



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-4-331-339  
УДК 535.2  
EDN: IKZIWI

Научная статья / Research article

## Высоковольтный полупроводниковый генератор импульсов напряжения для формирования капиллярного разряда в источнике мягкого рентгеновского излучения

А.А. Самохвалов<sup>a,b</sup> , К.А. Сергушичев<sup>b</sup> , С.И. Елисеев<sup>b,c</sup> ,  
А.А. Смирнов<sup>c</sup>  , М.В. Тимшина<sup>c</sup> , Т.П. Бронзов<sup>c</sup> 

<sup>a</sup> Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>b</sup> Лаборатория им. В.А. Бурцева, Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>c</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация  
 cmid@inbox.ru

### История статьи

Поступила в редакцию: 17 апреля 2023 г.  
Доработана: 28 августа 2023 г.  
Принята к публикации: 12 сентября 2023 г.

### Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Вклад авторов

Нераздельное соавторство.

**Аннотация.** Представлены результаты разработки высоковольтного полупроводникового генератора (на базе IGBT-транзисторов) напряжения с импульсным трансформатором и результаты экспериментов по генерации капиллярного разряда при помощи него на компактном газоразрядном источнике, способном формировать импульсы мягкого рентгеновского излучения (МРИ) в области так называемого «водяного окна» — с длиной волны в диапазоне 2,4...4,4 нм. Описаны методы проектирования высоковольтного импульсного генератора импульсов напряжения: теоретические расчеты и результаты моделирования электрической принципиальной схемы в программном пакете LTSpice, описана разработанная конструкция импульсного трансформатора на основе кольцевых ферритов N 87 и самого генератора, представлены и проанализированы результаты его работы в составе компактного газоразрядного источника излучения. Показана перспективность использования подобного высоковольтного генератора (с полупроводниковыми транзисторными ключами) с импульсным трансформатором в составе источника мягкого рентгеновского излучения за счет его технико-эксплуатационных особенностей: разработанный генератор способен работать от сети переменного тока 380 В/50 Гц в частотно-пачечном режиме (с частотой следования формируемых импульсов напряжения до 600 Гц) и заряжать капиллярную емкость источника МРИ до напряжения более 20 кВ за время порядка 4 мкс, имеет небольшие габариты, не создает импульсных высокочастотных наводок и ложных срабатываний, а также обладает стабильными выходными (амплитудно-временными) параметрами.

**Ключевые слова:** мягкое рентгеновское излучение, капиллярная плазма, газоразрядный источник, высоковольтный генератор, трансформатор напряжения, емкостной накопитель, компьютерное моделирование, Altium Designer, Solid Works, LTSpice



### Финансирование

Исследование выполнено в ООО «Лаборатория им. В.А. Бурцева» при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-10110).

### Для цитирования

Самохвалов А.А., Сергушичев К.А., Елисеев С.И., Смирнов А.А., Тимшина М.В., Бронзов Т.П. Высоковольтный полупроводниковый генератор импульсов напряжения для формирования капиллярного разряда в источнике мягкого рентгеновского излучения // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 4. С. 331–339. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-4-331-339>

## High-voltage semiconductor voltage pulse generator for capillary discharge formation in soft X-ray radiation source

Andrey A. Samokhvalov<sup>a,b</sup> , Kirill A. Sergushichev<sup>b</sup> , Stepan I. Eliseev<sup>b,c</sup> ,  
Artyom A. Smirnov<sup>b</sup>  , Maria V. Timshina<sup>b</sup> , Timur P. Bronzov<sup>b</sup> 

<sup>a</sup> Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics,  
*Saint-Petersburg, Russian Federation*

<sup>b</sup> «Laboratory V.A. Burtseva» LLC, *Saint-Petersburg, Russian Federation*

<sup>c</sup> St. Petersburg State University, *Saint-Petersburg, Russian Federation*

 [cmid@inbox.ru](mailto:cmid@inbox.ru)

### Article history

Received: April 17, 2023

Revised: August 28, 2023

Accepted: September 12, 2023

### Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

### Authors' contribution

Undivided co-authorship.

**Abstract.** The results of the development of a high-voltage semiconductor voltage generator (based on IGBT transistors) with a pulse transformer and the results of experiments on generating a capillary discharge using it on a compact gas-discharge source capable of generating pulses of soft X-ray radiation (SXR) in the area of the so-called «water window» — with wavelength in the range of 2.4...4.4 nm. Methods for designing a high-voltage pulse voltage pulse generator are described: theoretical calculations and results of modeling the electrical circuit diagram in the LTSpice software package, the developed design of a pulse transformer based on N87 ring ferrites and the generator itself is described, the results of its operation as part of a compact gas-discharge radiation source are presented and analyzed. The prospects of using such a high-voltage generator (with semiconductor transistor switches) with a pulse transformer as part of a soft X-ray radiation source are shown due to its technical and operational features: the developed generator is capable of operating from an alternating current network of 380 V/50 Hz in a frequency-burst mode (with a repetition rate of the generated voltage pulses up to 600 Hz) and charges the capillary capacitance of the SXR source to a voltage of more than 20 kV in a time of about 4  $\mu$ s, has small dimensions, does not create pulsed high-frequency interference and false alarms, and also has stable output (amplitude-temporary) parameters.

**Keywords:** Soft X-rays, capillary plasma, gas-discharge source, high-voltage generator, voltage transformer, capacitive storage, computer simulation, Altium Designer, SolidWorks, LTSpice

### Acknowledgements

The research was carried out at the V.A. Burtsev Laboratory LLC with the support of a grant from the Russian Science Foundation (project No. 21-79-10110).

### For citation

Samokhvalov AA, Sergushichev KA, Eliseev SI, Smirnov AA, Timshina MV, Bronzov TP. High-voltage semiconductor voltage pulse generator for capillary discharge formation in soft X-ray radiation source. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(4):331–339. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-4-331-339>

## Введение

Мягкое рентгеновское излучение (МРИ) в «окне прозрачности воды» — диапазоне длин волн между линиями поглощения атомов кислорода (2,34 нм или 530 эВ) и углерода (4,40 нм или 280 эВ) — традиционно привлекало исследователей возможностью получения увеличенных изображений внутреннего строения различных биологических объектов [1]. Недавние демонстрации возможности мягкой рентгеновской микроскопии включают исследования инфицированных вирусом клеток [2]. Большой прогресс в развитии методов микроскопии «водяного окна» в значительной степени был достигнут с использованием синхротронного источника излучения [3]. Большая стоимость и сложность таких источников мотивировали на поиск более дешевых и компактных альтернатив, доступных значительному кругу исследователей, которые потенциально могут быть использованы для решения широкого спектра прикладных научных задач и исследований [4; 5]. Значительные усилия направлены на разработку газоразрядных источников мягкого рентгеновского излучения для микроскопии «водяного окна» [6; 7]. В таких системах применяются высоковольтные генераторы импульсов напряжения, которые при определенных условиях способны формировать электрические разряды в газе (обычно в азоте), создавая горячую кратковременную плазму, которая служит источником излучения. Используя оптическую фильтрацию, можно выделить определенные линии спектра и сфокусировать на исследуемом биологическом образце в диапазоне «водяного окна» [8].

В [9; 10] в экспериментах в составе компактного источника мягкого рентгеновского излучения для формирования электрических разрядов в газе был использован разработанный нами высоковольтный генератор на базе тиратрона ТПИ-10к/50 с ненакаливаемым катодом. Несмотря на ряд уникальных характеристик тиратрона (возможность работы в диапазоне напряжений 1–50 кВ и токов до 10 кА), у высоковольтного генератора на основе тиратрона есть ряд недостатков. Например, необходимость охлаждения тиратрона при его частотном режиме работы. При малых напряжениях достаточно охлаждения при помощи вентилятора,

однако при напряжениях, близких к максимальным рабочим — при помощи трансформаторного масла. Также необходима экранировка тиратрона и гальваническая развязка тиратронного генератора для исключения электромагнитных помех и наводок в другие электрические цепи, периодическая подстройка напряжения накала тиратрона, ограниченный ресурс (как почти у любого сильноточного газоразрядного прибора), а также необходимость использования высоковольтного мощного источника постоянного напряжения, который по сути определяет режим работы тиратронного генератора.

Альтернативой тиратронам могут быть твердотельные коммутаторы, например, такие, как сильноточные биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) и мощные полевые транзисторы (MOSFET). Благодаря последним достижениям в сильноточной высоковольтной полупроводниковой электронике появились транзисторы, способные коммутировать импульсные токи в сотни и тысячи ампер за время десятки и сотни наносекунд при максимальном рабочем напряжении в 2...4 кВ.

В данной работе представлены результаты проектирования и экспериментальной работы в составе источника МРИ-генератора высоковольтных импульсов напряжения на основе IGBT-транзисторов с импульсным трансформатором напряжений.

## 1. Результаты разработки IGBT-генератора

Как известно, для осуществления частотного или частотно-пачечного режима работы генератора тока, осуществляющего питание капиллярного разряда в источнике мягкого рентгеновского излучения, необходимо обеспечивать синхронную зарядку его реактивного накопительного элемента (емкости). В проектируемых для частотных лазеров мощных источниках на основе ВЧ-инверторов обычно предусмотрена возможность запрета заряда на период коммутации накопителя на нагрузку. Такие источники имеют сложную систему управления зарядом, поэтому, как правило, используется другой подход — метод импульсного резонансного заряда непосредственно от сетевого напряжения. Его применение целесообразно при умеренно небольших значениях энергии накопителя в импульсе и при достаточно широком

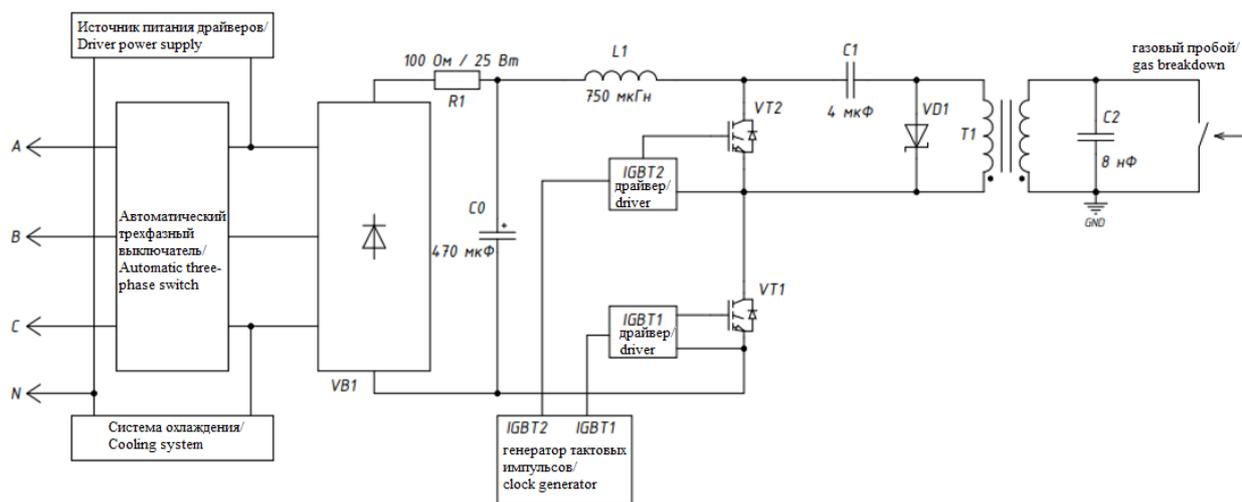
диапазоне следования рабочих импульсов во времени (от единиц герц до десятка килогерц в зависимости от энергии в импульсе).

Ниже на рис. 1 рассматривается один из возможных вариантов такой схемы заряда под конкретный тип накопителя, разработанный в ООО «Лаборатория им. В.А. Бурцева». Основная идея состоит в том, чтобы заряжать емкостной накопитель генератора тока капиллярного разряда за один колебательный цикл при использовании промежуточного емкостного накопителя с той же энергетикой, но при более низком исходном напряжении, равном при-

мерно удвоенному выпрямленному напряжению трехфазной сети. Наиболее важным узлом данной системы заряда является импульсный трансформатор, во вторичной и первичной цепи которого используются емкости  $C1$  и  $C2$ , связанные приблизительно условием

$$C1/C2 = L2/L1 = (N2/N1)^2 = n^2,$$

где  $L2$  и  $L1$  — собственные индуктивности вторичной и первичной обмоток соответственно,  $n$  — коэффициент трансформации напряжения (при числе витков в первичной и вторичной обмотках  $N1$ ,  $N2$  соответственно).



**Рис. 1.** Функциональная схема импульсной системы зарядки накопительной емкости на капиллярном узле

И с т о ч н и к : составлено автором К.А. Сергушичевым

**Figure 1.** Functional diagram of a pulse charging system storage tank on the capillary unit

S o u r c e : compiled by the author K.A. Sergushichev

Питание схемы осуществляется от трехфазной сети переменного тока 380 В/50 Гц. Трехфазный мостовой выпрямитель  $VB1$  (IXYS GUO40-12NO1) обеспечивает заряд емкости фильтра  $C0 = 470$  мкФ (2 последовательно и 2 параллельно соединенных электролитических конденсатора Epcos B43509A5477M000) до напряжения  $Ud \approx 530$  В. Для ограничения броска пускового тока используется демпфирующий резистор  $R1$ , далее подзарядка емкости фильтра в процессе эксплуатации осуществляется через систему предохранителей на случай разрушения электролитических конденсаторов при импульсной перегрузке по току.

Заряд промежуточного накопителя  $C1$  (4 параллельно соединенных конденсатора Epcos

B32026A3105M000) происходит при отпирании IGBT-транзистора  $VT1$  (IXYS IXYN30N170C) по внешней команде управляемого драйвера транзистора (Texas Instruments UCC23513). Ток заряда проходит по цепи: «ограничительный дроссель  $L1$  (разработан в ООО «Лаборатория им. В.А. Бурцева»), промежуточный накопитель  $C1$ , диод  $VD1$  (3 последовательно соединенных диода GENESIC GB50MPS17), транзисторный ключ  $VT1$ ». По истечении времени  $T/2$  заканчивается первый полупериод зарядного тока, емкость  $C1$  будет заряжена до напряжения  $U1 \approx (Ud \cdot 2) / (1 + C1/C0)$ . Затем, в момент времени  $T/2$ , производится запуск транзистора  $VT2$  (2 параллельно соединенных транзистора IXYS IXGN200N170) внешним сигналом драйвера и

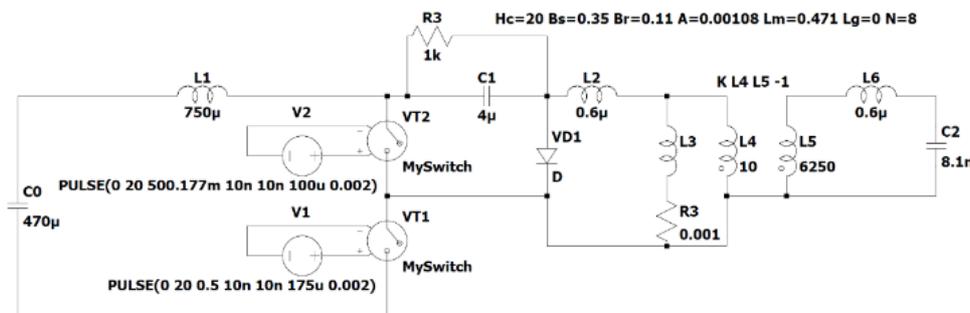
почти одновременно в момент времени  $T/2+\Delta$  происходит запираание транзистора VT1. Очень важно, чтобы запираание транзистора осуществлялось в момент перехода тока на транзисторе VT1 через нуль. При этом условии коммутационные потери в процессе запираания ключа будут минимальны, мало напряжение на нем и нагрев перехода.

## 2. Результаты численного моделирования IGBT-генератора

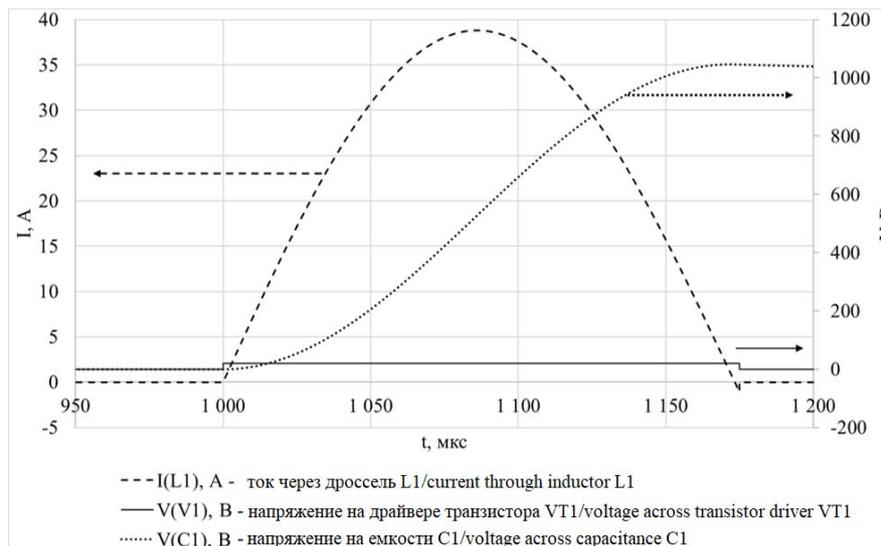
Моделирование схемы проводилось в программном пакете LTSpice. Расчетная схема представлена на рис. 2. Для упрощения все полупро-

водниковые элементы задавались без учета их паразитных параметров, а транзисторы представлялись в виде ключей, управляемых напряжением. На рис. 3 приведен результат моделирования заряда промежуточной емкости C1. Видно, что за счет величины индуктивности дросселя L1 (750 мкГн) время заряда составило примерно 170 мкс, при этом величина напряжения на емкости составила примерно удвоенное выпрямленное сетевое напряжение (1050 В).

Основной задачей являлось моделирование реального импульсного трансформатора, разработанного в ООО «Лаборатория им. В.А. Бурцева». Его параметры представлены в табл. 1.



**Рис. 2.** Расчетная схема высоковольтного IGBT-генератора в LTSpice  
И с т о ч н и к : составлено авторами С.И. Елисеевым, М.В. Тимшиной  
**Figure 2.** Design diagram of a high-voltage IGBT-generator in LTSpice  
S o u r c e : made by the authors S.I. Eliseev, M.V. Timshina



**Рис. 3.** Заряд промежуточной емкости C1  
И с т о ч н и к : составлено авторами С.И. Елисеевым, М.В. Тимшиной  
**Figure 3.** Charge of intermediate capacitance C1  
S o u r c e : made by the authors S.I. Eliseev, M.V. Timshina

Таблица 1

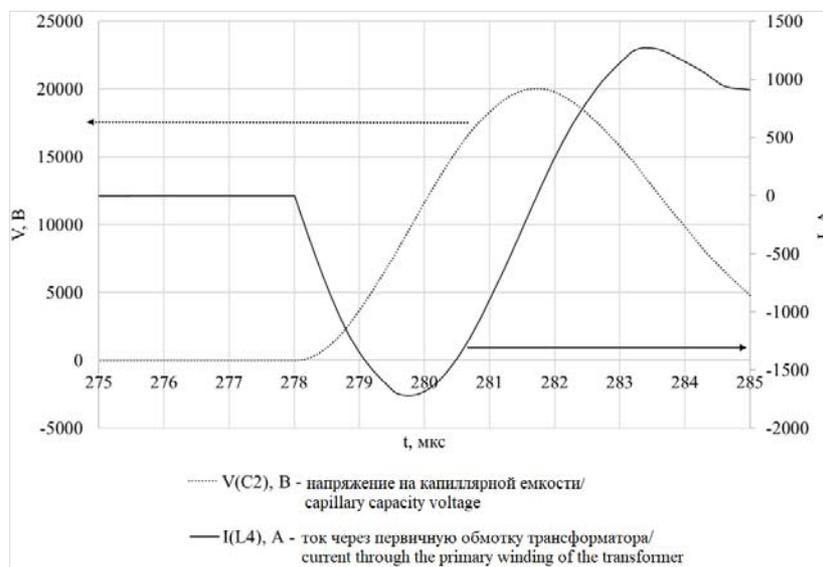
**Параметры высоковольтного трансформатора**

Параметр	Описание	Величина	Единица измерения
$D$	Внешний диаметр магнитопровода	0,19	м
$d$	Внутренний диаметр магнитопровода	0,11	м
$h$	Толщина магнитопровода	0,027	м
$A$	Сечение сердечника	0,00108	м <sup>2</sup>
—	Материал магнитопровода	1000 нм	—
$H_c$	Коэрцитивная сила	20	А/м
$B_s$	Индукция насыщения	0,35	Тл
$B_r$	Остаточная индукция	0,11	Тл
$M_1$	Количество витков в первичной обмотке	8	шт.
$M_2$	Количество витков во вторичной обмотке	180	шт.

Table 1

**Parameters of a high-voltage transformer**

Parameter	Description	Value	Unit of measurement
$D$	External diameter of the magnetic circuit	0.19	m
$d$	The inner diameter of the magnetic circuit	0.11	m
$h$	Magnetic core thickness	0.027	m
$A$	Core cross section	0.00108	m <sup>2</sup>
—	Magnetic core material	1000 нм	—
$H_c$	Coercive force	20	A/m
$B_s$	Saturation induction	0.35	Tl
$B_r$	Residual induction	0.11	Tl
$M_1$	Number of turns in the primary winding	8	unit
$M_2$	Number of turns in the secondary winding	180	unit



**Рис. 4.** Заряд капиллярной емкости C2

И с т о ч н и к : составлено авторами С.И. Елисеевым, М.В. Тимшиной

**Figure 4.** Charge of capillary capacity C2

S o u r c e : made by the authors S.I. Eliseev, M.V. Timshina

На основании измеренных параметров реального трансформатора, учтенных в расчетной модели, было проведено моделирование перезарядки емкости  $C1$  на капиллярную емкость  $C2$  величиной 8 нФ. На рис. 4 изображены две кривые. Видно, что при протекании тока через ноль напряжение на емкости  $C2$  достигает максимального значения 20 000 В. Расчетное время перезарядки составило примерно 4 мкс.

После проведения всех необходимых расчетов и компьютерного моделирования схемы

генератора была разработана окончательная схема электрическая принципиальная. Дальнейшая трассировка печатной платы высоковольтного генератора осуществлялась в E-CAD-MCAD пакете Altium Designer. После чего в программном пакете SolidWorks были спроектированы необходимые конструктивные элементы.

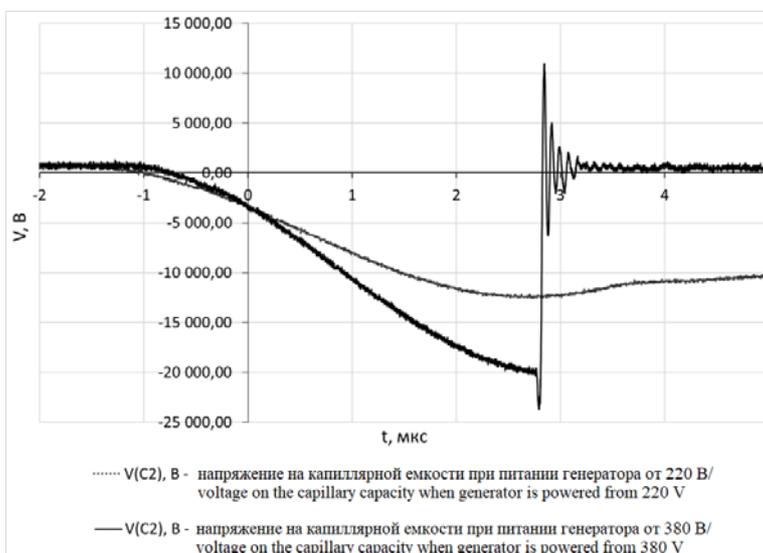
Фотография изготовленного генератора представлена на рис. 5. На рис. 6 представлен генератор в составе источника МРИ.



**Рис. 5.** Фотография разработанного высоковольтного генератора с импульсным трансформатором  
Источник: фото К.А. Сергушичева  
**Figure 5.** Photo of the developed high-voltage generator with pulse transformer  
Source: photo by K.A. Sergushichev



**Рис. 6.** Фотография разработанного высоковольтного генератора в составе источника мягкого рентгеновского излучения (МРИ)  
Источник: фото К.А. Сергушичева  
**Figure 6.** Photo of the developed high-voltage generator as part of a soft X-ray radiation (SXR) source  
Source: photo by K.A. Sergushichev



**Рис. 7.** Экспериментальные данные по заряду капиллярной емкости  $C2$  при разных уровнях питающего напряжения  
Источник: составлено авторами А.А. Смирновым, К.А. Сергушичевым  
**Figure 7.** Experimental data on the charge of capillary capacity  $C2$  at different supply voltage levels  
Source: made by the authors A.A. Smirnov, K.A. Sergushichev

### 3. Испытания IGBT-генератора при работе в составе источника мягкого рентгеновского излучения

Испытания разработанного высоковольтного IGBT-генератора проводились при реальных условиях эксплуатации. С помощью форвакуумного и двух турбомолекулярных насосов была произведена откачка капиллярного узла до вакуума  $10^{-6}$  мбар, после чего в систему был напущен чистый рабочий газ азот. На первом этапе тестирование системы проводилось при работе от сетевого напряжения 220 В (рис. 7). Капиллярная емкость при таких условиях работы заряжалась до величины 12 000 В за время порядка 4 мкс. Как видно из рис. 7, этого уровня напряжений было недостаточно для пробоя газового промежутка. На следующем этапе генератор был подключен к трехфазной сети 380 В и были проведены аналогичные эксперименты. Капиллярная емкость при таких условиях заряжалась уже до 20 000 В за аналогичное время. И, как видно из рис. 7, данного уровня напряжений уже хватило для пробоя газового промежутка. На осциллограмме виден классический скол напряжения, после которого следует релаксационный колебательный процесс. Частота следования формируемых высоковольтных импульсов составляла 600 Гц

#### Заключение

Представлены результаты разработки (теоретические расчеты, компьютерное моделирование и проектирование, описание основных характеристик) высоковольтного полупроводникового генератора (на базе IGBT-транзисторов) напряжения с импульсным трансформатором и результаты экспериментов по генерации капиллярного разряда при помощи него в составе компактного газоразрядного источника мягкого рентгеновского излучения. Показано, что разработанный высоковольтный генератор способен работать от сети переменного тока 380 В/50 Гц в частотно-пачечном режиме (с частотой до 600 Гц), обладает малыми габаритами и имеет стабильные амплитудно-временные параметры формируемых высоковольтных импульсов напряжения.

#### Список литературы / References

1. Weinhardt V, Chen J, Ekman A, Mcdermott G, Le Gros M.A. Imaging cell morphology and physiology

using X-rays. *Biochemical Society Transactions*. 2019; 47(2):BST20180036. <https://doi.org/10.1042/BST20180036>

2. Loconte V, Chen J-H, Chen J-H, Cortese M, Ekman A, Le Gros MA, Larabell C, Barten-schlager R, Weinhardt V. Using soft X-ray tomography for rapid whole-cell quantitative imaging of SARS CoV-2-infected cells. *Cell Reports Methods*. 2021;1(7):100117. <https://doi.org/10.1016/j.crmeth.2021.100117>

3. Jacobsen C, Kirz J. X-ray microscopy with synchrotron radiation. *Nature Structural Biology*. 1998; 5:650–653. <https://doi.org/10.1038/1341>

4. Adam J, Moy J, Susini J, Adam J, Moy J. Table-top water window transmission x-ray microscopy: Review of the key issues, and conceptual design of an instrument for biology. *Review of Scientific Instruments*. 2005;76:091301. <https://doi.org/10.1063/1.2018633>

5. Kördel M, Dehlinger A, Seim C, Vogt U, Fogelqvist E, Sellberg JA, Stiel H, Hertz HM. Laboratory water-window x-ray microscopy. *Optica*. 2020;7(6): 658–674. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.393014>

6. Benk M, Bergmann K, Schäfer D, Wilhein T. Compact soft x-ray microscope using a gas discharge light source. *Optics Letters*. 2008;33(20):2359–2361. <https://doi.org/10.1364/OL.33.002359>

7. Nawaz MF, Nevrkla M, Jancarek A, Torrisi A, Parkman T, Turnova J, Stolcova L, Vrbova M, Limpouch J, Pina L, Wachulak P. Table-top water-window soft X-ray microscope using a Z-pinching capillary discharge source. *Journal of Instrumentation*. 2016; 11(07):P07002. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/07/P07002>

8. Malyshev IV, Chkhalo NI. A method of z-tomography using high-aperture soft X-ray microscopy. *Ultramicroscopy*. 2019;202:76–86. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2019.04.001>

9. Samokhvalov AA, Sergushichev KA, Eliseev SI, Bronkhov TP, Bolshakov EP. Optimization of parameters of a compact soft x-ray source for operation in the wavelength range 2-5 NM. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki [Journal of Technical Physics]*. 2022;92(8):1213–1218. (In Russ.) <https://doi.org/10.21883/JTF.2022.08.52786.73-22>

Самохвалов А.А., Сергушичев К.А., Елисеев С.И., Бронзов Т.П., Большаков Е.П. Оптимизация параметров компактного источника мягкого рентгеновского излучения для работы в диапазоне длин волн 2–5 нм // Журнал технической физики. 2022. Т. 92. № 8. С. 1213–1218. <https://doi.org/10.21883/JTF.2022.08.52786.73-22>

10. Samokhvalov AA, Sergushichev KA, Eliseev SI, Smirnov AA, Bronzov TP, Getman DV, E.P. Bolshakov ER. Fast capillary discharge device for soft x-ray generation in the «carbon-window» and «water-window» spectral regions. *Journal of Instrumentation*. 2022;17(6):P06002. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/06/P06002>

## Об авторах

**Самохвалов Андрей Александрович**, кандидат технических наук, ассистент лаборатории производственных лазерных технологий, Физико-технический мегафакультет, Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Российская Федерация; старший научный сотрудник, ООО «Лаборатория им. В.А. Бурцева», Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-4318-1991; E-mail: samokhvalov.itmo@gmail.com

**Сергушичев Кирилл Александрович**, инженер, ООО «Лаборатория им. В.А. Бурцева», Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-9379-2809; E-mail: k.a.sergishichev@gmail.com

**Елисеев Степан Иванович**, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-1140-3625; E-mail: step.eliseev@yandex.ru

**Смирнов Артем Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник, ООО «Лаборатория им. В.А. Бурцева», Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-9341-674X; E-mail: cmid@inbox.ru

**Тимшина Мария Викторовна**, аспирант, научный сотрудник, ООО «Лаборатория им. В.А. Бурцева», Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-3868-3797; E-mail: mariyitimshina@yandex.ru

**Бронзов Тимур Павлович**, инженер-исследователь, ООО «Лаборатория им. В.А. Бурцева», Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0009-0006-2987-9321; E-mail: imp\_impaler@mail.ru

## About the authors

**Andrey A. Samokhvalov**, Candidate of Technical Sciences, Assistant at the Laboratory of Industrial Laser Technologies, School of Physics and Engineering, National Research University ITMO, St. Petersburg, Russian Federation; Senior Researcher, «Laboratory V.A. Burtseva» LLC, Saint-Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-4318-1991; E-mail: samokhvalov.itmo@gmail.com

**Artyom A. Smirnov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Researcher, «Laboratory V.A. Burtseva» LLC., St. Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9341-674X; E-mail: cmid@inbox.ru

**Kirill A. Sergushichev**, Engineer, «Laboratory V.A. Burtseva» LLC, St. Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9379-2809; E-mail: k.a.sergishichev@gmail.com

**Stepan I. Eliseev**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior lecturer, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russian Federation; Research engineer, «Laboratory V.A. Burtseva» LLC, St. Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1140-3625; E-mail: step.eliseev@yandex.ru

**Maria V. Timshina**, Graduate student, Researcher, «Laboratory V.A. Burtseva» LLC, St. Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-3868-3797; E-mail: mariyitimshina@yandex.ru

**Timur P. Bronzov**, Research engineer, «Laboratory V.A. Burtseva» LLC, St. Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0009-0006-2987-9321; E-mail: imp\_impaler@mail.ru