

УДК 535.4; 621.378.8; 681.2

PACS 05.40.Ca, 07.07.Df, 42.25.Bs, 42.62.-b, 42.82.-m, 89.60.-k

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКОГО СЕНСОРА ГАЗООБРАЗНЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ НАЛИЧИИ АДДИТИВНОГО СЛУЧАЙНОГО ШУМА

А. А. Егоров,¹ Т. К. Чехлова,² В. И. Григорук,³ А. В. Коваленко³

¹ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

² Российский университет дружбы народов

³ Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко

Получена 8 сентября 2010 г.

Аннотация. Проанализирована зависимость чувствительности интегрально-оптического волноводного сенсора от длины волноводной сенсорной ячейки, эффективности ввода лазерного излучения в волновод, сечения поглощения детектируемого вещества и уровня аддитивного случайного шума. По данным компьютерного моделирования установлено, что интегрально-оптический сенсор данного типа может обнаруживать содержание, например, газообразного аммиака в воздухе с предельной теоретической концентрацией около 0.1 ppm при сечении поглощения исследуемого вещества $4 \cdot 10^{-16}$ см², величине отношения сигнал/шум около 20, длине сенсорной ячейки примерно 4 см и эффективности ввода лазерного излучения в волновод не менее 40%.

Ключевые слова: интегрально-оптический сенсор, химический сенсор, лазерное излучение, газообразные вещества, численное моделирование, случайный шум.

Введение

В последние годы существует устойчивый интерес к развитию оптических сенсоров (датчиков) [1-13], который обусловлен в основном следующими их

преимуществами: высокой чувствительностью, быстрым срабатыванием, простотой мультиплексирования сигнала, а также – применением интегральных технологий [2-14]. По-нашему мнению, среди оптических химических датчиков интегрально-оптические химические сенсоры [2-13] являются наиболее перспективными.

Принцип работы интегрально-оптического химического сенсора, например абсорбционного типа, основан на регистрации изменения интенсивности лазерного излучения, взаимодействующего с исследуемой газообразной (газ, пар) или жидкой средой на некоторых длинах волн, характерных для данной среды.

В оптико-лучевом приближении лазерное излучение, введенное в регулярный планарный волновод, распространяется вдоль волновода в виде плоских волн, двигающихся по зигзагообразному пути и испытывающих полное внутреннее отражение на границах волновода [14]. Оптическая энергия моды не ослабевает в результате интерференции волн отраженных на границах волновода, если полное изменение фазы в вертикальном направлении кратно 2π (выполнено резонансное условие).

При появлении рядом с волноводным сенсором газообразной или жидкой среды, у которой есть характерная линия поглощения, совпадающая с длиной волны лазерного излучения, будет наблюдаться затухание мощности волноводной моды за счет взаимодействия экспоненциально затухающего в воздухе поля ТЕ-моды с исследуемой средой. Именно этот эффект и лежит в основе работы интегрально-оптического химического датчика абсорбционного типа.

Несомненный интерес представляет также исследование интегрально-оптических датчиков, в которых используются вытекающие волны. Необходимо подчеркнуть, что в этом случае для анализа процессов распространения направляемых волноводных мод, а также процессов рассеяния излучательных волноводных мод неприменимы как метод Фурье разделения переменных, используемый для регулярных волноводов [1, 2], так и метод

разложения по полной системе направляемых мод и мод излучения регулярного волновода [2, 7-15]. Поскольку постоянная распространения здесь комплексная и существует проблема ортогональности соответствующих мод [15-18]. В общем случае необходимо рассмотрение распространения и трансформации поляризованного монохроматического излучения в многослойном интегрально-оптическом трехмерном (3D) нерегулярном волноводе [15-18].

В настоящей работе основное внимание уделено исследованию чувствительности трехслойного интегрально-оптического датчика газообразных веществ в зависимости от длины волноводной сенсорной ячейки, эффективности ввода лазерного излучения в волновод и уровня аддитивного случайного шума. Как показали данные проведенного нами компьютерного моделирования, именно эти параметры оказывают важнейшее влияние на чувствительность волноводного химического сенсора.

Принцип действия интегрально-оптического абсорбционного сенсора

Схема, иллюстрирующая процесс детектирования газообразного вещества с помощью интегрально-оптического датчика (см., например, [11-13]) изображена на рис. 1. Интегрально-оптические химические датчики могут иметь волноводный слой из различных материалов. Это может быть пленка Ta_2O_5 , нанесенная с помощью катодного распыления на стеклянную подложку. Волноводный слой может быть изготовлен также методом твердотельной диффузии PbO_2 в стеклянную пластину. Могут применяться и другие типы пленок, например, из полистирола, желатины или полиметилметакрилата. Поверхность использованной в наших экспериментах стеклянной пластинки (марки К8) была обработана по 14-му класса чистоты. Среднеквадратичная величина шероховатости поверхности этой пластинки не превышает 100 \AA .

Для ввода и вывода лазерного излучения в волноводный сенсор могут использоваться призмы, дифракционные решетки. Может использоваться также торцевой ввод лазерного излучения. Выбор конкретного типа волновода и способа ввода/вывода лазерного излучения в интегрально-оптический волновод

определяется конструкцией сенсора, типом исследуемого вещества, а также – предъявляемыми к датчику технологическими требованиями.

Общая схема экспериментальной установки дана на рис. 2. Для конкретности мы выбрали в качестве исследуемого вещества аммиак (NH_3). В качестве источника когерентного излучения используется лазер 1 с длиной волны λ , совпадающей с одной из полос поглощения детектируемого газообразного аммиака, либо находящейся в ее окрестности.

Отметим, что в традиционной спектроскопии известны следующие полосы поглощения газообразного аммиака: 110–230 нм,¹ около 790 нм, около 1300 нм, около 3000 нм, около 9000 нм, около 10300 нм и около 10700 нм [3, 5, 8]. Менее известна и пока все еще слабо изучена область поглощения NH_3 в диапазоне 549–653 нм [3, 5, 8, 9]. Эти работы выполнены с использованием классических источников излучения (типа ламп накаливания).

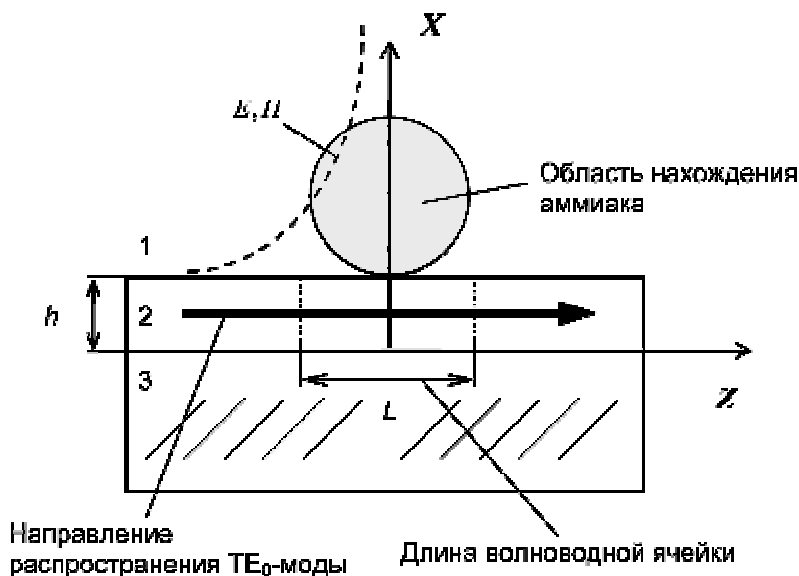


Рис. 1. Схема детектирования газообразного вещества. Интегрально-оптический волновод, образованный средами 1-3: 1 – воздух, 2 – волноводный слой; 3 – подложка; h – толщина волноводного слоя; L – длина волноводной сенсорной ячейки.

Схематично показан экспоненциальный спад напряженностей электромагнитного поля направляемой TE_0 -моды в воздухе.

¹ См., например, базу данных МФТИ по сечениям поглощения молекул: <http://neq.mipt.ru/SEPS355/database.htm>

В работах по интегрально-оптическим датчикам, выполненным за последние пятнадцать лет, используются преимущественно лазерные источники излучения (газовые и полупроводниковые лазеры). В ряде этих работ обнаружена удовлетворительная чувствительность интегрально-оптических сенсоров к аммиаку, как в окрестности 600 и 633 нм [3, 8, 13], так и в диапазоне длин волн от примерно 500 до 700 нм [5].

Вместе с тем особенности работы различных интегрально-оптических сенсоров в видимом диапазоне длин волн изучены пока еще слабо. Нет, например, достоверных данных о взаимодействии молекул аммиака, как с поверхностью конкретного сенсора, так и с приповерхностным слоем сенсора в поле лазерного излучения волноводной моды. Хотя еще в первых работах по интегрально-оптическим датчикам отмечались возможности сложного взаимодействия детектируемого вещества и сенсора [2].

В типичной экспериментальной установке (рис. 2) лазерный луч разделяется полупрозрачным зеркалом 2 на опорный и сенсорный лучи. Сенсорный луч вводится в оптический волновод 3 через вводную призму под углом, который соответствовал резонансному возбуждению TE_0 -моды. Эффективность ввода η лазерного излучения в волноводную сенсорную ячейку в наших экспериментах была не ниже 20%.

Введенное в волноводную сенсорную ячейку излучение распространяется по ней, частично проникая в верхнюю обрамляющую среду, и в присутствии исследуемого газа на выходе выводной призмы наблюдается уменьшение амплитуды сигнала, регистрируемого фотоприемником (ФП 1). Сигнал опорного луча фиксируется вторым фотоприемником (ФП 2). В качестве фотоприемников могут использоваться кремниевые фотодиоды типа ФД-256. При низком отношении сигнал/шум (SNR) предпочтительнее применять фотоэлектронные умножители.

Сигналы с фотоприемников поступают на электронную схему сравнения 4. После аналого-цифрового преобразования сигнал регистрировался и

обрабатывается компьютером 5. Наличие сигналов от опорного и сенсорного фотоприемников позволяет повысить отношение сигнал/шум и улучшить чувствительность датчика.

При использовании интегрально-оптического интерферометра типа Маха-Цендера оба плеча будут оптическими, что позволяет сделать всю схему более компактной и более устойчивой к внешним воздействиям и помехам. Действительно, отношение сигнал/шум при измерениях является одним из важных лимитирующих чувствительность датчика факторов, его повышению следует уделять особое внимание.

Затухание α направляемой волноводной моды определяется по известным методикам [8, 13, 14]. Расстояние L между вводом и выводом лазерного излучения в волновод определяет длину сенсорной ячейки и может, например, при использовании призмного ввода/вывода варьироваться в пределах длины волноводной подложки.

Запись данных экспериментов в цифровом виде может производиться, например, с помощью компьютеризированной виртуальной лаборатории типа «PC-LAB», возможности которой могут быть расширены последующей математической обработкой полученных данных [13]. Данные измерений, сохраненные на компьютере, могут затем обрабатываться как с помощью различных компьютерных программ или с помощью таких систем компьютерной математики как «MathCAD» или «MathLab».

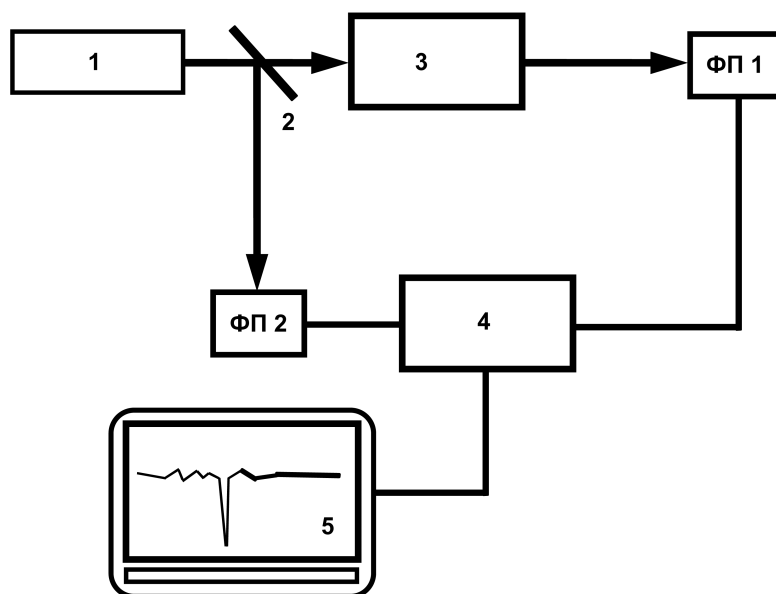


Рис. 2. Типичная схема измерительной установки: 1 – лазер; 2 – полупрозрачное зеркало; 3 – интегрально-оптический волноводный сенсор; 4 – электронная схема сравнения; 5 – компьютер.

Для расчетов концентрация газообразного аммиака в экспериментах можно использовать закон Бугера-Ламберта-Бэра в интегральной форме [13]:

$$P = P_0 \exp \left[- \int_{-L/2}^{L/2} \sigma N(z) dz \right], \quad (1)$$

где P и P_0 – мощность лазерного излучения на выходе волноводной сенсорной ячейки в присутствии и в отсутствие аммиака соответственно; L – толщина слоя исследуемой среды (длина сенсорной ячейки); σ и $N(z)$ – сечение поглощения и распределение концентрации определяемого вещества вдоль оси z ; $\sigma N(z) = \alpha(z)$ – локальный коэффициент затухания лазерного излучения направляемой моды.

Результаты исследования чувствительности интегрально-оптического датчика газообразных веществ и их обсуждение

На рис. 3 и рис. 4 приведены два из ряда полученных графиков зависимости коэффициента затухания α основной волноводной ТЕ-моды, который обусловлен наличием газообразного аммиака. Расчеты выполнены для экспериментальных условий измерения.

Полученные зависимости (см. рис. 3 и рис. 4) характеризуют определенную минимальную чувствительность рассматриваемого интегрально-оптического датчика в зависимости от длины сенсорной ячейки L при заданной величине сечения поглощения $\sigma \approx 4 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ определяемого вещества, в качестве которого выбран аммиак (см., например, указанную выше базу данных МФТИ по сечениям поглощения молекул).

Подчеркнем, что применение этой величины в более широком оптическом диапазоне длин волн требует проведения высокоточных экспериментов с использованием прецизионных генераторов газов, которые являются эталонной мерой и предназначены для воспроизведения размера единицы массовой концентрации определяемых примесей в воздухе. На данный момент нам не удалось найти достоверных данных для σ в видимом диапазоне длин волн. Существующие в литературе данные, получены в традиционной спектроскопии с использованием классических источников излучения (типа ламп накаливания). Обоснованность их применения в измерениях с лазерными источниками требует дополнительных трудоемких и дорогостоящих исследований. Отметим, что близкая к указанной выше величина σ у аммиака наблюдается в традиционной спектроскопии в окрестности длин волн² ≈ 110 нм и ≈ 190 нм.

² Отметим, что близкие длины волн имеют, например, эксимерный лазер ($\lambda \approx 193$ нм) или вторая гармоника азотного лазера ($\lambda \approx 169$ нм).

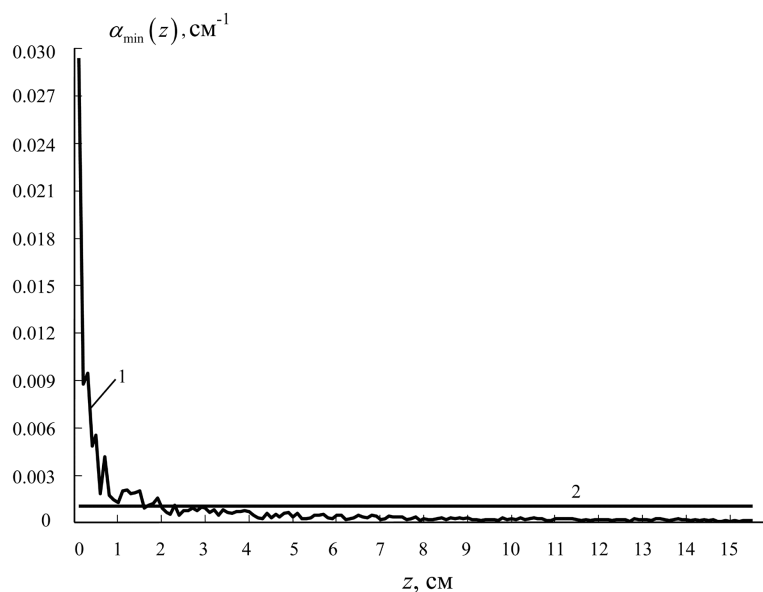


Рис. 3. Зависимость минимальной чувствительности $\alpha_{\min}(z)$ интегрально-оптического датчика в зависимости от длины сенсорной ячейки L (полагается, что $L = z$). На рисунке обозначены: 1 – зависимость $\alpha_{\min}(z)$ при $\langle \text{SNR} \rangle \approx 20$; 2 – уровень $\alpha_{\min}(z) = 1.03 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$, соответствующий концентрации газообразного аммиака в воздухе 0.1 ppm.

Минимальное значение коэффициента затухания волноводной моды в присутствии аммиака и при наличии случайного аддитивного шума рассчитывалось по простой формуле:

$$\alpha_{\min}(z) = \ln[(P_0 + P_n)P_{\min}^{-1}] \cdot z^{-1}, \quad (2)$$

где P_{\min} – мощность сигнала, при котором отношение сигнал/шум в среднем не ниже заданного уровня; P_n – мощность случайного аддитивного шума.

На рис. 3 обозначен также уровень $\alpha_{\min}(z)$, соответствующий концентрации газообразного аммиака в воздухе 0.1 ppm. Как видно из рис. 3, при среднем значении $\langle \text{SNR} \rangle \approx 20$ и эффективности ввода η лазерного излучения в волноводную сенсорную ячейку около 40%, для достижения уровня чувствительности 0.1 ppm длина сенсорной ячейки L должна быть не менее 4 см.

На рис. 4 приведены результаты расчетов для предельного отношения сигнал/шум ≥ 1 . Параметры η и L здесь те же, что и на рис. 3. В этом случае

для достижения уровня чувствительности 0.1 ppm длина сенсорной ячейки должна быть увеличена как минимум до 50 см. Следовательно, здесь требуется брать L почти на порядок больше, чем при $\langle \text{SNR} \rangle \approx 20$.

Эти два примера достаточно хорошо показывают влияние такого параметра как величина отношения сигнал/шум и длина сенсорной ячейки на чувствительность интегрально-оптического химического датчика.

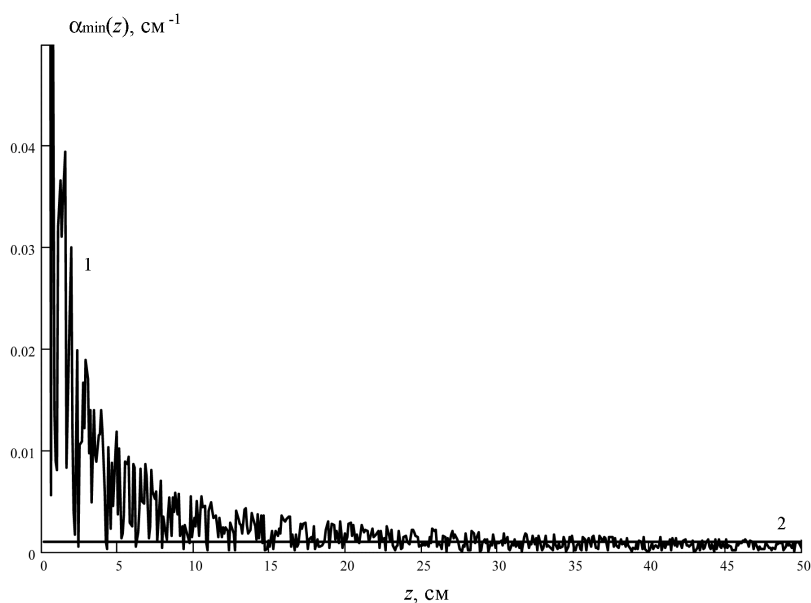


Рис. 4. То же самое, что и на рис. 3, но при $\langle \text{SNR} \rangle \geq 1$.

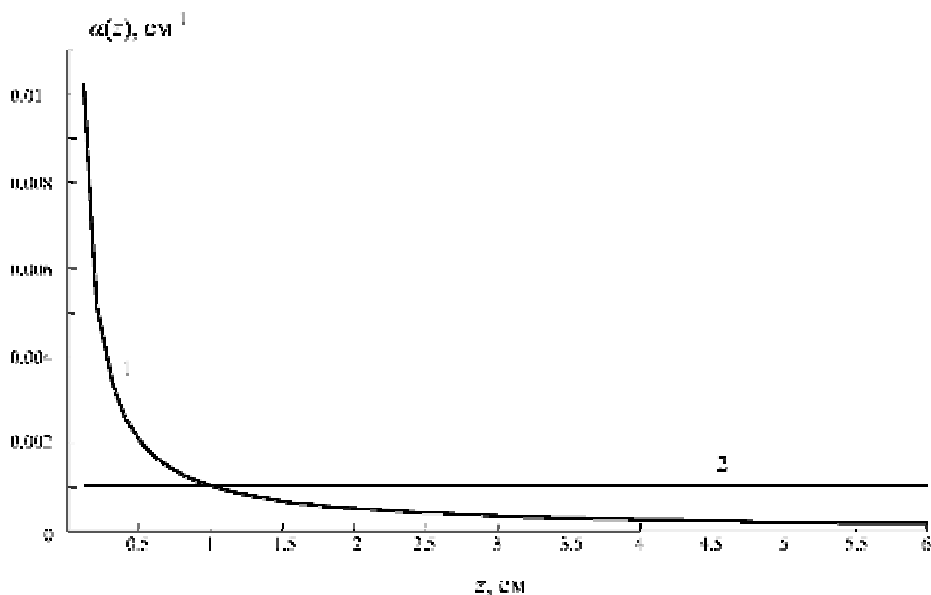


Рис. 5. То же самое, что и на рис. 3, но в отсутствие шума).

Компьютерное моделирование показало, что повышение чувствительности интегрально-оптических датчиков подобного типа возможно, например, с помощью: 1) повышения эффективности ввода η лазерного излучения в волновод; 2) снижения потерь из-за рассеяния лазерного излучения на нерегулярностях волноводной части сенсора при фиксированной η ; 3) увеличения доли мощности волноводной моды в исследуемой среде.

Увеличение эффективности ввода η лазерного излучения в волновод с 40 до примерно 70% позволяет достичь чувствительности 0.1 ppm при длине сенсорной ячейки L примерно 10-15 см и $\langle \text{SNR} \rangle$ около 10.

В отсутствие шума и при параметре $\eta = 40\%$ для достижения уровня чувствительности 0.1 ppm минимальная длина сенсорной ячейки $L = 1$ см (см. рис. 5). В интервале изменения L примерно от 1 до 2 см можно достичь чувствительности 0.1 ppm при незначительном шуме, когда $\langle \text{SNR} \rangle > 100$. Аналогичные данные были также получены для нескольких других типов интегрально-оптических химических датчиков.

Важно подчеркнуть, что при уменьшении выбранного сечения поглощения σ от $4 \cdot 10^{-16}$ см² до $\approx 10^{-19}$ – 10^{-21} см² в случаях, показанных на рис. 3 и рис. 4, потребуются значительное увеличение длины сенсорной ячейки. При этом естественно возрастают требования к чувствительности измерительной аппаратуры и математическим методам последующей обработки данных измерений. При оптимизированных параметрах установки и использовании, например, в качестве волноводного датчика цилиндрического стержня можно получить эффективную длину сенсорной ячейки от нескольких метров до десятков метров. Это позволяет создать подобные сенсоры компактными по линейным размерам, не превышающим примерно 15-20 сантиметров.

Дискуссия

Детальный анализ влияния рассеяния света на чувствительность интегрально-оптического волноводного датчика будет дан в одной из наших

следующих наших работ. Здесь только отметим, что рассеяние лазерного излучения в волноводе [13-17, 19, 20] является одним из важнейших лимитирующих факторов достижения предельной чувствительности интегрально-оптических сенсоров [13]. В связи с этим для достижения высокой чувствительности интегрально-оптических датчиков необходимо детальнее исследовать проблему рассеяния лазерного излучения на границах раздела пленка–подложка и пленка–верхний покровный слой, поскольку с ростом разницы показателей преломления этих сред возрастают и потери на рассеяние волноводных мод интегрально-оптических волноводов. Аналогичные исследования необходимо провести и для интегрально-оптических датчиков, у которых есть рассеяние на внутренних дефектах волноводной части структуры сенсора.

Отметим, что интегрально-оптические волноводы на основе пленок, изготовленных по золь-гель технологии, несомненно, перспективны для создания различных интегрально-оптических сенсоров т.к. они сочетают относительную простоту реализации, дешевизну, прочность, возможность изменения показателя преломления в широком диапазоне. И, что чрезвычайно важно для создания независимых от температуры интегрально-оптических устройств, обладают сравнительно большим отрицательным температурным оптическим коэффициентом [19]. Указанные свойства делают их весьма привлекательными для создания атермальных волноводных устройств, т.е. устройств, параметры, которых не зависят от температуры. Подчеркнем, что температурной зависимости подвержены и такие необходимые компоненты систем плотного мультиплексирования, как узкополосные оптические фильтры, к которым относятся фильтры на основе волноводных матриц, резонаторы Фабри-Перо, РОС и РБО фильтры, интерферометры Маха-Цандера и др., что также связано с температурным изменением длины оптического пути.

Несомненный интерес представляет также исследование механизмов потерь в волноводных пленках, изготовленных по золь-гель технологии и оптических нановолокнах [19, 20], которые могут быть использованы как для создания

перспективных оптических датчиков, так и найти применение в телекоммуникационных системах с высокой плотность передачи данных, а также – в системах обработки оптической информации.

Все эти факторы необходимо детально учитывать при решении задач анализа и синтеза перспективных оптических сенсоров параметров окружающей среды для достижения высоких метрологических характеристик данных сенсоров.

Заключение

В данной работе исследована зависимость чувствительности интегрально-оптического волноводного датчика от таких важных параметров собственно сенсора как длина волноводной ячейки, сечение поглощения исследуемого вещества и эффективность ввода лазерного излучения в волноводную ячейку, а также от важнейшего фактора, обусловленного условиями измерений – уровня аддитивного случайного шума, изменяющегося в широких пределах.

Датчики на основе интегрально-оптических волноводов могут найти применение, например, в компьютеризированных системах контроля качества воздуха в микроэлектронной, медицинской и химической промышленности, а также в других отраслях, где требуется оперативный контроль, особенно – взрыво- и пожароопасных газов.

Литература

1. Шмидт Д., Шварц А. *Оптоэлектронные сенсорные системы*. – М: Мир, 1991.
2. Lambeck P.V. // *Sensors and Actuators*, 1992, **8**, p. 103.
3. Wiesmann R., Muller L., Klein R., Neyer A. // *Proc. 7th European Conf. on Integrate Optics ECIO`95* (Delft, Netherland), 1995, p. 453.
4. Bednorz M., Urbańczyk M., Pustelny T., Piotrowska A., Papis E., Sidor Z., Kamińska E. // *Molecular and Quantum Acoustics*, 2006, **27**, p. 31.
5. Pustelny T., Maciak E., Opilski Z., Bednorz M. // *Optica Applicata*, 2007, Vol. XXXVII, No. 1 2, p. 187.

6. Хомченко А.В., Глазунов Е.В., Примак И.У., Редько В.П., Сотский А.Б. // *Письма в ЖТФ*, 1999, **25**, С. 11.
7. Mogensen K.B., El-Ali J., Wolff A., Kutter J.P. // *Appl. Opt.*, 2003, **42**, p. 4072.
8. Чехлова Т.К., Тимакин А.Г., Попов К.А. // *ИТЭ*, 2002, **45**, С. 145.
9. Egorov A.A., Egorov M.A., Tsareva Yu.I., Chekhlova T.K. // *Laser Physics*, 2007, **17**, С. 50.
10. Passaro V.M.N., Dell'Olio F., De Leonardis F. // *Sensors*, 2007, **7**, С. 2741.
11. Егоров А.А., Егоров М.А., Чехлова Т.К., Тимакин А.Г. // *Экология и промышленность России*, 2008, № 4 (апрель), С. 16.
12. Егоров А.А., Егоров М.А., Чехлова Т.К., Тимакин А.Г. // *Датчики и системы*, 2008, № 1, С. 25.
13. Егоров А.А., Егоров М.А., Чехлова Т.К., Тимакин А.Г. // *Квантовая электроника*, 2008, **38**, С. 787.
14. Hunsperger R.G. *Integrated Optics: Theory and Technology*. – New York: Springer-Verlag, 1984. (Перевод: Хансперджер Р. *Интегральная оптика: Теория и технология*. – М.: Мир, 1985).
15. Снайдер А., Лав Дж. *Теория оптических волноводов*. – М.: Радио и связь, 1987.
16. Егоров А.А. // *Квантовая электроника*, 2004, **34**, С. 744.
17. Egorov A.A. // *Las. Phys. Let.*, 2004, **1**, p. 579.
18. Маненков А.Б. // *Изв. вузов. Сер. Радиофизика*, 2005, **48**, С. 388.
19. Чехлова Т.К., Живцов С.В., Грабовский Е.И. // *Радиотехника и Электроника*, 2006, **51**, С. 855.
20. Kovalenko A.V., Kurashov V.N., Kisil A.V. // *Optics Express*, 2008, **16**, p. 5797.