

УДК 535:371.623

Лазер на парах европия ($\lambda = 1,76$ мкм) с мощностью излучения 2,5 Вт

А.Г. Филонов, Д.В. Шиянов[✉], М.В. Тригуб*

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

Поступила в редакцию 31.08.2023;
после доработки 04.10.2023;
принята к печати 29.01.2024

Лазеры, излучающие в ИК-области спектра, активно применяются в различных областях науки и техники. В связи с этим расширение спектрального диапазона и получение эффективной генерации в ИК-области — это актуальная задача. Объектом исследования является лазер на самоограниченном переходе атома европия с длиной волны излучения 1,76 мкм. В настоящей работе исследована возможность повышения выходных параметров такого лазера за счет увеличения длины активной зоны газоразрядной трубки (ГРТ). Показано, что увеличение объема разрядной трубки с 157 до 314 см³ при сохранении уровня мощности накачки 1200 Вт позволяет повысить мощность генерации и КПД лазера вдвое. Впервые на линии 1,76 мкм достигнута средняя мощность излучения 2,5 Вт. Максимальное значение КПД 0,3% достигается при мощности накачки 500 Вт. После 100 ч работы энергетические характеристики Eu+Ne-лазера с активной зоной объемом 314 см³ продемонстрировали хорошую повторяемость, что позволяет сделать вывод о возможности дальнейшего увеличения энергетических характеристик и срока службы этого лазера. Лазер с такими параметрами может использоваться при микрообработке материалов (излучение с $\lambda = 1,76$ мкм), а также в активных оптических системах, связанных с визуализацией быстропротекающих процессов.

Ключевые слова: газовые лазеры, ИК-излучение, лазерная генерация, лазер на парах европия; gas laser, IR radiation, laser generation, europium vapor laser.

Введение

В последнее время все больший интерес начинают вызывать лазеры на парах металлов, работающие в ближнем и среднем ИК-диапазонах спектра [1, 2]. Это связано как с исследованиями работы подобных многоволновых систем, так и с решением практических задач, например скоростной визуализации в данных диапазонах [3]. Лазер на парах европия является многоволновой системой, излучающей как на атоме, так и на ионе [4, 5].

В настоящее время генерация на атоме европия реализована на 12 линиях от 1,66 до 6,06 мкм [6, 7], а на ионе — на шести линиях от 0,664 до 1,47 мкм [8]. Несмотря на такой широкий спектральный диапазон излучения, основное внимание уделялось исследованию ионного лазера на парах европия $6p^7P_4 \rightarrow 5d^7D_5^0$ с длиной волны 1,0019 мкм [9–11]. Это обусловлено тем, что в среде буферного газа гелия высокого давления появлялась возможность реализации непрерывной столкновительной генерации [12, 13]. На этом переходе в импульсно-периодическом режиме при давлении буферного газа от 0,3 до 1 атм

достигнута мощность генерации 13 Вт [14, 15]. В работе [16] отмечалось, что недостатком такого лазера является срок его службы в несколько часов, что объяснялось металлизацией кюветы, шунтирующей разряд.

Использование неона в качестве буферного газа позволило нам в работах [17, 18] получить генерацию на ионе и атоме европия в красной и ИК-областях спектра. В максимуме мощности генерации основная доля излучения была сосредоточена на переходе $y^8P_{9/2} \rightarrow a^8D_{11/2}^0$ ($\lambda = 1,76$ мкм). В таком режиме газоразрядная трубка (ГРТ) объемом 157 см³ продемонстрировала стабильную работу в течение длительного времени (более 100 ч). Дальнейшее увеличение энергетических характеристик такого лазера возможно за счет усиления мощности накачки, применения специальных схем возбуждения, позволяющих уменьшать длительность импульса накачки и увеличивать крутизну его фронта. Кроме этого можно масштабировать объем рабочего канала ГРТ. Улучшение характеристик в этом случае подтверждают результаты, полученные с лазером на парах меди и его галогенидов [19, 20].

Цель работы — изучение влияния на характеристики лазера на парах атома европия ($\lambda = 1,76$ мкм) увеличения объема активной зоны ГРТ за счет ее удлинения.

* Александр Григорьевич Филонов (qel@iao.ru);
Дмитрий Валерьевич Шиянов (shiyarov73@mail.ru);
Максим Викторович Тригуб (trigub@iao.ru).

Экспериментальная установка

В экспериментах использовалась установка, схематично показанная на рис. 1.

ГРТ лазера 1 представляла собой газоразрядный канал, образованный керамической трубкой 5 внутренним диаметром 20 мм и длиной 1000 мм со слоем теплоизоляционного порошка 4, помещенного, в свою очередь, в вакуумирующую оболочку из оптически чистого кварца. По краям разрядного канала расположены электроды 6 в виде полых цилиндров из ниобия. Кусочки европия располагались равномерно вдоль разрядного канала 5. Разряд рабочей емкости C_1 (730–200 пФ) через тиратрон и ГРТ производил разогрев и возбуждение активного объема. Заряд C_1 осуществлялся от ИП через зарядную индуктивность L . В электрической схеме возбуждения использовалась обострительная емкость C_2 (165–220 пФ). Импульсы напряжения и тока регистрировались делителем напряжения 8 и датчиком тока 9, сигналы с которых выводились на осциллограф. Резонатор Фабри–Перо состоял из глухого зеркала с алюминиевым покрытием 2 и выходного зеркала 3, представляющего собой кварцевую пластинку. Излучение лазера направлялось на измеритель мощности, который регистрировал суммарную мощность генерации. С помощью фильтра 10 выделялась линия генерации 0,6645 мкм и определялась ее средняя мощность. С помощью поворотного зеркала 7 излучение лазера могло направляться на монохроматор МДР-23. Решетка монохроматора 600 линий/мм позволяла определять линии генерации до 2 мкм, а с помощью фотоэлемента регистрировалась форма импульсов генерации.

Результаты и обсуждение

В работах [14, 15] исследовались характеристики ГРТ-лазера на парах европия диаметром 2 см и длиной 50 см ($V = 157 \text{ см}^3$), далее по тексту обозначим ее как ГРТ1. Был определен диапазон оптимальных частот следования импульсов (ЧСИ), который составил при наших условиях возбуждения 7–10 кГц. Установлено, что энергосъем лазера сильно зависит от напряжения на ГРТ. Наблюдается практически линейный рост выходной мощности при увеличении мощности накачки. Мощность генерации 1,15 Вт соответствовала мощности накачки 1170 Вт с ЧСИ 7 кГц. При увеличении вкладываемой мощности до 1300 Вт мощность излучения возросла до 1,4 Вт.

С учетом этих экспериментальных результатов длина рабочего канала была увеличена до 100 см, диаметр оставили прежним. Таким образом объем активной зоны увеличился в два раза — до 314 см^3 . Как и в работах [14, 15], в качестве буферного газа мы использовали неон с давлением 15–30 торр, которое выбиралось исходя из максимума мощности генерации.

Изменения энергетических характеристик лазера при увеличении рабочего объема ГРТ2 ($V = 314 \text{ см}^3$) особенно хорошо видны в сравнении с ГРТ1 (рис. 2). Мощность накачки ГРТ2 и ГРТ1 была одинаковой, потребляемая мощность была ограничена возможностями источника питания.

Как видно из рис. 2, увеличение объема ГРТ2 в два раза привело к возрастанию мощности генерации более чем вдвое (с 1,15 до 2,5 Вт). Причиной этого может быть то, что потери рабочего вещества

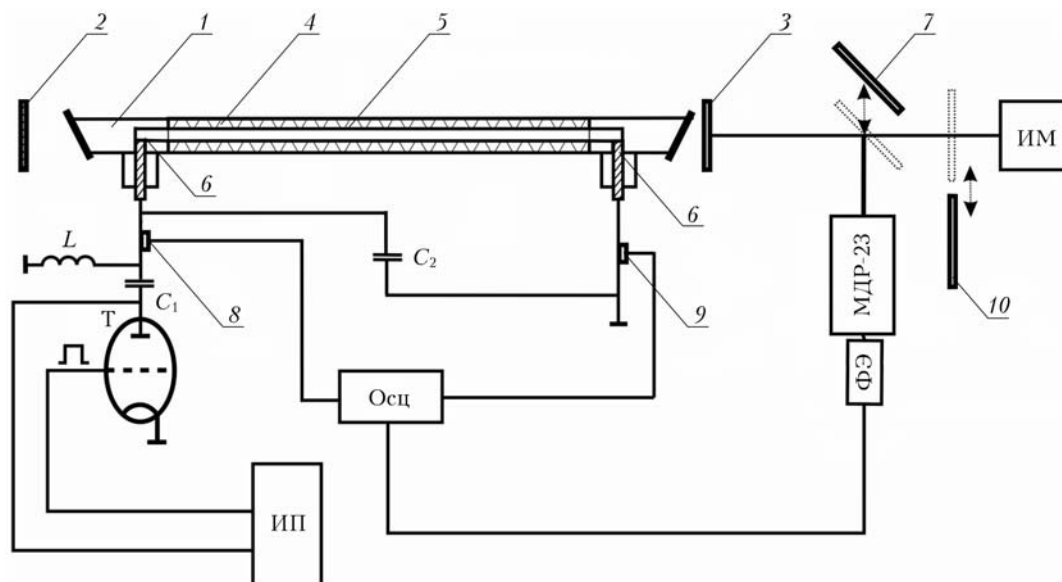


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — ГРТ; 2 — глухое зеркало резонатора; 3 — выходное зеркало резонатора; 4 — теплоизолирующий порошок ZrO_2 ; 5 — керамическая трубка из BeO_2 ; 6 — электроды; 7 — поворотное зеркало; 8 — датчик напряжения Tektronix P6015A; 9 — датчик тока Pearson current monitor; 10 — фильтр СЗС 26; Т — тиратрон ТГИ1-1000/25; C_1 — рабочая емкость; C_2 — обостритель; L — зарядная индуктивность; ИМ — измеритель мощности Ophir 20C-SH; Осц — осциллограф Le Croy Wave Jet 324; ФЭ — фотоэлемент ФК-19 или ЛФД-2; МДР-23 — монохроматор; ИП — источник питания

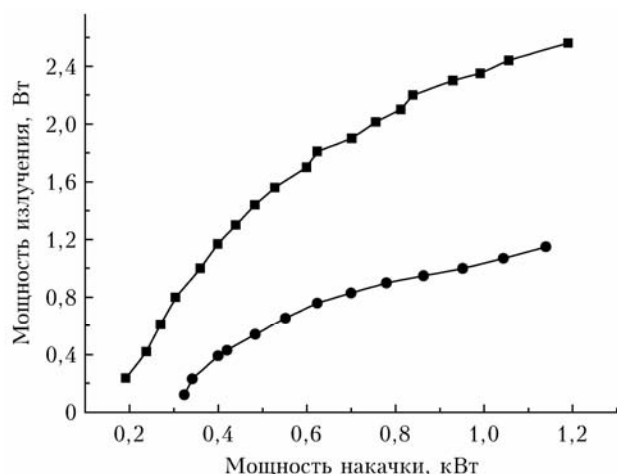


Рис. 2. Мощность генерации ГРТ1 (точки) и ГРТ2 (квадраты) в зависимости от мощности накачки

происходят преимущественно из-за его выноса на краях активного объема. При увеличении длины активной зоны ГРТ эти потери сохраняются, а внутренний объем возрастает. Увеличивается так же и количество активного вещества, т.е. объем. Все вместе, как нам представляется, работает не только на увеличение мощности генерации, но и на срок службы лазера.

Характерным для мощности генерации ГРТ2 является то, что при потребляемых мощностях она не переходит в режим насыщения, как и в ГРТ1. Следовательно, увеличение вводимой мощности должно привести к дальнейшему росту выходной мощности лазера.

Важной характеристикой лазера является его КПД. Наши результаты показывают, что для ГРТ2 он существенно вырос и достиг 0,3% при мощности накачки ~ 450–500 Вт (рис. 3). Это значение сравнимо с КПД других лазеров этого класса.

Как отмечалось выше, исследованиям лазера на парах атома европия уделялось мало внимания. Известны работы [7, 9], где изучены характеристики лазеров на парах атома европия, в том числе на переходе с $\lambda = 1,76$ мкм. В работе [7] рассмотрены две ГРТ (далее обозначим их как ГРТ1*, ГРТ2*) со следующими параметрами: диаметры 1,1 и 2 см, длина 50 ($V = 47,5$ см³) и 46 см ($V = 144,4$ см³) соответственно. Для этих лазеров получены мощности излучения 1,65 и 1,95 Вт с КПД ~ 0,2%. При этом не полностью описаны электрические параметры возбуждения ГРТ, такие как напряжение и ток, мощность накачки и рабочая ЧСИ для ГРТ1*. В качестве буферного газа использовался гелий, суммарная мощность излучения была распределена на нескольких линиях (переходах). Накачка осуществлялась с помощью схемы Блюмляйна, позволяющей дополнительно к резонансной зарядке вдвое повысить напряжение на ГРТ. В связи с этим интересно сравнить результаты наших исследований и работы [7]. Стоит отметить, что условия эксперимента не совсем сопоставимы, поскольку мы использовали буферный газ неон и максимум

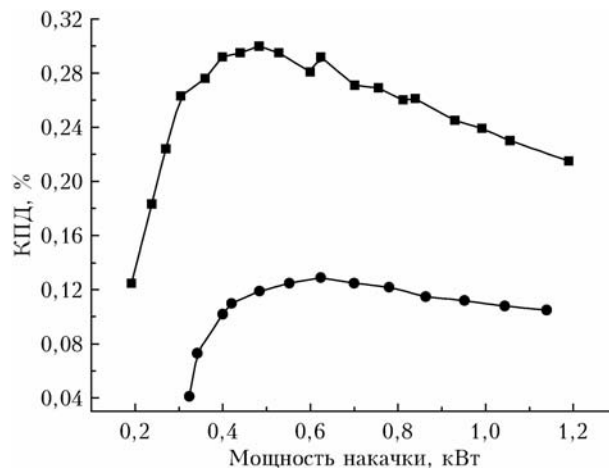


Рис. 3. КПД Eu+Ne-лазера при увеличении рабочего объема ГРТ со 157 (точки) до 314 см³ (квадраты)

мощности генерации достигался исключительно на линии 1,76 мкм. Применялась схема накачки с резонансным зарядом рабочей емкости, напряжение на источнике питания не превышало 7 кВ (как отмечалось выше, энергоём Eu+Ne-лазера сильно зависит от амплитуды напряжения на ГРТ).

Из предоставленных данных по выходной мощности и КПД ГРТ, исследуемых в [7], можно оценить их удельные энергетические характеристики. Для ГРТ1* импульсная энергия $E_{\text{имп}} = \sim 180$ мДж, удельная $E_{\text{имп}} \sim 3,8$ мкДж/см³ при удельной мощности накачки $P_{\text{нак}} \sim 17,5$ Вт/см³. ГРТ2* показала следующие характеристики: $E_{\text{имп}} = 195$ мДж, удельная $E_{\text{имп}} = 1,35$ мкДж/см³ при удельной $P_{\text{нак}} \sim 7,5$ Вт/см³. Для лазеров на парах металлов характерно то, что по ряду причин высокие мощности генерации получены в ГРТ с большим объемом активной зоны, а максимальные удельные характеристики — с малым [21, 22].

Следует отметить, что ГРТ1 и ГРТ2* имеют схожие объемы. При мощности излучения 1,15 Вт и удельной $P_{\text{нак}} = 7,4$ Вт/см³ энергия генерации ГРТ1 составила 143 мДж; при мощности излучения 1,4 Вт и удельной $P_{\text{нак}} = 9$ Вт/см³ энергия генерации составила 200 мДж. Эти значения коррелируют со значениями, полученными для ГРТ2*. С учетом увеличения объема активной зоны ГРТ2 в два раза ее удельная $P_{\text{нак}}$ снизилась до 3,8 Вт/см³, а $E_{\text{имп}}$ достигла 325 мДж. При этом удельная энергия генерации для ГРТ1 и ГРТ2 сохранялась на уровне 1 мкДж/см³.

Таким образом, энергетические характеристики ГРТ со схожими объемами показывают приблизительно одинаковые результаты, причем при различных условиях накачки. Увеличение объема ГРТ при сохранении мощности накачки приводит к увеличению энергетических характеристик лазера и сохранению удельной энергии на определенном уровне.

Одной из основных проблем лазеров на парах металлов является воспроизводимость параметров генерации. На рис. 4 показана мощность генерации ГРТ2 в начале исследования и после 100 ч работы.

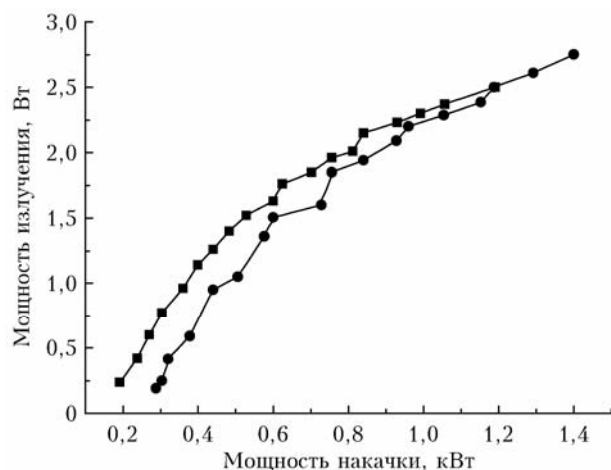


Рис. 4. Мощность генерации Eu+Ne-лазера (ГРТ2) в начале эксплуатации (квадраты) и после 100 ч работы (точки)

Видно, что после продолжительной работы параметры генерации практически не изменились, что позволяет сделать вывод об увеличении срока службы активного элемента. Данный вопрос весьма актуален для лазеров, излучающих в ближней ИК-области спектра (на парах европия, бария, кальция, стронция). Небольшой сдвиг начала генерации относительно мощности накачки может быть связан с уменьшением количества рабочего вещества — европия — за счет его выноса в холодные зоны.

Заключение

В работе впервые показана возможность повышения мощности генерации и КПД Eu+Ne-лазера с длиной волны генерации 1,76 мкм более чем в два раза при удлинении активной зоны ГРТ. Объем ГРТ-лазера вырос с 157 до 314 см³ за счет увеличения длины разрядного промежутка. При мощности накачки 1,2 кВт выходная мощность лазера достигла 2,6 Вт, увеличение мощности накачки до 1,4 кВт привело к росту мощности генерации до 2,75 Вт. Максимальный КПД составил 0,3% при потребляемой мощности 450–500 Вт. Импульсная энергия при изменении объема увеличилась со 143 до 325 мДж при сохранении своего удельного значения на уровне 1 мкДж/см³. Сравнение энергетических характеристик Eu+Ne-лазера с активной зоной объемом 157 см³ и 144,4 см³, полученных ранее в работе [7], показали схожие результаты при удельных мощностях накачки 7–9 Вт/см³. После более 100 ч эксплуатации выходные параметры ГРТ изменились незначительно, что позволяет говорить об увеличении срока службы лазера при наличии достаточного количества рабочего вещества в активной зоне ГРТ.

Список литературы

1. Kostadinov I.K., Temelkov K.A., Popova L.T., Ivanov B.L., Slaveeva S.I. Compact 10-W Sr vapor laser oscillating in middle infrared spectral range on Sr

- atomic self-terminating transitions // Opt. Quant. Electron. 2022. V. 54, N 11. P. 718–723.
2. Lavrukhin M.A., Bokhan P.A., Gugin P.P., Zakrevsky D.E. 100-kHz RM calcium ion NIR laser // Opt. Laser Technol. 2024. V. 170, N 110174. P. 1–9.
3. Тригуб М.И., Гембух П.И., Васнев Н.А., Шиянов Д.М. Лазерный монитор для одновременной визуализации в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра // Оптика атмосф. и океана. 2023. Т. 36, № 3. С. 239–243; Trigub M.V., Gembukh P.I., Vasnev N.A., Shiyonov D.V. Laser monitor for simultaneous imaging in the VIS and near-IR spectral regions // Atmos. Ocean. Opt. 2023. V. 36, N 4. P. 415–420.
4. Батенин В.М., Бохан П.А., Бучанов В.В., Евтушенко Г.С., Казарян М.А., Карпухин В.Т., Климовский И.И., Маликов М.М. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. Ч. 2. М.: Физматлит, 2011. 616 с.
5. Little C.E. Metal Vapor Lasers. Physics, Engineering & Applications. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd., 1998. 620 p.
6. Cahuzac Ph. Emission laser infrarouges dans les vapeurs de terres rares // Phys. Lett. A. 1970. V. 31, N 10. P. 541–542.
7. Бохан П.А., Клишкин В.М., Прокопьев В.Е., Соломонов В.И. Исследование лазера на самоограничивающихся переходах атома и иона европия // Квант. электрон. 1977. Т. 4, № 1. С. 152–154.
8. Бохан П.А., Клишкин В.М., Прокопьев В.Е. Газовый лазер на ионизированном европии // Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 18, вып. 2. С. 80–82.
9. Бохан П.А., Клишкин В.М., Прокопьев В.Е. Столкновительный газоразрядный лазер на ионизированных парах европия I. Наблюдение самоограниченной генерации и переход от циклического режима к квазинепрерывному // Квант. электрон. 1974. Т. 1, № 6. С. 1365–1369.
10. Бохан П.А., Клишкин В.М., Прокопьев В.Е., Монастырев С.С. Ионный гелий-европиевый лазер со средней мощностью 2 Вт // Письма в ЖЭТФ. 1977. Т. 3, вып. 9. С. 410–413.
11. Бохан П.А., Егоров Л.Е. Гелий-европиевый лазер с удельной энергией излучения 5 Дж/л·атм // Квант. электрон. 1984. Т. 11, № 8. С. 1683–1685.
12. Бохан П.А. Непрерывная генерация в столкновительном гелий-европиевом лазере // Письма в ЖЭТФ. 1984. Т. 10, вып. 4. С. 210–214.
13. Бохан П.А. Столкновительные лазеры на ионах Ca⁺ и Eu⁺ с высокой удельной энергией излучения // Письма в ЖЭТФ. 1986. Т. 12, вып. 3. С. 161–164.
14. Bokhan P.A., Zakrevsky D.E. High power high repetition rate pulsed collisional laser using a He+Eu⁺ mixture // Opt. Quant. Electron. 1991. V. 23. P. S513–S522.
15. Bokhan P.A., Zakrevsky D.E. Investigation of a He–Eu⁺ laser excited by short pumping pulses // J. Russ. Laser Res. 1995. V. 16, N 2. P. 138–144.
16. Клишкин В.М. Металлизация кювет в импульсно-периодических лазерах. Причины и следствия // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13, № 12. С. 1103–1106.
17. Троцкий В.О., Соколов В.Г., Филонов А.Г., Шиянов Д.В. Лазер на парах европия // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 3. С. 253–258; Troitskii V.O., Sokolov V.G., Filonov A.G., Shiyonov D.V. Europium vapor laser // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 5. P. 489–494.
18. Соколов В.Г., Филонов А.Г., Шиянов Д.В. Сравнение параметров генерации Ne+Eu- и He+Eu-лазеров // Оптика атмосф. и океана. 2019. Т. 32, № 2.

- C. 168–171; *Sokovikov V.G., Filonov A.G., Shiyanov D.V.* The comparison of lasing parameters of Ne + Eu and He + Eu lasers // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 3. P. 366–369.
19. *Mildren R.P., Piper J.A.* Compact and efficient kinetically enhanced copper-vapor lasers of high (100-W) average power // *Opt. Lett.* 2003. V. 28, N 20. P. 1936–1938.
 20. *Astadjov D.N., Dimitrov K.D., Jones D.R., Kirkov V., Little L., Little C.E., Sabotinov N.V., Vuchkov N.K.* Influence on operating characteristics of scaling sealed-off CuBr lasers in active length // *Opt. commun.* 1997. V. 135, N 4–6. P. 289–294.
 21. *Воробьев В.Б., Калинин С.В., Климовский И.И., Костадинов И., Крестов В.А., Кубасов В.Н., Маразов О.* Лазер на парах меди со средней удельной мощностью генерации свыше 1 Вт/см³ // *Квант. электрон.* 1991. Т. 18, № 10. С. 1178–1180.
 22. *Kimura H., Aoki N., Kobayashi N., Seki E.S., Abe M., Mori H.* Development of high-power copper vapor laser system // *Proc. SPIE.* 2000. V. 3886. P. 550–561.

A.G. Filonov, D.V. Shiyanov, M.V. Trigub. **Scaling of europium vapor laser.**

IR lasers are widely used in various fields of science and technology. In this regard, expanding the spectral range and obtaining effective generation in the IR is an urgent task. The object of our study is a laser based on the self-terminating transition of Eu atom with a radiation wavelength of 1.76 μm . In this work, we investigated the possibility of increasing the output parameters of such a laser by increasing the length of the active zone of the gas discharge tube (GDT). It is shown that increasing the volume of the discharge tube from 157 to 314 cm³ while maintaining the pump power level at 1200 W makes it possible to double the output power and laser efficiency. For the first time, an average radiation power of 2.5 W was achieved at the 1.76 μm line. The maximal efficiency of 0.3% is achieved at a pump power of 500 W. After 100 hours of operation, the energy characteristics of the Eu+Ne laser with an active zone volume of 314 cm³ demonstrated good repeatability, which allows us to conclude that it is possible to further increase the energy characteristics and lifetime of this laser. The results of the work can be used in microprocessing of materials, as well as in active optical systems associated with the visualization of fast processes.