

10.17586/2226-1494-2024-24-3-438-447

УДК 544.3

Анализ химических взаимодействий при заполнении цезием газовой ячейки квантового магнитометра

Ольга Сергеевна Юльметова¹✉, Александр Григорьевич Щербак²,
Полина Евгеньевна Решетняк³, Александр Сергеевич Завитаев⁴,
Александр Николаевич Шевченко⁵, Ракия Фагимовна Юльметова⁶

^{1,2,4,5} АО «Концерн «ЦНИИ «Электрон», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация

^{1,3,4,6} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ olga@yulmetova.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-9899-5939>

² asherbak1946@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8507-7653>

³ pole4ka004@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-3973-8201>

⁴ zav.al98@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-7035-5783>

⁵ Standw@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6303-0544>

⁶ liya@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-6416-3198>

Аннотация

Введение. Представлены результаты разработки и исследования технологического процесса изготовления сферических газовых ячеек. Подобные ячейки применяются в квантовых приборах, таких как магнитометры, гироскопы и атомные часы. Их работа основана на оптической накачке и детектировании состояния паров щелочных металлов, в частности, цезия. Для увеличения времени жизни спин-поляризации цезия ячейку заполняют буферным инертным газом. Качество изготовления ячейки напрямую влияет на такие характеристики приборов как ширина линий резонансов и достижимое отношение сигнал/шум. Предложенная технология изготовления ячеек позволяет упростить технологический процесс, исключает применение специализированного оборудования, повышает воспроизводимость результатов, связанных с химическими реакциями щелочного металла с посторонними примесями в буферном газе. Это достигается путем детектирования формируемых соединений и их исключения из состава газовой среды ячеек за счет выбора обоснованной последовательности технологических операций в цикле изготовления ячеек. **Метод.** Применение традиционных методов рентгенофазового анализа связано с необходимостью разгерметизации стеклянной капсулы с цезием и неизбежной реакцией цезия с компонентами воздушной среды. В работе предложена двухэтапная аналитическая оценка состава газовой смеси. На первом этапе определяется термодинамическая разрешенность всех возможных реакций в системе цезий-азот-примесный кислород. На втором этапе сопоставляется цветовая гамма спектров экспериментально полученных продуктов реакций с цветом продуктов термодинамически разрешенных взаимодействий. **Основные результаты.** Термодинамический анализ на основе двухэтапного подхода позволил выявить формирование субоксидов цезия в газовой ячейке при нагреве в интервале температур 273–700 К. Для их исключения из состава ячейки предложена последовательность операций. Она включает в себя формообразование стеклотрунным методом ампулы, имеющей технологическую цилиндрическую часть, и соединенную с ней перетяжкой сферическую ячейку. В технологическую часть ампулы закладывается капсулированный в стеклянную оболочку цезий высокой чистоты, после чего проводится вакуумирование ампулы. После вскрытия капсулы с цезием осуществляется температурная перегонка чистого цезия в сферическую зону. Технологический процесс завершается заполнением ячейки буферным газом, после чего она отпаивается. **Обсуждение.** Отсутствие нагрева при заполнении азотом существенно упрощает технологический процесс и минимизирует в газовой смеси количество посторонних примесей в виде субоксидов цезия.

Ключевые слова

газовая ячейка, цезий, субоксиды цезия, буферный газ, энергия Гиббса, химическая термодинамика, лазерная спектроскопия

Благодарности

Авторы выражают благодарность А.Г. Михелю за изготовление стеклотрунным методом ампул, использованных в экспериментальных исследованиях, М.М. Дементьеву за помощь в организации работ по вакуумированию и заполнению ампул азотом, а также проведению спектральных измерений.

© Юльметова О.С., Щербак А.Г., Решетняк П.Е., Завитаев А.С., Шевченко А.Н., Юльметова Р.Ф., 2024

Ссылка для цитирования: Юльметова О.С., Щербак А.Г., Решетняк П.Е., Завитаев А.С., Шевченко А.Н., Юльметова Р.Ф. Анализ химических взаимодействий при заполнении цезием газовой ячейки квантового магнитометра // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 3. С. 438–447. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-3-438-447

Analysis of chemical interactions during filling a cesium vapor cell for a quantum magnetometer

Olga S. Yulmetova^{1✉}, Aleksandr G. Shcherbak², Polina E. Reshetnyak³, Alexander S. Zavitaev⁴, Alexander N. Shevchenko⁵, Raliya F. Yulmetova⁶

^{1,2,4,5} Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation

^{1,3,4,6} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ olga@yulmetova.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-9899-5939>

² asherbak1946@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8507-7653>

³ pole4ka004@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-3973-8201>

⁴ zav.al98@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-7035-5783>

⁵ Standw@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6303-0544>

⁶ liya@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-6416-3198>

Abstract

The results of the development and research of the technological process for manufacturing spherical vapor cells are presented. Such cells are used in quantum devices, such as magnetometers, gyroscopes, and atomic clocks. Their work is based on optical pumping and detection of the state of alkali metal vapors, in particular cesium. To increase the lifetime of cesium spin polarization in the vapor cell, it is filled with a buffer inert gas. The quality of cell manufacturing directly affects such device characteristics as the width of resonance lines and the achievable signal-to-noise ratio. The proposed cell manufacturing technology simplifies the technological process, eliminates the use of specialized equipment, and increases the reproducibility of results associated with chemical reactions of an alkali metal with foreign impurities in a buffer gas. This is achieved by detecting the formed compounds and excluding them from the composition of the gaseous environment of the cells through the selection of a reasonable sequence of technological operations in the cell manufacturing cycle. The use of traditional methods of X-ray diffraction is associated with the need to depressurize the vapor cell with cesium which leads to the inevitable reaction of cesium with components of the air environment. The work proposes a two-stage analytical assessment of the composition of the gas mixture. At the first stage, the thermodynamic resolution of all possible reactions in the cesium-nitrogen-impurity oxygen system is determined. At the second stage, the color spectrum of the spectra of experimentally obtained reaction products is compared with the color of the products of thermodynamically allowed interactions. Thermodynamic analysis based on a two-stage approach made it possible to identify the formation of cesium suboxides in a vapor cell when it was heated in the temperature range of 273–700 K. To exclude them from the composition of the vapor cell, a sequence of operations was proposed. It involves the formation of an ampoule using the glass blowing method which has a technological cylindrical part and a spherical cell connected to it by a constriction. High purity cesium encapsulated in a glass shell is placed into the technological part of the ampoule, after which the ampoule is evacuated. After opening the capsule with cesium, thermal distillation of pure cesium into a spherical zone takes place. The technological process is completed by filling the cell with buffer gas, after which it is sealed off. The absence of heating during filling a vapor cell with nitrogen significantly simplifies the technological process and minimizes the amount of foreign impurities in the form of cesium suboxides in the gas mixture.

Keywords

vapor cell, cesium, cesium suboxides, buffer gas, Gibbs energy, chemical thermodynamics, laser spectroscopy

Acknowledgments

Authors express their gratitude to Michel A.G. for manufacturing ampoules using the glass blowing method, Demytyev M.M. for assistance in vacuumizing and filling ampoules with nitrogen as well as carrying out spectral measurements.

For citation: Yulmetova O.S., Shcherbak A.G., Reshetnyak P.E., Zavitaev A.S., Shevchenko A.N., Yulmetova R.F. Analysis of chemical interactions during filling a cesium vapor cell for a quantum magnetometer. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 3, pp. 438–447 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-3-438-447

Введение

Стремительное развитие за последние годы квантовых технологий вызывает возрастающий интерес к исследованиям в области взаимодействия фотонов светового излучения и атомов паров щелочных металлов, которые помещаются в прозрачные стеклянные газовые ячейки. Ячейки, содержащие пары щелочных металлов, таких как калий, рубидий и цезий (Cs), ввиду простоты их электронной конфигурации уже сегодня имеют широкий спектр промышленного применения

в атомных гироскопах [1–3], магнитометрах [4, 5] и атомных часах [6] при создании элементов квантовой памяти [7, 8] и каналов квантовой связи [9], а также в фундаментальных физических исследованиях [10]. Все перечисленные применения напрямую зависят от времени жизни спин-поляризации газовой ячейки [11]. В этой области на сегодняшний день прослеживается тенденция развития исследований по двум направлениям [11, 12]: нанесение в процессе изготовления антирелаксационных покрытий на внутреннюю поверхность ячейки и применение при заполнении ячейки буферных

газов, в качестве которых могут выступать азот (N₂), аргон, неон или смесь газов.

Очевидно, что функциональные параметры ячейки во многом определяются процессами, протекающими в рабочей среде газовой ячейки на стадии ее заполнения парами щелочных металлов и буферными газами, включая комплекс гомогенных и гетерогенных химических взаимодействий между компонентами газовой смеси.

Постановка задачи

В настоящей работе рассматривается процесс изготовления газовой ячейки на примере сферической ячейки магнитометра [13], заполненной парами щелочного металла и буферного газа, в качестве которых выбраны Cs и N₂.

Цель работы — разработка технологического процесса заполнения газовых ячеек парами Cs и N₂. Для достижения этой цели необходимо решение таких задач, как определение возможных химических взаимодействий, которые могут протекать в рассматриваемой системе для указанного сочетания компонентов газовой среды; выявление критериев оценки возможности и предпочтительности протекания конкретных реакций; определение методов и средств анализа и объективного контроля процессов, протекающих в рабочей среде газовой ячейки на стадии ее заполнения.

Материалы и методы исследований

При разработке технологии изготовления ячейки для исследования процессов, протекающих в замкнутой и изолированной от внешней среды системе, предложено использовать инструментарий термодинамического анализа химических взаимодействий [14]. Применение аналитических методов обусловлено тем, что прямое использование рентгенофазового анализа или рентгено-электронной спектроскопии затруднительно ввиду высокой реакционной способности Cs. А детальное понимание и выявление механизмов протекающих процессов необходимо для разработки управляемой технологии изготовления ячеек.

В качестве объекта исследований выступают стеклянные ампулы, полученные стеклудувным методом, имеющие две части: технологическую цилиндрическую 1 и соединенную перетяжкой 2 с рабочей сферической зоной 3 (рис. 1).

В цилиндрической части размещается капсула 4 с Cs, далее производится откачка воздуха, заполнение ампулы N₂, разрушение капсулы и высвобождение капсулированного Cs. Перегонка Cs в сферическую ячейку осуществляется направленным тепловым воздействием на цилиндрическую часть ампулы с перемещением зоны нагрева в сторону ячейки.

Предметом исследования является технология изготовления сферической газовой ячейки, определяемая совокупностью и последовательностью операций ее изготовления, включая процесс заполнения ячейки газовой смесью Cs и N₂.

Для выявления возможных взаимодействий в представленной системе использован инструментарий хи-

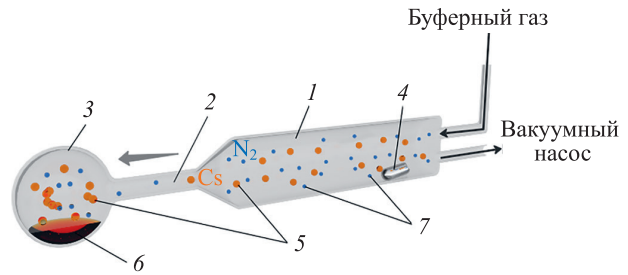


Рис. 1. Стеклянная ампула: 1 — цилиндрическая часть ампулы; 2 — перетяжка; 3 — сферическая часть ампулы (ячейка); 4 — капсула с цезием (Cs); 5 — пары Cs; 6 — конденсированный Cs (жидкая фаза); 7 — азот (N₂)

Fig. 1. Glass ampoule. 1 — cylindrical part of the ampoule; 2 — waist; 3 — spherical part of the ampoule (vapor cell); 4 — capsule with cesium; 5 — cesium vapor; 6 — condensed cesium (liquid phase); 7 — nitrogen

мической термодинамики. Как известно [15], оценка термодинамической вероятности и разрешенности химических реакций при заданной температуре осуществляется на основе расчета изобарно-изотермического потенциала ΔG_T^0 (энергии Гиббса) рассматриваемого взаимодействия.

Расчет ΔG_T^0 , определяющей протекание взаимодействия с учетом газовой среды, выполнен в соответствии с выражением:

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_{298}^0 - T\Delta S_{298}^0 + \int_{298}^T C_p dt - T \int_{298}^T 1/t \Delta C_p dt + RT \ln P_g^{-k}, \quad (1)$$

где ΔH_T^0 — тепловой эффект процесса (изменение энтальпии); ΔS_T^0 — изменение энтропии системы; C_p — теплоемкость; T — температура; P_g — относительное парциальное давление участвующего в реакции компонента g газовой среды; R — универсальная газовая постоянная; k — стехиометрический коэффициент.

Для выявления химических соединений, образующихся при заполнении ячейки, необходимо рассмотреть систему «цезий-азот-кислород» (Cs-N₂-O₂). Данная система выбрана в связи с тем, что химическая активность Cs настолько высока, что он реагирует с O₂ в условиях глубокого вакуума, и с O₂, который как примесь присутствует в N₂, выполняющим роль буферного газа.

Для анализа процесса образования соединений Cs использован метод оценки эволюции цветовой гаммы, апробированный на примере формирования растровых рисунков из оксидов титана [16] и ниобия [17] различной стехиометрии на поверхности сферических роторов электростатического [18] и криогенного [19] гироскопов. Основанием служит то, что соединения Cs с O₂ и N₂ имеют широкую цветовую гамму [20], что позволяет делать предположения о получаемых соединениях.

Процесс исследования заключался в сопоставлении цветовой гаммы, полученной при заполнении ампулы Cs и N₂, с наиболее вероятным сочетанием химических реакций, протекающих в ампуле и ячейке, и соответствующих указанной цветовой гамме. Дальнейшее вы-

деление из сочетания реакций тех, которые отвечают условию отрицательных значений ΔG_T^0 с учетом ее величины, определит механизм наиболее вероятных процессов, происходящих в замкнутой системе «ампула-ячейка».

Контроль функциональных параметров ячейки позволит выявить нежелательные взаимодействия, а представленная схема обеспечит возможность создания управляемой технологии процесса изготовления ячейки.

Наиболее объективный способ контроля параметров газовых ячеек — регистрация линии поглощения атомов щелочного металла методом лазерной спектроскопии [21]. Для этой цели луч лазерного излучателя с длиной волны 894 нм, соответствующей энергетическим переходам атомов Cs, просвечивает центральную часть исследуемой ячейки. Схема используемой в работе экспериментальной установки представлена на рис. 2.

Как показано на рис. 2, в состав экспериментальной установки входят: лазерный излучатель 1, фотодиод 2, нагреватель 3 для стабилизации температуры лазера и ячейки 4, а также осциллограф 5. В работе прибора для газовых ячеек с Cs можно выделить следующие диапазоны рабочих температур ячеек: 313–333 К [22, 23] и 333–393 К [24, 25].

На осциллограмме наблюдается контур оптического резонансного поглощения 6, ширина и сдвиг которого позволяют оценить качество изготовленной ячейки и давление буферного газа внутри нее. В случае отклонения давления буферного газа от номинального значения контур резонансного поглощения будет значительно расширен или сужен по сравнению с расчетным значением. Присутствие примесей в газовой смеси проявляется в уширении линии поглощения.

Эксперимент и обсуждение

Образование возможных химических соединений при заполнении ячейки Cs и буферным газом оценим, рассмотрев систему Cs-N₂-O₂ и входящие в нее системы Cs-N₂, Cs-O₂ и N₂-O₂. В данном случае при очевидных реагентах — Cs и N₂ — учитывается и O₂, который как примесь присутствует в N₂ особой чистоты, используемом в качестве буферного газа. Например, для давления N₂ порядка 100 торр парциальное давление O₂ составляет порядка — $5 \cdot 10^{-4}$ торр. Поскольку химическая активность Cs высока, он очень быстро реагирует с O₂ и способен поглощать его малейшие следы и в условиях глубокого вакуума. Исходя из этого, даже малые количества O₂, бурно реагирующего с Cs [20] с образованием различного рода оксидов Cs, могут влиять на рабочие параметры ячейки. Необходимость анализа реакций в системе N₂-O₂ обусловлена температурным воздействием при перегонке Cs из цилиндрической части ампулы в сферическую (рис. 1) в условиях, когда сферическая ячейка и ампула предварительно были заполнены N₂.

В табл. 1 приведены реакции и соединения, образование которых возможно в системах Cs-N₂, Cs-O₂ и N₂-O₂.

Для системы N₂-O₂ в интервале температур 298–772 К значения ΔG_T^0 всех реакций образования

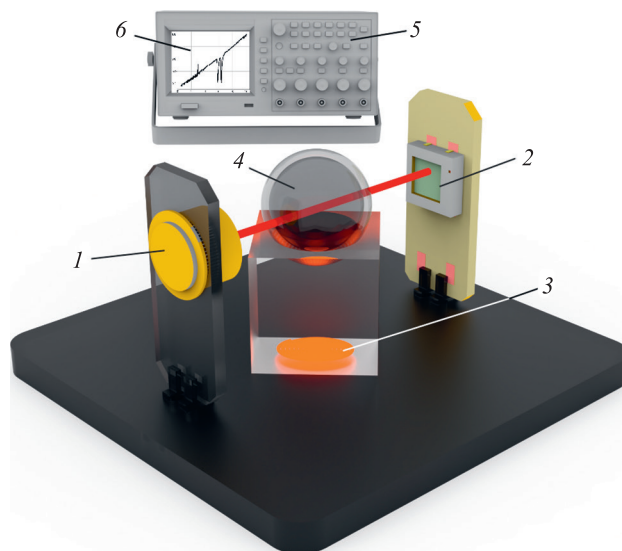


Рис. 2. Модель стенда для контроля параметров ячеек: 1 — лазерный излучатель; 2 — фотодиод; 3 — нагреватель; 4 — сферическая ячейка; 5 — осциллограф; 6 — контур оптического резонансного поглощения

Fig. 2. 3D-Model of a stand for monitoring vapor cell parameters: 1 — laser emitter; 2 — photodiode; 3 — heater; 4 — spherical vapor cell; 5 — oscillograph; 6 — optical resonant absorption line

оксидов N₂ (табл. 1) больше нуля: 98 кДж/моль для N₂O, 175 кДж/моль для NO, 105 кДж/моль для NO₂, 143 кДж/моль для N₂O₃ и 116 кДж/моль для N₂O₅.

Таким образом, расчеты показали невозможность образования устойчивых оксидов N₂ в замкнутой ампуле с парами Cs. Для указанной системы с точки зрения термодинамики разрешены реакции Cs с N₂ и O₂ с образованием нитрата, нитрита и оксидов Cs.

Исходя из известных источников [20], Cs не вступает в реакцию с N₂ при обычных условиях, однако отмечается возможность взаимодействия при нагреве, причем указывается на нестабильность соединений Cs с N₂. Реакция CsN₃ термодинамически запрещена, что согласуется с данными работы [26].

Рассмотрим возможность образования нитрита CsNO₂ и нитрата цезия CsNO₃, что осуществляется при участии трех компонентов цезия, азота и кислорода: $2Cs + 2O_2 + N_2 \rightarrow 2CsNO_2$ и $2Cs + 3O_2 + N_2 \rightarrow 2CsNO_3$.

Для соединений, приведенных в табл. 1, и реакций образования CsNO₂ и CsNO₃, используя зависимость (1), рассчитаем значения ΔG_T^0 при 727 и 772 К — температуры [27] парообразования Cs при 50 и 100 торр соответственно, при которых осуществляется перегонка Cs из ампулы в ячейку.

Значения $\Delta G_{727\text{ К}}$, $\Delta G_{298\text{ К}}$ и $\Delta G_{772\text{ К}}$ для реакций в системах Cs-O₂ и Cs-O₂-N₂, а также характеристики образующихся оксидов, нитрита и нитрата представлены в табл. 2. Для расчета ΔG_T^0 использованы справочные материалы [20, 26–28] и энциклопедия¹.

На рис. 3 представлены графические зависимости изменения ΔG_T от температуры в интервале 250–750 К

¹ Химическая энциклопедия: в 5 т. Москва: Большая Российская энциклопедия, 1999. Т. 5. 783 с.

Таблица 1. Соединения в системе Cs-N₂-O₂
Table 1. Compounds in the system Cs-N₂-O₂

Соединения в системе Cs-N ₂	Соединения в системе Cs-O ₂	Соединения в системе N ₂ -O ₂
азид цезия (CsN ₃) 2Cs + 3N ₂ → 2CsN ₃	надпероксид цезия (CsO ₂) Cs + O ₂ → CsO ₂	оксид диоксида азота (N ₂ O) 2N ₂ + O ₂ → 2N ₂ O
нитрид цезия (Cs ₃ N) 6Cs + N ₂ → 2Cs ₃ N	оксид цезия (Cs ₂ O) 4Cs + O ₂ → 2Cs ₂ O	монооксид азота (NO) N ₂ + O ₂ → 2NO
	пероксид цезия (Cs ₂ O ₂) 2Cs + O ₂ → Cs ₂ O ₂	диоксид азота (NO ₂) N ₂ + 2O ₂ → 2NO ₂
	озонид цезия (CsO ₃) 2Cs + 3O ₂ → 2CsO ₃	оксид азота (III) (N ₂ O ₃) 2N ₂ + 3O ₂ → 2N ₂ O ₃
	субоксид цезия (Cs ₄ O) 8Cs + O ₂ → 2Cs ₄ O	пентаоксид диоксида азота (N ₂ O ₅) 2N ₂ + 5O ₂ → 2N ₂ O ₅
	субоксид цезия (Cs ₇ O) 14Cs + 7O ₂ → 2Cs ₇ O	
	оксид трицезия (Cs ₃ O) 6Cs + O ₂ → 2Cs ₃ O	

Таблица 2. Значения ΔG_T⁰ для систем Cs-O₂ и Cs-O₂-N₂
Table 2. ΔG_T⁰ values for systems Cs-O₂ and Cs-O₂-N₂

Соединение	Реакция	ΔG _{298 К} , кДж/моль	ΔG _{727 К} , кДж/моль	ΔG _{772 К} , кДж/моль	Описание цвета
Соединения в системе Cs-O ₂					
Cs ₂ O	4Cs + O ₂ → 2Cs ₂ O	-203,6	-137,63	-130,73	Коричнево-красный, при нагревании карминово-красный цвет, затем черный
Cs ₂ O ₂	2Cs + O ₂ → Cs ₂ O ₂	-240,00	-159,36	-150,89	Светло-желтый, коричневатый, выше 923 К разлагается
CsO ₂	Cs + O ₂ → CsO ₂	-291,01	-188,63	-177,89	Желтый, оранжевый, золотисто-коричневый, выше 623 К разлагается
CsO ₃	2Cs + 3O ₂ → 2CsO ₃	-259,26	-114,06	-98,83	Оранжево-красный, при 343 К разлагается
Cs ₄ O	8Cs + O ₂ → 2Cs ₄ O	-128,14	-80,87	-75,91	Красновато-коричневый
Cs ₇ O	14Cs + O ₂ → 2Cs ₇ O	-94,64	-51,32	-46,78	Бронзовый
Cs ₃ O	6Cs + O ₂ → 2Cs ₃ O	-153,58	-101,02	-95,51	Черный, температура разложения 439 К
Соединения в системе Cs-O ₂ -N ₂					
CsNO ₂	2Cs + 2O ₂ + N ₂ → 2CsNO ₂	-371,96	-275,64	-265,54	Бледно-желтый
CsNO ₃	2Cs + 3O ₂ + N ₂ → 2CsNO ₃	-451,60	-321,44	-307,79	Бесцветный

для термодинамически разрешенных взаимодействий, приведенных в табл. 2.

Выполним эксперимент, основанный на сопоставлении цветовой гаммы, образованной в ампулах после вскрытия в них капсул с Cs, для различных состояний замкнутой системы, определяемых создаваемой в ампулах средой, и протеканием конкретных термодинамически разрешенных реакций в системе Cs-N₂-O₂, в результате которых образуются соединения соответствующего цвета.

Три стеклянные ампулы, изготовленные традиционным стеклодувным методом (рис. 4), включающие цилиндрическую зону и сферическую часть, представляющую собой ячейку (рис. 1), подвергались химической

промывке, сушке и термообработке [11]. В каждую из трех ампул помещался капсулированный в стеклянную оболочку Cs высокой чистоты (99,999 %) в количестве 5 мг. Далее двухсекционная ампула 1 (рис. 4) вакуумировалась до давления 7,5·10⁻⁹ торр, ампула 2 заполнялась N₂ с давлением 50 торр и ампула 3 — N₂ с давлением 100 торр. На следующем этапе производилось вскрытие капсул с Cs, например, ударным воздействием помещенного в технологическую ампулу магнитного металлического шарика-молоточка в стеклянной оболочке [29], и перегонка тепловым воздействием паров Cs в сферическую часть.

На рис. 5 приведены при 15-кратном увеличении фотографии ампул. Порядок размещения ампул

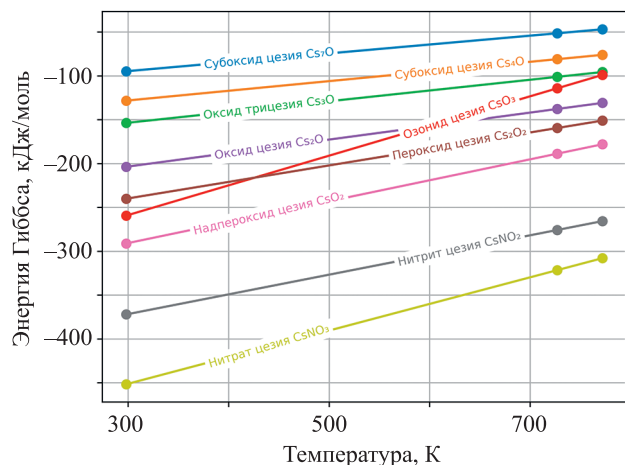


Рис. 3. Зависимость изменения энергии Гиббса от температуры для образования соединений в системе Cs-O₂-N₂

Fig. 3. The dependence of the change in Gibbs energy vs. temperature for the formation of compounds in the Cs-O₂-N₂ system



Рис. 4. Ампулы после заполнения цезием: 1 — вакуум $7,5 \cdot 10^{-9}$ торр; 2 — 50 торр азота; 3 — 100 торр азота

Fig. 4. Ampoules after filling with cesium: 1 — vacuum $7.5 \cdot 10^{-9}$ torr; 2 — 50 torr of nitrogen; 3 — 100 torr of nitrogen



Рис. 5. Сферическая часть ампул: вакуум $7,5 \cdot 10^{-9}$ торр (a); 50 торр азота (b); 100 торр азота (c). Цилиндрическая часть ампул: вакуум $7,5 \cdot 10^{-9}$ торр (d); 50 торр азота (e); 100 торр азота (f)

Fig. 5. Spherical part of ampoules: vacuum $7.5 \cdot 10^{-9}$ torr (a); 50 torr of nitrogen (b); 100 torr of nitrogen (c). Cylindrical part of the ampoules: vacuum $7.5 \cdot 10^{-9}$ torr (d); 50 torr of nitrogen (e); 100 torr of nitrogen (f)

аналогичен рис. 4 (на рис. 5, *a–c* показаны ячейки, рис. 5, *d–f* — цилиндрическая часть ампулы).

Очевидно, что ампула 1, в которой предварительно был создан вакуум $7,5 \cdot 10^{-9}$ торр и отсутствовал буферный газ — N_2 , заполнена чистым Cs. Cs в жидком агрегатном состоянии имеет характерный металлический золотистый цвет.

Вскрытие капсул с Cs, заполненных N_2 , привело к формированию соединений Cs в системе Cs- N_2 - O_2 . Причем при парциальном давлении N_2 50 торр (ампула 2) цвет соединений коричнево-золотистый, а при 100 торр ампула с Cs имеет менее выраженный коричневатый оттенок.

Полученную разницу в цвете можно объяснить тем, что при давлении N_2 100 торр парциальное давление O_2 в ампуле составляет $5 \cdot 10^{-4}$ торр, т. е. в два раза больше по сравнению с ампулой, в которой давление N_2 — 50 торр, что влияет на скорость возможных взаимодействий [30]. Количественно зависимость между скоростью реакции и молярными концентрациями реагирующих веществ описывается основным законом химической кинетики — законом действующих масс [31], определяющим, что скорость химической реакции при постоянной температуре прямо пропорциональна произведению концентраций реагирующих веществ. Можно предположить, что для реакций Cs с O_2 , представленных в табл. 1, влияние изменения относительной концентрации O_2 на скорость будет различным.

Поскольку в ампулах, в которых давление N_2 составляло 50 и 100 торр, происходит формирование коричнево-бурых образований, тогда как нитрат цезия $CsNO_3$ — бесцветный, а нитрит $CsNO_2$ — бледно-желтый, по цветовому признаку образование нитритов и нитратов на стадии заполнения ячейки Cs исключается.

Таким образом, различия в цветовой гамме обусловлены парциальными давлениями в ампулах как O_2 , так и N_2 .

По совокупности признаков — цвет и отрицательное значение энергии Гиббса — можно считать, что наиболее вероятно образование Cs_2O , из которых образуемой цветовой гамме соответствуют Cs_2O , Cs_2O_2 , CsO_2 , CsO_3 и субоксиды Cs_4O и Cs_7O . Исключением по цветовому признаку является Cs_3O , имеющий черный цвет. Наибольшую термодинамическую разрешенность образования имеет CsO_2 .

Нагрев ампул до температур парообразования Cs^1 при 50 и 100 торр, составляющих 727 К и 772 К, не выявил разложений находящихся в ампуле соединений, что согласно работе [20], свойственно Cs_2O_2 и CsO_2 . Метод исключений по цветовой гамме, а также оценка реакции соединения, находящегося в ампуле, на условия нагрева показали, что единственно возможными соединениями остаются Cs_4O и Cs_7O , имеющие бронзово-коричневый оттенок (рис. 5, *e*).

На рис. 6 представлены линии поглощения щелочного металла (Cs) для трех экспериментальных образцов ячеек: вакуум, 50 торр и 100 торр N_2 .

Из рис. 6 видно, что во всех трех ячейках наблюдается резонансное поглощение света атомами Cs, что свидетельствует о принципиальной возможности использования данных ячеек в составе квантовых приборов, таких как магнитометры. Однако присутствуют явные различия в форме линий резонансного поглощения.

В вакуумной ячейке вместо ожидаемых четырех узких пиков поглощения, соответствующих четырем компонентам сверхтонкой структуры дублета D1 в атоме Cs, видны только два широких пика. С увеличением давления буферного газа N_2 происходит дальнейшее уширение линий поглощения, и при давлении 100 торр четыре пика сливаются в одну общую широкую линию.

Этот эффект обусловлен столкновительным уширением, когда атомы Cs испытывают соударения с атомами буферного газа, приводящие к размытию энергетических уровней и соответствующему увеличению спектральных линий поглощения. Чем выше давление буферного газа, тем интенсивнее столкновения и сильнее эффект уширения линий.

Однако степень уширения в экспериментальных ячейках значительно превышает теоретически ожидаемую. Если использовать коэффициент столкновительного уширения для системы Cs- N_2 15,82 МГц/торр, приведенный в работе [32], то получается, что наблюдаемый в эксперименте спектр для ячейки с номинальным давлением N_2 100 торр соответствует фактическому давлению не менее 200 торр.

Причина столь значительного превышения экспериментально наблюдаемого уширения над теоретически

¹ Химическая энциклопедия: в 5 т. Москва: Большая Российская энциклопедия, 1999. Т. 5. 783 с.

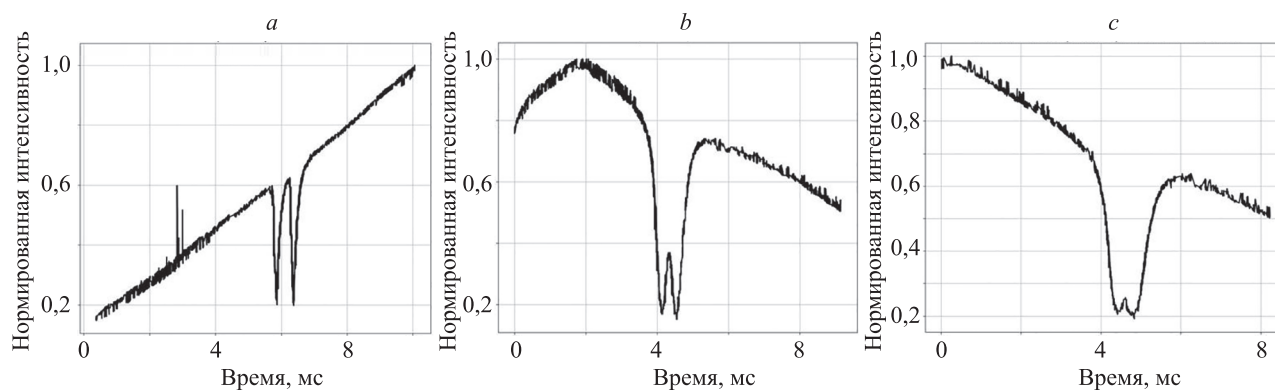


Рис. 6. Линии поглощения цезия: вакуум (*a*); 50 торр азота (*b*); 100 торр азота (*c*)

Fig. 6. Absorption lines of Cs: vacuum (*a*); 50 torr of nitrogen (*b*); 100 torr of nitrogen (*c*)



Рис. 7. Технологическая схема изготовления газовой ячейки

Fig. 7. Technological process for manufacture of a vapor cell

ожидаемым заключается в наличии в газовой смеси других компонентов, кроме буферного газа. Как было показано теоретическим анализом и подтверждено экспериментальными наблюдениями цветовой гаммы, во время заполнения ячейки парами Cs происходит образование примесных субоксидов Cs, которые вносят вклад в столкновительное уширение спектральных линий, усиливая общий эффект уширения.

Таким образом, спрогнозированное теоретически и подтвержденное экспериментально образование примесных Cs₄O, Cs₇O в процессе заполнения ячейки требует учета при формировании технологической схемы изготовления газовой ячейки. Можно предполагать, что образование нежелательных соединений в большей мере происходит в газовой смеси Cs с N₂ на стадии направленного теплового воздействия на цилиндрическую часть ампулы. Техническое решение проблемы заключается в том, что вначале ампулу заполняют Cs и осуществляют его перегонку в ячейку, исключая какие-либо химические взаимодействия в замкнутой системе (ампула 1 на рис. 3). Затем заполняют ампулу и ячейку N₂, минимизируя возможность взаимодействий.

Предлагаемая усовершенствованная схема технологического процесса с учетом образования Cs₄O, Cs₇O и мер по их минимизации приведена на рис. 7.

Согласно представленной схеме, сначала осуществляется формообразование стеклодувным методом стеклянной ампулы, имеющей цилиндрическую и сферическую зоны. Следующий шаг — промывка и обезгаживание ампулы. Далее следует вакуумирование ампулы с цезиевой капсулой. После чего производится вскрытие капсулы в среде вакуума в цилиндрической зоне ампулы. Следующая операция — температурная

перегонка Cs из цилиндрической части в сферическую. Финишной операцией является заполнение ампулы N₂ и отпайка.

Заключение

Разработана методика анализа процесса заполнения газовых ячеек щелочным металлом и буферным газом на примере цезия и азота, основанная на сопоставлении цветовой гаммы, полученной при заполнении ампулы цезием и азотом и совокупности термодинамически разрешенных химических реакций в системе «цезий-азот-кислород» с последующим выделением реакций, продукты которых соответствуют указанной цветовой гамме.

Для объективного контроля функциональных параметров изготовленных газовых ячеек был использован метод лазерной спектроскопии поглощения, заключающийся в регистрации спектральной линии поглощения света атомами цезия на длине волны 894 нм, оценке ее ширины и сравнении с теоретическим значением. Обнаруженное уширение линии поглощения свидетельствует о присутствии дополнительных соединений цезия в газовой среде ячейки, что согласуется с результатами термодинамического анализа возможных химических реакций в системе «цезий-азот-кислород».

Предложена технологическая схема, включающая последовательность операций при изготовлении ячеек магнитометра, основанная на комплексном анализе и оценке процессов, в том числе термически активируемых, протекающих при заполнении ячейки цезием и азотом.

Литература

1. Вершовский А.К., Литманович Ю.А., Пазгалев А.С., Пешехонов В.Г. Гирокоп на ядерном магнитном резонансе: предельные характеристики // Гирокопия и навигация. 2018. Т. 26. № 1. С. 55–80. <https://doi.org/10.17285/0869-7035.2018.26.1.055-080>
2. Pei H., Duan L., Ma L., Fan S., Cai Z., Wu Z., Fan W., Quan W. Real-time quantum control of spin-coupling damping and application in atomic spin gyroscopes // Cell Reports Physical Science. 2024. V. 5. N 2. P. 101832. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2024.101832>
3. Li R., Quan W., Fan W., Xing L., Fang J. Influence of magnetic fields on the bias stability of atomic gyroscope operated in spin-exchange

References

1. Vershovskii A.K., Litmanovich Yu.A., Pazgalev A.S., Peshekhonov V.G. Nuclear magnetic resonance gyro: ultimate parameters. *Gyroscopy and Navigation*, 2018, vol. 9, no. 3, pp. 162–176. <https://doi.org/10.1134/S2075108718030100>
2. Pei H., Duan L., Ma L., Fan S., Cai Z., Wu Z., Fan W., Quan W. Real-time quantum control of spin-coupling damping and application in atomic spin gyroscopes. *Cell Reports Physical Science*, 2024, vol. 5, no. 2, pp. 101832. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2024.101832>
3. Li R., Quan W., Fan W., Xing L., Fang J. Influence of magnetic fields on the bias stability of atomic gyroscope operated in spin-exchange

- relaxation-free regime // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2017. V. 266. P. 130–134. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.09.023>
4. Jie S., Liu Z., Wang J., Zhang S., Zhao K. Calibration of the coil constants and nonorthogonal angles of triaxial NMR coils based on in-situ EPR magnetometers // *Journal of Magnetic Resonance*. 2024. V. 360. P. 107634. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2024.107634>
 5. Ranjbaran M., Tehranchi M.M., Hamidi S.M., Khalkhali S.M.H. Relaxation time dependencies of optically detected magnetic resonance harmonics in highly sensitive Mx magnetometers // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2019. V. 469. P. 522–530. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.09.031>
 6. Knapkiewicz P. Technological assessment of MEMS alkali vapor cells for atomic references // *Micromachines*. 2019. V. 10. N 1. P. 25. <https://doi.org/10.3390/mi10010025>
 7. Wolters J., Buser G., Horsley A., Béguin L., Jöckel A., Jahn J.P., Warburton R.J., Treutlein P. Simple atomic quantum memory suitable for semiconductor quantum dot single photons // *Physical Review Letters*. 2017. V. 119. N 6. P. 060502. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.060502>
 8. Katz O., Firstenberg O. Light storage for one second in room-temperature alkali vapor // *Nature Communications*. 2018. V. 9. P. 2074. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04458-4>
 9. Zugenmaier M., Dideriksen K.B., Sørensen A.S., Albrecht B., Polzik E.S. Long-lived non-classical correlations towards quantum communication at room temperature // *Communications Physics*. 2018. V. 1. P. 76. <https://doi.org/10.1038/s42005-018-0080-x>
 10. Kobtsev S., Radnatarov D., Khripunov S., Popkov I., Andryushkov V., Steshchenko T., Lunin V., Zarudnev Y. Feedback-controlled and digitally processed coherent population trapping resonance conversion in ^{87}Rb vapour to high-contrast resonant peak // *New Journal of Physics*. 2017. V. 19. N 4. P. 043016. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/aa68b9>
 11. Chi H., Quan W., Zhang J., Zhao L., Fang J. Advances in anti-relaxation coatings of alkali-metal vapor cells // *Applied Surface Science*. 2020. V. 501. P. 143897. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.143897>
 12. Wang X., Li J., Liu Z., Wu Z., Shao Y. Optimizing ^{129}Xe and ^{131}Xe relaxation in an NMR gyroscope using buffer gas pressure and wall coating // *Journal of Magnetic Resonance*. 2023. V. 352. P. 107430. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2023.107430>
 13. Шевченко А.Н., Захарова Е.А. Исследование зависимости качества резонанса от распределения цезия в ячейке квантового датчика вращения // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2019. Т. 19. № 4. С. 567–573. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2019-19-4-567-573>
 14. Woetzel S., Talkenberg F., Scholtes T., IJsselsteijn R., Schultze V., Meyer H.-G. Lifetime improvement of micro-fabricated alkali vapor cells by atomic layer deposited wall coatings // *Surface & Coatings Technology*. 2013. V. 221. P. 158–162. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.01.044>
 15. Gibbs J.W., Bumstead H.A., Van Name R.G., Longley W.R. *The Collected Works of J. Willard Gibbs: In two volumes*, Longmans, Green and Co., 1928.
 16. Scherbak A.G., Yulmetova O.S. Contrast image formation based on thermodynamic approach and surface laser oxidation process for optoelectronic read-out system // *Optics and Laser Technology*. 2018. V. 101. P. 242–247. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.11.030>
 17. Tit M.A., Yulmetova O.S., Sisyukov A.N. Analysis of niobium thin film modification based on thermodynamic approach // *Proc. of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. 2020. P. 1049–1052. <https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9038932>
 18. Yulmetova O.S., Scherbak A.G. Composition analysis of thin films formed on beryllium surfaces under pulsed laser action by the method of chemical thermodynamics // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. V. 97. N 9-12. P. 3231–3236. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2216-2>
 19. Tit M.A., Yulmetova O.S., Andreeva V.D., Sisyukov A.N., Yulmetova R.F. Application of niobium nitride thin films for improvement of performance characteristics of cryogenic gyroscope // *Proc. of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. 2021. P. 1232–1235. <https://doi.org/10.1109/EIConRus51938.2021.9396714>
 20. Плюшев В.Е., Степин Б.Д. Химия и технология соединений лития, рубидия и цезия. М.: Химия, 1970. 408 с.
 21. Власова М.А., Чалков В.В., Шевченко А.Н. Особенности применения VCSEL-лазеров в установке по контролю параметров газовой ячейки квантового магнитометра // *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, vol. 266, pp. 130–134. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.09.023>
 4. Jie S., Liu Z., Wang J., Zhang S., Zhao K. Calibration of the coil constants and nonorthogonal angles of triaxial NMR coils based on in-situ EPR magnetometers. *Journal of Magnetic Resonance*, 2024, vol. 360, pp. 107634. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2024.107634>
 5. Ranjbaran M., Tehranchi M.M., Hamidi S.M., Khalkhali S.M.H. Relaxation time dependencies of optically detected magnetic resonance harmonics in highly sensitive Mx magnetometers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, vol. 469, pp. 522–530. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.09.031>
 6. Knapkiewicz P. Technological assessment of MEMS alkali vapor cells for atomic references. *Micromachines*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 25. <https://doi.org/10.3390/mi10010025>
 7. Wolters J., Buser G., Horsley A., Béguin L., Jöckel A., Jahn J.P., Warburton R.J., Treutlein P. Simple atomic quantum memory suitable for semiconductor quantum dot single photons. *Physical Review Letters*, 2017, vol. 119, no. 6, pp. 060502. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.060502>
 8. Katz O., Firstenberg O. Light storage for one second in room-temperature alkali vapor. *Nature Communications*, 2018, vol. 9, pp. 2074. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04458-4>
 9. Zugenmaier M., Dideriksen K.B., Sørensen A.S., Albrecht B., Polzik E.S. Long-lived non-classical correlations towards quantum communication at room temperature. *Communications Physics*, 2018, vol. 1, pp. 76. <https://doi.org/10.1038/s42005-018-0080-x>
 10. Kobtsev S., Radnatarov D., Khripunov S., Popkov I., Andryushkov V., Steshchenko T., Lunin V., Zarudnev Y. Feedback-controlled and digitally processed coherent population trapping resonance conversion in ^{87}Rb vapour to high-contrast resonant peak. *New Journal of Physics*, 2017, vol. 19, no. 4, pp. 043016. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/aa68b9>
 11. Chi H., Quan W., Zhang J., Zhao L., Fang J. Advances in anti-relaxation coatings of alkali-metal vapor cells. *Applied Surface Science*, 2020, vol. 501, pp. 143897. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.143897>
 12. Wang X., Li J., Liu Z., Wu Z., Shao Y. Optimizing ^{129}Xe and ^{131}Xe relaxation in an NMR gyroscope using buffer gas pressure and wall coating. *Journal of Magnetic Resonance*, 2023, vol. 352, pp. 107430. <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2023.107430>
 13. Shevchenko A.N., Zakharova E.A. Research of magnetic resonance quality factor dependence on cesium distribution in quantum rotation sensor cell. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 567–573. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2019-19-4-567-573>
 14. Woetzel S., Talkenberg F., Scholtes T., IJsselsteijn R., Schultze V., Meyer H.-G. Lifetime improvement of micro-fabricated alkali vapor cells by atomic layer deposited wall coatings. *Surface & Coatings Technology*, 2013, vol. 221, pp. 158–162. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.01.044>
 15. Gibbs J.W., Bumstead H.A., Van Name R.G., Longley W.R. *The Collected Works of J. Willard Gibbs: In two volumes*, Longmans, Green and Co., 1928.
 16. Scherbak A.G., Yulmetova O.S. Contrast image formation based on thermodynamic approach and surface laser oxidation process for optoelectronic read-out system. *Optics and Laser Technology*, 2018, vol. 101, pp. 242–247. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.11.030>
 17. Tit M.A., Yulmetova O.S., Sisyukov A.N. Analysis of niobium thin film modification based on thermodynamic approach. *Proc. of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 2020, pp. 1049–1052. <https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9038932>
 18. Yulmetova O.S., Scherbak A.G. Composition analysis of thin films formed on beryllium surfaces under pulsed laser action by the method of chemical thermodynamics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 97, no. 9-12, pp. 3231–3236. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2216-2>
 19. Tit M.A., Yulmetova O.S., Andreeva V.D., Sisyukov A.N., Yulmetova R.F. Application of niobium nitride thin films for improvement of performance characteristics of cryogenic gyroscope. *Proc. of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 2021, pp. 1232–1235. <https://doi.org/10.1109/EIConRus51938.2021.9396714>
 20. Plushchev V.E., Stepin B.D. *Chemistry and technology of lithium, rubidium and cesium compounds*. Moscow, Himija Publ., 1970, 408 p. (in Russian)

- зовых ячеек квантовых датчиков // XI конгресс молодых ученых: сборник научных трудов. Т. 1. СПб.: Университет ИТМО, 2022. С. 68–71.
22. Lebedev V., Hartwing S., Middelmann T. Fast and robust optically pumped cesium magnetometer // *Advanced Optical Technologies*. 2020. V. 9. N 5. P. 275–286. <https://doi.org/10.1515/aot-2020-0024>
 23. Bison G., Wynands R., Weis A. Optimization and performance of an optical cardiomagnetometer // *Journal of the Optical Society of America B*. 2005. V. 22. N 1. P. 77–85. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.22.000077>
 24. Fabricant A., Novikova I., Bison G. How to build a magnetometer with thermal atomic vapor: a tutorial // *New Journal of Physics*. 2023. V. 25. N 2. P. 025001. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/acb840>
 25. Вершовский А.К., Дмитриев С.П., Козлов Г.Г., Пазгалева А.С., Петренко М.В. Проекционный спиновый шум в оптических квантовых датчиках на тепловых атомах // *Журнал технической физики*. 2020. Т. 90. № 8. С. 1243–1253. <https://doi.org/10.21883/JTF.2020.08.49533.438-19>
 26. Багал Л.И. Химия и технология инициирующих взрывчатых веществ. М.: Машиностроение, 1975. 456 с.
 27. Heilmel S. Thermodynamic Properties of Cesium up to 1500°K. NASA TN D-2906. 1965. 33 p.
 28. Локшин Э.П., Воскобойников Н.Б. Рубидий и цезий = Rubidium and cesium. Апатиты: Кольский научный центр РАН, 1996. 168 с.
 29. Patton B., Ishikawa K., Jau Y.-Y., Happer W. Intrinsic impurities in glass alkali-vapor cells // *Physical Review Letters*. 2007. V. 99. N 2. P. 027601. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.99.027601>
 30. Соколов А.Н., Щедринский М.З., Бебяков В.М., Воробьев М.Г., Синькова В.А., Сухарев К.Н., Розанов Л.Н. Исследование парциальных давлений газов в вакуумном объеме с применением многофункционального высоковакуумного откачного агрегата // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2021. № 3. С. 5–10.
 31. Коровин Н.В., Масленникова Г.Н., Мингулина Э.И., Филиппов Э.Л. Курс общей химии. М.: Высшая школа, 1990. С. 109–110, 140–141.
 32. Pitz G.A., Wertepny D.E., Perram G.P. Pressure broadening and shift of the cesium D1 transition by the noble gases and N₂, H₂, HD, D₂, CH₄, C₂H₆, CF₄, and ³He // *Physical Review A*. 2009. V. 80. N 6. P. 062718. <https://doi.org/10.1103/PHYSREVA.80.062718>
 21. Vlasova M.A., Chalkov V.V., Shevchenko A.N. Special aspects of the VCSEL lasers use in an installation for monitoring the parameters of quantum sensors gas cells. *Proc. of the XI Congress of Young Scientists. Vol. 1*, St. Petersburg, ITMO University, 2022, pp. 68–71. (in Russian)
 22. Lebedev V., Hartwing S., Middelmann T. Fast and robust optically pumped cesium magnetometer. *Advanced Optical Technologies*, 2020, vol. 9, no. 5, pp. 275–286. <https://doi.org/10.1515/aot-2020-0024>
 23. Bison G., Wynands R., Weis A. Optimization and performance of an optical cardiomagnetometer. *Journal of the Optical Society of America B*, 2005, vol. 22, no. 1, pp. 77–85. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.22.000077>
 24. Fabricant A., Novikova I., Bison G. How to build a magnetometer with thermal atomic vapor: a tutorial. *New Journal of Physics*, 2023, vol. 25, no. 2, pp. 025001. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/acb840>
 25. Vershovskii A.K., Dmitriev S.P., Pazgaleva A.S., Petrenko M.V., Kozlov G.G. Projection spin noise in optical quantum sensors based on thermal atoms. *Technical Physics*, 2020, vol. 65, no. 8, pp. 1193–1203. <https://doi.org/10.1134/S1063784220080204>
 26. Bagal L.I. *Chemistry and technology of primary explosives*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, 456 p. (in Russian)
 27. Heilmel S. *Thermodynamic Properties of Cesium up to 1500°K*. NASA TN D-2906. 1965. 33 p.
 28. Lokshin E.P., Voskoboinikov N.B. *Rubidium and cesium*. Апатиты, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, 1996, 168 p. (in Russian)
 29. Patton B., Ishikawa K., Jau Y.-Y., Happer W. Intrinsic impurities in glass alkali-vapor cells. *Physical Review Letters*, 2007, vol. 99, no. 2, pp. 027601. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.99.027601>
 30. Sokolov A.N., Schedrinsky M.Z., Bebyakov V.M., Vorobev M.G., Sinkova V.A., Sukharev K.N., Rozanov L.N. Study of partial pressures of gases in vacuum chamber using multifunctional high-vacuum plant. *Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University*, 2021, no. 3, pp. 5–10. (in Russian)
 31. Korovin N.V., Maslennikova G.N., Mingulina E.I., Filippov E.L. *General chemistry course*. Moscow, Vysshaja shkola, 1990, pp. 109–110, 140–141. (in Russian)
 32. Pitz G.A., Wertepny D.E., Perram G.P. Pressure broadening and shift of the cesium D1 transition by the noble gases and N₂, H₂, HD, D₂, CH₄, C₂H₆, CF₄, and ³He. *Physical Review A*, 2009, vol. 80, no. 6, pp. 062718. <https://doi.org/10.1103/PHYSREVA.80.062718>

Авторы

Юльметова Ольга Сергеевна — доктор технических наук, начальник сектора, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация; профессор-практики, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 37068364500](https://orcid.org/0000-0001-9899-5939), <https://orcid.org/0000-0001-9899-5939>, olga@yulmetova.ru

Щербак Александр Григорьевич — доктор технических наук, начальник сектора, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация, [sc 57197817003](https://orcid.org/0000-0001-8507-7653), <https://orcid.org/0000-0001-8507-7653>, asherbak1946@gmail.com

Решетняк Полина Евгеньевна — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0008-3973-8201>, pole4ka004@gmail.com

Завитаев Александр Сергеевич — инженер-конструктор, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация; аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 58512020400](https://orcid.org/0009-0009-7035-5783), <https://orcid.org/0009-0009-7035-5783>, zav.al98@mail.ru

Шевченко Александр Николаевич — заместитель начальника лаборатории, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация, [sc 57209169813](https://orcid.org/0000-0002-6303-0544), <https://orcid.org/0000-0002-6303-0544>, Standw@yandex.ru

Юльметова Ралия Фагимовна — кандидат химических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 37036488600](https://orcid.org/0009-0008-6416-3198), <https://orcid.org/0009-0008-6416-3198>, liya@mail.ru

Authors

Olga S. Yulmetova — D.Sc., Head of Sector, Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation; Professor of Practice, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 37068364500](https://orcid.org/0000-0001-9899-5939), <https://orcid.org/0000-0001-9899-5939>, olga@yulmetova.ru

Aleksandr G. Shcherbak — D.Sc., Head of Sector, Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, [sc 57197817003](https://orcid.org/0000-0001-8507-7653), <https://orcid.org/0000-0001-8507-7653>, asherbak1946@gmail.com

Polina E. Reshetnyak — Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0008-3973-8201>, pole4ka004@gmail.com

Alexander S. Zavitaev — Design Engineer, Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation; PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 58512020400](https://orcid.org/0009-0009-7035-5783), <https://orcid.org/0009-0009-7035-5783>, zav.al98@mail.ru

Alexander N. Shevchenko — Deputy Head of Laboratory, Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, [sc 57209169813](https://orcid.org/0000-0002-6303-0544), <https://orcid.org/0000-0002-6303-0544>, Standw@yandex.ru

Raliya F. Yulmetova — PhD (Chemistry), Associate Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 37036488600](https://orcid.org/0009-0008-6416-3198), <https://orcid.org/0009-0008-6416-3198>, liya@mail.ru

Статья поступила в редакцию 03.04.2024
Одобрена после рецензирования 22.04.2024
Принята к печати 30.05.2024

Received 03.04.2024
Approved after reviewing 22.04.2024
Accepted 30.05.2024



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»