

МОНИТОРИНГ ТЕМПЕРАТУРЫ И КОНЦЕНТРАЦИИ ВЕНТИЛЯЦИОННОГО ГАЗА АККУМУЛЯТОРОВ

В.Ю. Казаров

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

Аннотация. Представлен волоконно-оптический датчик для мониторинга температуры и концентрации вентиляционного газа литий-ионных аккумуляторов. Датчик комбинирует адресную волоконную брэгговскую структуру (АВБС) с резонатором Фабри-Перо (РФП) в виде полимерной пленки, нанесенной на торец волокна. Описаны принцип работы и математическая модель датчика, позволяющего одновременно измерять два параметра за счёт анализа изменений спектральных характеристик АВБС и РФП. Результаты моделирования демонстрируют высокий спектральный контраст отражённого излучения и возможность разделения температурного и газочувствительного откликов.

Ключевые слова: волоконно-оптические датчики; адресные волоконно-брэгговские структуры; волоконная брэгговская решетка; интерферометр Фабри-Перо; мониторинг температуры и концентрации газа; литий-ионные аккумуляторы.

Введение

Контроль состояния литий-ионных аккумуляторов является критически важной задачей для обеспечения их безопасной эксплуатации. Особое значение имеет мониторинг температуры и состава вентиляционного газа, который может свидетельствовать о начале деградационных процессов или термическом разгоне. Существующие электрохимические и электронные датчики обладают ограничениями, связанными с электромагнитной совместимостью и взрывобезопасностью. Волоконно-оптические сенсоры предлагают альтернативное решение, обеспечивая устойчивость к помехам и возможность встраивания в герметичные системы.

Материалы и методы

Датчик температуры и концентрации вентиляционного газа состоит из адресной волоконной брэгговской структуры (АВБС), комбинированной с резонатором Фабри-Перо (РФП) в виде полимерной пленки, созданной на торце АВБС. РФП формируется двумя отражающими поверхностями: переходом между волокном и полимерной пленкой (поверхность 1) и границей раздела между полимерной пленкой и газовой средой (поверхность 2). Падающий широкополосный свет отражается от АВБС на двух длинах волн её адресных компонент, а затем проходит в РФП, где происходит интерференция лучей, отражённых от двух поверхностей.

Интенсивность выходного излучения датчика может быть приближённо выражена как:

$$I_{out} = I_{in}[\rho_{BSP1} + \rho_{BSP2} + (1 - \rho_{BSP1} - \rho_{BSP2})^2 \rho_{RFP}], \quad (1)$$

где ρ_{BSP1} , ρ_{BSP2} и ρ_{RFP} – спектральные коэффициенты отражения первой и второй ВБР компонент АВБС и РФП соответственно.

Данные коэффициенты соответственно определяются как:

$$\rho_{B\bar{B}Pi} = R_i \exp[-(\lambda - \lambda_{B\bar{B}Pi})^2 / \omega^2], \quad (2)$$

$$\rho_{P\bar{P}Pi} = 2R_{SMF}[1 + \cos(4\pi L/\lambda + \pi)], \quad (3)$$

где R_i – пиковая отражательная способность первой и второй ВБР ($i = 1, 2$, $R_i = 0,6-0,8$), $\lambda_{B\bar{B}Pi}$ и ω – их центральная длина волны и ширина полосы пропускания, равная для обеих ВБР, R_{SMF} – отражательная способность конца одномодового волокна, на котором собран датчик, L – длина РФП:

$$L = \lambda_{P\bar{P}Pi1}\lambda_{P\bar{P}Pi2}/2(\lambda_{P\bar{P}Pi2} - \lambda_{P\bar{P}Pi1}), \quad (4)$$

где $\lambda_{P\bar{P}Pi1}$, $\lambda_{P\bar{P}Pi2}$ – длины волн соседних узлов или пучностей огибающей отражения РФП. Итак, можно сделать вывод, что окончательный спектр датчика представляет собой наложение спектров отражения АВБС и РФП. Реакция датчика на изменение концентрации газа может быть связана с упруго-оптическим эффектом, что приведет к изменению толщины полимерной пленки РФП. Температурный отклик датчика можно отнести к термическому эффекту расширения и термооптическому эффекту используемого полимера, что также приведет к изменению длины РФП, но и центральной длины первой и второй ВБР АВБС.

Сдвиг центральной длины волны компонент АВБС может быть задан как $\Delta\lambda_{B\bar{B}Pi} = 2\delta n_{\text{eff}}\Lambda_i$, где Λ_i – период первой и второй ВБР, δn_{eff} – изменение эффективного показателя преломления сердцевины волокна SMF. Одновременное измерение концентрации газа, как изменения толщины полимерной пленки, и температуры может быть реализовано путем измерения изменения длины волны огибающей, вызванной интерференцией отраженных от РФП волн и сдвига центральных длин волн первой и второй ВБР. Когда изменения длины волны огибающей РФП $\Delta\lambda_{P\bar{P}Pi}$ и сдвига центральных длин волн первой и второй ВБР $\Delta\lambda_{ABBC}$ ($\Delta\lambda_{ABBC} = \Delta\lambda_{B\bar{B}Pi1} = \Delta\lambda_{B\bar{B}Pi2}$, что следует из теории АВБС [1]) определены, можно построить матрицу чувствительности датчика в целом как:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{P\bar{P}Pi} \\ \Delta\lambda_{ABBC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{P\bar{P}Pi,C} & K_{P\bar{P}Pi,T} \\ K_{ABBC,C} & K_{ABBC,T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta C \\ \Delta T \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $K_{P\bar{P}Pi,C}$ и $K_{P\bar{P}Pi,T}$ – чувствительность РФП по концентрации газа и температуре соответственно, $K_{ABBC,C}$ и $K_{ABBC,T}$ – соответствующие чувствительность АВБС по концентрации газа и температуре. Используя обращение матрицы, относительные значения концентрации газа и температуры можно получить с помощью следующих матриц:

$$\begin{bmatrix} \Delta C \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{M} \begin{bmatrix} K_{ABBC,T} & -K_{P\bar{P}Pi,T} \\ -K_{ABBC,C} & K_{P\bar{P}Pi,C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{P\bar{P}Pi} \\ \Delta\lambda_{ABBC} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где $M = K_{ABBC,T}K_{P\bar{P}Pi,C} - K_{ABBC,C}K_{P\bar{P}Pi,T}$ является определителем матрицы.

Результаты исследования

Проведено моделирование спектрального отклика комбинированного волоконно-оптического датчика с разрешением 1 пм в диапазоне 1520–1580 нм. При комнатной температуре и стандартном давлении 1 атм отраженный спектр демонстрирует высокие спектральные контрасты: около 18 дБ для РФП и 9 дБ для АВБС (Рисунок 1).

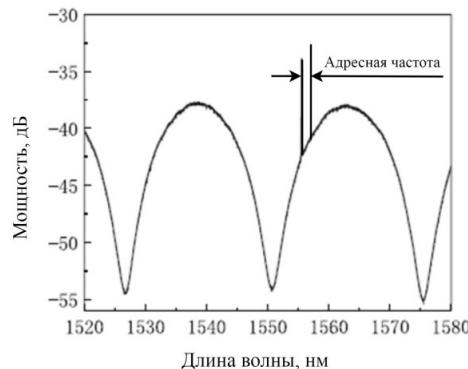


Рис. 1. Спектр отраженного излучения КВОД (лабораторные условия)

Полученные результаты подтверждают возможность одновременного детектирования изменений температуры и концентрации газа по анализу спектральных характеристик. Коэффициенты матрицы чувствительности определены путём калибровки при индивидуальном воздействии каждого из факторов.

Заключение

Разработан и смоделирован комбинированный волоконно-оптический датчик для мониторинга температуры и концентрации вентиляционного газа литий-ионных аккумуляторов. Датчик на основе адресной ВБС и резонатора Фабри-Перо позволяет осуществлять одновременные измерения двух параметров с высокой селективностью. Предложенная математическая модель и результаты моделирования подтверждают работоспособность подхода, что открывает перспективы для создания интегрированных систем диагностики состояния аккумуляторных батарей.

Благодарность

Автор выражает благодарность за научное руководство профессору кафедры РФМТ КНИТУ им. А.Н. Туполева-КАИ Морозову Олегу Геннадьевичу.

Список литературы

1. Морозов, О.Г. Адресные волоконные брэгговские структуры в квазиразпределённых радиофотонных сенсорных системах / О.Г. Морозов, А.Ж. Сахабутдинов // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43. – № 4. – С. 535-543.

MONITORING OF TEMPERATURE AND CONCENTRATION OF VENTI-LATION GAS OF THE BATTERY

V.Yu. Kazarov

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI
10, K. Marx St., Kazan, 420111, Russian Federation

Abstract. A fiber-optic sensor for monitoring the temperature and concentration of ventilation gas in lithium-ion batteries is presented. The sensor combines an addressable fiber Bragg structure (AFBS) with a Fabry-Perot resonator (FPR) in the form of a polymer film applied to the fiber end. The working principle and mathematical model of the sensor are described, enabling simultaneous measurement of two parameters through analysis of changes in the spectral characteristics of AFBS and FPR. Simulation results demonstrate high spectral contrast of the reflected radiation and the possibility of separating temperature and gas concentration responses.

Keywords: fiber-optic sensors; addressable fiber-Bragg structures; fiber Bragg grating; Fabry-Perot interferometer; monitoring of temperature and gas concentration; lithium-ion batteries.

Статья представлена в редакцию 22 декабря 2025 г.