

ХеСl-лазер с энергией излучения 650 Дж

Э.Н.Абдуллин, Д.М.Гришин, В.П.Губанов, В.Б.Зорин, А.А.Ким,
Б.М.Ковальчук, Е.В.Кумпяк, Д.Лио, А.В.Морозов, В.С.Скакун,
А.С.Степченко, В.Ф.Тарасенко, В.С.Толкачев, Н.В.Цой, П.М.Щанин

Описана конструкция и приведены результаты испытаний ХеСl-лазера ($\lambda = 308$ нм) с активным объемом 200 л. При накачке смеси состава $Ar : Хе : НСl = 1520 : 40 : 2$ Тор была получена энергия излучения 660 Дж. Длительность импульса излучения на полувывоте составила ~ 350 нс. Неоднородность распределения плотности энергии излучения по сечению выходного пучка в ближней зоне не превышала 10%. Для накачки использовался ускоритель, формирующий радиально сходящийся электронный пучок с энергией электронов до 550 кэВ, током в вакуумном диоде до 320 кА, длительностью импульса тока пучка ~ 1 мкс и током пучка до 250 кА. Источниками высокого напряжения являются два линейных трансформатора с энергозапасом первичного накопителя 98 кДж. Для снижения влияния собственного магнитного поля на формирование пучка вакуумный диод был разделен на шесть диодов, магнитоизолированных друг от друга.

Ключевые слова: ХеСl-лазер, накачка пучком электронов.

1. Введение

В настоящее время продолжают исследования и разработки мощных лазерных систем, использующих эксиплексные лазеры на галоидах благородных газов [1–4]. Лазерные системы включают в себя задающий генератор и несколько усилителей. Последний (оконечный) усилитель – это обычно широкоапертурный лазер с накачкой электронным пучком. В известных широкоапертурных эксиплексных лазерах с накачкой пучком электронов [1–5] высокие мощности накачки достигались за счет применения промежуточных накопительных водяных линий, которые заряжались от импульсных генераторов. Применение дополнительного накопителя энергии увеличивает размеры установки и усложняет ее конструкцию. В Институте сильноточной электроники СО РАН были созданы ускорители электронов, в которых благодаря применению вакуумной изоляции удалось существенно уменьшить индуктивность генератора накачки и вакуумного диода [6, 7]. Это позволило создать компактные широкоапертурные эксиплексные лазеры [8–11] с прямой накачкой от генераторов Маркса с вакуумной изоляцией. В созданных лазерах возбуждение осуществлялось четырьмя [8, 11] и шестью [9–11] радиально сходящимися пучками.

В данной работе описан широкоапертурный ХеСl-лазер с радиально сходящимся электронным пучком. В этом лазере питание вакуумного диода, состоящего из шести магнитоизолированных диодов, осуществляется

от двух параллельно включенных линейных трансформаторов. Распределение тока между диодами осуществляется с помощью размещенных в объеме электронного диода коллектора в виде цилиндра большого диаметра и пластин, регулирующих протекание прямого тока от цилиндра к катодам и обратного тока.

2. Описание установки

Внешний вид лазера с ускорителем показан на рис. 1. Импульс напряжения на диоде формируется с помощью двух параллельно включенных линейных трансформаторов с вакуумной изоляцией вторичного витка. Трансформаторы состоят из десяти ступеней, каждая из которых собрана из восьми конденсаторов ИК-100-0.17 (100 кВ, 0.17 мкФ, 50 нГн) и имеет выходную мощность ~ 12 ГВт. Напряжение к диоду подается с помощью вакуумных линий, одновременно служащих вторичными витками трансформаторов. Основными элементами электронного диода являются вакуумная камера 1 с боковыми фланцами 2, коллектор 3, катоды 4 с катододержателями 5, пластины для подвода тока к катодам 6, магнитоизолирующие пластины обратного тока 7–9, кювета 10, ложементы 11 для установки кюветы. Диаметр вакуумной камеры составляет 1310 мм, длина – 2100 мм. Коллектор 3, представляющий собой цилиндр диаметром 1140 мм и длиной 1200 мм, подвешивается соосно с вакуумной камерой на двух пружинах 12, размещенных в верхней части камеры.

Ускоритель содержит 18 катодов. Катоды с катододержателями 5 установлены на катодных пластинах 6 так, что секционированный катод каждого магнитоизолированного диода состоит из трех частей. Деление катодов в магнитоизолированных диодах уменьшает ток, протекающий по поверхности кюветы в направлении оси, что способствует уменьшению потерь пучка на ребрах опорной решетки. Магнитная изоляция диодов реализуется в результате применения коллектора, катодных

Э.Н.Абдуллин, Д.М.Гришин, В.П.Губанов, В.Б.Зорин, А.А.Ким, Б.М.Ковальчук, Е.В.Кумпяк, А.В.Морозов, В.С.Скакун, А.С.Степченко, В.Ф.Тарасенко, В.С.Толкачев, Н.В.Цой, П.М.Щанин. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 4
J.Liu. Chinese North-West Institute of Nuclear Technologies, 710024, Xi'an, China

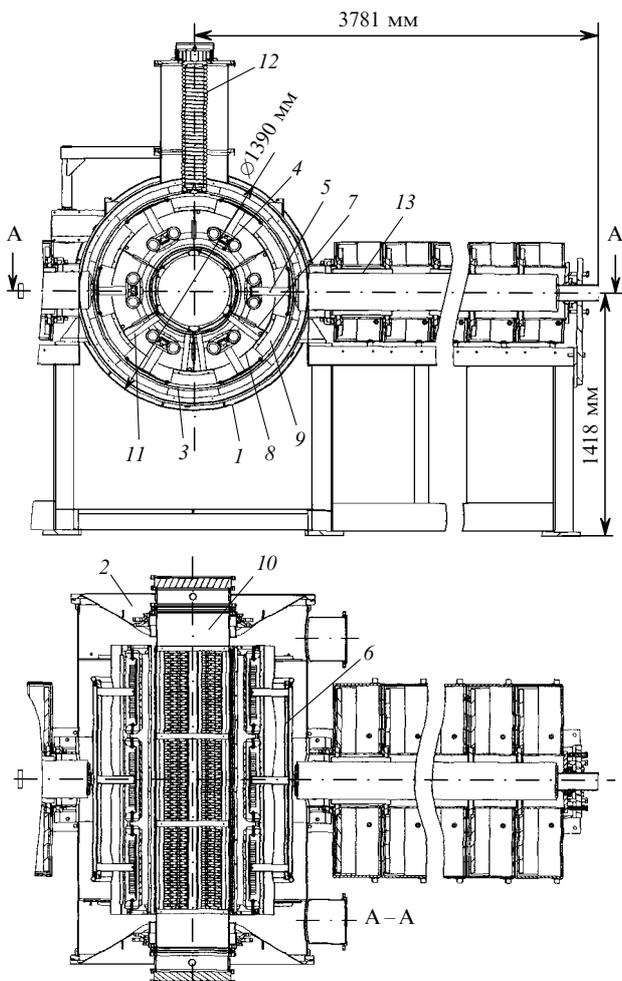


Рис.1. Конструкция лазера с накачкой радиально сходящимся электронным пучком с помощью двух параллельно включенных линейных трансформаторов:
 1 – вакуумная камера; 2 – боковые фланцы; 3 – коллектор; 4 – катоды; 5 – катододержатели; 6 – пластины для подвода тока к катодам; 7, 8, 9 – магнитоизолирующие пластины обратного тока; 10 – кювета; 11 – лотки; 12 – пружины; 13 – высоковольтный виток трансформатора.

пластин 6 и пластин обратного тока 7–9. Индуктивность электронного диода составляет ~40 нГн, что соизмеримо с индуктивностью вакуумных изоляторов формирующих линий в ускорителях, собранных по традиционной схеме.

Профиль катодов выбирался в соответствии с результатами двумерных численных расчетов параметров пучка с помощью специально разработанной программы. Эмиттирующая поверхность катодов изготавливалась из карботекстима (графитоволокнистого материала) с удельным сопротивлением $\sim (5 - 50) \times 10^{-2}$ Ом·м и покрывалась бархатом. Ширина эмиттирующей поверхности катодов составляла 120 мм, а ее полная площадь – 0.95 м². Межэлектродный зазор между эмиттирующей поверхностью и опорной структурой выводного окна был равен 60 мм.

Опорная структура содержала 18 окон. Геометрическая прозрачность системы вывода составляла ~75%. Вывод пучка в газ осуществлялся через титановую фольгу толщиной 40 мкм. Кювета имела диаметр 410 мм и объем 200 л. Максимальное давление газа равнялось 3.5 атм. Вакуумная система откачивалась двумя вакуум-

ными агрегатами АВДМ-250 с азотными ловушками со скоростью откачки 870 л/с, остаточное давления в диоде равнялось $(3 - 4) \times 10^{-5}$ Тор.

Резонатор лазера состоял из плоского зеркала с алюминиевым покрытием и плоскопараллельной кварцевой пластинки диаметром 420 мм из кварца КУ. Рабочая смесь (аргон, ксенон и HCl) приготавливалась непосредственно в лазерной камере.

Измерения энергии излучения проводились с помощью калориметра ОРНІR с измерительной головкой L30A-EX и калориметров ТПИ-2М с размером рабочей части 6 × 6 см, которые собирались в единый блок из 36 калориметров. Распределение энергии излучения по сечению выходного пучка лазера определялось по автографу на цветной фотобумаге AGFACOLOR, почернение которой при изменении плотности энергии излучения от 70 до 550 мДж/см² было практически линейным. Форма импульса излучения находилась с помощью вакуумного фотодиода ФЭК-22. Энерговклад в активную среду определялся по скачку давления в лазерном объеме с помощью датчика давления 6 МДХ-3Б. Однако при этом не учитывались потери энергии за счет образования ударных волн в зоне ввода пучка.

3. Экспериментальные результаты

Работа ускорителя описана в [12]. На рис.2 приведены осциллограммы напряжения, измеряемого на вакуумном диоде со стороны каждого из двух параллельно включенных линейных трансформаторов, и соответствующих токов в вакуумном диоде, осциллограмма тока с фотодиода, а также полная энергия, передаваемая в диод. Видно, что при зарядном напряжении 85 кВ напряжение на вакуумном диоде достигает около 550 кВ, полный ток составляет 320 кА (сумма двух токов, осциллограммы которых приведены на рис.2) и энергия, передаваемая от трансформатора в диод, равна 86 кДж. При зарядном напряжении 80 кВ напряжение на вакуумном диоде составляет около 500 кВ, полный ток достигает 280 кА и энергия, передаваемая в диод, равна 75 кДж. Вложенная в газ энергия увеличивается с ростом давления до 2.5 атм, а

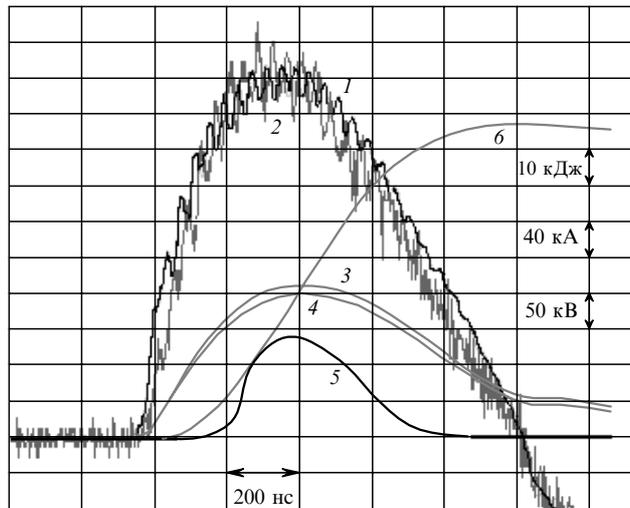


Рис.2. Осциллограммы импульсов напряжения (1, 2), импульсов тока трансформаторов (3, 4) и импульса излучения ХеСІ-лазера (5), а также зависимость от времени энергии, переданной в электронный диод (6).

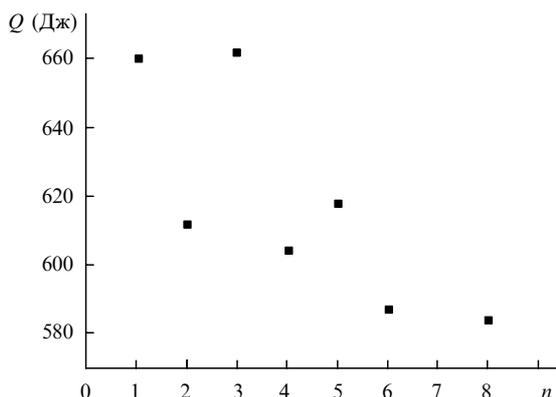


Рис.3. Зависимость энергии излучения лазера Q от номера импульса n для смеси состава $\text{Ar}:\text{Xe}:\text{HCl} = 1520:40:2$ Тор и зарядного напряжения 85 кВ.

затем при увеличении давления до 3.5 атм практически не меняется. Максимальная энергия, вкладываемая в газ электронным пучком, составляет ~ 19 кДж. Эффективность передачи энергии от первичного накопителя в газ равна $\sim 19\%$, что близко к эффективности, получаемой в традиционных ускорителях.

Отметим высокую надежность ускорителя и его стабильность. Нестабильность амплитуд импульсов напряжения и токов при постоянном зарядном напряжении составляет единицы процентов, форма импульсов характеризуется высокой воспроизводимостью. В процессе исследований не было ни одного случая разрушения фольги выводного окна под действием пучка. Длительность импульса излучения на полувысоте равнялась ~ 350 нс.

На рис.3 приведена зависимость энергии излучения в импульсе от номера импульса при измерениях на свежеприготовленной смеси состава $\text{Ar}:\text{Xe}:\text{HCl} = 1520:40:2$ Тор. Энергия излучения в импульсе достигала 660 Дж и медленно уменьшалась от импульса к импульсу из-за «ухода» молекул HCl на стенки лазерной камеры и появления примесей и пыли, «выбываемых» электронным пучком из фольги и стенок лазерной камеры. При уменьшении зарядного напряжения до 80 кВ энергия излучения уменьшилась более чем на 30% и ухудшилась однородность распределения плотности мощности излучения по сечению выходного пучка лазера. Увеличение давления смеси до 2.5 атм при зарядном напряжении 85 кВ также приводило к неравномерному распределению плотности энергии излучения по сечению выходного пучка лазера. В этом случае плотность энергии излучения около фольги превышала плотность энергии излучения на оси лазерной камеры на $\sim 35\%$. В оптимальных условиях (зарядное напряжение 85 кВ и давление смеси $\text{Ar}-\text{Xe}-\text{HCl}$ около 2 атм) распределение плотности энергии излучения по поперечному сечению лазерного пучка было весьма однородным (рис.4), и ее отклонения от среднего значения не превышали 10%. Радиальные ступеньки на рис.4 появились при стыковке отдельных частей автографа. Для проведения сканирования из-за больших размеров автографа лист фотобумаги был разрезан на четыре части.

Отметим, что доля лазерного ИК излучения на атомарных переходах ксенона в оптимальном режиме для данного XeCl-лазера при удельной мощности накачки

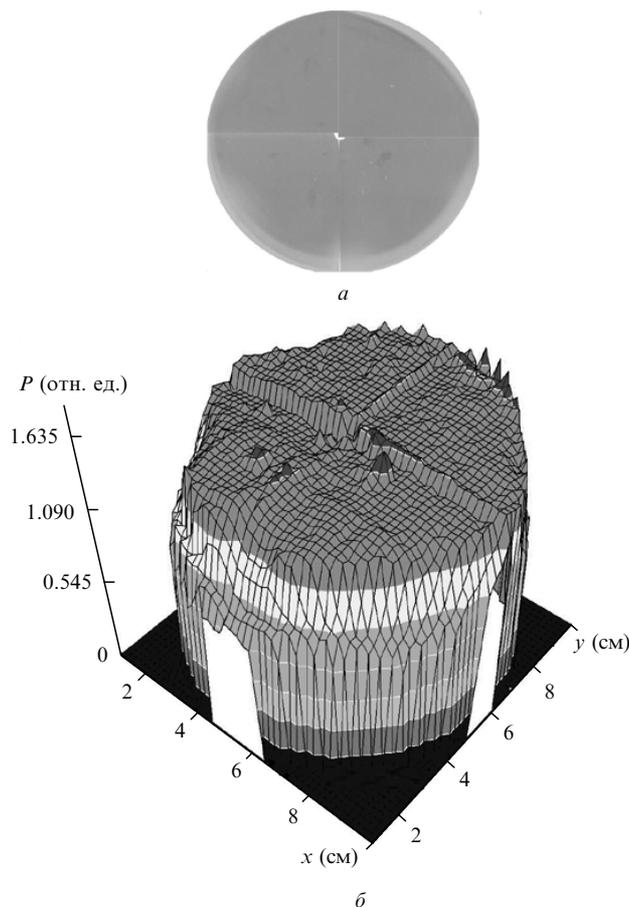


Рис.4. Распределение почернения фотобумаги (без проявления) за один импульс (a) и распределение восстановленной плотности энергии P лазерного излучения по сечению выходного пучка лазера для смеси состава $\text{Ar}:\text{Xe}:\text{HCl} = 1520:40:2$ Тор, зарядного напряжения 85 кВ и диаметра лазерного пучка 41 см.

~ 200 кВт/см³ составляла менее 1% от излучения на длине волны 308 нм. Известный эффект увеличения энергии ИК излучения на атомарных переходах ксенона в смеси $\text{Ar}-\text{Xe}-\text{HCl}$ при уменьшении мощности накачки наблюдается при удельном энергокладе менее 100 кВт/см³ [13, 14]. Даже в смеси $\text{Ar}-\text{Xe}$ при получении только ИК генерации в широкоапертурном лазере с активным объемом 600 л энергия излучения на атомарных переходах ксенона при удельной мощности накачки ~ 100 кВт/см³ не превысила 10 Дж, а КПД генерации составил менее 0.05% [10].

4. Заключение

Таким образом, создан широкоапертурный лазер с энергией излучения 650 Дж. Для накачки лазера подобного типа впервые применен ускоритель электронов с генератором импульсов на основе линейных трансформаторов. При напряжении на диоде ~ 550 кВ и полном токе диода 320 кА получен радиально сходящийся электронный пучок с током до 250 кА, сечением ~ 1.5 м² и длительностью импульса ~ 1 мкс, а также осуществлена его инжекция в кювету с газом объемом 200 л при давлении до 3.5 атм. По сравнению с традиционными электронными ускорителями с быстрыми накопителями в виде формирующих линий разработанный ускоритель более прост, надежен и компактен. Его эффективность

близка к энергетической эффективности традиционных ускорителей. Данный ускоритель может быть применен для накачки различных лазеров на плотных газах.

1. Shaw M.J. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3092**, 154 (1997).
2. Sethian J.D., Pawley C.J., Obenschain S.P., et al. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **25**, 221 (1997).
3. Owadano Y., Okuda I., Matsumoto Y., et al. *Fusion Eng. and Design*, **44**, 91 (1999).
4. Zvorykin V.D., Arlantsev S.V., Bakaev V.G., et al. *Laser and Particle Beams*, **19**, 609 (2001).
5. Rosocha L.A., Hanlon J.A., McLeond J., et al. *Fusion Technol.*, **11**, 576 (1987).
6. Mesyats G.A., Bychkov Yu.I., Kovalchuk V.M. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1628**, 70 (1992).
7. Абдуллин Э.Н., Бугаев С.П., Ефремов А.М. и др. *ИТЭ*, № 5, 138 (1993).
8. Абдуллин Э.Н., Горбачев В.И., Ефремов А.М. и др. *Квантовая электроника*, **20**, 652 (1993).
9. Mesyats G.A., Osipov V.V., Tarasenko V.F. *Pulsed Gas Lasers* (Washington: SPIE Press, 1995).
10. Ковальчук Б.М., Тарасенко В.Ф., Феденев А.В. *Квантовая электроника*, **23**, 504 (1996).
11. Ковальчук Б.М., Лосев В.Ф., Месяц Г.А., Тарасенко В.Ф. *Изв. вузов. Сер. Физика*, № 5, 12 (2000).
12. Kovalchuk V.M., Abdullin E.N., Grishin D.M., et al. *Proc. XIV Intern. Conf. on High-Power Particle Beams* (Albuquerque, New Mexico, USA, 2002, p. 239).
13. Бычков Ю.А., Иванов Н.Г., Коновалов И.Н., Лосев В.Ф., Тарасенко В.Ф., Тельминов Е.Н. *Квантовая электроника*, **10**, 1510 (1983).
14. Месяц Г.А., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **33**, 568 (2003).