

Лазер на парах европия

В.О. Троицкий¹, В.Г. Соковиков¹, А.Г. Филонов¹, Д.В. Шиянов^{1,2*}

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

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634034, г. Томск, пр. Ленина, 30

Поступила в редакцию 12.12.2016 г.

Представлены результаты экспериментального исследования работы газоразрядного Ne–Eu-лазера. Идентифицированы генерационные линии, определены формы импульсов излучения в атоме и ионе европия в конкретных условиях эксперимента. Установлено влияние давления буферного газа Ne и частоты следования импульсов на энергетические характеристики лазера; определены их оптимальные значения. Показано, что при оптимальных условиях работы для соответствующих переходов мощность излучения составила 1 Вт на линии 1759 нм и 70 мВт на линии 664,5 нм.

Ключевые слова: лазеры на парах металлов, газоразрядный способ накачки, генерация на атоме европия, генерация на ионе европия; metal vapor lasers, gas discharge excitation, lasing on europium atom, lasing on europium ion.

Введение

Развитие лазеров на парах металлов связано с изучением работы активных сред в различных условиях. В качестве активных сред используются как чистые металлы, так и их соли. В результате комплексных исследований к настоящему времени получены высокие КПД, мощности излучения, а также ресурс работы лазеров на парах меди, галогенидов меди, золота, марганца, стронция и т.д. [1–3]. К классу этих перспективных лазеров относится и лазер на парах европия.

Впервые о лазерной генерации, наблюдаемой при газоразрядном способе возбуждения паров европия, сообщалось в работе [4]. Уже первые исследования Eu-лазера [5] показали, что он обладает хорошими энергетическими характеристиками, перспективой создания столкновительного режима работы, а также возможностью генерирования на нескольких длинах волн. Дальнейшее изучение свойств активной среды, ее специфики позволило существенно улучшить характеристики лазера и достичь мощности генерации 13 Вт и КПД 0,24% [6]. Следует отметить, что для получения такого результата потребовалось провести тщательные исследования, которые показали, что наилучшие генерационные характеристики Eu-лазера получаются на ионе европия с использованием гелия высокого давления в качестве буферного газа. Потому практически все исследования проводились с использованием гелия. Было установлено, что только с использованием

этого газа возможен перевод ионной генерации с $\lambda = 1001,9$ нм на переходе $6p^7P_4 \rightarrow 5d^7D^0_5$ в столкновительный режим [7]. Сравнение атомной и ионной генераций, полученных в работе [5], также проводилось с гелием.

Вместе с тем известно, что мощность генерации на атомных линиях, наблюдаемых на переходах с резонансного на метастабильный уровень, при газоразрядном способе возбуждении паров металлов может существенно зависеть от используемого буферного газа. Например, лазер на парах стронция также генерирует большую мощность в присутствии буферного газа гелия [8]. В лазерах на парах меди и золота применение неона позволило получать высокие мощности генерации [1]. Замена буферного газа влияет не только на величину мощности генерации, но и на другие характеристики лазера.

Исходя из изложенных выше факторов, представляется интересным рассмотреть некоторые аспекты работы лазера на парах европия в инертной среде неона.

Экспериментальная установка

Для исследования работы Ne–Eu-лазера была собрана экспериментальная установка (рис. 1).

Газоразрядная трубка (ГРТ) лазера представляла собой газоразрядный канал, образованный керамической трубкой из BeO с внутренним диаметром 20 мм и длиной 500 мм. В качестве теплоизолятора использовался порошок ZrO₂. Газоразрядный канал и теплоизолятор помещались в вакуумирующую оболочку из оптически чистого кварца. По краям разрядного канала располагались электроды в виде полых цилиндров из ниобия. Вывод излучения производился через кварцевые окна.

* Владимир Олегович Троицкий (qel@asd.iao.ru); Владимир Григорьевич Соковиков (gel@asd.iao.ru); Александр Григорьевич Филонов (gel@asd.iao.ru); Дмитрий Валерьевич Шиянов (qel@asd.iao.ru).

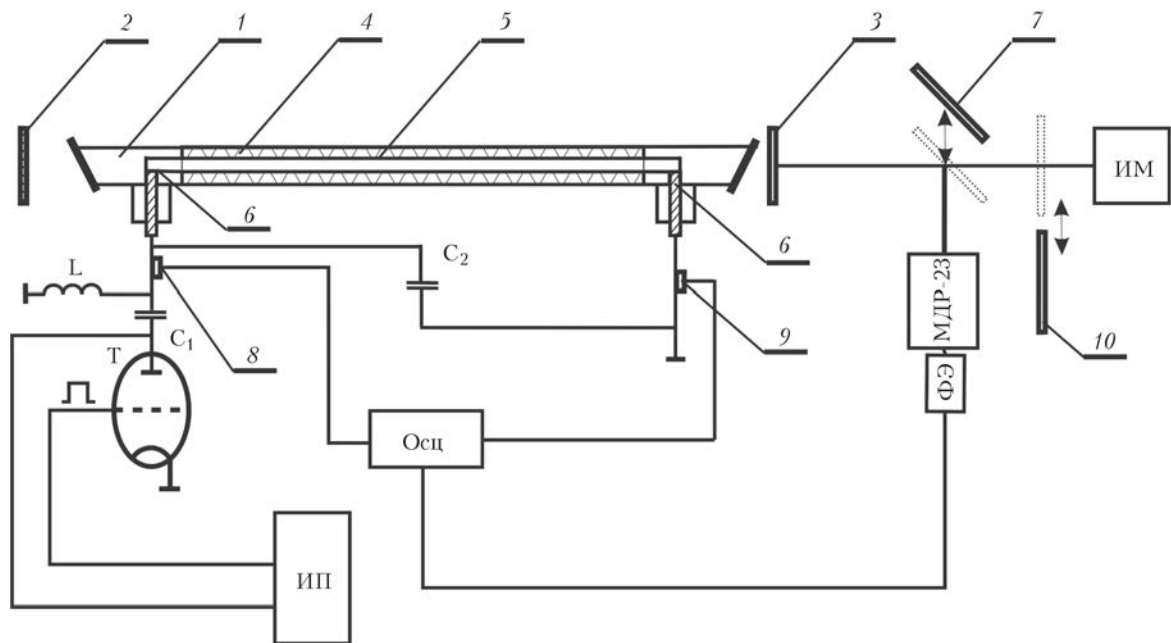


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – газоразрядная трубка; 2 – глухое зеркало резонатора; 3 – выходное зеркало резонатора (кварцевая пластина); 4 – теплоизолирующий порошок ZrO_2 ; 5 – керамическая трубка из BeO_2 ; 6 – электроды; 7 – поворотное зеркало; 8 – делитель напряжения Tektronics P6015 A; 9 – индикатор тока PearsonTM current monitor; 10 – фильтр СЗС 26; Т – тиратрон ТГИ1-1000/25; C_1 – рабочая емкость; L – зарядная индуктивность; C_2 – обостритель; ИМ – измеритель мощности Ophir 20C-SH; Осц – осциллограф LeCroy Wave Jet 324; ФЭ – фотоэлемент ФК-19 или ЛФД-2; МДР-23 – монохроматор; ИП – источник питания

Кусочки европия располагались равномерно вдоль разрядного канала. Разряд рабочей емкости (730 пФ) через тиратрон и ГРТ осуществлял разогрев и возбуждение активного объема. Заряд C_1 производился от источника питания через зарядную индуктивность. В электрической схеме возбуждения использовался обострительный конденсатор (165 пФ). Регистрация импульсов напряжения и тока осуществлялась посредством делителя напряжения 8 и индикатора тока 9, сигналы с которых выводились на осциллограф. Резонатор Фабри–Перо состоял из глухого зеркала с алюминиевым покрытием и выходного зеркала, представляющего собой кварцевую пластинку. Излучение лазера направлялось на измеритель мощности, посредством чего регистрировалась суммарная мощность генерации. С помощью фильтра СЗС 26 выделялась линия генерации 664,5 нм и определялась ее средняя мощность. Поворотное зеркало 7 позволяло направлять излучение лазера на монохроматор МДР-23. Решетка монохроматора 600 штр/мм позволяла определять линии генерации до 2000 нм, а с помощью фотоэлемента ФЭ регистрировалась форма импульсов генерации. Изменение давления буферного газа Ne в ГРТ производилось с помощью вакуумного поста с подключением газобаллонного оборудования.

Результаты эксперимента и их обсуждение

На рис. 2 показаны переходы, на которых ранее при исследовании Ne–Eu-лазера была получена генерация в атоме и ионе европия. Ионные переходы

ды $6p^7P_4 \rightarrow 5d^7D^0_4$ ($\lambda = 1016$ нм) и $6p^9P_3 \rightarrow 5d^7D^0_4$ ($\lambda = 1477$ нм) на рисунке не отмечены.

Проведенные эксперименты показали, что в разряде в среде буферного газа Ne осуществляется устойчивая генерация, параметры которой в сильной степени зависят от давления Ne, частоты следования импульсов возбуждения, температурного режима работы ГРТ. Это потребовало определения границ, в которых осуществляется эффективная генерация. С помощью монохроматора МДР-23 были обнаружены и идентифицированы следующие линии генерации: 664,5; 1001,9; 1361; 1759 нм. На рис. 2 эти линии отмечены двойной чертой. Необходимо подчеркнуть, что применение кварцевых пластин в качестве выходных окон ГРТ и зеркала резонатора ограничивало число наблюдаемых линий генерации в силу пропускной способности кварца. Как и в случае инертной среды Ne, по мере повышения рабочей температуры изменялся спектр генерации. В начале развития генерации появлялись ионные линии $6p^9P_5 \rightarrow 5d^9D^0_6$ ($\lambda = 664,5$ нм), $6p^9P_4 \rightarrow 5d^7D^0_5$ ($\lambda = 1361$ нм) и $6p^7P_4 \rightarrow 5d^7D^0_5$ ($\lambda = 1001,9$ нм), затем появлялась атомная линия $6py^8P_{9/2} \rightarrow 5da^8D^0_{11/2}$ ($\lambda = 1759$ нм), а ионные линии угасали. На рис. 3 показано начало генерации и обозначена область излучения ионных линий. Видно, что при работе с вводимой мощностью, близкой к максимальной выходной мощности, мощность излучения довольно быстро проходит область генерации ионных линий. Однако генерация ионных линий стабилизировалась путем уменьшения вводимой в разряд мощности, например за счет снижения частоты следования импульсов (ЧСИ)

возбуждения. При этом разогрев замедлялся или вовсе останавливался, что позволяло определить параметры генераций ионных линий.

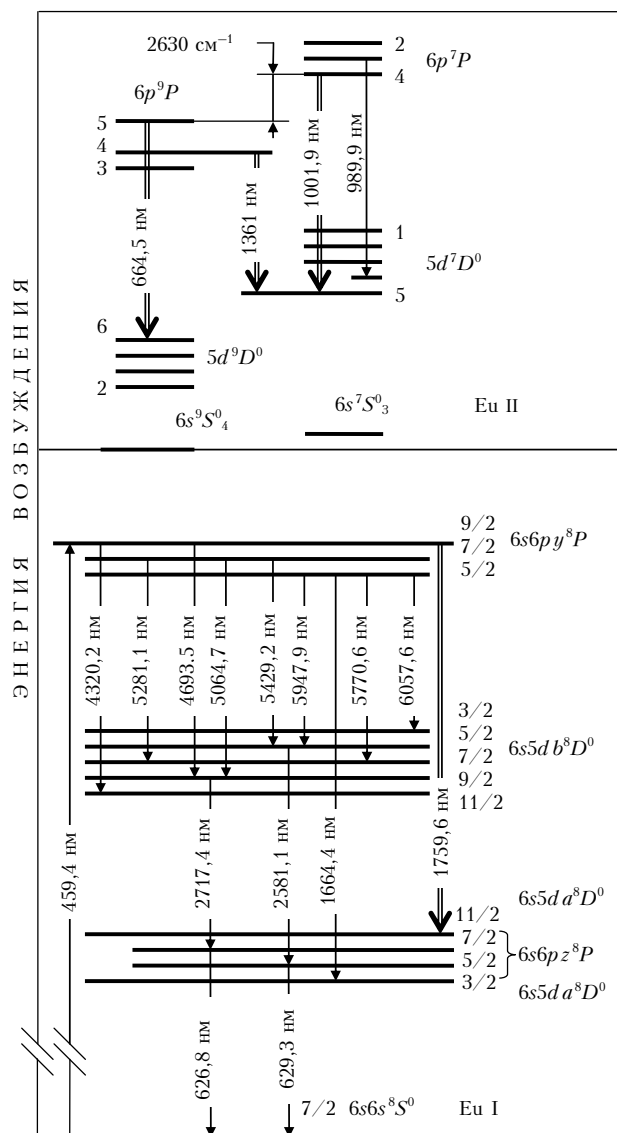


Рис. 2. Энергетическая схема уровней атома и иона европия. Данные о лазерных переходах взяты из справочника [9]. Когерентное излучение на резонансных переходах с $\lambda = 626,8$ и $629,3$ нм получено при оптической накачке паров европия [10]

Мощность генерации зависит от вкладываемой в разряд мощности. На рис. 4 приведен график этой зависимости. Мощность излучения достигала 1,1 Вт и КПД 0,1% при увеличении вкладываемой мощности до 1050 Вт. При этом генерация в максимуме мощности осуществлялась исключительно на линии 1759 нм. Фрагмент на рис. 4 показывает осциллограмму импульса генерации на этой длине волны. Длительность импульса по основанию составила 30 нс. Дальнейшее повышение мощности накачки до 1,3 кВт позволило получить максимальную выходную мощность 1,4 Вт.

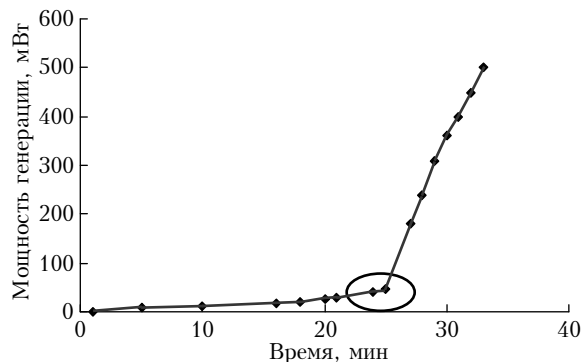


Рис. 3. Зависимость мощности генерации от времени при вводимой в разряд мощности 1,2 кВт

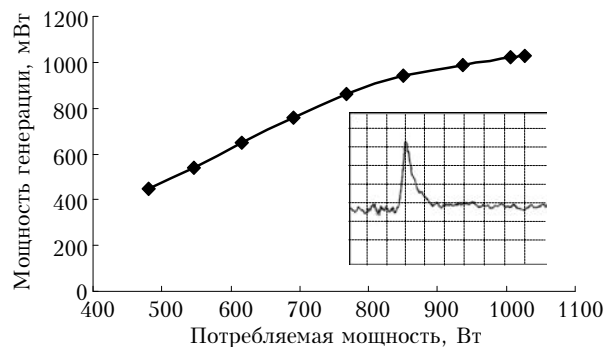


Рис. 4. Зависимость мощности генерации ($\lambda = 1759$ нм) от вводимой в разряд мощности; ЧСИ – 11 кГц; давление Ne – 30 торр. Фрагмент – импульс генерации (20 нс/дел.)

Характерной особенностью лазера на парах европия является сильная зависимость от частоты следования импульсов возбуждения (рис. 5).

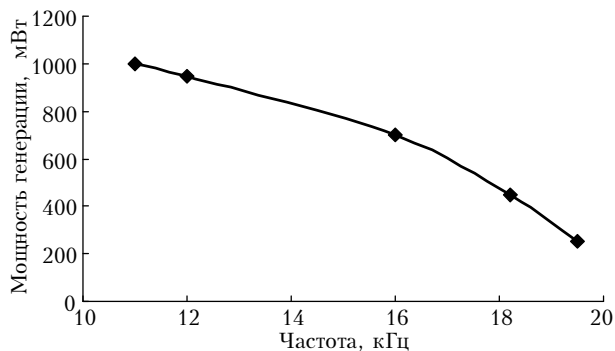


Рис. 5. Поведение мощности генерации в зависимости от ЧСИ

Мы полагаем, что такая зависимость обусловлена наличием остаточных электронов, роль которых для лазеров на самоограничивающихся переходах подробно рассмотрена в ряде работ, например [11, 12]. Они не только подзаселяют рабочий метастабильный уровень, но и снижают величину напряжения, формирующегося на ГРТ. Тем более что в нашем конкретном случае существует очень сильная зависимость энергосъема от напряжения, прикладываемого к ГРТ.

Рассмотрим графики на рис. 6. Кривая 1 показывает зависимость энергосъема от напряжения при фиксированной частоте. При изменении напряжения от 7 до 9,25 кВ, т.е. при увеличении напряжения

в 1,3 раза, мощность генерации возросла в 1,8 раза. Кривая 2 показывает зависимость энергосъема от напряжения на ГРТ для разных ЧСИ. Можно видеть, что, к примеру, при ЧСИ, равной 19 кГц (точка *a* на кривой 2), при одном и том же напряжении на ГРТ энергосъем ниже, чем при 13 кГц. Точка *e* лежит выше кривой 1, но в ней ЧСИ ниже (8 кГц). Подчеркнем, что напряжение на ГРТ одинаковое. Следовательно, за снижение энергосъема при увеличении ЧСИ отвечает активная среда, т.е. ее состояние. Поскольку давление буферного газа фиксировано, то мы можем предположить, что в данном случае определяющим фактором может быть заселение метастабильного уровня.

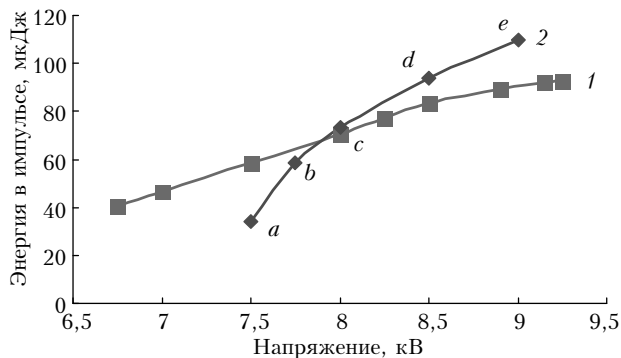


Рис. 6. Поведение энергосъема в зависимости от напряжения на ГРТ: 1 – при фиксированной ЧСИ (13 кГц); 2 – при разных ЧСИ (*a* – 19, *b* – 15, *c* – 13, *d* – 10, *e* – 8 кГц)

Ввиду того что изменение частотного режима в ходе эксперимента производилось достаточно быстро, можно считать, что температура стенок и рабочего вещества оставалась приблизительно постоянной и концентрация рабочего вещества тоже была фиксированной. Если это так, то мощность генерации существенно зависит от напряжения на ГРТ, а значит, и от давления буферного газа, так как с увеличением давления Ne падает приведенная величина отношения напряженности электрического поля к давлению. В связи с этим выявленная зависимость может отражать тот факт, что энергосъем сильно зависит от температуры электронов. Зависимость мощности излучения от давления буферного газа Ne показана на рис. 7.

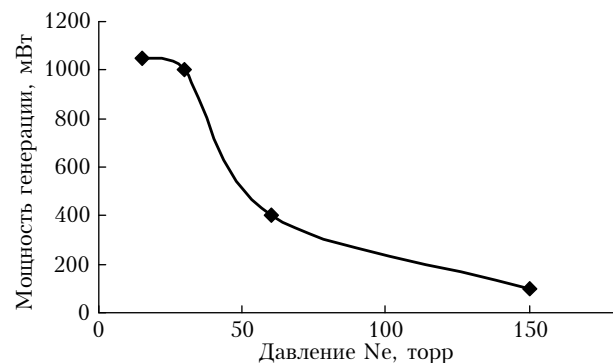


Рис. 7. Зависимость мощности генерации от давления буферного газа

Представляется интересным рассмотреть поведение красной линии генерации. Она удобна тем, что позволяет визуализировать трассу прохождения ИК-излучения. В наших экспериментах генерация на этой линии появляется при достаточно высокой ЧСИ. По всей видимости, это связано с накопительными процессами. Относительно низкая рабочая температура на линии 664,5 нм обуславливает низкую концентрацию паров рабочего вещества, и требуется достаточно высокая ЧСИ возбуждения для преодоления порога генерации. Однако генерация пропадала при дальнейшем увеличении частоты, что можно связать со снижением температуры электронов в связи с увеличением роли остаточных электронов. Область существования генерации зависела как от давления буферного газа, так и от ЧСИ, что продемонстрировано на рис. 8, *a*. Мощность генерации на переходе $6p^9P_5 \rightarrow 5d^9D_6^0$ растет с увеличением давления буферного газа Ne (рис. 8, *б*).

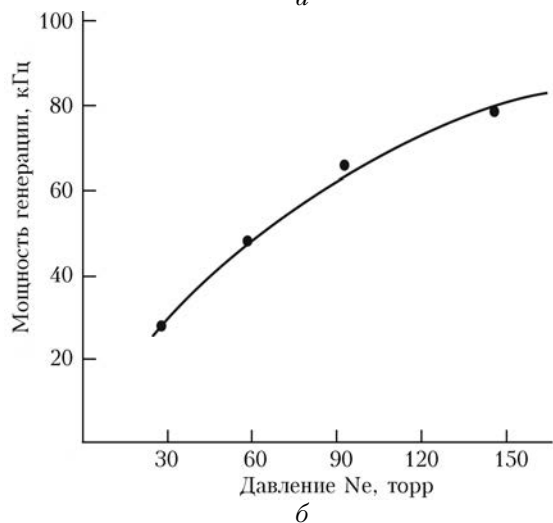
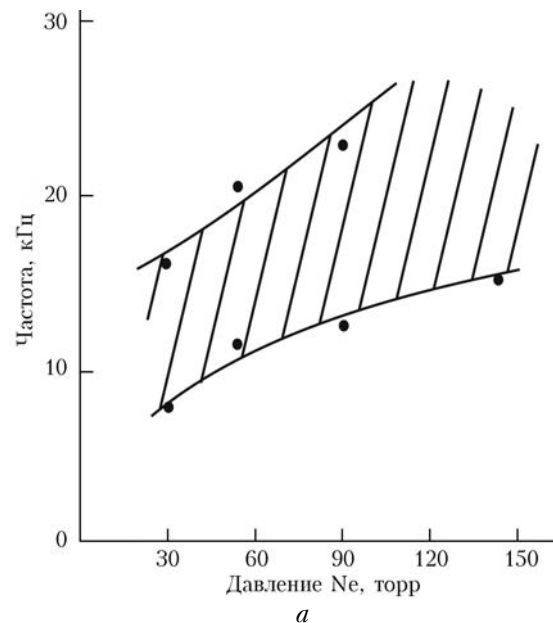


Рис. 8. Область существования генерации в зависимости от давления буферного газа и ЧСИ (*a*); зависимость мощности генерации от давления буферного газа (*б*)

На рис. 9 показано временное расположение импульсов тока, напряжения и импульса генерации. Оно является типичным для лазеров на самоограниченных переходах. Длительность импульса генерации составила 30 нс.

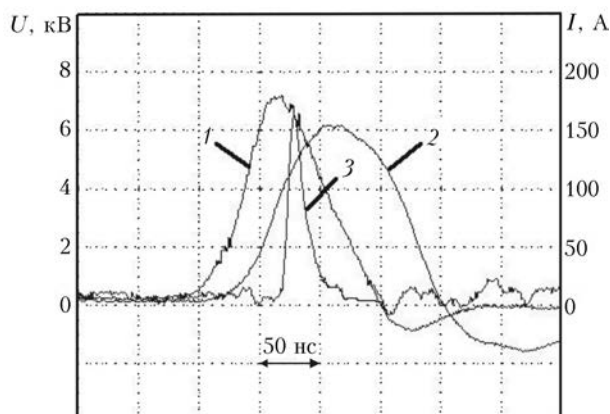


Рис. 9. Положение и форма импульсов напряжения (1), тока (2) и импульса генерации (3) для излучения с $\lambda = 664,5$ нм

Согласно данным работы [5], в присутствии гелия генерация на линии с $\lambda = 664,5$ нм наблюдается даже в режиме одиночных импульсов. При этом отмечено, что только линии генерации, начинающиеся с резонансных уровней иона мультиплетности 7 ($6p^7P_3 - 989,9$ нм; $6p^7P_4 - 1001,9$ нм) соответственно, начинают генерировать при ЧСИ большей, чем 8 кГц. Исходя из этих результатов, авторы сделали вывод о том, что резонансные уровни иона европия мультиплетности 9 ($6p^9P_5$) заселяются при возбуждении электронным ударом непосредственно с основного состояния атома. Напротив, возбуждение резонансных уровней иона мультиплетности 7 осуществляется с основного состояния иона. Поэтому в последнем случае для накопления пороговой населенности основного состояния иона требуется высокая частота следования импульсов.

В нашем случае линии генерации, начинающиеся с уровней мультиплетности 7 и 9, демонстрируют одинаковое поведение. Это означает, что при использовании неона имеет место иной механизм заселения $6p^9P_5$ -уровня, нежели чем при использовании гелия. В пользу этого предположения свидетельствует и зависимость, представленная на рис. 8, а.

В связи с вышесказанным представляют интерес результаты, полученные при оптической накачке смеси паров европия и буферного газа (в основном гелия) перестраиваемым УФ-излучением [13, 14]. В ходе этих работ было получено вынужденное излучение на ионных переходах европия, в том числе и на тех, о которых идет речь в нашей статье (664,5 и 1001,9 нм). Первый переход начинается с уровня иона $6p^9P_5$, второй с уровня $6p^7P_4$. Авторы считают, что механизм накачки указанных уровней является процесс двухфотонной, или двухступенчатой, ионизации через автоионизационное двухэлектронное состояние атома европия. Результаты этой работы указывают на то, что канал на-

качки $6p^7P_4$ -уровня необязательно должен быть связан с накоплением населенности основного состояния иона европия (уровни $6s^9S_4^0$ и $6s^7S_3^0$).

Стоит отметить, что порядок появления ионных и атомных линий генерации, наблюдаемый с ростом давления паров металлов при газоразрядном и оптическом [14] способах возбуждения, совпадает. А именно: первыми появляются ионные линии, затем, с ростом давления паров металла, начинают генерировать атомные линии.

В ходе исследования работы лазера на парах европия было установлено, что при использовании неона в качестве буферного газа время эксплуатации ГРТ заметно выше, чем при использовании гелия. В работе [15] отмечалось, что срок службы He–Eu-лазера составляет несколько часов вследствие необратимой металлизации лазерной кюветы. К настоящему моменту наша ГРТ отработала более 100 ч. Можно предложить следующее объяснение этого обнаруженного факта. Возможно, гелий, являясь более легким газом, способствует более быстрой термализации атомов европия в момент их столкновений со стенками керамического вкладыша. Разумеется, это предложенное объяснение требует отдельного исследования.

Заключение

В результате проведенной работы в Ne–Eu-лазере была реализована генерация на четырех линиях излучения с длинами волн 664,5; 1001,9; 1361 и 1759 нм, определены форма и положение импульсов генерации относительно импульсов тока и напряжения. Выявлено, что Ne–Eu-лазер является эффективным лазером, который, в зависимости от параметров лазерной системы, может генерировать излучение как на длине волны 1759 нм мощностью 1 Вт, так и на длине волны 664,5 нм мощностью до 70 мВт. В максимуме мощности генерации на линии 1759 нм область оптимальных давлений лежит в пределах 20–30 торр, а ЧСИ ~10 кГц. На переходе с $\lambda = 664,5$ нм оптимальная ЧСИ составляет 15–25 кГц, а влияние давления на выходную мощность требует дополнительного изучения, поскольку до 150 торр мощность генерации показывает монотонный рост. При этом импульсная энергия излучения возрастает с увеличением напряжения. Изменение температурного режима работы ГРТ лазера позволяет осуществлять перестройку длины волны излучения. Сравнение газоразрядного и оптического способов возбуждения активной среды европия показало одинаковый порядок появления ионных и атомных линий генерации. Выявленные закономерности определяют возможность дальнейшего улучшения параметров лазера.

1. 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 – 2. М.: Физматлит, 2011. 616 с.
2. Little C.E. Metal Vapor Lasers. Physics, Engineering & Applications. UK, Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 1998. 620 p.

3. *Евтушенко Г.С., Шиянов Д.В., Губарев Ф.А.* Лазеры на парах металлов с высокими частотами следования импульсов. Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2010. 276 с.
4. *Cahuzac Ph.* Emission laser infrarouges dans les vapeurs de terres rares // *Phys. Lett. A.* 1970. V. 31, N 10. P. 541–542.
5. *Бохан П.А., Климкин 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.
6. *Bokhan P.A., Zakrevsky D.E.* Investigation of a He–Eu⁺ laser excited by short pumping pulses // *J. Rus. Laser Res.* 1995. V. 16, N 2. P. 138–144.
7. *Bokhan P.A., Klimkin V.M., Maltsev A.N., Prokoryev V.E., Sokovikov V.G.* Investigation of anomalously high-speed deexcitation of Eu⁺ metastable states in gas discharge plasma // *J. De Physique.* 1979. V. 40, N 7. P. 115–116.
8. *Солдатов А.Н., Филонов А.Г., Полуни Ю.П., Васильева А.В.* Лазерная система «генератор-усилитель» на парах стронция со средней мощностью более 20 Вт // *Оптика атмосфер. и океана.* 2008. Т. 21, № 8. С. 666–668.
9. *Beck R., English W., Gurs K.* Table of laser lines in gases and vapors. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 1978. 130 p.
10. *Соковиков В.Г., Климкин А.В.* Вынужденное комбинационное рассеяние излучения ХеF^{*}- и КгF-лазеров в парах самария и европия // *Оптика атмосфер. и океана.* 2014. Т. 27, № 4. С. 295–301; *Sokovikov V.G., Klimkin A.V.* Stimulated raman scattering of ХеF^{*} and КгF laser radiation in samarium and europium vapors // *Atmos. Ocean. Opt.* 2014. V. 27, N 5. P. 447–453.
11. *Бохан П.А.* Процессы релаксации и влияние метастабильных состояний атомов и ионов металлов на механизм генерации и энергетические характеристики лазеров // *Квант. электрон.* 1986. Т. 13, № 9. С. 1837–1847.
12. *Земсков К.И., Исаев А.А., Петраш Г.Г.* Роль отрицательных ионов в плазме импульсных лазеров на парах металлов и их соединений // *Квант. электрон.* 1997. Т. 24, № 7. С. 596–600.
13. *Климкин В.М., Прокопьев В.Е., Соковиков В.Г.* Экспериментальное исследование взаимосвязи ионных и атомных спектров Eu в He–Eu-смеси // *Оптика атмосфер. и океана.* 1993. Т. 6, № 6. С. 628–634.
14. *Соковиков В.Г.* Исследование двухфотонной селективной фотоионизации паров щелочно-земельных и редкоземельных элементов // *Оптика атмосфер. и океана.* 2012. Т. 25, № 2. С. 190–197.
15. *Климкин В.М.* Металлизация кювет в импульсно-периодических лазерах. Причины и следствия // *Оптика атмосфер. и океана.* 2000. Т. 13, № 12. С. 1103–1106.

V.O. Troitskii, V.G. Sokovikov, A.G. Filonov, D.V. Shiyarov. Europium vapor laser.

The results of experimental study of a gas-discharge Ne–Eu laser are presented. In this work, lasing lines, pulse shapes in europium atom and ion in the conditions of this experiment are identified. Influence of the buffer gas pressure and pulse repetition rate on the energy characteristics of the laser is ascertained; their optimal values are determined. It is shown that under optimum operating conditions for the corresponding transitions the output power is 1 W at 1759 nm line and 70 mW at 664.5 nm line.