

13

## Энергетические характеристики лазера на парах меди с накачкой генератором Маркса: газоразрядная трубка LT-10Cu

© Х. Баалбаки<sup>1</sup>, А.В. Маликов<sup>1</sup>, Н.А. Юдин<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия<sup>2</sup> Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск, Россия

E-mail: baalbaki.houssain@yandex.ru

Поступило в Редакцию 18 октября 2024 г.

В окончательной редакции 25 ноября 2024 г.

Принято к публикации 27 ноября 2024 г.

Исследованы энергетические характеристики лазера на парах меди при накачке активной среды генератором Маркса. Показано, что генератор Маркса позволяет поднять верхнюю границу устойчивой работы тиратронов кратно количеству используемых тиратронов (для двух тиратронов до обратного напряжения на аноде тиратронов  $\sim 8-10\text{ kV}$ ) и соответственно обеспечивает параметры накачки активной среды, не достижимые с одним тиратроном.

**Ключевые слова:** лазер на парах меди, генератор Маркса.

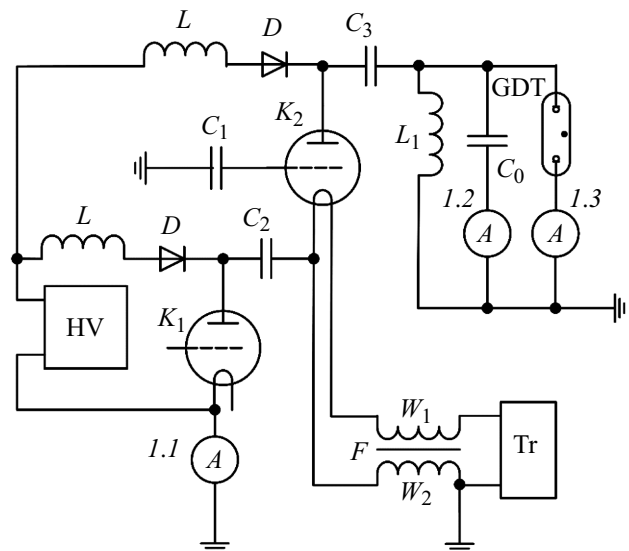
DOI: 10.61011/PJTF.2025.07.60066.20157

Лазер на парах меди (ЛПМ) является источником видимого излучения с уникальными частотно-энергетическими характеристиками (ЧЭХ) излучения, что исключает возможность его замены во многих применениях, несмотря на развитие твердотельных лазеров видимого диапазона с диодной накачкой. Накачка активной среды ЛПМ осуществляется в процессе разрядки накопительного конденсатора через газоразрядную трубку (ГРТ). В качестве коммутатора используются тиратроны. Одним из факторов, ограничивающих ЧЭХ ЛПМ, является необходимость поддержания вводимой мощности в ГРТ на определенном уровне при изменении параметров накачки, чтобы не нарушать тепловой режим работы лазера [1,2]. Это обуславливает необходимость уменьшения емкости накопительного конденсатора с увеличением напряжения на аноде тиратрона или частоты следования импульсов (ЧСИ,  $f$ ) возбуждения. С уменьшением емкости накопительного конденсатора возрастает добротность разрядного контура лазера, что приводит к увеличению обратного напряжения на аноде тиратрона и является существенным фактором ограничения ЧЭХ ЛПМ, поскольку тиратроны имеют достаточно узкую область устойчивой работы [3]. Существенно расширить возможности оптимизации параметров накачки ЛПМ, как показал анализ, позволяет генератор Маркса, принцип действия которого основан на зарядке электрическим током соединенных параллельно конденсаторов, соединяющихся после зарядки последовательно при помощи различных коммутирующих устройств, например тиратронов [4].

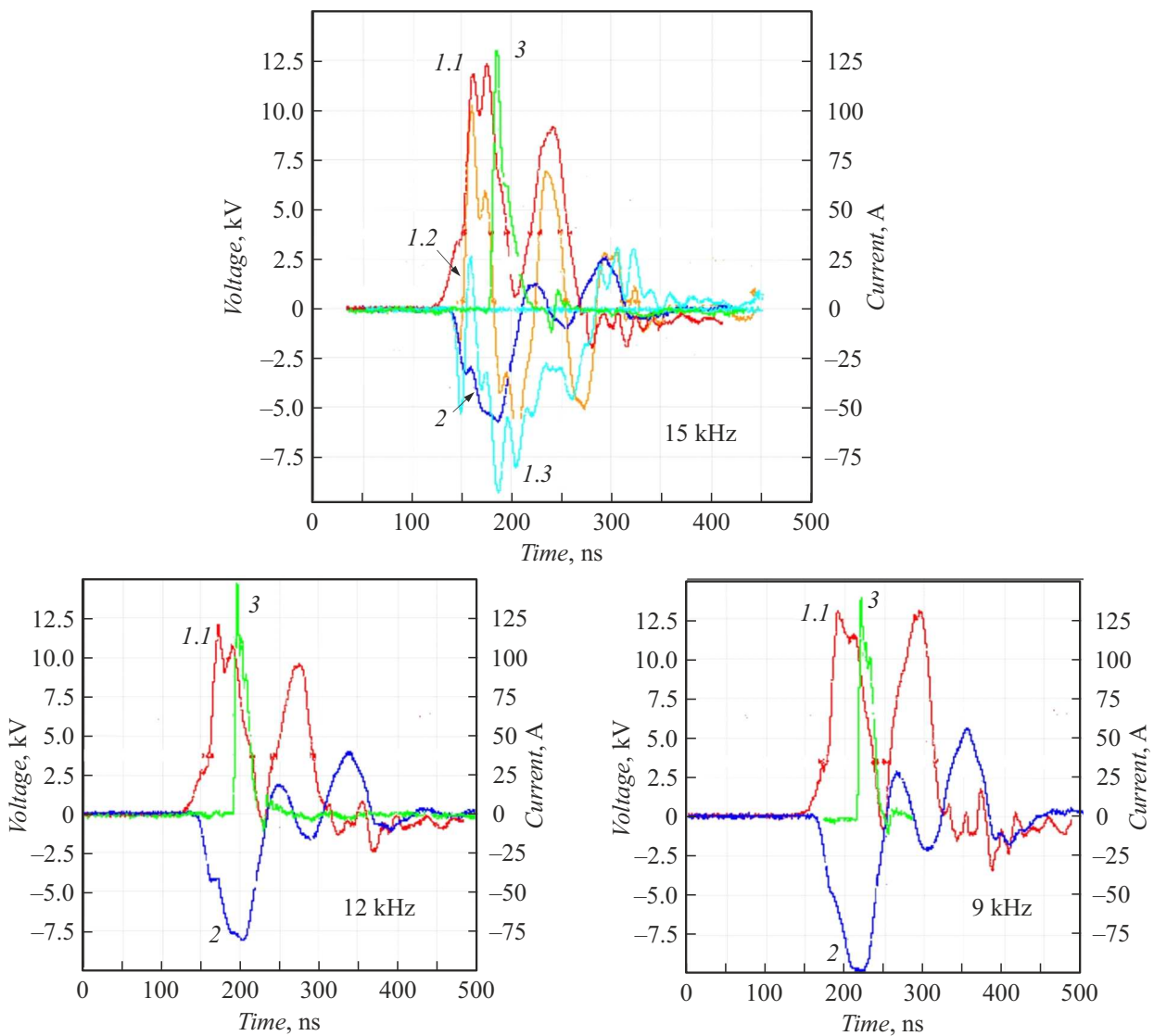
Целью настоящей работы является оценка эффективности накачки активной среды ЛПМ генератором Маркса. Исследования проводились с промышленной газоразрядной трубкой — LT-10Cu (ФГУП НПП „Исток“, Фрязино) [5,6].

На рис. 1 представлена схема накачки ЛПМ, иллюстрирующая принцип работы генератора Маркса, в котором в качестве разрядников используются тиратроны ТГИ2-500/20.

От высоковольтного выпрямителя HV параллельно заряжаются накопительные конденсаторы  $C_2$  и  $C_3$  через соответствующие цепи резонансно-диодной зарядки  $L-D$  и шунтирующие индуктивности  $L_1$  и  $W_2$ . Источ-



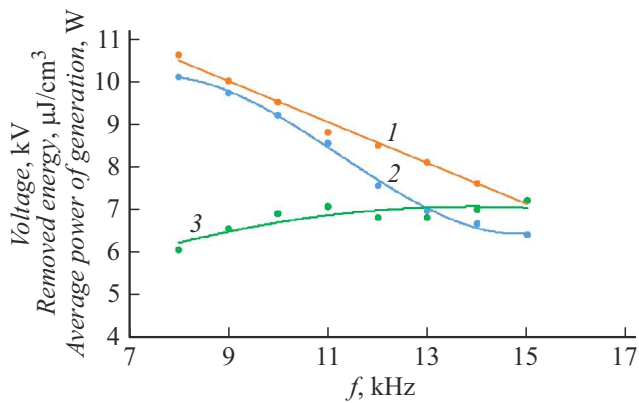
**Рис. 1.** Схема генератора Маркса для накачки активной среды ЛПМ.  $K_1, K_2$  — тиратроны ТГИ2-500/20;  $C_1$  — конденсатор КВИ-3 (100 pF);  $C_2 = C_3$  — накопительные конденсаторы;  $C_0$  — обостряющий конденсатор;  $L-D$  — цепь резонансно-диодной зарядки конденсаторов  $C_2$  и  $C_3$  соответственно; HV — высоковольтный выпрямитель;  $L_1$  — шунтирующая индуктивность; GDT (ГРТ) — LT-10Cu;  $F$  — фильтр; Tr — источник подогрева катода и генератора водорода тиратрона  $K_2$ ;  $I.1-I.3$  — токовые датчики.



**Рис. 2.** Осциллограммы импульсов тока, протекающего через тиратрон (1.1), обостряющий конденсатор (1.2), газоразрядную трубку (1.3), импульс напряжения на ГРТ (2) и импульс генерации ( $C_0 = 340$  pF) (3).

ник Тг подключается к тиратрону  $K_2$  через фильтр  $F$ , обеспечивающий его развязку от высоковольтных импульсов, формируемых при включении тиратронов, что позволяет использовать в качестве источника Тг для подогрева катода и генератора водорода тиратронов  $K_1$  и  $K_2$  накаливающие трансформаторы — ТН-61. Фильтр  $F$  содержит две встречно намотанные индуктивности  $W_1$  и  $W_2$  по  $\sim 20$  витков на ферритовом кольце ( $100 \times 60 \times 15$  mm). При этом индуктивность  $W_2$  выполняет роль шунтирующей индуктивности при зарядке накопительного конденсатора  $C_2$ . После зарядки накопительных конденсаторов на сетку тиратрона  $K_1$  подается импульс запуска. Тиратрон  $K_1$  открывается, и накопительный конденсатор  $C_2$  начинает разряжаться по цепи  $K_1-C_1$ —сетка тиратрона  $K_2$ , заряжая конденсатор  $C_1$  до напряжения, при котором включается тиратрон  $K_2$ .

Измерения энергетических и вольт-амперных характеристик лазера проводились в условиях, когда  $C_2 = C_3 \sim 1.9$  nF (два последовательно включенных конденсатора КВИЗ-3.3 nF и КВИЗ-4.7 nF),  $C_0 = 340$  pF при потребляемой мощности от высоковольтного выпрямителя  $\sim 1.5$  kW. На рис. 2 приведены осциллограммы электрофизических параметров электрической цепи разрядного контура лазера и генерации, демонстрирующие процесс накачки активной среды с изменением ЧСИ возбуждения. Полный набор снятых осциллограмм приведен на рис. 2 для  $f = 15$  kHz, а для  $f = 12$  и 9 kHz приведены осциллограммы импульсов тока, протекающего через тиратрон, напряжения на ГРТ и генерации. На рис. 3 приведены зависимости напряжения на ГРТ, удельной энергии в импульсе генерации и средней мощности генерации от ЧСИ возбуждения.



**Рис. 3.** Зависимость напряжения на ГРТ (1), удельной энергии в импульсе генерации (2) и средней мощности генерации (3) от ЧСИ возбуждения ( $C_0 = 340$  pF).

Проведенные исследования показали, что накачка активной среды лазера осуществляется также в два этапа, как и в [7]. На подготовительном этапе заряжается  $C_0$  от последовательно включенных накопительных конденсаторов  $C_2$ – $C_3$ , а накачка активной среды осуществляется в процессе разрядки  $C_0$ .

Переход от подготовительного этапа к этапу накачки происходит в результате „пробоя“, который формируется в процессе зарядки  $C_0$  (аналогичен [7]). Это указывает на то, что данный процесс накачки активной среды ЛПМ характерен для газоразрядных трубок с электродами, расположенными в холодных буферных зонах. Представленные на рис. 2 осциллограммы являются наглядной иллюстрацией отмеченного выше. Генерация реализуется на спаде тока в зарядном контуре лазера (ток, протекающий через тиратрон), а накачка активной среды определяется энерговыделением энергии, запасенной в индуктивности разрядного контура и  $C_0$ . Механизм двухэтапной накачки рассмотрен в [7], поэтому следует рассмотреть более детально особенности накачки генератором Маркса. Отличительной особенностью накачки ЛПМ в саморазогревном режиме является существенное изменение обратного напряжения на аноде тиратрона [3] в процессе разогрева ГРТ до рабочей температуры, что накладывает определенное ограничение на величину емкости накопительного конденсатора, при которой обратное напряжение на аноде тиратрона не выходит за границы области устойчивой работы тиратрона. Минимальное значение емкости накопительных конденсаторов, при котором обеспечивалась устойчивая работа генератора Маркса, составляло  $C_2$ – $C_3 \sim 1.9$  nF (емкость в контуре накачки активной среды  $\sim 0.95$  nF). Очевидно, что в этих условиях накачки приходится изменять напряжение с изменением ЧСИ возбуждения, чтобы поддерживать саморазогревный режим работы ЛПМ. Приведенные зависимости энергетических характеристик (рис. 3) от ЧСИ возбуждения наглядно демонстрируют, что с увеличением напряжения на

ГРТ наблюдается линейный рост энергии в импульсе генерации. Суммарное напряжение при последовательном соединении накопительных конденсаторов после запуска тиратронов составляло  $\sim 17$ – $18$  kV при ЧСИ возбуждения  $\sim 15$  kHz и  $\sim 22$ – $25$  kV при ЧСИ  $\sim 8$  kHz, что невозможно реализовать в традиционной схеме накачки с одним тиратроном. Основное преимущество генератора Маркса заключается в том, что он позволяет поднять верхнюю границу (суммарно) области устойчивой работы двух тиратронов до обратного напряжения  $\sim 8$ – $10$  kV. С увеличением ЧСИ возбуждения (рис. 3) снижается энергия в импульсе генерации, но наблюдается рост средней мощности генерации. Подобная зависимость энергетических характеристик объясняется тем, что изменение энергии в импульсе генерации  $E_{gen} \sim U$ , где  $U$  — напряжение, а изменение запасаемой энергии в накопительных конденсаторах  $E_C = CU^2/2 \sim U^2$ . Это определяет два варианта решения проблемы повышения энергетических характеристик ЛПМ. Первый непосредственно связан с тем, что генератор Маркса расширяет область устойчивой работы тиратронов и позволяет, уменьшая толщину теплоизолятора ГРТ, реализовать саморазогревный режим работы лазера при более высокой потребляемой мощности. Второй обусловлен тем, что накачка активной среды осуществляется в процессе разрядки  $C_0$ . На подготовительном этапе накачки происходит зарядка  $C_0$ . Согласно [7], всегда можно выбрать величину емкости  $C_0$ , при которой ток через коммутатор падает до нуля после зарядки  $C_0$ , что позволяет, используя управляемый коммутатор (например, таситрон), „отсечь“ дальнейший энерговыдел в ГРТ от накопительного конденсатора. Результаты наших исследований показали (рис. 2), что в условиях накачки генератором Маркса такой режим накачки реализуется, ток через коммутатор падает до нуля после зарядки  $C_0$  (рис. 2) во всем диапазоне изменения ЧСИ возбуждения и напряжения на ГРТ. „Отсечка“ энерговыдела в ГРТ потенциально обеспечивает возможность на порядок повысить ЧСИ возбуждения, а фактором, ограничивающим энергетические характеристики лазера в этих условиях, является предимпульсная концентрация электронов  $n_{e0}$  [8] и предимпульсная концентрация атомов меди в метастабильном состоянии  $N_{m0}$  [9]. Релаксация метастабильных состояний в межимпульсный период происходит за время  $\sim 15$ – $20$  μs в режиме согласованной нагрузки [10], который реализуется также и при „отсечке“ энерговыдела после импульса генерации. Следовательно,  $N_{m0}$  не должно оказывать влияния на энергетические характеристики ЛПМ при ЧСИ возбуждения  $< 50$ – $75$  kHz. Если принять во внимание, что основной вклад в ионизационный процесс в импульсе возбуждения вносят ступенчатые процессы [11,12], а на подготовительном этапе накачки, согласно [7,13], процесс ионизации атомов меди не наблюдается, то „отсечка“ энерговыдела после импульса генерации позволяет устранить основной канал ионизации в активной среде. Это создает условия для повышения оптимальной ЧСИ

возбуждения до указанных значений  $\sim 50\text{--}75\text{ kHz}$  в режиме „отсечки“. Приведенные выше оценки для режима „отсечки“ являются лишь демонстрацией потенциальной возможности повышения энергетических характеристик ЛПМ. Преимущество генератора Маркса перед традиционной схемой накачки ЛПМ с одним тиратроном заключается в следующем. Увеличение напряжения на аноде тиратрона обуславливает соответствующее увеличение средней мощности генерации, но при этом возрастает и обратное напряжение на аноде тиратрона. Максимально возможное значение средней мощности генерации реализуется при значениях обратного напряжения на аноде тиратрона  $\sim 5\text{--}6\text{ kV}$  (верхняя граница области устойчивой работы тиратрона). Однако срок службы тиратрона в этих условиях накачки составляет  $\sim 50\text{ h}$ , но соответствует паспортным значениям  $\sim 1000\text{ h}$  при обратном напряжении  $\sim 3\text{ kV}$  [14]. Уровень средней мощности генерации, соответствующий указанному выше максимальному значению, должен реализоваться при суммарном обратном напряжении на анодах тиратронов в генераторе Маркса также  $\sim 6\text{ kV}$ . Обратное напряжение на аноде каждого тиратрона при этом будет  $\sim 3\text{ kV}$ , и соответственно срок службы тиратронов  $\sim 1000\text{ h}$ , что экономически весьма выгодно с учетом стоимости тиратронов.

Генератор Маркса расширяет область устойчивой работы тиратронов, поднимая верхнюю границу до  $\sim 8\text{--}10\text{ kV}$  (обратное напряжение на аноде тиратронов) суммарно для двух тиратронов, что обеспечивает накачку активной среды при более высоком напряжении на газоразрядной трубке, и соответственно реализуются более высокие значения энергии импульса генерации. Результаты проведенных исследований и их анализ показали перспективность использования генератора Маркса для накачки активной среды ЛПМ, что указывает на необходимость проведения дальнейших исследований.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] С.Е. Little, *Metal vapour lasers. Physics, engineering and application* (John Wiley & Sons, N.Y. 1999).
- [2] V.M. Batenin, V.V. Buchanov, A.M. Boichenko, M.A. Kazaryan, I.I. Klimovskii, E.I. Molodykh, *High-brightness metal vapour lasers (physical fundamentals and mathematical models)* (CRC, Boca Raton, FL, 2016).
- [3] Н.А. Юдин, Квантовая электроника, **25** (9), 795 (1998). [N.A. Yudin, Quantum Electron., **28** (9), 774 (1998). DOI: 10.1070/QE1998v028n09ABEH001324].
- [4] В.И. Воронов, Н.А. Юдин, *Генератор с умножением напряжения*, патент 2288536 (заявл. 28.04.2005; опубл. 27.11.2006), бюл. № 33.
- [5] А.Г. Григорьянц, М.А. Казарян, Н.А. Лябин, *Лазеры на парах меди: конструкция, характеристики и применения* (Физматлит, М., 2005).
- [6] И.С. Колоколов, В.И. Клименко, Н.А. Лябин, Г.М. Парамонова, А.Д. Чурсин, Прикладная физика, № 3, 84 (2003).
- [7] Х. Баалбаки, Н.А. Юдин, Н.Н. Юдин, Оптика атмосферы и океана, **35** (11), 963 (2022). DOI: 10.15372/AOO20221113 [H.A. Baalbaki, N.A. Yudin, N.N. Yudin, Atmos. Ocean. Opt., **36**, 86 (2023). DOI: 10.1134/S1024856023020021].
- [8] П.А. Бохан, В.А. Герасимов, В.И. Соломонов, В.Б. Щеглов, Квантовая электроника, **5** (10), 2162 (1978). [P.A. Bokhan, V.A. Gerasimov, V.I. Solomonov, V.B. Shcheglov, Sov. J. Quantum Electron., **8** (10), 1220 (1978). DOI: 10.1070/QE1978v008n10ABEH011040].
- [9] А.А. Исаев, В.Т. Михкельсоо, Г.Г. Петраш, В.Э. Пеэт, И.В. Пономарев, А.Б. Трещалов, Квантовая электроника, **15** (12), 2510 (1988). [A.A. Isaev, V.T. Mikhkel'soo, G.G. Petrash, V.É. Peét, I.V. Ponomarev, A.B. Treshchalov, Sov. J. Quantum Electron., **18** (12), 1577 (1988). DOI: 10.1070/QE1988v018n12ABEH012765].
- [10] П.А. Бохан, Д.Э. Закревский, Квантовая электроника, **32** (7), 602 (2002). [P.A. Bokhan, D.E. Zakrevskii, Quantum Electron., **32** (7), 602 (2002). DOI: 10.1070/QE2002v032n07ABEH002254].
- [11] С.В. Арланцев, В.В. Бучанов, А.А. Васильев, Э.И. Молодых, В.В. Тыкоцкий, Н.И. Юрченко, Квантовая электроника, **7** (8), 2319 (1980). [S.V. Arlantsev, V.V. Buchanov, L.A. Vasil'ev, É.I. Molodykh, V.V. Tykotskii, N.I. Yurchenko, Sov. J. Quantum Electron., **10** (11), 1350 (1980). DOI: 10.1070/QE1980v010n11ABEH010300].
- [12] Ю.А. Пиотровский, Н.М. Реутова, Ю.А. Толмачев, Оптика и спектроскопия, **7** (1), 99 (1984).
- [13] G.P. Hogan, C.E. Webb, Opt. Commun., **117** (5), 570 (1995). DOI: 10.1016/0030-4018(95)00143-V
- [14] Н.А. Юдин, Квантовая электроника, **32** (9), 815 (2002). [N.A. Yudin, Quantum Electron., **32** (9), 815 (2002). DOI: 10.1070/QE2002v032n09ABEH002297].