

Страницы истории ТПУ

УДК 621.375.8

ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЕ ЛАЗЕРЫ, РАЗРАБОТАННЫЕ В ИОА СО РАН

А.И. Федоров

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск
E-mail: fedorov@asd.iao.ru

Рассматривается история создания выпускниками Томского политехнического и государственного университетов первых лазеров в г. Томске на базе Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН. Приводятся параметры и особенности возбуждения электроразрядных лазеров с УФ-предионизацией на активных средах высокого давления N_2 , CO_2 , Cu и эксимерных молекулах. В г. Томске был создан один из первых в мире Cu -лазер с поперечным разрядом возбуждения и с импульсным получением паров меди за счет взрыва проводников. На нем были получены рекордные удельные параметры генерации: энергия излучения 2,4 Дж/л, пиковая мощность 120 МВт/л при КПД 0,16 %. Впервые разработан в России малогабаритный азотный лазер с максимальным КПД 0,27 % с энергией в импульсе 0,8 мДж, пиковой мощностью 160 кВт и частотой следования импульсов до 40 Гц.

Ключевые слова:

Импульсный газовый разряд, газоразрядные лазеры высокого давления, энергия излучения, КПД лазера.

Key words:

A pulse gas discharge, high-pressure gas-discharge lasers, radiation energy, laser efficiency.

Введение

В октябре 2009 г. исполнилось 40 лет со дня основания Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (ИОА СО РАН). Обращаясь к истории его рождения и работам, выполненными его сотрудниками, выпускниками ТПУ и ТГУ, ясно понимаешь, какую роль выполнили основатели института. Основой для создания Института оптики атмосферы стала лаборатория инфракрасных излучений Сибирского физико-технического института при Томском государственном университете, численность которой превышала 100 человек. Главной заслугой этого коллектива как в СССР, так и за рубежом была грамотная интерпретация результатов исследований распространения оптического излучения в атмосфере с учетом роли поглощения лазерного излучения атмосферными газами, ослабления аэрозолями, рефракции и прочих факторов. С открытием Института появились принципиально новые научные направления исследований, — это, прежде всего, решение обратных задач оптики атмосферы и лазерное зондирование атмосферы и океана.

Для успешного решения основных задач Института В.Е. Зуевым в 1972 г. было создано Специальное конструкторское бюро «Оптика» (в настоящее время Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН), основной

целью которого было разработка современной экспериментальной измерительной техники для обеспечения фундаментальных исследований по всем направлениям оптики атмосферы. В частности, была создана лазерная лаборатория, возглавляемая А.Н. Солдатовым, главной целью которой являлось практическая реализация в виде образцов соответствующих лазеров основных результатов исследований, проводимых в лаборатории прикладной квантовой электроники (ЛПКЭ) Института.

Автор статьи останавливается лишь на небольшой части работ, проведенных и проводимых в институте по разработке и исследованию электроразрядных лазеров высокого давления, используемых для задач атмосферной оптики и других прикладных приложений.

Созданием лазеров на различных газовых средах с возбуждением поперечным разрядом сотрудники Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН начали успешно заниматься в 1969 г. когда была создана ЛПКЭ, руководителем которой был назначен Ю.И. Бычков. В нее вошли сотрудники отделов СФТИ, возглавляемого д.ф.-м.н. В.Е. Зуевым и НИИ ядерной физики, возглавляемого д.т.н. Г.А. Месяцем [1]. У сотрудников лаборатории инфракрасного излучения был опыт создания и работы с He-Ne-лазерами. В 1963 г. в г. Томске был запущен И.И. Муравьевым с дипломниками А. Солда-

товым и В. Щербиком первый He-Ne-лазер с полым катодом ($\lambda=1,15$ мкм) [2]. Под его руководством работали дипломники и студенты старших курсов ТГУ: П. Бохан, И. Ипполитов, В. Клишкин и А. Солдатов, будущие сотрудники ИОА СО АН СССР. Г.А. Месяц и его сотрудники в конце 60-х годов прошлого века исследовали объемные разряды высокого давления [3, 4], которые позднее нашли применение при создании мощных импульсных газовых лазеров. Такое объединение сотрудников ТГУ и ТПИ оправдало в будущем свои надежды в полном объеме.

1. Лаборатория прикладной квантовой электроники

В 1969 г. коллективом в составе Ю.И. Бычкова, Ю.А. Курбатова и дипломника ТПИ В.Ф. Тарасенко был запущен первый в Томске импульсный лазер с продольным возбуждением на азоте ($\lambda=337,1$ нм) и неоне ($\lambda=614,3$ нм) [5]. В 1970 г. был запущен первый Си-лазер с продольным разрядом возбуждения П.А. Боханом с дипломником В.И. Соломоновым. В этом же году автор статьи, студент электрофизического факультета ТПИ, занимался учебно-исследовательской работой в ЛПКЭ в группе Ю.А. Курбатова по сборке и на-

стройке азотного лазера с поперечным разрядом возбуждения. В 1971 г., став дипломником, он получил тему работы от Ю.И. Бычкова по созданию CO_2 -лазера высокого давления с коронной УФ-предионизацией. В это время аспирант В.В. Осипов создавал CO_2 -лазер большого объема с двойным поперечным разрядом возбуждения. Ю.А. Курбатов и В.М. Орловский собирали и запускали CO_2 -лазер высокого давления с накачкой разрядом, инициируемым пучком электронов. Руководителем этих работ был Г.А. Месяц. Экспериментаторы Ю.И. Бычкова размещались в подвале первого здания ИХН СО АН СССР, а группа — П.А. Бохана в СФТИ, поэтому автору при разработке и изготовлении деталей оптического резонатора приходилось постоянно посещать СФТИ. Напыление зеркал осуществлялось в СФТИ, а обработка их — в мастерских НИИ ЯФ. Постоянными консультантами при выполнении работ были П.А. Бохан и В.М. Клишкин. В апреле 1972 г. была зарегистрирована впервые в СССР генерация в CO_2 -лазере высокого давления с коронной УФ-предионизацией. Вместе с В.Ф. Тарасенко были получены энергетические характеристики излучения. На рис. 1 приведены фотография и электрическая схема установки первого CO_2 -лазера.

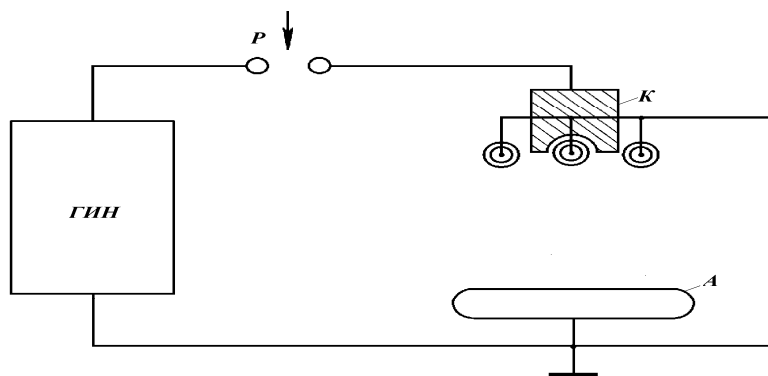
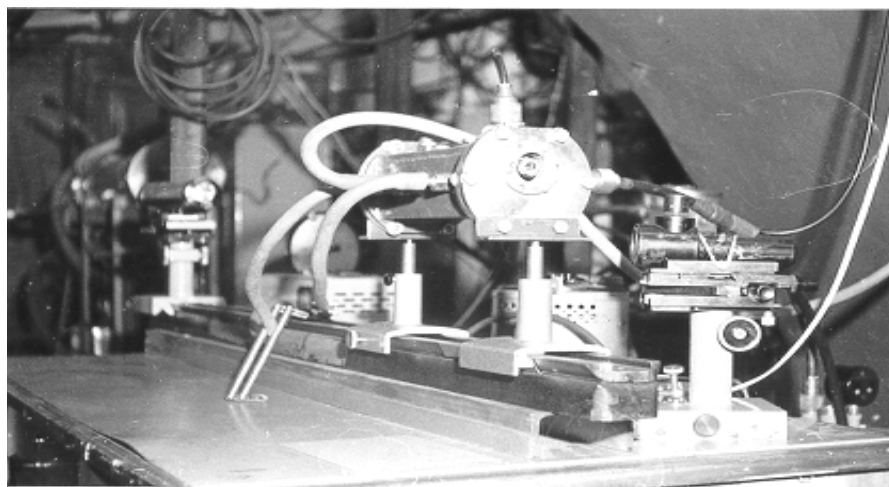


Рис. 1. Первый CO_2 -лазер с коронной УФ-предионизацией и принципиальная электрическая блок-схема накачки с использованием вспомогательного разряда через диэлектрик на катоде: ГИН — генератор импульсного напряжения; Р — коммутатор; К — катод; А — анод

Активный объем лазера составлял $17 \times 1 \times 1,2 \text{ см}^3$. Максимальная энергия излучения 12 мДж была зарегистрирована в смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:1:5$ при давлении 60,8 кПа и длительности импульсов излучения 200 нс. Лазер работал при давлениях до 121,6 кПа с частотой следования импульсов до 25 Гц. Форму импульса излучения нам удалось зарегистрировать только в начале мая, когда в СФТИ изготовили приемник излучения для ИК-диапазона. Дипломная работа была отмечена грамотой МВидСО РСФСР и премией. Более подробно результаты исследований приведены в работах [6, 7]. Позднее установка была передана В.В. Осипову, на которой была проведена оптимизация КПД лазера от удельных энергозатрат и разработана установка с активным объемом 1,5 л, которая позволяла получать энергию излучения за импульс 15 Дж [8]. В 1975 г. В.В. Осиповым была защищена кандидатская диссертация [9]. Данная модель лазера использовалась и используется в настоящее время в институте при решении задач атмосферной оптики.

Группой в составе В.Ф. Тарасенко, В.Ф. Лосева и А.И. Федорова были продолжены исследования и разработка мощных азотных лазеров. Были получены следующие максимальные параметры излучения: пиковая мощность 2,1 МВт, энергия излучения 11 мДж при длительности импульсов излучения на полувысоте 5 нс [10]. На основании этих исследований был разработан опытный образец азотного лазера АИЛ-1 с параметрами: пиковая мощность 1 МВт, энергия излучения 6 мДж, длительность импульсов излучения 5 нс, частота повторения до 5 Гц. Кроме того, нами впервые была применена автоматическая коронная УФ-преионизация на электродах для азотного лазера, которая позволила работать при давлениях чистого азота 121,6 кПа и в смесях с гелием до 2026 кПа [11]. Итогом этой работы стала кандидатская диссертация, защищенная в 1976 г. В.Ф. Тарасенко [12].

В 1977 г. были начаты исследования нового класса лазеров — эксимерных электроразрядных лазеров с УФ-преионизацией. В этом году впервые в СССР сотрудниками Ю.И. Бычковым, М.Н. Костиным, В.Ф. Тарасенко и А.И. Федоровым были разработаны электроразрядные лазеры с автоматической коронной УФ-преионизацией на молекулах: KrF ($\lambda=248 \text{ нм}$) с энергией 5 мДж, длительностью импульсов излучения 25 нс, КПД лазера 0,1 %; XeF ($\lambda=351 \text{ нм}$) с энергией 15 мДж, длительностью импульсов излучения 25 нс, КПД лазера 0,17 % и на XeCl ($\lambda=308 \text{ нм}$) с энергией 21 мДж, длительностью импульсов излучения 12 нс, КПД лазера 0,23 % [13].

С образованием в сентябре 1977 г. Института сильноточной электроники (ИСЭ СО АН СССР) эти работы были продолжены в лаборатории газовых лазеров, возглавляемой Ю.И. Бычковым. На базе ЛПКЭ была образована лаборатория коге-

рентных источников излучения, возглавляемая П.А. Боханом, которая продолжала заниматься разработкой лазеров на парах металлов. За разработку мощных импульсных УФ-лазеров в 1979 г. коллектив в составе И.Н. Коновалова, В.Ф. Лосева, В.Ф. Тарасенко и А.И. Федорова стал лауреатом премии Томского обкома ВЛКСМ. В 1982 г. автором статьи была защищена кандидатская диссертация по электроразрядным эксимерным лазерам [14].

Идея получения предельных параметров излучения лазеров на парах металлов, в частности на парах меди активно, разрабатывалась в ЛПКЭ. Интенсивные исследования проводились в группе П.А. Бохана: В.М. Климиным, В.И. Соломоновым, В.Е. Прокопьевым, В.Б. Щегловым как продольным, так и поперечным разрядом возбуждения [15, 16]. Такая же задача была поставлена Г.М. Месяцем Ю.И. Бычкову, но пары металлов необходимо было получать импульсным способом за счет электрического взрыва проводников в вакууме или электронным пучком. Автору этой статьи пришлось решать эту задачу практически. Из литературы была известна одна работа J.F. Asmus, N.K. Moncur, в которой было показано, что пары меди можно использовать в качестве активной среды для создания газоразрядного лазера. Возбуждение паров меди осуществлялось поперечным разрядом [17]. Для получения паров использовалось 12 проводников, каждый из которых находился внутри плазменной пушки. Все 12 плазменных пушек образовывали один из электродов системы возбуждения. Напротив находился второй электрод. На получение паров тратилась энергия 1,2 кДж. Выходная пиковая мощность составляла 30 Вт при длительности импульса генерации 65 нс. В начале пришлось решать проблему эффективного получения паров меди с минимальными энергозатратами для взрыва проводников в вакууме при давлении 0,0013 Па. Энергия, затрачиваемая на взрыв проводников, была уменьшена до 200 Дж. Для этого была спроектирована специальная камера высокого давления, которая приведена рис. 2, с принципиальной электрической блок-схемой получения и возбуждения паров меди.

В 1976 г. сотрудниками ИОА А.И. Федоровым, В.П. Сергеевко и В.Ф. Тарасенко впервые в СССР (одновременно с МГУ) были запущены Cu -лазеры с импульсным получением паров меди [18, 19]. Авторами работы [18] была получена удельная энергия излучения 0,4 Дж/л при длительности импульсов излучения 6 нс. Нами же она была доведена до 0,64 Дж/л при длительности импульсов излучения 30 нс, пиковой мощности 32 МВт/л и КПД 0,1 % [19]. Суммарные удельные параметры излучения наблюдались на длинах волн $\lambda=510,6$ и $578,2 \text{ нм}$. В то время это были максимальные удельные параметры излучения для медного лазера.

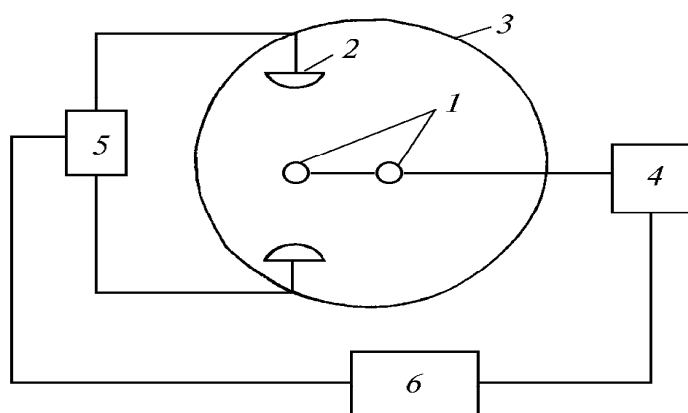
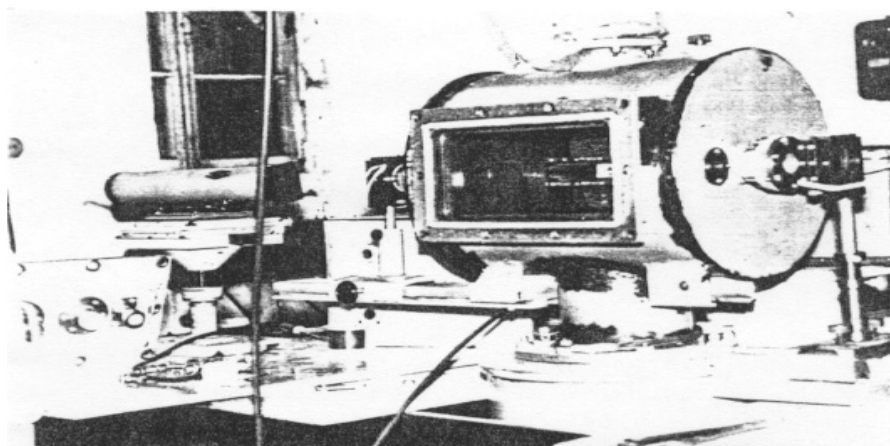


Рис. 2. Первый Cu-лазер с максимальными удельными параметрами генерации и его принципиальная электрическая схема: 1) медный проводник; 2) электроды возбуждения; 3) вакуумная камера; 4) генератор взрыва проводников; 5) генератор возбуждения; 6) генератор временных задержек

2. Лаборатория флуоресцентных методов исследования

В 1981 г. сотрудниками ИОА и ИСЭ СО АН СССР В.С. Верховским, В.М. Климкиным, В.Е. Прокопьевым, В.Ф. Тарасенко, В.Г. Соколовым и А.И. Федоровым были проведены совместные исследования по эффективности преобразования эксимерного излучения в другие спектральные диапазоны, в том числе видимый [20]. Экспериментально было исследовано ВКР излучения эксимерных лазеров на парах бария, тулия, европия. Энергия преобразования излучения ХеF-лазера ($\lambda=351$ нм) в желтую область ($\lambda=585$ нм) в парах бария составила 6 мДж при КПД ~39 %. Спектральный состав преобразованного излучения определялся ВКР, четырехволновыми параметрическими процессами, а также генерацией на собственном переходе бария. Реализовано ВКР излучения ХеCl-лазера ($\lambda=308$ нм) в парах тулия с $\lambda=422$ нм. В парах европия при квазирезонансе с запрещенным переходом получено индуцированное излучение на его собственных переходах. Позже В.М. Климкин стал руководителем лаборатории флуоресцентных методов исследования ИОА СО АН СССР.

В 1988 г. сотрудниками ИОА А.И. Федоровым, С.А. Бричковым, С.И. Тихомировым, В.С. Верховским был создан универсальный импульсный электроразрядный лазер с квазистационарным режимом возбуждения, предназначенный для решения задач зондирования атмосферы. На рис. 3 представлена принципиальная электрическая схема возбуждения лазера.

Лазер мог работать на эксимерных молекулах, например как ХеCl-лазер с энергией до 0,3 Дж и длительностью импульсов излучения от 30 до 110 нс, так и на смесях двуокиси углерода с энергией 2,5 Дж за импульс при давлении 60,8 кПа с КПД лазера 8 % и с изменяющейся длительностью импульсов излучения от 0,15 до 2,5 мкс, а также как азотный лазер с энергией излучения 0,01 Дж и длительностью импульсов излучения 5 нс [21]. В это же время был создан опытный образец мологабаритного ХеCl-лазера с оригинальной искровой УФ-предионизацией «ЧЭПЛ-5» [6]. На рис. 4 представлены общий вид лазерной системы и конструктивное исполнение лазерной камеры возбуждения.

Лазер обеспечивал среднюю мощность излучения 2,5 Вт с длительностью импульсов излучения 30 нс и частотой повторения до 100 Гц. В 1990 г.

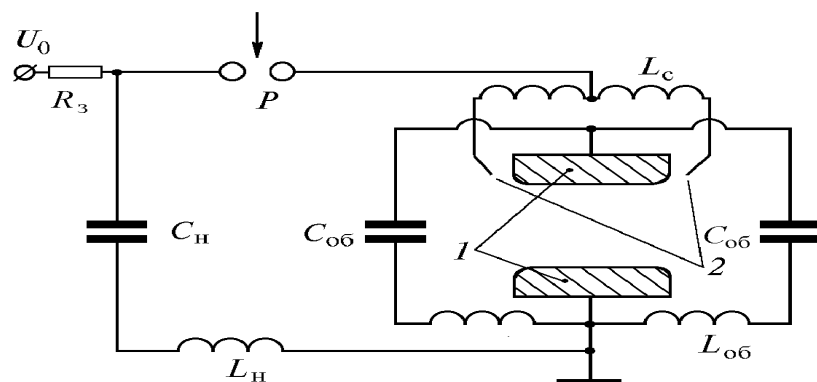


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема возбуждения универсального лазера на CO_2 , N_2 и эксимерных молекулах: 1) основные электроды; 2) ряды искровых промежутков

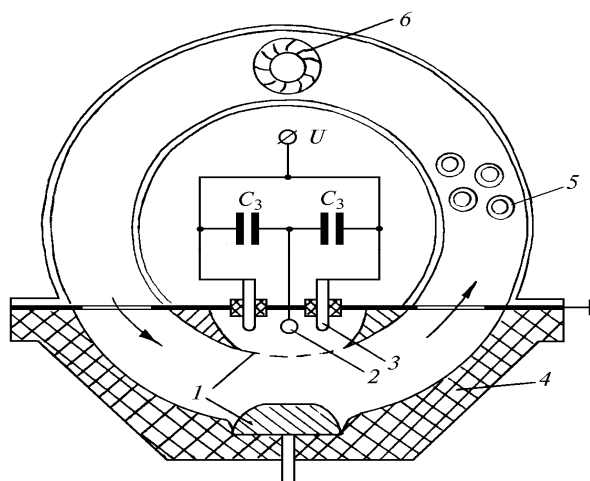
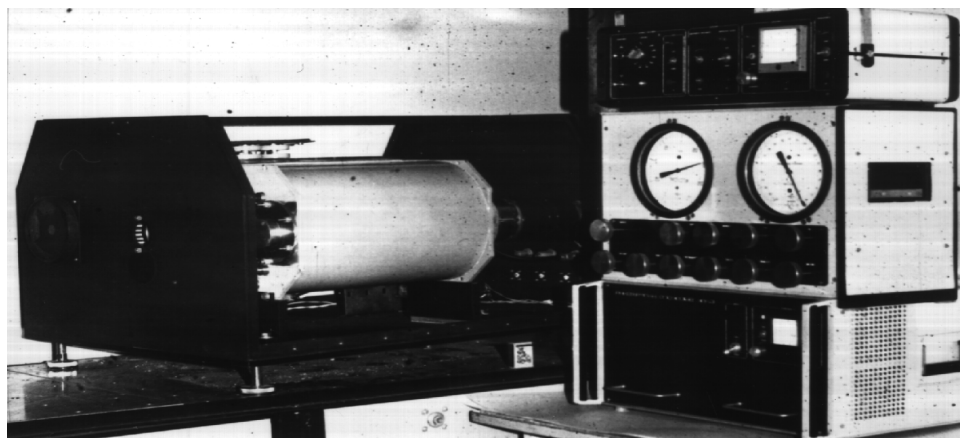


Рис. 4. Мобильный импульсно-периодический XeCl -лазер и конструктивное исполнение лазерной камеры возбуждения «ЧЭПЛ-5»: 1) электроды основного промежутка; 2, 3) электроды искрового промежутка; 4) изолятор лазерной камеры; 5) теплообменник; 6) вентилятор

впервые был запущен совместно с сотрудниками ИОФ АН СССР (г. Москва) азотный лазер с плазменными электродами, который обеспечивал два режима работы лазера с разным пространственным распределением лазерного излучения. Эти режимы работы лазера необходимы для решения ряда прикладных задач [22]. Лазер мог работать как при

низких, так и высоких давлениях азота. Общий вид опытного образца азотного лазера и его принципиальная схема возбуждения представлены на рис. 5.

Лазер обеспечивал энергию излучения 0,5 мДж за импульс при давлении 13,3 кПа с длительностью импульсов излучения 5 нс и частотой повторения 5 Гц.

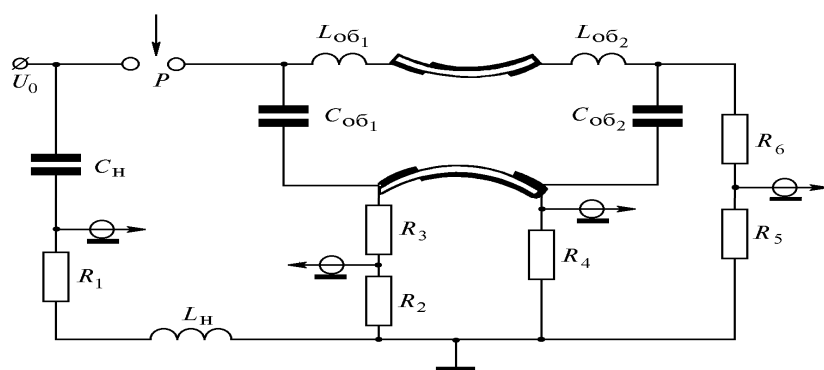


Рис. 5. Малогабаритный азотный лазер с плазменными электродами и принципиальная электрическая схема возбуждения

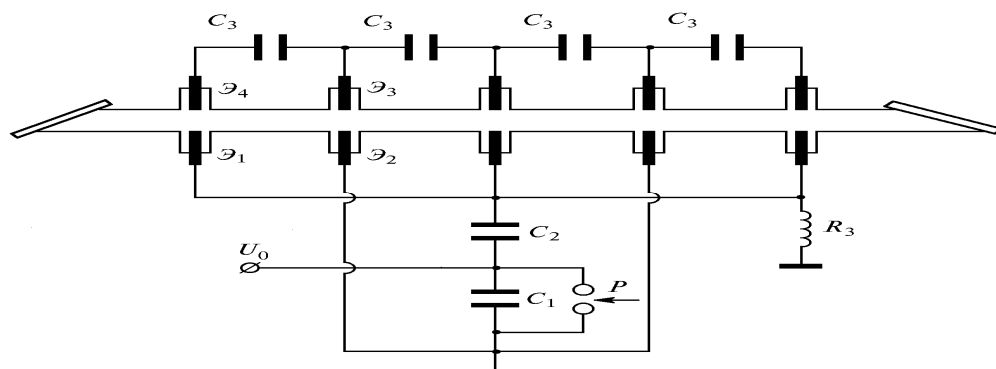
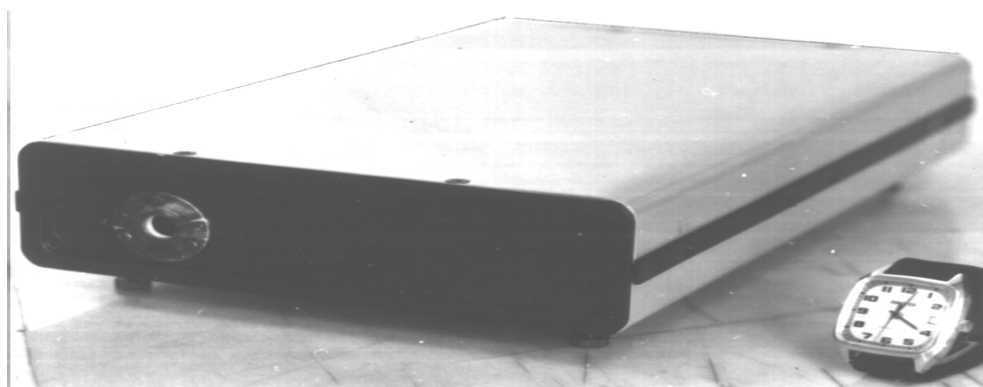


Рис. 6. Миниатюрный HeCl- и N₂-лазер и его принципиальная электрическая схема накачки с продольным разрядом возбуждения и автоматической УФ-предионизацией

В 1993–1995 гг. был разработан первый в России малогабаритный образец эксимерного XeCl - и N_2 -лазера с продольным разрядом возбуждения и автоматической искровой УФ-предионизацией [23]. На рис. 6 представлен общий вид лазера и принципиальная электрическая схема возбуждения.

Впервые XeCl -лазер с продольным разрядом возбуждения мог работать как с буферными газами He , Ne и Ar , так и без них. Выходная энергия излучения составляла 0,1 мДж при длительности импульса излучения 5 нс при суммарном давлении газовой смеси 6 кПа и зарядном напряжении 10 кВ. Азотный лазер обеспечивал среднюю мощность излучения 0,35 мВт при длительности импульса излучения 2,5 нс и рабочем давлении 5,3 кПа с частотой повторения импульсов 10 Гц.

Согласно теоретическим работам, по лазерам на парах металлов удельный энергосъем для медного лазера может быть порядка 3 Дж/л [24]. Поэтому нами были проведены дополнительные исследования предельных энергетических параметров излучения медного лазера при получении паров за счет взрыва проводника в вакууме и поперечном способе их возбуждения. В 1994 г. автором статьи были получены рекордные в мире удельные параметры излучения для медного лазера. Это энергия излуче-

ния 2,4 Дж/л, которой соответствовала мощность излучения 120 МВт/л с КПД лазера 0,16 % [25, 26]. Сегодня можно повысить предельные параметры лазеров на парах металлов за счет получения активной среды взрывом проводников, а возбуждение осуществлять индукционным поперечным или продольным разрядом [27, 28].

В 1999 г. сотрудниками В.М. Климкиным, В.Е. Прокопьевым и Н.А. Юдиным впервые был обнаружен оптогальванический эффект в импульсном лазере на парах меди, а также оптотермический эффект, обусловленный гистерезисом оптогальванического эффекта [29]. Эффект состоит в том, что поглощение света производит перераспределение населенностей уровней атомов или молекул. В результате различных радиационных и/или столкновительных, и/или коллективных процессов происходит изменение плотности заряженных частиц, их подвижности и энергии, что сказывается на ионизационном балансе и проводимости среды [30]. В работе [29] авторами была найдена обобщенная константа скорости девозбуждения резонансного уровня меди в состоянии ионизации активной среды. Была показана возможность измерения констант ступенчатой ионизации резонансных и метастабильных состояний ряда металлов в плазме импульсных разрядов. В это же время проводились исследования особенностей зажигания разря-

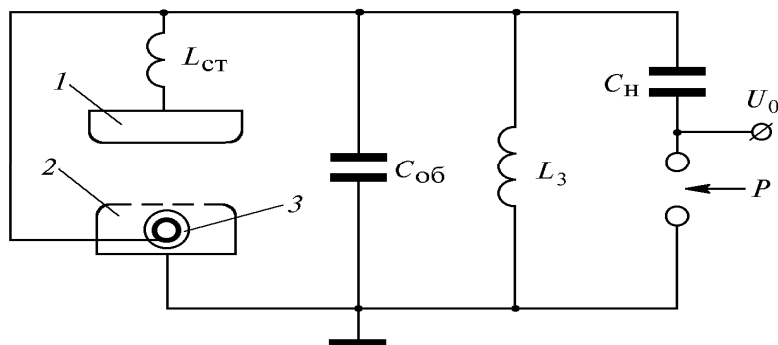
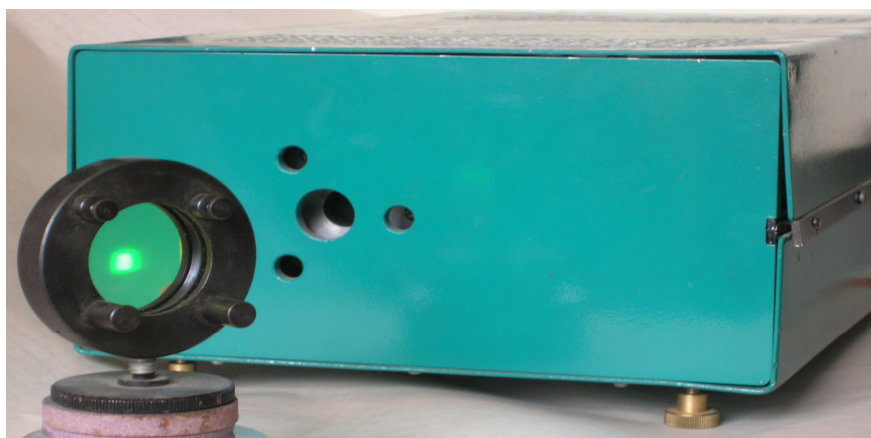


Рис. 7. Лабораторный образец малогабаритного азотного лазера с высоким КПД и его принципиальная электрическая схема возбуждения: 1, 2) электроды основного промежутка; 3) элемент коронной УФ-предионизации

да в ХеСl-лазере, накачиваемого самостоятельным разрядом при коронной, плазменной и искровой УФ-предионизации, которые позволили сделать вывод о существенной роли оптогальванического эффекта, обеспечивающегося дополнительным источником УФ-излучения [31]. Эти исследования согласуются с работами авторов [32, 33]. На основании проведенных исследований был предложен новый тип самостоятельного разряда возбуждения для газовых лазеров высокого давления. Это самостоятельный самоподдерживающийся разряд. Его отличие от самостоятельного разряда, который тоже является самоподдерживающимся, в том, что он может управляться УФ- или Х-предионизацией или несамостоятельным разрядом. Ранее роль УФ-предионизации отводилась лишь для создания начальной оптимальной концентрации электронов в активной среде перед срабатыванием вспомогательного или основного источника возбуждения. В самостоятельном самоподдерживающемся разряде источник УФ-предионизации обеспечивает одновременно как начальную концентрацию электронов в активном объеме, так и ее оптимальное поддержание в течение горения всего разряда [34, 35]. На основании нового типа разряда и ранее проведенных исследований по возможности повышения эффективности азотного лазера нами впервые в России был создан лабораторный образец лазера с высоким КПД. На рис. 7 приведены общий вид малогабаритного азотного лазера и его принципиальная электрическая схема возбуждения.

Лазер обеспечивал практический КПД на уровне 0,27 % с энергией в импульсе 0,8 мДж, пиковой мощностью 160 кВт, длительностью импульсов излучения 5 нс, с апертурой излучения 5×7 мм² и частотой следования импульсов до 25 Гц [36].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макушкин Ю.С., Майер Г.В., Янчарина А.М. Современные проблемы оптики и спектроскопии. – Томск: Изд-во ТГУ, 2001. – 464 с.
2. Солдатов А.Н., Янчарина А.М. Становление и развитие физики лазеров в Томском университете // Известия вузов. Физика. – 1999. – № 8. – С. 4–13.
3. Месяц Г.А. Исследование по генерации мощных наносекундных импульсов: Дис. ... д.т.н. – Томск, 1966. – 292 с.
4. Ковальчук Б.М., Кремнев В.В., Месяц Г.А. Лавинный разряд в газе и генерирование нано-субнаносекундных импульсов большого тока // Доклады АН СССР. – 1970. – Т. 191. – № 1. – С. 76–78.
5. Тарасенко В.Ф., Курбатов Ю.А. О.К.Г. на азоте с продольным разрядом и высокой удельной мощностью // Приборы и техника эксперимента. – 1973. – № 1. – С. 182–183.
6. Федоров А.И. Импульсные газовые лазеры, возбуждаемые самостоятельным разрядом с автоматической УФ-предионизацией: Автореф. дис. ... д.ф.-м.н. – Новосибирск, 2002. – 26 с.
7. Тарасенко В.Ф., Савин В.В. Характеристики CO₂-лазера повышенного давления с поперечным разрядом // Журнал технической физики. – 1973. – Т. 13. – № 2. – С. 353–354.

Заключение

С 1998 г. Институтом оптики атмосферы СО РАН руководит заслуженный деятель науки РФ, д.ф.-м.н. Г.Г. Матвиенко, который успешно поддерживает основные принципы его развития, заложенные В.Е. Зуевым. За последние десятилетия мощным стимулом развития атмосферной оптики стало использование лазеров с их уникальными свойствами и широкими возможностями для практики. Применение лазеров в системах дистанционного зондирования параметров атмосферы с рекордно высоким временным и пространственным разрешением, в работающих в атмосфере системах связи, локации, дальнометрирования, навигации и передачи информации. Эти применения обусловили формирование соответствующих требований перехода от классической к современной атмосферной оптике как в фундаментальных исследованиях (фемтосекундная атмосферная оптика), так и при создании соответствующей технической базы. В последние годы в связи с необходимостью совершенствования моделей погоды и климата, учитывающих постоянно растущую антропогенную нагрузку на атмосферу планеты, возросла роль комплексных атмосферно-оптических исследований.

После первых работ по исследованию генерации на He-Ne, N₂, CO₂, Cu, Eu и эксимерных молекулах сотрудниками ИОА СО РАН были продолжены детальные исследования этих и многих других лазерных сред, преобразование излучения и создание лабораторных образцов лазеров. В настоящее время ведутся работы по управлению и повышению качества выходных параметров излучения УФ-лазеров для прикладных задач [37], а также по поиску новых эффективных методов возбуждения газовых сред, в том числе новым импульсным индукционным разрядом [27, 28, 38].

8. Бычков Ю.И., Кудряшов В.П., Осипов В.В. Импульсный лазер на двуокиси углерода с энергией 15 Дж // Квантовая электроника. – 1974. – № 5. – С. 1256–1258.
9. Осипов В.В. Исследование энергетических характеристик электроразрядных импульсных лазеров на двуокиси углерода: Автореф. дис. ... к.ф.-м.н. – Томск, 1975. – 20 с.
10. Тарасенко В.Ф., Федоров А.И., Бычков Ю.И. Мощный азотный лазер // Квантовая электроника. – 1974. – Т. 1. – № 5. – С. 1226–1227.
11. Лосев В.Ф., Тарасенко В.Ф., Федоров А.И. Генератор накачки для лазеров // Приборы и техника эксперимента. – 1976. – № 5. – С. 213–214.
12. Тарасенко В.Ф. Особенности возбуждения лазеров на самоограниченных переходах: Автореф. дис. ... к.ф.-м.н. – Томск, 1976. – 24 с.
13. Бычков Ю.И., Костин М.Н., Тарасенко В.Ф., Федоров А.И. Электроразрядные эксимерные лазеры // Квантовая электроника. – 1978. – Т. 5. – № 5. – С. 1164–1166.
14. Федоров А.И. Эксимерные лазеры на молекулах ХеF и ХеСl, возбуждаемые самостоятельным разрядом: Автореферат дис. ... к.ф.-м.н. – Томск, 1982. – 17 с.
15. Бохан П.А. Эффективные газоразрядные лазеры на парах металлов. – Томск: Изд-во ИОА СО АН СССР, 1978. – 100 с.

16. Солдатов А.Н., Соломонов В.И. Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов. — Новосибирск: Наука, 1985. — 149 с.
17. Asmus J.F., Moncur N.K. Pulse broadening in a MND copper vapor laser // Appl. Phys. Lett. — 1968. — V. 13. — № 11. — P. 384–385.
18. Исаков И.М., Леонов А.Г. Лазер на парах меди при давлении паров, близком к атмосферному // Письма в ЖТФ. — 1976. — Т. 2. — № 19. — С. 865–867.
19. Федоров А.И., Сергеев В.П., Тарасенко В.Ф., Седой В.С. Лазер на парах меди с импульсным созданием паров. // Известия вузов. Физика. — 1977. — № 2. — С. 135–136.
20. Верховский В.С., Климин В.М., Прокопьев В.Е., Тарасенко В.Ф., Соколов В.Г., Федоров А.И. Исследование ВКР излучения эксимерных лазеров на электронных переходах атомов металлов // Квантовая электроника. — 1982. — Т. 9. — № 11. — С. 2151–2155.
21. Федоров А.И., Тихомиров С.И., Жунусов Б.А. Импульсный CO₂-лазер // Оптика атмосферы. — 1989. — Т. 2. — № 9. — С. 1003–1005.
22. Закрин Б.О., Кузьмин Г.П., Тихомиров С.И., Федоров А.И. УФ-лазер с плазменными электродами // Оптика лазеров: Тез. докл. VI Всес. конф. — Л., 1990. — С. 414.
23. Федоров А.И. ХеСl-лазер низкого давления с продольным разрядом // Оптика атмосферы и океана. — 1994. — Т. 7. — № 1. — С. 96–101.
24. Елецкий А.В., Земцов Ю.К., Родин А.В., Старостин А.И. Оптимальные характеристики лазера на парах металлов высокого давления // Доклады АН СССР. Физика. — 1975. — Т. 220. — № 2. — С. 318–321.
25. Федоров А.И. Импульсный лазер на парах меди с высокими удельными параметрами // Письма в ЖТФ. — 1994. — Т. 20. — № 19. — С. 6–8.
26. Федоров А.И. Перспективы повышения энергетических параметров излучения Си-лазера, возбуждаемого поперечным разрядом // Журнал технической физики. — 1996. — Т. 66. — № 7. — С. 115–123.
27. Ражев А.М., Чуркин Д.С. Индукционный ультрафиолетовый азотный лазер // Письма в ЖЭТФ. — 2007. — Т. 86. — № 5–6. — С. 479–483.
28. Федоров А.И. Особенности формирования импульсного индукционного разряда для накачки газоразрядных источников излучения // Письма в ЖТФ. — 2009. — Т. 35. — № 20. — С. 48–54.
29. Юдин Н.А., Климин В.М., Прокопьев В.Е. Оптогальванический эффект в лазере на самоограниченных переходах атома меди. // Квантовая электроника. — 1999. — Т. 28. — № 3. — С. 273–276.
30. Очкин В.Н., Преображенский Н.Г., Соболев Н.Н., Шапарев Н.Я. Оптогальванический эффект в плазме и газе // Успехи физических наук. — 1986. — Т. 148. — № 3. — С. 473–507.
31. Федоров А.И. Влияние буферного газа аргона и УФ-предioniзации на параметры излучения электроразрядного ХеСl-лазера // Письма в ЖТФ. — 2000. — Т. 26. — № 26. — С. 71–77.
32. Басов Н.Г., Глотов Е.П., Данилычев В.А., Миланич А.И., Сорока А.М. Накачка мощных газовых лазеров самоподдерживающимся электрофотоионизационным разрядом // Письма в ЖТФ. — 1979. — Т. 5. — № 8. — С. 449–453.
33. Sato Y., Inoe M., Haruta K. et. al. High repetition rate operation of a long pulse excimer laser // Appl. Phys. Lett. — 1994. — V. 64. — № 6. — P. 679–680.
34. Федоров А.И. Возможности увеличения и управления длительностью импульсов излучения газоразрядных лазеров // Письма в ЖТФ. — 2001. — Т. 27. — № 24. — С. 52–56.
35. Федоров А.И. Газовые лазеры высокого давления, возбуждаемые самостоятельным самоподдерживающимся разрядом // Оптика атмосферы и океана. — 2004. — Т. 17. — № 2–3. — С. 183–187.
36. Федоров А.И. Возможности повышения эффективности отпаянного азотного лазера // Письма в ЖТФ. — 2005. — Т. 31. — № 10. — С. 88–94.
37. Федоров А.И. ХеСl-лазер с управляемой формой импульса излучения // Квантовая электроника. — 2009. — Т. 39. — № 4. — С. 313–316.
38. Федоров А.И. Возможности создания импульсного индукционно-емкостного продольного разряда // Письма в ЖТФ. — 2009. — Т. 35. — № 24. — С. 81–87.

Поступила 31.08.2009 г.