

**Импульсный разряд в парах смесей цезия с металлами**

С. В. Гавриш

*На основе результатов расчетных и экспериментальных исследований показана перспективность использования сплава цезия с рубидием в качестве плазмообразующей среды в серийных импульсных источниках ИК-излучения. Установлено, что при 25 % весовом содержании рубидия в сплаве с цезием давление паров и теплопроводность плазмы близки к указанным характеристикам серийной импульсной лампы, наполненной амальгамой цезия. Полученные результаты позволили повысить пиковую мощность излучения и создать экологически чистый импульсный источник ИК-излучения.*

*Ключевые слова:* импульсный разряд, смесь паров, цезий, рубидий, калий, ртуть, сплав, давление паров, теплопроводность, ИК-излучение.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-1-58-63

В настоящее время сформирован новый класс импульсных источников ИК-излучения с разрядом в цезий–ртуть–ксеноновой парогазовой смеси (газоразрядная лампа) для оптико-электронных систем (ОЭС) специального назначения [1, 2]. При разработке указанных газоразрядных ламп достаточно полно изучены факторы, определяющие их основные эксплуатационные параметры (пиковая сила излучения, глубина модуляции и т. д.) [3, 4]. В то же время остается актуальной задача повышения эффективности излучения импульсного разряда в ИК-диапазоне спектра для модернизации существующих изделий и создания новых ОЭС. Сегодня уже понятно, что основным компонентом плазмообразующей среды в импульсной лампе данного класса является цезий [1, 2].

Остается открытым вопрос о возможной замене ртути в составе наполнения (амальгаме цезия) импульсного источника ИК-излучения, важность которого обусловлена следующими причинами:

1. Наличие высокого потенциала ионизации у Hg (10,39 В [5]) в сравнении с цезием (3,89 В [5]) не обеспечивает высокой эффективности ИК-излучения разряда при повышении электрической мощности газоразрядной лампы.

2. Высокая токсичность ртути не позволяет создать экологически чистый газоразрядный источник модулируемого ИК-излучения.

Одним из возможных решений указанной проблемы является замена ртути на щелочные металлы с близким к цезию потенциалом ионизации, например калием (4,34 В [5]) или рубидием (4,18 В [5]). Частично данная проблема рассмотрена в работе [6], но подробного теоретического обоснования наблюдаемых явлений приведено не было.

**Теоретический аспект проблемы**

Как отмечалось выше, основными параметрами импульсного источника ИК-излучения являются пиковая сила излучения ( $I$ ), постоянная составляющая ( $I_n$ ), длительность импульса ( $t_{0,5}$ ) и глубина модуляции, рассчитываемая по формуле:  $m = [I - I_n]/I \times 100 \%$ .

Ранее в работах [1, 2] отмечалось, что указанные параметры зависят от ряда взаимосвязанных факторов:

Гавриш Сергей Викторович, нач. отдела, д.т.н.  
E-mail: svgavr@list.ru  
ООО «НПП «Мелитта».  
Россия, 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 16/10.

Статья поступила в редакцию 26 июля 2021 г.

© Гавриш С. В., 2022

1. Величина пиковой силы излучения, определяется давлением паров цезия. Данный вывод понятен, так как, чем значительнее давление паров в разряде, тем выше концентрация атомов и больше выход тормозного излучения изотермической плазмы. В свою очередь, давление паров металлов в плазмообразующей среде зависит от температуры самой холодной точки [5] разрядного объема, которая определяется рядом конструктивных параметров (диаметр и длина плазменного канала, величина заэлектродного объема и т. д.) и условий эксплуатации (электрическая мощность лампы, условия теплосъема и т. д.) газоразрядной лампы.

2. Глубина модуляции существенно зависит от непрерывного излучения разрядной оболочки, нагреваемой до высокой темпера-

туры, прежде всего, за счет теплопроводности плазмообразующей среды.

Для решения первого вопроса проведем расчетные исследования давления паров цезия в разряде при замене ртути на рубидий и калий. Для оценки давления паров используем методику расчета, учитывающую отклонения от закона Рауля при низких температурах холодной точки газоразрядной лампы [7]. Предлагаемая модель позволяет определить давления паров металлов над сплавом при различных температурах, габаритах разрядного объема и массы ртути и цезия. Полученные в результате реализации математической модели расчетные данные показаны на рис. 1. Представленные данные соответствуют сплаву в весовом соотношении 50:50, т. е. в нашем случае 5 мг цезия и 5 мг добавляемого в сплав второго компонента (Hg, Rb, K).

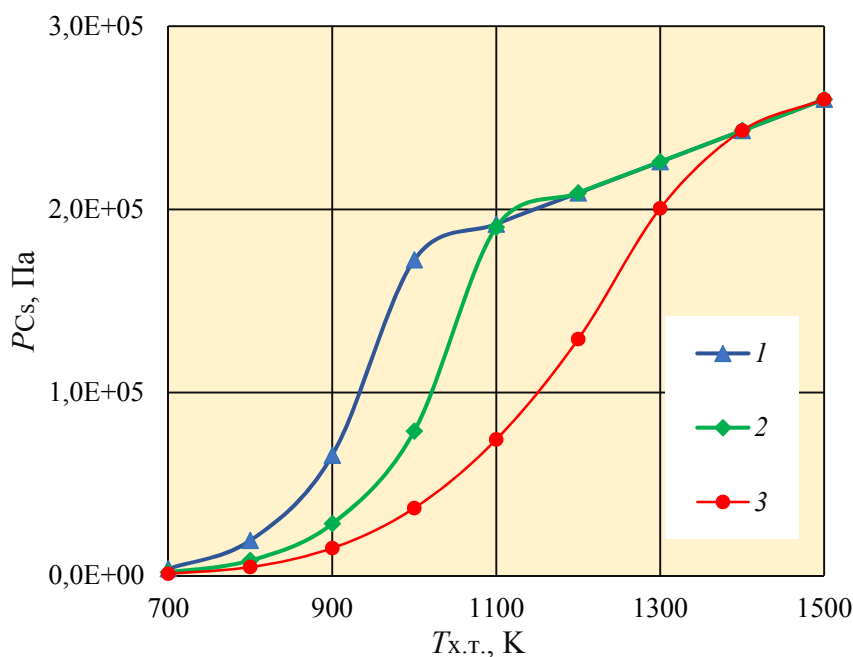


Рис. 1. Давление паров цезия над сплавами со ртутью (1), рубидием (2) и калием (3) в импульсной лампе с размерами плазменного канала: диаметр 11 мм и длина 35 мм

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать следующие заключения:

1. В процессе повышения температуры холодной точки газоразрядной лампы давление паров цезия в разряде сначала растет по экспоненциальному закону, а при достижении определенной температуры зависимость  $P_{Cs} = f(T_{х.т.})$  становится близкой к линейной. Данное явление связано с переходом импульсного разряда в насыщенных парах цезия к их ненасыщенному состоянию.

2. Для каждого сплава существует своя  $T_{х.т.}$ , при которой происходит установленное

изменение характера хода кривых. Например, в случае сплава цезий–рубидий температура перехода разряда в насыщенные пары выше на 150 К, чем в случае амальгамы цезия. Конструкция существующего серийного импульсного источника ИК-излучения позволяет реализовать такое температурное состояние холодной точки, что обеспечивает положительный эффект при введении в цезиевый сплав вместо ртути рубидия. В то время как в случае калия разность указанных температур достигает 400 К, что делает возможность такой замены проблематичной.

Вторым важным вопросом является изучение влияния замены ртути щелочным металлом на температурное состояние разрядной оболочки, определяющее глубину модуляции импульсного источника ИК-излучения. Для реализации этой цели необходимо оценить изменение теплопроводности плазмообразующей среды при предлагаемом изменении состава наполнения газоразрядной лампы.

В работе [8] разработана математическая модель расчета теплопроводности многокомпонентных парогазовых смесей, позволяющая вычислять коэффициент теплопроводности плазмообразующей среды на основе смеси паров металлов. Расчеты производятся в интервале температур 700–1500 К при фиксированной дозировке компонентов и различных конструктивных параметрах разрядной трубки. Важной особенностью данной модели является тот факт, что определение коэффициента теплопроводности парогазовой смеси проводится с учетом повышения концентрации паров цезия в разряде из заэлектродных зон лампы.

Расчетная зависимость теплопроводности плазмообразующей среды от ее компонентного состава приведена на рис. 2. Пред-

ставленные данные соответствуют сплаву в весовом соотношении 50:50, т. е. в нашем случае 5 мг цезия и 5 мг добавляемого в сплав компонента (Hg, Rb, K).

Из представленных на рисунке данных можно сделать следующие выводы:

1. Как и в случае с давлением паров цезия (рис. 1) полученная зависимость теплопроводности парогазовой смеси рассматриваемых металлов имеет нелинейный характер. Наличие минимума на кривых (рис. 2), как и в случае, показанном на рис. 1, обусловлено изменением парогазового состояния, а именно переходом разряда из насыщенных в ненасыщенные пары.

2. Наибольшую теплопроводность имеет плазмообразующая среда на основе паров цезия и калия. Данное явление связано с наличием у калия наименьшего диаметра атома из всех изучаемых комбинаций металлов и, как следствие обладающего наибольшей длиной свободного пробега в газе.

Таким образом, из рассмотренных выше результатов (рис. 1 и 2) следует, что замена ртути на рубидий наиболее эффективна для повышения эксплуатационных характеристик импульсных источников ИК-излучения.

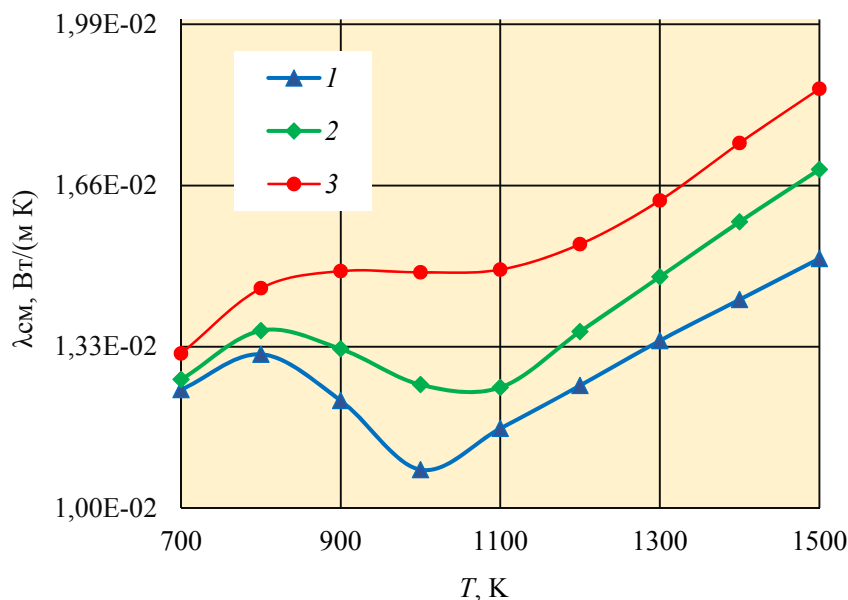


Рис. 2. Теплопроводность смеси паров цезия со ртутью (1), рубидием (2) и калием (3) в импульсной лампе с размерами плазменного канала: диаметр 11 мм и длина 35 мм

Далее оценим влияние концентрации рубидия в сплаве на давление паров цезия при работе импульсной лампы. Для реализации поставленной цели воспользуемся математической моделью, разработанной в работе [7].

При расчетах будем принимать массу цезий – рубидий сплава 10 мг постоянной величиной. На рис. 3 представлены результаты зависимости  $P_{Cs} = f(T_{х.т.})$  для различных концентраций рубидия в сплаве с цезием.

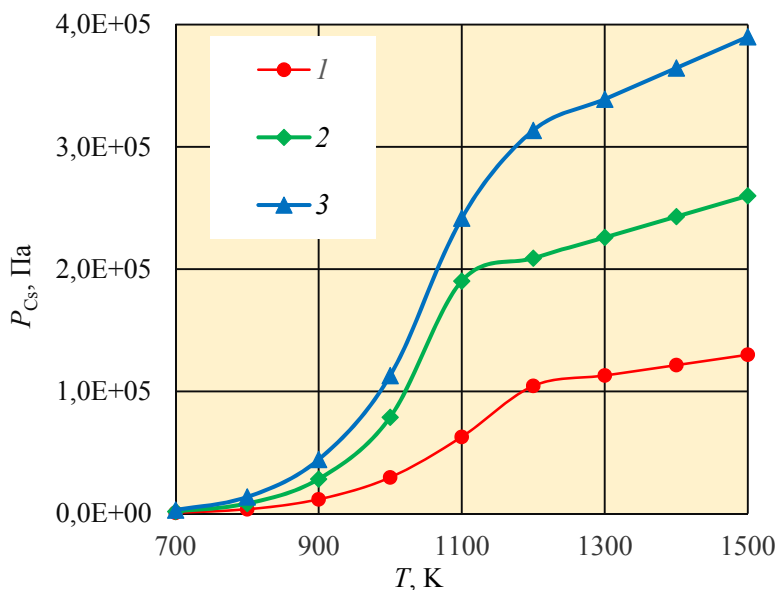


Рис. 3. Давление паров цезия над сплавами следующих составов: 2,5 мг Cs – 7,5 мг Rb (1), 5 мг Cs – 5 мг Rb (2), 7,5 мг Cs – 2,5 мг Rb (3) в импульсной лампе с размерами плазменного канала: диаметр 11 мм и длина 35 мм

Как видно из рис. 3 уменьшение массовой доли рубидия в сплаве способствует росту давления паров цезия при нагреве холодной точки. Сопоставление рис. 3 и рис. 1 показывает, что при температуре  $T_{х.т.} = 1100$  К, характерной для серийного импульсного источника ИК-излучения [1, 2], давление цезия над сплавом с рубидием на 50 кПа выше, чем это наблюдается в случае амальгамы.

Можно ожидать, что дальнейшее уменьшение дозировки рубидия в рассматриваемом сплаве приведет к большему росту давления паров цезия. Такое решение, к сожалению, невозможно сегодня реализовать по двум причинам. Во-первых, в силу существующей технологии наполнения разрядного объема разложением бихроматов щелочных металлов [1, 2] из спрессованных таблеток смеси порошков. Точность такой технологии низка для воспроизведения сплавов с малой концентрацией одного из компонентов. Во-вторых, дополнительная роль паров рубидия в разряде (кроме излучения) заключается в обеспечении градиента потенциала разряда, поэтому уменьшение его массы в плазмообразующей среде приведет к снижению электрической мощности импульсной лампы [1, 2].

### Экспериментальное подтверждение сделанных выводов

В начале данного раздела необходимо отметить, что представленные расчетные результаты и заключения полностью подтверж-

дены экспериментально в работе [6]. Поэтому ниже приведены некоторые дополнительные результаты, доказывающие правомочность сделанных в данной статье выводов.

Для экспериментальной оценки влияния состава плазмообразующей среды на ее теплопроводность были изготовлены две импульсные лампы с диаметром плазменного канала 11 мм и межэлектродным расстоянием 35 мм, которые имели различное наполнение разрядного объема, а именно, 5 мг Cs – 5 мг Rb и 5 мг Cs – 5 мг K. В обеих газоразрядных лампах в качестве пускового газа использовался ксенон при давлении в холодном состоянии 70 мм рт.ст.

Исследование продольного температурного профиля разрядной оболочки проводилось по тепловизионной методике, подробно изложенной в работе [9]. Лампы работали в схеме с транзисторным модулятором [10], позволяющем регулировать электрическую мощность импульсной лампы за счет изменения амплитуды прямоугольного импульса напряжения  $U_d$  при фиксированной его длительности 260 мкс. Измерения температур проводились при незначительной средней электрической мощности лампы 400 Вт, что позволило сопоставить температурные поля в условиях естественного охлаждения. Применение принудительного охлаждения поверхности сапфировой оболочки неизбежно привело бы к повышению погрешности измерений, связанных с характеристиками потока воздуха (скорость, расход, турбулентность и т. д.).

На рис. 4 представлено температурное поле разрядных трубок с указанным выше наполнением.

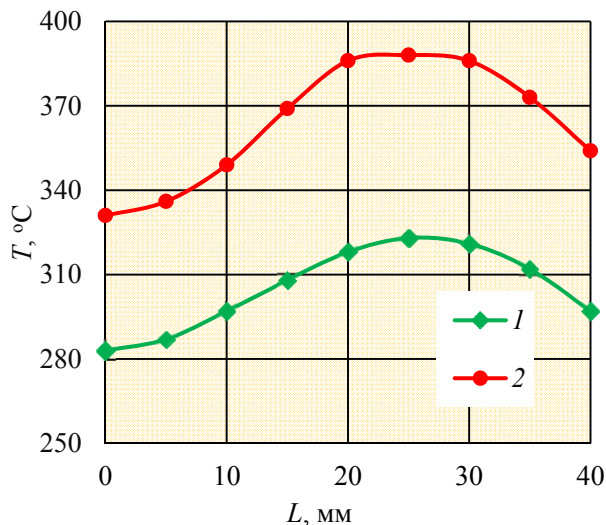


Рис. 4. Продольное распределение температуры разрядной трубки с цезий–рубидиевым (1) и цезий–калиевым (2) наполнением

Как и предполагалось, температура в центре оболочки, ограничивающей цезий–калиевый разряд, на  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$  выше, чем у импульсной лампы с цезий–рубидиевым наполнением, что подтверждает достоверность представленных на рис. 1 зависимостей. Несмотря на незначительную величину разности температур, данный параметр является существенным, так как снижается не только глубина модуляции газоразрядной лампы, но и сдвигается в область коротких волн длинноволновая граница прозрачности сапфира, сужая тем самым рабочий диапазон импульсного источника ИК-излучения [1, 2].

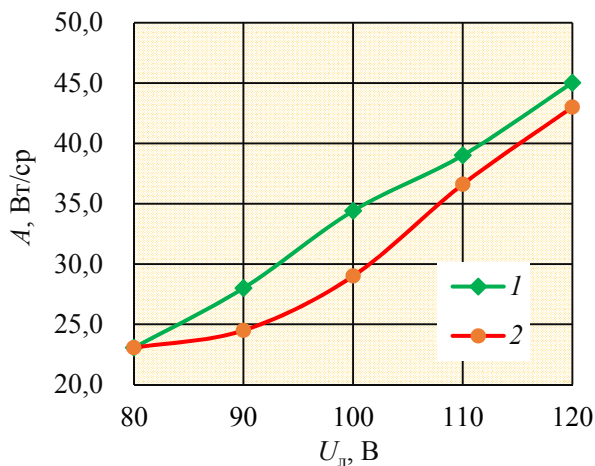


Рис. 5. Зависимость пиковой силы излучения газоразрядных ламп с цезий–рубидиевым (1) и цезий–ртутным (2) наполнением от амплитуды импульса напряжения

Рассмотрим вопрос о пиковой силе излучения  $A$  исследуемых разрядов. Как следует из рис. 1, существенного увеличения  $A$  не следует ожидать. Давление паров цезия над его сплавом с рубидием ниже, чем над амальгамой. Однако, представленные на рис. 5 данные говорят об обратном.

Возможные причины заключаются в следующем:

1. Увеличение концентрации электронов за счет соизмеримых потенциалов ионизации рассматриваемых щелочных металлов. Например, при электрической мощности лампы 400 Вт пиковое значение импульса тока в цезий–рубидиевом разряде выше на 5–10 %, чем в случае с амальгамой.

2. Согласно справочника [11] в ИК-диапазоне спектра имеются несколько достаточно интенсивных линий рубидия (4,7 мкм, 3,98 мкм) способствующих росту пиковой силы излучения в ИК-диапазоне.

В итоге, при номинальной величине амплитуды напряжения  $U_{л} = 120\text{ В}$  в случае импульсного разряда в парах смеси цезия с рубидием достигается пиковая сила излучения 45 Вт/ср в сравнении с серийным образцом источника ИК-излучения, обеспечивающим 40 Вт/ср [6].

## Заключение

В данной работе на основе расчетно-экспериментальных исследований показана перспектива замены ртути, применяемой в качестве буферного пара в современных серийных источниках ИК-излучения, на пары рубидия. Рассмотрены вопросы влияния введения калия и рубидия в состав плазмообразующей среды на давление паров цезия и теплопроводность образовавшейся парогазовой смеси при работе импульсной лампы. Доказано, что излучение разряда в цезий–рубидиевых парах не снижает основные эксплуатационные характеристики ОЭС специального назначения.

Автор выражает благодарность инженерам Петренко Н. Ю. и Кондратьеву А. Н. за оказанную помощь в проведении расчетных и экспериментальных исследований.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гавриш С. В., Логинов В. В., Пучнина С. В. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 4. С. 333.

2. Гавриш С. В., Кобзарь А. И. // Электронные информационные системы. 2019. № 2 (21). С. 43.
3. Градов В. М., Гавриш С. В., Рудаков И. В. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2017. № 6. С. 130.
4. Градов В. М., Гавриш С. В., Рудаков И. В. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2018. № 3. С. 91.
5. Рохлин Г. Н. Разрядные источники света. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
6. Логинов В. В. Исследование и разработка импульсного газоразрядного источника ИК-излучения с повышенными эксплуатационными параметрами для оптико-электронных систем: Автореф. дис. канд. тех. наук. – М., 2020. – 19 с.
7. Гаврилов С. А., Гавриш С. В., Петренко Н. Ю. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 6. С. 471.
8. Петренко Н. Ю. // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2017. № 3. С. 59.
9. Гавриш С. В., Киреев С. Г., Кугушев Д. Н. и др. // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 4. С. 251.
10. Гавриш С. В., Кобзарь А. И., Жмаев В. С. и др. // Прикладная физика. 2009. № 1. С. 53.
11. Зайдель А. Н., Прокофьев В. К., Райский С. М. Таблицы спектральных линий. – М.: Гос. Из-во Физико-теоретической литературы, 1952.

PACS: 07.50.-e

## Pulsed discharge in vapors of mixtures of cesium with metals

S. V. Gavrish

Scientific and Production Enterprise "Melitta", Ltd  
16/10 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117997, Russia  
E-mail: svgavr@list.ru

Received January 10, 2022

***Based on the results of computational and experimental studies, it is shown that the use of a cesium-rubidium alloy as a plasma-forming medium in serial pulsed sources of IR radiation is promising. It was found that at a 25 % weight content of rubidium in an alloy with cesium, the vapor pressure and thermal conductivity of the plasma are close to the specified characteristics of a serial flash lamp filled with cesium amalgam. The results obtained made it possible to increase the peak radiation power and create an environmentally friendly pulsed source of infrared radiation.***

*Keywords:* pulse discharge, mixture of vapors, cesium, rubidium, potassium, mercury, alloy, vapor pressure, thermal conductivity, IR radiation.

**DOI:** 10.51368/1996-0948-2022-1-58-63

### REFERENCES

1. S. V. Gavrish, V. V. Loginov, and S. V. Puchnina, Usp. Prikl. Fiz. **6** (4), 333 (2018).
2. S. V. Gavrish and A. I. Kobzar, Electronic information systems, No. 2 (21), 43 (2019).
3. V. M. Gradov, S. V. Gavrish, and I. V. Rudakov, Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N. E. Bauman, Priborostr., No. 6, 130 (2017).
4. V. M. Gradov, S. V. Gavrish, and I. V. Rudakov, Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N. E. Bauman, Priborostr., No. 3, 91 (2018).
5. G. N. Rokhlin, *Discharge light sources*. (Energoatomizdat, Moscow, 1991).
6. V. V. Loginov, Research and development of a pulsed gas-discharge source of infrared radiation with increased operational parameters for optoelectronic systems. Extended Abstract of Cand. Sci. Dissertation. Moscow, 2020, p. 19.
7. S. A. Gavrilov, S. V. Gavrish, and N. Yu. Petrenko, Usp. Prikl. Fiz. **6** (6), 471 (2018).
8. N. Yu. Petrenko, Defense complex – to the scientific and technical progress of Russia, No. 3, 59 (2017).
9. S. V. Gavrish, S. G. Kireev, D. N. Kugushev et al., Usp. Prikl. Fiz. **8** (4), 251 (2020).
10. S. V. Gavrish, A. I. Kobzar, V. S. Zhmaev et al., Applied Physics, No. 1, 53 (2009) [in Russian].
11. A. N. Zaidel, V. K. Prokofiev, and S. M. Raisky, *Spectral line tables*. (State Publ. Phys.-Theor. Lit., Moscow, 1952).