

**Лазеры, разработанные в ИОА СО РАН (обзор)***А. И. Федоров*

*Приведены результаты исследований по разработке первых электроразрядных лазеров на активных средах  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $Cu$ ,  $CuBr$  и эксимерных молекулах в Институте оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН. В нем был создан один из первых в мире  $Cu$ -лазер с импульсным получением паров меди за счет взрыва проводников и поперечным разрядом возбуждения. Для медного лазера были получены рекордные удельные параметры генерации, почти равные предельным: энергия излучения 2,4 Дж/л, пиковая мощность 120 МВт/л с КПД равным 0,16 %. Для  $CuBr$ -лазера, работающего в частотном режиме, впервые была получена средняя мощность излучения более 100 Вт. В режиме сдвоенных импульсных возбуждения были найдены условия, ограничивающие рост КПД  $CuBr$ -лазера. Для него был получен рекордный КПД, равный 2,7 %. Впервые был разработан азотный лазер с максимальным КПД, равным 0,27 %, с энергией 0,8 мДж, пиковой мощностью 160 кВт. Впервые был разработан миниатюрный  $HeCl$ -лазер с продольным разрядом возбуждения, который работал как с буферными газами  $He$ ,  $Ne$  и  $Ar$ , так и без них.*

*Ключевые слова:*  $Cu$ ,  $CuBr$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$  и эксимерные лазеры, режимы возбуждения, удельная энергия и пиковая мощность излучения, КПД лазера.

**DOI:** 10.51368/2307-4469-2021-9-5-417-429

**Введение**

В октябре 2019 года исполнилось 50 лет со дня создания Института оптики атмосферы им. В. Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН). Основой для создания Института оптики атмосферы стала Лаборатория инфракрасных излучений Сибирского физико-технического института (СФТИ) при Томском государственном университете (ТГУ), 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 оптического мониторинга СО РАН), основной целью которого было разработка современной экспериментальной измерительной техники для обеспечения фундаментальных исследований по всем направ-

**Федоров Анатолий Игнатьевич**, с.н.с., д.ф.-м.н.

E-mail: fedorov@iao.ru

Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН.

Россия, 634021, г. Томск, пл. Зуева, 1.

Статья поступила в редакцию 01 июня 2021 г.

© Федоров А. И., 2021

лениям оптики атмосферы. В частности, была создана лазерная Лаборатория, возглавляемая А. Н. Солдатовым, главной целью которой являлось практическая реализация в виде создания образцов соответствующих лазеров на основании результатов исследований, проводимых в Лаборатории прикладной квантовой электроники (ЛПКЭ) Института.

Автор данной статьи останавливается лишь на малой части работ, проведенных и проводимых в Институте, а именно, на работах по созданию и исследованию электро-разрядных лазеров высокого давления, используемых для задач атмосферной оптики и других прикладных приложений. Однако такие же тенденции к синергетике имеющих потенциалов можно проследить и в других направлениях работ ИОА.

Созданием лазеров на различных газовых средах с возбуждением продольным и поперечным разрядом сотрудники ИОА начали успешно заниматься в 1969 г., когда была создана ЛПКЭ, руководителем которой был назначен Ю. И. Бычков. В нее вошли сотрудники отделов СФТИ ТГУ, руководимого д.ф.-м.н. В. Е. Зуевым, и НИИ ядерной физики ТПИ, руководимого д.т.н. Г. А. Месяцем [1]. У сотрудников Лаборатории инфракрасного излучения СФТИ к тому времени был опыт создания и работы с He-Ne-лазерами. В 1963 г. в Томске И. И. Муравьевым с дипломниками А. Солдатовым и В. Щербиком был запущен первый He-Ne-лазер с полым катодом ( $\lambda = 1,15$  мкм) [2]. Под руководством И. И. Муравьева в СФТИ работали дипломники и студенты старших курсов ТГУ: П. Бохан, В. Клишкин и А. Солдатов – будущие сотрудники ИОА СО АН СССР. Г. А. Месяц и его сотрудники в конце 60-х годов исследовали объемные разряды в газах высокого давления [3, 4], которые позднее нашли свое применение при создании мощных импульсных газовых лазеров. Объединение сотрудников ТГУ и ТПИ в полном объеме оправдало в будущем все возлагавшиеся на него надежды.

Целью данной работы является представление обзора основных достижений ИОА СО РАН в области электроразрядных

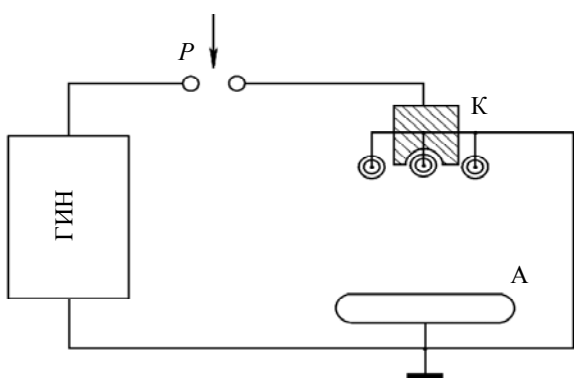
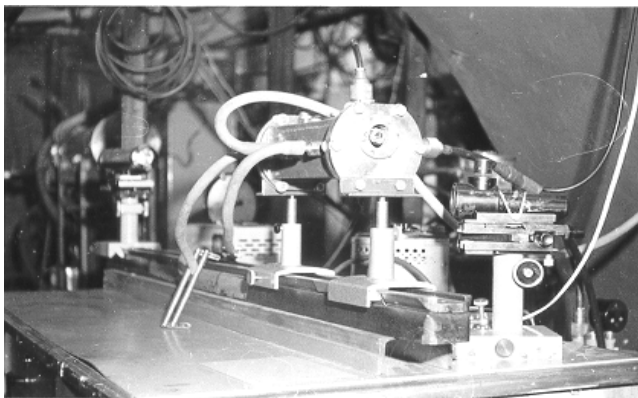
лазеров на активных средах  $N_2$ ,  $CO_2$ , Cu, CuVg и эксимерных молекулах.

### Первые лазеры Лаборатории прикладной квантовой электроники

В 1969 г. коллективом в составе Ю. А. Курбатовым 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 Cu-лазер с продольным разрядом возбуждения П. А. Боханом с дипломником В. И. Соломоновым. В этом же году автор данной статьи, студент электрофизического факультета ТПИ, занимался учебно-исследовательской работой в ЛПКЭ в группе Ю. А. Курбатова по сборке и настройке азотного лазера с поперечным разрядом возбуждения. В 1971 г. была предложена дипломная работа по созданию  $CO_2$ -лазера высокого давления с коронной УФ-предыонизацией. В это время Ю. А. Курбатов и В. М. Орловский собирали и запускали  $CO_2$ -лазер высокого давления с накачкой разрядом, инициируемым пучком электронов. Инициатором этих работ был Г. А. Месяц, а консультантом – П. А. Бохан. Моими постоянными консультантами были П. А. Бохан и В. М. Клишкин. В апреле 1972 г. нами была получена впервые в СССР генерация в  $CO_2$ -лазере высокого давления с коронной УФ-предыонизацией (см. рис. 1).

Активный объем лазера составлял  $17 \times 1 \times 1,2$  см<sup>3</sup>. Максимальная энергия излучения 12 мДж была зарегистрирована в смеси  $CO_2:N_2:He = 1:1:5$  при давлении 0,6 атм и длительности импульсов излучения 200 нс. Лазер работал при давлении активной среды 1,2 атм и частотой следования импульсов 25 Гц. Нам удалось форму импульса излучения зарегистрировать только в начале мая, когда в СФТИ изготовили приемник излучения, работающий в ИК-диапазоне. Дипломная работа была отмечена грамотой МВССО РСФСР [6]. Более подробно результаты исследований приведены в работе [7]. Данная модель лазера использовалась и

используется в настоящее время в институте при решении задач атмосферной оптики.



**Рис. 1.** Фотография первого  $\text{CO}_2$ -лазера с коронной УФ-предыонизацией и принципиальная электрическая блок-схема накачки с использованием вспомогательного разряда через диэлектрик на катоде: ГИИ – генератор импульсного напряжения;  $P$  – коммутатор;  $K$  – катод;  $A$  – анод.

В этом же году автор статьи был зачислен стажером-исследователем в ЛПКЭ в группу по разработке мощных азотных лазеров с поперечным разрядом возбуждения активных сред. В результате этих исследований были получены следующие максимальные параметры излучения: пиковая мощность 2,1 МВт, энергия излучения 11 мДж при длительности импульсов излучения на полувысоте 5 нс [8]. На основании этих исследований был разработан опытный образец азотного лазера АИЛ-1 со следующими параметрами: пиковая мощность 1 МВт, энергия излучения 6 мДж, длительность импульсов излучения 5 нс и частота повторения до 5 Гц. Кроме того, нами впервые была применена автоматическая коронная УФ-предыонизация на электродах азотного лазера, которая позволила работать при

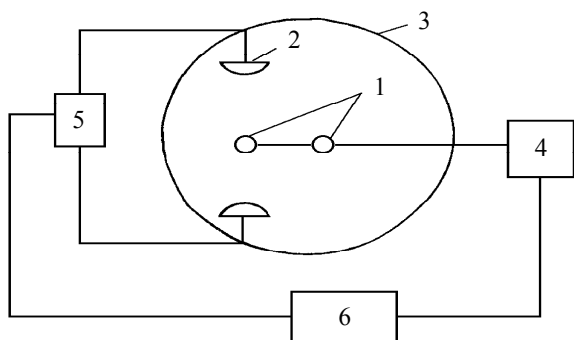
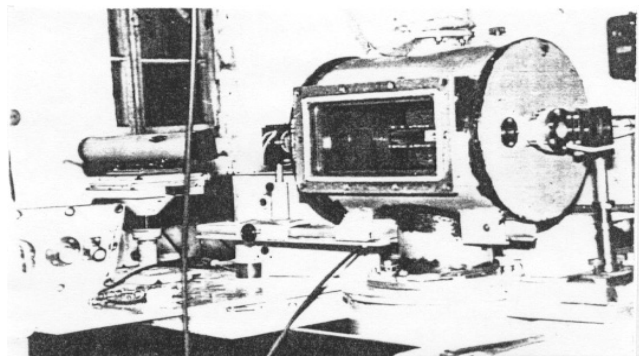
давлении чистого азота 1,2 атм и в смесях с гелием при давлении 20 атм [9].

В ЛПКЭ активно разрабатывалась идея получения предельных параметров излучения на парах металлов, в частности, на парах меди, а также создание лазеров непрерывного действия. Эти исследования проводились в группе П. А. Бохана. Так, В. М. Климкиным и В. Е. Прокопьевым был запущен  $\text{Ca:H}_2$ -лазер непрерывного режима генерации с длиной волны 5,54 мкм [10]. Непрерывный режим генерации устанавливался вследствие тушения метастабильного состояния кальция водородом. Мощность лазера составляла 0,1 Вт с КПД равным 0,1 %.

Группа П. А. Бохана проводила детальные исследования по использованию как продольного, так и поперечного разряда возбуждения для накачки активных сред паров металлов. Такая же задача была поставлена Г. А. Месяцем для нашей группы. Пары меди необходимо было получить импульсным способом за счет электрического взрыва проводников или электронного пучка. Меня назначили руководителем этой темы, которую пришлось решать практически «с чистого листа». Авторами работы [11] было показано, что за счет взрыва проводников можно получать пары меди. Затем их возбуждать поперечным самостоятельным разрядом. 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.

Первая задача, которую нам пришлось решать, – это проблема эффективного получения паров меди с минимальными затратами энергии на взрыв проводников в вакууме при давлении  $10^{-5}$  Торр. Нами был найден оптимальный режим взрыва проводника с минимальной энергией, которая равнялась 0,2 кДж. При этом данная система получения паров меди была надежная и простая в эксплуатации. Затраты энергии на пары меди были на порядок меньше, чем в работе

[11]. Для этого была спроектирована специальная камера высокого давления.



**Рис. 2.** Фотография первого Си-лазера 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.

В 1976 г. нами впервые в СССР (одновременно с сотрудниками МГУ) были запущены Си-лазеры с импульсным получением паров меди и поперечным разрядом возбуждения (см. рис. 2) [12, 13]. Авторами работы [12] 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 лазера 0,1 % [13]. Суммарные удельные параметры излучения наблюдались на длинах волн  $\lambda = 510,6$  нм и 578,2 нм. В то время это были максимальные удельные параметры излучения для медного лазера. Согласно выводам теоретической работы по лазерам на парах металлов, удельная максимальная энергия излучения для медного лазера должна составлять

$\sim 3$  Дж/л [14]. Позже нами были проведены детальные исследования предельных энергетических параметров излучения медного лазера на данной экспериментальной установке. В 1994 г. автором статьи были получены рекордные в мире удельные параметры излучения, близкие к предельным характеристикам медного лазера. Это удельная энергия излучения 2,4 Дж/л, которой соответствовала удельная мощность излучения 120 МВт/л с КПД лазера 0,16 % [15, 16]. В настоящее время можно повышать предельные параметры излучения лазеров на парах металлов за счет получения активной среды взрывом проводников, а возбуждение осуществлять индукционным поперечным или продольным разрядом [17, 18].

В. Б. Щегловым и П. А. Боханом были также проведены детальные исследования медного лазера с поперечным самостоятельным разрядом возбуждения [19]. Ими были исследованы детально зависимости параметров излучения от характеристик газового разряда накачки. Для медного лазера была показана возможность получения удельной энергии излучения 55 мДж/л с КПД 1 %. В смесях с малой концентрации буферного газа оптимальные частоты возбуждения составляла 10–18 кГц. При больших концентрациях буферного газа неона частота повторения повышалась до 20–36 кГц. В это время В. И. Соломонов, В. А. Герасимов и В. Б. Щеглов провели детальные исследования Си-лазера с продольным разрядом накачки [20]. Ими был сделан сравнительный анализ результатов исследований с поперечным и продольным разрядом возбуждения. Было показано, что для поперечного разряда возбуждения удельная энергия излучения выше, чем для продольного разряда, которая составляла 40 мДж/л. Следует отметить, что с продольным разрядом возбуждения при частоте 50 Гц был получен один из наиболее высоких КПД лазера 2,1 %. Результаты этих исследований подробно приведены в трудах [21, 22].

С образованием в сентябре 1977 г. Института сильноточной электроники (ИСЭ СО АН СССР) работы по лазерной тематике

были продолжены сотрудниками в Лаборатории газовых лазеров, возглавляемой Ю. И. Бычковым. На базе ЛПКЭ в ИОА СО РАН была образована Лаборатория когерентных источников излучения, возглавляемая П. А. Боханом, которая продолжала заниматься разработкой лазеров на парах металлов.

### **Лаборатория когерентных источников излучения, а в настоящее время Лаборатория квантовой электроники**

Г. В. Колбычевым и П. А. Боханом успешно проводились исследования по новым методам возбуждения лазеров на парах металлов. Одним из них является, метод генерации убегающих электронов для активных газовых сред среднего давления до 152 Торр. Он применим как в одиночном, так и частотном режимах работы источника накачки с частотой до 1 кГц [23, 24]. Ими была показана высокая эффективность получения пучка убегающих электронов, а именно, в 5 раз выше, чем ранее полученная другими авторами. Впервые было предложено получение ленточных электронных пучков в газе среднего давления для возбуждения импульсных газовых лазеров.

Позже Г. В. Колбычевым и И. В. Пташником были продолжены исследования сильноточных пучков убегающих электронов [25, 26]. Вопрос о физике этого разряда, протекающего в газе среднего давления в узких межэлектродных промежутках и генерирующего сильноточные пучки убегающих электронов (УЭ), имел принципиальное значение как в научном, так и прикладном плане. Хотя эти пучки уже успешно применялись для накачки лазеров, ясного понимания основных механизмов этого разряда не было. Авторами впервые было экспериментально установлено существование двух переходных режимов разряда, генерирующего пучки УЭ. Первый режим, неизвестный ранее, имел место лишь при достаточно мощной внешней УФ-подсветке и возникал сразу же после пробоя промежутка. Второй

режим – это затруденный тлеющий разряд. Он следует за первым режимом, либо, при слабой УФ-подсветке, возникает уже в процессе пробоя промежутка.

Г. В. Колбычевым были проведены исследования по накачке продольными пучками УЭ-лазеров на парах металлов с низкими рабочими температурами активной среды. Показана возможность получения эффективной генерации на парах кадмия с длиной волны генерации 441,6 нм и в парах цинка на длине волны 492 нм [27]. Полученные данные являются основой для разработки лазеров на парах металлов.

В обзорной работе [28] была показана возможность получения эффективных радиальных пучков УЭ для накачки лазеров с высокой пиковой энергии с низкой частотой следования импульсов возбуждения. Для высокой средней мощности излучения оказываются более эффективными продольные пучки УЭ с высокой частотой повторения. В работе [29] была показана возможность накачки газовой среды параллельными поперечными пучками УЭ. На основе этого метода был создан СО<sub>2</sub>-лазер с частотой следования импульсов генерации 30 Гц, средней мощностью 9 мВт и давлением 20 Торр рабочей смеси СО<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>. В работах П. А. Бохана с сотрудниками [30, 31], была продемонстрирована высокая эффективность накачки лазеров на парах металлов радиальными пучками УЭ. Так, в лазере на бромиде меди была получена удельная энергия излучения 44 мДж/л с частотой импульсов возбуждения 3 кГц [31].

Лазер на парах бромида меди привлекал внимание многих исследователей из-за пониженной температуре активной среды, что обеспечивало создание надежных и более простых приборов. Разработкой и исследованием этого типа лазера занимались В. Ф. Елаев и В. П. Пеленков. Ими впервые была получена средняя мощность излучения 112 Вт при частоте следования импульсов 25 кГц [32]. Для средней мощности генерации 100 Вт КПД лазера составлял 1,7 %. Эти результаты были получены в разрядной трубе длиной 150 см с диаметром 6 см. Самые

высокие параметры данного лазера обеспечили дальнейшее его развитие.

В. Б. Сухановым и Ф. А. Губаревым впервые был создан CuBr-лазер, накачиваемый емкостным высокочастотным разрядом [33]. В качестве буферного газа применялся неон. Ими была получена средняя мощность 1 Вт с частотой повторения импульсов генерации 100 кГц. Особенность данного режима накачки в том, что рабочие электроды находились вне активного объема лазера. Это обеспечивало долговременную работу лазера в отпаянном режиме генерации. Детальные исследования данного режима накачки приведены в работе [34]. Дальнейшие исследования позволили увеличить среднюю мощность излучения до 12 Вт с КПД лазера 0,5 % [35].

А. Н. Солдатовым и В. Ф. Федоровым впервые для медного лазера была реализована частота следования импульсов генерации 230 кГц [36]. Не ясен был механизм ограничения частот следования импульсов в лазерах на парах металлов. С практической точки зрения, большой интерес представлял высокочастотный CuBr-лазер с добавками водорода или HBr. Д. В. Шияновым проводились детальные исследования данного лазера в работе [37]. Была реализована частота следования импульсов генерации до 300 кГц и показана возможность достижения частоты следования свыше 600 кГц. Впервые был создан образец лазера на парах бромида меди с встроенным генератором HBr, с выходной мощностью 10 Вт и частотой следования импульсов 100 кГц. Авторами работы [38] частота повторения импульсов генерации лазера была доведена до 700 кГц.

Для лазеров на парах металлов на самоограниченных переходах интересен вопрос увеличения длительности импульсов генерации. Обычная длительность импульсов 20–40 нс. Длинными импульсами считаются импульсы длительностью 100–300 нс. Они эффективны для ряда прикладных задач. Это пучки излучения для усилителей яркости с высоким их качеством и с минимальной дифракционной расходимостью. В ра-

боте А. Н. Солдатова [39] было показано, что за счет изменения длительности импульса накачки в медном лазере возможно получение импульсов генерации длительностью от 3 до 200 нс. В лазере на парах бромида меди В. Ф. Федоровым с сотрудниками были получены импульсы генерации длительностью до 320 нс за счет ограничения разрядного тока накачки [40]. Наибольшая длительность импульсов генерации достигалась в трубках среднего и большого диаметра от 2,5 до 5 см при частоте следования импульсов возбуждения 2–4 кГц.

Впервые усилитель яркости в виде лазерного проекционного микроскопа на парах металлов был представлен в работе [41]. Детально усилители яркости были исследованы и сформулированы к ним требования по их эффективной работе в публикации [42].

В 2009 году в Институте были начаты исследования для наблюдения быстротекающих процессов в средах с большой температурой (засветкой) за счет лазерного мониторинга на CuBr-лазере с частотой следования излучения 50–70 кГц [43]. В результате этих исследований был разработан макет бистатического лазерного монитора на основе CuBr-лазера для визуализации удаленных объектов. В схеме использовались два активных элемента. Один выполнял функцию подсветки объекта наблюдения, второй использовался как усилитель яркости изображения [44].

Дальнейшие исследования CuBr-лазера были связаны с работой его в режиме регулярных импульсов возбуждения с частотой порядка 10 кГц. В этом случае обеспечивался режим саморазогрева активной среды. В работе [45] для лазера на чистых парах меди был реализован этот режим накачки, который обеспечивал длительность работы лазерной трубки до 1000 часов со средней мощностью излучения до 40 Вт. Для CuBr-лазера аналогичный ресурс работы был показан авторами работы [46]. В этом случае обеспечивалась высокая стабильность импульсов со средней мощности излучения 50 Вт. Дальнейшие повышение работы ла-

зерных трубок связаны с применением чистых технологий создания газовых компонент активной среды.

Одной из главных задач для лазеров на бромиде меди является повышение КПД лазера. Наиболее простым способом его повышения является применение режима сдвоенных импульсов возбуждения. Это режим, когда два импульса накачки подаются от двух независимых источников питания. Первый импульс обеспечивал диссоциацию молекул бромида меди, в результате чего в активной среде появлялись атомы меди в основном состоянии. Второй импульс возбуждения обеспечивал генерацию лазерного излучения. Авторами работ [47, 48] были проведены детальные исследования данного режима накачки. Нами был получен КПД лазера 2,7 %, что является максимальным для лазера на бромиде меди. Для максимального КПД задержка импульса возбуждения составляла 200 мкс. Исследования показали, что при оптимальной задержки между импульсами накачки лазера обеспечивается полное согласование волновых сопротивлений разрядного контура (источника) и активного объема (нагрузки). В дальнейшем КПД лазера может быть увеличен в 2 и более раза за счет более жестких требований к длительности импульса возбуждения и применяемых форм разрядных электродов.

### **Лаборатория флуоресцентных методов исследования**

В 1981 г. сотрудниками ИОА и ИСЭ СО АН СССР В. С. Верховским, В. М. Климкиным, В. Г. Соколовым, А. И. Федоровым проведены совместные исследования по эффективности преобразования эксимерного излучения в другие спектральные диапазоны, в т. ч. в видимый [49]. Экспериментально были исследованы вынужденное комбинационное рассеяние (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  $\sim 39$  %. 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. Эта работа послужила одной из тематик дальнейшей работы группы В. М. Климкина, которая занималась исследованиями процессами в парах металлов с их возбуждением оптическим лазерным излучением. Она решала задачи, связанные с получением новой информации о наиболее важных свойствах активных сред на парах металлов и использованием этих сред для преобразования излучения накачки в другие спектральные диапазоны.

В 1990 г. В. М. Климкиным была создана Лаборатория флуоресцентных методов исследования ИОА СО АН СССР. В качестве основного инструмента для исследования активных сред на парах металлов сотрудниками применялся метод модуляции населенности уровней возбуждения. Основные результаты данного метода исследований приведены в работах [50–52]. С помощью этого метода В. М. Климкиным с сотрудниками был обнаружен оптогальванический эффект в лазерах на парах металлов [53].

В группе А. И. Федорова с сотрудниками создан универсальный импульсный электроразрядный лазер с квазистационарным режимом возбуждения, который предназначался для решения задач зондирования атмосферы. Система работала на эксимерных молекулах, например, как ХеCl-лазер с энергией до 0,3 Дж и длительностью импульсов излучения от 30 до 110 нс; на смесях двуокиси углерода с энергией 2,5 Дж за импульс с КПД лазера 8 % и с изменяющейся длительностью импульсов излучения от 0,15 до 2,5 мкс, а также и на молекулярном азоте с энергией излучения 0,01 Дж и длительностью импульсов излучения 5 нс [54]. В это же время был создан опытный мо-

бильный образец ХеСl-лазера «ЧЭПЛ-5» (рис. 3) [7].

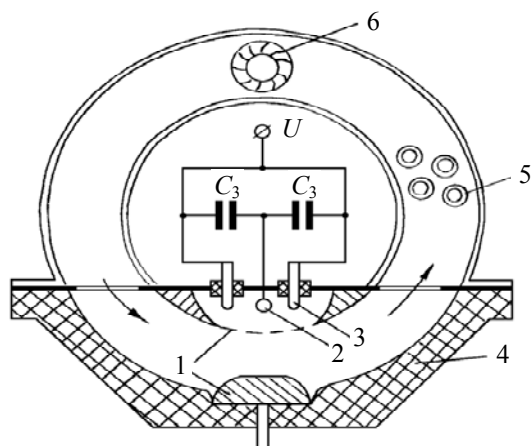
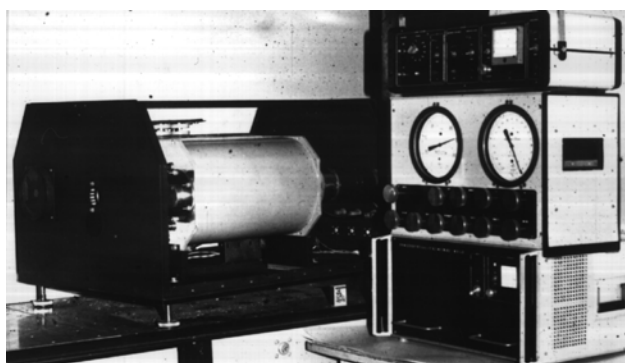


Рис. 3. Общий вид импульсно-периодического ХеСl-лазера и конструктивное исполнение лазерной камеры «ЧЭПЛ-5»: 1 – электроды основного промежутка; 2, 3 – электроды искрового промежутка; 4 – изолятор лазерной камеры; 5 – теплообменник; 6 – вентилятор.

Лазер обеспечивал среднюю мощность излучения 2,5 Вт с длительностью импульсов излучения 30 нс и частотой повторения до 100 Гц. В 1993 г. был разработан первый в России малогабаритный образец эксимерного ХеСl и N<sub>2</sub>-лазера, возбуждаемого продольным разрядом с искровой УФ-предыонизацией (рис. 4) [55].

Впервые ХеСl-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 45 Торр и зарядном напряжении 10 кВ. Азотный лазер обеспечивал среднюю мощность излучения 0,35 мВт при длительности импульса излучения 2,5 нс и рабочим

давлении 40 Торр с частотой повторения импульсов 10 Гц.

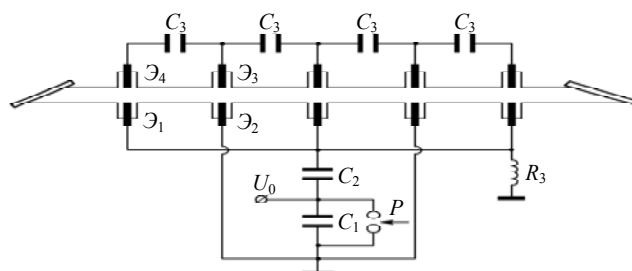
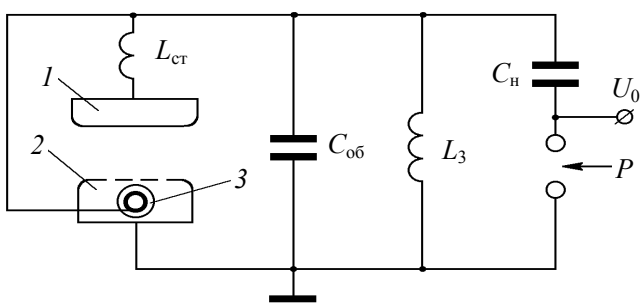


Рис. 4. Общий вид первого ХеСl и N<sub>2</sub>-лазера и его принципиальная электрическая схема возбуждения с продольным разрядом накачки и автоматической УФ-предыонизацией.

В 1998 г. В. М. Климкиным с сотрудниками впервые был обнаружен оптогальванический эффект в импульсном лазере на парах меди, а также оптотермический эффект, обусловленный гистерезисом оптогальванического эффекта [53]. Причина эффекта 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 [56]. Авторами работы [53] 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 разряда в ХеСl-лазере. Его накачка осуществлялась самостоятельным разрядом с коронной, плазменной или искровой УФ-предыонизацией раз-



ряда. Эти исследования позволили сделать вывод о существенной роли оптогальванического эффекта, обеспечивающегося дополнительным источником УФ-излучения [57]. Наши исследования подтверждали результаты авторов работ [58, 59]. На основании проведенных исследований был предложен новый тип самостоятельного разряда возбуждения для газовых лазеров высокого давления. Это самостоятельный самоподдерживающийся разряд (ССР). Его отличие от самостоятельного разряда, который тоже является самоподдерживающимся, в том, что он может управляться источником УФ- или X-предыонизацией. Ранее роль УФ-предыонизации отводилась лишь для создания начальной оптимальной концентрации электронов в активной среде перед срабатыванием вспомогательного или основного источника возбуждения. В ССР источник УФ-предыонизации обеспечивает одновременно как начальную концентрацию электронов в активном объеме, так ее оптимальное поддержание в течение горения всего разряда [60, 61]. На основании нового типа разряда и ранее проведенных исследований по возможности повышения эффективности азотного лазера нами впервые в России был создан лабораторный образец азотного лазера с высоким КПД (рис. 5).



**Рис. 5.** Принципиальная электрическая схема накачки азотного лазера с высоким КПД: 1, 2 – электроды основного промежутка возбуждения; 3 – коронная УФ-предыонизация.

Лазер обеспечивал практический КПД, равный 0,27 %, с энергией в импульсе 0,8 мДж, пиковой мощностью 160 кВт, длительностью импульсов излучения 5 нс, апертурой излучения  $5 \times 7 \text{ мм}^2$  и частотой следо-

вания импульсов до 25 Гц [62]. Более детальные исследования сотрудников лаборатории представлены в работе [63].

Результаты исследований процессов преобразования лазерного УФ-излучения в парах щелочноземельных и редкоземельных элементов были представлены и обобщены в работе В. Г. Соковикова [64]. Анализ литературных и экспериментальных данных, полученных при исследовании оптической накачки паров Ba, Yb, Sm и Eu, позволил предложить общий механизм генерации атомных линий усиленного спонтанного излучения.

### Заключение

После первых работ по исследованию генерации на He-Ne, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, Cu, Eu и эксимерных молекулах сотрудниками ИОА СО РАН в Лабораториях флуоресцентных методов исследования и квантовой электроники были продолжены детальные исследования этих и многих других лазерных сред, преобразование излучения и создание лабораторных образцов лазеров, которые используются в настоящее время.

В 1995 г. В. Е. Зуевым был сделан исторический обзор за 25 лет развития научных направлений и достижений сотрудниками Института [65]. С 1998 г. по 2018 г. Институтом руководил д.ф.-м.н. Г. Г. Матвиенко, а с 2018 г. руководит д.ф.-м.н. И. В. Пташник, которые успешно поддерживали и поддерживают 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. Обеспечено 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. В настоящее время основными научными направлениями Института являются следующие задачи.

1. Актуальные проблемы оптики и лазерной физики, в том числе атмосферная оптика и спектроскопия, распространение оптического излучения в атмосфере, исследование процессов, определяющих оптическое состояние атмосферы, оптико-электронные системы и процессы, определяющие радиационный режим и климат Земли.

2. Физические и химические процессы в атмосфере и на поверхности Земли, механизмы формирования и изменения климата, в том числе оптически значимые составляющие атмосферы и процессы, определяющие радиационный режим и климат Земли.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Макушкин Ю. С., Майер Г. В., Янчарина А. М. Современные проблемы оптики и спектроскопии. – Томск: Изд. ТГУ, 2001.
- Солдатов А. Н., Янчарина А. М. // Известия вузов. Физика. 1999. № 8. С. 4.
- Месяц Г. А. Исследование по генерации мощных наносекундных импульсов. Дис. ... д.т.н. Томск: ТПИ, 1966. – 292 с.
- Ковальчук Б. М., Кремнев В. В., Месяц Г. А. // Докл. АН СССР. 1970. Т. 191. № 1. С. 76.
- Тарасенко В. Ф., Курбатов Ю. А. // ПТЭ. 1973. № 1. С. 182.
- Федоров А. И. Разработка и исследования СО<sub>2</sub>-лазера с поперечным возбуждением. Дипломная работа. Томск. ПТИ. ИОА СО АН СССР. 1972. – 67 с.
- Федоров А. И. Импульсные газовые лазеры, возбуждаемые самостоятельным разрядом с автоматической УФ-преионизацией. Дис. ... д.ф.-м.н. ИЛФ СО РАН. Новосибирск, 2002. – 313 с.
- Тарасенко В. Ф., Федоров А. И., Бычков Ю. И. // Квантовая электроника. 1974. Т. 1. № 5. С. 1226.
- Лосев В. Ф., Тарасенко В. Ф., Федоров А. И. // ПТЭ. 1976. № 5. С. 213.
- Климкин В. М., Прокопьев В. Е., Монастырев С. С. // Письма в ЖЭТФ. 1974. Т. 20. Вып. 4. С. 251.
- Asmus J. F., Moncur N. K. // Appl. Phys. Lett. 1968. Vol. 13. № 11. P. 384.
- Исаков И. М., Леонов А. Г. // Письма в ЖТФ. 1976. Т. 2. Вып. 19. С. 865.
- Федоров А. И., Сергеенко В. П., Тарасенко В. Ф., Седой В. С. // Известия вузов. Физика. 1977. № 2. С. 135.
- Елецкий А. В., Земцов Ю. К., Родин А. В., Старостин А. И. // ДАН СССР. Физика. 1975. Т. 220. С. 318.
- Федоров А. И. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. Вып. 19. С. 6.
- Федоров А. И. // ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 7. С. 115.
- Ражев А. М., Чуркин Д. С. // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 86. Вып. 5–6. С. 479.
- Федоров А. И. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. Вып. 20. С. 48.
- Бохан П. А., Щеглов В. Б. // Квантовая электроника. 1978. Т. 5. № 2. С. 381.
- Бохан П. А., Герасимов В. А., Соломонов В. И., Щеглов В. Б. // Квантовая электроника. 1978. Т. 5. № 2. С. 381.
- Бохан П. А. Эффективные газоразрядные лазеры на парах металлов. – Томск: Изд. ИОА СО АН СССР, 1978.
- Солдатов А. Н., Соломонов В. И. Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов. – Новосибирск: Изд. Наука, 1985.
- Бохан П. А., Колбычев Г. В. // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6. Вып. 7. С. 418.
- Бохан П. А., Колбычев Г. В. // ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып. 9. С. 1823.
- Колбычев Г. В., Пташник И. В. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. Вып. 18. С. 1106.
- Колбычев Г. В., Пташник И. В. // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 9. С. 104.
- Колбычев Г. В., Колбычева П. Д., Заблудский О. Б. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 3. С. 247.
- Колбычев Г. В. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 6. С. 635.
- Колбычев Г. В., Колбычева П. Д. // Известия вузов. Физика. 2002. № 12. С. 79.
- Бохан П. А. Накачка газовых лазеров убегающими электронами, генерируемыми в открытом разряде. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. – М.: Физматлит, 2005. Т. XI. Гл. 4. С. 316.
- Бохан П. А., Гугин П. П., Закревский Д. Э. // Квантовая электроника. 2016. Т. 46. № 9. С. 782.
- Елаев В. Е., Лях Г. Д., Пеленков В. П. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 11. С. 1228.
- Суханов В. Б., Федоров В. Ф., Губарев Ф. А., Троицкий В. О., Евтушенко Г. С. // Квантовая электроника. 2007. Т. 37. № 7. С. 603.
- Губарев Ф. А. Лазер на парах галогенидов металлов с накачкой емкостным разрядом. Дис. ... к.ф.-м.н. – Томск. 2008. – 161 с.

35. Губарев Ф. А., Шиянов Д. В., Суханов В. Б., Евтушенко Г. С. // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 11. С. 1003.
36. Солдатов А. Н., Федоров В. Ф. // Известия вузов. Физика. 1983. Т. 26. № 9. С. 80.
37. Шиянов Д. В. Лазер на парах бромида меди с высокой частотой следования импульсов. Дис. ... к.ф.-м.н. – Томск. ИОА СО РАН, 2007. – 125 с.
38. Нехорошев В. О., Федоров В. Ф., Евтушенко Г. С., Торгаев С. Н. // Квантовая электроника. 2012. Т. 42. № 10. С. 877.
39. Солдатов А. Н. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 6. С. 650.
40. Губарев Ф. А., Федоров В. Ф., Шиянов Д. В., Федоров К. В., Евтушенко Г. С. // Квантовая электроника. 2016. Т. 46. № 1. С. 57.
41. Земсков К. И., Исаев А. А., Петраш Г. Г., Казарян М. А. // Квантовая электроника. 1974. Т. 1. № 1. С. 14.
42. Пасманик Г. А., Земсков К. И., Казарян М. А. Оптические системы с усилителями яркости. – Горький: ИПН АФ СССР, 1988. – 173 с.
43. Евтушенко Г. С., Губарев Ф. А., Суханов В. Б., Шиянов Д. В., Торгаев С. Н. // Известия. Томск. ПУ. 2009. Т. 315. № 4. С. 141.
44. Gubarev F. A., Troitskiy V. O., Sukhanov V. B., Trigub M. V. // Optics Commun. 2011. Vol. 284. № 10–11. P. 2565.
45. Лябин Н. А. // Оптика атмосферы. 2000. Т. 13. № 3. С. 258.
46. Суханов В. Б., Шиянов Д. В., Чернышев А. И. // Оптика атмосферы. 2000. Т. 13. № 11. С. 1053.
47. Федоров А. И., Шиянов Д. В. // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. Вып. 5. С. 10.
48. Федоров А. И., Шиянов Д. В. // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 3. С. 288.
49. Верховский В. С., Климкин В. М., Прокопьев В. Е., Федоров А. И., Тарасенко В. Ф., Сокоиков В. Г. // Квантовая электроника. 1982. Т. 9. № 11. С. 2151.
50. Климкин В. М., Прокопьев В. Е., Сокоиков В. Г. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 6. С. 628.
51. Климкин В. М., Сокоиков В. Г. // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 11. С. 1306.
52. Климкин В. М. Газоразрядные процессы в импульсных лазерах на парах металлов. Дис. ... д.ф.-м.н. ИОА им. В. Е. Зуева СО РАН. Томск. 2004. – 236 с.
53. Юдин Н. А., Климкин В. М., Прокопьев В. Е. // Квантовая электроника. 1999. Т. 28. № 3. С. 273.
54. Федоров А. И., Тихомиров С. И., Жунусов Б. А. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 9. С. 1003.
55. Федоров А. И. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 1. С. 96.
56. Очкин В. Н., Преображенский Н. Г., Соболев Н. Н., Шапарев Н. Я. // УФН. 1986. Т. 148. Вып. 3. С. 473.
57. Федоров А. И. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. Вып. 26. С. 71.
58. Басов Н. Г., Глотов Е. П., Данилычев В. А., Миланич А. И., Сорока А. М. // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. Вып. 8. С. 449.
59. Sato Y., Inoe M., Haruta K. // Appl. Phys. Lett. 1994. Vol. 64. № 6. P. 679.
60. Федоров А. И. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. Вып. 24. С. 52.
61. Федоров А. И. // Оптика атмосферы и океана. 2004. Т. 17. № 2–3. С. 183.
62. Федоров А. И. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 10. С. 88.
63. Федоров А. И. Как это было... Воспоминания создателей отечественной лазерной техники. – Сб. статей. Ч. 2. – Москва: ЛАС, 2010. С. 181.
64. Сокоиков В. Г. Исследование процессов преобразования УФ-излучения в парах металлов. Дис. ... к.ф.-м.н. ИОА СО РАН. Томск. 2013.
65. Зувев В. Е. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 1–2. С. 5.

PACS: 42.55. Lt; 42.60 Lh

## Lasers developed in the Institute of Atmospheric Optics of the SB RAS (a review)

A. I. Fedorov

V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, SB RAS  
1 Acad. Zuev square, Tomsk, 634021, Russia  
E-mail: fedorov@iao.ru

Received June 01, 2021

***The results of research on the development of the first electric discharge lasers on active media  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $Cu$ ,  $CuBr$  and excimer molecules at the Institute of Atmospheric Optics***

**named after V. E. Zueva SB RAS are given. It created one of the world's first Cu-lasers with a pulse production of copper vapors due to the explosion of conductors and a transverse excitation discharge. For a copper laser, record specific generation parameters were obtained almost equal to the limit: radiation energy 2.4 J/l, peak power 120 MW/l with an efficiency of 0.16 %. For the CuBr laser operating in frequency mode, for the first time, an average radiation power of more than 100 W was obtained. In the dual pulse excitation mode, conditions were found that limit the growth of the efficiency of the CuBr laser. For him, a record efficiency of 2.7 % was obtained. For the first time, a nitrogen laser was developed with a maximum efficiency of 0.27 % with an energy of 0.8 mJ, a peak power of 160 kW. For the first time, a miniature XeCl laser with a longitudinal excitation discharge was developed, which worked both with and without buffer gases He, Ne and Ar.**

**Keywords:** Cu, CuBr, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, and excimer lasers, excitation modes, radiation specific energy and peak power, laser efficiency.

**DOI:** 10.51368/2307-4469-2021-9-5-417-429

#### REFERENCES

1. Yu. S. Makushkin, G. V. Mayer, and A. M. Yancharina, *Modern problems of optics and spectroscopy* (Ed. TGU, Tomsk, 2001) [in Russian].
2. A. N. Soldatov and A. M. Yancharina, *Izvestia of Universities. Physics*, No. 8, 4 (1999).
3. G. A. Mesyats, *Research on the generation of powerful nanosecond pulses* (Dis. Doctor of Engineering, Tomsk. TPI. 1966) [in Russian].
4. B. M. Kovalchuk, V. V. Kremnev, and G. A. Mesyats, *Doklady Akademii Nauk SSSR* **191** (1), 76 (1970).
5. V. F. Tarasenko and Yu. A. Kurbatov, *PTE*, No. 1, 182 (1973).
6. A. I. Fedorov, *Development and research of a CO<sub>2</sub> laser with transverse excitation*, Thesis. PTI and IOA SB USSR AS, Tomsk. 1972.
7. A. I. Fedorov, *Pulsed gas lasers excited by independent discharge with automatic UV preionization* (Dis. doctor of physics and mathematics sciences. ILF SB RAS. Novosibirsk. 2002) [in Russian].
8. V. F. Tarasenko, A. I. Fedorov, and Yu. I. Bychkov, *Sov. J. Quantum Electron.* **1** (5), 1226 (1974).
9. V. F. Losev, V. F. Tarasenko, and A. I. Fedorov, *PTE*, No. 5, 213 (1976).
10. V. M. Klimkin, V. E. Prokopiev, and S. S. Monasteries, *Technical Physics Letters* **20** (4), 251 (1974).
11. J. F. Asmus and N. K. Moncur, *Appl. Phys. Lett.* **13** (11), 384 (1968).
12. I. M. Isakov and A. G. Leonov, *Technical Physics Letters* **2** (19), 865 (1976).
13. A. I. Fedorov, V. P. Sergeenko, V. F. Tarasenko, and V. S. Sedoy, *News of Universities. Physics*, No. 2, 135 (1977).
14. A. V. Eletsy, Y. K. Zemtsov, A. V. Rodin, and A. I. Starostin, *Doklady Akademii Nauk SSSR* **220**, 318 (1975).
15. A. I. Fedorov, *Technical Physics Letters* **20** (19), 6 (1994).
16. A. I. Fedorov, *Technical Physics Letters* **66** (7), 115 (1996).
17. A. M. Razhev and D. S. Churkin, *Experimental and Theoretical Physics Letters.* **86** (5–6), 479 (2007).
18. A. I. Fedorov, *Technical Physics Letters* **35** (20), 48 (2009).
19. P. A. Bohan and V. B. Shcheglov, *Sov. J. Quantum electron.* **5** (2), 381 (1978).
20. P. A. Bohan, V. A. Gerasimov, V. I. Solomonov, and V. B. Shcheglov, *Sov. J. Quantum electron* **5** (2), 381 (1978).
21. P. A. Bohan, *Effective gas-discharge lasers on metal vapors* (Tomsk. Prod. IOA SB of the USSR AS, 1978) [in Russian].
22. A. N. Soldatov and V. I. Solomonov, *Gas-discharge lasers on self-limited transitions in metal vapors* (Novosibirsk. 1985; Nauka) [in Russian].
23. P. A. Bohan and G. V. Kolbychev, *Technical Physics Letters* **6** (7), 418 (1980).
24. P. A. Bohan and G. V. Kolbychev, *Technical Physics* **51** (9), 1823 (1981).
25. G. V. Kolbychev and I. V. Ptashnik, *Technical Physics Letters* **11** (18), 1106 (1985).
26. G. V. Kolbychev and I. V. Ptashnik, *Technical Physics* **59** (9), 104 (1989).
27. G. V. Kolbychev, P. D. Kolbycheva, and O. B. Zabludsky, *Atmospheric and ocean optics* **6** (3), 247 (1993).
28. G. V. Kolbychev, *Atmospheric and ocean optics* **6** (6), 635 (1993).
29. G. V. Kolbychev and P. D. Kolbycheva, *News of Universities. Physics*, No. 12, 79 (2002).
30. P. A. Bohan, *Pumping gas lasers with escaping electrons generated in open discharge* (*Encyclopedia of*

*low-temperature plasma*. M.: Fizmatlit. **XI**, (4), 316 (2005) [in Russian].

31. P. A. Bohan, P. P. Gugin, and D. E. Zakrevsky, *Sov. J. Quantum electron* **46** (9), 782 (2016).

32. V. E. Elaev, G. D. Lyakh, and V. P. Pelenkov, *Atmospheric Optics*. **2** (11), 1228 (1989).

33. V. B. Sukhanov, V. F. Fedorov, F. A. Gubarev, V. O. Troitsky, and G. S. Yevtushenko, *Sov. J. Quantum electron* **37** (7), 603 (2007).

34. F. A. Gubarev, *Laser on metal halide vapors with capacitive discharge pumping* (Dis. edging. physical. and a mathematical sciences. Tomsk. 2008) [in Russian].

35. F. A. Gubarev, D. V. Shiyanov, V. B. Sukhanov, and G. S. Yevtushenko, *Atmospheric and oceanic optics* **25** (11), 1003 (2012).

36. A. N. Soldatov and V. F. Fedorov, *News of Universities. Physics* **26** (9), 80 (1983).

37. D. V. Shiyanov, *Laser on copper bromide vapors with a high pulse rate* (Dis. edging. physical. and mathematical sciences. Tomsk. IOA SB RAS. 2007) [in Russian].

38. V. O. Nekhoroshev, V. F. Fedorov, G. S. Yevtushenko, and S. N. Torgaev, *Sov. J. Quantum electron* **42** (10), 877 (2012).

39. A. N. Soldatov, *Atmosphere and oceanic optics* **6** (6), 650 (1993).

40. F. A. Gubarev, V. F. Fedorov, D. V. Shiyanov, K. V. Fedorov, and G. S. Yevtushenko, *Sov. J. Quantum electron* **46** (1), 57 (2016).

41. K. I. Zemskov, A. A. Isaev, G. G. Petrash, and M. A. Kazaryan, *Sov. J. Quantum electron* **1** (1), 14 (1974).

42. G. A. Pasmanik, K. I. Zemskov, and M. A. Kazaryan, *Optical systems with brightness amplifiers* (Gorky: IPN AF USSR. 1988) [in Russian].

43. G. S. Yevtushenko, F. A. Gubarev, V. B. Sukhanov, D. V. Shiyanov, and S. N. Torgaev, *Izvestia PU. Tomsk* **315** (4), 141 (2009).

44. F. A. Gubarev V. O. Troitskiy, V. B. Sukhanov, and M. V. Trigub, *Optics Commun.* **284** (10–11), 2565 (2011).

45. N. A. Lyabin, *Atmospheric and oceanic optics* **13** (3), 258 (2000).

46. V. B. Sukhanov, D. V. Shiyanov, A. I. Chernyshev, and G. S. Yevtushenko, *Atmospheric and oceanic optics* **13** (11), 1053 (2000).

47. A. I. Fedorov and D. V. Shiyanov, *Technical Physics Letters* **43** (5), 10 (2017).

48. A. I. Fedorov and D. V. Shiyanov, *Usp. Prikl. Fiz.* **5** (3), 288 (2017).

49. V. S. Verkhovsky, V. M. Klimkin V. E. Prokopiev, A. I. Fedorov, V. F. Tarasenko, and V. G. Sokovikov, *Sov. J. Quantum electron* **9** (11), 2151 (1982).

50. V. M. Klimkin, V. E. Prokopiev, and V. G. Sokovikov, *Atmospheric and ocean optics* **6** (6), 628 (1993).

51. V. M. Klimkin and V. G. Sokovikov, *Atmospheric and ocean optics* **10** (11), 1306 (1997).

52. V. M. Klimkin, *Gas discharge processes in pulsed metal vapor lasers* (Dis. doctor of physics and mathematics sciences. IOA SB RAS. Tomsk. 2004) [in Russian].

53. N. A. Yudin, V. M. Klimkin, and V. E. Prokopiev, *Sov. J. Quantum electron* **28** (3), 273 (1999).

54. A. I. Fedorov, S. I. Tikhomirov, and B. A. Zhunusov, *Atmospheric optics* **2** (9), 1003 (1989).

55. A. I. Fedorov, *Atmospheric and ocean optics* **7** (1), 96 (1994).

56. V. N. Ochkin, N. G. Preobrazhensky, N. N. Sobolev, and N. Ya. Shaparev, *Successes of physical sciences* **148** (3), 473 (1986).

57. A. I. Fedorov, *Technical Physics Letters* **26** (26), 71 (2000).

58. N. G. Basov, E. P. Glotov, V. A. Danilychev, A. I. Milanich, and A. M. Soroka, *Technical Physics Letters* **5** (8), 449 (1979).

59. Y. Sato, M. Inoe, and K. Haruta, *Appl. Phys. Lett.* **64** (6), 679 (1994).

60. A. I. Fedorov, *Technical Physics Letters*. **27** (24), 52 (2001).

61. A. I. Fedorov, *Atmospheric and ocean optics* **17** (2–3), 183 (2004).

62. A. I. Fedorov, *Technical Physics Letters* **31** (10), 88 (2005).

63. A. I. Fedorov, *How it was... Memories of the creators of domestic laser technology* (Collection of articles. Part 2. Moscow. LAS. 2010) [in Russian].

64. V. G. Sokovikov, *Study of the processes of conversion of UV radiation in metal vapors* (Dis. edging. physical. and a mathematical sciences. IOA SB RAS. Tomsk. 2013) [in Russian].

65. V. E. Zuev, *Atmosphere and ocean optics* **8** (1–2), 5 (1995).