

Мощные импульсные лазеры на плотных газах с накачкой разрядом и пучком электронов

В.Ф. Лосев, В.Ф. Тарасенко*

Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3

Поступила в редакцию 27.05.2009 г.

Приведены параметры генерации и описаны режимы накачки импульсных лазеров на молекулах и атомах различных газов. Наибольшие энергии излучения (> 1 кДж) в импульсе были получены на молекулах CO_2 при накачке разрядом, контролируемым пучком электронов, и XeCl^* при накачке пучком электронов.

Ключевые слова: импульсные лазеры, накачка пучком и разрядом, плотные газы; pulse lasers, pumping by beam and discharge, dense gases.

Введение

В настоящее время лазеры находят широкое применение в различных областях науки и техники, в том числе для изучения свойств атмосферы Земли [1, 2]. В настоящей статье приведены данные о наиболее перспективных лазерах на переходах атомов и молекул различных газов, которые были созданы в отделе сильноточной электроники, входившем до 1977 г. в состав Института оптики атмосферы СО РАН, и в Институте сильноточной электроники СО РАН. За прошедшие 40 лет были получены приоритетные результаты в различных областях. Во-первых, были определены механизмы генерации и особенности накачки ряда импульсных лазеров на плотных газах. Во-вторых, были созданы уникальные образцы лазеров, часть из которых была отмечена медалями и дипломами отечественных и международных выставок [1, 3–24]. Отметим также длительное и плодотворное сотрудничество в этом направлении коллективов Института сильноточной электроники СО РАН и Института оптики атмосферы СО РАН [25–30].

Эксимерные (эксиплексные) лазеры

Электроразрядные лазеры

Разработаны импульсно-периодические электроразрядные лазеры серии EL. Внешний вид лазера EL-500-100 приведен на рис. 1.

Лазеры работают на эксимерных молекулах в спектральном УФ-диапазоне с частотой повторения импульсов от единиц герц до 100 Гц, производят энергию излучения в импульсе длительностью 25–35 нс от 0,2 до 0,5 Дж и имеют близкие удельные параметры накачки [9–12, 23].

* Валерий Федорович Лосев (losev@ogl.hcei.tsc.ru); Виктор Федотович Тарасенко (VFT@loi.hcei.tsc.ru).



Рис. 1. Внешний вид эксимерного лазера EL-500-100

Для создания активной среды в лазерах используется двухконтурная электрическая схема. Емкость накопительного конденсатора C_1 варьируется в диапазоне 50–110 нФ, а емкость во втором разрядном контуре $C_2 = 30 \div 70$ нФ. Зарядка накопительного конденсатора осуществляется от компактного источника постоянного напряжения до $U_0 = 22 \div 25$ кВ. В качестве коммутатора во всех лазерах используется тиратрон ТПИЗ-10к/25. Индуктивность первого разрядного контура $L_1 = 150$ нГ позволяет эффективно перезаряжать первый конденсатор на второй за достаточно длительное время ~ 150 –180 нс и тем самым обеспечивает большой ресурс работы тиратрона.

При зарядке разрядной емкости C_2 осуществляется автоматическая ультрафиолетовая предыонизация разрядного промежутка. После импульсной зарядки емкости C_2 до напряжения, близкого к зарядному, пробивается лазерный промежуток и осуществляется накачка лазера. Компоновка лазерной камеры и разрядных конденсаторов C_2 выполняется таким образом, чтобы иметь минимальную индуктивность в разрядном контуре, которая составляла $L_2 = 3,5 \div 4$ нГ. Это обеспечивает большую скорость нарастания разрядного тока, что очень важно для зажигания однородного объемного разряда на всей длине разрядного промежутка. Емкости C_1 и C_2

состоят из конденсаторов TDK UHV-6A, 2700 пФ и 30 кВ.

Конструктивно искровые промежутки УФ-предыонизации располагаются на расстоянии 30 мм от оси разряда с шагом 20 мм. Зазоры в промежутках для разных лазеров устанавливаются в диапазоне 1–2 мм. Разрядные электроды имеют длину рабочей поверхности от 50 до 65 см. Межэлектродное расстояние в лазерах изменяется в диапазоне 22–28 мм. Рабочая поверхность электродов представляет собой сферу, радиус закругления которой изменяется от 4 до 6 см. При этом эффективная ширина разряда изменяется в диапазоне 0,5–1 см и определяется радиусом электродов, величиной разрядной емкости, ее напряжением и составом лазерной смеси.

Разрядная камера лазера изготавливается из капролона, внутренняя ее поверхность покрывается специальным защитным лаком. Камера соединяется с алюминиевым корпусом, в котором располагаются системы прокачки, охлаждения и фильтрации рабочей газовой смеси. Все элементы, расположенные в корпусе, и его внутренняя поверхность покрываются защитным слоем Al_2O_3 . Газовый поток в камере создается диаметральной вентилятором, который приводится в движение электродвигателем через магнитную муфту. Для охлаждения газа он проходит через радиаторы с водяным охлаждением. Для улавливания частиц, загрязняющих газовую смесь, в корпусе установлен электростатический фильтр. Ресурс лазерной смеси на одной закачке составляет более 10^6 имп.

Лазеры серии EL могут применяться для отжига полупроводников, получения нанопорошков и нанопленок, для запуска разрядников, обработки материалов, в микроэлектронике, фотохимии, медицине и т.д.

Широкоапертурные электроразрядные лазеры

Для мощной лазерной системы были разработаны электроразрядные лазеры серии «Фотон» с энергией в импульсе от 1 до 10 Дж [10, 14, 19].

Для возбуждения лазера Фотон-1 (рис. 2) используется электрическая схема с индуктивным накопителем энергии и полупроводниковым прерывателем тока. В такой схеме высоковольтный импульс с коротким передним фронтом, необходимый для зажигания разряда, формируется за счет обострительной емкости $C = 3,2$ нФ, которая заряжается от индуктивного накопителя энергии с 12 SOS-диодами. Предыонизация разряда осуществляется при зарядке обострительных конденсаторов за счет излучения 90 искровых промежутков, расположенных равномерно с двух сторон анода. Основная энергия в активную среду вкладывается при пониженном оптимальном напряжении от накопительной емкости 550 нФ, которая состоит из керамических конденсаторов K15-10. Резонатор лазера состоит из зеркал с диэлектрическим покрытием, имеющих коэффициенты отражения 100 и 20 или 7%. На смеси $Ne : Xe : HCl = 1520 : 10 : 1$ при давлении 2 атм мак-

симальная энергия генерации лазера превышала 1,5 Дж при длительности импульса 300 нс и полном КПД 1,4%.



Рис. 2. Эксимерный лазер Фотон-1

Два других электроразрядных лазера, Фотон-2 и Фотон-3, имеют практически одинаковую схему накачки и конструктивное исполнение. В этих лазерах используется рентгеновская предыонизация разрядного промежутка. Внешний вид одного из них (Фотон-3) приведен на рис. 3.

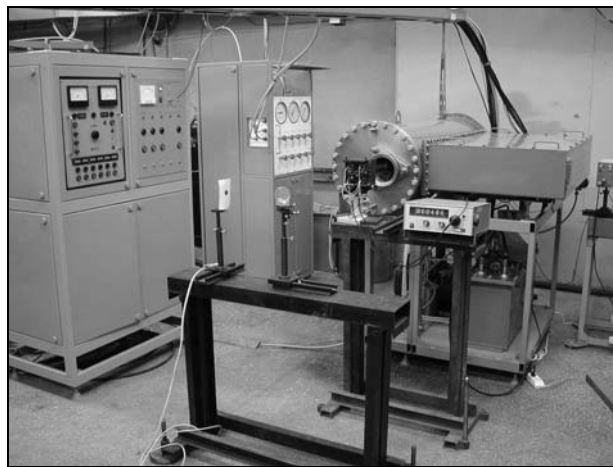


Рис. 3. ХеСl-лазер Фотон-3

Лазеры состоят из трех основных блоков, включающих газоразрядную камеру с генератором накачки, электрический и пневматический пульты управления. В камере размещаются вакуумный диод источника мягкого рентгеновского излучения, электроды, образующие разрядный промежуток лазера, и изолятор ввода высокого напряжения. Электроды изготовлены из нержавеющей стали. Расстояние между электродами составляет 5,4 и 9 см, длина электродов 80 и 100 см для лазеров Фотон-2 и Фотон-3 соответственно.

Для ввода рентгеновского излучения в разрядный промежуток в электроде имеется окно, 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 обеспечивает 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 полосок фольгированного стеклотекстолита. Полоски закреплялись на разделительной решетке, которая закрывалась 40-мкм титановой фольгой для герметизации вакуумного диода и служила для вывода из него рентгеновского излучения. В качестве анода вакуумного диода использовалась танталовая фольга. Откачка вакуумного диода производилась паромасляным насосом до давления остаточного газа $\sim 10^{-4}$ мм рт. ст.

Питание вакуумного диода осуществлялось от трехступенчатого генератора Аркадьева—Маркса с ударной емкостью 15 нФ. Генератор соединялся с вакуумным диодом высоковольтным кабелем марки КВИ-120. Импульс напряжения 50–55 кВ длительностью 700 нс положительной полярности подавался на анод. Доза рентгеновского излучения в области катода разрядного промежутка составляла ~ 20 –30 мР.

Основными элементами генератора накачки лазеров являются накопительная емкость, коммутатор и обострительная емкость. Накопительная емкость C_L состоит из двух (Фотон-2) или трех (Фотон-3) параллельно соединенных линий марки ФЛ-300. Линия имеет электрическую длину 300 нс, емкость 150 нФ, волновое сопротивление 1 Ом. Импульсная зарядка линий производится от емкости C_H марки ИК-100, которая через кабель КВИ-120 соединяется с линиями. Емкость C_H может заряжаться до напряжения 40–65 кВ. Обостряющие емкости $C_2 = 4,9$ нФ (Фотон-2) и 6,9 нФ (Фотон-3), ответственные за формирование объемного разряда в разрядном промежутке, собраны из керамических конденсаторов марки КВИ-3 (20 кВ, 680 пФ). В качестве малоиндуктивного коммутатора используется многоканальный рельсовый разрядник.

В режиме генератора резонатор лазера образуется внешним диэлектрическим зеркалом с коэффициентом отражения 97% на длине волны 308 нм и окном лазерной камеры. Лазерная смесь состоит из газов Ne/Xe/HCl с давлением 3,5–4 атм.

В режиме свободной генерации лазеры Фотон-2 и Фотон-3 генерируют импульсы излучения длительностью 250–300 нс и энергией до 3,5 и 10 Дж соответственно.

Лазеры с накачкой электронным пучком

Для получения в эксимерных лазерах импульса генерации с энергией 100 Дж и более был разработан ряд лазеров с накачкой электронным пучком [3, 4, 6, 8, 13, 14, 17, 18]. Для получения однородной накачки электронный пучок инжектировался в ла-

зерную камеру с двух, четырех или шести сторон. К таким лазерам относятся УФЛ-100 (150 Дж) [3], УФЛ-100М (200 Дж) [4], Фотон-4 (120 Дж) [13], Фотон-5 (650 Дж) [6, 14] и ДМ (2000 Дж) [8]. Данные лазеры использовались в основном как усилители в лазерных системах.

Используемые в лазерах ускорители электронов были созданы на основе импульсных генераторов, построенных по двум принципиально разным схемам. В одном случае это был специально разработанный в ИСЭ СО РАН генератор Аркадьева—Маркса с вакуумной изоляцией, во втором — линейный трансформатор, нагружаемый на вакуумный диод.

В лазере ДМ накачка осуществлялась с шести сторон от 12 ускорителей. Объем активной среды составил порядка 600 л (диаметр 60 см и длина 2 м). Формирование электронных пучков производилось в шести магнитоизолированных диодах. Питание каждого диода осуществлялось от двух 8-ступенчатых генераторов Маркса с вакуумной изоляцией. Окна лазерной камеры, имеющей объем 980 л, служили одновременно зеркалами резонатора. Выходное окно резонатора было изготовлено из плавленого кварца, глухое окно имело алюминиевое покрытие. Вывод лазерного излучения осуществлялся по вертикальной оси вниз от выходного окна.

На данной установке была исследована зависимость характеристик генерации ХеСl-лазера от давления рабочей смеси, ее состава, зарядного напряжения, числа включаемых ГИНов. Также снималось распределение энергии излучения по сечению выходного пучка. При увеличении рабочего давления от 1 до 1,5 атм энергия излучения возрастала на 30%, затем при изменении давления от 1,5 до 2 атм повышалась всего на 20%. Это обусловлено тем, что при $p = 1,5$ атм основная часть энергии электронного пучка вкладывается в рабочую смесь и противоположной стенке достигает относительно малая часть электронного пучка. Соответственно при увеличении давления от 1,5 до 2 атм энерговклад в рабочую смесь меняется незначительно. Максимальная энергия излучения при $U_0 = 85$ кВ и смеси Ar : Хе : HCl = 750 : 10 : 1 составила 1,6 Дж при КПД от вложенной в рабочую смесь энергии 3,8%. Длительность импульса излучения при этом составляла ~ 250 нс, его запаздывание относительно начала импульса тока пучка ~ 100 нс. При увеличении зарядного напряжения до 95 кВ в смеси Ar : Хе : HCl = 750 : 25 : 1 при давлении 2 атм энергия излучения составила 1,9 кДж.

Лазеры на атомарных переходах ксенона, неона и криптона

Лазеры на атомарных переходах инертных газов в 70–80-е гг. XX в. привлекали к себе пристальное внимание, причем наибольший интерес был уделен ИК-лазеру на атомарных переходах ксенона и пеннинговскому плазменному лазеру на переходах неона. Эти два лазера имеют низкие пороги генерации и эффективно работают при высоком давлении активной

среды. Порог генерации у лазера на атомарных переходах ксенона является одним из наиболее низких для газовых лазеров высокого давления. В конце 80-х гг. интенсивно развивалась идея построения мощного лазера с активной зоной, пространственно совмещенной с активной зоной ядерного реактора. Это открывало возможность напрямую преобразовывать энергию ядерных реакций в лазерное излучение (реактор-лазер).

Для реализации этой идеи широко проводились работы по оптимизации известных и поиску новых активных сред, накачиваемых ядерными осколками и пучком электронов. Низкопороговые активные среды (удельная энергия накачки $\leq 100 \text{ Вт/см}^3$) позволяют увеличивать активный объем (создавать широкоапертурные лазеры) и работают в импульсно-периодическом режиме. Кроме того, позволяют получать импульсы генерации большой длительности (до секунд) при реально достижимых энерговкладах.

Для моделирования условий накачки реактора использовались ускорители электронов с плазменным катодом, позволяющие изменять длительность и плотность тока пучка в широких пределах. Были изучены процессы, определяющие эффективность каждого из лазеров. Получены энергии излучения в ксеноне на $\lambda = 1,73 \text{ мкм}$ 5 Дж с кпд 2%, в неоне на $\lambda = 585,3 \text{ нм}$ 0,5 Дж с кпд $\sim 0,3\%$. Осуществлен импульсно-периодический режим работы ксенонового и неоновых лазеров с частотами до 50 Гц. При использовании широкоапертурного лазера с активным объемом 600 л получена энергия излучения 100 Дж на $\lambda = 1,73 \text{ мкм}$ с кпд $\sim 2\%$ и 50 Дж на $\lambda = 2,03 \text{ мкм}$ с кпд $\sim 1\%$.

СО₂-лазеры высокого давления

Способ накачки газовых лазеров разрядом, контролируемым или инициируемым пучком электронов, широко использовался в лазерной технике. Благодаря этому способу были созданы широкоапертурные лазеры с большой энергией излучения в импульсе, сформированы объемные разряды при высоких давлениях рабочей смеси, получены высокие удельные энерговклады. Инжекция пучка электронов в газ обеспечивала формирование объемного импульсного разряда в СО₂-лазерах и усилителях высокого давления.

В ИСЭ СО РАН были созданы три широкоапертурных СО₂-лазера и СО₂-лазер высокого давления с плавной перестройкой частоты. Кроме того, был создан импульсно-периодический СО₂-лазер с прокачкой рабочей смеси [15]. Наибольшая энергия излучения в этих лазерах была получена в СО₂-лазере с активным объемом 270 л и составила в импульсе 7,5 кДж. Максимальная удельная энергия излучения при активном объеме 12 л и давлении смеси 2 атм составила 150 Дж/л. Наибольшая средняя мощность излучения была получена в режиме пачек импульсов и при кратковременных включениях достигала 1 кВт. Данные результаты были достигнуты благодаря тесному сотрудничеству двух академических

институтов – ИСЭ СО РАН и ИОФ РАН и достижениям в области сильноточной электроники.

HF- и DF-лазеры, возбуждаемые нецепными химическими реакциями

Реализованы два режима работы электроразрядного HF-лазера с высоким кпд (от вложенной энергии $\sim 10\%$) при накачке от емкостного и индуктивного накопителей энергии. При накачке от генератора с емкостным накопителем энергии максимальные кпд достигаются при относительно малых зарядных напряжениях, когда остаточное напряжение после окончания разряда и напряжение на плазме во время накачки максимальны. Для данного режима характерны относительно малые удельные энерговклады [0,1–0,15 кДж/(л·атм)] и удельные энергии излучения [$\sim 15 \text{ Дж/(л·атм)}$], а наибольшие эффективности достигаются в смесях с водородом. Общий кпд лазера в этом режиме может быть существенно увеличен при использовании генератора, например на основе линии с распределенными параметрами, который имеет волновое сопротивление, равное сопротивлению разрядной плазмы во время накачки и полностью передает энергию в активный объем. Данный режим перспективен для создания импульсно-периодических лазеров.

При накачке от генератора с индуктивным накопителем энергии высокие кпд реализуются в более широких диапазонах зарядного напряжения и энерговклада, что позволило получить удельную энергию генерации до 5,5 Дж/л [$\sim 100 \text{ Дж/(л·атм)}$] при кпд $\sim 10\%$. В этом режиме наибольшие эффективности также достигаются в смесях с водородом. Максимальные удельные энергии излучения были реализованы при использовании в лазерах емкостных накопителей с минимальной индуктивностью разрядного контура, что позволяло запасать и вкладывать в рабочую смесь в данных условиях большие энергии.

Сравнение максимальных энергий в смесях с водородом и углеводородами показало, что наибольшая энергия излучения была получена в смеси и с водородом, и с углеводородом. При увеличении длительности импульса накачки все большая часть энергии вкладывалась в рабочую смесь при более низких значениях параметра E/p и существенно уменьшалось остаточное напряжение. Эффективность генерации от вложенной энергии при этом уменьшилась (до 4,7%) и существенно не отличалась от эффективности, рассчитанной относительно запасаемой в конденсаторе энергии (до 4,5%). Для достижения максимальных энергетических параметров лазера необходимо использовать как предьонизацию, так и профилированные электроды. Особенно это важно при создании лазеров и лазерных систем с малой расходимостью излучения.

Проведены также исследования HF-лазеров с накачкой нецепной химической реакцией, инициируемой радиально сходящимся и планарным пучками электронов. Проанализированы основные каналы образования колебательно-возбужденных молекул HF.

Показано, что за счет образования атомарного и молекулярного фтора при воздействии электронного пучка на рабочую смесь достигаются высокие КПД нецепного HF-лазера с накачкой электронным пучком. Измерено распределение плотности энергии излучения в выходном пучке широкоапертурного лазера. В смеси $SF_6 : H_2 = 8 : 1$ при давлении 1,1 атм с активного объема ~ 30 л получена энергия излучения ~ 200 Дж при эффективности относительно вложенной энергии $\sim 11\%$. Показано, что добавки буферных газов неона или аргона улучшают однородность распределения энергии излучения в выходном пучке HF-лазера, накачиваемого нецепной химической реакцией, инициируемой пучком электронов, а также увеличивают энергию излучения.

Азотные лазеры

Разработан компактный частотный азотный лазер с поперечным разрядом [20] (рис. 4).



Рис. 4. Внешний вид азотного лазера NL-1-100

Габариты лазера составляют $60 \times 42 \times 23$ см, масса — 23 кг. Лазерное излучение имеет следующие характеристики: размер пучка 4×14 мм, энергия в импульсе до 1,5 мДж, длительность импульса излучения 4–6 нс, частота повторения импульсов до 100 Гц. Лазерная смесь N_2 и He (при давлении 1,25 атм). Рабочий газ прокачивается диаметральной вентилятором, установленным в рабочей камере лазера. Лазер используется в системе лазерного спектроанализатора для экспресс-контроля состава различных материалов и для диагностических исследований в медицине. Кроме того, он может применяться для накачки лазеров на красителях, в фотохимии, спектроскопии, медицине, биологии.

Отметим, что в результате исследований азотного лазера с накачкой самостоятельным разрядом

была получена энергия излучения в импульсе более 100 мДж и реализован двухпиковый режим генерации [21, 22].

Заключение

Импульсные лазеры на плотных газах позволяют получать излучение в различных спектральных диапазонах и находят широкое практическое применение. Наибольшее распространение из лазеров, описанных выше, получили лазеры на углекислом газе и эксимерные (эксиплексные) лазеры. Вместе с тем новые исследования в области лазерной физики в настоящее время в основном направлены на освоение терагерцевого диапазона длин волн и на создание лазеров и лазерных систем с фемтосекундной длительностью импульса. Большое внимание уделяется развитию волоконных и полупроводниковых лазеров. В Институте сильноточной электроники СО РАН планируется продолжить традиционные исследования лазеров, а также развивать новые направления. В частности, начаты работы по созданию лазерной системы с фемтосекундной длительностью импульса [24]. Планируются работы по созданию лазеров терагерцевого диапазона.

Авторы благодарят коллективы лабораторий газовых лазеров и оптических излучений, а также других отделов и лабораторий Института сильноточной электроники СО РАН за сотрудничество при получении представленных в данной статье результатов.

1. *Mesyats G.A., Osipov V.V., Tarasenko V.F.* Pulsed gas lasers. USA, Washington: SPIE PRESS, 1995.
2. *Endo I., Walter R.F.* Gas lasers. N.Y.: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2007.
3. *Бычков Ю.И., Иванов Н.Г., Лосев В.Ф., Месяц Г.А.* ХеСl-лазер с энергией генерации 150 Дж // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 6. С. 566–569.
4. *Иванов Н.Г., Лосев В.Ф., Наац Э.И., Рыков В.В., Турчановский И.Ю., Ястремский А.Г.* ХеСl-лазер с энергией генерации 200 Дж // Квант. электрон. 1997. Т. 24. № 8. С. 688–690.
5. *Panchenko A.N., Orlovskii V.M., Tarasenko V.F.* Efficient E-Beam and Discharge Initiated Nonchain HF (DF) Lasers // Laser and Particle Beams. 2003. V. 21. N 2. P. 223–232.
6. *Абдуллин Э.Н., Гришин Д.М., Губанов В.П., Зорин В.Б., Ким А.А., Ковальчук Б.М., Кулмяк Е.В., Лио Д., Морозов А.В., Скаун В.С., Степченко А.С., Тарасенко В.Ф., Толкачев В.С., Цой Н.В., Щанин П.М.* ХеСl-лазер с энергией излучения 650 Дж // Квант. электрон. 2004. Т. 34. № 3. С. 199–202.
7. *Панченко А.Н., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф.* Спектральные характеристики нецепных электроразрядных HF- и DF-лазеров в эффективных режимах возбуждения // Квант. электрон. 2004. Т. 34. № 4. С. 320–324.
8. *Бугаев С.П., Абдуллин Э.Н., Зорин В.Б., Ковальчук Б.М., Логинов С.В., Месяц Г.А., Скаун В.С., Тарасенко В.Ф., Толкачев В.С., Щанин П.М.* Широкоапертурный ХеСl-лазер с энергией излучения ~ 2 кДж // Квант. электрон. 2004. Т. 34. № 9. С. 801–804.
9. *Панченко Ю.Н., Иванов Н.Г., Лосев В.Ф.* Особенности формирования активной среды в короткоимпульсном электроразрядном ХеСl-лазере // Квант. электрон. 2005. Т. 35. № 9. С. 618–620.

10. Коновалов И.Н., Лосев В.Ф., Панченко Ю.Н., Иванов Н.Г., Сухов М.Ю. Электроразрядный XeCl-лазер с энергией генерации 10 Дж и длительностью импульса излучения 300 нс // Квант. электрон. 2005. Т. 35. № 3. С. 237–240.
11. Vyckov Yu.I., Losev V.F., Panchenko Yu.N., Yastremsky A.G., Yampolskaya S.A. Research of short pulse discharge XeCl laser // Proc. SPIE. 2005. V. 5777. P. 558–561.
12. Vyckov Yu.I., Losev V.F., Panchenko Yu.N., Yastremsky A.G. Efficiency of discharge XeCl laser with 30 ns radiation pulse duration // Proc. SPIE. 2006. V. 6053. P. 266–269.
13. Ivanov N.G., Losev V.F. Compact XeCl laser with 120 J output radiation pulse // Proc. SPIE. 2006. V. 6263. P. 44–47.
14. Лосев В.Ф., Ковальчук Б.М., Тарасенко В.Ф., Панченко Ю.Н., Иванов Н.Г., Коновалов И.Н., Абдуллин Э.Н., Панченко А.Н., Лю Ж., Зорин В.Б., Скакун В.С., Губанов В.П., Степченко А.С., Толкачев В.С. Широкоапертурная эксимерная лазерная система // Квант. электрон. 2006. Т. 36. № 1. С. 1–6.
15. Kovalchuk B.M., Mesyats G.A., Orlovskii V.M., Tarasenko V.F. Wide-aperture CO₂ lasers pumped by electron-beam-controlled discharge // Laser Phys. 2006. V. 16. N 1. P. 13–22.
16. Koval N.N., Mesyats G.A., Skakun V.S., Tarasenko V.F. Low-threshold gas lasers pumped by plasma-cathode accelerators // Laser Phys. 2006. V. 16. N 1. P. 52–63.
17. Abdullin E.N., Ivanov N.G., Kovalchuk B.M., Losev V.F., Mesyats G.A., Skakun V.S., Tarasenko V.F., Turchanovskiy I.Yu., Yastremsky A.G. High-power wide-aperture electron-beam-pumped lasers on dense gases // Laser Phys. 2006. V. 16. N 1. P. 89–103.
18. Abdullin E.N., Ivanov N.G., Kovalchuk B.M., Kononov I.N., Losev V.F., Panchenko A.N., Panchenko Yu.N., Skakun V.S., Tarasenko V.F., Yastremsky A. High-power excimer laser sistem // Laser Phys. 2006. V. 16. N 1. P. 104–115.
19. Panchenko A.N., Tarasenko V.F. Pulsed gas lasers pumped by generators with inductive energy storage // Laser Phys. 2006. V. 16. N 1. P. 23–39.
20. Лубенко Д.М., Иванов Н.Г., Лопатин И.В., Лосев В.Ф. Применение азотного лазера для микроспектрального анализа вещества // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21. № 8. С. 732–736.
21. Панченко А.Н., Сулов А.И., Тарасенко В.Ф., Тельминов А.Е. Лазер на смесях азота с электроотрицательными газами, накачиваемый поперечным разрядом от генератора с индуктивным накопителем энергии. Теория и эксперимент // Квант. электрон. 2007. Т. 37. № 5. С. 433–439.
22. Коновалов И.Н., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф., Тельминов А.Е. Широкоапертурный электроразрядный азотный лазер // Квант. электрон. 2007. Т. 37. № 7. С. 623–627.
23. Панченко Ю.Н., Лосев В.Ф., Иванов Н.Г., Коновалов И.Н. Эффективные импульсно-периодические эксимерные лазеры // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21. № 8. С. 674–677.
24. Зворыкин В.Д., Ионин А.А., Конященко А.В., Ковальчук Б.М., Крохин О.Н., Лосев В.Ф., Месяц Г.А., Михеев Л.Д., Молчанов А.Г., Новоселов Ю.Н., Селезнев Л.В., Сидицын Д.В., Стародуб А.Н., Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И. Мощные фемтосекундные гибридные лазерные системы с широкоапертурными усилителями на основе газовых лазеров. 2. Гибридная фемтосекундная XeF (C–A) лазерная система // Изв. ТПУ. 2008. Т. 312. № 2. С. 121–125.
25. Кирилов А.Е., Кухарев В.Н., Солдатов А.Н., Тарасенко В.Ф. ОКГ на парах свинца // Изв. вузов. Физ. 1977. № 10. С. 146–149.
26. Верховский В.С., Клишкин В.М., Прокопьев В.Е., Тарасенко В.Ф., Сокоиков В.Г., Федоров А.И. Исследование ВКР-излучения эксимерных лазеров на электронных переходах атомов металлов // Квант. электрон. 1982. Т. 9. № 11. С. 2151–2155.
27. Евтушенко Г.С., Мельченко С.В., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. Преобразование излучения KrCl- и XeCl-лазеров в видимый диапазон спектра при ВКР в парах свинца // Квант. электрон. 1990. Т. 17. № 4. С. 451–452.
28. Мельченко С.В., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф., Евтушенко Г.С. Влияние оптического пробоя на ВКР-излучение XeCl в газах и парах // Оптика атмосфер. 1990. Т. 3. № 5. С. 518–522.
29. Евтушенко Г.С., Копылова Т.Н., Солдатов А.Н., Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И., Янчарина А.М. IV Междунар. конф. по импульсным лазерам на переходах атомов и молекул (AMPL'99) // Оптика атмосфер. и океана. 2000. Т. 13. № 3. С. 223–231.
30. Евтушенко Г.С., Клишкин В.М., Копылова Т.Н., Солдатов А.Н., Янчарина А.М., Тарасенко В.Ф. Современные тенденции развития импульсных лазеров (по материалам V Международной конференции «Импульсные лазеры на переходах атомов и молекул» (AMPL'01)) // Оптика атмосфер. и океана. 2001. Т. 14. № 11. С. 985–990.

V.F. Losev, V.F. Tarasenko. High-power pulse lasers on dense gases, pumped by the discharge and electron beam.

The parameters of generation and pump modes of the pulse lasers on molecules and atoms of various gases are described. The greatest pulse radiation energy (> 1 kJ) have been obtained for CO₂ molecules at pumping by a controllable e-beam discharge and for XeCl* molecules at pumping by e-beam.