04

Источник мощных наносекундных импульсов вакуумного ультрафиолетового излучения на основе сильноточного объемного разряда в ксеноне

© *В.И. Барышников*[1], *В.Л. Паперный*[2]

[1] Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия
[2] Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия
E-mail: paperny@math.isu.runnet.ru

Поступило в Редакцию 3 октября 2025 г.
В окончательной редакции 3 ноября 2025 г.
Принято к публикации 3 ноября 2025 г.

Предложен источник излучения в диапазоне длин волн от < 70 до 400 nm с длительностью импульса ~ 1 ns и мощностью 350 MW на основе высоковольтного объемного разряда в ксеноне при давлении 2 atm. Разряд длительностью ~ 1 ns с током ~ 50 kA, напряжением 100 kV и частотой следования импульсов 0.1–2.0 Hz возбуждался в низкоиндуктивной разрядной камере путем инжекции плазменной струи вспомогательного маломощного объемного разряда в ксеноне (110 kV, 5 kA, 250 ps), который в свою очередь инициировался путем подачи на разрядный промежуток импульса напряжения малогабаритного пикосекундного генератора Тесла.

Ключевые слова: наносекундный высоковольтный разряд, ВУФ–УФ-спектр излучения, пикосекундный генератор Тесла, люминесценция сапфира.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.05.62330.20515

Наносекундные разряды в плотных газах широко изучаются уже несколько десятилетий благодаря высокой актуальности протекающих в них физических явлений и важной практической значимости. В частности, на основе этих исследований были созданы мощные импульсные источники спонтанного вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) излучения [1,2], системы оптической накачки лазерных сред [3]. Кроме того, они имеют приложения в процессах быстрого зажигания газовых смесей и аэродинамике [4].

Исследования быстропротекающих процессов стимулируют создание источников мощного ВУФ–УФ-излучения (суб)наносекундной длительности. Разработанные источники на основе быстрых высоковольтных разрядов в инертных газах излучают ВУФ-импульсы на эксимерных переходах ксенона в полосе на длинах волн около 172 nm (в ксеноне) [5]. Достигаемая минимальная длительность импульса излучения составляла несколько десятков наносекунд и уменьшалась с ростом давления, но даже при давлении 12 atm и длительности разрядного импульса 2 ns длительность импульса излучения составляла 8 ns [5]. Поэтому создание мощного источника ВУФ-излучения с длительностью импульса $\leqslant 1$ ns является актуальной задачей. Кроме того, для ряда приложений представляет интерес создание источника широкополосного излучения в ВУФ–УФ-спектральном диапазоне. Решению указанных задач посвящена настоящая работа.

Ранее авторами был разработан малогабаритный пикосекундный высоковольтный генератор, где в низкоиндуктивной разрядной камере при давлении газа 0.1–3 atm достигнута высокая эффективность излучения объемного разряда в ВУФ–УФ-диапазоне спектра для различных газовых сред (Ar, Xe, N_2, He, H_2 и др.) [6]. В этих исследованиях мощность излучения объемного разряда в ксеноне при давлении 1 atm в ВУФ–УФ-диапазоне спектра достигала 12 MW. В последующих экспериментах авторами был разработан высоковольтный импульсный генератор, обеспечивающий объемный разряд в ксеноне с предельно малой длительностью (~ 200 ps) и высокой скоростью нарастания тока (около $5 \cdot 10^{13}$ A/s). При этом был зарегистрирован импульс излучения с квазитепловым спектром в диапазоне 110–400 nm и мощностью 60 MW, т. е. энергией около 10 mJ при полной энергии, выделяемой в разряде, 300 mJ [7].

В качестве дальнейшего развития этих исследований в настоящей работе предполагается разработка значительно более мощного источника широкополосного ВУФ–УФ-излучения с длительностью импульса порядка наносекунды. Данный разряд инициировался описанным выше вспомогательным генератором пикосекундных импульсов малой мощности. С помощью различных методик исследовались параметры излучения разряда в широком спектральном диапазоне, при этом детальное исследование электрических параметров разряда выходило за рамки настоящей работы.

Источник основан на разряде емкости C_1, инициируемом по тригатронной схеме импульсом генератора Тесла с обострителем напряжения *3* (рис. 1). Параметры пикосекундного инициирующего импульса, измеренные по методике, описанной в [8], имеют следующие значения: напряжение 110 kV, ток 5 kA, длительность 250 ps.

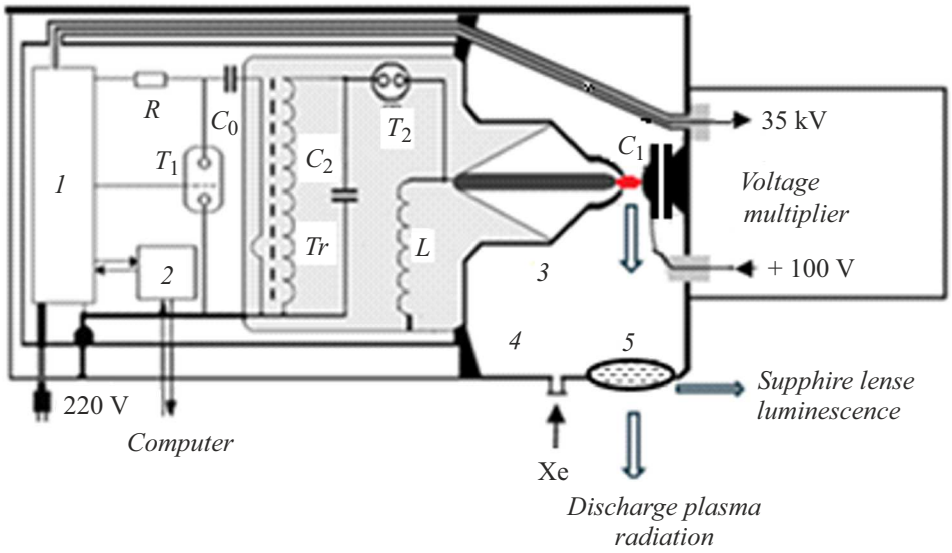


Рис. 1. Схема эксперимента. *1* — высоковольтный импульсный блок питания, *2* — микроконтроллер, *3* — емкостный обостритель с генератором Тесла инициирующего пикосекундного разряда, *4* — малоиндуктивная камера основного разряда, *5* — сапфировая линза.

Малоиндуктивный металлокерамический высоковольтный разрядный конденсатор $C_1 = 3400$ pF с рабочим напряжением 100 kV выполнен таким образом, что одна из его обкладок соединена с вольфрамовым электродом основного разрядника, а другая обкладка коаксиально соединена с медным корпусом разрядной камеры через опорный демпфирующий высоковольтный изолятор. Пикосекундный инициирующий генератор представляет собой единую коаксиальную малоиндуктивную конструкцию (рис. 1), состоящую из разрядной камеры тригатрона, емкостного обострителя, согласующей линии, работающей в режиме бегущей волны, и малогабаритного высоковольтного генератора Тесла [7].

Емкостный накопитель C_1 заряжается импульсным высоковольтным блоком питания через специальную коаксиальную линию с встроенным распределенным зарядным сопротивлением. Данная конструкция коаксиальной линии обладает конструкционной емкостью для эффективного подавления электромагнитных помех. Импульсный блок питания *1* (400 W) управляется микропроцессорной системой *2*. Когда в процессе заряда напряжение на емкости C_1 достигнет рабочей величины (100 kV), измеренной двухступенчатым резистивным делителем, микроконтроллер дает команду на систему запуска разрядника T_1 генератора Тесла, и сформированный последним пикосекундный импульсный плазменный факел обеспечивает инициирование мощного основного объемного газового разряда. Струя разрядной плазмы, перемыкающая разрядный промежуток длиной 12 mm, расположена в фокусе сапфировой линзы *5* диаметром 3 cm с фокусным расстоянием 8 cm. Оценка амплитуды тока основного разряда, сделанная на основе характеристик разрядной цепи и длительности разрядного импульса, дает величину около 50 kA.

Проведены исследования ВУФ–УФ-излучения объемного разряда при давлении ксенона 2 atm в коаксиальной разрядной камере через окно из линзы, изготовленной из монокристалла сапфира (Al_2O_3) особой чистоты (содержание примесей $< 10^{-7}$ wt.%). Кинетика и спектр оптического излучения регистрировались ВУФ–УФ-спектрометром, состоящим из вакуумного монохроматора ВМС-1, ФЭУ-142, $p-i-n$-фотодиода с удаленным окном S1722-O1 Hamamatsu и осциллографа Tektronix TDS3032B. Временно́е разрешение спектрометра составляло около 1 ns. Измерение интегральной по спектру интенсивности ВУФ–УФ-излучения производилось посредством калиброванного $p-i-n$-фотодиода FDUK-1UVSKM (спектральный диапазон $\Delta\lambda = 0.12-650$ nm, временно́е разрешение $\tau \approx 1$ ns).

ВУФ–УФ-спектр интенсивных вспышек длительностью (ширина на полувысоте) около 1 ns (см. вставку на рис. 2) был измерен в спектральной области 140–450 nm. Левая граница спектра определяется фундаментальным поглощением материала линзы и спектральной чувствительностью стандартной аппаратуры (рис. 2 и 3). В эмиссионном ВУФ–УФ-спектре разрядной плазмы с учетом анализа, выполненного в [6,7], преобладает излучение со спектром, близким к тепловому, интенсивность которого максимальна в ВУФ-области и снижается с увеличением длины волны (рис. 2).

Помимо излучения разрядной плазмы в эксперименте зарегистрирована малоинерционная ($\tau \sim 1$ ns) $2pO^{2-}$ валентная фотолюминесценция (ФЛ) сапфировой линзы в полосе с максимумом на длине волны 390 nm, возбуждаемая ВУФ–УФ-излучением разряда (рис. 3). Спектр ФЛ регистрировался под углом 90° к оптической оси линзы, чтобы избежать засветки регистратора излучением разрядной плазмы.

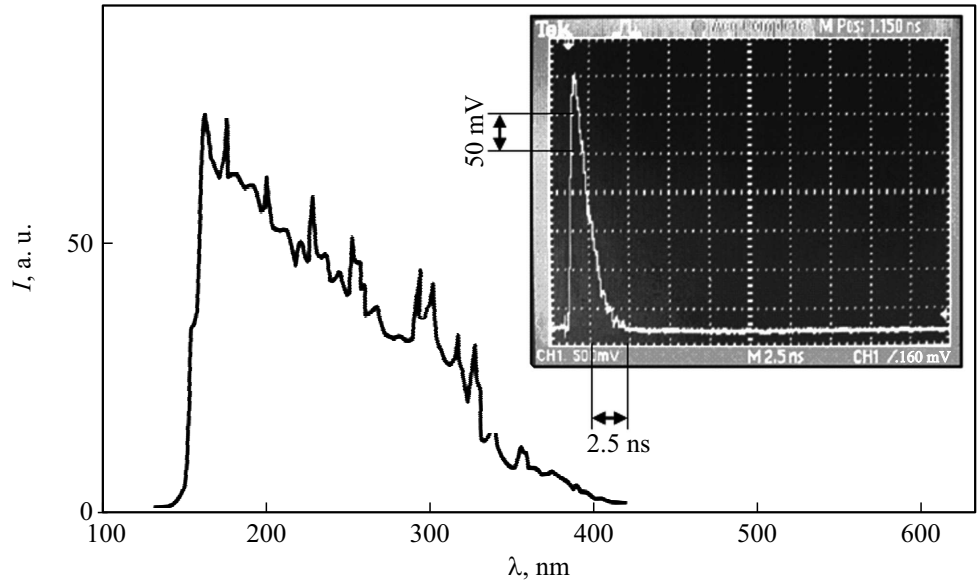


Рис. 2. Спектр излучения ксенона из разрядного промежутка, регистрируемый через сапфировое окно, при давлении ксенона 2 atm. На вставке приведена осциллограмма излучения на длине волны 190 nm.

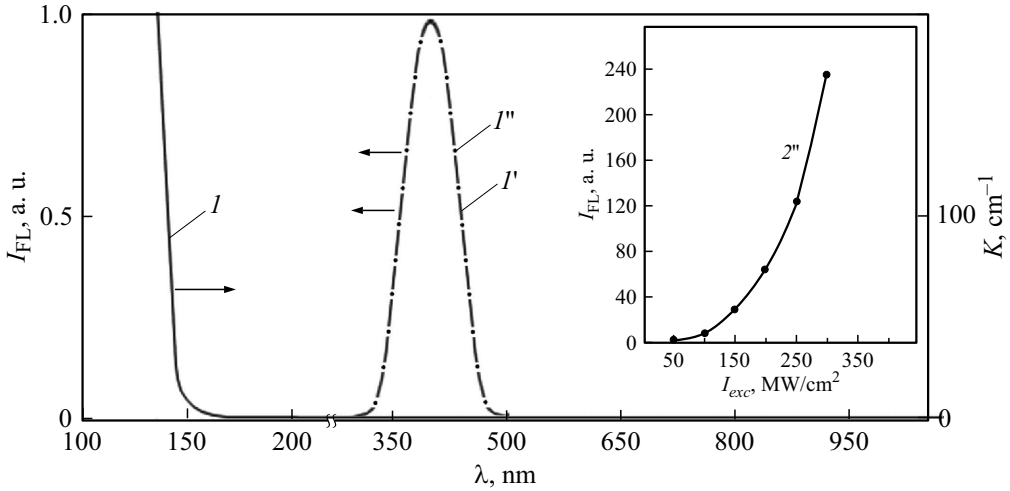


Рис. 3. Спектры поглощения (*1*) и ФЛ (*1′* и *1″*) кристалла сапфира. *1′* — спектр ФЛ, возбуждаемой импульсами ВУФ-излучения данного разряда, *1″* — спектр ФЛ возбуждаемой импульсами четвертой гармоники 4ω:Ti:Al_2O_3-лазера. *2″* — зависимость интенсивности ФЛ от интенсивности возбуждающего излучения.

Известно, что $2pO^{2-}$ ФЛ в полосе с длинами волн вблизи 390 nm в кристаллах сапфира возбуждается фемтосекундными лазерными импульсами [8]. Для определения спектрального состава излучения, возбуждающего $2pO^{2-}$ ФЛ, исследован образец исходного материала линзы под воздействием излучения четвертой гармоники перестраиваемого фемтосекундного 4ω:Ti:Al_2O_3-лазера TIF-50 с длительностью импульса 50 fs, спектральным диапазоном $\Delta\lambda = 200-215$ nm и плотностью мощности $0.03-1.5$ GW/cm^2, которая регулировалась стандартным кварцевым двухлинзовым телескопом путем изменения диаметра лазерного пучка в диапазоне $0.1-1$ mm. Было установлено, что интенсивность $2pO^{2-}$ ФЛ имеет кубическую зависимость от плотности мощности возбуждающих лазерных импульсов (вставка на рис. 3), что указывает на режим трехфотонного возбуждения ФЛ в данном случае.

Это означает, что коротковолновая граница спектра излучения, возбуждающего $2pO^2$ ФЛ в полосе 390 nm, находится в области $\lambda \leqslant 67$ nm, т.е. энергия фотонов $h\nu > 18$ eV. Таким образом, спектр излучения данного газоразрядного плазменного источника лежит в спектральном диапазоне от < 70 до 400 nm.

Далее проведены измерения интенсивности излучения объемного ВУФ–УФ-разряда с помощью $p-i-n$-фотодиода FDUK-1UVSKM в двух режимах: с откры-

тым окном, когда регистрируется излучение во всем спектральном диапазоне чувствительности фотодиода (0.12−650 nm), а также с окном, закрытым светофильтром УФС-1, который пропускает излучение в спектральном диапазоне 210−420 nm. Эти измерения показали, что лишь небольшая доля излучения разряда (около $\sim 1/8$ от полной величины) лежит в диапазоне длин волн 210−420 nm. Отсюда следует, что основная часть излучения находится в диапазоне $\lambda < 200$ nm, т. е. в ВУФ-области. Полная мощность ВУФ−УФ-излучения в спектральной области 0.12−650 nm достигает 350 MW.

Таким образом, в настоящей работе предложен источник ВУФ−УФ-излучения в диапазоне длин волн от < 70 до 400 nm с длительностью импульса ~ 1 nm и мощностью 350 MW на основе высоковольтного объемного разряда. Разряд возбуждался в среде ксенона при давлении 2 atm, при этом параметры разряда были следующими: ток ~ 50 kA, напряжение 100 kV и частота следования импульсов 0.1−2.0 Hz.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Г.Я. Малиновский, С.Б. Мамаев, Л.Д. Михеев, Т.Ю. Москалев, М.Л. Сентис, В.И. Черемискин, В.И. Яловой, Квантовая электроника, **31** (7), 617 (2001). [G.Ya. Malinovskii, S.B. Mamaev, L.D. Mikheev, T.Yu. Moskalev, M. Sentis, V.I. Cheremiskin, V.I. Yalovoi, Quantum Electron., **31** (7), 617 (2001). DOI: 10.1070/QE2001v031n07ABEH002014].

[2] М.И. Ломаев, Г.А. Месяц, Д.В. Рыбка, В.Ф. Тарасенко, Е.Х. Бакшт, Квантовая электроника, **37** (6), 595 (2007). [M.I. Lomaev, G.A. Mesyats, D.V. Rybka, V.F. Tarasenko, E.Kh. Baksht, Quantum Electron., **37** (6), 595 (2007). DOI: 10.1070/QE2007v037n06ABEH013528].

[3] E.W. McDaniel, W.L. Nighan, *Gas lasers* (Academic Press, N.Y., 1982).

[4] A.Y. Starikovskii, N.B. Anikin, I.N. Kosarev, E.I. Mintoussov, M.M. Nudnova, A.E. Rakitin, D.V. Roupassov, S.M. Starikovskaia, V.P. Zhukov, J. Propul. Power, **24** (6), 1182 (2008). DOI: 10.2514/1.24576

[5] E.Kh. Baksht, A.G. Burachenko, I.D. Kostyrya, M.I. Lomaev, V.F. Tarasenko, J. Phys. D, **42** (18), 185201 (2009). DOI: 10.1088/0022-3727/42/18/185201

[6] V.I. Baryshnikov, V.L. Paperny, J. Phys.: Conf. Ser., **2064**, 12008 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/2064/1/012008

[7] V.I. Baryshnikov, V.L. Paperny, Optik, **271**, 170067 (2022). DOI: 10.1016/j.ijleo.2022.170067

[8] В.И. Барышников, Т.А. Колесникова, ФТТ, **47** (10), 1776 (2005). [V.I. Baryshnikov, T.A. Kolesnikova, Phys. Solid State, **47** (10), 1847 (2005). DOI: 10.1134/1.2087734].