

УФ излучатель с повышенной вирулицидной эффективностью

М.И. Ломаев^{1,2,}, В.Ф. Тарасенко^{1,2}*

¹*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

²*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

**lomaev@loi.hcei.tsc.ru*

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований УФ излучателя (газоразрядной лампы), возбуждаемой емкостным разрядом. В качестве рабочей среды лампы использовались пары йода, а также смеси паров йода с инертными газами. Установлено, что при парциальных давлениях паров йода и гелия ~ 2.5 Торр и ~ 7 Торр, соответственно, в выходном спектре лампы доминирует линия атома йода с длиной волны 206.16 нм, а удельная мощность излучения составляет ~ 3 мВт/см² на внешней поверхности лампы. Излучение в данной спектральной области характеризуется повышенной бактерицидной/вирулицидной эффективностью, что перспективно с точки зрения создания источника излучения для безопасной УФ-инактивации среды обитания человека, загрязненной патогенными микроорганизмами – бактериями, микробами и вирусами, в том числе, вирусом SARS-CoV-2.

Ключевые слова: УФ-инактивация, емкостной разряд, пары йода.

1. Введение

В настоящее время существенно усилился интерес к источникам спонтанного излучения в УФ и ВУФ областях спектра. Причиной повышенного интереса является возможность использования излучения в области 200–225 нм для дезинфекции воздуха, помещений, и различных поверхностей, загрязненных патогенными микроорганизмами, включая коронавирус SARS-CoV-2 [1]. Одними из наиболее эффективных источников в данной области спектра являются эксилампы – газоразрядные источники спонтанного излучения в УФ и ВУФ областях спектра, основанные на неравновесном излучении эксиплексных и эксимерных молекул [2]. Однако, KrCl- и KrBr-эксилампы, излучающие в указанной спектральной области, имеют дополнительные полосы в области 225–300 нм, излучение которых с высокой эффективностью поражает молекулы ДНК.

Одним из вариантов создания источника излучения в данной области спектра, эффективного с точки зрения инактивации коронавируса SARS-CoV-2, является газоразрядная лампа, излучающая на линии атома йода с длиной волны 206.16 нм. Преимуществом данной лампы по сравнению KrCl-эксилампой является то, что коэффициент поглощения молекулами ДНК и протеина, входящих в состав бактерий и вирусов, на длине волны 206.16 нм более, чем в 2 раза превышает коэффициент поглощения на длине волны 222 нм. Это обеспечивает большую бактерицидную/вирулицидную эффективность излучения йодной лампы по сравнению с излучением KrCl-эксилампы. При этом принципиально важным обстоятельством является то, что бактерии и вирусы (типичный размер 1 мкм и 0.1 мкм, соответственно) облучаются полностью. В тоже время, при облучении млекопитающего лишь малая часть излучения (не более 5%) достигает молекул ДНК, расположенных в клетке млекопитающего (типичный размер 10 мкм).

В работе [4] было установлено, что при газоразрядном возбуждении паров йода регистрируется интенсивная линия с длиной волны 206.16 нм, а в области вплоть до 355 нм отсутствуют линии и полосы излучения с заметной интенсивностью.

Целью настоящей работы является исследование спектральных и энергетических характеристик лампы на основе паров йода, перспективной с точки зрения разработки источника излучения с повышенной вирулицидной эффективностью для УФ-дезинфекции среды обитания человека, загрязненной патогенными микроорганизмами, включая коронавирус SARS-CoV-2.

2. Экспериментальная установка

Колба излучателя была выполнена из кварцевой трубки диаметром 33 мм, на концы которой снаружи устанавливались электроды, изготовленные из стальной фольги шириной 40 мм. Разряд во внутренней полости трубки зажигался при подаче на электроды импульсов напряжения, формируемых высоковольтным генератором (амплитуда, частота следования и длительность импульсов напряжения до 5 кВ, 5–100 кГц и 3 мкс, соответственно). Напряжение на электродах, а также ток во внешней цепи лампы регистрировались с помощью делителя напряжения АКТАКОМ АСА-6039 (полоса пропускания 220 МГц), резистивного токового шунта и осциллографа TDS 3032В (полоса пропускания 300 МГц). Для регистрации спектра излучения лампы использовались компьютер и спектрометр OceanOptics HR2000 с известной спектральной чувствительностью в диапазоне 200–800 нм. Для измерения величины средней плотности мощности и временной формы импульсов излучения использовались фотоприемник C8026, Hamamatsu Photonics (8) с фотоприемной головкой H8025-222 (9) и фотоземлет коаксиальный ФЭК-22 СПУ, соответственно. Внешний вид разряда регистрировался фотокамерой Sony A100 (10). Рабочая среда готовилась непосредственно во внутренней полости лампы посредством помещения кристаллов йода из контейнера внутрь колбы, а также наполнения колбы буферным газом. В качестве буферного газа использовались гелий или ксенон, или их смесь. Полное давление смеси измерялось вакуумметром образцовым ВО. Для оценки давления паров йода с помощью термопары производилось измерение температуры наиболее холодной части внешней поверхности колбы лампы. Уменьшение содержания паров йода в смеси осуществлялось откачиванием смеси с последующим наполнением трубки буферными газами без добавления кристаллов йода. Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис.1.

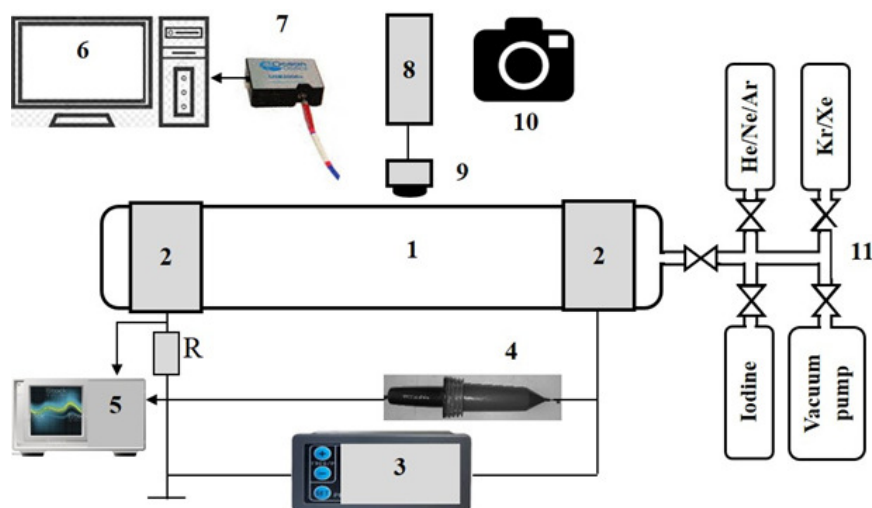


Рис.1. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – излучатель, 2 – электроды, 3 – высоковольтный генератор, 4 – делитель напряжения АКТАКОМ АСА-6039, 5 – осциллограф TDS 3032В, 6 – компьютер, 7 – спектрометр Ocean Optics HR2000, 8 – фотоприемник C8026, Hamamatsu Photonics с фотоприемной головкой H8025-222 (9), 10 – фотоаппарат Sony A100, 11 – система откачки и напуска газов и паров йода.

3. Результаты и обсуждение

Измерение средней мощности и регистрация спектров излучения было проведено в парах йода и смесях йода с различными буферными газами. Давление паров йода определяется температурой наиболее холодной части излучателя – отрезка, соединяющего

через клапан колбу излучателя и систему откачки и напуска газов и паров йода (рис.1). Температура излучателя, в том числе отрезка, зависела от средней мощности возбуждения и температуры окружающего воздуха. По мере повышения температуры излучателя за счет его омического нагрева плотность паров йода увеличивалась. При малых порциях йода в излучателе плотность паров йода ограничивается плотностью, соответствующей испарению всей порции кристаллов йода, загруженной в излучатель. При этом спектральная плотность мощности линии атома йода с длиной волны 206.16 нм была наибольшей при давлении паров йода не более 10 Торр. Также, в области 300–355 нм наблюдалась полоса молекулярного йода с максимумом на длине волны 342 нм. Интенсивность этой полосы зависит от плотности паров йода в колбе и при давлении пара менее 3 Торр её вклад незначителен. Было установлено, что суммарная интенсивность излучения на линии атомарного йода 206.16 нм и полосе молекулярного йода 342 нм линейно увеличивается с ростом удельной мощности возбуждения до ~ 1.3 Вт/см³. При этом давление паров йода составляло ~ 2.5 Торр. В этих условиях в трубке формировался однородный канал диффузного разряда диаметром ~ 1.5 см и длиной примерно равной расстоянию между внешними торцами электродов. При увеличении удельной мощности возбуждения более 1.3 Вт/см³ диаметр канала разряда, а также мощность и эффективность излучения начинали уменьшаться. По-видимому, это было связано с ухудшением однородности горения разряда.

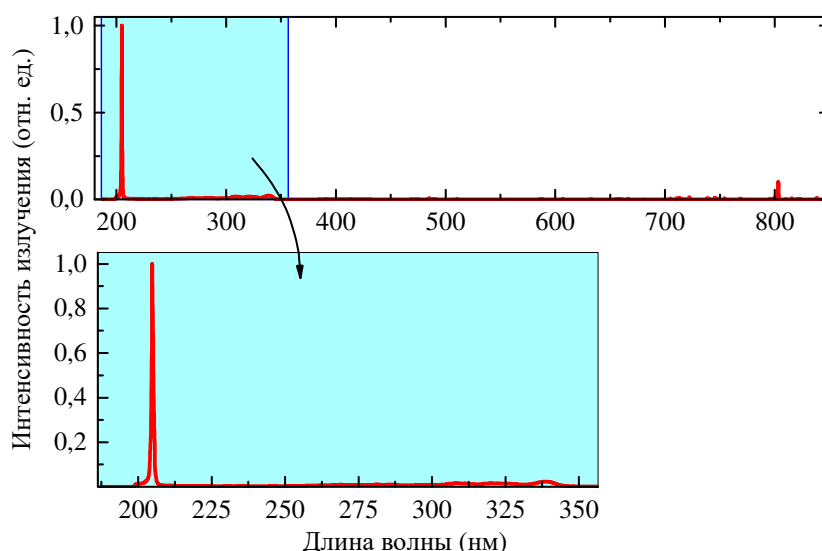


Рис.2. Спектр излучения лампы при возбуждении смеси паров йода (~ 2.5 Торр) и гелия (~ 7 Торр). Частота следования импульсов возбуждения 96 кГц.

При исследовании работы излучателя с заполнением смесями паров йода с различными буферными газами (He, Ne, Ar, Kr, Xe) было подтверждено (см. [5]), что средняя мощность излучения в смесях с буферными газами увеличивается. Наибольшие величины средней мощности излучения были получены при добавках гелия, ксенона и смесей гелия с ксеноном. В смесях с добавкой ксенона регистрируется полоса излучения молекул XeI^* с максимумом на длине волны 253 нм. Известно, что излучение в данном спектральном диапазоне опасно для кожи или глаз человека. Поэтому, с точки зрения создания лампы для дезинфекции среды обитания человека на основе паров йода целесообразно использовать смесь паров йода с гелием. При изменении давления паров йода в смеси было установлено, что при их давлении более ~ 2.5 Торр интенсивность свечения полосы молекулярного йода с максимумом на длине волны 342 нм существенно нарастает, что нежелательно по указанной

выше причине. При давлении паров йода в смеси менее 1 Торр наблюдалось заметное уменьшение интенсивности излучения, как на полосе 342 нм молекулы I_2 , так и на линии 206.16 нм атома йода. Оптимальной с точки зрения спектра и удельной мощности излучения лампы оказалась смесь при парциальных давлениях паров йода и гелия ~ 2.5 Торр и ~ 7 Торр, соответственно. При частоте следования импульсов напряжения 96 кГц удельная мощность излучения составляла ~ 3 мВт/см² на внешней поверхности трубки. Спектр излучения лампы и внешний вид лампы в рабочем режиме при данных условиях приведен на рис.2. Из рис.2 видно, что в спектральной области от 200 до 350 нм доминирует линия 206.16 нм. В ультрафиолетовой части спектра наблюдается слабый континуум в области короче 350 нм, в видимой и ближней ИК части спектра присутствуют линии гелия. Было установлено, что временной ход интенсивности излучения лампы, зарегистрированного фотодиодом ФЭК–22 СПУ, повторяет форму импульса тока разряда. Изменение частоты следования импульсов напряжения от 40 до 100 кГц приводило к незначительному росту соотношения интенсивности излучения атомной линии 206.16 нм к интенсивности излучения полосы молекулы I_2 с максимумом на длине волны 342 нм. При увеличении удельной мощности возбуждения более ~ 1.3 Вт/см³ при частоте следования импульсов возбуждения более 100 кГц диаметр канала разряда, а также мощность и эффективность излучения начинали уменьшаться. Вероятно, это связано с ионизационно-перегревной (тепловой) неустойчивостью [6], приводившей к неоднородности разряда.

4. Заключение

Результаты проведенного исследования указывают на перспективность лампы на основе паров йода с точки зрения создания источника излучения с высокой вирулицидной эффективностью на длине волны 206.16 нм. Установлено, что удельная мощность излучения составляет ~ 3 мВт/см² на внешней поверхности лампы, а в эмиссионном спектре в области от 200 до 350 нм доминирует излучение атомной линии йода с длиной волны 206.16 нм. Для ответа на вопрос о возможности уменьшения интенсивности излучения данной лампы в диапазоне 230–350 нм, а также в вакуумной ультрафиолетовой части спектра требуется проведение дополнительных исследований.

Благодарность

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИСЭ СО РАН, проект № FWRM-2021-0014.

5. Список источников

- [1] Kitagawa H., et al., *American Journal of Infection Control*, **49**, 299, 2021; <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2020.08.022>
- [2] Бойченко А.М., Ломаев М.И., Панченко А.Н., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. *Ультрафиолетовые и вакуумно-ультрафиолетовые эксилампы: физика, техника и применения*. (Томск: Изд-во STT, 2011).
- [3] Hessling M., Haag R., Sieber N., Vatter P., *GMS Hygiene and Infection Control*, **16**, 1, 2021; doi: 10.3205/dgkh000378
- [4] Kiess C.C., Corliss C.H., *Journal of research of the National Bureau of Standards. Section A, Physics and chemistry*, **63A**(1), 1, 1959.
- [5] Lomaev M.I., Tarasenko V.F., *Proc. of SPIE*, **4747**, 390, 2002; <https://doi.org/10.1117/12.460150>
- [6] Райзер Ю.П., *Физика газового разряда*. (Долгопрудный: Издательский Дом "Интеллект", 2009).