

## ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ИСТОЧНИК НАКАЧКИ АКТИВНЫХ СРЕД НА ПАРАХ МЕТАЛЛОВ

© 2020 г. С. Н. Торгаев<sup>a,b,c,\*</sup>, Д. Н. Огородников<sup>a</sup>, И. С. Мусоров<sup>a</sup>,  
А. Е. Кулагин<sup>a,c</sup>, Г. С. Евтушенко<sup>c,d</sup>

<sup>a</sup> Томский политехнический университет  
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 30

<sup>b</sup> Томский государственный университет  
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 36

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

<sup>d</sup> Научно-исследовательский институт –  
Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы  
Россия, 123317, Москва, ул. Антонова-Овсеенко, 13/1

\*e-mail: [torgaev@tpu.ru](mailto:torgaev@tpu.ru)

Поступила в редакцию 26.07.2019 г.

После доработки 26.07.2019 г.

Принята к публикации 03.08.2019 г.

Представлены результаты разработки высокочастотного источника накачки активных сред на самоограниченных переходах в парах металлов, обеспечивающего работу в режиме пониженного энерговклада в разряд. Пониженный энерговклад в разряд обеспечивается за счет накачки активной среды высоковольтными импульсами малой длительности (3 кВ, 15 А, 40–60 нс). Экспериментально получена рекордная частота следования импульсов излучения в активной среде на парах бромида меди 200 кГц при работе в режиме сверхсветимости.

DOI: 10.31857/S0032816220010085

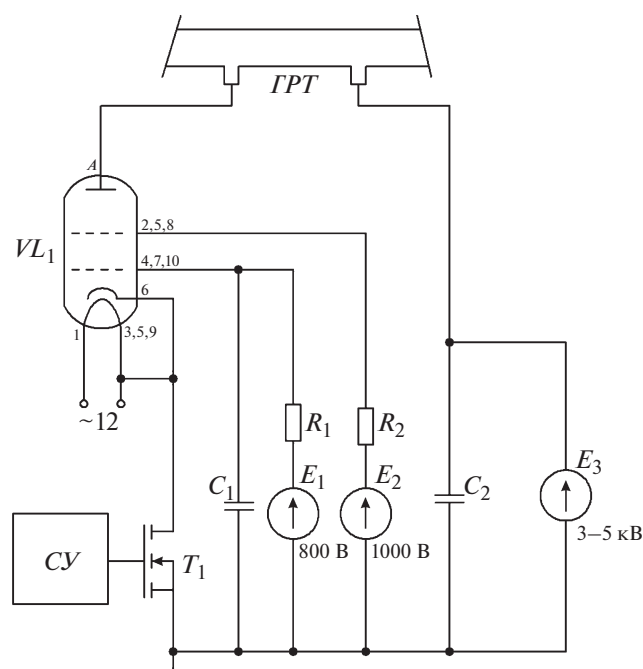
Активные оптические среды на парах металлов находят широкое применение в задачах оптического контроля объектов и процессов в экстремальных условиях, например процессов взаимодействия высококонцентрированных потоков энергии с веществом. Такие системы контроля получили названия лазерный проекционный микроскоп и лазерный монитор [1–5]. Временное разрешение лазерных мониторов определяется скоростью видеорегистратора и частотой работы активной среды усилителя яркости.

На сегодняшний день, максимальные частоты следования импульсов (ч.с.и.) излучения/усиления активных сред на самоограниченных переходах в парах металлов достигают 700 кГц для сред на парах бромида меди [6] и 830 кГц – на парах стронция [7]. В данных работах активные оптические среды работали в режиме генерации, а не усиления сигнала. Работа в режиме сверхсветимости обеспечивает возможность усиления сигнала, несущего изображение наблюдаемого объекта.

Обеспечение эффективной работы в режиме сверхсветимости [8] является сложной задачей.

Это связано, в первую очередь, с необходимостью разработки высокочастотного источника накачки, формирующего импульсы с частотой до 1 МГц и амплитудой до 5 кВ. При этом источник должен обеспечивать режим пониженного энерговклада в разряд, что является необходимым условием повышения частоты работы подобных активных сред [9]. Обеспечение пониженного энерговклада в разряд возможно за счет накачки активной среды импульсами напряжения длительностью порядка 40–60 нс с малым временем нарастания – порядка 8–10 нс. Формирование импульсов возбуждения с указанными параметрами позволило реализовать усилители яркости с ч.с.и. 100 кГц [10, 11]. Дальнейшее повышение ч.с.и. накачки с используемыми в работах [10, 11] источниками питания невозможно.

Традиционные источники накачки строятся с применением газоразрядных приборов, таких как тиратрон и таситрон, максимальная частота работы которых составляет 50 и 100 кГц соответственно [12, 13]. При этом длительность импульсов накачки в таких источниках составляет от 100 нс и выше, что при работе на частотах >100 кГц приводит



**Рис. 1.** Схема высокочастотного источника накачки активных сред на парах металлов. *СУ* – система управления, *ГРТ* – газоразрядная трубка.

к значительному перегреву активной среды за счет ее малых геометрических размеров. Существует ряд разработок полупроводниковых источников накачки, работающих на основе применения типовых трансформаторных ячеек [14–16] или составных полупроводниковых коммутаторов [17]. В первом случае практически невозможно получение высоковольтных импульсов с малым временем нарастания из-за эффектов насыщения трансформаторов [15] в момент пробоя активной среды. Во втором случае необходимо осуществлять весьма сложную настройку схемы с целью обеспечения одновременной коммутации всех полупроводниковых приборов составного коммутатора. Также экспериментальные работы показывают, что получение высоковольтных импульсов малой длительности при использовании составного коммутатора возможно за счет применения ячеек магнитного сжатия, что значительно ограничивает частоту работы источника [17].

Целью данной работы является разработка высокочастотного источника накачки активных сред на самоограниченных переходах в парах металлов, позволяющего осуществлять возбуждение активной среды с ч.с.и. свыше 100 кГц и обеспечивающего режим пониженного энергозатрата в разряд.

Источник накачки для усилителя яркости на парах металлов разработан на основе высоковольтного составного коммутатора. Функцио-

нальная схема источника накачки представлена на рис. 1 [18]. Основным элементом источника является высоковольтный коммутатор с гибридной структурой. В его состав входит модуляторный тетрод ГМИ-27Б ( $VL_1$ ), включенный по схеме с общей сеткой (управляющая сетка по переменной составляющей соединена с общей шиной устройства через фильтрующий конденсатор  $C_1$ ), и высоковольтный MOSFET-транзистор STP20N95K5 ( $T_1$ ), включенный между катодом модуляторной лампы и общей шиной устройства. На управляющую и экранирующую сетки тетрода подаются напряжения положительной полярности 1000 и 800 В соответственно. Напряжение накала лампы составляет 12 В и формируется с помощью сетевого понижающего трансформатора, при этом в схеме накала предусмотрен мягкий запуск.

После включения источника высокого напряжения  $E_3$  происходит заряд накопительной емкости  $C_2$  и всех паразитных емкостей схемы, после чего ток в цепи перестает протекать. При подаче системой управления импульса на затвор силового транзистора полупроводниковый коммутатор открывается, разряжая емкость сетка–катод модуляторной лампы  $VL_1$ . При этом лампа открывается, газоразрядная трубка (*ГРТ*) через открытый коммутатор подключается к общей шине устройства. До тех пор, пока силовой транзистор в катодной цепи модуляторной лампы открыт, через газоразрядную трубку протекает ток. После окончания импульса управления силовой транзистор запирается, потенциал катода модуляторной лампы возрастает, лампа запирается и ток через газоразрядную трубку не протекает. Быстродействие схемы ограничивается скоростью переключения полупроводникового ключа до тех пор, пока время переключения не становится соизмеримо с временем пролета электронов в объеме лампы (единицы наносекунд).

Таким образом, подобная комбинация электровакуумной лампы и полупроводникового ключа позволяет получить надежный и стабильный коммутатор, обладающий высоким быстродействием и малой мощностью, потребляемой схемой управления, а также следующими преимуществами:

1) неравномерное распределение потенциала в гибридной структуре; большая часть анодного напряжения в момент запирающей лампы прикладывается к промежутку сетка – анод, что позволяет использовать относительно низковольтный полупроводниковый коммутатор;

2) анодные и сеточные напряжения – одного знака относительно общего провода и, в принципе, могут быть получены от одного источника питания;

3) для управления коммутатором требуется низковольтный импульс, который может быть

получен от стандартной интегральной микросхемы драйвера;

4) схема источника накачки проста и содержит небольшое количество элементов;

5) поскольку ток короткого замыкания генератора ограничен током эмиссии с катода, при соответствующем выборе полупроводникового ключа схема будет устойчива к режиму короткого замыкания в нагрузке;

6) схема стабильна в режиме холостого хода (или обрыва в цепи нагрузки);

7) схема источника накачки работает в режиме частичного разряда накопительной емкости;

8) поскольку по переменному току управляющая сетка заземлена через фильтрующую емкость, катодная и анодная цепи лампы экранированы друг от друга, что ослабляет действие паразитных обратных связей и соответственно ведет к улучшению быстродействия и уменьшению вероятности самовозбуждения схемы по сравнению со схемой включения лампы с общим катодом.

Экспериментальные исследования источника накачки проводились при использовании газоразрядной трубки, параметры которой следующие: длина нагреваемой зоны ГРТ 40 см; внутренний диаметр ГРТ 0.7 см; ч.с.и. >100 кГц; давление буферного газа (Ne) в ГРТ 30 Торр; напряжение на накопительной емкости  $C_2$  до 3 кВ; температура стенок ГРТ 650°C.

В ходе проведения экспериментов ГРТ помещалась в изолированную печьку, в которой с помощью независимого нагревателя и термопары поддерживалась постоянная температура. Контейнеры с рабочим веществом (бромид меди) также были помещены в изолированные печики с возможностью поддержания и регулирования температуры. Концентрация паров рабочего вещества в ГРТ регулировалась изменением температуры нагревателей.

Регистрация импульсов тока и напряжения проводилась с помощью датчика тока Pearson Current Monitors 8450 и пробника напряжения Tektronix P6015A. Импульсы генерации и сверхизлучения фиксировались с использованием коаксиального фотоэлемента ФК-22. Регистрируемые датчиками сигналы подавались на осциллограф Tektronix TDS 3054C. При проведении экспериментальных исследований источника для накачки активной среды на парах бромида меди в режиме пониженного энерговклада в разряд была получена стабильная генерация как в режиме сверхизлучения, так и в режиме генератора.

На рис. 2 представлены осциллограммы импульсов напряжения на аноде модуляторной лампы  $U_a$ , напряжения на транзисторе  $U_T$  и тока анода  $I_a$  для активной среды, работающей в режиме генератора, с ч.с.и. накачки 420 кГц, а на рис. 3

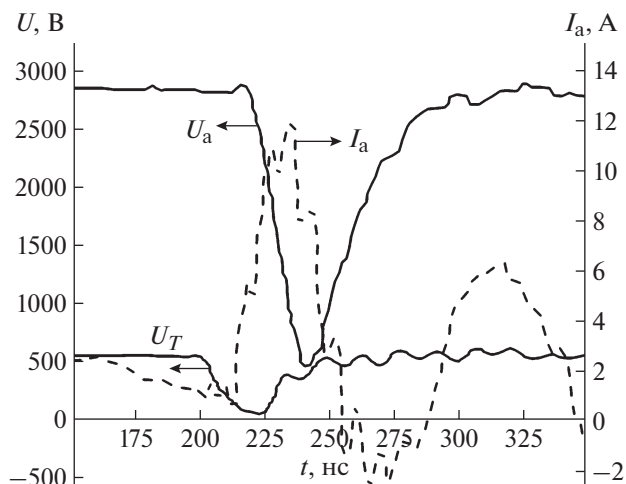


Рис. 2. Экспериментальные осциллограммы импульсов напряжения на аноде модуляторной лампы ( $U_a$ ), напряжения на транзисторе ( $U_T$ ) и тока анода ( $I_a$ ) при ч.с.и. накачки 420 кГц в режиме генератора.

такие же осциллограммы при ч.с.и. накачки 150 и 200 кГц, где активная среда работала в режиме сверхизлучения, т.е. в отсутствие резонатора.

Из осциллограмм видно, что длительность импульса напряжения на аноде лампы, а следовательно, и на газоразрядной трубке составляет порядка 40–50 нс (по полувысоте). За счет такой малой длительности импульса обеспечивается режим пониженного энерговклада в разряд — удельная энергия, вводимая в активную среду, не превышала 100 мкДж/см<sup>3</sup>. Отметим, что с повышением ч.с.и. накачки происходит уменьшение амплитуды тока ГРТ, что связано с недостаточной релаксацией плазмы в межимпульсный период. Также это приводит к ухудшению отпириания модуляторной лампы ( $U_a$  на рис. 3б). Улучшение процесса отпириания модуляторной лампы возможно за счет увеличения напряжения на сетках, однако это будет приводить к росту напряжения на транзисторе, вплоть до вывода его из строя.

Следует отметить, что на сегодняшний день ч.с.и. сверхизлучения 200 кГц является предельной для активных сред на самоограниченных переходах в парах металлов.

При работе источника накачки наиболее уязвимым элементом является транзистор. В частности, уменьшение длины и увеличение диаметра активной зоны ГРТ приводят к значительному изменению проводимости активной среды. При этом амплитуда тока через транзистор может превысить предельно допустимые значения и привести к выходу его из строя. Одним из способов оценки параметров работы схемы является ее моделирование.

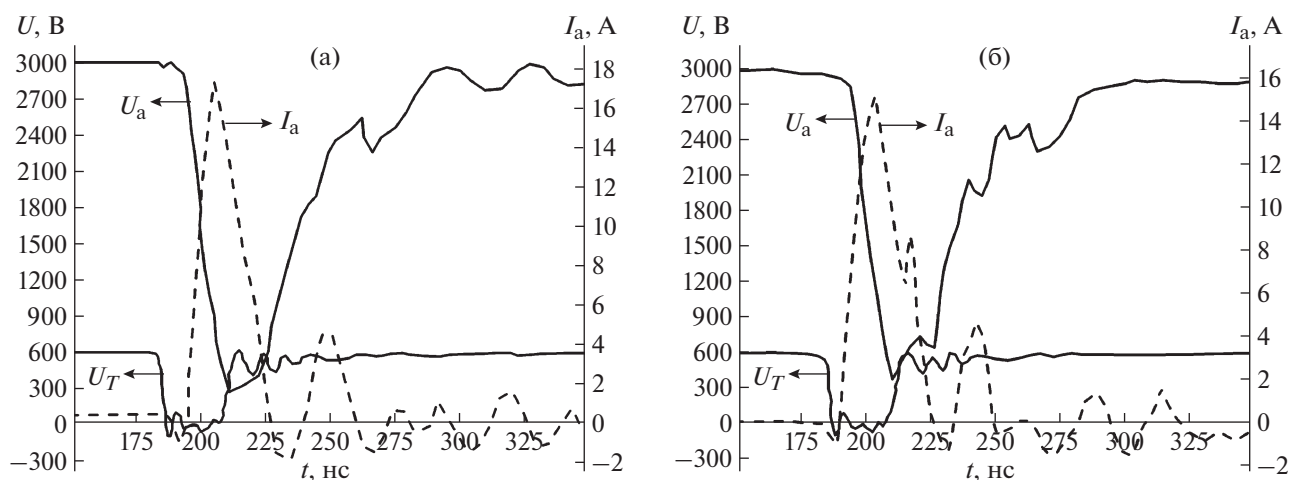


Рис. 3. Экспериментальные осциллограммы импульсов напряжения на аноде модуляторной лампы ( $U_a$ ), напряжения на транзисторе ( $U_T$ ) и тока анода ( $I_a$ ) при различных ч.с.и. накачки в режиме сверхсветимости: 150 кГц (а), 200 кГц (б).

Моделирование источника накачки осуществлялось в программе OrCAD. Для построения адекватной модели была создана Spice-модель вакуумного тетрода ГМИ-27Б. Для этого использовались модель вакуумной лампы и методика выбора ее параметров, описанные в [19]. Разработанная модель ГМИ-27Б использована при моделировании высокочастотного источника накачки (рис. 4), где в качестве коммутатора лампы  $VL_1$  применялась модель

$T_1$  мощного полевого транзистора STP20N95K5 [20]. Кроме того, разработана модель нелинейной нагрузки  $X_1$ , являющейся по сути сопротивлением, управляемым напряжением внешнего источника, в данном случае источника  $V_5$ . Характер изменения тока нагрузки определяется по данным моделирования ГРТ и индивидуален для трубок разного диаметра.

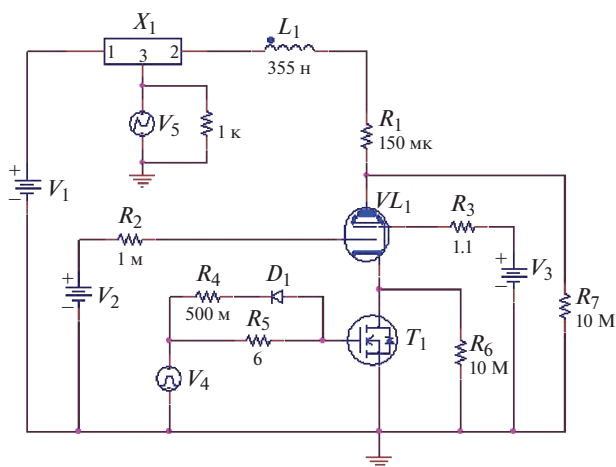
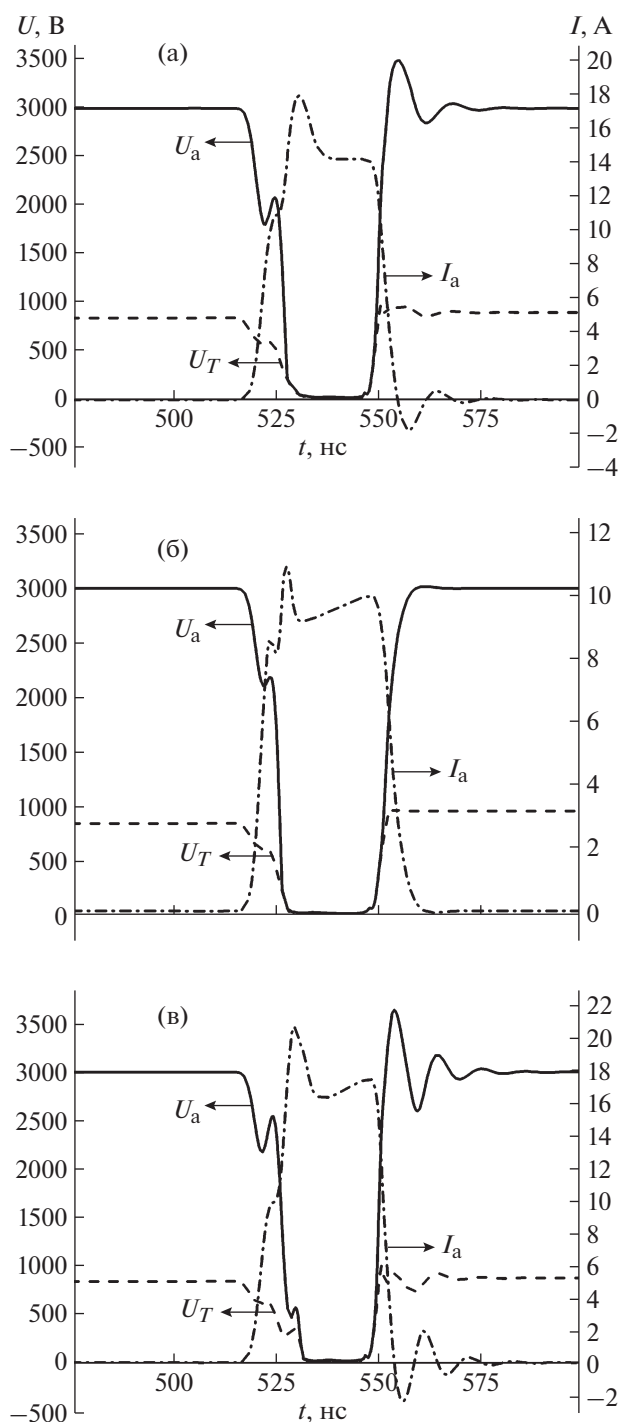


Рис. 4. Схема высокочастотного источника накачки в программе OrCAD.  $T_1$  – STP20N95K5;  $VL_1$  – ГМИ-27Б;  $V_1$  – источник высокого напряжения 3 кВ,  $V_2$  – источник напряжения 800 В,  $V_3$  – источник напряжения 1000 В,  $V_4$  – импульсный источник напряжения (параметры – начальное напряжение  $V_0 = -15$  В, напряжение в импульсе  $V_m = 15$  В, время задержки  $TD = 0.5$  мкс, время нарастания  $TR = 5$  нс, время спада  $TF = 5$  нс, ширина импульса  $PW = 35$  нс, период следования импульсов  $PER = 6.6667$  мкс),  $V_5$  – нелинейный источник напряжения;  $X_1$  – нелинейная нагрузка.

Данные по сопротивлению ГРТ могут быть получены путем использования детального кинетического моделирования активной среды. Кинетическое моделирование представляет собой самосогласованный расчет концентраций всех реагентов плазмы активной среды, температуры электронов и газа. Описание кинетической модели и результатов моделирования подробно представлено в работах [21–23]. Изначально при моделировании в OrCAD задавалось постоянное сопротивление ГРТ, далее полученное напряжение являлось исходным для проведения кинетического моделирования, результатом которого была временная зависимость сопротивления ГРТ в период действия импульса накачки. Полученная зависимость интегрировалась в OrCAD и вновь просчитывался импульс накачки. Итерации продолжались до тех пор, пока разность между напряжениями в кинетической и OrCAD моделях не становилась  $< 2\%$ .

Источник постоянного напряжения  $V_1$  моделирует выход источника высокого напряжения 3 кВ, источник  $V_2$  обеспечивает напряжение 800 В для управляющей сетки, источник  $V_3$  – напряжение 1000 В для экранирующей сетки. Полярность напряжений на обеих сетках тетрода является положительной, но анодный ток будет протекать через лампу только после отпирания силового транзистора  $T_1$ . Резистор  $R_5$  ограничивает отпирательный ток затвора, а для уменьшения времени выключе-



**Рис. 5.** Временные диаграммы напряжения на аноде модуляторной лампы ( $U_a$ ), напряжения на транзисторе ( $U_T$ ) и тока анода ( $I_a$ ) для различных ГРТ и ч.с.и. накачки: а – длина активной зоны 40 см,  $\varnothing 7$  мм, ч.с.и. 150 кГц; б – 30 см,  $\varnothing 6$  мм, 150 кГц; в – 30 см,  $\varnothing 6$  мм, 100 кГц.

ния силового транзистора в его затворную цепь введены резистор  $R_4$  и диод  $D_1$ . Импульсы управления силовым транзистором формируются импульсным источником  $V_4$ . Резисторы  $R_1$ – $R_3$ ,  $R_6$ ,  $R_7$  моде-

лируют потери в схеме, помогают процессу расчета, обеспечивая сходимость и не оказывая существенного влияния на результаты моделирования.

Моделирование источника накачки проводилось для двух ГРТ различных размеров: с длиной активной зоны 40 и 30 см и диаметром 6 и 7 мм. Предварительно модель была верифицирована в сравнении с экспериментальными данными, полученными для ГРТ диаметром 7 мм. Погрешность не превысила 10%, что сделало возможным анализировать процессы в источнике накачки при работе на ГРТ других габаритных размеров. Результаты моделирования приведены на рис. 5.

Представленная на рис. 5а рассчитанная диаграмма тока достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными (рис. 3). Диаграммы на рис. 5 показывают возможность оценки поведения источника накачки при моделировании ГРТ не только с длиной активной зоны 30 см и  $\varnothing 6$  мм, но и другими размерами без необходимости проведения натурального эксперимента.

Представленный в работе источник накачки активных сред на самоограниченных переходах в парах металлов позволяет осуществлять накачку с частотой следования выходных импульсов свыше 100 кГц. Использование данного источника позволило получить рекордную на сегодняшний день частоту следования импульсов излучения в активной среде в парах бромида меди – 200 кГц в режиме сверхсветимости. Разработанная модель позволяет проверять работоспособность источника накачки при различных нагрузках (ГРТ различных размеров) и определить основные параметры для выбора элементов его принципиальной схемы, в частности силового транзистора. Проведение подобных исследований экспериментально весьма сложно и затратно, в том числе из-за необходимости изготовления нескольких газоразрядных трубок.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа по разработке высокочастотного источника возбуждения функциональных преобразователей оптических сигналов выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-79-10096), по изготовлению активных элементов и проведению экспериментов выполнена в рамках государственных заданий Института оптики атмосферы СО РАН (№ АААА-А17-117021310150-0) и Министерства науки и высшего образования России (№ 730000Ф.99.1БВ 15АА00003).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оптические системы с усилителями яркости: Труды ФИАН / Под ред. Г.Г. Петраша. М.: Наука, 1991. Т. 206.
2. Evtushenko G.S., Trigub M.V., Gubarev F.A., Evtushenko T.G., Torgaev S.N., Shiyonov D.V. // Rev. Scient. In-

- strum. 2014. V. 85. Issue 3. Article number 033111. P. 1. <https://doi.org/10.1063/1.4869155>
3. *Kuznetsov A.P., Buzhinskij R.O., Gubskii K.L., Savojlov A.S., Sarantsev S.A., Terekhin A.N.* // Plasma Phys. Reports. 2010. V. 36. № 5. P. 428.
  4. *Buzhinskij O.I., Vasiliev N.N., Moshkunov A.I., Slivitskaya I.A., Slivitsky A.A.* // Fusion Eng. Des. 2002. V. 60. № 2. P. 141. <https://doi.org/10.1134/S1063780X10050090>
  5. *Abramov D.V., Arakelian S., Galkin A.F., Klimovskii I.I., Kucherik A., Prokoshev V.G.* // Laser Phys. 2005. V. 15. № 9. P. 1313.
  6. *Nekhoroshev V.O., Fedorov V.F., Evtushenko G.S., Torgaev S.N.* // Quantum Electronics. 2012. V. 42. № 10. P. 877. <https://doi.org/10.1070/QE2012v042n10ABEH014897>
  7. *Солдатов А.Н., Юдин Н.А., Полунин Ю.П., Васильева А.В., Костыря И.Д., Колмаков Е.А.* // Квантовая электроника. 2012. Т. 42. № 2. С. 31.
  8. *Васнев Н.А., Тригуб М.В., Евтушенко Г.С.* // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 03. С. 247. <https://doi.org/10.15372/AOO20190310>
  9. *Boichenko A.M., Evtushenko G.S., Nekhoroshev V.O., Shiyarov D.V., Torgaev S.N.* // Phys. Wave Phenomena. 2015. V. 23. Issue 1. P. 1. <https://doi.org/10.3103/S1541308X1501001X>
  10. *Trigub M.V., Shiyarov D.V., Vlasov V.V.* // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. 2014. P. 301. <https://doi.org/10.1109/EDM.2014.6882534>
  11. *Trigub M.V., Evtushenko G.S., Torgaev S.N., Shiyarov D.V., Evtushenko T.G.* // Opt. Commun. 2016. V. 376. P. 81. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2016.04.039>
  12. *Губарев Ф.А., Суханов В.Б., Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С.* // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21. № 1. С. 85.
  13. *Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С., Суханов В.Б., Федоров В.Ф.* // Квантовая электроника. 2002. Т. 32. № 8. С. 680.
  14. *Суханов В.Б., Татур В.В.* // Изв. Том. политехн. ун-та. 2008. Т. 312. № 2. С. 108.
  15. *Torgaev S.N., Trigub M.V., Gubarev F.A.* // Micro/Nanotechnologies and Electron Devices: International Conference and Seminar 30 June–4 July 2011. P. 411. <https://doi.org/10.1109/EDM.2011.6006984>
  16. *Evtushenko G.S., Kashaev V.Yu., Parshina N.V., Sukhanov V.B., Tatur V.V., Trifonov A.N., Fedorov V.F.* // Atmospheric and oceanic optics. 2000. V. 13. № 3. P. 265.
  17. *Иванов Е.В., Мошкунев С.И., Хомич В.Ю.* // ПТЭ. 2006. № 1. С. 88.
  18. *Торгаев С.Н., Евтушенко Г.С., Ярославцев Е.В., Нехорошев В.О., Мусоров И.С., Тригуб М.В.* Патент на изобретение 2672180 РФ // Оpubл. 12.11.2018. Бюл. № 31.
  19. *Zheng S., Keane J.* <https://www.bnl.gov/isd/documents/79916.pdf>
  20. STMicroelectronics – N-channel 950 V, 0.275 Ohm тип., 17.5 A MDmesh K5 Power MOSFET in a TO-220 package. <https://www.st.com/en/power-transistors/stp20n95k5.html>
  21. *Кулагин А.Е., Торгаев С.Н., Евтушенко Г.С., Тригуб М.В.* // Изв. вузов. Физика. 2017. Т. 60. № 11. С. 122.
  22. *Evtushenko G.S., Torgaev S.N., Trigub M.V., Shiyarov D.V., Evtushenko T.G., Kulagin A.E.* // Opt. Commun. 2017. V. 383. P. 148. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2016.09.001>
  23. *Torgaev S.N., Kulagin A.E., Evtushenko T.G., Evtushenko G.S.* // Opt. Commun. 2019. V. 440. P. 146. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2019.01.061>