

51. Балькин В И и др. *ЖЭТФ* **90** 458 (1986) [Balykin V I et al. *Sov. Phys. JETP* **63** 264 (1986)]
52. Schulze Th et al. *Appl. Phys. Lett.* **78** 1781 (2000); Schulze Th et al. *Appl. Phys. B* **70** 671 (2001)
53. Cohen-Tannoudji C, Phillips W *Phys. Today* **43** (10) 33 (1992)
54. Gupta R et al. *Appl. Phys. Lett.* **67** 1378 (1995); *Phys. Rev. Lett.* **76** 4689 (1996)
55. Berggren K K et al. *Science* **269** 1255 (1995)
56. Behringer R E, Natarajan V, Timp G *Opt. Lett.* **22** 114 (1997)
57. Drodofsky U et al. *Appl. Phys. B* **65** 755 (1997)
58. Jurdik E et al. *Phys. Rev. B* **69** 201102 (2004)
59. Mützel M et al. *Appl. Phys. B* **77** 1 (2003)
60. te Sligte E et al. *Microel. Eng.* **67–68** 664 (2003)
61. Myszkiewicz G et al. *Appl. Phys. Lett.* **85** 3842 (2004)
62. te Sligte E et al. *Appl. Phys. Lett.* **85** 4493 (2004)
63. Ohmukai R, Urabe S, Watanabe M *Sci. Technol. Adv. Mater.* **5** 585 (2004)
64. Rehse S J, McGowan R W, Lee S A *Appl. Phys. B* **70** 657 (2000)
65. Johnson K S et al. *Appl. Phys. Lett.* **69** 2773 (1996)
66. Rehse S J et al. *Appl. Phys. Lett.* **71** 1427 (1997)
67. Balykin V I *Adv. Atom. Mol. Opt. Phys.* **41** 181 (1999)
68. Balykin V I, Klimov V V, Letokhov V S *J. Physique II* **4** 1981 (1994)
69. Lüthi R et al. *Appl. Phys. Lett.* **75** 1314 (1999)
70. Subbotin M V, Balykin V I, Laryushin D V, Letokhov V S *Opt. Commun.* **139** 107 (1997)
71. Балькин В И и др. *Письма в ЖЭТФ* **84** 544 (2006) [Balykin V I et al. *JETP Lett.* **84** 466 (2006)]
72. Oberst H, Kasashima S, Balykin V I, Shimizu F *Phys. Rev. A* **68** 013606 (2003)
73. Bradley C C, Anderson W R, McClelland J J, Celotta R J *Appl. Surf. Sci.* **141** 210 (1999)
74. Li Y T et al. *Phys. Rev. E* **69** 036405 (2004)
75. Melentiev P N et al. *Nano Lett.* (2009) (submitted)

PACS numbers: 32.30. –r, 32.30.Jc, 42.82.Cr, 95.30.Ky, **97.10. –q**
 DOI: 10.3367/UFNr.0179.200903j.0305

Спектроскопия ионизованных атомов для астрофизики и нанотехнологии

А.Н. Рябцев, С.С. Чурилов

1. Введение

Спектроскопия ионизованных атомов является важным инструментом при решении научно-технических задач в различных областях физики. Результаты исследований спектров ионов использовались и используются при изучении Солнца и звёзд, для диагностики лабораторных источников плазмы, в том числе в проблеме управляемого термоядерного синтеза, для оптической микроскопии и литографии высокого разрешения. Отдел атомной спектроскопии Института спектроскопии РАН (ИСАН) проводит исследования по большинству из перечисленных направлений со дня основания института. К настоящему времени отдел обладает уникальной экспериментальной, теоретической и методологической базой, достаточной для анализа самых сложных ионных спектров и успешного применения полученных результатов. В данном докладе рассматриваются две довольно далёкие друг от друга области применения спектроскопии ионизованных атомов: исследование атмосфер магнитных пекулярных звёзд и разработка эффективных источников для оптической литографии в дальней вакуумной ультрафиолетовой (ВУФ) области.

Пристальное внимание астрофизиков давно привлекает довольно компактная по свойствам группа звёзд, в

спектрах которых наблюдаются интенсивные линии поглощения ионов тяжёлых элементов, очень слабых или вообще не регистрируемых в спектрах звёзд основной последовательности. В атмосферах звёзд этой группы регистрируются линии поглощения ионов редкоземельных, а иногда и более тяжёлых элементов, вплоть до Pt, Bi и U. Массы этих звёзд составляют 2–5 масс Солнца, температура их поверхности колеблется в пределах 7000–18000 К, большинство из них обладает сильными магнитными полями напряжённостью до 10–30 кГс, большими турбулентностями в атмосфере и пульсирующими интенсивностями в спектрах поглощения. Данные объекты получили название магнитных пекулярных (особенных) звёзд, в литературе их также часто называют Ар-звёздами. Атомы редкоземельных элементов в атмосферах этих звёзд в основном находятся в состоянии первой и второй кратности ионизации, спектры которых изучены весьма неудовлетворительно [1–3]. Во многих спектрах, особенно в спектрах двукратно ионизованных атомов, идентифицировано только несколько десятков (из возможных нескольких тысяч) линий в видимой области, которые представляют собой переходы между нижними уровнями. Вероятности переходов (силы линий), рассчитанные для двукратно ионизованных редкоземельных атомов и содержащиеся в базе данных DREAM (Database on Rare-Earth Atoms University) [3], также ограничиваются значениями вероятностей переходов между небольшим числом известных уровней энергий. Для определения состава и параметров атмосфер Ар-звёзд, уточнения происходящих на них процессов и, наконец, для объяснения причин возникновения их особенностей необходимы как можно более детальные данные о спектрах соответствующих ионов, являющихся практически единственным источником информации о данных объектах. В разделе 2 описываются проведённые в ИСАН исследования спектров двукратно ионизованных атомов Nd III и Eu III и применение результатов этих исследований для диагностики Ар-звёзд.

Другой актуальной областью применения исследований сложных спектров ионов является проекционная оптическая литография в дальней ВУФ-области. Сейчас интегральные микросхемы изготавливаются методом оптической литографии с использованием излучения эксимерных ArF-лазеров ($\lambda = 193$ нм). Для дальнейшего улучшения параметров микросхем (повышение числа активных элементов в микропроцессорах, увеличение быстродействия, объёма памяти и т.д.) необходимо продвижение в область более коротких длин волн. Переход в дальнюю ВУФ-область позволит довести пространственное разрешение оптической литографии до 10 нм, что, безусловно, вызовет новый скачок в развитии микроэлектроники, вплоть до её возможного переименования в "наноэлектронику". В течение последних нескольких лет активно разрабатывается эффективный источник для литографии на длине волны $\lambda = 13,5$ нм, совпадающей с полосой отражения Mo/Si-зеркал. Наиболее перспективными признаны плазменные источники типа вакуумной искры и лазерной плазмы, содержащие ионы олова. Последние обладают очень интенсивным пиком излучения вблизи $\lambda = 13,5$ нм, состоящим из множества линий 4d-подоболочки (см., например, [4, 5]). Однако спектроскопическая информация по этим пере-

ходам, чрезвычайно важным для оптимизации параметров литографических источников, практически отсутствовала. В разделе 3 изложены результаты исследования спектров ионов олова, ориентированного на создание источника для 13,5-нанометровой литографии.

2. Исследование спектров двукратно ионизованных редкоземельных элементов для астрофизики

Ион Nd III. Имевшиеся данные по спектру Nd III являлись весьма разрозненными и частично противоречили друг другу [1, 6, 7]. Это рассогласование привело к значительным затруднениям при анализе химических составов Ар-звёзд [8]. Наша группа совместно с Институтом астрономии РАН провела независимый анализ спектра Nd III с использованием спектра Ар-звезды HD 217522 в видимой области. Эта звезда обладает относительно слабым магнитным полем ($B_s < 2$ кГс), поэтому контуры линий в её спектре практически не искажены зеемановским расщеплением и их длины волн в видимой области измерены с большой точностью ($\sim 5 \times 10^{-4}$ нм) [9]. Расчёты энергий и вероятностей переходов в спектре Nd III проводились методом Хартри–Фока с использованием пакета программ Кауэна [10]. В расчётах учитывалось сильное взаимодействие между электронными конфигурациями $4f^4 + 4f^3 6p + 4f^2 5d^2$ и $4f^3 5d + 4f^3 6s + 4f^2 5d 6p$ (здесь и далее в обозначениях конфигураций опущены целиком заполненные электронные подоболочки). Интегралы взаимодействия по возможности масштабировались с учётом данных анализа спектров других двукратно ионизованных атомов редкоземельных элементов. В процессе анализа идентифицировано более 70 спектральных линий и найдено около 40 уровней энергий конфигураций $4f^4$ и $4f^3 5d$. Классифицированные переходы выделены более тёмным цветом на рис. 1, где представлен полный рассчитанный спектр переходов $4f^4 - 4f^3(5d + 6s) - 4f^3 6p$ в Nd III. Видно, что идентифицированные переходы составляют очень малую часть спектра Nd III. Однако даже с помощью такого непол-

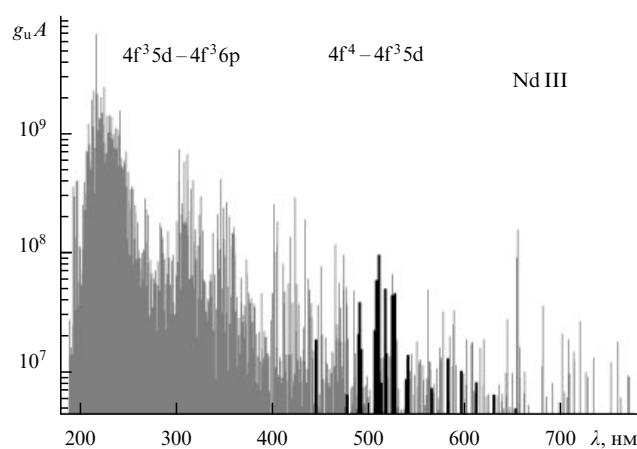


Рис. 1. Рассчитанный спектр переходов $4f^4 - 4f^3(5d + 6s) - 4f^3 6p$ в Nd III. Интенсивности линий даны в единицах $g_u A$, где A — вероятность излучательного перехода в $[c^{-1}]$, g_u — статистический вес верхнего уровня перехода. Идентифицированные переходы выделены более тёмным цветом.

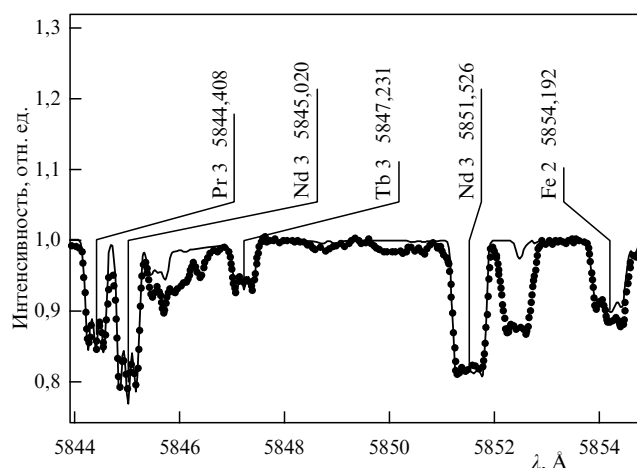


Рис. 2. Участок спектра поглощения атмосферы магнитной пекулярной звезды HD 144897 (точки) и результат его моделирования (сплошная кривая). (Из работы [8].)

ного анализа уверенно определена концентрация неодима в атмосфере звезды HD 144897, на которой найдены все редкоземельные элементы от La до Lu за исключением нестабильного Pm [8]. Участок спектра данной звезды с линиями Nd III и результатом параметрического моделирования представлен на рис. 2. Вновь полученные данные по спектру Nd III позволили весьма точно рассчитать спектр поглощения звёздной атмосферы. Наблюдаемые структуры зеемановского расщепления линий, соответствующие напряжённости магнитного поля звезды HD 144897 $B_s = 9,0 \pm 0,5$ кГс, также подтверждают корректность проведённого анализа спектра Nd III.

Ион Eu III. Анализ очень сложного спектра Eu III весьма важен для исследования звёздных атмосфер, поскольку европий наиболее распространён в атмосферах горячих Ар-звёзд, где он в основном находится в состоянии второй кратности ионизации (Eu III) [11, 12]. Спектр Eu III изучен гораздо лучше спектра Nd III, опубликован список из 890 принадлежащих ему линий, треть из которых идентифицирована как переходы между уровнями $4f^7$, $4f^6(^7F)5d$, $4f^6(^7F)6s$ и $4f^6(^7F)6p$ [13]. Однако вероятности переходов, рассчитанные по результатам идентификации спектра Eu III, оказались на 2–3 порядка меньше, чем ожидалось согласно измерениям времён жизни некоторых уровней Eu III [14] и астрофизическим данным [15].

В таблице представлены концентрации ряда редкоземельных элементов в атмосферах трёх Ар-звёзд, определённые по вторым и третьим спектрам в предположении локального термодинамического равновесия [8]. Видно, что концентрации, измеренные по линиям ионов разной кратности, согласуются в пределах ошибки измерений для всех элементов кроме европия. Концентрации европия, полученные по спектрам Eu II и Eu III, различаются более чем на порядок величины. Для решения этой проблемы были проведены новые расчёты спектра Eu III методом обобщённых средних квадратов (см., например, [16, 17]) с масштабированием хартри-фоковских интегралов и учётом эффектов взаимодействия с высоковозбуждёнными конфигурациями.

Масштабирование радиальных интегралов осуществлялось с учётом данных, полученных при анализе

Таблица. Концентрации редкоземельных элементов, $\log(N/N_{\text{tot}})$, в атмосферах некоторых Ар-звёзд и Солнца, измеренные по спектрам различных ионов. В скобках даны ошибки измерений. (Из работы [8].)

Ион	HD 144897	HD 170973	HD 116458	Солнце
Ce II	−6,69(20)	−6,87	−7,34	−10,46
Ce III	−6,64(18)			
Pr II	−6,60(14)	−7,19	−7,30	−11,33
Pr III	−6,69(14)	−6,87	−7,32	
Nd II	−6,45(12)	−6,48		−10,59
Nd III	−6,45(20)	−6,63	−7,26	
Sm II	−6,98(21)	−7,07		−11,03
Sm III	−6,92(20)			
Eu II	−7,75(20)	−7,77	−7,94	−11,52
Eu III	−6,32(23)		−6,90	
Cd II	−6,95(18)	−7,17	−7,47	−10,92
Cd III	−6,60(14)			
Tb II	−7,83(10)			−11,76
Tb III	−7,92(22)	−7,96		
Dy II	−7,12(22)	−7,17		−10,90
Dy III	−6,99(39)	−7,13		
Er II	−7,55(14)	−7,54		−11,11
Er III	−7,21(14)	−7,79		
Tm II	−8,12(20)			−12,04
Tm III	−7,70(20)			

спектров других двукратно ионизованных лантаноидов с экспериментально известными временами жизни уровней. Вместе с исследуемыми конфигурациями $4f^7$, $4f^65d$, $4f^66s$ и $4f^66p$ в расчёты были включены взаимодействующие с ними дважды возбуждённые конфигурации $4f^55d^2$, $4f^55d6s$, $4f^56s^2$, $4f^55d6p$ и $4f^56s6p$. Вычисленные таким образом вероятности переходов хорошо согласуются с результатами измерений времён жизни уровней и с вероятностями, имеющимися в базе данных DREAM [3]. При этом рассогласование в концентрациях европия, определённых по спектрам Eu II и Eu III, уменьшилось вдвое. Оставшееся различие вполне может быть объяснено отклонениями населённостей уровней от равновесных значений в условиях атмосфер Ар-звёзд [18].

По результатам расчётов также идентифицировано 90 новых спектральных линий и найдено более 30 новых уровней энергии в спектре Eu III [19]. Список рассчитанных вероятностей переходов для длин волн в области 200–1000 нм содержит теперь 1145 линий между известными уровнями и 23800 линий между всеми уровнями с энергиями, меньшими 90000 см^{-1} . Результаты данной идентификации и расчётов помещены в астрофизическую базу данных VALD (Vienna Atomic Line Database).

Необходимо отметить, что изложенные в этом разделе результаты получены по спектрограммам, зарегистрированным в видимой области спектра. Однако наиболее сильные переходы в двукратно ионизованных атомах редкоземельных элементов лежат в ВУФ-области спектра (см., например, рис. 1). Исследование спектров редкоземельных ионов в ВУФ-области позволит получить гораздо более обширную и надёжную информацию о процессах, происходящих в атмосферах горячих звёзд.

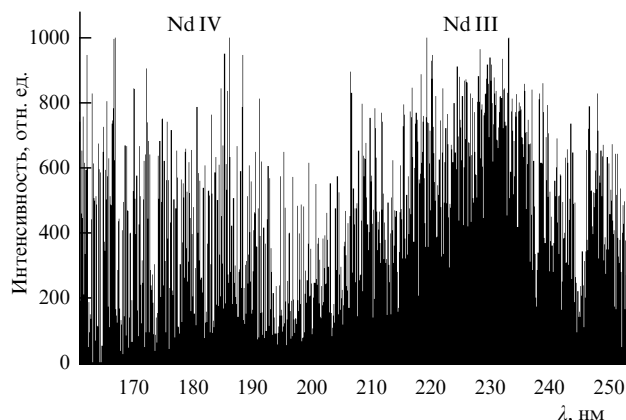


Рис. 3. Спектр ионов неодима высокого разрешения, зарегистрированный в плазме низковольтной искры на ВУФ-спектрографе ИС-АН.

В 2010 г. планируется запуск Всемирной космической обсерватории (ВКО), на которой будет установлен спектрометр высокого разрешения ВКО-УФ (область длин волн 102–310 нм). При регистрации спектров магнитных пекулярных звёзд неизбежно возникнет вопрос об обеспечении лабораторными данными по спектрам двукратно и трёхкратно ионизованных тяжёлых атомов. Эти данные могут быть получены с использованием ВУФ-спектрографа нормального падения ИСАН, который по характеристикам превосходит спектрометр ВКО-УФ. В качестве примера на рис. 3 приведён спектр ионов неодима в области длин волн 160–250 нм, зарегистрированный на спектрографе ИСАН с разрешением 200000. На спектре выделяются массивы линий, принадлежащие переходам $4f^35d-4f^36p$ в Nd III (ср. рис. 1) и резонансным переходам $4f^3-4f^2(5d+6s)$ в Nd IV. В настоящее время анализируются спектры неодима и иттербия в области длин волн, меньших 250 нм, полученные в условиях преимущественного возбуждения двукратно и трёхкратно ионизованных атомов.

3. Исследование спектров ионов олова для литографии в дальней ВУФ-области

Как отмечалось во введении, для создания эффективного источника оптической 13,5-нанометровой литографии необходимы детальные исследования спектров многозарядных ионов олова. Согласно результатам предварительных расчётов, интенсивный пик излучения вблизи длины волны 13,5 нм создают переходы $4d^m-(4p^54f^{m+1}+4d^{m-1}4f)$ в спектрах Sn X–Sn XIV ($m=1-5$). Данные переходы содержат огромное количество близко расположенных линий, поэтому в зарегистрированных ранее спектрах наблюдалась только спектрально неразрешённая структура 13,5-нанометрового пика (см., например, [5]).

Упомянутые переходы типа 4–4, лежащие в стороне от основного пика в области $\lambda > 16 \text{ нм}$, были изучены лишь для спектров ионов малой кратности: Sn VI [20] и Sn VII [21]. В области длин волн 13–14 нм были идентифицированы только четыре самые сильные линии 4–4-переходов в наиболее простом спектре Sn XIV ($m=1$) [22]. Спектры аналогичных переходов в ближайших членах соответствующих изоэлектронных последо-

вательностей также не были известны. Поэтому исследование 4–4-переходов проводилось методом экстраполяции вдоль "изоядерной" последовательности ионов олова с разной кратностью. Спектры рассчитывались методом Хартри–Фока с помощью программ Кауэна [10] при включении в рассмотрение конфигураций типа $4d^m$, $4d^{m-1}nl$ ($n = 5, 6$; $l = s, p, d, f$), $4p^5 4d^{m+1}$ и $4p^5 4d^m 5s$.

Спектры возбуждались в малоиндуктивной вакуумной искре с пиковым током разряда $I = 10–25$ кА и регистрировались на спектрографе скользящего падения ДФС-26 с голографической решёткой (3600 штрихов на 1 мм). Разрешающая способность данного прибора составляет около 20000 в области $\lambda = 13–14$ нм, что позволило спектрально разрешить структуру наиболее интенсивных 4–4-переходов. На рисунке 4 изображены спектры ионов олова, полученные при токах разряда 15 и 20 кА. Каждый спектр состоит приблизительно из 1000 сильных линий, выделяющихся на фоне квазинепрерывной структуры из множества менее интенсивных линий. На рисунке 4а обозначены рассчитанные положения наиболее интенсивных переходов в различных спектрах олова. Видно, что спектральные линии различных ионов можно селективно по зависимости их интенсивности от тока разряда. В частности, при уменьшении тока от 20 до 15 кА интенсивности линий Sn VIII существенно увеличиваются, тогда как линии Sn XIII–XIV ослабевают. Данный факт учитывался при идентификации спектров.

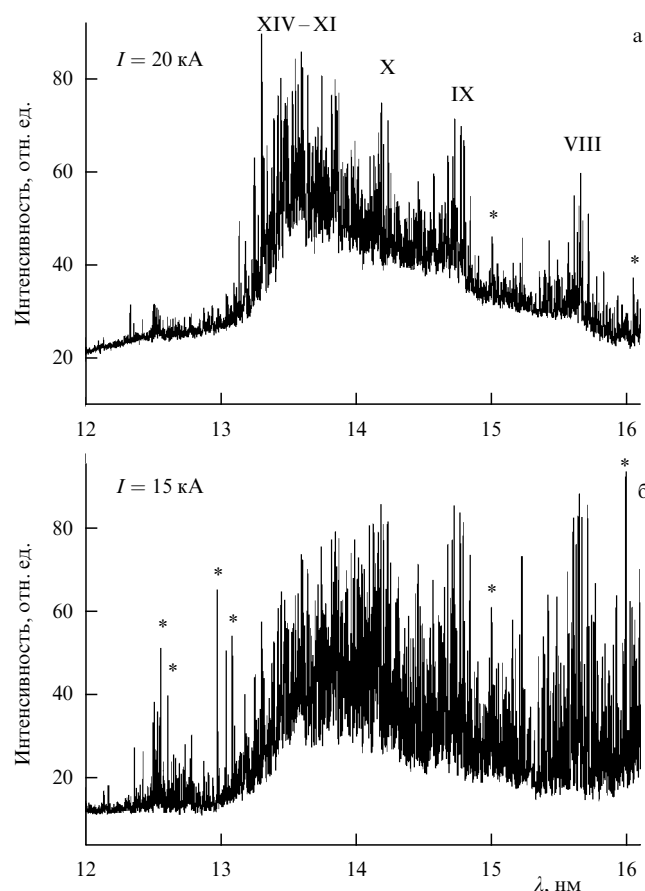


Рис. 4. Спектры ионов олова в дальней ВУФ-области, возбуждаемые в плазме малоиндуктивной вакуумной искры. (Из работы [26].) Звёздочками отмечены линии примесных ионов кислорода и алюминия.

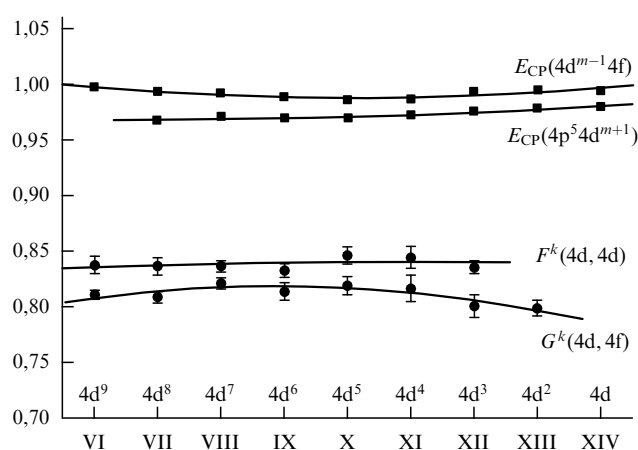


Рис. 5. Изменение масштабирующих множителей для энергетических параметров конфигураций $4d^{m-1}4f$ и $4p^5 4d^{m+1}$ вдоль изоядерной последовательности ионов олова.

Анализ спектров осуществлялся в несколько этапов. Сначала были исследованы переходы $4d^7 - (4p^5 4d^8 + 4d^6 4f)$ в спектре Sn VIII с известной структурой основной конфигурации $4d^7$ [23]. При полуэмпирической обработке полученных результатов было замечено, что масштабирующие множители (отношения полуэмпирических энергетических параметров к их хартри-фовским значениям) практически постоянны вдоль изоядерной последовательности Sn VI–VIII [24]. Поэтому на следующих этапах спектры анализировались с помощью экстраполяции масштабирующих множителей к их значениям для более многозарядных ионов. Таким образом были идентифицированы 4–4-переходы в относительно простых спектрах Sn XIII и Sn XIV [25], а затем исследованы более сложные спектры Sn IX–Sn XII [26]. В последних спектрах удалось классифицировать лишь наиболее интенсивные переходы, однако даже такой неполный анализ позволил с достаточной точностью определить полуэмпирические значения основных параметров. Определённые в результате анализа масштабирующие множители для средних энергий (E_{CP}) и слэтеровских параметров возбуждённых конфигураций $4f^{m-1}4f$ и $4p^5 4d^{m+1}$ представлены на рис. 5 для спектров изоядерной последовательности Sn VI–XIV. Зависимость каждого множителя от заряда ядра аппроксимируется полиномами второй степени с точностью до ошибок определения параметров (ошибка определения E_{CP} не превышает размера соответствующего символа на рисунке).

В результате проведённого анализа классифицировано около 440 спектральных линий в области длин волн 12,5–16 нм, принадлежащих переходам $4d^m - (4d^{m-1}4f + 4p^5 4d^{m+1})$ в спектрах Sn VIII–XIV ($m = 1–7$). Наибольший интерес для ВУФ-литографии представляет 2 %-ный интервал длин волн вблизи $\lambda = 13,5$ нм ($13,5 \pm 0,135$ нм), именно этот интервал совпадает с полосой отражения Mo/Si-зеркал.

На рисунке 6 приведён участок спектра вакуумной искры (20 кА) в 2 %-ном интервале длин волн с классификацией наиболее интенсивных линий по принадлежности к стадиям ионизации. Спектр ионов олова в используемом для 13,5-нанометровой литографии интервале состоит в основном из переходов в Sn XI–Sn XIII. Отсюда можно сделать предварительный вывод, что для получе-

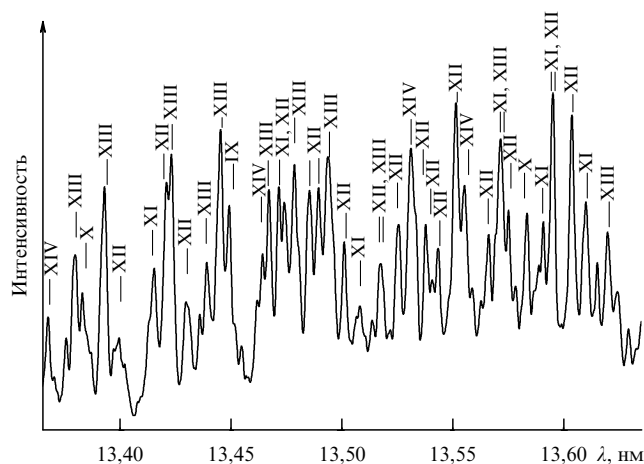


Рис. 6. Классификация спектральных линий ионов олова в 2%-ном интервале вблизи длины волны 13,5 нм по стадиям ионизации. (Из работы [26].)

ния эффективного источника излучения в интервале $\lambda = 13,5 \pm 0,135$ нм необходимо создать плазму с преимущественным содержанием ионов $\text{Sn}^{+10} - \text{Sn}^{+12}$.

Проводимые параллельно аналогичные исследования спектров ионов индия с зарядом ядра $Z_C = 49$ подтвердили основные результаты анализа спектров олова ($Z_C = 50$). Было замечено, что по мере уменьшения заряда ядра спектры 4–4-переходов для различных стадий ионизации постепенно разделяются по длинам волн. Это даёт возможность более уверенной идентификации переходов в каждом отдельном ионе. В настоящее время в отделе атомной спектроскопии ИСАН с целью проверки результатов анализа спектров ионов олова исследуются спектры 4–4-переходов в ионах Pd , Ag и Cd ($Z_C = 46 - 48$). Тем не менее полученные результаты уже сейчас успешно используются в качестве спектроскопического базиса для моделирования, разработки и оптимизации литографических источников 13,5-нанометрового излучения на основе ионов олова.

Исследования проводились при финансовой поддержке 6-й рамочной программой Европейского сообщества (проект IST-1-507754-IP), грантами РФФИ (проекты 05-02-08224-офи и 07-02-00244-а), а также при частичной поддержке грантом программы ОФН РАН "Оптическая спектроскопия и стандарты частоты".

Список литературы

1. Martin W C, Zalubas R, Hagan L, Natl. Stand. Ref. Data Ser. Natl. Bureau Stand. NSRDS-NBS 60 (Washington: National Bureau of Standards, 1978)
2. BIBL: Bibliography database on atomic spectra, <http://das101.isan.troitsk.ru/bibl.htm>
3. Biemont E, Palmeri P, Quinet P *Astrophys. Space Sci.* **269** 635 (1999); D.R.E.A.M. Database on Rare Earths at Mons University, <http://w3.umh.ac.be/~astro/dream.shtml>
4. Tolstikhina I Yu, Churilov S S, Ryabtsev A N, Koshelev K N, in *EUV Sources for Lithography* Vol. PM149 (Ed. V Bakshi) (Bellingham, Wash.: SPIE Press, 2006) p.113
5. Svendsen W, O'Sullivan G *Phys. Rev. A* **50** 3710 (1994)
6. Crosswhite H, неопубликованные данные (1976)
7. Aldenius M, Master Thesis (Lund: Depart. of Physics, Univ. of Lund, 2001)
8. Ryabchikova T, Ryabtsev A, Kochukhov O, Bagnulo S *Astron. Astrophys.* **456** 329 (2006)

9. Kochukov O, Ryabchikova T, Piskunov N *Astron. Astrophys.* **415** L13 (2004)
10. Cowan R D *The Theory of Atomic Structure and Spectra* (Berkely: Univ. of California Press, 1981)
11. Wahlgren G M *Phys. Scripta T* **100** 22 (2002)
12. Biemont E, Quinet P *Phys. Scripta T* **105** 38 (2003)
13. Sugar J, Spector N J. *Opt. Soc. Am.* **64** 1484 (1974)
14. Den Hartog E A, Wickliffe M E, Lawler J E *Astrophys. J. Suppl.* **141** 255 (2002)
15. Ryabchikova T et al. *Astron. Astrophys.* **343** 229 (1999)
16. Wyart J F J. *Opt. Soc. Am.* **68** 197 (1978)
17. Wyart J F, Buache-Arnold C *Phys. Scripta* **22** 583 (1980)
18. Mashonkina L, Ryabchikova T, Ryabtsev A *Astron. Astrophys.* **441** 309 (2005)
19. Wyart J-F, Tcham-Brillet W-Ü L, Churilov S S, Ryabtsev A N *Astron. Astrophys.* **483** 339 (2008)
20. Churilov S S, Kildiyarova R R, Ryabtsev A N, Kramida A E, Joshi Y N *Phys. Scripta* **50** 463 (1994)
21. Azarov V I, Joshi Y N, Churilov S S, Ryabtsev A N *Phys. Scripta* **50** 642 (1994)
22. Sugar J, Kaufman V, Rowan W L J. *Opt. Soc. Am. B* **9** 1959 (1992)
23. Azarov V I, Joshi Y N J. *Phys. B* **26** 3495 (1993)
24. Чурилов С С, Рябцев А Н *Опн. и спектроск.* **100** 721 (2006) [Churilov S S, Ryabtsev A N *Opt. Spectrosc.* **100** 660 (2006)]
25. Чурилов С С, Рябцев А Н *Опн. и спектроск.* **101** 181 (2006) [Churilov S S, Ryabtsev A N *Opt. Spectrosc.* **101** 169 (2006)]
26. Churilov S S, Ryabtsev A N *Phys. Scripta* **73** 614 (2006)

PACS numbers: 03.75.Hh, 71.35.Lk, **71.36.+c**

DOI: 10.3367/UFNr.0179.200903k.0309

Сильные корреляции и новые фазы в системе экситонов и поляритонов, поляритонный лазер

Ю.Е. Лозовик

Одно из самых красивых явлений в физике многих частиц — бозе-эйнштейновская конденсация (БЭК) в системе частиц с ненулевой массой m , подчиняющихся статистике Бозе, была предсказана Эйнштейном еще в 1925 г., вскоре после появления работы Бозе, посвящённой термодинамически равновесному распределению фотонов. Эйнштейн показал, что при температуре T ниже критической

$$T_c = \frac{3,31 \hbar^2}{m} n^{2/3} \quad (1)$$

(где n — концентрация частиц) интеграл от функции распределения по всем импульсам становится меньше полного числа частиц, и для разрешения этого парадокса предположил, что "недостающие" частицы занимают одно-единственное состояние с наименьшей энергией (с нулевым импульсом). При $T \leq T_c$ температурная дебройлевская длина волны частиц $\lambda_T \approx \hbar(2mk_B T)^{-1/2}$ имеет порядок среднего расстояния между частицами или становится больше его, так что БЭК происходит лишь в квантовом режиме для системы частиц. При $T \rightarrow 0$ в невзаимодействующей системе все частицы находятся в конденсате.

После открытия Капицей сверхтекучести в ^4He Ф. Лондон предположил, что сверхтекучесть связана с БЭК. Это была смелая гипотеза, поскольку БЭК тогда была предсказана лишь для невзаимодействующих частиц, а в конденсированном ^4He взаимодействие