

DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-09-59-65

УДК 535-3; 621.327.2; 621.38

Источник излучения с повышенной вирулицидной эффективностью на основе смеси гелия с парами йода

Михаил Иванович Ломаев^{1✉}, Виктор Федотович Тарасенко²,
Владимир Сергеевич Кузнецов³

^{1, 2, 3}Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия

^{1, 2}Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

¹Lomaev@loi.hcei.tsc.ru <https://orcid.org/0000-0001-9067-4954>

²VFT@loi.hcei.tsc.ru <https://orcid.org/0000-0001-5706-3211>

³robert_smith_93@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-1115-6495>

Аннотация

Предмет исследования. Источник спонтанного излучения (лампа) ультрафиолетового диапазона спектра, возбуждаемый емкостным разрядом. В качестве рабочей среды лампы использованы пары йода, а также смеси паров йода с инертными газами. Условия повышения удельных выходных параметров излучения лампы, а также определение условий возбуждения, при которых лампа излучает преимущественно на атомной линии йода с длиной волны 206,16 нм. **Основной целью работы** является исследование спектральных и энергетических характеристик лампы на основе паров йода, перспективной с точки зрения разработки источника излучения с повышенной вирулицидной эффективностью для ультрафиолетовой дезинфекции среды обитания человека, загрязненной патогенными микроорганизмами, включая коронавирус SARS-CoV-2. **Метод.** При проведении работы осуществлены оптимизация состава и давления рабочей среды, а также режима возбуждения излучения лампы за счет изменения частоты следования импульсов напряжения. **Основные результаты.** Установлено, что при удельной мощности возбуждения порядка 1,3 мВт/см³ и парциальных давлениях паров йода и гелия около 2,5 и 7 Торр соответственно в выходном спектре лампы доминирует линия атома йода на длине волны 206,16 нм, а удельная мощность излучения составляет порядка 3 мВт/см² на внешней поверхности колбы лампы. **Практическая значимость.** Излучение данной лампы попадает в спектральный диапазон 200–225 нм, перспективный с точки зрения разработки технологии безопасной ультрафиолетовой инактивации патогенных микроорганизмов, включая коронавирус SARS-CoV-2.

Ключевые слова: лампа ультрафиолетового диапазона, ультрафиолетовая инактивация, емкостной разряд, пары йода

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

Ссылка для цитирования: Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф., Кузнецов В.С. Источник излучения с повышенной вирулицидной эффективностью на основе смеси гелия с парами йода // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 9. С. 59–65. DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-09-59-65

Коды OCIS: 230.6080, 260.7190

ВВЕДЕНИЕ

Пандемия COVID-19, вызванная распространением вируса SARS-CoV-2, существенно усилила интерес к источникам излучения в ультрафиолетовой (УФ) и вакуумной ультрафиолетовой (ВУФ) областях спектра. Причиной повышенного интереса является возможность использования излучения в дальнейшем (коротко-

трафиолетовой (УФ) и вакуумной ультрафиолетовой (ВУФ) областях спектра. Причиной повышенного интереса является возможность использования излучения в дальнейшем (коротко-

волновом) спектральном диапазоне ультрафиолета (УФС 200–280 нм) для дезинфекции воздуха, помещений и различных поверхностей, загрязненных патогенными микроорганизмами, включая коронавирус SARS-CoV-2 [1–9]. В качестве источника излучения в данном спектральном диапазоне традиционно используются ртутные лампы низкого давления (РЛНД), в спектре излучения которых доминирует резонансная линия на длине волны 253,7 нм. Излучение на данной длине волны попадает в область длинноволнового максимума спектра поглощения дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК), что обеспечивает высокую эффективность УФ инактивации патогенных микроорганизмов [4]. Основным недостатком РЛНД является, во-первых, канцерогенность излучения с длиной волны 253,7 нм, что опасно для человека при облучении его кожи или глаз [3–9]. Во-вторых, эксплуатация ртутных ламп сопряжена с риском загрязнения окружающей среды, медицинских, биологических и других объектов парами ртути. Кроме того, оказалось, что микроорганизмы могут приобретать резистентность к излучению линии 253,7 нм, в то время как инактивирующий эффект излучения источника с большей спектральной шириной, в частности, ХеВr-эксилампы, остается неизменным [4]. Для УФ инактивации различных микроорганизмов применяются также УФС-светодиоды с длинами волн излучения в диапазоне 250–300 нм [9], а также источники спонтанного излучения в УФ и ВУФ диапазонах спектра на основе неравновесного излучения эксиплексных и эксимерных молекул — эксилампы [10–12]. К основным преимуществам УФС-светодиодов следует отнести малые габариты, а также быстрый выход на рабочий режим после включения. Однако они имеют относительно низкий ресурс, а также, как и в случае РЛНД, излучение УФС-светодиодов в диапазоне 250–300 нм канцерогенно. Особенностью эксиламп среди других источников спонтанного излучения в УФ и ВУФ областях спектра является, во-первых, квазимонохроматичность излучения: до 80% и более общей мощности излучения в диапазоне 120–800 нм может быть сосредоточено в относительно узкой (не более 10–15 нм) наиболее интенсивной полосе эксиплексной/эксимерной молекулы [12]. Во-вторых, выбор рабочего газа/смеси

газов в эксилампе позволяет получать излучение на наиболее интенсивном оптическом переходе определенной молекулы и, соответственно, в определенном спектральном диапазоне. Установлено, что эксилампы обладают явно выраженными бактерицидным и вирулицидным эффектами и могут быть использованы для эффективной УФ инактивации патогенных микроорганизмов [4–8, 13–17].

К настоящему времени установлено, что излучение в коротковолновой части (200–225 нм) УФС-диапазона в отличие от излучения в диапазоне 225–280 нм, обеспечивая эффективную УФ инактивацию патогенных микроорганизмов, оказывается минимально опасным для человека [5–8]. В указанной спектральной области излучают KrCl-эксилампа, а также менее эффективная KrBr-эксилампа (пиковые длины волн основных полос излучения 222 и 206 нм соответственно). В то же время, данные эксилампы имеют дополнительные полосы в области 225–300 нм, излучение которых опасно при облучении тканей человека [14, 15]. Для ослабления интенсивности излучения данных эксиламп в области 225–280 нм и его негативного воздействия на молекулы ДНК при облучении кожи или глаз человека предложено использовать узкополосные фильтры [14–17]. Однако стоимость таких фильтров весьма высока и возрастает при увеличении размера фильтра, а их селективность зависит от угла падения излучения на поверхность фильтра. Поэтому поиск других эффективных источников излучения с длинами волн в области 200–225 нм весьма актуален. При этом дополнительным важным условием является отсутствие в эмиссионном спектре источника излучения интенсивных линий или полос в спектральной области 225–280 нм. Актуальность разработки источников излучения в спектральном диапазоне 207–222 нм для создания эффективных безопасных систем УФ инактивации отмечается в публикации [18]. Авторы данной работы теоретически исследуют источник излучения в спектральной области короче 220 нм на основе наноструктур, перспективной для УФ инактивации вирусов и безопасной для человека.

Одним из вариантов создания источника излучения в области 200–225 нм, эффективного с точки зрения инактивации коронавируса SARS-CoV-2, является газоразрядная лам-

па, излучающая на линии атома йода с длиной волны 206,16 нм. Преимуществом данной лампы по сравнению с KrCl-эксилампой является то, что коэффициенты поглощения молекулами ДНК и протеина, входящими в состав бактерий и вирусов, на длине волны 206,16 нм более чем в 2 раза превышают соответствующие коэффициенты поглощения на длине волны 222 нм [15]. Это обеспечивает большую бактерицидную/вирулицидную эффективность излучения йодной лампы, в том числе при инактивации коронавируса. При этом принципиально важным обстоятельством является то, что при облучении бактерий и вирусов из-за их малых размеров (типичный размер 1 и 0,1 мкм соответственно) воздействию излучения подвергается весь объем микроорганизма. В то же время при облучении млекопитающего лишь малая часть излучения (не более 5%) достигает молекул ДНК, расположенных в ядре клетки млекопитающего (типичный размер клетки 10 мкм). Предполагается, что кожа и глаза человека дополнительно защищены соответственно внешним омертвевшим слоем эпителия и роговицей глаза, поглощающими большую часть излучения в данной спектральной области. Тем не менее, отмечается, что вопрос безопасности при облучении тканей человека излучением с длиной волны 222 нм до настоящего времени изучен недостаточно [15].

Ранее было установлено [19], 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. При этом известно, что в коротковолновой части эмиссионного спектра йодной лампы имеются также линии атома йода 187,6, 184,4 и 183 нм [20]. Применение для возбуждения йодной лампы емкостного разряда при полном давлении единицы Торр позволило существенно увеличить время жизни отпаянных йодных ламп [21–23].

Целью настоящей работы было 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.

ТЕХНИКА И УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В состав экспериментальной установки (рис. 1) входят излучатель с электродами, высоковольтный генератор, набор приборов для регистрации электрических и излучательных характеристик плазмы разряда, а также система откачки и напуска газов и паров йода. Для проведения исследований был изготовлен излучатель из кварцевой трубки диаметром 33 мм (см. рис. 2а). Electrodes, выполненные из стальной фольги, наложены вблизи торцов на внешнюю поверхность трубки. Длина разрядной области регулируется как изменением длины разрядной трубки, так и за счет перемещения вдоль трубки одного или двух электродов. При подаче на электроды импульсов напряжения, формируемых высоковольтным генератором, во внутренней полости трубки формируется емкостной разряд. Напряжение на электродах, а также ток во внешней цепи лампы регистрируются с помощью делителя напряжения АКТАКОМ АСА-6039 (полоса пропускания 220 МГц), резистивного токового шунта R , выполненного из малоиндуктивных резисторов ТВО, и осциллографа TDS 3032В (полоса пропускания 300 МГц). Для регистрации спектра излучения лампы использовались компьютер и спектрометр *OceanOptics* HR2000

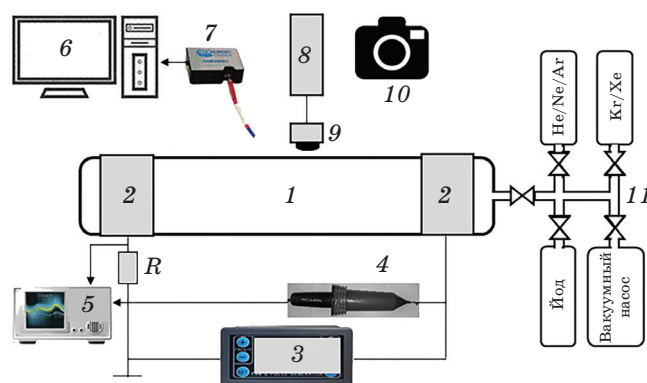


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки. 1 — излучатель, 2 — электроды, 3 — высоковольтный генератор, 4 — делитель напряжения АКТАКОМ АСА-6039, 5 — осциллограф TDS 3032В, 6 — компьютер, 7 — спектрометр *Ocean Optics* HR2000, 8 — фотоприемник C8026 *Hamamatsu Photonics* с фотоприемной головкой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

с известной спектральной чувствительностью в диапазоне 200–800 нм. Для измерения средней плотности мощности и временной формы импульсов излучения использовались фотоприемник C8026 *Hamamatsu Photonics* с фотоприемной головкой H8025-222 и фотоэлемент коаксиальный ФЭК-22 СПУ соответственно. Внешний вид разряда регистрировался фотокамерой *Sony A100*.

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 инертные газы или их смеси. Полное давление смеси измерялось вакуумметром образцовым ВО. Для оценки давления паров йода с помощью термопары проводилось измерение температуры наиболее холодной части колбы лампы. Уменьшение содержания паров йода в смеси осуществлялось откачиванием смеси с последующим наполнением трубки буферными газами без добавления кристаллов йода.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Регистрация спектров и измерение средней мощности излучения проведено в парах йода и смесях паров йода с буферными газами. Давление паров йода определяется температурой наиболее холодной части излучателя — отростка, соединяющего через клапан колбу излучателя и систему откачки и напуска газов и паров йода (рис. 1). Температура излучателя, в том числе отростка, зависит от средней мощности возбуждения и температуры окружающего воздуха. В случае заполнения излучателя парами йода без добавок буферного газа зажигание разряда в колбе происходит при пониженной плотности рабочей среды, соответствующей давлению насыщенного пара при начальной температуре излучателя [24]. По мере повышения температуры излучателя за счет его омического нагрева плотность паров йода увеличивается. 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. В спектральной 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 ее 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 около 2,5 Торр. В этих условиях в трубке формируется однородный канал диффузного разряда диаметром около 1,5 см и длиной, примерно равной расстоянию между внешними торцами электродов. При увеличении удельной мощности возбуждения выше 1,3 Вт/см³ диаметр канала разряда, а также мощность и эффективность излучения начинали уменьшаться. Вероятно, это было связано с ухудшением однородности горения разряда.

При исследовании работы лампы с использованием смесей паров йода с различными буферными газами (He, Ne, Ar, Kr, Xe) в соответствии с ранее полученным результатом [21] было подтверждено, что средняя мощность излучения в смесях паров йода с буферными газами увеличивается. Наибольшие значения средней мощности излучения были получены при добавках гелия, ксенона и смесей гелия с ксеноном. В смесях с добавкой ксенона в спектре излучения лампы регистрируется полоса излучения молекул XeI^* с максимумом на длине волны 253 нм. Как уже было отмечено, излучение в данном спектральном диапазоне опасно для кожи и 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 спектрального состава и удельной мощности излучения

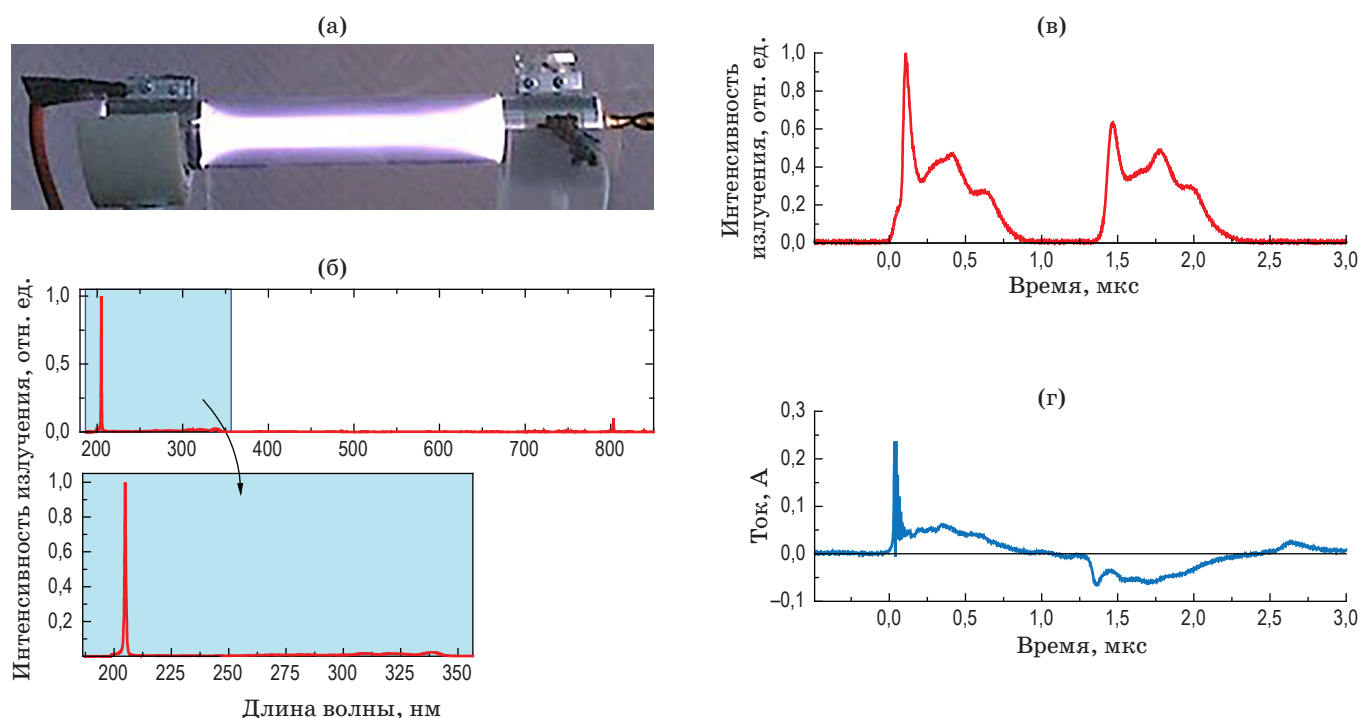


Рис. 2. Внешний вид лампы (а), спектр ее излучения (б), временной ход интенсивности излучения (в) и осциллограмма тока разряда (г) в рабочем режиме при возбуждении смеси паров йода (2,5 Торр) и гелия (7 Торр). Частота следования импульсов возбуждения 96 кГц, ширина электродов 45 мм, расстояние между электродами 140 мм.

лампы оказалась смесь при парциальных давлениях паров йода и гелия около 2,5 и 7 Торр соответственно.

При использовании данной смеси и частоте следования импульсов напряжения 96 кГц удельная мощность излучения составляла примерно 3 мВт/см² на внешней поверхности трубки. Внешний вид лампы и спектр ее излучения в рабочем режиме при данных условиях приведены на рис. 2а, б.

Следует отметить, что область спектральной чувствительности фотоприемной головки Н8025-222 фотоприемника С8026, предназначенного для измерения мощности излучения KrCl-эксилампы, составляет 170–350 нм по основанию с максимумом на длине волны 222 нм. В связи с этим при измерении мощности излучения йодной лампы показания прибора корректировались с учетом спектральной чувствительности фотоприемника на длине волны 206 нм. Из рис. 2б видно, что при возбуждении смеси паров йода (2,5 Торр) и гелия (7 Торр) и частоте следования импульсов возбуждения 96 кГц в спектральной области от 200 до 350 нм доминирует линия 206,16 нм.

В УФ диапазоне спектра наблюдается слабый континуум в области короче 350 нм, в видимой и ближней инфракрасной областях спектра присутствуют линии гелия. Зона разряда, как видно из рис. 2б, занимает значительную часть внутреннего объема лампы. Было установлено, что временной ход интенсивности излучения лампы, зарегистрированный фотодиодом ФЭК-22 СПУ, повторяет форму импульса тока разряда (рис. 2в, г). 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 I₂ с максимумом на длине волны 342 нм. При увеличении удельной мощности возбуждения более 1,3 Вт/см³ и 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 [25], приводящей к уменьшению диаметра токового канала и контракции разряда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что при возбуждении смеси паров йода с гелием емкостным разрядом с частотой следования импульсов 96 кГц и удельной мощностью возбуждения около 1,3 Вт/см³ удельная мощность излучения составляет порядка 3 мВт/см² на внешней поверхности колбы лампы, а в эмиссионном спектре в области от 200 до 350 нм доминирует излучение атомной линии йода на длине волны 206,16 нм.

Результаты проведенного исследования указывают на перспективность лампы на ос-

нове паров йода с точки зрения создания источника излучения с высокой вирулицидной эффективностью на длине волны 206,16 нм. Меньшая глубина проникновения излучения с данной длиной волны в ткани человека по сравнению с излучением KrCl-эксилампы с излучением длиной волны 222 нм указывает на потенциальную возможность создания на основе йодной лампы безопасного открытого источника излучения для УФ инактивации патогенных микроорганизмов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Raeiszadeh M. and Adeli B. A critical review on ultraviolet disinfection systems against COVID-9 outbreak: Applicability, validation, and safety considerations // *ACS Photonics*. 2020. V. 7. № 11. P. 2941–2951. DOI: 10.1021/acsp Photonics.0c01245
2. Heßling M., Hönes K., Vatter P., Lingenfelder C. Ultraviolet irradiation doses for coronavirus inactivation — review and analysis of coronavirus photoinactivation studies // *GMS Hygiene and Infection Control*. 2020. V. 15. P. 1–8. ISSN 2196-5226 <https://www.egms.de/en/journals/dgkh/2020-15/dgkh000343.shtml>
3. Michelini Z., Mazzei C., Magurano F., Baggieri M., Marchi A., et al. UltraViolet SANitizing system for sterilization of ambulances fleets and for real-time monitoring of their sterilization level // *Internat. J. Environmental Research and Public Health*. 2022. V. 19. P. 331. <https://doi.org/10.3390/ijerph19010331>
4. Соснин Э.А., Скакун В.С., Панарин В.А., Авдеев С.М., Сорокин Д.А. Коротковолновые эксилампы — эффективные источники излучения для инактивации вирусов и бактерий // *Оптический журнал*. 2021. Т. 88. № 10. С. 50–58. DOI: 10.17586/1023-5086-2021-88-10-50-58
5. Bhardwaj S.K., Singh H., Deep A., Khatri M., Bhaumik J., Kimd K., Bhardwaj N. UVC-based photoinactivation as an efficient tool to control the transmission of coronaviruses // *Sci. Total Environment*. 2021. V. 792. P. 148548. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148548>
6. Narita K., Asano K., Naito K., Ohashi H., Sasaki M., Morimoto Y., Igarashi T., and Nakane A. Ultraviolet C light with wavelength of 222-nm UVC inactivates a wide spectrum of microbial pathogens // *J. Hospital Infection*. 2020. V. 105. Iss. 3. P. 459–467. <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2020.03.030>
7. Kitagawa H., Nomura T., Nazmul T., Omori K., Shigemoto N., Sakaguchi T., Ohge H. Effectiveness of 222-nm ultraviolet light on disinfecting SARS-CoV-2 surface contamination // *American J. Infection Control*. 2021. V. 49. Iss. 3. P. 299–301. <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2020.08.022>
8. Buonanno M., Welch D., Shuryak I., Brenner D.J. Far-UVC light (222 nm) efficiently and safely inactivates airborne human coronaviruses // *Scientific Reports*. 2020. V. 10. № 1. 10285. DOI: 10.1038/s41598-020-67211-2
9. Kim S.-J., Kim D.-K., Kang D.-H. Using UVC light-emitting diodes at wavelengths of 266 to 279 nanometers to inactivate foodborne pathogens and pasteurize sliced cheese // *Appl. Environmental Microbiol.* 2016. V. 82. № 1. P. 11–17. DOI: 10.1128/AEM.02092-15
10. Kogelschatz U. Excimer lamps: History, discharge physics, and industrial applications // *Proc. SPIE*. 2004. V. 5483. P. 272–286. DOI: 10.1117/12.563006
11. 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. STT, 2011. 512 с. ISBN 978-5-93629-433-4
12. Ломаев М.И., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В., Ерофеев М.В. Эксилампы — эффективные источники спонтанного УФ- и ВУФ-излучения // *УФН*. 2003. Т. 173. № 2. С. 201–217.
13. Sosnin E.A., Zhdanova O.S. Viricidal and bactericidal exciplex barrier-discharge lamps // *Quantum Electron.* 2020. V. 50. № 10. P. 984–988. <https://doi.org/10.1070/QEL17374>

14. Buonanno M., Welch D., Brenner D.J. Exposure of human skin models to KrCl excimer lamps: The impact of optical filtering // *Photochem. and Photobiol.* 2021. V. 97. P. 517–523. DOI: 10.1111/php.13383
15. Hessling M., Haag R., Sieber N., Vatter P. The impact of far-UVC radiation (200–230 nm) on pathogens, cells, skin, and eyes — a collection and analysis of a hundred years of data // *GMS Hygiene and Infection Control.* 2021. V. 16. P. 1–17. DOI: 10.3205/dgkh000378
16. Buonanno M., Ponnaiya B., Welch D., Stanislauskas M., Randers-Pehrson G., Smilenov L., Lowy F.D., Owens D.M., Brenner D.J. Germicidal efficacy and mammalian skin safety of 222-nm UV light // *Radiation Research.* 2017. V. 187. № 4. P. 493–501. DOI: 10.1667/RR0010CC.1
17. Narita K., Asano K., Morimoto Y., Igarashi T., Nakane A. Chronic irradiation with 222 nm UVC light induces neither DNA damage nor epidermal lesions in mouse skin, even at high doses // *PLoS ONE.* 2018. V. 13. Iss. 7: e0201259. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201259>
18. Gao N., Chen J., Feng X., Lu S., Lin W., Li J., Chen H., Huang K., and Kang J. Strain engineering of digitally alloyed AlN/GaN nanorods for far-UVC emission as short as 220 nm // *Opt. Mater. Exp.* 2021. V. 11. № 4. P. 1282–1291. <https://doi.org/10.1364/OME.422215>
19. Kiess C.C., Corliss C.H. Description and analysis of the first spectrum of iodine // *J. Research of the National Bureau of Standards. Section A, Phys. and Chem.* 1959. V. 63A. № 1. P. 1–18.
20. Gross U., Ubelis A., Spietz P., Burrows J. Iodine and mercury resonance lamps for kinetics experiments and their spectra in the far ultraviolet // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2000. V. 33. P. 1588–1591.
21. Ломаев М.И., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. Рабочая среда лампы высокочастотного емкостного разряда // Патент РФ №2154323 С1. 2000. Бюл. № 22.
22. Lomaev M.I., Tarasenko V.F. Xe(He) — I2 Glow and capacitive discharge excilamps // *Proc. SPIE.* 2002. V. 4747. P. 390–398. <https://doi.org/10.1117/12.460150>
23. Шуайбов А.К., Миня А.Й., Гомоки З.Т., Ласлов Г.Е. Эмиссионные характеристики импульсного емкостного разряда на смеси гелия и неона с молекулами йода // *ЖТФ.* 2009. Т. 79. Вып. 1. С. 147–151.
24. Таблицы физических величин. Справочник. Под ред. акад. Кикоина И.К. М.: Атомиздат, 1976, 1008 с.
25. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Долгопрудный: Издательский Дом "Интеллект", 2009. 736 с. ISBN 978-5-91559-019-8

АВТОРЫ

Михаил Иванович Ломаев — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, 634055, Россия; профессор, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, 634050, Россия; Scopus ID 7003564662; <https://orcid.org/0000-0001-9067-4954>; Lomaev@loi.hcei.tsc.ru

Виктор Федотович Тарасенко — доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, 634055, Россия; профессор, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, 634050, Россия; Scopus ID 14036428100; <https://orcid.org/0000-0001-5706-3211>; VFT@loi.hcei.tsc.ru

Владимир Сергеевич Кузнецов — младший научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, 634055, Россия; Scopus ID 57112971800; <https://orcid.org/0000-0002-1115-6495>; robert_smith_93@mail.ru

AUTHORS

Mikhail I. Lomaev — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Institute of High Current Electronics (IHCE), Tomsk, 634055, Russia; Professor, National Research Tomsk State University, Tomsk, 634050, Russia; Scopus ID 7003564662; <https://orcid.org/0000-0001-9067-4954>; Lomaev@loi.hcei.tsc.ru

Victor F. Tarasenko — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Chief Researcher, Institute of High Current Electronics (IHCE), Tomsk, 634055, Russia; Professor, National Research Tomsk State University, Tomsk, 634050, Russia; Scopus ID 14036428100; <https://orcid.org/0000-0001-5706-3211>; VFT@loi.hcei.tsc.ru

Vladimir S. Kuznetsov — Junior Researcher, Institute of High Current Electronics (IHCE), Tomsk, 634055, Russia; Scopus ID 57112971800; <https://orcid.org/0000-0002-1115-6495>; robert_smith_93@mail.ru