

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 24.1.193.01  
(Д 002.110.02), СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ  
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА  
СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 22.12.2021г. № 32

О присуждении Вильшанской Евгении Владимировне, гражданке Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Экспериментальное исследование ультрахолодной плазмы кальция-40» по специальности 1.3.9 – физика плазмы принята к защите 20.10.2021г., (протокол заседания № 23) диссертационным советом 24.1.193.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, (495) 485-8345, [jiht.ru](http://jiht.ru)), утвержденного Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации № 105/нк от 11.04.2012 г (ред. 1046/нк от 15.10.2021).

Соискатель Вильшанская Евгения Владимировна 1993 года рождения, в 2017 году окончила Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ".

Работает в должности научного сотрудника лаборатории № 1.4. – лазерного охлаждения и ультрахолодной плазмы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

В 2021 году окончила очную аспирантуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего

образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ".

Диссертация выполнена в лаборатории № 1.4. – лазерного охлаждения и ультрахолодной плазмы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Научный руководитель заведующий лабораторией № 1.4. – лазерного охлаждения и ультрахолодной плазмы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук доктор физико-математических наук Зеленер Борис Борисович.

Официальные оппоненты:

- доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела физики плазмы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» Скворцова Нина Николаевна;

- кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела спектроскопии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук Вишнякова Гульнара Александровна

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (г. Москва) в своем положительном заключении, составленном ведущим научным сотрудником Отдела теории плазмы Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» д.ф.-м.н. Кукушкиным Александром Борисовичем (утвержденном 06.12.2021г. руководителем Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий НИЦ «Курчатовский институт»

Лутченко А.В.) указала, что научная значимость работы определяется в первую очередь новизной полученных результатов. Например, создана установка по лазерному охлаждению атомов кальция-40, на которой получено самое точное значение потенциала ионизации, равное  $49305,91966(4) \text{ см}^{-1}$ , и впервые получена ультрахолодная плазма кальция-40 в стационарном режиме.

Результаты работы могут быть применены в различных организациях при исследовании сред с высоковозбужденными атомами и ионами, включая Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Институт спектроскопии РАН, Объединенный Институт высоких температур РАН, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт».

Соискатель имеет 28 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 8 работ в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень наукометрической базы данных Web of Science, 9 тезисов в сборниках трудов конференций.

1. Sautenkov. V.A. Power broadening of two-photon coherent resonances on Rydberg atomic transitions in a magneto-optical trap / V.A. Sautenkov, S.A. Saakyan, E.V. Vilshanskaya, B.B. Zelener, B.V. Zelener // Journal of Russian Laser Research. — 2017. — Vol. 38., no. 1. — Pp. 91-95.
2. Зеленер, Б.Б. Когерентное возбуждение ридберговских состояний в холодном газе атомов  $^{40}\text{Ca}$  / Б.Б. Зеленер, И.Д. Аршинова, А.А. Бобров, Е.В. Вильшанская, С.А. Саакян, В.А. Саутенков, Б.В. Зеленер, В.Е. Фортов // Письма в ЖЭТФ. — 2018. — Vol. 108., no. 12. — Pp. 829-833.
3. Зеленер, Б.Б. Измерение температуры оптически охлажденных атомов кальция с использованием метода дифференциальной двухфотонной спектроскопии / Б.Б. Зеленер, А.А. Бобров, Е.В. Вильшанская, И.Д. Аршинова, С.А. Саакян, В.А. Саутенков, Б.В. Зеленер, В.Е. Фортов // ДАН. — 2018. — Vol. 485., no. 3. — Pp. 281-284.
4. Vilshanskaya, E.V. Saturation spectroscopy of calcium atomic vapor in hot

quartz cells with cold windows / E.V. Vilshanskaya, S.A. Saakyan, V.A. Sautenkov, D.A. Murashkin, B.B. Zelener, B.V. Zelener // Journal of Physics: Conference Series. — 2018. — Vol. 946., no. 1. — Pp. 012130.

5. Зеленер, Б.Б. Измерение энергий ридберговских переходов в  $n^1S_0$  состояния и порога ионизации атомов  $^{40}\text{Ca}$  / Б.Б. Зеленер, С.А. Саакян, В.А. Саутенков, Е.В. Вильшанская, Б.В. Зеленер, В.Е. Фортов // Письма в ЖЭТФ. — 2019. — Vol. 110., no. 12. — Pp. 767-771.

6. Vilshanskaya, E.V. The setup for laser cooling and trapping of calcium atoms / E.V. Vilshanskaya, S.A. Saakyan, V.A. Sautenkov, B.B. Zelener // Journal of Physics: Conference Series. — 2019. — Vol. 1147., no. 1. — Pp. 012097.

7. Zelener, B.B. Differential two-photon spectroscopic measurements of cold atoms temperature with variable angle between probe beams / B.B. Zelener, E.V. Vilshanskaya, S.A. Saakyan, I.D. Arshinova, A.A. Bobrov, V.A. Sautenkov, B.V. Zelener // Laser Physics. — 2020. — Vol. 30., no. 2. — Pp. 025501.

8. Зеленер, Б.Б. Диагностика разреженной ультрахолодной плазмы на основе эффекта автоионизации ридберговских состояний атомов  $^{40}\text{Ca}$  / Б.Б. Зеленер, Е.В. Вильшанская, С.А. Саакян, В.А. Саутенков, Б.В. Зеленер, В.Е. Фортов // Письма в ЖЭТФ. — 2021. — Vol. 113. no. 2. — Pp. 92-95.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН (ИТПЭ РАН)** (г.н.с., д.ф.-м.н., Сарычев А.К.) – отзыв положительный, с замечаниями:

- в работе получена плазма с большой неидеальностью, однако полученная плазма является принципиально неравновесной. Насколько свойства такой плазмы дают представление о физике неидеальной стационарной плазмы с высокой плотностью?

2. **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский**

**ядерный университет «МИФИ»** (и.о. зам. зав. кафедрой «Физико-технических проблем метрологии», к.ф.-м.н., доцент Борисюк П.В.) – отзыв положительный, без замечаний.

**3. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»** (к.т.н., доцент Поройков А.Ю.) – отзыв положительный, с замечаниями:

- в автореферате не приведена методика оценки погрешности измеренного в работе порога ионизации кальция-40;
- в автореферате не приведены оценки погрешности измеряемых в работе величин, кроме порога ионизации атомов кальция-40.

**4. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»** (старший преподаватель к.ф.-м.н. Кавыршин Д.И.) – отзыв положительный, с замечаниями:

- одним из положений, выносимых на защиту, является наиболее точное определение порога ионизации кальция-40, при этом автор не приводит в автореферате ссылок на другие исследования и сравнения их результатов;
- на рисунке 4 представлены экспериментальная и теоретическая зависимости температуры захваченных атомов кальция от отстройки охлаждающего излучения МОЛ, при этом на частоте, на которой, согласно теории, должен наблюдаться минимум температуры, экспериментальная зависимость имеет максимум. Данное качественное отличие хода зависимостей не объясняется погрешностью измерений и никак не прокомментировано автором;
- в третьей главе подчёркивается чувствительность эффекта автоионизации ридберговских состояний атомов  $^{40}\text{Ca}$  к паразитным малым электрическим полям, что фактически означает снижение порога ионизации под их воздействием. При этом в автореферате не освещено, как было достигнуто и контролировалось отсутствие паразитных полей при метрологически точном

определении значения энергии ионизации атомов  $^{40}\text{Ca}$  49305,91966(4)  $\text{см}^{-1}$ .

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается:

- д.ф.-м.н., профессор Скворцова Нина Николаевна является ведущим ученым в области физики плазмы, имеет многочисленные публикации по тематике представленной диссертационной работы:

1. Skvortsova N. N. et al. Synthesis of micro-and nanostructured materials via oscillating reactions initiated by high-power microwave pulses // *Ceramics International*. – 2021. – Т. 47. – №. 3. – С. 3978-3987;
2. Kharchevskii A. A. et al. Modernization of the filtration system for the Doppler reflectometry diagnostics of the L-2M stellarator for operation in regimes high-power ECR heating // *Journal of Instrumentation*. – 2020. – Т. 15. – №. 01. – С. 01038;
3. Batanov G. M. et al. Time–Space Evolution of the Parameters of Turbulent Density Fluctuations During Pulsed EC Heating of the Plasma at the L-2M Stellarator // *Plasma Physics Reports*. – 2020. – Т. 46. – №. 10. – С. 955-966.

- к.ф.-м.н., Вишнякова Гульнара Александровна является признанным специалистом в области лазерной физики и исследовании холодных атомов в магнитооптической ловушке, и имеет публикации по тематике представленной диссертационной работы:

1. Kryuchkov D. S. et al. Compact High-Finesse ULE Cavities for Laser Frequency Stabilization // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. – 2021. – Т. 48. – №. 10. – С. 295-300;
2. Fedorova E. S. et al. Optical pumping of ultracold thulium atoms to a lower level of the clock transition and study of their depolarisation // *Quantum Electronics*. – 2019. – Т. 49. – №. 5. – С. 418;
3. Kalganova E. et al. Two-temperature momentum distribution in a thulium magneto-optical trap // *Physical Review A*. – 2017. – Т. 96. – №. 3. – С. 033418.

- Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» широко

известен своими достижениями в области физики плазмы. В частности, в этом институте ведутся работы по исследованию кинетики холодной пристеночной плазмы, взаимодействия короткого лазерного импульса с плазмой, а также по исследованию спектров ридберговских атомов во внешних полях.

1. Kukushkin A. B. et al. Ballistic model of recycling of atomic and molecular hydrogen and its application to the ITER main chamber // Plasma Physics and Controlled Fusion. – 2021. – Т. 63. – №. 3. – С. 035025;
2. Astapenko V. A., Lisitsa V. S., Yakovets A. V. Absorption of Ultrashort Laser Pulses by Diatomic Molecules // Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 2018. – Т. 127. – №. 6. – С. 1003-1008;
3. Letunov A., Lisitsa V. Spectra of a Rydberg Atom in Crossed Electric and Magnetic Fields // Universe. – 2020. – Т. 6. – №. 10. – С. 157.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

– на созданной соискателем экспериментальной установке по лазерному охлаждению атомов  $^{40}\text{Ca}$  произведен захват в магнитооптическую ловушку  $3 \cdot 10^7$  атомов, температура которых составляет порядка 5 мК;

– с использованием неразрушающей ридберговские состояния методики, основанной на падении резонансной флуоресценции атомов в магнитооптической ловушке, проведена регистрация спектров переходов в  $n$   $^1\text{S}_0$ -состояния атомов  $^{40}\text{Ca}$  для  $n$  от 40 до 120, по энергиям которых было определено значение потенциала ионизации, равное  $49305,91966(4) \text{ см}^{-1}$ ; полученный потенциал ионизации является самым точным на данный момент;

– впервые экспериментально получена ультрахолодная неидеальная плазма в стационарном режиме плотностью до  $10^6 \text{ см}^{-3}$ ; проведено исследование основных параметров ультрахолодной стационарной плазмы; показано, что радиус Дебая не превышает размеров исследуемой среды,

параметр неидеальности может достигать 2, температура ионов составляет порядка 0,05 К;

– разработан чувствительный метод диагностики электрических полей, создаваемых разреженной ультрахолодной плазмой, на основе эффекта автоионизации ридберговских состояний атомов кальция; показана возможность детектирования плазмы с плотностью ионов до  $10^3 \text{ см}^{-3}$ .

**Теоретическая значимость исследования** обоснована тем, что:

– уточненное в работе значение порога ионизации атомов кальция-40 позволит проверить теоретический расчет энергий ридберговских переходов.

**Практическое значение** полученных соискателем результатов подтверждается тем, что:

- достижение рекордной точности измерения потенциала ионизации, значение которого составило  $49305,91966(4) \text{ см}^{-1}$ , представляет интерес для баз атомных данных в аспекте энергии ридберговских переходов атомов кальция-40;
- исследуемые в работе свойства ультрахолодной плазмы с концентрацией до  $10^6 \text{ см}^{-3}$  дают представление о физике плазмы с более высокой плотностью и энергией, так как неидеальная плазма различной природы с одинаковым параметром неидеальности является подобной и имеет одинаковые кинетические и переносные свойства. Также изучение ультрахолодной неидеальной плазмы кальция позволит улучшить разрешающую способность ионных просвечивающих микроскопов путем создания плазмы с упорядоченной структурой.

Результаты работы могут быть применены в различных организациях при исследовании сред с высоковозбужденными атомами и ионами, включая Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Институт спектроскопии РАН, Объединенный Институт высоких температур РАН, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт».

**Оценка достоверности результатов** исследования подтверждается



проведением измерений на современном сертифицированном оборудовании при использовании проверенных ранее методик, анализом неопределенности измерений, согласием результатов, полученных различными методами, например, методом баллистического разлета атомов в пустоту и методом дифференциальной двухфотонной спектроскопии для оценки температуры атомов.

**Личный вклад соискателя** состоит в выполнении основного объема экспериментальных исследований, изложенных в диссертационной работе. Все выносимые на защиту результаты и положения получены автором лично или при его непосредственном участии. Автор принимала активное участие в расчете и создании вакуумной и оптической частей установки, реализации стационарной концентрации ультрахолодной плазмы кальция, а также анализе и интерпретации полученных экспериментальных данных. Научный вклад автора является определяющим.

Апробация результатов исследования проводилась на 9 российских и международных конференциях. Основные публикации по выполненной работе также подготовлены при определяющем участии автора.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было.

Соискатель Вильшанская Евгения Владимировна согласилась с техническими замечаниями и ответила на задаваемые ей в ходе заседания вопросы и привела собственную аргументацию.

На заседании от 22.12.2021 г. диссертационный совет принял решение присудить за решение научной задачи, связанной с получением и исследованием ультрахолодной плазмы в стационарном режиме, имеющей значение для развития физики плазмы, Вильшанской Е.В. ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

При проведении тайного голосования Диссертационный совет в количестве 20 человек, из них очно: 10 докторов наук (6 по специальности

1.3.9 – физика плазмы и 4 по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника), дистанционно: 10 докторов наук (5 по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 5 по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника), участвовавших в заседании, из 30 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 20, против 0, недействительных бюллетеней - 0.

И.о. зам. председателя диссертационного совета 24.1.193.01

д.ф.-м.н., профессор

Храпак А.Г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.193.01

д.ф.-м.н.

Васильев М.М.

22.12.2021г.