

Анализ вещества

Substances analysis

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-8-5-11>**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЛЕДОВ ХРОМА АТОМНО-ИОНИЗАЦИОННОМ МЕТОДОМ В ВОДНЫХ СТАНДАРТНЫХ РАСТВОРАХ И АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АТОМИЗАТОРА «СТЕРЖЕНЬ – ПЛАМЯ»**© **Актам Тошкуватович Халманов**

Самаркандский государственный университет архитектуры и строительства им. М. Улугбека, Узбекистан, 140147, Самарканд, улица Лолазор, д. 70; e-mail: a-xalmanov@umail.uz

*Статья поступила 12 января 2024 г. Поступила после доработки 17 мая 2024 г.
Принята к публикации 25 июня 2024 г.*

Настоящая работа посвящена определению следовых количеств хрома в его водных стандартных растворах и в особо чистом арсениде галлия методом атомно-ионизационной спектроскопии. Изучены одноступенчатые и двухступенчатые схемы возбуждения атомов хрома из основного $3d^5 4s^1 \ ^7S_3$ состояния в септетные состояния $3d^5 4p \ ^7P_{2,3,4}$, $3d^4 4s 4p \ ^7P_{2,3,4}$ с использованием атомизатора «стержень – пламя». Установлен механизм формирования атомно-ионизационного сигнала для двухступенчатой схемы возбуждения. Наиболее эффективными оказались двухступенчатые схемы возбуждения $\lambda_1 = 425,4$ нм, $\lambda_2 = 451,4$ нм и $\lambda_1 = 425,4$ нм, $\lambda_2 = 426,1$ нм, которым соответствует предел обнаружения хрома 50 пг/мл. Продemonстрирована возможность определения следов хрома в арсениде галлия с использованием атомизатора «стержень – пламя» на уровне $5 \cdot 10^{-7}$ %. Предложено два способа повышения селективности и чувствительности атомно-ионизационного определения хрома: оптимизация температурной программы атомизатора «стержень – пламя» и использование двухступенчатого возбуждения атомов хрома. Показано, что основным мешающим фактором является фон, связанный с ионизацией матрицы. Предложены способы уменьшения или исключения влияния матрицы, что обеспечивает прямое определение элементов в пробах.

Ключевые слова: атомизатор; «стержень – пламя»; схема возбуждения; атомизация; атомно-ионизационная спектроскопия; хром; арсенид галлия; метод добавок; влияние матрицы.

DETERMINATION OF CHROMIUM TRACES BY ATOMIC IONIZATION SPECTROSCOPY IN AQUEOUS STANDARD SOLUTIONS AND IN GALLIUM ARSENIDE USING THE “ROD – FLAME” ATOMIZATION SYSTEM© **Aktam T. Khalmanov**

M. Ulugbek Samarkand State University of Architecture and Construction, 70, Lolazor ul., Samarkand, 140147, Uzbekistan; e-mail: a-xalmanov@umail.uz

Received January 12, 2024. Revised May 17, 2024. Accepted June 25, 2024.

The results of the determination of trace amounts of chromium in aqueous standard solutions of chromium and in high purity gallium arsenide using atomic ionization spectroscopy are presented. Single — and two-step schemes of chromium atom excitation from the ground state $3d^5 4s^1 \ ^7S_3$ to septet states $3d^5 4p \ ^7P_{2,3,4}$, $3d^4 4s 4p \ ^7P_{2,3,4}$ were studied using a “rod – flame” atomizer. A mechanism of forming atomic-ionization signal for two-step excitation schemes is revealed. The most effective two step excitation schemes for chromium atoms were determined and experimentally studied at different wavelengths $\lambda_1 = 425.4$ nm, $\lambda_2 = 451.4$ nm; $\lambda_1 = 425.4$ nm, $\lambda_2 = 426.1$ nm. The low limit of chromium detection in aqueous water solutions was 50 pg/ml. The analytical potentiality of the “rod – flame” system for determining traces of chromium in gallium arsenide solutions has been demonstrated. The possibility of determining traces of chromium in gallium arsenide using a flame – rod atomizer at a level of 5×10^{-7} % is demonstrated. Two methods are proposed to increase the selectivity and sensitivity of atomic-ionization determination of chromium: optimization of the temperature program of the flame – rod atomizer and the use of two-stage

excitation of chromium atoms. It is shown that the main interfering factor is the background attributed to the matrix ionization. Methods are proposed to reduce or eliminate the matrix impact, which ensure direct determination of elements in samples.

Keywords: rod – flame atomizer; excitation scheme; atomization; atomic ionization spectroscopy; chromium; gallium arsenide; standard addition method; matrix effect.

Введение

Методы лазерной резонансно-ионизационной спектроскопии (РИС) в вакууме и атомно-ионизационной спектроскопии (АИС) в пламени основаны на эффекте увеличения степени ионизации определяемых атомов при их взаимодействии с лазерным излучением и отличаются высокой чувствительностью в связи с эффективным подавлением помех, связанных с рассеянием лазерного излучения и излучением атомизатора [1 – 4]. В работах [1 – 3, 5 – 9] приведены полные описания экспериментальных установок для методов РИС и АИС. Системы лазеров, новые высокочувствительные подходы, методы направленного термического испарения исследуемых веществ в вакууме, лазерный пробоотбор, фотоионизационный и столкновительный механизмы ионизации атомов определяемых элементов были описаны ранее [10 – 12]. В работах [13 – 17] авторы применяли современные методы лазерной спектроскопии и использовали молекулы и аэрозоли в качестве объектов исследования при решении спектроскопических и аналитических задач.

Хром, использующийся в различных областях науки и техники, является токсичным элементом, и его роль в метаболизме человека до сих пор остается малоизученной. Одна из причин этого — отсутствие надежного метода оценки концентрации хрома в организме человека. Арсенид галлия — достаточно распространенный материал, используемый в настоящее время в производстве полупроводниковых приборов. Как известно, физические свойства полупроводников в первую очередь зависят от чистоты материала, поскольку примеси создают незапрограммированные донорные и акцепторные центры, непредсказуемо изменяющие свойства полупроводника. Одной из возможных примесей в арсениде галлия является хром. Двухступенчатая схема возбуждения атомов Cr была изучена в работе [5], рассчитанный предел обнаружения хрома в водных стандартных растворах составил 1 нг/мл.

Интерес к исследованию схем возбуждения атома Cr вызван тем обстоятельством, что спектроскопические данные о его ридберговских состояниях ($n \geq 4$), лежащих на 0,9 – 1,5 эВ ниже потенциала ионизации, в литературе отсутствуют. Эти данные представляют как самостоятельный научный интерес, так и могут использовать-

ся при выборе оптимальных схем лазерной ионизации атомов Cr. В частности, определение этих схем является необходимым этапом при решении задачи высокочувствительной регистрации атомов Cr методом РИС.

Настоящая работа посвящена определению следовых количеств хрома в его водных стандартных растворах и в растворах проб арсенида галлия методом атомно-ионизационной спектроскопии. Исследованы одноступенчатая и двухступенчатая схемы возбуждения хрома в атомизаторе «стержень – пламя». Полученные результаты могут быть использованы для решения аналитических задач, в частности, для определения малых концентраций элементов в растворах, особенно чистых веществах, полупроводниковых материалах и в организме человека.

Экспериментальная часть

Схема экспериментальной установки аналогична описанной в работах [18 – 21] и состоит из следующих основных узлов: система лазеров; атомизатор и блок подготовки газов; система регистрации АИ сигнала. Излучение эксимерного лазера ($\lambda = 308$ нм, $\tau = 10$ нс, $E = 60$ мДж) использовали для накачки двух или трех переключаемых лазеров на красителях. Исследовали несколько двухступенчатых схем возбуждения атома хрома: для первой ступени возбуждения $\lambda_1 = 357,8$ нм (краситель — оксазин-1) энергия импульса после удвоения составляла $E_1 = 35$ мкДж; для второй ступени $\lambda_2 = 530,4$ нм (краситель — кумарин-153) энергия в импульсе $E_2 = 0,7$ мДж. Данные по остальным схемам приведены в табл. 1.

Предварительные эксперименты были выполнены в пламени ацетилен-воздух для эффективной атомизации и ионизации атомов Cr. Расход газов составлял 0,3 и 1,8 л/мин соответственно. Полученные свободные атомы взаимодействуют с резонансным излучением лазера на красителях, образовавшиеся ионы собирают с помощью двух параллельных электродов, один из которых был заземлен, а другой имел потенциал – 1,3 кВ. Расстояние между электродами — 10 мм.

Модельные растворы хрома готовили путем растворения дихромата калия $K_2Cr_2O_7$ в деионизованной воде, перед применением растворы подщелачивали. Были использованы чистые вод-

Таблица 2. Зависимость атомно-ионизационного сигнала от концентрации хрома ($n = 10$; $P = 0,95$)

Table 2. Dependence of the atomic ionization signal on the chromium concentration ($n = 10$; $P = 0.95$)

Введено Cr, нг/мл	U, мВ	Найдено Cr, нг/мл	S_r
10,0	0,45	$9,7 \pm 0,4$	0,05
100,0	4,40	$99,5 \pm 0,9$	0,02
1000,0	42,7	1020 ± 22	0,03

ные стандартные растворы с концентрацией хрома 10 нг/мл – 1 мг/мл для построения градуировочной зависимости при использовании атомизатора «стержень – пламя».

В наших предыдущих работах показано, что чувствительность и селективность атомно-ионизационного метода зависят от схем возбуждения исследуемых атомов [4, 7, 11, 18]. Основным состоянием хрома является $3d^54s\ ^7S_3$. Хром имеет 6 валентных электронов, находящихся в синглетных, триплетных, квинтетных и септетных состояниях [5]. Существует только три типа состояний, которые могут быть возбуждены из основного: 1) $3d^54p\ ^7P_{2,3,4}$ — состояния имеют энергию $\sim 23\,400\text{ см}^{-1}$, длина волны излучения для их возбуждения составляет 425 – 429 нм; 2) $3d^44s4p\ ^7P_{2,3,4}$ — состояния имеют энергию $\sim 27\,800\text{ см}^{-1}$, $\lambda = 357 - 361\text{ нм}$; 3) $3d^55p\ ^7P_{2,3,4}$ — состояния имеют энергию $\sim 42\,250\text{ см}^{-1}$, $\lambda = 236 - 237\text{ нм}$.

Обсуждение результатов

В одноступенчатой схеме мы исследовали АИ сигнал при резонансном возбуждении из основного состояния различных $3d^44s4p\ ^7P_{2,3,4}$ и $3d^54p\ ^7P_{2,3,4}$ состояний атомов хрома, для которых силы осцилляторов переходов главной серии известны [18]. На рис. 1 приведена возможная двухступенчатая схема возбуждения атома хрома с использованием септетных состояний.

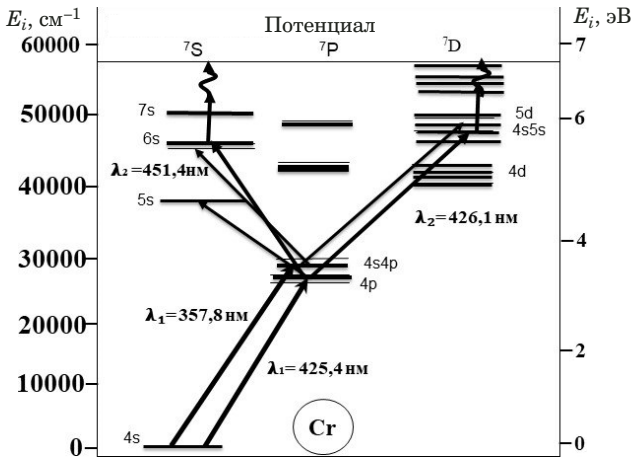


Рис. 1. Двухступенчатые схемы возбуждения атома хрома

Fig. 1. Two-stage schemes of the chromium atom excitation

Первоначально оптимизировали расход горючего газа и окислителя и напряжение на электроде. Температурная программа атомизатора была следующей: сушка на стержне в течение 50 с при 90 °С без пламени и испарение 10 мкл пробы из центра углубления стержня при 1800 °С в течение 6 с. В диапазоне концентраций хрома $10^{-1} - 10^3$ нг/мл была получена линейная градуировочная характеристика. Предел обнаружения хрома по этой схеме для объема пробы 10 мкл составляет 150 нг/мл. Зависимость атомно-ионизационного сигнала (U) от концентрации хрома приведена в табл. 2.

Были изучены различные схемы возбуждения атомов хрома в ридберговские состояния (табл. 3). Как видно из табл. 3, самый низкий предел обнаружения получен по схемам $3d^54s\ ^7S_3 \rightarrow 3d^54p\ ^7P_4 \rightarrow 3d^56s\ ^7S_3$ и $3d^54s\ ^7S_3 \rightarrow 3d^54p\ ^7P_4 \rightarrow 3d^44s5s\ ^7D_5$; для объема пробы 10 мкл он составил 50 нг/мл.

Исследовали зависимость амплитуды ионизационного сигнала от энергии излучения лазера

Таблица 1. Схемы возбуждения атомов хрома и характеристики лазеров на красителях

Table 1. Schemes of the chromium atom excitation and characteristics of dye lasers

Первая ступень возбуждения, λ_1 , нм	Краситель	Энергия импульса, E_1 , мДж	Вторая ступень возбуждения, λ_2 , нм	Краситель	Энергия импульса, E_2 , мДж
357,8	Оксазин-1	35	530,4	Кумарин-153	0,7
425,4	Кумарин-120	0,6	532,8	Кумарин-153	0,9
425,4	Кумарин-120	0,6	451,4	Кумарин-47	1,2
425,4	Кумарин-120	0,6	426,1	Кумарин-120	0,62
427,4	Кумарин-120	0,61	427,3	Кумарин-120	0,67
428,9	Кумарин-120	0,62	430,5	Кумарин-120	0,75
428,9	Кумарин-120	0,62	431,9	Кумарин-120	0,8
427,5	Кумарин-120	0,61	740,0	ЛК-703	30 мкДж

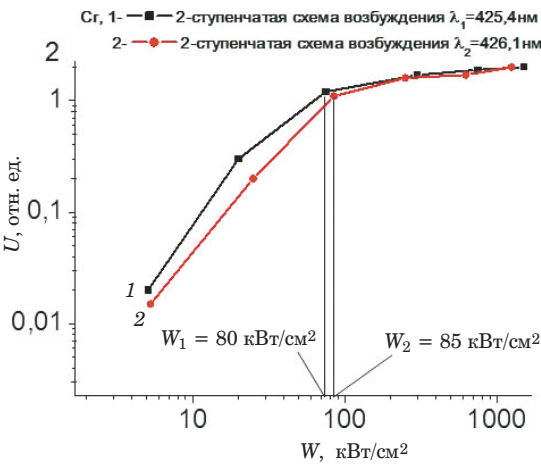


Рис. 2. Зависимость интенсивности ионизационных сигналов (U_i) от плотности мощности лазерного излучения (W)

Fig. 2. Dependence of the intensity of ionization signals (U_i) on the power density of laser radiation (W)

на красителях. Лазерные лучи имеют относительно большие диаметры (~ 2 мм). Для всех схем возбуждения проверено насыщение ионизационного сигнала. Насыщение сигнала ионизации наблюдалось для одноступенчатого возбуждения $3d^5 4s \ ^7S_3 \rightarrow 3d^5 4p \ ^7P_{2,3,4}$, $3d^5 4s \ ^7S_3 \rightarrow 3d^4 4s 4p \ ^7P_{2,3,4}$. При этом плотность мощности излучения первого лазера составляла $700 - 1500$ кВт/см² для импульса длительностью 10 нс. Поскольку заселенность того или иного энергетического уровня пропорциональна интенсивности лазерного излучения, которая меняется при изменении длины волны генерации, проводили нормировку АИ-сигналов на соответствующую мощность возбуждающего лазерного излучения.

Исследовали эффективность возбуждения и ионизации атомов хрома в двухступенчатой схеме. В случае столкновительной ионизации парт-

Таблица 3. Схемы возбуждения атомов хрома из основного состояния ($3d^5 4s \ ^7S_3$) и пределы обнаружения в водных растворах

Table 3. Excitation transitions for chromium atoms from the ground state ($3d^5 4s \ ^7S_3$) and detection limit in aqueous solutions

Длина волны возбуждения, нм	Верхнее состояние	Энергии возбуждения для первой и второй ступеней, E_1, E_2		Разница энергий, $\Delta E = \text{ПИ} - E_{\text{возб}}$ ($\text{ПИ} = 54\,565 \text{ см}^{-1} = 6,76 \text{ эВ}$)		Предел обнаружения (атомизатор «стержень – пламя»), C_n , нг/мл
		см ⁻¹	эВ	см ⁻¹	эВ	
$\lambda_1 = 357,8$	$3d^4 4s 4p \ ^7P_4$	27 935	3,46	7 782	0,96	150
$\lambda_2 = 530,4$	$3d^4 4s 5s \ ^7D_4$	46 783	2,34			
$\lambda_1 = 359,3$	$3d^4 4s 4p \ ^7P_3$	27 820	3,45	7 928	0,99	200
$\lambda_2 = 531,2$	$3d^4 4s 5s \ ^7D_3$	46 637	2,33			
$\lambda_1 = 360,5$	$3d^4 4s 4p \ ^7P_2$	27 729	3,44	8 040	1,00	250
$\lambda_2 = 531,8$	$3d^4 4s 5s \ ^7D_2$	46 525	2,33			
$\lambda_1 = 425,4$	$3d^5 4p \ ^7P_4$	23 499	2,91	8 922	1,10	50
$\lambda_2 = 451,4$	$3d^5 6s \ ^7S_3$	45 643	2,75			
$\lambda_1 = 425,4$	$3d^5 4p \ ^7P_4$	23 499	2,91	7 606	0,94	50
$\lambda_2 = 426,1$	$3d^4 4s 5s \ ^7D_5$	46 959	2,9			
$\lambda_1 = 425,4$	$3d^5 4p \ ^7P_4$	23 499	2,91	12 304	1,52	1500
$\lambda_2 = 532,8$	$3d^5 4d \ ^7D_5$	42 261	2,32			
$\lambda_1 = 425,4$	$3d^5 4p \ ^7P_4$	23 499	2,91	12 309	1,53	1400
$\lambda_2 = 533$	$3d^5 4d \ ^7D_3$	42 256	2,33			
$\lambda_1 = 427,5$	$3d^5 4p \ ^7P_3$	23 386	2,90	7 782	0,96	150
$\lambda_2 = 427,3$	$3d^4 4s 5s \ ^7D_5$	46 783	2,90			
$\lambda_1 = 427,5$	$3d^5 4p \ ^7P_3$	23 386	2,90	17 669	2,18	500
$\lambda_2 = 740,0$	$3d^5 \ 5s \ ^7S_3$	46 783	1,68			
$\lambda_1 = 427,5$	$3d^5 4p \ ^7P_3$	23 386	2,90	12 307	1,52	400
$\lambda_2 = 529,7$	$3d^5 4d \ ^7D_3$	42 258	2,34			
$\lambda_1 = 428,9$	$3d^5 4p \ ^7P_2$	23 305	2,89	8 040	0,99	1000
$\lambda_2 = 430,5$	$3d^4 4s 5s \ ^7D_2$	46 525	2,88			
$\lambda_1 = 428,9$	$3d^5 4p \ ^7P_2$	23 305	2,89	8 116	1,01	1000
$\lambda_2 = 431,9$	$3d^4 4s 5s \ ^7D_1$	46 449	2,87			
$\lambda_1 = 428,9$	$3d^5 4p \ ^7P_2$	23 305	2,89	12 312	1,53	1400
$\lambda_2 = 527,6$	$3d^5 4d \ ^7D_1$	42 253,4	2,35			

нерами по столкновениям в пламени с возбужденными атомами могут быть электроны, атомы, возбужденные лазерным излучением, или частицы, возбужденные термически.

Известно, что в пламенах при атмосферном давлении число частиц составляет примерно 10^{18} см^{-3} , а число газокинетических столкновений возбужденного атома A^* с другими частицами — приблизительно 10^9 с^{-1} [3]. Наиболее вероятными партнерами по столкновениям с частицей A^* будут атомы и молекулы продуктов сгорания, а также молекулы азота, всегда присутствующие в пламенах, горящих на воздухе, и составляющие большую долю общей концентрации частиц в пламени.

Используемые в двухступенчатых схемах возбуждения септетные состояния атома хрома (см. рис. 1) соответствуют основным квантовым числам $n = 6$ или $n = 5$. Амплитуды АИ сигналов при двухступенчатом возбуждении оказываются приблизительно в 50 раз больше, чем при одноступенчатом. Наблюдалось насыщение сигнала ионизации для вторых ступеней возбуждения, когда $E_2 = 0,9 \text{ мДж}$, что соответствует плотности мощности 1500 кВт/см^2 . Атомы хрома возбуждали в режиме оптического насыщения переходов по первой и второй ступеням (рис. 2). Соответствующие плотности мощности насыщения переходов в пламени C_2H_2 – воздух составляли: для первой ступени — 80 кВт/см^2 , для второй — 85 кВт/см^2 . Для достижения высокой эффективности процессов возбуждения и ионизации не обязательно возбуждать атомы в состояния, близкие к потенциалу ионизации. В условиях оптического насыщения переходов можно реализовать схемы столкновительной ионизации атомов, которая происходит даже с уровней, лежащих на $0,9 - 1,3 \text{ эВ}$ ниже потенциала ионизации.

Определение хрома в арсениде галлия методом атомно-ионизационной спектроскопии с атомизатором «стержень – пламя». Навеску арсенида галлия массой $0,5 \text{ г}$ измельчали в яшмовой ступке и растворяли в тефлоновой посуде в 2 %-ной HNO_3 . Образующийся серый творожистый осадок исчезает только при нагревании. Далее добавляли 10 капель концентрированной HCl и упаривали до влажных солей. Влажные соли растворяли в $0,5 \text{ М HNO}_3$. Полученный раствор соответствовал содержанию арсенида галлия 10 г/л . Исследовали влияние основы пробы на аналитический сигнал хрома: для этого были приготовлены модельные растворы, соответствующие содержанию GaAs 10 г/л и содержащие $30, 60$ и 100 нг/мл хрома. Определение хрома проводили методом добавок. Для определения хрома использовали двухступенчатые схемы возбуждения с $\lambda_1 = 425,4 \text{ нм}$, $\lambda_2 = 451,4 \text{ нм}$ и режим оптического насыщения по первой ступени. Оп-

Таблица 4. Результаты определения хрома в арсениде галлия методом атомно-ионизационной спектроскопии ($n = 10$; $P = 0,95$; $t = 2,26$)

Table 4. Results of chromium determination in gallium arsenide by atomic ionization spectroscopy ($n = 10$; $P = 0,95$; $t = 2.26$)

$U, \text{ мВ}$		Найдено Cr ($x \pm \Delta x$) · $10^{-3} \%$	S_r
Cr, $C = 100 \text{ нг/мл}$	GaAs, $C = 1 \text{ г/л}$		
2,27	0,956	$4,26 \pm 0,14$	0,047

тимальные режимы нагрева стержня были следующими: сушка на стержне в течение 50 с при 90°C без пламени, предварительный нагрев при $700 - 1400^\circ \text{C}$ в течение 20 с и рабочий режим (испарение пробы) при $1400 - 1800^\circ \text{C}$ в течение 15 с . Таким образом, было установлено, что при массовом отношении основа пробы — определяемый элемент $10^8:1$ не обнаружено подавления сигнала хрома. Фон от основы, наблюдаемый при отстройке от линии поглощения хрома, не зафиксирован. Поэтому предел обнаружения хрома в арсениде галлия определяется, как и в случае водных растворов хрома, шумами системы регистрации и составляет $5 \cdot 10^{-7} \%$.

Определять микропримесь хрома в арсениде галлия можно по градуировочным графикам, построенным с использованием водных растворов хрома в диапазоне концентраций $1 - 100 \text{ нг/мл}$, или методом добавок. При анализе контрольных растворов был обнаружен фоновый сигнал. Измерение фонового сигнала проводили путем отстройки первой ступени возбуждения от линии хрома, что дает возможность уменьшить сигнал хрома на два порядка величины. Такая операция позволила оценить фоновый сигнал в контрольном растворе как соответствующий концентрации хрома 5 нг/мл .

Разработанную методику можно использовать для анализа арсенида галлия особой чистоты. Результаты анализа приведены в табл. 4. Каждое значение в таблице представляет собой среднее 10 параллельных измерений при суммировании 60 импульсов в каждом измерении.

Заключение

Исследована возможность применения атомно-ионизационного анализа для определения хрома в арсениде галлия. Предел обнаружения хрома в арсениде галлия составляет $5 \cdot 10^{-7} \%$. Сходимость результатов параллельных определений характеризуется относительным стандартным отклонением $S_r = 0,02 - 0,05$.

В результате экспериментально найдены эффективные схемы возбуждения атома хрома. Полученные результаты показывают, что АИ метод

с атомизацией в системе «стержень – пламя» может быть использован для исследования процессов возбуждения, ионизации, определения низких концентраций изучаемых атомов и прямого определения элементов в различных объектах. Этот метод может быть также применен для исследования и нахождения ридберговских состояний атомов.

Благодарности

Автор выражает признательность О. И. Матвееву за плодотворное сотрудничество и поддержку работы.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Большаков А. А., Ганеев А. А., Немец В. М.** Перспективы аналитической атомной спектроскопии / *Успехи химии*. 2006. Т. 75. № 4. С. 322 – 338. DOI: 10.1070/RC2006v075n04ABEH001174
2. **Fedosseev V. N., Kudryavtsev Yu., Mishin V. I.** Resonance laser ionization of atoms for nuclear physics / *Phys. Scr.* 2012. Vol. 85. N 5. 058104. DOI: 10.1088/0031-8949/85/05/058104
3. **Зоров Н. Б., Кузяков Ю. Я., Новодворский О. А., Чаплыгин В. И.** Оптикогальванический эффект в пламенах атмосферного давления: в сб. «Химия плазмы». — М.: Энергоатомиздат, 1987. С. 131 – 163.
4. **Khalmanov A. T., Ko D. K., Lee J., et al.** Study of Traces of Au and Ag Atoms by Resonant Laser Stepwise Ionization Spectroscopy / *J. Korean Phys. Soc.* 2004. Vol. 44. N 4. P. 843 – 848.
5. **Axner O., Rubinztein-Dunlor H.** Detection of trace amounts of Cr by two laser-based spectroscopic techniques: laser-enhanced ionization in flames and laser-induced fluorescence in graphite furnace / *Appl. Opt.* 1993. Vol. 32. N 6. P. 867 – 884. DOI: 10.1364/AO.32.000867
6. **Balykin V. I.** The scientific career of V. S. Letokhov (10 November 1939 – 21 March 2009) / *Phys. Scr.* 2012. Vol. 85. N 5. 050302. DOI: 10.1088/0031-8949/85/05/050302
7. **Chekalin N. V., Khalmanov A., Marunkov A. G., et al.** Determination of Co, Cr, Mn and Ni traces in fluorine containing materials for optical fibers using laser enhanced ionization techniques with flame and rod – flame atomizers / *Spectrochim. Acta, Part B*. 1995. Vol. 50. N 8. P. 753 – 761. DOI: 10.1016/0584-8547(94)00168-U
8. **Temirov J. P., Chigarev N. V., Matveev O. I., et al.** Dual-wavelength time-resolved resonance ionization imaging with cesium and mercury vapors / *Appl. Spectrosc.* 2004. Vol. 58. N 8. P. 1020 – 1022. DOI: 10.1366/0003702041655485
9. **Nadeem A., Haq S. U.** Oscillator strength measurements of the $5s5p^3P_1 \rightarrow 5snd^3D_2$ Rydberg transitions of cadmium / *Spectrochim. Acta, Part B*. 2010. Vol. 65. N 9 – 10. P. 842 – 846. DOI: 10.1016/j.sab.2010.07.004
10. **Горбатенко А. А., Ревина Е. И.** Лазерный проботбор / *Успехи химии*. 2015. Т. 84. № 10. С. 1051 – 1058. DOI: 10.1070/RCR4543
11. **Khalmanov A. T., Khamraev Kh. S., Tursunov A. T., Tukhlibaev O.** Study of traces of elements on a universal laser photoionization spectrometer / *Opt. Spectrosc.* 2001. Vol. 90. N 3. P. 344 – 347. DOI: 10.1134/1.1358438
12. **Горбатенко А. А., Воронина Р. Д., Любомирова О. Р., Ревина Е. И.** Лазерная молекулярно-ионизационная спектроскопия BaO и LuO в низкотемпературном пламени /

- Вестн. Моск. ун-та. Серия 2. Химия. 2007. Т. 48. № 5. С. 357 – 360.
13. **Khalmanov A., Ernazarov Sh., Muxamedov A., Toshkuvatova N.** Investigation of laser remote identification of the plant state / *Theor. Appl. Sci.* 2020. N 12(92). P. 75 – 82. DOI: 10.15863/TAS.2020.12.92.16
 14. **Sherer J. J., Paul J. B., O'Keefe A., Saykally J.** Cavity Ringdown Laser Absorption Spectroscopy: History, Development, and Application to Pulsed Molecular Beams / *Chem. Rev.* 1997. Vol. 97. N 1. P. 25 – 52. DOI: 10.1021/cr930048d
 15. **Bulatov V., Yuheng Chen, Khalmanov A., Schechter I.** Absorption and scattering characterization of airborne micro-particulates by a cavity ringdown technique / *Anal. Bioanal. Chem.* 2006. Vol. 384. N 1. P. 155 – 160. DOI: 10.1007/s00216-005-0173-8
 16. **Bulatov V., Khalmanov A., Schechter I.** Study of the morphology of a laser-produced aerosol plume by cavity ringdown laser absorption spectroscopy / *Anal. Bioanal. Chem.* 2003. Vol. 375. N 8. P. 1282 – 1286. DOI: 10.1007/s00216-003-1775-7
 17. **Khalmanov A., Boboev S., Burxonov X.** Calculation of a polluting substance released into the atmosphere from asphalt-concrete plants / *Theor. Appl. Sci.* 2019. Vol. 76. N 8. P. 246 – 249. DOI: 10.15863/TAS.2019.08.76.34
 18. **Халманов А. Т., Топкуватова Н.** Современные методы идентификации атомов, молекул и аэрозолей в различных объектах / *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2023. Т. 89. № 6. С. 23 – 34. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-6-23-34
 19. **Халманов А. Т., Хамраев Х. С.** Лазерный атомно-ионизационный спектрометр в пламени / *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2001. Т. 67. № 10. С. 16 – 19.
 20. **Khalmanov A. T., Aymatov R., Turdikulov B.** Optimization of the ventilation system and gas supply in the process of burning / *Theor. Appl. Sci.* 2021. Vol. 101. N 9. P. 254 – 258. DOI: 10.15863/TAS.2021.09.101.19
 21. **Khalmanov A.** Laser spectroscopy of ultra-small concentration of atoms and aerosols in various phase states of substance / *Theor. Appl. Sci.* 2019. Vol. 75. N 7. P. 225 – 239. DOI: 10.15863/TAS.2019.07.75.38

REFERENCES

1. **Bol'shakov A. A., Ganeev A. A., Nemets V. M.** Prospects in analytical atomic spectrometry / *Russ. Chem. Rev.* 2006. Vol. 75. N 4. P. 289 – 302. DOI: 10.1070/RC2006v075n04ABEH001174
2. **Fedosseev V. N., Kudryavtsev Yu., Mishin V. I.** Resonance laser ionization of atoms for nuclear physics / *Phys. Scr.* 2012. Vol. 85. N 5. 058104. DOI: 10.1088/0031-8949/85/05/058104
3. **Zorov N. B., Kuzyakov Yu. Ya., Novodvorski O. A., Chaplygin V. I.** Optogalvanic effect in atmospheric pressure discharges: in the book “Plasma Chemistry”. — Moscow: Energoatomizdat, 1987. P. 131 – 163 [in Russian].
4. **Khalmanov A. T., Ko D. K., Lee J., et al.** Study of Traces of Au and Ag Atoms by Resonant Laser Stepwise Ionization Spectroscopy / *J. Korean Phys. Soc.* 2004. Vol. 44. N 4. P. 843 – 848.
5. **Axner O., Rubinztein-Dunlor H.** Detection of trace amounts of Cr by two laser-based spectroscopic techniques: laser-enhanced ionization in flames and laser-induced fluorescence in graphite furnace / *Appl. Opt.* 1993. Vol. 32. N 6. P. 867 – 884. DOI: 10.1364/AO.32.000867
6. **Balykin V. I.** The scientific career of V. S. Letokhov (10 November 1939 – 21 March 2009) / *Phys. Scr.* 2012. Vol. 85. N 5. 050302. DOI: 10.1088/0031-8949/85/05/050302
7. **Chekalin N. V., Khalmanov A., Marunkov A. G., et al.** Determination of Co, Cr, Mn and Ni traces in fluorine containing materials for optical fibers using laser enhanced ionization techniques with flame and rod – flame atomizers / *Spectrochim. Acta, Part B*. 1995. Vol. 50. N 8. P. 753 – 761. DOI: 10.1016/0584-8547(94)00168-U
8. **Temirov J. P., Chigarev N. V., Matveev O. I., et al.** Dual-wavelength time-resolved resonance ionization imaging

- with cesium and mercury vapors / *Appl. Spectrosc.* 2004. Vol. 58. N 8. P. 1020 – 1022. DOI: 10.1366/0003702041655485
9. **Nadeem A., Haq S. U.** Oscillator strength measurements of the $5s5p^3P_1 \rightarrow 5snd^3D_2$ Rydberg transitions of cadmium / *Spectrochim. Acta, Part B.* 2010. Vol. 65. N 9 – 10. P. 842 – 846. DOI: 10.1016/j.sab.2010.07.004
10. **Gorbatenko A. A., Revina E. I.** Laser sampling / *Russ. Chem. Rev.* 2015. Vol. 84. N 10. P. 1051 – 1058. DOI: 10.1070/RCR4543
11. **Khalmanov A. T., Khamraev Kh. S., Tursunov A. T., Tukhlibaev O.** Study of traces of elements on a universal laser photoionization spectrometer / *Opt. Spectrosc.* 2001. Vol. 90. N 3. P. 344 – 347. DOI: 10.1134/1.1358438
12. **Gorbatenko A. A., Voronina R. D., Lyubomirova O. R., Revina E. I.** Laser molecular ionization spectrometry of BaO and LuO in a low-temperature flame / *Vestn. Mosk. Univ. Ser. 2. Khimiya.* 2007. Vol. 48. N 5. P. 357 – 360 [in Russian].
13. **Khalmanov A., Ernazarov Sh., Muxamedov A., Toshkuvatova N.** Investigation of laser remote identification of the plant state / *Theor. Appl. Sci.* 2020. N 12(92). P. 75 – 82. DOI: 10.15863/TAS.2020.12.92.16
14. **Sherer J. J., Paul J. B., O'Keefe A., Saykally J.** Cavity Ringdown Laser Absorption Spectroscopy: History, Development, and Application to Pulsed Molecular Beams / *Chem. Rev.* 1997. Vol. 97. N 1. P. 25 – 52. DOI: 10.1021/cr930048d
15. **Bulatov V., Yuheng Chen, Khalmanov A., Schechter I.** Absorption and scattering characterization of airborne micro-particulates by a cavity ringdown technique / *Anal. Bioanal. Chem.* 2006. Vol. 384. N 1. P. 155 – 160. DOI: 10.1007/s00216-005-0173-8
16. **Bulatov V., Khalmanov A., Schechter I.** Study of the morphology of a laser-produced aerosol plume by cavity ringdown laser absorption spectroscopy / *Anal. Bioanal. Chem.* 2003. Vol. 375. N 8. P. 1282 – 1286. DOI: 10.1007/s00216-003-1775-7
17. **Khalmanov A., Boboev S., Burxonov X.** Calculation of a polluting substance released into the atmosphere from asphalt-concrete plants / *Theor. Appl. Sci.* 2019. Vol. 76. N 8. P. 246 – 249. DOI: 10.15863/TAS.2019.08.76.34
18. **Khalmanov A. T., Toshkuvatova N.** Modern methods for identification of atoms, molecules, and aerosols in various objects / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2023. Vol. 89. N 6. P. 23 – 34 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-6-23-34
19. **Khalmanov A. T., Khamraev Kh. S.** Laser atomic ionization spectrometer in flame / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2001. Vol. 67. N 10. P. 16 – 19 [in Russian].
20. **Khalmanov A. T., Aymatov R., Turdikulov B.** Optimization of the ventilation system and gas supply in the process of burning / *Theor. Appl. Sci.* 2021. Vol. 101. N 9. P. 254 – 258. DOI: 10.15863/TAS.2021.09.101.19
21. **Khalmanov A.** Laser spectroscopy of ultra-small concentration of atoms and aerosols in various phase states of substance / *Theor. Appl. Sci.* 2019. Vol. 75. N 7. P. 225 – 239. DOI: 10.15863/TAS.2019.07.75.38