

02;04;09;15

CuBr-лазер с высоким КПД 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 27 сентября 2016 г.

Приведены результаты исследований характеристик CuBr-лазера, работающего в режиме сдвоенных импульсов накачки с частотой повторения импульсов генерации 50 Hz. Рассмотрены возможности повышения эффективности лазера за счет выбора оптимальных напряжений диссоциирующего и возбуждающего импульсов и их временной задержки. Показано, что за счет оптимизации и согласованного ввода энергии импульса возбуждения в плазму активной среды можно КПД лазера увеличить более чем в 2 раза. Получен максимальный КПД лазера 2.6% по импульсу возбуждения со средней мощностью 16 mW, энергией 0.32 mJ, длительностью импульса излучения на полувывоте 40 ns и временной задержкой 150 μ s. Максимальная средняя мощность излучения равнялась 37 mW с энергией 0.7 mJ и КПД лазера 0.7% для удельной энергии диссоциирующего 24 mJ/cm³ и возбуждающего 2.7 mJ/cm³ импульсов накачки.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.05.44356.16501

В лазерах на парах галогенидов металлов (ЛПГМ) удастся реализовать более высокие параметры генерации [1], чем в лазерах на парах чистых металлов [2,3]. Основные исследования проводятся в лазерах на парах меди или бромиде меди [1]. В основном ЛПГМ работают в режиме регулярных импульсов накачки с частотой повторения порядка десятков килогерц, в которых энергия разряда используется как для создания активной среды, так и для ее возбуждения. При этом импульсная энергия излучения оказывается низкой, что ограничивает использование этого режима в задачах технологического плана, где требуются высокие энергии излучения с частотой повторения десятки и сотни герц. Данный режим генерации возможен при возбуждении

активной среды CuVr-лазера сдвоенными импульсами накачки при наличии внешнего нагревателя газоразрядной трубки [4].

Впервые метод сдвоенных импульсов накачки был применен авторами работы [5] 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, второй импульс накачки формировался разрядником с временной задержкой между импульсами от 120 до $200 \mu\text{s}$ для возбуждения паров атомов меди. В работе [6] авторами впервые была получена генерация в парах CuVr 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 полувывоте 20 ns с энергией 0.4 mJ и КПД, равным 0.3% по импульсу возбуждения. Нами в работе [4] были проведены исследования условий получения и возбуждения паров CuVr при частоте повторения 50 Hz. Была показана возможность повышения эффективности лазера в несколько раз за счет оптимизации параметров импульса возбуждения и его согласования с импедансом плазмы активной среды, образуемой диссоциирующим импульсом накачки. Был получен максимальный КПД лазера 1.2% по импульсу возбуждения с энергией 0.2 mJ, средней мощностью 10 mW и длительностью импульса излучения на полувывоте 30 ns для временной задержки $50 \mu\text{s}$. Таким образом, оставался открытым вопрос о возможности дальнейшего повышения КПД лазера за счет оптимизации параметров диссоциирующего и возбуждающего импульсов накачки и их временной задержки.

В работе рассмотрена возможность повышения энергетических характеристик и КПД лазера за счет оптимизации параметров импульсов накачки в режиме согласованного ввода энергии возбуждения в плазму активной среды. Исследования проводились на установке, описанной в работе [7], которая состояла из газоразрядной трубки (ГРТ), двух импульсных генераторов накачки, генератора временных задержек и системы регистрации параметров разряда и генерации излучения. Конструкция ГРТ приведена в работе [8]. Лазерная трубка имела внутренний диаметр 1 cm и активную длину 40 cm с рабочим объемом 31.4 cm^3 , которая нагревалась от внешней печи. На холодных концах трубки были расположены внутренние электроды и выходные окна. Резонатор состо-

ял из Al-зеркала и кварцевой пластины. К электродам прикладывались два импульса накачки, временная задержка (τ_d) между которыми была оптимальной и равнялась $150 \mu\text{s}$. Первый диссоциирующий импульс накачки обеспечивался высоковольтным источником на 20 kV с рабочей емкостью (C_d), которая могла изменяться от 1.1 до 11.5 nF . Он позволял вкладывать в разряд удельную энергию диссоциирующего импульса (E_d) от 2.7 до 24 mJ/cm^3 . Для возбуждения атомов меди использовался дополнительный высоковольтный источник питания на 15 kV с рабочей емкостью (C_p), равной 1 nF . Он обеспечивал удельную энергию возбуждения (E_p) в активной среде от 0.4 до 3.6 mJ/cm^3 и мощность возбуждения (W_p) от 2 до 17 kW/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 импульсов накачки можно было управлять вводом удельных энергий в активную среду CuBr-лазера. За счет генератора временных задержек достигалось оптимальное время ввода 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 увеличение удельной энергии или мощности импульса возбуждения влияет на рост энергии или мощности излучения при уменьшении КПД лазера из-за рассогласования импедансов источников накачки [4]. Максимальный КПД лазера соответствовал режиму согласованного ввода энергии возбуждения в плазму активной среды, которая определялась параметрами диссоциирующего импульса накачки. Поэтому нами была проведена оптимизация параметров источников диссоциирующих и возбуждающих импульсов накачки, обеспечивающих как образование плазмы активной среды, так и ее возбуждение.

На рис. 1 приведены зависимости напряжения на плазме и удельной энергии импульса накачки для создания активной среды CuBr-лазера от величины рабочей емкости диссоциирующего источника питания. Оказалось, что он обеспечивал максимальное напряжение на плазме 16 kV для рабочих емкостей от 1 до 4 nF . Затем напряжение на плазме линейно спадало до 11 kV с ростом емкости до 11.5 nF . При этом удельная энергия накачки линейно росла до 24 mJ/cm^3 при изменении

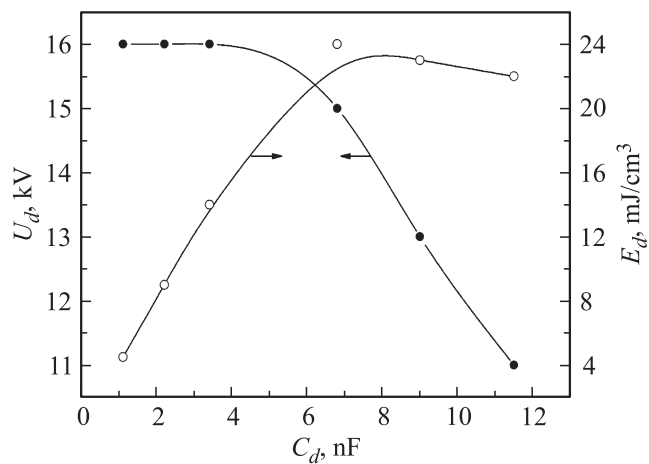


Рис. 1. Зависимости напряжения на плазме и удельной энергии накачки для создания активной среды CuBr-лазера от величины рабочей емкости диссоциирующего источника питания.

емкости от 1 до 6.8 нФ, а далее медленно спадала до 22 мДж/см³ при увеличении емкости до 11.5 нФ. Нами в работе [7] было показано, что для максимального КПД лазера 1.5% оптимальной являлась задержка между импульсами накачки 150 мкс. Поэтому эта временная задержка нами использовалась в последующих экспериментах.

На рис. 2 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 источника импульса возбуждения. Средняя мощность излучения резко возрастала для максимального напряжения возбуждения 15 кВ с увеличением диссоциирующей емкости до 6.8 нФ и соответствовала 37 мВт, а затем она медленно уменьшалась до 35 мВт при $C_d = 11.5$ нФ. Для КПД лазера наблюдалась 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 предложен в [4]. Этот режим нами наблюдался при более низких напряжениях на плазме активной среды. Оказалось, что оптимальным напряжением

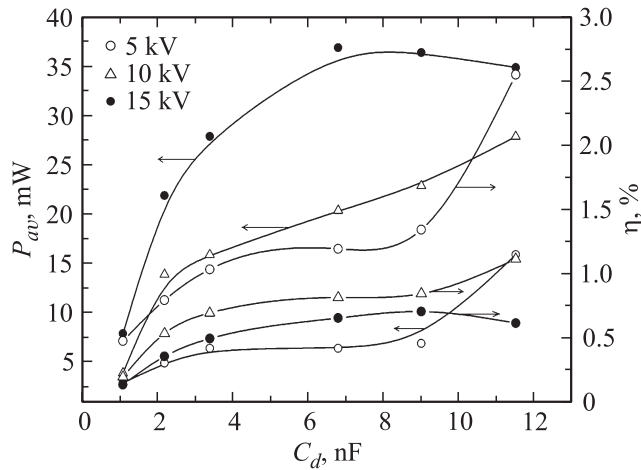


Рис. 2. Зависимости средней мощности излучения и КПД лазера от величины рабочей емкости диссоциирующего источника питания и напряжения импульса возбуждения на плазме активной среды для $C_p = 1$ нФ и $\tau_d = 150$ мкс.

на плазме является величина 5 кВ. Зависимости средней мощности излучения и КПД лазера в случае согласованного режима отличались от этих зависимостей для режима максимального напряжения на плазме 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 емкости до 9 нФ. Она резко возрастала до 16 мВт с ростом емкости, которая увеличивалась до 11.5 нФ. Аналогичная картина наблюдалась для КПД лазера, который был также максимальным для емкости 11.5 нФ и равнялся 2.6%. Этот факт говорит о том, что оптимальные условия образования плазмы активной среды наблюдались при емкости 11.5 нФ с удельной энергией диссоциирующего импульса накачки, равного 22 мДж/см^3 . При напряжении возбуждения 10 кВ наблюдались наиболее оптимальные параметры излучения. Это средняя мощность излучения 28 мВт, энергия излучения 0.56 мДж с КПД лазера 1.1%. Таким образом, за счет оптимального напряжения согласованного режима возбуждения 5 кВ, $E_p = 0.4 \text{ мДж/см}^3$ и $W_p = 2 \text{ кВт/см}^3$ нами был получен максимальный КПД лазера 2.6%

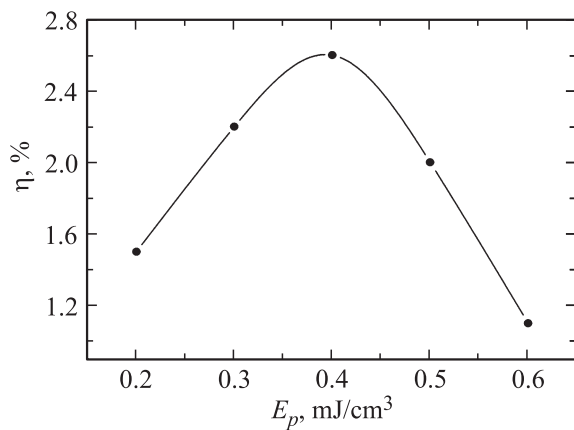


Рис. 3. Зависимость КПД лазера от удельной энергии импульса возбуждения в режиме согласованного ввода ее в плазму активной среды для $C_d = 11.5 \text{ нФ}$, $C_p = 1 \text{ нФ}$ и $\tau_d = 150 \text{ мкс}$.

со средней мощностью излучения 16 мВт , энергией излучения 0.32 мДж при длительности импульса генерации на полувысоте 40 нс . Для максимального напряжения возбуждения на плазме 15 кВ , $E_p = 2.7 \text{ мДж/см}^3$ и $W_p = 17 \text{ кВт/см}^3$ средняя мощность излучения равнялась 37 мВт , энергия излучения 0.7 мДж и КПД лазера 0.7% при длительности импульса генерации 40 нс . Для напряжения возбуждения 10 кВ , $E_p = 1.6 \text{ мДж/см}^3$ и $W_p = 8 \text{ кВт/см}^3$ средняя мощность 28 мВт , энергия излучения 0.56 мДж и КПД лазера 1.1% при длительности импульса генерации 30 нс . Нами было обнаружено, что максимальный КПД лазера наблюдался при минимальных энергиях импульса возбуждения.

На рис. 3 приведена оптимальная зависимость КПД лазера от удельной энергии возбуждения в режиме согласованного ввода ее в плазму активной среды. Для минимальной энергии возбуждения 0.2 мДж/см^3 и напряжении на плазме 3 кВ КПД равнялся 1.5% , а для максимальной энергии возбуждения 0.6 мДж/см^3 и напряжении 6 кВ он равнялся 1.1% . Максимальный КПД лазера 2.6% наблюдался при оптимальной удельной энергии возбуждения 0.4 мДж/см^3 .

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 и 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.

Список литературы

- [1] Батенин В.М., Бучанов В.В., Казарян М.А. и др. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. М.: Научная книга, 1998.
- [2] Земсков К.И., Исаев А.А., Петраш Г.Г. // Квант. электроника. 1997. Т. 24. № 7. С. 596.
- [3] Петраш Г.Г. // Изв. вузов. Физика. 1999. № 8. С. 18.
- [4] Федоров А.И., Шиянов Д.В. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 15. С. 98.
- [5] Chen C.J., Nerheim N.M., Russell G.R. // Appl. Phys. Lett. 1973. V. 23. N 29. P. 514.
- [6] Абросимов Г.В., Васильцов В.В., Волошин В.Н. и др. // Письма в ЖТФ. 1976. Т. 2. В. 9. С. 417.
- [7] Федоров А.И., Шиянов Д.В. // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 11. С. 1035.
- [8] Федоров А.И., Федоров В.Ф., Димаки В.А. // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 2. С. 198.