

## МАЛОГАБАРИТНЫЙ CuBr-ЛАЗЕР С ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ БЛОКОМ ЗАРЯДА НАКОПИТЕЛЬНОГО КОНДЕНСАТОРА

© 2023 г. К. Ю. Семенов<sup>a,b,\*</sup>, П. И. Гембух<sup>a</sup>, М. В. Тригуб<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
Россия, 634055, Томск, площадь Академика Зуева, 1

<sup>b</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 30

\*e-mail: [semenovkostya98@gmail.com](mailto:semenovkostya98@gmail.com)

Поступила в редакцию 13.04.2022 г.

После доработки 23.06.2022 г.

Принята к публикации 07.07.2022 г.

Представлены результаты разработки малогабаритного лазера на парах бромида меди с импульсным зарядом рабочей емкости. Особенности разработанного устройства являются высокочастотный режим заряда рабочей емкости (свыше 200 кГц) и варьируемая в интервале вплоть до 36 кГц частота следования импульсов генерации. При возбуждении активного элемента (длина 50 см, диаметр 2 см) с помощью разработанного источника достигнута мощность генерации 1.6 Вт при частоте следования импульсов 36 кГц. При этом мощность источника питания составляла 750 Вт.

DOI: 10.31857/S0032816222060179, EDN: JQAFRN

### ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности возбуждения лазеров является важной задачей, успешное решение которой во многом определяет дальнейшее внедрение лазерных технологий в различные секторы экономики для решения конкретных технологических задач. На сегодняшний день они позволяют решать задачи в различных сферах – от металлообработки до хирургии [1, 2]. Кроме того, квантовые технологии достаточно широко представлены в области информационных и телекоммуникационных цифровых систем. Существует ряд задач, где лазерные системы используются для получения изображений объектов наблюдения, экранированных широкополосной фоновой засветкой [3, 4]. Одним из направлений в этой области является построение высокоскоростных активных оптических систем с усилителями яркости изображений [5]. Наиболее перспективные разработки в этой сфере основаны на применении активных элементов на парах галогенидов металлов, работающих при повышенных частотах следования импульсов [6, 7]. Наибольшее распространение получили среды на парах галогенидов меди, в частности CuBr, а также на переходах атома марганца благодаря высокому коэффициенту усиления активной среды и низким рабочим температурам [8–10]. Это, в совокупности с высокой частотой следования импульсов усилителя яркости на парах CuBr, позволило изучать про-

цессы, экранированные фоновой засветкой, в режиме реального времени без дополнительной обработки и цифровой фильтрации формируемых изображений [11–13].

Таким образом, можно заключить, что в ряде современных применений активные среды на парах галогенидов меди и марганца остаются весьма востребованными. Именно это определяет необходимость в повышении их практической эффективности и ресурса.

До появления на рынке доступных транзисторов, таких как MOSFET (Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect-Transistors) и IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), широко применялись схемы с использованием сетевых высоковольтных трансформаторов, имеющих большие массу и габариты [14]. Недостатки такой схемы очевидны – крайне высокие массогабаритные параметры магнитных элементов и, как следствие, стоимость устройства, а также практически полное отсутствие мобильности.

В настоящее время широкое применение нашли источники накачки с импульсным зарядом рабочей емкости [15, 16] на основе MOSFET или IGBT. Такой метод заряда позволил значительно снизить массогабаритные параметры магнитных элементов по сравнению со схемой из работы [14]. Подобное решение также имеет ряд недостатков, основной из которых – привязка частоты работы преобразователя к частоте коммутации

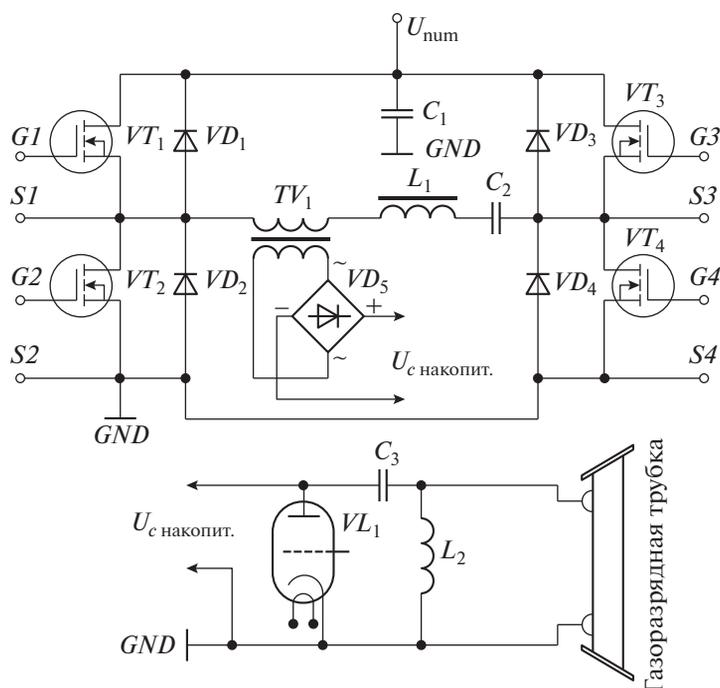


Рис. 1. Принципиальная схема инвертора.

тиратрона, а также заряд накопительного конденсатора за один относительно длинный импульс. Хотя применение такого способа заряда накопительной емкости и дает возможность снизить размеры силовой части в целом, размер магнитных элементов по-прежнему не позволяет создавать высокоомобильные системы на основе лазеров на парах металлов и галогенидов.

В рамках данной работы решалась задача повышения эффективности источника питания, улучшения его тактико-технических характеристик. Был разработан источник питания с высокочастотным возбуждением накопительного конденсатора. На основе такого источника был реализован действующий макет лазера на парах бромида меди, предназначенный для решения задач скоростной визуализации [17] с временным разрешением до 27.8 мкс.

#### ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ АКТИВНЫХ СРЕД НА ПАРАХ БРОМИДА МЕДИ

Коллективом авторов данной работы был предложен и реализован многоступенчатый способ заряда накопительной емкости за несколько импульсов с частотой следования выше 250 кГц. Такое решение позволило значительно снизить массогабаритные параметры магнитных элементов, на которые приходилось до 50% массы всех компонентов блока заряда накопительного конденсатора [15, 16]. На рис. 1 показаны принципиальная схема инвертора в основных элементах и

схема формирования импульса накачки газоразрядной трубки (ГРТ).

Конденсатор  $C_1$  емкостью 1.5 мкФ с зарядным напряжением до 630 В (TDK Corp., [www.tdk.com](http://www.tdk.com)) служит для питания инвертора. Дроссель  $L_1$  индуктивностью 30 мкГн, выполненный на сердечнике ETD59 N87 (TDK Corp., [www.tdk.com](http://www.tdk.com)), и составной из двух конденсаторов K78-2 6800 пФ, 2 кВ (ООО «Поликонд», [policond.ru](http://policond.ru)) суммарной емкостью 13.6 нФ конденсатор  $C_2$  образуют последовательный резонансный контур. Заряд накопительной емкости  $C_3$ , выполненной на конденсаторах КВИ-3 (АС «Энергия», [asenergi.ru](http://asenergi.ru)) суммарной емкостью 830 пФ, осуществляется через зарядный дроссель  $L_2$  индуктивностью 50 мкГн, выполненный без сердечника. За счет повышения частоты формирования импульсов для высоковольтного трансформатора  $TV_1$  его удалось реализовать на сердечнике V64290L0084X087 размером R102 × 66 × 15 мм (TDK Corp., [www.tdk.com](http://www.tdk.com)). Инвертор выполнен на транзисторах STP26NM60N (STMicroelectronics, [www.st.com](http://www.st.com)) и диодах C3D02060F (Wolfspeed, [www.wolfspeed.com](http://www.wolfspeed.com)). Высоковольтный выпрямитель  $VD_5$  состоит из 64-х диодов HER308 (MOSPEC, [www.mospec.com.tw](http://www.mospec.com.tw)). Для коммутации  $C_3$  на газоразрядную трубку использован тиратрон ТГИ1-270/12 (АО «ПЛАЗМА», [www.plasmalabs.ru](http://www.plasmalabs.ru)).

Управление осуществляется с помощью системы, реализованной на микроконтроллере STM32F100RBT6 (STMicroelectronics, [www.st.com](http://www.st.com)).

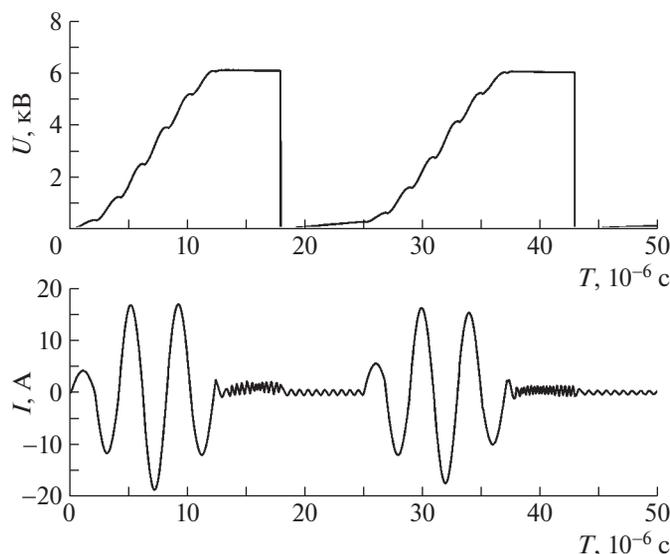


Рис. 2.  $U$  – диаграмма напряжения на накопительном конденсаторе;  $I$  – диаграмма тока в диагонали инвертора.

Сигналы управления мостовым преобразователем усиливаются драйверами TC4420EPА (Microchip Inc., www.microchip.com) и подаются на затворы MOSFET через развязывающие трансформаторы. На схему запуска тиратрона сигнал передается по оптической линии при помощи оптического передатчика HFBR-1528Z и принимается с помощью оптического приемника HFBR-2528Z (Broadcom Inc., www.broadcom.com).

Реализация многоступенчатого высокочастотного заряда требует применения в первичной цепи последовательного резонансного контура, емкость которого в 10–20 раз меньше пересчитанной в первичную цепь емкости накопительного конденсатора. Такое схемотехническое решение обуславливает гармоническую форму заряжающих импульсов (рис. 2). Амплитуды импульсов формируют квазисинусоидальную огибающую, параметры которой зависят от дросселя  $L_1$  и накопительной емкости  $C_3$ .

Для оптимизации конструкции источника питания на первом этапе проводилось компьютерное моделирование разработанной схемы для реализуемого алгоритма заряда накопительного конденсатора. На рис. 2 изображены диаграммы, полученные при моделировании со следующими параметрами: емкость накопительного конденсатора 830 пФ, частота работы инвертора 245 кГц, входное напряжение 215 В. Заряд емкости происходил за 3 периода работы инвертора, частота разряда накопительного конденсатора была задана 40 кГц.

Параметры модели соответствовали параметрам как реальной электрической схемы, так и используемых в ней компонентов, благодаря чему удалось достичь высокой сходимости результа-

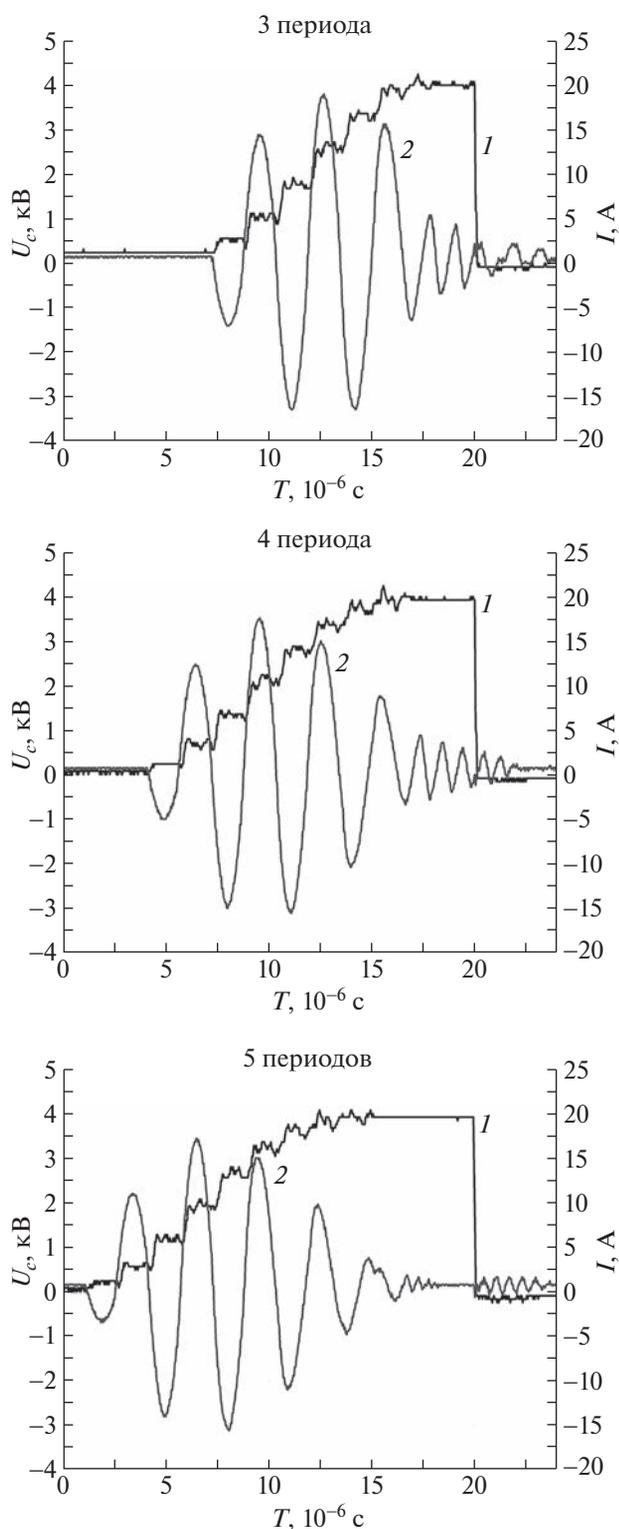
тов, полученных при моделировании и экспериментально. Это прослеживается в результатах исследования экспериментального макета при аналогичных параметрах.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МАКЕТА

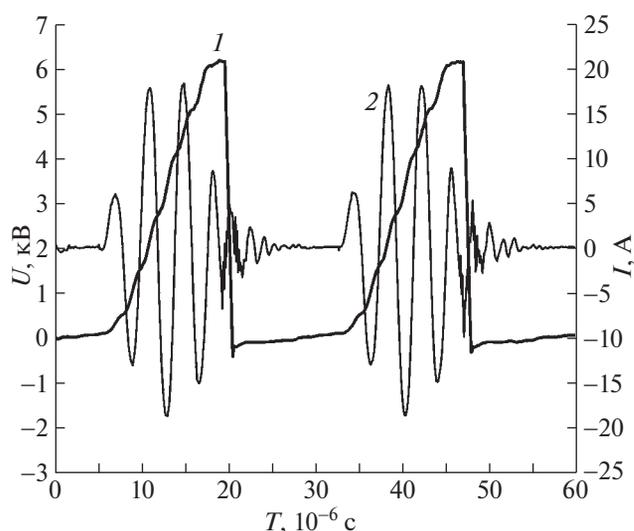
Варьированием числа и частоты импульсов можно подбирать оптимальный режим работы источника для заряда накопительных конденсаторов различного номинала. Изменение рабочей емкости требуется для оптимизации режима возбуждения активных сред на парах галогенидов металлов в зависимости от температурных условий работы, а также наличия водородосодержащих добавок [18]. Для накопительной емкости 2200 пФ была получена серия осциллограмм для различного числа пар заряжающих импульсов (рис. 3). Частота работы тиратрона для всех случаев составляла 12 кГц. При этом входное напряжение и ток выбирались таким образом, чтобы напряжение на накопительной емкости перед ее разрядом составляло 4 кВ. Значения напряжения питания инвертора и потребляемого тока для различного числа пар импульсов заряда накопительной емкости 2200 пФ представлены ниже:

Число пар заряжающих импульсов	3	4	5
Напряжение питания инвертора, В	185	170	170
Действующий ток от вспомогательного источника питания, А	1.25	1.4	1.45

На рис. 4 приведены осциллограммы при частоте следования импульсов разряда накопительного конденсатора на ГРТ 36 кГц.



**Рис. 3.** Напряжение на накопительном конденсаторе (1) и ток первичной обмотки трансформатора (2) для различного числа пар импульсов заряда накопительной емкости 2200 пФ при частоте работы тиратрона 12 кГц.



**Рис. 4.** Напряжение на накопительном конденсаторе (1) и ток первичной обмотки трансформатора (2) экспериментального макета для емкости 830 пФ при частоте работы тиратрона 36 кГц.

При экспериментальном исследовании макета накопительный конденсатор емкостью 830 пФ заряжался до напряжения 6 кВ за 3 периода работы инвертора при частоте последнего 254 кГц. Максимальный ток первичной обмотки составил примерно 17 А при входном напряжении 215 В, что отлично согласуется с результатами компьютерного моделирования (см. рис. 2). Небольшое отличие заключалось в том, что частота заряжающих импульсов в экспериментальном макете была на 3.6% выше, чем при компьютерном моделировании. Разряд емкости на ГРТ происходил с помощью тиратрона ТГИ1-270/12 с частотой 36 кГц, дальнейшее увеличение частоты было ограничено временем восстановления электрической прочности тиратрона.

При экспериментальном исследовании макета с частотой следования импульсов накачки 36 кГц (см. рис. 3) использовался активный элемент на парах CuVg со следующими параметрами ГРТ: длина активной зоны 50 см, диаметр 2 см. Мощность излучения составляла 1.2 Вт, а при введении водородсодержащей добавки – 1.6 Вт. При этом потребляемая блоком заряда накопительной емкости мощность составляла 750 Вт. Развернутые осциллограммы импульсов генерации, напряжения на ГРТ и тока через ГРТ представлены на рис. 5.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спроектирован и реализован малогабаритный CuVg-лазер с высокочастотным блоком заряда накопительного конденсатора. Основным преимуществом блока возбуждения является высокочастотный резонансный заряд накопительного

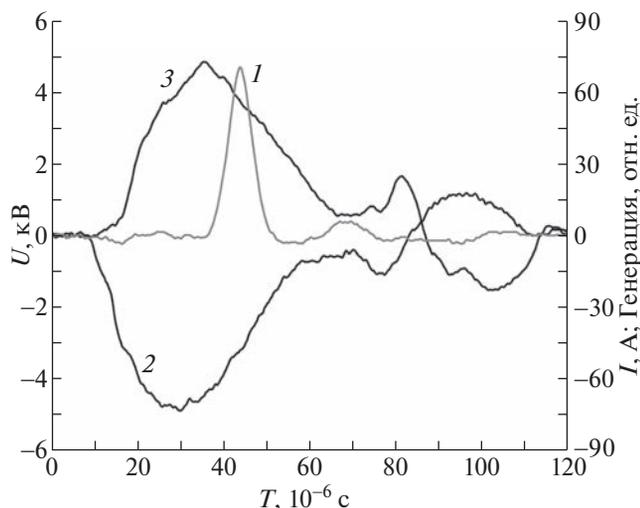


Рис. 5. Осциллограммы импульса генерации (1), напряжения на ГРТ (2) и тока через ГРТ (3) при частоте следования импульсов 36 кГц и напряжении на накопительном конденсаторе 6 кВ.

конденсатора с частотой следования импульсов 254 кГц. Это позволило уменьшить массогабаритные параметры высоковольтного трансформатора более чем в 6 раз и реализовать его на тороидальном сердечнике  $R102 \times 65.8 \times 15$  мм из материала N87. Эффективность заряда накопительного конденсатора составила 73%. Такая эффективность связана не только с потерями в мостовом инверторе и токами утечки в блоке тиратрона, но и с наличием паразитных емкостей длинных высоковольтных линий, на заряд которых тратилось до 17% мощности силовой части. Но даже с учетом этого эффективность оказалась выше, чем для ранее представленных систем возбуждения.

Разработанный источник был использован при возбуждении активной среды с частотой следования импульсов 36 кГц, что дает возможность реализовать систему визуализации с временным разрешением до 27.8 мкс. При этом мощность генерации при использовании в активном элементе плоскопараллельного резонатора составила 1.6 Вт, объем активной зоны —  $157 \text{ см}^3$ .

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Разработка и исследование ВЧ-усилителя яркости выполнены при поддержке РФФИ 19-79-10096, финансирование 2022 года (19-79-10096-П).

Работа по оптимизации возбуждения — при поддержке государственного задания ИОА СО РАН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вакс Е.Д., Миленкий М.Н., Сапрыкин Л.Г. Практика прецизионной лазерной обработки. М.: Техносфера, 2013.
2. Блоцкий А.А., Шмелева Н.В. // Бюллетень физиологии и патологии дыхания. 2009. № 34. С. 12 URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-lazernoy-i-endoskopicheskoy-hirurgii-v-otorinolaringologii-obzor-literatury> (дата обращения: 23.03.2022)
3. Kanitz A., Kalus M.R., Gurevich E.L., Ostendorf A., Barcikowski S., Amans D. // Plasma Sources Science and Technology. 2019. V. 28. № 10. P. 103001 <https://doi.org/10.1088/1361-6595/AB3DBE>
4. Kraft S., Schille J., Mauersberger S., Schneider L., Loeschner U. // Proc. SPIE Laser-based Micro- and Nanoprocessing XIV. 2020. V. 11268. P. 54. <https://doi.org/10.1117/12.2545021>
5. Trigub M.V., Vasne N.A., Evtushenko G.S. // Appl. Phys. B. 2020. V. 126. P. 33. <https://doi.org/10.1007/s00340-020-7387-5>
6. Trigub M.V., Evtushenko G.S., Torgaev S.N., Shiyonov D.V., Evtushenko T.G. // Optics Communications. 2016. V. 376. P. 81. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2016.04.039>
7. Нехорошев В.О., Федоров В.Ф., Евтушенко Г.С., Торгаев С.Н. // Квантовая электроника. 2012. Т. 42. № 10. С. 877.
8. Суханов В.Б., Троицкий В.О., Губарев Ф.А., Иванов А.И. Патент РФ на полезную модель № 62742 // Опубл. 27.04.2007. Бюл. № 12.
9. Kostadinov I.K., Temelkov K.A., Astadjov D.N., Slaveeva S.I., Yankov G.P., Sabotinov N.V. // Optics Communications. 2021. V. 501. P. 127363. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2021.127363>
10. Bokhan P.A., Gugin P.P., Zakrevskii D.E. // Quantum Electronics. 2016. V. 46. № 9. P. 782. <https://doi.org/10.1070/QEL16127>
11. Trigub M.V., Vasnev N.A., Evtushenko G.S. // Applied Physics B: Lasers and Optics. 2020. V. 126. № 3. P. 33. <https://doi.org/10.1007/s00340-020-7387-5>
12. Li L., Ilyin A.P., Gubarev F.A., Mostovshchikov A.V., Klenovskii M.S. // Ceramics International. 2018. V. 46. № 16. P. 19800. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.07.237>
13. Gubarev F.A., Klenovskii M.S., Li L., Mostovshchikov A.V., Ilyin A.P. // Optica Pura y Aplicada. 2018. V. 51. № 4. P. 1. <https://doi.org/10.7149/OPA.51.4.51003>
14. Казарян М.А., Петраш Г.Г., Трофимов А.Н. Импульсные лазеры на парах галогенидов меди // Труды ФИАН. 1987. Т. 181. С. 54.
15. Андриенко О.С., Димаки В.А., Колбычев Г.В., Суханов В.Б., Троицкий В.О. // Оптика атмосферы и океана. 2004. Т. 17. № 11. С. 890.
16. Тригуб М.В., Огородников Д.Н., Димаки В.А. // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 12. С. 1112.
17. Евтушенко Г.С., Казарян М.А., Торгаев С.Н., Тригуб М.В., Шиянов Д.В. Скоростные усилители яркости на индуцированных переходах в парах металлов. Томск: STT, 2016.
18. Евтушенко Г.С., Шиянов Д.В., Губарев Ф.А. Лазеры на парах металлов с высокими частотами следования импульсов: монография. 2-е изд. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012.