

ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЙ ИСТОЧНИК СТАЦИОНАРНОГО УФ-ВУФ ИЗЛУЧЕНИЯ АТОМОВ ЙОДА И ЙОДСОДЕРЖАЩИХ МОЛЕКУЛ

© 2005 г. А. К. Шуаибов, И. А. Грабовая

Ужгородский национальный университет, Ужгород, Украина

E-mail: ishev@univ.uzhgorod.ua

Приведены результаты исследования оптических характеристик малогабаритного электроразрядного УФ-ВУФ излучателя на смесях инертных газов с парами йода при давлении рабочих смесей 250–2000 Па. Оптимизация выходных характеристик лампы проводилась в зависимости от величины парциального давления инертных газов и тока тлеющего разряда. Установлено, что суммарная мощность излучения лампы в спектральном диапазоне 206–350 нм достигает 6–7 Вт при коэффициенте полезного действия 15–20%. Ресурс работы лампы в газостатическом режиме составил 500 ч. При этом примерно половина мощности УФ излучения тлеющего разряда представлена в виде спектральной линии атома йода ($\lambda = 206,2$ нм), а другая половина – в форме электронно-колебательных полос молекул йода и йодистого ксенона. Лампа может быть рекомендована для применения в фотохимии, медицине и биофизике.

Коды OCIS: 230.6080.

Поступила в редакцию 30.06.2004.

Мощные электроразрядные эксимерно-галогенные лампы, излучающие на электронно-колебательных переходах моногалогенидов инертных газов и ртути [1–7], представляют в настоящее время значительный интерес для использования в микроэлектронике, фотохимии, очистке воздуха и воды, светотехнике, сельском хозяйстве и медицине [8–12]. Из них существенный интерес представляют УФ лампы на основе излучения монохлоридов криптона и ксенона с накачкой тлеющим разрядом низкого давления, которые позволяют получать наиболее простым способом мощное непрерывное во времени излучение в спектральном диапазоне 210–310 нм [13]. Применение в составе рабочих сред таких излучателей агрессивных молекул хлора приводит к сравнительно низкому ресурсу работы лампы на одной газовой смеси (1–100 ч [1, 3, 5, 14]), что препятствует их широкому применению в различных оптических технологиях. Основными причинами этого являются поглощение хлора открытыми металлическими электродами (особенно сильно нагретым катодом) и уход хлора в гетерофазную химическую реакцию со стенками кварцевой разрядной трубки, которая сопровождается образованием полимерных соединений (хлорсилоксанов) [15]. Поэтому актуальной является замена в рабочих средах эксимерно-галогенных ламп постоянного тока молекул хлора на менее агрессивные молекулы йода. Применение паров йода в смесях с инертными газами низкого давления в лампах с накачкой тлеющим разрядом позволяет получать излучение полос 253 нм $\text{XeI}(B-X)$, 342 нм $\text{I}_2(B-X)$ и интенсивное излучение спектральной линии 206,2 нм атома йода. Ресурс работы таких ламп в отпаянном режиме составляет 500–1000 ч [16–19]. Особый интерес для

йодсодержащих электроразрядных ламп представляет возможность получения излучения полосы йодида ксенона 253 нм, совпадающей по длине волны с наиболее интенсивной спектральной линией атома ртути в ртутных лампах низкого давления. Это позволит применять безртутные, экологически чистые йодсодержащие лампы в тех же оптических технологиях, которые ранее разрабатывались и были оптимизированы для излучения спектральной линии 253 нм HgI ртутных ламп. Для применений в фотохимии и в качестве источника бактерицидного излучения важным является также и возможность продвижения в область вакуумного ультрафиолета (ВУФ), которая открывается за счет использования излучения спектральных линий атома йода с $\lambda \leq 206$ нм. Но условия работы йодсодержащих эксимерно-галогенных ламп с накачкой тлеющим разрядом в области ВУФ и эффективность образования йодидов ксенона (а также криптона) изучены недостаточно полно, что сдерживает разработку простых безртутных источников непрерывного излучения для спектральной области 150–350 нм.

В настоящей работе представлены результаты оптимизации выходных характеристик малогабаритного УФ-ВУФ излучателя низкого давления с непрерывным режимом излучения, работающего на бинарных смесях инертных газов с парами йода.

Тлеющий разряд постоянного тока зажигался в разрядной трубке, которая изготовлена из высококачественного кварца марки УФ. Расстояние между анодом и катодом лампы было равным 10 см. Внутренний диаметр разрядной трубки 1,4 см. Электродами в лампе служили полые цилиндры из листового никеля длиной 1,5 см. Торцы разрядной трубки, которая устанавливалась в металлическую раз-

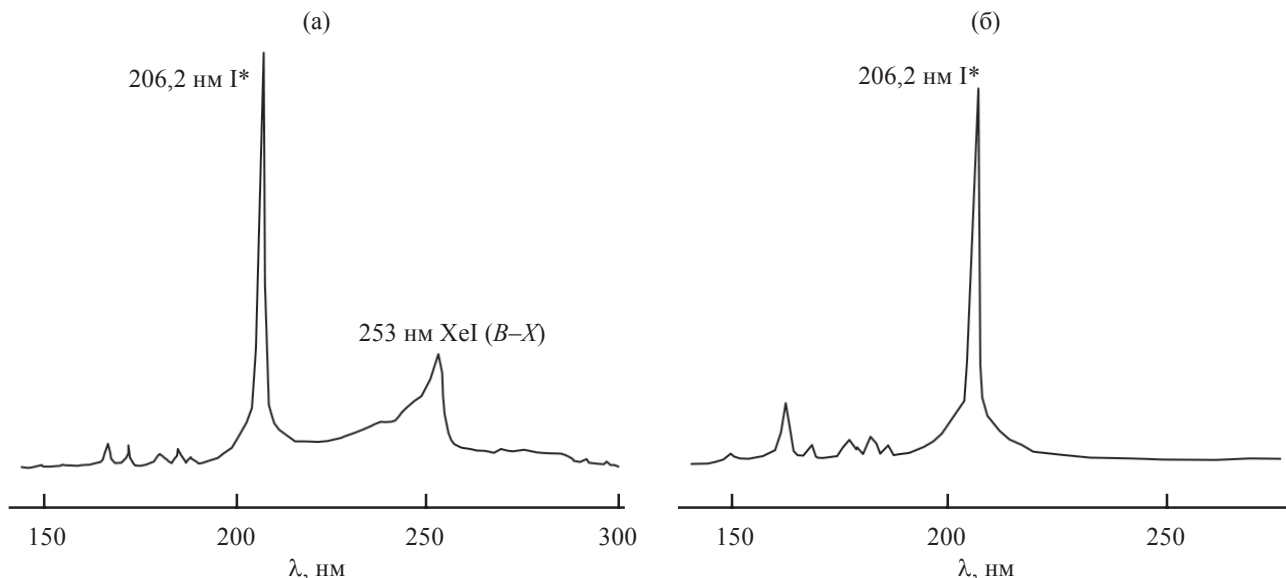


Рис. 1. Спектры излучения электроразрядной лампы на смесях He-I_2 (а) и Xe-I_2 (б) при давлении инертных газов в диапазоне 500–1300 Па и токе разряда 30 мА.

рядную камеру, оставались открытыми. Камера была пристыкована к вакуумному монохроматору через окно из MgF_2 . Излучение плазмы отбиралось с одной из торцевых частей разрядной трубки. Кристаллический йод высокой чистоты размещался в нижней части разрядной камеры. Перед заправкой инертными газами камера откачивалась до остаточного давления воздуха 7–10 Па.

Излучение плазмы тлеющего разряда в лампе анализировалось с помощью фотоумножителя с входным окном из LiF (ФЭУ-142) и вакуумного монохроматора, изготовленного по схеме Сейя-Намиоки, а также с использованием фотоумножителя ФЭУ-106 и монохроматора МДР-2 (дифракционная решетка 1200 штр/мм или голографическая дифракционная решетка на 2400 штр/мм). Фотоумножители и соответствующие им спектральные приборы предварительно калибровались по величине относительной спектральной чувствительности в спектральном диапазоне 130–400 нм. Тлеющий разряд в лампе зажигался с помощью высоковольтного выпрямителя постоянного тока (средний ток до 50 мА, напряжение до 10 кВ). Давление паров йода в камере с разрядной трубкой оценивалось по температуре наиболее холодной ее части с использованием данных справочника [20]. Измерение характеристик тлеющего разряда и полной мощности излучения лампы проводилось по фотометрической методике, приведенной в статье [3].

Сравнительно однородный тлеющий разряд постоянного тока зажигался только при общем давлении газовых смесей, не превышающем 400–600 Па, и разрядном токе 40–50 мА. Для меньших токов разряда в центре разрядной трубки формировался яркий плазменный шнур, а в периферийной области

разряда наблюдалось только слабое свечение газовой смеси синего цвета. Диаметр плазменного шнура увеличивался с 2–3 до 10–12 мм при увеличении тока с 5 до 50 мА. При давлении газовых смесей, превышающем 1000–1200 Па, тлеющий разряд при максимальной величине тока существовал в контрагированном состоянии (диаметр плазменного шнура был равен 2–3 мм).

Такой вид тлеющего разряда в электроотрицательных газовых смесях связан с формированием в центральной части разрядной трубки ион-ионной плазмы, что обусловлено разными скоростями диффузии электронов и ионов плазмы (вдоль радиуса разрядной трубки). Так как скорость диффузии электронов значительно превышает скорость диффузии отрицательных и положительных ионов, то электроны быстро покидают центральную часть разрядной трубки, где остаются одни ионы.

Вольт-амперные характеристики соответствовали поднормальной и нормальной стадиям тлеющего разряда и были близкими по форме к приведенным в работах [17, 18].

Спектры излучения плазмы тлеющего разряда в смесях гелия и ксенона с парами йода (не исправленные с учетом относительной спектральной чувствительности системы регистрации излучения) представлены на рис. 1. В спектре излучения лампы на смеси He-I_2 выделялась спектральная линия атома йода 206,2 нм и система полос молекулы йода в спектральном диапазоне 320–342 нм; при $P(\text{He}) = 400$ Па отношение мощностей УФ излучения плазмы между ними составило $W(206 \text{ нм})/W(342 \text{ нм}) = 52/48$. В смеси Xe-I_2 зарегистрировано также излучение яркой полосы при 253 нм $\text{XeI}(B-X)$. Образование молекул KI^* практически не проявлялось из-за высокой эффектив-

Таблица 1. Интенсивности спектральных линий атома йода в тлеющем разряде на смеси гелия с парами йода при $P(\text{He}) = 500$ Па

λ , нм	150,7	161,8	170,2	178,2	179,9	183	187,6	206,2
I , отн. ед.	60	38	12	2	2	6	2	100

ности преддиссоциации ее верхних возбужденных состояний при низком давлении смеси криптона с парами йода. Типичное соотношение яркостей полос молекул йода, йодида ксенона и интенсивности спектральной линии 206,2 нм составляет 10/3/7. В табл. 1 представлены относительные интенсивности спектральных линий атома йода в области ВУФ. Они получены с учетом относительной спектральной чувствительности вакуумного монохроматора и фотоумножителя и даны в сравнении с интенсивностью спектральной линии 206,2 нм. Спектральные линии атома йода 150,7 и 161,8 нм соизмеримы по интенсивности с линией 206,2 нм. Нижним энергетическим состоянием для спектральных линий ВУФ является основное состояние атома йода $^2P_{3/2}$, в то время как для спектральной линии 206,2 нм нижнее состояние $^2P_{1/2}$ расположено примерно на 1 эВ выше основного. Для йодсодержащих ламп с накачкой посредством барьерного разряда в области ВУФ основными были спектральные линии 183 и 184,4 нм, которые для ламп с тлеющим разрядом не являются преобладающими.

Ширина контура спектральной линии излучения атома йода 206,2 нм составляет 0,10–0,12 нм (рис. 2). Контур этой спектральной линии асимметричный со слабо выраженной структурой на коротковолновом участке.

На рис. 3 представлены зависимости интенсивности излучения спектральных линий атома йода

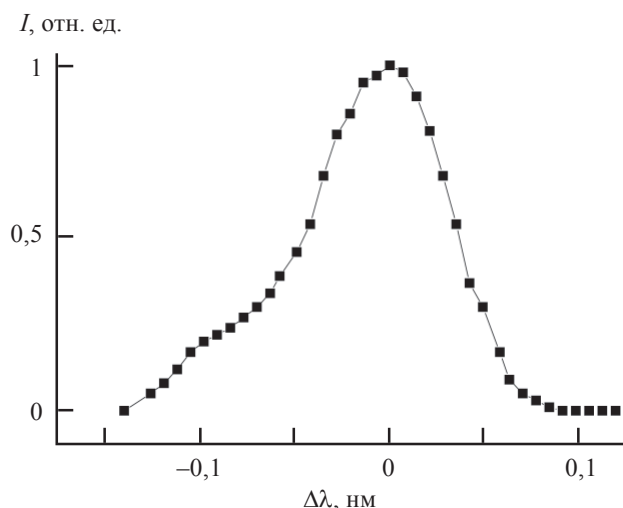


Рис. 2. Контур спектральной линии 206,2 нм атома йода в спектре плазмы на смеси Kr–I₂ при $P(\text{Kr}) = 400$ Па и токе тлеющего разряда 50 мА.

от величины тока тлеющего разряда в смесях He–I₂ и Kr–I₂. С увеличением тока интенсивность излучения атомов йода увеличивалась без признаков насыщения. Интенсивность излучения спектральной линии 206,2 нм была примерно одинакова при использовании в качестве буферного газа как гелия, так и криптона.

Зависимости относительной интенсивности излучения спектральных линий атома йода и амплитуды полосы йодида ксенона от тока тлеющего разряда и рода инертного газа представлены на рис. 4 и в табл. 2. Все приведенные зависимости характеризовались насыщением интенсивности излучения при увеличении тока разряда свыше 30 мА. Это может быть связано с перегревом разрядной трубки, заполненной ксеноном, и значительным увеличении

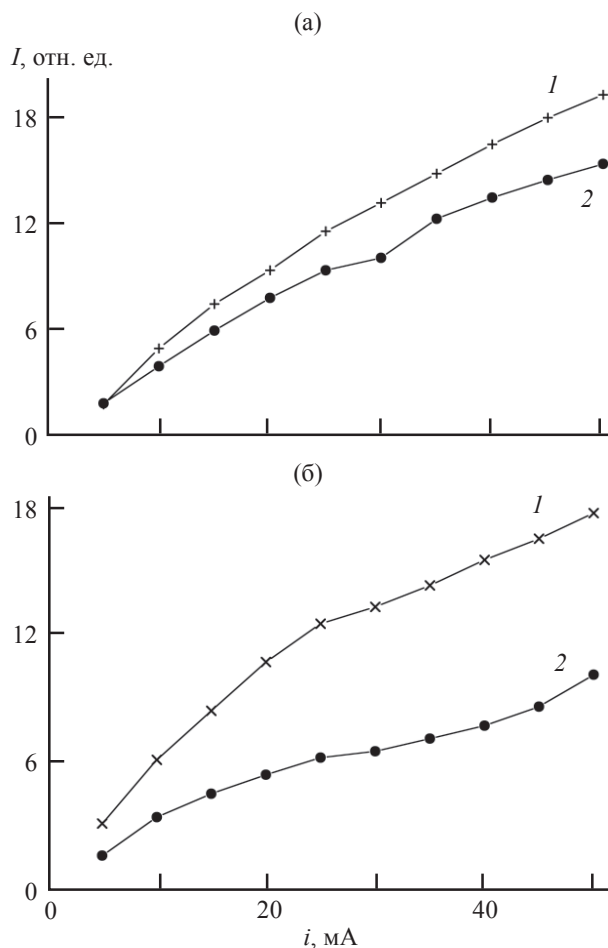


Рис. 3. Зависимости относительной интенсивности излучения спектральных линий атома йода 206,2 (1) и 161,8 нм (2) от тока тлеющего разряда на смесях He–I₂ (а) и Kr–I₂ (б) при давлении гелия и криптона в смесях 500 Па.

Таблица 2. Зависимость интенсивности спектральных линий атомов йода и амплитуды полосы 253 нм от тока разряда и рода инертного газа при давлении инертных газов 500 Па

Смесь	λ , нм	$i_{\text{раз}} = 30$ мА		$i_{\text{раз}} = 50$ мА	
		$W_{\text{вкл}}$, Вт	I , отн. ед.	$W_{\text{вкл}}$, Вт	I , отн. ед.
He-I ₂	206,2	26,4	69,3	45	100
He-I ₂	161,8	26,4	56,8	45	79,7
Ne-I ₂	206,2	22,8	69,3	38	85,4
Ne-I ₂	161,8	22,8	30	38	39
Xe-I ₂	206,2	15	83,9	25	86,5
Xe-I ₂	253,0	15	35,4	25	38,5
Xe-I ₂	161,8	15	32,8	25	33,5
Kr-I ₂	206,2	18	69,3	31	92,2
Kr-I ₂	161,8	18	34	31	52,6

ем плотности паров йода. При этом происходит увеличение плотности атомов йода в наиболее низких энергетических состояниях, приводящее к поглощению интенсивности излучения спектральных линий 206,2 и 161,8 нм атома йода и тушению полосы при 253 нм XeI(*B-X*) молекулами йода. При охлаждении разрядной трубки (близкой по конструкции к используемой в настоящем эксперименте) потоком воздуха от вентилятора интенсивность спектральной линии 206,2 нм атома йода с увеличением мощности электрического разряда (которое достигалось при увеличении тока в пределах 10–50 мА) в смеси паров йода как с гелием, так и с ксеноном возрастала без признаков насыщения [17].

Наиболее высокая интенсивность излучения спектральной линии 206,2 нм была получена в смесях He-I₂, Kr-I₂ при токе тлеющего разряда 50 мА. Но максимальная эффективность излучателя получена для смеси Xe-I₂. Оптимальное давление инертных

газов находится в диапазоне 400–600 Па. Отношение интенсивностей спектральных линий 161,8 и 206,2 нм в тлеющем разряде на смесях паров йода с гелием, неоном, криптоном и ксеноном (при давлении инертного газа 500 Па и токе разряда 50 мА) при выводе излучения с торцевой части плазменного столба с длиной примерно 100 мм соответственно составляло 0,80, 0,46, 0,57, 0,39. Для ВУФ-лампы на парах йода наиболее оптимальной также является смесь на основе гелия.

Абсолютная величина полной мощности излучения (со всей поверхности разрядной трубки и ее торцевых частей) достигала 6–7 Вт при КПД 15–20%. Ресурс работы излучателя на одной смеси при объеме буферной камеры 10 л составлял 500 ч.

Заключение

Исследование эмиссионных характеристик малогабаритного УФ-ВУФ излучателя с накачкой тлеющим разрядом, который работает на смесях инертных газов с парами йода, показало, что при электрической мощности тлеющего разряда, не превышающей 50 Вт, суммарная мощность излучения лампы в спектральном диапазоне 200–350 нм достигает 6–7 Вт при коэффициенте полезного действия 15–20%. Ресурс работы лампы в газостатическом режиме равнялся 500 ч. Примерно половина мощности УФ излучения лампы приходится на спектральную линию атома йода ($\lambda = 206,2$ нм) с шириной 0,12 нм, а другая половина – на электронно-колебательные полосы молекул при 342 I₂(*B-X*) и 253 нм XeI(*B-X*). Оптимальное парциальное давление инертных газов находилось в диапазоне 400–600 Па.

ЛИТЕРАТУРА

1. Головицкий А.П., Кан С.Н. Характеристики ультрафиолетового эксимерного излучения непрерывного тлеющего разряда низкого давления // Опт. и спектр. 1993. Т. 75. В. 3. С. 604–609.

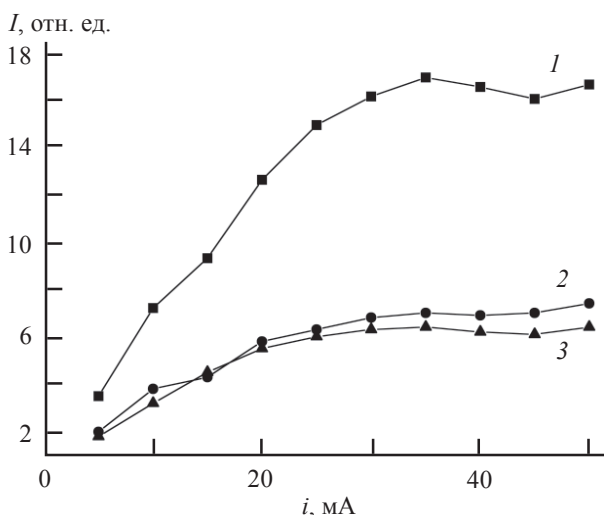


Рис. 4. Зависимости относительной интенсивности излучения спектральных линий атома йода 206,2 (1), 161,8 нм (3) и амплитуды полосы излучения 253 нм XeI(*B-X*) (2) от разрядного тока в смеси Хе-I₂ при давлении ксенона 500 Па.

2. Ломаев М.И., Панченко А.Н., Соснин Э.А. Цилиндрические эксилампы с накачкой тлеющим разрядом // ЖТФ. 1998. Т. 68. В. 2. С. 64–68.
3. Шуаибов О.К., Шимон Л.Л., Дащенко А.Й., Шевера І.В. Електророзрядне джерело випромінювання низького тиску на хлоридах Ag, Kr, Xe і молекулах Cl_2^* // Журнал фізичних досліджень. 2001. Т. 5. № 2. С. 131–138.
4. Шуаибов А.К., Дащенко А.И., Шевера І.В. Многоволновый источник излучения низкого давления на хлоридах аргона и ксенона // Опт. и спектр. 2002. Т. 92. № 5. С. 753–755.
5. Шуаибов О.К., Шимон Л.Л., Дащенко А.Й., Шевера І.В. Електророзрядна ексімерна лампа низького тиску // Деклараційний патент України № 47628 А. 2002.
6. Шуаибов О.К., Шимон Л.Л., Дащенко А.Й., Шевера І.В. Ексімерно-галогенна високочастотна лампа з планарною апертурою // Деклараційний патент України № 60621 А. 2003.
7. Малинин А.Н., Поляк А.В. Широкополосный эксимерный источник видимого излучения с накачкой барьерным разрядом // Опт. и спектр. 2003. Т. 95. № 6. С. 988–996.
8. Sugimura H., Takai O., Nakagiri N. Scanning probe lithography for electrode surface modification // Journ. of Electroanalytic Chem. 1999. V. 473. P. 230–234.
9. Ломаев М.И., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. и др. Эксилампы – эффективные источники спонтанного УФ- и ВУФ-излучения // УФН. 2003. Т. 173. № 2. С. 201–217.
10. Sosnin E.A., Lavrent'eva L.V., Yusupov M.R., Masterova Y.V., Tarasenko V.F. Inactivation of escherichia coli using capacitive discharge excilamp // Proc. Int. Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Filds. Rhodes, 2002. P. 384–388.
11. Kanegae A., Muto M., Omori Sh., Iritono K. High pressure electric discharge lamp // Patent USA № 6624580 B2. 2003.
12. Боярчук К.А., Карелин А.В., Широков Р.В. Анализ перспектив применения узкополосных источников спонтанного излучения для очистки атмосферного воздуха // Квант. электрон. 2003. Т. 33. № 12. С. 1107–1110.
13. Скакун В.С., Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В. KrCl и XeCl эксилампы с мощностью излучения ~1,5 kW, возбуждаемые тлеющим разрядом // Письма в ЖТФ. Т. 28. В. 21. С. 42–47.
14. Tarasenko V.F., Panchenko A.N., Skakun V.S., Sosnin E.A. et al. Powerful glow discharge excilamp // Patent USA. № 6376972 B1. 2002.
15. Ерофеев М.В., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. О причинах снижения мощности излучения KrCl-эксиламп барьерного разряда в процессе работы // Изв. вузов. Физика. 1999. № 4. С. 68–71.
16. Lomaev M.I., Tarasenko V.F. Xe(He)–I₂ glow and capacitive discharge excilamps // Proc. SPIE. 2002. V. 4747. P. 390–398.
17. Шуаибов А.К., Грабовая И.А. Электроразрядный ультрафиолетовый эксимерно-галогенный излучатель на смеси гелия и ксенона с парами иода // ЖТФ. 2004. Т. 74. В. 4. С. 66–69.
18. Шуаибов А.К., Шимон Л.Л., Грабовая И.И. Широкополосный эксимерно-галогенный излучатель на основе бромиды и иодида ксенона // Теплофиз. выс. темп. 2004. Т. 42. № 4. С. 640–642.
19. Шуаибов О.К., Шимон Л.Л., Грабова І.А. Бактерицидна лампа // Деклараційний патент України № 62723 А. 2003.
20. Свойства неорганических соединений. Справочник. Л.: Химия, 1983. 392 с.