

УДК 537.527.9; 621.373.8

*А.Г. БУРАЧЕНКО***, Е.Х. БАКШТ*, М.И. ЛОМАЕВ***, А.Н. ПАНЧЕНКО***, В.Ф. ТАРАСЕНКО****

ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОБЪЕМНОГО РАЗРЯДА, ИНИЦИИРУЕМОГО ПУЧКОМ ЭЛЕКТРОНОВ ЛАВИН¹

Исследовано излучение плазмы объемного разряда, инициируемого пучком электронов лавин (ОРИПЭЛ). На промежутках с неоднородным электрическим полем подавались импульсы напряжения с амплитудой в падающей волне до 30 кВ, длительностью на полувысоте ~ 4 нс и фронтом ~ 2.5 нс. При длине возбуждаемой области 35 см и давлениях азота 30–60 Торр без применения дополнительной системы для предыонизации промежутка получен диффузный разряд, в том числе при частоте следования импульсов 2 кГц. Во всем диапазоне исследованных давлений, за анодом из фольги, на модельной камере зарегистрировано рентгеновское излучение, а при давлениях менее 100 Торр зафиксирован сверхкороткий лавинный электронный пучок (СЛЭП). Создан протяженный импульсно-периодический источник спонтанного УФ-излучения.

Ключевые слова: *УФ-излучение азота, объемный разряд, инициируемый пучком электронов лавин (ОРИПЭЛ).*

Введение

В настоящее время продолжают исследования и разработки источников спонтанного и лазерного излучения различных спектральных диапазонов, в которых в качестве рабочей среды используют газы повышенного давления [1–3]. Для получения объемного разряда при повышенных давлениях применяется барьерный разряд [2, 3] и разряды, формируемые за счет предыонизации от дополнительных источников [4, 5]. В последние годы было показано, что при использовании ОРИПЭЛ могут быть созданы эффективные лазеры [6, 7] и источники УФ- и ВУФ-излучения с высокой импульсной мощностью [8–11]. Однако в лазерах и источниках спонтанного излучения, возбуждаемых ОРИПЭЛ, обычно использовался режим однократных импульсов [6–11]. При высоких частотах следования импульсов для получения ОРИПЭЛ необходимо уменьшать энергию накачки в отдельном импульсе и сокращать его длительность. Импульсно-периодический режим ОРИПЭЛ без прокачки газа через промежуток был реализован в работах [12–15]. В [12, 13] диффузный характер разряда обеспечивался при увеличении межэлектродного зазора за счет уменьшения амплитуды тока через разрядный промежуток и удельного энергозатрата. Авторами [14, 15] ОРИПЭЛ был получен при объеме разряда ~ 1 мм³ и частоте следования импульсов до 1 кГц за счет уменьшения амплитуды и сокращения длительности импульса напряжения. Однако исследования источников спонтанного УФ-излучения в импульсно-периодическом режиме при удельной мощности возбуждения ОРИПЭЛ более ≥ 1 МВт/см³, частоте следования импульсов ≥ 1 кГц и межэлектродных зазорах ≥ 0.5 см ранее не проводились.

Целью настоящей работы является создание и исследование протяженного источника УФ-излучения с возбуждением азота повышенного давления импульсно-периодическим разрядом.

Экспериментальная аппаратура и методики измерений

В данных экспериментах для формирования ОРИПЭЛ использовались две разрядные камеры и четырехканальный генератор FPG-60 [16]. Камеры заполнялись азотом с содержанием примесей менее 0.01 %. Генератор подключался к газоразрядным промежуткам 75-омными кабелями длиной ~ 5 м. Амплитуда падающей волны напряжения в передающей линии (75-омном кабеле) могла регулироваться в пределах 10–30 кВ. Длительность импульса напряжения составляла на полувысоте ~ 4 нс, длительность фронта ~ 2.5 нс. Для исследования параметров разряда и излучения в более широком диапазоне экспериментальных условий применялись разрядные камеры с различными размерами разрядного промежутка и различной конструкцией катодов.

В первой камере с длиной возбуждаемой области ~ 35 см катодом служили 50 или 100 параллельно установленных швейных стальных иголок диаметром 0.7 мм, которые устанавливались соответственно в один или два ряда и крепились к одному проводнику. Анод был изготовлен из части цилиндра из нержавеющей стали с радиусом 7 см и имел закругленные края. Межэлектродный

¹ Работа выполнена в рамках госзадания ИСЭ СО РАН по теме № 13.1.3, при поддержке гранта Президента РФ № НШ-1305.2014.2 и гранта РФФИ № 14-08-00074.

зазор мог изменяться от 6 до 21 мм. На катод по четырем кабелям подавались от генератора FPG-60 четыре идентичных импульса напряжения. Задержка между импульсами напряжения, приходящими на катод по различным каналам, была менее 1 нс. Исследуемый газ в первой камере мог прокачиваться через разрядный промежуток с помощью вентиляторов со скоростью до 20 м/с. Излучение разрядной плазмы регистрировалось через окна на торцевых фланцах.

На вторую разрядную камеру импульсы напряжения подавались по одному кабелю, а остальные три кабеля соединялись с сопротивлениями номиналом 75 Ом. Соответственно мощность, выделяемая в разрядном промежутке при одинаковых напряжениях, была в 4 раза меньше, чем на первой разрядной камере. Применялись два катода – цилиндрический из вольфрама и трубчатый из нержавеющей стали. Цилиндрический катод имел диаметр 0.3 мм. Второй катод имел форму трубки диаметром 6 мм и толщиной стенки 0.2 мм. Анод был плоским и был изготовлен из тонкой алюминиевой или медной фольги. Это позволяло регистрировать за анодом СЛЭП и рентгеновское излучение. Межэлектродный зазор мог изменяться от 1 до 12 мм. Системы прокачки азота через разрядный промежуток во второй камере не было. Это приводило вначале, при увеличении частоты следования и амплитуды импульсов напряжения, к нестабильности положения разрядной плазмы в зазоре. При дальнейшем увеличении частоты следования и амплитуды импульсов напряжения наблюдалось контрагирование разряда. Однако при относительно малых амплитудах и частотах импульса напряжения в промежутке, как отмечалось и в работах [14, 15], формировался диффузный разряд.

Временной ход импульсов излучения регистрировался скоростным фотодиодом Photek PD025 Solar Blind и фотодиодом ФЭК-22 СПУ. Спектры излучения разряда определялись спектрометрами EPP2000C-25 (StellarNet-Inc., рабочий диапазон 195–850 нм) и HR4000 (Ocean Optics B.V., рабочий диапазон 200–300 нм) с известными спектральными чувствительностями. Интегральное свечение разряда за один или несколько импульсов фотографировалось с помощью цифрового фотоаппарата Sony A100. Динамика развития разряда определялась с помощью CCD-камеры HSFC-PRO. Ток разряда измерялся с помощью шунта, изготовленного из чип-резисторов. Пучок убегающих электронов за фольгой регистрировался коллектором (вторая камера), а импульсы напряжения омическим (первая камера) или емкостным (вторая камера) делителем. Для записи электрических сигналов применялся цифровой осциллограф DPO70604 (6 ГГц, $25 \cdot 10^9$ выборок·с⁻¹) или TDS3054B (0.5 ГГц, $2.5 \cdot 10^9$ выборок·с⁻¹). Для регистрации рентгеновского излучения из разряда (вторая камера) использовался сцинтиллятор и фотоэлектронный умножитель ФЭУ-100. Также применялась фотопленка Kodak RAR film 2497, помещенная в непроницаемый для света и мягкого рентгеновского излучения конверт с окошком, закрытым бериллиевой фольгой толщиной 15 мкм (длинноволновый край пропускания соответствовал энергии рентгеновских квантов ~ 0.7 кэВ).

Результаты и их обсуждение

В процессе проведения экспериментов получены следующие результаты. В широком диапазоне давлений азота (от 30 до 760 Торр) в промежутке острие – плоскость, в отсутствие дополнительного источника для предыонизации, формировался диффузный разряд (ОРИПЭЛ), в том числе и при частоте следования импульсов 2 кГц. Как и в лазерах с накачкой поперечным разрядом [1, 5], для формирования диффузного разряда в импульсно-периодическом режиме при повышенных частотах следования импульсов необходимо было осуществлять прокачку газа через промежуток. Фотографии ОРИПЭЛ, полученные на первой камере, показаны на рис. 1. На данной установке при частоте следования импульсов 2 кГц и скорости прокачки азота ~ 20 м/с в зависимости от давления азота формировался диффузный (рис. 1, а) или коронный разряд (рис. 1, б).

При больших зазорах (> 10 мм) даже при максимальном напряжении генератора для формирования ОРИПЭЛ надо было уменьшать давление в разрядной камере. Свечение разряда при низких давлениях (< 50 Торр) было однородным и яркие пятна на электродах отсутствовали. Увеличение давления в этих условиях, а также уменьшение амплитуды импульса напряжения и частоты следования импульсов приводило к формированию коронного разряда (рис. 1, б). Положение светящейся границы коронного разряда в промежутке зависело от напряжения генератора при прочих неизменных условиях. Ярких пятен на электродах при формировании коронного разряда также не было. Для формирования ОРИПЭЛ при давлении 760 Торр (рис. 1, в) необходимо было уменьшить межэлектродный зазор до 6 мм. В этих условиях на катоде появлялись яркие пятна. Величина пикового значения удельной мощности при межэлектродном зазоре 6 мм достигала ~ 10 МВт/см³ для объема, занимаемого разрядной плазмой ~ 6 см³.

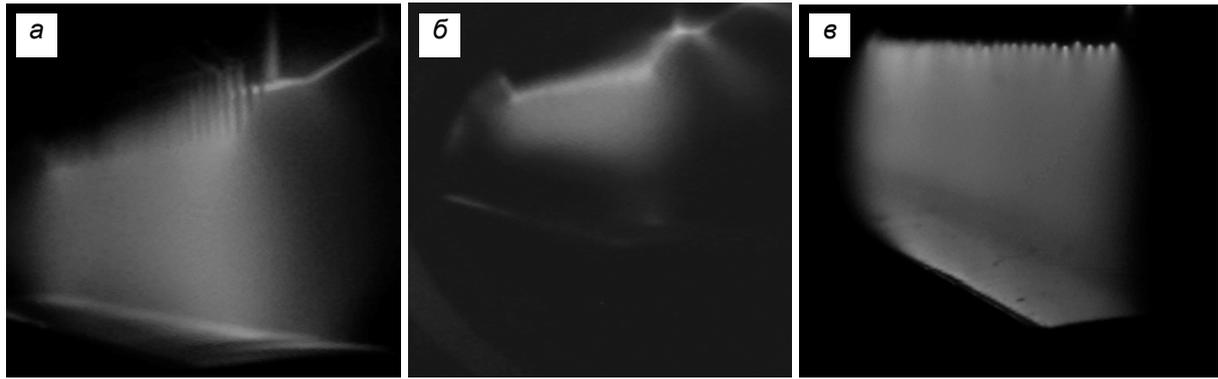


Рис. 1. Фотографии излучения разряда в камере № 1 при частоте следования импульсов $f = 2$ кГц. Межэлектродный зазор $d = 20.5$ мм и давление азота $p = 30$ (а) и 80 (б) Торр; $d = 6$ мм и $p = 760$ Торр (в). Катод из игл сверху

Были проведены измерения и оценки плотности мощности спонтанного излучения в полный телесный угол в предположении, что спектр импульса излучения не меняется на протяжении всего импульса (формулы для расчета взяты из [17]). Максимальная импульсная плотность мощности спонтанного излучения на расстоянии ~ 17 см от торцевого окна составила ~ 1.5 Вт/см². Оценки полной мощности излучения в угол 4π дают её величину ~ 16 кВт. При проведении оценок мощности учитывалось, что источник протяженный.

Спектр излучения плазмы ОРИПЭЛ был типичным для диффузного разряда в азоте. Наибольшую интенсивность имела вторая положительная система азота и переход $0 \rightarrow 0$ полосы $C^3P_u \rightarrow B^3P_g$. Зависимости плотности мощности излучения в области 300–400 нм от давления были получены при измерении излучения через окно на торцевом фланце. Оптимальное давление азота при максимальном напряжении генератора (30 кВ в падающей волне напряжения) составило 270 Торр. Наблюдалось нелинейное увеличение мощности излучения при давлении азота ~ 270 Торр, что обусловлено влиянием индуцированного излучения при максимальных напряжениях генератора. Благодаря прокачке азота через промежуток, плотность мощности излучения с ростом частоты следования импульсов практически не изменяется. Скорость прокачки ~ 20 м/с была достаточна для сохранения плотности мощности излучения в отдельном импульсе при увеличении частоты до 2 кГц. Длина излучающей области в отсутствие индуцированного излучения, как и в работе [18], не оказывала существенного влияния на плотность мощности излучения. Так, уменьшение длины излучающей области от 35 до 4 см дало менее чем двукратное уменьшение плотности мощности излучения. При проведении этих измерений тонкая пластинка из диэлектрика помещалась в межэлектродный промежуток. При этом характер разряда не изменялся, а излучение из области за пластинкой фотодиодом не регистрировалось.

Установка резонатора, состоящего из «глухого» зеркала с алюминиевым покрытием и кварцевой пластинкой, приводила к достижению порога генерации на длине волны 337.1 нм. Лазерный импульс запаздывал на 3 нс относительно импульса спонтанного излучения и имел вдвое меньшую длительность на полувысоте. При максимальной амплитуде импульса напряжения в импульсно-периодическом режиме мощность лазерного излучения составила 10 Вт.

Фотографии ОРИПЭЛ, полученные в импульсно-периодическом режиме без прокачки азота на второй камере были получены при подаче на промежуток импульсов напряжения по одному кабелю. При уменьшении межэлектродного зазора и напряжения генератора в промежутке также формировался диффузный разряд. Однако его положение в промежутке с ростом мощности возбуждения и частоты следования импульсов могло изменяться от импульса к импульсу. При малых частотах яркие пятна видны были только на катоде, а с увеличением частоты яркие пятна появлялись и на аноде. При дальнейшем увеличении частоты следования импульсов или напряжения ОРИПЭЛ мог переходить в искровой разряд.

С помощью ССD-камеры на второй установке было получено, что формирование диффузного разряда в промежутке без дополнительного источника для предыонизации происходит при напряжении более 20 кВ за время не более 1 нс. Также за 1 нс на катоде при давлении азота более 500 Торр обычно появлялось яркое пятно, положение которого во время данного импульса напряжения не изменялось. Спустя несколько наносекунд после подачи импульса напряжения на промежуток, могли появляться новые катодные пятна.

Проведенные исследования подтверждают возможность формирования диффузных разрядов в неоднородном электрическом поле при повышенных давлениях без источника дополнительной предыонизации (см., например, [19] и ссылки в [19]). Проведенные исследования также подтверждают, что ОРИПЭЛ формируется за счет генерации убегающих электронов и рентгеновского излучения. На второй разрядной камере, условия возбуждения в которой были подобны условиям возбуждения в первой, за анодом из фольги было зарегистрировано рентгеновское излучение как с помощью ФЭУ и сцинтиллятора, так и по автографам на фотопленке Kodak RAR. Причем с помощью фотопленки рентгеновское излучение было зарегистрировано при атмосферном давлении азота. При уменьшении давления до 100 Торр и менее за анодом из фольги был зарегистрирован СЛЭП. Результаты подробных исследований генерации СЛЭП и рентгеновского излучения в импульсно-периодическом режиме на подобных установках приведены в работах [12, 13, 20, 21].

Заключение

В данной работе сообщается о создании протяженного источника УФ-спонтанного излучения с частотой следования импульсов до 2 кГц. Плотность импульсной мощности излучения на расстоянии ~ 17 см от области разряда в продольном направлении составила ~ 1.5 Вт/см². Формирование диффузного разряда при повышенных давлениях обеспечивается за счет генерации убегающих электронов и рентгеновского излучения. Приведены результаты исследования разряда и спонтанного излучения при давлениях азота 30–760 Торр.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Endo M., Walter R.F. Gas lasers. – New York: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2007.
2. Sosnin E.A., Tarasenko V.F., Lomaev M.I. UV and VUV excilamps. – Saarbrücken, Deutschland, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012.
3. Автаева С.В., Жданова О.С., Пикулев А.А. и др. // Новые направления в научных исследованиях и применении эксиламп. – Томск: STT, 2013.
4. Palmer A.J. // Appl. Phys. Lett. – 1974. – V. 25. – No. 3. – P. 138–140.
5. Mesyats G.A., Osipov V.V., Tarasenko V.F. Pulsed gas lasers. – Washington: SPIE Press, 1995.
6. Бакшт Е.Х., Бураченко А.Г., Тарасенко В.Ф. // Квантовая электроника. – 2009. – Т. 39. – С. 1107–1111.
7. Вильтовский П.О., Ломаев М.И., Панченко А.Н. и др. // Квантовая электроника. – 2013. – Т. 43. – С. 605–609.
8. Ломаев М.И., Месяц Г.А., Рыбка Д.В. и др. // Квантовая электроника. – 2007. – Т. 37. – С. 595–596.
9. Ерофеев М.В., Тарасенко В.Ф. // Квантовая электроника. – 2008. – Т. 38. – С. 401–403.
10. Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Сорокин Д.А. и др. // Оптика и спектроскопия. – 2009. – Т. 107. – С. 40–47.
11. Герасимов Г.Е., Крылов Б.Е., Ломаев М.И. и др. // Квантовая электроника, 2010. – Т. 40. – С. 241–245.
12. Shao T., Zhang C., Niu Z., Yan P., et al. // Applied Physics Letters. – 2011. – V. 98. – P. 021503.
13. Shao T., Tarasenko V.F., Zhang C., et al. // J. Applied Physics. – 2013. – V. 113. – P. 093301.
14. Ерофеев М.В., Бакшт Е.Х., Тарасенко В.Ф., Шутько Ю.В. // Квантовая электроника. – 2010. – Т. 40. – С. 561–564.
15. Бакшт Е.Х., Тарасенко В.Ф., Шутько Ю.В., Ерофеев М.В. // Квантовая электроника. – 2012. – Т. 42. – С. 153–156.
16. Efanov V.M., Efanov M.V., Komashko A.V., et al. // Ultra-Wideband, Short Pulse. Electromagnetics. – 2010. – V. 9. – Part 5.
17. Ломаев М.И., Рыбка Д.В. // Приборы и техника эксперимента. – 2006. – № 3. – С. 111–114.
18. Бойченко А.М., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф. и др. // Квантовая электроника. – 1993. – Т. 20. – С. 613–615.
19. Алексеев С.Б., Губанов В.П., Костыря И.Д. и др. // Квантовая электроника. – 2004. – Т. 34. – С. 1007–1010.
20. Ерофеев М.В., Бакшт Е.Х., Тарасенко В.Ф., Шутько Ю.В. // ЖТФ. – 2013. – Т. 83. – Вып. 2. – С. 52–58.
21. Бакшт Е.Х., Бураченко А.Г., Ерофеев М.В., Тарасенко В.Ф. // Физика плазмы. – 2014. – Т. 40. – С. 480–488.

*Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 01.10.14.

**Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия
E-mail: BAG@loi.hcei.tsc.ru

Бураченко Александр Геннадьевич, инженер лаб. оптических излучений;
Бакшт Евгений Хаимович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр. лаб. оптических излучений;
Ломаев Михаил Иванович, д.ф.-м.н., ст. науч. сотр. лаб. оптических излучений;
Панченко Алексей Николаевич, д.ф.-м.н., ст. науч. сотр. лаб. оптических излучений;
Тарасенко Виктор Федотович, д.ф.-м.н., зав. лаб. оптических излучений.

A.G. BURACHENKO, E.H. BAKSHT, M.I. LOMAEV, A.N. PANCHENKO, V.F. TARASENKO

RESEARCH PULSE-PERIODIC SOURCE UV-RADIATION BASED ON DIFFUSE DISCHARGE INITIATED BY RUN-AWAY ELECTRON BEAM

In recent years, high-voltage nanosecond discharges having no additional sources of preionization have been widely studied. Researches of the sources of spontaneous UV radiation in a pulse-periodic mode at a specific power of REP DD excitation exceeding $\geq 1 \text{ MW/cm}^3$, pulse repetition rate of $\geq 1 \text{ kHz}$, and interelectrode gaps of $\geq 0.5 \text{ cm}$ have not been carried out previously. This paper presents the results of the study of radiative characteristics of the REP DD plasma when the discharge is excited in a pulse-periodic mode.

In the experiments, a four-channel FPG-60 oscillator was used to generate a REP DD [17]. The oscillator formed an incident-wave voltage pulse of up to 30 kV with FWHM of $\sim 4 \text{ ns}$, and a front edge of ~ 2.5 with a frequency up to 2 kHz. To investigate the parameters of the discharge and radiation in a more wide range of experimental conditions, two discharge chambers differing in their design were applied. The cathodes with a small radius of curvature were used. To study the radiation of the REP DD plasma, a HSFC-PRO CCD camera, a EPP2000C-25 StellarNet-Inc and a HR4000 Ocean Optics B.V. spectrometers as well as a Photek PD025 Solar Blind high-speed photodiode and a FEC-22 SPU coaxial photocell were used.

An extensive pulse-periodic source of spontaneous radiation with the pulse repetition rate of up to 2 kHz was created and its characteristics were studied. Laser UV radiation was obtained at the wavelength of 337.1 nm.

Keywords: UV radiation of nitrogen, runaway electron preionized diffuse discharge (REP DD).

REFERENCES

1. Endo M., & Walter R. F. (eds.). *Gas Lasers*. CRC Press, 2007.
2. Sosnin E. A., Lomaev M. I., & Tarasenko V. F. *UV and VUV Excilamps*. Saarbrücken, Deutschland, Germany, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012.
3. Avtaeva S.V., Zhdanova O.S., Pikulev A.A., Sosnin E.A., & Tarasenko V. F.. *New Direction in Scientific Research and Application of Excilamps*. STT, Tomsk, 2013.
4. Palmer A.J. (1974). A physical model on the initiation of atmospheric-pressure glow discharges. *Applied Physics Letters*, 25(3), 138–140.
5. Mesyats G.A., Osipov V.V., & Tarasenko V.F. *Pulsed Gas Lasers*. Bellingham, SPIE Opt. Eng. Press, 1995.
6. Baksht E.K., Burachenko A.G., & Tarasenko V.F. (2009). Lasing in nitrogen pumped by a runaway-electron-preionised diffuse discharge. *Quantum Electronics*, 39(12), 1107.
7. Vil'tovskii P.O., Lomaev M.I., Panchenko A.N., Panchenko N.A., Rybka D.V., & Tarasenko V.F. (2013). Lasing in the UV, IR and visible spectral ranges in a runaway-electron-preionised diffuse discharge. *Quantum Electronics*, 43(7), 605.
8. Lomaev M.I., Mesyats G.A., Rybka D.V., Tarasenko V.F., & Baksht E.K. (2007). High-power short-pulse xenon dimer spontaneous radiation source. *Quantum Electronics*, 37(6), 595–596.
9. Erofeev M.V., & Tarasenko V.F. (2008). Study of a volume discharge in inert-gas halides without preionisation. *Quantum Electronics*, 38(4), 401–403.
10. Lomaev M.I., Rybka D.V., Sorokin D.A., Tarasenko V.F., & Krivonogova K.Y. (2009). Radiative characteristics of nitrogen upon excitation by volume discharge initiated by runaway electron beam. *Optics and Spectroscopy*, 107(1), 33–40.
11. Gerasimov G.N., Krylov B.E., Lomaev M.I., Rybka D.V., & Tarasenko V.F. (2010). Emission in argon and krypton at 147 nm excited by runaway-electron-induced diffusion discharge. *Quantum Electronics*, 40(3), 241.
12. Shao T., Zhang C., Niu Z., Yan P., Tarasenko V.F., Baksht E.K., & Shut'ko Y.V. (2011). Diffuse discharge, runaway electron, and x-ray in atmospheric pressure air in an inhomogeneous electrical field in repetitive pulsed modes. *Applied Physics Letters*, 98(2), 021503.
13. Shao T., Tarasenko V.F., Zhang C., Baksht E.K., Zhang D., Erofeev M.V., & Yan P. (2013). Diffuse discharge produced by repetitive nanosecond pulses in open air, nitrogen, and helium. *Journal of Applied Physics*, 113(9), 093301.
14. Erofeev M.V., Baksht E.K., Tarasenko V.F., & Shut'ko Y.V. (2010). Miniature UV lamp excited by subnanosecond voltage pulses. *Quantum Electronics*, 40(6), 561.
15. Baksht E.K., Tarasenko V.F., Shut'ko Y.V., & Erofeev M.V. (2012). Point-like pulse-periodic UV radiation source with a short pulse duration. *Quantum Electronics*, 42(2), 153.
16. Efanov V.M., Efanov M.V., Komashko A.V., Kriklenko A.V., Yarin P.M., & Zazoulin S.V. (2010). High-voltage and high-PRF FID pulse generators. In *Ultra-Wideband, Short Pulse Electromagnetics*, 9 (pp. 301–305). Springer New York.
17. Lomaev M.I., & Rybka D.V. (2006). Calculation of absolute values of the spectral energy density of polychromatic radiation. *Instruments and Experimental Techniques*, 49(3), 399–402.
18. Boichenko A.M., Skakun V.S., Tarasenko V.F., Fomin E.A., & Yakovlenko S.I. (1993). LASER ELEMENTS: Spatial characteristics of the emission from exciplex lamps. *Quantum Electronics*, 23, 532–534.
19. Alekseev S.B., Gubanov V.P., Kostyrya I.D., Orlovskii V.M., Skakun V.S., & Tarasenko V.F. (2004). Pulsed volume discharge in a nonuniform electric field at a high pressure and the short leading edge of a voltage pulse. *Quantum Electronics*, 34(11), 1007.
20. Erofeev M.V., Baksht E.K., Tarasenko V.F., & Shut'ko Y.V. (2013). Generation of runaway electrons in a nonuniform electric field by applying nanosecond voltage pulses with a frequency of 100–1000 Hz. *Technical Physics*, 58(2), 200–206.
21. Baksht E.K., Burachenko A.G., Erofeev M.V., & Tarasenko V.F. (2014). Pulse-periodic generation of supershort avalanche electron beams and X-ray emission. *Plasma Physics Reports*, 40(5), 404–411.