

Секция А

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СРЕДЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЛАЗЕРОВ И ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

УДК 535.14

Активные среды на переходах атомов металлов, генерирующие в ближнем ИК-диапазоне спектра

Д.В. Шиянов, М.В. Тригуб

*Институт оптики атмосферы СО РАН**634055, Томск, Россия, пл. Академика Зюева, 1, trigub@iao.ru, shyanov73@mail.ru*

Работа посвящена исследованию энергетических характеристик активных сред на ИК-переходах атомов бария (1,5 мкм), европия (1,76 мкм) и марганца (1,29–1,399 мкм) в газоразрядных трубках с объемом активной зоны 88–314 см³. В качестве активной среды на переходах атома марганца были выбраны MnCl₂ и MnVg₂-лазеры. Достигнуты рекордные на данный момент времени удельные выходные параметры этих сред. В лазерах на переходах атомов бария и европия получена мощность генерации 5 Вт с удельной мощностью 57 и 16 мВт/см³, соответственно. В MnVg₂-лазере суммарная мощность излучения для видимой и ИК-области спектра также достигла 5 Вт с использованием добавки NVg. Удельная мощность генерации составила 32 мВт/см³. Принимая во внимание к полученным результатам высокие усилительные характеристики таких активных сред, можно заключить, что они могут использоваться в усилителях яркости изображения для визуализации процессов, экранированных фоновой засветкой в ближней ИК-области спектра.

Ключевые слова: активные среды, барий, европий, марганец, удельная мощность генерации; laser, absorption, stimulated Raman scattering, optoacoustics.

Введение

Развитие методики визуализации быстропротекающих процессов, экранированных фоновой засветкой, на основе узкополосного усиления лазерными средами связано с разработкой и оптимизацией усилителей сигналов. Наиболее пригодны для этих целей среды на переходах атомов металлов [1–3], обладающих высокими усилительными характеристиками. Важно отметить, что с использованием усилителей яркости на переходах атома меди получены рекордные характеристики лазерных мониторов – степень фильтрации, пространственное и временное разрешение визуализации и определен ряд направлений, связанных с практическим применением [4–12]. С учетом интенсивного развития средств визуализации в ближней ИК-области спектра, в первую очередь за счет развития SWIR камер, встает вопрос разработки усилителей яркости, обеспечивающих формирование сигналов и усиленных изображений в диапазоне до 2 мкм. В этой связи перспективными являются среды на самоограниченных переходах атомов марганца, бария и европия, поскольку демонстрируют высокие энергетические характеристики и большие коэффициенты усиления.

Так в лазере на парах бария достигнута мощность генерации 12,5 Вт [13]. Причем основная доля сконцентрирована на переходе с $\lambda = 1,5$ мкм. Кроме этого, на этой линии получено высокое усиление, что позволило использовать активный элемент этого лазера в качестве усилителя яркости в ИК-лазерном проекционном микроскопе и реализовать значение эффективного усиления за один проход $\sim 2,7 \cdot 10^3$ [14].

Лазер на парах марганца эффективно излучает на нескольких линиях в видимой (534,1–553,8 нм) и ИК-области спектра (1,289–1,399 мкм.). Максимальная суммарная мощность излучения на данный момент составляет 12 Вт, а коэффициент усиления в видимой области спектра достигает 0,2 см⁻¹ [16, 17]. Это позволило использовать Mn-лазер в качестве усилителя яркости изображений [18–20].

В лазере на парах европия с буферным газом неоном основная доля излучения сосредоточена на линии 1,76 мкм с максимальной на сегодняшний день мощностью генерации 2,5 Вт [21]. К сожалению, в этой среде не исследованы усилительные характеристики.

Цель настоящей работы заключалась в исследовании оптимальных режимов работы и достижении высоких удельных параметров генерации в активных средах на ИК-переходах атомов марганца ($\lambda = 1,29$ – $1,33$ мкм), бария ($\lambda = 1,5$ мкм) и европия ($\lambda = 1,76$ мкм) с газоразрядными трубками (ГРТ) объемом 88–314 см³ для создания компактных лазерных мониторов.

Материалы и методы

Для создания компактных лазерных мониторов требуются усилители яркости, отличающиеся простотой конструкции из доступных материалов. Поэтому было принято решение использовать галогениды марганца ($MnCl_2$ и $MnBr_2$) при изготовлении активных элементов на переходах атома Mn. За счет более низкой рабочей температуры $MnCl_2$ и $MnBr_2$ -лазеров их кюветы изготавливаются из плавящегося кварца. Галогениды бария и европия нецелесообразно использовать, т.к. их температуры плавления выше температуры плавления исходного металла. Длина активной зоны ГРТ лазеров на галогенидах марганца составляла 50 см, диаметр – 2 см. Конструкция этих активных элементов подробно описана в работе [22]. Каждая ГРТ была оснащена реверсивным генератором галогеноводорода (HCl, HBr) для увеличения выходной мощности лазера. Длина и диаметр ГРТ Eu-лазера – 100 и 2 см, а Ba – 50 и 1,5 см, соответственно. Конструкция этих лазеров была типичной для саморазогреваемых лазеров с керамическим вкладышем, кварцевой оболочкой и теплоизолятором между ними [2].

Резонатор лазеров 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-25 и ИКС-1 выделялись видимые и ИК-компоненты спектра излучения Mn-лазера. Для обнаружения и идентификации линий генерации использовался монохроматор МДР-23. Решетка монохроматора 600 линий/мм позволяла определять линии излучения до 2 мкм, а с помощью фотоэлементов ФК-19 и фотодиодного приемника DET05D2 регистрировалась форма импульсов генерации в зеленой и ближней ИК-области спектра.

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

Для накачки лазеров использовалась схема с диодно-резонансным зарядом рабочей емкости [1–3], а также полумостовая схема с импульсным зарядом [23]. В качестве коммутатора использовался тиратрон ТГИ1-1000/25. Для увеличения напряжения на электродах ГРТ в схему включался импульсный кабельный автотрансформатор (АТ) с коэффициентом трансформации 1:2. Для увеличения мощности накачки использовалась двухкаскадная схема по аналогии с [24]. В качестве основного буферного газа использовался неон и гелий.

Результаты эксперимента

Несмотря на то, что изучению Ва-лазера уделялось много внимания, до сих пор нет ясности в вопросах, связанных с определением оптимальных условий возбуждения: сорта буферного газа и его давления (в разных источниках приводятся разные данные), частоты следования импульсов (ЧСИ), удельных мощностей накачки и т.д.

При уровне накачки ~ 900 Вт с ЧСИ 10 кГц и рабочей емкостью $C_{\text{раб}} = 750$ пФ без АТ исследовалось влияние сорта буферного газа (Ne и He) и его давления. Результаты показали, что оно составило 20 торр и оказалось, что с гелием достигаются более высокие выходные параметры (рис. 1, а). Поэтому в дальнейшем исследование энергетических характеристик лазера производилось с буферным газом гелием.

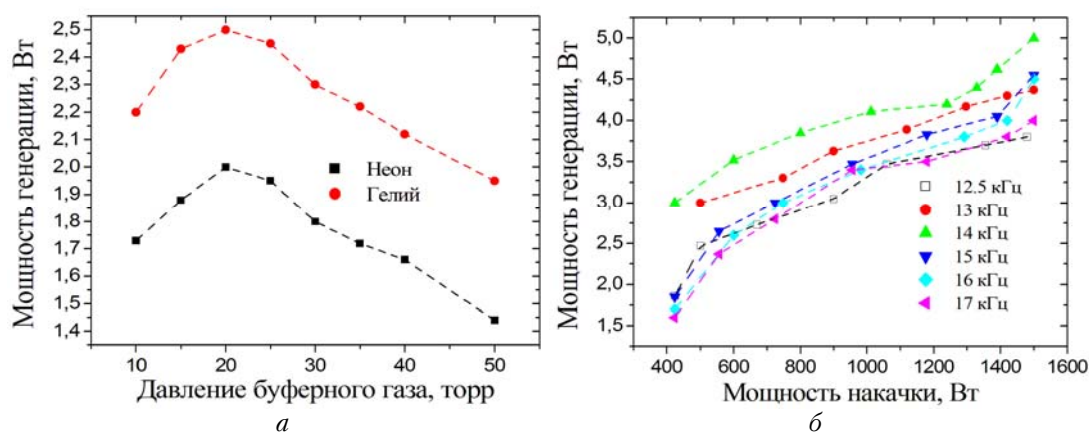


Рис. 1. Зависимость мощности генерации Ва-лазера от давления буферного газа неона и гелия (а); зависимость мощности генерации лазера от мощности накачки при частотах следования импульсов от 12,5 до 17 кГц (б), давление гелия 20 торр

На рис. 1, б приведены зависимости мощности генерации от мощности накачки для разных ЧСИ. Результаты показали линейный рост выходной мощности до 1500 Вт без ее насыщения с увеличением частоты. При ЧСИ 14 кГц, давлении гелия 20 торр и рабочей емкости 680 пФ максимальная мощность генерации достигла 5 Вт с использованием воздушного охлаждения ГРТ. В максимуме выходной мощности достигнуты удельные значения мощности и энергии генерации – 57 мВт/см³ и 4 мкДж/см³. Эти значения превосходят параметры, полученные ранее в мощном лазере [13] – 30 мВт/см³ и 2,2 мкДж/см³.

Лазер на переходе атома европия с $\lambda = 1,76$ мкм, работающий в среде буферного газа неона, демонстрирует высокие параметры генерации и ресурсные характеристики в отличие от других буферных газов [21, 25]. Для накачки нашего лазера использовалась двухкаскадная система с поочередным запуском тиратронов ($P_{\text{нак}}$ до 3 кВт) с импульсным кабельным АТ и обострительным конденсатором, что позволяло увеличить напряжение на ГРТ.

Выбор оптимальных условий накачки показал, что рабочая частота лазера составляет 7 кГц, а оптимальные емкости составляют 2,76–4,43 нФ на каждом канале. Максимальная мощность генерации составила 4,2 Вт с емкостью 4,43 нФ и мощности накачки $\sim 2,6$ кВт. Стоит отметить, что дальнейшее повышение уровня накачки приводило к перегреву стенки ГРТ и снижению мощности генерации. Частично перегрев был устранен за счет использования воздушного охлаждения. Таким образом, удалось повысить уровень накачки до 2,8–2,9 кВт и повысить мощность излучения до 5 Вт, что является рекордным значением на сегодняшний день. При этом энергия импульса составила 0,7 мДж, удельная мощность и энергия генерации 16 мВт/см³ и 2,3 мкДж/см³, соответственно. На рис. 2 показана зависимость мощности излучения от мощности накачки. Без охлаждения ГРТ наблюдается спад выходной мощности при превышении уровня накачки 2,3 кВт. Сверху представлен участок, когда используется воздушное охлаждение ГРТ.

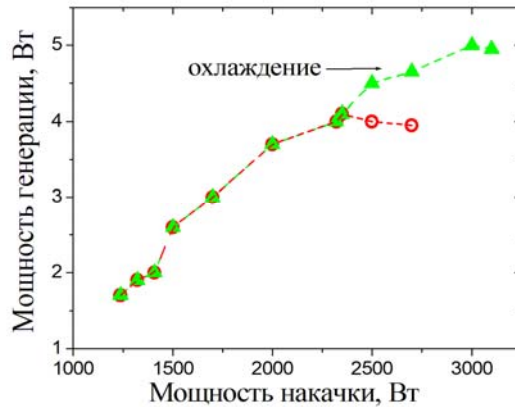


Рис. 2. Зависимость мощности генерации лазера от мощности накачки

При исследовании MnCl_2 и MnBr_2 -лазеров было установлено, что оптимальная рабочая температура стенки ГРТ составляет 780–800 °С. Причем изменение температуры на 40–50 °С приводит к снижению мощности генерации более, чем в 2 раза. Оптимальные частоты в схеме с диодно-резонансной зарядкой составляют 16–21 кГц.

Масштабирование давления буферного газа неона и гелия для MnCl_2 и MnBr_2 -лазеров показало, что оптимальное значение характерно для лазеров на парах галогенидов металлов и составляет порядка 15–25 торр, причем мощности обоих лазеров с этими газами сопоставимы. Было установлено, что добавка хлороводорода и бромоводорода в исследуемые активные среды в количестве 0,15 мм рт. ст. способствует увеличению мощности генерации. На рис. 3 приведены зависимости суммарной выходной мощности для этих систем с добавками HCl , HBr и без них. При этом рабочая емкость составляла 750 пФ, ЧСИ – 17 кГц, а мощность накачки 1–1,2 кВт.

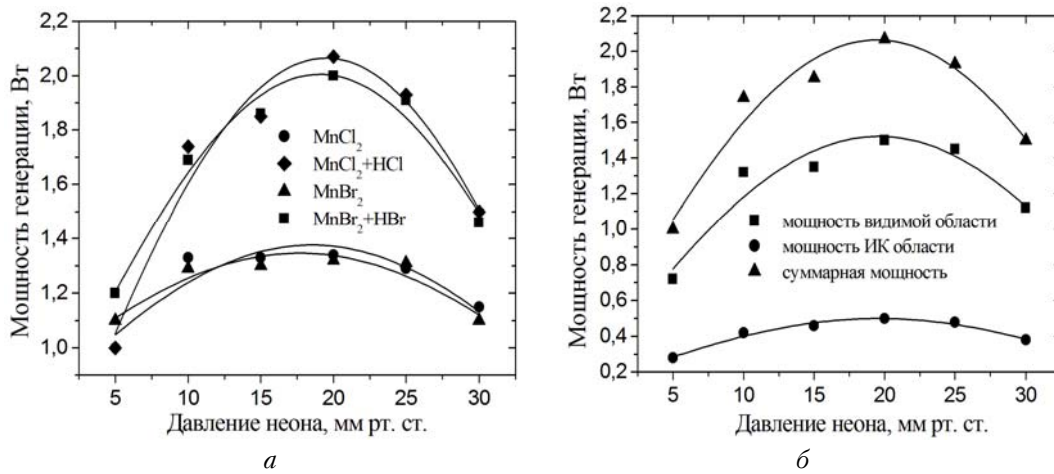


Рис. 3. Зависимости мощности генерации MnCl_2 и MnBr_2 -лазеров с добавками HCl , HBr давлением 0,15 торр (а) и без добавок (б), мощности $\text{MnCl}_2 + \text{HCl}$ -лазера суммарной и по компонентам в видимой и ИК-области от давления буферного газа

Для повышения мощности накачки и напряжения использовалась двухкаскадная схема с импульсным зарядом рабочей емкости и импульсным АТ. Суммарная ЧСИ составляла 14 кГц, рабочие емкости от 1,5 до 3,3 нФ. На рис. 4 на примере $\text{MnBr}_2 + \text{HBr}$ -лазера показаны осциллограммы с импульсами напряжения тока и генерации в видимой части спектра без АТ и с подключенным АТ.

Как видно, импульсный АТ позволяет не только увеличить напряжение на ГРТ, но и уменьшить длительность импульсов тока и напряжения и тем самым повысить мощность генерации.

Стоит отметить, что до настоящего момента времени не проводились активные исследования характеристик лазеров на парах галогенидов марганца. Максимальная мощность излучения 2,3 Вт при мощности накачки 1,9 кВт и ЧСИ 12,5 кГц реализована в работе [26]. При этом удельные выходные параметры составили 23 мВт/см³ и 1,8 мкДж/см³. Увеличение мощности генерации до 2 кВт позволило нам в $\text{MnBr}_2 + \text{HBr}$ -лазере, работающего с ЧСИ 14 кГц достичь мощности 5 Вт. При меньшей удельной мощности накачки 12,7 Вт/см³, чем в работе [26] (19,1 Вт/см³) удельные характеристики генерации составили 32 мВт/см³ и 2,2 мкДж/см³, а мощность генерации в ИК-области спектра 1–1,5 Вт.

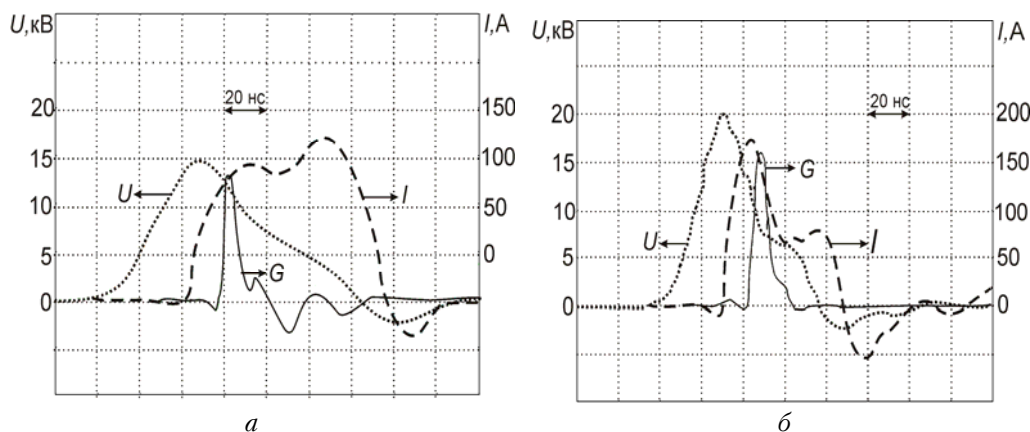


Рис. 4. Импульсы напряжения U , тока I и генерации G в видимой части спектра MnBr_2 -лазера с добавкой HBr давлением 0,15 торр. $C_{\text{раб}} = 1,5$ нФ, $f = 14$ кГц, $P_{\text{Ne}} = 15$ мм рт. ст.: без кабельного АТ (а), с кабельным АТ (б)

Полученные результаты показали отсутствие насыщения мощности генерации исследуемых Ba , Eu и MnCl_2 и MnBr_2 -ИК-лазеров при увеличении мощности накачки, что говорит об их дальнейшем потенциале для использования в качестве усилителей яркости изображения.

Заключение

В активных средах на ИК-переходах атомов Ba , Eu и Mn (MnCl_2 - и MnBr_2 -лазеры) реализованы рекордные удельные параметры генерации. В Ba и Eu -лазерах мощность генерации была ограничена перегревом активной среды. Поэтому дальнейшее увеличение энергетических характеристик исследуемых ГРТ возможно за счет уменьшения слоя теплоизолятора. В лазерах на переходах атома марганца ограничение по мощности возбуждения было связано с возможностью источника накачки. Причем за счет того, что в атоме Mn нижние рабочие уровни для переходов в видимой и ИК-области спектра являются общими, появляется возможность варьирования соотношением мощности генерации между ними за счет изменения условий накачки, в первую очередь, напряжения на ГРТ и давления буферного газа.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке госбюджета ИОА СО РАН.

Список литературы

1. Солдатов А.Н., Соломонов В.И. Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов. Новосибирск: Наука, 1985. 152 с.
2. Батенин В.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Молодых Э.И., Климовский И.И. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. Москва: Научная книга, 1998. 544 с.
3. Little C.E. Metal Vapor Lasers: Physics, Engineering & Applications. Chichester (UK): John Wiley & Sons, 1998. 620 p.
4. Евтушенко Г.С., Казарян М.А., Торгаев С.Н., Тригуб М.В., Шиянов Д.В. Скоростные усилители яркости на индуцированных переходах в парах металлов. Серия «Излучение. Пучки. Плазма». Вып. 1. Томск: STT, 2016. 246 с.
5. Васнев Н.А., Тригуб М.В. Бистатический лазерный монитор для визуально-оптической диаг. Серия «Излучение. Пучки. Плазма». Вып. 6. Томск: STT, 2024. 156 с.
6. Evtushenko G.S., Torgaev S.N., Trigub M.V., Shiyarov D.V., et. Laser monitor for imaging single crystal diamond growth in H_2 - CH_4 microwave plasma // Optics and laser technology. 2019. V. 120. Article 105716.
7. Li L., Mostovshchikov A.V., Ilyin A.P., Antipov P.A., Shiyarov D.V., Gubarev F.A. In situ nanopowders combustion visualization using laser systems with brightness amplification // Proceedings of the combustion institute. 2021. V. 38. P. 1695–1702.

8. *Gubarev F.A., Chulkov A.O., Mostovshchikov A.V.* Laser tracking system for real-time monitoring the combustion of energetic nanomaterials // *Optics and laser technology*. 2024. V. 175. Article 110835.
9. *Trigub M.V., Vasnev N.A., Gembukh P.I., Osipov V.V., Platonov V.V., Tikhonov E.V.* Active optical system for high-speed imaging of oxides laser evaporation // *Optics and laser technology*. 2024. V. 174. P. 110635.
10. *Тригуб М.В., Малахов Д.В., Степахин В.Д., Евтушенко Г.С., Балабанов Д.А., Скворцова Н.Н.* Высокоскоростная визуализация плазмохимического синтеза в цепных быстротекающих процессах, инициируемых излучением гиротрона // *Оптика атмосферы и океана*. 2020. Т. 33, № 3. С. 199–204.
11. *Buzhinsky R.O., Savransky V.V., Zemskov K.I., Isaev A.A., Buzhinsky O.I.* Observation of objects under intense plasma background illumination // *Plasma Phys. Rep.* 2010. V. 36. P. 1269–1271.
12. *Buzhinsky O.I., Vasiliev N.N., Moshkunov A.I., Slivitskaya L.A., Slivitsky A.A.* Copper vapor laser application for surface monitoring of divertor and first wall in ITER // *Fusion Eng. Des.* 2002. iss. 60. P. 141–155.
13. *Исаев А.А., Леммерман Г.Ю., Маркова С.В., Петраш Г.Г.* Характеристики импульсной генерации на переходах в атоме бария // *Квантовая электроника*. 1979. Т. 6, № 9. С. 1942–1947.
14. *Земсков М.И., Казарян М.А., Петраш Г.Г. и др.* Лазерный проекционный микроскоп с усилителем яркости на парах бария и люминесцентным экраном для визуализации ИК-изображений // *Квантовая электроника*. 1980. Т. 7, № 7. С. 2454–2459.
15. *Исаков В.К., Потапов С.Е.* Исследование генерации активных сред на переходах атомов марганца // *Квантовая электроника*. 1983. Т. 10, № 3. С. 588–597.
16. *Исаков В.К., Калугин М.М., Парфенова Е.Н., Потапов С.Е.* Исследование усиления в активных средах на переходах атомов меди и марганца применительно к созданию проекционных систем с усилением яркости изображений // *ЖТФ*. 1983. Т. 53, № 4. С. 704–714.
17. *Исаков В.К.* Исследование усиления активных сред на переходах атомов марганца // *Квантовая электроника* 1984. Т. 11, № 4. С. 666–672.
18. *Петраш Г.Г.* Усилители яркости для оптических приборов // *Вестник АН СССР*. 1982. № 2. С. 66–75.
19. *Тригуб М.В., Шиянов Д.В., Суханов В.Б., Петухов Т.Д., Евтушенко Г.С.* Усилитель яркости на переходах атома марганца с частотой следования импульсов до 100 кГц // *Письма в ЖТФ*. 2018. Т. 44. Вып. 24. С. 135–142.
20. *Тригуб М.В., Гембух П.И., Васнев Н.А., Шиянов Д.В.* Лазерный монитор для одновременной визуализации в видимом и ИК-диапазонах спектра // *Оптика атмосферы и океана*. 2023. Т. 36, № 3. С. 239–243.
21. *Филонов А.Г., Шиянов Д.В., Тригуб М.В.* лазер на парах европия ($\lambda = 1,76$ мкм) с мощностью излучения 2,5 Вт // *Оптика атмосферы и океана*. 2024. Т. 37, № 4. С. 335–339.
22. *Shiyanov D.V., Trigub M.V., Sokovikov V.G., Evtushenko G.S.* MnCl₂ laser with pulse repetition frequency up to 125 kHz // *Optics and Laser Technology*. 2020. V. 129. P. 106302.
23. *Троцкий В.О., Димаки В.А., Филонов А.Г.* Источник питания для лазера на парах бромиде меди // *Приборы и техника эксперимента*. 2016. № 3. С. 57–60.
24. *Шиянов Д.В., Димаки В.А., Тригуб М.В., Троцкий В.О., Гембух П.И.* CuBr лазер с накачкой трехкаскадным источником питания // *Оптика атмосферы и океана*. 2022. Т. 35, № 4. С. 266–270.
25. *Соковиков В.Г., Филонов А.Г., Шиянов Д.В.* Сравнение параметров генерации Ne + Eu и He + Eu-лазеров // *Оптика атмосферы и океана*. 2019. Т. 32, № 2. С. 168–171.
26. *Исаков В.К., Калугин М.М., Потапов С.Е.* Лазер на парах хлорида марганца (энергетические характеристики) // *Письма в ЖТФ*. 1976. Т. 2. Вып. 18. С. 747–751.

D.V. Shiyanov, M.V. Trigub. Active media on metal atom transitions lasing in the near IR range of the spectrum.

The work is devoted to the study of the energy characteristics of active media on the IR transitions of barium (1.5 μm), europium (1.76 μm) and manganese (1.29–1.399 μm) atoms in gas-discharge tubes with an active zone volume of 88–314 cm^3 . MnCl₂ and MnBr₂ lasers were chosen as the active media on the transitions of the manganese atom. Record-breaking specific output parameters of these media have been achieved to date. In lasers on the transitions of barium and europium atoms, the generation power of 5 W was obtained with a specific power of 57 and 16 mW/cm^3 , respectively. In the MnBr₂ laser, the total radiation power for the visible and IR spectral regions also reached 5 W using the HBr additive. The specific generation power was 32 mW/cm^3 . Taking into account the high amplification characteristics of such active media, it can be concluded that they can be used in image brightness amplifiers for visualization of processes screened by background illumination in the near IR region of the spectrum.