

А.Ю. Кропанев, А.Н. Орлов, В.В. Осипов

ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ХеСІ-ЛАЗЕР С СИСТЕМОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ ГАЗОВОЙ СМЕСИ

Приводятся результаты исследований, направленных на улучшение энергетических, ресурсных характеристик и качества излучения типичного ХеСІ-лазера. Впервые в ходе одного эксперимента обнаружено наличие двух максимумов у зависимости энергии излучения от величины отношения обострительной емкости к накопительной. Объяснены причины появления этих максимумов.

Данные по загрязнению зеркал и циклическому режиму работы позволили сделать вывод, что на начальном этапе (до 10^6 включений) основной причиной снижения мощности излучения лазера является появление в активной среде мелкодисперсных частиц.

Показана работоспособность новой системы регенерации рабочей смеси газов, не требующей использования криогенной аппаратуры и позволяющей обеспечить поддержание концентрации молекул НСІ в активном объеме, избавиться от мелкодисперсных частиц и ряда вредных молекулярных примесей.

Область применения импульсно-периодических (ИП) эксимерных лазеров интенсивно расширяется. Связано это, в первую очередь, с такими их достоинствами, как возможность фокусировки излучения в пятно малого диаметра $\sim(1-10 \text{ мк})$ и малое отражение излучения от плазмы, образованной передним фронтом светового импульса. В последние годы значительные усилия были направлены на улучшение энергетических и ресурсных характеристик таких лазеров. При анализе влияния параметров разрядной цепи на энергетику лазера установлено, что максимум энергии излучения достигается при использовании для возбуждения двухконтурной схемы с отношением величины обострительной емкости $C_{об}$ к накопительной $C_{об}/C_n \ll 1$ [1-3] или $C_{об}/C_n \sim 1$ [4, 5]. Увеличение ресурса работы достигается с помощью систем очистки и регенерации газовой смеси, основанных на вымораживании примесей с последующим введением в газовую среду НСІ [6] или на вымораживании частиц примесей при удалении остальных путем взаимодействия с аскаритом и последующим отделением продуктов реакции молекулярными ситами [7].

Эти способы очистки и регенерации газовой среды сложны в реализации из-за использования криогенной аппаратуры, характеризуются многостадийностью и длительностью процесса очистки, требуют перерыва в работе. Кроме того, при очистке вместе с примесями удаляется один из основных компонентов смеси – НСІ, а газовая смесь при этом загрязняется парами воды [7], от которых ее приходится очищать, используя молекулярные сита.

В настоящей статье излагаются результаты исследований, направленных на улучшение энергетических и ресурсных характеристик типичного импульсно-периодического ХеСІ-лазера.

В экспериментах использовался эксимерный лазер с разработанной нами системой регенерации, не требующей использования криогенной аппаратуры.

Активный объем лазера образован двумя электродами из нержавеющей стали. Длина разрядного промежутка составляет 500 мм.

Предыонизация активного объема обеспечивалась УФ-излучением двух рядов вспомогательных разрядов (100 искровых промежутков), возбуждаемых по обе стороны вдоль заземленного электрода. Питание каждого вспомогательного промежутка осуществлялось от индивидуального конденсатора $C_{вс}$.

Прокачка рабочей смеси газов через разрядную зону производилась диаметральным вентилятором с магнитной муфтой. Рабочая смесь газов охлаждалась с помощью радиатора, выполненного в виде набора медных пластин, установленных с шагом 6 мм. Резонатор состоял из глухого плоского зеркала с многослойным диэлектрическим покрытием (коэффициент отражения $R = 99,6\%$, длина волны $\lambda = 308 \text{ нм}$) и плоскопараллельной пластины из кварца типа КУ-1.

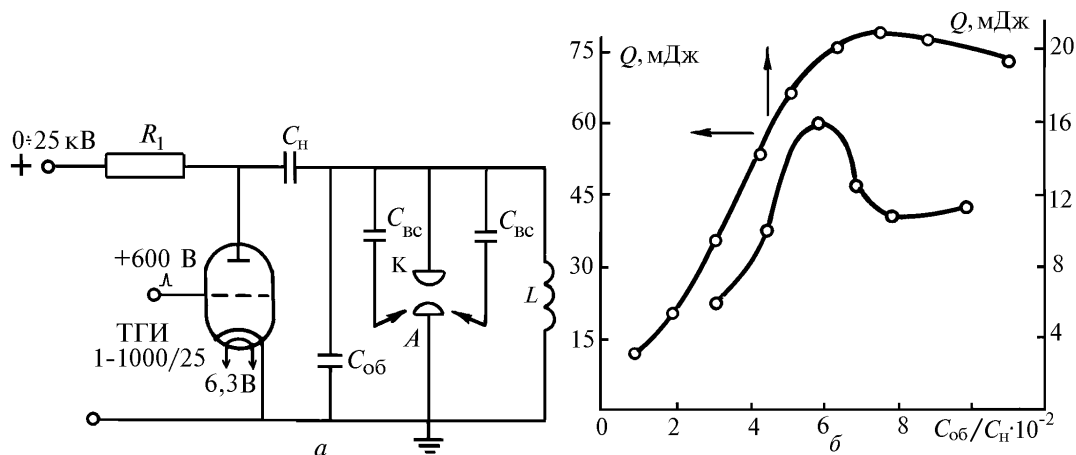


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема возбуждения разряда: $R = 200$ Ом, $C_n = 40$ нФ, $C_{об} = 0-40$ нФ, $C_{вс} = 1,6$ нФ, $L = 45$ мкГн (а); зависимость энергии генерации Q от соотношения обострительной и накопительной емкостей $C_{об}/C_n$: $C_n = 40$ нФ, $U_{зар} = 22$ кВ, He:Xe:HCl:H = 1000:100:1:0,5 (б)

Разряд в межэлектродном промежутке возбуждался высоковольтным генератором, собранным согласно двухконтурной электрической схеме с коммутатором ТГИ-1000/25 (рис. 1, а). Емкости накопительной батареи C_n и блока конденсаторов $C_{вс}$ для питания вспомогательных разрядов составляли соответственно 40 и 1,6 нФ. Величина блока обострительных конденсаторов $C_{об}$ варьировалась в ходе экспериментов от 0 до 40 нФ. Зарядное напряжение величиной до 25 кВ подавалось на C_n через «сглаживающее» сопротивление $R = 200$ Ом.

Энергия генерации и средняя мощность излучения регистрировались измерителем мощности ИМО-2Н. В экспериментах использовались газы следующей чистоты: He–99,995; Xe–99,999; HCl–99,0; H₂–99,95.

Контроль средней мощности излучения в ходе ресурсных испытаний осуществлялся с помощью самописца ЭН 3001-2. Система регенерации газовой смеси лазера с газовакуумным оборудованием приведена на рис. 2.

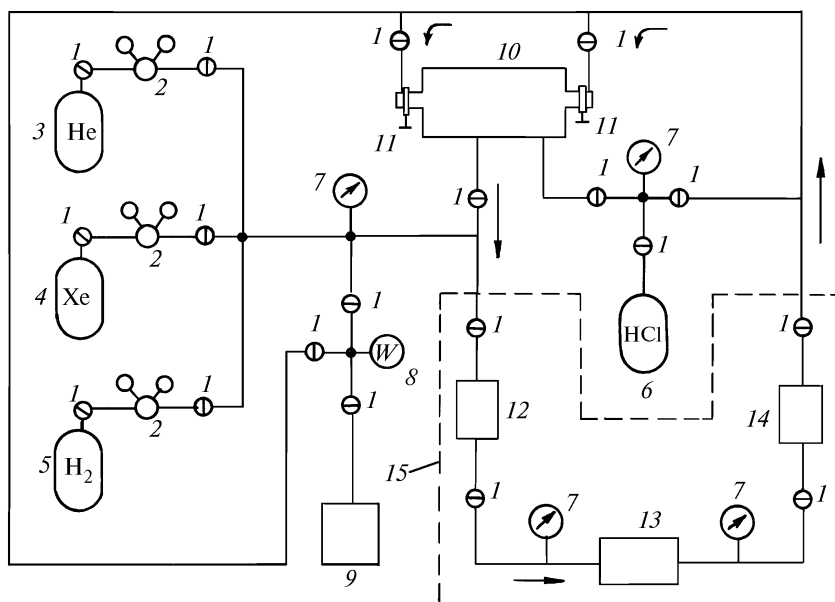


Рис. 2. Системы газонапуска и регенерации: 1 – вентили газовакуумные; 2 – редукторы газовые высокого давления; 3 – баллон с гелием; 4 – с ксеноном; 5 – с водородом; 6 – с хлористым водородом; 7 – мановакуумметры; 8 – лампа термодарная МЛТ-2; 9 – форвакуумный насос; 10 – лазерная камера; 11 – шиберные затворы; 12 – пылевой фильтр; 13 – микрокомпрессор безмасляный; 14 – регенеративный патрон; 15 – система регенерации

Отработанная газовая смесь в лазерной камере (ЛК) 10 пропусклась через систему регенерации 15, которая включала в себя: пылевой фильтр 12 для очистки газовой смеси от образовавшихся крупных твердых частиц; микропроцессор 13, служащий для принудительной циркуляции газовой смеси; регенеративный патрон 14. Очищенная смесь вновь поступала в лазерную камеру.

Для устранения противоречий, связанных с выбором соотношений $C_{об}/C_n$, были выполнены измерения энергии излучения при изменении C_n в широком диапазоне. Другие электротехнические параметры оставались неизменными, зарядное напряжение составляло 22 кВ. Эти данные приведены на рис. 1, б и указывают на наличие двух максимумов, сильно отличающихся по величине при $C_{об}/C_n = 0,06$ и при $C_{об}/C_n = 0,7$, которые, по нашему мнению, могут быть обусловлены следующими факторами.

Наличие максимума при $C_{об} \sim C_n$ объясняется тем, что в этом случае реализуется наименьшая длительность разряда.

Действительно, по мере увеличения емкости $C_{об}$ вплоть до $\sim C_n$ длительность разряда сокращается из-за накопления энергии до начала развития разряда в обострительном контуре, имеющем наименьшую индуктивность при вводе энергии в газ в связи с более близким расположением блока обострительных конденсаторов к месту горения разряда из-за распределения конденсаторов этого блока вдоль электродов и отсутствия коммутатора в цепи протекания тока. Таким образом, условие минимальной длительности разряда одновременно является наиболее близким к условию «бескоммутаторного» ввода энергии в газ. При этом $C_{об}$, как правило, несколько меньше C_n из-за начала развития разряда на фронте нарастания напряжения и дозарядки $C_{об}$ в процессе горения объемного разряда.

Дальнейшее увеличение $C_{об}$ будет вести к увеличению длительности разряда. Естественно, что в различных схемах возбуждения оптимальное соотношение $C_{об}/C_n$ будет несколько меняться, однако условие минимальной длительности разряда должно сохраняться. В этом случае разряд оказывается наиболее однородным, поскольку временной фактор является особенно важным с точки зрения формирования микроструктуры и контракции разряда в условиях, когда существенно влияние процесса ступенчатой ионизации на характер протекания тока.

Наличие второго максимума при $C_{об} \ll C_n$ можно объяснить, используя подход [8, 9], связанный с обоснованием S-образной вольтамперной характеристики (ВАХ) разряда в газовых смесях на основе ХеСl. Действительно, нижняя ветвь ВАХ, соответствующая положительной дифференциальной проводимости, указывает на возможность существования устойчивого слаботокового однородного разряда, когда локальное повышение n_e ведет к увеличению скорости их прилипания к молекулам HCl (ν), скорость наработки которых в этом месте возрастает. Наши оценки согласно данным для амплитуды первого пика тока показывают, что при $C_{об}/C_n = 0,06$ $n_e \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$, которая является максимально возможной для нижней ветви, где происходит перегиб ВАХ. Дальнейшее увеличение $C_{об}$ ведет к увеличению концентрации электронов в разряде и его переходу в неустойчивое состояние, что соответствует ветви ВАХ с отрицательной дифференциальной проводимостью. Последующее поведение зависимости энергии излучения от соотношения $C_{об}/C_n$, связанное с увеличением $C_{об}$, обуславливается двумя конкурирующими процессами: ухудшением однородности разряда из-за возрастающего влияния на нее ступенчатой ионизации и повышением его однородности, обусловленным уменьшением длительности разряда.

В импульсно-периодическом режиме работы ХеСl-лазера происходит постепенное снижение мощности излучения в связи с появлением примесей, загрязнением оптических деталей, деградацией хлористого водорода. Зависимость мощности излучения (рис. 3, кривая 1, день первый) получена при небольшой частоте следования импульсов накачки без включения системы прокачки газовой смеси через разрядный промежуток. Видно, что мощность излучения за 2 ч непрерывной работы лазера уменьшилась в 2,5 раза при удельном энергокладе 115 мДж/см³. Добавление в газовую смесь хлористого водорода не привело к заметному увеличению мощности. Температура газовой смеси оставалась неизменной и не могла служить причиной спада мощности. Основной вклад в этот процесс вносился загрязнением зеркал. После их очистки мощность генерации восстановилась почти до первоначального уровня.

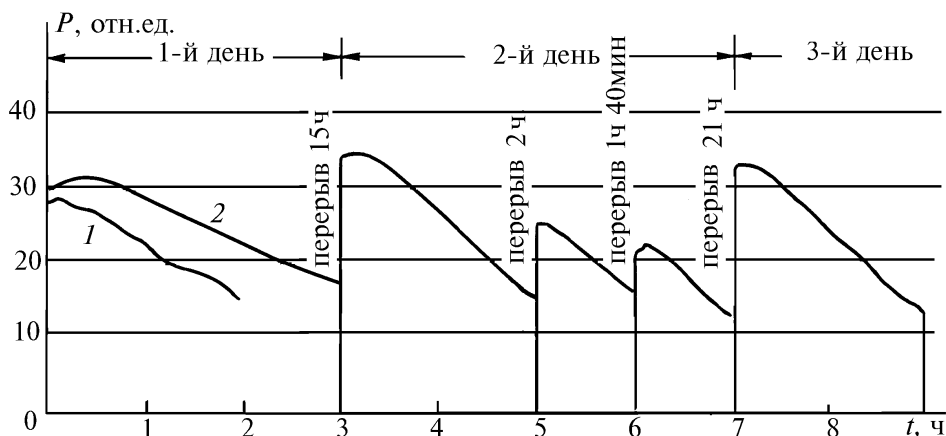


Рис. 3. Зависимость мощности излучения P от времени t ; $p = 2,8$ атм, $W = 100$ Дж/л, $\text{He:Xe:HCl:H} = 1000:100:1:0,5$, частота следования импульсов $\nu = 30$ Гц

Зависимость мощности излучения от времени (рис. 3, день первый, кривая 2) была получена при включенной системе прокачки и более высокой частоте следования импульсов. Видно, что после трех с лишним часов или $3,2 \cdot 10^6$ импульсов энергия генерации W снизилась на 50%. Это по количеству импульсов в 15 раз больше, чем в первом случае, когда отсутствовал поток газовой смеси через разрядный промежуток. Поперечный газовый поток удаляет мелкодисперсные частицы из разрядной зоны и затрудняет их градиентный и светоиндуцированный дрейф [10] к поверхностям зеркал.

Известно [11], что в пределах $\sim 10^6$ импульсов такие примеси, как CO_2 , NO_2 , NO , в XeCl -лазере нарабатываются незначительно. Концентрация молекул Cl недостаточна для существенного поглощения излучения на длине волны $\lambda = 308$ нм [12, 13]. Поэтому можно предположить, что первоначально причиной уменьшения мощности излучения является появление в активной среде мелкодисперсных частиц, например, вследствие распыления электродов и протекания плазмохимических реакций в разрядной зоне лазера. Приведенные на рис. 3 данные подтверждают это предположение.

Экспериментальные исследования проводились в течение трех дней с перерывами разной длительности. Состав газовой смеси выбран таким образом, чтобы небольшое изменение концентрации HCl не приводило к заметному уменьшению генерации [14]. Видно, что мощность излучения лазера после перерыва увеличивается в 1,5–2 раза в зависимости от его длительности (от времени между выключением и последующим включением лазера), причем увеличение мощности пропорционально последней. По-видимому, в отсутствие разряда в газовой камере лазера происходит оседание мелкодисперсных частиц на внутренние поверхности камеры и таким образом происходит очищение отработанной газовой смеси.

Однако при непрерывной эксплуатации лазера такой метод восстановления мощности излучения малопригоден, так как необходимы достаточно большие перерывы и к тому же нарабатывающиеся в дальнейшем молекулярные примеси нельзя удалить вышеуказанным способом.

Нами предложены способ регенерации газовой среды XeCl -лазера и система для его осуществления, которые не требуют применения криогенной аппаратуры, позволяют поддерживать выходную мощность лазера на необходимом уровне и увеличить ресурс работы лазера в десятки раз без замены газовой смеси.

Разработанная система регенерации очищает газовую среду от мелкодисперсных частиц, примесей H_2O , CO_2 , NO_2 , Cl_2 и одновременно регулирует концентрацию хлористого водорода без введения его извне. Для этого газовая среда прокачивается через камеру регенерации, объем которой 200 мл, не включая лазер, непрерывно или периодически. При этом в камере регенерации находятся два химических реагента, разделенных газопроницаемой перегородкой. Тридцати граммов этих реагентов достаточно для проведения десятков циклов регенерации. Каждая входящая в камеру регенерации молекула примеси или хлористого водорода дает на выходе две молекулы хлористого водорода, что позволяет совсем не вводить в исходную газовую смесь хлористый водород. Очистка и регенерация производятся при комнатной температуре.

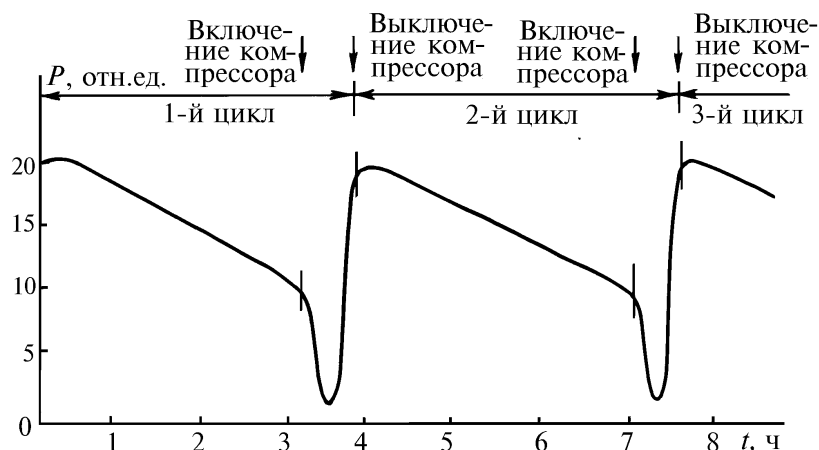


Рис. 4. Зависимость мощности излучения P от времени t при кратковременном включении системы регенерации: $W = 100$ Дж/л, $\nu = 30$ Гц, $p = 2,8$ атм, He:Xe:HCl:H₂ = 1000:100:1:0,5

На рис. 4 в качестве примера циклической регенерации представлена зависимость мощности генерации ХеСl-лазера от времени его работы. После 3,5 ч работы лазера с частотой 30 Гц мощность генерации снизилась до 50% от первоначальной. В этот момент без выключения системы прокачки газа был включен микрокомпрессор, часть газовой смеси стала проходить через камеру регенерации и снова поступать в лазерный блок, за 20 – 30 мин мощность генерации увеличилась до первоначального уровня. После выключения микрокомпрессора лазер поработал еще 3,5 ч до снижения энергии на 50%, а затем вышеописанный цикл операций повторялся. Таким образом, разработанная система регенерации позволяла обеспечить быструю эффективную очистку и восстановление газовой среды ХеСl-лазера при комнатной температуре с использованием небольшого количества двух недорогих реагентов и без замены газовой среды.

В заключение выделим основные результаты работы.

1. Впервые в ходе одного цикла измерений обнаружено наличие двух максимумов в зависимости энергии излучения от величины C_{06}/C_n . Дано объяснение причинам появления максимумов.

2. Данные по загрязнению зеркал и циклическому режиму работы позволили сделать вывод, что на начальном этапе (до 10^6 включений) основной причиной снижения мощности излучения лазера является появление в активной среде мелкодисперсных частиц.

3. Показана работоспособность новой системы регенерации рабочей смеси газов, не требующей использования криогенной аппаратуры и позволяющей обеспечить поддержание концентрации молекул HCl в рабочем объеме, избавиться от мелкодисперсных частиц и ряда вредных молекулярных примесей.

1. Ануфрик С.С., Зноско К.Ф., Курганский А.Д. // Квантовая электроника. 1989. N 16. С. 2228.
2. Атежев В.В., Букреев В.С., Вартапетов С.К. и др. // Квантовая электроника. 1991. N 18. С. 500.
3. Тарасенко В.Ф., Федоров А.И. // Изв. вузов. Сер. физика. 1981. Т. 24. N 2. С. 15
4. Хирамацу М., Гото Т. // Приборы для научных исследований. 1986. N 4. С. 18.
5. Kenzo M., Yuzo T., Toshifumi H., Tokuzo S. // Rev. Sci. Instrum. 1985. Т. 58. N 2. С. 201
6. Патент США N:4977749, от 18.12.90. Jeffrey P. Sercel. Apparatus and Method for purification of gases used excimer lasers.
7. Kutschke K.O., Hackett P.A., Willes C. // Rev. Sci. Instrum. 1981. N 52. С. 1655.
8. Бычков Ю., Пантелеев В., Суслов А. и Ястремский А. // Физ. плазмы. 1989. Т. 15. вып. 3.330.
9. Макаров М.К. Устройство самостоятельного электрического разряда накачки эксимерных лазеров: Дис. ... к. ф.-м. н. Томск, 1993.
10. Гельмуханов Ф.Х., Шалагин А.М. // Письма в ЖЭТФ. 1979. N 29. С. 773.
11. Gower M.C., Kearsley A.J., Webb C.E. // IEEE J. 1980. QE-16. P. 231.
12. McKee T.J., James D.J., Nip W.S., Weeks R.W. // Appl. Phys. Lett. 1980. N 36. P. 943.
13. Weigmann H.-J., Taubert P., Konig R., and Patzold H. // J. Appl. Phys. 1990. V. 52. P. 262.

14. Kawakubo Y., Oqura S., Sasaki R., Kubota Y., Miki A. // Conference on Lasers and Electro-optics, Technical Digest Series. Washington, 1989. Vol. 7. P. 102.

Институт электрофизики УрО РАН,
Екатеринбург

Поступила в редакцию
15 апреля 1995 г.

A. Yu. Kropanev, A. N. Orlov, V. V. Osipov. Repetitively Pulsed XeCl laser with System of Gaseous Mixture Regeneration.

The investigation results on energetic characteristics of discharge XeCl laser improvement are presented. Presence of two maxima in the dependence of output energy on the ratio of peaking capacitor to storage one is discovered and explained. Data on mirror's contamination and cyclic regime of the laser operation allow one to conclude that at initial stage (up to one million pulses) the main reason of output beam power lowering is an appearance of micro particles in the gaseous mixture. Serviceability of the new generation system free of cryogenic apparatus allows one to maintain HCl concentration at the necessary level and get rid of a series of harmful impurities.