Оптический журнал

Оптическое приборостроение

УДК 621.327.43 535-31

Малогабаритная ртутная лампа для настройки спектральных приборов: спектр излучения в диапазоне 115–400 нм

© 2017 г. М. А. Карташева; Б. Е. Крылов, канд. физ.-мат. наук; О. В. Левина; Л. А. Мурашева; В. А. Тяпков; Н. В. Шилина

АО «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург

E-mail: bekrylov@bk.ru

Поступила в редакцию 03.07.2017

Представлен спектр новой малогабаритной ртутной лампы с энергопотреблением менее 1 Вт. Проанализированы спектрограммы источника в диапазоне 115–400 нм. Наряду с атомарными линиями спектр лампы содержит интенсивные ионные линии ртути. В интервале длин волн 115–230 нм спектр источника формируется в основном ионными линиями. Приведены таблицы спектральных линий с указанием их относительной интенсивности. Лампа разработана для настройки спектральных приборов, работающих в ультрафиолетовой области.

Ключевые слова: *спектральная лампа, тлеющий разряд, ультрафиолетовая область, спектр излучения.*

Коды OCIS: *230.6080, 260.7190, 260.7210, 300.6540, 300.6170*

ВВЕДЕНИЕ

Ртутные спектральные лампы являются наиболее востребованными источниками излучения при настройке спектральных приборов, работающих в ультрафиолетовой (УФ) области спектра. В большинстве случаев предпочтение отдается малогабаритным источникам с низким энергопотреблением. Один из таких источников — спектральная лампа тлеющего разряда ЛГР-1, разработанный в Государственном оптическом институте.

В данной публикации представлены параметры ЛГР-1 и спектр излучения лампы в УФ диапазоне 115–400 нм, включающем ближнюю вакуумную ультрафиолетовую (ВУФ) область. Важной особенностью лампы ЛГР-1 является присутствие в спектре значительного числа ионных линий ртути, в том числе линий с высокой интенсивностью — на уровне интенсивности атомарных резонансных линий ртути. При этом энергопотребление источника составляет менее 1 Вт. Ионные линии существенно обогащают спектр лампы в интервале 115–230 нм.

В статье представлены спектрограммы источника, таблицы спектральных линий, указана их относительная интенсивность.

ЛАМПА ЛГР-1

Конструкция лампы схематично представлена на рис. 1. Габариты источника: диаметр 18 мм, длина 50 мм. Окно лампы изготовлено из кристалла фторида магния и припаяно к стеклянному корпусу лампы с помощью стеклоэмали. Граница пропускания окна — 113 нм. Разряд постоянного тока зажигается между анодом и катодом, расположенным внутри стеклянной трубки, а анод установлен на торце этой трубки. В аноде имеется отверстие диаметром 2 мм для выхода излучения разряда. Катод изготовлен из никеля и имеет форму полого цилиндра. Траверсы электродов служат одновременно опорными элементами электродной сборки. Остальные детали используются для центровки электродной сборки и придания жесткости. Напряжение подается на впаянные в колбу лампы внешние электроды.

Лампа работает на парогазовой смеси гелий-ртуть. Давление гелия в лампе — 10 Торр, давление паров ртути — на уровне 10^{-2} Торр. Рекомендуемый диапазон рабочих токов — 0,3–3,0 мА. При этом падение напряжения на лампе не превышает 200 В. При токе 1 мА энергопотребление лампы составляет 0,15 Вт. Давление рабочей смеси подобрано таким образом, чтобы обеспечивались высокая

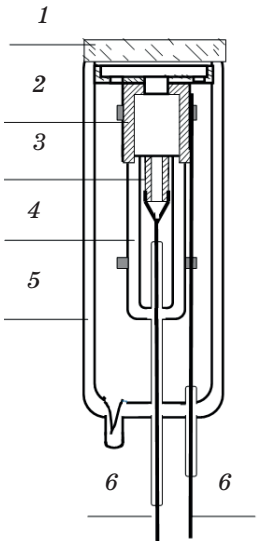

Рис. 1. Лампа ЛГР-1 (схема). *1* — окно из фторида магния, *2* — стеклянный корпус лампы, *3* — анод, *4* – катод, *5* — стеклянная трубка, *6* — внешние электроды.

интенсивность спектральных линий и устойчивая работа разряда в диапазоне рабочих токов. Регулирование тока лампы в этом диапазоне обуславливает плавное изменение потока УФ излучения.

Питание лампы осуществляется от малогабаритного блока питания, изготовленного в Бюро аналитического приборостроения «Хромдет-Экология» (Москва). Блок обеспечивает зажигание лампы (при 500 В), снижение напряжения на включенной лампе до уровня рабочих значений, регулировку и стабилизацию тока лампы в диапазоне 0,1–5,0 мА.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

При регистрации спектра источника использовались два спектрометра: ВУФ спектрометр — для исследований спектра в области 115–200 нм и УФ спектрометр — для диапазона 190–400 нм.

В состав ВУФ спектрометра входит вакуумный сканирующий монохроматор, оснащенный вогнутой дифракционной решеткой с радиусом кривизны 1 м и плотностью штрихов 1200 шт/мм. Спектральное разрешение составляло 0,02 нм. В качестве приемника излучения используется фотоумножитель R1220 (*Hamamatsu*) с окном из фторида магния и фотокатодом Cs-Te. Применялся режим счета фотонов. Управление процессом регистрации спектра осуществляется с помощью компьютера. Шаг сканирования не превышал 0,01 нм, а в пределах контуров спектральных линий уменьшался до 0,0025 или 0,00125 нм. Время накопления сигнала на каждом шаге сканирования составляло 0,5 с; допустимая максимальная скорость счета фотонов — 10^7 в секунду.

Система вакуумной откачки спектрального прибора (с турбомолекулярным насосом *Pfeiffer Balzers*, 230 л/с) обеспечивает вакуум в объеме монохроматора на уровне 10^{-6} Торр.

Исследуемый источник излучения крепился перед входной щелью вакуумного монохроматора с помощью фланцевого соединения (KF 25 с витоновым уплотнителем), для этого на торце лампы устанавливался фланец соответствующего размера. Между входной щелью монохроматора и источником излучения располагается вакуумный затвор, который позволяет заменять исследуемые источники без разгерметизации основного объема спектрального прибора.

В УФ спектрометре используется сканирующий монохроматор HR-1000 (*Jobin Yvon*), собранный по схеме Черни–Тернера, с фокусным расстоянием 1м; прибор оснащен голограммной дифракционной решеткой 2400 шт/мм. Рабочий диапазон спектрометра 190–720 нм. Спектральное разрешение составляло 0,035 нм, использовался шаг сканирования 0,005 нм при скорости сканирования 5 нм/мин. В качестве приемника излучения используется фотоумножитель 1P28 (*Hamamatsu*) с окном из УФ стекла с границей пропускания 185 нм и фотокатодом Sb-Cs. Сигнал с фотоприемника обрабатывается 24-разрядным аналого-цифровым преобразователем и передается на компьютер.

При регистрации спектров использовалась стандартная осветительная система монохроматора HR-1000: излучение лампы с увеличением 1:1 проецировалось в центр входной щели спектрального прибора.

Регистрируемые (на ВУФ и УФ спектрометрах) спектры выводились на экраны мониторов и запоминались в файлах, используемых для построения и обработки спектрограмм.

При идентификации спектров использовались таблицы спектральных линий [1, 2]. Поправки на спектральное пропускание спектрометров при записи спектров не вводились.

СПЕКТР ЛАМПЫ

Спектр лампы ЛГР-1 в диапазоне 115–200 нм (при токе в лампе 1 мА) представлен на рис. 2а. В спектре источника выделяются интенсивностью три линии ртути: кроме атомарной резонансной линии 184,950 нм, присутствие которой в спектре не вызывало сомнений, наблюдаются две ионные резонансные линии (линии однократно ионизованных атомов ртути) 164,994 и 194,227 нм. Появление в спектре интенсивных ионных линий связано с использованием в источнике полого катода. Эффективность применения полого катода в спектральных лампах УФ диапазона указывалась, например, в патенте [3].

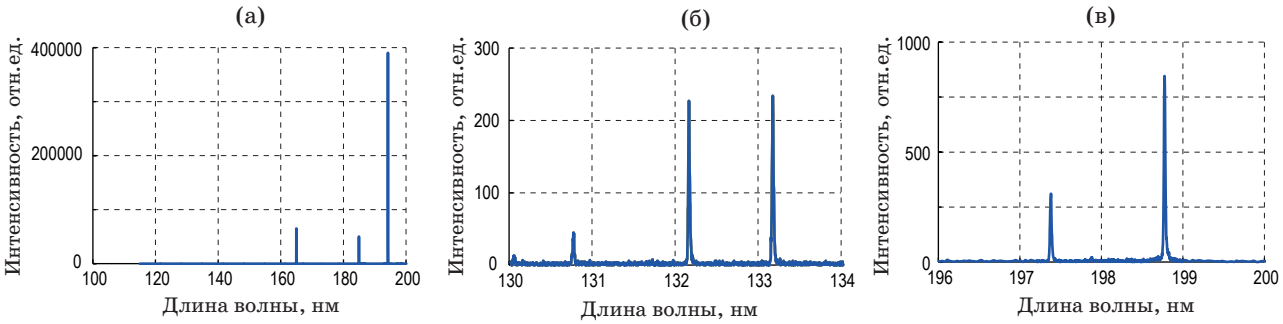

Рис. 2. Спектр лампы ЛГР-1 в диапазоне 115–200 нм (а), фрагменты спектра (б, в).

Кроме трех отмеченных выше интенсивных линий в диапазоне 115–200 нм регистрируются около тридцати ионных линий ртути существенно меньшей интенсивности, а также резонансная линия водорода 121,567 нм и несколько слабых линий углерода. Фрагменты спектра с наиболее интенсивными линиями представлены на рис. 2б, в. В табл. 1 приведены только те линии, интенсивность которых на спектрограммах превышала 30 ед. (более слабые линии в таблицу не включены). Относительная интенсивность линий в табл. 1 указана с учетом спектрального пропускания ВУФ спектрометра (рис. 3а). При этом интенсивность самой длинноволновой линии, 198,784 нм, полученная по спектрограммам, оставлена без изменения, а интенсивности остальных линий

Таблица 1. Спектральные линии лампы ЛГР-1 в диапазоне 115–200 нм (длины волн даны по таблицам спектральных линий [1, 2])

№ п/п	Длина волны, нм	Интенсивность, отн. ед.	Элемент
1	121,567	100	H I
2	130,793	130	Hg II
3	132,171	600	Hg II
4	133,174	630	Hg II
5	136,127	150	Hg II
6	141,442	150	Hg II
7	153,030	100	Hg II
8	162,387	280	Hg II
9	164,05	260	?
10	164,451	100	Hg II
11	164,994	120000	Hg II
12	167,254	700	Hg II
13	167,581	120	Hg II
14	173,182	350	Hg II
15	184,950	65000	Hg I
16	186,923	550	Hg II
17	194,227	400000	Hg II
18	197,379	300	Hg II
19	198,784	850	Hg II

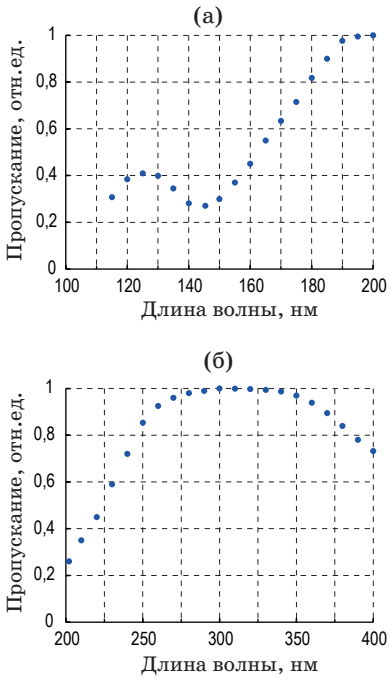

Рис. 3. Спектральные зависимости пропускания ВУФ спектрометра (а) и УФ спектрометра (б).

скорректированы в соответствии с зависимостью, представленной на рис. 3а.

На рис. 4а приведен спектр лампы ЛГР-1 в области 190–400 нм (при токе 1 мА). Рис. 4а демонстрирует распределение в спектре наиболее интенсивных линий источника. На рис. 4б изменена шкала ординат, чтобы показать плотность линий в различных частях рассматриваемого спектрального диапазона. Всего в области 190–400 нм зарегистрировано около ста спектральных линий, примерно две трети из них — атомарные линии ртути, одна треть — ионные линии ртути и линии атомов гелия.

Перечень спектральных линий представлен в табл. 2, в которой приведены только те линии, интенсивность которых на спектрограммах превышала 1000 ед. (за исключением линии 197,315 нм). Интенсивности линий указаны в табл. 2 с уче-

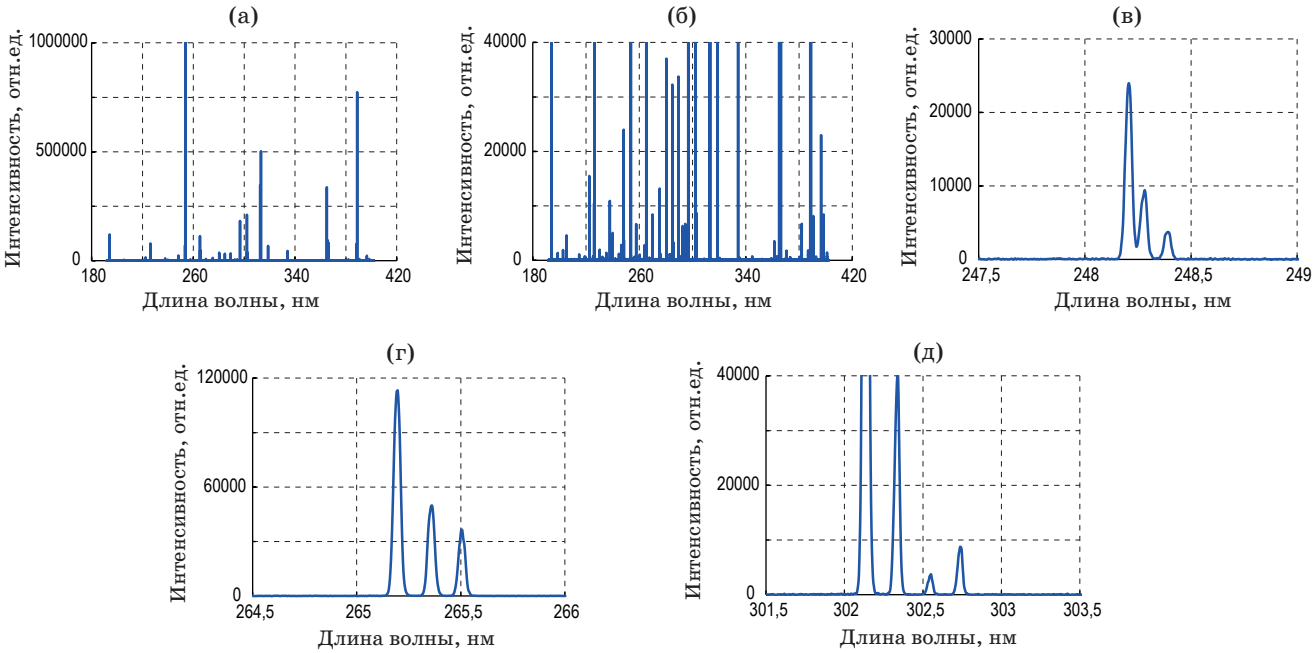

Рис. 4. Спектр лампы ЛГР-1 в диапазоне 190–400 нм (а), тот же спектр с изменением масштаба шкалы ординат (б), фрагменты спектра (в–д).

Таблица 2. Спектральные линии лампы ЛГР-1 в диапазоне 194–400 нм (длины волн в диапазоне 200–400 нм даны по таблицам спектральных линий [1, 2])

№ п/п	Длина волны, нм	Интенсивность, отн. ед.	Элемент
1	194,163	(130000)	Hg II
2	197,315	(150)	Hg II
3	198,720	850	Hg II
4	202,686	1000	Hg II
5	205,283	2200	Hg II
6	214,801	400	Hg II
7	222,471	4800	Hg II
8	226,029	3000	Hg II
9	226,222	22000	Hg II
10	237,832	2400	Hg I
11	239,935	1100	Hg I
12	244,690	240	Hg I
13	246,406	440	Hg I
14	246,436	530	Hg II
15	248,200	4500	Hg I
16	248,272	1800	Hg I
17	248,382	700	Hg I
18	253,477	13000	Hg I
19	253,652	180000	Hg I
20	257,629	1200	Hg I
21	263,978	470	Hg I
22	265,204	19000	Hg I
23	265,369	8500	Hg I
24	265,513	6000	Hg I
25	269,883	1400	Hg I
26	269,938	260	Hg I
27	275,278	2100	Hg I
28	275,970	190	Hg I
29	280,347	6000	Hg I
30	280,443	1100	Hg I
31	280,636	180	Hg II
32	282,908	190	He I
33	284,768	5000	Hg II
34	285,694	500	Hg I
35	289,360	5300	Hg I
36	292,541	1000	Hg I
37	294,511	1100	He I
38	296,728	29000	Hg I
39	302,150	33000	Hg I
40	302,347	6200	Hg I
41	302,560	600	Hg I
42	302,749	1400	Hg I
43	312,567	55000	Hg I
44	313,184	78000	Hg I
45	318,774	10500	He I
46	334,148	7000	Hg I
47	361,364	600	He I
48	365,016	57000	Hg I
49	365,484	16000	Hg I
50	366,328	14000	Hg I
51	370,417	250	Hg I
52	370,500	300	He I
53	381,961	1200	He I
54	386,748	350	He I
55	388,326	15000	194,163 нм, 2-й порядок
56	388,865	150000	He I
57	390,187	400	Hg I
58	390,637	1600	Hg I
59	396,473	4700	He I
60	398,393	1800	Hg II

том спектрального пропускания УФ спектрометра (рис. 3б) и представлены в той же шкале интенсивности, которая использована в табл. 1 для линий ВУФ диапазона. Привязка к шкале, используемой в табл. 1, осуществлена по линии 198,720 нм, регистрируемой двумя спектрометрами. Линии 194,227, 197,379 и 198,784 нм (табл. 1) и линии 194,163, 197,315 и 198,720 нм (табл. 2) соответствуют одним и тем же электронным переходам, различие в длинах волн (на 0,064 нм) обусловлено тем, что измерения проведены в вакууме и на воздухе.

Расчет пропускания УФ спектрометра на длинах волн короче 202 нм затруднен тем, что необходимо учитывать поглощение излучения кислородом воздуха (необходимо корректно учитывать вращательную структуру полос Шумана–Рунге) [4]. Надежная оценка получается только для линии 198,720 нм: поглощение кислородом на данной длине волны в нашем случае составляет 2–3% (на основании данных по сечениям поглощения из работы [4]). Поэтому для создания единой шкалы интенсивности в табл. 1 и 2 использовалась линия 198,720 нм. Интенсивности линий 194,163 и 197,315 нм (табл. 2) даны без поправки на поглощение кислородом.

Анализ данных табл. 2 показывает, что ионные линии ртути располагаются преимущественно в коротковолновой части диапазона, спектральный интервал 190–230 нм «заполнен» именно ионными линиями ртути. Линии гелия наблюдаются преимущественно в длинноволновой части рассматриваемого диапазона и существенно обогащают спектр лампы в интервале 370–400 нм (табл. 2). В спектре выделяется интенсивная линия гелия 388,865 нм (переход с уровня 23,0 эВ), вторая по интенсивности после длинноволновой атомарной резонансной линии ртути 253,652 нм (рис. 4а).

Часть линий располагается в спектре группами с интервалами между линиями 0,1–0,2 нм (см., например рис. 4в–4д), на спектрограммах (рис. 4а, б) такие группы прочитываются как одна линия. Эти группы линий могут использоваться для оценки спектрального разрешения настраиваемых приборов.

Необходимо отметить, что зависимости, представленные на рис. 3, получены расчетным путем на основании имеющихся (паспортных или типовых) данных по спектральным характеристикам используемых дифракционных решеток, приемников излучения, зеркал УФ спектрометра и носят оценочный характер. Тем не менее, учет спектральной зависимости пропускания спектрометров, безусловно, позволяет приблизиться к реальному соотношению интенсивности линий в спектре.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная в данной публикации малогабаритная, с низким энергопотреблением ртутная спектральная лампа ЛГР-1 предназначена, в основном, для настройки спектральных приборов. В диапазоне 115–400 нм лампа излучает не менее 130 спектральных линий: атомарные и ионные линии ртути и линии гелия. В интервале 115–230 нм спектр формируется в основном ионными линиями ртути, в диапазоне 230–370 нм — преимущественно атомарными линиями ртути, а в интервале 370–400 нм в значительной степени — линиями гелия. При этом в диапазоне 160–400 нм в спектре источника наблюдаются два десятка линий высокой интенсивности. Поэтому, по крайней мере, в диапазоне 160–400 нм, лампа может использоваться как при юстировке спектральных приборов, так и для калибровки по длинам волн.

Для юстировки спектральных приборов в интервале 115–175 нм можно рекомендовать лампу ЛГАК-1 [5], которая представляет собой малогабаритный источник с близкими ЛГР-1 электрическими параметрами, излучающий три пары интенсивных атомарных линий, расположенные на краях и в середине указанного спектрального диапазона.

Лампы ЛГР-1 и ЛГАК-1 дополняют перечень спектральных источников, выпускаемых Государственным оптическим институтом [6].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Kramida A., Ralchenko Yu., Reader J., and NIST ASD Team (20l6).* NIST Atomic Spectra Database (version 5.4). Available: http://physics.nist.gov/asd. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
2. *Стриганов А.Р., Свентицкий Н.С.* Таблицы спектральных линий нейтральных и ионизованных атомов. М.: Атомиздат, 1966. 899 с.
3. *Шишацкая Л.П., Шилина Н.В.* Газоразрядная ультрафиолетовая лампа // Патент России № 2079182. 1997.
4. *Yoshino K., Esmond J.R., Cheung A. S.-C., Freeman D.E., and Parkinson W.H.* High resolution absorption cross sections in the transmission window region of the Schumann-Runge bands and Herzberg continuum of O_2 // Planet. Space Sci. 1992. V. 40. № 2/3. P. 185–192.
5. *Карташева М.А., Крылов Б.Е., Левина О.В., Невяжская И.А., Тяпков В.А.* Лампа для юстировки спектральных приборов в диапазоне 115–175 нм // Оптический журнал. 2017. Т. 84. № 3. С. 67–70.
6. *Невяжская И.А., Тяпков В.А., Шилина Н.В., Шилов В.Б.* Разработка и выпуск источников УФ и ВУФ излучения // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 8. С. 108–111.