

ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 535:371.623

**Особенности получения высокого КПД CuBr-лазера
в режиме двойных импульсов накачки**

А.И. Федоров¹, Д.В. Шиянов^{1,2*}

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

² *Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30*

Поступила в редакцию 21.08.2015 г.

Приведены результаты исследований CuBr-лазера с малым объемом активной зоны, работающего в режиме двойных импульсов накачки с частотой повторения импульсов генерации 50 Гц. Рассмотрены возможности повышения эффективности лазера за счет оптимизации параметров импульса возбуждения и его согласования с импедансом плазмы активной среды, образуемой диссоциирующим импульсом накачки. Показано, что для повышения КПД лазера необходим выбор режима оптимального ввода энергии в плазму активной среды. Он достигался согласованием импедансов источников накачки с плазмой, которое осуществлялось за счет выбора оптимального напряжения импульса возбуждения и его временной задержки относительно диссоциирующего импульса накачки. Получен максимальный КПД лазера 1,5% по импульсу возбуждения для временной задержки 150 нс и удельной энергии диссоциирующего импульса 26, а возбуждающего 0,2 мДж/см³.

Ключевые слова: CuBr-laser, средняя мощность излучения, низкая частота, режим двойных импульсов накачки, импульсы диссоциации и накачки, удельная энергия, КПД лазера; CuBr laser, average output power, low frequency, double-pulsed excitation, dissociation and pumping pulse, energy density, laser efficiency.

Введение

Импульсные лазеры на парах галогенидов металлов (ЛПГМ) привлекательны тем, что способны работать в частотном диапазоне от единиц герц до сотен килогерц [1–3]. При этом существенно отличаются способы возбуждения лазера при работе на низких и на высоких частотах следования импульсов. Высокочастотный импульсно-периодический режим совмещает функции нагрева активной среды лазера и ее возбуждения. Низкочастотный режим основан на возбуждении рабочей зоны двойными импульсами накачки с использованием внешнего нагрева газоразрядной трубки (ГРТ). Первый импульс осуществляет диссоциацию молекул галогенида металла, а второй непосредственно обеспечивает возбуждение атомов металла. В отличие от высокочастотного этот режим генерации позволяет повысить импульсную энергию излучения лазера, что необходимо для практического применения ЛПГМ в некоторых областях науки и техники.

В настоящее время в ЛПГМ удается реализовать более высокие частоты и КПД генерации, чем в лазерах на парах чистых металлов [1–3]. Из всего класса лазеров на парах металлов наиболее эффективен лазер на парах меди, а на парах галогенидов металлов – лазер на парах бромида меди.

Впервые метод двойных импульсов накачки был применен авторами работы [4] для активной среды хлорида меди с буферным газом гелием. При частоте повторения импульсов возбуждения 5 Гц и временной задержке между диссоциирующим и возбуждающим импульсами от 120 до 200 нс была получена удельная энергия излучения 17 мкДж/см³. Авторами [5] была получена генерация в парах CuBr при частоте повторения импульсов 10 Гц и оптимальной временной задержке между импульсами накачки от 20 до 100 нс. Кроме того, ими были получены импульсы генерации длительностью на полувысоте 20 нс с энергией 0,4 мДж и КПД лазера, равным 0,3% по импульсу возбуждения.

Авторы [6, 7] провели исследования CuBr-лазера при частоте повторения 50 Гц для малых удельных энергий диссоциирующего и возбуждающего импульсов, которые не превышали 1,4 мДж/см³ с оптимальной временной задержкой 60 нс. Ими был сделан вывод, что для повышения удельных параметров излучения необходимо увеличение энергии диссоциирующего импульса накачки.

Нами была проведена оптимизация параметров данного режима накачки от частоты повторения импульсов возбуждения в диапазоне от 5 до 100 Гц [8]. Она показала, что для повышения эффективности лазера необходимо выполнять ряд требований, предъявляемых к импульсу возбуждения активной среды. В [9] были описаны эти условия и предложен согласованный режим ввода энергии

* Анатолий Игнатьевич Федоров (fedorov@asd.iao.ru);
Дмитрий Валерьевич Шиянов (qel@asd.iao.ru).

возбуждающего импульса в активную среду лазера на частоте 50 Гц, который обеспечивал кпд лазера по импульсу возбуждения 1,2% с энергией излучения 0,22 мДж.

В настоящей статье представлены результаты исследований CuBr-лазера с малым объемом активной зоны в режиме двоек импульсов накачки с частотой повторения 50 Гц в режиме согласованного ввода энергии импульса возбуждения в плазму активной среды для достижения максимального кпд лазера. На основании экспериментальных данных делается вывод о возможности дальнейшего увеличения выходных параметров CuBr-лазера.

Техника эксперимента

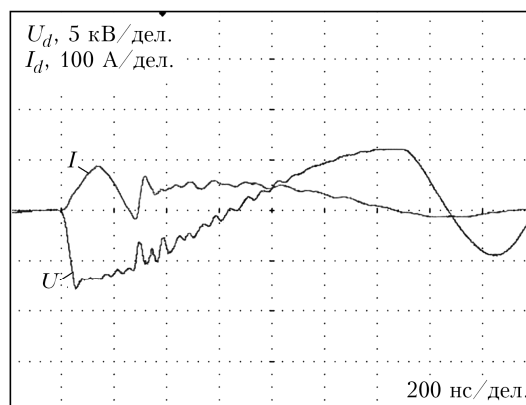
Экспериментальная установка состояла из ГРТ, двух импульсных генераторов накачки, генератора импульсов задержек и системы регистрации параметров излучения. Конструкция ГРТ представлена в [10]. Лазерная трубка имела активную длину 40 см с внутренним диаметром 1 см, которая нагревалась от внешней печи. На холодных концах трубки были расположены внутренние электроды и выходные окна. Резонатор состоял из алюминиевого зеркала и кварцевой пластины. К электродам прикладывались два импульса накачки, временная задержка t_d между которыми могла изменяться от 25 до 250 мкс. Первый диссоциирующий импульс накачки формировался высоковольтным источником питания с амплитудой напряжения до 20 кВ и током разряда до 700 А за счет рабочей емкости C_d . Величина емкости могла изменяться от 3,4 до 11,5 нФ. Источник питания позволял подавать в разряд удельные энергии диссоциации E_d от 3 до 26 мДж/см³.

Для возбуждения атомов меди использовался дополнительный высоковольтный источник питания, который мог формировать импульсы возбуждения с амплитудой до 10 кВ и током разряда до 400 А за счет рабочей емкости C_p . Ее величина могла изменяться от 1,1 до 9,4 нФ. Источник обеспечивал удельные энергии возбуждения E_p в активную среду от 2 до 12 мДж/см³. В качестве коммутаторов применялись тиратроны ТГИ1-1000/25. Лазер позволял работать с частотой повторения импульсов генерации 50 Гц. В качестве буферного газа в активной среде использовался неон при давлении 30 торр. 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.

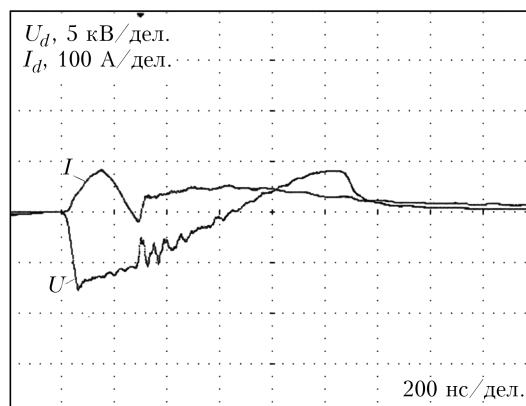
Экспериментальные результаты

Нами были проведены исследования зависимости средней мощности излучения от вкладываемой энергии диссоциирующего импульса, которая обусловлена величиной C_d и рабочим напряжением, подаваемым на нее. Ранее в [11] было показано, что источник независимого подогрева активной среды

существенно влияет на параметры диссоциирующего импульса и на согласование сопротивлений диссоциирующего источника накачки и плазмы активной среды. Так, на рис. 1 приведены осциллограммы диссоциирующих импульсов накачки U_d, I_d для молекул CuBr с буферным газом неоном при $C_d = 3,4$ нФ для ГРТ без подогрева и с подогревом ГРТ от независимого источника питания при напряжении на плазме $U_d = 7,5$ кВ.



а



б

Рис. 1. Осциллограммы напряжения U_d и тока I_d диссоциирующих импульсов накачки для $C_d = 3,4$ нФ без подогрева (а) и с подогревом (б) при $U_d = 7,5$ кВ

Оказалось, что с источником подогрева в ГРТ наблюдался более согласованный ввод энергии в активную среду (рис. 1, б), когда уменьшались колебания напряжения и тока на плазме. Аналогичный режим наблюдался, когда отсутствовал источник подогрева активной среды ГРТ, но амплитуда напряжения диссоциирующего импульса на плазме увеличивалась почти в 2 раза (до 12 кВ). Для этого случая на рис. 2 приведены зависимости амплитуды напряжения на плазме импульса диссоциации без подогрева и с подогревом от величины зарядного напряжения источника питания.

Для режима работы без источника подогрева активной среды величина напряжения диссоциирующего импульса накачки на плазме была почти в 1,5 раза выше, чем с ее подогревом. В этом слу-

чае амплитуда напряжения на плазме достигала постоянного значения 12,5 кВ. Для режима с источником подогрева наблюдался почти линейный рост напряжения на плазме до 10,5 кВ. Следовательно, наиболее эффективный согласованный режим ввода энергии диссоциирующего импульса накачки осуществлялся при наличии независимого источника подогрева активной среды ГРТ. А в его отсутствие — 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 рабочей емкости источника диссоциирующего импульса накачки можно было управлять вводом удельной энергии в активную среду лазера.

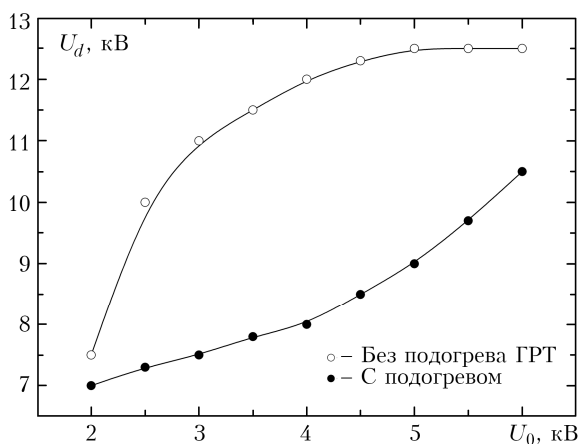


Рис. 2. Зависимости амплитуды напряжения диссоциирующего импульса для молекул CuVg с неона при давлении 30 торр без подогрева и с подогревом активной среды для $C_d = 3,4$ нФ от величины зарядного напряжения источника питания

Нами были проведены исследования зависимости средней мощности излучения от вкладываемой энергии диссоциирующего импульса в молекулы CuVg , которая могла изменяться 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 могла подаваться в активную среду с изменяющейся временной задержкой. Установлено, что увеличение емкости диссоциирующего источника накачки уменьшало величину амплитуды напряжения на плазме. Это приводило к снижению вкладываемой энергии в активную среду лазера. Так, для $C_d = 6,8$ нФ при рабочем напряжении 15 кВ удельная энергия диссоциации равнялась 24 мДж/см³, а для 11,5 нФ при рабочем напряжении 8 кВ она соответствовала 12 мДж/см³. При этом средняя мощность излучения не сильно отличалась для данных емкостей, поэтому дальнейшие эксперименты проводились для емкости $C_d = 11,5$ нФ, при которой емкость источника импульса возбуждения могла изменяться от 1,1 до 9,4 нФ.

За счет генератора временных задержек регулировался ввод энергии импульса возбуждения в активную среду, что обеспечивало частичное согласование импедансов источников накачки. Максимальные параметры излучения наблюдались с емкостью $C_p = 1,1$ нФ для оптимальных временных задержек от 100 до 150 мкс. Они соответствовали средней мощности 18 мВт и энергии излучения 0,36 мДж. Амплитуда импульса возбуждения равнялась 10 кВ, ей соответствовала оптимальная удельная энергия 2 мДж/см³. В этом случае удельная мощность возбуждения W равнялась 18 кВт/см³. Она определялась, согласно [12], как $W = E_c / (Vt)$, где E_c — энергия, запасаемая в емкости C_p ; V — активный объем лазера; t — длительность по основанию 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 $C_p = 1,1$ нФ. И хотя в этом случае удельная энергия возбуждения была больше и равнялась 5 мДж/см³, удельная мощность возбуждения уменьшалась до 11 кВт/см³. Таким образом, удельную мощность возбуждения можно считать одним из основных параметров, влияющих на энергию излучения для режима двоянных импульсов накачки.

Ранее считалось, что увеличение амплитуды импульса возбуждения должно было приводить к увеличению энергии излучения и кпд лазера. Нами было обнаружено, что энергия излучения может уменьшаться при увеличении удельной энергии или мощности импульса возбуждения вследствие рассогласования импедансов источника и разрядной трубки. Максимальный кпд лазера соответствовал режиму согласованного ввода энергии возбуждения в плазму активной среды. На рис. 3. приведены осциллограммы диссоциирующего импульса накачки (U_d, I_d), возбуждающего импульса с максимальной амплитудой и импульса генерации, а также импульсов возбуждения с оптимальной амплитудой и генерации (U_p, I_p, P_r) для согласованного режима ввода энергии возбуждения в плазму активной среды для $C_d = 11,5$ нФ, $C_p = 1,1$ нФ и $t_d = 150$ мкс. Амплитуда напряжения диссоциирующего импульса накачки равнялась 10 кВ. Ей соответствовала удельная энергия 18 мДж/см³. Средняя мощность и энергия излучения, составляющие $18,5$ мВт и $0,37$ мДж соответственно, зависели в основном от величины амплитуды напряжения импульса, которая равнялась 10 кВ (см. рис. 3, б). В данном случае кпд лазера по энергии возбуждения равнялся $0,7\%$ с длительностью импульса генерации на полувысоте 30 нс. Эти параметры регистрировались в режиме несогласованного ввода энергии импульса возбуждения в плазму разряда, т.е. наблюдались затухающие колебания напряжения и тока большой амплитуды (см. рис. 3, б). Удельная энергия и мощность импульса возбуждения равнялись $1,8$ мДж/см³ и 17 кВт/см³ соответственно. Согласованный ввод энергии импульса возбуждения наблюдался при его оптимальной амплитуде напряжения на плазме 6 кВ, когда отсутствовали

колебания напряжения и тока разряда (см. рис. 3, в).

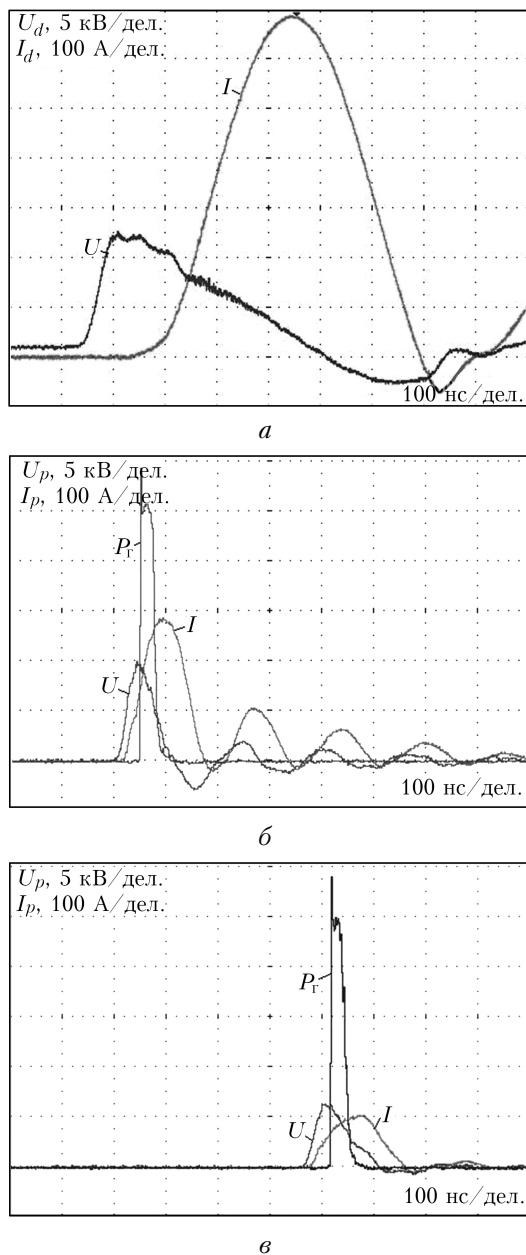


Рис. 3. Осциллограммы диссоциирующего импульса накачки для $C_d = 11,5$ нФ (а), возбуждающего импульса с максимальной амплитудой и импульса генерации (б), возбуждающего импульса оптимальной величины в режиме согласованного ввода энергии в плазму активной среды и генерация (U_p, I_p, P_r) (в) для $C_p = 1,1$ нФ и $t_d = 150$ мкс

В этом случае происходило согласование импедансов источников питания диссоциирующего и возбуждающего импульсов накачки, которому соответствовал наибольший кпд лазера, равный 1,1%. Средняя мощность и энергия излучения составляли 11 мВт и 0,22 мДж при удельной энергии и мощности возбуждения $0,6$ мДж/см³ и $3,5$ кВт/см³. Следовательно, простое увеличение параметров импульса возбуждения может приводить к росту энер-

гетики лазера до определенного предела, после которого она начинает падать. В этом случае кпд лазера был намного меньше, чем для согласованного режима ввода энергии в плазму разряда. Кроме того, на режим согласованного ввода энергии возбуждения в плазму разряда существенное влияние оказывала величина межимпульсной временной задержки, а соответственно, и на согласование импедансов источников накачки. На рис. 4 приведены типичные осциллограммы оптимальных импульсов возбуждения и генерации (U_p, I_p, P_r) для временных задержек 25, 50 и 250 мкс. Для $t_d = 25$ мкс средняя мощность излучения равнялась 2,5 мВт, энергия 0,05 мДж, длительность на полувысоте 10 нс и кпд лазера по энергии возбуждения 0,45%.

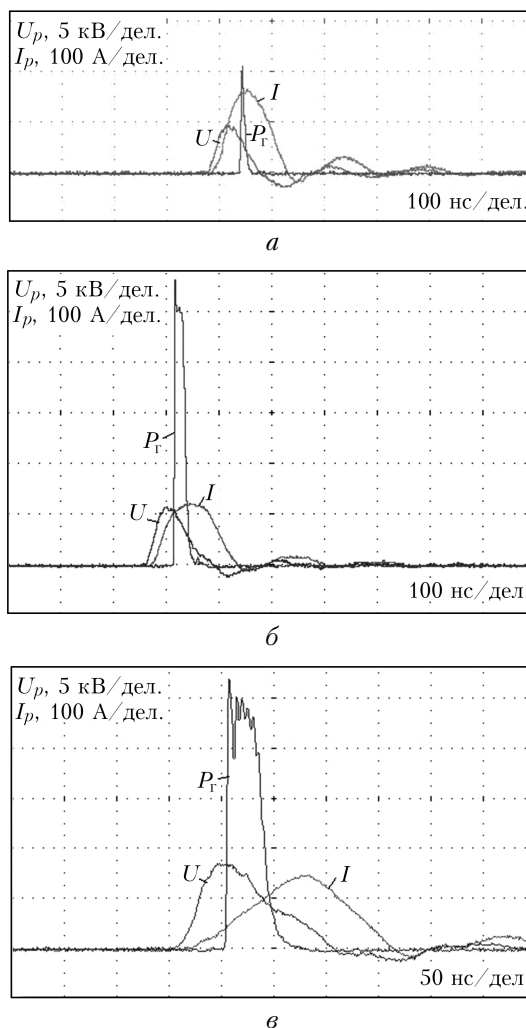


Рис. 4. Осциллограммы оптимальных амплитуд импульсов возбуждения и генерации (U_p, I_p, P_r) для $C_p = 1,1$ нФ и временных задержек $t_d = 25$ (а), 50 (б) и 250 мкс (в) для режима согласованного ввода энергии в плазму активной среды

В этом случае амплитуда импульса напряжения соответствовала 4,5 кВ, она не успевала существенно увеличиваться из-за малого значения t_d . Кроме того, наблюдались затухающие колебания импульсов возбуждения, которые указывали на

несогласованный ввод энергии возбуждения в разряд для небольших временных задержек. Для $t_d = 50$ мкс средняя мощность излучения равнялась 10 мВт, энергия 0,2 мДж, длительность на полувысоте 20 нс и кпд лазера по энергии возбуждения 1,2%. Амплитуда импульса напряжения составляла 5,5 кВ и соответствовала режиму согласованного ввода энергии в активную среду.

С увеличением временной задержки длительность импульса генерации возрастала в 2 раза. Для $t_d = 250$ мкс средняя мощность излучения составляла 13 мВт, энергия 0,26 мДж, длительность на полувысоте 35 нс также возрастала почти в 2 раза, кпд лазера по энергии возбуждения был равен 0,7%. В этом случае амплитуда напряжения импульса возбуждения возрастала до 9 кВ и соответствовала режиму согласованного ввода энергии в активную среду. Это связано с тем, что при большой временной задержке начинает уменьшаться концентрация атомов меди, а плазма переходит 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.

Нами была рассмотрена также возможность влияния величины удельной энергии и мощности импульса возбуждения на параметры импульса генерации. В таблице приведены параметры импульсов возбуждения и генерации для оптимальной $t_d = 150$ мкс в зависимости от амплитуды напряжения на плазме для емкостей $C_p = 1,1$ нФ и $C_d = 11,5$ нФ источников накачки. С ростом амплитуды возрастала средняя мощность и энергия излучения при постоянной удельной энергии диссоциации 26 мДж/см³. При этом кпд лазера по энергии возбуждения уменьшался независимо от роста амплитуды импульса возбуждения. Для амплитуд импульса возбуждения 3 и 6 кВ, которым соответствовал кпд лазера 1,5 и 1,1%, наблюдался согласованный ввод энергии в плазму.

Параметры импульсов возбуждения и генерации для оптимальной задержки 150 мкс в зависимости от амплитуды напряжения на плазме (U_p) для $E_d = 26$ мДж/см³

U_p , кВ	E_p , мДж/см ³	W_p , кВт/см ³	P_{Γ} , мВт	$E_{изл}$, мДж/см ³	кпд, %	Примечание
10	1,8	17	18,5	0,012	0,7	$C_d = 11,5$ нФ
6	0,6	3,5	11	0,007	1,1	$C_p = 1,1$ нФ
3	0,2	0,8	4,5	0,003	1,5	—

Следовательно, максимальный кпд лазера 1,5% (что является практически значимой величиной для ГРТ с таким рабочим объемом) соответствовал средней мощности излучения 4,5 мВт при длительности импульса генерации на полувысоте 10 нс. Максимальная мощность излучения 18,5 мВт длительностью 30 нс с кпд лазера 0,7% наблюдалась для максимального напряжения импульса возбуждения 10 кВ в режиме несогласованного ввода энергии в активную среду. Рост же удельной мощности возбуждения позволял повышать как среднюю мощность, так и энергию излучения.

Следует отметить особенность данного режима накачки, состоящую в том, что с ростом временной задержки между импульсами накачки увеличивается амплитуда напряжения импульса возбуждения из-за перехода плазмы в равновесное состояние. При этом средняя мощность излучения после $t_d = 100$ мкс достигает своего максимума и слабо изменяется с ростом временной задержки до 250 мкс. Ранее было показано [9], что максимальная амплитуда напряжения импульса возбуждения на плазме разряда не всегда соответствует режиму согласованного ввода энергии в активную среду (см. рис. 3, 4). Поэтому амплитуда напряжения импульса возбуждения существенным образом влияет на кпд лазера. Так, на рис. 5 приведены зависимости кпд лазера по энергии импульса возбуждения при максимальной и оптимальной амплитудах напряжения на плазме, а также от ее временной задержки при $E_d = 26$ мДж/см³.

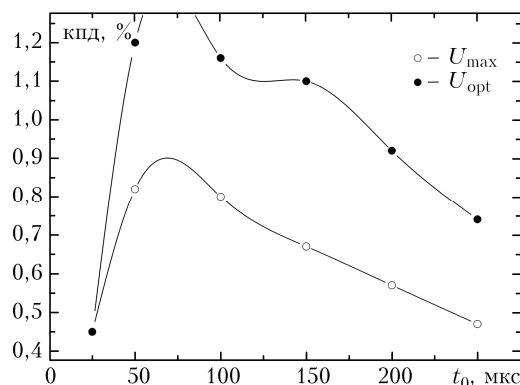


Рис. 5. Зависимости кпд лазера от энергии импульса возбуждения для его максимальной и оптимальной амплитуды напряжения на плазме и от временной задержки между импульсами накачки для $E_d = 26$ мДж/см³

Для максимальной амплитуды напряжения на плазме при оптимальной задержке от 50 до 100 мкс кпд лазера не превышал 0,85%, а с ее увеличением линейно падал. Аналогичная картина наблюдалась для оптимальной амплитуды напряжения на плазме импульса возбуждения. Ее отличие в том, что максимальный кпд лазера увеличился до 1,2% при временной задержке 50 мкс, а затем медленно спадал до 1,1% при временной задержке 150 мкс. И далее кпд лазера уменьшался почти до максимального значения кпд для несогласованного режима возбуждения. Это связано с тем, что с увеличением временной задержки кпд лазера падал из-за рассогласования импедансов источников накачки и снижения концентрации атомов меди за счет рекомбинации.

Заключение

Проведены исследования и оптимизация параметров излучения CuVg-лазера для режима сдвоенных импульсов накачки с частотой повторения 50 Гц. Установлено, что для оптимизации параметров излучения в режиме сдвоенных импульсов накачки при временных задержках 50–150 мкс необходимо

уменьшать удельную энергию, вкладываемую в диссоциирующий импульс накачки при увеличении удельной мощности импульса возбуждения. Показано, что для повышения кпд лазера нужен режим оптимального ввода энергии импульса возбуждения в плазму разряда активной среды. Он достигается согласованием импедансов источников накачки с плазмой, которое осуществляется за счет выбора оптимального напряжения импульса возбуждения и его временной задержки относительно диссоциирующего импульса накачки.

Получен максимальный кпд лазера 1,5% по импульсу возбуждения для временной задержки 150 мкс. Удельная энергия диссоциирующего импульса накачки составляла 26 мДж/см^3 , а возбуждающего — $0,2 \text{ мДж/см}^3$. Этим значениям соответствовала энергия $0,1 \text{ мДж}$, средняя мощность излучения $4,5 \text{ мВт}$ и длительность импульса генерации 10 нс . Максимальная средняя мощность излучения равнялась $18,5 \text{ мВт}$ с энергией $0,37 \text{ мДж}$ и кпд лазера $0,7\%$. В этом случае удельная энергия диссоциирующего импульса составила 26 мДж/см^3 , возбуждающего — $1,8 \text{ мДж/см}^3$, удельная мощность возбуждения 17 кВт/см^3 . Дальнейшее увеличение параметров CuBr-лазера со сдвоенными импульсами накачки должно быть связано с оптимизацией импульсов накачки. Основная задача заключается в уменьшении паразитной энергии, вкладываемой в плазму активной среды лазера. Проблема может быть решена за счет применения линий сжатия, уменьшающих длительность импульсов накачки, срезающих их задние фронты. Кроме того, можно использовать активные добавки (H_2 , HBr), способные повышать выходные характеристики лазера в несколько раз [13].

1. Little C.E. Metal Vapor Lasers: Physics, Engineering & Applications. Chichester (UK): John Wiley & Sons Ltd., 1998. 620 p.
2. Петраш Г.Г. Импульсные лазеры на парах металлов и их соединений: проблемы и перспективы // Изв. вузов. Физ. 1999. № 8. С. 18–22.
3. Батенин В.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Молодых Э.И., Климовский И.И. Лазеры на самоограни-

ченных переходах атомов металлов. М.: Научная книга, 1998. 544 с.

4. Chen C.J., Nerheim N.M., Russell G.R. Double-discharge copper vapor laser with copper chloride as a lasant // Appl. Phys. Lett. 1973. V. 23, N 9. P. 514–515.
5. Абросимов Г.В., Васильцов В.В., Волошин В.Н., Корнеев А.В., Письменный В.Д. Импульсная генерация на самоограниченных переходах атома меди в парах галогенидов меди // Письма в ЖТФ. 1976. Т. 2, вып. 9. С. 417–420.
6. Губарев Ф.А., Федоров В.Ф., Федоров К.В., Евтушенко Г.С. Режим одиночных импульсов генерации CuBr-лазера // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 12. С. 1107–1111.
7. Федоров А.И., Федоров В.Ф., Шиянов Д.В. Исследование характеристик низкочастотного CuBr-лазера // Докл. V Всерос. конф. «Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине». Новосибирск, март, 2013. Новосибирск: Параллель, 2013. Т. 1. С. 263–265.
8. Федоров А.И., Шиянов Д.В. Оптимизация параметров излучения CuBr-лазера, работающего в режиме сдвоенных импульсов возбуждения // Докл. VI Всерос. конф. «Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине». Новосибирск, март, 2015. Новосибирск: Параллель, 2015. Т. 1. С. 257–261.
9. Федоров А.И., Шиянов Д.В. Возможности повышения эффективности CuBr-лазера в режиме сдвоенных импульсов накачки // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41, вып. 15. С. 98–104.
10. Федоров А.И., Федоров В.Ф., Димаки В.А. Возможности оперативного управления параметрами излучения CuBr-лазера // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 2. С. 198–202.
11. Федоров А.И., Шиянов Д.В. Оптимизация параметров излучения CuBr лазера со сдвоенными импульсами накачки: Тезисы докл. // Симпозиум «Лазеры на парах металлов». Лоо, сентябрь, 2014. Ростов н/Д: Диапазон-Плюс, 2014. С. 85.
12. Федоров А.И. ХеСl-лазер низкого давления с накачкой продольным разрядом // Квант. электрон. 2013. Т. 43, № 10. С. 898–902.
13. Андриенко А.С., Евтушенко Г.С., Жданев О.В., Суханов В.Б., Шиянов Д.В. Влияние добавок HBr в активную среду лазеров на парах меди и галогенида меди // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17, № 2–3. С. 112–118.

A.I. Fedorov, D.V. Shiyonov. Peculiarities of the obtaining of high efficiency of a CuBr laser with double-pulsed excitation.

A CuBr laser with a small active volume operating with a double-pulsed excitation and 50 Hz pulse repetition rate is studied. The possibilities of increasing efficiency of the laser by optimizing parameters of the excitation pulse and its agreement with the impedance of the plasma active medium formed by dissociating pulse is shown. It is shown that to improve the efficiency of the laser it is necessary to choose the optimal mode of energy input into the plasma. This is achieved by impedance matching of pump sources with the plasma, which was carried out by selection of the optimum voltage excitation pulse and the time delay with respect to the dissociating pulse. The maximum efficiency of 1.5% for the laser excitation pulse with time delay of 150 ms, and the specific energy of dissociating pulse of 26 мДж/см^3 , and the exciting pulse of 0.2 мДж/см^3 is obtained.