

НОВЫЙ ПОДХОД К ТЕХНОЛОГИЯМ
ПОЛУЧЕНИЯ ЧИСТОГО ВЕЩЕСТВА ИЗ ГОРНОЙ ПОРОДЫ
С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯН. Б. ЭШКАБИЛОВ¹⁾, Ш. Р. ХАЙДАРОВ¹⁾, А. С. КУРБАНИЯЗОВ²⁾¹⁾Самаркандский государственный университет им. Шарафа Рашидова,
буль. Университетский, 15, 140104, г. Самарканд, Узбекистан²⁾Самаркандский филиал Ташкентского университета информационных технологий
им. Мухаммеда аль-Хорезми, ул. Ибн Сины, 2а, 140100, г. Самарканд, Узбекистан

Аннотация. Рассматривается метод селективной ступенчатой фотоионизации атомов для исследования околопороговых явлений на границе дискретных и сплошных спектров атомов при возбуждении ридберговских и автоионизационных состояний с резонансным лазерным излучением. Основными достоинствами метода являются высокие чувствительность, спектральное и временное разрешение, а также селективность, гибкость и универсальность. Оптимально подобранная схема селективной фотоионизации атомов под воздействием двух или трех лазерных лучей с определенным образом настроенными частотами и заданными интенсивностями позволяет ионизировать каждый атом за 10^{-5} – 10^{-7} с. Используя 20 % энергии излучения со средней мощностью 10^3 Вт, можно добиться фотоионизации атомов на уровне примерно 1 моль вещества за 1 ч. Таким образом, относительно небольшие установки, как правило, производят несколько тонн чистого вещества в год. По этой причине метод селективной ступенчатой фотоионизации атомов в сочетании с перестраиваемым лазером средней мощности (10^2 – 10^3 Вт) считается самым продуктивным для тонкого разделения вещества на атомарно-молекулярном уровне.

Ключевые слова: лазерное излучение; селективная ступенчатая фотоионизация атомов; ССФА; нейтральные атомы; горная порода; атомный пучок; фотоионный сигнал; флуктуация; коллимированный ионный пучок.

Благодарность. Работа выполнена по открытому плану научно-исследовательских работ Самаркандского государственного университета имени Шарафа Рашидова, а также в рамках фундаментального научного проекта Ф2-15 «Околопороговая лазерно-ионизационная спектроскопия атомов тяжелых элементов (Pt, Au, Hg, Tl, Pb)».

Образец цитирования:

Эшкабилов НБ, Хайдаров ШР, Курбаниязов АС. Новый подход к технологиям получения чистого вещества из горной породы с помощью лазерного излучения. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2024;2:11–19. EDN: MVLOOC

For citation:

Eshkabilov NB, Khaidarov ShR, Kurbaniyazov AS. A new approach to technologies for obtaining pure matter from rock using laser radiation. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2024;2:11–19. Russian. EDN: MVLOOC

Авторы:

Напас Бекназарович Эшкабилов – доктор физико-математических наук, профессор; заведующий кафедрой теоретической физики и квантовой электроники Института инженерной физики.

Шухрат Рустамович Хайдаров – докторант кафедры теоретической физики и квантовой электроники Института инженерной физики.

Анвар Сапарбаевич Курбаниязов – кандидат физико-математических наук; заведующий учебно-методическим отделом.

Authors:

Napas B. Eshkabilov, doctor of science (physics and mathematics), full professor; head of the department of theoretical physics and quantum electronics, Institute of Engineering Physics. napas_eshkabilov@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-3057-8650>

Shukhrat R. Khaidarov, doctoral student at the department of theoretical physics and quantum electronics, Institute of Engineering Physics.

khaidarov-shukhrat@mail.ru

Anvar S. Kurbaniyazov, PhD (physics and mathematics); head of the educational and methodological department.

kurbaniyazov85@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-3186-9369>

A NEW APPROACH TO TECHNOLOGIES FOR OBTAINING PURE MATTER FROM ROCK USING LASER RADIATION

N. B. ESHKABILOV^a, Sh. R. KHAIDAROV^a, A. S. KURBANIYAZOV^b

^aSamarkand State University named after Sharof Rashidov,
15 Universitetskiy Boulevard, Samarkand 140104, Uzbekistan

^bSamarkand branch of the Tashkent University of Information Technologies
named after Muhammad Al-Khwarizmi, 2a Ibn Sino Street, Samarkand 140100, Uzbekistan

Corresponding author: A. S. Kurbaniyazov (kurbaniyazov85@gmail.com)

Abstract. This article examines the method of selective stepwise photoionisation of atoms for the study of near-threshold phenomena at the boundary of discrete and continuous spectra of atoms when excited Rydberg and autoionisation states with resonant laser radiation. The main advantage of the method is its high sensitivity, high spectral and temporal resolution, selectivity, flexibility and versatility.

Keywords: laser radiation; selective stepwise photoionisation of atoms; SSPA; neutral atoms; rock; atomic beam; photo-ionic signal; fluctuation; collimated ion beam.

Acknowledgements. This work was carried out according to the open research plan of the Samarkand State University named after Sharof Rashidov, as well as within the framework of the fundamental scientific project F2-15 «Near-threshold laser ionisation spectroscopy of atoms of heavy elements (Pt, Au, Hg, Tl, Pb)».

Введение

Метод селективной ступенчатой фотоионизации атомов (ССФА), разработанный для разделения изотопов [1; 2], дает возможность развить новый подход к технологии тонкого разделения вещества на атомно-молекулярном уровне, когда с помощью лазерного излучения можно непосредственно манипулировать атомами или молекулами определенного сорта, т. е. собирать макроскопические количества вещества по одному атому или по одной молекуле из любой матрицы, в том числе из горной породы. Наиболее важным процессом лазерной атомно-молекулярной технологии является получение особо чистых веществ дорогостоящих технологических элементов из горных пород в виде сплавов и пленок [3]. Для синтеза чистых веществ или очистки веществ от примесей можно использовать селективную фотоионизацию атомов.

Суть метода заключается в следующем: нейтральные атомы селективно возбуждаются узкополосным лазерным излучением в промежуточные высоколежащие состояния за одну или несколько ступеней, а затем возбужденные атомы ионизируются либо дополнительным лазерным излучением, либо электрическим полем (рис. 1). Первые эксперименты с применением этой методики были проведены в 1971 г. с атомами рубидия [4]. В дальнейшем данный метод был использован для разделения радиоактивных изотопов урана [5].

Идея нового подхода к технологиям получения чистых веществ заключается в том, что нейтральные атомы, создаваемые в атомном пучке, после двойной коллимации селективно возбуждаются и ионизируются излучением двух или трех узкополосных перестраиваемых лазеров в две либо три ступени.

Ширина линии лазерного излучения настолько узка, что возбуждаются или ионизируются только нужные сорта атомов (либо ионов). Селективно возбужденные ионы отделяются от пучка с помощью электромагнитного поля и осаждаются на коллектор (подложку) (рис. 2).

Описанный подход к технологиям получения чистых веществ является наиболее универсальным и гибким. Оптимально подобранная схема селективной фотоионизации атомов под воздействием двух или трех лазерных лучей с определенным образом настроенными частотами и заданными интенсивностями позволяет ионизировать каждый атом за 10^{-5} – 10^{-7} с. При использовании 20 % энергии излучения со средней мощностью 10^3 Вт на фотоионизацию атомов можно селективно ионизировать примерно 1 моль вещества за 1 ч. Следовательно, установка сравнительно небольшого размера в принципе способна обеспечить получение нескольких тонн чистого вещества в год. По этой причине метод ССФА в сочетании с перестраиваемыми лазерами со средней выходной мощностью 10^2 – 10^3 Вт можно рассматривать как достаточно производительный метод тонкого разделения вещества на атомно-молекулярном уровне [6]. Как видно, использование этого метода предъявляет определенные требования к энергетике лазеров.

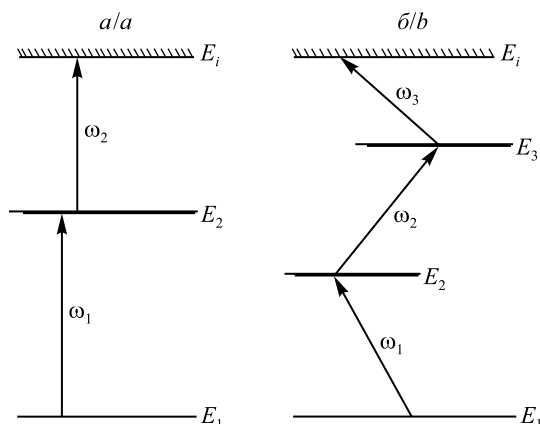


Рис. 1. Схемы резонансной двухступенчатой (а) и трехступенчатой (б) фотоионизации атомов
Fig. 1. Schemes of resonant two-stage (a) and three-stage (b) photoionisation of atoms

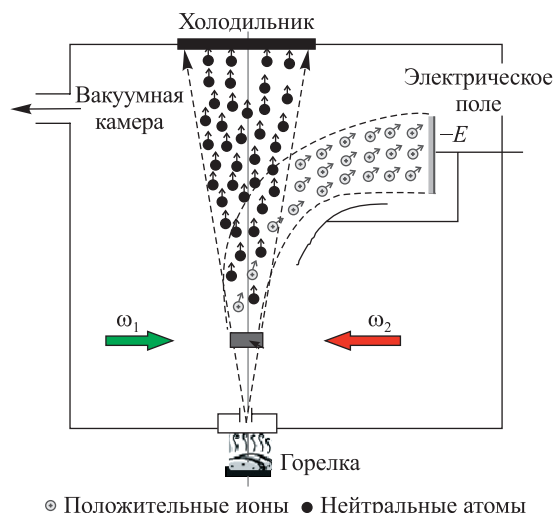


Рис. 2. Схема получения пленок с помощью фотоионного пучка
Fig. 2. Scheme for producing films using a photoion beam

Кроме того, метод ССФА может применяться для очистки веществ [7]. Лазерная технология очистки вещества методом ССФА имеет ряд весомых преимуществ перед существующими методами, основанными на различии каких-либо химических или физических свойств очищаемого вещества и примесей. Во-первых, степень очистки в процессе отделения заданного элемента от любых примесей может достигать значений более 10^3 , т. е. если взять материал массового производства с чистотой 10^{-7} %, то метод ССФА обеспечит его очистку вплоть до 10^{-10} %. Во-вторых, данный метод универсален, т. е. применим практически к любому элементу независимо от его физико-химических характеристик. Если необходимо очистить вещество от одного или нескольких определенных элементов, то возможны селективная ионизация только примесей и удаление их из атомного пучка вещества. Гибкость метода позволяет непосредственно использовать ионные пучки для получения чистой пленки заданного элемента (см. рис. 2) или внедрения ионов в однородное вещество.

Сам процесс получения особо чистых веществ на атомно-молекулярном уровне не так прост. Он требует проведения нескольких последовательных самостоятельных экспериментов, включающих в себя следующие этапы: 1) создание источника нейтральных атомов, который позволяет работать в широком диапазоне плотностей атомного пучка, имеющего гауссову форму; 2) проведение селективной ступенчатой фотоионизации нужного сорта атомов лазерным излучением с высокой эффективностью; 3) реализацию механизма контроля концентрации атомов и ионов в пространстве пучка и управления ею; 4) отделение селективно возбужденных ионов нужного сорта атомов от основного пучка и осаждение их на подложку путем создания электромагнитного поля вдоль атомного пучка. Кратко рассмотрим каждый этап процесса.

Методика проведения эксперимента по получению особо чистых веществ на атомно-молекулярном уровне

Создание источника нейтральных атомов. В рамках реализации данного этапа был создан высокотемпературный атомизатор (источник нейтральных атомов) на основе танталовой трубки с графитовым тиглем, схема которого приведена на рис. 3 [8]. Он обеспечивает внутри печи температуру до 2273 К. Атомизатор устанавливается в вакуумной фотоионизационной камере, где создается высокий вакуум с давлением остаточных газов $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па. Испаряемое вещество (горная порода) помещается в тигель, находящийся внутри танталовой трубки, которая нагревается электрическим током. Корпус нижней и верхней частей атомизатора охлаждается проточной водой, тем самым обеспечивается комнатная температура наружной стороны всего корпуса атомизатора.

Неселективные тепловые ионы, образующиеся при нагревании тигля, задерживаются системой электростатической защиты, которая находится в верхней части атомизатора. На четыре последовательно расположенные диафрагмы, установленные на пути атомного пучка, подаются положительный и отрицательный потенциалы, которые полностью очищают атомный пучок от неселективных тепловых ионов. Тем самым на выходе атомизатора получаем чистые нейтральные атомные пучки, которые можно использовать не только для селективной фотоионизации нейтральных атомов, но и для любых спектроскопических исследований без доплеровского уширения.

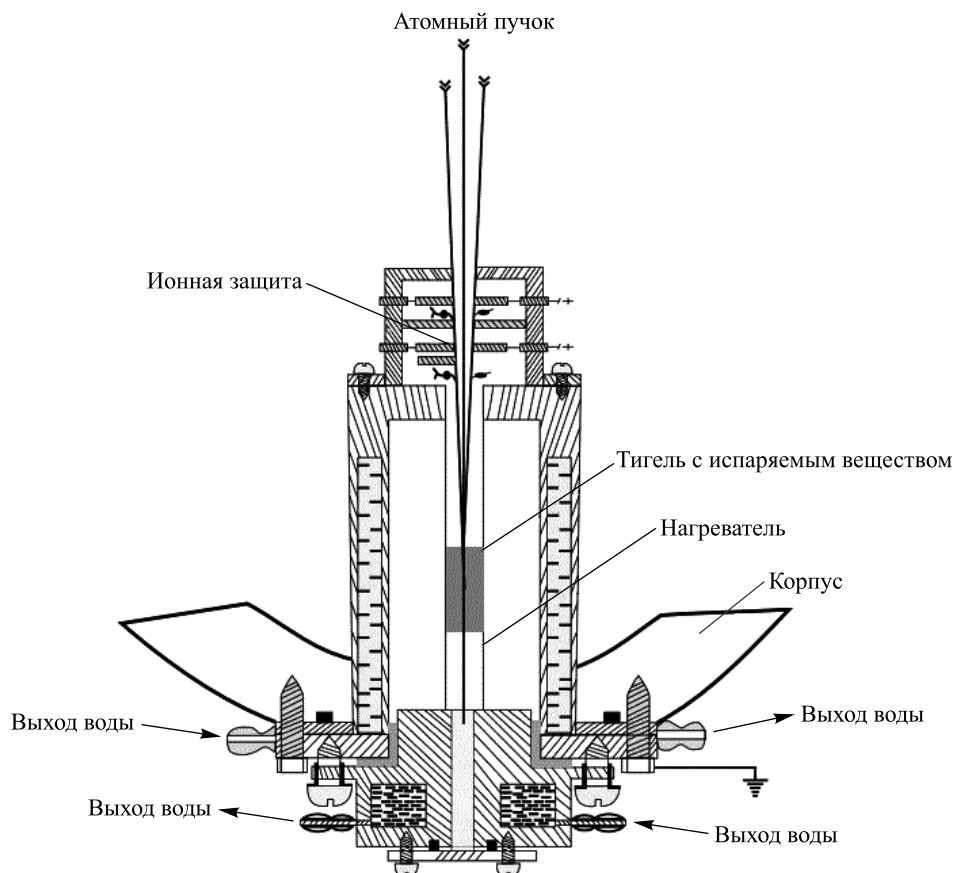


Рис. 3. Схема высокотемпературного источника нейтральных атомов
Fig. 3. Scheme of a high-temperature source of neutral atoms

Следующими этапами процесса получения особо чистых веществ на атомно-молекулярном уровне являются проведение селективной ступенчатой фотоионизации нужного сорта атомов лазерным излучением и реализация механизма контроля концентрации атомов и ионов в пространстве пучка и управления ею. В целях создания оптимальных условий для их осуществления исследовано пространственное распределение ионов и изучены зависимости концентрации атомов от температуры тигля на примере атомов галлия и индия¹ [9].

Проведение селективной ступенчатой фотоионизации нужного сорта атомов лазерным излучением. Лазерные лучи направлялись в вакуумную камеру, где создавались атомные пучки галлия и индия, и фокусировались в исследуемый объем в пятно размером меньше сотен микрон. Это обеспечивало высокое пространственное разрешение пучка. В эксперименте с атомами индия длина волны излучения лазера на красителе перестраивалась на переход $5p\ ^2P_{1/2} \rightarrow 6s\ ^2S_{1/2}$ с длиной волны $\lambda_1 = 410,2$ нм. Лазерное излучение с такой длиной волны одновременно возбуждало и ионизировало атомы индия, так как энергия двух фотонов превышала энергию ионизации атома на $2053,146\text{ см}^{-1}$ (рис. 4, а) [10].

В случае с атомами галлия лазер настраивался на переход $4p\ ^2P_{1/2} \rightarrow 5s\ ^2S_{1/2}$ с длиной волны $\lambda_1 = 417,2$ нм. Лазерное излучение с такой длиной волны одновременно возбуждало и ионизировало атомы галлия, так как энергия двух фотонов превышала энергию ионизации атома на $363,2\text{ см}^{-1}$ [11, с. 16–26]. Таким образом, атомы галлия селективно фотоионизировались с использованием всего лишь одного лазера.

Атомный пучок формировался за счет эффузии паров галлия или индия из печи, нагретой до температуры 1700 К. Пучок коллимировался набором диафрагм с отверстием диаметром 4 мм. Концентрация атомов в пучке составляла 10^{10} атомов на 1 см^3 . Давление остаточных газов в камере равнялось $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па. Луч лазера фокусировался линзой в пятно диаметром 0,1 мм в область атомного пучка. С помощью электромеханического привода линза перемещалась поперек пучка равномерно во времени. Вследствие этого лазерный луч пересекал атомный пучок по одному из направлений (x или y). Возникшие ионы в результате фотоионизации детектировались вторичным электронным умножителем [12]. На рис. 4, б,

¹А. с. 1092387 СССР, МКИ³ G 01 N 21/39. Способ измерения пространственного распределения атомных концентраций / А. Т. Турсунов, Н. Б. Эшкабилов (СССР). № 3540021/18–25 ; заявл. 17.01.83 ; опубл. 15.05.84, Бюл. № 18. 5 с. : ил.

приведена амплитуда фотоионного сигнала от положения фокуса линзы при сканировании в направлениях x и y . Как видно из рис. 4, б, ширина атомного пучка на полувысоте составляет 6,4 мм (высота от последней диафрагмы источника атомного пучка равна 85 мм). Достоверность результатов проверена напылением испаряемого вещества на стеклянную подложку, установленную в область взаимодействия лазерного луча с атомным пучком. Напыленная подложка была исследована с использованием атомно-силового микроскопа CoreAFM (Nanosurf, Швейцария) (рис. 5, а).

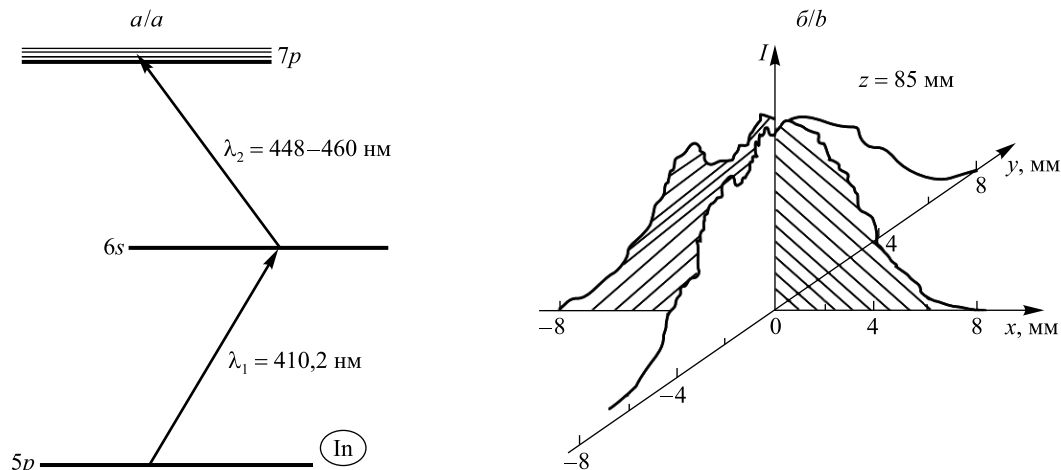


Рис. 4. Схема двухступенчатой фотоионизации атомов индия (а) и амплитуда фотоионного сигнала в направлениях x и y (б)
Fig. 4. Scheme of two-stage photoionisation of indium atoms (a) and amplitude of the photoion signal in the x and y directions (b)

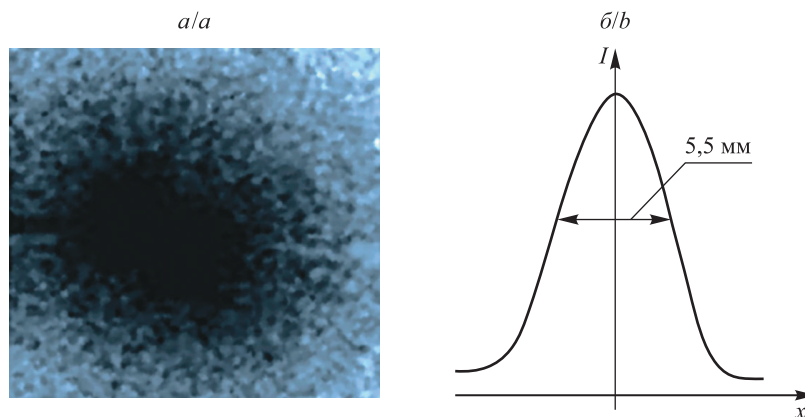
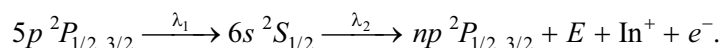


Рис. 5. Фотография подложки, напыленной атомным пучком индия (а), и полученная микроденситограмма (б)
Fig. 5. Photograph of a substrate sputtered with an indium atomic beam (a) and the resulting microdensitogram (b)

Как видно из рис. 5, б, ширина интенсивности на полувысоте равняется 5,5 мм, что хорошо согласуется с данными, полученными методом ССФА (см. рис. 4, б). Из рис. 4, б, и рис. 5, б, следует, что пучок имеет колоколообразный вид, похожий на гауссову форму, т. е. обеспечены нормальные условия для определения концентрации атомов. С другой стороны, концентрацию атомов можно рассчитать с помощью формулы, приведенной в работе [13], учитывая гауссову форму атомного пучка. В нашем случае диаметр канала источника равнялся 3 мм, диаметр последней диафрагмы – 4 мм. Пучок имел трапециевидную форму. Его ширина на полувысоте составляла 7,3 мм, что хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Реализация механизма контроля концентрации атомов и ионов в пространстве пучка и управления ею. Для создания оптимальных условий для определения концентрации атомов и ионов методом ССФА сначала были изучены спектроскопические параметры (квантовые дефекты и тонкие структуры) высоковозбужденных ридберговских состояний атома индия [14], используемые для возбуждения и ионизации атомов, так как они играют важную роль в эффективности всего процесса фотоионизации.

В эксперименте исследованы главные серии ридберговских состояний атома индия. Высоковозбужденные ридберговские ($np\ ^2P_{1/2, 3/2}$) состояния атома индия заселяются из основного ($5p\ ^2P_{1/2}$) или метастабильного ($5p\ ^2P_{3/2}$) состояния через промежуточное ($6s\ ^2S_{1/2}$) состояние по следующей схеме:



Основным термом является дублетный терм $^2P_{1/2, 3/2}$, причем уровень $^2P_{1/2}$ расположен ниже уровня $^2P_{3/2}$. Величина расщепления составляет около $2212,56\text{ см}^{-1}$. Для возбуждения атома выбирается более сильный квантовый переход, т. е. $5p\ ^2P_{1/2} \rightarrow 6s\ ^2S_{1/2}$, который возбуждается лазером первой ступени с длиной волны $\lambda_1 = 410,2\text{ нм}$. Длина волны лазера второй ступени перестраивалась в диапазоне $\lambda_2 = 448\text{--}460\text{ нм}$, что позволяет возбуждать ридберговские состояния с $n = 17\text{--}70$. По фотоионизационным спектрам были определены квантовые дефекты и тонкие структуры состояний. На основе результатов эксперимента, усредненных по трем измерениям, определены значения энергии квантовых переходов и квантовые дефекты ридберговских состояний. Квантовые дефекты оставались почти постоянными при изменении главного квантового числа: для состояний $np\ ^2P_{1/2}$ они равнялись $3,225$, а для состояний $np\ ^2P_{3/2} - 3,195$.

В эксперименте разрешены дублетные расщепления спектра P -состояния атома индия до $n = 53$. В результате обработки спектров определена величина междублетного расщепления тонкой структуры для ридберговских состояний и изучена ее зависимость от главного квантового числа. Эта зависи-

мость хорошо описывается соотношением $\Delta E = \frac{5900}{(n^*)^3}$, где n^* – эффективное главное квантовое число,

и согласуется с водородоподобным поведением атома [15, с. 171–228]. Полученные результаты были использованы при выборе оптимальной схемы возбуждения и ионизации атома индия для решения некоторых технологических задач, связанных с возбуждением атомных уровней лазерным излучением.

При указанных параметрах атомного пучка и лазерного луча рассчитаны давление паров и концентрация атомов в области взаимодействия (рис. 6, сплошная линия) [16]. Кроме того, на рис. 6 приведены экспериментальные значения фотоионного сигнала, полученного в результате фотоионизации (см. рис. 6, пунктирная линия).

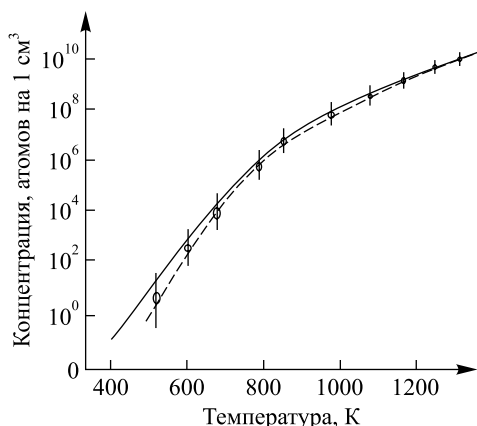


Рис. 6. Зависимость концентрации атомов индия от температуры тигля

Fig. 6. Dependence of the concentration of indium atoms on the crucible temperature

Как видно из рис. 6, с понижением температуры тигля концентрация атомов в области взаимодействия снижается и, соответственно, уменьшается фотоионный сигнал. При малой плотности пучка фотоионный сигнал становится нестабильным, что объясняется флуктуациями числа атомов в объеме возбуждения, т. е. расчетное число атомов на рис. 6 отличается от регистрируемого числа ионов. При измерении ультранизких концентраций, когда в облучаемой области имеются одиночные атомы, неизбежны сильные флуктуации числа детектируемых атомов. Таким образом, атомные пучки с такими термодинамическими параметрами вполне могут использоваться в процессе получения особо чистых материалов с помощью лазерного излучения.

Отделение селективно возбужденных ионов нужного сорта атомов от основного пучка и осаждение их на подложку. Основным и наиболее сложным этапом технологии получения особо чистых веществ на атомно-молекулярном уровне является отделение селективно возбужденных ионов нужного сорта атомов от основного пучка и осаждение их на подложку.

В настоящее время в полупроводниковой атомной технологии получения материалов используется метод вакуумной эпитаксии из молекулярных пучков [17]. Однако этот метод позволяет создавать только одномерные сверхрешетки. В работе [18, с. 461–491] получены чередующиеся пленки $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ толщиной 10 Å и GaAs толщиной 60 Å с общим числом слоев около 100. При использовании фотоионных пучков Ga^+ , Al^+ , As^+ с помощью электромагнитной фокусирующей и отклоняющей системы можно создать трехмерные гетероструктурные сверхрешетки (рис. 7). Одним из потенциальных применений особо чистых фотоионных пучков, получаемых методом ССФА, является создание сложных гетероструктур типа сверхрешеток. Эта возможность пространственного контроля осаждаемых ионов представляется принципиально важной для полупроводниковой атомной технологии получения материалов в будущем [19].

Были проведены пробные эксперименты в целях получения пленки металлического индия особой чистоты с помощью фотоионного пучка, создаваемого при селективной двухступенчатой фотоионизации атомов индия лазерным излучением. Весь процесс селективной фотоионизации атомов, экстракции ионов из пучка и осаждения их на подложку осуществлялся в вакууме ($1,33 \cdot 10^{-3}$ Па). Процесс не требует контакта очищаемого вещества (индия) с какими-либо реагентами или материалами, кроме подложки. Ионы индия, образующиеся в результате фотоионизации, имеют почти такие же тепловые скорости движения, что и нейтральные атомы. За счет этого с помощью умеренных электрических полей из них легко сформировать коллимированный ионный пучок, который может быть хорошим ионным источником для любого масс-сепаратора ионов [20]. Выделение ионов нужного сорта атомов из совокупности всех атомов осуществлялось с помощью постоянных электрических полей, имеющих градиент напряженностей от 100 до 500 В/см вдоль пучка. При подборе оптимальных параметров атомного пучка и напряженности электрических полей из основного атомного пучка были выделены ионные пучки атомов индия, образовавшиеся в результате селективной двухступенчатой фотоионизации атомов лазерным излучением. На рис. 8 представлена фотография стеклянной подложки, напыленной фотоионным пучком индия.

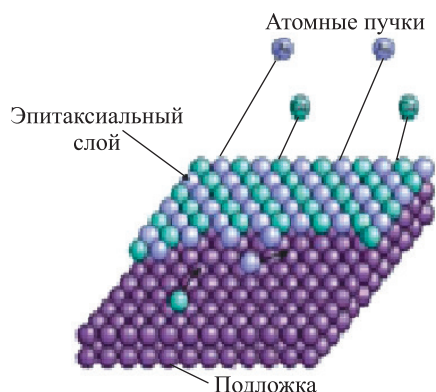


Рис. 7. Принципиальная схема
трехмерной гетероструктурной сверхрешетки.
Источник: [18]

Fig. 7. Schematic diagram
of a three-dimensional heterostructure superlattice.
Source: [18]



Рис. 8. Фотография подложки,
напыленной селективно созданным
фотоионным пучком индия

Fig. 8. Photograph of a substrate sputtered
with a selectively generated indium photoion beam

Полученные таким образом эпитаксиальные пленки широко используются в нанотехнологиях и при производстве полупроводниковых приборов для создания слоев полупроводниковых материалов с высоким кристаллическим качеством, таких как кремний, германий, арсенид галлия и фосфид индия [21, с. 416].

В заключение можно отметить, что основой успешного развития данного направления являются подбор оптимальных схем возбуждения и ионизации атомов различных элементов лазерным излучением и разработка эффективных мощных лазеров ультрафиолетового и видимого диапазонов с перестраиваемой частотой излучения.

Библиографические ссылки

1. Летохов ВС, Мур СБ. Лазерное разделение изотопов (обзор). Часть 1. *Квантовая электроника*. 1976;3(2):248–287.
2. Летохов ВС, Мур СБ. Лазерное разделение изотопов. Часть 2. *Квантовая электроника*. 1976;3(3):485–516.
3. Летохов ВС, Мишин ВИ, Пурецкий АА. Селективная фотоионизация атомов лазерным излучением. В: Смирнов БМ, редактор. *Химия плазмы. Выпуск 4*. Москва: Атомиздат; 1977. с. 3–60.
4. Амбарцумян РВ, Калинин ВН, Летохов ВС. Двухступенчатая селективная фотоионизация атомов рубидия лазерным излучением. *Письма в ЖЭТФ*. 1971;13(6):305–307.
5. Tuccio SA, Dubrin JW, Peterson OG, Snavely BB. Two-step selective photoionization of ^{235}U in uranium vapor. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 1974;10(9):790. DOI: 10.1109/JQE.1974.1068454.
6. Letokhov VS. Prospects of dye laser applications to the selective laser photophysics. *Spectroscopy Letters*. 1975;8(9):697–709. DOI: 10.1080/00387017508067374.
7. Letokhov VS. Laser isotope separation. *Nature*. 1979;277(5698):605–610. DOI: 10.1038/277605a0.
8. Eshkabilov NB, Kurbanliyazov AS, Haidarov ShR. Laser photoionization spectroscopy of Rydberg and autoionizing states of rare-earth element atoms. *Russian Physics Journal*. 2022;64(10):1872–1879. DOI: 10.1007/s11182-022-02535-2.
9. Турсунов АТ, Эшкабилов НБ. Пространственная диагностика атомного пучка галлия методом двухступенчатой лазерной фотоионизации. *Квантовая электроника*. 1982;9(10):2096–2097.
10. Турсунов АТ, Эшкабилов НБ. Детектирование единичных атомов галлия в атомном пучке. *Журнал технической физики*. 1984;54(1):166–168.
11. Радциг АА, Смирнов БМ. *Параметры атомов и атомных ионов*. 2-е издание. Москва: Энергоатомиздат; 1986. 344 с.
12. Эшкабилов НБ. Детектирование единичных атомов золота в атомном пучке. В: *Спектроскопия конденсированных сред*. Самарканд: Издательство Самаркандского государственного университета; 1991. с. 57–60.
13. Несмеянов АН. *Давление пара химических элементов*. Москва: Издательство Академии наук СССР; 1961. 396 с.
14. Eshkabilov NB, Khaydarov ShR. Laser spectroscopy of the Rydberg states of the indium atom. In: *3rd International conference on nanophotonics, metamaterials and photovoltaics (ICNMP-2023); 2023 May 23–27; Samarkand, Uzbekistan*. [S. l.]: [s. n.]; 2023. p. 29–30.
15. Смирнов БМ. *Возбужденные атомы*. Москва: Энергоиздат; 1982. 232 с.
16. Kasimov AK, Tursunov AT, Eshkabilov NB. Investigation of aluminum vaporization by method of laser resonance step photoionization. In: Winograd N, Parks JE, editors. *Resonance ionization spectroscopy – 1996. Eighth International symposium; 1996 June 30 – July 5; State College, USA*. Woodbury: AIP Press; 1997. p. 141 (AIP conference proceedings; volume 388).
17. Мучник МЛ, Орлов ЮВ, Паршин ГД, Черняк ЕЯ, Летохов ВС, Мишин ВИ. Получение ионного пучка индия методом селективной ступенчатой лазерной фотоионизации атомов. *Квантовая электроника*. 1983;10(11):2331–2335.
18. Майссел Л, Глэнг Р, Елинсон МИ, Смолко ГГ, редакторы. *Технология тонких пленок. Том 1*. Москва: Советское радио; 1977. 664 с.
19. Эшкабилов НБ, Хайдаров ШР. Технология получения чистых материалов на атомно-молекулярном уровне с помощью лазерного излучения. *Modern Science and Research*. 2022;1(1):173–176. DOI: 10.5281/zenodo.7337055.
20. Зайнабидинов СЗ, Саидов АС, Лейдерман АЮ, Каланов МУ, Усмонов ШН, Рустамова ВМ и др. Получение, структура и свойства эпитаксиальных пленок $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2\text{S}_3)(\text{ZnSe})_y$ на основе GaAs. *Физика и техника полупроводников*. 2016;50(1):60–66. EDN: VPSAMN.
21. Гусев АИ. *Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии*. 2-е издание. Москва: Физматиздат; 2007. 416 с.

References

1. Letokhov VS, Moore CB. [Laser isotope separation (review). Part 1]. *Kvantovaya elektronika*. 1976;3(2):248–287. Russian.
2. Letokhov VS, Moore CB. [Laser isotope separation. Part 2]. *Kvantovaya elektronika*. 1976;3(3):485–516. Russian.
3. Letokhov VS, Mishin VI, Puretskii AA. [Selective photoionization of atoms by laser radiation]. In: Smirnov BM, editor. *Khimiya plazmy. Vypusk 4* [Plasma chemistry. Issue 4]. Moscow: Atomizdat; 1977. p. 3–60. Russian.
4. Ambartsumyan RV, Kalinin VN, Letokhov VS. [Two-step selective photoionization of rubidium atoms by laser radiation]. *Pis'ma v ZhETF*. 1971;13(6):305–307. Russian.
5. Tuccio SA, Dubrin JW, Peterson OG, Snavely BB. Two-step selective photoionization of ^{235}U in uranium vapor. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 1974;10(9):790. DOI: 10.1109/JQE.1974.1068454.
6. Letokhov VS. Prospects of dye laser applications to the selective laser photophysics. *Spectroscopy Letters*. 1975;8(9):697–709. DOI: 10.1080/00387017508067374.
7. Letokhov VS. Laser isotope separation. *Nature*. 1979;277(5698):605–610. DOI: 10.1038/277605a0.
8. Eshkabilov NB, Kurbanliyazov AS, Haidarov ShR. Laser photoionization spectroscopy of Rydberg and autoionizing states of rare-earth element atoms. *Russian Physics Journal*. 2022;64(10):1872–1879. DOI: 10.1007/s11182-022-02535-2.
9. Tursunov AT, Eshkabilov NB. Spatial diagnostics of atomic gallium beam by the two-step laser photoionization. *Kvantovaya elektronika*. 1982;9(10):2096–2097. Russian.
10. Tursunov AT, Eshkabilov NB. [Detection of single gallium atoms in an atomic beam]. *Journal of Technical Physics*. 1984;54(1):166–168. Russian.
11. Radtsig AA, Smirnov BM. *Parametry atomov i atomnykh ionov* [Parameters of atoms and atomic ions]. 2nd edition. Moscow: Energoatomizdat; 1986. 344 p. Russian.
12. Eshkabilov NB. [Detection of single gold atoms in an atomic beam]. In: *Spektroskopiya kondensirovannykh sred* [Spectroscopy of condensed matter]. Samarkand: Publishing House of the Samarkand State University; 1991. p. 57–60. Russian.
13. Nesmeyanov AN. *Davlenie para khimicheskikh elementov* [Vapor pressure of chemical elements]. Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR; 1961. 396 p. Russian.
14. Eshkabilov NB, Khaydarov ShR. Laser spectroscopy of the Rydberg states of the indium atom. In: *3rd International conference on nanophotonics, metamaterials and photovoltaics (ICNMP-2023); 2023 May 23–27; Samarkand, Uzbekistan*. [S. l.]: [s. n.]; 2023. p. 29–30.

15. Smirnov BM. *Vozbuzhdenные atomy* [Excited atoms]. Moscow: Energoizdat; 1982. 232 p. Russian.
16. Kasimov AK, Tursunov AT, Eshkabilov NB. Investigation of aluminum vaporization by method of laser resonance step photo-ionization. In: Winograd N, Parks JE, editors. *Resonance ionization spectroscopy – 1996. Eighth International symposium; 1996 June 30 – July 5; State College, USA*. Woodbury: AIP Press; 1997. p. 141 (AIP conference proceedings; volume 388).
17. Muchnik ML, Orlov YuV, Parshin GD, Chernyak EYa, Letokhov VS, Mishin VI. Production of an indium ion beam by the method of selective step laser photp ionization of atoms. *Kvantovaya elektronika*. 1983;10(11):2331–2335. Russian.
18. Maissel LI, Glang R, editors. *Handbook of thin film technology*. New York: McGraw-Hill Book Company; 1970. X, 1174 p.
Russian edition: Maissel L, Glang R, Elinson MI, Smolko GG, editors. *Tekhnologiya tonkikh plenok. Tom 1*. Moscow: Sovetskoe radio; 1977. 664 p.
19. Eshkabilov NB, Khaidarov ShR. Technology for obtaining pure materials at the atomic-molecular level using laser radiation. *Modern Science and Research*. 2022;1(1):173–176. Russian. DOI: 10.5281/zenodo.7337055.
20. Zaynabidinov SZ, Saidov AS, Leiderman AYU, Kalanov MU, Usmonov ShN, Rustamova VM, et al. Receiving, structure and properties of epitaxial films $(\text{GaAs})_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{ZnSe})_y$ based on GaAs. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*. 2016;50(1):60–66. Russian. EDN: VPSAMN.
21. Gusev AI. *Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii* [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies]. 2nd edition. Moscow: Fizmatizdat; 2007. 416 p. Russian.

Получена 15.01.2024 / исправлена 30.01.2024 / принята 30.01.2024.
Received 15.01.2024 / revised 30.01.2024 / accepted 30.01.2024.