

02;04;09;15

Возможности повышения эффективности CuVr-лазера в режиме сдвоенных импульсов накачки

© А.И. Федоров¹, Д.В. Шиянов^{1,2}¹ Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск² Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: fedorov@asd.iao.ru

Поступило в Редакцию 24 февраля 2015 г.

Приведены результаты исследований для CuVr-лазера, работающего в режиме сдвоенных импульсов накачки с частотой повторения импульсов генерации 50 Нз. Рассмотрены возможности повышения эффективности лазера за счет оптимизации параметров импульса возбуждения и его согласованием с импедансом плазмы активной среды, образуемой диссоциирующим импульсом накачки. Показано, что за счет оптимизации и согласованного режима ввода энергии импульса возбуждения в плазму активной среды можно КПД лазера увеличивать в несколько раз. Получен максимальный КПД лазера 1.2% по энергии импульса возбуждения с энергией 0.2 мДж, средней мощностью 10 мВт и длительностью импульса излучения на полувысоте 30 нс при временной задержке 50 мкс. Максимальная средняя мощность излучения равнялась 18.5 мВт с энергией 0.37 мДж и КПД лазера 0.7% для удельной энергии диссоциирующего импульса 26 мДж/см³ и возбуждающего — 1.8 мДж/см³.

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 удается 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, подготовки и возбуждения активной

среды достигается при работе лазера с частотой следования импульсов накачки порядка десятков килогерц. Одним из недостатков данного режима накачки ЛППМ является низкая импульсная энергия излучения, что ограничивает их применения в некоторых областях науки и техники. Например, для задач технологического плана это зондирования параметров атмосферы и передачи сигналов в водной среде, где требуются высокие энергии и длинные импульсы излучения с низкой частотой их повторения. Такой режим генерации возможен при возбуждении активной среды CuBr-лазера сдвоенными импульсами накачки при наличии внешнего нагревателя газоразрядной трубки. 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 Hz была получена удельная энергия излучения $17 \mu\text{J}/\text{cm}^3$. Первый импульс накачки коммутировался тиратроном и использовался для диссоциации молекул CuCl, а второй импульс накачки осуществлялся разрядником с временной задержкой между импульсами от 120 до $200 \mu\text{s}$ для возбуждения паров атомов меди. В работе [5] авторами впервые была получена генерация в парах CuBr при частоте повторения 10 Hz и оптимальной временной задержке между импульсами накачки от 20 до $100 \mu\text{s}$, которая зависела от давления буферного газа гелия. Были получены импульсы генерации длительностью на полувывсоте 20 ns, с энергией 0.4 mJ и КПД, равным 0.3% по импульсу возбуждения. Авторами работы [6] проведены исследования условий получения и возбуждения паров CuBr при частоте повторения 50 Hz. Для малых удельных энергий диссоциирующего $1.4 \text{ mJ}/\text{cm}^3$ и возбуждающего $1.3 \text{ mJ}/\text{cm}^3$ импульса накачки и временной задержки $60 \mu\text{s}$ была получена энергия излучения 0.024 mJ. Таким образом, открытыми оставались вопросы, связанные с оптимальными условиями получения и возбуждения активной среды CuBr-лазера, — это удельная энергия, вкладываемая в диссоциирующий и возбуждающий импульс накачки, временные задержки между ними и соответственно КПД лазера.

В работе рассмотрены возможности повышения КПД лазера за счет оптимизации параметров импульсов накачки и согласования условий ввода энергии возбуждения в плазму активной среды. Исследования проводились на установке, которая состояла из газоразрядной трубки

(ГРТ), двух импульсных генераторов накачки, генератора временных задержек и системы регистрации параметров разряда и излучения. Конструкция ГРТ приведена в работе [7]. Лазерная трубка имела внутренний диаметр 1 см и активную длину 40 см с рабочим объемом 31.4 cm^3 , которая нагревалась от внешней печи. На холодных концах трубки были расположены внутренние электроды и выходные окна. Резонатор состоял из Al-зеркала и кварцевой пластины. К электродам прикладывались 2 импульса накачки, временная задержка (τ_d) между которыми могла изменяться от 25 до $250 \mu\text{s}$. Первый диссоциирующий импульс накачки обеспечивался высоковольтным источником на 20 kV с рабочей емкостью (C_d), которая могла изменяться от 3.4 до 11.5 nF. Он позволял вкладывать в разряд удельную энергию диссоциирующего импульса (E_d) от 3 до 26 mJ/cm^3 . Для возбуждения атомов меди использовался дополнительный высоковольтный источник питания на 10 kV с рабочей емкостью (C_p), которая могла изменяться от 1.1 до 9.4 nF. Он обеспечивал удельную энергию возбуждения (E_p) в активную среду от 2 до 12 mJ/cm^3 . Лазер работал с частотой повторения импульсов возбуждения 50 Hz. В качестве буферного газа использовался неон при давлении 25 Torr. В зависимости от величины рабочего напряжения на плазме и емкости источников диссоциирующего и возбуждающего импульса накачки можно было управлять вводом удельных энергий в активную среду CuVg-лазера. За счет генератора временных задержек регулировался ввод энергии импульса возбуждения в активную среду, тем самым обеспечивая частичное согласование импедансов источников 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. 1 приведены осциллограммы диссоциирующего импульса накачки (U, I) (a), возбуждающего импульса максимальной амплитуды и генерации (b), импульса возбуждения оптимальной амплитуды и генерации для согласованного режима ввода энергии возбуждения в плазму активной среды (c) для $C_d = 11.5 \text{ nF}$, $C_p = 1.1 \text{ nF}$ и $\tau_d = 150 \mu\text{s}$. Амплитуда напряжения диссоциирующего импульса накачки равнялась 10 kV. Ей соответствовала удельная энергия 18 mJ/cm^3 . Параметры излучения зависели в основном от величины амплитуды напряжения импульса воз-

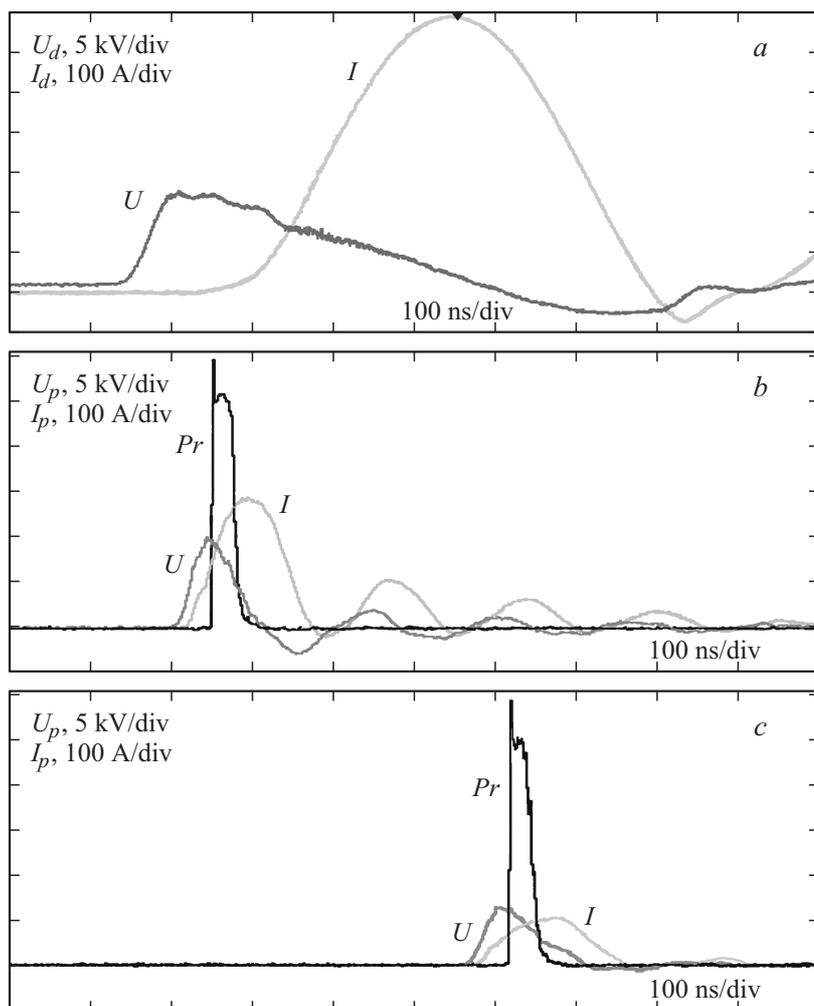


Рис. 1. Осциллограммы диссоциирующего импульса накачки (U, I) для $C_d = 11.5 \text{ nF}$ (a), возбуждающего импульса максимальной амплитуды и генерации (b), возбуждающего импульса оптимальной величины в режиме его согласованного ввода энергии импульса возбуждения в плазму активной среды и генерации (c) для $C_p = 1.1 \text{ nF}$ и $t_d = 150 \mu\text{s}$.

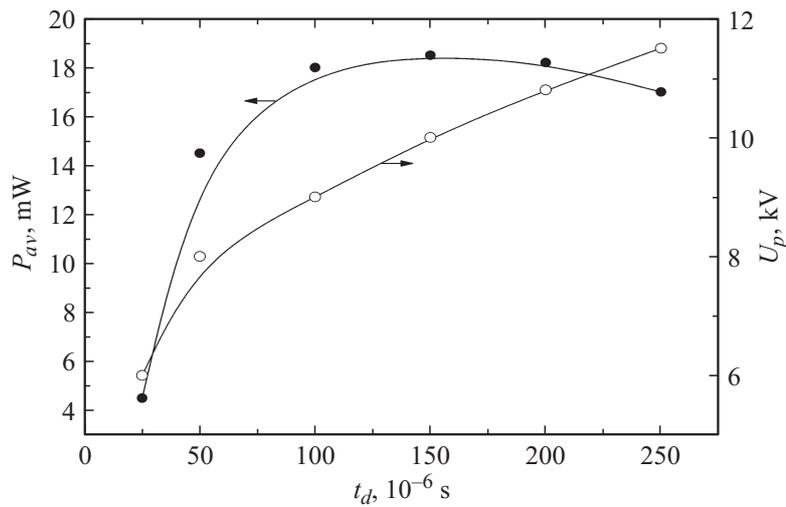


Рис. 2. Зависимости средней мощности излучения и максимальной амплитуды напряжения возбуждения от временной задержки между импульсами накачки для $C_p = 1.1 \text{ nF}$ и $C_d = 11.5 \text{ nF}$.

буждения, который равнялся 10 kV (*b*). Это средняя мощность 18.5 mW и энергия излучения 0.37 mJ . В данном случае КПД лазера по энергии возбуждения равнялся 0.7% с длительностью импульса генерации на полувысоте 30 ns . Эти параметры регистрировались в режиме несогласованного ввода энергии импульса возбуждения в плазму разряда, т.е. наблюдались затухающие колебания напряжения и тока большой амплитуды (*b*). Удельная энергия и мощность импульса возбуждения равнялись 1.8 mJ/cm^3 , 17 kW/cm^3 соответственно. Согласованный ввод энергии импульса возбуждения наблюдался при его оптимальной амплитуде напряжения на плазме, равной 6 kV , когда отсутствовали колебания напряжения и тока разряда (*c*). 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 равнялись 11 mW и 0.22 mJ при удельной энергии и мощности возбуждения 0.6 mJ/cm^3 , 3.5 kW/cm^3 соответственно. Следовательно, простое увеличение параметров импульса возбуждения может приводить к

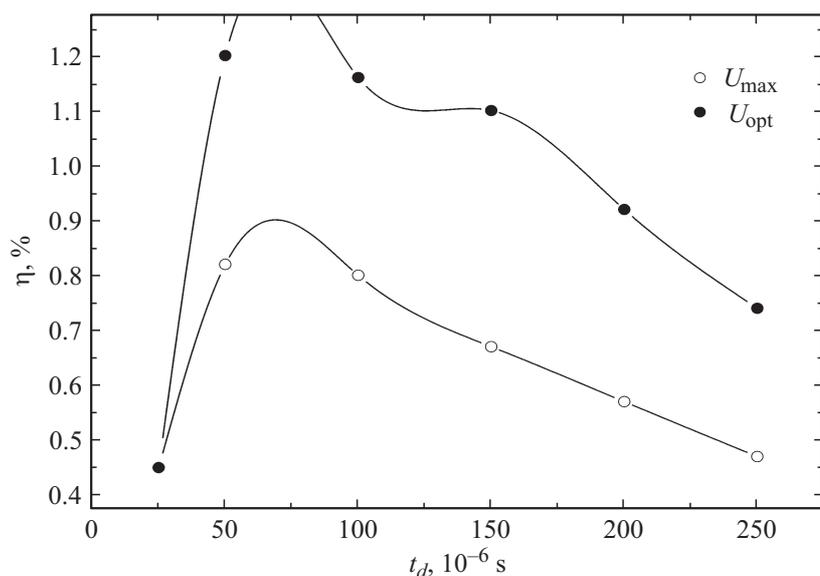


Рис. 3. Зависимости КПД лазера по энергии импульса возбуждения для максимальной и оптимальной его амплитуды напряжения на плазме и временной задержки между импульсами накачки для $E_d = 26 \text{ mJ/cm}^3$.

росту энергетике лазера до определенного предела, после которого она начинает падать. В этом случае КПД лазера был на много меньше, чем для согласованного режима ввода энергии в разряд. Этот вывод хорошо иллюстрируют экспериментальные результаты, приведенные на рис. 2, 3. Так, на рис. 2 даны зависимости средней мощности излучения и амплитуды максимального напряжения импульса возбуждения на плазме от временной задержки между импульсами накачки. Для малых временных задержек от 25 до 50 μs наблюдался резкий рост амплитуды напряжения на плазме, которое затем линейно нарастало с увеличением временной задержки. Максимальные параметры излучения регистрировались для временных задержек от 100 до 250 μs , хотя наибольший КПД лазера соответствовал временным задержкам от 50 до 150 μs (рис. 3) в зависимости от энергии импульса возбуждения для максимальной и оптимальной его амплитуды напряжения на плазме и величины временной задержки при $E_d = 26 \text{ mJ/cm}^3$. Для максимальной

амплитуды напряжения на плазме при оптимальной задержке от 50 до 100 μs 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 увеличивался до 1.2% при временной задержке 50 μs , а затем медленно спадал до 1.1% для временной задержки 150 μs . И далее КПД лазера уменьшался до величины, почти равной величине максимального значения КПД для несогласованного режима возбуждения. Это связано с тем, что с увеличением временной задержки КПД лазера уменьшался из-за рассогласования импедансов источников накачки и снижения концентрации атомов меди за счет рекомбинации.

Таким образом, нами показано, что для повышения КПД лазера необходим режим, который обеспечивал бы оптимальный ввод энергии импульса возбуждения в плазму активной среды. Он достигался согласованием импедансов источников накачки с плазмой, которое осуществлялось за счет выбора оптимального напряжения импульса возбуждения и временной его задержки относительно диссоциирующего импульса накачки. Получен максимальный КПД лазера 1.2% по импульсу возбуждения для временной задержки 50 μs при удельной энергии диссоциирующего импульса накачки 26 mJ/cm^3 и возбуждающего 0.6 mJ/cm^3 , которым соответствовала энергия 0.22 mJ и средняя мощность излучения 11 mW при длительности импульса генерации 30 ns .

Список литературы

- [1] Земсков К.И., Исаев А.А., Петраш Г.Г. // Квант. электрон. 1997. Т. 24. № 7. С. 596.
- [2] Петраш Г.Г. // Изв. 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. 544 с.
- [4] Chen C.J., Nerheim N.M., Russell G.R. // Appl. Phys. Lett. 1973. V. 23. N 29. P. 514.
- [5] Абросимов Г.В., Васильцов В.В., Волошин В.Н., Корнеев А.В., Письменный В.Д. // Письма в ЖТФ. 1976. Т. 2. В. 9. С. 417.
- [6] Губарев Ф.А., Федоров В.Ф., Федоров К.В. и др. // Опт. атм. и океана. 2012. Т. 25. № 12. С. 1107.
- [7] Федоров А.И., Федоров В.Ф., Димаки В.А. // Опт. атм. и океана. 2012. Т. 25. № 2. С. 198.