

УДК 543.612/621/684

© А. Н. Шевченко, А. Г. Кузьмин, Ю. А. Титов

МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЕ ИЗМЕРЕНИЕ СОСТАВА ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ В ЯЧЕЙКАХ КВАНТОВОГО ДАТЧИКА ВРАЩЕНИЯ

В работе описана процедура масс-спектрометрического анализа состава газовых смесей в ячейках квантового датчика вращения. Датчики вращения используются в инерциальных навигационных системах, поэтому к их параметрам предъявляются повышенные требования. Количественный состав газовой смеси в ячейках, особенно изотопное обогащение, оказывает критическое влияние на их характеристики. Предложенная методика масс-спектрометрического анализа позволяет производить оперативную отбраковку произведенных партий ячеек.

Кл. сл.: масс-спектрометрия, определение состава смеси газов, квантовый датчик вращения

ВВЕДЕНИЕ

При производстве приборов квантовой электроники, основанных на эффекте магнитного резонанса в газовых средах, необходимо с высокой степенью точности гарантировать заданные парциальные давления компонент рабочей газовой смеси в активной ячейке и отсутствие в ней примесей. Примерами таких приборов могут быть квантовый датчик вращения [1–3] и трехкомпонентный квантовый магнитометр [4], основанные на эффекте ядерного магнитного резонанса (ЯМР) в благородном газе. Также отсутствие примесей в газовой смеси важно для квантовых стандартов частоты [5, 6] и квантовых магнитометров с оптической накачкой [7, 8], основанных на эффекте электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) в парах щелочного металла. Чувствительным элементом всех перечисленных приборов является газонаполненная ячейка, содержащая пары щелочного металла, которые подвергаются оптической накачке для наблюдения ЭПР, и азот, необходимый для гашения нежелательной люминесценции [9, 10]. Отличительной особенностью квантового датчика вращения и трехкомпонентного магнитометра является наличие в рабочей ячейке благородного газа, например смеси определенных изотопов ксенона, в которых наблюдается ЯМР. В последнем случае тоже добавляются пары щелочного металла (рубидия или цезия), которые служат для оптической накачки изотопов благородного газа через спин-обменное взаимодействие, катализатором которого является азот [11, 12].

Существующие в настоящее время лабораторные технологии изготовления газонаполненных ячеек [13, 14] включают ряд достаточно сложных операций, на каждой из которых может произойти нарушение требуемого полного давления газовой смеси, парциальных давлений ее компонент или попадание примесей. Отклонение давлений компонент рабочей газовой смеси от заданных значений приводит к ухудшению отношения сигнал/шум квантового датчика, а примеси могут вступать в реакцию с парами щелочного металла, что приведет к нестабильности показаний прибора и уменьшению его чувствительности [15].

Для определения состава смеси в газонаполненных ячейках могут быть использованы методы газовой масс-спектрометрии, предполагающие деструкцию ячейки с последующим вводом выделившегося газа в масс-спектрометр. Так как ячейки производятся партиями, то для контроля всей партии достаточно проанализировать состав газовой смеси в одной ячейке из партии.

Настоящая работа посвящена решению задачи измерения состава газовой смеси в ячейках квантового датчика вращения методами газовой масс-спектрометрии, а также контроля общего давления газа в ячейке.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для анализа состава газовой смеси в ячейках была разработана и изготовлена специальная герметичная камера из нержавеющей стали, в которой можно было обеспечить достаточно высокий

вакуум. Кроме того, камера была оснащена механическим манипулятором для разрушения ячеек с последующим выделением их содержимого в объем камеры. Рабочее давление газа в ячейках обычно составляет величину в диапазоне 5–80 торр, поэтому для корректных измерений состава смеси камера откачивалась форвакуумным насосом до давления порядка 10^{-2} – 10^{-3} торр.

Поскольку внутренняя емкость камеры имела специфическую форму и содержала элементы, объем которых было трудно оценить с достаточной точностью, исходя из геометрических размеров, то для определения ее действительного объема была реализована специальная процедура измерения. Была собрана вакуумная установка (рис. 1, а).

Процедура измерения объема производилась следующим образом. При закрытом вентиле 9 и открытом вентиле 3 производилась откачка камеры 6 форвакуумным насосом 1. Затем вентиль 3 закрывался, и с помощью датчика давления 4 производилось измерение давления P_0 в системе.

После этого вентиль 9 открывался и калиброванный объем воздуха из шприца 10 поступал во внутреннюю емкость камеры. Объем калиброванного шприца 10 с воздухом при атмосферном давлении (760 торр) составлял 0.1 мл. При этом фиксировалось установившееся давление P_1 . Объем камеры рассчитывался по формуле: V (мл) = $760 / (P_1 - P_0) - 0.1$ и в наших измерениях составил 86 ± 1 мл. Таким образом, при деструкции реальной ячейки диаметром 20 мм (объем 4 мл) с давлением смеси порядка 10 торр в камере установится давление в диапазоне 0.2–0.3 торр.

Для оценки герметичности вакуумной камеры она была откачана до давления 10^{-3} торр, а затем вентиль 3 был перекрыт, при этом камера была отсечена от системы откачки. Была снята зависимость давления в камере от времени за промежуток 5 мин. В результате была произведена оценка скорости натекания в камеру, которая составила 10^{-5} торр·л/с. При такой скорости натекания за время регистрации масс-спектра (порядка 10 с)

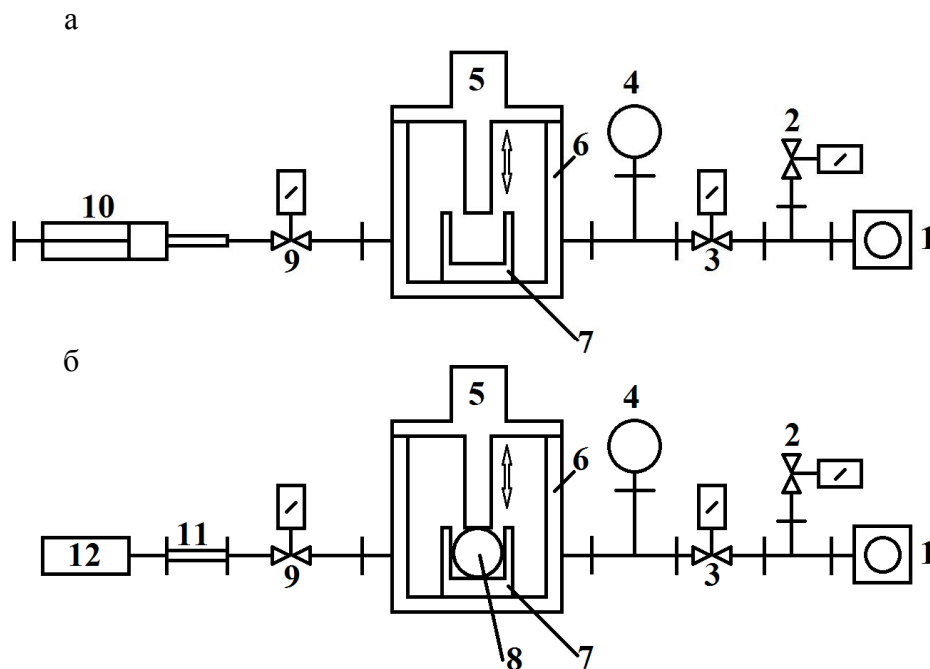


Рис. 1. Вакуумная схема установки для измерения объема емкости камеры (а) и для масс-спектрометрических измерений газового состава в камере (б). 1 — насос E2M 1.5 (Edwards); 2 — вентиль A321-1E2 (CAMOZZI) для напуска атмосферы; 3 — вентиль A321-1E2 (CAMOZZI) для отсечки форнасоса; 4 — датчик давления APGX-L (Edwards); 5 — сильфонный пресс; 6 — камера деструкции; 7 — стакан для фиксации ячейки; 8 — ячейка; 9 — вентиль A321-1E2 (CAMOZZI) для отсечки системы ввода; 10 — калиброванный шприц; 11 — транспортный капилляр; 12 — масс-спектрометр

изменение давления в камере не превысит 10^{-3} торр. Это на 2 порядка меньше давления в камере после разрушения ячейки, поэтому натеканием за время регистрации спектра можно пренебречь.

Для определения состава газовой смеси, оценки общего и парциальных давлений компонентов смеси в ячейке была собрана вакуумная установка (рис. 1, б), отличающаяся тем, что вместо калиброванного шприца подключен квадрупольный масс-спектрометр с ионизацией электронным ударом МС7-200 (Россия) [16] с прямым капиллярным вводом газообразных проб. Масс-спектрометр МС7-200 разработан в ИАП РАН и в настоящее время находит широкое применение при анализе газовыделения в геологических [17], биологических [18–23] и технологических [24–26] процессах. Модель МС7-200 имеет диапазон масс 2–200 а.е.м., разрешающую способность, равную 1 а.е.м., и скорость регистрации полного масс-спектра порядка 2 с. При этом чувствительность прибора достигает 0.1–1 ppm. Откачка камеры масс-спектрометра производится высоковакуумным турбомолекулярным насосом и форвакуумным мембранным насосом. Давление в ионизационной камере масс-спектрометра составляет 10^{-5} торр.

Измерения производились следующим образом. При закрытом вентиле 9 и открытом вентиле 3, производилась откачка камеры 6. Затем закрывался вентиль 3 и с помощью датчика давления 4 производилось измерение давления P_0 в системе.

После этого производилась деструкция ячейки и датчиком 4 фиксировалось давление P_2 в камере. Для оценки общего давления в ячейке P_3 использовалась формула $P_3 = (P_2 - P_0) \cdot V/V_1$, где V — объем камеры, а V_1 — объем ячейки.

Для проведения масс-спектрометрического анализа состава газовой смеси в камере после деструкции ячейки открывался вентиль 9 (при закрытом вентиле 3). Газовая смесь по капилляру 11 поступала в масс-спектрометр 12, после чего производилась регистрация масс-спектров. По интенсивности спектральных линий компонентов смеси рассчитывались их относительные концентрации.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Поскольку давление в камере деструкции после разгерметизации ячеек может достигать $10 \div 20$ торр, то в качестве транспортного капилляра был установлен фторопластовый капилляр длиной 500 мм и внутренним диаметром 0.5 мм. Такой капилляр обеспечивал необходимый перепад давления между камерой деструкции и ионизационной камерой масс-спектрометра. Так как основными компонентами смеси в ячейках являются азот и ксенон, то масс-спектры снимались в диапазоне 1–140 а.е.м.

В качестве исследуемых образцов были взяты ячейки с диаметром 20 мм, наполненные азотно-ксеноновой газовой смесью и имеющие неудовлетворительные сигналы ЯМР и ЭПР. Ячейки имели технологическую маркировку 352, 353 и 401.

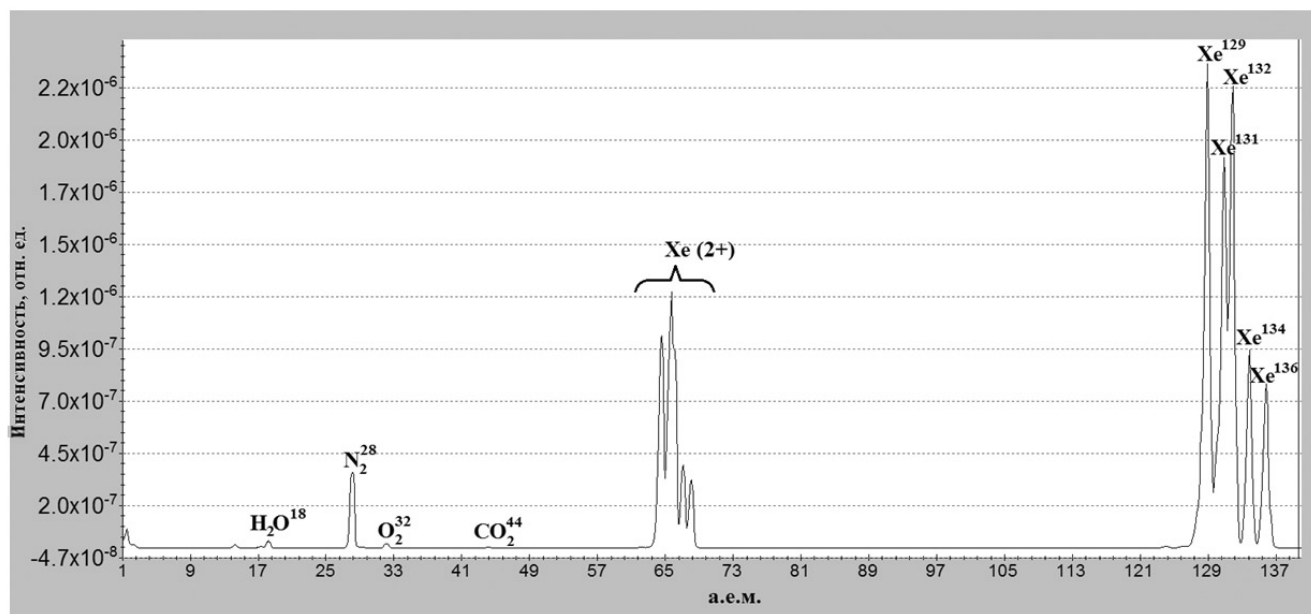


Рис. 2. Масс-спектр газов в ячейке 353

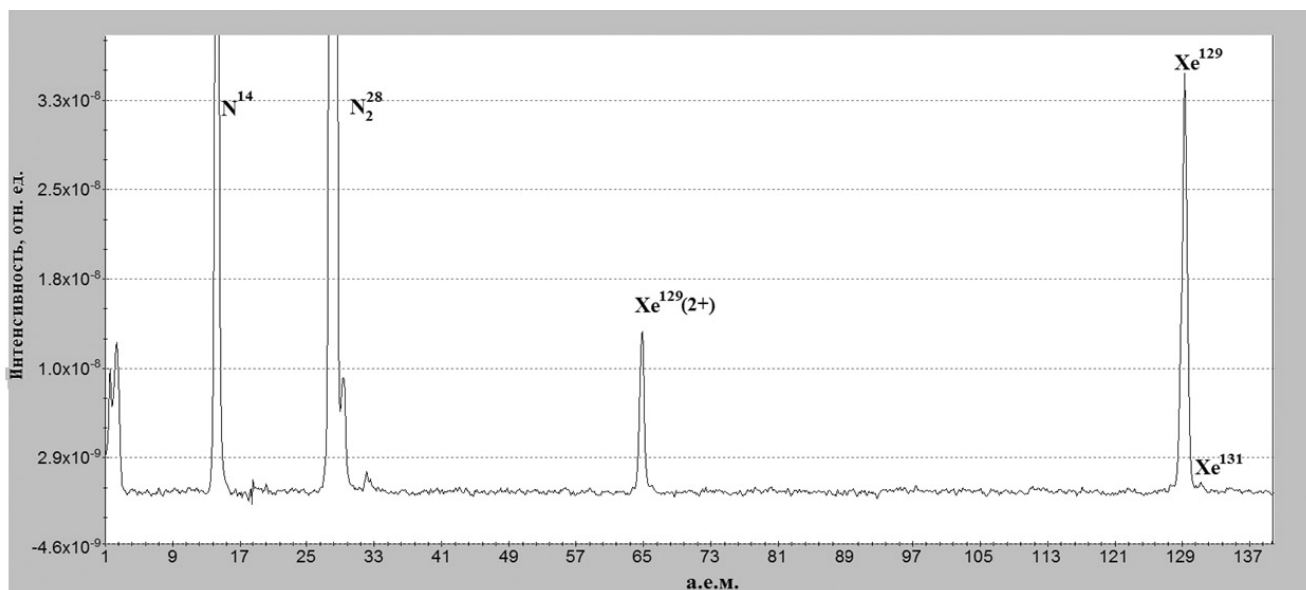


Рис. 3. Масс-спектр газов в ячейке 401

В ячейки 352 и 353 при изготовлении был напущен природный ксенон, а при наполнении ячейки 401 производился последовательный напуск ксенона, обогащенного изотопами Xe^{129} и Xe^{131} . Для калибровки масс-спектрометра была использована специальная калибровочная ячейка (КЯ) с диаметром 15 мм и с калиброванным составом двух газов — азот 66.7 % и природный ксенон 33.3 %. Исходя из соотношения интенсивности линий азота и ксенона в масс-спектре калиброванной ячейки, производились расчеты парциальных давлений газов в исследуемых ячейках. При этом из масс-спектров газа после деструкции ячеек вычитались масс-спектры остаточного газа в камере до деструкции.

Концентрация ксенона рассчитывалась, исходя из амплитуды сигнала изотопа 129 и данных о природном изотопическом составе ксенона, поскольку в масс-спектрах соотношения интенсивностей линий изотопов ксенона соответствовали природным. Образцы масс-спектров газов в исследуемых ячейках представлены на рис. 2, 3.

Обработанные данные сведены в таблицу, содержащую заданные при изготовлении и измеренные в наших экспериментах парциальные давления газов в ячейках. Как видно из таблицы, заявленные изготовителем и измеренные общие и парциальные давления компонентов азотно-ксеноновых смесей могут достаточно сильно различаться. Особенно критичным является наличие в некоторых ячейках паров воды, кислорода и других примесей, которые могут вступать в реакцию со щелочным металлом. В ячейке 401 выявлено не-

удовлетворительно малое общее содержание ксенона и недостаточное изотопное обогащение смеси изотопом ксенона Xe^{131} .

Полученные данные свидетельствуют о высокой информативности метода для контроля критически важных параметров смесей в ячейках. Существенное различие в заявленном и измеренном полном давлении газовой смеси может быть объяснено вытеканием газа при разогреве ячейки в процессе отпайки от вакуумного поста. Исследование ячеек с естественным ксеноном показало, что соотношение интенсивностей линий изотопов ксенона соответствует соотношению мольных долей изотопов в естественной смеси, следовательно, парциальный состав изотопов ксенона в естественной смеси не нарушается ни при наполнении ячеек, ни при их отпайке и достоверно детектируется масс-спектрометром после деструкции ячейки. В то же время выявлена возможность нарушения заданных парциальных давлений при смешивании различных газов, что особенно критично при смешивании ксенона, обогащенного изотопами Xe^{129} и Xe^{131} .

ВЫВОДЫ

Разработанный масс-спектрометрический метод контроля качественного и количественного состава рабочей газовой смеси на примере анализа газонаполненных ячеек для квантового датчика вращения показал себя как достаточно точный, быстрый и удобный метод. Предложенный метод в первую очередь необходим на стадии отработки

Заданные при изготовлении (Заявл.) и измеренные (Измер.) на масс-спектрометре парциальные давления газов в ячейках

Характеристика	Заявл.	Измер.	Заявл.	Измер.	Заявл.	Измер.	Заявл.	Измер.
Ячейка №	352		353		401		КЯ	
Объем, мл	4.19		4.19		4.19		1.77	
$P_{\text{сум}}$, торр	45.00	10.25	85.00	12.37	35.00	31.80	60.00	39.50
Содержание N_2 , об. %	11.11	12.88	5.88	9.86	25.71	98.71	66.67	66.67
Содержание He , об. %	88.89	82.24	94.12	88.57	74.29	1.29	33.33	33.33
Содержание He^{129} , об. %	23.50	21.74	24.89	23.42	14.29	1.26	8.81	8.81
Содержание He^{131} , об. %	18.83	17.42	19.93	18.76	60.00	0.03	7.06	7.06
Содержание H_2O , об. %	—	3.61	—	0.97	—	0.00	—	0.00
Содержание O_2 , об. %	—	1.17	—	0.50	—	0.00	—	0.00
Содержание CO_2 , об. %	—	0.00	—	0.10	—	0.00	—	0.00
Содержание др. примесей, об. %	—	0.10	—	0.00	—	0.00	—	0.03

лабораторной технологии изготовления газонаполненных ячеек. Впоследствии он может стать наиболее быстрым методом отбраковки неудачных партий ячеек, позволяющим сделать вывод о качестве произведенных газонаполненных ячеек до их установки в систему магнитных экранов и настройки оптической схемы квантового датчика вращения или магнитометра.

Работа выполнена в ИАП РАН в рамках государственного задания № АААА-А16-116041310010-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Walker T.G., Larsen M.S. Spin-exchange-pumped NMR gyros // *Advances in atomic, molecular, and optical physics*. 2016. Vol. 65. P. 373–401.
2. Литманович Ю.А., Вершовский А.К., Пешехонов В.Г. Гироскоп на основе явления ядерного магнитного резонанса: прошлое, настоящее, будущее // *Материалы пленарного заседания 7-й российской мультikonференции по проблемам управления*, 07–09 октября 2014. С. 35–42.
3. Вершовский А.К., Шевченко А.Н. Ядерный магнитный гироскоп: принцип действия, история, перспективы // *Материалы XVII конференции молодых ученых "Навигация и управление движением"*, Санкт-Петербург, 17–20 марта 2015 г. С. 19–28.
4. Bulatowicz M., Larsen M. Compact atomic magnetometer for global navigation (NAV-CAM) // *Proc. IEEE PLANS*, Apr. 2012. P. 1088–1093.
5. Патент РФ на изобретение № 2408978, 10.01.2011.
6. Патент РФ на полезную модель № 133354, 10.10.2013.
7. Вершовский А.К., Пазгалёв А.С. Квантовые Мх-магнитометры с оптической накачкой: цифровые способы измерения частоты Мх-резонанса в быстро меняющемся поле // *Журнал технической физики*. 2006. Т. 76, вып. 7. С. 108–112.
8. Groeger S., Bison G., Schenker J.L., Wynands R., Weis A. A high-sensitivity laser-pumped Mx-magnetometer // *Eur. Phys. J. D*. 2006. Vol. 38. P. 239–247.
9. Happer W. Optical pumping // *Reviews of modern physics*. 1972. Vol. 44, no. 2. P. 170–249.
10. Benumof R. Optical pumping. Theory and experiments // *American Journal of Physics*. 1965. Vol. 33. P. 151–160.
11. Walker T.G., Happer W. Spin-exchange optical pumping of noble-gas nuclei // *Reviews of modern physics*. 1997. Vol. 69, no. 2. P. 629–642.
12. Walker T.G. Fundamentals of spin-exchange optical pumping // *Journal of Physics: Conference Series*. 2011. Vol. 294, no. 1.
13. Патент США N 7292031, 6.11.2007.
14. Патент РФ на изобретение № 25584358, 27.06.2015.
15. Попов Е.Н., Баранцев К.А., Литвинов А.Н., Курапов А.С., Воскобойников С.П., Устинов С.М., Ларионов Н.В., Лиокумович Л.Б., Ушаков Н.А., Шевченко А.Н. Частотная линия ядерного магнитного резонанса в квантовом датчике вращения: Негативное

- влияние схемы детектирования // Гироскопия и навигация. 2016. Т. 84, № 1. С. 3–13.
16. Патент РФ на полезн. мод. № 94763, 27.05.2010.
 17. Кузьмин Ю.Д., Кузьмин А.Г. Масс-спектрометрический анализ состава газов на термальных площадках Камчатки в полевых условиях // Труды III научно-технической конференции "Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России", г. Петропавловск-Камчатский, 9–15 октября 2011 г. Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 1–5.
 18. Манойлов В.В., Кузьмин А.Г., Титов Ю.А. Метод обработки сигналов масс-спектров выдыхаемых газов на основе спектрального разложения в адаптивном базисе // Масс-спектрометрия. 2015. Т. 12, № 3. С. 194–200.
 19. Елизаров А.Ю., Кузьмин А.Г., Полежаев А.В., Титов Ю.А., Чербылло В.Ю. Измерение коэффициента легочного газообмена во время анестезии // Биомедицинская радиоэлектроника. Москва, 2015. № 8. С. 10–15.
 20. Манойлов В.В., Титов Ю.А., Кузьмин А.Г., Заруцкий И.В. Методы обработки и классификации масс-спектров выдыхаемых газов с использованием дискриминантного анализа // Научное приборостроение. 2016. Т. 26, № 3. С. 50–56.
URL: <http://213.170.69.26/mag/2016/abst3.php#abst7>.
 21. Кузьмин А.Г., Ткаченко Е.И., Орешко Л.С., Титов Ю.А., Балабанов А.С. Метод масс-спектрометрической экспресс-диагностики по составу выдыхаемого воздуха // Медицинский академический журнал. 2016. Т. 16, № 4. С. 106–107.
 22. Kuzmin A.G., Tkachenko E.I., Oreshko L.S., Titov Yu.A., Balabanov A.S. The method of medical instant diagnostics based on real-time mass-spectrometric analysis of exhaled air composition // 3rd ICMM PAN-ASIA PACIFIC CONGRESS ON MILITARY MEDICINE, 08.08.2016–12.08.2016, St.-Petersburg. Abstracts. P. 181–182.
 23. Манойлов В.В., Титов Ю.А., Кузьмин А.Г., Заруцкий И.В. Алгоритмы дискриминантного анализа для классификации масс-спектров выдыхаемых газов // Научное приборостроение. 2017. Т. 27, № 3. С. 33–42.
URL: <http://213.170.69.26/mag/2017/abst3.php#abst5>.
 24. Tveryanovich Ju.S., Kuzmin A.G., Menchikov L.G., Kochemirovsky V.A., Safonov S.V., Tumkin I.I., Povolotsky A.V., Manshina A.A. Composition of the gas phase formed upon laser-induced copper deposition from solutions // Mendeleev Commun. 2011. Vol. 21. P. 1–3.
 25. Кочемировский В.А., Менчиков Л.Г., Кузьмин А.Г., Сафонов С.В., Тумкин И.И., Тверьянович Ю.С. Побочные реакции при лазерно-индуцированном осаждении меди из водных растворов комплексов Cu^{II} // Известия Академии наук. Серия химическая. 2012. № 5. С. 1035–1041.
 26. Gordeyevchuk D.I., Kochemirovsky V.A., Sorokoumov V., Tumkin I.I., Kuzmin A.G., Balova I.A. Copper particles generated during in situ laser-induced synthesis exhibit catalytic activity towards formation of gas phase // Journal of Laser Micro/Nanoengineering. 2017. Vol. 12, no. 2. P. 57–61.

**АО "Концерн "ЦНИИ "Электронприбор",
Санкт-Петербург (Шевченко А.Н.)**

**Институт аналитического приборостроения РАН,
Санкт-Петербург (Кузьмин А.Г., Титов Ю.А.)**

Контакты: Кузьмин Алексей Георгиевич,
agqz55@rambler.ru

Материал поступил в редакцию 1.03.2018

MASS-SPECTROMETRIC MEASUREMENT OF THE GAS MIXTURES COMPOSITION IN THE CELLS OF A QUANTUM ROTATE SENSOR

A. N. Shevchenko¹, A. G. Kuzmin², Yu. A. Titov²

¹State Research Center of the RF Concern CSRI Elektropribor, JSC, Russia

²Institute for Analytical Instrumentation of RAS, Saint-Petersburg, Russia

The procedure of mass spectrometric analysis of the gas mixtures composition in cells of a quantum rotation sensor is described. Rotation sensors are used in gyroscopes, so their parameters are subject to strict requirements. The quantitative composition of the gas mixture in cells, especially isotope enrichment, has a critical effect on their characteristics. The suggested analysis procedure allows to sort out the produced cells batches efficiently.

Keywords: mass spectrometry, determination of gas mixture composition, quantum rotation sensor

REFERENCES

- Walker T.G., Larsen M.S. Spin-exchange-pumped NMR gyros. *Advances in atomic, molecular, and optical physics*, 2016, vol. 65, pp. 373–401.
- Litmanovich Yu.A., Vershovskiy A.K., Peshechonov V.G. Litmanovich Yu.A., Vershovskiy A.K., Peshechonov V.G. [Gyroscope on the basis of the phenomenon of nuclear magnetic resonance: last, real, future]. *Materialy plenarnogo zasedaniya 7-y rossiyskoy mul'tikonferentsii po problemam upravleniya, 07–09 oktyabrya 2014* [Proc. of a plenary session of the 7th Russian multiconference on control problems, on October 07–09, 2014], pp. 35–42. (In Russ.).
- Vershovskiy A.K., Shevchenko A.N. [Nuclear magnetic gyroscope: principle of action, history, perspectives]. *Materialy XVII konferentsii molodych uchenykh "Navigaziya i upravlenie dvizheniem", Sankt-Peterburg, 17–20 marta 2015 g.* [Proc. of the XVII conference of young scientists "Navigation and traffic control", St. Petersburg, on March 17–20, 2015], pp. 19–28. (In Russ.).
- Bulatowicz M., Larsen M. Compact atomic magnetometer for global navigation (NAV-CAM). *Proc. IEEE PLANS*, Apr., 2012, pp. 1088–1093.
- Patent of the Russian Federation for an invention N 2408978, 10.01.2011.
- Patent of the Russian Federation for the useful model N 133354, 10.10.2013.
- Vershovskiy A.K., Pazgalyev A.S. [Quantum Mx-magnetometers with optical pump: digital methods of measurement of frequency of a Mx-resonance in quickly changing field]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of technical physics], 2006, vol. 76, no. 7, pp. 108–112. (In Russ.).
- Groeger S., Bison G., Schenker J.L., Wynands R., and Weis A. A high-sensitivity laser-pumped M-x magnetometer. *Eur. Phys. J. D*, 2006, vol. 38, pp. 239–247.
- Happer W. Optical pumping. *Reviews of modern physics*, 1972, vol. 44, no. 2, pp. 170–249.
- Benumof R. Optical pumping. Theory and experiments. *American Journal of Physics*, 1965, vol. 3, pp. 151–160.
- Walker T.G., Happer W. Spin-exchange optical pumping of noble-gas nuclei. *Reviews of modern physics*, 1997, vol. 69, no. 2, pp. 629–642.
- Walker T.G. Fundamentals of spin-exchange optical pumping. *Journal of Physics: Conference Series*, 2011, vol. 294, no. 1.
- Patent of the USA N 7292031, 6.11.2007.
- Patent of the Russian Federation for an invention N 25584358, 27.06.2015.
- Popov E.N., Baranzhev K.A., Litvinov A.N., Kurapzev A.S., Voskoboinikov S.P., Ustinov S.M., Lariov N.V., Liokumovich L.B., Ushakov N.A., Shevchenko A.N. [The frequency line of nuclear magnetic resonance in the quantum sensor of rotation: Negative impact of the diagram of detection]. *Giroskopiya i navigaziya* [Gyroscopy and navigation], 2016, vol. 84, no. 1, pp. 3–13.
- Patent of the Russian Federation for the useful model N 94763, 27.05.2010.
- Kuzmin Yu.D., Kuzmin A.G. [The mass-spectrometer analysis of composition of gases on thermal platforms of Kamchatka in field conditions]. *Trudy III nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa Dal'nego Vostoka Rossii", g. Petropavlovsk-Kamchatskiy, 9–15 oktyabrya 2011 g.* [Proc. of III the scientific and technical conference "Problems of Complex Geophysical Monitoring of the Far East of Russia", Petropavlovsk-Kamchatsky, on October 9–15, 2011.], Obninsk, GC RAS. 2011, pp. 1–5. (In Russ.).
- Manoylov V.V., Kuzmin A.G., Titov Yu.A. [Method of signal processing of mass spectrums of the exhaled gases on the basis of spectral expansion in the adaptive base]. *Mass-spektrometriya* [Mass-spectrometry], 2015, vol. 12, no. 3, pp. 194–200. (In Russ.).
- Elizarov A.Yu., Kuzmin A.G., Polezhaev A.V., Titov Yu.A., Cherebillo V.Yu. [Measurement of coefficient of pulmonary gas exchange during anesthesia]. *Biomedizinskaya radioelektronika* [Biomedical radiotronics], Moscow, 2015, no. 8, pp. 10–15. (In Russ.).
- Manoylov V.V., Titov Yu.A., Kuzmin A.G., Zaruzkiy I.V. [Methods for data processing and classification

- for mass spectra of exhaled gases using discriminant analysis]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2016, vol. 26, no. 3, pp. 50–56. (In Russ.). Doi: 10.18358/np-26-3-i5056.
21. Kuzmin A.G., Tkachenko E.I., Oreshko L.S., Titov Yu.A., Balabanov A.S. [Method of mass-spectrometer express diagnostics on composition of the exhaled air]. *Meditsinskiy akademicheskiy zhurnal* [Medical academic journal], 2016, vol. 16, no 4, pp. 106–107. (In Russ.).
 22. Kuzmin A.G., Tkachenko E.I., Oreshko L.S., Titov Yu.A., Balabanov A.S. The method of medical instant diagnostics based on real-time mass-spectrometric analysis of exhaled air composition. *3rd ICMM PAN-ASIA PACIFIC CONGRESS ON MILITARY MEDICINE, 08.08.2016–12.08.2016, St.-Petersburg*. Abstracts, pp. 181–182.
 23. Manoylov V.V., Titov Yu.A., Kuzmin A.G., Zaruzkiy I.V. [Discriminant analysis algorithms for classification mass spectra of exhaled gases]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2017, vol. 27, no. 3, pp. 33–42. Doi: 10.18358/np-27-3-i3342. (In Russ.).
 24. Tveryanovich Ju.S., Kuzmin A.G., Menchikov L.G., Kochemirovsky V.A., Safonov S.V., Tumkin I.I., Povolotsky A.V., Manshina A.A. Composition of the gas phase formed upon laser-induced copper deposition from solutions. *Mendeleev Commun.*, 2011, vol. 21, pp. 1–3.
 25. Kochemirovskiy V.A., Menchikov L.G., Kuzmin A.G., Safonov S.V., Tumkin I.I., Tver'yanovich Yu.S. [Collateral responses in case of laser and induced sedimentation of copper from water solutions of the Cu^{II} complexes]. *Izvestiya Akademii nauk. Seriya chimicheskaya* [News of Academy of Sciences. Chemical series], 2012, no. 5, pp. 1035–1041.
 26. Gordeychuk D.I. Kochemirovsky V.A., Sorokoumov V., Tumkin I.I., Kuzmin A.G., Balova I.A. Copper particles generated during in situ laser-induced synthesis exhibit catalytic activity towards formation of gas phase. *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, 2017, vol. 12, no. 2, pp. 57–61.

Contacts: *Kuzmin Aleksey Georgievich*,
agqz55@rambler.ru

Article received in edition: 1.03.2018