 1. – P. 477-494. – DOI: 10.1109/JLT.2005.859856.
36. **Degtyarev, S.A.** Singular laser beams nanofocusing with dielectric nanostructures: theoretical investigation / S.A. Degtyarev, A.P. Porfirev, A.V. Ustinov, S.N. Khonina // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2016. – Vol. 33, Issue 12. – P. 2480-2485. – DOI: 10.1364/JOSAB.33.002480.
37. **Yang, R.** Subwavelength plasmonic waveguides and plasmonic materials / R. Yang, Z. Lu // *International Journal of Optics*. – 2012. – Vol. 2012. – 258013. – DOI: 10.1155/2012/258013.
38. **Kamada, S.** Design optimization and fabrication of Mach-Zehnder interferometer based on MIM plasmonic waveguides / S. Kamada, T. Okamoto, S.E. El-Zohary, M. Haraguchi // *Optics Express*. – 2016. – Vol. 24, Issue 15. – P. 16224-16231. – DOI: 10.1364/OE.24.016224.
39. **Ditlbacher, H.** Silver nanowires as surface plasmon resonators / H. Ditlbacher, A. Hohenau, D. Wagner, U. Kreibitz, M. Rogers, F. Hofer, F.R. Aussenegg, J.R. Krenn // *Physical Review Letters*. – 2005. – Vol. 95, Issue 25. – 257403. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.95.257403.
40. **Kittel, C.** Introduction to solid state physics / C. Kittel. – New York, NY: John Wiley & Sons, 1989. – ISBN: 978-0-471-41526-8.
41. **Lide, D.R.** CRC handbook of chemistry and physics / D.R. Lide. – 85th ed. – Boca Raton: CRC Press, 2004. – 2656 p. – ISBN: 978-0-8493-0485-9.
42. **Ordal, M.A.** Optical properties of fourteen metals in the infrared and far infrared: Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Mo, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, V, W / M.A. Ordal, R.J. Bell, J. Alexander, L.L. Long, M.R. Querry // *Applied Optics*. – 1985. – Vol. 24, Issue 24. – P. 4493-4499. – DOI: 10.1364/ao.24.004493.
43. **Kazanskiy, N.L.** Optical materials: Microstructuring surfaces with off-electrode plasma / N.L. Kazanskiy, V.A. Kolpakov. – Boca Raton, FL: CRC Press, 2017. – 212 p. – ISBN: 978-1-1381-9728-2.
44. **Masson, J.-F.** Nanohole arrays in chemical analysis: Manufacturing methods and applications / J.-F. Masson, M.-P. Murray-Methot, L.S. Live // *Analyst*. – 2010. – Vol. 135, Issue 7. – P. 1483-1489. – DOI: 10.1039/C0AN00053A.
45. **Donnelly, V.M.** Plasma etching: Yesterday, today, and tomorrow / V.M. Donnelly, A. Kornblit // *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*. – 2013. – Vol. 31, Issue 5. – 050825. – DOI: 10.1116/1.4819316.
46. **Cao, J.** Gold nanorod-based localized surface plasmon resonance biosensors: A review / J. Cao, T. Sun, K.T.V. Grattan // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2014. – Vol. 195. – P. 332-351. – DOI: 10.1016/j.snb.2014.01.056.
47. **Dong, P.** Low loss shallow-ridge silicon waveguides / P. Dong, W. Qian, S. Liao, H. Liang, C.-C. Kung, N.-N. Feng, R. Shafiqi, J. Fong, D. Feng, A.V. Krishnamoorthy, M. Asghari // *Optics Express*. – 2010. – Vol. 18, Issue 14. – P. 14474-14479. – DOI: 10.1364/OE.18.014474.
48. **Butt, M.A.** A T-shaped 1×8 balanced optical power splitter based on 90° bend asymmetric vertical slot waveguides / M.A. Butt, S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy // *Laser Physics*. – 2019. – Vol. 29, Issue 4. – 046207. – DOI: 10.1088/1555-6611/ab0372.
49. **Heck, M.J.R.** Ultra-low loss waveguide platform and its integration with silicon photonics / M.J.R. Heck, J.F. Bauters, M.L. Davenport, D.T. Spencer, J.E. Bowers // *Laser and Photonics Reviews*. – 2014. – Vol. 8, Issue 5. – P. 667-686. – DOI: 10.1002/lpor.201300183.
50. **Butt, M.A.** Compact design of a polarization beam splitter based on silicon-on-insulator platform / M.A. Butt, S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy // *Laser Physics*. – 2018. – Vol. 28, Issue 11. – 116202. – DOI: 10.1088/1555-6611/aadfl8.
51. **Tran, M.A.** Ultra-low-loss silicon waveguides for heterogeneously integrated silicon/III-V photonics / M.A. Tran, D. Huang, T. Komljenovic, J. Peters, A. Malik, J.E. Bowers // *Applies Sciences*. – 2018. – Vol. 8, Issue 7. – 1139. – DOI: 10.3390/app8071139.
52. **Butt, M.A.** Silicon on silicon dioxide slot waveguide evanescent field gas absorption sensor / M.A. Butt, S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy // *Journal of Modern Optics*. – 2018. – Vol. 65, Issue 2. – P. 174-178. – DOI: 10.1080/09500340.2017.1382596.
53. **Butt, M.A.** A compact design of a balanced 1×4 optical power splitter based on silicon on insulator slot waveguides / M.A. Butt, A.N.K. Reddy, S.N. Khonina // *Computer Optics*. – 2018. – Vol. 42(2). – P. 244-247. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-2-244-247.
54. **Butt, M.A.** Hybrid plasmonic waveguide race-track μ -ring resonator: Analysis of dielectric and hybrid mode for refractive index sensing applications / M.A. Butt, S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy // *Laser Physics*. – 2020. – Vol. 30, Issue 1. – 016202. – DOI: 10.1088/1555-6611/ab5719.
55. **Maier, S.A.** Low-loss fibre accessible plasmon waveguide for planar energy guiding and sensing / S.A. Maier, P.E. Barclay, T.J. Johnson, M.D. Friedman, O. Painter // *Applied Physics Letters*. – 2004. – Vol. 84. – 3990. – DOI: 10.1063/1.1753060.

56. **Безус, Е.А.** Подавление рассеяния в элементах плазмонной оптики с помощью двухслойной диэлектрической структуры / Е.А. Безус, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, В.А. Соيفер // Письма в ЖТФ. – 2011. – Т. 37, № 23. – С. 10-18.
57. **Bezus, E.A.** Scattering suppression in plasmonic optics using a simple two-layer dielectric structure / E.A. Bezus, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy // Applied Physics Letters. – 2011. – Vol. 98, Issue 22. – 221108. – DOI: 10.1063/1.3597620.
58. **Безус, Е.А.** Плазмонный волновод диэлектрик–диэлектрик–металл для подавления паразитного рассеяния в элементах плазмонной оптики / Е.А. Безус, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский // Известия РАН. Серия физическая. – 2011. – Т. 75, № 12. – С. 1674-1677.
59. **Maier, S.A.** Experimental demonstration of fibre-accessible metal nanoparticle plasmon waveguides for planar energy guiding and sensing / S.A. Maier, M.D. Friedman, P.E. Barclay, O. Painter // Applied Physics Letters. – 2005. – Vol. 86, Issue 7. – 071103. – DOI: 10.1063/1.1862340.
60. **Oulton, R.F.** Confinement and propagation characteristics of subwavelength plasmonic modes / R.F. Oulton, G. Bartal, D.F.P. Pile, X. Zhang // New Journal of Physics. – 2008. – Vol. 10. – 105018. – DOI: 10.1088/1367-2630/10/10/105018.
61. **Thiel, A.J.** In situ surface plasmon resonance imaging detection of DNA hybridization to oligonucleotide arrays on gold surfaces / A.J. Thiel, A.G. Frutos, C.E. Jordan, R.M. Corn, L.M. Smith // Analytical Chemistry. – 1997. – Vol. 69, Issue 24. – P. 4948-4956. – DOI: 10.1021/ac9708001.
62. **Piliarik, M.** A new surface plasmon resonance sensor for high throughput screening applications / M. Piliarik, H. Vaisocherova, J. Homola // Biosensors and Bioelectronics. – 2005. – Vol. 20, Issue 10. – P. 2104-2110. – DOI: 10.1016/j.bios.2004.09.025.
63. **Cao, Z.L.** High performing phase-based surface plasmon resonance sensing from metallic nanohole arrays / Z.L. Cao, S.L. Wong, S.Y. Wu, H.P. Ho, H.C. Ong // Applied Physics Letters. – 2014. – Vol. 104, Issue 17. – 171116. – DOI: 10.1063/1.4875019.
64. **Otto, L.M.** Polarization interferometry for real-time spectroscopic plasmonic sensing / L.M. Otto, D.A. Mohr, T.W. Johnson, S.H. Oh, N.C. Lindquist // Nanoscale. – 2015. – Vol. 7, Issue 9. – P. 4226-4233. – DOI: 10.1039/C4NR06586G.
65. **Kravets, V.G.** Singular phase nano-optics in plasmonic metamaterials for label-free single-molecule detection / V.G. Kravets, [et al.] // Nature Materials. – 2013. – Vol. 12. – P. 304-309. – DOI: 10.1038/nmat3537.
66. **Homola, J.** Surface plasmon resonance sensors: Review / J. Homola, S. Sinclair, G. Gauglitz // Sensors and Actuators B: Chemical. – 1999. – Vol. 54, Issues 1-2. – P. 3-15. – DOI: 10.1016/S0925-4005(98)00321-9.
67. **Butt, M.A.** Metal-Insulator-Metal nano square ring resonator for gas sensing applications / M.A. Butt, S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy // Waves in Random and Complex Media. – 2019. – DOI: 10.1080/17455030.2019.1568609.
68. **Zhang, Z.** Plasmonic refractive index sensor with high figure of merit based on concentric-rings resonator / Z. Zhang, J. Yang, X. He, J. Zhang, J. Huang, D. Chen, Y. Han // Sensors. – 2018. – Vol. 18, Issue 1. – 116. – DOI: 10.3390/s18010116.
69. **Wu, T.** The sensing characteristics of plasmonic waveguide with a ring resonator / T. Wu, Y. Liu, Z. Yu, Y. Peng, C. Shu, H. Ye // Optics Express. – 2014. – Vol. 22, Issue 7. – P. 7669-7677. – DOI: 10.1364/OE.22.007669.
70. **Wei, W.** Plasmonic circular resonators for refractive index sensors and filters / W. Wei, X. Zhang, X. Ren // Nanoscale Research Letters. – 2015. – Vol. 10. – 211. – DOI: 10.1186/s11671-015-0913-4.
71. **Chen, Z.** Multiple Fano resonances based on different waveguide modes in a symmetry breaking plasmonic system / Z. Chen, L. Yu // IEEE Photonics Journal. – 2014. – Vol. 6, Issue 6. – P. 1-8. – DOI: 10.1109/JPHOT.2014.2368779.
72. **Gaur, S.** Plasmonic refractive index sensor based on metal insulator metal waveguide / S. Gaur, R. Zafar, D. Somwanshi // 2016 International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE). – 2016. – P. 1-4. – DOI: 10.1109/ICRAIE.2016.7939557.
73. **Zhang, Z.** Fano resonance based on metal-insulator-metal waveguide-coupled double rectangular cavities for plasmonic nanosensors / Z. Zhang, L. Luo, C. Xue, W. Zhang, S. Yan // Sensors. – 2016. – Vol. 16, Issue 5. – 642. – DOI: 10.3390/s16050642.
74. **Yun, B.F.** Fano resonances in a plasmonic waveguide system composed of stub coupled with a square cavity resonator / B.F. Yun, G.H. Hu, R.H. Zhang, Y.P. Cui // Journal of Optics. – 2016. – Vol. 18, Issue 5. – 055002. – DOI: 10.1088/2040-8978/18/5/055002.
75. **Yan, S.** Refractive index sensor based on a metal-insulator-metal waveguide coupled with a symmetric structure / S. Yan, M. Zhang, X. Zhao, Y. Zhang, J. Wang, W. Jin // Sensors. – 2017. – Vol. 17, Issue 12. – 2879. – DOI: 10.3390/s17122879.
76. **Zhao, X.** Tunable Fano resonance in asymmetric MIM waveguide structure / X. Zhao, Z. Zhang, S. Yan // Sensors. – 2017. – Vol. 17, Issue 7. – 1494. – DOI: 10.3390/s17071494.
77. **Butt, M.A.** Hybrid plasmonic waveguide-assisted Metal-Insulator-Metal ring resonator for refractive index sensing / M.A. Butt, S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy // Journal of Modern Optics. – 2018. – Vol. 65, Issue 9. – P. 1135-1140. – DOI: 10.1080/09500340.2018.1427290.
78. **Rakhshani, M.R.** Design of a plasmonic sensor based on a square array of nanorods and two slot cavities with a high figure of merit for glucose concentration monitoring / M.R. Rakhshani, A. Tavousi, M.A. Mansouri-Birjandi // Applied Optics. – 2018. – Vol. 57, Issue 27. – P. 7798-7804. – DOI: 10.1364/AO.57.007798.
79. **Wang, L.** A refractive index sensor based on an analogy T shaped metal-insulator-metal waveguide / L. Wang, Y.-P. Zeng, Z.-Y. Wang, X.-P. Xia, Q.-Q. Liang // Optik. – 2018. – Vol. 172. – P. 1199-1204. – DOI: 10.1016/j.ijleo.2018.07.093.
80. **Butt, M.A.** Plasmonic refractive index sensor based on MIM square ring resonator / M.A. Butt, S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy // 2018 International Conference on Computing, Electronic and Electrical Engineering (ICE Cube). – 2018. – DOI: 10.1109/ICCECUBE.2018.8610998.
81. **Fang, Y.** Multiple Fano resonances based on end-coupled semi-ring rectangular resonator / Y. Fang, K. Wen, Z. Li, B. Wu, L. Chen, J. Zhou, D. Zhou // IEEE Photonics Journal. – 2019. – Vol. 11, Issue 4. – 2914483. – DOI: 10.1109/JPHOT.2019.2914483.
82. **Chen, Y.** Fano resonance sensing characteristics of MIM waveguide coupled square convex ring resonator with metallic baffle / Y. Chen, Y. Xu, J. Cao // Results in Physics.

- 2019. – Vol. 14. – 102420. – DOI: 10.1016/j.rinp.2019.102420.
83. **Yu, S.** Tuning multiple Fano resonances for on-chip sensors in a plasmonic system / S. Yu, T. Zhao, J. Yu, D. Pan // *Sensors*. – 2019. – Vol. 19, Issue 7. – 1559. – DOI: 10.3390/s19071559.
84. **Asgari, S.** Tunable Mid-Infrared refractive index sensor composed of asymmetric double graphene layers / S. Asgari, N. Granpayeh // *IEEE Sensors Journal*. – 2019. – Vol. 19, Issue 14. – P. 5686-5691. – DOI: 10.1109/JSEN.2019.2906759.
85. **Shi, Y.** Controllable fano resonance based on coupled square split ring resonance cavity / Y. Shi, G.-M. Zhang, H.-L. An, N. Hu, M.-Q. Gu // *Acta Photonica Sinica*. – 2017. – Vol. 46, Issue 4. – 0413002. – DOI: 10.3788/gzxb20174604.0413002.
86. **Zafar, R.** Enhanced figure of merit in fano resonance-based plasmonic / R. Zafar, M. Salim // *IEEE Sensors Journal*. – 2015. – Vol. 15, Issue 11. – P. 6313-6317. – DOI: 10.1109/JSEN.2015.2455534.
87. **Butt, M.A.** A multichannel metallic dual nano-wall square split-ring resonator: design analysis and applications / M.A. Butt, S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy // *Laser Physics Letters*. – 2019. – Vol. 16, Issue 12. – 126201. – DOI: 10.1088/1612-202X/ab5574.
88. **Kabashin, A.V.** Plasmonic nanorod metamaterials for biosensing / A.V. Kabashin, [et al.] // *Nature Materials*. – 2009. – Vol. 8, Issue 11. – P. 867-871. – DOI: 10.1038/nmat2546.
89. **Danaie, M.** Design of a high resolution metal-insulator-metal plasmonic refractive index sensor based on a ring shaped Si resonator / M. Danaie, A. Shahzadi // *Plasmonics*. – 2019. – DOI: 10.1007/s11468-019-00926-9.
90. **Song, M.** Nanofocusing beyond the near-field diffraction limit via plasmonic Fano resonance / M. Song, [et al.] // *Nanoscale*. – 2016. – Vol. 8, Issue 3. – P. 1635-1641. – DOI: 10.1039/c5nr06504f.
91. **Cetin, A.E.** Fano resonant ring/disk plasmonic nanocavities on conducting substrates for advanced biosensing / A.E. Cetin, H. Atlug // *ACS Nano*. – 2012. – Vol. 6, Issue 11. – P. 9989-9995. – DOI: 10.1021/nn303643w.
92. **Wang, Q.** Linearly tunable Fano resonance modes in a plasmonic nanostructure with a waveguide loaded with two rectangular cavities coupled by a circular cavity / Q. Wang, Z. Ouyang, Y. Sun, M. Lin, Q. Liu // *Nanomaterials*. – 2019. – Vol. 9, Issue 5. – 678. – DOI: 10.3390/nano9050678.
93. **Ye, J.** Plasmonic nanoclusters: Near field properties of the fano resonance interrogated with SERS / J. Ye, [et al.] // *Nano Letters*. – 2012. – Vol. 12, Issue 3. – P. 1660-1667. – DOI: 10.1021/nl3000453.
94. **Liu, J.** Tunable multiple Fano resonance employing polarization-selective excitation of coupled surface-mode and nanoslit antenna resonance in plasmonic nanostructures / J. Liu, Z. Liu, H. Hu // *Scientific Reports*. – 2019. – Vol. 9. – 2414. – DOI: 10.1038/s41598-019-38708-2.
95. **Zhan, S.** Tunable nanoplasmonic sensor based on the asymmetric degree of Fano resonance in MDM waveguide / S. Zhan, Y. Peng, Z. He, B. Li, Z. Chen, H. Xu, H. Li // *Scientific Reports*. – 2016. – Vol. 6. – 22428. – DOI: 10.1038/srep22428.
96. **Deng, Y.** Tunable and high-sensitivity sensing based on Fano resonance with coupled plasmonic cavities / Y. Deng, G. Cao, H. Yang, G. Li, X. Chen, W. Lu // *Scientific Reports*. – 2017. – Vol. 7. – 10639. – DOI: 10.1038/s41598-017-10626-1.
97. **Wen, Y.** High sensitivity and FOM refractive index sensing based on Fano resonance in all-grating racetrack resonators / Y. Wen, [et al.] // *Optics Communications*. – 2019. – Vol. 446. – P. 141-146. – DOI: 10.1016/j.optcom.2019.04.068.
98. **Chen, F.** Temperature tunable Fano resonance based on ring resonator side coupled with a MIM waveguide / F. Chen, H. Zhang, L. Sun, J. Li, C. Yu // *Optics and Laser Technology*. – 2019. – Vol. 116. – P. 293-299. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2019.03.044.
99. **Elshorbagy, M.H.** Performance improvement of refractometric sensors through hybrid plasmonic Fano resonances / M.H. Elshorbagy, [et al.] // *Journal of Lightwave Technology*. – 2019. – Vol. 37, Issue 13. – P. 2905-2913. – DOI: 10.1109/JLT.2019.2906933.
100. **Liu, H.** Metasurface generated polarization insensitive Fano resonance for high performance refractive index sensing / H. Liu, [et al.] // *Optics Express*. – 2019. – Vol. 27, Issue 9. – P. 13252-13262. – DOI: 10.1364/OE.27.013252.
101. **Li, Z.** Refractive index sensor based on multiple fano resonances in a plasmonic MIM structure / Z. Li, [et al.] // *Applied Optics*. – 2019. – Vol. 58, Issue 18. – P. 4878-4883. – DOI: 10.1364/AO.58.004878.
102. **Wang, M.** Fano Resonance in an Asymmetric MIM waveguide structure and its application in a refractive index nanosensor / M. Wang, M. Zhang, Y. Wang, R. Zhao, S. Yan // *Sensors*. – 2019. – Vol. 19, Issue 4. – 791. – DOI: 10.3390/s19040791.
103. **Zhang, B.H.** Two kinds of double Fano resonances induced by an asymmetric MIM waveguide structure / B.H. Zhang, L.-L. Wang, H.-J. Li, [et al.] // *Journal of Optics*. – 2016. – Vol. 18, Issue 6. – 065001. – DOI: 10.1088/2040-8978/18/6/065001.
104. **Chen, F.** Refractive index and temperature sensing based on defect resonator coupled with a MIM waveguide / F. Chen, J. Li // *Modern Physics Letters B*. – 2019. – Vol. 33, Issue 3. – 1950017. – DOI: 10.1142/S0217984919500179.
105. **Qi, L.** Highly reflective long period fibre grating sensor and its application in refractive index sensing / L. Qi, C.L. Zhao, J.Y. Yuan, M.P. Ye, J. Wang, Z. Zhang, S. Jin // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2014. – Vol. 193. – P. 185-189. – DOI: 10.1016/j.snb.2013.11.063.
106. **Wu, D.K.C.** Ultrasensitive photonic crystal fibre refractive index sensor / D.K.C. Wu, B.T. Kuhlmeier, B.J. Eggleton // *Optics Letters*. – 2009. – Vol. 34, Issue 3. – P. 322-324. – DOI: 10.1364/OL.34.000322.
107. **Shen, Y.** Plasmonic gold mushroom arrays with refractive index sensing figures of merit approaching the theoretical limit / Y. Shen, J.H. Zhou, T.R. Liu, [et al.] // *Nature Communications*. – 2013. – Vol. 4, Issue 4. – 3381. – DOI: 10.1038/ncomms3381.
108. **Tang, Y.** Refractive index sensor based on Fano resonances in metal-insulator-metal waveguides coupled with resonators / Y. Tang, Z. Zhang, R. Wang, Z. Hai, C. Xue, W. Zhang, S. Yan // *Sensors*. – 2017. – Vol. 17. – 784. – DOI: 10.3390/s17040784.
109. **Akhavan, A.** Metal-insulator-metal waveguide-coupled asymmetric resonators for sensing and slow light applications / A. Akhavan, H. Ghafoorifard, S. Abdolhosseini, H. Habibiyan // *IET Optoelectronics*. – 2018. – Vol. 12, Issue 5. – P. 220-227. – DOI: 10.1049/iet-opt.2018.0028.
110. **Lu, H.** Plasmonic analog of electromagnetically induced transparency in multinanoresonator-coupled waveguide systems / H. Lu, X. Liu, D. Mao // *Physical Review A*. –

2012. – Vol. 85, Issue 5. – 053803. – DOI: 10.1103/PhysRevA.85.053803.
111. **Boller, K.** Observation of electromagnetically induced transparency / K. Boller, A. Imamoglu, S.E. Harris // *Physical Review Letters*. – 1991. – Vol. 66, Issue 20. – P. 2593-2596. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.66.2593.
 112. **Chen, Y.** Double Fano resonances based on different mechanisms in a MIM plasmonic system / Y. Chen, L. Chen, K. Wen, Y. Hu, W. Lin // *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*. – 2019. – Vol. 36. – 100714. – DOI: 10.1016/j.photonics.2019.100714.
 113. **Wen, K.** A plasmonic chip-scale refractive index sensor design based on multiple Fano resonances / K. Wen, L. Chen, J. Zhou, L. Lei, Y. Fang // *Sensors*. – 2018. – Vol. 18. – 3181. – DOI: 10.3390/s18103181.
 114. **Berini, P.** Bulk and surface sensitivities of surface plasmon waveguides / P. Berini // *New Journal of Physics*. – 2008. – Vol. 10, Issue 10. – 105010. – DOI: 10.1088/1367-2630/10/10/105010.
 115. **Daviau, R.** Fabrication of surface plasmon waveguides and integrated components on Cytop / R. Daviau, A. Khan, E. Lisicka-Skrzek, R.N. Tait, P. Berini // *Micro-electronic Engineering*. – 2010. – Vol. 87, Issue 10. – P. 1914-1921. – DOI: 10.1016/j.mee.2009.11.078.
 116. **Krupin, O.** Biosensing using straight long-range surface plasmon waveguides / O. Krupin, H. Asiri, Ch. Wang, R.N. Tait, P. Berini // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21, Issue 1. – P. 698-709. – DOI: 10.1364/OE.21.000698.
 117. **Hayashi, S.** Waveguide-coupled surface plasmon resonance sensor structures: Fano lineshape engineering for ultrahigh-resolution sensing / S. Hayashi, D.V. Nesterenko, Z. Sekkat // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2015. – Vol. 48, Issue 32. – 325303. – DOI: 10.1088/0022-3727/48/32/325303.
 118. **Nesterenko, D.V.** Extremely narrow resonances, giant sensitivity and field enhancement in low-loss waveguide sensors / D.V. Nesterenko, S. Hayashi, Z. Sekkat // *Journal of Optics*. – 2016. – Vol. 18, Issue 6. – 065004. – DOI: 10.1088/2040-8978/18/6/065004.
 119. **Refki, S.** Resolution enhancement of plasmonic sensors by metal-insulator-metal structures / S. Refki, S. Hayashi, H. Ishitobi, D.V. Nesterenko, A. Rahmouni, Y. Inouye, Z. Sekkat // *Annalen Der Physik*. – 2018. – Vol. 530, Issue 4. – 1700411. – DOI: 10.1002/andp.201700411.
 120. COMSOL [Electronical Resource]. – URL: <https://www.comsol.com> (request date 20.04.2020).
 121. ANSYS [Electronical Resource]. – URL: <https://www.ansys.com> (request date 20.04.2020).
 122. Lumerical [Electronical Resource]. – URL: <https://www.lumerical.com> (request date 20.04.2020).
 123. **Zand, I.** Highly tunable nanoscale metal-insulator-metal split ring core ring resonators (SRCRRs) / I. Zand, M.S. Abrishamian, P. Berini // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21, Issue 1. – P. 79-86. – DOI: 10.1364/OE.21.000079.
 124. **Hirsch, L.R.** A whole blood immunoassay using gold nanoshells / L.R. Hirsch, J.B. Jackson, A. Lee, N.J. Halas, J.L. West // *Analytical Chemistry*. – 2003. – Vol. 75. – P. 2377-2381. – DOI: 10.1021/ac0262210.
 125. **Guler, U.** Colloidal plasmonic titanium nitride nanoparticles: Properties and applications / U. Guler, S. Suslov, A.V. Kildishev, A. Boltasseva, V.M. Shalaev // *Nanophotonics*. – 2015. – Vol. 4, Issue 3. – P. 269-276. – DOI: 10.1515/nanoph-2015-0017.
 126. **Behnam, M.A.** Novel combination of silver nanoparticles and carbon nanotubes for plasmonic photothermal therapy in a melanoma cancer model / M.A. Behnam, F. Emami, [et al.] // *Advanced Pharmaceutical Bulletin*. – 2018. – Vol. 8, Issue 1. – P. 94-95. – DOI: 10.15171/apb.2018.006.
 127. **Zand, I.** Selective-mode optical nanofilters based on plasmonic complementary split-ring resonators / I. Zand, A. Mahigir, T. Pakizeh, M.S. Abrishamian // *Optics Express*. – 2012. – Vol. 20, Issue 7. – P. 7516-7525. – DOI: 10.1364/OE.20.007516.
 128. **Tao, H.** Metamaterials on paper as a sensing platform / H. Tao, [et al.] // *Advanced Materials*. – 2011. – Vol. 23, Issue 28. – P. 3197-3201. – DOI: 10.1002/adma.201100163.
 129. **Yanik, A.A.** Seeing protein monolayers with naked eye through plasmonic Fano resonances / A.A. Yanik, A.E. Cetin, M. Huang, A. Artar, S. Hossein Mousavi, A. Khanikaev, J.H. Connor, G. Shvets, H. Altug // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2011. – DOI: 10.1073/pnas.1101910108.
 130. **Hrelescu, C.** Selective excitation of individual plasmonic hotspots at the tips of single gold nanostars / C. Hrelescu, [et al.] // *Nano Letters*. – 2011. – Vol. 11, Issue 2. – P. 402-407. – DOI: 10.1021/nl103007m.
 131. **Dondapati, S.K.** Label-free biosensing based on single gold nanostars as plasmonic transducers / S.K. Dondapati, [et al.] // *ACS Nano*. – 2010. – Vol. 4, Issue 11. – P. 6318-6322. – DOI: 10.1021/nn100760f.
 132. **Unger, A.** Sensitivity of crescent-shaped metal nanoparticles to attachment of dielectric colloids / A. Unger, [et al.] // *Nano Letters*. – 2009. – Vol. 9, Issue 6. – P. 2311-2315. – DOI: 10.1021/nl900505a.
 133. **Shan, B.** High-quality dual-plasmonic Au@Cu_{2-x}Se nanocrescents with precise Cu_{2-x}Se domain size control and tunable optical properties in the second near-infrared biowindow / B. Shan, Y. Zhao, Y. Li, H. Wang, R. Chen, M. Li // *Chemistry of Materials*. – 2019. – Vol. 31, Issue 23. – P. 9875-9886. – DOI: 10.1021/acs.chemmater.9b04100.
 134. **Beeram, S.R.** Selective attachment of antibodies to the edges of gold nanostructures for enhanced localized surface plasmon resonance biosensing / S.R. Beeram, [et al.] // *Journal of the American Chemical Society*. – 2009. – Vol. 131, Issue 33. – P. 11689-11691. – DOI: 10.1021/ja904387j.
 135. **Feuz, L.** Improving the limit of detection of nanoscale sensors by directed binding to high-sensitivity areas / L. Feuz, [et al.] // *ACS Nano*. – 2010. – Vol. 4, Issue 4. – P. 2167-2177. – DOI: 10.1021/nn901457f.
 136. **Liu, N.** Three-dimensional plasmon rulers / N. Liu, [et al.] // *Science*. – 2011. – Vol. 332, Issue 6036. – P. 1407-1410. – DOI: 10.1126/science.1199958.
 137. **Bolduc, O.R.** Advances in surface plasmon resonance sensing with nanoparticles and thin films: nanomaterials, surface chemistry, and hybrid plasmonic techniques / O.R. Bolduc, [et al.] // *Analytical Chemistry*. – 2011. – Vol. 83, Issue 21. – P. 8057-8062. – DOI: 10.1021/ac2012976.

Сведения об авторах

Казанский Николай Львович в 1981 году с отличием окончил Куйбышевский авиационный институт (КуАИ, ныне – Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва (Самарский университет)) по специальности «Прикладная математика». Доктор физико-математических наук

(1996 г.), профессор, работает руководителем Института систем обработки изображений РАН – филиала Федерального научно-исследовательского центра «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук (ИСО-ИРАН), профессором кафедры технической кибернетики Самарского университета. Заведующий базовой кафедрой высокопроизводительных вычислений Самарского университета в ИСОИ РАН. Является членом международных научных обществ OSA, SPIE и IAPR. Н.Л. Казанский – специалист в области дифракционной оптики, математического моделирования, обработки изображений и нанофотоники. В списке научных работ Н.Л. Казанского 290 статей, 12 монографий, 53 авторских свидетельства и патента. Страница в интернете: <http://www.ipsi.smr.ru/staff/kazanskiy.htm> . E-mail: kazanskiy@ssau.ru .

Бутт Мухаммед Али (род. 1985) получил степень бакалавра в области электротехники (телекоммуникаций) в Институте информации и технологий Комсатс (Пакистан) в 2008 году, степень магистра в области электротехники связи в Университете Касселя (Германия) в 2010, степень доктора наук с отличием в области материаловедения в Университете Ровира и Вирджили (Испания) в 2015 году. В 2013 году он провел исследовательскую стажировку в Оптоэлектронном исследовательском центре (ORC), Университет Саутгемптона, Англия. В настоящее время работает старшим научным сотрудником в Самарском национальном исследовательском университете, Россия. Область научных интересов: оптические волноводы, плазмонные датчики, дифракционная оптика и оптические фильтры. E-mail: m.a.butt@ssau.ru .

Дегтярев Сергей Александрович, доцент Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва, научный сотрудник ИСОИ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: волновая и сингулярная оптика. E-mail: sealek@gmail.com .

Хонина Светлана Николаевна, доктор физико-математических наук, профессор Самарского университета; главный научный сотрудник ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, сингулярная оптика, модовые и поляризационные преобразования, оптическое манипулирование, оптическая и цифровая обработка изображений. E-mail: khonina@ipsiras.ru .

ГРНТИ: 29.31.26

Поступила в редакцию 21 апреля 2020 г. Окончательный вариант – 01 июня 2020 г.

Achievements in the development of plasmonic waveguide sensors for measuring the refractive index

N.L. Kazanskiy^{1,2}, M.A. Butt², S.A. Degtyarev^{1,2}, S.N. Khonina^{1,2}

¹ IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS,
Molodogvardeyskaya 151, 443001, Samara, Russia,

² Samara National Research University, Moskovskoye Shosse 34, 443086, Samara, Russia

Abstract

Optical sensors are widely used in the biomedical, chemical and food industries. They provide high sensitivity to changes in the refractive index of the environment due to a specific distribution of resonances across the field. The sensitivity of the sensor is highly dependent on its material and structure. In this review, we focused on the analysis of silicon waveguides as a promising component for optical sensor miniaturization, and plasmon refractive index sensors without fluorescent labeling. We presented the latest developments of special types of plasmon structures, such as metal-insulator-metal waveguides, and their application in refractive index sensors. We analyzed numerous types of plasmon waveguides, their geometry, materials and manufacturing processes, as well as possible energy losses. A discussion of the spectral characteristics of recently proposed refractive index sensors, with an emphasis on their sensitivity and quality indicators, is an important part of the review.

Keywords: plasmonic waveguides, metal-dielectric-metal structures, Lorentz and Fano resonances, refractive index sensors.

Citation: Kazanskiy NL, Butt MA, Degtyarev SA, Khonina SN. Achievements in the development of plasmonic waveguide sensors for measuring the refractive index. *Computer Optics* 2020; 44(3): 295-318. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-743.

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research under projects No. 19-17-50131 and by the Ministry of Science and Higher Education within the government project of FSRC “Crystallography and Photonics” RAS under agreement 007-Г3/Ч3363/26.

References

- [1] Reed GT, Knights AP. Silicon photonics: The state of the art. Wiley-Interscience; 2008. ISBN: 978-0-470-02579-6.
 - [2] Alferov ZhI. The semiconductor revolution in the 20th century. *Russian Chemical Reviews* 2013; 82(7): 587-596. DOI: 10.1070/RC2013v082n07ABEH004403.
 - [3] Butt MA, Degtyarev SA, Khonina SN, Kazanskiy NL. An evanescent field absorption gas sensor at mid-IR 3.39 μm wavelength. *J Mod Opt* 2017; 64(18): 1892-1897. DOI: 10.1080/09500340.2017.1325947.
 - [4] Homola J, Yee S, Myszka D. Surface plasmon resonance biosensors. In Book: Ligler FS, Taitt Ch, eds. *Optical biosensors: Present and future*. Ch 7. Amsterdam: Elsevier; 2002: 207-251. DOI: 10.1016/B978-044450974-1/50007-0.
 - [5] Butt MA, Khonina SN, Kazanskiy NL. Optical elements based on silicon photonics. *Computer Optics* 2019; 43(6): 1079-1083. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-6-1079-1083.
 - [6] Dong P, et al. Low loss shallow-ridge silicon waveguides. *Opt Express* 2010; 18(14): 14474-14479. DOI: 10.1364/OE.18.014474.
 - [7] Penades JS, Ortega-Moñux A, Nedeljkovic M, Wangüemert-Pérez JG, Halir R, Khokhar AZ, Alonso-Ramos C, Qu Z, Molina-Fernández I, Cheben P, Mashanovich GZ. Suspended silicon mid-infrared waveguide devices with subwavelength grating metamaterial cladding. *Opt Express* 2016; 24(20): 22908-22916. DOI: 10.1364/OE.24.022908.
 - [8] Rickman AG, Reed GT, Namavar F. Silicon-on-insulator optical rib waveguide loss and mode characteristics. *J Lightw Technol* 1994; 12(10): 1771-1776. DOI: 10.1109/50.337489.
 - [9] Degtyarev SA, Podlipnov VV, Verma P, Khonina SN. 3D-simulation of silicon micro-ring resonator with Comsol. *Proc SPIE* 2016; 10224: 102241L. DOI: 10.1117/12.2266783.
 - [10] Kazanskiy NL, Khonina SN, Butt MA. Plasmonic sensors based on Metal-insulator-metal waveguides for refractive index sensing applications: A brief review. *Phys E Low-dimensional Systems and Nanostructures* 2020; 117: 113798. DOI: 10.1016/j.physe.2019.113798.
 - [11] Butt MA, Kozlova ES, Khonina SN. Conditions of a single-mode rib channel waveguide based on dielectric $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$. *Computer Optics* 2017; 41(4): 494-498. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-4-494-498.
 - [12] Egorov AV, Kazanskiy NL, Serafimovich PG. Using coupled photonic crystal cavities for increasing of sensor sensitivity. *Computer Optics* 2015; 39(2): 158-162. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-2-158-162.
 - [13] Butt MA, Khonina SN, Kazanskiy NL. Modelling of Rib channel waveguides based on silicon-on-sapphire at 4.67 μm wavelength for evanescent field gas absorption sensor. *Optik* 2018; 168: 692-697. DOI: 10.1016/j.ijleo.2018.04.134.
 - [14] Khonina SN, Kazanskiy NL, Butt MA. Evanescent field ratio enhancement of a modified ridge waveguide structure for methane gas sensing application. *IEEE Sensors J* 2020; 20. DOI: 10.1109/JSEN.2020.2985840.
 - [15] Soref RA, Schmidtchen J, Petermann K. Large single-mode rib waveguides in GeSi-Si and Si-on-SiO₂. *IEEE J Quantum Electron* 1991; 27(8): 1971-1974. DOI: 10.1109/3.83406.
-

- [16] Almeida VR, Xu Q, Barrios CA, Lipson M. Guiding and confining light in void nanostructure. *Opt Lett* 2004; 29(11): 1209-1211. DOI: 10.1364/OL.29.001209.
- [17] Wang X, Grist S, Flueckiger J, Jaeger NAF, Chrostowski L. Silicon photonic slot waveguide Bragg gratings and resonators. *Opt Express* 2013; 21(16): 19029-19039. DOI: 10.1364/OE.21.019029.
- [18] Butt MA, Khonina SN, Kazanskiy NL. Numerical analysis of a miniaturized design of a Fabry-Perot resonator based on silicon strip and slot waveguides for bio-sensing applications. *J Mod Opt* 2019; 66(11): 1172-1178. DOI: 10.1080/09500340.2019.1609613.
- [19] Butt MA, Khonina SN, Kazanskiy NL. A serially cascaded micro-ring resonator for simultaneous detection of multiple analytes. *Laser Phys* 2019; 29(4): 046208. DOI: 10.1088/1555-6611/ab0371.
- [20] Butt MA, Khonina SN, Kazanskiy NL. Highly sensitive refractive index sensor based on hybrid plasmonic waveguide microring resonator. *Waves in Random and Complex Media* 2020; 30(2): 292-299. DOI: 10.1080/17455030.2018.1506191.
- [21] Butt MA, Device performance of standard strip, slot and hybrid plasmonic μ -ring resonator: a comparative study / M.A. Butt, S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy // *Waves in Random and Complex Media*. – 2020. – DOI: 10.1080/17455030.2020.1744769.
- [22] He X, et al. Ultralow loss graphene-based hybrid plasmonic waveguide with deep-subwavelength confinement. *Opt Express* 2018; 26(8): 10109-10118. DOI: 10.1364/OE.26.010109.
- [23] Zenin VA, et al. Hybrid plasmonic waveguides formed by metal coating of dielectric ridges. *Opt Express* 2017; 25(11): 12295-12302. DOI: 10.1364/OE.25.012295.
- [24] Butt MA, Khonina SN, Kazanskiy NL. Enhancement of evanescent field ratio in a silicon strip waveguide by incorporating a thin metal film. *Laser Phys* 2019; 29(7): 076202. DOI: 10.1088/1555-6611/ab1414.
- [25] Butt MA, Khonina SN, Kazanskiy NL. Sensitivity enhancement of silicon strip waveguide ring resonator by incorporating a thin metal film. *IEEE Sensors J* 2020; 20(3): 1355-1362. DOI: 10.1109/JSEN.2019.2944391.
- [26] Butt MA, Khonina SN, Kazanskiy NL. Plasmonic refractive index sensor based on metal-insulator-metal waveguides with high sensitivity. *J Mod Opt* 2019; 66(9): 1038-1043. DOI: 10.1080/09500340.2019.1601272.
- [27] Butt MA, Khonina SN, Kazanskiy NL. An array of nanodots loaded MIM square ring resonator with enhanced sensitivity at NIR wavelength range. *Optik* 2020; 202: 163655. DOI: 10.1016/j.ijleo.2019.163655.
- [28] Kazanskiy NL, Butt MA. Enhancing the sensitivity of a standard plasmonic MIM square ring resonator by incorporating nanodots in the cavity. *Photonics Letters of Poland* 2020; 12(1): 1-3. DOI: 10.4302/plp.v12i1.902.
- [29] Butt MA, Khonina SN, Kazanskiy NL. Label-free detection of ambient refractive index based on plasmonic Bragg gratings embedded resonator cavity sensor. *J Mod Opt* 2019; 66(19): 1920-1925. DOI: 10.1080/09500340.2019.1683633.
- [30] Gordon R. Light in a subwavelength slit in a metal: propagation and reflection. *Phys Rev B* 2006; 73(15): 153405. DOI: 10.1103/PhysRevB.73.153405.
- [31] Dionne JA, Sweatlock LA, Atwater HA, Polman A. Plasmon slot waveguides: towards chip-scale propagation with subwavelength-scale localization. *Phys Rev B* 2006; 73(3): 035407. DOI: 10.1103/PhysRevB.73.035407.
- [32] Bozhevolnyi SI, Volkov VS, Devaux E, Laluet J-Y, Ebbesen TW. Channel plasmon subwavelength waveguide components including interferometers and ring resonators. *Nature* 2006; 440(7083): 508-511. DOI: 10.1038/nature04594.
- [33] Economou EN. Surface plasmons in thin films. *Phys Rev* 1969; 182(2): 539-554. DOI: 10.1103/PhysRev.182.539.
- [34] Nikolajsen T, Leosson K, Bozhevolnyi SI. Surface plasmon-polariton based modulators and switches operating at telecom wavelengths. *Appl Phys Lett* 2004; 85(24): 5833-5835. DOI: 10.1063/1.1835997.
- [35] Charbonneau R, Scales C, Breukelaar I, et al. Passive integrated optics elements based on long-range surface plasmon polaritons. *J Lightw Technol* 2006; 24(1): 477-494. DOI: 10.1109/JLT.2005.859856.
- [36] Degtyarev SA, Porfirev AP, Ustinov AV, Khonina SN. Singular laser beams nanofocusing with dielectric nanostructures: theoretical investigation. *J Opt Soc Am B* 2016; 33(12): 2480-2485. DOI: 10.1364/JOSAB.33.002480.
- [37] Yang R, Lu Z. Subwavelength plasmonic waveguides and plasmonic materials. *Int J Opt* 2012; 2012: 258013. DOI: 10.1155/2012/258013.
- [38] Kamada S, Okamoto T, El-Zohary SE, Haraguchi M. Design optimization and fabrication of Mach-Zehnder interferometer based on MIM plasmonic waveguides. *Opt Express* 2016; 24(15): 16224-16231. DOI: 10.1364/OE.24.016224.
- [39] Dittlbacher H, Hohenau A, Wagner D, Kreibitz U, Rogers M, Hofer F, Aussenegg FR, Krenn JR. Silver nanowires as surface plasmon resonators. *Phys Rev Lett* 2005; 95(25): 257403. DOI: 10.1103/PhysRevLett.95.257403.
- [40] Kittel C. *Introduction to solid state physics*. New York, NY: John Wiley & Sons; 1989. ISBN: 978-0-471-41526-8.
- [41] Lide DR. *CRC handbook of chemistry and physics*. 85th ed. Boca Raton: CRC Press; 2004. ISBN: 978-0-8493-0485-9.
- [42] Ordal MA, Bell RJ, Alexander J, Long LL, Querry MR. Optical properties of fourteen metals in the infrared and far infrared: Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Mo, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, V, W. *Appl Opt* 1985; 24(24): 4493-4499. DOI: 10.1364/ao.24.004493.
- [43] Kazanskiy NL, Kolpakov VA. *Optical materials: Microstructuring surfaces with off-electrode plasma*. Boca Raton, FL: CRC Press; 2017. ISBN: 978-1-1381-9728-2.
- [44] Masson J-F, Murray-Methot M-P, Live LS. Nanohole arrays in chemical analysis: Manufacturing methods and applications. *Analyst* 2010; 135(7): 1483-1489. DOI: 10.1039/C0AN00053A.
- [45] Donnelly VM, Kornblit A. Plasma etching: Yesterday, today, and tomorrow. *J Vacuum Sci Technol A* 2013; 31(5): 050825. DOI: 10.1116/1.4819316.
- [46] Cao J, Sun T, Grattan KTV. Gold nanorod-based localized surface plasmon resonance biosensors: A review. *Sens Actuators B Chem* 2014; 195: 332-351. DOI: 10.1016/j.snb.2014.01.056.
- [47] Dong P, Qian W, Liao S, Liang H, Kung C-C, Feng N-N, Shafiqi R, Fong J, Feng D, Krishnamoorthy AV, Asghari M. Low loss shallow-ridge silicon waveguides. *Opt Express* 2010; 18(14): 14474-14479. DOI: 10.1364/OE.18.014474.
- [48] Butt MA, Khonina SN, Kazanskiy NL. A T-shaped 1×8 balanced optical power splitter based on 90° bend asymmetric vertical slot waveguides. *Laser Phys* 2019; 29(4): 046207. DOI: 10.1088/1555-6611/ab0372.

- [49] Heck MJR, Bauters JF, Davenport ML, Spencer DT, Bowers JE. Ultra-low loss waveguide platform and its integration with silicon photonics. *Laser Photon Rev* 2014; 8(5): 667-686. DOI: 10.1002/lpor.201300183.
- [50] Butt MA, Khonina SN, Kazanskiy NL. Compact design of a polarization beam splitter based on silicon-on-insulator platform. *Laser Phys* 2018; 28(11): 116202. DOI: 10.1088/1555-6611/aadf18.
- [51] Tran MA, Huang D, Komljenovic T, Peters J, Malik A, Bowers JE. Ultra-low-loss silicon waveguides for heterogeneously integrated silicon/III-V photonics. *Appl Sci* 2018; 8: 1139. DOI: 10.3390/app8071139.
- [52] Butt MA, Khonina SN, Kazanskiy NL. Silicon on silicon dioxide slot waveguide evanescent field gas absorption sensor. *J Mod Opt* 2018; 65(2): 174-178. DOI: 10.1080/09500340.2017.1382596.
- [53] Butt MA, Reddy ANK, Khonina SN. A compact design of a balanced 1×4 optical power splitter based on silicon on insulator slot waveguides. *Computer Optics* 2018; 42(2): 244-247. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-2-244-247.
- [54] Butt MA, Khonina SN, Kazanskiy NL. Hybrid plasmonic waveguide race-track μ -ring resonator: Analysis of dielectric and hybrid mode for refractive index sensing applications. *Laser Phys* 2020; 30(1): 016202. DOI: 10.1088/1555-6611/ab5719.
- [55] Maier SA, Barclay PE, Johnson TJ, Friedman MD, Painter O. Low-loss fibre accessible plasmon waveguide for planar energy guiding and sensing. *Appl Phys Lett* 2004; 84: 3990. DOI: 10.1063/1.1753060.
- [56] Bezus EA, Doskolovich LL, Kazanskiy NL, Soifer VA. Scattering in elements of plasmon optics suppressed by two-layer dielectric structures. *Techn Phys Lett* 2011; 37(12): 1091-1095. DOI: 10.1134/S1063785011120030.
- [57] Bezus EA, Doskolovich LL, Kazanskiy NL. Scattering suppression in plasmonic optics using a simple two-layer dielectric structure. *Appl Phys Lett* 2011; 98(22): 221108. DOI: 10.1063/1.3597620.
- [58] Bezus EA, Doskolovich LL, Kazanskiy NL. Insulator-insulator-metal plasmonic waveguide for parasitic scattering suppression in plasmonic optics. *Bull Russ Acad Sci Phys* 2011; 75(12): 1573-1575. DOI: 10.3103/S1062873811120045.
- [59] Maier SA, Friedman MD, Barclay PE, Painter O. Experimental demonstration of fibre-accessible metal nanoparticle plasmon waveguides for planar energy guiding and sensing. *Appl Phys Lett* 2005; 86: 071103. DOI: 10.1063/1.1862340.
- [60] Oulton RF, Bartal G, Pile DFP, Zhang X. Confinement and propagation characteristics of subwavelength plasmonic modes. *New J Phys* 2008; 10: 105018. DOI: 10.1088/1367-2630/10/10/105018.
- [61] Thiel AJ, Frutos AG, Jordan CE, Corn RM, Smith LM. In situ surface plasmon resonance imaging detection of DNA hybridization to oligonucleotide arrays on gold surfaces. *Anal Chem* 1997; 69(24): 4948-4956. DOI: 10.1021/ac9708001.
- [62] Piliarik M, Vaisocherova H, Homola J. A new surface plasmon resonance sensor for high throughput screening applications. *Biosens Bioelectr* 2005; 20(10): 2104-2110. DOI: 10.1016/j.bios.2004.09.025.
- [63] Cao ZL, Wong SL, Wu SY, Ho HP, Ong HC. High performing phase-based surface plasmon resonance sensing from metallic nanohole arrays. *Appl Phys Lett* 2014; 104(17): 171116. DOI: 10.1063/1.4875019.
- [64] Otto LM, Mohr DA, Johnson TW, Oh SH, Lindquist NC. Polarization interferometry for real-time spectroscopic plasmonic sensing. *Nanoscale* 2015; 7(9): 4226-4233. DOI: 10.1039/C4NR06586G.
- [65] Kravets VG, et al. Singular phase nano-optics in plasmonic metamaterials for label-free single-molecule detection. *Nature Mater* 2013; 12: 304-309. DOI: 10.1038/nmat3537.
- [66] Homola J, Sinclair S, Gauglitz G. Surface plasmon resonance sensors: Review. *Sens Actuators B* 1999; 54(1-2): 3-15. DOI: 10.1016/S0925-4005(98)00321-9.
- [67] Butt MA, Khonina SN, Kazanskiy NL. Metal-Insulator-Metal nano square ring resonator for gas sensing applications. *Wave Random Complex* 2019. DOI: 10.1080/17455030.2019.1568609.
- [68] Zhang Z, Yang J, He X, Zhang J, Huang J, Chen D, Han Y. Plasmonic refractive index sensor with high figure of merit based on concentric-rings resonator. *Sensors* 2018; 18(1): 116. DOI: 10.3390/s18010116.
- [69] Wu T, Liu Y, Yu Z, Peng Y, Shu C, Ye H. The sensing characteristics of plasmonic waveguide with a ring resonator. *Opt Express* 2014; 22(7): 7669-7677. DOI: 10.1364/OE.22.007669.
- [70] Wei W, Zhang X, Ren X. Plasmonic circular resonators for refractive index sensors and filters. *Nanoscale Res Lett* 2015; 10: 211. DOI: 10.1186/s11671-015-0913-4.
- [71] Chen Z, Yu L. Multiple Fano resonances based on different waveguide modes in a symmetry breaking plasmonic system. *IEEE Photon J* 2014; 6(6): 1-8. DOI: 10.1109/JPHOT.2014.2368779.
- [72] Gaur S, Zafar R, Somwanshi D. Plasmonic refractive index sensor based on metal insulator metal waveguide, IEEE International conference on recent advances and innovations in engineering (ICRAIE) 2016: 1-4. DOI: 10.1109/ICRAIE.2016.7939557.
- [73] Zhang Z, Luo L, Xue C, Zhang W, Yan S. Fano resonance based on metal-insulator-metal waveguide-coupled double rectangular cavities for plasmonic nanosensors. *Sensors* 2016; 16(5): 642. DOI: 10.3390/s16050642.
- [74] Yun BF, Hu GH, Zhang RH, Cui YP. Fano resonances in a plasmonic waveguide system composed of stub coupled with a square cavity resonator. *J Opt* 2016; 18(5): 055002. DOI: 10.1088/2040-8978/18/5/055002.
- [75] Yan S, Zhang M, Zhao X, Zhang Y, Wang J, Jin W. Refractive index sensor based on a metal-insulator-metal waveguide coupled with a symmetric structure. *Sensors* 2017; 17(12): 2879. DOI: 10.3390/s17122879.
- [76] Zhao X, Zhang Z, Yan S. Tunable Fano resonance in asymmetric MIM waveguide structure. *Sensors* 2017; 17(7): 1494. DOI: 10.3390/s17071494.
- [77] Butt MA, Khonina SN, Kazanskiy NL. Hybrid plasmonic waveguide-assisted Metal-Insulator-Metal ring resonator for refractive index sensing. *J Mod Opt* 2018; 65(9): 1135-1140. DOI: 10.1080/09500340.2018.1427290.
- [78] Rakhshani MR, Tavousi A, Mansouri-Birjandi MA. Design of a plasmonic sensor based on a square array of nanorods and two slot cavities with a high figure of merit for glucose concentration monitoring. *Appl Opt* 2018; 57(27): 7798. DOI: 10.1364/AO.57.007798.
- [79] Wang L, Zeng Y-P, Wang Z-Y, Xia X-P, Liang Q-Q. A refractive index sensor based on an analogy T shaped metal-insulator-metal waveguide. *Optik* 2018; 172: 1199-1204. DOI: 10.1016/j.ijleo.2018.07.093.
- [80] Butt MA, Khonina SN, Kazanskiy NL. Plasmonic refractive index sensor based on MIM square ring resonator. International Conference on Computing, Electronic and Electrical Engineering (ICE Cube) 2018. DOI: 10.1109/ICECUBE.2018.8610998.

- [81] Fang Y, Wen K, Li Z, Wu B, Chen L, Zhou J, Zhou D. Multiple Fano resonances based on end-coupled semi-ring rectangular resonator. *IEEE Photon J* 2019; 11(4): 2914483. DOI: 10.1109/JPHOT.2019.2914483.
- [82] Chen Y, Xu Y, Cao J. Fano resonance sensing characteristics of MIM waveguide coupled square convex ring resonator with metallic baffle. *Results in Physics* 2019; 14: 102420. DOI: 10.1016/j.rinp.2019.102420.
- [83] Yu S, Zhao T, Yu J, Pan D. Tuning multiple Fano resonances for on-chip sensors in a plasmonic system. *Sensors* 2019; 19(7): 1559. DOI: 10.3390/s19071559.
- [84] Asgari S, Granpayeh N. Tunable Mid-Infrared refractive index sensor composed of asymmetric double graphene layers. *IEEE Sensors J* 2019; 19(14): 5686-5691. DOI: 10.1109/JSEN.2019.2906759.
- [85] Shi Y, Zhang G-M, An H-L, Hu N, Gu M-Q. Controllable fano resonance based on coupled square split ring resonance cavity. *Acta Photonica Sinica* 2017; 46(4): 0413002. DOI: 10.3788/gzxb20174604.0413002.
- [86] Zafar R, Salim M. Enhanced figure of merit in fano resonance-based plasmonic. *IEEE Sensors J* 2015; 15(11): 6313-6317. DOI: 10.1109/JSEN.2015.2455534.
- [87] Butt MA, Khonina SN, Kazanskiy NL. A multichannel metallic dual nano-wall square split-ring resonator: design analysis and applications. *Laser Phys Lett* 2019; 16: 126201. DOI: 10.1088/1612-202X/ab5574.
- [88] Kabashin AV, et al. Plasmonic nanorod metamaterials for biosensing. *Nat Mater* 2009; 8(11): 867-871. DOI: 10.1038/nmat2546.
- [89] Danaie M, Shahzadi A. Design of a high resolution metal-insulator-metal plasmonic refractive index sensor based on a ring shaped Si resonator. *Plasmonics* 2019. DOI: 10.1007/s11468-019-00926-9.
- [90] Song M, et al. Nanofocusing beyond the near-field diffraction limit via plasmonic Fano resonance. *Nanoscale* 2016; 8(3): 1635-1641. DOI: 10.1039/c5nr06504f.
- [91] Cetin AE, Atlug H. Fano resonant ring/disk plasmonic nanocavities on conducting substrates for advanced biosensing. *ACS Nano* 2012; 6(11): 9989-9995. DOI: 10.1021/nn303643w.
- [92] Wang Q, Ouyang Z, Sun Y, Lin M, Liu Q. Linearly tunable Fano resonance modes in a plasmonic nanostructure with a waveguide loaded with two rectangular cavities coupled by a circular cavity. *Nanomaterials* 2019; 9(5): 678. DOI: 10.3390/nano9050678.
- [93] Ye J, et al. Plasmonic nanoclusters: Near field properties of the fano resonance interrogated with SERS. *Nano Lett* 2012; 12(3): 1660-1667. DOI: 10.1021/nl3000453.
- [94] Liu J, Liu Z, Hu H. Tunable multiple Fano resonance employing polarization-selective excitation of coupled surface-mode and nanoslit antenna resonance in plasmonic nanostructures. *Sci Rep* 2019; 9: 2414. DOI: 10.1038/s41598-019-38708-2.
- [95] Zhan S, Peng Y, He Z, Li B, Chen Z, Xu H, Li H. Tunable nanoplasmonic sensor based on the asymmetric degree of Fano resonance in MDM waveguide. *Sci Rep* 2016; 6: 22428. DOI: 10.1038/srep22428.
- [96] Deng Y, Cao G, Yang H, Li G, Chen X, Lu W. Tunable and high-sensitivity sensing based on Fano resonance with coupled plasmonic cavities. *Sci Rep* 2017; 7: 10639. DOI: 10.1038/s41598-017-10626-1.
- [97] Wen Y, et al. High sensitivity and FOM refractive index sensing based on Fano resonance in all-grating racetrack resonators. *Opt Commun* 2019; 446: 141-146. DOI: 10.1016/j.optcom.2019.04.068.
- [98] Chen F, Zhang H, Sun L, Li J, Yu C. Temperature tunable Fano resonance based on ring resonator side coupled with a MIM waveguide. *Opt Laser Technol* 2019; 116: 293-299. DOI: 10.1016/j.optlastec.2019.03.044.
- [99] Eisorbagy MH, et al. Performance improvement of refractometric sensors through hybrid plasmonic Fano resonances. *J Lightw Technol* 2019; 37(13): 2905-2913. DOI: 10.1109/JLT.2019.2906933.
- [100] Liu H, et al. Metasurface generated polarization insensitive Fano resonance for high performance refractive index sensing. *Opt Express* 2019; 27(9): 13252-13262. DOI: 10.1364/OE.27.013252.
- [101] Li Z, et al. Refractive index sensor based on multiple fano resonances in a plasmonic MIM structure. *Appl Opt* 2019; 58(18): 4878-4883. DOI: 10.1364/AO.58.004878.
- [102] Wang M, Zhang M, Wang Y, Zhao R, Yan S. Fano Resonance in an Asymmetric MIM waveguide structure and its application in a refractive index nanosensor. *Sensors* 2019; 19(4): 791. DOI: 10.3390/s19040791.
- [103] Zhang BH, Wang L-L, Li H-J, et al. Two kinds of double Fano resonances induced by an asymmetric MIM waveguide structure. *J Opt* 2016; 18(6): 065001. DOI: 10.1088/2040-8978/18/6/065001.
- [104] Chen F, Li J. Refractive index and temperature sensing based on defect resonator coupled with a MIM waveguide. *Mod Phys Lett B* 2019; 33(3): 1950017. DOI: 10.1142/S0217984919500179.
- [105] Qi L, Zhao CL, Yuan JY, Ye MP, Wang J, Zhang Z, Jin S. Highly reflective long period fibre grating sensor and its application in refractive index sensing. *Sens Actuators B Chem* 2014; 193: 185-189. DOI: 10.1016/j.snb.2013.11.063.
- [106] Wu DKC, Kuhlmeij BT, Eggleton BJ. Ultrasensitive photonic crystal fibre refractive index sensor. *Opt Lett* 2009; 34(3): 322-324. DOI: 10.1364/OL.34.000322.
- [107] Shen Y, Zhou JH, Liu TR, et al. Plasmonic gold mushroom arrays with refractive index sensing figures of merit approaching the theoretical limit. *Nat Commun* 2013; 4(4): 3381. DOI: 10.1038/ncomms3381.
- [108] Tang Y, Zhang Z, Wang R, Hai Z, Xue C, Zhang W, Yan S. Refractive index sensor based on Fano resonances in metal-insulator-metal waveguides coupled with resonators. *Sensors* 2017; 17: 784. DOI: 10.3390/s17040784.
- [109] Akhavan A, Ghafoorifard H, Abdolhosseini S, Habibiyani H. Metal-insulator-metal waveguide-coupled asymmetric resonators for sensing and slow light applications. *IET Optoelectron* 2018; 12(5): 220-227. DOI: 10.1049/iet-opt.2018.0028.
- [110] Lu H, Liu X, Mao D. Plasmonic analog of electromagnetically induced transparency in multianoresonator-coupled waveguide systems. *Phys Rev A* 2012; 85(5): 053803. DOI: 10.1103/PhysRevA.85.053803.
- [111] Boller K, Imamoglu A, Harris SE. Observation of electromagnetically induced transparency. *Phys Rev Lett* 1991; 66(20): 2593-2596. DOI: 10.1103/PhysRevLett.66.2593.
- [112] Chen Y, Chen L, Wen K, Hu Y, Lin W. Double Fano resonances based on different mechanisms in a MIM plasmonic system. *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications* 2019; 36: 100714. DOI: 10.1016/j.photonics.2019.100714.
- [113] Wen K, Chen L, Zhou J, Lei L, Fang Y. A plasmonic chip-scale refractive index sensor design based on multiple Fano resonances. *Sensors* 2018; 18: 3181. DOI: 10.3390/s18103181.

- [114] Berini P. Bulk and surface sensitivities of surface plasmon waveguides. *New J Phys* 2008; 10(10): 105010. DOI: 10.1088/1367-2630/10/10/105010.
- [115] Daviau R, Khan A, Lisicka-Skrzek E, Tait RN, Berini P. Fabrication of surface plasmon waveguides and integrated components on Cytop. *Microelectron Eng* 2010; 87(10): 1914-1921. DOI: 10.1016/j.mee.2009.11.078.
- [116] Krupin O, Asiri H, Wang Ch, Tait RN, Berini P. Biosensing using straight long-range surface plasmon waveguides. *Opt Express* 2013; 21(1): 698-709. DOI: 10.1364/OE.21.000698.
- [117] Hayashi S, Nesterenko DV, and Sekkat Z. Waveguide-coupled surface plasmon resonance sensor structures: Fano lineshape engineering for ultrahigh-resolution sensing. *J Phys D Appl Phys* 2015; 48(32): 325303. DOI: 10.1088/0022-3727/48/32/325303.
- [118] Nesterenko DV, Hayashi S, Sekkat Z. Extremely narrow resonances, giant sensitivity and field enhancement in low-loss waveguide sensors. *J Opt* 2016; 18(6): 065004. DOI: 10.1088/2040-8978/18/6/065004.
- [119] Refki S, Hayashi S, Ishitobi H, Nesterenko DV, Rahmouni A, Inouye Y, Sekkat Z. Resolution enhancement of plasmonic sensors by metal-insulator-metal structures. *Annalen Der Physik* 2018; 530(4): 1700411. DOI: 10.1002/andp.201700411.
- [120] COMSOL. Source: <https://www.comsol.com>.
- [121] ANSYS. Source: <https://www.ansys.com>.
- [122] Lumerical. Source: <https://www.lumerical.com>.
- [123] Zand I, Abrishamian MS, Berini P. Highly tunable nanoscale metal-insulator-metal split ring core ring resonators (SRCRRs). *Opt Express* 2013; 21(1): 79-86. DOI: 10.1364/OE.21.000079.
- [124] Hirsch LR, Jackson JB, Lee A, Halas NJ, West JL. A whole blood immunoassay using gold nanoshells. *Anal Chem* 2003; 75: 2377-2381. DOI: 10.1021/ac0262210.
- [125] Guler U, Suslov S, Kildishev AV, Boltasseva A, Shalaev VM. Colloidal plasmonic titanium nitride nanoparticles: Properties and applications. *Nanophotonics* 2015; 4(3): 269-276. DOI: 10.1515/nanoph-2015-0017.
- [126] Behnam MA, Emami F, et al. Novel combination of silver nanoparticles and carbon nanotubes for plasmonic photothermal therapy in a melanoma cancer model. *Adv Pharm Bull* 2018; 8(1): 94-95. DOI: 10.15171/apb.2018.006.
- [127] Zand I, Mahigir A, Pakizeh T, Abrishamian. Selective-mode optical nanofilters based on plasmonic complementary split-ring resonators. *Opt Express* 2012; 20(7): 7516-7525. DOI: 10.1364/OE.20.007516.
- [128] Tao H, et al. Metamaterials on paper as a sensing platform. *Adv Mater* 2011; 23(28): 3197-3201. DOI: 10.1002/adma.201100163.
- [129] Yanik AA, Cetin AE, Huang M, Artar A, Hossein Mousavi S, Khanikaev A, Connor JH, Shvets G, Altug H. Seeing protein monolayers with naked eye through plasmonic Fano resonances. *Proc National Academy of Sciences* 2011. DOI: 10.1073/pnas.1101910108.
- [130] Hrelescu C, et al. Selective excitation of individual plasmonic hotspots at the tips of single gold nanostars. *Nano Lett* 2011; 11(2): 402-407. DOI: 10.1021/nl103007m.
- [131] Dondapati SK, et al. Label-free biosensing based on single gold nanostars as plasmonic transducers. *ACS Nano* 2010; 4(11): 6318-6322. DOI: 10.1021/nn100760f.
- [132] Unger A, et al. Sensitivity of crescent-shaped metal nanoparticles to attachment of dielectric colloids. *Nano Lett* 2009; 9(6): 2311-2315. DOI: 10.1021/nl900505a.
- [133] Shan B., Y. Zhao, Y. Li, H. Wang, R. Chen, M. Li High-quality dual-plasmonic Au@Cu_{2-x}Se nanocrescents with precise Cu_{2-x}Se domain size control and tunable optical properties in the second near-infrared. *Chem Mater* 2019; 31(23): 9875-9886. DOI: 10.1021/acs.chemmater.9b04100.
- [134] Beeram SR, et al. Selective attachment of antibodies to the edges of gold nanostructures for enhanced localized surface plasmon resonance biosensing. *J Am Chem Soc* 2009; 131(33): 11689-11691. DOI: 10.1021/ja904387j.
- [135] Feuz L, et al. Improving the limit of detection of nanoscale sensors by directed binding to high-sensitivity areas. *ACS Nano* 2010; 4(4): 2167-2177. DOI: 10.1021/nn901457f.
- [136] Liu N, et al. Three-dimensional plasmon rulers. *Science* 2011; 332(6036): 1407-1410. DOI: 10.1126/science.1199958.
- [137] Bolduc OR, et al. Advances in surface plasmon resonance sensing with nanoparticles and thin films: nanomaterials, surface chemistry, and hybrid plasmonic techniques. *Anal Chem* 2011; 83(21): 8057-8062. DOI: 10.1021/ac2012976.

Authors' information

Nikolay Lvovich Kazanskiy graduated with honors (1981) from S.P. Korolyov Kuibyshev Aviation Institute (presently, Samara University), majoring in Applied Mathematics. He received his Candidate in Physics & Maths (1988) and Doctor in Physics & Mathematics (1996) degrees from Samara University. He is the Head of the IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics RAS”, also holding a part-time position of a professor at Technical Cybernetics department of Samara University, holding the chair at the of High-Performance Computing department at IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics RAS”. He is a member of OSA, SPIE and IAPR. He co-authored 290 scientific papers, 12 monographs, 53 inventions and patents. His current research interests include diffractive optics, mathematical modeling, image processing, and nanophotonics.

Website: <http://www.ipsi.smr.ru/staff/kazanskiy.htm> . E-mail: kazanskiy@ssau.ru .

Muhammad Ali Butt (b. 1985) received a Bachelor's degree in Electrical (Telecommunication) Engineering from Comsats Institute of Information and Technology, Pakistan in year 2008. He acquired his Master's degree in Electrical Communication Engineering from University of Kassel, Germany (2010). He accomplished his PhD degree with Cum Laude in Material Sciences from Universitat Rovira i Virgili, Spain in year 2015. In 2013, he made a research stay at Optoelectronic Research Centre (ORC), University of Southampton, England. Currently he works as a Senior Scientist at Samara National Research University, Russia. Research interests are optical waveguides, plasmonic sensors, diffractive optics, and optical filters. E-mail: m.a.butt@ssau.ru .

Sergey Alexandrovich Degtyarev, docent of Samara National Research University, research fellow of the Image Processing Systems Institute of the RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. Research interests: wave optics. E-mail: sealek@gmail.com.

Svetlana Nikolaevna Khonina, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Professor of Samara National Research University. Main researcher of the IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. Research interests: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulating, optical and digital image processing. E-mail: khonina@ipsiras.ru.

Received April 21, 2020. The final version – June 01, 2020.
