

Исследование компьютеризированного интегрально-оптического датчика концентрации газообразных веществ

А.А.Егоров, М.А.Егоров, Т.К.Чехлова, А.Г.Тимакин

Создан и исследован компьютеризированный интегрально-оптический волноводный датчик на основе оптического волновода диффузионного типа с низким коэффициентом затухания. Показано, что компьютеризированный интегрально-оптический датчик имеет время отклика около 0.15 с. По данным тестирования и компьютерного моделирования датчик этого типа может обнаруживать газообразный аммиак в воздухе с предельной теоретической концентрацией около 0.1 ppm при отношении сигнал/шум не менее 20.

Ключевые слова: интегрально-оптический датчик, лазерное излучение, загрязнители воздуха, мониторинг окружающей среды.

1. Введение

Обнаружение таких газов, как CO, NO_x, NH₃, SO_x и O₃, является важной задачей в области физической экологии, при мониторинге окружающей среды, в медицине, химии и военных технологиях. Существуют разные типы датчиков [1–4], принцип работы которых основан на различных физических или химических явлениях и свойствах материалов.

Развитие датчиков, которые позволяют определять температуру, давление, влажность и концентрацию газов, стимулируется, в частности, необходимостью совершенствования приборов для мониторинга окружающей среды и прогрессом в физической экологии. Создание таких приборов тесно связано с появлением новых типов сенсоров – оптических датчиков. Интерес к развитию и применению этих датчиков обусловлен рядом их преимуществ перед неоптическими датчиками: высокой чувствительностью, быстроедействие, возможностью использования при дистанционном зондировании, простотой мультиплексирования сигнала, возможностью применения интегральных технологий для их изготовления. Интегрально-оптические датчики, по нашему мнению, являются наиболее перспективными среди оптических датчиков [1–3, 5–8].

Принцип работы интегрально-оптических датчиков абсорбционного типа основан на регистрации изменения интенсивности лазерного излучения, проходящего через исследуемую газообразную (газ, пар) или жидкую среду (находящуюся рядом с этим датчиком), на некоторых длинах волн, типичных для данной среды. Основная задача состоит в том, чтобы создать простые в использовании, компактные, точные и безопасные датчики с малым временем сигнальной реакции для измерения, на-

пример, концентраций различных газов в атмосфере, особенно при крайне низких концентрациях.

В настоящей работе для улучшения характеристик интегрально-оптического датчика, таких как чувствительность, время анализа и др., предлагается использовать миниатюрную электронную схему сравнения на основе прецизионных операционных усилителей, аналого-цифровое преобразование сигнала, хранение и обработку оцифрованных данных измерений в компьютере.

2. Компьютеризированный интегрально-оптический датчик

Работоспособность интегрально-оптического датчика была показана на модели, созданной на основе диффузионного волновода. На рис.1 приведена схема детектирования газообразного аммиака с помощью данного

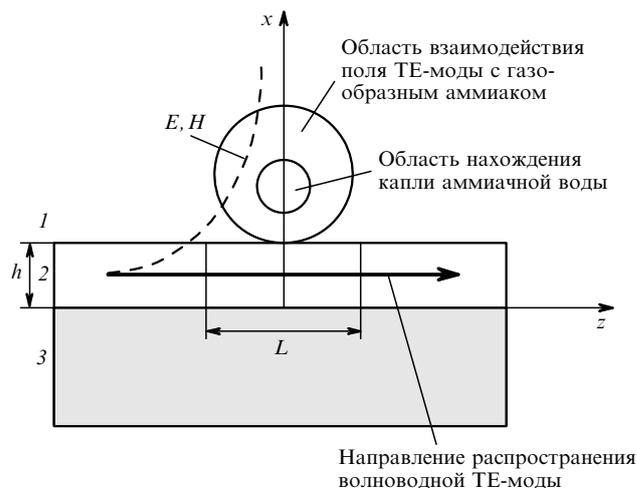


Рис.1. Схема детектирования газообразного аммиака: 1–3 – интегрально-оптический волновод (1 – слой воздуха; 2 – волноводный слой; 3 – подложка); h – толщина волноводного слоя; L – расстояние между входной и выходной призмами (длина волноводной ячейки); схематично показан экспоненциальный спад напряженностей электромагнитного поля волноводной TE-моды в воздухе.

А.А.Егоров, М.А.Егоров, Т.К.Чехлова, А.Г.Тимакин. Российский университет дружбы народов, Россия, 117923 Москва, ул. Орджоникидзе, 3; e-mail: yegorov@kapella.gpi.ru

Поступила в редакцию 3 апреля 2007 г., после доработки – 14 ноября 2007 г.

датчика. Волновод был изготовлен методом твердотельной диффузии PbO_2 в пластину из стекла К8 (14-й класс чистоты обработки поверхности). Для ввода и вывода излучения использовались призмы из стекла ТФ5 с показателем преломления $n = 1.7497$ для длины волны $\lambda = 632.8$ нм.

На рис.2 представлена общая схема экспериментальной установки. В качестве источника когерентного излучения использовался He-Ne-лазер 1 с длиной волны излучения $\lambda = 632.8$ нм, попадающей в одну из полос поглощения аммиака.

Лазерный пучок разделялся полупрозрачным зеркалом 2 на опорный и сенсорный пучки. Сенсорный пучок вводился в оптический волновод 3 через входную призму под углом, который соответствовал резонансному возбуждению TE_0 -моды. Эффективность η ввода излучения He-Ne-лазера в диффузионный волновод составляла около 40%. Введенное в волновод излучение распространялось по нему, частично проникая в верхнюю покровную среду, и в присутствии исследуемого газа на выходе выходной призмы наблюдалось уменьшение амплитуды сигнала, регистрируемого фотоприемником 6.

Сигнал опорного пучка фиксировался вторым фотоприемником 7. В качестве фотоприемников использовались фотодиоды ФД-256. Сигналы с фотоприемников поступали на электронную схему сравнения 4. После аналого-цифрового преобразования сигнал регистрировался и обрабатывался компьютером 5.

Схема сравнения 4 создана с использованием прецизионных операционных усилителей с малым напряжением смещения и высоким коэффициентом усиления на напряжения.

Для регистрации результатов экспериментов в цифровом виде использовалась компьютеризированная виртуальная лаборатория PC-LAB 2000, возможности которой могут быть расширены за счет последующей математической обработки данных экспериментов. Текстовый файл содержал следующие экспериментальные данные: шаг по времени (0.5 с), масштаб по вертикали (5 мВ), номера точек и другие данные.

Полученные данные можно обрабатывать с помощью простых компьютерных программ типа «Бейсик» или программных комплексов на основе систем компьютерной математики, таких как MathCAD, Maple, Mathema-

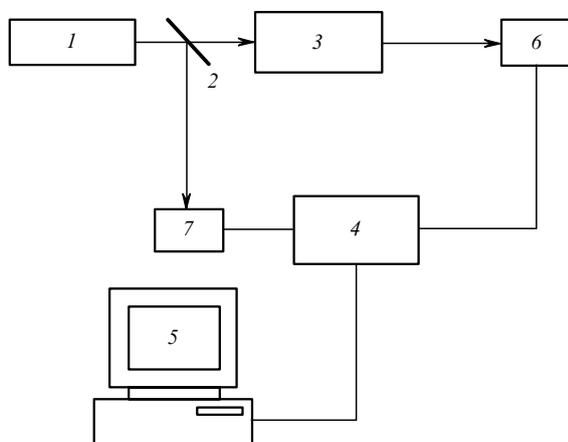


Рис.2. Схема измерительной установки:

1 – гелий-неоновый лазер; 2 – полупрозрачное зеркало; 3 – волноводная сенсорная ячейка; 4 – электронная схема сравнения; 5 – компьютер; 6, 7 – фотоприемники.

tica или MathLab. Могут эффективно использоваться и графические пакеты типа Microcal Origin. К достоинствам последней программы относятся, например, возможности спектральной оценки, сплайн-интерполяции, полиномиальной аппроксимации, дисперсионного анализа, а также расчета коэффициента корреляции и взаимной корреляционной функции. Все это открывает широкие перспективы для математической и компьютерной обработки данных экспериментов и результатов исследований.

Отношение сигнал/шум при измерениях составляло в среднем не менее 15. Время отклика компьютеризированного интегрально-оптического датчика не превышало 0.15 с (рис.3), при этом датчик достаточно быстро (примерно через 0.3 с) возвращался в исходное состояние и был снова готов к работе.

3. Результаты тестирования компьютеризированного интегрально-оптического датчика и их обсуждение

На рис.3 показаны результаты тестирования компьютеризированного интегрально-оптического датчика. В экспериментах использовались специально подготовленные и предварительно исследованные диффузионные волноводы с высокими эксплуатационными характеристиками. Диффузионный волновод имел эффективный показатель преломления $n_{\text{eff}} = 1.521$ для TE_0 -моды. Потери были измерены по известной методике, заключающейся в регистрации мощности излучения на входе и выходе волновода, и не превышали 0.1 см^{-1} . Расстояние между входной и выходной призмами $L = 4$ см. Ширина трека лазерного пучка в волноводе была равна 0.1 см.

На расстоянии 1 см от поверхности волноводного слоя, легированного PbO_2 , помещалась капельница, содержащая 10 %-ный раствор аммиачной воды (нашатырный спирт). Капли диаметром $d = 0.3$ см с интервалом 1 с пролетали область трека лазерного пучка в волноводе, где происходило взаимодействие поля волноводной TE_0 -моды с газообразным аммиаком.

Сигнал с электронной схемы сравнения поступал на устройство визуализации. Результаты эксперимента представлены на рис.3, где на экране монитора зафиксированы сигналы, соответствующие детектированию газообразного аммиака. Этот же рисунок иллюстрирует хорошую повторяемость результатов измерений при одной и той же концентрации NH_3 . Действительно, средне-

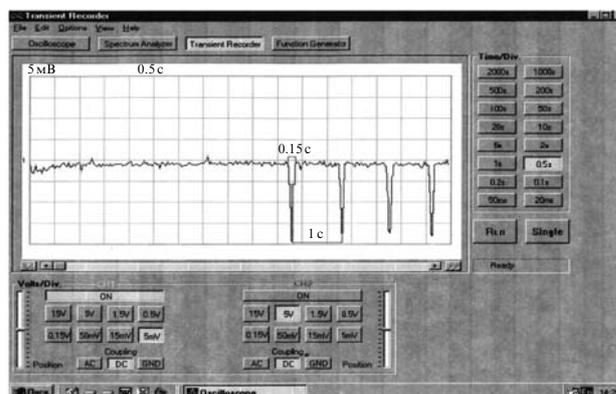


Рис.3. Результаты тестирования компьютеризированного интегрально-оптического датчика.

арифметическое отклонение напряжения в моменты детектирования газообразного аммиака от среднеарифметического значения не превышало 5 %.

Оценка показала, что концентрация газообразного аммиака в эксперименте составляла 4 ppm. Для расчетов использовался закон Бугера – Ламберта – Бэра в интегральной форме:

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

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

Экспериментально измеренный коэффициент затухания, обусловленный наличием газообразного аммиака, составил $\sim 0.04 \text{ см}^{-1}$. Зная сечение поглощения аммиака на длине волны излучения He–Ne-лазера $\lambda = 632.8 \text{ нм}$ ($\sigma \approx 3.8 \times 10^{-16} \text{ см}^2$), находим концентрацию аммиака $N \approx 1.1 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$, которая соответствует относительной объемной концентрации газообразного аммиака в воздухе $\sim 4 \times 10^{-4} \%$ (или 4 ppm).

Для нахождения распределения концентрации $N(z)$ решалась вспомогательная обратная задача с использованием модели гауссовой турбулентной диффузии (см., напр., [9]) газообразного аммиака в воздухе. Подробный анализ данной проблемы будет дан в одной из последующих наших работ. Здесь только отметим, что при известных параметрах задачи (длина сенсорной ячейки, коэффициент затухания волноводной моды, расстояние от источника газообразного аммиака до трека волноводной моды и др.) подбиралась функция с гауссовым профилем, аппроксимирующая $N(z)$. При этом также учитывалось, что диффузионное время τ релаксации концентрации газообразного аммиака в воздухе было равно примерно 0.5 с ($\tau \approx d^2/D$, где D – коэффициент диффузии аммиака), а время отклика датчика не превышало 0.15 с. Отношение сигнал/шум при измерениях составляло в среднем не менее 15. Полное время анализа, т.е. время по истечении которого датчик был снова готов к работе, не превышало 0.3 с, что выгодно отличает его от моделей, описанных, например, в [5, 7].

На рис.4 показаны некоторые результаты обработки экспериментальных данных с помощью графического пакета Microcal Origin. Техника фильтрации с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ) хорошо известна и не требует подробного описания. При БПФ осуществляется быстрый перенос данных из временной области в частотную, где и происходит подавление высокочастотной шумовой компоненты. Затем отфильтрованный сигнал с помощью обратного БПФ возвращается во временную область. Использование БПФ с эффективной фильтрацией шумов может оказаться очень полезным при измерениях на пределе чувствительности рассматриваемого интегрально-оптического датчика. Существенным свойством алгоритма БПФ является то, что число отсчетов в частотной области вдвое меньше, чем во временной. Это позволяет уменьшить время компьютерных расчетов, что особенно важно при больших объемах вычислений.

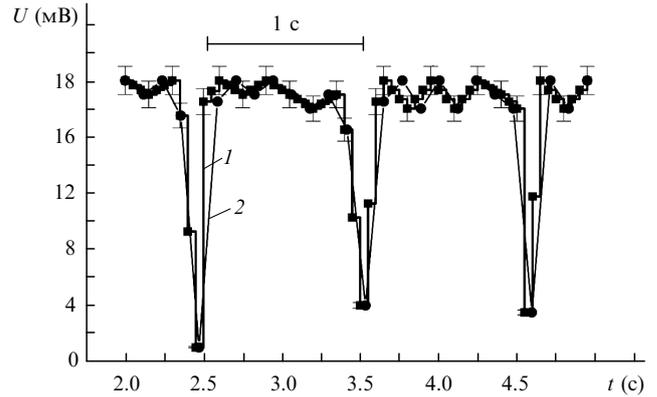


Рис.4. Результаты интерполяции выборочных экспериментальных данных (1) и сплайсирования этих данных с помощью низкочастотного фильтра, использующего БПФ (2). Погрешность измерений составляет 5 %.

Компьютерные расчеты показали, что чувствительность такого датчика примерно на порядок превышает чувствительность аналогичных датчиков без использования высокоточной электронной схемы сравнения и последующей компьютерной обработки данных измерения.

Для примера на рис.5 приведена зависимость минимального коэффициента затухания волновода $\alpha_{\min}(z)$, обусловленного наличием газообразного аммиака. Эта зависимость характеризует минимальную чувствительность рассматриваемого интегрально-оптического датчика. Регистрируемый коэффициент затухания волноводной моды при наличии аддитивного случайного шума (с мощностью P_n) рассчитывался на компьютере по известной формуле

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

где P_{\min} – мощность сигнала, при которой отношение сигнал/шум в среднем (от реализации к реализации к реализации случайного шума) составляет не менее 20. На рис.5 также показан уровень $\alpha_{\min}(z)$, соответствующий концентрации газообразного аммиака в воздухе 0.1 ppm.

Из рис.5 видно, что для достижения уровня чувствительности 0.1 ppm длина сенсорной ячейки должна быть

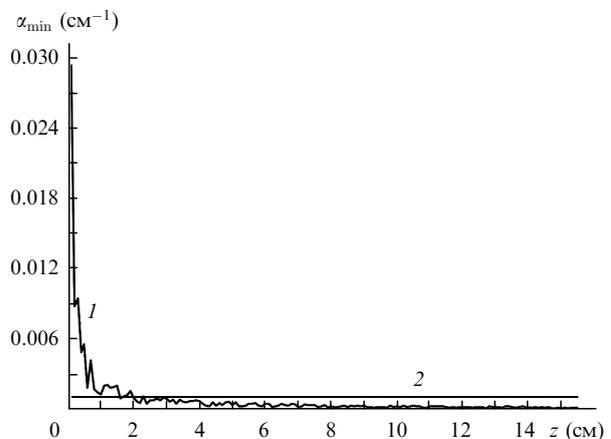


Рис.5. Зависимость минимальной чувствительности α_{\min} интегрально-оптического датчика от длины сенсорной ячейки L (полагается, что $L = z$) при отношении сигнал/шум не менее 20 (1) и уровень $\alpha_{\min}(z) = 1.03 \times 10^{-3} \text{ см}^{-1}$, соответствующий концентрации газообразного аммиака в воздухе 0.1 ppm (2).

не менее 4 см. Компьютерное моделирование показало, что дальнейшее повышение чувствительности данного датчика возможно, например, за счет повышения эффективности ввода η лазерного излучения в волновод и снижения потерь из-за рассеяния светового излучения на нерегулярностях волноводной части сенсора при фиксированном η .

Мы не анализируем здесь рассеяние света в «нерегулярном» волноводе, т.к. эта проблема достаточно подробно обсуждалась в литературе (см., напр., [4, 10–13]). Из полученных результатов следует, что такое рассеяние является одним из важнейших факторов, ограничивающих достижение предельной чувствительности, если уровень шума (внешняя засветка, попадающая в контур лазерной линии, шум фотоприемника, шумы аппаратуры) невысок или если используется специальный метод регистрации, обеспечивающий отношение сигнал/шум не менее 20.

Таким образом, результаты тестирования показывают возможность существенного повышения чувствительности интегрально-оптического датчика, являющегося составной частью компьютеризированного прибора, содержащего электронную схему сравнения на основе прецизионных операционных усилителей, по сравнению с обычным интегрально-оптическим датчиком, где регистрация аналогового сигнала осуществляется, например, стрелочным или цифровым вольтметром.

Использование диффузионного волновода в настоящем эксперименте обусловлено такими его ценными свойствами, как малые потери, отработанная технология изготовления, стабильные характеристики при заданных технологических параметрах. Несмотря на малую долю мощности волноводной моды, распространяющейся в регистрируемой газообразной среде (газ, пар)*, для рабочей модели датчика был выбран именно диффузионный волновод, поскольку на данном этапе исследований основное внимание было уделено принципиально важным в экспериментах вопросам регистрации и обработки сигналов в присутствии шумов.

Отметим, что для увеличения доли мощности волноводной моды в регистрируемой среде следует использовать пленки с большим показателем преломления или тонкий слой на поверхности волновода с оптимизированными параметрами [8].

Для дальнейшего повышения чувствительности интегрально-оптического датчика могут применяться различные способы, в частности [1–3, 8]:

- увеличение длины сенсорной ячейки (например, использование подложки в виде цилиндрического стержня, брегговских отражателей, резонаторов и др.) [1];
- оптимизация параметров волноводной системы [8];
- увеличение отношения сигнал/шум;
- интеграция на единой подложке элементов датчика, включая источник излучения, сенсорную ячейку и фотоприемник.

Для достижения высокой чувствительности и быстрого действия интегрально-оптического датчика использова-

лись диффузионные волноводы с низким затуханием, высокоустойчивая к шумам миниатюрная электронная схема сравнения на основе прецизионных операционных усилителей, хранение и обработка данных измерений в компьютере.

Отношение сигнал/шум может быть увеличено, во-первых, путем оптимизации параметров электронной схемы сравнения и, во-вторых, за счет уменьшения потерь в волноводной системе из-за рассеяния лазерного излучения, в частности путем использования подложки с малой шероховатостью поверхности.

Компьютерное моделирование показало, что минимальная концентрация газообразного аммиака, которая может быть измерена с помощью датчика рассмотренного типа, составляет примерно 0.1 ppm при отношении сигнал/шум около 20 и расстоянии от источника аммиака до волноводной поверхности 10–20 см.

4. Заключение

В настоящей работе исследован компьютеризированный диффузионный интегрально-оптический датчик аммиака. Установлено, что при использовании высокоустойчивой к шумам миниатюрной электронной схемы сравнения на основе прецизионных операционных усилителей, а также при компьютерной регистрации и обработке данных измерений датчик демонстрирует хорошие метрологические характеристики. Датчик данного типа достаточно прост в изготовлении, тестировании и настройке. Теоретическое значение пороговой концентрации аммиака, измеряемой этим датчиком, может быть менее 0.1 ppm при отношении сигнал/шум около 20.

Авторы выражают благодарность Р.Б.Смолякову за помощь в подготовке экспериментальной установки и проведении экспериментов.

1. Чехлова Т.К., Тимакин А.Г., Попов К.А. *ИТЭ*, **45**, 145 (2002).
2. Whitenett G., Stewart G., Atherton K., Culshaw B., Johnstone W. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, **5**, S140 (2003).
3. Egorov A.A., Egorov M.A., Tsareva Yu.I., Chekhlova T.K. *Laser Phys.*, **17**, 50 (2007).
4. Хансперджер Р. *Интегральная оптика: Теория и технология* (М.: Мир, 1985).
5. Wiesmann R., Muller L., Klein R., Neyer A. *Proc. 7th Europ. Conf. on Integrate Optics ECIO '95* (Delft, Netherland, 1995, Wc A4, 453).
6. Хомченко А.В., Глазунов Е.В., Примак И.У., Редько В.П., Сотский А.Б. *Письма в ЖТФ*, **25**, 11 (1999).
7. Klein R., Voges E. *Fresenius J. Anal. Chem.*, **349**, 394 (1994).
8. Николаев Н.Э., Тимакин А.Г., Чехлова Т.К. *Тез. докл. 13-й Междун. конф. «Математика. Компьютер. Образование»* (Дубна, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2006, с. 166).
9. Уорк К., Уорнер С. *Загрязнение воздуха. Источники и контроль* (М.: Мир, 1980).
10. Егоров А.А. *Квантовая электроника*, **33**, 335 (2003).
11. Егоров А.А. *Квантовая электроника*, **34**, 744 (2004).
12. Егоров А.А. *Laser Phys.*, **14**, 1072 (2004).
13. Егоров А.А. *Opt. Eng.*, **44**, 014601 (2005).
14. *Физическая энциклопедия*. Под ред. А.М.Прохорова (М.: Большая Российская энциклопедия, 1992, т. 3).

* Как известно, понятия газа и пара почти полностью эквивалентны ([14], с. 527). Однако при исследовании, например, динамики фазовых переходов, явления критической опалесценции и др., по-видимому, потребуется уточнение состояния, в котором находится газообразный аммиак.