

ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

doi: 10.51639/2713-0568_2023_3_2_4

УДК 621.373.826

ГРНТИ 29.33.15

ВАК 1.3.19

Лазер на парах меди с ёмкостным способом возбуждения

^{*1} Шиянов Д. В., ² Евтушенко Г. С.

¹ *Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН*
634055, Россия, г. Томск, пл. Академика Зуева 1

² *Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы,*
127055, Россия, г. Москва, ул. Образцова 12 к.2

e-mail: * siyanov73@mail.ru, evt@tpu.ru

Показана возможность использования продольного ёмкостного разряда для эффективной накачки лазеров на парах чистых металлов по аналогии с лазерами на парах галогенидов металлов. На примере лазера на парах меди в газоразрядных трубках с малым объёмом рабочей зоны – 8,3 и 20 см³ реализованы мощности генерации 1,5 и 2,6 Вт на частотах следования импульсов 55 и 35 кГц, соответственно. Отмечается, что простота конструкции активных элементов и упрощенная схема накачки с возможностью работать на более высоких ЧСИ делают такие лазеры привлекательными.

Ключевые слова: лазер на парах меди, ёмкостная накачка, частота следования импульсов, мощность накачки.

Введение

Высокочастотный ёмкостной (ВЧЕ) разряд широко применяется для травления, нанесения покрытий, плазмохимической обработки поверхностей при производстве изделий электроники и микроэлектроники [1–3] и т. д. Кроме этого, перспективной областью применения является возбуждение рабочих сред эксилламп [4], СО₂-лазеров [1, 2] и ионных лазеров на парах металлов [5, 6].

Высокочастотным считается разряд в диапазоне примерно от 1 до 100 МГц [1]. В настоящее время для накачки лазеров на парах галогенидов металлов успешно используется разновидность ВЧЕ разряда – продольный ёмкостной барьерный разряд с частотами следования 10...50 кГц [7–12]. Интерес к повышению ЧСИ обусловлен как фундаментальными исследованиями [13, 14], так и практическими возможностями использования высокочастотных сред в задачах визуально-оптической диагностики [15, 16].

Несмотря на то, что из-за наличия барьера такие лазеры уступают по эффективности своим аналогам со стандартной накачкой с внутренними электродами, такой способ возбуждения имеет свои преимущества. Значительно упрощается конструкция газоразрядной трубки (ГРТ) и схема накачки, а также облегчаются условия работы коммутатора – тиратрона. Изоляция электродов от активной среды снижает степень их

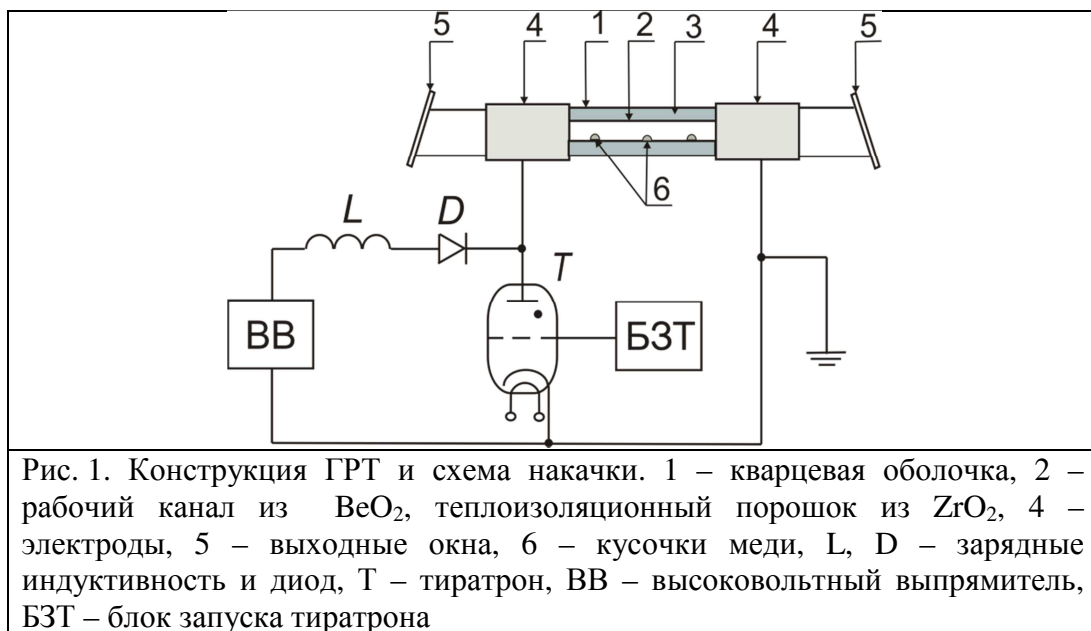
разрушения за счёт отсутствия контакта с химическими реагентами плазмы. Тем самым увеличивается срок службы ГРТ.

В связи с этим, представляет интерес дальнейших исследований данного способа накачки лазеров на парах металлов, в частности на парах чистых металлов.

Впервые возможность применения такого разряда для возбуждения лазера на парах меди показана нами в [17]. В представленной работе продолжены исследования частотно-энергетических характеристик лазеров на парах меди с ёмкостной накачкой.

Техника эксперимента

В работе исследования проведены с двумя ГРТ с диаметром канала 6, 8 мм и длиной 295 и 400 мм, соответственно (с объёмом активной зоны $V = 8,3$ и 20 см^3). Конструкция этих ГРТ типична для саморазогревных лазеров на парах металлов. На рис. 1 приведены как конструкция исследуемых ГРТ, так и схема накачки. Рабочий канал из окиси бериллия 1 размещался в центре кварцевой трубки 2. Между керамической и кварцевой трубками располагался теплоизолятор 3. Отличительная особенность этой конструкции заключалась в том, что электроды 4, выполненные из фольги ниобия, размещались поверх кварцевой оболочки на торцах ГРТ. Их собственная ёмкость являлась рабочей накопительной. Для первой ГРТ изменялся диаметр внешней кварцевой оболочки, что позволяло наряду с изменением длины электрода изменять величину рабочей ёмкости. В качестве коммутаторов в схеме накачки с резонансным зарядом использовались тиратрон ТГИ1-1000/25 и таситрон ТГУ1-1000/25.



Резонатор лазера состоял из глухого зеркала с алюминиевым покрытием и выходного зеркала, представляющего собой кварцевую пластинку. Суммарная мощность генерации регистрировалась измерителем мощности Ophir 20C-SH. С помощью фильтров СЗС-23 и ОС-16 выделялись зеленая и желтая компоненты спектра излучения. С помощью фотоэлементов ФК-19 регистрировалась форма импульса генерации.

Измерение электрических характеристик разряда осуществлялось с помощью датчика тока Pearson Current Monitor 8450, датчика напряжения Tektronics P6015A и осциллографа LeCroy WJ-324.

Результаты эксперимента

Исследования генерационных характеристик описанных ГРТ проведены в зависимости от давления буферного газа неона, частоты следования импульсов (ЧСИ) и мощности накачки. Результаты показали, что рабочее значение давления буферного газа составляет типичную для этого класса лазеров величину 20...30 торр. Стоит отметить, что типичные ЧСИ, когда достигается максимальная мощность излучения для лазеров на парах меди с внутренними электродами и малым объемом не превышает 20 кГц [18–20]. Вместе с тем можно сформировать режим возбуждения, например, при пониженных давлениях буферного газа, когда оптимальные частоты могут превысить 50 кГц [21]. Для наших ГРТ оптимальное значение частоты (по максимуму выходной мощности излучения) составило 55 кГц ($V = 8,3 \text{ см}^3$) и 35 кГц ($V = 20 \text{ см}^3$). Это может быть связано с тем, что в барьерном разряде, необходимый по накачке энергозатрат (при работе с малыми накопительными емкостями) достигается на более высоких частотах. При оптимальных значениях давления Ne и ЧСИ увеличение мощности накачки до 1,39 кВт для ГРТ с объемом $8,3 \text{ см}^3$ позволило получить мощность излучения 1,5 Вт. На рис. 2 показана зависимость выходной мощности лазера при увеличении ЧСИ, сопровождающееся повышением тока и, следовательно, мощности накачки.

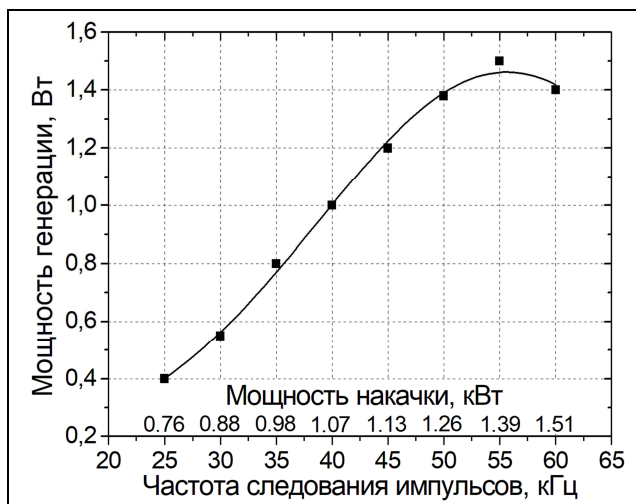


Рис. 2. Зависимость мощности излучения ГРТ диаметром 6 мм при напряжении источника питания 6,3 кВ от ЧСИ

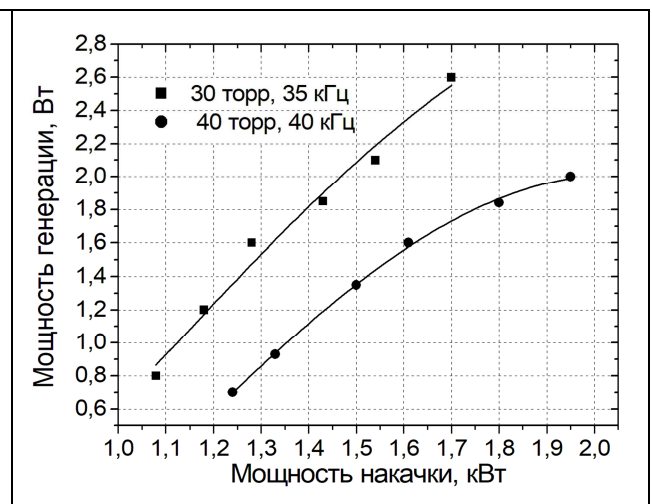


Рис. 3. Мощность генерации для ГРТ диаметром 8 мм в зависимости от мощности накачки для давлений неона 30, 40 торр и частотах 35 и 40 кГц

Для ГРТ с объемом 20 см^3 при мощности возбуждения 1,7 кВт выходная мощность достигла 2,6 Вт. При этом с увеличением мощности накачки рост мощности генерации происходил линейно. Зависимости для этого случая приведены на рис. 3.

Величину каждой электродной ёмкости можно оценить, рассматривая электроды как цилиндрические конденсаторы:

$$C_e = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon h}{\ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right)},$$

где D_2 – внешний диаметр электрода, $D_1 = D_2 - 2d$ – внутренний диаметр электрода, d – толщина стенки кварцевой трубки, h – ширина электрода, ϵ – диэлектрическая

проницаемость кварца ($\varepsilon \approx 4$). Поскольку в используемой конфигурации ёмкости катода и анода равны, и они соединены последовательно, то рабочая ёмкость $C_{раб} = C_{\phi}/2$. Для наших ГРТ рабочие ёмкости могли варьироваться от 100 до 300 пФ.

Регистрация электрических импульсов на ГРТ показала, что, как и в лазерах на парах галогенидов металлов с ёмкостной накачкой, после пробоя разрядного промежутка начинается заряд электродных ёмкостей, и в это время происходит генерация. Длительность импульса генерации, как и в стандартных лазерах составляла 15...20 нс. На рис. 4 приведены типичные импульсы тока, напряжения и генерации для ГРТ с объёмом 20 см^3 .

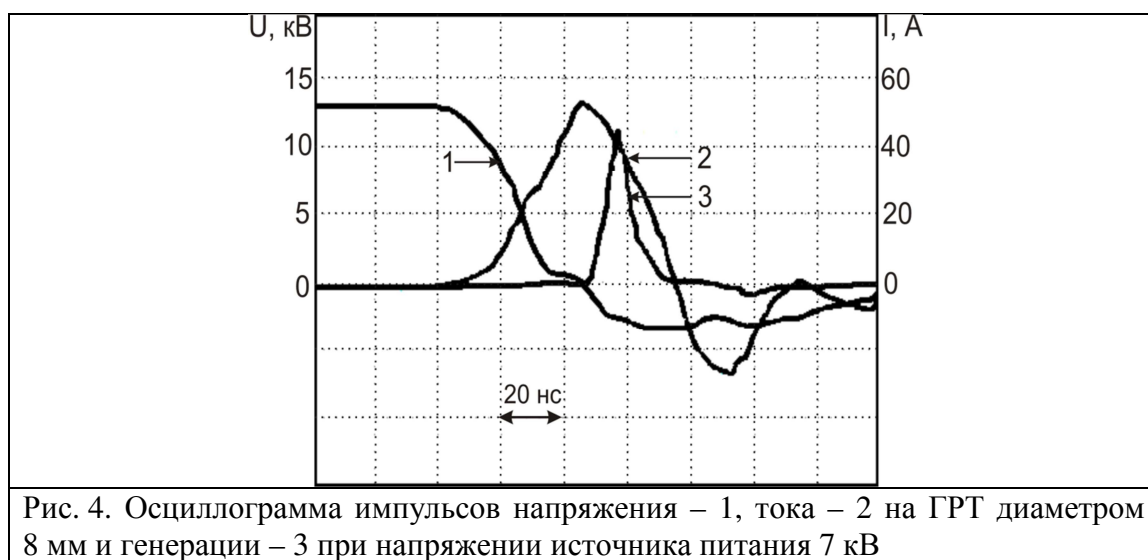


Рис. 4. Осциллограмма импульсов напряжения – 1, тока – 2 на ГРТ диаметром 8 мм и генерации – 3 при напряжении источника питания 7 кВ

Оптимальные значения рабочих ёмкостей C_e для исследуемых активных элементов составили 120 пФ для ГРТ диаметром 6 мм и 250 пФ для ГРТ диаметром 8 мм. При этом КПД наших лазеров достигал 0.1-0.15%, что уступает аналогам с внутренними электродами. Однако стоит отметить, что для стандартных ЛПМ с внутренними электродами с малым объёмом активной зоны (от 4 до 30 см^3) характерен невысокий КПД $\sim 0.3\%$ [14, 15]. Несмотря на это простота конструкции ГРТ и упрощенная схема накачки с возможностью работать на более высоких ЧСИ делают такие лазеры привлекательными.

Заключение

В ГРТ саморазогревных лазеров на парах меди с малым объёмом рабочей зоны $8,3$ и 20 см^3 и ёмкостным способом возбуждения реализованы мощности излучения 1,5 и 2,6 Вт, соответственно, на частотах следования 55 и 35 кГц. Проведённые исследования позволяют сделать вывод, что для получения практически значимых мощностей генерации лазеров на парах чистых металлов с небольшим объёмом активной зоны можно использовать продольный ёмкостной разряд.

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами, на момент подачи статьи в редакцию журнала, и им ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

Список литературы

1. Райзер Ю. П., Шнейдер М. Н., Яценко Н. А. Высоочастотный емкостный разряд: Физика. Техника эксперимента. Приложения. Москва: Наука. 1995. 320 с.
2. Райзер Ю. П. Высоочастотный емкостной разряд и его приложения // Соросовский образовательный журнал. 1999. № 8. С. 90–96.
3. Дресвин С. В., Бобров А. А., Лелевкин В. М., Лысов Г. В., Паскалов Г. З., Сорокин Л. М. ВЧ- и СВЧ-плазмотроны. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние. 1992. 319 с.
4. Ломаев М. И., Скакун В. С., Соснин Э. А., Тарасенко В. Ф., Шитц Д. В., Ерофеев М. В. Эксилампы – эффективные источники спонтанного УФ- и ВУФ-излучения // УФН. 2003. Т. 173. № 2. С. 201–217.
5. Иванов И. Г., Латуш Е. Л., Сэм М. Ф. Ионные лазеры на парах металлов. М.: Энергоатомиздат. 1990. 256 с.
6. Grozeva M., Kocik M., Mentel J., Mizeraczyk J., Petrov T., Telbizov P., Teuner D., Sabotinov N., Schulze J. Laser capabilities of CuBr mixture excited by RF discharge // European Physical Journal D. 2000. No. 8. P. 277–286.
7. Суханов В. Б., Федоров В. Ф., Губарев Ф. А., Троицкий В. О., Евтушенко Г. С. Лазер на парах бромида меди, возбуждаемый емкостным разрядом // Квантовая электроника. 2007. Т. 37. № 7. С. 603–604.
8. Gubarev F. A., Sukhanov V. B., Evtushenko G. S., Fedorov V. F., Shiyarov D. V. CuBr Laser Excited by a Capacitively Coupled Longitudinal Discharge // IEEE Journal of Quantum Electronics. 2009. Vol. 45. No 2. P. 171–177.
9. Губарев Ф. А., Суханов В. Б., Евтушенко Г. С., Шиянов Д. В. Особенности работы CuBr-лазера с накачкой продольным емкостным разрядом // Квантовая электроника. 2010. Т. 40. № 1. С. 19–24.
10. Губарев Ф. А., Шиянов Д. В., Суханов В. Б., Евтушенко Г. С. Исследование возможности масштабирования CuBr - лазера с емкостной накачкой // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 11. С. 1003–1006.
11. Gubarev F. A., Shiyarov D. V., Sukhanov V. B., Evtushenko G. S. Capacitive-Discharge-Pumped CuBr Laser With 12 W Average Output Power // IEEE Journal of Quantum Electronics. Vol. 49. No 1. 2013. P. 89–94.
12. Shiyarov D. V., Sukhanov V. B., Gubarev F. A. Influence of Peaking Capacitance on the Output Power of Capacitive-Discharge-Pumped Metal Halide Vapor Laser // IEEE Journal of Quantum Electronics. 2018. Vol. 54. No.2. Article Sequence Number: 1500107.
13. Boichenko A. M., Evtushenko G. S., Yakovlenko S. I., Zhdanev O. V. Theoretical investigation of influence hydrogen addition on copper vapor laser performance // Laser Physics. 2003. Vol. 12. № 10. P. 1231–1255.
14. Carman R. J., Brown D. J. W., Piper J. A. A self-consistent model for the discharge kinetics in a high repetition rate copper vapor laser // IEEE Journal of Quantum Electron. 1994. Vol.30. № 8. P. 1876–1895.
15. Trigub M. V., Vasnev N. A., Gembukh P. I. Amplifying features of the CuBr active element excited by longitudinal capacitive discharge // Optical Engineering. 2021. Vol. 60. No 8. 086104.
16. Trigub M. V., Shiyarov D. V., Vasnev N. A., Gembukh P. I. Brightness amplifier excited by longitudinal capacitive discharge for laser monitors // Optics Communications. 2021. Vol. 480. No 2. 126475.
17. Шиянов Д. В., Суханов В. Б. Использование разряда емкостного типа для накачки высокотемпературных лазеров на парах металлов // Лазеры на парах металлов: сб. трудов симпозиума. (Лео, 20–24 сентября 2010 г.) С. 95.

Лазеры. Измерения. Информация. 2023. Том № 03. № 02 (10)
<https://lasers-measurement-information.ru>

18. Исаев А. А., Казарян М. А., Петраш Г. Г. О параметрах генерации, достижимых с лазером на парах меди // Краткие сообщения по физике ФИАН. 1973. № 2. С. 27–29.
19. Лябин Н. А., Чурсин А. Д., Угольников С. А., Королев М. Е., Казарян М. А. Разработка, производство и применение отпаянных лазеров на парах меди и золота // Квантовая электроника. 2001. Т. 31. № 3. С. 191–202.
20. Солдатов А. Н., Федоров В. Ф. Лазер на парах меди с частотой следования импульсов 230 кГц // Известия вузов. Физика. 1983. № 9. С. 80–84.
21. Воробьев В. Б., Калинин С. В., Климовский И. И., Костадинов И. К., Крестов В. А., Кубасов В. Н., [и др.] Лазер на парах меди со средней удельной мощностью генерации свыше 1 Вт/см³ // Квантовая электроника. 1991. Т. 18. № 10. С. 1178–1180.

Copper vapor laser with capacitive excitation

^{*1} Shiyarov D. V., ² Evtushenko G. S.

¹ *V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS
634055, Russia, Tomsk, 1, Academician Zuev square*

² *Federal research center for projects evaluation and consulting services
127055, Russia, Moscow, Obraztsova St. 12, Bldg. 2*

The possibility of using a longitudinal capacitive discharge for efficient pumping of pure metal vapor lasers by analogy with metal halide vapor lasers is shown. By the example of a copper vapor laser in gas-discharge tubes with a small active volume of 8.3 and 20 cm³, generation powers of 1.5 and 2.6 W were realized at pulse repetition rates of 55 and 35 kHz, respectively. It is noted that the simplicity of the design of active elements and a simplified pumping scheme with the ability to operate at higher PRRs make such lasers attractive.

Key words: copper vapor laser, capacitive pumping, pulse repetition rate, pump power.