

ЭКСИМЕРНЫЕ ЛАЗЕРЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОТОКОВ

Представлены результаты разработки двухимпульсных эксимерных лазеров, предназначенных для диагностики динамических параметров высокоскоростных аэродинамических потоков. Приведены схемы накачки и характеристики двух типов лазеров: 1 – лазера, генерирующего два импульса длительностью 4–5 нс с интервалом между ними от 1 мкс до 1 мс, 2 – малогабаритного импульсно-периодического лазера, обеспечивающего генерацию парных импульсов с частотой повторения до 100 Гц.

Для решения многих задач, связанных с изучением и использованием импульсных, нестационарных и турбулентных потоков, необходимо количественное определение мгновенного распределения скоростей во всем поле течения. В последнее время для этих целей все шире применяются методы трековой анемометрии: PIV (particle image velocimetry) и PTV (particle tracking velocimetry) диагностики. Суть этих методов заключается в измерении смещения движущейся оптической неоднородности (например, светорассеивающей частицы) на двух (или нескольких) последовательных изображениях потока, полученных через известные (заданные) промежутки времени.

Основная задача, возникающая при использовании этих методов для диагностики динамических параметров высокоскоростных ($V \sim 10^2 - 10^3$ м/с) потоков, связана с разработкой мощных источников света, генерирующих серию импульсов (минимум два) длительностью $10^{-9} - 10^{-8}$ с, интервалы между которыми задаются с высокой точностью и изменяются в диапазоне от 0,1 мкс до 1 мс. Известны работы, где в качестве источников света используются два синхронно работающих твердотельных лазера с модуляцией добротности. Это рубиновые лазеры с длительностью импульса 25 нс, интервалы между которыми изменяются от 1 мкс до 10 с [1], или Nd:YAG-лазеры, работающие на длине волны 532 нм с длительностью импульса 4–6 нс и интервалами менее 1 мкс [2]. В ИТПМ СО РАН для этой цели разработан стробоскопический источник света на основе рубинового лазера, генерирующий серии от 1 до 30 импульсов длительностью ~ 30 нс, интервалы между которыми задаются в пределах от 5 до 500 мкс через 1 мкс [3, 4].

Как правило, в методах трековой анемометрии исследуемая область течения освещается плоским лазерным лучом (лазерный нож) и регистрируется излучение, рассеянное на неоднородностях потока. Поскольку сечение рассеяния существенно возрастает с уменьшением длины волны зондирующего пучка, то желательно использовать для этих целей коротковолновую область оптического спектра.

В этом плане несомненный интерес представляют импульсные эксимерные лазеры, позволяющие по-

лучать импульсы генерации длительностью 4–20 нс в УФ-диапазоне. При этом значительно возрастают сечение рассеяния, чувствительность фотоматериалов и фотоприемников, облегчаются условия выделения полезного излучения на фоне паразитных засветок. И что важно, появляется возможность реализации методов ЛИФ. Кроме того, малая длина когерентности и малая длительность излучения позволяют получать высококачественные теневые изображения особенностей аэродинамических течений (акустические и УВ, области сжатия и разрежения, фронты пламени и другие неоднородности прозрачной среды, положение частиц в пространстве и т.д.) [5].

В настоящее время для исследования динамических параметров аэродинамических течений эксимерные лазеры практически не применяются. Это связано как с отсутствием доступных, простых и дешевых приборов этого класса, так и с ограниченным диапазоном их работы в основном по частоте следования импульсов.

В данной статье приведены результаты разработки двухимпульсного источника УФ-излучения на основе эксимерного лазера с двумя активными объемами, возбуждаемыми одним импульсом тока [6]. Особое место в работе уделяется реализации простых систем накачки. Приводятся также результаты разработки малогабаритного импульсно-периодического лазера с высокой частотой следования парных импульсов.

1. Двухимпульсный эксимерный лазер

Основное назначение этого лазера – получение двух импульсов с регулируемой задержкой в широком интервале времени. Для создания такой установки использована электродная конфигурация лазера с двумя активными объемами, в котором добавлен обратный токопровод, подсоединенный к промежуточной пластине [7]. К полученным двум парам электродов подсоединены две независимые системы накачки. Схема источника питания лазера приведена на рис. 1, а его внешний вид – на рис. 2,а. В верхней части установки расположены излучатели, в нижней –

две системы возбуждения. Габаритные размеры демонстрируются масштабом 10 см на штангенциркуле.

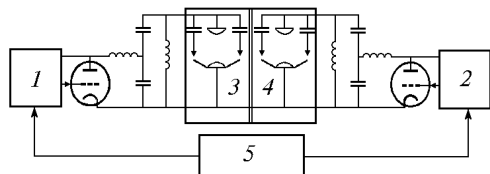


Рис. 1. Схема источника питания двухимпульсного лазера: 1, 2 – схема импульсной зарядки накопителя ГИН; 3, 4 – лазеры; 5 – генератор пусковых импульсов

Накачка двух активных сред лазера производится генераторами импульсного напряжения (ГИН) на основе LC инверторов с коммутацией тиратронами. Энергия ГИН каждого лазера – 4 Дж при напряжении питания 16 кВ. Управление ГИН производится при помощи тиристоров и требует сложных пусковых генераторов. Задержка запуска одного ГИН относительно другого устанавливается в пределах от 1 до 1000 мкс.

Реализованы два режима работы двухимпульсного эксимерного лазера. В первом – каждый объем активной среды помещался в отдельный резонатор. Сведение пучков осуществлялось при помощи зеркал, что приводило к значительным потерям излучения. Результаты исследования генерационных характеристик эксимерных лазеров на различных газах в первом режиме приводятся в табл. 1. Нестабильность временных интервалов между импульсами генерации – $\pm 0,5$ мкс, что связано в основном с разбросом времени срабатывания разрядников.

Таблица 1

Молекула	KrF	XeCl	N ₂
Длина волны, нм	248	308	337
Энергия, мДж	20	15	5
Длительность импульса, нс	5	4	4

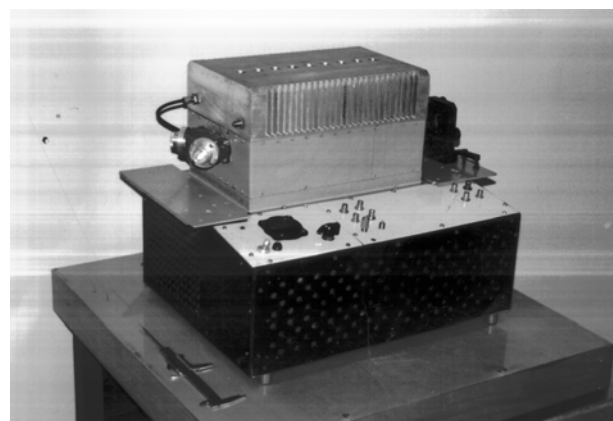
Во втором режиме – два активных объема заключены в общий резонатор. При этом обеспечивается строгое совмещение направления излучения лазеров без применения дополнительных оптических элементов. Предварительные исследования работы лазера во втором режиме показали, что уровень энергии генерации существенно снижается. По-видимому, это связано с увеличением длины резонатора в 2 раза и времени формирования импульса генерации, которое становится сравнимым со временем существования инверсии в активной среде. Отсюда следует необходимость увеличения времени существования инверсии.

2. Малогабаритный импульсно-периодический лазер с высокой частотой следования импульсов

Основное назначение лазера – исследование динамических параметров нестационарных потоков.

Для этого необходимо обеспечить работу лазера, генерирующего с высокой частотой пары импульсов.

Отметим, что эксимерные лазеры могут работать на частотах от 100 Гц (коммерческие лазеры) до 2,5–3 кГц (специальные установки [8]). Известны также эксперименты по генерации парных импульсов с одной активной среды эксимерного лазера [9]. При этом генерация второго импульса наблюдалась через 100 мкс.



а



б

Рис. 2. Внешний вид двухимпульсного лазера (а) и малогабаритного импульсно-периодического лазера с высокой частотой следования импульсов (б)

Ниже представлены результаты разработки импульсно-периодического лазера и реализации метода генерации сдвоенных импульсов в частотном режиме. Внешний вид такого лазера приведен на рис. 2, б, схема системы возбуждения и источника питания – на рис. 3. Этот лазер отличается от предыдущего установленным в верхней части излучателя вентилятором с приводом, обеспечивающим поперечную прокачку рабочего газа между электродами.

В лазере достигнута скорость прокачки до 5 м/с, что обеспечивает возможность работы при частоте следования импульсов до 100 Гц в стационарном режиме. Объем активной среды $2 \times (0,8 \times 0,6 \times 20)$ см³. Энергия импульса накачки составляет 2,2 Дж при максимальном напряжении ± 12 кВ. В схеме использован

первичный накопитель $C1$ с высоким запасом энергии и магнитотиристорный формирователь импульсов $ИТ1$, $VD1$, $C2$, $L1$, обеспечивающий зарядку емкости $C3$ за время порядка 5 мкс при малом частичном разряде накопителя $C1$. Время готовности схемы к формированию следующего зарядного импульса составляет величину порядка 100 мкс. Это позволяет обеспечить возможность генерации серий из нескольких (2–4) импульсов с интервалами более 100 мкс.

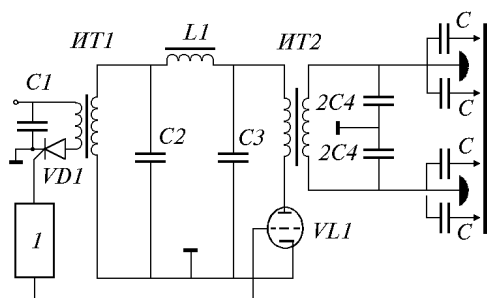


Рис. 3. Схема источника питания малогабаритного импульсно-периодического лазера: I – генератор пусковых импульсов; $VD1$ – тиристор ТЧИ-100; $VL1$ – тиратрон ТГИ1-1000-25; $ИТ1$, $ИТ2$ – импульсные трансформаторы; $L1$ – насыщающийся дроссель; $C1$ – конденсаторы К50-17, 500 В, 200 мкФ; $C2$, $C3$, $C4$ – конденсаторы КВИЗ-16 кВ, 1000 пФ; C – конденсаторы КВИ2–10 кВ, 47 пФ

Конечное звено формирования импульса возбуждения лазера включает тиратрон $VL1$, импульсный трансформатор $ИТ2$, обостряющую емкость $C4$ и автоматическую предыонизацию с ограничивающими емкостями C . Эта часть схемы не ограничивает режим работы по частотам следования импульсов возбуждения вплоть до нескольких десятков килогерц. Отличительная особенность схемы – использование согласующего трансформатора с малыми потерями и высокими временными характеристиками. Трансформатор обеспечивает получение двухполярного напряжения, требуемого для работы такого лазера, и решает альтернативную задачу получения высокой мощности накачки лазера и снижения уровня коммутационных потерь в тиратроне. В данной установке мощность первичного источника электро-

питания, подключенного к накопителю $C1$, позволяет получать серии парных импульсов с частотой повторения до 200 Гц. Параметры лазера при работе в непрерывном режиме приведены в табл. 2.

Таблица 2

Молекула	KrF	XeCl	N ₂
Длина волны, нм	248	308	337
Частота, Гц	100	100	100
Энергия импульса, мДж	8	5	2
Средняя мощность, мВт	600	400	150

Приведем предварительные результаты по генерации парных импульсов на молекуле XeCl. При выключенной прокачке газа получена устойчивая генерация двойных импульсов, отличающихся по амплитуде не более чем на 30% при задержке между ними 300 мкс. Включение прокачки на режим генерации парных импульсов не влияет.

1. *Adrian R.J.* Particle-imaging techniques for experiments in fluid mechanics //Annual Review of Fluid Mechanics. 1990. V. 23. P. 261–304.
2. *Molezzi M.J., Dutton J.C.* Application of particle image velocimetry in highspeed separated flows // AIAA J. 1993. V. 31. N 3. P. 438–446.
3. *Бойко В.М., Карнаухов А.А., Косарев В.Ф., Папырин А.Н.* Метод многоэкспозиционной фоторегистрации частиц в высокоскоростных двухфазных потоках //ПМТФ. 1982. N 3. С. 64–71.
4. *Boiko V.M., Papyrin A.N.* The quick-acting laser visualization of processes arising by interaction of shock and detonation waves and small particles //American Institute of Physics, Conference Proceedings №208, Current Topics in Shock Waves: Papers of 17-th ISSWST. 1990. P. 512–518.
5. *Tretyakov P.K., Garanin A.F., Kravnev V.L., Tupikin A.V., Yakovlev V.I.* Investigation of local laser energy release influence on supersonic flow by methods of aerophysical experiments //Proceed. ICMAR-96. Novosibirsk, 1996. Pt. 1. P. 200–204.
6. *Малов А.Н., Ражев А.М.* Эксиммерный лазер с двумя одновременно возбужденными активными средами. //Журнал технической физики. 1985. Т. 55. №4. С. 664–668.
7. *Boiko V.M., Malov A.N.* Pulsed lasers for the study of fast processes //Proceed. ICMAR-96. Novosibirsk. 1996. Pt. 1. P. 40–45.
8. *Takagi S., Okamoto N., Sato S., Goto T.* 2,5 kHz-high repetition rate XeCl excimer laser //J. of Appl. Phys. 1990. V. 68. N 8. P. 3844–3848.
9. *Takagi S., Okamoto N., Sato S., Goto T.* Double-pulse operation in XeCl excimer laser for simulation of high repetition rate performance //Jap. J. of Appl. Phys. Pt. 1. 1990. V. 29. N 6. P. 1108–1111.

V.M. Boiko, A.N. Malov. Excimer Lasers for Aerodynamic Flow Diagnostics.

Results of the development of two-pulsed excimer lasers designed for the study of the dynamic parameters of high-speed aerodynamic flows are presented. The pumping schemes and characteristics of two types of lasers are described: 1) laser generating two pulses with duration of 4–5 ns with an interval between them from 1 μs to 1 ms, and 2) small-scale pulsed periodic laser which ensures the generation of paired pulses with repetition frequency up to 100 Hz.