

Impact Factor:

ISRA (India) = 3.117
ISI (Dubai, UAE) = 0.829
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
PIIHU (Russia) = 0.156
ESJI (KZ) = 8.716
SJIF (Morocco) = 5.667

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

SOI: [1.1/TAS](#) DOI: [10.15863/TAS](#)

International Scientific Journal Theoretical & Applied Science

p-ISSN: 2308-4944 (print) e-ISSN: 2409-0085 (online)

Year: 2019 Issue: 07 Volume: 75

Published: 22.07.2019 <http://T-Science.org>

QR – Issue



QR – Article



Aktam Khalmanov
Samarkand State Architectural and construction institute named after Mirzo Ulugbek
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Docent to department of heat-gas supply
ventilation and service, Samarkand, Uzbekistan,
xolmonov@rambler.ru a-xalmanov@umail.uz

LASER SPECTROSCOPY OF ULTRA-SMALL CONCENTRATION OF ATOMS AND AEROSOLS IN VARIOUS PHASE STATES OF SUBSTANCE

Abstract: In this work it is given studying of dynamics and types of physical processes with excited atoms and molecules in atomizer of "graphite furnace". Physical mechanism of increasing atomic-ionization signal for two stepwise excitation schemes was shown. It is shown that the maximum signal is observed for In atoms at the transition $5p^2P_{3/2} \rightarrow 6s^2S_{3/2} \rightarrow 8p^2P_{1/2}$ and for Li, Na, Ag, Au, Pt atoms at the transition $(n)s \rightarrow (m)p \rightarrow (k)d$ respectively (where n , k , m and f principal quantum numbers of states). In the result in the experiment photoionization collisional ionization and mechanisms were developed. The results are shown that the collisional ionization process is the dominant mechanism. In the work were used different atomizers, as «flame», «rod-flame» and « laser atomizer». For the first time new parameters of aerosols on physical and chemical properties of aerosol plumes from solid surfaces and aerosols of salt of metals and organic aerosols are revealed.

Key words: atom, ionization signal, non-absorbing aerosols, ringdown time, optical resonator.

Language: Russian

Citation: Khalmanov, A. (2019). Laser spectroscopy of ultra-small concentration of atoms and aerosols in various phase states of substance. *ISJ Theoretical & Applied Science*, 07 (75), 225-239.

Soi: <http://s-o-i.org/1.1/TAS-07-75-38> **Doi:** <https://dx.doi.org/10.15863/TAS.2019.07.75.38>

Classifiers: Nanotechnology. Physics.

ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ УЛЬТРАМАЛЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ АТОМОВ И АЭРОЗОЛЕЙ В РАЗЛИЧНЫХ ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЯХ ВЕЩЕСТВА

Аннотация: В данной статье приведены результаты исследования динамики и типов физических процессов с возбужденными атомами и молекулами в атомизаторе «Графитовая печь». Показан физический механизм увеличения атомно-ионизационного сигнала для двухступенчатой схемы возбуждения. Показано, что максимальный сигнал наблюдается для атомов In при переходе $5p^2P_{3/2} \rightarrow 6s^2S_{3/2} \rightarrow 8p^2P_{1/2}$ и для атомов Li, Na, Ag, Au, Pt при переходе $(n)s \rightarrow (m)p \rightarrow (k)d$ соответственно (где n , k , m и f главные квантовые числа уровней). В результате эксперимента разработаны фотоионизационный и столкновительный механизмы ионизации. Полученные результаты показывают, что столкновительный механизм ионизации является доминирующим процессом. В работе использованы различные атомизаторы типа «пламя», «стержень-пламя» и «лазерная атомизация». Впервые выявлены новые параметры аэрозолей по физико-химическим свойствам аэрозольных факелом от твердых поверхностей и аэрозолей соли металлом и органических аэрозолей.

Ключевые слова: атом, ионизационный сигнал, прозрачные аэрозоли, время затухания, оптический резонатор.

Введение.

В современном мире разработка новых аналитических методов определения

ультранизких содержаний элементов в различных веществах играет важную роль для многих направлений современной науки и техники. В

Impact Factor:

ISRA (India) = 3.117
ISI (Dubai, UAE) = 0.829
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
ПИИЦ (Russia) = 0.156
ESJI (KZ) = 8.716
SJIF (Morocco) = 5.667
ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

этом аспекте для решения большого числа задач на современных достижениях необходим контроль содержания определенных элементов в веществе на уровне 10^{-8} – 10^{-11} % является одной из важных задач.

В годы независимости значительное внимание уделялось приоритетному развитию науки Республики Узбекистан, в частности особое внимание было уделено исследованию атомов и аэрозолей или аналогичных сложных молекул для эффективного развития высокочувствительной лазерной спектроскопии. В этой области достигнуты определенные результаты по исследованию ближней границы ионизации атомов и определения эффективных схем возбуждения атомов, а также по изучению морфологических и оптических свойств различных аэрозолей. В соответствии со «Стратегией действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» особое внимание важно уделить созданию эффективных механизмов внедрений научных и инновационных достижений в практику, создание новых приборов на основе физических механизмов проявления резонансных и нерезонансных процессов взаимодействия лазерного излучения с ультрамалыми концентрациями атомов и аэрозолей вещества в области фотоники лазерной спектроскопии.

В настоящее время в мировой науке исследования высоковозбужденных состояний многоэлектронных атомов и оптических свойств различных аэрозолей дают возможность разработки универсального лазерного фотоионизационного спектрометра. В этом отношении актуальность и востребованность темы данной работы определяется целенаправленными научными исследованиями, а именно: разработка новых фотоионизационных и столкновительных схем возбуждения известных состояний исследуемых атомов; проведение теоретических расчетов и получение экспериментальных спектров для тяжёлых атомов; выявление эффективной динамики и типов физических процессов возбужденных атомов и молекул; изучение кинетики сигналов в зависимости от технических характеристик экспериментальной установки и параметров атомов и молекул; установление новых закономерностей морфологических и оптических свойств аэрозольных частиц, не имеющих квантовых состояний; определение ультрамалых концентраций атомов и аэрозолей имеет важное значение. Среди них наиболее перспективным и разработанным для практических применений являются лазерная резонансно-ионизационная спектроскопия (ЛРИС) в вакууме, атомно-ионизационная спектроскопия (АИС) в пламени и внутрирезонансная лазерно-абсорбционная

спектроскопия (ВРЛАС). Ведущие ученые мировых научно-исследовательских центров и университетов, в частности Национальное бюро стандартов, Университет штата Флорида (США), Московский государственный университет, Институт геохимии и аналитической химии имени В.И.Вернадского РАН, Институт Спектроскопии РАН (Россия), Technion-Israel Institute of Technology (Израиль), Advanced Photonics Research Institute, APRI (Южная Корея) и Чалмерский технологический университет (Швеция), Самаркандский государственный университет и Самаркандский архитектурно-строительный институт (Узбекистан) проводят исследования природы процессов возбуждения и ионизации атомов методом резонансной лазерной спектроскопии и взаимодействия перестраиваемых лазерных излучений с частицами аэрозоля внутри резонатора. Методы ЛРИС и АИС отличаются высокой чувствительностью в связи с эффективным подавлением потерь, связанных с влиянием рассеяния лазерного излучения и излучением атомизатора [1-16].

Для многих элементов уже реализованы одноступенчатые, двухступенчатые и трехступенчатые схемы возбуждения через S и P состояния атомов. Для многих атомов спектроскопические данные о ридберговских состояниях ($n \geq 4$) лежащих в области $0,9 \div 1,5 \text{ эВ}$ ниже границы ионизации плохо изучены или в литературе отсутствуют. Фотоионизационные и столкновительные схемы возбуждения исследуемых атомов с высокими потенциалами ионизации в различных атомизаторах мало изучены. Большой фундаментальный и практический интерес представляют для многих элементов реализовать двухступенчатые и трехступенчатые схемы возбуждения через $s \rightarrow r \rightarrow d$ состояния. Это исследование приведет к увеличению ионного сигнала в определенных ридберговских состояниях (E_n) и главных квантовых числах (n) которые расположены ниже границе ионизации.

Исследование ридберговских состояний атомов в вакууме. Атомизация пробы в графитовом электротермическом атомизаторе. При таком способе испаряемые при высокой температуре атомы и молекулы пробы формируются в узкий направленный пучок и попадают в облучаемую зону, где происходит их селективная ионизация. Результаты исследования методом РИС приведены в таблице 1.1.

Настоящая работа посвящена систематическому исследованию процесса детектирования ультрамалых концентраций атомов и аэрозолей методами высокочувствительной лазерной спектроскопии. Это направление актуально при исследовании

Impact Factor:

ISRA (India) = 3.117
 ISI (Dubai, UAE) = 0.829
 GIF (Australia) = 0.564
 JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
 ПИНЦ (Russia) = 0.156
 ESJI (KZ) = 8.716
 SJIF (Morocco) = 5.667

ICV (Poland) = 6.630
 PIF (India) = 1.940
 IBI (India) = 4.260
 OAJI (USA) = 0.350

морфологических и оптических свойств аэрозолей на примере аэрозольных факелов от чистых металлов, аэрозолей соли металлов и органических красителей. Объектом исследования являются водные стандартные растворы, алюминиевые сплавы, кристаллы

(NH_4F , NaF), полупроводниковые материалы (GaAs , Si) и различные аэрозоли солей металлов (NaCl , CsCl , NaI , NaF , KCl , AgNO_3), органических красителей (родаминовые красители), сплавы, почвы и горные породы.

Таблица 1. Результаты исследования методом РИС

Атом	Граница Ионизации E_i , (эВ)	Длина волны возбуждения (нм)			Интервал главного квантового числа, n	Спектральные параметры $\Delta, \sigma(\text{см}^2)$, $E_i(\text{см}^{-1})$,	Система лазеров
		λ_1	λ_2	λ_3			
Na	5,14	589,6	414÷421		13÷18	$\sigma=0,7 \cdot 10^{-14}$	N_2 -лазер
In	5,78	410,2	448÷480		17÷53	$\Delta=2,417$; $E_i=46671$	N_2 -лазер
Al	5,98	396,1	450÷515		15÷30	$\Delta=1,34$	N_2 -лазер
		396,1	430÷510		7÷50	$E_i=48278,2$	N_2 -лазер
		308,2	630÷670		11÷55	$E_i=48278,4$	N_2 -лазер
Ga	5,99	309,2	630÷670		11÷55	$E_i=48278,4$	N_2 -лазер
		417,2	420÷440		14÷70	$\Delta=2,15$	N_2 -лазер
Ca	6,11	403,3	424÷440		12÷28	$\sigma=3 \cdot 10^{-17}$	N_2 -лазер
		414	406÷414	ДФВ	13÷45	$E_i=49306$	N_2 -лазер
Tl	6,11	377,5	440÷465		7÷40	$E_i=49266,7$	N_2 -лазер
Cd	8,99	326,1	479,9	490÷475	17÷50	$\Delta=3,1$; $E_i=72570,3$	N_2 -лазер
Zn	9,39	307,5	472,2	490÷475	17÷60	$\Delta=2,2$; $E_i=75766,9$	N_2 -лазер
Hg	10,4	253	435,8	470÷455	18÷60	$\Delta=4,21$; $E_i=84185,1$	N_2 -лазер
Ag	7,57	338,3	766,8	580÷630	5÷70	$E_A=58504$ $E_A=60529$	N_2 -лазер
Au	9,22	267,5	583,7	440÷520	16÷75	$\Delta=4,02$; $E_i=74410,8$	N_2 -лазер
Yb	6,25	555,6	452,8	410÷710	АИ		N_2 -лазер
Cd	8,99	326,1	479,9	475÷562	7÷50	$\Delta=3,16$	Nd:YAG
Zn	9,39	307,5	472,2	493÷452	10÷40	$\Delta=2,2$; $E_i=75766,9$	N_2 -лазер
Hg	10,4	253	224÷223	470÷455	22÷52	$\Delta=3,081$; $E_i=84184,1$	Nd:YAG

Метод был применен для исследования ридберговских состояний атомов Na, In, Al, Ga, Ca, Tl, Cd, Zn, Hg, Ag, Au, Ag, [7,8].

Экспериментальная часть.

Метод основан на эффекте увеличения степени ионизации определяющих атомов при их взаимодействии с лазерным излучением. Идея метода (рис.1.) состоит в том, что полученные каким-либо образом свободные атомы определяемого элемента селективно возбуждаются в высоколежащие электронные состояния излучением одного или нескольких /ступенчатое возбуждение через промежуточные уровни/ лазеров. Возбужденные атомы ионизируются различными способами с последующей регистрацией образующихся заряженных частиц.

Поглощение атомами или молекулами монохроматического резонансного излучения лазера приводит к заселению их возбужденных состояний: $A+h\nu \rightarrow A^*$.

Ионизация селективно возбужденных атомов может осуществляться несколькими путями, среди которых:

1. Ионизация импульсным электрическим полем. Поле прикладывается сразу после окончания лазерного импульса. Такой способ ионизации возможен благодаря большим временам жизни Ридберговских состояний.

2. Фотоионизация. При этом способе ионизация происходит за счет радиационного возбуждения атомов в непрерывный спектр или в дискретные автоионизационные состояния с энергией выше потенциала ионизации атома. В обоих этих случаях столкновения определяемых атомов с посторонними частицами не нужны, а при ионизации полем даже нежелательны из-за возможного увеличения скорости релаксации Ридберговских состояний. Поэтому и ионизацию атомов такими способами проводят обычно в ячейках низкого давления или в атомных пучках в вакууме, где столкновительные процессы несут существенны $A^*+h\nu \rightarrow A^+ + e^-$.

Impact Factor:

ISRA (India) = 3.117
ISI (Dubai, UAE) = 0.829
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
РИИЦ (Russia) = 0.156
ESJI (KZ) = 8.716
SJIF (Morocco) = 5.667

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

3. Столкновительная ионизация. Среди различных столкновительных процессов, дающих вклад в наблюдаемый ионизационный сигнал, основную роль играет столкновительная ионизация возбужденных атомов A^* определяемого элемента с атомами и молекулами X буферного газа или матрицы [1-6]: $A^* + X \rightarrow A^+ + e^- + X$

4. Ассоциативная ионизация $A^* + X \rightarrow AX^+ + e^-$

При ионизации щелочноземельных атомов существенную роль может играть процесс ассоциативной ионизации, особенно в случае одноступенчатых схем возбуждения, когда энергия возбуждения элементов невелика и процесс столкновительной ионизации идет неэффективно. Например, $Ba + OH \rightarrow BaOH^+ + e^-$

5. Передача энергии другой частице с последующей ее ионизацией $A^* + X \rightarrow A + X^*$, где X – любая частица в пламени.

В этом случае возможны процессы ионизации за счет передачи энергии возбужденных атомов другим частицам, когда аналитические атомы прямо не участвуют в процессе возбуждения, например, $CN^* + O \rightarrow CN^+ + e^-$.

Экспериментально такие исследования проводят в пламенах или разрядах при атмосферном давлении. Различные способы ионизации возбужденных лазерами атомов обусловлены обычно различными способами атомизации пробы, среди которых: термическое, лазерное, ионное или электронное-лучевое испарение в вакууме или в буферном газе, а также пламена, плазма газового разряда, ИСП, дуга, искра и другие.

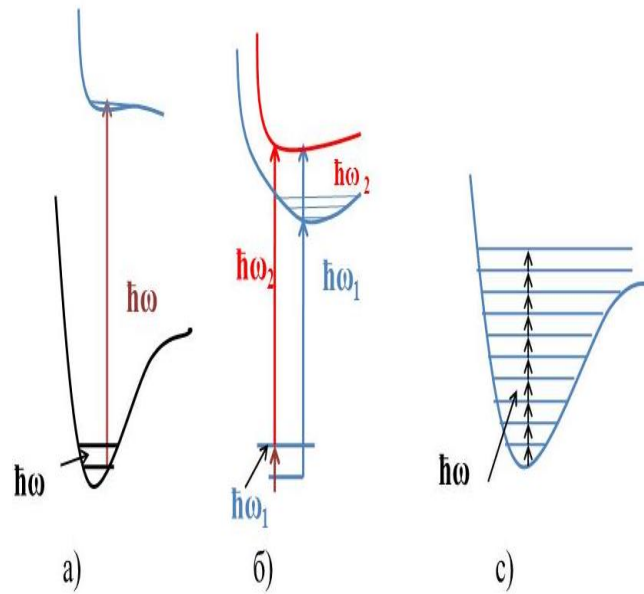
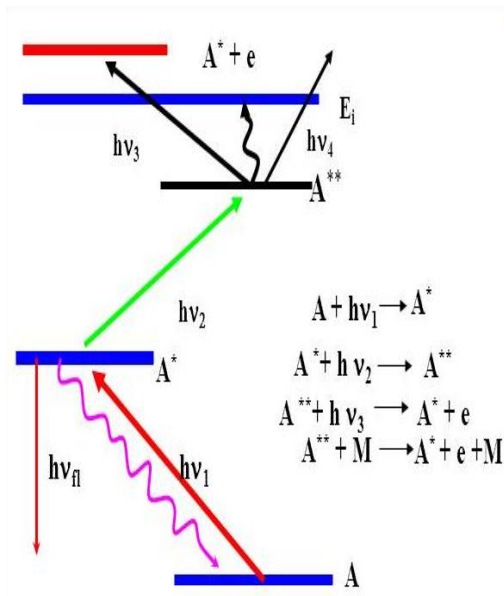
Исследование ридберговских состояний атомов в вакууме. Атомизация пробы в графитовом электротермическом атомизаторе. При таком способе испаряемые при высокой температуре атомы и молекулы пробы формируются в узкий направленный пучок и попадают в облучаемую зону, где происходит их селективная ионизация. Результаты исследования методом РИС приведены в таблице 1.

Принципиальная оптическая схема экспериментальной установки для исследования локального распределения примесей щелочных металлов в алюминиевых сплавах и различных

каналов ионизации атомов методами высокочувствительной лазерной спектроскопии приведена в работах [13-16]. Спектрометр работает следующим образом. Излучение двухобъемного лазера на молекуле азота ($\lambda=337,1$ нм, $\tau=8$ нс, $E=10$ мДж) использовалось для накачки перестраиваемых лазеров на красителях. Энергия импульсов лазеров на красителях на первой и второй ступенях составляла около 10–100 мкДж и ширина линии генерации – 1 см⁻¹. В вакуумной камере располагались атомизатор и вторично-электронный умножитель (ВЭУ). Пересечение атомного пучка с лазерными лучами происходило в центре вакуумной камеры в области между двумя электродами, на которые подавался высоковольтный ионизирующий электрический импульс. Фотоионный сигнал после ВЭУ и предусилителя поступал на вход стробинтегратора и от него на самописец. Одновременно на пламя направлялись лазерные лучи, и осуществлялось селективное ступенчатое возбуждение. Далее возбужденные атомы ионизируются при столкновении с частицами пламени. Образовавшиеся ионы собирались в коллекторе и после усиления подавались на стробинтегратор и регистрировались цифровым вольтметром. В качестве атомизатора использовалась щелевая горелка. Спектр ионизационного сигнала, возбуждаемый импульсным источником излучения, измерялся методом стробирования импульса. Принципиальная оптическая схема экспериментальной установки приведена в работах [13-16]. Комбинированный атомно-ионизационный спектрометр, работающий в режиме «стержень-пламя» и «графитовая печь», состоит из 3-х перестраиваемых лазеров на красителях, накачиваемых эксимерным лазером на $XeCl$ ($\lambda=308$ нм, $\tau=10$ нс, $E=70$ мДж), атомизатора-ионизатора «стержень-пламя» и «графитовой печи» и системы регистрации. Лазер на красителях собраны по схеме со скользящим падением луча на дифракционную решетку. Они обеспечивают энергию в импульсе до 2 мДж в видимом и до 200 мкДж в ультрафиолетовом диапазоне, ширину линии генерации 0,2 см⁻¹.

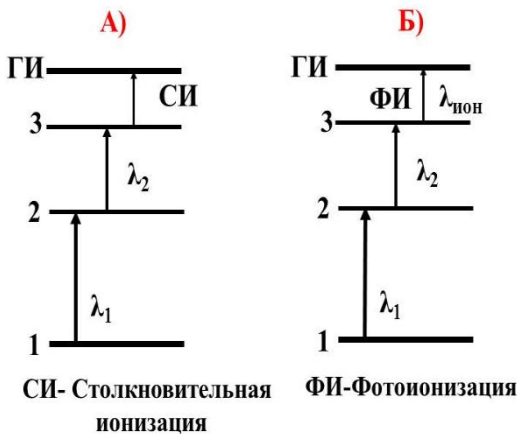
Impact Factor:

ISRA (India) = 3.117	SIS (USA) = 0.912	ICV (Poland) = 6.630
ISI (Dubai, UAE) = 0.829	ПИИЦ (Russia) = 0.156	PIF (India) = 1.940
GIF (Australia) = 0.564	ESJI (KZ) = 8.716	IBI (India) = 4.260
JIF = 1.500	SJIF (Morocco) = 5.667	OAJI (USA) = 0.350



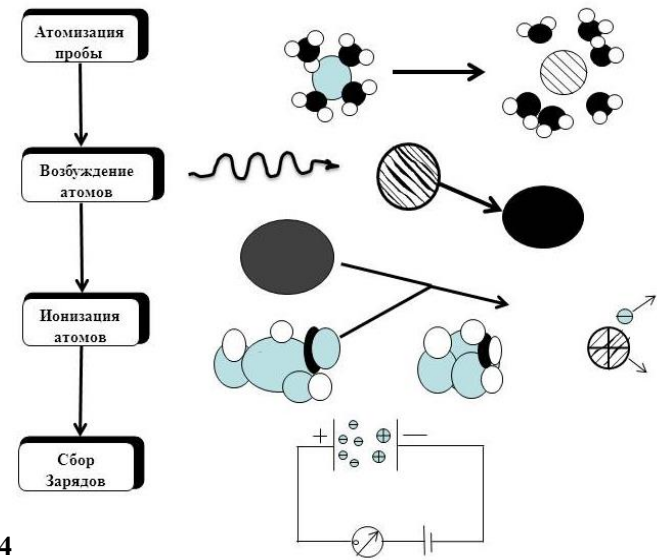
1

АИС в пламени ЛРИС в вакууме



3

2



4

Рис.1. Идея метода резонансно-ионизационной спектроскопии (1; общая схема возбуждения атомов, 2; общая схема возбуждения молекул, а) одноступенчатое возбуждение электронного или колебательного состояния; б) двухступенчатое возбуждение электронного состояния через промежуточное колебательное или электронное состояние; в) многофотонное возбуждение колебаний инфракрасным излучением 3; виды каналов ионизации: А) столкновительная ионизация, Б) фотоионизация, 4; сбор зарядов)

Атомизаторами служили двухщелевая горелка длиной 20 мм, стержень из пирографита длиной 28 мм, диаметром 4 мм и графитовая трубка диаметром 8 мм и длиной 28 мм, нагреваемая с помощью программируемого блока с системой стабилизации мощности, коллектор для сбора заряженных частиц. Внутри графитовой трубки расположена платформа. Исследуемый образец вводится через дозировочное отверстие в центре трубки в виде раствора или порошка массой 1-20 мг.

В конце 80-х годов американскими учеными О'Кифом и Дьяконом (О'Keefe и Deason) был изобретен новый метод лазерной спектроскопии внутрирезонаторного затухания (ЛСВРЗ) для исследования металла кластеров, диагностики пламени и молекулы газов. Принцип работы и многократного прохода лазерного излучения внутрирезонаторной лазерной спектроскопии представлен на рисунке 2.

Impact Factor:

ISRA (India) = 3.117	SIS (USA) = 0.912	ICV (Poland) = 6.630
ISI (Dubai, UAE) = 0.829	РИИЦ (Russia) = 0.156	PIF (India) = 1.940
GIF (Australia) = 0.564	ESJI (KZ) = 8.716	IBI (India) = 4.260
JIF = 1.500	SJIF (Morocco) = 5.667	OAJI (USA) = 0.350

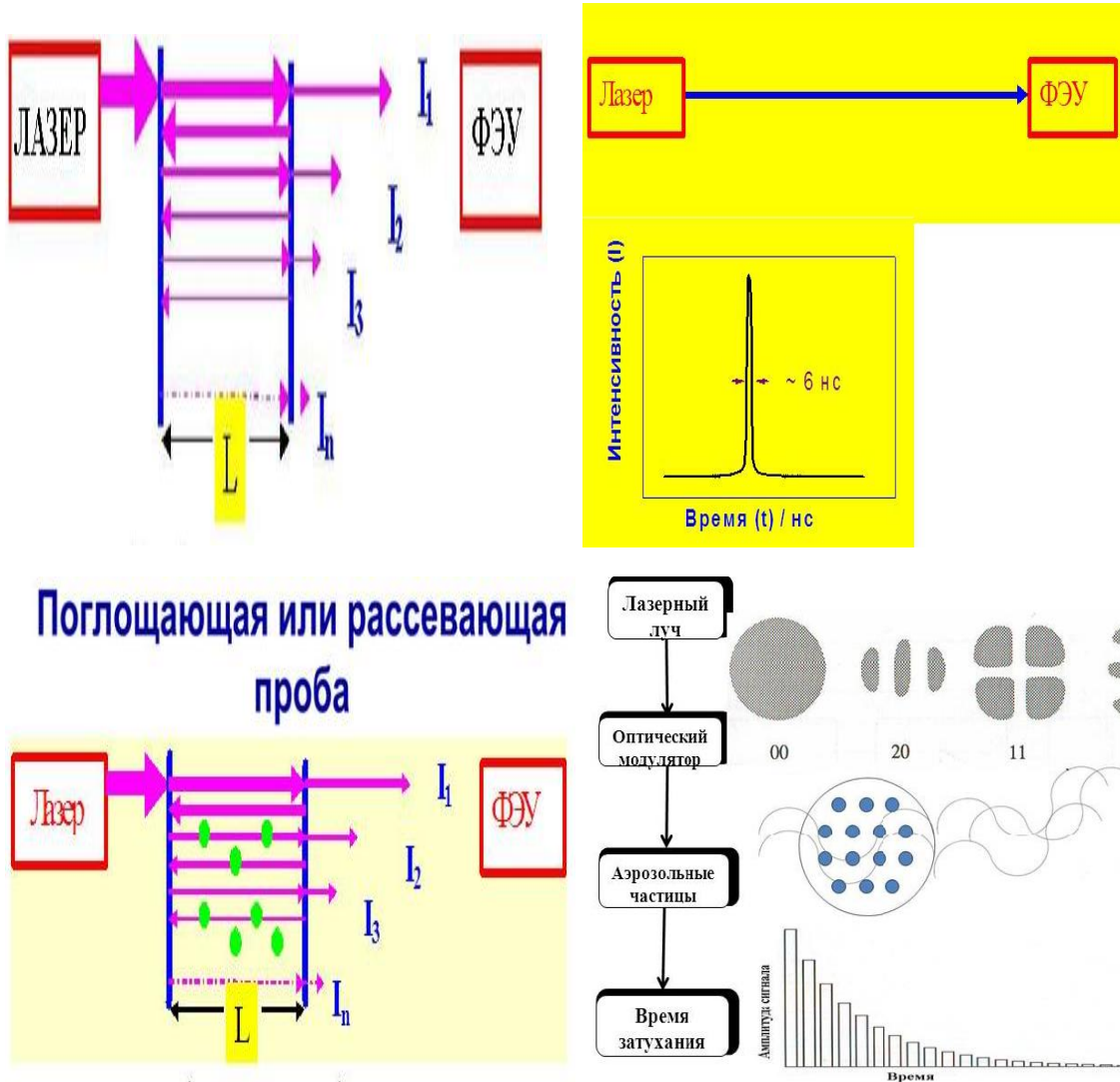


Рис.2. Оптическая схема многократного прохода лазерного излучения внутрирезонаторной лазерной спектроскопии (1; лазерный импульс без внутри резонаторного эффекта, 2; пустой резонатор, 3; оптический резонатор с пробой, 4; регистрации сигнала затухания)

Принципиальная оптическая схема экспериментальной установки для измерения экстинкции света частицами аэрозоля приведена в работах [16]. В спектрометре для образования аэрозольных частиц были использованы мощное лазерное излучение и пневматические распылители. В экспериментальной установке использовали два варианта формирования лазерных импульсов испарения и накачки лазера на красителях: одним и двумя Nd:YAG лазерами. Первый вариант – Nd:YAG лазер запускается от формирователя двойных импульсов генератора DG535. Вторая установка была основана на применении двух лазеров; первой Nd:YAG лазер использован для накачки лазера на красителях; второй Nd:YAG лазер использовался для образования плазмы.

Спектрометр состоит из генератора DG535, линзы (F=50мм), двух высоко отражательных

вогнутых зеркал (R>99.97%, r=100см), трубки из нержавеющей стали, резонатора длиной 75см, фотоумножителя и цифрового осциллографа (LeCroy 9362), электростатического классификатора и счётчика конденсации частицы.

Экспериментальная установка для исследования характеристики поглощения и рассеяния прозрачных аэрозольных частиц состоит из пневматического распылителя, трубки из нержавеющей стали резонатора с диаметром d=10см и длиной 85см. Для сушки аэрозоля использована кварцевая труба длиной 80см и диаметром 10см, заполненная силикагелем (molecular sieves 4A). Вогнутые зеркала (R>99.97%, r=100см), оптимизированные на длину волны 575–670нм, были точно расположены в концах трубки из нержавеющей стали резонатора с диаметром d=10см и длиной 85см.

Impact Factor:

ISRA (India) = 3.117
ISI (Dubai, UAE) = 0.829
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
РИИЦ (Russia) = 0.156
ESJI (KZ) = 8.716
SJIF (Morocco) = 5.667

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

Экспериментальная установка для измерения коэффициента экстинкции различных аэрозольных частиц состоит из нескольких компонентов: система лазеров, система блоков для чистого воздуха, аэрозоля и газоразрядной лампы с полым катодом, система регистрации. Внутррезонаторные зеркала были расположены в концах трубки из нержавеющей стали резонатора длиной 65 см. Сигнал затухания был измерен с помощью фотоумножителя (Photosensor Module H6780-04). Сигнал фотоумножителя был переведен в цифровую форму с помощью осциллографа (Tektronix TDS3032B) и затем подавался на персональный компьютер.

Экспериментальная установка для измерения коэффициента экстинкции атмосферных аэрозольных частиц (рис.3) работает следующим образом. Излучение двух объемного лазера на

молекула азота 1 ($\lambda=337,1$ нм, $\tau=8$ нс, $E=10$ мДж), использовалось для накачки лазера на красителях. Для регистрации сигнала затухания были использованы фотоумножитель ФЭУ-79, выпрямитель стабилизированный ВС-22, осциллограф С1-70, цифровой осциллограф TDS 2022В, генератор чистого воздуха и персональный компьютер.

Запуск развертки осциллографа осуществляется сигналом с фотодиода, на который отводится часть излучения азотного лазера. Внутррезонаторные зеркала были расположены в концах трубки из медного резонатора с длиной 65 см. Сигнал с фотоумножителя подавался на цифровой осциллограф (Tektronix TDS 2022В и персональный компьютер.

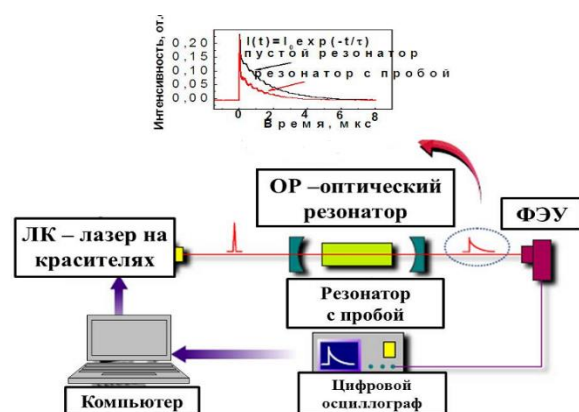


Рис.3. Блок-схема экспериментальной установки

Результаты и обсуждение.

Приведены данные исследования высоковозбужденных состояний s(Na, Ca), p(Al, In), d(Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Ag, Au, Pt, Hg, Cd, Zn), f(Yb, Eu) элементов в различных атомизаторах. Универсальный лазерный фотоионизационный спектрометр использован для определения локального распределения атомов Na, Ca в алюминиевых сплавах, работающий с термической атомизацией вещества в вакууме и атомизацией пробы в пламени. Были реализованы двухступенчатые схемы возбуждения для атомов Ca ($\lambda_1=422,67$ нм, $\lambda_2=399, 2$ нм для вакуума, $\lambda_2=518,9$ нм для пламени) и Na ($\lambda_1=589,9$ нм, $\lambda_2=418,7$ нм для вакуума, $\lambda_2=568,8$ нм для пламени). Для исследования пробы применены стандартные методики.

Запись фотоионных сигналов с выхода ВЭУ приведена на рис. 4. Для проверки правильности полученных результатов синхронно проведены эксперименты по определению концентрации Ca и Na в водных стандартных растворах описанным выше способом в режиме пламенной атомизации пробы. Ионизационный сигнал при исследовании

натрия в пламени пропан-бутан достигает максимального значения при соотношении газ-окислитель 1:8,5. Ионизационный сигнал для кальция при изменении расхода ацетилен-воздух сильно не меняется. Уровень содержания Ca и Na в используемых химических реактивах, а также чистота посуды во время эксперимента контролировались. Таким образом, методом «введено-найдено» установлено, что при массовом отношении основа/определяемый элемент 10 мкг/мл: 0,1 мкг/мл обнаружено подавление сигналов Ca и Na в растворе алюминия. Здесь подавление исчезает лишь при разбавлении растворов алюминия более чем в 100 раз.

Проведено около 60 анализов на 11 образцах различных поверхностей и глубин геометрии. Экспериментальные результаты показывают, что распределение примесей натрия по объему образца примерно одинаково, около $10^{-3}\%$. Но распределение примесей кальция оказалось неравномерным. Причем, в отдельных участках образца концентрация достигала до $10^{-2}\%$ и более.

Были реализованы трехступенчатые схемы возбуждения для атомов Hg, Cd, Zn. Исследование

Impact Factor:

ISRA (India) = 3.117
ISI (Dubai, UAE) = 0.829
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
РИИЦ (Russia) = 0.156
ESJI (KZ) = 8.716
SJIF (Morocco) = 5.667

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

высоковозбужденных ридберговских состояний атомов Hg, Cd, Zn проводилось в вакууме с использованием электротермического атомизатора.

По результатам обработки полученных ионизационных спектров были определены значения энергии (E_n), квантовые дефекты (Δ), и тонкие структуры (ΔE) ридберговских состояний главных серий у атомов ртути вплоть до $n=18\div 60$, у атомов цинка $n=17\div 55$ и у атомов кадмия $n=17\div 50$.

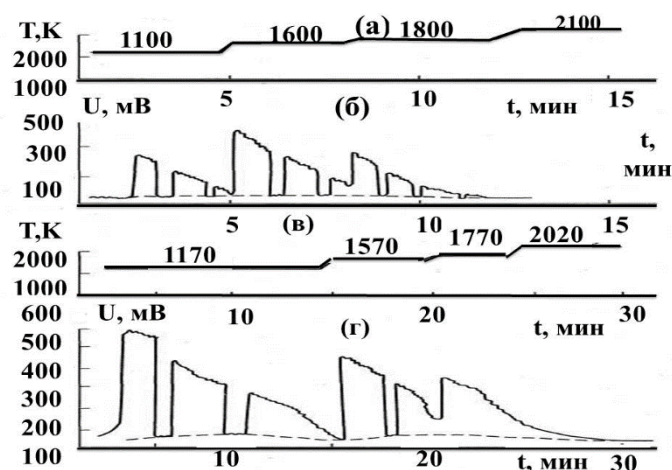
Приведены результаты численного расчета значения энергии (E_n) ридберговских состояний для $n\leq 50$. Полученные экспериментальные данные сравнивали с известными литературными данными. Результаты анализа показывают, что относительная ошибка расчета составляет $\leq 4\%$.

В предыдущей работе [13-15], мы исследовали одноступенчатый и двухступенчатый схемы возбуждения из основного $3d^5 4s^2 S_3$ состояния на септитные состояния $3d^5 4p^2 P_{2,3,4}$, $3d^4 4s 4p^2 P_{2,3,4}$ атомов хрома в атомизаторе «стержень-пламя». Для дальнейшего улучшения процесса испарения, атомизации и уменьшения пределов обнаружения в методе атомной ионизации нами был использован электротермический атомизатор «графитовая печь». Для изучения характеристик электротермического атомизатора-ионизатора использовались водные растворы исследуемых элементов. Реализованы двухступенчатые и трехступенчатые схемы возбуждения исследуемых атомов в атомизаторе «графитовая

печь». Впервые реализованы двухступенчатые столкновительные схемы возбуждения атомов In, Li, Au, Ag, Pt, Yb в атомизаторе «графитовая печь», состоящей из графитовой трубки, платформы и охлаждаемого коллектора, в которой получена чувствительность элементов в водных модельных растворах в 100 и 10 раз лучше по сравнению с атомизаторами «пламя» и «стержень-пламя» соответственно. Показано, что максимальный сигнал наблюдается для атомов In при переходе $5p^2 P_{3/2} \rightarrow 6s^2 S_{3/2} \rightarrow 8p^2 P_{1/2}$ и для атомов Li, Na, Ag, Au, Pt при переходе $(n)s \rightarrow (m)p \rightarrow (k)d$ соответственно (рис. 5). Это, по-видимому, связано с изменением орбитального момента ℓ от 0 до 2, а также ширина линии данного квантового перехода в 10 раз больше чем другой квантовый переход. В результате эксперимента разработаны фотоионизационный и столкновительный механизмы ионизации.

Результаты исследования Au, Yb, Li, Ag, Pt и In в водных растворах приведены в таблице 2. Полученные результаты показывают, что столкновительный механизм ионизации является доминирующим процессом. Для многих элементов в графитовых печах чувствительность в 100–1000 раз выше, чем в пламени. Причина тому – более длительное время пребывания атомов в исследуемом объеме и возможность достижения больших температур атомизации.

В этой главе также представлены результаты исследования различных каналов ионизации атомов Na, Ca, Cs, Al, In, Cr, Mn, Fe, Ni, Co, Pt, Au, Yb, Eu из различных состояний.



а) (Ca), в) (Na) - последовательность поэтапного повышения температуры атомизатора, б) зависимость ионного сигнала Ca от времени в образце ($M=1\text{мг}$), г) зависимость ионного сигнала Na от времени в образце ($M=2\text{мг}$)

Рис. 4. Зависимость ионных сигналов Ca и Na от времени и температуры испарения.

Impact Factor:

ISRA (India) = 3.117	SIS (USA) = 0.912	ICV (Poland) = 6.630
ISI (Dubai, UAE) = 0.829	ПИИЦ (Russia) = 0.156	PIF (India) = 1.940
GIF (Australia) = 0.564	ESJI (KZ) = 8.716	IBI (India) = 4.260
JIF = 1.500	SJIF (Morocco) = 5.667	OAJI (USA) = 0.350

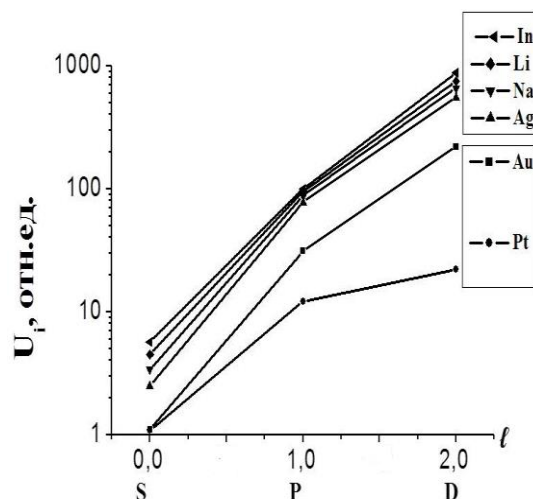


Рис. 5. Зависимость интенсивности ионизационных сигналов (U_i) от орбитального момента (l).

Таблица 2. Результаты определения Li, In, Au, Ag, Pt, Yb в водных растворах с использованием системы «графитовая печь»

Элемент	$\lambda_{\text{возб}}$, (нм)			t (°C)	$\Delta E = E_i - E_j$		C_{min} , пг/мл	
	λ_1	λ_2	λ_3		$\Delta E, \text{см}^{-1}$	$\Delta E, \text{эВ}$	ЭР	ТР
Li	670	610		2300	12204	1,49	0,006	0,002
In	451	571		2400	4802	0,59	0,008	0,03
Au	267	294		2400	3046	0,42	5	0,05
	267	306.5		2400	4439	0.66	5	0,05
	267	406.7	643.1	2400		AC	10	0,05
Ag	328	282		2300		AC	0.20	0,03
Pt	266	292		2400	587	0,06	50	0,04
Yb	555	581	581	2700		AC	10	0,03

Фотоионизационный механизм ионизации. Идея метода заключается в ступенчатом возбуждении атомов в высоколежащих электронных состояниях, из которых они ионизируются либо столкновительно, либо с помощью дополнительного излучения.

Сравнение сигналов, измеренных для этих двух случаев, позволяет определить параметры, характеризующие столкновительную ионизацию. Сравнение сигналов, измеренных для этих двух случаев, позволяет определить параметры, характеризующие столкновительную ионизацию. Выход ионизации связан с коэффициентом увеличения сигнала за счет фотоионизации K и эффективности столкновительной ионизации β следующими простыми соотношениями

$$Y = K^{-1}; \beta = \left(1 - \frac{g_b}{\sum g_i} + \frac{g_b}{\sum g_i} K \right)^{-1}, \quad (1)$$

где g_b – статистический вес верхнего возбужденного уровня, $\sum g_k$ – сумма статистических весов всех участвующих в возбуждении уровней. Экспериментально получены выход ионизации (Y) и эффективность столкновительной ионизации (β) для атомов Au, Ag, Fe, In (0.11, 0.1, 0.08, 0.06 и 0.59, 0.15, 0.25, 0.087) соответственно. Полученные значения показывают, что столкновительная ионизация для всех уровней идёт неэффективно. Это обусловлено большим значением разности потенциала ионизации и энергии возбуждения ($\Delta E = 1,5 \text{эВ} \div 3,87 \text{эВ}$), что почти в 8÷38 раз больше кТ (для пламени ацетилен-воздух кТ=0,217эВ). Был разработан фотоионизационный метод определения коэффициента атомизации $K_{\text{ат}}$ определяемых элементов, Au, Ag, In, Fe в атомизаторах «пламя» и «стержень-пламя». В

Impact Factor:

ISRA (India) = 3.117
ISI (Dubai, UAE) = 0.829
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
РИИЦ (Russia) = 0.156
ESJI (KZ) = 8.716
SJIF (Morocco) = 5.667

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

ограниченном объеме пламени проводится ступенчатая фотоионизация выбранных атомов в режиме насыщения оптических переходов. В результате все атомы из основного состояния переводятся в ионы, а величина регистрируемого при этом ионизационного сигнала $U_i^{\text{макс}}$ связана с коэффициентом атомизации $K_{\text{ат}}$ простым соотношением:

$$K_{\text{ат}} = \frac{C_0 U_i^{\text{макс}}}{e K_y V n_0} \quad (2),$$

где C_0 – ёмкость коллектор-горелки, определяемая экспериментально, e – заряд электрона, K_y – коэффициент усиления системы регистрации, V – облучаемый объем, n_0 – общая концентрация элемента в пламени. В оптимальных условиях мы экспериментально получили коэффициенты атомизации $K_{\text{ат}}$ для атомов Au, Ag, In, Fe (0.3, 0.2, 0.5 и 0.2) соответственно.

Для атомов Ag характерна длина волны 272.0нм и 282.0нм, от $5p^2P_{3/2}$ состояния дали два сильных автоионизационных состояния. Были реализованы трехступенчатые фотоионизационные схемы возбуждения для атомов Eu ($\lambda_1=601.815\text{нм}$, $\lambda_2=540.533\text{нм}$, $\lambda_3=618.203\text{нм}$) в универсальном лазерном фотоионизационном спектрометре. Предел обнаружения в водных стандартных растворах составил $10^{-8}\%$ при относительном стандартном отклонении $S_r=0.1$.

Фотоионизационные схемы возбуждения атомов индия можно реализовать в лампе с полым катодом. При настройке частоты генерации перестраиваемого лазера на спектральную линию ($\lambda=451.1\text{нм}$ и $\lambda=303.9\text{нм}$) атомного $5p^2P_{1/2,3/2} \rightarrow nd^2S_{1/2}$, $nd^2D_{1/2, 3/2}$ перехода в электрической схеме возникает отрицательный и положительный ОГ сигналы.

При газовом разряде ионы инертного газа бомбардируют поверхность катода и расплывают часть катодного материала в газовую фазу, где атомы In с $5p$ состояния возбуждаются посредством соударения с ионами и электронами на $5d$ состоянии. Далее возбужденные атомы в этом состоянии взаимодействуют с лазерным излучением. Продолжая перестройку длины волны излучения лазера в диапазонах 455.8нм, 456.1нм, 458.9нм, было обнаружено увеличение ОГ сигналов. Измерение значения ОГ сигнала дало возможность определить положение автоионизационных состояний атома In. В результате исследования двухступенчатой схемы возбуждения атома индия в лампе с полым катодом обнаружены автоионизационные состояния. Энергии автоионизационных уровней рассчитывались из измеренных значений длин волн лазерного излучения, осуществляющего с $5d^2D_{5/2}$ уровня атома In. Энергии этих

автоионизационных состояний составляли 52651.2см^{-1} , 52638.2см^{-1} , 52503.2см^{-1} .

Столкновительный механизм ионизации. Были изучены различные схемы возбуждения атомов в атомизаторах «пламя» и «стержень-пламя»: одноступенчатые с основного и возбужденных состояний, двухступенчатые схемы возбуждения от возбужденных состояний, двухступенчатая схема возбуждения от основного состояния и трехступенчатая схема возбуждения от основного состояния. Во всех случаях выбрано оптимальное соотношение «горючий газ» – «воздух», 0,2л/мин:1,3л/мин для атомов Al, Eu, (0,2л/мин:6,6л/мин) – Cs, (0,22л/мин:1,7л/мин) – Na соответственно. Для атомов Ca, In, Cr, Mn, Fe, Ni, Co, Pt, Au, Ag, Yb расходы горючего газа ацетилена и воздуха составили 0,27л/мин и 1,6л/мин соответственно. Для каждой схемы исследовали зависимости ионизационного сигнала от плотности мощности возбуждающего лазерного излучения W в широком диапазоне ее изменения (700кВ/см^2 для 10нс длительности лазерного излучения). Были использованы двухступенчатые схемы ионизации с $\lambda_1=267.6\text{нм}$ и $\lambda_2=294.0\text{нм}$ для Au и $\lambda_1=266\text{нм}$ и $\lambda_2=292.9\text{нм}$ для Pt в атомизаторе стержень-пламя. Лазерные лучи имеют относительно большие диаметры (~2мм). На рис. 6 представлена зависимость интенсивности ионизационных сигналов (U_i) атома золота от плотности мощности лазерного излучения (W). Были использованы чистые водные растворы (10пг/мл – 1мг/мл) атомов Au для калибровки в спектрометре «стержень-пламя» и электротермического атомизатора. Настраивая второй лазер в диапазоне между 250–340нм, обнаружили несколько пиков резонанса (рис. 7). Эти пики соответствуют высоко возбужденному ридберговскому состоянию атомов Au. Эти состояния соответствуют основным квантовым числам $n=8$ и $n=9$, где амплитуды сигналов ионизации от двухступенчатых возбуждений оказываются приблизительно в 1000 раз больше, чем при одноступенчатом возбуждении атомов Au. Исследованы одноступенчатый и двухступенчатый схемы возбуждения из основного $3d^54s \ ^7S_3$ состояния на септитные состояния $3d^54p \ ^7P_{2,3,4}$, $3d^44s4p \ ^7P_{2,3,4}$ атомов хрома в атомизаторе «стержень-пламя». Нижний предел обнаружения для $s(\text{Li, Na, Cs})$, $p(\text{Al, In})$, $d(\text{Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Ag, Pt, Au})$ и $f(\text{Yb, Eu})$ элементов в водных растворах в системе «пламя» составляет $10^{-10} \div 10^{-12}\text{г/мл}$, а для систем «стержень-пламя» $5 \times 10^{-10} \div 1 \times 10^{-14}\text{г/мл}$.

Результаты исследования теоретической оценки предела обнаружения для $s(\text{Li, Na, Cs})$, $p(\text{Al, In})$, $d(\text{Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Ag, Pt, Au})$ и $f(\text{Yb})$ элементов в водных растворах в системе «стержень-пламя» составляет $1 \times 10^{-14} \div 2 \times 10^{-15}\text{г/мл}$. Экспериментально достигнутые пределы

Impact Factor:

ISRA (India) = 3.117
ISI (Dubai, UAE) = 0.829
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
РИИЦ (Russia) = 0.156
ESJI (KZ) = 8.716
SJIF (Morocco) = 5.667

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

обнаружения оказались примерно на порядок выше, а для некоторых элементов на несколько порядков выше расчетных. В атомно-ионизационном методе существуют следующие влияющие факторы: термические, спектральные и химические. Сочетание лазерного ступенчатого возбуждения атома в системе «стержень-пламя» с пламенным способом атомизации пробы в

атмосфере продемонстрировано для определения содержания Li, Na и Ag в ацетоне, фосфорной кислоте, Cr, Mn, Ni, Co, NH_4F и NaF , Fe, Al, Na и Fe, Cs в GaAs, Si, Au и Au, Na, Pt, AgNO_3 и горной породе (Трапп) 30г/л, Cs, Na, In в природных водах. На рис. 8. представлены зависимости коэффициента усиления сигнала от исследуемых образцов.

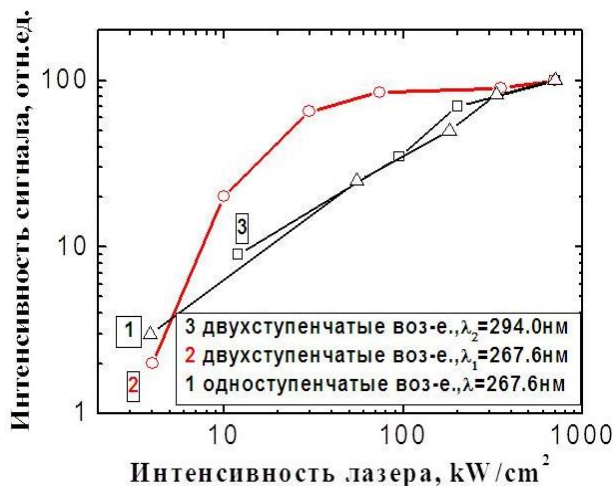


Рис. 6. Зависимость интенсивности ионизационных сигналов (U_i) от плотности мощности лазерного излучения (W).

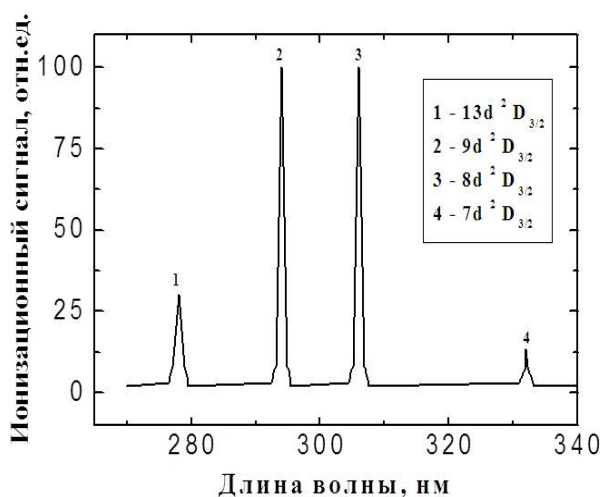


Рис. 7. Атомно-ионизационный спектр золота в области $n=7\div 13$ при сканировании второго лазера в диапазоне между 250–340 нм.

Для решения этой проблемы нами исследован эффект усиления сигнала от исследуемых элементов. Для определения золота в азотнокислом серебре готовились растворы AgNO_3 с концентрацией 1г/л. Спектральное влияние матрицы в этом случае проявляется в виде аддитивного фонового сигнала от Ag. Для решения этой проблемы нами использованы ступенчатые схемы возбуждения атома Au. Установлено, что химические влияния матрицы отсутствуют.

Для исследования следов золота в горных породах использован электротермический атомизатор «графитовая печь». Были реализованы двухступенчатые столкновительные схемы возбуждения атома золота ($\lambda_1=267\text{нм}$, $\lambda_2=294\text{нм}$, $\lambda_2=306\text{нм}$). Обнаружено химическое влияние матрицы на аналитический сигнал золота. Основными влияющими элементами являются оксиды алюминия и соединения натрия. Эта проблема решается путем разбавления раствора горных пород от $C=0,3\text{г/л}$ до $C=0,05\text{г/л}$.

Impact Factor:

ISRA (India) = 3.117
 ISI (Dubai, UAE) = 0.829
 GIF (Australia) = 0.564
 JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
 ПИИЦ (Russia) = 0.156
 ESJI (KZ) = 8.716
 SJIF (Morocco) = 5.667

ICV (Poland) = 6.630
 PIF (India) = 1.940
 IBI (India) = 4.260
 OAJI (USA) = 0.350

Для анализа растворителей наилучшим образом подходит пламенный атомизатор-ионизатор, что продемонстрировано на примере определения Li и K в ацетоне. Натрий определяли в системе «стержень-пламя», где предел обнаружения зависит от чистоты графитовых стержней. Для анализа полупроводниковых материалов использовали растворы кремния и арсенида галлия с концентрацией 1г/л. Методом добавок установлено, что влияние основы GaAs с концентрацией 10г/л на величину аналитического сигнала Cr, Al, Na и Fe отсутствует. Предел обнаружения Al в образцах GaAs определялся небольшим аддитивным фоновым сигналом от основы пробы. При определении Fe и Cs в кремнии с помощью стандартных добавок установлено, что влияние основы пробы на величину аналитического сигнала Fe и Cs не обнаружено. Предварительные оценки содержания Fe в растворах GaAs и Si с концентрацией 1г/л показали, что примеси Fe в используемых для приготовления растворов кислотах HCl, HNO₃ ограничивали предел обнаружения Fe в растворах GaAs и Si на уровне 10⁻³%. Для решения этой проблемы мы использовали особочистые кислоты и реактивы, а также контролировали чистоту посуды. Поэтому предел обнаружения Fe в этих образцах определялся флуктуациями фонового сигнала от соединений GaAs и Si в пламени.

Для определения Cr, Mn, Ni, Co в фторсодержащих материалах мы впервые использовали атомизаторы «пламя» и «стержень-пламя». Для анализа фторсодержащих материалов использовали растворы NH₄F и NaF с концентрацией 50г/л и 0,2г/л соответственно. Методом добавок установлено, что влияние основы NH₄F с концентрацией 50г/л на величину аналитического сигнала Cr, Co, Mn, Ni отсутствует. При определении никеля и кобальта в 5%-м растворе NH₄F наблюдался неселективный

ионизационный фон от матрицы. Природа этого фонового сигнала нами не была исследована. Предел обнаружения Ni и Co в пробе определялся флуктуациями фонового сигнала от соединений NH₄F в пламени. Анализ пробы NaF является более сложным для пламенного АИМ. Атомы Na, находящиеся в основном состоянии 3s и возбужденных состояниях 3p, имеют довольно высокую эффективность ионизации лазерным излучением первой и второй ступеней возбуждения. Подобная ионизация эффективна даже на крыльях линий поглощения вдали от резонанса. Добавление определяемых элементов в разбавленный раствор 0,2г/л NaF также обнаруживает фоновый сигнал от основы пробы. Установлено, что определение содержания Cr, Co, Ni, Mn в образцах NaF с помощью атомно-ионизационного метода в пламени ацетилен-воздух без удаления матрицы невозможно.

В результате проведенных исследований были выбраны следующие режимы нагрева (рис. 9): сушка при t=90°C в течение 50с, предварительный нагрев до t=800°C в течение 100–600с и рабочий цикл для хрома t=1800°C, для марганца t=1700°C, а для никеля и кобальта t=2000°C. Испарение пробы происходит в течение 6с для каждого цикла. При этих режимах нагрева, работая с 2%-ми растворами, удалось эффективно на предварительной стадии удалить натрий, не теряя хром, марганец, никель и кобальт.

Для исследования аэрозольных факелов от твердых поверхностей нами были выбраны чистые металлы (Fe, Al, Zn, Ag, Au), сплавы и почвы. Морфология аэрозольных факелов была исследована как функция аэрозольных плотностей от расстояния. Мощный Nd-YAG лазер был сфокусирован на исследуемые поверхности при частоте 1.0Гц. Образованные аэрозоли транспортировались в медленном потоке воздуха (10-12см³с⁻¹) к счётчику частиц.

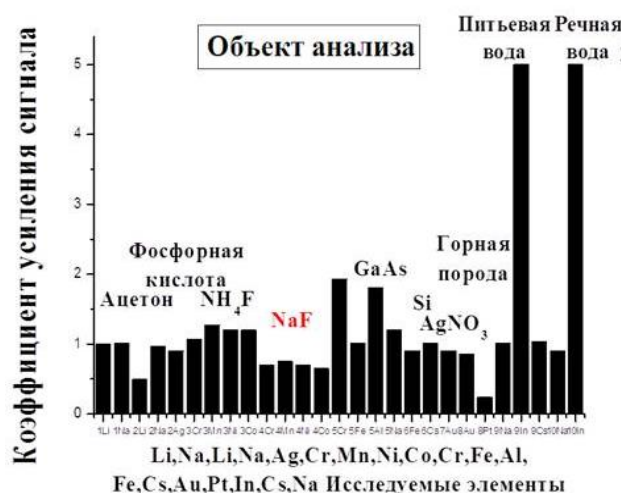


Рис. 8. Зависимости коэффициента усиления сигнала от исследуемых образцов.

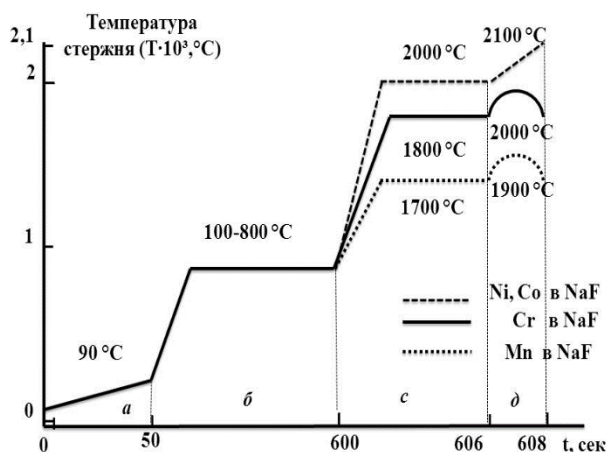


Рис. 9. Режимы нагрева стержня при определении Cr, Mg, Ni и Co в NaF; а) предварительный нагрев, б) испарение натрия, в) испарение определяемых элементов, д) прокаливание стержня.

Для достижения высокой эффективности процесса возбуждения и стимулируемой лазером ионизации не обязательно возбуждать атомы в состоянии, лежащие вблизи границы ионизации. В условиях оптического насыщения можно реализовать столкновительные схемы возбуждения атомов, которые происходят даже с уровней, лежащих на $0,9 \div 1,3$ эВ ниже границы ионизации.

В работе [16] описаны внутрирезонаторные лазерные абсорбционные спектрометры для измерения экстинкции света частицами аэрозоля. В спектрометре для образования аэрозольных частиц были использованы мощное лазерное излучение и пневматические распылители. В экспериментальной установке использовали два варианта формирования лазерных импульсов испарения и накачки лазера на красителях: одним и двумя Nd:YAG лазерами. На первом варианте Nd:YAG лазер запускается от формирователя двойных импульсов генератора DG535. Вторая установка была основана на применении двух лазеров. Первой Nd:YAG лазер использован для накачки лазера на красителях.

В работе приведены результаты экспериментов по исследованию измерения числа частиц, коэффициента экстинкции и время затухания лазерного импульса в оптическом резонаторе. Для исследования аэрозольных факелов от твердых поверхностей нами были выбраны чистые металлы (Fe, Al, Zn, Ag, Au), сплавы и почвы и результаты представлены в таблице 3. Было исследовано влияние мощности лазера на морфологию аэрозоля.

Результаты, приведенные в таблице 4, указывают, что величины фактора эффективности зависят от размерного параметра. Родаминовые аэрозоли поглощают излучения лазера на длине волны $\lambda=635$ нм.

Результаты исследования для не поглощающих аэрозолей, таких как NaCl, CsCl, NaI, NaF, KCl представлены в таблице 5. Максимальное значение Q соответствует минимальному значению размерного параметра, и результаты представлены в таблице 5. Эффективность экстинкции аэрозольной частицы возрастает с увеличением показателя преломления.

Таблица 3. Результаты исследования различных сплавов

Металлы	Al	Fe	Au	Ag	Zn	Почва
$\tau_{0, c}$	$1,41 \times 10^{-6}$	$1,49 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-6}$	$1,49 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-6}$
$\tau_{1, c}$	$9,7 \times 10^{-7}$	$11,7 \times 10^{-7}$	$7,2 \times 10^{-7}$	$5,5 \times 10^{-7}$	$3,4 \times 10^{-7}$	$1,5 \times 10^{-7}$
$\sigma, L=12\text{мм}$ см^{-1}	$1,1 \times 10^{-6}$	$6,12 \times 10^{-6}$	24×10^{-6}	35×10^{-6}	77×10^{-6}	200×10^{-6}

Impact Factor:

ISRA (India) = 3.117	SIS (USA) = 0.912	ICV (Poland) = 6.630
ISI (Dubai, UAE) = 0.829	РИИЦ (Russia) = 0.156	PIF (India) = 1.940
GIF (Australia) = 0.564	ESJI (KZ) = 8.716	IBI (India) = 4.260
JIF = 1.500	SJIF (Morocco) = 5.667	OAJI (USA) = 0.350

Таблица 4. Результаты исследования органических красителей

Родамин 640	d, нм	τ_1 , с	τ_0 , с	c, см/с	N, см ⁻³	Q	α
$\lambda = 615\text{нм}$	$2,75 \times 10^{-5}$	$9,74 \times 10^{-7}$	$1,49 \times 10^{-6}$	3×10^{10}	2206	4,1112	1,40
$\lambda = 635\text{нм}$	$5,75 \times 10^{-5}$	$1,45 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-6}$	3×10^{10}	64,667	4,1012	2,84

Таблица 5. Результаты исследования для не поглощающих аэрозолей NaCl, CsCl, NaI, NaF, KCl, AgNO₃

	NaF	KCl	NaCl	CsCl	AgNO ₃	NaI
d, нм	$9,0 \times 10^{-5}$	$9,0 \times 10^{-5}$	$10,0 \times 10^{-5}$	$7,5 \times 10^{-5}$	$4,0 \times 10^{-5}$	$6,3 \times 10^{-5}$
τ_1 , с	$1,2 \times 10^{-6}$	$1,3 \times 10^{-6}$	$1,4 \times 10^{-6}$	$1,2 \times 10^{-6}$	$1,3 \times 10^{-6}$	$1,04 \times 10^{-6}$
τ_0 , с	$1,5 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-6}$	$1,47 \times 10^{-6}$	$1,6 \times 10^{-6}$	$1,49 \times 10^{-6}$	$1,53 \times 10^{-6}$
N, см ⁻³	246,333	96	32	284	223,333	541,333
Q	3,579	5,12	3,6664	5,347	2,756	6,199
A	4,49	4,49	4,984	3,74	1,99	3,12
N	1.34	1.49	1.54	1.64	1.75	1.77
c, см/с	3×10^{10}	3×10^{10}	3×10^{10}	3×10^{10}	3×10^{10}	3×10^{10}

Экспериментально измеряли время задержки заполненного резонатора с пробой рассеивающей (τ_1) и время задержки пустого резонатора (τ_0). Тогда $\tau_1 = 1/14326,7468 = 6,98 \cdot 10^{-5}$ с, $\tau_0 = 1/13327,12461 = 7,5035 \cdot 10^{-5}$ с, коэффициент экстинкции для атмосферного воздуха $3,3 \cdot 10^{-6} \text{см}^{-1}$.

Выводы:

1. Впервые реализованы двухступенчатые столкновительные схемы возбуждения атомов In, Li, Au, Ag, Pt, Yb в атомизаторе «Графитовая печь», состоящего из графитовой трубки, платформы и охлаждаемого коллектора. Полученная чувствительность элементов в водных модельных растворах оказалась в 100 и 10 раз лучше по сравнению с атомизаторами «пламя» и «стержень-пламя» соответственно. Показано, что максимальный сигнал наблюдается для атомов In при переходе $5p^2P_{3/2} \rightarrow 6s^2S_{3/2} \rightarrow 8p^2P_{1/2}$ и для атомов Li, Na, Ag, Au, Pt при переходе $(n)s \rightarrow (m)p \rightarrow (k)d$ соответственно (где n, k, m и f главные квантовые числа уровней) соответственно.

2. Первые эксперименты с использованием электротермического атомизатора-ионизатора в

АИ методе подтвердела его перспективность. Метод может быть использован в процессах возбуждения и ионизации исследуемых атомов для нахождения оптимальных условий и получения максимального селективного сигнала, а также для решения широкого круга физических и химических задач.

3. Разработан и создан внутррезонаторный лазерный абсорбционный спектрометр для измерения экстинкции света частицами аэрозоля, который состоит из системы лазеров, системы блока подготовки и очистки газа и системы регистрации сигнала затухания.

4. Впервые изучены морфологические и оптические свойства аэрозольных факелов от поверхностей металлов (Fe, Al, Zn, Ag, Au), сплавов и почвы при воздействии мощного инфракрасного импульсного лазера ($\lambda = 1064\text{нм}$).

5. Определены зависимости эффективности экстинкции ($Q_{\text{экс}}$) прозрачных аэрозолей солей металлов (NaCl, CsCl, NaI, NaF, KCl, AgNO₃) и показана осциляция эффективности экстинкции $Q_{\text{экс}}$ аэрозолей соли металлов (NaCl, CsCl, NaI, NaF, KCl, AgNO₃), органических красителей.

References:

- Balykin, V. I. (2012). The scientific career of V S Letokhov. *Phys. Scr.* V85, pp.1-51.
- Fedosseev, V. N., Kudryavtsev, Y., & Mishin, V. I. (2012). Resonance laser ionization of atoms for nuclear physics. *Phys. Scr.* V85, pp.1-14.

Impact Factor:

ISRA (India) = 3.117
ISI (Dubai, UAE) = 0.829
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
PIHHI (Russia) = 0.156
ESJI (KZ) = 8.716
SJIF (Morocco) = 5.667

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

3. Travis, J. C., & Turk, G. C. (1996). *Laser-Enhanced Ionization Spectrometry* (p.334). New York.: John Wiley & Sons Inc.
4. Winefordner, J. D., Gornushkin, I. B., Pappas, D., Matveev, O. I., & Smith, B. W. (2000). Novel uses of lasers in atomic spectroscopy. *Plenary Lecture. J. Anal. Atomic Spectrom.* 15, pp.1161-1189.
5. Nadeema, A., Haqa, S. U., Nawaza, M., Shaha, M., & Baig, M. A. (2011). Measurements of the oscillator strengths for the $6p7s (1/2,1/2)1 \rightarrow 6pnp (1/2,3/2)2$ Rydberg transitions of lead. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy. Vol. 66. №11–12*, pp.841-846.
6. Zorov, N. B., Kuzyakov, Y. Y., Novodvorskiy, O. A., & Chaplgin, V. I. (1987). *Ximiya plazmi*. Moskva: Energoatomizdat.
7. Tuxlibayev, O. (1999). *Lazernaya rezonansnaya spektroskopiya mnogoelektronnix elementov i issledovaniye ix termodinamicheskix parametrov*. (p.230). Diss. dok. fiz.-mat. nauk. Tashkent: Otdel Teplofiziki.
8. Eshkobilov, N. B. (2002). *Okololoporogovaya lazerno-ionizatsionnaya spektrokopiya ridbergovskix i avtoionizatsionnix sostoyaniy atomov I, II i III grupp elementov*. (p.250). Diss. dok. fiz.-mat. nauk. Tashkent: Otdel Teplofiziki.
9. Sviridov, A. P. (2015). *Lazerno-indusirovanniye termoprosessi v soyedinitelnix tkanyax i ix opticheskaya diagnostika*. (p.280). Diss. dok. fiz.-mat. nauk. Moskva.
10. Kochelayev, Y. A. (2013). *Protochno-opticheskii metod analiza bioaerozoley*. Avtoref. dis. kand. texn. nauk. Sankt-Peterburg. pp.1-19.
11. Kokhkharov, A. M., Bakhranov, S. A., Zakhidov, E. A., Makhmanov, U. K., Ofurov, S. P., & Bolobernikov, A. V. (2014). Study of molecular-colloidal solutions of C₇₀ fullerene: structural features, optical and nonlinear-optical properties. *Uzbek Journal of Physics. Tashkent. Vol.16, № 2*, pp.114-125.
12. Miles, R., Carruthers, A., & Reid, J. (2011). Novel optical techniques for measurements of light extinction, scattering and absorption by single aerosol particles. *Laser & Photonics Reviews. Volume 5, Issue 4*, pp.534-552,
13. Khalmanov, A. T., Do-kyong, K., Lee, J., Eshkobilov, N., & Tursunov, A. (2004). *Korean J. Phys. Soc.* 44, pp.843.
14. Xalmanov, A. T., & Eshkobilov, N. B. (2014). Identifikatsiya ultramalix konsentrasiy atomov v razlichnix fazovix sostoyaniyax veshyestva. *Uzbekskiy fizicheskii jurnal. Tom 16. №2*, pp.100-105.
15. Xalmanov, A. T., & Eshkobilov, N. B. (2017). Issledovaniye dinamiki i tipov fizicheskix prosessov vzbujdeniya i ionizatsii atomov metodom atomno-ionizatsionnoy spektroskopii. *Uzbekskiy fizicheskii jurnal. Tom 19. №5*, pp.272-277.
16. Xalmanov, A. T. (2017). *Visokochuvstvitelnaya lazernaya spektroskopiya ultramalix konsentrasiy atomov v razlichnix fazovix sostoyaniyax veshyestva*. Avtoreferat doktorskoy (DSc) dissertatsii po fiziko-matematicheskim naukam. (pp.1-60). Tashkent.