

Прототип мощного высокоэнергетического промышленного ХеСl-лазера

В.М.Борисов, А.И.Демин, О.Б.Христофоров

Рассматриваются результаты создания и экспериментального исследования мощного эксимерного ХеСl-лазера для промышленных применений. Компактность лазера достигнута путем использования лазерной камеры на основе керамической трубы из Al_2O_3 . Большие (1.5 – 2.5 Дж) значения энергии генерации получены благодаря использованию широкоапертурного (до 55×30 мм) объемного разряда с предьонизацией скользящим разрядом. Предьонизация осуществляется через полупрозрачный электрод УФ излучением скользящего разряда в виде однородного плазменного листа на поверхности плоской сапфировой пластины. Ресурс использования газовой смеси составил $\sim 57 \times 10^6$ импульсов при стабилизированной средней мощности лазерного излучения 450 Вт. Полученные результаты демонстрируют реальные перспективы создания нового класса эксимерных ХеСl-лазеров со средней мощностью ~ 1 кВт.

Ключевые слова: эксимерный ХеСl-лазер, широкоапертурный лазер, скользящий разряд.

1. Введение

Технология мощных эксимерных лазеров требует создания самостоятельного объемного разряда при высоком давлении смесей инертных газов (Ne, He, Xe, Kr, Ar) с галогенсодержащими газами (F_2 , HCl). Такой разряд неустойчив, и его генерационные характеристики определяются рядом факторов, находящихся в довольно сложной взаимосвязи. К основным факторам следует отнести условия предварительной ионизации газового объема, режим ввода энергии в разряд, геометрию активного объема, условия прокачки газового объема. Условия предьонизации включают в себя прежде всего уровень создаваемой до начала развития основного разряда концентрации электронов и однородность их распределения в разрядном объеме.

В 1990-х гг. в рамках национальных и международных программ на создание мощных эксимерных лазеров киловаттной мощности, преимущественно на молекулах ХеСl, были направлены усилия многих научных групп, некоторым из которых удалось создать лазеры мощностью 1 кВт и более [1–4]. Однако многие из этих разработок не нашли промышленного применения из-за высокой стоимости эксплуатации, в значительной мере определяемой временем жизни газовой смеси лазера, содержащей химически активные элементы.

Обеспечение высокого ресурса использования газовой смеси, содержащей галогены, приводит к необходимости применять в конструкции лазерной камеры металлокерамику. Наиболее популярный вариант металлокерамического эксимерного лазера был разработан в компании

Lambda Physik под руководством Д.Бастинга более 30 лет назад [5]. Этот вариант на сегодняшний день остается базовым для большинства коммерческих эксимерных лазеров, поставляемых на мировой рынок. В данных лазерах УФ предьонизация осуществляется разрядами, обычно коронными, расположенными по обеим сторонам протяженных металлических электродов. Такая боковая УФ предьонизация ограничивает поперечное сечение разряда, объем активной среды лазера и, следовательно, энергию генерации. В наиболее мощных (до 540 Вт) коммерческих эксимерных лазерах Lambda SX 540 С [6] апертура разряда составляет 37×13 мм (37 мм – высота разряда, 13 мм – его ширина). При оптимально большой длине разряда (~ 1 м) энергия генерации не превышает 1 Дж. Увеличение апертуры разряда с боковой предьонизацией приводит к неоднородному распределению затравочных электронов в межэлектродном промежутке и, как следствие, к неоднородному горению разряда и неэффективной генерации. Для получения энергии в импульсе ~ 2 Дж, необходимой для обеспечения высокой эффективности технологии производства жидкокристаллических дисплеев, производители коммерческих лазеров создали новую лазерную систему VUPER [6, 7], в которой используют одновременно два синхронизованных ХеСl-лазера с энергией ~ 1 Дж каждый. Такой подход, на наш взгляд, значительно усложняет и удорожает лазерную систему.

Другим существенным недостатком газодинамического тракта лазерной камеры [5] является то, что газовый поток резко меняет свое направление в зоне разряда, что также ограничивает возможность увеличения поперечного сечения разряда.

Для преодоления ограничений, обусловленных боковой УФ предьонизацией, нами предложен и развит новый, эффективный и простой тип УФ предьонизации на основе завершеного скользящего разряда по поверхности диэлектрика [8–10]. Электродная система описанного в [8, 9] лазера помещалась в металлокерамическую камеру, включающую в себя алюминиевую трубу диаметром 0.5 м и керамический фланец из Al_2O_3 размером

В.М.Борисов, А.И.Демин, О.Б.Христофоров. ФГУП «ГНЦ РФ – Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Россия, 142190 Москва, Троицк, ул. Пушкиных, влад. 12; e-mail: borisov@triniti.ru

Поступила в редакцию 12 апреля 2014 г., после доработки – 4 июня 2014 г.

1 × 0.3 × 0.1 м, который уплотнялся на трубе. В лазере была получена апертура объемного разряда 55 × 30 мм и энергия генерации в импульсе 2.5 Дж при длине разряда 700 мм. При частоте следования импульсов 200 Гц эксимерный ХеСl-лазер обеспечивал среднюю мощность 500 Вт. Одна заправка газовой смеси позволяла поддерживать такую мощность в течение нескольких дней непрерывной работы лазера. Несмотря на хорошие достигнутые выходные характеристики, недостатком лазера являлись жесткие требования к прочности керамического фланца из Al_2O_3 , на который при заполнении лазерной камеры рабочей газовой смесью при давлении 5 бар действует сила 15000 кг.

Ниже представлены результаты создания мощного широкоапертурного эксимерного ХеСl-лазера, который лишен указанного выше недостатка.

2. Устройство лазера

На рис.1 показано поперечное сечение лазерной камеры, предложенной нами в [11]. Суть предложения заключалась в создании лазерной камеры из керамической (Al_2O_3) трубы. По контракту с компанией Lambda Physik, которая сейчас является отделением Coherent Inc., нами была реализована эта идея. При разработке конструкции лазерной камеры основная трудность состояла в соединении керамической трубы диаметром 450 мм с шасси и торцевыми фланцами. Эта задача была решена следующим образом: керамическая труба помещалась в жесткий и прочный каркас в виде металлической трубы большего диаметра с кольцевыми фланцами для крепления торцевых фланцев лазерной камеры. Детали каркаса, изготовленные из стали, были соединены сварным способом с последующей высокоточной механической обработкой присоединительных фланцев, что обеспечивало их соосность. Керамическая труба устанавливалась внутри металличе-

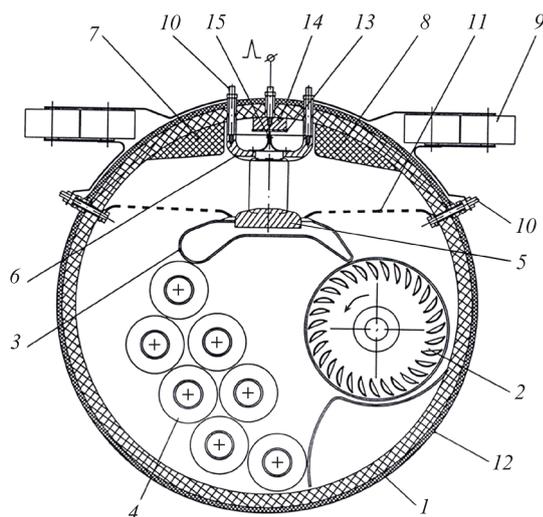


Рис.1. Конструкция эксимерного ХеСl-лазера:

1 – лазерная камера на основе керамической трубы из Al_2O_3 ; 2 – диаметральный вентилятор; 3 – спойлеры; 4 – трубки теплообменника; 5 – заземленный электрод; 6 – высоковольтный электрод; 7, 8 – керамические направляющие потока с цилиндрическими поверхностями; 9 – импульсные конденсаторы; 10 – тоководы; 11 – газопроницаемые токопроводы; 12 – стальной цилиндрический кожух; 13–15 – УФ предыонизатор (13 – плоская сапфировая пластина; 14 – инициирующий электрод; 15 – ножевой поджигающий электрод).

ского каркаса на опорах из фторопласта. Такая конструкция исключает прямой контакт металла и керамики, упрощает сборку лазерной камеры и повышает ее надежность. Одновременно каркас играет роль экрана для защиты от электромагнитных помех. Высоковольтный полупрозрачный электрод и система предыонизации закреплены непосредственно на керамической трубе. Остальные элементы лазерной камеры (заземленный электрод, теплообменники, вентилятор, спойлеры и формирователи потока) опираются только на торцевые фланцы, не касаясь поверхности керамической трубы. Заземленный электрод подсоединен к системе питания через прозрачный для газового потока обратный токопровод.

3. Лазерные характеристики

Результаты экспериментов по моделированию газодинамического контура лазерной камеры на основе керамической трубы представлены на рис.2, на котором приведены скорости газа вблизи высоковольтного электрода, в центре между электродами и вблизи заземленного электрода. Измерения скорости газового потока проводились с помощью трубки Пито. Частота вращения вентилятора из нержавеющей стали диаметром 150 мм составляла 3000 об./мин. Из рис.2 видно, что скорость вблизи заземленного электрода составляет 23–25 м/с, а вблизи высоковольтного электрода она равна 30–32 м/с.

В процессе работы над прототипом были созданы и испытаны системы накачки ХеСl-лазера для получения энергии генерации 1.5 и 2.5 Дж с использованием УФ предыонизации на базе завершеного скользящего разряда по поверхности диэлектрика. Скользящий разряд (СР) развивается по диэлектрику (сапфировая пластина) по обе стороны от ножевого электрода (рис.3). УФ излучение СР проходит через щели в электроде и осуществляет предыонизацию газа между электродами.

Устройство LC-инвертора с двумя ступенями сжатия импульса (рис.3) подобно описанному нами в работах [8, 9]. Коммутация LC-инвертора осуществлялась двумя тиратронами ИТТ 8614. Каждый тиратрон был включен в цепь LC-инвертора через насыщаемый магнитный дроссель МД, предназначенный для уменьшения стартовых потерь и выравнивания токов через тиратроны (на рис.3 не показаны). Были определены сечение магнитного железа и число витков МД, необходимые для стабильной

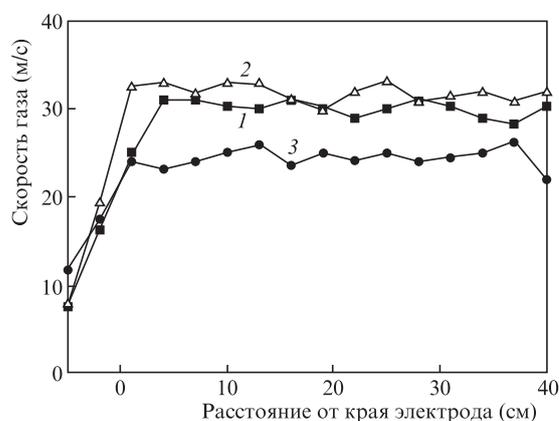


Рис.2. Скорость газового потока вблизи высоковольтного электрода (1), в центре между электродами (2) и вблизи заземленного электрода (3) в лазерной камере без спойлеров.

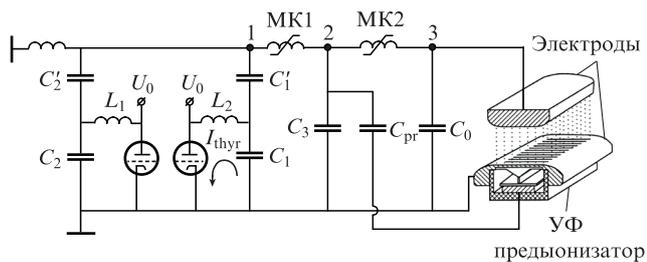


Рис.3. Электрическая схема питания.

работы тиратронов при относительно малой индуктивности МД в насыщенном состоянии. Магнитный ключ МК1 в виде многовиткового насыщаемого дросселя обеспечивает эффективную передачу электрической энергии LC-инвертора в промежуточный конденсатор C_3 емкостью 140 нФ и автоматическую предыонизацию за счет зарядки конденсатора малой емкости C_{pr} через разрядные промежутки системы формирования СР. Одновитковый магнитный ключ МК2 второй ступени, расположенный по центру лазерной камеры, рассчитан для передачи энергии в конденсатор второй ступени C_3 емкостью 100 нФ за время не более 180 нс.

Экспериментальные осциллограммы импульсов напряжения на выходе LC-инвертора (точка 1 на рис.3), на промежуточном конденсаторе C_3 (точка 2) и на конденсаторе последней ступени C_0 (точка 3), соответствующие варианту прототипа лазера с апертурой разряда 45×26 мм (45 мм – межэлектродное расстояние) для получения энергии генерации в импульсе 1.5 Дж, показаны на рис.4.

Были проведены исследования зависимости средней мощности излучения и относительной нестабильности энергии генерации σ от состава газовой смеси лазера. Оптимальный состав газовой смеси $\text{HCl}:\text{Xe}:\text{Ne}$ был определен как 3:12:4500 при общем давлении в лазерной камере 4515 мбар.

Исследования зависимости средней мощности и нестабильности σ от температуры газовой смеси показали, что оптимальной является температура 24–26 °С. При средней мощности лазера 500 Вт относительная нестабильность энергии генерации σ для последовательности из 6000 импульсов была равна 0.75%–0.8%, а максимальное и минимальное отклонения энергии от среднего зна-

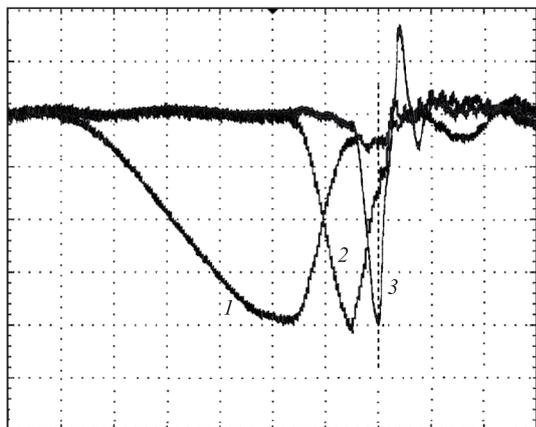


Рис.4. Экспериментальные осциллограммы 1, 2 и 3 напряжений в узлах 1, 2 и 3 электрической схемы на рис.3 соответственно. Масштаб по оси ординат 10 кВ/дел., по оси абсцисс – 400 нс/дел.

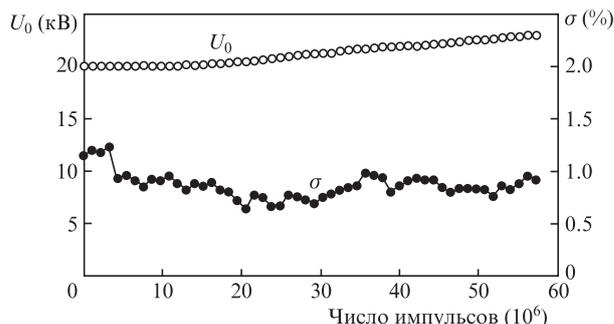


Рис.5. Зарядное напряжение и относительная нестабильность энергии генерации σ в режиме поддержания стабилизированной мощности лазера 450 Вт (1.5 Дж \times 300 Гц) в течение 57×10^6 импульсов при одной заправке газа с использованием инъекций галогена по оптимальному алгоритму.

чения в данной последовательности составляли ~6%. Это свидетельствует о высокой стабильности выходных характеристик лазера.

Для указанных выше оптимальных условий длительность по полувысоте импульса генерации на длине волны 308 нм была равна 45 нс.

В ходе долговременных тестов стабилизированная средняя мощность 450 Вт поддерживалась путем изменения зарядного напряжения системы накачки и инъекцией галогена в разряд. Дополнительные исследования были выполнены с целью определения оптимального для лазера алгоритма инъекций галогена. Полученные результаты показаны на рис.5. В этом эксперименте инъекции галогена проводились один раз за $(2-3) \times 10^6$ импульсов. Время жизни газовой смеси при этом было равно 57×10^6 импульсов.

Как было установлено во многих экспериментах [1, 8–10], оптимальный удельный энерговклад в газовую смесь широкоапертурных XeCl -лазеров составляет ~100 Дж/л. Поэтому простое увеличение емкости конденсатора C_0 не привело к пропорциональному увеличению энергии генерации лазера. Для увеличения ее от 1.5 до 2.5 Дж необходимо было пропорционально увеличить энергозапас системы накачки и объем разряда. Для получения энергии 2.5 Дж межэлектродное расстояние было увеличено от 45 до 55 мм, при этом ширина объемного разряда составила ~30 мм. Достоинством разработанной электродной системы с предыонизацией излучением СР через полупрозрачный электрод является возможность создания однородного объемного разряда в широком диапазоне межэлектродных расстояний без изменения профиля электродов [8, 9].

4. Заключение

Создана простая и надежная лазерная камера на основе керамической трубы, успешно испытанная при давлении свыше 5 бар. Для разработанного на базе этой камеры прототипа XeCl -лазера при средней стабилизированной мощности генерации ~450 Вт (1.5 Дж \times 300 Гц) были исследованы основные факторы, влияющие на стабильность энергии генерации. Найдены условия, при которых относительная нестабильность энергии генерации не превышает 1%.

Экспериментально определены оптимальные условия работы лазера в долговременном режиме, такие как состав газовой смеси, температура газа, диапазон зарядных

напряжений системы накачки, алгоритм инъекций галогена и др.

Долговременные тесты созданного лазера продемонстрировали возможность поддержания стабилизированной средней мощности 450 Вт в течение 57×10^6 импульсов при одной заправке газовой смесью.

При сохранении базовой конструкции, но при увеличении межэлектродного расстояния от 45 до 55 мм и оптимальном увеличении энергозапаса системы энергия генерации разработанного прототипа лазера составила 2.5 Дж.

Оценки показывают, что при повышении частоты следования импульсов и увеличении скорости прокачки охлаждающей жидкости реально получить среднюю лазерную мощность прототипа ~ 1 кВт.

1. Borisov V.M., Khristoforov O.B., Kirykhin Yu.B., Kuznetsov S.G., Stepanov Yu.Yu., Vinokhodov A.Yu. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1503**, 40 (1991).
2. Godard B., Murer P., Marc X., Stehle M., Bonnet J., Pigache D. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1810**, 372 (1993). DOI: 10.1117/12.144667.
3. Sato Y., Inoue M., Fujikawa S., Haruta K. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **1**, 811 (1995).
4. Timmermans J.C.M. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3343**, 687 (1998).
5. Basting D., Pippert K., Stamm U. *RIKEN Rev.*, № 43, 14 (2002).
6. <http://www.coherent.com/download/8125>.
7. Ralph F.D. *SPIE Newsroom* (14 February 2012). DOI: 10.1117/2.120121.004030.
8. Borisov V., Demin A., Khristoforov O., Kirykhin Yu., Vinokhodov A., Vodchits V., Basting D., Stamm U., Voss F., Bragin I. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3574**, 56 (1998).
9. Борисов В.М., Христофоров О.Б. В кн.: *Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Сер. Б.* (М.: Физматлит, 2005, т. 11, кн. 4).
10. Borisov V., Bragin I., in *Excimer Laser Technology* (Berlin: Springer-Verlag, 2005).
11. Borisov V.M., Khristoforov O.B. European Patent EP1525646B1, published 23.12.2009.