

**Повышение эффективности CuVr-лазера в режиме
сдвоенных импульсов накачки**

А. И. Федоров, Д. В. Шиянов

Приведены результаты исследований CuVr-лазера в режиме сдвоенных импульсов накачки, работающего с частотой повторения импульсов генерации 50 Гц. Показано, что КПД-лазера можно увеличивать в несколько раз за счет оптимального ввода энергии импульса возбуждения в разряд активной среды и ее согласованием с импедансом плазмы, образуемой диссоциирующим импульсом накачки. Получен максимальный КПД лазера на уровне 2,7 % по импульсу возбуждения со средней мощностью 17 мВт, энергией 0,35 мДж, длительностью импульса излучения 70 нс и временной задержкой 150 мкс.

Ключевые слова: CuVr-лазер, режим сдвоенных импульсов накачки, энергия излучения, удельная энергия диссоциирующего и возбуждающего импульсов накачки, КПД лазера.

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется исследованию импульсных лазеров на парах галогенидов металлов (ЛПГМ), генерирующих на самоограниченных переходах с резонансных на метастабильные уровни (r - m -переходах). В этих лазерах удастся реализовывать более высокие параметры генерации, чем в лазерах на парах чистых металлов [1, 2]. Наиболее изучен лазер на парах меди, а из галогенидов лазер на бромиде меди [3]. Одним из основных способов работы современных импульсно-периодических ЛПГМ является режим регулярных импульсов накачки, в котором энергия разряда используется как для создания активной среды, так и для ее возбуждения. Такое совмещение функций разряда достигается при работе лазера с частотой следования импульсов накачка порядка десятков килогерц. Одним из недостатков данного режима накачки ЛПГМ является низкая импульсная энергия излучения, что ограничивает их применения в некоторых об-

ластях науки и техники. Например, для прикладных задач, где требуются высокие энергии и длинные импульсы излучения с низкой частотой их повторения. Такой режим генерации возможен при возбуждении активной среды CuVr-лазера сдвоенными импульсами накачки с внешним нагревателем газоразрядной трубки (ГРТ). Первый импульс осуществляет диссоциацию молекул CuBr, а второй импульс обеспечивает возбуждение атомов меди.

Впервые метод сдвоенных импульсов накачки был применен авторами работы [4] для активной среды хлорида меди с буферным газом гелием, в которой при частоте повторения импульсов возбуждения 5 Гц была получена удельная энергия излучения 17 мкДж/см³. Первый импульс накачки коммутировался тиратроном и использовался для диссоциации молекул CuCl, а второй импульс формировался разрядником с временной задержкой между ними от 120 до 200 мкс для возбуждения паров атомов меди. Авторами работы [5] впервые была получена генерация в парах CuBr при частоте повторения 10 Гц и оптимальной временной задержкой между импульсами накачки от 20 до 100 мкс, которая зависела от давления буферного газа гелия. Ими были получены импульсы генерации длительностью на полувысоте 20 нс с энергией 0,4 мДж и КПД-лазера, равным 0,3 % по импульсу возбуждения. Нами в работе [6] были проведены исследования CuVr-лазера при частоте повторения 50 Гц для малых удельных энергий диссоциирующего и возбуждающего импульса, которые не превышали 1,4 мДж/см³ с оптимальной временной задержкой 60 мкс. Был сделан вывод, что для повышения удельных параметров излуче-

Федоров Анатолий Игнатьевич¹, старший научный сотрудник, д.ф.-м.н.

Шиянов Дмитрий Валерьевич^{1,2}, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.

¹ Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Россия, 634021, г. Томск, пл. Зуева, 1.
Тел. (38220) 49-22-97. E-mail: fedorov@iao.ru

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
Тел. (3822) 49-29-89.

Статья поступила в редакцию 1 марта 2017 г.

ния необходимо увеличение энергии диссоциирующего импульса накачки. Нами впервые в работах [7–10] была проведена оптимизация параметров данного режима накачки от частоты повторения импульсов возбуждения в диапазоне от 5 до 100 Гц. Она показала, что повышение средней мощности излучения возможно за счет оптимизации удельной энергии диссоциирующего и возбуждающего импульсов накачки и их временной задержки между собой. В работе [11] нами был предложен согласованный режим ввода энергии возбуждающего импульса в активную среду лазера, который позволил получить КПД лазера по импульсу возбуждения 1,2 % с энергией излучения 0,2 мДж со средней мощностью 10 мВт, временной задержкой 50 мкс и частотой повторения импульсов генерации 50 Гц. В дальнейшем КПД-лазера был увеличен до 1,5 % за счет оптимизации временной задержки, которая равнялась 150 мкс [12].

В данной работе представлены результаты исследований CuVg-лазера в режиме сдвоенных импульсов накачки с частотой повторения 50 Гц в режиме согласованного ввода энергии импульса возбуждения в активную среду для достижения максимального КПД-лазера. На основании экспериментальных данных делается вывод о возможности дальнейшего увеличения выходных параметров CuVg-лазера.

Техника эксперимента

На рис. 1 приведена электрическая блок-схема экспериментальной установки. Она состояла из ГРТ, двух импульсных генераторов накачки, генератора импульсов задержек и системы регистрации параметров излучения, ранее используемая в работе [13]. Лазерная трубка (8) имела активную длину 40 см с внутренним диаметром 1 см, которая нагревалась от внешней печи (10) с терморегулятором (11). На холодных концах трубки были расположены внутренние электроды (9) и выходные окна. Резонатор состоял из Al-зеркала и кварцевой пластины (7). К электродам прикладывались два импульса накачки, временная задержка t_d между которыми могла изменяться от 25 до 250 мкс за счет линии задержки (4) и генератора запускающих импульсов (3). Первый диссоциирующий импульс накачки формировался высоковольтным источником питания (1) с амплитудой напряжения до 20 кВ и током разряда до 700 А за счет рабочей емкости C_d . Её величина могла изменяться от 1,1 до 11,5 нФ. Источник питания позволял вкладывать в разряд удельные энергии диссоциации E_d от 3 до 24 мДж/см³. Для возбуждения атомов меди использовался дополнительный высоковольтный источник питания (6), который позволял формиро-

вать импульсы возбуждения с амплитудой до 15 кВ и током разряда до 400 А за счет рабочей емкости C_p . Её величина могла изменяться от 1 до 9,4 нФ. Источник обеспечивал удельные энергии возбуждения E_p в активную среду от 0,4 до 12 мДж/см³.

Нами также в ряде экспериментов использовался насыщающий дроссель с переменной индуктивностью $L_1 = 17\text{--}70$ мкГн из n ферритовых колец марки М 2000 НМ 40×25×11, который влиял на развитие разряда в активной среде. В качестве коммутаторов T_1 и T_2 применялись тиратроны ТГИ1-1000/25. Они запускались от генераторов (2) и (5). Лазер позволял работать с частотой повторения импульсов генерации от 5 до 100 Гц.

Параметры разрядной плазмы и лазерного излучения регистрировались с помощью датчика тока Pearson Current Monitors 8450, пробника напряжения Tektronix P6015A, фотоприемника ФЭК-22 СПУМ, осциллографа LeCroy WJ-324 и калориметра ИМО-2Н.

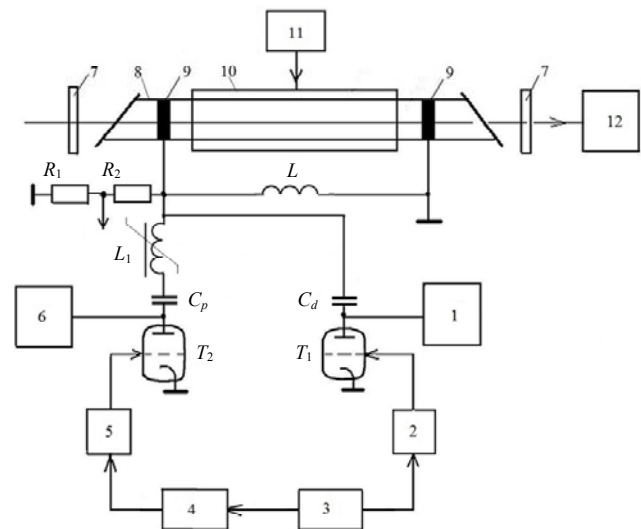


Рис. 1. Электрическая блок-схема экспериментальной установки: 1 и 6 – высоковольтные источники питания диссоциирующих и возбуждающих импульсов накачки; 2 и 5 – генераторы запуска тиратронов T_1 и T_2 (ТГИ1-1000/25); 3 – генератор запускающих импульсов; 4 – линия временной задержки между диссоциирующим и возбуждающим импульсами накачки; 7 – зеркала плоскопараллельного резонатора; 8 – ГРТ; 9 – электроды; 10 – нагревательная печь; 11 – термостабилизатор; 12 – измеритель мощности ИМО-2Н; L – зарядная индуктивность; L_1 – насыщающий дроссель; C_d и C_p – рабочие емкости источников накачки.

Импульсный режим получения паров атомов меди на основе диссоциации молекул CuVg самостоятельным разрядом

В качестве активной среды использовался CuVg с буферным газом неоном при давлении 25 Торр. Активная среда подогревалась от незави-

симого источника питания. Термостабилизация рабочего объема позволяла в широких пределах варьировать удельные мощности накачки.

Нами были проведены исследования по оптимизации параметров плазмы активной среды от параметров источника диссоциирующих импульсов накачки, а также влияние на нее независимого источника подогрева. Ранее в работе [10] нами было показано, что источник независимого подогрева активной среды существенным образом влияет на параметры диссоциирующего импульса накачки и его согласования с рабочей плазмой активной среды.

На рис. 2 приведены осциллограммы диссоциирующих импульсов накачки (напряжения U_d и тока I_d) для ГРТ без подогрева (а) и с ее подогревом (б) от независимого источника питания при напряжении на плазме 7,5 кВ для $C_d = 3,4$ нФ. Для ГРТ без подогрева после основных импульсов накачки наблюдались затухающие колебания напряжения и тока большой амплитуды (см. рис. 2, а). А для ГРТ с источником подогрева наблюдался согласованный ввод энергии в активную среду (рис. 2, б), когда отсутствовали затухающие колебания напряжения и тока на плазме. Аналогичный режим наблюдался, когда амплитуда напряжения диссоциирующего импульса накачки увеличивалась до 12 кВ, а источник подогрева активной сре-

ды ГРТ отсутствовал. Для режима работы активной среды без источника подогрева величина напряжения диссоциирующего импульса накачки на плазме была почти в 1,5 раза выше, чем для режима с ее подогревом. Следовательно, наиболее эффективный согласованный режим ввода энергии диссоциирующего импульса накачки осуществлялся при наличии независимого источника подогрева активной среды ГРТ. А при его отсутствии согласованный режим ввода энергии в активную среду осуществлялся за счет повышения в 1,5–2 раза амплитуды напряжения на плазме диссоциирующего импульса накачки. Таким образом, в зависимости от величины рабочего напряжения на плазме и емкости источника диссоциирующего импульса накачки, можно было управлять вводом удельной энергии для образования активной среды лазера.

Нами были проведены исследования зависимости средней мощности излучения от вкладываемой энергии диссоциирующего импульса накачки, которая, в свою очередь, зависела от величины C_d и рабочего напряжения, подаваемого на нее. Тем самым можно было изменять как длительность, так и амплитуду диссоциирующих импульсов накачки. При этом энергия импульса возбуждения оставалась постоянной и подавалась в активную среду с изменяющейся временной задержкой.

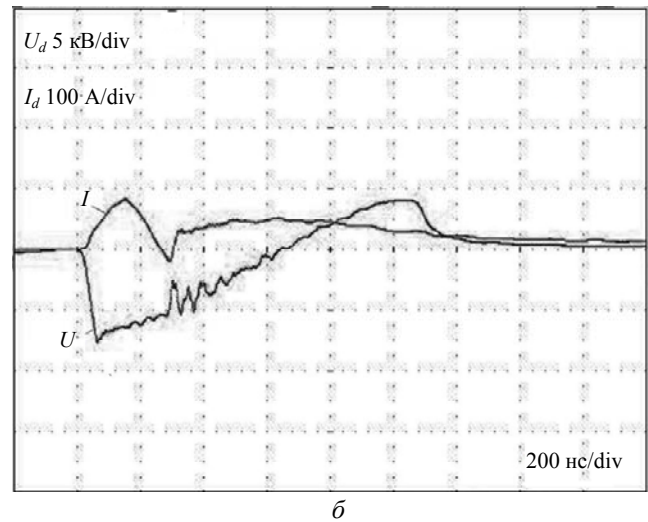
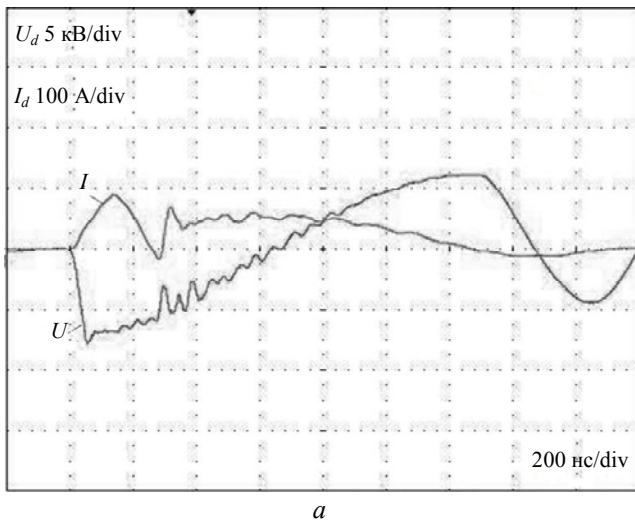


Рис. 2. Осциллограммы напряжения U_d и тока I_d диссоциирующих импульсов накачки при давлении неона 25 Торр, $C_d = 3,4$ нФ, $U_d = 7,5$ кВ без подогрева ГРТ (а) и с подогревом ГРТ (б).

На рис. 3 приведены зависимости средней мощности излучения от величины емкости источника диссоциирующего импульса накачки и временной задержки между ним и импульсом возбуждения. Рабочая емкость источника возбуждения была постоянной и равнялась 4,7 нФ, тем самым обеспечивая удельную энергию возбуждения 5 мДж/см³. Нами было показано, что максималь-

ная средняя мощность излучения наблюдалась при рабочей емкости источника диссоциирующего импульса $C_d = 7-8$ нФ и временной задержки $t_d = 75-200$ мкс. Также было установлено, что увеличение емкости диссоциирующего источника накачки уменьшала величину зарядного напряжения на плазме ГРТ. Это приводило к снижению вкладываемой энергии диссоциирующего импульса

накачки. Так, на рис. 4 приведены зависимости напряжения на плазме и удельной энергии импульса накачки для создания активной среды лазера от величины рабочей емкости диссоциирующего источника питания. Он обеспечивал максимальное значение напряжения на плазме 16 кВ. При этом напряжение оставалось постоянным для изменяющейся емкости источника питания от 1,1 до 4 нФ, а затем линейно спадало до величины 11 кВ при $C_d = 11,5$ нФ. Для удельной энергии импульса накачки наблюдалась обратная картина. С ростом емкости источника питания

удельная энергия накачки линейно росла. Её максимальная величина 24 мДж/см³ регистрировалась для емкости 6,8 нФ при напряжении на плазме 15 кВ. Затем она медленно уменьшалась до 22 мДж/см³ при напряжении на плазме 11 кВ. Максимальная средняя мощность и энергия излучения обеспечивалась источником диссоциирующих импульсов накачки с емкостью 11,5 нФ. Поэтому дальнейшие эксперименты проводились с данной емкостью, при которой рабочая емкость источника импульсов возбуждения могла изменяться от 1 до 9,4 нФ.

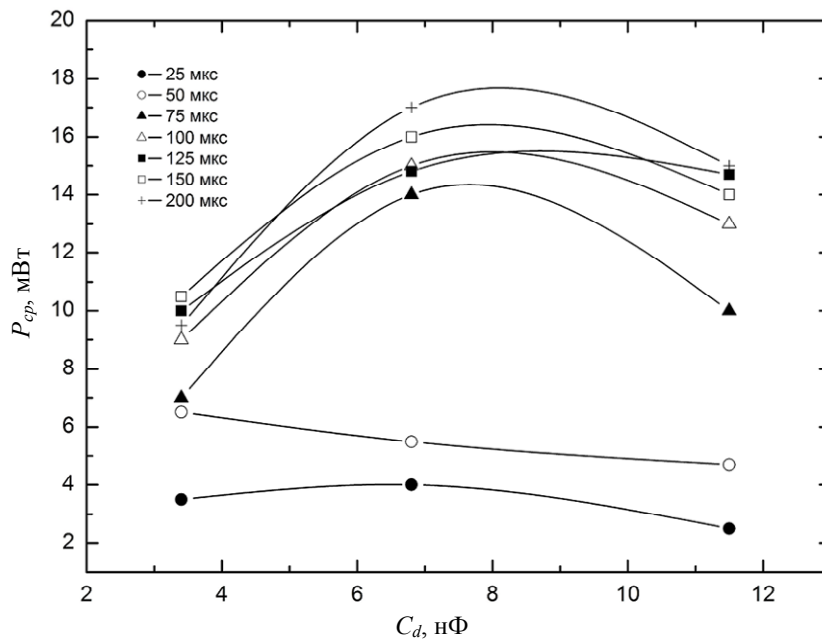


Рис. 3. Зависимости средней мощности излучения от величины емкости источника диссоциирующего импульса накачки и временной задержки между ним и импульсом возбуждения для $C_p = 4,7$ нФ.

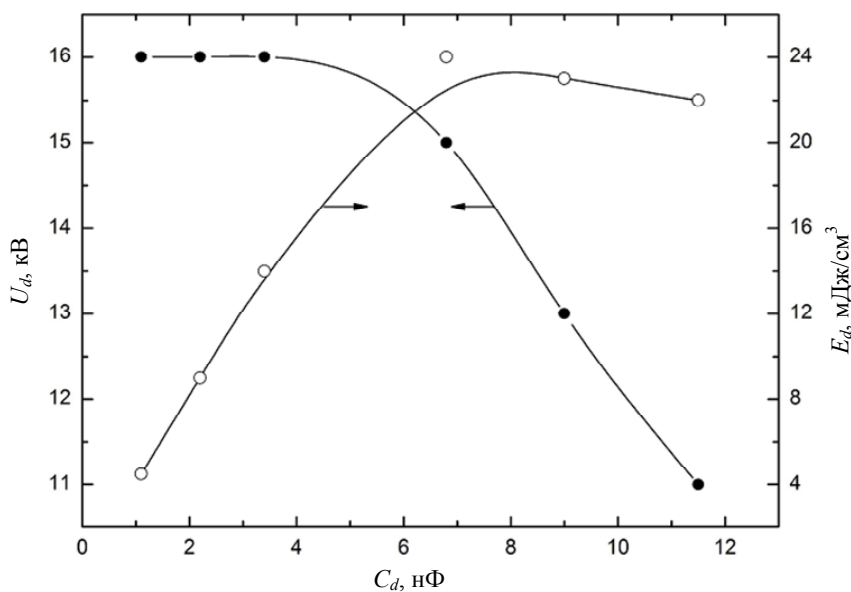


Рис. 4. Зависимости напряжения на плазме и удельной энергии импульса накачки для создания активной среды лазера от величины рабочей емкости диссоциирующего источника питания.

Импульсный режим возбуждения атомов меди самостоятельным разрядом

Для возбуждения атомов меди использовались дополнительные источники питания на 10 или 15 кВ. За счет генератора временных задержек регулировался ввод энергии импульса возбуждения в активную среду, тем самым обеспечивая частичное согласование импедансов источников накачки. На рис. 5 приведены зависимости средней мощности излучения от величины емкости источника импульсов возбуждения и временной задержки между ним и диссоциирующим импульсом накачки. Максимальные параметры излучения наблюдались с емкостью $C_p = 1$ нФ для оптимальных временных задержек от 100 до 150 мкс с источником питания на 10 кВ. Они соответствовали средней мощности 18 мВт и энергии излучения 0,36 мДж. Амплитуда напряжения на плазме импульса возбуждения равнялась 10 кВ, которая обеспечивала оптимальную удельную энергию 2 мДж/см³. В этом случае удельная мощность возбуждения W_p равнялась 18 кВт/см³. Она определялась, согласно работы [14], как $W_p = E_c/(Vt)$, где E_c – энергия, запасаемая в емкости C_p ; V – активный объем лазера; t – длительность по основа-

нию первого полупериода импульса тока разряда. Для сравнения, при $C_p = 9,4$ нФ средняя мощность излучения равнялась 10 мВт, т. е. была почти в 2 раза меньше, чем для емкости $C_p = 1$ нФ. Хотя удельная энергия возбуждения была больше и равнялась 5 мДж/см³, но удельная мощность возбуждения в этом случае уменьшалась до 11 кВт/см³. Таким образом, удельную мощность возбуждения можно считать одним из основных параметров, влияющим на энергию излучения для режима сдвоенных импульсов накачки.

На рис. 5 временные задержки между импульсами накачки можно разделить на две области. При временных задержках меньше 100 мкс средняя мощность излучения линейно возрастала с увеличением удельной мощности возбуждения. А для временных задержек более 100 мкс она начинала уменьшаться с ростом удельной мощности возбуждения. Оптимальной задержкой между импульсами накачки можно считать временной интервал от 100 до 150 мкс, которому соответствовала максимальная средняя мощность излучения. При этом КПД CuVr-лазера по импульсу возбуждения не превышал 0,7 %, что было значительно меньше, чем для Cu-лазера.

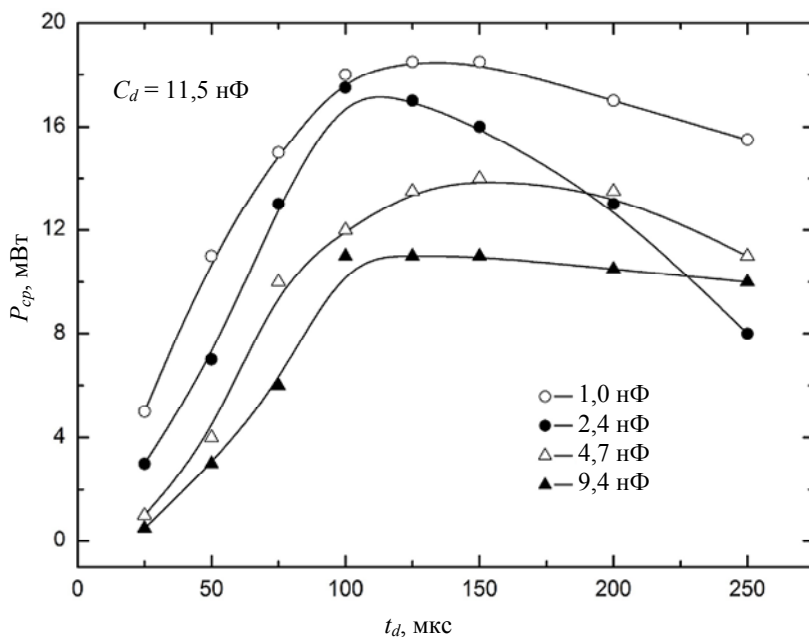


Рис. 5. Зависимости средней мощности излучения от величины емкости источника возбуждающего импульса и временной задержки между ним и диссоциирующим импульсом накачки для $C_d = 11,5$ нФ.

Согласованный режим возбуждения активной среды, обеспечивающий высокий КПД лазера

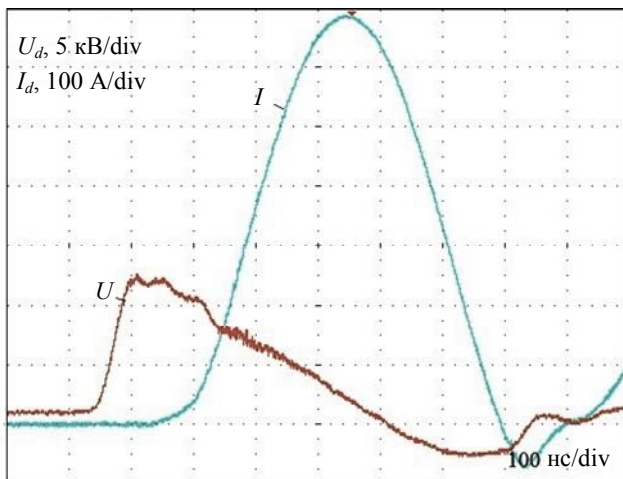
Нами были проведены исследования по определению причин ограничения повышения КПД лазера в данном режиме возбуждения. Ранее считалось, что увеличение амплитуды импульса возбуждения должно было приводить к увеличению энергии излучения и КПД лазера. Но нами было

обнаружено, что энергия излучения может уменьшаться при увеличении удельной энергии или мощности импульса возбуждения вследствие рассогласования импедансов источника и активной среды разрядной трубки. Максимальный КПД-лазера соответствовал режиму согласованного ввода энергии возбуждения в плазму активной среды, который нами был впервые предложен и показан ещё в работе [11]. На рис. 6, а приведены осциллограммы U_d и I_d для диссоциирующего им-

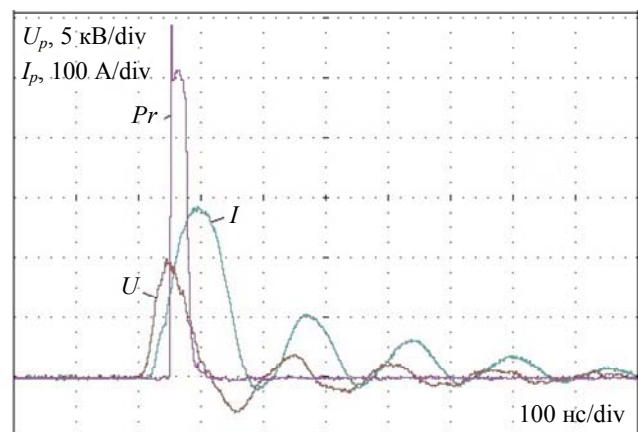
пульса накачки. Соответственно на рис. 6, б представлены осциллограммы U_p и I_p для возбуждающего импульса максимальной амплитуды и генерации излучения I . Наконец, рис. 6, в показывает осциллограммы U_p и I_p для импульса возбуждения с оптимальной амплитудой и генерации излучения P_r для согласованного режима ввода энергии возбуждения в плазму активной среды, что реализуется при $C_d = 11,5$ нФ, $C_p = 1$ нФ и $\tau_d = 150$ мкс. Амплитуда напряжения диссоциирующего импульса накачки равнялась 10 кВ. Ей соответствовала удельная энергия 18 мДж/см³.

Параметры излучения зависели в основном от величины амплитуды напряжения импульса возбуждения, который равнялся 10 кВ (см. рис. 6, б). Это средняя мощность $18,5$ мВт и энергия излучения $0,37$ мДж. В данном случае КПД лазера по энергии возбуждения равнялся $0,7$ % с длительностью импульса генерации на полувысоте 30 нс.

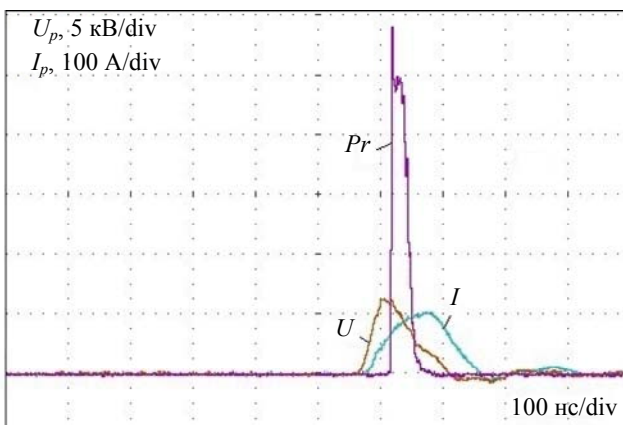
Данные параметры регистрировались в режиме несогласованного ввода энергии импульса возбуждения в плазму разряда, т. е. наблюдались затухающие колебания напряжения и тока большой амплитуды. Удельная энергия и мощность импульса возбуждения равнялись $E_p = 1,8$ мДж/см³ и $W_p = 17$ кВт/см³ соответственно. Согласованный ввод энергии импульса возбуждения наблюдался при его оптимальной амплитуде напряжения на плазме, равной 6 кВ, когда отсутствовали колебания напряжения и тока разряда (см. рис. 6, в). В этом случае происходило согласование импедансов источников питания диссоциирующего импульса и возбуждающего импульса накачки, которому соответствовал наибольший КПД лазера, равный $1,1$ %. Средняя мощность и энергия излучения равнялись 11 мВт и $0,22$ мДж при удельной энергии и мощности возбуждения $0,6$ мДж/см³ и $3,5$ кВт/см³ соответственно.



а



б



в

Рис. 6. Осциллограммы диссоциирующего импульса накачки (U , I) для $C_d = 11,5$ нФ (а), возбуждающего импульса с максимальной амплитудой и генерация (б), возбуждающего импульса оптимальной величины в режиме его согласованного ввода энергии в плазму активной среды и генерация (в) для $C_p = 1,1$ нФ и $t_d = 150$ мкс.

Следовательно, простое увеличение параметров импульса возбуждения может приводить к росту энергетики лазера до определенного предела, после которого она начинает спадать. В этом случае КПД лазера был на много меньше, чем для

согласованного режима ввода энергии в плазму активной среды. Кроме того, на режим согласованного ввода энергии возбуждения в плазму разряда существенное влияние оказывала величина межимпульсной временной задержки, прежде все-

го, в части согласования импедансов источников накачки. Так, для временной задержки 25 мкс средняя мощность излучения равнялась 2,5 мВт, энергия 0,05 мДж, длительность импульса излучения на полувысоте 10 нс, что давало КПД лазера 0,45 %. В этом случае амплитуда напряжения импульса возбуждения равнялась 4,5 кВ, которая не успевала существенно увеличиваться из-за малой величины временной задержки. Кроме того, наблюдались затухающие колебания импульсов возбуждения, которые указывали на несогласованный ввод энергии возбуждения в разряд при малых временных задержках. Но для временной задержки 50 мкс средняя мощность излучения уже равнялась 10 мВт, энергия 0,2 мДж, длительность импульса излучения 20 нс, что обеспечивало максимальный КПД лазера на уровне 1,2 %. Амплитуда напряжения импульса возбуждения равнялась 5,5 кВ, которая соответствовала режиму согласованного ввода энергии в активную среду. При этом с увеличением временной задержки в 2 раза также возрастала длительность импульса излучения в два раза до 20 нс. Для временной задержки 250 мкс средняя мощность излучения равнялась 13 мВт, энергия излучения 0,26 мДж и длительность импульса излучения увеличивалась до 35 нс. В этом случае амплитуда напряжения импульса возбуждения возрастала до 9 кВ, которая тоже соответствовала режиму согласованного ввода энергии в активную среду. Однако КПД лазера уменьшался и был равен всего 0,7 %. Это связано с тем,

что при большой временной задержки начинает уменьшаться концентрация атомов меди, и плазма переходит фактически в нейтральное состояние. Следовательно, за счет временной задержки в режиме сдвоенных импульсов накачки можно управлять как режимом ввода энергии возбуждения в плазму разряда, так и длительностью импульсов генерации.

На рис. 7 приведены зависимости КПД лазера от временной задержки между импульсами накачки при максимальной и оптимальной амплитуде напряжения на плазме импульса возбуждения. Для максимальной амплитуды напряжения на плазме при оптимальных задержках от 50 до 100 мкс КПД лазера не превышал 0,85 %, а с ее увеличением линейно падал. Аналогичная картина наблюдалась для импульса возбуждения с оптимальной амплитудой напряжения на плазме. Ее отличие в том, что максимальный КПД лазера увеличивался до 1,2 % для временной задержки 50 мкс, а затем уменьшался до величины, почти равной максимальному значению для несогласованного режима возбуждения. Это связано с тем, что с ростом временной задержки КПД лазера уменьшался из-за рассогласования импедансов источников накачки.

В работе [12] нами был получен КПД лазера 1,5 % за счет оптимизации параметров импульса возбуждения для временной задержки 150 мкс. Дальнейшие исследования КПД лазера проводились с данной оптимальной временной задержкой для источника возбуждения на 15 кВ.

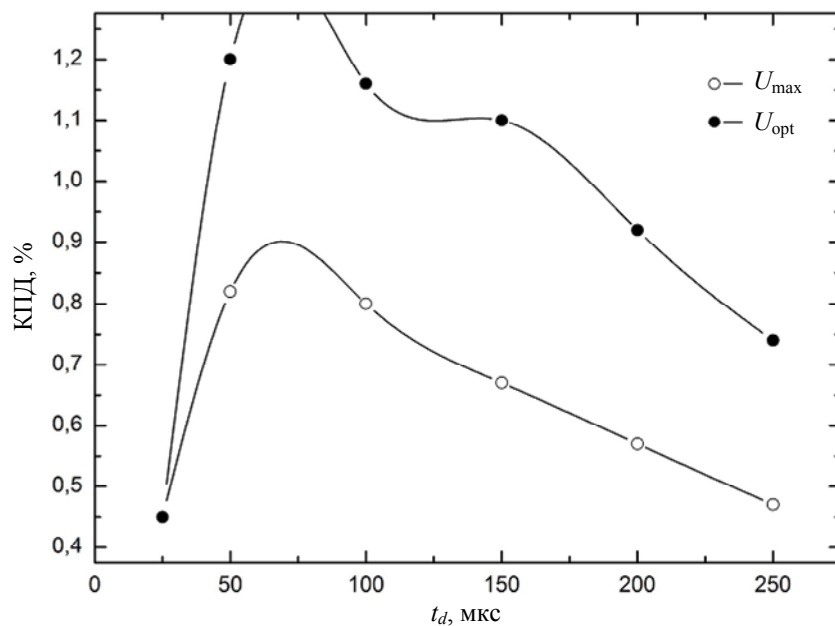


Рис. 7. Зависимости КПД-лазера по энергии импульса возбуждения для его максимальной и оптимальной амплитуды напряжения на плазме и временной задержки между импульсами накачки.

На рис. 8 приведены зависимости средней мощности излучения и КПД лазера от величины рабочей емкости источника диссоциирующего импульса накачки и напряжения на плазме активной среды для оптимальной емкости 1 нФ источ-

ника импульса возбуждения. Для максимального напряжения возбуждения 15 кВ средняя мощность излучения резко возрастала и равнялась 37 мВт с увеличением диссоциирующей емкости до 6,8 нФ, а затем она медленно уменьшалась до 35 мВт при

$C_d = 11,5$ нФ. Для КПД лазера наблюдалось иная картина. Это его медленное нарастание до максимального значения 0,7 % с увеличением диссоциирующей емкости до 6,8 нФ, а затем его медленный спад. Согласованный режим ввода энергии возбуждения наблюдался в данном случае при более низком напряжении на плазме активной среды. Оно равнялось 5 кВ.

Зависимости согласованного режима возбуждения резко отличались от режима максимального напряжения на плазме, равного 15 кВ. Средняя мощность излучения нарастала с ростом диссоциирующей емкости с 1,1 до 3,3 нФ, а затем оставалась почти постоянной и равнялась 6,5 мВт при увеличении диссоциирующей емкости до 9 нФ. Далее она возрастала до 16 мВт с ростом диссоциирующей емкости, которая увеличивалась до 11,5 нФ. Аналогичная картина наблюдалась для КПД лазера. Он был максимальным для диссоциирующей емкости 11,5 нФ и равнялся 2,6 % [15]. Этот факт говорит о том, что оптимальные условия образования активной среды наблюдались для емкости 11,5 нФ с удельной энергией диссоции-

рующего импульса накачки, равного 22 мДж/см³. Для напряжения возбуждения 10 кВ средняя мощность излучения резко возрастала с увеличением диссоциирующей емкости до 2,2 нФ, и она равнялась 14 мВт, а затем линейно нарастала до 28 мВт при КПД-лазера, равного 1,1 %. Следовательно, за счет оптимальных параметров импульса возбуждения ($U_p = 5$ кВ, $E_p = 0,4$ мДж/см³ и $W_p = 2$ кВт/см³) в согласованном режиме возбуждения нами был получен максимальный КПД лазера 2,6 % со средней мощностью 16 мВт и энергией излучения 0,32 мДж при длительности импульса генерации на полувывоте 40 нс. Для максимального напряжения возбуждения 15 кВ, $E_p = 2,7$ мДж/см³ и $W_p = 17$ кВт/см³ средняя мощность излучения равнялась 37 мВт, энергия излучения 0,7 мДж с КПД лазера 0,7 %. Для напряжения возбуждения 10 кВ, $E_p = 1,6$ мДж/см³ и $W_p = 8$ кВт/см³ средняя мощность равнялась 28 мВт, энергия излучения 0,56 мДж с КПД лазера 1,1 %. Нами было обнаружено, что максимальный КПД лазера наблюдался при оптимальной удельной энергии импульса возбуждения.

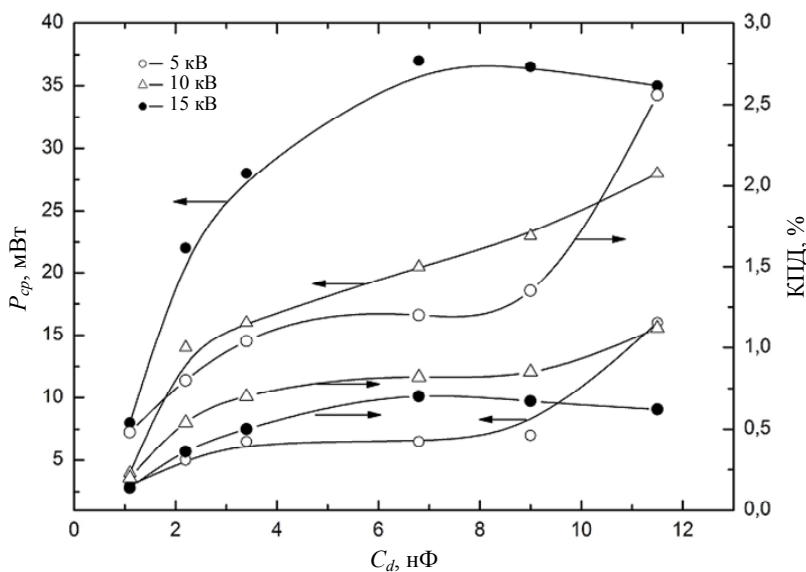


Рис. 8. Зависимости средней мощности излучения и КПД лазера от величины рабочей емкости источника диссоциирующих импульсов накачки и напряжения импульса возбуждения для $C_p = 1$ нФ и $t_d = 150$ мкс.

На рис. 9 приведена зависимость КПД лазера от удельной энергии импульса возбуждения в режиме согласованного ввода ее в плазму активной среды. Для минимальной энергии возбуждения 0,2 мДж/см³ и напряжения на плазме 3 кВ КПД равнялся 1,5 %, а для максимальной энергии возбуждения 0,6 мДж/см³ и напряжения 6 кВ он равнялся 1,1 %. Максимальный КПД-лазера 2,6 % наблюдался при оптимальной удельной энергии возбуждения 0,4 мДж/см³.

Таким образом, нами показано, что для повышения КПД лазера необходим режим, который обеспечивал бы оптимальный ввод энергии им-

пульса возбуждения в плазму активной среды. Он достигался согласованием импедансов источников накачки с плазмой, который осуществлялся за счет выбора оптимальных напряжений диссоциирующего и возбуждающего импульсов и их временной задержки. Получен максимальный КПД-лазера 2,6 % для импульса возбуждения с энергией излучения 0,32 мДж, средней мощностью излучения 16 мВт и длительностью импульса генерации 40 нс для временной задержки 150 мкс, которому соответствовала удельная энергия диссоциирующего импульса накачки 22 мДж/см³ и возбуждающего импульса – 0,4 мДж/см³.

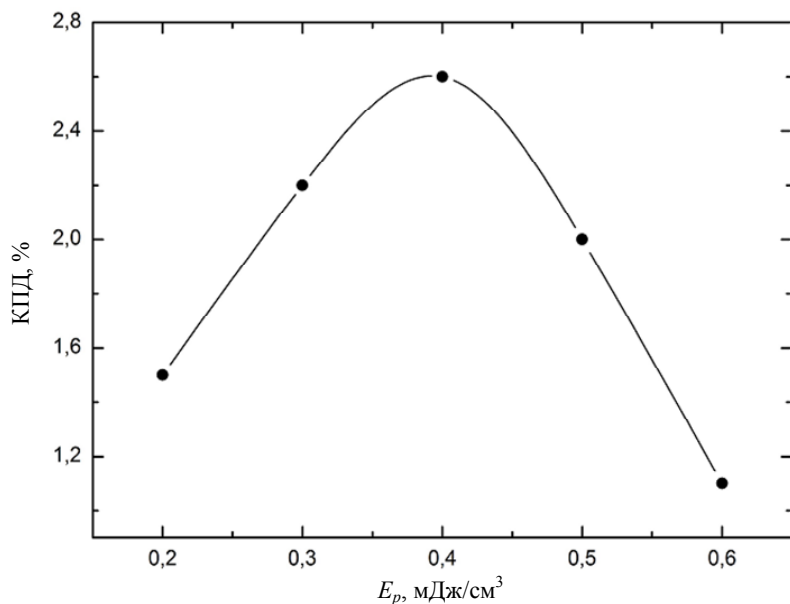


Рис. 9. Зависимость КПД лазера от удельной энергии импульса возбуждения в режиме согласованного ввода ее в плазму активной среды для $C_d = 11,5$ нФ, $C_p = 1$ нФ и $t_d = 150$ мкс.

Дальнейшая возможность повышения КПД-лазера до 2,7 % нами была показана за счет включения в цепь возбуждения насыщающего дросселя, показанного на рис. 1. Величина индуктивности насыщающего дросселя L_1 изменялась от 15 до 70 мкГн. При его отсутствии в схеме питания напряжение импульса возбуждения на плазме активной среды возрастало с 5 до 15 кВ. При этом мощность излучения увеличивалась с 6 до 21 мВт. При включении насыщающего дросселя амплитуда напряжения импульса возбуждения возрастала лишь до 10 кВ. В этом случае максимальная мощность излучения 37 мВт при КПД лазера 1,4 % наблюдалась для индуктивности 30 мкГн, а максимальный КПД лазера 2,7 % со средней мощностью излучения 17 мВт для амплитуды импульса возбуждения

5 кВ, что отражено на рис. 10. На нем приведены зависимости средней мощности излучения и КПД лазера от величины индуктивности насыщающего дросселя и напряжения импульса возбуждения. Максимальные параметры излучения наблюдались для оптимальной индуктивности насыщающего дросселя 30–40 мкГн. В этом случае, как видно из наблюдаемых осциллограмм импульсов тока и напряжения, происходило дополнительное улучшение согласования импедансов плазмы активной среды и источника накачки. При этом оптимальная величина диссоциирующей емкости составляла 6,8 нФ, а возбуждающей емкости – 1 нФ. Следовательно, использование насыщающего дросселя позволяло увеличивать в 2 раза как мощность излучения, так и КПД-лазера.

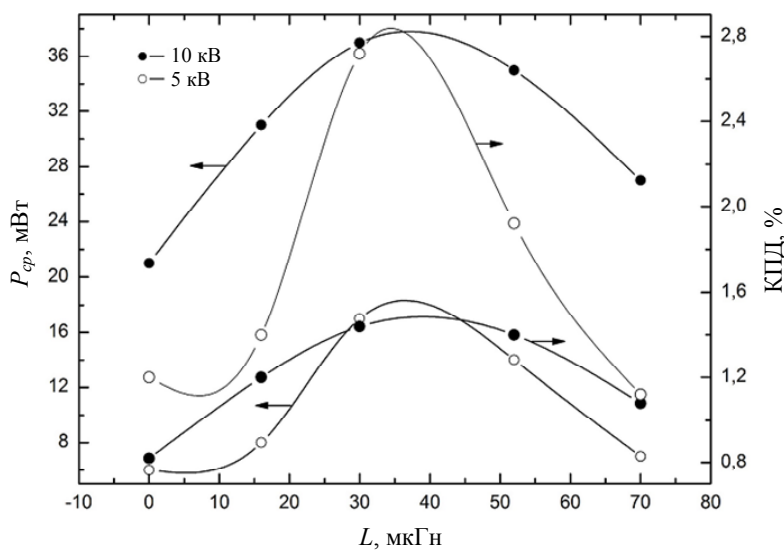


Рис. 10. Зависимости средней мощности излучения и КПД лазера от величины индуктивности насыщающего дросселя и напряжения импульса возбуждения для $C_d = 6,8$ нФ, $C_p = 1$ нФ и $t_d = 150$ мкс.

Заключение

Исследования показали, что для повышения КПД CuBr-лазера, работающего в режиме сдвоенных импульсов накачки, необходимо обеспечить оптимальный ввод энергии импульса возбуждения в плазму активной среды, предварительно образуемой совместно независимым источником подогрева и диссоциирующим импульсом накачки. Это достигалось согласованием импедансов источников накачки с рабочей плазмой, что происходило, прежде всего, за счет выбора оптимальных значений для напряжений диссоциирующего и возбуждающего импульсов и их временной задержки. Кроме того, параметры излучения можно повышать за счет использования насыщающего дросселя в цепи импульса возбуждения.

Получен максимальный КПД лазера 2,7 % по импульсу возбуждения со средней мощностью 17 мВт, энергией 0,35 мДж, длительностью импульса излучения на полувысоте 70 нс и временной задержки 150 мкс. Максимальная энергия 0,7 мДж регистрировалась при средней мощности излучения 37 мВт и КПД лазера на уровне 1,4 %.

Дальнейшее повышение параметров CuBr лазера должно быть связано с оптимизацией формы импульса возбуждения, которая заключается в уменьшении паразитной энергии, вкладываемой в разряд после окончания импульса генерации. Решением этой задачи может стать применение специальных линий сжатия, уменьшающих длительность импульсов возбуждения, или проходных емкостей, срезающих их задние фронты. Наряду с этим можно использовать активные добавки (в виде, например, H₂, HBr), которые изменяют параметры плазмы активной среды и способны повышать выходные характеристики лазера в несколько раз, согласно данным работы [16].

ЛИТЕРАТУРА

1. Земсков К. И., Исаев А. А., Петраш Г. Г. // Квантовая электроника. 1997. Т. 24. № 7. С. 596.
2. Петраш Г. Г. // Известия Вузов. Физика. 1999. № 8. С. 18.
3. Батенин В. М., Бучанов В. В., Казарян М. А., Климовский И. И., Молодых Э. И. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. – М.: Научная книга, 1998.
4. Chen C. J., Nerheim N. M., Russell G. R. // Appl. Phys. Lett. 1973. Vol. 23. No. 9. P. 514.
5. Абросимов Г. В., Васильцов В. В., Волошин В. Н., Корнеев А. В., Письменный В. Д. // Письма в ЖТФ. 1976. Т. 2. Вып. 9. С. 417.
6. Федоров А. И., Федоров В. Ф., Шиянов Д. В. / Доклад на V Всероссийской конференции «Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине». – Новосибирск: Параллель, 2013. Т. 1. С. 263.
7. Федоров А. И., Шиянов Д. В. / Доклад на V Всероссийской конференции «Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине». – Новосибирск: Параллель, 2015. Т. 1. С. 257.
8. Федоров А. И., Шиянов Д. В. // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 9. С. 859.
9. Fedorov A. I. and Shiyonov D. V. // Proc. SPEE 9810, 981006, December 15, 2015. / XII International Conference on Atomic and Molecular Pulsed Lasers. Tomsk. Russian Federation / September 14, 2015.
10. Федоров А. И., Шиянов Д. В. / Тез. докл. симпозиума «Лазеры на парах металлов». – Ростов-на-Дону, 2014. С. 85.
11. Федоров А. И., Шиянов Д. В. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. Вып. 15. С. 98.
12. Федоров А. И., Шиянов Д. В. // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 11. С. 1035.
13. Федоров А. И., Федоров В. Ф., Димаки В. А. // Квантовая электроника. 2012. Т. 42. № 1. С. 18.
14. Федоров А. И. // Квантовая электроника. 2013. Т. 43. № 10. С. 898.
15. Федоров А. И., Шиянов Д. В. // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. Вып. 5. С. 10.
16. Андриенко А. С., Евтушенко Г. С., Жданев О. В., Суханов В. Б., Шиянов Д. В. // Оптика атмосферы и океана. 2004. Т. 17. № 2–3. С. 112.

Increase of effectiveness for a low-frequency CuBr-laser operating in the regime of double pumping pulses

A. I. Fedorov¹ and D. V. Shiyarov^{1,2}

¹V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS
1 Acad. Zuev square, Tomsk, 634021, Russia
E-mail: fedorov@iao.ru

²National Research Tomsk Polytechnic University
30 Lenin av., Tomsk, 634050, Russia

Received March 1, 2017

The problem of increase of the CuBr laser effectiveness has been studied. The CuBr laser can work in the regime of double pumping pulses. The laser operated at the pulse repetition frequency of 50 Hz. It is shown that the laser efficiency can be increased by several times owing to the optimal input of the excitation pulse energy in the discharge of active medium by matching its plasma impedance. The maximum laser efficiency of 2.7 % has been obtained with respect to the excitation pulse energy. In this case, experimental parameters were reached as follows: the laser energy was as high as 0.35 mJ, the average power was equal to 17 mW, and lasing was 70 ns at the time delay of 150 μs.

Keywords: CuBr laser, regime of double pumping pulses, output energy, dissociation and excitation energy density, laser efficiency.

REFERENCES

1. K. I. Zemskov, A. A. Isaev, and G. G. Petrash, *Quantum Electron.*, **27**, 579 (1997).
2. G. G. Petrash, *Russ. Phys. J.* **42**, 674 (1999).
3. V. M. Batenin, V. V. Buchanov, M. A. Kazaryan, et. al., *Self-Contained Metal Atom Transitions Lasers* (Nauchnaya kniga, Moscow, 1998) [in Russian].
4. C. J. Chen, N. M. Nerheim, and G. R. Russel, *Appl. Phys. Lett.* **23** (9), 514 (1973).
5. G. V. Abrosimov, V. V. Vasiltsov, V. N. Voloshin, et. al., *Technical Physics Letters* **2** (9), 417 (1976).
6. A. I. Fedorov, V. F. Fedorov, and D. V. Shiyarov, in *Proc. V Conference on "Interaction of the high-concentrated energy fluxes with materials in perspective technologies and medicine"* (Novosibirsk: Parallel) **1**, 263 (2013).
7. A. I. Fedorov and D. V. Shiyarov, in *Proc. VI Conference on "Interaction of the high-concentrated energy fluxes with materials in perspective technologies and medicine"* (Novosibirsk: Parallel). **1**, 257 (2015).
8. A. I. Fedorov and D. V. Shiyarov, *Atmospheric and Oceanic Optics* **28** (9), 859 (2015).
9. A. I. Fedorov and D. V. Shiyarov, *Proc. SPEE 9810, 981006/ December 15, 2015. / XII International Conference on Atomic and Molecular Pulsed Lasers*. (Tomsk. Russian Federation, September 14, 2015).
10. A. I. Fedorov and D. V. Shiyarov, in *Proc. Symposium "Metal Vapor Lasers"*, (Loo, 22–26 September, 2014). P. 84.
11. A. I. Fedorov and D. V. Shiyarov, *Technical Physics Letters* **41** (8), 759 (2015).
12. A. I. Fedorov and D. V. Shiyarov, *Atmospheric and Oceanic Optics* **28** (11), 1035 (2015).
13. A. I. Fedorov, D. V. Shiyarov, and V. A. Dimaki, *Quantum Electron.* **42** (1), 18 (2012).
14. A. I. Fedorov, *Quantum Electron.* **43** (10), 898 (2013).
15. A. I. Fedorov and D. V. Shiyarov, *Technical Physics Letters* **43** (5), 10 (2017).
16. O. S. Andrienko, V. B. Sukhanov, D. V. Shiyarov, et. al., *Atmospheric and Oceanic Optics* **17** (2–3), 112 (2004).