

ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 535:371.623

Сравнение параметров генерации Ne + Eu- и Ne + Eu-лазеров

В.Г. Сокоиков, А.Г. Филонов, Д.В. Шиянов*

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

Поступила в редакцию 7.12.2018 г.

Проведено сравнение генерационных характеристик лазера на парах атомарного европия с буферными газами Ne и Ne на переходе $y^8P_{9/2} \rightarrow 8^7D_{11/2}^0$ с длиной волны 1,76 мкм. Показано, что мощность излучения и импульсная энергия Ne + Eu-лазера в зависимости от мощности накачки и частоты следования импульсов незначительно уступают аналогичным характеристикам Ne + Eu-лазера. Предложена эмпирическая модель, объясняющая поведение мощности генерации Ne + Eu-лазера в зависимости от потребляемой мощности. Установлено, что срок службы Ne + Eu-лазера не превышает 2 ч, в то время как Ne + Eu-лазер на момент окончания эксперимента отработал около 200 ч. Выдвинуто предположение, что за релаксацию метастабильных уровней иона и атома европия и деградацию активных сред, состоящих из смеси паров европия и гелия, отвечает один и тот же процесс с участием гелия.

Ключевые слова: лазер на парах европия, ионный Eu-лазер, атомный Eu-лазер, буферный газ, деградация активной среды; europium vapor laser, ion Eu-laser, atom Eu-laser, buffer gas, degradation of the active medium.

Введение

В настоящее время диапазон генерации, полученный на самоограниченных переходах в парах металлов, перекрывает УФ-, видимую и ИК-области спектра [1–4]. Причем некоторые металлы способны излучать одновременно на нескольких линиях, как атомных, так и ионных, например медь, свинец, марганец, стронций и т.д. При этом для достижения высоких энергетических характеристик используют определенный буферный газ, в основном неон или гелий. Иногда используют смесь гелия и неона, как в случае с Sr-лазером [5].

Одним из ярких представителей многоволновых систем является лазер на парах европия. На атоме Eu получена генерация в ближней ИК-области спектра $y^8P_{9/2} \rightarrow 8^7D_{11/2}^0$ (1,76 мкм) [6–8] и показана возможность получения генерации в среднем ИК-диапазоне [6]. На ионе европия генерация реализована на переходах $z^9P_5 \rightarrow a^9D_6^0$ (0,6645 мкм), $z^7P_4 \rightarrow a^7D_5^0$ (1,0019 мкм), $z^7P_4 \rightarrow a^7D_4^0$ (1,0166 мкм), $z^9P_4 \rightarrow a^7D_5^0$ (1,3610 мкм) и $z^9P_3 \rightarrow a^7D_4^0$ (1,4770 мкм) [7–14]. Особенность этого лазера заключается в том, что при использовании гелия в качестве буферного газа с давлением, близким к атмосферному и более, реализован столкновительный режим генерации на 1,0019 мкм [9]. Почти все работы посвящены исследованию этого режима [10–14], однако до настоя-

щего времени не уделялось должного внимания работе лазера на парах европия с буферным газом неон. Только в первых публикациях встречались упоминания о Ne [7, 10], но не было проведено сравнительных исследований характеристик Ne + Eu- и Ne + Eu-лазеров. В [15] показано, что срок службы столкновительного ионного Ne + Eu-лазера составляет всего несколько часов, что объясняется автором повторной контракцией разряда, вызванной металлизацией стенок лазерной кюветы.

Использование неона в качестве буферного газа позволило нам в [8] получить генерацию на ионных переходах в красной и ИК-областях спектра, а также стабильную генерацию с мощностью излучения более 1 Вт на атомной линии 1,76 мкм в течение длительного времени (более 100 ч). При этом были выявлены определенные закономерности поведения генерации в зависимости от различных параметров накачки. Цель работы – сравнение генерационных характеристик Ne + Eu- и Ne + Eu-лазеров ($\lambda = 1,76$ мкм).

Экспериментальная установка

На рис. 1 показана схема экспериментальной установки.

Газоразрядная трубка (ГРТ) лазера представляла собой газоразрядный канал, образованный керамической трубкой из BeO внутренним диаметром 20 мм и длиной 500 мм с теплоизолирующим слоем порошка ZrO₂, помещенной в вакуумирующую оболочку из оптически чистого кварца. По краям разрядного канала располагались электроды в виде полых цилиндров из ниобия. Вывод излучения про-

* Владимир Григорьевич Сокоиков (qel@asd.iao.ru); Александр Григорьевич Филонов (qel@asd.iao.ru); Дмитрий Валерьевич Шиянов (shiyanov73@mail.ru).

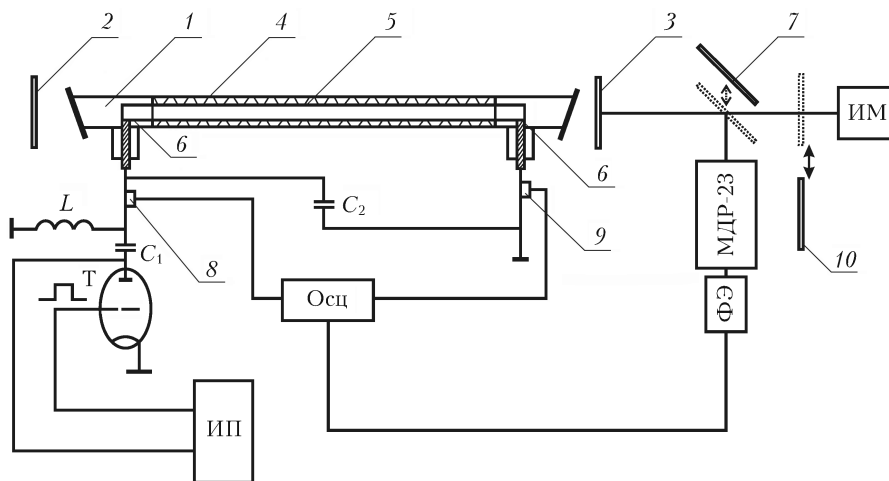


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – газоразрядная трубка; 2 – глухое зеркало резонатора; 3 – выходное зеркало резонатора; 4 – теплоизолирующий порошок; 5 – керамическая трубка; 6 – электроды; 7 – поворотное зеркало; 8 – делитель напряжения; 9 – индикатор тока; 10 – светофильтр; Т – тиратрон ТГИ1-1000/25; C_1 – рабочая емкость; L – зарядная индуктивность; C_2 – обострительный конденсатор; ИМ – измеритель мощности; Осц – осциллограф; ФЭ – фотоэлемент; ИП – источник питания

изводился через кварцевые окна. Кусочки европия располагались равномерно вдоль разрядного канала. Путем разряда рабочей емкости C_1 (730 пФ) через тиратрон и ГРТ осуществлялся разогрев и возбуждение активного объема. Заряд C_1 производился от источника питания через зарядную индуктивность L . В электрической схеме возбуждения использовалась обострительная емкость $C_2 = 165$ пФ. Импульсы напряжения и тока регистрировались делителем напряжения Tektronix P6015 А и индикатором тока PearsonTM current monitor, сигналы с которых выводились на осциллограф Le Croy Wave Jet 324. Резонатор состоял из глухого зеркала с алюминиевым покрытием и выходного зеркала, представляющего собой кварцевую пластинку. Излучение лазера направлялось на измеритель мощности Ophir 20C-SH, который регистрировал суммарную мощность генерации. С помощью фильтра СЗС 26 выделялась линия генерации 0,6645 мкм. Используя поворотное зеркало 7, излучение лазера можно направлять на монохроматор МДР-23. Решетка монохроматора 600 линий/мм позволяла определять линии генерации до 2 мкм; фотоэлементы ФК-19 и ЛФД-2 регистрировали форму импульсов генерации. С помощью газового поста изменялось давление буферного газа Ne в газоразрядной трубке.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

В ранних работах [6, 7, 9–12] приводятся значения мощности генерации и КПД Eu-лазера с буферным газом гелием, что, конечно, немаловажно. Однако данные о зависимости характеристик генерации от различных параметров, в том числе и на

атомной линии генерации, отсутствуют. Возможно, это связано с малым сроком службы Ne + Eu-лазера. Следовательно, интересно выяснить зависимости от давления буферного газа, частоты следования импульсов (ЧСИ), напряжения, потребляемой мощности и т.д., как это сделано в [8] для неона. Сложности заключаются в том, что, во-первых, работа лазера осуществляется в узком температурном интервале. В условиях саморазогрева изменение параметров накачки приводит к выходу лазера из оптимального режима по температуре. Во-вторых, мощность генерации зависит как от приложенного напряжения, так и от вводимой в разряд мощности. Изменяя один параметр, например напряжение, мы одновременно изменяем и второй, а узкий температурный интервал делает картину еще более сложной. Тем не менее некоторые характеристики можно отследить, учитывая инерционность температурных процессов. На рис. 2 представлена зависимость мощности генерации от потребляемой мощности для различных ЧСИ при использовании буферного газа гелия.

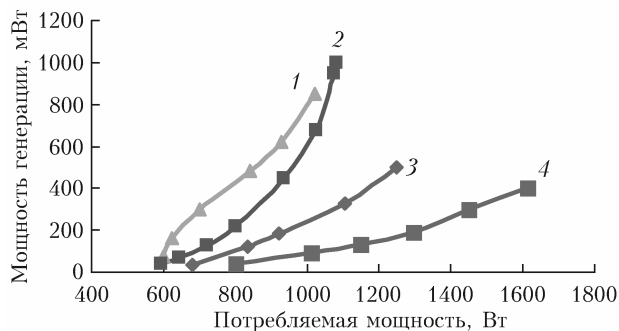


Рис. 2. Зависимость мощности генерации от потребляемой мощности для следующих ЧСИ: 1 – 10; 2 – 13; 3 – 18; 4 – 22 кГц. Буферный газ гелий, давление 15 торр

Как видим, мощность генерации растет с увеличением потребляемой мощности и свое влияние оказывает ЧСИ. Зафиксировав потребляемую мощность на уровне 1 кВт, можно проследить поведение энергии в импульсе при изменении частоты. Зависимость представлена на кривой 1 (рис. 3).

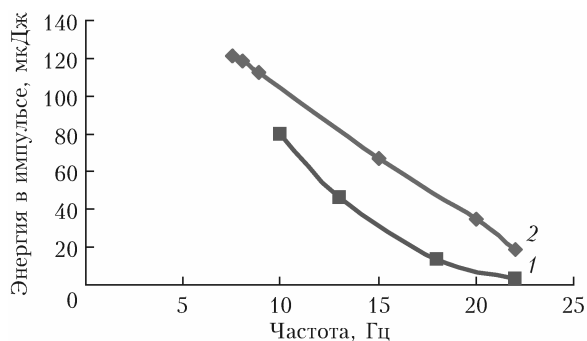


Рис. 3. Поведение энергии генерации в импульсе в зависимости от ЧСИ для буферных газов гелия (1) и неона (2), давление 15 торр

На этом же рисунке приведена зависимость энергии в импульсе для буферного газа неона (кривая 2). Несмотря на то что характер зависимости несколько различен для этих буферных газов, абсолютная величина давления различается ненамного.

Зависимость мощности генерации на линии 1,76 мкм от давления буферных газов неона, гелия, а также аргона характеризуется резким спадом с увеличением давления. Если для неона при 150 торр еще есть небольшой уровень генерации [8], для аргона при 50 торр мощность излучения составляла 110 мВт, а при 100 торр генерацию не удалось зафиксировать, то для гелия генерация отсутствовала уже при 50 торр.

Интересно сравнить поведение мощности генерации от потребляемой мощности для разных буферных газов: Ne, He и Ar.

Из рис. 4 следует, что характер зависимости выходной мощности от мощности накачки для неона и гелия существенно отличается, а для неона и аргона схожи. Возможно, что в присутствии легкого газа гелия в качестве буферного газа атомы европия в парообразном состоянии образуют «слабую» связь между собой. Пробой в такой среде сложно реализовать, для этого требуется более высокое напряжение, чем для случая не связанных друг с другом атомов пара. При этом канал пробоя становится ограниченным. Увеличение напряжения, прикладываемого к разрядному промежутку, увеличивает диаметр разрядного канала. Это приводит к резкому росту мощности генерации, что мы и наблюдаем на рис. 4. Для буферного газа неона картина меняется. Можно предположить, что атомы неона, обладая большей массой, по достижении рабочей температуры обладают энергией, достаточной для разрушения «слабой» связи атомов европия между собой. В силу этого пробой осуществляется гораздо легче, и он проходит по всему объему, что и наблюдается в эксперименте. Мы полагаем,

что именно это явление и обуславливает некоторые сложности в работе He + Eu-лазера. Имеется в виду склонность к шнурованию, описанная в [15].

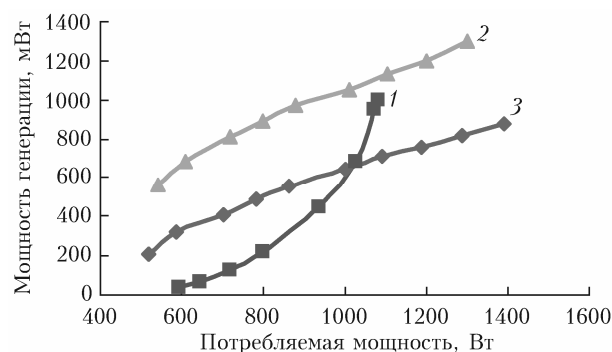


Рис. 4. Поведение мощности генерации лазера на парах европия в зависимости от потребляемой мощности при ЧСИ 13 кГц для буферных газов гелия (1), неона (2) и аргона (3), давление 15 торр

Если принять данную точку зрения, то становится понятным, почему для более тяжелого аргона в качестве буферного газа поведение мощности генерации подобно случаю с буферным газом неон.

В свете сказанного становится актуальным использование в качестве буферной среды смеси газов неона и гелия. В этом случае объединяются положительные свойства гелия — высокая теплопроводность, снижающая радиальный градиент температур, что принципиально важно для сред с узким температурным интервалом работы, и неона, который с помощью механизма, описанного выше, позволяет осуществлять объемный разряд. На наш взгляд, примером может служить работа лазера на парах стронция [5]. Несмотря на то что в этой статье не представлена модель, объясняющая необходимость использования данной смеси, мы предполагаем, что причина может быть общей с лазером на парах европия.

Еще одна особенность работы лазера на парах европия на длине волны 1,76 мкм с буферным газом гелием заключается в том, что в течение 2 ч работы мощность генерации монотонно спадала до нуля. Повторное включение разряда без смены газа не приводило к восстановлению генерации. Более того, замена буферного газа в газоразрядной кювете на свежую порцию гелия так же не позволяла восстановить генерацию. А вот замена буферного газа на неон давала положительный эффект. Аналогичная картина со снижением мощности генерации до нуля в течение нескольких часов наблюдалась для активной среды ионного He + Eu-лазера ($\lambda = 1,0019$ мкм) [15]. При этом для работы ионного и атомарного He + Eu-лазеров требуются существенно отличающиеся параметры активной среды и системы газоразрядной накачки. Присутствие гелия приводит к деградации активной среды и того и другого лазеров. Только гелий в качестве буферного газа обеспечивает быструю релаксацию населенности метастабильного уровня $\text{Eu}^+(a^7D_3^0)$.

Таким образом, присутствие гелия в активных средах с парами европия, с одной стороны, приводит к деградации этих сред, а с другой — обеспечивает быстрое тушение метастабильного уровня $\text{Eu}^+(a^7D_5^0)$. Можно предположить, что за релаксацию уровня $\text{Eu}^+(a^7D_5^0)$ и деградацию активных сред, состоящих из смеси паров европия и гелия, отвечает один и тот же процесс с участием гелия. Данное предположение является всего лишь гипотезой. Планируется в ходе дальнейшего исследования уделить этому вопросу особое внимание.

Заключение

Сравнение работы лазера на парах европия с различными буферными газами на линии излучения 1,76 мкм выявило существенное различие при работе лазера с гелием и неоном. Ресурс работы атомарного $\text{He} + \text{Eu}$ -лазера составил 2 ч. В отличие от него $\text{Ne} + \text{Eu}$ -лазер показал стабильную работу в течение длительного времени. На момент окончания эксперимента лазер отработал около 200 ч. Предложена эмпирическая модель активной среды, позволяющая согласовать экспериментальные результаты работы. Подтверждение модели проведено с помощью буферного газа аргона. Кроме этого, выдвинуто предположение, что за релаксацию метастабильных уровней иона и атома европия и деградацию активных сред, состоящих из смеси паров европия и гелия, отвечает один и тот же процесс с участием гелия.

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. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 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. Солдатов А.Н., Соломонов В.И. Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов. Новосибирск: Наука, 1985. 152 с.

5. Солдатов А.Н., Филонов А.Г., Полуниин Ю.П., Васильева А.В. Лазерная система «генератор—усилитель» на парах стронция со средней мощностью более 20 Вт // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 8. С. 666–668.
6. Cahuzac Ph. Rare laser infrarouges dans les vapeurs de terres rares et d'alcalino-terreux // J. De Physique. 1971. V. 32, N 7. P. 499–505.
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. Троицкий 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.
9. 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.
10. Бохан П.А., Клишкин В.М., Прокопьев В.Е. Столкновительный газоразрядный лазер на ионизированных парах европия // Квант. электрон. 1974. Т. 1, № 6. С. 1365–1369.
11. Бохан П.А., Клишкин В.М., Прокопьев В.Е., Монастырев С.С. Ионный гелий-европиевый лазер со средней мощностью 2 Вт // Письма в ЖТФ. 1977. Т. 3, вып. 9. С. 410–413.
12. Бохан П.А. Непрерывная генерация в столкновительном гелий-европиевом лазере // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10, вып. 4. С. 210–214.
13. Bokhan P.A., Zakrevsky D.E. High power high repetition rate pulsed collisional laser using a $\text{He} + \text{Eu}^+$ mixture // Opt. Quant. Electron. 1991. V. 23. P. S513–S522.
14. Bokhan P.A., Zakrevsky D.E. Investigation of a $\text{He}-\text{Eu}^+$ laser excited by short pumping pulses // J. Russ. Laser Res. 1995. V. 16, N 2. P. 138–144.
15. Клишкин В.М. Повторная контракция энергонапряженных импульсно-периодических разрядов // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29, вып. 18. С. 16–21.
16. Справочник по лазерам / под ред. А.М. Прохорова. М.: Сов. радио, 1978. Т. 1. 504 с.
17. Клишкин В.М., Монастырев С.С., Прокопьев В.Е. Селективная релаксация долгоживущих состояний атомов металлов в газоразрядной плазме. Стационарная генерация на переходах $^1P_1^0 - ^1D_2$ кальция и стронция // Письма в ЖЭТФ. 1974. Т. 20, вып. 4. С. 251–253.
18. Klimkin V.M., Prokopyev V.E. Metal vapor lasers with chemical depopulation of the metastable // Proc. SPIE. 1998. V. 3403. P. 155–160.

V.G. Sokolov, A.G. Filonov, D.V. Shiyonov. Comparison of the output parameters of $\text{He} + \text{Eu}$ and $\text{Ne} + \text{Eu}$ lasers.

The lasing characteristics of atomic $\text{He} + \text{Eu}$ and $\text{Ne} + \text{Eu}$ vapor lasers at the $y^8P_{9/2} \rightarrow 8^7D_{11/2}^0$ transition with a wavelength of 1.76 μm were compared. It is shown that the output power and pulsed energy of the $\text{He} + \text{Eu}$ laser, depending on the pump power and pulse repetition frequency, are slightly worse than those of the $\text{Ne} + \text{Eu}$ laser. An empirical model is proposed to explain the behavior of the $\text{He} + \text{Eu}$ laser output power as a function of the input power. It was established that the lifetime of the $\text{He} + \text{Eu}$ laser does not exceed two hours, while the $\text{Ne} + \text{Eu}$ laser by the end of the experiment operated about 200 hours. It has been suggested that the relaxation of metastable levels of the ion and atom of europium and degradation of active media consisting of a mixture of europium and helium vapors is responsible for the same process involving helium.