

УДК 621.373.826

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЦУГОВОГО И ЖДУЩЕГО РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЛАЗЕРА НА ПАРАХ БРОМИДА МЕДИ

В.А. Димаки, В.Б. Суханов, В.О. Троицкий, А.Г. Филонов

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

E-mail: qel@asd.iao.ru

Приведены результаты экспериментального исследования работы лазера на парах бромида меди со стабилизацией температурного режима внешним источником. Показано, что данная конструкция позволяет работать в цуговом и ждущем режимах. Определено влияние параметров импульса возбуждения на восстановление характеристик импульсов генерации. Предложен механизм, поясняющий пороговый характер влияния добавки HBr на мощность генерации.

Ключевые слова:

Лазеры на парах металлов, бромид меди, разрядный канал, цуговый и ждущий режимы.

Введение

Возможность работы лазеров на парах металлов и их солей в цуговом и ждущем режимах во многом определяет их коммерческий успех. При этом значительно расширяется область их применения в зондировании атмосферы, в технологических процессах обработки материалов, в медицине для низкоинтенсивной терапии и т. д., поскольку позволяет, при компьютерном управлении процессом возбуждения активной среды, дозировать энергию излучения с точностью до энергии в одном импульсе генерации. Как правило, такого типа лазеры работают в режиме саморазогрева, т. е. импульс тока одновременно возбуждает активную среду и формирует и поддерживает рабочую температуру. Вследствие этого переход в ждущий режим приводит к остыванию активного объема, что делает невозможным сохранение энергетических характеристик импульсов генерации.

В работе [1] показано, что создание рабочей температуры активной среды независимым от разряда источником для лазера на парах бромида меди в определенной степени решает эту проблему. Но и в этом случае происходит снижение концентрации атомов меди в активном объеме по причине их объемной рекомбинации. Такой механизм ухода атомов меди из активного объема предполагает, что процесс восстановления рабочего состояния менее инерционен, чем восстановление теплового режима. Соответственно, становится актуальным исследование процесса восстановления генерационных свойств активной среды после окончания режима ожидания в зависимости от ее условий возбуждения и компонентного состава. В силу важности изучения данных процессов для практического применения нами была проведена данная работа.

Экспериментальная установка

Формирование температуры активного объема источником питания, не зависимым от разряда, для лазера на парах бромида меди создает условия работы прибора в цуговом и ждущем режимах. Такое решение, на наш взгляд, является наиболее простым и, соответственно, наиболее надежным в эксплуа-

тации. Другие решения, к примеру, поддержание температуры дополнительными (подогревающими) импульсами [2], увеличивают нагрузку на коммутатор, усложняют конструкцию и тем самым снижают надежность работы лазера в данных режимах.

В экспериментах использовалась газоразрядная трубка — 2 из оптического кварца с внутренним диаметром 38 мм и толщиной стенки 2 мм. Длина активной зоны — 900 мм. Резонатор — 1 — плоскопараллельный. Давление буферного газа (неона) составляло 6,7 кПа. Установка работала следующим образом. Нагревательная камера активного объема — 3 поддерживает с помощью блока управления температурным режимом — 9 температуру стенки газоразрядной трубки на заданном уровне (~680 °С). Импульсно-периодический разряд между электродами — 5 возбуждается от источника питания — 10. Рабочая емкость величиной 454 пФ, заряженная до 14 кВ, разряжалась через коммутатор (водородный тиратрон ТГИ1-1000/25) на газоразрядную трубку. Контейнеры с CuBr — 7 подогреваются специальными камерами — 6. Температура контейнеров стабилизирована на уровне ~500 °С, реверсивный источник HBr обеспечивал необходимое давление примеси (~27 Па).

Светоделительная пластинка — 4 распределяет излучение между измерителем мощности — 14 и фотоприемником — 13. На осциллографе Tektronix TDS 3032 — 12 регистрируются импульсы генерации, импульсы тока и напряжения. Компьютер — 11 управляет работой источника питания, формируя импульсно-периодический, цуговый и ждущий режимы, а также синхронизирует работу осциллографа.

Температурный режим активного элемента формируется не только энергией нагревательной камеры, но и энергией, выделяемой в разряде. При стабилизации температуры необходимо учитывать ее изменение, вызванное изменением скважности, или изменением времени ожидания. В нашем случае блок управления температурным режимом контролирует с помощью термопары температуру стенки разрядного канала, соответственно, изменение температурного режима вследствие прекращения разряда компенсируется нагревательным элементом. Таким образом, проблемы тепловых, наиболее

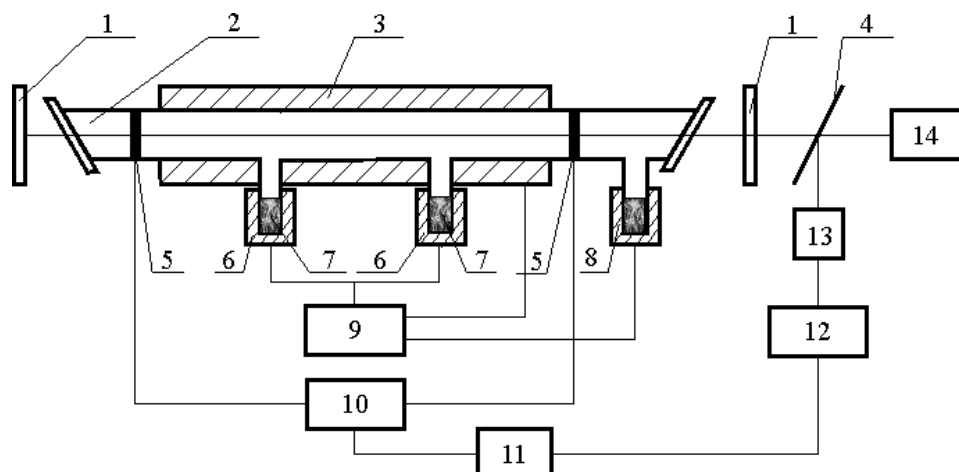


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1) резонатор; 2) газоразрядная трубка; 3) нагревательная камера активного объема; 4) светоделительная пластинка; 5) электроды; 6) камера нагрева CuBr; 7) контейнер с бромидом меди; 8) реверсивный источник HBr; 9) блок управления температурным режимом; 10) источник питания; 11) компьютер; 12) осциллограф; 13) фотоэлемент; 14) измеритель мощности

инерционных процессов в значительной степени снимаются данной конструкцией активного элемента. Разумеется, невозможно компенсировать градиенты, возникающие внутри активного объема вследствие регулярного прохождения разряда. В то же время мы предполагаем, что стабилизация таких процессов проходит достаточно быстро.

Результаты экспериментов и их обсуждение

В активном объеме CuBr-лазера в отсутствие разряда происходит уменьшение концентрации паров меди как за счет ухода их на стенки, так и за счет рекомбинации в объеме [1, 3] при реакции: $\text{Cu} + \text{Br} \rightarrow \text{CuBr}$. На рис. 2 показано, как с увеличением паузы между цугами уменьшается амплитуда импульсов генерации. Необходимо отметить, что, поскольку параметры импульса возбуждения при изменении паузы между цугами сохранялись, то длительность импульса генерации оставалась постоянной, а уменьшение энергии в импульсе генерации выражалось в снижении амплитуды импульса генерации.

Обращает на себя внимание существование характерного времени (~650 мкс), по прошествии которого первый импульс генерации в цуге исчезает, т. е., атомов меди становится настолько мало, что не преодолевается порог генерации. Это время практически совпадает со временем, сообщаемым другими авторами [1, 4]. При этом полного восстановления активной среды за один цикл разряда (в течение одного импульса возбуждения) не происходит. При паузе 650 мкс в данных конкретных условиях восстановление амплитуды происходит за пять импульсов возбуждения, по времени это составляет 250 мкс. То есть предполагается, что энергия в импульсе генерации в этот период отслеживает концентрацию паров чистой меди.

Увеличение времени ожидания приводит к более существенной релаксации активной среды; требуется большее количество импульсов возбуждения для восстановления рабочего давления паров меди и выхода на стационарный режим генерации. График такой зависимости показан на рис. 3. Как видим, достаточно 4000 импульсов возбужде-

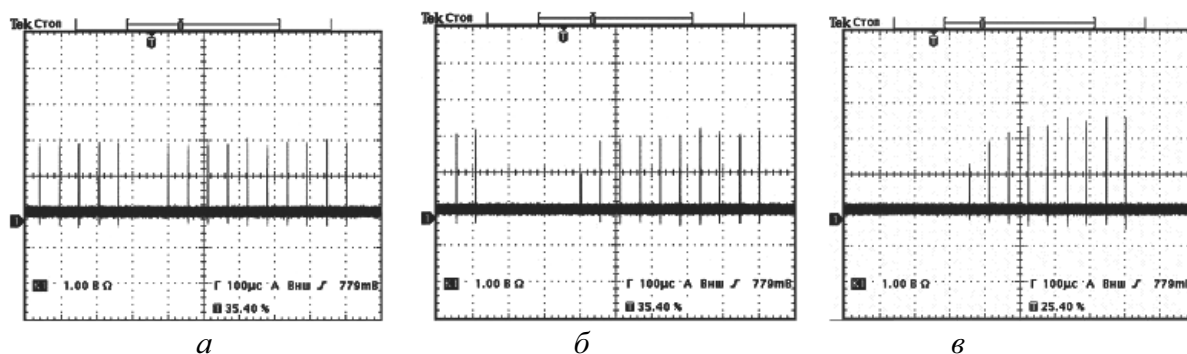


Рис. 2. Влияние паузы между цугами на амплитуду импульсов в цуге из 10 импульсов: а) пауза в 140 мкс не изменяет амплитуды импульсов генерации в цуге; б) пауза в 300 мкс приводит существенному уменьшению амплитуды первого импульса в цуге; в) после паузы 650 мкс первый импульс генерации отсутствует

ния, чтобы восстановить активную среду, выйти на стационарный режим генерации после того, как она полностью релаксировала. В нашем случае время полной релаксации соответствует паузе длительностью более 3 мин., при дальнейшем ее увеличении число импульсов, необходимых для выхода на стационарный режим, не изменяется, что соответствует прямому участку. При частоте 20 кГц это составляет 0,2 с.

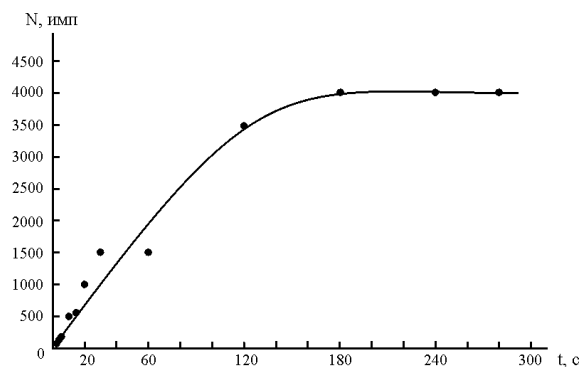


Рис. 3. Число импульсов возбуждения, необходимое для выхода на режим стационарной генерации в зависимости от величины паузы в импульсно-периодическом режиме с частотой следования импульсов 20 кГц

Таким образом, система с внешним разогревом активной среды существенно быстрее выходит на стационарный режим, чем система «саморазогрева», при которой в случае полной релаксации среды (полное остывание активной среды) выход на рабочий режим осуществляется в течение 20 мин. и более. Малое время восстановления рабочего режима позволяет работать лазеру в импульсно-периодическом, цуговом и ждущем режимах [4].

Следует ожидать, что процесс восстановления активной среды чувствителен к параметрам различного рода, таким, как величина энергии в импульсе возбуждения, давление паров CuBr, присутствие в активном объеме добавок HBr.

Увеличение вводимой в разряд мощности приводит к образованию большего количества атомов меди. Соответственно, это должно затягивать процесс релаксации активной среды во время паузы. В то же

время падение амплитуды первого импульса в цуге с ростом паузы слабо меняется (рис. 4), поскольку промежуток времени между цугами существенно больше межимпульсного интервала внутри цуга (50 мкс). И это естественно, так как последствия от изменения энергии в импульсе возбуждения с ростом времени релаксации становятся менее выраженными. Тем не менее, заметен сдвиг точки исчезновения первого импульса в цуге с 650 до ~720 мкс. Влияние длительности паузы на второй импульс в цуге более заметно. Если при энергии в импульсе возбуждения 42 мДж второй импульс в цуге исчезает при задержке 1000 мкс, то при увеличении энергии в импульсе возбуждения (53; 63 мДж) в исследуемом диапазоне задержек второй импульс не исчезает вообще. Его амплитуда возрастает с увеличением вводимой в разряд энергии. Это же происходит и с амплитудой третьего импульса.

Для нас существенным является то, что увеличение энергии в импульсе возбуждения приводит к более быстрому восстановлению активной среды. Это происходит потому, что нелинейные процессы ограничивают рост энергии в импульсе генерации, формируется стационарное состояние активной среды, означающее динамическое равновесие между исчезновением и появлением атомов меди. Такое состояние формируется, поддерживается и восстанавливается пришедшим импульсом тока до определенного времени задержки, паузы между импульсами тока и выражается, к примеру, в том, что увеличение паузы не сразу сказывается на амплитуде второго импульса в цуге. Только превышение определенного значения этой паузы приводит к тому, что среда релаксирует, и требуется определенное число импульсов возбуждения для восстановления этого стационарного состояния.

Интересно в этой связи посмотреть, как влияет на поведение амплитуды импульсов генерации добавка HBr (рис. 5). Как следует из рис. 5, с увеличением паузы между цугами наряду с опережающим снижением амплитуды первых импульсов происходит практически одновременное падение амплитуды всего цуга (на рис. 5 показано поведение амплитуды первых трех импульсов генерации). Усло-

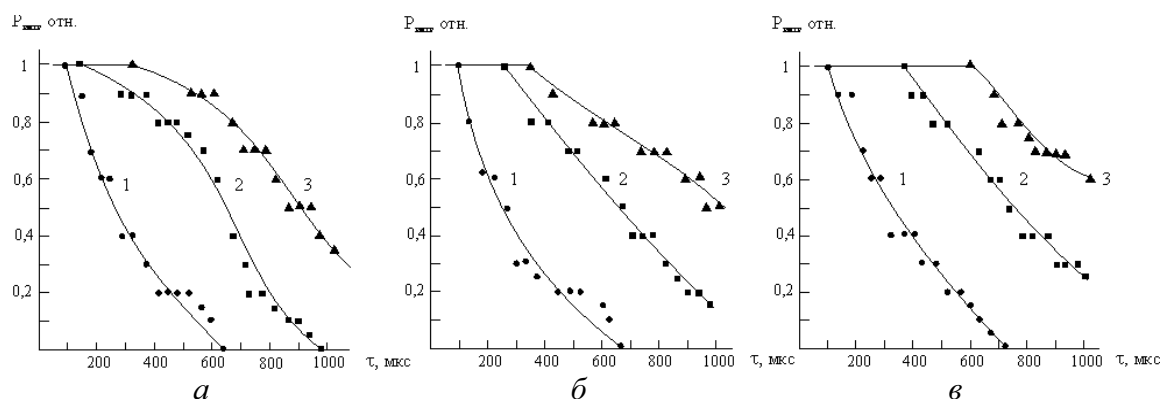


Рис. 4. Поведение амплитуды первого (1), второго (2) и третьего (3) импульсов в цуге из десяти импульсов генерации в зависимости от паузы между цугами при энергии в импульсе возбуждения: а) 42; б) 53; в) 63 мДж

вия возбуждения соответствуют рис. 4, б. Ранее мы отмечали, что энергия в импульсе генерации отслеживает концентрацию паров чистой меди в активном объеме. Можно сделать предположение, что происходит более быстрый уход их из активного объема. Нарушается динамическое равновесие, и стационарный режим достигается при более низком значении как концентрации паров чистой меди, так и энергии в импульсе генерации.

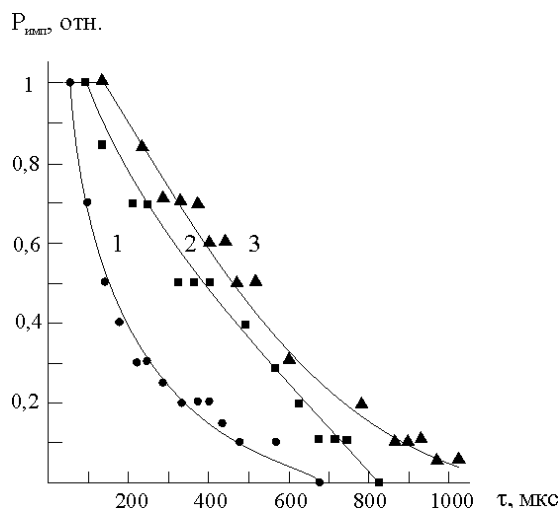


Рис. 5. Поведение амплитуды первого (1), второго (2) и третьего (3) импульсов в цуге импульсов генерации в зависимости от паузы между цугами при наличии добавки НВг. Энергия в импульсе возбуждения — 53 мДж

Действительно, в работе [5] отмечается, что при введении в активный объем паров НВг протекают процессы, аналогичные процессам, происходящим в «гибридных» лазерах, происходит реакция Cu (металл) с НВг (газ) с образованием CuVg (газ). Но такая реакция может протекать и в объеме с той лишь разницей, что Cu — газ. Это способствует убыли концентрации паров меди. В среднем такой процесс при фиксированном импульсе тока приводит к снижению концентрации атомов чистой меди. Обеднение парами меди активной среды дол-

жно приводить к снижению мощности генерации. В то же время, введение в активный объем паров НВг из-за диссипативного прилипания электронов [6], посредством воздействия на характеристики импульсов тока и напряжения, создает условия для эффективного возбуждения атомов меди и увеличения мощности генерации. Соответственно, соотношение этих двух факторов может приводить как к снижению, так и к увеличению мощности генерации. Если снижение мощности генерации, вызванное уходом определенной части паров меди, компенсируется увеличением мощности генерации за счет более эффективного возбуждения, идет ее рост, в противном случае происходит снижение мощности генерации. Восстановить концентрацию паров меди можно увеличением мощности импульса возбуждения. При этом будет существовать некоторая пороговая мощность накачки, ниже которой добавка НВг приводит к снижению мощности генерации, что и наблюдается на практике.

Выводы

Рассмотрена работа лазера на парах CuVg в цуговом и ждущем режимах в условиях стабилизации температуры стенок разрядного канала. Определено влияние величины мощности, вкладываемой в разряд, на процесс восстановления характеристик активной среды после режима ожидания. Показано, что в системе с внешним разогревом процесс восстановления активной среды после паузы в прохождении импульса возбуждения по разрядному каналу менее инерционен по сравнению с тепловыми процессами в режиме саморазогрева. Максимальное время восстановления характеристик лазерного излучения $\sim 0,2$ с. Выявлено возрастание скорости восстановления CuVg при введении добавки НВг, что объясняет пороговый характер ее влияния на мощность генерации. Показана практическая пригодность данной конструкции лазера для работы в цуговом и ждущем режимах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 06-02-96908-р_офи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Губарев Ф.А., Суханов В.Б., Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С. Исследование энергетических характеристик лазера на парах бромида меди с пониженным энерговыделением в разряд // Оптика атмосферы и океана. — 2008. — Т. 21. — № 1. — С. 85–93.
2. Солдатов А.Н., Федоров В.Ф. Лазер на парах меди со стабилизированными выходными параметрами // Квантовая электроника. — 1983. — Т. 10. — № 10. — С. 974–980.
3. Гордон Е.Б., Егоров В.Г., Павленко В.С. Лазер на парах CuCl . Процессы, лимитирующие мощность генерации // Квантовая электроника. — 1979. — Т. 6. — № 12. — С. 2579–2588.
4. Димаки В.А., Суханов В.Б., Троицкий В.О., Филонов А.Г., Шестаков Д.Ю. Лазер на бромиде меди с компьютерным управлением импульсно-периодического, цугового и ждущего режимов // Приборы и техника эксперимента. — 2008. — № 6. — С. 119–122.
5. Шиянов Д.В., Суханов В.Б., Евтушенко Г.С., Андриенко О.С. Экспериментальное исследование влияния добавок НВг на генерационные характеристики CuVg -лазера // Квантовая электроника. — 2004. — Т. 34. — № 7. — С. 625–629.
6. Земсков К.И., Исаев А.А., Петраш Г.Г. Роль отрицательных ионов в плазме импульсных лазеров на парах металлов и их соединений // Квантовая электроника. — 1997. — Т. 24. — № 7. — С. 596–600.