

яном токе в диапазоне 1 мкА..20 мА с шагом 1 мкА или постоянном напряжении в диапазоне 1..300 В с шагом 0,5 В на исследуемом образце. Входящий в состав установки многоканальный АЦП позволяет осуществлять контроль напряжения и тока, а так же записывать временные зависимости тока, напряжения и заряда протекающего через образец в процессе регистрации спектра. Сопоставление полученных временных зависимостей напряжения и тока со спектрами ЭЛ позволяет определить влияние степени заполнения электронных и дырочных ловушек на спектральный состав и интенсивность полос ЭЛ, определить наиболее эффективный режим возбуждения ЭЛ, оценить величину напряжения пробоя исследуемого образца.

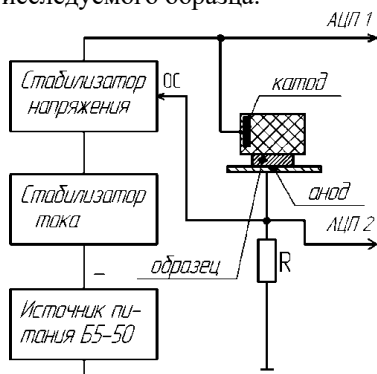


Рисунок 2 – Структурная электрическая схема установки для возбуждения электролюминесценции в системе ЭДП

Установка была апробирована на структурах  $\text{Si}/\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{SiN}_x/\text{SiO}_2$ . На рисунке 3 представлены спектры ЭЛ образцов  $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{SiN}_{0,9}/\text{SiO}_2$ , зарегистрированные при различных плотностях протекающего тока. Диэлектрические слои оксида и нитрида кремния сформированы методом химического осаждения из газовой фазы на кремниевой пластине р-типа. Общая толщина диэлектрических слоев составляет 140 нм. Спектры ЭЛ зарегистрированы при анодной поляризации кремниевой подложки.

Спектры ЭЛ характеризуется полосами с энергиями в красной (1,9 эВ), зеленой (2,3 эВ) и синей (2,7 эВ) области, причем последняя по-

лоса имеет наибольшую интенсивность. Полоса в красной области спектра ЭЛ связана с наличием в слоях  $\text{SiO}_2$  силанольных групп (Si-OH). ЭЛ в зеленой области объясняется внутрицентровыми переходами в атомах трехкоординированного кремния в слоях  $\text{SiO}_2$ . Интенсивная полоса ЭЛ с максимумом при 2,7 эВ характерна для излучательной релаксации силиленовых центров [2]. Наличие этих центров присуще слоям оксинитрида кремния, что позволило сделать заключение о формировании таких слоев на границах оксида и нитрида кремния. Установлено, что интенсивность свечения этой полосы обладает наибольшей устойчивостью к воздействию сильных электрических полей после протекания через образец заряда 1-3 Кл/см<sup>2</sup>.

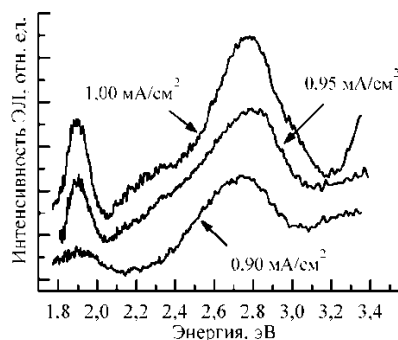


Рисунок 3 – Спектры электролюминесценции образца p-Si/SiO<sub>2</sub>/SiN<sub>0,9</sub>/SiO<sub>2</sub>

Таким образом, реализованный метод электролюминесценции позволяет изучить состав, структурные особенности, определить концентрацию центров люминесценции, исследовать деградацию диэлектрических слоев в результате воздействия сильного электрического поля.

#### Литература

1. Барабан, А. П. Электроника слоев  $\text{SiO}_2$  на кремнии / А.П. Барабан, В.В. Булавинов, П.П. Коноров. – Л. : Изд. ЛГУ, 1988. – 304 с.
2. Baraban, A.P. Electroluminescence of Si-SiO<sub>2</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> structures / A.P. Baraban [et al.] // Technical Physics Letters. – 2002. – Vol. 28, № 12. – P. 978–980.

УДК 681.7.068

### ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ КОНЦЕНТРАЦИИ КИСЛОРОДА РЕЦИРКУЛЯЦИОННОГО ТИПА

Ксенофонов М.А.<sup>1</sup>, Поляков А.В.<sup>2</sup>, Сырель А.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НИУ «Институт прикладных физических проблем им.А.Н.Севченко БГУ», Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Непрерывное развитие самостоятельного направления в индустрии – кислородной промышленности – обуславливает все возрастающие требования к точности и динамизму измерений при производстве и использовании кислорода. В

результате ведутся интенсивный поиск и исследования физических принципов построения различных сенсорных устройств, способных удовлетворить этим требованиям. Кислород является самым распространённым окислителем на

Земле. Ни одно предприятие, в основе которого задействованы биотехнологии, не может обходиться без устройств, способных измерять уровень кислорода. Это такие отраслевые организации как металлургия (цветная и чёрная), фармацевтика, электростанции (ТЭЦ, ГРЭС, АЭС), пищевое производство, службы, отвечающие за охрану окружающей среды, медицина и нефтепромышленность.

Большинство традиционных датчиков для обнаружения и измерения концентрации кислорода основаны на изменении их сопротивления и емкости, которая может быть легко нарушена с помощью электрического или магнитного поля, а тем более, они будут создавать проблемы безопасности, если они используются в легко воспламеняемых или взрывоопасных случаях. Оптоволоконные датчики газа имеют такие характеристики, как высокая точность, защиту от воздействия электрического и магнитного полей, безопасность использования. Проведенный анализ конструктивных решений волоконно-оптических датчиков концентрации кислорода показал [1–4], что в них оптическое волокно используется, как правило, только как канал передачи информации. Однако, современные тенденции развития оптоволоконных измерительных устройств свидетельствуют о том, что оптоволоконно может применяться одновременно и в качестве чувствительного элемента и как информационный тракт.

Нами предложен новый тип волоконно-оптического магнитоотрицательного датчика, принцип измерения которого основан на регистрации частоты (периода) рециркуляции одиночных оптических импульсов на различных длинах волн, распространяющихся в замкнутом оптоволоконном контуре. Данная структура хорошо согласуется с трубопроводами различного диаметра. Внутри измерительной трубки располагаются полосы из магнитоотрицательного материала, называемым металлическим стеклом. На этих полосках расположено оптическое волокно, достаточно жестко закрепленное, например, цианоакрилатом. Поверх этой конструкции навита электрическая катушка для формирования постоянного магнитного поля  $H_0$  во внутреннем объеме трубки. При изменении величины магнитного поля происходит изменение длины магнитоотрицательных полос, и, следовательно, длины волоконного световода (ВС) и как следствие, частоты рециркуляции.

В качестве чувствительного элемента использовалось стандартное телекоммуникационной многомодовое градиентное волокно 50/125 мкм фирмы Corning, имеющее толщину защитного полиимидного покрытия  $65 \pm 5$  мкм и полный наружный диаметр  $d_b = 255$  мкм. Минимально допустимый радиус изгиба ВС определяется исходя из механических свойств волокна. Если волокно изогнуто столь сильно, что поверхност-

ные напряжения превысят 0,2%, то весьма вероятно, что в процессе эксплуатации в нем могут возникнуть значительные трещины. Для того чтобы этого не произошло, должно выполняться следующее условие:  $d > 500D_{bc} - 2h_1$ , где  $D_{bc}$  – диаметр оболочки ВС (125 мкм),  $h_1$  – толщина слоя защитного покрытия ( $h_1 = 65$  мкм), т. е.  $d > 6$  см.

В основе принципа измерений лежит такое специфическое свойство газообразного кислорода, как парамагнетизм, так как именно кислород среди наиболее распространенных газов обладает парамагнитными свойствами, поскольку у него спины обобщенных электронов нескомпенсированы. Физическая сущность парамагнетизма кислорода состоит в том, что молекула кислорода в свободном состоянии обладает постоянным магнитным моментом  $P_m$ , не зависящим от внешнего магнитного поля  $H$ . Если некоторый объем  $V$ , заполненный  $O_2$ , поместить в постоянное магнитное поле  $H_0$ , произойдет его намагничивание, вследствие чего действующее поле  $H_0$  изменится на  $\Delta H$ :

$$\Delta H = K \chi_i H_0,$$

где  $K$  – безразмерный коэффициент, показывающий, во сколько раз используемый измерительный объем отличается от единичного;  $\chi_i = \chi_i(N_0, \theta)$  – парамагнитная восприимчивость единицы объема, являющаяся функцией концентрации  $N_0$  и температуры  $\theta$  кислорода в выбранном объеме. Образец магнитоотрицательного материала преобразовывает  $\Delta H$  в изменение своей длины. В результате, продольная линейная (по направлению магнитного поля) деформация магнитоотрицательного материала  $\Delta l$ , помещенного в это поле, с некоторой эффективностью  $\gamma$  преобразовывается в изменение оптического пути  $\Delta(n_0 L)$  жестко связанного с ним оптического волокна, где  $n_0$  и  $L$  – показатель преломления и длина отрезка волоконного световода, соответственно. Изменение оптического пути светового потока приводит к изменению периода рециркуляции  $\Delta T$  одиночного импульса в замкнутом оптоэлектронном контуре [5]:

$$\Delta T = \frac{2\Delta n_0 n \gamma \xi}{c},$$

где  $\Delta l$  – изменение длины ВС, подвергающегося деформирующему воздействию;  $n_0$  – показатель преломления сердцевины ВС;  $c$  – скорость света;  $n$  – число магнитоотрицательных полос в измерительной трубке;  $\xi$  – коэффициент, обусловленный эффектом фотоупругости материала ВС, который для кварцевого волокна составляет величину 0,78. Типичные значения  $\gamma$  для системы одномодовое кварцевое волокно без оболочки – тонкая прямоугольная полоска магнитоотрицательного материала, элементы которой скреплены органическим клеевым составом, попадают в диапазон значений  $0,3 \leq \gamma \leq 0,9$ .

Связь между изменением длины магнитного материала  $\Delta l$  и изменением магнитного поля  $\Delta H$ , обусловленном присутствием кислорода в измерительном объеме задается соотношением [6, 7]:

$$\Delta l/l \approx CH_0 \Delta H(N_0, \theta),$$

где

$$C = 3/2\lambda_s H_c^{-2} (1 + N\mu_m)^2 (nS_f E_f S_m^{-1} E_m^{-1})^{-1} -$$

эффективная константа магнитоупругости подсистемы, учитывающая свойства собственно ферромагнетика, его формы и механической нагруженности из-за сопряжения с волокном. Здесь  $\lambda_s$  – магнитоупругость насыщения при слабой анизотропии;  $H_c$  – коэрцитивная сила;  $\mu_m$  – максимальная магнитная проницаемость;  $n$  – число витков ВС;  $S_f = 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$  и  $E_f = 7 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$  – сечение и модуль упругости ВС, соответственно. Параметры ферромагнетика имеют следующие типичные значения:  $\lambda_s = 3 \cdot 10^{-5}$ ;  $H_c = 16 \text{ А/м}$ ;  $\mu_m = 2 \cdot 10^4$ ;  $E_m = 1,7 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$ . Насыщаемость магнитоупругости отклика для элементов из «металлического стекла» начинает заметно проявляться уже при  $H_0 \approx 10^3 \text{ А/м}$ .

Зависимость парамагнитной восприимчивости от концентрации  $N_0$  и температуры  $\theta$  кислорода имеет вид:

$$\chi_i = \frac{p_m^2}{3k\theta} \mu_0 N_0,$$

где  $p_m$  – магнитный момент молекулы;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $k$  – постоянная Больцмана.

Магнитный момент молекулы  $p_m = g\sqrt{J(J+1)}\mu_B$ , где  $J$  – квантовое число;  $\mu_B = he/4\pi m_e = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ А}\cdot\text{м}^2$  – магнетон Бора;  $g$  – множитель Ланде. Для кислорода  $g = 2, J = 1$ .

Разрешающая способность предложенного метода оценивалась из условия:

$$\frac{\Delta T}{T_0} = \chi_{\max},$$

где  $\chi_{\max}$  – максимальное значение относительной долговременной нестабильности частоты рециркуляции (для длин ВС более 100 м  $\chi_{\max} = 2 \cdot 10^{-6}$ ).

Период рециркуляции при начальных параметрах:

$$T_0 = \frac{2n_0}{c} (L_0 + nL_T + \pi r(n-1)),$$

$$L_i = L_0 - 2r, L = L_0 + n \cdot L_T + \pi r \cdot (n-1)$$

где  $L$  – общая длина волоконного световода;  $L_0$  – длина внешней части волокна;  $L_T$  – длина ВС, закрепленная на магнитоупругой полоске и подвергающаяся деформации;  $L_T$  – длина измерительной трубки;  $r$  – радиус изгиба ВС (3 см).

Число магнитоупругих полосок определяем по формуле:

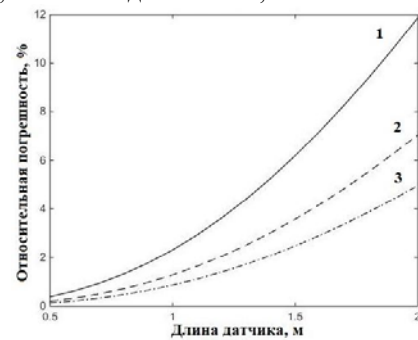
$$n = \frac{2\pi R_0}{d+h},$$

где  $d$  – расстояние между полосами ( $d = 2r$ );  $h$  – ширина полосы.

Из приведенных выше формул получаем выражение для анализа разрешающей способности датчика при комнатной температуре:

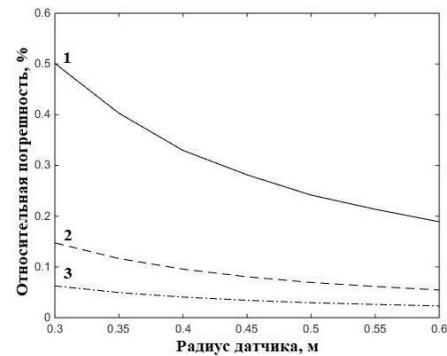
$$N_0^{\min} = \frac{\chi_{\max} 3k\theta}{nCH_0^2 K p_m^2 \mu_0 \gamma \xi L_T} \cdot \frac{L}{L_T}.$$

Были проведены расчеты относительной погрешности измерения в зависимости от параметров чувствительного элемента для воздуха (рис.1, 2). Из рисунков следует, что увеличение длины чувствительного элемента увеличивает погрешность, увеличение радиуса уменьшает погрешность. Относительная погрешность измерения концентрации кислорода в воздухе при длине датчика, равной 0,7 м и радиусе датчика 0,3–0,6 м может достигать 0,1 %.



радиус датчика: 1– $R_T=0,2$  м; 2– $R_T=0,3$  м; 3– $R_T=0,4$  м

Рисунок 1 – Зависимость относительной погрешности от длины датчика



площадь сечения магнитоупругой полоски: 1– $S_m=1,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$  (1,5 см×1 см); 2– $S_m=2,25 \cdot 10^{-4} \text{ м}$  (1,5 см×1,5 см); 3– $S_m=3 \cdot 10^{-4} \text{ м}$  (2 см×1,5 см)

Рисунок 2 – Зависимость относительной погрешности от радиуса датчика

Для достижения данной погрешности интерференционным датчиком [7], необходимо осуществлять регистрацию изменения тока порядка 20 нА, что является достаточно сложной технической задачей выделения таких малых сигналов на уровне шумов.

Предложена схема чувствительного элемента определения концентрации газообразного кисло-

рода, основанная на использовании структуры, состоящей из магнитоотрицательного материала (металлическое стекло) и волоконного световода, помещенных в однородное магнитное поле. Данный чувствительный элемент может использоваться в структуре квазираспределенных волоконно-оптических измерительных систем рециркуляционного типа. Установлено, что изменяя размеры чувствительного элемента, может быть достигнута относительная погрешность измерений концентраций менее 0,1 % для воздуха.

### Литература

1. Use of an optical oxygen sensor to measure dissolved oxygen in seawater / Hiroshi Hasumoto [et al.] // *Journal of Oceanography*. – 2006. – Vol. 62, № 2. – P. 99–103.
2. Preparation and properties of sensing membrane for fiber optic oxygen sensor / De-sheng Jiang [et al.] // *Journal of Wuhan University of Technology*. – 2002. – Vol. 17, № 2. – P. 51–53.

3. Basu, B. J. Studies on the oxygen sensitivity and microstructure of sol-gel based organic-inorganic hybrid coatings doped with platinum porphyrin dye / Bharathibai J. Basu, Jeevan Kamble // *J Sol-Gel Sci Technol*. – 2009. – Vol. 52, № 1. – P. 24–30.

4. Gewerh, P.M. Optical oxygen sensor based on phosphorescence lifetime quenching and employing a polymer immobilised metallophosphorin probe / P.M. Gewerh, T.D. Delphy // *Med.& Biol. Eng.&Comput.* – 1999. – Vol. 31. – P. 2–10.

5. Поляков, А.В. Рециркуляционные оптоволоконные измерительные системы / А.В. Поляков. – Минск : БГУ, 2014. – 208 с.

6. Ксенофонтов, М.А. Устройство измерения концентрации кислорода / М.А. Ксенофонтов, А.В. Поляков // *Фотоника*. – 2010. – № 4. – С. 44–48.

7. Липатов, Н.И. Волоконно-оптический магнитоотрицательный датчик концентрации свободного кислорода / Н.И. Липатов, В.В. Саханова // *Измерительная техника*. – 2004. – № 7. – С. 50–53.

УДК 681.785.554

## МНОГОЦЕЛЕВЫЕ СПЕКТРОМЕТРЫ С ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ ДЛЯ МГНОВЕННОЙ ГИПЕРСПЕКТРОСКОПИИ

Гулис И.М., Купреев А.Г., Демидов И.Д.

*Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь*

Особый интерес для спектроскопии с пространственным разрешением представляют решения, пригодные для регистрации нестационарных процессов, в том числе, обеспечивающие получение полного куба данных  $I(x, y, \lambda)$  в одном акте измерения (snapshot hyperspectroscopy [1], или мгновенная гиперспектроскопия – МГС). Перспективный вариант прибора для МГС формирует проекцию куба данных в виде совокупности локальных спектров от отдельных фрагментов объекта, осуществляя пространственную фильтрацию маской регулярно расположенных микрощелей. Благодаря использованию дифракционной решетки в качестве диспергирующего элемента (вместо обычных для подобных решений призм) он обладает высокой и практически неизменной в рабочем спектральном диапазоне дисперсией [2]. Данный подход предусматривает размещение пропускающей дифракционной решетки вблизи от многощелевой маски в расходящихся пучках от микрощелей. Можно показать, что линейная дисперсия такого спектрометра:

$$\frac{dl}{d\lambda} = h \frac{m}{t \cos \beta} \Gamma,$$

где  $h$  – расстояние от маски до решетки,  $\Gamma$  – увеличение системы,  $m$  и  $\beta$  – порядок и угол дифракции,  $t$  – период решетки. Отсюда следует, что дисперсию системы можно варьировать

перемещением решетки вдоль оптической оси (изменением  $h$ ).

Формирование изображения на детекторе после дифракционной решетки осуществляется телецентрической системой из двух изображающих объективов с небольшим рабочим отрезком, настроенных на бесконечность и расположенных так, что их передние фокусы совпадают. Диафрагма, размещенная в точке совпадения фокусов, пропускает лишь пучки нужного порядка, что в совокупности с полосовыми светофильтрами на входе системы решает типичную для систем с дифракционной решеткой проблему отсекаания всех порядков дифракции кроме рабочего: светофильтры отсекают порядки  $|m| > 1$ , а диафрагма исключает 0-й порядок и ненужный 1-й либо -1-й.

Предложенный подход реализован в двух разработанных схемных решениях спектрометров. В первом [2] телецентрическая система построена на основе двух короткофокусных изображающих объективов, настроенных на бесконечность (для моделирования использованы объективы Nikon Nikkor AF 50mm 1.4D). Для оценки изображающих характеристик системы проведено численное моделирование в программе ZEMAX® (рабочий спектральный диапазон 405–700 нм, пропускающая дифракционная решетка 300 штрих./мм, толщина подложки маски и дифракционной решетки 2 мм, материал – стекло BK7). Результаты