

УДК 535:371.623

Секционированный лазер на парах бромида меди с управляемой формой импульса генерации

В.А. Димаки, В.Б. Суханов, А.Г. Филонов,
Д.В. Шиянов*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 22.11.2011 г.

Показана возможность увеличения длительности и управления формой импульса генерации лазера на парах бромида меди при использовании двухсекционной газоразрядной трубки. Внесение рассогласования в работу секций с помощью линии задержки позволило увеличивать длительность импульса генерации до 90 нс, а также формировать двойной импульс, необходимый для ряда практических применений. Снижение концентрации паров рабочего вещества в опережающей секции приводило к формированию ступенчатого импульса генерации, используемого для эффективного формирования излучения с малой расходимостью.

Ключевые слова: длительность импульса, лазер на парах бромида меди, генерация; pulse elongation, CuBr laser, lasing.

Введение

Успехи, достигнутые в разработке лазеров на парах металлов и их солей [1–3], позволяют использовать их в самых разных областях науки и техники. Это может быть зондирование атмосферы, накачка лазеров на красителях, прецизионная обработка материалов, в медицине может использоваться в качестве хирургического инструмента, а также для низкоинтенсивной терапии и т.д. Однако ряд физических особенностей лазеров на самоограниченных переходах усложняют их работу. Имеются в виду короткое время существования инверсии населенностей и необходимость поддержания на заданном уровне достаточно высокой рабочей температуры активного объема.

Если вопрос с температурой в достаточной степени решается использованием солей металлов и применением внешнего термостата, поддерживающего температуру стенки разрядного канала на заданном уровне, то с длительностью импульса генерации дело обстоит сложнее. Малое время инверсии приводит к тому, что при длительности импульса генерации 30–40 нс и типичной длине резонатора 1,5–2 м излучение всего 5–6 раз обходит резонатор. Благодаря высокому коэффициенту усиления, характерному для лазеров на парах металлов (10–100 дБ/м), средняя мощность излучения лазера на парах бро-

мида меди достигает высоких значений — выше 100 Вт, однако за это число проходов не успевает сформироваться излучение с расходимостью, близкой к дифракционной при использовании резонатора Фабри–Перо.

Для получения излучения с малой расходимостью в лазерах такого типа используют неустойчивые резонаторы телескопического типа, в которых дифракционный предел достигается за существенно меньшее число проходов. Хотя для этого типа резонаторов характерны высокие потери, доля излучения с малой расходимостью существенно выше, чем при использовании резонатора Фабри–Перо. Соответственно возрастает эффективность использования лазерного излучения. Однако большая величина доли лазерного излучения с высокой расходимостью в пучке импульса генерации заставляет искать пути снижения этих потерь.

В [3–5] рассматривается зависимость эффективности получения излучения с малой расходимостью от длительности импульса генерации и показано, что время переходных процессов при формировании излучения с малой расходимостью практически совпадает с длительностью импульса генерации. Другими словами, излучение с малой расходимостью формируется только к концу импульса генерации и поэтому длительность импульса становится существенным фактором, определяющим эффективность работы лазера.

Длительность импульса генерации зависит от рода активной среды. Примером может служить сравнение эффективности генерации в лазерах на парах золота, меди и свинца, проведенное в [6]. Показано, что эффективность работы резонатора меняется от

* Виктор Анатольевич Димаки (qel@asd.iao.ru); Виктор Борисович Суханов (qel@asd.iao.ru); Александр Григорьевич Филонов (qel@asd.iao.ru); Дмитрий Валерьевич Шиянов (qel@asd.iao.ru).

среды к среде и определяющим фактором является длительность импульса генерации. Конечно, есть возможности оптимизации работы неустойчивого резонатора и для сред с малой длительностью импульса генерации [7] путем подбора параметров разряда и активной среды, однако этот метод не решает проблемы в целом.

Длительность импульса генерации существенным образом зависит от частоты следования импульсов (ЧСИ) возбуждения. В монографии [8] подчеркивается, что повышение ЧСИ остается одним из основных путей развития лазеров на парах металлов и их солей, однако при увеличении ЧСИ снижается длительность импульса генерации. Соответственно, эффективность получения генерации с расходимостью, близкой к дифракционной, зависит и от того, на какой частоте работает лазер.

Существенным фактором формирования такого важного параметра, как расходимость излучения, является форма импульса генерации [9, 10]. В начале импульса генерации требуется малый уровень энергии для получения излучения с расходимостью, близкой к дифракционной, а затем производится эффективное снятие инверсии в активной среде.

Таким образом, из сказанного следует, что для эффективного формирования излучения необходимого качества желательно иметь по возможности более длительный импульс генерации с полочкой на переднем фронте и относительно низкой импульсной мощностью, при которой формируется излучение с малой расходимостью, с основной величиной энергии, расположенной в конце импульса генерации.

В работе [11] показано, что секционирование активного объема позволяет увеличить эффективность работы лазера и довести его КПД до 3%. В то

же время некоторая независимость формирования инверсии в секциях заставляет сделать предположение, что возможен сдвиг импульсов генерации в разных секциях газоразрядной трубки друг относительно друга. Такое положение позволяет варьировать суммарную длительность импульса генерации, увеличивая эффективность работы неустойчивого резонатора. Такой эффект позволил бы работать и при высоких частотах следования импульсов, увеличивая длительность импульса генерации и, соответственно, эффективность работы лазеров при формировании излучения с малой расходимостью. Аналогично можно формировать излучение с малой расходимостью для сред с малой длительностью импульса генерации, как, например, для лазера на парах свинца.

Нами были проведены экспериментальные исследования возможности изменения длительности и формы импульса генерации за счет секционирования активного объема лазера на парах бромида меди.

Экспериментальная установка

Особенностью газоразрядной трубки являлось наличие центрального электрода 6 между обычными электродами, расположенными по концам разрядного канала (рис. 1).

Три электрода формировали два разрядных объема. Внутренний диаметр разрядной трубки, выполненной из оптически чистого кварца, составлял 36 мм при толщине стенки 2 мм. Расстояние между боковыми электродами — 1500 мм с соответствующим каждой секции расстоянием 750 мм. В каждой секции равномерно располагались три боковых отростка (контейнера), в которых находилось рабочее вещество CuBr. Каждый боковой отросток снабжался

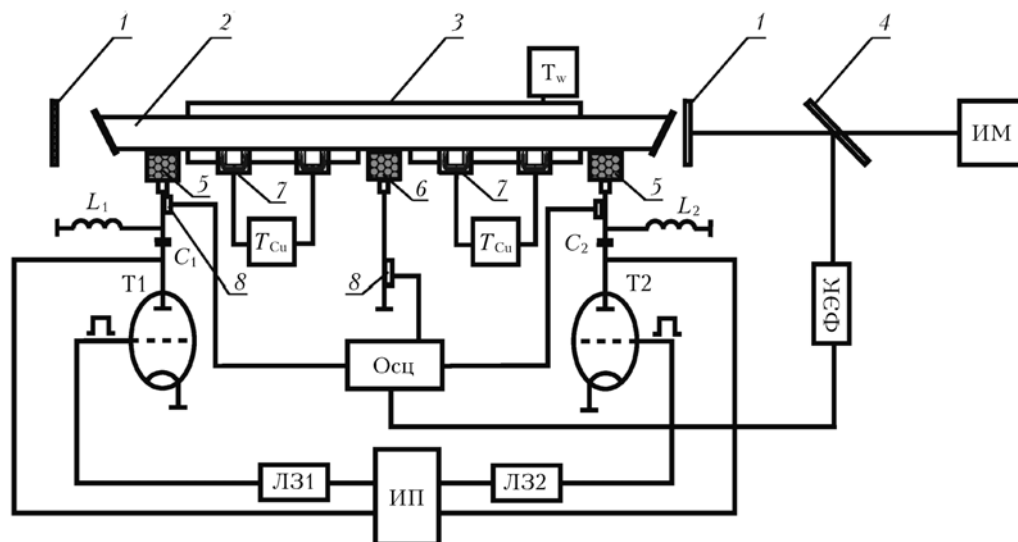


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 — резонатор; 2 — ГРТ (газоразрядная трубка); 3 — теплоизолятор; 4 — светоделительная пластинка; 5 — торцевые электроды; 6 — центральный электрод; 7 — контейнеры с CuBr и нагреватели; 8 — делители напряжения и пояса Роговского; T_{Cu} — блок контроля температуры контейнеров с CuBr; T_w — блок управления температурой стенки разрядного канала; Т1, Т2 — тиратроны секций; ИП — высоковольтный источник питания; ЛЗ1, ЛЗ2 — блоки задержки запуска тиратронов; L_1 , L_2 — зарядные индуктивности; C_1 , C_2 — рабочие емкости; ФЭК — фотоприемник ФК-19; ИМ — измеритель мощности Ophir 20C-SH

нагревательной печью, работа которой контролировалась и управлялась блоком T_{Cu} . При нагреве контейнера с CuVg создавалось необходимое давление паров CuVg в разрядном канале.

В качестве теплоизолятора активного объема использовался внешний нагреватель – термостат, который при изменении вводимой в разряд мощности и соответствующем изменении температуры стенки разрядного канала увеличивал или уменьшал подогрев, поддерживая температуру стенки в заданном интервале. Контроль за температурой стенки разрядного канала осуществлялся хромель-алюмелевой термопарой. Разряд проходил в буферном газе неоне давлением 50 торр. Резонатор Фабри–Перо состоял из глухого зеркала с диэлектрическим покрытием с коэффициентом отражения 99,9% для линий генерации 510,5 и 578,8 нм и выходного зеркала, представляющего собой плоскую кварцевую пластинку.

В данном конкретном исполнении электрической схемы возбуждения крайние электроды использовались в качестве катодов, а центральный электрод в качестве анода. Коммутаторами служили два тиратрона ТГИ1-1000/25. Линии задержки ЛЗ1 и ЛЗ2, расположенные в цепи включения тиратронов, обеспечивали режим синхронной работы коммутаторов и режим фиксированной задержки включения тиратронов относительно друг друга. При этом происходил сдвиг начала развития разряда в секциях ГРТ относительно друг друга. Через индуктивности L_1 и L_2 осуществляется заряд рабочих емкостей величиной 730 пФ. Разряд осуществляется каждой емкостью через свою секцию с частотой следования импульсов 20 кГц.

Контроль за импульсами напряжения осуществлялся с помощью малоиндуктивного делителя напряжения. Форма импульса тока определялась с помощью поясов Роговского, форма импульса генерации – с помощью фотоэлемента ФК-19. Импульсы напряжения, тока и генерации выводились на осциллограф Tektronix 3022. Средняя мощность генерации регистрировалась измерителем мощности Ophir 20C-SH.

Экспериментальные результаты

Для исследуемого лазера характерны две особенности: стабилизация температуры стенки разрядного канала и секционирование активного объема.

Как правило, лазеры на парах металлов и их солей работают в режиме «саморазогрева», при котором за счет диссипации энергии разряда производится разогрев активной среды, а теплоизолятор поддерживает оптимальную рабочую температуру разрядного канала при вполне конкретной вводимой в разряд мощности. При отклонении от этой вводимой мощности происходит либо охлаждение активной среды, либо так называемый «перегрев». Одновременно с этим процессом изменяется температура стенки разрядного канала. Как показывают результаты работы [12], мощность генерации существенным образом зависит от этой температуры.

В случае секционирования активного объема режимы работы секций влияют друг на друга. Действительно, в работе [11] отмечается, что одной из проблем, возникающих при работе с секционированной ГРТ, является создание одинаковой температуры в различных секциях. При работе с секционированным активным объемом, в случае необходимости изменения параметров разряда одной секции, следствием может быть изменение режима работы второй секции. При формировании рабочей температуры активного объема диссипацией энергии разряда она будет в значительной степени зависеть от ряда слабо контролируемых параметров. Наиболее существенными из них являются давление бромиды меди и режим работы тиратронов. Поэтому в данной конструкции лазера температура стенки разрядного канала поддерживается на определенном уровне внешним источником, что стабилизирует работу лазера.

Отрицательная обратная связь выполнена с помощью хромель-алюмелевой термопары, контролирующей температуру стенки разрядного канала. Это позволяло работать в широком диапазоне вводимых в разряд мощностей, стабилизируя ее с точностью до 5 °С. Создание температурного режима источником, не зависящим от свойств разряда и разрядной электрической цепи, в значительной степени увеличивает стабильность работы лазера в целом и выравнивает температуру секций. Такое решение позволило воздействовать на работу отдельных секций, не изменяя температурного режима, что существенно расширило возможности лазера на парах бромиды меди.

Второй особенностью является секционированность активного объема: в центре разрядного канала расположен дополнительный электрод, который увеличивает функциональные возможности газоразрядной трубки, что позволяет работать в следующих режимах.

Во-первых, можно обойтись без использования дополнительного электрода и тогда ГРТ представляет собой простую разрядную трубку с общим разрядом через две секции. При этом в результате прохождения разряда формируется одиночный импульс генерации, характерный для лазеров на самоограниченных переходах и описанный во многих статьях.

Во-вторых, использование дополнительного электрода позволяет эффективно управлять формой импульса генерации за счет сдвига времени существования инверсии в секциях вплоть до получения двойного импульса генерации с расстоянием между импульсами в несколько наносекунд. Кроме того, секционированность активного объема допускает использование преимуществ уменьшенной индуктивности разрядного объема, что является принципиально важным для лазеров на самоограниченных переходах [11].

Работа лазера рассматривалась в трех режимах: одновременная работа двух секций, работа лазера с небольшим сдвигом импульсов генерации и режим генерации двух разнесенных во времени импульсов.

В первом режиме, режиме одновременной работы двух секций, импульс генерации представлял собой совмещенный импульс. Его форма приведена на рис. 2.

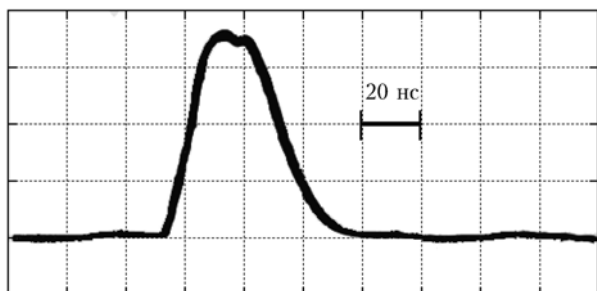


Рис. 2. Суммарный импульс генерации при одновременной работе секций (20 нс/дел)

Одновременная работа двух секций сформировала импульс генерации большой амплитуды, с характерными для лазеров на самоограниченных переходах характеристиками. Длительность импульса генерации типична для данного типа лазеров и составляет 45–50 нс по основанию и 30 нс по полувысоте. В то же время наблюдается небольшое рассогласование между работой секций примерно 5 нс, не влияющее на эффективность работы лазера. В этом режиме лазер работал на уровне средней мощности генерации ~ 30 Вт с потребляемой мощностью ~ 3 кВт.

На рис. 3 представлены импульсы напряжения на анодах секционной трубки при постепенном увеличении паузы между включениями секций. Важным аспектом при работе секций со смещенным запуском является вопрос влияния секций друг на друга при малых рассогласованиях. Хотя этот момент требует отдельного рассмотрения, укажем, что влияние достаточно определенно выражено небольшим повышением напряжения на отстающей секции. На рис. 3 эта область обозначена буквой А (кривые 2, 3 и 4).

Видим, что эта область соответствует области пробоя опережающей секции. Можно сказать, что разряд в опережающей секции меняет некоторым образом предимпульсное состояние газа в запаздывающей секции. Такое опережение должно облегчать пробой запаздывающей секции, что выражается в некотором снижении напряжения пробоя, заметном на осциллограмме (рис. 3). Возможное прохождение паразитного тока от первой секции через вторую секцию, видимо, должно достаточно сильно влиять на параметры импульса генерации. Именно в этом и заключается проблема образования формы импульса генерации путем сложения импульсов секций при их совместной работе.

Вопрос получения импульса генерации специальной формы, увеличивающего эффективность формирования излучения, с расходимостью, близкой к дифракционной, решался в ряде работ. Например, в работах [8, 9] в лазере на парах меди для достижения указанной цели используется дополнительный разряд через активный объем. Однако известно, что прохождение дополнительного тока в межимпульсный период приводит к увеличению остаточных электронов в плазме активной среды, что резко

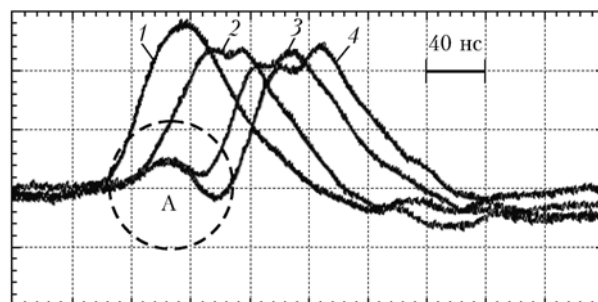


Рис. 3. Импульсы напряжения: 1 – опережающая секция; 2, 3 и 4 – отстающая секция с последовательным увеличением задержки (40 нс/дел); А – область влияния опережающей секции на отстающую секцию

снижает энергетические параметры получаемой генерации.

В нашем случае можно сказать, что дополнительный и основной разряды пространственно разнесены. Это существенно снижает их влияние друг на друга и позволяет получать максимальный энергосъем, формируя импульс генерации требуемой формы. Необходимость такого режима отмечается в работе [9], в которой показано, что формирование полочки длительностью порядка 40 нс обеспечивает эффективное (до 80%) формирование излучения с дифракционной расходимостью.

На рис. 4 показан сформированный импульс генерации с полочкой приблизительно указанной длительности.

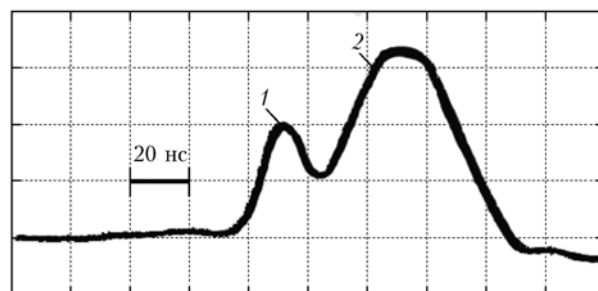


Рис. 4. Формирование суммарного импульса генерации сложной формы: 1 – опережающий импульс генерации; 2 – отстающий импульс генерации (20 нс/дел)

Процесс формирования суммарного импульса генерации двумя секциями осуществлялся следующим образом. За счет линий задержки проводилось разделение импульсов генерации. Затем производилось уменьшение амплитуды первого импульса генерации, которое в нашем случае достигалось снижением концентрации паров брома меди в опережающей секции. Таким образом, за время длительности ступеньки в начале импульса генерации слабое излучение формирует в резонаторе поле с малой расходимостью. А затем оно усиливается, что позволяет существенно снизить в пучке излучения долю с большой расходимостью. Однако такая схема дает возможность получать суммарный импульс генерации и с другими формами, варьируя амплитуду, длительность и временное положение импульсов генерации от двух секций.

Существенным в этом плане является увеличение длительности импульса генерации при работе на более высоких частотах. Известно [4], что при этом длительность импульса генерации сокращается, это снижает эффективность работы неустойчивого резонатора, и решение вопроса видится в использовании секционных активных элементов. Аналогично, увеличение длительности импульса генерации может быть произведено для активных сред с малой длительностью инверсии, например для лазера на парах свинца.

На рис. 5 приведен режим формирования двойного импульса генерации.

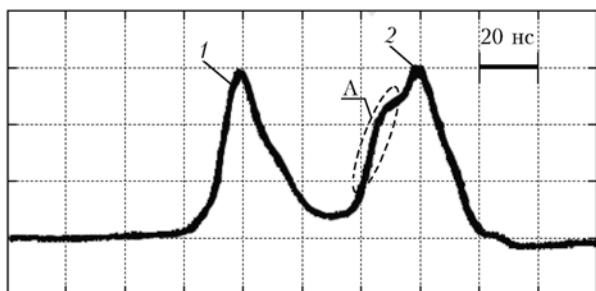


Рис. 5. Режим с разнесенными во времени импульсами генерации от секций (20 нс/дел)

Импульсы от разных секций задержаны друг относительно друга на 60 нс. Неодинаковость импульсов объясняется воздействием остаточного излучения опережающей секции на работу отстающей секции. Двойные импульсы широко применяются для диагностики активных сред лазеров. Такое расположение может использоваться в диагностике сред, когда требуется произвести ее возбуждение, а затем исследовать ее состояние. Надо отметить, что эффективная регулировка скважности импульсов является немаловажным инструментом исследования наносекундных процессов.

Заключение

Нами исследована и реализована возможность гибкого формирования формы и длительности импульса генерации в секционированном активном объеме лазера на парах бромид меди. В зависимости от величины задержки импульса возбуждения на секциях получены три режима работы:

- мощный суммарный импульс генерации при нулевой задержке;
- импульс генерации с регулируемой по амплитуде ступенькой на переднем фронте для формиро-

вания излучения с малой расходимостью при длительностях задержки 15–20 нс;

– двойной импульс генерации при задержке ~ 60 нс.

Во всех исследованных режимах энергия в импульсе зависела от концентрации паров бромида меди в отдельных секциях, что позволяло эффективно управлять амплитудой импульсов генерации. Отметим также, что при длительностях задержки более 100 нс было замечено сильное снижение энергии импульса генерации отстающей секции, обусловленное, по-видимому, наведенным поглощением по генерационному переходу в опережающей секции.

1. Елаев В.Ф., Лях Г.Д., Пеленков В.П. CuBr-лазер со средней мощностью генерации свыше 100 Вт // Оптика атмосфер. 1989. Т. 2, № 11. С. 1228–1229.
2. Astajov D.N., Dimitrov K.D., Jones D.R., Kirkov V.K., Little C.E., Sabotinov N.V., Vuchkov N.K. Copper Bromide Laser of 120-W Average Output Power // IEEE. J. Quantum. Electron. 1997. V. 33. P. 705–709.
3. Григорьянц А.Г., Казарян М.А., Лябин Н.А. Лазеры на парах меди. М.: Физматлит, 2005. 312 с.
4. Батенин В.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Климовский И.И., Молодых Э.И. Лазеры на самоограниченных переходах. М.: Науч. книга, 1998. 544 с.
5. Елаев В.Ф., Мирза С.Ю., Суханов В.Б., Троцкий В.О., Солдатов А.Н., Филонов А.Г. Влияние фонового излучения лазера на парах меди с неустойчивым резонатором на генерацию красителей // Квант. электрон. 1986. Т. 13, № 5. С. 914–917.
6. Елаев В.Ф., Мирза С.Ю., Суханов В.Б., Троцкий В.О., Филонов А.Г. Исследование лазеров на парах меди, золота и свинца с неустойчивым резонатором // Аппаратура дистанционного зондирования параметров атмосферы. Томск: ТФ СО АН СССР, 1987. С. 92–99.
7. Evtushenko G.S., Filonov A.G., Filonova N.A. Unstable Resonator Lead Vapor Laser // Atomic and Molecular Pulsed Lasers / V.F. Tarasenko, G.Y. Mayer, G.G. Petrushin, Editors // Proc. SPIE. 1995. V. 2619. P. 84–88.
8. Евтушенко Г.С., Шиянов Д.В., Губарев Ф.А. Лазеры на парах металлов с высокими частотами следования импульсов. Томск: Изд-во ТПУ, 2010. 276 с.
9. Солдатов А.Н., Суханов В.Б., Федоров В.Ф., Юдин Н.А. Исследование лазера на парах меди с повышенным кпд // Оптика атмосфер. и океана. 1995. Т. 8, № 11. С. 1626–1636.
10. Полушин Ю.П., Юдин Н.А. Управление характеристиками излучения лазера на парах меди // Квант. электрон. 2003. Т. 33, № 9. С. 833–835.
11. Vuchkov N.K., Sabotinov N.V., Temelkov K.A. Two-arm CuBr laser with a central electrode // IEEE. J. Quantum. Electron. 1997. V. 33, N 4. P. 541–543.
12. Димаки В.А., Суханов В.Б., Троцкий В.О., Филонов А.Г. Лазер на парах бромида меди со стабилизацией температуры стенок активного объема // Изв. Том. политехн. ун-та. 2009. Т. 315, № 4. С. 152–155.

V.A. Dimaki, V.B. Sukhanov, A.G. Filonov, D.V. Shiyonov. **Sectional CuBr vapor laser with a controlled shape of a generation pulse.**

The possibility of CuBr lasing pulse elongation and shape control is shown when using a two-sectional gas discharge tube. Introducing of mismatch into the sections operation with the help of a delay circuit allows an increase in the lasing pulse length up to 90 ns and formation of a double pulse, required for some practical applications. A decrease in the concentration of working laser medium vapors in the lead section results in formation of the step lasing pulse, which provides a low-divergence beam.