

УДК 535:621.373.826:539.25

Эффективный метод увеличения длительности импульса излучения электроразрядного KrF-лазера

Ю. А. Железнов, Р. Р. Хасая, Ю. В. Хомич, В. А. Ямщиков

Исследована возможность увеличения длительности генерации эксимерного KrF-лазера за счет использования режима накачки активной среды с периодически затухающим напряжением на разрядном промежутке. Для KrF-лазера с максимальной выходной энергией до 30 мДж диапазон изменения длительности импульсов излучения составил 16—45 нс.

PACS: 42.60.Rn

Ключевые слова: эксимерные лазеры, длительность лазерного импульса, энергия излучения, высоковольтный генератор накачки.

Введение

Электроразрядные эксимерные лазеры широко применяются в промышленности, медицине, микроэлектронике, научных исследованиях и технологиях. Эти лазеры способствуют развитию новых методов микрообработки материалов, включая модификацию рельефа и свойств поверхностей методом прямого лазерного наноструктурирования [1—8].

В настоящее время большое внимание уделяется улучшению характеристик выходного пучка и продлению срока службы оптических элементов лазерной установки, что требует решения ряда проблем. С одной стороны, это сравнительно низкая монохроматичность и высокая расходимость оптического пучка эксимерных лазеров, обусловленная коротким временем существования инверсной населенности (≈ 10 нс). С другой стороны, под воздействием мощного УФ- и ВУФ-излучения возникает эффект уплотнения вещества оптических деталей установки, который проявляется наиболее сильно в ArF- и F₂-лазерах. Из-за этого изменяется показатель преломления оптических материалов (плавленый кварц, флюорит кальция) и происходит деградация зеркал резонатора и проецирующих оптических элементов, через которые проходит лазерный пучок.

При решении указанных проблем используется метод увеличения длительности импульса лазерного излучения [9—11]. Он позволяет повысить число проходов излучения по резонатору, что улучшает пространственную когерентность пучка и сужает ширину спектра излучения. Одновременно в результате увеличения длительности излучения снижается пиковая интенсивность пучка и ослабляется негативное влияние эффекта уплотнения вещества.

Для получения затянутого во времени лазерного импульса в [16, 17] была предложена электрическая схема генератора накачки (ГН) с магнитными звеньями сжатия высоковольтных импульсов, состоящими из сосредоточенных емкостей и насыщающихся дросселей. В этом случае число последовательных звеньев сжатия должно обеспечивать оптимально высокие амплитуду и скорость нарастания напряжения на разрядном промежутке (РП), а длительность и мощность накачки определяются скоростью энерговклада в активную среду из двух последних звеньев ГН.

Однако наличие магнитных элементов приводит к возрастанию веса и габаритов всей лазерной установки. Поэтому для увеличения длительности импульса излучения нами был впервые предложен другой метод, основанный на использовании режима накачки с периодически затухающим напряжением на разрядном промежутке [18, 19]. В настоящей работе приводятся результаты исследования этого метода на примере импульсно-периодического электроразрядного KrF-лазера.

Описание установки и результаты экспериментов

Эксперименты проводились на базе мощного импульсно-периодического KrF-лазера серии CL7000 [20]. Он имел традиционную систему воз-

Железнов Юрий Анатольевич, заведующий лабораторией.
Хасая Радмир Рюрикович, младший научный сотрудник.
Хомич Юрий Владиславович, инженер-исследователь.
Ямщиков Владимир Александрович, заведующий лабораторией.
Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.
191186, г. Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 18.
Тел. 8 (499) 135-11-95. E-mail: yamschikov52@mail.ru

Статья поступила в редакцию 9 апреля 2015 г.

© Железнов Ю. А., Хасая Р. Р., Хомич Ю. В., Ямщиков В. А., 2015

буждения с искровой предварительной ионизацией активной среды. Для накачки лазера служила схема СС-генератора с накопительной емкостью $C_1 = 14$ нФ и обостряющей емкостью $C_2 = 8$ нФ. Эти емкости перезаряжались при коммутации тиратрона ТГИ-1000/25. Активный объем РП составлял $V = d \times w \times l \approx 40$ см³ (где $d = 1,4$ см, $w \approx 0,4$ см, $l \approx 70$ см). Резонатор был образован глухим зеркалом с коэффициентом отражения 98 % и выходным окном с коэффициентом отражения 22 %. Длина резонатора составляла 140 см.

В экспериментах применялся не чистый газ F_2 , а премикс F_2/Ne с 5 % концентрацией F_2 . Поэтому указанное во всех исследуемых смесях $F_2/Kr/Ne$ давление F_2 , реально, является давлением этого премикса, а не F_2 . На рис. 1 представлены характерные осциллограммы импульсов напряжения на РП (1) и лазерного излучения (2) на смеси $F_2/Kr/Ne = 20/20/1900$ мбар. Зарядное напряжение в накопительном конденсаторе C_1 составляло величину $U_1 = 15$ кВ. Видно, что форма напряжения имеет вид затухающей синусоиды. При этом первый и второй периоды колебания имеют сопоставимые амплитуды. В свою очередь, профиль импульса излучения модулирован в соответствии с колебаниями напряжения и имеет несколько максимумов.

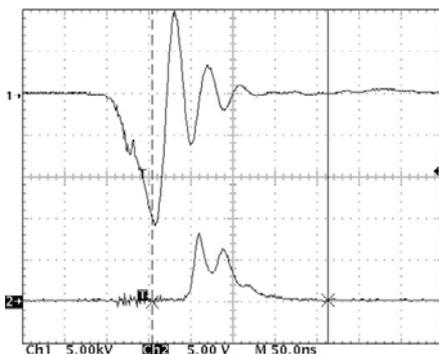


Рис. 1. Осциллограммы импульсов напряжения на разрядном промежутке (1) и лазерного излучения на длине волны 248 нм (2)

Важно отметить, что режим накачки с периодически затухающим напряжением на разрядном промежутке может быть реализован в режиме значительного перенапряжения, при котором напряжение U , подаваемое на РП, существенно превышает удвоенное напряжение U_{qs} квазистационарного горения разряда [14—16]. Поскольку величина U_{qs} зависит от состава и давления газовой смеси, то появляется возможность управлять числом затухающих полупериодов напряжения за счет изменения U и U_{qs} и, тем самым, варьировать форму и длительность импульсов излучения. При этом, конечно, не следует допускать существенного снижения уровня выходной энергии. В настоящих экспериментах число максимумов на временном профиле излучения изменялось в пределах 1—3 в зависимости от величины перенапряжения. В отдельных случаях их амплитуды отличались несущественно.

Величиной, характеризующей длительность лазерного излучения, является длительность импульсов T , измеряемая по полувысоте их амплитуды. Экспериментальные зависимости T от давления криптона p_{Kr} при давлениях фтора $p_{F_2} = 20, 30$ и 40 мбар, а также фиксированном $U_1 = 15$ кВ и полном давлении $p = 2500$ мбар смеси $F_2/Kr/Ne$ показаны на рис. 2. Для этих же условий на рис. 2 представлены зависимости выходной энергии лазера W от p_{Kr} . Нарастание T обусловлено ростом второго максимума у профиля лазерного импульса. На падающем участке T первый максимум профиля излучения начинает резко обгонять рост второго. Из рис. 2 следует, что данные условия не оптимальны, т.к. максимумы T наблюдаются при более низких концентрациях p_{Kr} и p_{F_2} , чем те, которые соответствуют максимальным значениям W . При $p_{F_2} = 20$ мбар резко снижается энергия генерации.

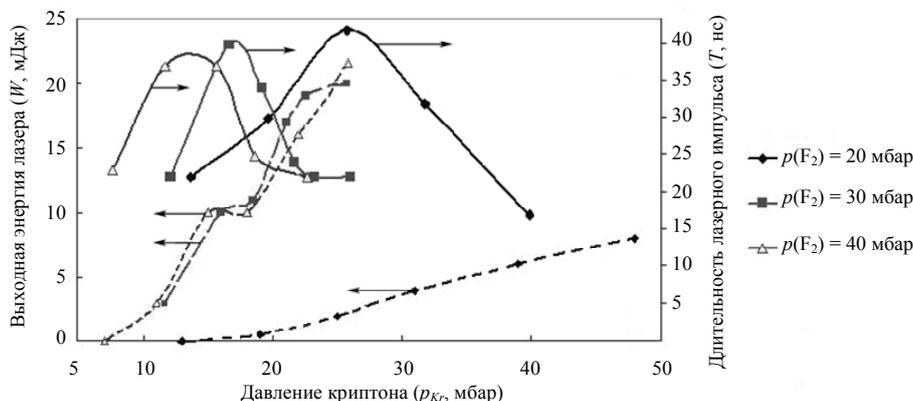


Рис. 2. Экспериментальные зависимости длительности лазерных импульсов T и выходной энергии лазера W от давления криптона p_{Kr} при разных значениях давления фтора p_{F_2} и фиксированных напряжениях $U_1 = 15$ кВ и давлении $p = 2500$ мбар

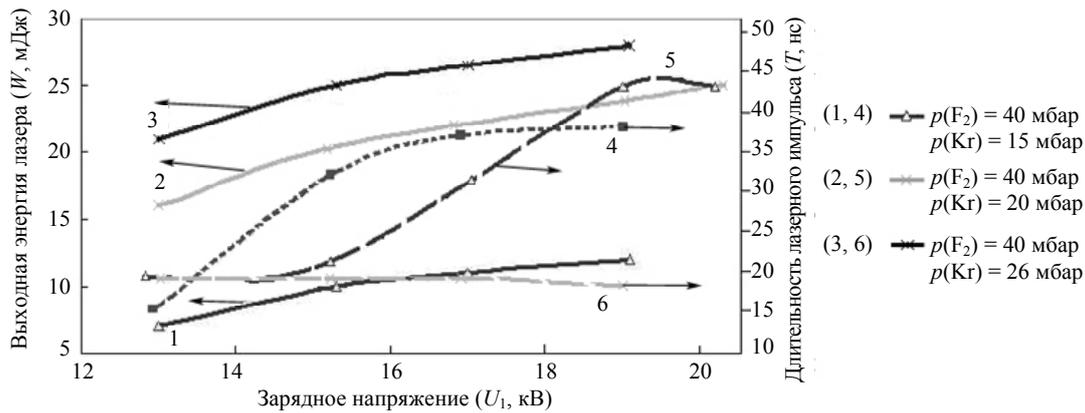


Рис. 3. Экспериментальные зависимости длительности лазерных импульсов T и выходной энергии лазера W от зарядного напряжения U_1 при разных давлениях p_{Kr} и p_{F_2}

Экспериментальные зависимости T и W от U_1 при различных значениях p_{Kr} и p_{F_2} представлены на рис. 3. При некоторых давлениях p_{Kr} и p_{F_2} (кривые 1 и 4) наблюдается увеличение T и W с ростом U_1 . Оно обусловлено ростом сначала второго, а затем третьего максимумов излучения. Наибольшие значения W достигаются при повышенных порциях F_2 и Kr (кривая 3), но T при этом (кривая 6) мало или почти не зависит от U_1 . Это происходит из-за того, что форма импульса напряжения становится аperiodической, а профиль излучения приобретает типичный вид одиночного импульса с небольшими колебаниями на хвосте.

В рассмотренных условиях накачки KrF -лазера оптимальной для увеличения длительности излучения оказалась смесь $F_2/Kr/Ne = 40/20/2500$ (кривые 2 и 5), на которой наибольшие значения T и W достигались при максимальном U_1 .

Заключение

В представленной работе исследован метод увеличения длительности генерации эксимерного KrF -лазера за счет использования режима накачки с периодически затухающим напряжением на разрядном промежутке, для реализации которого необходимо, чтобы выходное напряжение генератора U существенно превышало значение удвоенного напряжения U_{qs} квазистационарного горения разряда.

Получены экспериментальные зависимости энергии и длительности лазерного излучения от напряжения накачки, состава и давления газовых смесей в разрядном промежутке. Показано, что этот метод позволяет достаточно эффективно изменять длительность лазерных импульсов, не приводя к существенным потерям выходной энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лапшин К. Э., Обидин А. З., Токарев В. Н. и др. // Российские нанотехнологии. 2007. Т. 2. № 11–12. С. 50.
2. Токарев В. Н., Хомич В. Ю., Шмаков В. А. и др. // Физика и химия обработки материалов. 2008. № 4. С. 15.
3. Токарев В. Н., Хомич В. Ю., Шмаков В. А. и др. // Доклады Академии наук. 2008. Т. 419. № 6. С. 754.
4. Лапшин К. Э., Обидин А. З., Токарев В. Н. и др. // Физика и химия обработки материалов. 2008. № 1. С. 43.
5. Tokarev V. N., Shmakov V. A., Khomich V. Yu., et al. // Proc. 29th Intern. Congress on Applications of Lasers and Electrooptics (September 26–30, 2010, Anaheim, USA). P. 1257.
6. Миколуцкий С. И., Хомич В. Ю., Шмаков В. А. и др. // Российские нанотехнологии. 2011. Т. 6. № 11–12. С. 65.
7. Khomich V. Yu., Urlichich Yu. M., Shmakov V. A., et al. // Inorganic Materials: Applied Research. 2013. V. 4. No. 3. P. 201.
8. Миколуцкий С. И., Токарев В. Н., Хомич В. Ю. и др. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 5. С. 548.
9. Hofman T., Johanson B. and Das P. // Proc. SPIE. 2000. V. 4000. P. 511.
10. Saito T., Matsunaga T., Mitsuhashi K.-I., et al. // Proc. SPIE. 2001. V. 4346. P. 1229.
11. Hidenori Watanabe, Naoki Kitatochi, Kouji Kakizaki, et al. // Proc. SPIE. 2001. V. 4346. P. 1074.
12. Atejev V. V., Vartapetov S. K., Zhukov A. N., et al. // Quantum Electronics. 2003. V. 33. No. 8. P. 677.
13. Atejev V. V., Vartapetov S. K., Zhukov A. N., et al. // Proc. SPIE. 2004. V. 5479. P. 123.
14. Вартанетов С. К., Жигалкин А. А., Лапшин К. Э. и др. // Квантовая электроника. 2006. Т. 36. № 5. С. 393.
15. Месяц Г. А., Осипов В. В., Тарасенко В. Ф. Импульсные газовые лазеры. — М.: Наука, 1991.
16. Vartapetov S. K., Gryaznov O. V., Malashin M. V., et al. // Quantum Electronics. 2009. V. 39 (8), P. 714.
17. Moshkunov S. I., Khomich V. Yu., Yamshchikov V. A. // Quantum Electronics. 2011. V. 41. No. 4. P. 366.
18. Khasaya R. R., Malashin M. V., Khomich V. Yu., et al. // Proc. ILLA<L 2009. P. 205 (2010).
19. Shershunova E. A., Malashin M. V., Moshkunov S. I., et al. // Proc. SPIE. 2013. V. 87700C. P. 78.
20. <http://www.optosystems.ru/>

Effective approach for increasing the duration of KrF laser radiation

Yu. A. Zheleznov, R. R. Khasaya, Yu. V. Khomich, and V. A. Yamshchikov

Institute for Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences
18 Dvortsovaya naberejnaya, Saint-Petersburg, 191186, Russia
E-mail: yamshchikov52@mail.ru

Received April 9, 2015

Consideration is given to a possibility of increasing the excimer laser generation time through the use of pumping mode of the active medium with periodically voltage relaxation applied on the discharge gap. For KrF laser with a maximum output energy up to 40 mJ, radiation duration variable within $t = 16\text{--}45$ ns were obtained.

PACS: 42.60.Rn

Keywords: excimer lasers, elongation pulse duration, laser radiation energy, high voltage pump generator.

REFERENCES

1. K. E. Lapshin, A. Z. Obidin, V. N. Tokarev, et al., *Ross. Nanotechnol.* **2** (11–12), 50 (2007).
2. V. N. Tokarev, V. Yu. Khomich, V. A. Shmakov, et al., *Fizika Khimiya Obrabot. Material.*, No. 4, 15 (2008).
3. V. N. Tokarev, V. Yu. Khomich, V. A. Shmakov, et al., *Dokl. Ross. Akad. Nauk* **419**, 754 (2008).
4. K. E. Lapshin, A. Z. Obidin, V. N. Tokarev, et al., *Fizika Khimiya Obrabot. Material.*, No. 1, 43 (2008).
5. V. N. Tokarev, V. A. Shmakov, V. Yu. Khomich, et al., in *Proc. 29th Intern. Congress on Applications of Lasers and Electrooptics* (September 26–30, 2010, Anaheim, USA). P. 1257.
6. S. I. Mikolutskii, V. Yu. Khomich, V. A. Shmakov, et al., *Ross. Nanotechnol.* **6** (11–12), 65 (2011).
7. V. Yu. Khomich, Yu. M. Urlichich, V. A. Shmakov, et al., *Inorganic Materials: Applied Research.* **4**, 201 (2013).
8. S. I. Mikolutskii, V. N. Tokarev, V. Yu. Khomich, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **1**, 548 (2013).
9. T. Hofman, B. Johanson and P. Das, *Proc. SPIE* **4000**, 511 (2000).
10. T. Saito, T. Matsunaga, K.-I. Mitsuhashi, et al., *Proc. SPIE* **4346**, 1229 (2001).
11. Hidenori Watanabe, Naoki Kitatochi, Kouji Kakizaki, et al., *Proc. SPIE* **4346**, 1074 (2001).
12. V. V. Atejev, S. K. Vartapetov, A. N. Zhukov, et al., *Quantum Electronics* **33**, 677 (2003).
13. V. V. Atejev, S. K. Vartapetov, A. N. Zhukov, et al., *Proc. SPIE* **5479**, 123 (2004).
14. S. K. Vartapetov, A. A. Zhigalkin, K. E. Lapshin, et al., *Quantum Electronics* **36**, 393 (2006).
15. G. A. Mesyats, V. V. Osipov, and V. F. Tarasenko, *Pulse Gas Lasers* (Nauka, Moscow, 1991) [in Russian].
16. S. K. Vartapetov, O. V. Gryaznov, M. V. Malashin, et al., *Quantum Electronics* **39** (8), 714 (2009).
17. S. I. Moshkunov, V. Yu. Khomich, and V. A. Yamshchikov, *Quantum Electronics* **41**, 366 (2011).
18. R. R. Khasaya, M. V. Malashin, V. Yu. Khomich, et al., *Proc. ILLA<L 2009*. P. 205 (2010).
19. E. A. Shershunova, M. V. Malashin, S. I. Moshkunov, et al., *Proc. SPIE* **87700C**, 78 (2013).
20. <http://www.optosystems.ru/>