

Мощные импульсные лазеры на плотных газах

Г.А.Месяц, В.Ф.Тарасенко

Изложены результаты работ по импульсным лазерам на плотных газах, соавтором которых был А.М.Прохоров, и проанализирована значимость этих результатов для дальнейшего развития мощных газовых лазеров. Основное внимание уделено исследованиям CO₂-лазеров с накачкой разрядом, контролируемым пучком электронов, лазера на смеси аргона с азотом, накачиваемого электронным пучком, а также эксиплексных лазеров на галогенидах благородных газов.

Ключевые слова: импульсные лазеры на плотных газах, CO₂-лазер, эксиплексные лазеры.

1. Введение

Развитие квантовой электроники в 70–80-е гг. прошлого века во многом связано с созданием и развитием мощных импульсных лазеров на плотных газах с накачкой разрядом, формируемым электронным пучком, самостоятельным разрядом и электронным пучком. Большую роль в инициировании и проведении этих исследований сыграл А.М.Прохоров, который являлся также соавтором целого ряда пионерских работ [1–19]. Велика роль А.М.Прохорова в организации тесного сотрудничества ученых Института сильноточной электроники СО РАН (ИСЭ СО РАН, Томск) и Института общей физики РАН (ИОФ РАН, Москва) в деле создания мощных импульсных газовых лазеров. Это сотрудничество, начавшееся в 1973 г., продолжается и по сей день [1–38].

В рамках этого сотрудничества выполнены исследования CO₂-лазеров с накачкой разрядом, контролируемым пучком электронов [1, 2, 4, 7, 10, 11], лазера на смеси аргона с азотом, накачиваемого электронным пучком [3], эксиплексных лазеров на галогенидах благородных газов [5, 6, 9, 11, 17]. А.М.Прохоров стимулировал работы по моделированию с помощью электронного пучка условий ядерной накачки от импульсных реакторов [18], а также работы, посвященные исследованиям газовых разрядов для лазеров [13–17] и взаимодействию лазерного излучения с веществом [8, 12, 19]. Мощные газовые импульсные лазеры в настоящее время широко используются в различных областях науки и техники (см. книги и обзоры [39–55]).

В данном обзоре кратко изложены основные результаты исследований импульсных лазеров на плотных газах, полученные в работах, соавтором которых был Александр Михайлович, и проанализирована их значимость.

Г.А.Месяц. Президиум РАН, Россия, 117901 Москва, Ленинский просп., 14

В.Ф.Тарасенко. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, Академический просп., 4;
e-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 28 августа 2002 г.

2. Широкоапертурные CO₂-лазеры с накачкой разрядом, контролируемым пучком электронов

Способ накачки газовых лазеров повышенного давления разрядом, контролируемым или инициируемым пучком электронов, позволяет создавать широкоапертурные лазеры с большой энергией в импульсе. Вначале инъекция пучка электронов в газ была использована для точного запуска высоковольтных разрядников [56], а затем и для формирования объемного разряда в CO₂-лазерах высокого давления [57, 58]. Первый CO₂-лазер [57], в котором электронный пучок использовался для стабилизации разряда, мог работать при давлении до 15 атм, а первый CO₂-усилитель [58] имел активный объем 1.5 л. Отметим, что лазеры с накачкой разрядом, инициируемым или контролируемым электронным пучком, ввиду их перспективности интенсивно исследовались многими научными группами как в Советском Союзе, так и за рубежом. Уже в 1973 г. появились сообщения о создании лазеров с энергией излучения в импульсе 200 Дж [59] и 1000 Дж [60]. Очень быстро были созданы лазерные системы с большой энергией в наносекундных импульсах (180 Дж [61], 1 кДж [62] и 9 кДж [63]). В данном разделе рассмотрены созданные сотрудниками ИСЭ СО РАН и ИОФ РАН три широкоапертурных CO₂-лазера и CO₂-лазер высокого давления, на которых были получены большие энергии излучения и высокая эффективность. Создание этих лазеров стало возможным благодаря финансированию разработок в ИСЭ СО РАН за счет хоздоговоров с ИОФ РАН.

2.1. Импульсный CO₂-лазер с энергией излучения 500 Дж [1]

Испытания данного лазера были закончены в конце 1974 г. в ИОФ РАН. Впервые были получены предельные КПД для импульсных CO₂-лазеров атмосферного давления. Конструкция основных узлов лазера показана на рис. 1. Основными узлами являются ускоритель электронов и газовая камера с резонатором. Корпус 1 вакуумного диода ускорителя электронов выполнен из нержавеющей стали. В диоде использован многоострыйный хо-

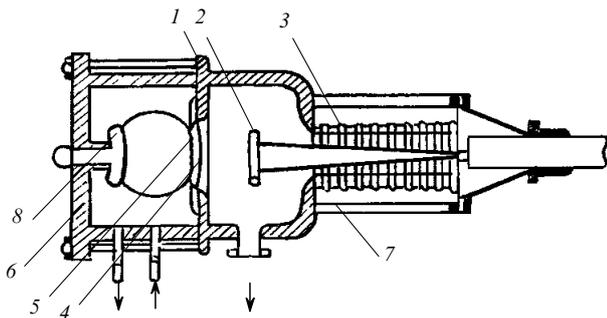


Рис.1. Общий вид основных узлов лазера с энергией излучения 500 Дж:

1 – корпус вакуумного диода; 2 – многоострый холодный катод; 3 – изолятор; 4 – титановая фольга; 5 – решетка; 6 – газовая кювета; 7 – металлический стакан; 8 – анод.

лодный катод 2, работающий в режиме взрывной эмиссии [64, 65]. Рабочая площадь катода равнялась 980×80 мм. Эмиттирующие острия высотой 5 мм с радиусом закругления 20 мкм были расположены равномерно по всей площади с шагом 4 мм. Отклонение плотности тока от среднего значения по всему сечению пучка не превышало 10 %.

Вывод электронного пучка осуществлялся через окно размером 1020×120 мм в корпусе вакуумного диода. Окно вакуумно-плотно закрывалось титановой фольгой 4 толщиной 50 мкм. Площадь поперечного сечения пучка при выводе из фольги составляла 1000×100 мм, расстояние между фольгой и катодом было равно 80 мм. В диоде использовался секционированный изолятор 3, который помещался в металлический стакан 7. Пространство между внутренней стенкой стакана и изолятором заполнялось азотом до давления 15 атм. Внутренняя полость изолятора была обращена к вакуумному диоду, давление в котором составляло $\sim 10^{-4}$ Тор.

Имелась возможность изменять параметры тока электронного пучка (длительность $t_b = 0.5 - 1.5$ мкс, плотность тока $j_b = 0.3 - 1.4$ А/см²). Импульс тока электронного пучка имел форму, близкую к прямоугольной. Средняя энергия электронов пучка в течение импульса оставалась постоянной и составляла 200 кэВ, что обеспечивало равномерную ионизацию газового объема глубиной 10 см при давлении 1 атм.

Корпус 6 газовой кюветы, выполненной из оргстекла, имел по торцам окна для крепления и юстировки зеркал оптического резонатора. Использование диэлектрической газовой кюветы позволяло существенно упростить конструкцию лазера. Вблизи фольги устанавливалась антидуговая предохранительная решетка 5. Аноду 8 в газовой кювете была придана форма, предотвращающая коронирование.

Энергия для возбуждения активного объема газовой кюветы запасалась в батарее малоиндуктивных конденсаторов емкостью до 8 мкФ. Зарядка конденсаторов осуществлялась от источника постоянного напряжения до 60 кВ. В процессе работы регистрировалось начальное и остаточное (после протекания разряда) напряжение на конденсаторной батарее, что позволяло с достаточной точностью определять энергию накачки.

При анализе работы CO₂-лазера существенным является знание вклада энергии в активную среду. Энергия, вводимая в единицу объема газовой среды, определяется из следующего соотношения:

$$W_g = \frac{Cd^2 E_0^2}{2V} \left\{ 1 - \exp \left[-2 \left(\frac{\psi}{\beta} \right)^{1/2} \frac{\mu V e t_b}{C d^2} \right] \right\}, \quad (1)$$

где $\psi = j_b N_0 p \langle \sigma \rangle e^{-1}$; C – емкость конденсаторной батареи; d – расстояние между катодом и анодом; E_0 – напряженность электрического поля; $V = dS$ – объем газовой кюветы; β – коэффициент рекомбинации; e – заряд электрона; $\langle \sigma \rangle$ – сечение ионизации; p – давление газа; $N_0 = 2.7 \times 10^{19}$ см⁻³·атм⁻¹.

Второй член в скобках отражает долю энергии, оставшуюся в конденсаторной батарее после окончания инжекции электронного пучка. Обозначим этот член через K . Оптимальным значением следует считать $K = 0.5 - 0.7$. При больших K в батарее останется значительный запас неиспользованной энергии, при меньших – напряженность поля в течение импульса будет снижаться, что приведет к ухудшению условий генерации и снижению КПД. С учетом сказанного из (1) получаем соотношение

$$\frac{V \sqrt{\psi}}{Cd^2} = \frac{\ln(1/k)}{2t_b e \mu} \sqrt{\beta}, \quad (2)$$

которое оказывается весьма полезным для установления связи между параметрами электронного пучка, свойствами газа и размерами кюветы.

Все эксперименты проводились со смесью CO₂:N₂:He = 1:1:3, для которой $\beta = 10^{-7}$ см³·с⁻¹·В⁻¹. В резонаторе лазера в качестве выходного зеркала использовалась плоскопараллельная пластина из КРС диаметром 150 мм с коэффициентом отражения от одной грани 17 %. Глухим зеркалом служила кварцевая подложка с золотым напылением. Это позволило создать резонатор с большой апертурой и высокой оптической прочностью. Оптические элементы резонатора в процессе работы длительное время выдерживали без разрушения лучевую нагрузку до 7.5 Дж/см². Радиус кривизны глухого зеркала составлял 5 м. Энергия излучения измерялась путем сканирования калориметром ИКТ-1М без сапфирового окна в приемной головке по поперечному сечению лазерного пучка. Результаты соответствующего пересчета совпадали с результатами контрольных опытов, выполненных с применением расщепителей пучка излучения, изготовленных на основе тонких пленок из лавсана или полиэтилена. Форма импульса излучения регистрировалась фотоприемником Ge-Zn-Sb (77 К) с временем разрешения 1 нс. Длительность импульса излучения на полувывоте составляла 1 мкс. Амплитуда и форма импульса излучения оставались практически постоянными по всему поперечному сечению лазерного пучка, что свидетельствует о высокой степени однородности возбуждения активной среды лазера.

Зависимости энергии излучения и КПД энерговклада от напряженности поля приведены на рис.2. Видно, что при атмосферном давлении в смеси CO₂:N₂:He = 1:1:3 наибольший КПД излучения относительно энерговклада, равный 33 %, получен при отношении $E/p = 5.5$ кВ·см⁻¹·атм⁻¹. Энерговклад при этом равен 150 Дж/л, энергия излучения – 500 Дж. Отметим, что, как показали последующие экспериментальные и теоретические исследования, максимальный КПД CO₂-лазера в работе [1] был превышен на 15 % (в действительности он составлял около 28 %).

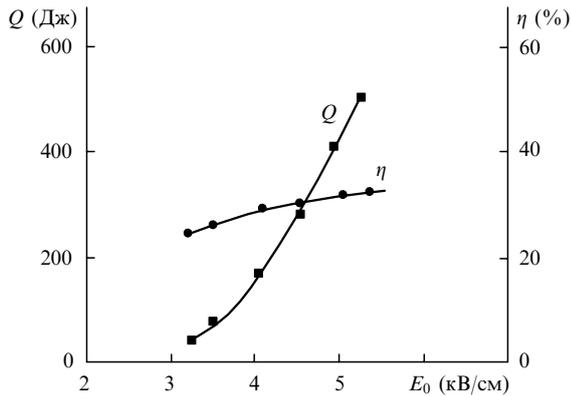


Рис.2. Зависимости энергии излучения Q и КПД η от напряженности поля.

2.2. Импульсный CO_2 -лазер с энергией излучения 5 кДж [2]

В середине 1975 г. была закончена разработка CO_2 -лазера атмосферного давления с активным объемом 270 л ($30 \times 30 \times 300$ см) и проведены его испытания (также в ИОФ РАН). Ионизация газового объема осуществлялась пучком ускоренных электронов. Газовая кювета 1 (рис.3) объемом 4500 л была выполнена из стали, и для предотвращения коронирования ее внутренняя поверхность футеровалась стеклопластиком 3. Анод 2 газовой кюветы с рабочей площадью 30×300 см, выполненный из дюраля, также имел форму, предотвращающую коронирование. Кювета заполнялась смесью состава $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 1 : 3$ до давления 1 атм.

Электронная пушка 4 обеспечивала равномерный пучок электронов сечением 30×300 см. Средняя энергия электронов равнялась 200 кэВ при импульсной плотности тока в газовой кювете до 0.4 А/см^2 и длительности около 2 мкс. В вакуумном диоде использовался многоострый холодный катод 5, работающий в режиме «взрывной эмиссии». Вывод пучка из вакуумного диода электронной пушки осуществлялся через окно, перекрытое полимерной пленкой 7 толщиной 150 мкм, лежащей на металлической решетке 6. При вакуумировании диода прогиб пленки не превышал 18 мм. Ток разряда в газовой кювете лазера замыкался на стальной сетке 8, защищающей пленку от тепловых воздействий разряда. Общая прозрачность окна и сетки для электронов с энергией 200

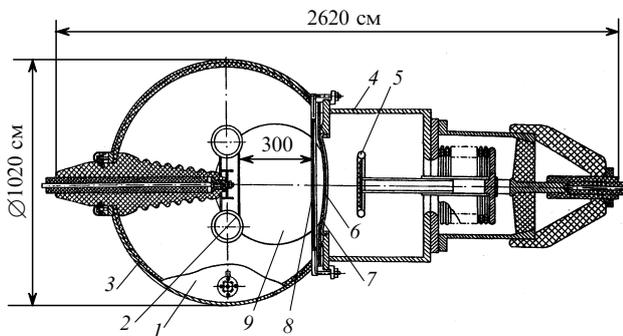


Рис.3. Общий вид основных узлов лазера с энергией излучения 5 кДж: 1 – газовая кювета; 2 – анод; 3 – стеклопластик; 4 – электронная пушка; 5 – многоострый катод; 6 – решетка; 7 – полимерная пленка; 8 – сетка; 9 – глухое зеркало.

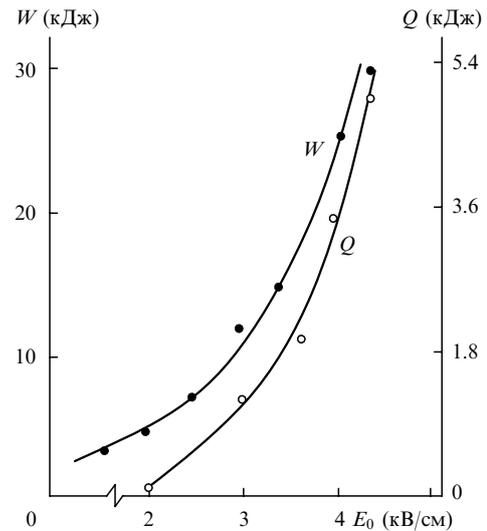


Рис.4. Зависимости энергии накачки W и энергии излучения Q от напряженности поля.

кэВ составляла не менее 50%. Диод электронной пушки питался от генератора импульсного напряжения, собранного по схеме Маркса, с ударной емкостью 0,67 мкФ и выходным напряжением 500 кВ. Энергия для возбуждения активного объема газовой кюветы запасалась в конденсаторной батарее, собранной из малоиндуктивных конденсаторов. Максимальные параметры батареи: емкость 15 мкФ, напряжение зарядки 200 кВ, запасаемая энергия 300 кДж.

На рис.4 приведены результаты измерения энергии накачки, вводимой в газовый объем лазера. Лазер работал устойчиво при напряжении на аноде газовой кюветы не более 125 кВ (т.е. при напряженности поля в газе не более 4.2 кВ/см). Максимальная амплитуда тока разряда в газе при этом составляла 150 кА при длительности на полувысоте 2 мкс. В лазере использовался резонатор с выходным зеркалом (диаметр 240 мм), изготовленным из плоскопараллельной пластины КРС8 с коэффициентом отражения от одной грани 17%. Глухим зеркалом являлась кварцевая подложка 9 с золотым покрытием, имеющая радиус кривизны 12 м и диаметр 300 мм. Используемые зеркала не позволяли снять энергию со всего возбуждаемого объема, тем не менее общая энергия излучения в оптимальных режимах работы, измеренная путем сканирования калориметром по поперечному сечению лазерного луча, достигала 5 кДж.

На рис.4 приведена также зависимость энергии излучения лазера от напряженности электрического поля в газе. Максимальная плотность излучения в центральной области лазерного луча достигала 20 Дж/см^2 , а на краях – около 9 Дж/см^2 . Длительность импульса излучения на полувысоте составляла 1.5 мкс. Столь высокая плотность излучения приводила к появлению дефектов в материале выходного зеркала резонатора при длительной эксплуатации. Поскольку активный объем газовой кюветы превышал объем газа, находящегося в резонаторе, примерно в 2 раза, то была возможность увеличения выходной энергии за счет увеличения размеров оптических элементов. Это было сделано в работе [4], где при оптимизации резонатора энергия излучения в импульсе составила 7.5 кДж. Отметим, что в свое время энергия излучения этого лазера была одной из наибольших в мире.

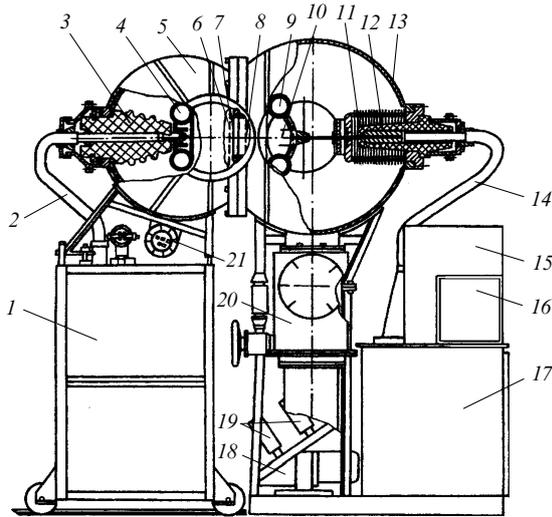


Рис.5. Конструкция лазера:
 1 – ГИНЫ, питающие лазерный промежуток; 2, 14 – кабель КПВ-7-300; 3, 12 – изоляторы; 4 – анод; 5 – корпус лазерной камеры, футерованный диэлектриком; 6 – сетка; 7 – фольга или лавсановая пленка; 8 – экстрактор; 9 – экран катода; 10 – эмиттеры; 11 – секционный изолятор; 13 – корпус вакуумного диода; 15 – пульт управления; 16 – блок запуска; 17 – ГИН ускорителя; 18 – насос; 19 – электромагнитные клапаны; 20 – вакуумный агрегат; 21 – разрядник.

2.3. CO₂-лазер с энергией излучения 3 кДж, возбуждаемый в согласованном режиме [10]

Данный лазер, показанный на рис.5, был запущен и исследован в ИСЭ СО РАН. Установка состояла из газовой камеры, источника питания и ускорителя электронов. Возбуждение активной среды осуществлялось несамостоятельным разрядом. Максимальный объем камеры с активной средой составлял 50 л (20 × 20 × 125 см). Лазерная камера позволяла работать при давлении до 2.5 атм. Предполагалось, что данный лазер будет использован в качестве усилителя коротких импульсов, поэтому для увеличения коэффициента усиления планировалось работать при повышенных давлениях и высоких удельных мощностях накачки. Эксперименты проводились с активным объемом 50 л, а также с уменьшенным активным объемом (12 л, 8 × 12 × 125 см). Электронный ускоритель обеспечивал плотность тока электронного пучка в газовой камере порядка 0.5 А/см² при ускоряющем напряжении в вакуумном диоде ~ 300 кВ.

Осциллограммы ускоряющего напряжения на вакуумном диоде и тока электронного пучка в газовой камере показаны на рис.6, а, б. Особенностью выбранного режима работы лазера было то, что длительность импульса электронного пучка вдвое превышала длительность тока разряда. Разряд в камере запаздывал относительно пучка примерно на 0.3 мкс (рис.6, в). Таким образом, накачка осуществлялась при примерно постоянных плотностях тока пучка и энергии электронов. Это является важным для достижения максимальных удельных энергий накачки и излучения. Нами применялась LC-коррекция в генераторе импульсных напряжений (ГИН), питающем вакуумный диод, что позволило получить форму импульса тока пучка, близкую к прямоугольной (рис.6, б).

Для питания газовой камеры использовался ГИН, собранный по схеме Маркса и состоящий из трех параллельных ветвей по пять ступеней в каждой, в котором применялись конденсаторы ИК-100/0,4; в контуре LC-коррекции использовались конденсаторы ИМН-100/0,1.

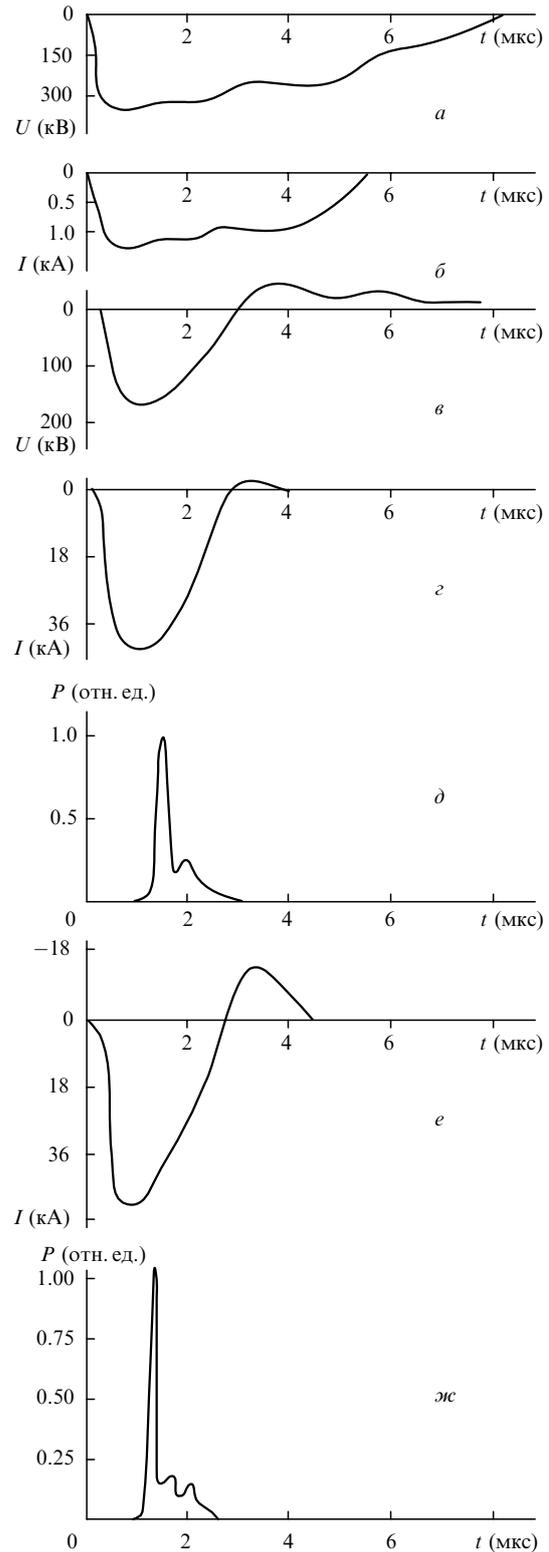


Рис.6. Осциллограммы импульсов напряжения (а) и тока (б) ускорителя, импульсов напряжения на лазерном промежутке (в), импульсов тока через лазерную камеру (г, е) и импульсов излучения (д, ж) для смеси CO₂: N₂: He = 1 : 2 : 2 при давлении $p = 2$ атм и объеме активной среды 50 л (в – д) и 12 л (е, ж); зарядное напряжение ГИНов 58 кВ.

Эквивалентная емкость ГИНа составляла 0.24 мкФ, волновое сопротивление $\rho = 3.3$ Ом; при зарядном напряжении $U = 58$ кВ энергия, запасаемая в ГИНе, достигала 10 кДж. В ГИНе использовались разрядники с продувкой через них сухого воздуха, что обеспечивало высокую ста-

бильность срабатывания (± 20 нс) и позволяло синхронизировать импульсы разрядного тока в газовой камере и тока пучка. Для выяснения возможности достижения высоких энерговыкладов при согласованном режиме объем активной среды был уменьшен до 12 л ($8 \times 12 \times 125$ см). При объеме 50 л этого не позволяло сделать ограниченный энергозапас ГИНов, питающих разрядный промежуток. При активном объеме 12 л сопротивление плазмы уменьшалось до 2.5 Ом. Внутренний резонатор состоял из плоского медного зеркала и плоскопараллельной пластинки из КРС5 или NaCl, размещенных на торцах лазерной камеры.

В лазере с активным объемом 50 л для смеси $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 2 : 2$ при давлении 2 атм сопротивление плазмы R составило 3.8 Ом. Для зарядного напряжения $U = 58$ кВ осциллограммы импульсов напряжения на плазме, разрядного тока и импульса излучения показаны на рис.6. Зависимость полной энергии излучения от энергии, запаасаемой в ГИНе, представлена на рис.7,а. Распределение энергии излучения в поперечном сечении выходного пучка было неравномерным, в центре плотность энергии достигала 15 Дж/см², при этом наблюдалось повреждение выходного окна. Полная наибольшая энергия излучения составляла 3 кДж, а КПД было равно $\sim 25\%$. Осциллограммы разрядного тока и импульса излучения для этого случая показаны на рис.6,з,д. Энергия, вкладываемая в газ во время второго полупериода тока, не превышала 10%, поэтому режим можно считать согласованным.

Зависимости удельной энергии излучения от энерго-

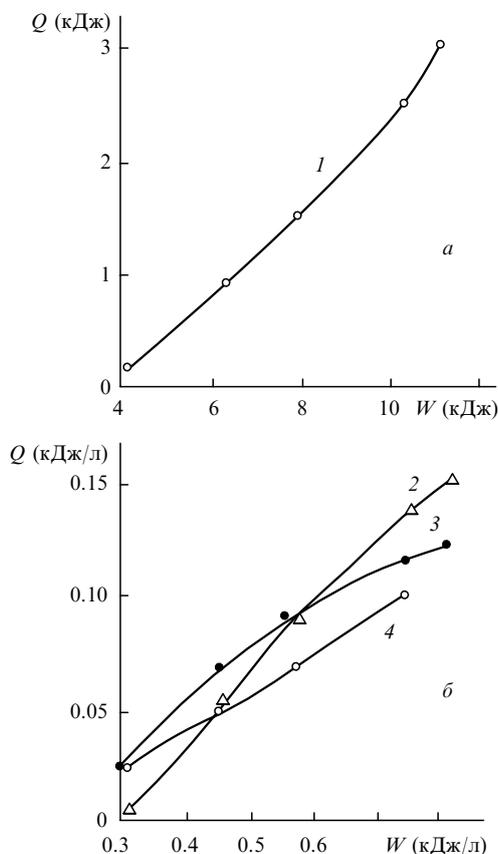


Рис.7. Зависимости полной энергии излучения от вкладываемой энергии при объеме активной среды 50 л (а) и удельной энергии излучения от удельной вкладываемой энергии при объеме активной среды 12 л (б). Смесь $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1 : 2 : 2$ при давлении $p = 2$ (1–3) и 1.2 атм (4); выходное окно из КРС5 (1, 3, 4) и NaCl (2).

вклада при давлениях смеси 2 и 1.2 атм, а также при разных резонаторах, в которых в качестве выходных зеркал использовались пластины из NaCl и КРС, показаны на рис.7,б. Максимальная энергия излучения, полученная с объема 12 л, составила 1,8 кДж. Амплитудное значение напряжения на плазме было равно 136 кВ ($E/p = 8.5$ кВ·см⁻¹·атм⁻¹), а максимальные энерговыклады превышали 0.6 кДж·л⁻¹·атм⁻¹. В этой работе впервые была получена максимальная энергия с единицы объема активной среды, составившая 150 Дж/л. Отметим, что с увеличением удельного энерговыклада эффективность генерации уменьшалась.

Таким образом, применение для накачки широкоапертурных CO_2 -лазеров ($\lambda = 1.06$ мкм) разряда, контролируемого пучком электронов, позволяет получать при повышенных давлениях большие энергии излучения и высокие эффективности. На лазерах атмосферного давления с активным объемом 10 и 270 л получены энергии излучения 0.5 и 7.5 кДж соответственно, а на лазере с объемом активной среды 50 л при давлении рабочей смеси 2 атм и импульсном питании лазерного промежутка реализована энергия излучения 3 кДж. Максимальная эффективность излучения для лазеров данного типа составила $\sim 28\%$. При импульсном питании разрядного промежутка были получены удельные энергии накачки и излучения 0.6 кДж·л⁻¹·атм⁻¹ и 80 Дж·л⁻¹·атм⁻¹ соответственно.

В 1986 г. система накачки CO_2 -лазера с активным объемом 270 л была использована для исследования генерации в ближней ИК области спектра на атомарных переходах ксенона [27]. Благодаря большому межэлектродному промежутку удалось получить генерацию при накачке несамостоятельным разрядом (как с ионизационным размножением, так и без него) и показать, что электрическое поле дает вклад в энергию генерации только при ионизационном размножении электронов.

2.4. Плавно перестраиваемый по частоте CO_2 -лазер высокого давления [7]

Получение мощных импульсов излучения малой длительности и расширение диапазона перестройки частоты CO_2 -лазера связано с увеличением давления и объема возбуждаемой активной среды при сохранении высокого коэффициента усиления. Данная задача решается при использовании для накачки несамостоятельного разряда, контролируемого электронным пучком. Схема установки приведена на рис.8. Ионизация объема активной среды осуществлялась пучком электронов с плотностью 2 А/см², сечением 3×100 см и длительностью 1 мкс. Расстояние анод–катод газовой камеры регулировалось от 1 до 3 см. Энергия, расходуемая на возбуждение активной среды, запасалась в малоиндуктивной конденсаторной батарее 2 емкостью 0.8 мкФ. Подробно данный лазер описан в [66].

Дисперсионный резонатор был образован дифракционной решеткой 150 штр./мм 4, плоскопараллельной пластиной из германия с одной просветленной гранью и призмой из NaCl 3, обеспечивающей восьмикратное увеличение апертуры пучка на решетке. Апертура резонатора ограничивалась двумя диафрагмами диаметром 6 мм, что обеспечивало одномодовый режим работы лазера. Точность установки решетки составляла $10''$.

Для измерения спектральных характеристик использовался монохроматор 10 с разрешением 0.3 см⁻¹ и ска-

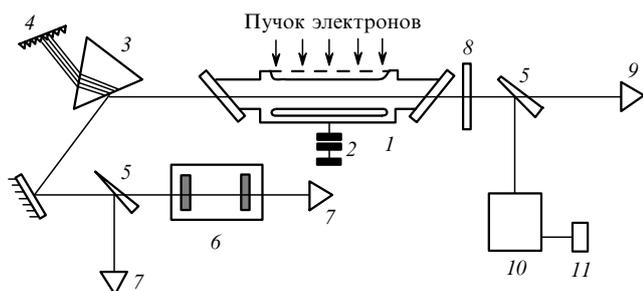


Рис.8. Схема перестраиваемого CO₂-лазера:
 1 – модуль CO₂-лазера; 2 – конденсаторная батарея (0,8 мкФ, 100 кВ);
 3 – призма из NaCl; 4 – дифракционная решетка; 5 – пластины из ZnSe; 6 – интерферометр; 7 – калориметр ИМО-2; 8 – выходное зеркало; 9 – калориметр ИКТ-1М; 10 – монохроматор; 11 – пироэлектрический приемник.

нирующий интерферометр Фабри–Перо 6 с базой до 2,5 см и резкостью 30, который позволял измерять перестроенные характеристики и ширину линии генерации.

Возбуждение производилось несамостоятельным разрядом, основной энергоклад осуществлялся в полях напряженностью 4–11 кВ·см⁻¹·атм⁻¹. Оптимальной в этих условиях оказалась смесь CO₂:N₂ = 1:1. Предельная энергия, рассеиваемая в газе при давлении смеси от 4 до 6 атм, составляла 250–300 Дж·л⁻¹·атм⁻¹. Предельная энергия генерации, не приводящая к разрушению оптических элементов, равнялась 1–1,5 Дж/см² и достигалась во всем диапазоне плавной перестройки частоты. Длительность импульса излучения на полувысоте не превышала 40 нс. Перестроенные характеристики лазера, т. е. зависимости частоты генерации от углов поворота решетки, исследовались во всем возможном диапазоне генерации CO₂-лазера.

Плавная перестройка частоты начинала осуществляться уже при давлении 4 атм. Однако значительная нелинейность перестроенной характеристики, связанная с затягиванием частоты генерации к центрам линии усиления, препятствовала практическому использованию этого режима. Увеличение давления смеси до 5 атм делало перестроенные характеристики практически линейными. Спектральная ширина линии генерации лазера, измеренная при помощи сканирующего интерферометра с базой 2,5 см, составляла 0,028 см⁻¹ на линии P18 и 0,24 см⁻¹ – в провале между линиями P16 и P18 перехода 001–100. Резонатор с выходным зеркалом из германия обеспечивал диапазон плавной перестройки 86 см⁻¹ при давлении 6 атм (линии P6 – P34 и R6 – R30 переходов 001–100 и 001–020).

Дальнейшее увеличение диапазона плавной перестройки возможно за счет роста усиления в активной среде лазера, что связано с увеличением удельной энергии накачки. Однако при увеличении энергии, вводимой в газ, в активной среде может возникать сверхизлучение, и лазер становится неуправляемым по частоте. Это приводит к ограничению энергокладов при работе лазера в режиме перестройки частоты излучения. На рис.9 показаны зависимости удельного энергоклада, при котором достигается порог сверхизлучения, от давления смеси. Кривая 2 соответствует порогу возникновения генерации в провале между линиями P16 и P18. Области, ограниченные кривыми 1 и 2, а также 1 и 3, определяют энергоклады, необходимые для работы лазера в режиме плавной перестройки частоты.

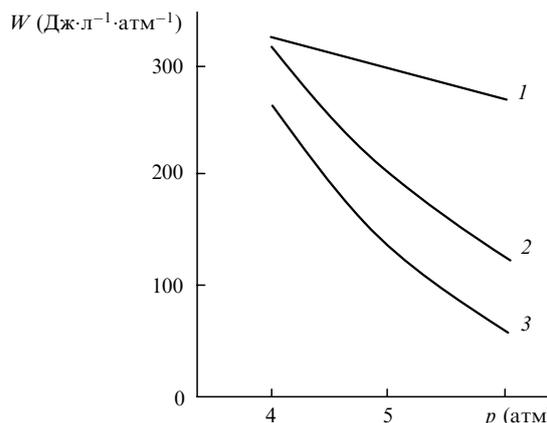


Рис.9. Зависимости величины удельного энергоклада, при котором достигается порог генерации, от давления смеси (1 – порог сверхизлучения, 2 – порог генерации в провале между линиями P16 и P18, 3 – порог генерации на линии P18).

Таким образом, использование несамостоятельного разряда, контролируемого электронным пучком, позволило создать CO₂-лазер высокого давления с плавной перестройкой частоты в области 86 см⁻¹ при плотности энергии излучения 1,5 Дж/см² (максимальная плотность энергии излучения при быстром повреждении оптики не превышает 5 Дж/см²). Данный лазер был использован для многих задач, в частности для селективного возбуждения газов в сильном поле ИК лазеров [8].

3. Исследование генерации в лазере на смеси Ar–N₂ [3]

В семидесятые годы начали интенсивно исследоваться лазеры с накачкой пучком электронов. В отличие от лазеров на димерах ксенона лазер на смеси Ar–N₂ имел низкий порог генерации, сравнительно низкие рабочие давления смеси, состоящей из неактивных газов, и позволял получать излучение в УФ и видимой областях спектра. В ИСЭ СО РАН были проведены подробные исследования данного лазера, и публикация первых результатов была поддержана А.М.Прохоровым [3]. В лазере используются смеси, содержащие азот и аргон. Энергия электронного пучка расходуется в основном на ионизацию и возбуждение аргона, а затем благодаря эффективной передаче энергии от метастабильных уровней аргона (3p) к уровню C³π_u молекулы азота возникает инверсия на переходе C³π_u → B³π_g. Генерация была получена на переходах 0–0 (λ = 337 нм), 0–1 (λ = 358 нм), 0–2 (λ = 381 нм) и др. В лазере на смеси Ar–N₂ вследствие сохранения оптимальных условий накачки (температуры электронов) во время действия пучка электронов и участия аргона в очистке нижнего лазерного уровня реализуются большие длительности импульса излучения (сотни наносекунд – единицы микросекунд).

Для возбуждения смеси Ar–N₂ в [3] использовался ленточный пучок электронов со следующими параметрами: энергия электронов 400 кэВ, плотность тока пучка 200 А/см², длительность тока пучка на полувысоте 13 нс, поперечное сечение пучка 20 × 1 см. Ускоритель электронов мог работать с лазерной камерой в режиме однократных импульсов и в режиме двух импульсов с регулируемой задержкой между ними. Без лазерной камеры при обдуве фольги ускоритель мог кратковременно работать с частотой до 150 Гц.

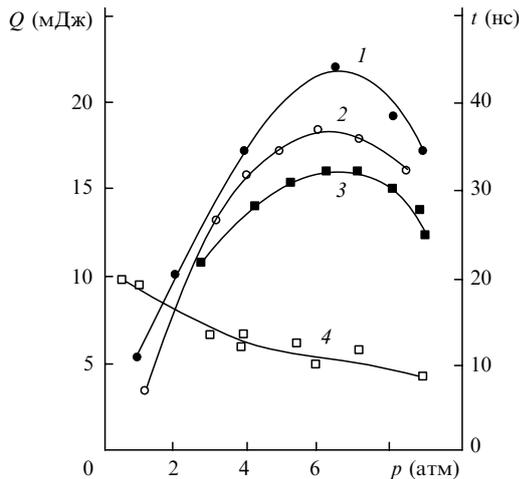


Рис.10. Зависимости энергии излучения (1–3) и длительности импульса генерации на полувысоте (4) от общего давления смеси Ar–N₂ при концентрации азота 10 % (1,4), 14 % (2) и 5 % (3).

Лазерная камера была выполнена в виде трубки диаметром 2 см. Пучок электронов инжектировался в газовый объем через стальную фольгу толщиной 50 мкм перпендикулярно оптической оси. Суммарный ток электронов, который попадал в лазерную камеру, достигал 4.3 кА. Резонатор был образован плоским зеркалом с алюминиевым покрытием и плоскопараллельной кварцевой пластинкой.

На рис.10 показаны зависимости энергии и длительности импульса генерации на полувысоте от давления смеси при различных концентрациях азота. Максимум энергии излучения достигался при давлениях 6–8 атм. Зависимости мощности излучения и длительности импульса генерации на полувысоте от процентного содержания азота в смеси даны на рис.11, при этом для каждой точки кривой рабочее давление соответствует максимальной энергии излучения. Увеличение добротности резонатора приводит к уменьшению энергии излучения лазера. При использовании только глухого зеркала (выходное зеркало было разюстировано) лазер мог работать в режиме сверхизлучения, но энергия излучения уменьшалась в несколько раз.

Длительность импульса излучения на полувысоте при малых давлениях и малых концентрациях азота превы-

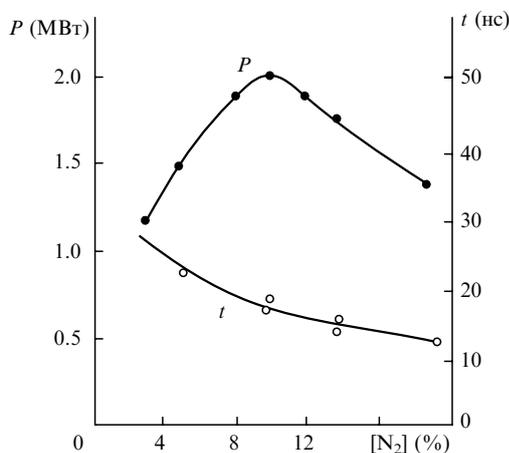


Рис.11. Зависимости мощности излучения и длительности импульса генерации на полувысоте от содержания азота в смеси.

шала длительность импульса накачки. При максимальной энергии и мощности генерации 22 мДж и 2 МВт длительность импульса излучения на полувысоте примерно соответствовала длительности импульса накачки. Давление смеси Ar:N₂ = 9:1 при этом составляло 6.5 атм. Эффективность генерации лазера на смеси Ar–N₂ мала по сравнению с эффективностью эксиплексных лазеров на галогенидах благородных газов, и в экспериментах [3] при уточненном расчете вложенной в газ энергии (с учетом нелинейности траектории электронов пучка и отражения электронов от стенок лазерной камеры) она не превышала 0.3 %.

Метод возбуждения двоянными импульсами тока, инжектируемыми в лазерную камеру с регулируемой задержкой, позволяет выяснить возможности работы лазера в импульсно-периодическом режиме. На рис.12 приведена зависимость отношения мощности генерации во втором импульсе к мощности генерации в первом импульсе от частоты следования двух импульсов. Видно, что до 20 Гц импульсы генерации имеют одинаковую мощность. При частоте 50 Гц мощность второго импульса уменьшается на 40 %. Работа [3] положила начало циклу исследований сотрудников ИСЭ СО РАН по изучению лазера на смеси Ar–N₂ [25, 67–70], в которых были получены следующие результаты:

- Впервые осуществлена одновременная мощная генерация на трех линиях с $\lambda = 337, 358$ и 381 нм в смеси Ar–N₂ и показана возможность дискретной перестройки длины волны излучения.

- Показано, что добавки гелия и неона увеличивают мощность спонтанного излучения на второй положительной системе азота и эффективность генерации лазера на смеси Ar–N₂ при накачке пучком электронов.

- Проведен анализ влияния мощности накачки на время поддержания инверсии в лазерах на самоограниченных переходах и показано, что увеличение длительности «полезной» накачки приводит к увеличению длительности импульса генерации.

- На установке с активным объемом 30 л в смеси Ar–N₂–Ne получены энергия излучения 3 Дж, удельная энергия излучения до 0.12 Дж/л и длительность импульса излучения 290 нс на полувысоте.

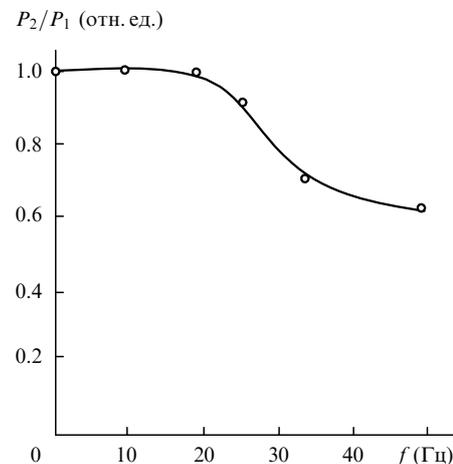


Рис.12. Зависимость отношения мощности излучения во втором импульсе к мощности излучения в первом от частоты следования импульсов.

4. Эксплексные лазеры на галогенидах благородных газов (первые эксперименты)

Работы по созданию эксплексных лазеров с накачкой разрядом, инициируемым пучком электронов, и накачкой пучком электронов сотрудники ИСЭ СО РАН начали в 1977 г. [5, 71]. В это время уже были хорошо известны первые статьи о запущенных в США первых лазерах на галогенидах благородных газов (см. [72–74], а также ссылки в книгах и обзорах [41, 42, 44, 46–48, 50, 52]). В работах [5, 6, 9, 11, 12, 17, 19], поддержанных А.М. Прохоровым, сообщалось об исследованиях и применениях различных эксплексных лазеров.

4.1. Эксплексный лазер на молекулах XeF* ($\lambda \sim 350$ нм) с накачкой разрядом, контролируемым наносекундным пучком электронов

Эксперименты [6] были проведены на системе накачки CO₂-лазера высокого давления, который подробно описан в [66]. Установка состояла из ускорителя электронов, формировавшего электронный пучок длительностью 1 мкс с плотностью тока более 2 А/см² и энергией электронов ~ 200 кэВ, и лазерной камеры с активным объемом $1.8 \times 3 \times 100$ см. Пучок электронов через окно, закрытое 50-микронметровой титановой фольгой, инжектировался в разрядный промежуток. Питание разряда осуществлялось от накопительной емкости, которая через токовый шунт подсоединялась к электродам лазерной камеры. Рабочие смеси состояли из аргона, ксенона и SF₆, максимальное давление смеси было равно 5 атм.

На рис.13 приведена зависимость энергии излучения от давления смеси при различных зарядных напряжениях и составах смеси. Максимальная энергия генерации в импульсе (0.2 Дж) была получена при давлении 5 атм и зарядном напряжении 23 кВ, КПД при этом составил ~ 0.3 %. При накачке одним электронным пучком мощность генерации существенно уменьшалась. Отметим, что в данных условиях наряду с УФ генерацией на молекулах XeF* ($\lambda \sim 350$ нм) регистрировалась ИК генерация на атомарных переходах ксенона, доля которой при давлении 5 атм и зарядном напряжении 23 кВ не превышала 20 % от УФ генерации. Однако при уменьшении удельного энерговклада за счет уменьшения зарядного напряжения и (или) величины накопительной емкости, а также при накачке только электронным пучком доля ИК излучения могла достигать 90 % и более. Отметим так-

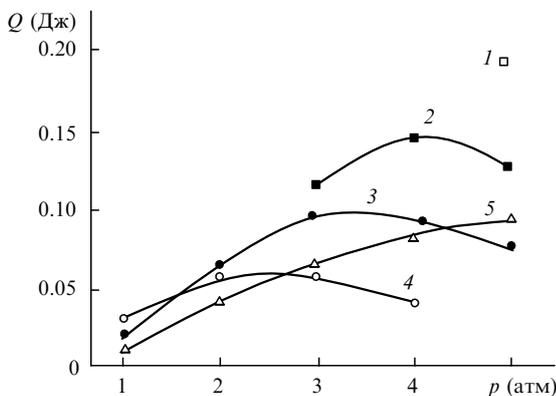


Рис.13. Зависимости энергии излучения от давления смеси при зарядном напряжении 23 (1), 14 (2) и 10 кВ (3–5) для смесей Ar: Xe: SF₆ = 2200: 10: 1 (1–3), Ar: Xe: SF₆ = 1000: 10: 1 (4) и Ar: Xe: SF₆ = 3500: 10: 1 (5).

же, что на соотношение между ИК и УФ генерацией существенное влияние оказывает используемый резонатор. Подробно одновременная генерация в УФ и ИК областях спектра при накачке наносекундным электронным пучком была исследована в [75] для XeCl-лазера.

4.2. Эксплексный лазер на молекулах XeCl* ($\lambda \sim 308$ нм) при накачке разрядом, инициируемым наносекундным пучком электронов [6]

В экспериментах использовалась установка, состоящая из ускорителя с энергией электронов 300 кэВ, плотностью тока пучка 40 А/см² и длительностью тока пучка на полувысоте 25 нс, а также разрядной камеры с межэлектродным расстоянием 2 см. Пучок электронов через окно, закрытое 25-микронметровой железной фольгой, инжектировался в разрядный промежуток. Питание разряда осуществлялось от малоиндуктивной емкости, собранной из конденсаторов К15-4 (2200 пФ, 30 кВ), которая через токовый шунт соединялась с электродами лазерной камеры. Резонатор был образован плоским «глухим» зеркалом с алюминиевым покрытием и плоскопараллельной кварцевой пластинкой. Рабочие смеси состояли из Ar, Xe и CCl₄, которые предварительно готовились в смесителе, а затем напускались в лазерную камеру.

На рис.14 приведены зависимости энергии излучения импульса от давления смеси и величины накопительного конденсатора, а на рис.15 – осциллограммы импульсов излучения и тока разряда. При увеличении зарядного напряжения энергия генерации возрастала вплоть до ста-

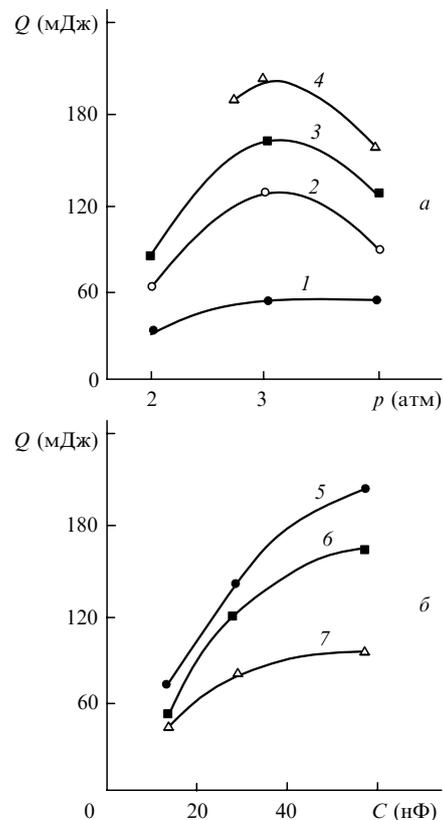


Рис.14. Зависимости энергии излучения от давления смеси (а) и емкости накопительного конденсатора (б) (смесь Ar: Xe: CCl₄ = 1600: 50: 1) при накачке электронным пучком (1) и разрядом, инициируемым электронным пучком, при зарядном напряжении 12 (2), 16 (3) и 20 (4) кВ (C = 57 нФ), а также при U₀ = 20 кВ, p = 3 (5) и 4 атм (6); U₀ = 16 кВ, p = 2 атм (7).

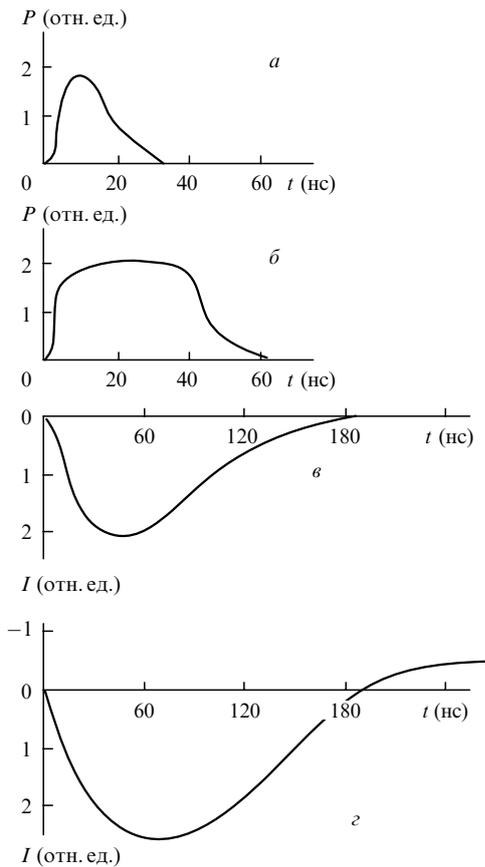


Рис.15. Осциллограммы импульсов излучения (а, б) и тока (в, г) при накачке одним электронным пучком (а) и накачке разрядом, инициируемым электронным пучком при $U_0 = 20$ кВ, $C = 57$ (б, г) и $C = 28.5$ нФ (в); давление смеси Ar : Хе : $CCl_4 = 1600 : 50 : 1$ равно 3 атм.

тического пробивного напряжения. При напряжениях, близких к статическому пробивному, разряд становился колебательным (рис.15,г). Максимальная эффективность генерации достигалась при аperiodическом разряде и зарядном напряжении, меньшем статического пробивного напряжения для данного промежутка на $\sim 25\%$. При использовании комбинированной накачки (пучком электронов и разрядом) распределение энергии излучения по сечению выходного пучка было более равномерным.

Таким образом, в работе [6] впервые была получена высокая эффективность генерации (2%) на молекулах $XeCl^*$ ($\lambda \sim 308$ нм), возбуждаемых электрическим полем емкостного накопителя при накачке разрядом, инициируемым пучком электронов.

4.3. Генерация на молекулах XeF^* ($\lambda \sim 350$ нм), $XeBr^*$ ($\lambda \sim 282$ нм) и $XeCl^*$ ($\lambda \sim 308$ нм) при накачке разрядом, контролируемым пучком электронов [9, 11]

В экспериментах использовалась система накачки CO_2 -лазера, показанная на рис.5 и подробно описанная в разд.2.3, которая была несколько модернизирована. Установка состояла из ускорителя электронов, формирующего электронный пучок длительностью 1 или 5.4 мкс с плотностью тока до 8 А/см² и энергией электронов ~ 250 кэВ, и лазерной камеры с активным объемом $20 \times 10 \times 140$ см или $10 \times 5 \times 140$ см, где межэлектродный зазор составлял 10 и 5 см соответственно. К аноду подсоединялся накопительный конденсатор $C = 3$ нФ, индуктивность разрядного контура составляла 150 нГ. При исследовании

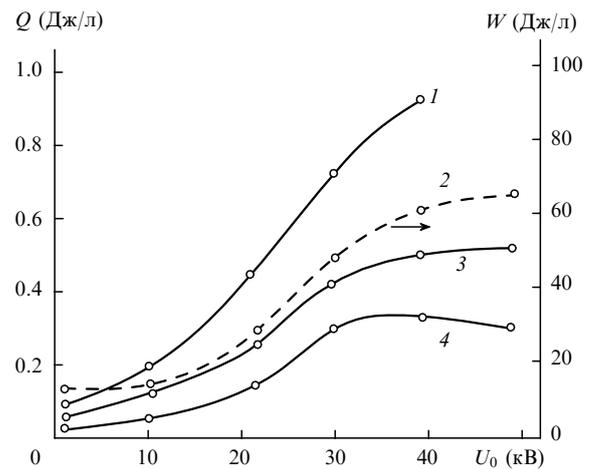


Рис.16. Зависимости удельной энергии излучения Q (1, 3, 4) и вложенной в газ удельной энергии W (2) от зарядного напряжения: смесь Ar : Хе : $NF_3 = 1000 : 10 : 1$, плотность тока пучка $j = 3$ А/см², длительность импульса на полувысоте $\tau = 1.2$ мкс (1), смесь Ar : Хе : $NF_3 = 2000 : 10 : 1$, $j = 1.2$ А/см², $\tau = 1$ мкс (2, 4), смесь Ar : Хе : $NF_3 = 2000 : 10 : 1$, $j = 3$ А/см², $\tau = 1.2$ мкс (3).

довании генерации на молекулах галогенидов инертных газов давление смеси было равно 2 атм, объем активной среды XeF - и $XeBr$ -лазеров составлял 28 л, $XeCl$ -лазера – 7 л. Рабочие смеси состояли из аргона, ксенона и одного из галогеноносителей (NF_3 , $C_2F_4Br_2$ или CCl_4).

Наибольшая энергия излучения (25 Дж) была получена на молекулах XeF^* при объеме активной среды 28 л и накачке разрядом с ионизационным усилением. Зависимости удельной энергии излучения и вкладываемой в газ энергии от зарядного напряжения приведены на рис.16. Видно, что при наложении электрического поля наблюдается существенный рост энергии генерации. При максимальных энергиях излучения реализуется режим объемного разряда с ионизационным размножением, а после окончания тока пучка разряд контрагируется. На молекулах $XeBr^*$ энергия излучения для того же активного объема не превышала 9 Дж. Наименьшая энергия генерации 3 Дж была получена на молекулах $XeCl^*$. В последнем случае для увеличения удельной мощности накачки объем активной среды был уменьшен до 7 л. Мы уже отмечали, что в энергии излучения эксимерных лазеров, работающих на смесях с буферным газом аргоном и основным газом ксеноном, наряду с УФ генерацией на эксимерных молекулах наблюдается ИК излучение на атомарных переходах ксенона. Доля этой энергии зависит от мощности накачки, состава и давления смеси, а также от используемого резонатора. В оптимальных режимах работы эксимерных лазеров доля ИК излучения меньше 10%, однако при уменьшении мощности накачки основной вклад в генерацию может вносить ИК излучение ксенона.

Вышеописанные эксперименты были проведены на широкоапертурном лазере и позволили получить первый опыт создания мощных эксимерных лазеров. Энергия излучения 25 Дж в импульсе в то время была наибольшей для разработанных в СССР эксимерных лазеров. Накопленные данные показали, что для создания эксимерных лазеров с энергией излучения свыше 100 Дж более выгодно использовать накачку одним электронным пучком. Это было реализовано в последующих работах, выполненных в ИСЭ СО РАН [52, 76, 77], где были созданы

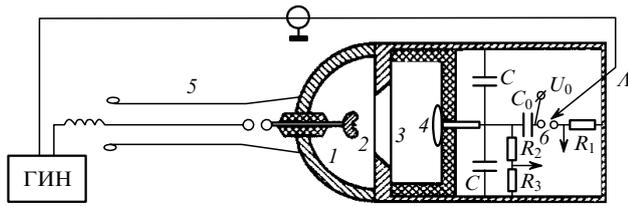


Рис. 17. Конструкция лазера:
1 – вакуумный диод; 2 – танталовая фольга; 3 – электрод; 4 – профилированный электрод; 5 – зарядная линия; 6 – разрядник.

XeCl-лазер с энергией излучения ~ 2 кДж и KrF-лазер с энергией излучения ~ 100 Дж.

4.4. XeCl-лазер с накачкой разрядом, формируемым с помощью рентгеновской предьонизации [17]

В настоящее время рентгеновское излучение широко используется в системах предьонизации эксиплексных лазеров. Конструкция нашего первого лазера, в котором инициирование объемного разряда осуществлялось рентгеновским излучением, показана на рис. 17 [17]. Это модификация установки с накачкой разрядом, формируемым электронным пучком; подобная установка использовалась в [6] (см. также разд. 4.2) для возбуждения XeCl-лазера. Рентгеновское излучение получали за счет торможения в вакуумном диоде 1 пучка быстрых электронов на танталовой фольге 2. Вакуумный промежуток с ленточным катодом запитывался от формирующей линии 5, заполненной глицерином. Длительность импульса тока составляла 40 нс при напряжении ~ 200 кВ. Зарядка линии 5 осуществлялась от ГИНа Аркадьева – Маркса. Лазерный промежуток был образован плоским электродом 3, изготовленным из мелкочаеистой сетки либо из медной фольги, и профилированным электродом 4. Межэлектродное расстояние составляло 2.7 см, активная длина – 48 см. Резонатор был образован зеркалом с покрытием из алюминия и плоскопараллельной кварцевой пластинкой. Рабочая смесь $\text{Ar}:\text{Xe}:\text{CCl}_4 = 1000:10:1$ готовилась в лазерной камере. Исследования проводились при давлениях до 3 атм. Накачка осуществлялась от конденсаторов C_0 и C , причем обострительные конденсаторы C были равномерно распределены по длине лазерной камеры. Синхронизация времени подачи напряжения на электроды в лазерной камере и рентгеновской вспышки осуществлялась за счет регулировки запуска разрядника 6.

Проведенные эксперименты показали, что энергия излучения растет с увеличением давления смеси, а оптимальная задержка между началом рентгеновской вспышки и подачей напряжения на электроды лазерной камеры составляет 100–200 нс (рис. 18). Важное значение имеет состояние поверхности электродов. Наибольшая удельная энергия излучения (свыше 1 Дж/л) была получена при замене сетчатого электрода на электрод из фольги и при максимально возможном в данных экспериментах давлении (3 атм). Измерения начальной концентрации электронов показали, что она достигает $\sim 4 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$.

В работах [16, 17] была также показана целесообразность снижения энергии рентгеновских квантов до ~ 50 кэВ. Такой энергии рентгеновского излучения уже достаточно для предьонизации в широкоапертурных электро-разрядных лазерах.

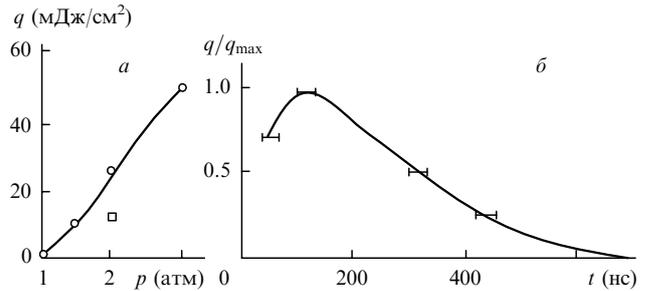


Рис. 18. Зависимости плотности энергии излучения от давления смеси (а) и от задержки между началом роста тока пучка и напряжения на лазерном промежутке при $p = 2$ атм (б) для смеси $\text{Ne}:\text{Xe}:\text{CCl}_4 = 1000:50:1$ при $U_0 = 24$ кВ; плоский электрод изготовлен из медной фольги (○) или из сетки (□).

Таким образом, в первых работах по исследованию эксиплексных лазеров были получены следующие результаты. Запущен лазер на молекулах XeF^* с накачкой разрядом, контролируемым микросекундным пучком электронов. Впервые получена высокая эффективность от электрического поля емкостного накопителя (2%) XeCl-лазера при накачке разрядом, инициируемым пучком электронов. При увеличении объема активной среды до 28 л в лазере с накачкой разрядом, контролируемым пучком электронов, на молекулах XeF^* была получена энергия излучения 25 Дж. В дальнейшем были проведены исследования XeF- ($\lambda = 350$ нм), XeCl- ($\lambda = 308$ нм) и XeBr-лазеров ($\lambda = 282$ нм) при накачке электронными пучками различной длительности, а также разрядами, формируемыми электронными пучками, и было показано, что механизмы создания инверсии в этих лазерах существенно различаются [50, 52].

5. Определения примесей NO₂ и CO в атмосфере [19, 78]

Современные успехи, так же как и дальнейшее развитие исследований оптики атмосферы, связаны с созданием и совершенствованием лазерных лидарных систем дистанционного зондирования атмосферы. Наиболее широкое применение в исследованиях оптических характеристик атмосферы и атмосферного аэрозоля находят лидары, построенные на основе импульсных лазеров [19, 78]. При этом к передатчику лидарного комплекса предъявляются следующие требования: 1) генерация на заданных длинах волн; 2) стабильность энергии импульса; 3) высокий КПД лазера. Эксиплексные лазеры, являясь наиболее мощными источниками импульсного УФ излучения, удовлетворяют всем этим требованиям и, кроме того, обладают достаточно широким спектром генерации, что также может рассматриваться как преимущество при решении задач мониторинга атмосферы методом дифференциального зондирования.

Этот метод является в настоящее время одним из наиболее распространенных при измерениях атмосферной концентрации промышленных выбросов (SO_2 , NO_2) и озона. Он основан на измерении разности интенсивностей излучения, рассеянного назад примесью от лазерных сигналов, генерируемых на двух длинах волн. Наиболее перспективными являются лидары, позволяющие проводить измерения максимального количества примесей без значительных изменений конфигурации лазера. Именно поэтому большая ширина спектра генерации эк-

сиплексных лазеров обеспечивает их преимущество. С одной стороны, современные методы спектральной селекции позволяют легко выделить узкую линию излучения на нужной длине волны, а с другой – длина волны может быть так же легко изменена путем ее перестройки по спектру излучения. Кроме того, эксиплексные лазеры обладают достаточной мощностью для преобразования их излучения в другие спектральные диапазоны методами нелинейной оптики, а также для накачки лазеров на красителях [19, 78].

5.1. Лазер ЛИДА как лидар для диагностики концентрации SO_2

Лазеры типа ЛИДА были разработаны в ИСЭ СО РАН как универсальные электроразрядные лазеры джоульного уровня энергии [50, 52, 79]. При этом основными для них являются смеси с эксиплексными рабочими молекулами XeCl^* , XeF^* , KrCl^* , KrF^* . Отметим, что после незначительной модернизации данные лазеры могут успешно использоваться и как источники ИК, УФ и видимого излучения на HF , CO_2 , N_2 и других молекулах. Наиболее широко для зондирования атмосферы использовался XeCl -лазер, поэтому в дальнейшем будет рассматриваться работа лазера ЛИДА на длине волны ~ 308 нм. Обобщенная конструкция одного из таких лазеров приведена на рис.19,а.

В режиме свободной генерации спектр излучения XeCl -лазера состоит из четырех линий, соответствующих электронным переходам $B - X$. При этом линии переходов $0-1$ и $0-2$ обычно именуются сильными, а линии переходов $0-0$ и $0-3$ – слабыми, т. к. интенсивность первых в спектре на порядок превышает интенсивность

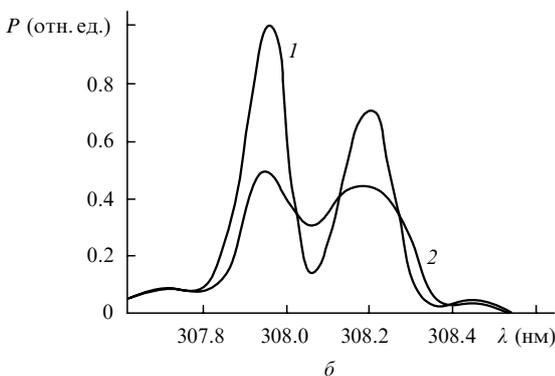
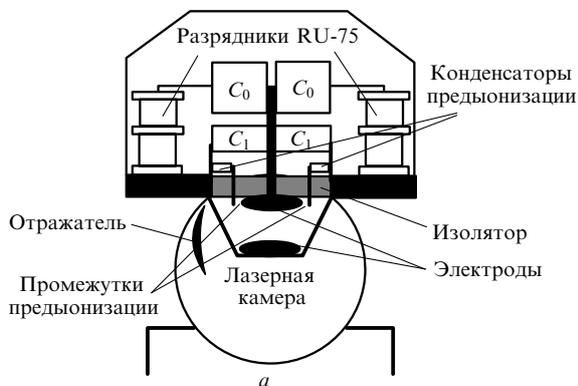


Рис.19. Схема конструкции лазера ЛИДА (а) и структура спектра выходного излучения электроразрядного XeCl -лазера в режиме свободной генерации (1) и с повышенной относительной интенсивностью слабых линий (2) (б).

вторых (рис.19,б). Такая структура спектра оказалась очень удобной для измерения концентрации молекул SO_2 в атмосфере. Линия с $\lambda = 307.7$ нм (слабая) лежит в окне прозрачности атмосферы (попадает на край полосы поглощения молекулы SO_2), а линия с $\lambda = 308.45$ нм (сильная) попадает в центр этой же полосы поглощения молекулы SO_2 .

При разработке дифференциального лидара были решены также проблемы, связанные в первую очередь с получением на длине волны слабой линии узкополосного сигнала, интенсивность которого значительно превышает интенсивность широкополосного шума, развивающегося из спонтанного излучения на длинах волн сильных линий спектра. Получение достаточно мощного сигнала в этом случае возможно только при использовании системы генератор – усилитель. В [80] было исследовано влияние параметров накачки на структуру выходного спектра XeCl -лазера и сформулированы следующие требования: плотность мощности накачки должна превышать 1 МВт/см^3 , что должно обеспечить инкремент усиления $gl > 6$ (здесь g – коэффициент усиления слабого сигнала, l – активная длина); длительность импульса накачки должна превышать время насыщения сильных переходов, составляющих для типичных параметров лазера ~ 20 нс; концентрация ксенона в смеси должна в $1.5 - 2$ раза превышать концентрацию, оптимальную с точки зрения максимальной выходной мощности.

Выполнение этих условий позволяет получить выходной спектр с повышенной относительной интенсивностью слабых линий (рис.19,б, кривая 2). Однако поскольку излучение на сильных линиях остается все же более интенсивным, для эффективного выделения узкой слабой линии из спектра требуется оптический резонатор, обладающий, с одной стороны, высокой селекцией, а с другой – минимальными потерями в оптических элементах. Схема такого резонатора изображена на рис.20. Дифракционная решетка 1 работает здесь в автоколлимационном режиме, обеспечивая в первом порядке дифракции коэффициент отражения 0.7, что сравнимо с коэффициентом отражения алюминиевого зеркала. Пространственная селекция излучения обеспечивается фильтром из длиннофокусной линзы 2 ($F = 2$ м) и размещенной в ее фокусе диафрагмы 3 диаметром $30 - 100$ мкм. Из-за высоких плотностей мощности излучения, формируемого в резонаторе, выходное зеркало 5 было удалено от фокуса на 10 см и помещено за реколлимирующей линзой 4. Такая конфигурация резонатора позволила максимально использовать объем активной среды лазера ($3.5 \times 1.2 \times 60$ см) и получить на выходе генератора энергию 3 мДж при ширине линии 0.025 нм ($\lambda = 307.7$ нм) и 30 мДж при ширине линии 0.04 нм ($\lambda = 308.45$ нм). При этом отношение сигнала к уровню шумов (контрастность) превышало 100 на расстоянии 2 м от выходного окна лазера. Отме-

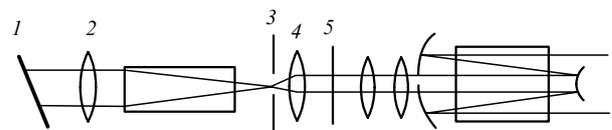


Рис.20. Оптическая схема задающего генератора и усилителя, работающего в режиме инжекционной синхронизации, созданная для получения мощного узкополосного высококонтрастного излучения на длине волны слабой линии спектра молекулы XeCl^* : 1 – дифракционная решетка; 2 – длиннофокусная линза; 3 – диафрагма; 4 – линза; 5 – зеркало резонатора.

тим, что контрастность возрастала пропорционально квадрату расстояния.

Лазер ЛИДА использовался также в качестве усилителя выделенного узкополосного сигнала. Было исследовано два режима усиления: однопроходный и режим инжекционной синхронизации. В последнем случае конкуренция между спонтанным шумом на длинах волн сильных линий и полезным сигналом на слабой линии в среде усилителя особенно критична. Для обеспечения максимальной контрастности на выходе в этом случае оптимальная задержка между включением генератора и усилителя должна составлять ~ 30 нс. Это позволяет получить превышение сигнала над шумом в 5–10 раз на расстоянии 2 м от выходного окна усилителя.

Более контрастное излучение было получено при однопроходном режиме усиления. При этом оказалось возможным повысить контрастность путем подбора геометрии распространения излучения в усилителе и при усилении расходящегося пучка получить контрастность, равную 100. Данный режим был выбран как наиболее приемлемый для решения задачи зондирования и позволил получить в окончательном варианте энергию 120 мДж при ширине линии 0.025 нм ($\lambda = 307.7$ нм) и 250 мДж – при ширине линии 0.04 нм ($\lambda = 308.45$ нм). Оптимальная задержка между включением генератора и усилителя составила 5–10 нс.

5.2. Диагностика NO₂

Появление мощных эксиплексных лазеров дало гигантский толчок развитию мощных перестраиваемых лазеров на красителях [19, 78]. Лазерные системы на красителях с накачкой от эксиплексных лазеров способны генерировать излучение в диапазоне 430–550 нм со средней мощностью, в три раза превышающей таковую для аналогичных систем с накачкой Nd–YAG-лазерами [81]. Такие системы находят широкое применение, в том числе и в области зондирования атмосферы. В частности, с их помощью может быть решена весьма актуальная, особенно для мегаполисов, задача определения концентрации NO₂ в атмосфере. Для этого требуются две длины волны: $\lambda = 446.9$ нм (в центре полосы поглощения молекулы NO₂) и $\lambda = 448.2$ нм (край полосы поглощения молекулы NO₂). Достаточно мощное и узкополосное излучение (150 мДж, 0.01 нм) было получено на этих длинах волн в мощном жидкостном лазере (МЖЛ) на красителях (кумарин-2) [78]. Лазерная система МЖЛ была разработана в Лаборатории лазерной физики Сибирского физико-технического института им. Кузнецова при ТГУ специально под накачку эксиплексным лазером ЛИДА.

На базе лазеров ЛИДА (генератор и усилитель) и лазерной системы МЖЛ в НПО космического приборостроения (НПО КП, Москва) был разработан лидарный комплекс по измерению концентрации примесей SO₂ и NO₂. При измерении концентрации SO₂ должны были работать только эксиплексные лазеры, при измерении концентрации NO₂ излучение XeCl-лазеров использовалось для накачки системы МЖЛ. Данный лидарный комплекс с 1997 г. успешно используется НПО КП для мониторинга NO₂ в воздушном бассейне Москвы [78].

6. Заключение

Таким образом, в 1970–90-е гг. благодаря поддержке академика А.М.Прохорова и сотрудничеству коллекти-

вов ИСЭ СО РАН и ИОФ РАН были получены важные результаты при исследовании и создании импульсных лазеров на плотных газах, а также при использовании этих лазеров.

Авторы выносят глубокую благодарность сотрудникам ИСЭ СО РАН и ИОФ РАН, которые являлись участниками и соавторами работ [1–38].

1. Бугаев С.П., Бычков Ю.И., Карлова Е.К., Карлов Н.В., Ковальчук Б.М., Кузьмин Г.П., Курбатов Ю.А., Месяц Г.А., Орловский В.М., Прохоров А.М., Рыбалов А.М. *Письма в ЖТФ*, **1**, 492 (1975).
2. Бычков Ю.И., Карлова Е.К., Карлов Н.В., Ковальчук Б.М., Кузьмин Г.П., Курбатов Ю.А., Месяц Г.А., Орловский В.М., Прохоров А.М., Рыбалов А.М. *Письма в ЖТФ*, **2**, 212 (1976).
3. Бычков Ю.И., Загулов Ф.Я., Карлов Н.В., Ковшаров Н.Ф., Лосев В.Ф., Месяц Г.А., Прохоров А.М., Тарасенко В.Ф. *Письма в ЖТФ*, **2**, 1052 (1976).
4. Дацкевич Н.П., Карлова Е.К., Карлов Н.В., Ковальчук Б.М., Конев Ю.Б., Кононов Н.Н., Кочетов И.В., Кузьмин Г.П., Месяц Г.А., Никифоров С.М., Певгов В.Г., Прохоров А.М. *Квантовая электроника*, **4**, 457 (1977).
5. Бычков Ю.И., Карлов Н.В., Коновалов И.Н., Месяц Г.А., Прохоров А.М., Тарасенко В.Ф. *Письма в ЖТФ*, **3**, 1041 (1977).
6. Бычков Ю.И., Карлов Н.В., Лосев В.Ф., Месяц Г.А., Прохоров А.М., Тарасенко В.Ф. *Письма в ЖТФ*, **4**, 83 (1978).
7. Алимписев С.С., Бычков Ю.И., Карлов Н.В., Карлова Е.К., Месяц Г.А., Набиев М.Ш., Никифоров С.М., Орловский В.М., Осипов В.В., Прохоров А.М., Хохлов Э.М. *Письма в ЖТФ*, **5**, 816 (1979).
8. Алимписев С.С., Карлов Н.В., Месяц Г.А., Никифоров С.М., Орловский В.М., Прохоров А.М., Сартаков Б.Г., Хохлов Э.М., Штарков А.А. *Письма в ЖЭТФ*, **30**, 279 (1979).
9. Бычков Ю.А., Коновалов И.Н., Лосев В.Ф., Месяц Г.А., Прохоров А.М., Сисакян И.Н., Тарасенко В.Ф., Филонов А.Г. *Письма в ЖТФ*, **6**, 1483 (1980).
10. Аполлонов В.В., Бункин В.Ф., Бычков Ю.И., Коновалов И.Н., Лосев В.Ф., Месяц Г.А., Прохоров А.М., Тарасенко В.Ф., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **8**, 1331 (1981).
11. Аполлонов В.В., Бункин В.Ф., Бычков Ю.И., Коновалов И.Н., Лосев В.Ф., Месяц Г.А., Прохоров А.И., Тарасенко В.Ф., Фирсов К.Н., Чесноков С.М. *Изв. АН СССР. Сер. физич.*, **45**, 989 (1981).
12. Агеев В.П., Горбунов А.А., Конов В.И., Луковников Д.С., Мельченко С.В., Прохоров А.М., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **10**, 1466 (1983).
13. Бычков Ю.И., Зарослов Д.Ю., Карлов Н.В., Кузьмин Г.П., Месяц Г.А., Осипов В.В., Прохоров А.М., Тельнов В.А. *Квантовая электроника*, **9**, 1718 (1982).
14. Бычков Ю.И., Зарослов Д.Ю., Карлов Н.В., Кузьмин Г.П., Месяц Г.А., Осипов В.В., Прохоров А.М., Тельнов В.А. *ЖТФ*, **53**, 1489 (1983).
15. Бычков Ю.И., Зарослов Д.Ю., Карлов Н.В., Кузьмин Г.П., Месяц Г.А., Осипов В.В., Прохоров А.М., Тельнов В.А. *ЖТФ*, **53**, 2138 (1983).
16. Генкин С.А., Карлов Н.В., Клименко К.А., Королев Ю.Д., Кузьмин Г.П., Месяц Г.А., Новоселов Ю.Н., Прохоров А.М. *Письма в ЖТФ*, **10**, 641 (1984).
17. Козырев А.В., Королев Ю.Д., Месяц Г.А., Новоселов Ю.Н., Прохоров А.М., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Генкин С.А. *Квантовая электроника*, **11**, 584 (1984).
18. Держиев В.И., Коваль Н.Н., Месяц Г.А., Прохоров А.М., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Толкачев В.С., Фомин Е.А., Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **14**, 427 (1987).
19. Gochelashvili K.S., Kabanov M.V., Kaul' V.V., Kopylova T.N., Maier G.V., Mel'chenko S.V., Panchenko A.N., Prokhorov A.M., Tarasenko V.F., Tel'minov E.N. *Laser Phys.*, **2**, 802 (1992).
20. Бункин Ф.В., Держиев В.И., Месяц Г.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Юровский В.А., Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **11**, 1277 (1984).
21. Зарослов Д.Ю., Кузьмин Г.П., Тарасенко В.Ф. *Радиотехника и электроника*, **24**, 1217, (1984).
22. Бункин Ф.В., Держиев В.И., Месяц Г.А., Скакун В.С., Тарасенко

- В.Ф., Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **12**, 245 (1985).
23. Бункин Ф.В., Держиев В.И., Месяц Г.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **12**, 874 (1985).
 24. Бункин Ф.В., Держиев В.И., Месяц Г.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Феденев А.В., Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **12**, 1993 (1985).
 25. Держиев В.И., Лосев В.Ф., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И. *Оптика и спектроскопия*, **60**, 811 (1986).
 26. Бункин Ф.В., Держиев В.И., Месяц Г.А., Муравьев И.И., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Феденев А.В., Яковленко С.И., Янчарина А.М. *Известия АН СССР. Сер. физич.*, **50**, 1064 (1986).
 27. Бункин Ф.В., Дацкевич Н.П., Держиев В.И., Карлов Н.В., Кузьмин Г.П., Месяц Г.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **13**, 878 (1986).
 28. Бункин Ф.В., Держиев В.И., Месяц Г.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Шпак В.Г., Яковленко С.И. *ЖТФ*, **56**, 2240 (1986).
 29. Бункин Ф.В., Держиев В.И., Коваль Н.Н., Месяц Г.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Щанин П.М., Яковленко С.И. *Радиотехника и электроника*, **32**, 1672 (1987).
 30. Bunkin F.V., Derzhiev V.T., Mesyats G.A., Skakun V.S., Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I. *J. Opt. Soc. Am.*, **3**, 989 (1986).
 31. Середа О.В., Тарасенко В.Ф., Феденев А.В., Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **20**, 535 (1993).
 32. Бойченко А.М., Тарасенко В.Ф., Фомин Е.А., Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **20**, 7 (1993).
 33. Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **24**, 1145 (1997).
 34. Karelin A.V., Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I. *Laser Phys.*, **10**, 827 (2000).
 35. Voichenko A.M., Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I. *Laser Phys.*, **10**, 1157 (2000).
 36. Бычков Ю.И., Ковальчук Б.М., Кузьмин Г.П., Месяц Г.А., Тарасенко В.Ф. *Изв. вузов. Сер. Физика*, № 5, 5 (2000).
 37. Voichenko A.M., Skakun V.S., Sosnin E.A., Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I. *Laser Phys.*, **10**, 540 (2000).
 38. Arnold E., Lomaev M.I., Skakun V.S., Tarasenko V.F., Tkachev A.N., Shitts D.V., Yakovlenko S.I. *Laser Phys.*, **12**, 1270 (2002).
 39. *Газовые лазеры*. Под ред. Н.Н.Соболева (М.: Мир, 1968).
 40. Аллен Л., Джонс Д. *Основы физики газовых лазеров* (М.: Наука, 1970).
 41. Гудзенко Л.И., Яковленко С.И. *Плазменные лазеры* (М.: Атомиздат, 1978).
 42. *Справочник по лазерам*. Под ред. А.М.Прохорова (М.: Сов. радио, 1978, т. 1).
 43. *Справочник по лазерам*. Под ред. А.М.Прохорова (М.: Сов. радио, 1978, т. 2).
 44. *Экцимерные лазеры*. Под ред. Ч.Роудза (М.: Мир, 1981).
 45. *Химические лазеры*. Под ред. Н.Г.Басова (М.: Наука, 1982).
 46. Звелто О. *Принципы лазеров* (М.: Мир, 1984).
 47. *Газовые лазеры*. Под ред. И.Мак-Даниэля, У.Нигена (М.: Мир, 1986).
 48. Баранов В.Ю., Борисов В.М., Степанов Ю.Ю. *Электроразрядные эксимерные лазеры на галогенидах инертных газов* (М.: Энергоатомиздат, 1988).
 49. Алейников В.С., Масычев В.И. *Лазеры на окиси углерода* (М.: Радио и связь, 1990).
 50. Месяц Г.А., Осипов В.В., Тарасенко В.Ф. *Импульсные газовые лазеры* (М.: Наука, 1991).
 51. Донин В.И. *Мощные ионные газовые лазеры* (Новосибирск: Наука, 1991).
 52. Mesyats G.A., Osipov V.V., Tarasenko V.F. *Pulsed gas lasers* (Washington: SPIE Press, 1995).
 53. Молчанов А.Г. *УФН*, **106**, 165 (1972).
 54. Гудзенко Л.И., Шелепин Л.А., Яковленко С.И. *УФН*, **114**, 457 (1974).
 55. Rodes C.K. *IEEE J. Quantum Electron.*, **10** (12), 153 (1977).
 56. Ковальчук Б.М., Кремнев В.В., Месяц Г.А. *ДАН СССР*, **191**, 76 (1970).
 57. Басов Н.Г., Беленов Э.М., Данилычев В.А., Сучков А.Ф. В сб. *Квантовая электроника*, № 3, 121 (1971).
 58. Fenstermaher C.A., Hufter M.I., Rink I.P., Boyer K. *Bull. Am. Phys. Soc.*, (16), 42 (1971).
 59. Басов Н.Г., Данилычев В.А., Ионин А.А., Ковш И.Б., Соболев В.А. *ЖТФ*, **43**, 2357 (1973).
 60. Cason C., Dezenberg G., Huff R.J. *Appl. Phys. Lett.*, **23**, 110 (1973).
 61. Анисимов В.Н., Баранов В.Ю., Борзенко В.Л. и др. *Квантовая электроника*, **7**, 1451 (1980).
 62. Yamanaka C., Nakai S., Matova M. *IEEE J. Quantum Electron.*, **17**, 1678 (1981).
 63. Carlson R.L., Carpenter J.P., Casperson D.E., et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, **17**, 1662 (1981).
 64. *Разработка и применение источников интенсивных электронных пучков*. Под ред. Г.А.Месяца (Новосибирск: Наука, 1976).
 65. *Сильноточные импульсные электронные пучки в технологии*. Под ред. Г.А.Месяца (Новосибирск: Наука, 1983).
 66. Бычков Ю.И., Орловский В.М., Осипов В.В. *Квантовая электроника*, **4**, 2435 (1977).
 67. Бычков Ю.И., Лосев В.Ф., Месяц Г.А., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **4**, 1385 (1977).
 68. Бычков Ю.И., Королев Ю.Д., Лосев В.Ф., Тарасенко В.Ф., Хузеев А.П., Шемякин И.А. *Изв. вузов. Сер. Физика*, № 12, 57 (1977).
 69. Бычков Ю.И., Лосев В.Ф., Савин В.В., Тарасенко В.Ф. *Изв. вузов. Сер. Физика*, № 1, 81 (1978).
 70. Tarasenko V.F., Baksht E.H., Fedenev A.V., Orlovskii V.M., Panchenko A.N., Skakun V.S., Sosnin E.A. *Proc. SPIE. Int. Soc. Opt. Eng.*, **3343**, 715 (1998).
 71. Бычков Ю.И., Лосев В.Ф., Месяц Г.А., Тарасенко В.Ф. *Письма в ЖТФ*, **3**, 1223 (1977).
 72. Searles S.K., Hart G.A. *Appl. Phys. Lett.*, **27**, 243 (1975).
 73. Ewing J.J., Brau C.A. *Appl. Phys. Lett.*, **27**, 350 (1975).
 74. Ault E.R., Branford R.S., Bhaumik M.L. *Appl. Phys. Lett.*, **27**, 413 (1975).
 75. Бычков Ю.И., Иванов Н.Г., Коновалов И.Н., Лосев В.Ф., Тарасенко В.Ф., Тельминов Е.Н. *Квантовая электроника*, **10**, 1510 (1983).
 76. Абдуллин Э.Н., Горбачев С.И., Ефремов А.И., Ковальчук Б.М., Логинов С.В., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Толкачев В.С., Феденев А.В., Фомин Е.А., Щанин П.М. *Квантовая электроника*, **20**, 652 (1993).
 77. Ковальчук Б.М., Лосев В.Ф., Месяц Г.А., Тарасенко В.Ф. *Изв. вузов. Сер. Физика*, № 5, 12 (2000).
 78. Tarasenko V.F., Baksht E.H., Kopylova T.N., Kunts S.E., Kuznetsova R.T., Maier G.V., Mel'chenko S.V., Onitschenko A.L., Panchenko A.N., Samsonova L.G., Svetlichnyi V.A., Tel'minov E.N. *Proc. Conf. Lasers'98* (McLEAN: STS Press, 1999, p. 525).
 79. Мельченко С.В., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. *Письма в ЖТФ*, **12**, 171 (1986).
 80. Кауль В.Б., Кунц С.Э., Мельченко С.В. *Квантовая электроника*, **22**, 555 (1995).
 81. Artykhov V.Ya., Sokolova I.V., Kopylova T.N., Maier G.V., Tarasenko V.F. *Proc. Conf. Lasers'94* (McLEAN: STS Press, 1995, p. 208).