

Лазер на парах бромида меди с высокой частотой следования импульсов

Д.В.Шиянов, Г.С.Евтушенко, В.Б.Суханов, В.Ф.Федоров

Приведены результаты экспериментального исследования лазера на парах бромида меди с диаметром разрядного канала более 2.5 см при высоких частотах следования импульсов накачки. Использование мощного таситрона ТГУ1-1000/25 в качестве коммутатора впервые позволило получить достаточно большие выходные мощности излучения на частотах накачки свыше 200 кГц. При максимальной достигнутой частоте накачки 250 кГц в лазерной трубке диаметром 2.6 см и длиной 76 см мощность излучения составила 1.5 Вт. На частотах следования 200 и 100 кГц выходные мощности были равны 3 и 10.5 Вт соответственно. Указанные характеристики реализованы без прокачки активного объема буферным газом и/или малыми активными примесями.

Ключевые слова: лазеры на парах галогенидов металлов, выходные характеристики, импульсно-периодический лазер.

1. Введение

Импульсно-периодические лазеры на парах меди (ЛПМ) и галогенидов меди (ЛПГМ), способные работать с мощностью излучения десятки и сотни ватт при частоте следования импульсов генерации до десятков килогерц, нашли широкое применение в промышленности, медицине и научных исследованиях [1–5]. Однако в последнее время возникает все бóльшая необходимость в лазерах данного типа, стабильно излучающих импульсы с частотами более 100 кГц при высокой средней мощности, в связи с возможностью их использования для исследования быстротекущих процессов, в скоростных оптико-электронных системах записи информации, при зондировании атмосферы и т. д.

К сожалению, высокие частоты следования импульсов генерации к настоящему времени достигнуты в газоразрядных трубках (ГРТ) малого диаметра, обеспечивающих получение только небольших выходных мощностей. Так, максимальные частоты следования импульсов в ЛПМ равны 235 кГц [6], а в ЛПГМ – 300 кГц [7] при использовании ГРТ с диаметрами 0.8 и 1.5 см соответственно. Средняя мощность излучения в этом случае составляет всего несколько десятков милливатт. Кроме того, практически отсутствуют сведения о ресурсе работы ЛПМ и ЛПГМ в режиме высоких частот следования импульсов. Заметим также, что вопрос о том, какой механизм является определяющим в ограничении частот следования импульсов генерации лазеров на парах металлов и их соединений, в настоящее время до конца не ясен. Дискуссии на эту тему продолжаются до сих пор (см., напр., [8–13]). Однако модельные оценки, выполненные методом сдвоенных импульсов, показали, что в

ЛПМ [9], а также в ЛПГМ [14] можно получить частоты следования импульсов $f = 500 - 1000$ кГц.

В работе [7] было показано, что в ЛПГМ удельная вводимая мощность накачки в 3–5 раз ниже, чем в ЛПМ аналогичных размеров, и поскольку времена релаксации основных параметров плазмы в ЛПГМ меньше, чем в ЛПМ [15], то оптимальные (и максимальные) частоты следования импульсов в ЛПГМ должны быть выше. Малые же добавки водорода H_2 способны дополнительно увеличить максимальные достижимые частоты и мощности генерации в ГРТ не только малых, но и средних диаметров (более 2 см). Анализ работ по исследованию CuVg-лазеров с добавками H_2 [16], а также гибридных лазеров [17] и ЛПМ с улучшенной кинетикой [18, 19], в которых рабочая среда по составу схожа со средой CuVg– H_2 -лазера, подтверждает эту мысль. Самые высокие выходные параметры (КПД, средняя и удельная мощности излучения) получены с лазерами именно этих двух типов.

Исследования CuVg-лазера с ГРТ среднего диаметра 2 см и длиной 80 см без специального добавления H_2 позволили получить мощность генерации 4.8 Вт при $f = 100$ кГц [7]. Максимальная же частота следования импульсов составила 160 кГц. Эта частота была ограничена используемым коммутатором – таситроном ТГУ1-5/12. В одной из последних работ [19], связанной с исследованием частотных свойств ЛПМ с улучшенной кинетикой (при использовании трехступенчатого магнитного сжатия импульса накачки), в ГРТ диаметром 2.5 см и длиной 61 см при $f = 100$ кГц мощность излучения составила 9 Вт. В то же время исследования частотных свойств CuVg-лазера [14] с ГРТ диаметром 2.5 см и длиной 80 см, проведенные нами в режиме сдвоенных, повторяющихся с частотой до 30 кГц импульсов накачки, свидетельствуют о возможности достижения частот следования импульсов, превышающих 500 кГц.

В настоящей работе была поставлена задача, используя более мощный высокочастотный коммутатор (ТГУ1-1000/25), реализовать режим регулярных импульсов на-

Институт оптики атмосферы СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 1; тел.: (3822) 259 989, факс: (3822) 259 986, e-mail: qel@asd.iao.ru

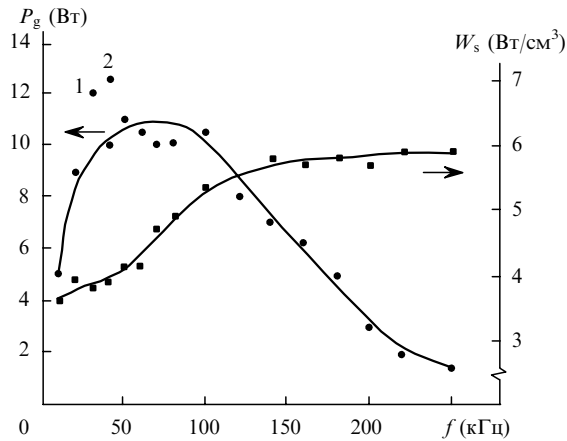


Рис.1. Зависимости мощности генерации P_g и удельной вводимой в разряд мощности накачки W_s от частоты следования импульсов f при $p_{Ne} = 30$ мм рт. ст. и $p_{H_2} = 0.3$ мм рт. ст.

качки CuBr-лазера на частотах, превышающих 100 кГц, изучить поведение энергетических характеристик (в присутствии малых добавок водорода) и определить максимальные достижимые частоты следования импульсов в лазере на бромиде меди с ГРТ диаметром более 2 см.

2. Методика и результаты эксперимента

Для исследования предельных достижимых частот следования импульсов генерации CuBr–H₂-лазеров средних размеров (с трубками диаметром более 2 см) была изготовлена специальная конструкция излучателя диаметром 2.6 см с расстоянием между электродами 76 см, которая представляет собой «саморазогревную» ГРТ, описанную в [20]. Эта ГРТ была дополнительно оснащена теплоизоляционным экраном и устройством, позволяющим осуществлять контроль температуры рабочего канала ГРТ и поддерживать ее на уровне, обеспечивающем стабильную мощность излучения в стационарном режиме работы лазера.

Возбуждение активной среды осуществлялось по схеме, примененной в работе [7], т. е. по схеме прямого разряда накопительной емкости (КВИ-3) на ГРТ с помощью мощного таситрона ТГУ1-1000/25. Специальная оптимизация разрядного контура и характеристик импульса накачки не проводилась. Запуск основного коммутатора производился от модуляторного блока, собранного на таситроне ТГУ1-5/12, который, в свою очередь, запускался от транзисторного подмодулятора и генератора импульсов Г5-27А. Импульсы тока регистрировались поясом Роговского, напряжения – малоиндуктивным делителем на резисторах типа ТВО, генерации – коаксиальным фотоэлементом ФК-22. В качестве буферного газа использовался спектрально-чистый неон при давлении 30–50 мм рт. ст. В активную среду добавлялся водород при давлении 0.2–0.5 мм рт. ст.

Методика эксперимента заключалась в том, что изменения энергетических характеристик CuBr–H₂-лазера начинались со стандартных частот следования импульсов $f = 10$ кГц. Увеличение частоты до 80 кГц осуществлялось с шагом 10 кГц, а после 80 кГц – с шагом 20 кГц. При этом на каждой частоте производилось новое включение ГРТ, которая выводилась на стационарный режим работы, и фиксировались импульсы тока, напряжения и генерации. При повышении f рабочая емкость C_w

постепенно уменьшалась для поддержания постоянного энерговклада в ГРТ.

Результаты эксперимента показали, что максимальная частота следования импульсов накачки исследуемого лазера, обеспечиваемая данным коммутатором, составляет 250 кГц (рис.1). Средняя мощность излучения P_g на этой частоте равнялась 1.5 Вт. При $f = 200$ кГц выходная мощность составила 3 Вт. Область оптимальных частот следования (таких, при которых выходная мощность максимальна) простирается от 40 до 100 кГц, а далее начинается медленный спад мощности излучения. При $f = 100$ кГц нами были проведены предварительные испытания ГРТ на наработку. В течение нескольких десятков часов мощность стабильно сохранялась на уровне 10 Вт, а максимальное значение P_g на данной частоте составило 10.5 Вт.

Ранее, при исследовании CuBr-лазеров без контролируемых добавок водорода [21], максимальная выходная мощность достигалась при $f = 16 – 20$ кГц, после чего наблюдалось ее снижение. Как показывают результаты этой и других работ по исследованию CuBr–H₂-лазера [22], а также ЛПМ с улучшенной кинетикой [18,19] и гибридного лазера на BrID [17], добавки H₂ приводят к смещению оптимальной частоты в область больших частот для ГРТ не только малых диаметров. В последнее время это на качественном уровне объясняется [12] образованием и присутствием в активной среде этих лазеров электроотрицательных молекул (HBr, HCl) с большим сечением диссоциативного прилипания электронов, что увеличивает скорость объемной рекомбинации плазмы.

В данном эксперименте максимальный КПД (рассчитанный по мощности, отбираемой от выпрямителя) составил 0.7 % при $f = 50$ кГц и $P_g = 11$ Вт. Относительно низкий КПД связан, как уже упоминалось, с тем, что дополнительная оптимизация контура возбуждения не проводилась. Надо также отметить, что полученные мощности P_g не являются максимальными для данных частот следования импульсов, а соответствуют стационарному тепловому режиму работы лазера. Кроме того, подбор оптимального соотношения добавок (неон–водород) оказался трудной задачей. В результате приведенные на рис.1 зависимости соответствуют добавке водорода, несколько отличной от оптимальной. Так, незначительное увеличение количества водорода при $f = 30$ и 40 кГц привело к увеличению мощности излучения соответственно до 12 и 12.5 Вт и увеличению КПД до 0.8 %. Эти значения на рис.1 отмечены точками 1 и 2.

Помимо зависимости средней выходной мощности P_g от частоты следования импульсов накачки f на рис.1 приведена зависимость от f удельной вводимой в разряд мощности накачки W_s (в единицу объема). При расчете (правильнее сказать, оценке) W_s в качестве объема брался полный объем активной среды между электродами без учета области контракции. С изменением f (особенно при $f > 100$ кГц) мощность W_s поддерживалась примерно на одном уровне, чтобы сохранить температурный режим работы ГРТ. Сравнение представленных на рис.1 значений W_s со значениями, полученными ранее в ЛПМ с ГРТ аналогичных размеров, показывает, что в ЛПМ мощности W_s на порядок меньше, чем в ЛПМ, за счет меньших рабочих температур.

Осциллограммы импульсов тока, напряжения и генерации для разных частот f приведены на рис.2. Видно, что вплоть до частот накачки 150 кГц импульс генерации

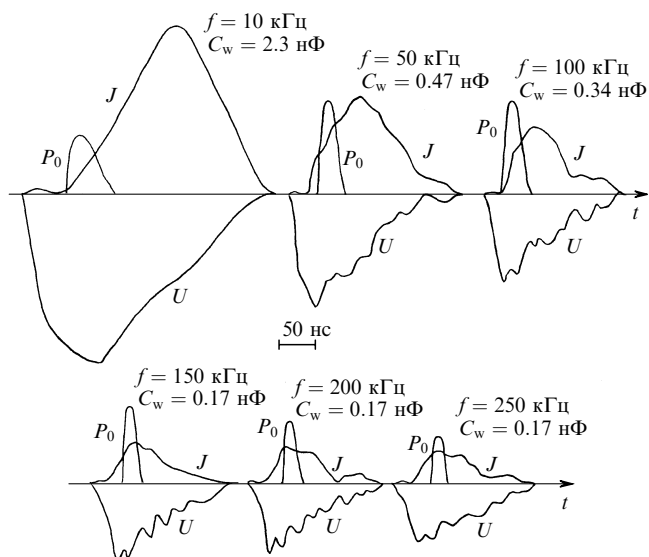


Рис.2. Осциллограммы импульсов тока J , напряжения U и генерации P_0 для разных частот следования импульсов f и рабочих емкостей C_w .

появляется в максимуме импульса напряжения U_{\max} . При дальнейшем повышении частоты f он смещается от U_{\max} в сторону больших времен. Однако в отличие от ЛПМ, где с увеличением частоты генерация возникает далеко на заднем фронте импульса накачки [6], здесь генерация все же появляется вблизи U_{\max} . Типичные значения тока и напряжения (на рабочей емкости) при $f = 100 - 200$ кГц составляют $150 - 80$ А и $9 - 7$ кВ соответственно.

Сравнение выходных характеристик исследуемого CuVg-H₂-лазера без прокачки буферного газа и ЛПМ с улучшенной кинетикой [19] идентичного объема показывает, что при $f = 100$ кГц мощности излучения лазеров равны 10.5 и 9 Вт соответственно. В области же частот 20–50 кГц мощность излучения ЛПМ с улучшенной кинетикой в 4 раза превышает мощность излучения CuVg-H₂-лазера. Это связано с тем, что лазер, описанный в работе [19], является прокачным, а, как известно, в таких лазерах мощность P_g всегда выше, т.к. рабочая смесь постоянно обновляется. Еще одна возможная причина увеличения P_g состоит в том, что в прокачных лазерах добавки HВг и HСl присутствуют в «чистом» виде, а это приводит к более быстрой релаксации плазмы в межимпульсный период. Следует также иметь в виду, что в работе [19] и у нас использованы разные схемы накачки, оптимизированные на различные частоты.

В ходе экспериментов было установлено, что на частотах накачки 200–250 кГц происходило уменьшение диаметра пучка генерации вдвое, причем на частоте 250 кГц значительно увеличивались потери в таситроне. Мощность, потребляемая от выпрямителя, возрастала на 900 Вт по сравнению с мощностью на частоте 10 кГц. Следовательно, ограничения по частоте, полученные нами, имеют технический, а не физический характер. Мощности же генерации, полученные при высоких частотах следования импульсов, не являются оптимальными, и возможно их дальнейшее повышение.

3. Заключение

Таким образом, испытания CuVg-H₂-лазера, в котором использовалась схема прямого разряда накопительной емкости на ГРТ и таситрон ТГУ1-1000/25 в качестве коммутатора впервые позволили получить значительную выходную мощность излучения при частотах следования импульсов накачки $f > 200$ кГц. При максимальной достигнутой частоте накачки 250 кГц в лазерной трубке диаметром 2.6 см и длиной 76 см мощность излучения составила 1.5 Вт. При $f = 200$ и 100 кГц мощности излучения были равны соответственно 3 и 10.5 Вт. Указанные характеристики реализованы без прокачки активного объема буферным газом и/или малыми активными примесями. Предельная частота следования импульсов была ограничена возможностями используемого коммутатора. Полученные результаты свидетельствуют о том, что существует реальная возможность дальнейшего увеличения частот следования и мощностей излучения ЛППМ с активными элементами большого объема.

Авторы выражают свою признательность Г.Г.Петрашу за интерес к работе и полезные дискуссии.

1. Солдатов А.Н., Соломонов В.И. *Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов* (Новосибирск: Наука, 1985).
2. Little С.Е., Sabotinov N.V. (Eds) *Pulsed metal vapor lasers* (New York: Kluwer Acad. Publ., 1996, vol.5).
3. Little С.Е. *Metal vapor lasers: physics, engineering & applications* (Chichester, UK: John Wiley & Sons, 1998).
4. Евтушенко Г.С., Клишкин В.М. *Оптика атмосферы и океана*, **12**, 875 (1999).
5. Webb С.Е. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4184**, 183 (2001).
6. Солдатов А.Н., Федоров В.Ф. *Изв. вузов. Сер. Физика*, № 9, 80 (1983).
7. Евтушенко Г.С., Петраш Г.Г., Суханов В.Б., Федоров В.Ф. *Квантовая электроника*, **28**, 220 (1999).
8. Бохан П.А., Силантьев В.И., Соломонов В.И. *Квантовая электроника*, **7**, 1264 (1980).
9. Бохан П.А., Закревский Д.Э. *ЖТФ*, **67**, 54 (1997).
10. Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **30**, 501 (2000).
11. Исаев А.А., Михельсоо В.Т., Петраш Г.Г., Пезт В.Э., Пономарев И.В., Трещалов А.Б. *Квантовая электроника*, **15**, 2510 (1988).
12. Петраш Г.Г. *Препринт ФИАН № 28* (М., 1999).
13. Петраш Г.Г. *Квантовая электроника*, **31**, 407 (2001).
14. Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С., Федоров В.Ф. *Оптика атмосферы и океана*, **13**, 254 (2000).
15. Hogan G.P., Webb С.Е. In: *Pulsed metal vapor lasers* (New York: Kluwer Acad. Publ., 1996, vol.5, p.67).
16. Astadjov D.N., Dimitrov K.D., Jones D.R., Kirkov V.K., Little С.Е., Sabotinov N.V., Vuchkov N.K. *IEEE J. Quantum Electron.*, **33**, 705 (1997).
17. Jones D.R., Maitland A., Little С.Е. *IEEE J. Quantum Electron.*, **30**, 2385 (1994).
18. Withford M.J., Brown D.W., Piper J.A. *Opt. Lett.*, **23**, 1538 (1998).
19. Marshall G.D., Coutts D.W. *IEEE J. Selected Topics Quantum Electron.*, **6**, 623 (2000).
20. Суханов В.Б., Евтушенко Г.С., Шиянов Д.В., Чернышев А.И. *Оптика атмосферы и океана*, **13**, 1053 (2000).
21. Казарян М.А., Петраш Г.Г., Трофимов А.Н. *Труды ФИАН*, **181**, 54 (1987).
22. Елаев В.Ф., Лях Г.Д., Пеленков В.П. *Оптика атмосферы и океана*, **2**, 1228 (1989).