

широком интервале от 2 с до 15 мин зависимость воздействия от длительности облучения. Угол падения лазерного луча ϑ был ограничен конструкцией экспериментальной установки и удовлетворял условию $\vartheta \geq 76^\circ$. Образцами служили пиролитический графит, пленки золота и т.п.

Методика эксперимента была такова: сначала несколько раз производился первичный просмотр с помощью СТМ одного и того же участка образца, при этом проверялась воспроизводимость изображения и оценивался боковой дрейф. Затем позиционированием иглы СТМ в заданные точки, одновременно с освещением области контакта лазерными импульсами, рисовалась одна из следующих фигур: точка, линия или крест. При позиционировании в точку игла отходила от поверхности на 4 нм и затем опять возвращалась. Линии и кресты состояли из таких отдельных "точек". После облучения производилась с помощью СТМ повторная съемка топографии обработанной области для выявления фотоиндуцированных изменений поверхности. В результате проведения экспериментов были обнаружены следующие эффекты:

1. Возникновение X-подобной структуры после ее прорисовки локальным полем излучения лазера с помощью позиционирования по точкам. Характерные размеры долгоживущей X-подобной структуры — толщина линии порядка 100 нм и глубина 1,5 нм.

2. Образование канавки шириной 20 нм и глубиной 5 нм в районе воздействия иглы и излучения при позиционировании иглы по точкам.

Наблюдаемое возникновение долгоживущей структуры после нанолокального воздействия фемтосекундного лазерного излучения свидетельствует о перспективности использованного метода нанолитографии. Оптимальные режимы и конкретный механизм нанолокального воздействия фемтосекундного лазерного излучения требуют дальнейшего изучения. Возможно, что таким механизмом является конденсация фотоиндуцированных вакансий. Аналогичный механизм, возможно, работает и в случае полученной нами с помощью фемтосекундного лазерного облучения при нормальном падении одномерной решетки на поверхности пиролитического графита с периодом 100 нм.

Работа была поддержана РФФИ, программами "Физика твердотельных наноструктур" и "Поверхностные и атомные структуры".

Список литературы

1. Lozovik Yu E, Klyuchnik A V, Merkulova S P *Laser Phys.* (in print)
2. Lozovik Yu E, Klyuchnik A V, in *The Dielectric Function of Condensed Systems* (Eds. LV Keldysh et. al.) *Elsevier Science Publisher B.V.* (1987); Klyuchnik A V, Lozovik Yu E, Oparin A B *Phys. Lett. A* **179** 372 (1993); Ключник А В, Лозовик Ю Е, Солодов А В *ЖТФ* **65** (6) 203 (1995)
3. Dobryakov A L, Ernstring N P, Kovalenko S A, Lozovik Yu E *Laser Phys.* **7** (2) 397 (1997)
4. Lozovik Yu E et al., in *Proc. of Int. Symp. "Nanostructures'98: Physics and Technology"* (St. Petersburg, 1997) p. 352; *Phys. Lett. A* (in print)
5. Bobinger Y et.al. *Laser Phys.* (in print)

PACS number: 07.65.-b

Спектроскопия ионов с 5d-электронами в основном состоянии

А.Н. Рябцев

В последние годы в Лаборатории атомной спектроскопии Института спектроскопии (ИС) РАН активно ведутся работы по исследованию спектров ионов с 5d-электронами в основном состоянии. Возобновление интереса к этим ионам связано, с одной стороны, с недавним наблюдением спектральных линий 5d-элементов в химически особенных звездах, зарегистрированных с помощью спектрометра высокого разрешения космическим телескопом Хаббла (Hubble Space Telescope) [1]. С другой стороны, 5d-ионы с большими релятивистскими и корреляционными эффектами представляют интерес для развития теории атомных спектров.

Особенностью электронного строения данных ионов является сильное взаимодействие конфигураций как в четной $5d^N + 5d^{N-1}6s + 5d^{N-2}6s^2$, так и в нечетной $5d^{N-1}6p + 5d^{N-2}6s6p + 5d^{N-3}6s^26p$ системе уровней. Основное состояние в нейтральных атомах принадлежит конфигурациям $5d^{N-2}6s^2$, при этом конфигурации $5d^N$ расположены высоко по энергиям и в атомах неизвестны. При следовании вдоль изоэлектронной последовательности происходит пересечение указанных выше конфигураций так, что уже в двукратно ионизованных атомах основное состояние принадлежит конфигурации $5d^N$. При этом смежные конфигурации одной четности переналагаются, их энергетическая структура и вероятности переходов сильно искажаются. Спектры являются сложными не только количественно (сотни уровней энергии, до тысячи интенсивных спектральных линий в резонансном переходе), но и качественно по причине переналаживания конфигураций. Их анализ требует спектральной аппаратуры высокого разрешения в вакуумной УФ области, систем и методик быстрого измерения спектрограмм и получения длин волн спектральных линий, а также надежных методик предсказания и анализа спектров.

Для получения спектров использовались уникальные вакуумные спектрографы высокого разрешения ИС РАН, спектрографы нормального падения излучения с решеткой 1200 штр мм⁻¹ радиусом 6,65 м и скользящего падения излучения с решеткой 3600 штр мм⁻¹ радиусом 3 м, позволяющие регистрировать спектры в области 50–2500 Å с разрешением соответственно 5×10^3 – 2×10^5 . Кроме того, использовались спектрограммы, зарегистрированные в Национальном институте стандартов и технологии США, Парижской обсерватории и Университете им. Св. Ф. Ксавьера (Канада).

Измерение спектрограмм проводилось с помощью созданной в ИС РАН прецизионной системы сканирования и обработки фотоспектрограмм, состоящей из сканирующего микроденситометра и пакета оригинальных графических программ для обработки спектров с целью получения длин волн и параметров профилей спектральных линий.

Для идентификации спектров использовалась методика анализа сложных спектров, развитая ранее при работе с менее сложными 3d-спектрами сравнительно легких элементов. Методика основывается не на tradi-

ционной экстраполяции вдоль изоэлектронной последовательности длин волн и уровней энергии, а энергетических параметров теоретического описания структуры ионов. Поскольку параметры, полученные из расчетов *ab initio* (например, методом Хартри–Фока) далеко не обеспечивают требуемую точность, используется полуэмпирический метод: параметры рассматриваются как свободные и определяются подгонкой расчетных значений к известным экспериментальным энергиям уровней. Воздействие со стороны удаленных конфигураций, которое может быть трактовано в рамках теории возмущений, учитывается введением эффективных параметров. Взаимодействие с близлежащими конфигурациями рассматривается в явном виде. Как было показано при исследовании 3d-спектров, при последовательном проведении такой схемы расчетов электростатические параметры Слэтера, спин-орбитальные, а также эффективные двухчастичные электростатические параметры изменяются гладким образом вдоль изоэлектронных, изоионных и изонуклеарных последовательностей, в том числе и в области сильных взаимодействий конфигураций. Экстраполяция энергетических параметров на неизвестный спектр дает надежное начальное приближение, позволяющее получить первую экспериментальную информацию, которая используется для уточнения параметров при дальнейшей идентификации спектра по этой итеративной схеме.

Непосредственно идентификация выполнялась с помощью не имеющей в мире аналогов программы автоматизированного компьютерного анализа сложных спектров [2].

Таблица, в 1-м столбце которой приведен спектроскопический символ иона (спектру нейтрального атома соответствует I, однократно ионизованного — II и т.д.), а каждая клеточка с написанной в ней конфигурацией основного состояния, соответствующего спектру конкретного атома или иона, показывает состояние изученности спектров 5d-ионов и наш вклад в данную проблему.

Изученность спектров ионов элементов от W до Hg

	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg
I	5d ⁴ 6s ²	5d ⁵ 6s ²	5d ⁶ 6s ²	5d ⁷ 6s ²	5d ⁹ 6s	5d ¹⁰ 6s	5d ¹⁰ 6s ²
II	5d ⁴ 6s	5d ⁵ 6s	5d ⁶ 6s	5d ⁷ 6s	5d ⁹	5d ¹⁰	5d ¹⁰ 6s
III	5d ⁴	5d ⁵	5d ⁶	5d ⁷	5d ⁸	5d ⁹	5d ¹⁰
IV	5d ³	5d ⁴	5d ⁵	5d ⁶	5d ⁷	5d ⁸	5d ⁹
V	5d ²	5d ³	5d ⁴	5d ⁵	5d ⁶	5d ⁷	5d ⁸
VI	5d	5d ²	5d ³	5d ⁴	5d ⁵	5d ⁶	5d ⁷
VII		5d	5d ²	5d ³	5d ⁴	5d ⁵	5d ⁶
VIII			5d	5d ²	5d ³	5d ⁴	5d ⁵
IX				5d	5d ²	5d ³	5d ⁴
X					5d	5d ²	5d ³
XI						5d	5d ²
5d ^N — спектр неизвестен;	исследовался 5d ^N — другими авторами;			изучен в наших 5d ^N — работах			

За последние 6 лет были исследованы спектры около 20 ионов (см. [3–5], где содержатся ссылки на более ранние работы). С высокой точностью измерены длины волн, определены энергии уровней, аккуратно рассчитаны вероятности переходов. Надежность данных подтверждена при обнаружении линий PtIII в спектре химически особенной звезды [1]. Другим результатом исследований является получение полуэмпирических данных о внутриатомных взаимодействиях. В частности, для некоторых ионов получены величины двухчастичных магнитных и трехчастичных электростатических параметров. В рамках модели полуэмпирических расчетов на ортогональных параметрах [6] возможно также получение данных о взаимодействиях более высоких порядков. Для этого необходимо исследование наиболее сложных спектров ионов Ir, Pt, Au и Hg, которые планируется выполнить в ближайшие три года.

Список литературы

1. Wahlgren G M et al. *Astrophys. J.* **444** 438 (1995)
2. Azarov V I *Phys. Scripta* **48** 656 (1993)
3. Ryabtsev A N et al. *Phys. Scripta* **57** 82 (1998)
4. Kildiyarova R R, Churilov S S, Joshi Y N *Phys. Scripta* **58** 32 (1998)
5. Churilov S S et al. *Phys. Scripta* **57** 626 (1998)
6. Raassen A J J, Uylings P H M *Phys. Scripta* **T 65** 84 (1996)

PACS numbers: 82.80.Ch, 95.85.Bh, **98.58.–w**

Микроволновая спектроскопия молекулярных ван-дер-ваальсовых комплексов в астрофизических исследованиях

Б.С. Думеш

Исследование состава галактических молекулярных облаков — одна из самых увлекательных задач радиоастрономии. В этих облаках, представляющих собой остатки протозвездной материи, уже найдено около ста различных молекул и молекулярных ионов, в том числе достаточно сложных. Однако молекулярные ван-дер-ваальсовы комплексы, являющиеся самой первой стадией конденсации материи и очень чувствительные к параметрам межзвездной среды, до сих пор не обнаружены. Причина состоит в том, что до сих пор отсутствовали надежные данные о миллиметровых спектрах самых распространенных в космосе комплексов R-CO, где R — H₂, He.

Эти комплексы обладают весьма малой энергией связи (20–30 K), и создание достаточно большой их концентрации для измерения спектров в лабораторных условиях — трудная задача. Сравнительно большая концентрация молекулярных комплексов получается при расширении газовой смеси в вакуум через сверхзвуковое сопло (сверхзвуковая молекулярная струя). Таким способом получены миллиметровые спектры Ar-CO [1]. Однако вследствие малых геометрических размеров сверхзвуковой молекулярной струи чувствительность обычных однопроходных радиоспектрметров недоста-