

# CuBr + Ne + HBr-лазер с полупроводниковым источником возбуждения

К.Ю. Семенов

*Институт оптики атмосферы СО РАН  
634055, Томск, Россия, пл. Академика Зуева, 1  
Томский политехнический университет  
634050, Томск, Россия, пр. Ленина 30, kys6@tpu.ru*

Целью настоящего исследования является согласование работы полупроводникового источника на основе LTD-технологии с активным элементом на парах бромида меди, оснащенного генератором электроотрицательной добавки HBr. Согласование производилось путем подбора величины обостряющего конденсатора, подключенного параллельно электродам активного элемента, и повышающего автотрансформатора, установленного между источником и активным элементом.

*Ключевые слова:* LTD, ЛПГМ, обостряющий конденсатор, автотрансформатор; LTD, copper halide vapor laser, peaking capacitor, autotransformer.

## Введение

Активные среды на парах металлов [1, 2] являются эффективным инструментом для построения лазерных активных оптических систем визуализации как в видимом, так и в ближнем ИК-диапазонах спектра. Благодаря этому они находят широкое применения в области визуально-оптического неразрушающего контроля [3], а также при исследовании различных физических явлений в области взаимодействия высококонцентрированных потоков энергии с веществом [4]. Возможности внедрения таких систем ограничены в виду сложности и относительно низкой эффективности лазеров и усилителей яркости на парах галогенидов металлов. В первую очередь это обусловлено низкой эффективностью возбуждения активной среды. Рассмотрим некоторые особенности возбуждения.

Эффективность газоразрядной накачки лазеров на самоограниченных переходах металлов зависит от способности источника быстро вводить энергию в активную среду [5, 6]. Для лазеров на переходах атомов меди типичная длительность импульса генерации лежит в диапазоне 20–60 нс [7]. По этой причине нецелесообразно использовать длинные импульсы накачки, т.к. после конца импульса генерации энергия накачки будет расходоваться на тепло. Средняя практическая эффективность накачки таких лазеров 1–2%, типичный диапазон частоты следования импульсов (ЧСИ) 4–50 кГц. Для случая 1% и 10 кГц потребуются источник с энергией импульса накачки 0,1 Дж для получения средней мощности генерации 10 Вт. При длительности накачки 100 нс произведение напряжения на ток накачки составит  $10^6$  ВЧА. Такие жесткие требования к импульсам накачки определили и способ их формирования, а именно коммутация накопительной емкости на газоразрядный промежуток с помощью мощного коммутатора (рис. 1, а). Для повышения эффективности используются схемы обострения фронта импульса накачки [7]. В простейшем случае для минимизации влияния индуктивности разрядного контура (К–С–ГРТ–К) параллельно электродам устанавливается низкоиндуктивный обостряющий фронт тока конденсатор  $C_{об}$  (рис. 1, б). Для согласования медленно коммутирующегося ключа или для более радикального повышения эффективности накачки используются схемы с магнитными ключами (рис. 1, в): МК1 снижает потери в ключе К во время заряда С1, МК2 формирует быстрый импульс разряда С1 на  $C_{об}$  и ГРТ.

Коммутаторы К выбираются в зависимости от параметров возбуждения лазерной системы (ЧСИ, средняя мощность). Так, например, в [8] было проведено исследование по накачке лазеров на самоограниченных переходах атомов металлов в наиболее широком диапазоне ЧСИ – от 10 до 250 кГц. В качестве коммутатора был использован таситрон, а разрядный контур был выполнен аналогично рис. 1, а, т.е. без каких-либо цепей коррекции формы импульса накачки. При использовании ГРТ объемом 0,4 литра (диаметр активной зоны 2,6 см и длина 76 см) авторами была получена рекордная мощность при ЧСИ 50 кГц для непрокачиваемых лазеров в 11 Вт (КПД 0,7%).

В [9] описан похожий эксперимент по исследованию величины максимальной мощности генерации прокачиваемого лазера в диапазоне ЧСИ от 5 до 100 кГц. В качестве коммутатора использовался тиратрон. В отличие от [8] разрядный контур использовал обострительный конденсатор и магнитные ключи по аналогии с рис. 1в, но в количестве двух последовательных цепей сжатия. При использовании прокачиваемой ГРТ объемом 0,3 литра (диаметр активной зоны 2,5 см и длина 61 см) был получен абсолютный рекорд средней мощности излучения при ЧСИ 50 кГц, составивший 35 Вт (КПД 1,17% исходя из описания).

Альтернативой газонаполненным коммутаторам является высоковольтный полупроводниковый коммутатор. Так, например, составной коммутатор из 20 IGBT (также вместо него использовался тиратрон) применялся для накачки самого мощного одиночного лазера и МОРА системы [10]. Для повышения эффективно-

сти использовались две последовательные цепи магнитных ключей с промежуточным повышающим трансформатором. В режиме усилителя с ГРТ объемом 22 литра (диаметр 9 см и длина 350 см) была получена мощность 650 Вт при ЧСИ 4,4 кГц (КПД исходя из мощности в описании 0,9–1,3%). Также в этой работе описана самая мощная (2400 Вт излучения) лазерная установка из ЛПМ.

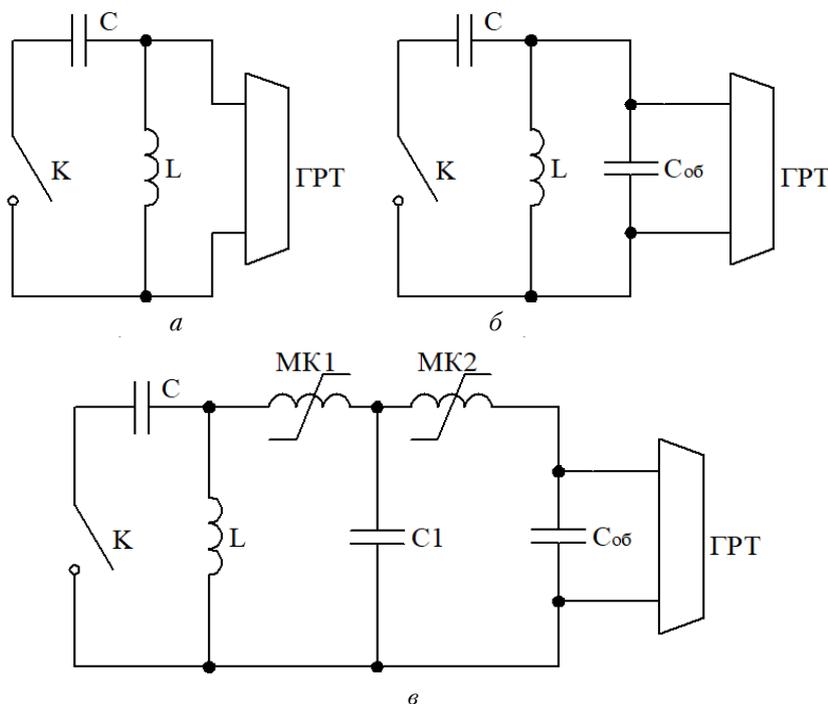


Рис. 1. Схемы формирования импульсов накачки лазеров на самоограниченных переходах атомов металлов

Низковольтный полупроводниковый коммутатор может представлять собой как отдельный мощный электронный ключ (тиристор, транзистор и т.п.), так и их параллельное включение, но требует значительного повышения напряжения при помощи импульсного трансформатора. Наибольшая мощность генерации при накачке от источника с низковольтным полупроводниковым коммутатором была получена с ЧСИ 5 кГц на саморазогревной прокачиваемой ГРТ объемом 15,1 л (диаметр 8 см и длина 300 см) и составила 312 Вт (КПД 1,42%) [11]. Наибольшая мощность генерации при накачке от низковольтного полупроводникового коммутатора в непрокачиваемой ГРТ была получена с ЧСИ 19 кГц на ГРТ объемом 0,157 литра (диаметр 2 см и длина 50 см) и составила 8 Вт (КПД 0,9%) [12]. В [11,12] для повышения эффективности также использовались две последовательные цепи магнитных ключей. Максимальная ЧСИ генерации с низковольтным полупроводниковым коммутатором была показана в [13] и составила 150 кГц с ГРТ объемом 0,023 литра (диаметр 1,2 см и длина 20 см), мощность генерации была 0,65 Вт (КПД 0,12%). Схема разрядного контура не имела элементов коррекции фронта импульса, т.е. была аналогична рис. 1а.

Наиболее новая технология формирования коротких высоковольтных импульсов большой мощности – использование технологии linear transformer driver (LTD), которая имеет ряд существенных достоинств. Во-первых, все полупроводниковые коммутаторы расположены одним электродом на «земле» и сигналы управления ими формируются относительно «земли», что значительно упрощает схемотехнику драйверов. Во-вторых, для достижения типовых уровней напряжения (5–30 кВ) достаточно использовать широко распространенные недорогие полупроводниковые транзисторы на 650–1700 В. В-третьих, за счет конструкции модуля и способа их соединения обеспечивается крайне высокий уровень тока нагрузки и крайне быстрый вывод энергии из накопительных емкостей в нагрузку, т.е. короткий передний фронт импульса возбуждения. Одна из первых вариаций источника накачки лазеров на самоограниченных переходах атомов металлов по LTD-технологии с несколькими модулями была описана нами в [14]. При ЧСИ 50 кГц с ГРТ объемом 0,115 л (диаметр 1,8 см, длина 45 см) была получена мощность генерации 1,3 Вт (КПД 0,14%).

### Экспериментальный макет

Для повышения эффективности накачки относительно [14] был разработан новый источник на основе LTD-технологии, который отличался повышенным выходным напряжением с 6 кВ до 12 кВ на активную нагрузку. Новый источник обеспечивает ЧСИ накачки 50 кГц и среднюю мощность накачки 0,9 кВт. Особенность источников на основе LTD-технологии – трансформаторный выход. Для минимизации размеров и индуктивности рассеяния трансформаторы были выполнены с минимально допустимым объемом магнитопровода. Такое решение потребовало хорошего согласования источника с ГРТ для быстрого разряда накопительной емкости на ГРТ. Для чего была реализована схема (рис. 2), аналогичная рис. 1, а.

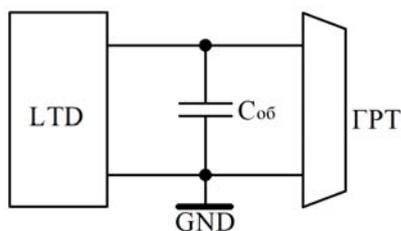


Рис. 2. Схема подключения источника к ГРТ

В исследовании использовался CuVg активный элемент с внутренними электродами, длиной активной зоны 45 см, диаметром 1,8 см, оснащенный внешним нагревателем активной зоны, встроенным генератором электроотрицательной добавки Hg и независимым нагревом контейнеров с рабочим веществом (CuVg), расположенных вдоль активной зоны. Давление неона 30 торр. Так как ГРТ имеет индуктивную реакцию, для согласования использовался обострительный конденсатор, емкость которого выбиралась исходя из наибольшей амплитуды импульса напряжения на ГРТ (рис. 3), бесколебательной формы тока (рис. 4) и из наименьшей температуры выходных трансформаторов LTD. Осциллограммы (рис. 3 и 4) получены при разряде в чистом неоне с несущественным остаточным содержанием Hg при средней мощности накачки 0,6 кВт. Исследовалась работа с обострительными емкостями: 0 пФ (т.е. без емкости), 22 пФ, 44 пФ, 66 пФ, 100 пФ, 144 пФ и 200 пФ.

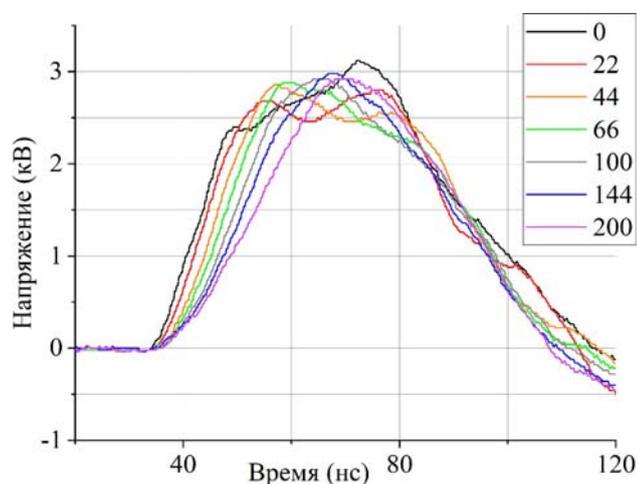


Рис. 3. Напряжение на ГРТ, в легенде приведена емкость обострительного конденсатора в пикофарадах

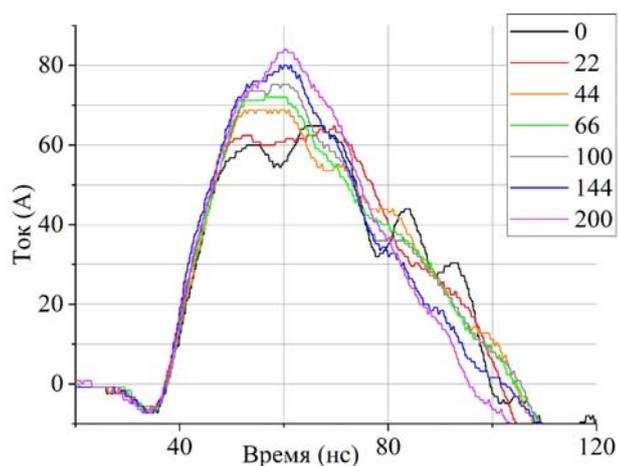


Рис. 4. Выходной ток LTD, в легенде приведена емкость обострительного конденсатора в пикофарадах

Из рисунка 3 и 4 видно, что начиная с величины емкости 66 пФ пропадают колебания высших гармоник на фоне основного импульса накачки. Емкость 144 пФ и 200 пФ приводят к чрезмерному затягиванию фронта импульса напряжения. Поэтому исходя из осциллограмм оптимальное значение обостряющей емкости 66 пФ и 100 пФ. Минимальная температура выходных трансформаторов LTD была зафиксирована при емкости 100 пФ и 144 пФ, максимальная при отсутствии емкости. Исходя из проведенного анализа была выбрана емкость обострительного конденсатора 100 пФ.

## Параметры лазерной системы

При мощности накачки 0,9 кВт и ЧСИ 50 кГц была получена средняя мощность генерации 6,0–6,5 Вт, мощность однопроходного излучения 3 Вт и сверхсветимости 0,6 Вт. Давление паров CuBr и HBr подбирались эмпирически исходя из максимума мощности излучения.

### Дополнительная модификация разрядного контура

При максимальной мощности генерации после основного импульса накачки наблюдался отрицательный выброс напряжения на ГРТ. Было выдвинуто предположение, что повышения выходного напряжения источника позволит улучшить согласование источника с активным элементом и снизить выброс. Для повышения напряжения на ГРТ был использован автотрансформатор с коэффициентом повышения напряжения 1,5 (рис. 5).

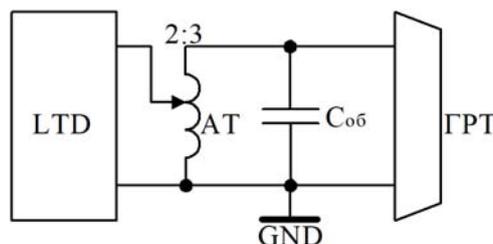


Рис. 5. Схема с повышающим автотрансформатором

Автотрансформатор выполнен из 5 магнитомягких сердечников  $R102 \times 65.8 \times 15$ . Первичная обмотка состояла из 4 витков, вторичная из 6 витков. Для корректной работы системы обостряющий конденсатор был пересчитан по формуле:

$$C_{об}' = C_{об} \cdot \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 = 100 \text{ пФ} \cdot \left(\frac{4}{6}\right)^2 \cong 44 \text{ пФ}.$$

Во время экспериментов с целью согласования источника с ГРТ было повышено давление HBr для увеличения напряжения на электродах с 7–8 до 9–10 кВ, ток через ГРТ остался на том же уровне 60–70 А. Выброс отрицательного напряжения после импульса накачки был устранен. Однако мощность генерации составила те же 6,0–6,5 Вт. Таким образом, дополнительное повышение напряжения без повышения мощности не дало повышения эффективности накачки, что говорит о хорошем согласовании выходных параметров источника с активным элементом.

## Заключение

В работе приведены результаты испытаний полупроводникового источника накачки, выполненного по новой для этой отрасли LTD-технологии, для лазеров на самоограниченных переходах атомов металлов. Подробно описан процесс согласования источника с активным элементом при помощи обостряющих ток конденсаторов и повышающего автотрансформатора. При мощности накачки 0,9 кВт получена мощность генерации 6,5 Вт при ЧСИ 50 кГц, длине активной зоны ГРТ 45 см и диаметром 1,8 см.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность коллективу ЛКЭ ИОА СО РАН за помощь в обсуждении результатов, научному руководителю д.т.н. Тригубу М.В. за формулировку задачи и помощь при подготовке статьи.

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке госбюджета ИОА СО РАН.

## Список литературы

1. Trichili A., Park K.-H., Zghal M., Ooi B.S., Alouini M.-S. Communicating using spatial mode multiplexing: potentials, challenges and perspectives // IEEE Commun. Surveys & Tutorials. 2019. V. 21, N 4. P. 3175–3202. DOI: 10.1109/COMST.2019.2915981.
2. Kupferman J., Arnon Sh. Direct detection receiver for vortex beam // J. Opt. Soc. Am. A. 2018. V. 35, N 9. P. 1543–1547. DOI: 10.1364/JOSAA.35.001543.
3. Shao W., Huang S., Liu X., Chen M. Free-space optical communication with perfect optical vortex beams multiplexing // Opt. Commun. 2018. V. 427. P. 545–550. DOI: 10.1016/j.optcom.2018.06.079.
4. Guo Z., Wang Z., Dedo M.I., Guo K. The orbital angular momentum encoding system with radial indices of Laguerre-Gaussian beam // IEEE Photon. J. 2018. V. 10, N 5. 7906511. DOI: 10.1109/JPHOT.2018.2859807.
5. Wang Z., Zhang N., Yuan X.-C. High-volume optical vortex multiplexing and de-multiplexing for free-space optical communication // Opt. Express. 2011. V. 19, N 2. P. 482–492. DOI: 10.1364/OE.19.000482.

6. Gu Y. Statistics of optical vortex wander on propagation through atmospheric turbulence // J. Opt. Soc. Am. A. 2013. V. 30, N 4. P. 708–716. DOI: 10.1364/JOSAA.30.000708.
7. Yang J., Zhang H., Zhang X., Li H., Xi L. Transmission characteristics of adaptive compensation for joint atmospheric turbulence effects on the OAM-based wireless communication system // Appl. Sci. 2019. V. 9, N 5. 901. DOI: 10.3390/app9050901.
8. Chen M., Dholakia K., Mazilu M. Is there an optimal basis to maximize optical information transfer? // Sci. Rep. 2016. V. 6. 22821. DOI: 10.1038/srep22821.
9. Eyyuboglu H.T. Optical communication system using Gaussian vortex beams // J. Opt. Soc. Amer. A. 2020. V. 37, N 10. P. 1531–1538. DOI: 10.1364/JOSAA.400899.
10. Лукин И.П. Когерентность бessel-гауссовых пучков, распространяющихся в турбулентной атмосфере // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 8. С. 672–681; Lukin I.P. Coherence of Bessel-Gaussian beams propagating in a turbulent atmosphere // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 1. P. 49–59. DOI: 10.1134/S1024856018010098.
11. Lukin I.P., Lukin V.P. Propagation of a partially coherent Bessel-Gaussian beam in a uniform medium and turbulent atmosphere // Photonics. 2024. V. 11, N 6. 562. DOI: 10.3390/photonics11060562.
12. Chen C., Yang H., Tong S., Lou Y. Changes in orbital-angular momentum modes of a propagated vortex Gaussian beam through weak-to-strong atmospheric turbulence // Opt. Express. 2016. V. 24, N 7. P. 6959–6975. DOI: 10.1364/OE.24.006959.
13. Andrews L.C., Phillips R.L. Laser beam propagation through random media. Second edition. Bellingham, Washington: SPIE Press, 2005. 783 p. DOI: 10.1117/3.626196.

*K. Yu. Semenov. CuBr + Ne + HBr laser with semiconductor excitation source.*

The aim of this work is to match the LTD-based semiconductor power source with the CuBr + Ne + HBr active element. The matching was performed by selecting the appropriate value of the peaking capacitor connected in parallel with the active element and by installing the step-up autotransformer between the power source and the active element.