

Электроразрядный ХеС1-лазер с энергией генерации 10 Дж и длительностью импульса излучения 300 нс

И.Н.Коновалов, В.Ф.Лосев, Ю.Н.Панченко, Н.Г.Иванов, М.Ю.Сухов

Сообщается о создании длинноимпульсного электроразрядного ХеС1-лазера с активным объемом $9 \times 6 \times 100$ см. Для возбуждения лазера используется двухконтурная схема с импульсной зарядной накопительной емкостью, в качестве которой применялись бумажно-масляные конденсаторы, образующие формирующую линию. Коммутация накопительной емкости осуществлялась многоканальным протяженным разрядником. Предыонизация лазерной смеси обеспечивалась рентгеновским излучением. Лазер генерировал импульс излучения длительностью 300 нс на полувысоте с энергией 10 Дж и равномерным распределением интенсивности по выходной апертуре.

Ключевые слова: эксимерный лазер, формирующие линии, протяженный разрядник, предыонизация, рентгеновское излучение.

1. Введение

Возможность применения электроразрядных эксимерных лазеров в качестве мощных источников УФ излучения в нелинейной оптике, при обработке материалов и в ряде физических экспериментов стимулирует разработку и создание эксимерных лазеров с большим объемом активной области и однородным распределением энергии по апертуре [1–7]. В работах [4–6], посвященных исследованию широкоапертурных электроразрядных ХеС1-лазеров с энергией излучения в импульсе около 10 Дж, была получена длительность импульса на полувысоте от 85 до 180 нс. В то же время существует принципиальная возможность получения генерации с длительностью импульса до 1 мкс [8]. Дальнейшее увеличение длительности импульса генерации в таких лазерах может привести к повышению энергии излучения в импульсе и упрощению задачи формирования излучения с высоким качеством [7]. Заметим, что широкоапертурные лазеры с большой длительностью импульса излучения могут быть использованы в качестве усилителей в мощных лазерных системах.

Основная проблема, которую приходится решать экспериментаторам в длинноимпульсных лазерах, – это обеспечение однородности горения объемного разряда в активной области в течение всего импульса накачки. При этом необходимо сохранять оптимальные условия накачки и обеспечивать эффективный ввод энергии в активную среду. Как известно, основные требования, предъявляемые к системе возбуждения лазера, включают в себя получение однородной предыонизации рабочей смеси газов и однородного электрического поля в разрядном промежутке. Необходимо также достаточно быстро сформировать объемный разряд и затем в течение длительности

импульса накачки лазера поддерживать оптимальную плотность тока в объемном разряде и оптимальную напряженность электрического поля в плазме. Удовлетворить всем этим требованиям в реальном эксперименте достаточно сложно, но степень их реализации и определяет в основном длительность импульса генерации эксимерного лазера.

Целью настоящей работы являлось исследование возможности увеличения длительности импульса излучения в широкоапертурном электроразрядном ХеС1-лазере и создание экспериментального макета лазера с энергией генерации до 10 Дж и длительностью импульса 300 нс.

2. Аппаратура и методика эксперимента

Данная работа выполнялась в два этапа. На первом этапе были проведены исследования электроразрядного ХеС1-лазера с апертурой 7×4 см, с помощью которого ранее нами была получена длительность импульса генерации до 150 нс [6]. В процессе этих исследований длительность импульса генерации была увеличена до 200 нс за счет увеличения накопительной емкости и были определены факторы, которые могут ограничивать возможность дальнейшего увеличения длительности импульса излучения. В первую очередь к ним относились степень и однородность рентгеновской предыонизации.

На втором этапе с учетом полученных результатов была разработана, создана и исследована установка, внешний вид которой показан на рис. 1. Лазер состоит из трех основных блоков, включающих в себя газоразрядную камеру с генератором накачки, а также электрическую и пневматическую системы управления. Корпус газоразрядной камеры был изготовлен из нержавеющей стали. Он имел диаметр 41 см и длину 140 см. В камере размещаются вакуумный диод источника мягкого рентгеновского излучения, электроды, образующие разрядный промежуток, и изолятор ввода высокого напряжения.

Электроды, изготовленные из нержавеющей стали, имеют специальный профиль для обеспечения однородного электрического поля в разрядном промежутке. Рас-

И.Н.Коновалов, В.Ф.Лосев, Ю.Н.Панченко, Н.Г.Иванов, М.Ю.Сухов. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 2/3; e-mail: losev@ogl.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 15 ноября 2004 г., после доработки – 28 декабря 2004 г.



Рис.1. Внешний вид лазерной установки.

стояние между электродами составляет 9 см. Размеры электродов обеспечивали горение разряда в объеме $6 \times 9 \times 100$ см. Электрод, выполняющий роль катода, крепится в разрядном промежутке непосредственно на корпусе вакуумного диода рентгеновского источника. Для вывода рентгеновского излучения в разрядный промежуток в электроде имеется окно размером 5×100 см, закрытое титановой фольгой толщиной 80 мкм. Анод разрядного промежутка соединяется с генератором накачки, расположенным снаружи камеры, через изолятор с помощью металлических шпилек. Конструкция элементов соединения генератора с анодом и обратных токопроводов обеспечивала минимальную индуктивность разрядного контура.

Вакуумный диод источника рентгеновского излучения имеет цилиндрический корпус, внутри которого располагаются анод и холодный катод, работающий в режиме взрывной эмиссии электронов. Катод состоит из трех полосок фольгированного стеклотекстолита толщиной 0.5 мм и длиной 1000 мм. Полоски, имеющие конфигурацию гребенки, закреплялись на разделительной решетке, которая закрывалась титановой фольгой толщиной 40 мкм для герметизации вакуумного диода и вывода из него рентгеновского излучения. В качестве анода вакуумного диода использовалась танталовая фольга. Зазор между катодом и анодом мог изменяться от 17 до 23 мм. Откачка вакуумного диода производилась паромасляным насосом до давления $\sim 10^{-4}$ Тор.

Питание вакуумного диода осуществлялось от трехступенчатого генератора Аркадьева – Маркса с ударной емкостью 15 нФ. Генератор соединялся с вакуумным диодом высоковольтным кабелем КВИ-120. Напряжение положительной полярности подавалось на анод. Равномерное распределение тока по длине диода достигалось путем соединения анода и ввода в корпус диода с помощью набора одинаковых по длине отрезков провода с

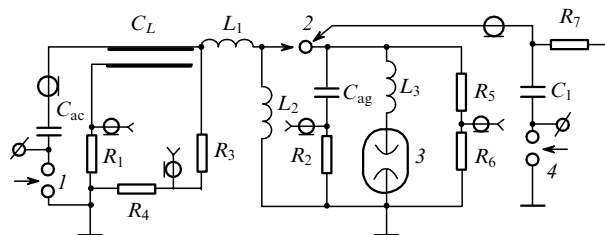


Рис.2. Принципиальная электрическая схема возбуждения лазера: 1, 4 – управляемые разрядники; 2 – протяженный разрядник; 3 – лазерная камера; R_1 , R_2 – токовые шунты; R_3 и R_4 , R_5 и R_6 – омические делители напряжения; R_7 – зарядное сопротивление; $L_1 = L_3 = 20$ нГн, $L_2 = 250$ нГн, $C_{ac} = 560$ нФ, $C_L = 450$ нФ, $C_{ag} = 7$ нФ, $C_1 = 6.6$ нФ.

высоковольтной изоляцией. Зарядное напряжение генератора могло варьироваться от 20 до 30 кВ.

Окнами лазерной камеры служили плоскопараллельные пластины из плавленого кварца диаметром 140 мм. Резонатор лазера был образован внешним диэлектрическим зеркалом с коэффициентом отражения 97 % на длине волны $\lambda = 308$ нм и окном лазерной камеры. В качестве активной среды использовалась смесь Ne–Xe–HCl. Рабочее давление смеси составляло 3.5–4 атм.

Основными элементами генератора накачки лазера являются накопительная емкость, коммутатор и обострительная емкость. Принципиальная электрическая схема генератора приведена на рис.2. Накопительная емкость C_L состоит из трех параллельно соединенных линий конденсаторов марки ФЛ-300 с пленочной бумажно-масляной изоляцией. Каждая линия имеет емкость 150 нФ, волновое сопротивление 1 Ом и позволяет получать электрические импульсы длительностью 300 нс. Импульсная зарядка линий производится от емкости C_{ac} марки ИК-100 кВ–0.56 мкФ, которая через кабель КВИ-120 соединялась с этими линиями. Емкость C_{ac} обычно заряжалась до напряжения 60–65 кВ. Обостряющая емкость $C_{ag} = 7$ нФ, ответственная за формирование объемного разряда в лазерной камере, собрана из керамических конденсаторов марки КВИ-3 (20 кВ, 680 нФ).

В качестве малоиндуктивного коммутатора 2 использовался многоканальный разрядник с резко неоднородным электрическим полем на аноде [9]. Электроды разрядника были изготовлены из нержавеющей стали. Анод представлял собой пластинку толщиной 1 мм, катод – стержень диаметром 15 мм. Длина электродов была равна 100 см, зазор между электродами – 6 мм. Вблизи катода по всей его длине располагался запускающий электрод, состоящий из отдельных лепестков. Корпус разрядника выполнен из диэлектрической трубы с внешним диаметром 65 мм. В рабочем режиме разрядник заполнялся сухим воздухом при давлении 6.6 атм. Запуск разрядника осуществлялся импульсом напряжения, формируемым при разряде емкости C_1 через управляемый искровой разрядник 4. Данный импульс подавался на катод через искровые промежутки около катода, подсветка которых помогала обеспечивать стабильность запуска и многоканальность пробоя протяженного разрядника 2.

Запуск всех искровых разрядников лазера производился с помощью генератора импульсов высокого напряжения, выполненного на основе тиратрона ТГИ-1-1000/25. Искусственные радиотехнические линии задержки системы синхронизации обеспечивают последовательное включение генератора накачки и источника рентгеновского излучения.

Принцип работы схемы возбуждения лазера заключается в следующем. После зарядки емкости C_{ac} от постоянного источника напряжения включается разрядник 1 и осуществляется импульсная зарядка емкости накопительной линии C_L . При достижении максимума напряжения включается разрядник 2, заряжается обострительная емкость C_{ag} и возникает пробой в разрядном промежутке лазерной камеры. После этого энергия, запасенная в конденсаторе C_L , передается в плазму разряда.

Регистрация импульсов напряжения на накопительной линии C_L и на обострительной емкости C_{ag} осуществлялась делителями напряжения $R_3 - R_4$ и $R_5 - R_6$. Ток разряда накопительных линий измерялся с помощью шунта R_1 , состоящего из резисторов ТВО-0.5 с сопротивлением 1 Ом. Для измерения временных и энергетических характеристик импульсов лазерного излучения применялись фотоприемник ФЭК-22, а также калориметры ТПИ-7 и ИКТ-2Н. Исследуемые сигналы регистрировались осциллографом TDS-3014. Экспозиционная доза мягкого рентгеновского излучения в активной области лазера измерялась дозиметрами КДТ-02М и КИД-1, специально подготовленными для этих целей.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

Вследствие особой важности предыонизации для зажигания объемного разряда с большой длительностью нами были проведены исследования параметров рентгеновского источника. В работах [10, 11] было показано, что оптимальный диапазон напряжений на диоде составляет 30–50 кВ. Это связано с тем, что при ускоряющих напряжениях более 50 кВ уменьшается степень поглощения рентгеновского излучения в лазерной смеси газов, что ведет к уменьшению начальной концентрации электронов в активной области лазера. При напряжении на диоде менее 30 кВ увеличиваются потери рентгеновского излучения в фольге, обычно разделяющей рентгеновский источник и газоразрядный промежуток лазерной камеры. В связи с этим мы стремились реализовать такой режим работы рентгеновского источника, при котором основной ток в диоде соответствовал именно этому диапазону ускоряющих напряжений.

На конечном этапе исследований рентгеновского источника мы изменяли зарядное напряжение генератора импульсов и зазор анод–катод в диоде. При зазоре длиной $d = 23$ мм и зарядном напряжении генератора $U = 28$ кВ длительность импульса тока ускоренных электронов достигала 700 нс, амплитуда тока – 3 кА. Максимальное напряжение на диоде составляло ~ 55 кВ (рис.3). Снижение зарядного напряжения генератора импульсов приводило к уменьшению дозы рентгеновского излучения, а увеличение – к развитию неустойчивости в конце импульса напряжения диода. При уменьшении зазора до 17 мм амплитуда тока в диоде возрастала до 4 кА, а максимальное напряжение на диоде уменьшалось до 45 кВ. Для дальнейшей работы рентгеновского источника нами был выбран режим, возникающий при $d = 23$ мм и $U = 28$ кВ. Измерения неравномерности распределения дозы рентгеновского излучения по апертуре выходного окна показали, что она составляет 10%–20%. После прохождения титановых фольг, закрывающих окна в вакуумном диоде и профилированном электроде, экспозиционная доза излучения в активной области лазера была равна ~ 30 мР.

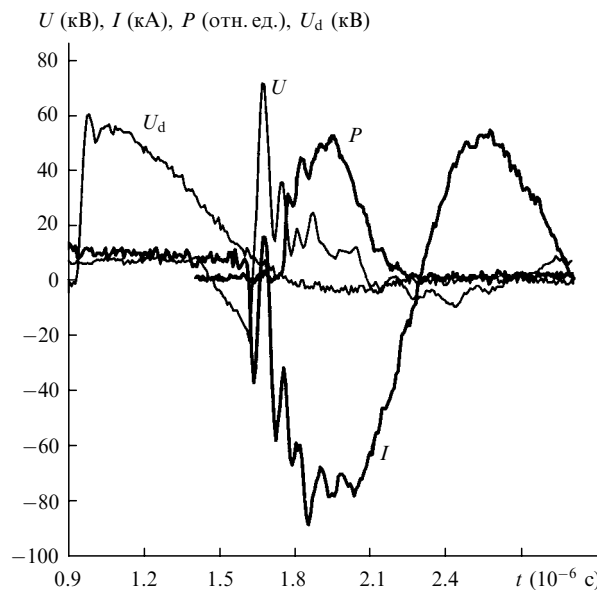


Рис.3. Осциллограммы импульсов напряжения U на обострительной емкости C_{ag} , разрядного тока I накопительной емкости C_L , мощности лазерного излучения P и напряжения на вакуумном диоде рентгеновского источника U_d . Смесь Ne: Xe: HCl = 3200: 10: 1, давление смеси 4 атм, максимальное напряжение на емкости C_{ac} составляет 63 кВ.

Оценки начальной концентрации электронов, создаваемой рентгеновским излучением с такой дозой в лазерной смеси газов, дают $(5 - 10) \times 10^8 \text{ см}^{-3}$.

На рис.3 приведены осциллограммы импульсов напряжения, тока и излучения, характеризующих типичный режим работы лазера. В проведенных экспериментах импульсная зарядка емкости накопительной линии C_L от емкости C_{ac} до напряжения 63 кВ производилась за время, равное ~ 2.8 мкс. За 700 нс до окончания зарядки линий включался источник рентгеновского излучения. Оптимальное время задержки между запускающим импульсом, подаваемым на протяженный разрядник 2, и началом импульса ускоряющего напряжения на рентгеновском источнике, составляло 380 нс. После пробоя многоканального разрядника скорость нарастания напряжения на обострительной емкости C_{ag} равнялась $\sim 10^{12}$ В/с. Это обеспечивало зарядку обострительной емкости до 70 кВ и формирование однородного объемного разряда в лазерном промежутке при ее разряде. Во время нарастания тока в разрядном промежутке лазера колебательный ток обостряющей емкости также проходил и через многоканальный разрядник, поддерживая проводимость каналов и их равномерное распределение по длине электродов разрядника. Максимальный ток разряда накопительных линий достигал 80 кА, приведенное напряжение на плазме объемного разряда в этот момент времени равнялось $\sim 0.3 \text{ кВ}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$. Генерация излучения развивалась с задержкой ~ 100 нс относительно начала накачки лазера и далее существовала в течение ~ 500 нс вплоть до окончания первого полупериода разрядного тока. Длительность импульса генерации на уровне половины мощности достигала 310 нс.

Автографы лазерного излучения, полученные в ближней зоне на фотобумаге, и результаты сканирования измерителем энергии по сечению лазерного пучка, показали, что излучение было распределено достаточно равномерно по апертуре 6×9 см (рис.4). При давлении смеси,

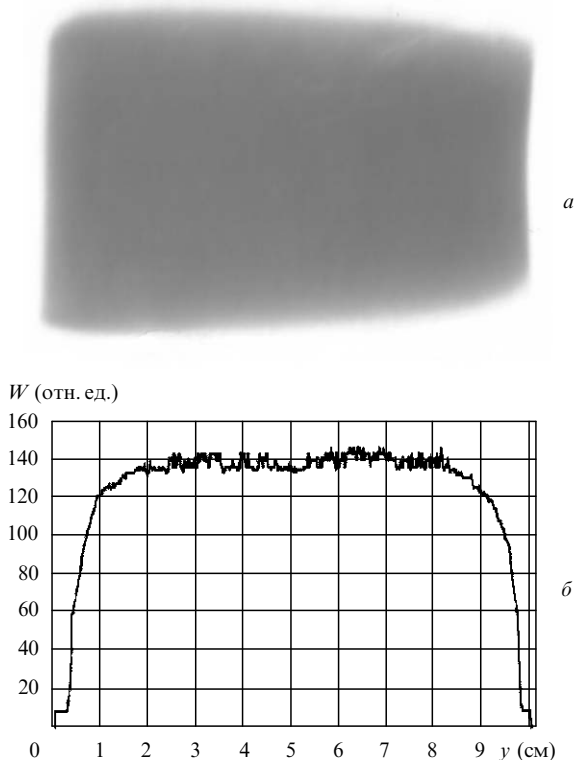


Рис.4. Автограф импульса лазерного излучения в ближней зоне (а) и распределение энергии излучения W по сечению лазерного пучка (б).

равном 3.5–4 атм, и изменении содержания Ne в ее составе (Ne : Xe : HCl = (2000–3200) : 10 : 1) энергия импульса излучения изменялась незначительно и была равна ~ 10 Дж. Длительность импульса генерации излучения при разбавлении смеси буферным газом неоном возрастала от 250 до 310 нс. Наибольшая энергия генерации в наших экспериментах составляла 10.8 Дж при напряжении на накопительной емкости 64 кВ для смеси состава Ne : Xe : HCl = 2800 : 10 : 1 при давлении 3.5 атм.

Эффективность генерации лазера относительно энергии, вложенной в газ в течение первого полупериода разрядного тока, составила 3.5 %. Исследование потерь энергии в генераторе накачки показало, что активные потери в протяженном разряднике и диэлектрические потери в линиях ФЛ-300 достигали ~ 60 % от запасаемой в линиях энергии. Кроме того, при возбуждении лазера отсутствовало полное согласование импеданса разрядного контура и сопротивления плазмы лазерного промежутка из-за использования смеси с пониженным содержанием HCl, необходимой для получения длинного импульса. В результате рабочий КПД лазера в наших экспериментах не превышал 1.2 %.

4. Заключение

В настоящей работе впервые показана возможность увеличения вплоть до 310 нс длительности импульса излучения широкоапертурного XeCl-лазера при энергии генерации 10 Дж. Данный результат получен при использовании рентгеновской предыонизации простой двухконтурной схемы возбуждения с импульсной зарядкой накопительной емкости. При этом в качестве накопителей энергии применялись бумажно-масляные формирующие линии, а в качестве высокоточного коммутатора – протяженный многоканальный разрядник. Исходя из наших экспериментальных результатов можно сделать вывод, что для реализации в XeCl-лазере импульса генерации длительностью 300 нс необходимо выполнение следующих условий:

- плотность разрядного тока должна составлять примерно 150 А/см^2 , а удельная мощность накачки – примерно 150 кВт/см^3 ;

- однородность предыонизации в активной области должна быть не хуже 10 % – 20 %, а создаваемая начальная концентрация электронов – не менее $5 \times 10^8 \text{ см}^{-3}$;

- лазерная смесь должна иметь пониженное содержание ксенона и HCl (Ne : Xe : HCl = (2000–3000) : 10 : 1).

Данный лазер планируется использовать в качестве предусилителя в лазерной линейке с конечным усилителем на основе разработанного в Институте сильноточной электроники СО РАН лазерного XeCl-модуля с энергией 650 Дж и накачкой электронными пучками [12] для получения мощного УФ излучения с расходимостью, близкой к дифракционному пределу.

1. Champagne L.F., Dudas A.J., Harris N.W. *J. Appl. Phys.*, **62**, 1576 (1987).
2. Баранов В.Ю., Борисов В.М., Молчанов Д.Н., Новиков В.П., Христофоров О.Б. *Квантовая электроника*, **14**, 1542 (1987).
3. Hasama T., Miyazaki K., Yamada K., Sato T. *IEEE J. Quantum Electron.*, **25**, 113 (1989).
4. Bollanti S., Di Lazzaro P., Flora F., et al. *Appl. Phys. B*, **50**, 415 (1990).
5. Burchkov Yu., Makarov M., Suslov A., Yastremsky A. *Rev. Sci. Instr.*, **65**, 28 (1994).
6. Басов В.А., Коновалов И.Н. *Квантовая электроника*, **23**, 787 (1996).
7. Лосев В.Ф., Панченко Ю.Н. *Квантовая электроника*, **31**, 293 (2001).
8. Taylor R.S., Leopold K.E. *Appl. Phys. Lett.*, **47**, 81 (1985).
9. Балбоненко Е.Ф., Басов В.А., Визирь В.А., Коновалов И.Н., Сак К.Д., Червяков В.В. *ПТЭ*, № 6, 86 (1997).
10. Shields H., Alcock A.J., Taylor R.S. *Appl. Phys. B*, **31**, 27 (1983).
11. Tallman C.R., Bigio I.J. *Appl. Phys. Lett.*, **42**, 149 (1983).
12. Абдуллин Э.Н., Гришин Д.М., Губанов В.П. и др. *Квантовая электроника*, **34**, 199 (2004).