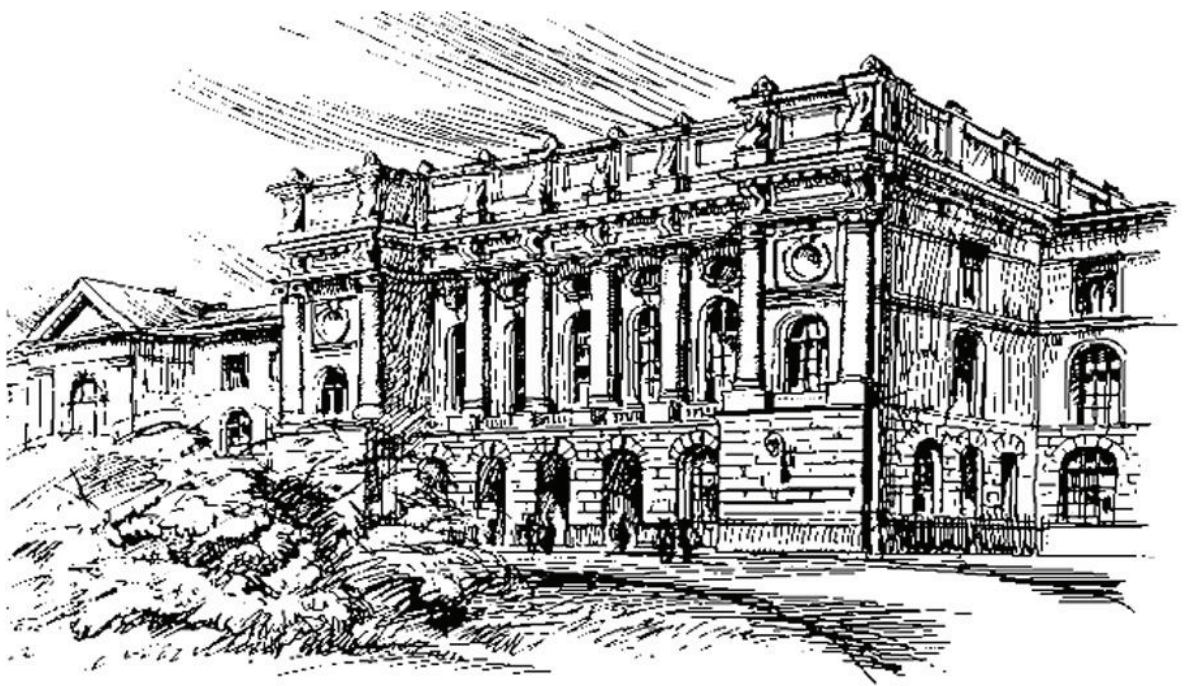


**ЛАЗЕРЫ.  
ИЗМЕРЕНИЯ. ИНФОРМАЦИЯ.**

**2013**

Том 1



Санкт-Петербург

Издательство Политехнического университета

2013

Академия инженерных наук России им. А.М. Прохорова  
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет  
Оптическое общество России им. Д.С. Рождественского  
Балтийский государственный технический университет «Военмех»  
Новороссийский политехнический институт (филиал)  
Кубанского государственного технологического университета  
Научно-исследовательский центр «Репер»  
Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере

**Л А З Е Р Ы.**

**ИЗМЕРЕНИЯ. ИНФОРМАЦИЯ.**

**2013**

**Сборник докладов 23-й международной конференции**

Том 1

Санкт-Петербург

Издательство Политехнического университета

2013

УДК 62+66  
ББК 30

**ЛАЗЕРЫ.ИЗМЕРЕНИЯ.ИНФОРМАЦИЯ.2013 Том 1.** – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013.- 347 с.

В сборник включены доклады, представленные на 23-й Международной конференции «Лазеры.Измерения.Информация – 2013». Сборник рассчитан на научных сотрудников, инженеров, аспирантов и студентов старших курсов соответствующих специальностей.

Редакционная коллегия:

- Очкин В.Н. – д-р физ.-мат. наук, проф., действительный член Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова
- Привалов В.Е. – д-р физ.-мат. наук, проф., действительный член Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова
- Фотиади А.Э. – д-р физ.-мат. наук, проф., действительный член Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова

Организация и проведение конференции поддержаны РФФИ (грант 13-02-06050 г)

Информационная поддержка журнала «Фотоника»

Председатель Программного комитета - **С.Н.Багаев** акад. РАН  
Сопредседатели - **В.Н.Очкин** акад. АИН, зам. директора ФИАН  
- **А.И.Рудской** чл.-кор РАН, ректор СПбГПУ

### **Оркомитет**

Э.И.Акопов канд. техн. наук  
В.М.Арпишкин канд. физ-мат. наук  
А.В.Бабкин проф.  
В.И. Балобан проф.  
Г.А.Баранов акад. АИН  
А.С.Борейшо проф.  
А.Н.Власов проф.  
Г.И.Долгих чл.-кор РАН  
В.С.Иванов проф.  
И.Г.Иванов проф.  
И.Б.Ковш проф.  
Н.М.Кожевников проф.  
В.Н.Курятов проф.  
Е.Л.Латуш проф.  
В.А.Лопота чл.-кор РАН, акад. АИН  
В.Я.Панченко акад. РАН, акад. АИН  
В.Е.Привалов (председатель) акад. АИН  
И.В.Пучков (уч.секретарь) канд.техн.наук  
А.Л.Соколов проф.  
А.Н.Солдатов акад. АИН  
В.А.Степанов проф.  
В.А.Тарлыков проф.  
В.В.Тучин, проф.  
А.Б.Федорцов проф.  
А.Э. Фотиади акад. АИН  
Ю.В. Чугуй акад. АИН  
В.Г.Шеманин, проф.  
И.А.Щербаков чл.-кор. РАН, акад. АИН

От редакторов

С 1991 года мы регулярно проводили школу-семинар-выставку «Лазеры и современное приборостроение». Тематика разрасталась, поэтому было принято решение с 2000 года проводить конференцию «Лазеры.Измерения.Информация».

Перечень тем: физика лазеров, в первую очередь, нестабильности и возмущения в них; стабилизация частоты и мощности излучения лазеров; измерения параметров излучения лазеров; измерения с помощью лазеров; лазерные системы; формирование и передача оптической информации; различные оптические технологии. Есть доклады по медико-биологической тематике.

На конференцию «Лазеры.Измерения.Информация-2013» был представлено 132 доклада. Авторы докладов работают в различных учреждениях Санкт-Петербурга, Москвы, Екатеринбурга, Нижнего Новгорода, Минска, Новосибирска, Томска, Самары, Волгограда, Киева, Ростова на Дону, Новороссийска, Рязани, Воронежа, Орла, Перми, Казани, Ижевска, Благовещенска, Комсомольска на Амуре, Ярославля, Нальчика, Фрязино, Черногловки, Соснового Бора, Квангуна, Чанчуна. Издан сборник тезисов. Поступившие доклады издаются в этом году ( как и предыдущие четыре года) в трёхтомнике. Первый из томов Вы держите в руках.

В этом году конференция поддержана грантом РФФИ 13-02-06050-г. Информационная поддержка конференции осуществляется журналом «Фотоника» ([www.photonics.su](http://www.photonics.su) и [www.technosphaera.ru](http://www.technosphaera.ru)). Подробнее о конференции и правилах публикации тезисов и статей на русском и английском см. сайты: [http://laser-portal.ru/content\\_404](http://laser-portal.ru/content_404) и <http://www.photonics.su/news/show/id/269>

Мы рассчитываем проводить данную конференцию и далее. С предложениями и за справками обращаться в Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (195251, Санкт-Петербург, Политехническая 29, Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций, профессору В.Е.Привалову), электронная почта: [vaevpriv@yandex.Ru](mailto:vaevpriv@yandex.Ru) или И.В.Пучкову [penep@peterlink.Ru](mailto:penep@peterlink.Ru), тел-факс: (812) 222-20-65

## СОДЕРЖАНИЕ

И.В. Гончар, А.С. Иванов, А.Б. Федорцов ЛАЗЕРНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	9
М.С. Кузьмин, С.А. Рогов ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ МОДУЛЯТОР СВЕТА ДЛЯ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЫ ВИДЕОПРОЕКТОРА.....	19
А.В. Князьков, Р.И. Харисов ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЗАЗОРА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ .....	29
В.Ю. Андриевская, Э.А. Рагимов ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СТРУКТУРУ СНЕГА И ЛЬДА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ.....	34
В.И. Зайков, М.Р. Крупский ОЦЕНКА КРИВИЗНЫ ПОВЕРХНОСТИ ВОЛНОВОГО ФРОНТА. ....	42
А.А.Равин ОПТИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДИАГНОСТИКИ СУДОВОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ .....	48
Савельев И.И., Синельников А.О. РАБОТА ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА В РЕЖИМЕ СИНХРОНИЗАЦИИ ВСТРЕЧНЫХ ВОЛН .....	57
А.Ф.Шаталов, Ф.А.Шаталов ДИНАМИКА ИНВЕРСИИ НАСЕЛЕННОСТЕЙ АКТИВНОЙ СРЕДЫ ЧЕТЫРЕХ-, ТРЕХ- И КВАЗИТРЕХУРОВНЕВЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ ПРИ СТУПЕНЧАТОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКЕ .....	64
А.Б. Аткарская, О.В. Мкртычев, В.Г. Шеманин ОПТИЧЕСКИЕ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОРАЗМЕРНЫХ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ ПОКРЫТИЙ.....	72
Г.В. Жувикин, Е. А. Викторов ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА СПЕКТРА СОСТОЯНИЙ ЭЛЕКТРОНА В КВАНТОВОЙ ЯМЕ ВБЛИЗИ ПРОВОДЯЩЕЙ СФЕРЫ .....	83
С. А. Шойдин О ТРЕБОВАНИЯХ К ПАРАМЕТРАМ ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ГОЛОГРАФИИ.....	94
Н.А. Ушаков, Л.Б. Лиокумович ИЗМЕРЕНИЕ МИКРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ ВНЕШНЕГО ВОЛОКОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ-ПЕРО С ПИКОМЕТРОВЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ.....	107
Бабенко Т.Н.,Голяева А.Ю.,Лобанов П.Ю., Мануйлович И.С., Сидорюк О.Е. УТОЧНЕНИЕ КРИТЕРИЕВ В ОЦЕНКАХ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ ИЗ ОПТИЧЕСКОГО СИТАЛЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ МЕТОДИК .....	120
Е.А. Тихонов, А.К. Лямец ПРЕЦИЗИОННЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПО УГЛУ БРЮСТЕРА.....	135
В.А. Алексеев, С.И. Юран, А.С. Перминов ИСТОЧНИК ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	155

А.К. Вишератина, А.В. Скрипник ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЦЕССА ФРАКТАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ МЯГКОЙ БИОТКАНИ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ БЛИЖНЕГО ИК ДИАПАЗОНА <i>IN VITRO</i> .....	164
Ю.В. Коробкин, И.В. Романов, А.С. Шиканов О ФИЗИКЕ ВАКУУМНОГО ИСКРОВОГО РАЗРЯДА, ИНИЦИИРУЕМОГО ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ .....	171
О.Е. Костик, В.В. Машко, Л.Л. Тепляшин ПРЕЦИЗИОННЫЙ ДВУХЧАСТОТНЫЙ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ЛАЗЕР С ПРОДОЛЬНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ .....	184
Л.В. Леваш, В.Б. Самойлов ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ USB-ДЖОУЛЬМЕТРЫ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ .....	191
Т.В.Малинский, В.Ю.Хомич ЛАЗЕРНАЯ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКАЯ СОРТИРОВКА МИКРОЧАСТИЦ.....	201
С.Н. Менсов, Ю.В. Полуштайцев ОПТИЧЕСКОЕ СОГЛАСОВАНИЕ ГРАДИЕНТНОГО МНОГОМОДОВОГО И СТУПЕНЧАТОГО ОДНОМОДОВОГО СВЕТОВОДОВ В ФОТОПОЛИМЕРИЗУЮЩЕЙСЯ КОМПОЗИЦИИ.....	209
Д.О.Москалец, О.Д.Москалец УЧЕТ ВЛИЯНИЯ КОНЕЧНОЙ АПЕРТУРЫ ФОТОДЕТЕКТОРА В УСТРОЙСТВАХ ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ .....	220
В.А.Парфенов, Д.В.Дворцов МОДУЛЯЦИЯ ЧАСТОТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ДИОДА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СИГНАЛА ОШИБКИ В СИСТЕМЕ СТАБИЛИЗАЦИИ ЕГО ЧАСТОТЫ.....	226
Ушаков А.П., Байков А.Е., Петров А.И., Далингер Я.М. ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДИАГНОСТИКИ ПРЕДПОМПАЖНОГО СОСТОЯНИЯ АВИАЦИОННОГО ГТД.....	230
Л.А. Глущенко, Ф.А. Запрягаев ВЛИЯНИЕ УСРЕДНЯЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ ПРИЕМНЫХ АПЕРТУР НА УСЛОВИЯ ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛА ПРИ НАЛИЧИИ СПЕКЛ-ФЛУКТУАЦИЙ .....	236
С. Н. Гуляев, С. А. Яловик РЕЛЬЕФНО-ФАЗОВЫЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ НА ГАЛОИДОСЕРЕБРЯНОМ ФОТОМАТЕРИАЛЕ ПФГ-01 С ПОМОЩЬЮ ОБРАБОТКИ, ВКЛЮЧАЮЩЕЙ В СЕБЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ МЕТОДЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЖЕЛАТИНУ ФОТОЭМУЛЬСИОННОГО СЛОЯ.....	247
В.М.Кочергин, А.Е.Лернер, Д.М.Ляхов, И.В.Козлов ЛАЗЕРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ КОМПОНЕНТОВ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ. ....	256
Д.В. Кизеветтер, А.Ю. Савина, Н.М. Журавлева, А.В. Воробьев ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАСЕЛ ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ.....	274
Д.В. Свистунов НАСТРОЙКА УЗЛА ВВОДА ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАНАРНОГО ВОЛНОВОДА МЕТОДОМ ТОРЦЕВОЙ МОДОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ.....	283

В.В. Давыдов, В.И. Дудкин, А.Ю. Карсеев ВОЛОКОННО – ОПТИЧЕСКАЯ ЛИНИЯ СВЯЗИ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ ЯМР В СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ РАБОТЫ КОРАБЕЛЬНЫХ АТОМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК.....	293
А.В. Рязанов, И.Г. Иванов, В.Е. Привалов О СОЗДАНИИ ИНВЕРСИИ В СМЕСИ ИНЕРТНОГО ГАЗА И ПАРОВ МЕТАЛЛА .....	301



## ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА СПЕКТРА СОСТОЯНИЙ ЭЛЕКТРОНА В КВАНТОВОЙ ЯМЕ ВБЛИЗИ ПРОВОДЯЩЕЙ СФЕРЫ

### 1. Введение

Металлические наночастицы размером 1-100 нм обладают оптическими свойствами, существенно отличающимися их от массивных тел. Некоторые из таких свойств, например, эффект гигантского комбинационного рассеяния света молекулами вблизи поверхности отдельной частицы или в промежутке между двумя частицами, находят объяснение в рамках теории коллективных взаимодействий - плазменных колебаний [1]. Вместе с тем в спектрах малых металлических частиц обнаруживаются резонансные размерные явления, связанные с приповерхностными одноэлектронными состояниями в поле поляризационного потенциала изображения.

Впервые квантовая задача о движении заряженной частицы в поляризационном потенциале изображения рассматривалась для плоской поверхности диэлектрика [2]. В поле сил электростатического изображения электрон обладает потенциальной энергией

$$U(x) = -e^2(\varepsilon - 1)/4(\varepsilon + 1)x = -Qe^2/x \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость,  $e$  - заряд электрона,  $x$  - расстояние электрона до поверхности,  $Q = (1/4)(\varepsilon - 1)/(\varepsilon + 1)$ . Для металлической поверхности  $\varepsilon$  принимает бесконечное значение, что дает  $Q = 1/4$ . Решение квантовой задачи с потенциалом (1) дает водородоподобные состояния с энергией дискретного спектра

$$E_n = -Q^2/(2n^2) \quad (2)$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$  - главное квантовое число.

Такие состояния могут далеко простираться в область вакуума над плоской поверхностью. Этим они значительно отличаются от поверхностных состояний Тамма и Шокли, которые локализованы вблизи поверхностного атомного слоя. Поэтому такие состояния также называют ридберговскими — по аналогии с высоковозбужденными состояниями атомов. Однако в отличие от атомов, состояния потенциала изображения проявляют свойства ридберговских атомов, начиная с  $n = 1$ .

В квантовой яме потенциала изображения могут оказаться не только отдельные электроны, но и электроны возбужденных состояний атомов, приблизившиеся к поверхности. Особенно велико влияние поляризационного потенциала на ридберговские атомы [3].

Потенциал, создаваемый индуцируемым зарядом, на больших расстояниях от поверхности ведет себя как классический потенциал изображения. Действию сил поля изображения подвержена любая заряженная частица, оказавшаяся вблизи поверхности. В работе [4] исследовались поверхностные состояния протона, входящего в состав атомарного водорода. Расчеты, выполненные в рамках теории многочастичных функционалов плотности, показывают, что отклонения от потенциала изображения становятся значительными лишь при приближении к поверхности, начиная примерно с 0.2 нм [4]. При этом надо учитывать, что такие тяжелые частицы, как протон локализуются около поверхности на расстоянии порядка 1 а.е. - в области локализации электронных состояний Тамма -Шокли.

Экспериментально состояния электрона в потенциале изображения наблюдались над плоской поверхностью металлов и диэлектриков - твердых и жидких. Локализация электронов в поляризационной яме над поверхностью криогенного газа - явление, получившее название левитации электронов [5]. Для жидкого  $\text{He}^4$   $\epsilon = 1.0572$ . Квантовая система в такой среде аналогична водородоподобному атому с эффективным

зарядом ядра  $Q = 0,0389$ . Для  $n = 1, 2, 3$  среднее расстояние электрона до поверхности равно 11.4 нм, 45.6 нм и 102.6 нм, соответственно. Для первых двух переходов серии Лаймана такой системы расчет дает частоты 119,7 и 141,8 ГГц. Они близки к экспериментально найденным значениям, соответственно равным  $(125,9 \pm 0,2)$  и  $(148,6 \pm 0,3)$  ГГц [5].

При малых расстояниях заряженной частицы от поверхности необходимо учитывать атомистическую структуру вещества поверхности. Обычно это делается путем введения в модель дополнительных параметров.

Например, введение параметра экранировки  $\beta$  устраняет особенность при  $x = 0$

$$U(x) = -Qe^2/(x+\beta) \quad (3)$$

что при  $\beta = 0,104$  нм дает полное согласие с экспериментом в рассмотренном ранее случае [5].

Также поправки к поляризационному потенциалу изображения можно вводить с помощью квантового дефекта. Например, для металлов энергия поляризационного состояния будет иметь вид

$$E_n = -0.85/(n + \Delta)^2, \quad (4)$$

где  $\Delta$  - квантовый дефект.

Эта величина также зависит от кристаллографических индексов граней поверхности. Для большинства металлов энергия поляризационного состояния с  $n = 1$  над плоской поверхностью лежит в области от -0,3 до -0,5 [9].

## **2. Квантовая задача электрона вблизи сферической поверхности**

Характер поляризационного потенциала существенно меняется, если поверхность перестает быть плоской. Такая ситуация наблюдается для малых частиц. В общем случае задача является сложной, однако движение

зарядом ядра  $Q = 0,0389$ . Для  $n = 1, 2, 3$  среднее расстояние электрона до поверхности равно 11.4 нм, 45.6 нм и 102.6 нм, соответственно. Для первых двух переходов серии Лаймана такой системы расчет дает частоты 119,7 и 141,8 ГГц. Они близки к экспериментально найденным значениям, соответственно равным  $(125,9 \pm 0,2)$  и  $(148,6 \pm 0,3)$  ГГц [5].

При малых расстояниях заряженной частицы от поверхности необходимо учитывать атомистическую структуру вещества поверхности. Обычно это делается путем введения в модель дополнительных параметров.

Например, введение параметра экранировки  $\beta$  устраняет особенность при  $x = 0$

$$U(x) = -Qe^2/(x+\beta) \quad (3)$$

что при  $\beta = 0,104$  нм дает полное согласие с экспериментом в рассмотренном ранее случае [5].

Также поправки к поляризационному потенциалу изображения можно вводить с помощью квантового дефекта. Например, для металлов энергия поляризационного состояния будет иметь вид

$$E_n = -0.85/(n + \Delta)^2, \quad (4)$$

где  $\Delta$  - квантовый дефект.

Эта величина также зависит от кристаллографических индексов граней поверхности. Для большинства металлов энергия поляризационного состояния с  $n = 1$  над плоской поверхностью лежит в области от -0,3 до -0,5 [9].

## **2. Квантовая задача электрона вблизи сферической поверхности**

Характер поляризационного потенциала существенно меняется, если поверхность перестает быть плоской. Такая ситуация наблюдается для малых частиц. В общем случае задача является сложной, однако движение

В случае изолированной незаряженной сферы потенциальная энергия взаимодействия с увеличением расстояния до центра сферы убывает быстрее

$$U(r) = -R^3 e^2 / (2 r^2 (r^2 - R^2)) \quad (6)$$

Число связанных состояний в таких ямах оказывается конечным.

Потенциальная энергия электрона, взаимодействующего с заряженной проводящей сферой равна

$$U(r) = Ze^2/r - R^3 e^2 / (2 r^2 (r^2 - R^2)) \quad (7)$$

Квантовая задача с потенциалами (5)-(7) представляет значительный интерес для изучения оптических и электронных свойств кластеров и малых частиц размером от единиц до сотен нанометров. Проведившиеся ранее исследования выявили периодичность изменения свойств кластеров металлов и полупроводников с увеличением их размера. В частности, это проявляется в периодическом изменении устойчивости кластеров при оптическом возбуждении, ионизации, термическом воздействии, а также их поляризуемости и взаимодействии со средой. Существование «магических чисел» размеров кластеров также является проявлением такой периодичности [10,11]. Теоретические разработки ряда авторов показали тесную связь наблюдаемой периодичности с симметрией электронных состояний кластеров.

В данной работе исследуется формирование энергетических уровней связанных состояний электрона на границе сплошного спектра в потенциальной яме вблизи проводящей сферы. Основными параметрами задачи являются размер кластера  $R$  и его зарядовое состояние  $Z$ .

Формирование связанных состояний изучалось путем численного решения уравнения Шредингера для сферических частиц различного размера и зарядового состояния. Критическим параметром, принимающим непрерывное множество значений, здесь является радиус кластера, а

фиксированными параметрами являются заряд кластера и главное квантовое число электронного состояния.

Рассматривались случаи: 1) заземленная сфера, 2) изолированная нейтральная сфера, 3) изолированная отрицательно заряженная сфера.

Энергетический спектр квантовой системы находится решением уравнения Шредингера для радиальной волновой функции  $\chi(r)$

$$\left\{ \frac{1}{r^2} \left( \frac{d}{dr} \right)^2 r^2 \left( \frac{d}{dr} \right) - \frac{l(l+1)}{r^2} + 2[E - U(r)] \right\} = 0 \quad (8)$$

В данной работе исследование ограничено состояниями с  $l = 0$ .

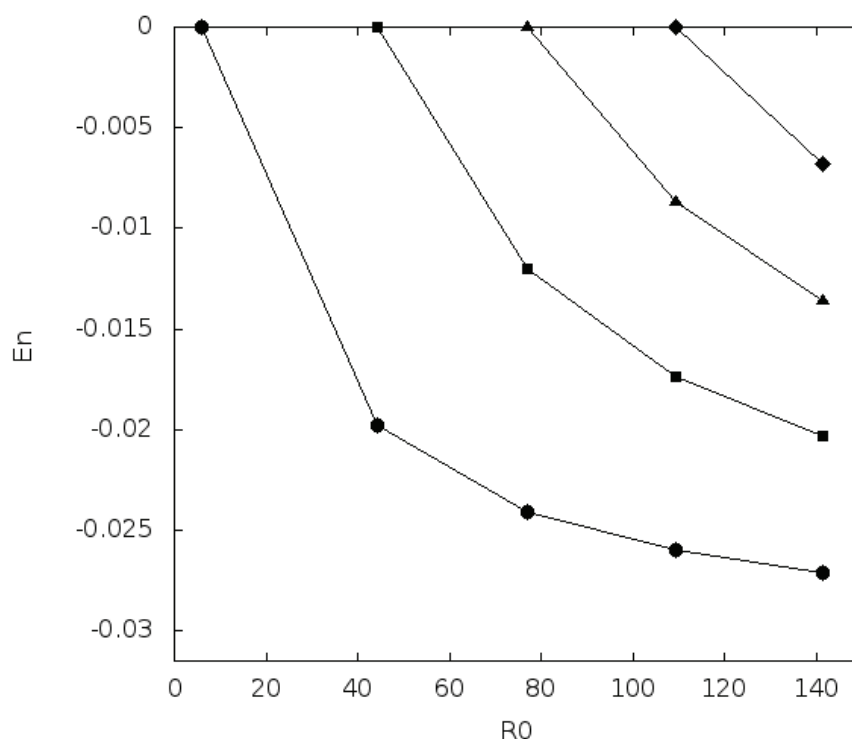


Рис.1. Зависимость энергии от радиуса для заряда: 1)  $Z = 0$  (круглые точки), 2)  $Z = 1$  (квадратные точки), 3)  $Z = 2$  (треугольники), 4)  $Z = 3$  (ромбики).

Уравнение Шредингера решалось численно с использованием пакета общей линейной алгебры LAPACK [8]. Результаты расчетов приведены на рис. 1- 5.

На рис.1 приведена зависимость энергии состояния квантовой системы от радиуса для различных зарядовых состояний сферы  $Z = 0, 1, 2, 3$ . При  $E = 0$  находим критические значения радиуса, при которых состояния дискретного спектра впервые появляются на границе сплошного спектра. Из приведенного графика также видно, что зависимость критического радиуса от заряда при  $Z > 0$  близка к линейной.

На рис.2 показана зависимость энергии электронного состояния от зарядового состояния сферы при различных значениях критического радиуса  $R_{cr} = 6.02, 44.33, 76.99, 109.4, 141.5$  а.е. Отметим линейную зависимость энергии от заряда во всех случаях.

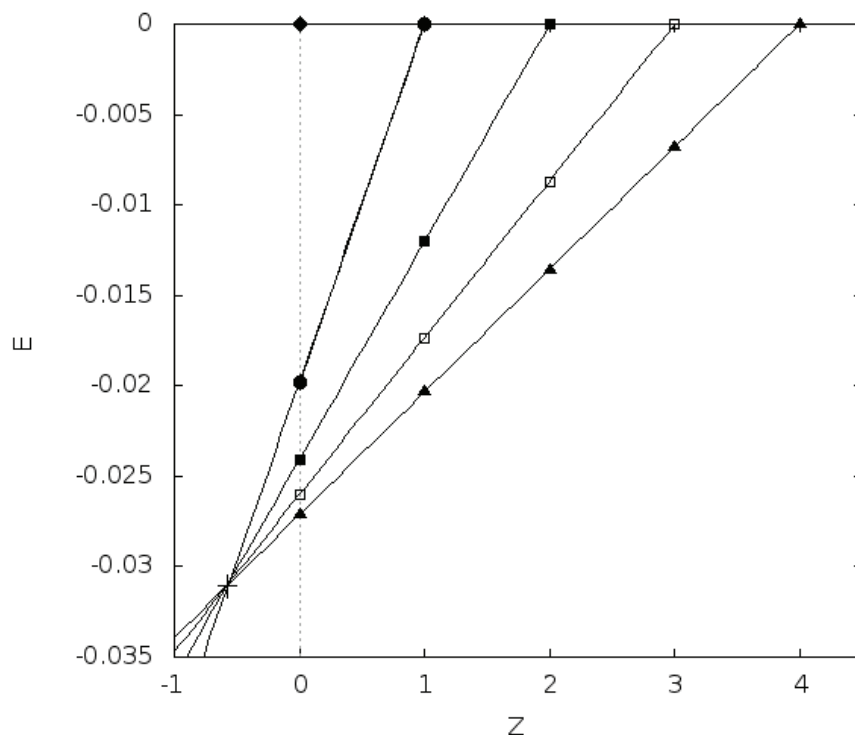


Рис.2. Зависимость энергии от заряда сферы при различных значениях критического радиуса: 1)  $R_{cr} = 6.02$  а.е. (ромбики), 2)  $R_{cr} = 44.33$  а.е. (круглые точки), 3)  $R_{cr} = 76.99$  а.е. (черные квадраты), 4)  $R_{cr} = 109.4$  а.е. (светлые квадраты), 5)  $R_{cr} = 141.5$  а.е. (треугольники).

На рис.3 показана характерная зависимость энергии состояния от радиуса сферы при приближении к критическим значениям радиуса. Кривые приближаются к оси  $E=0$  по касательной.

На рис.4 показаны семейства кривых зависимости энергии электронного состояния от радиуса сферы  $n = 1, 2, 3$ . Внутри семейства кривые соответствуют значениям  $Z = 0, 1, 2$  в порядке возрастания энергии.

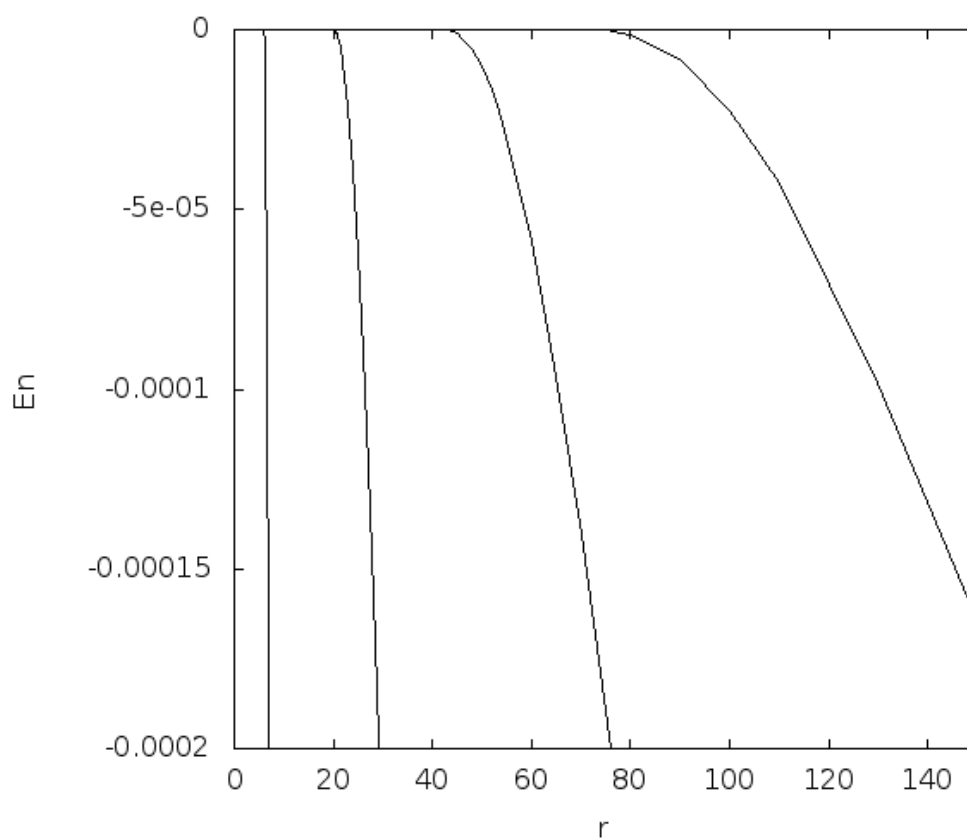


Рис.3. Характер зависимости энергии от радиуса сферы при приближении радиуса к критическим значениям для  $Z=0$ .



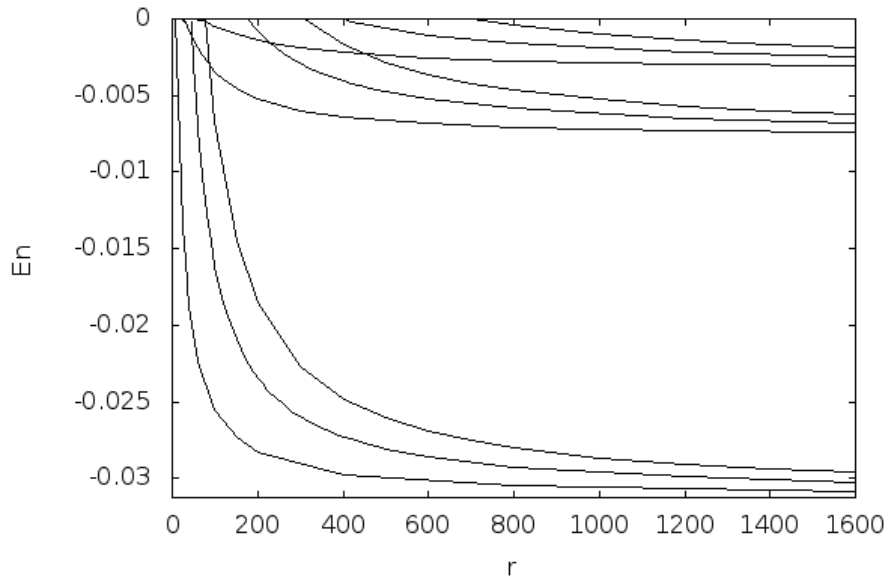


Рис.4. Семейства кривых зависимости энергии электронного состояния от радиуса сферы для  $n = 1, 2, 3$ . Внутри семейства кривые отличаются значением  $Z = 0, 1, 2$  соответственно.

На рис.5 показана зависимость критического радиуса от квадрата главного квантового числа электронного состояния при различном зарядовом состоянии сферы,  $Z = 0, 1, 2$ .

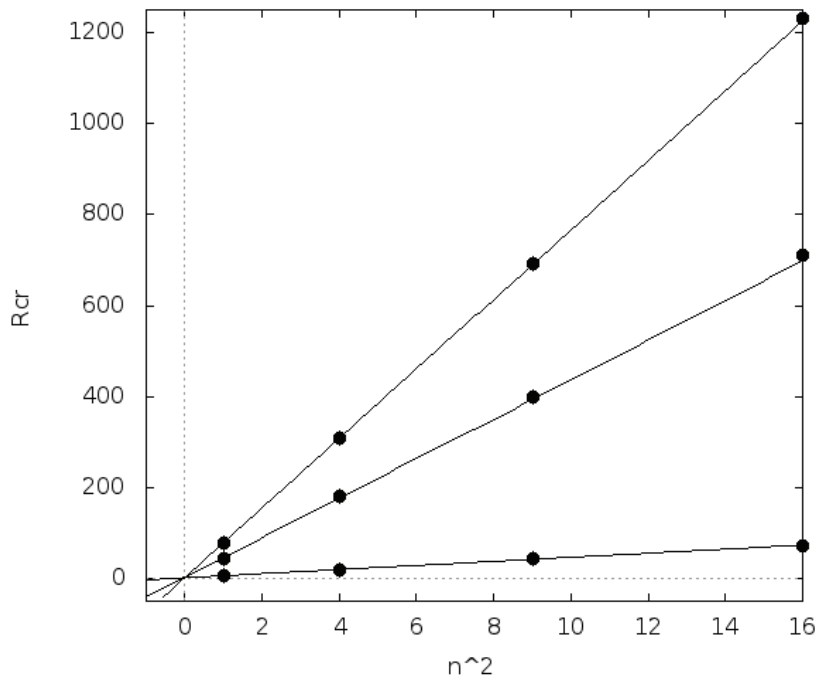


Рис.5. Зависимость критического радиуса от квадрата главного квантового числа электронного состояния при значениях  $Z = 0, 1, 2$ .

## Заключение

Для некоторых типов взаимодействия задача определения критических значений параметра потенциала взаимодействия имеет точное решение. Например, для задачи о движении электрона внутри проводящей сферы получена квадратичная зависимость критического радиуса от квантового числа [6]

$$R_{cr} = 2 + (n-1)(n+2) \quad (8)$$

В настоящей работе для нейтральной изолированной сферы также найдена квадратичная зависимость критического радиуса от  $n$ .

$$R_{cr} = 3/2 (3n^2 + 1) \quad (9)$$

Численное решение уравнения Шредингера показало хорошее согласие с приближенным аналитическим выражением для энергии основного состояния  $1s$  электрона во внешнем потенциале изображения заземленной сферы, полученным вариационным методом [6]

$$E_{1s} = \frac{-Q^2}{2(1 + 4/R + 4/R^2 + \dots)} \quad (10)$$

Для  $R = 9,1$  а.е. формула (10) дает значение  $-0,57$  эВ, в настоящей работе получено значение  $-0,56507$  эВ.

Численные расчеты также показали, что энергетические состояния, появляющиеся на границе сплошного спектра при критических значениях радиуса сферы, с ростом радиуса опускаются вниз, асимптотически приближаясь к соответствующим значениям энергии дискретного спектра водородоподобного атома с эффективным зарядом ядра  $Q = 1/4$ . Это справедливо для всех рассмотренных потенциалов без исключения.

## Литература

1. Бонч-Бруевич А.М., Вартанян Т.А., Пржибельский С.Г. Оптические резонансные свойства металлических наночастиц // В кн. Оптика наноструктур. Под ред. А.В.Федорова: СПб, Недра, 2005, с. 275-325.
2. Cole M.V., Cohen M.H. Image-potential-induced surface bands in insulators // Phys. Rev. Lett., v.23, N 21, p.1238 (1969).
3. Лернер П.Б., Соколов И.М. Ридберговский атом на поверхности жидкого гелия // Письма в ЖЭТФ, Т.44, вып.11, с.501-504 (1986).
4. Еркович О.С. Структура электронного газа вблизи поверхности металла в присутствии адсорбированных ионов водорода // № 5, с.135-141 (2012).
5. Эдельман В.С. Левитирующие электроны // УФН, Т 130, вып. 4, с.675-706 (1980).
6. Тулуб А.В. Ридберговский спектр в задаче о движении электрона вблизи сферических поверхностей // Оптика и спектроскопия, 1992, Т. 73, вып. 1, с.48-54.
7. Zhuvikin G.V., Nesvetaev Yu.A. Quantum problem of charged particle interacting with conducting sphere // Proceedings of the IAS'96, Murmansk, 1996, edited by Demidov V.I., Murmansk State Pedagogical Institute, p.61-64.
8. LAPACK, Univ. of Tennessee, Univ. of California Berkeley, NAG Ltd., Courant Institute, Argonne National Lab, and Rice University , v.3.0, June 30, 1999.
9. Bausells J., Echenique P.M. Velocity dependence of binding energies of image states at surfaces // Phys. Rev. V.33, N2, p. 1471-1473.
10. Nishioka H., Hansen K., Mottelson B.R. Supershells in metal clusters // Phys. Rev. V.42, N.15, p.9377-9386.
11. Ekardt W. Work function of small metal parile: self-consistent spherical jellium-background model // Phys. Rev. V.29, N.4, p.1558-1564.