

Лазеры на парах металлов в Институте оптики атмосферы СО РАН. Физика, техника, применения. К 50-летию запуска первого лазера

П.А. Бохан¹, Г.С. Евтушенко², А.Н. Солдатов^{3*}

¹Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр. Академика М.А. Лаврентьева, 13

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634034, г. Томск, пр. Ленина, 30

³Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 8.06.2010 г.

Представлена история исследований и разработок лазеров на парах металлов, проводимых в Институте оптики атмосферы им. академика В.Е. Зуева, с момента создания Института. Отмечены наиболее значимые, по мнению авторов, результаты.

Ключевые слова: лазер на парах металлов, импульсно-периодический режим работы, самоограниченные переходы, резонансные и метастабильные уровни, концентрации частиц, исследования и разработки; metal vapor laser, pulse periodic mode, self-terminating transitions, resonant and metastable levels, density of particles, study and development.

Введение

Как известно, с момента создания первых лазеров на рубеже 1960-х гг. начался широкомасштабный поиск перспективных активных сред. В ряду возможных кандидатов оказались и пары металлов. И это не удивительно, так как 70% элементов из Периодической системы Менделеева — металлы. И уже в первых классических работах Беннета и Гулда были сформулированы основополагающие критерии выбора эффективных лазерных систем на переходах в спектрах атомов металлов. Наибольшие перспективы сулили лазеры на переходах с первых резонансных на метастабильные уровни, получившие название «лазеры на самоограниченных переходах». С учетом высокой квантовой эффективности (более 50%), при условии реализации столкновительной очистки нижних рабочих состояний, они обещали стать эффективными источниками когерентного излучения УФ, видимой и ближней ИК-области спектра. Первые работы по лазерам на парах металлов (ЛПМ) были выполнены в США в 1965–1970 гг. Несколько позже исследование активных сред в парах металлов началось в нашей стране: в ФИАНе, в Ростовском госуниверситете, Институте оптики атмосферы СО АН СССР (ИОА) и др.

История развития лазеров (в том числе ЛПМ) в Институте оптики атмосферы начинает свой отсчет с момента создания Института в 1969 г. А если быть более точным, то начиналась лазерная тематика еще в стенах Сибирского физико-технического института в лаборатории инфракрасных излучений (ИКИ). Эта лаборатория, возглавляемая профессором В.Е. Зуевым, впоследствии академиком, основателем Института, и сектор высоковольтной наносекундной техники Института ядерной физики при Томском политехническом институте, возглавляемый профессором Г.А. Месяцем, ныне академиком РАН, явились базой для создания ИОА. Объединение этих двух коллективов было естественным процессом и диктовалось необходимостью оснащения лабораторий Института передовой лазерной техникой. Перспективность использования лазеров в задачах оптики атмосферы была осознана В.Е. Зуевым сразу после создания первых лазеров. Конкретные разработки и применение лазеров начались в лаборатории ИКИ с приходом в нее В.В. Покасова и П.А. Бохана, выпускников 1963 г. Томского госуниверситета. Они прошли длительную преддипломную и дипломную практику в Институте радиофизики и электроники СО РАН г. Новосибирска (в дальнейшем реорганизованном в Институт физики полупроводников СО РАН), где приняли участие в запуске первого гелий-неонового лазера в Сибири (третий в СССР). (Первый же лазер в Томске был запущен И.И. Муравьевым со своими студентами А. Солдатовым и В. Щербином

* Петр Артемьевич Бохан; Геннадий Сергеевич Евтушенко (ime@tpu.ru); Анатолий Николаевич Солдатов (general@tic.tsu.ru).

в лаборатории спектроскопии СФТИ 4 декабря 1963 г. Это был гелий-неоновый лазер на ИК-переходах (см. [Солдатов А.Н., Янчарина А.М. Развитие физики лазеров в Томском университете и г. Томске // Как это было: Сб. статей. М.: Изд. Лазерной Ассоциации, 2006. С. 186 – 193]). В результате их активной деятельности и при мощной поддержке В.Е. Зуева было освоено изготовление опытных образцов гелий-неоновых и гелий-кадмиевых лазеров, лазера на молекулах CO_2 и атомах ксенона, рубинового и на стекле с неодимом. И это было сделано еще до промышленного производства таких лазеров в нашей стране.

С образованием ИОА СО АН СССР и формированием направления по лазерному зондированию атмосферы возникла необходимость создания лазеров с короткой (наносекундной) длительностью импульса излучения, работающих с высокой частотой следования и неприхотливых в работе. В качестве перспективных были выбраны лазеры на переходах молекулы азота $\text{C}^3\pi_u - \text{B}^3\pi_g$ ($\lambda = 337$ нм), атома меди на переходах ($\lambda_1 = 510$ нм, $\lambda_2 = 578$ нм) и атомов других металлов. Для среднего ИК-диапазона ($\lambda = 10,6$ мкм) предполагалось получить генерацию на молекуле CO_2 в смеси $\text{CO}_2 - \text{N}_2 - \text{He}$ высокого давления. Все эти лазеры к 1969 г. уже были реализованы в ИКИ, однако предполагалось, что объединение усилий двух коллективов, возглавляемых В.Е. Зуевым и Г.А. Месяцем, способно поднять уровень исследований и разработок на качественно новый уровень. Эти надежды оправдались. Исследования по лазерам на парах металлов, как отмечено в юбилейных материалах, посвященных 25-летию запуска первого лазера [1], вошли в список работ, внесших наиболее выдающийся вклад в развитие физики лазеров. Исследования и разработки по лазерам на молекулах N_2 и CO_2 , позднее и по другим газовым лазерам высокого давления также быстро вышли на мировой уровень и способствовали организации на базе ИОА СО АН СССР Института сильноточной электроники СО РАН, продолжающего удерживать передовые позиции по мощным импульсным газовым лазерам.

Регулярные исследования по лазерам на самоограниченных переходах паров металлов начались в ИОА СО АН СССР в 1969 г. и явились темой курсовых и дипломной работ В.И. Соломонова (в настоящее время д.ф.-м.н., профессор, ведущий научный сотрудник Института электрофизики УрО РАН). В частности, в его дипломной работе в 1971 г. методом двойных импульсов было показано, что лазер на парах меди должен работать до частоты следования импульсов 30 кГц. Этот результат оказался настолько неожиданным и сенсационным для того времени, что было принято решение отложить его опубликование до проведения более тщательных исследований. Они были закончены только в 1973 г. [2] и были опережены работами группы профессора Г.Г. Петраша из ФИАНа, сообщившими о частотном режиме генерации Cu-лазера (свыше 10 кГц) в 1972 г. [3].

Тем не менее результаты работы [2] инициировали другие более глубокие исследования физики генерации Cu-лазера и других лазеров на самоограниченных переходах. Ключевыми из них являются

работы [4, 5], в которых был постулирован принципиально новый механизм, ограничивающий мощность и частоту следования импульсов генерации и обусловленный неполной рекомбинацией плазмы перед очередным импульсом возбуждения. Этот постулат определил фактически главное направление по физике лазеров на самоограниченных переходах в последующие годы вплоть до настоящего времени [6–16] и дал направление поиску способов нейтрализации неполной рекомбинации плазмы рабочей среды на ограничение частотно-энергетических характеристик Cu- и других лазеров. Наиболее значимыми в этом направлении также оказались работы сотрудников ИОА СО АН СССР. К ним в первую очередь нужно отнести доказательство положительного влияния водорода [5] на энергетические параметры лазеров и разработку методов генерации электронных пучков (ЭП) кэВ-диапазона энергий в газе среднего давления [17] и накачку ими лазеров. В результате все мощные лазеры на парах Cu [18, 19], включая отпаянные [20], в качестве необходимой компоненты рабочей смеси всегда включают водород.

Малая добавка водорода существенно изменяет кинетику процессов в активной среде лазера. По сути, это был первый вариант ЛПМ с модифицированной кинетикой. На сегодня к ним относятся лазеры с улучшенной кинетикой (Kinetically enhanced lasers), гибридный лазер (HyDBrID-laser), лазер на парах бромида меди с добавками водорода либо HBr [16, 18, 19]. В настоящее время они успешно конкурируют с традиционными ЛПМ. Именно использование В.Ф. Елаевым и др. добавки водорода в количестве 0,35 торр в ГРТ CuBr-лазера (диаметр 6 см, длина 150 см) привело к тому, что в 1989 г. впервые была достигнута мощность излучения свыше 100 Вт [21]. Максимальное значение мощности составило 112 Вт, а КПД 1,7% на ЧСИ 25 кГц. Тем самым оптимальная частота следования импульсов накачки существенно превысила аналогичную для стандартного лазера на парах меди.

Увеличение частоты следования импульсов излучения ЛПМ представляет как практический, так и научный интерес. В ИОА и Томском госуниверситете для лазеров на парах меди, золота, стронция достигнуты частоты повторения 100 кГц и более, а для лазера на парах бромида меди – 400 кГц [22–26]. При этом на высоких частотах следования (100 кГц) получены практически значимые мощности излучения (10 Вт для CuBr-лазера). Как показывают модельные эксперименты, реально достижение частот следования до 1,0 МГц [25, 27, 28]. Данные работы в Томском госуниверситете поддержаны в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (номер государственного контракта: 02.740.11.0444) и гранта РФФИ № 09-05-99035-р-офи.

Фундаментальные исследования динамики и спектроскопических свойств импульсно-периодического разряда, его оптических и электрокинетических характеристик позволили осуществить механизм возбуждения активной среды ЛПМ, основанный на избирательном воздействии на электронную компоненту

плазмы. Благодаря этому был реализован режим «управляемой ионизации» в саморазогревном Cu-лазере и экспериментально продемонстрирован физический КПД, равный 9%. Другим следствием этого цикла работ была реализация целого ряда способов высокооперативного управления выходными характеристиками (энергия, мощность, длительность) лазеров на парах металлов [29].

Целенаправленное исследование физических процессов в лазерах на парах металлов привело к реализации первого лазера на атомарных переходах, в которых девозбуждение нижних рабочих состояний осуществляется в соударениях с частицами рабочей среды. Хотя идея такого лазера (вернее, создания среды с отрицательным поглощением оптического излучения) была высказана еще до открытия лазеров [30], концепция «столкновительного» лазера была разработана позднее в 1965 г. [31]. Именно в работах сотрудников ИОА СО АН СССР была осуществлена эта возможность в лазере на ионизированном европии [32]. С этих пор было реализовано много других мощных лазеров со столкновительной очисткой нижних уровней: на переходах $n^1S_0 - n^1D_2$ группы кислорода, на тяжелых инертных газах при высоком давлении, пеннинговские лазеры и др. [7]. Однако именно в He–Eu⁺-лазере атмосферного давления была реализована наивысшая среди всех газовых лазеров энергия излучения на единицу массы вещества [33].

Важно подчеркнуть, что генерация на Eu⁺ была получена с использованием принципиально нового явления в физике столкновений — девозбуждения в соударениях простых атомов при энергии перехода, многократно превышающую тепловую [34]. Поиск и исследование перспективных активных сред, генерирующих с использованием этого явления, продолжают и в настоящее время. Интересные результаты получены В.А. Герасимовым с коллегами при исследовании лазеров на парах редкоземельных элементов. Продемонстрирована важность процессов косвенного заселения верхних рабочих состояний в спектрах этих атомов. Показана возможность создания на основе таких сред дискретно перестраиваемых источников когерентного излучения видимого и ближнего ИК-диапазонов спектра [35, 36].

Переход к электронно-пучковой накачке, согласно модельным экспериментам и компьютерным расчетам, может существенно улучшить частотно-энергетические характеристики ЛПМ. В частности, привести к погонной мощности генерации до 10 кВт/м [37], что является наивысшей величиной для любых газовых лазеров, работающих без режима быстрой смены рабочей среды.

Кроме традиционного возбуждения лазеров на парах металлов газовым разрядом и электронными пучками, в Институте активно исследуются взаимодействие мощного излучения с парами металлов и получение на этой основе генерации в широком диапазоне спектра [38–46]. При оптической накачке эксимерными лазерами паров щелочноземельных и редкоземельных элементов получено множество линий генерации, лежащих в ИК-, видимом и УФ-диапазонах спектра [39–42]. В частности, метод оптиче-

ской накачки позволяет получить генерацию на тех же переходах паров металлов, на которых она наблюдается при газоразрядном возбуждении. Интересно отметить, что и ионные переходы паров металлов не составляют исключения. Так, при накачке ХеСl*-лазером была получена генерация на переходах в основном и метастабильные состояния иона бария [43].

Аналогично при накачке излучением второй гармоники лазера на красителе или четвертой гармоники Nd:YAG-лазера наблюдалась генерация на ионных переходах европия [44]. Как и при газоразрядном возбуждении паров Eu, наблюдалась генерация на R–M-переходах иона $6p^7P_3 - 5d^7D_4^0$ (989,8 нм), $6p^7P_4 - 5d^7D_5^0$ (1001,9 нм), $6p^9P_5 - 5d^9D_6^0$ (664,5 нм). Это обстоятельство указывает на возможность использования обнаруженных каналов селективной оптической накачки верхних лазерных уровней для различных схем модуляционной спектроскопии. Генерация в ионах, по-видимому, обусловлена двухфотонным резонансом с автоионизационными состояниями бария и европия [45]. Предложен и реализован метод усиления слабых линий генерации, наблюдающихся при оптической накачке эксимерными лазерами [46].

Фактически одновременно с исследованием физических процессов в Cu- и других лазерах началась разработка приборов на их основе. В результате первый в мире действующий макет отпаянного лазера на парах меди был изготовлен в ИОА СО АН СССР [47]. Успех этого лазера и использование его в целях лазерного зондирования атмосферы инициировали организацию полного цикла исследований, разработок и производства отпаянных лазеров на парах меди, золота, свинца и др. В 1974 г. по инициативе В.Е. Зуева был создан комплексный отдел квантовой электроники, в который входили лаборатории квантовой электроники ИОА и лаборатория источников когерентного излучения СКБ НИ «Оптика» СО АН СССР. Основные усилия первой (зав. лабораторий П.А. Бохан) были сконцентрированы на исследовательской части, а второй (зав. лабораторий А.Н. Солдатов) — на приборной. Тем самым тот путь развития, который сегодня модно называть инновационным, реально функционировал с момента создания ИОА.

Принципиально важно, что значительная часть полученных в ходе исследовательских работ результатов доведена до приборных вариантов ЛПМ и устройств на их основе для задач оптики атмосферы и других применений [48, 49]. В частности, первые малосерийные образцы лазеров на парах меди были созданы в 1975–1978 гг. и имели средние мощности от 1 до 10 Вт [50, 51]. Первый 10-ваттный Cu-лазер в 1978 г. демонстрировался на Международной выставке в Болгарии, следствием которой стал лицензионный контракт на передачу лазера со стабилизированными характеристиками из ИОА в Институт специальной оптики НРБ.

Сегодня в лаборатории квантовой электроники ИОА под руководством В.О. Троицкого ведется разработка ЛПМ с активным теплоизолятором для технологических применений, включая медицинские [52, 53]. Проводятся исследования предложенного

В.Б. Сухановым емкостного способа накачки лазеров на самоограниченных переходах в парах металлов [52–56]. Он может оказаться весьма перспективным для создания компактных ЛПМ с большим ресурсом работы. Совместно с Томским политехническим университетом проводятся работы по созданию скоростного лазерного монитора на основе CuVg-лазера [57]. Применение такого монитора позволит проводить диагностику процессов взаимодействия пучков энергии с материалами, изучать процесс самовозгорающегося синтеза веществ в режиме реального времени и, что принципиально важно, в условиях мощной фоновой засветки. Активное участие в этих работах принимают молодые сотрудники: Д.В. Шиянов, Ф.А. Губарев, С.Н. Торгаев, М.В. Тригуб. А это значит, что будут и новые интересные результаты.

Авторы выражают искреннюю благодарность руководству Института за предоставленную возможность отразить свое видение развития лазерного направления в ИОА.

1. Bertolotti M. Twenty-five Years of the Laser: The European Contribution to Its Development // Opt. Acta. 1985. V. 32, N 9. P. 961–980.
2. Бохан П.А., Соломонов В.И. О механизме генерации ОКГ на парах меди // Квант. электрон. 1973. № 6. С. 53–57.
3. Исаев А.А., Казарян М.А., Петраш Г.Г. Эффективный импульсный лазер на парах меди с высокой средней мощностью генерации // Письма в ЖЭТФ. 1972. Т. 16, вып. 1. С. 40–42.
4. Бохан П.А., Герасимов В.А., Соломонов В.И., Щеголов В.Б. О механизме генерации лазера на парах меди // Квант. электрон. 1978. Т. 5, № 10. С. 2162–2173.
5. Бохан П.А., Силантьев В.И., Соломонов В.И. О механизме ограничения частоты следования импульсов в лазере на парах меди // Квант. электрон. 1980. Т. 7, вып. 6. С. 1264–1269.
6. Kushner M.G., Warner B.E. Large-bore copper vapor lasers: Kinetics and scaling issues // J. Appl. Phys. 1983. V. 54, N 6. P. 2970–2982.
7. Бохан П.А. Процессы релаксации и влияние метастабильных состояний атомов и ионов металлов на механизм генерации и энергетические характеристики лазеров // Квант. электрон. 1986. Т. 13, № 9. С. 1837–1847.
8. Боровиц Б.Л., Молодых Э.И., Рязанская Л.А., Тыкоцкий В.В. Влияние предимпульсной концентрации электронов и населенностей нижних лазерных уровней на ограничение средней мощности излучения в электроразрядных импульсно-периодических лазерах на парах металлов // Квант. электрон. 1990. Т. 17, № 10. С. 1265–1271.
9. Carman R.J., Brown D.J.W., Piper J.A. A self-consistent model for the discharge kinetics in a high repetition rate copper vapor laser // IEEE J. Quantum. Electron. 1994. V. 30, N 8. P. 1876–1895.
10. Carman R.J. Modeling of the kinetics and parametric behavior of a copper vapor laser: Output power limitation issues // J. Appl. Phys. 1997. V. 82, N 1. P. 71–83.
11. Петраш Г.Г. Процессы, определяющие достижимую частоту повторения импульсов в импульсных лазерах на парах металлов и их соединений. Препр. / ФИАН (М.). 1999. № 28. 36 с.
12. Яковленко С.И. Критическая плотность электронов при ограничении частоты следования импульсов в лазере на парах меди // Квант. электрон. 2000. Т. 30, № 6. С. 501–505.

13. Петраш Г.Г. Об ограничении частоты повторения импульсов в лазере на парах меди, связанном с предимпульсной плотностью электронов // Квант. электрон. 2001. Т. 31, № 5. С. 407–411.
14. Бойченко А.М., Яковленко С.И. Критические предимпульсные плотности электронов и метастабильей в лазерах на парах меди // Квант. электрон. 2002. Т. 32, № 2. С. 172–178.
15. Бохан П.А., Закревский Д.Э. Влияние согласования генератора накачки с лазерной трубкой и условий накачки на релаксацию метастабильных состояний и частотно-энергетические характеристики лазера на парах меди // Квант. электрон. 2002. Т. 32, № 7. С. 602–608.
16. Withford M.J., Brown D.J.W., Mildren R.P., Carman R.P., Marshall G.D., Piper J.A. Advances in copper laser technology: kinetic enhancement // Progr. Quantum. Electron. 2004. V. 28, N 3–4. P. 165–196.
17. Бохан П.А., Колбычев Г.В. Генерация интенсивных пучков убегающих электронов // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6, вып. 7. С. 418–421.
18. Little C.E. Metal Vapour Lasers: Physics, Engineering and Application. Chichester (UK): J. Wiley and Sons, 1999. 620 p.
19. Батенин В.М., Бойченко А.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Климовский И.И., Молодых Э.И. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов 2. М.: Физматлит, 2009. 544 с.
20. Григорьянц А.Г., Казарян М.А., Лябин Н.А. Лазеры на парах меди: конструкция, характеристики и применения. М.: Физматлит, 2005. 312 с.
21. Елаев В.Ф., Лях Г.Д., Пеленков В.П. CuVg-лазер со средней мощностью генерации свыше 100 Вт // Оптика атмосф. 1989. Т. 2, № 11. С. 1228–1230.
22. Солдатов А.Н., Федоров В.Ф. Лазер на парах меди с частотой следования импульсов 230 кГц // Изв. вузов. Физ. 1983. Т. 26, № 9. С. 80–84.
23. Евтушенко Г.С., Полушин Ю.П., Федоров В.Ф. Исследование импульсно-периодической генерации в парах золота при высоких частотах (до 100 кГц) // Ж. прикл. спектроскопии. 1987. Т. 46, № 6. С. 1009–1011.
24. Солдатов А.Н., Филонов А.Г., Васильева А.В. Исследование работы Sr-лазера при высоких частотах повторения импульсов // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 2–3. С. 224–226.
25. Солдатов А.Н., Юдин Н.А., Васильева А.В., Полушин Ю.П., Латуш Е.Л., Чеботарев Г.Д., Фесенко А.А. О предельной частоте следования импульсов генерации лазера на самоограниченных переходах иона стронция // Квант. электрон. 2008. Т. 38, № 11. С. 1009–1015.
26. Губарев Ф.А., Федоров В.Ф., Евтушенко Г.С., Суханов В.Б., Заикин С.С. Лазер на парах бромида меди с частотой следования импульсов 400 кГц // Изв. Томского политехн. ун-та. 2008. Т. 312, № 2. С. 106–107.
27. Бохан П.А., Закревский Д.Э. О предельных частотах следования импульсов генерации в лазерах на парах меди // Ж. техн. физ. 1997. Т. 67, вып. 5. С. 54–60.
28. Евтушенко Г.С., Шиянов Д.В., Федоров В.Ф. Частотные характеристики CuVg-лазера // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13, № 3. С. 254–257.
29. Солдатов А.Н. Лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов с управляемой генерацией: Дис. ... д.ф.-м.н. ТГУ. Томск: ИОА СО РАН, 1996. 356 с.
30. Бутаева Ф.А., Фабрикант В.А. Исследования по экспериментальной и теоретической физике: Сб. памяти Г.С. Ландсберга. М.: Изд. АН СССР, 1959. 62 с.
31. Gould G. Collision Laser // Appl. Opt. Suppl. 1965. V. 4, N S1. P. 59–67.
32. Бохан П.А., Клишкин В.М., Прокофьев В.Е. Газовый лазер на ионизированном европии // Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 18, вып. 2. С. 80–82.

33. *Бохан П.А.* Столкновительные лазеры на ионах Eu^+ и Ca^+ с высокой энергией излучения // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12, вып. 3. С. 161–164.
34. *Бохан П.А., Фадин Л.В.* Исследование процессов переноса возбуждения в ионе европия // Оптика и спектроскопия. 1982. Т. 52, вып. 4. С. 626–629.
35. *Герасимов В.А., Павлинский А.В.* Особенности поведения переходов с $\lambda = 1101$ нм в лазере на парах туля // Оптика атмосфер. и океана. 2004. Т. 17, № 2–3. С. 165–167.
36. *Gerasimov V.A., Gerasimov V.V., Pavlinskiy A.V.* Temperature range and conditions of stable operation of gas-discharge rare-earth metal vapor lasers // Appl. Phys. B. 2008. V. 92, N 2. P. 225–227.
37. *Bokhan P.A., Molodykh E.I.* Pulsed Metal Vapour Lasers / C.E. Little, N.V. Sabotinov (Eds.). Dordrecht; Boston; London: Kluwer Acad. Publ., 1996. P. 137.
38. *Климкин В.М.* Газоразрядные процессы в импульсных лазерах на парах металлов: Дис. ... д.ф.-м.н. Томск: ИОА СО РАН, 2004. 236 с.
39. *Верховский В.С., Климкин В.М., Прокопьев В.Е., Сокоиков В.Г., Тарасенко В.Ф., Федоров А.И.* Исследование ВКР-излучения эксимерных лазеров на электронных переходах атомов металлов // Квант. электрон. 1982. Т. 9, № 11. С. 2151–2155.
40. *Sokovikov V.G., Klimkin V.M.* Generation of ultraviolet and visible coherent radiation by four-wave parametric oscillation in Barium vapor // Atomic and Molecular Pulsed Lasers / V.F. Tarasenko, G.Y. Mayer, G.G. Petrash (Eds.) // Proc. SPIE. 1995. V. 2619. P. 315–323.
41. *Климкин В.М., Сокоиков В.Г.* Лазерные эффекты при резонансном оптическом возбуждении паров алюминия // Оптика атмосфер. и океана. 2006. Т. 19, № 2–3. С. 229–231.
42. *Сокоиков В.Г., Климкин В.М., Шестаков Д.Ю., Воробьева Л.П.* Асимметрия оптического возбуждения резонансного дублета атома меди // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 6, № 6. С. 628–634.
43. *Климкин В.М., Николаев В.Н., Сокоиков В.Г., Щеголов В.Б.* Генерация в основное и метастабильные состояния Ba^+ при двухфотонной ионизации паров Ba излучением XeCl^* -лазера // Письма в ЖЭТФ. 1980. Т. 34, вып. 3. С. 111–114.
44. *Сокоиков В.Г., Климкин В.М., Прокопьев В.Е.* Генерация вынужденного излучения на переходах в основное и метастабильные состояния иона европия при оптической накачке // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 5. С. 359–363.
45. *Климкин В.М., Сокоиков В.Г.* Бейтлеровские лазеры // Оптика атмосфер. и океана. 1997. Т. 10, № 11. С. 1306–1315.
46. *Климкин В.М., Сокоиков В.Г.* Увеличение мощности генерации на атомных и ионных переходах химических элементов // Квант. электрон. 2007. Т. 37, № 2. С. 135–140.
47. *Бохан П.А., Николаев В.Н., Соломонов В.И.* Отпаянный лазер на парах меди // Квант. электрон. 1975. Т. 5, № 1. С. 159–162.
48. *Солдатов А.Н., Соломонов В.И.* Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов. Новосибирск: Наука, 1985. 152 с.
49. *Евтушенко Г.С.* Лазеры на парах металлов и устройства на их основе для задач оптики атмосферы и других применений: Дис. ... д.т.н. Томск: ИОА СО РАН, 1994. 305 с.
50. *Солдатов А.Н., Власов Г.Я., Горохов А.М., Кирилов А.Е., Кухарев В.Н., Платонов А.В., Полушин Ю.П., Федоров В.Ф., Филонов А.Г.* Импульсные лазеры на парах металлов «Милан-5» // Эффективные лазеры на парах металлов. Томск: ИОА, 1978. С. 201–203.
51. *Солдатов А.Н., Власов Г.Я., Горохов А.М., Кирилов А.Е., Платонов А.В., Полушин Ю.П., Федоров В.Ф., Филонов А.Г.* Лазер на парах меди «Милан-10» // Квант. электрон. 1979. Т. 6, № 10. С. 1359.
52. *Andrienko O.S., Dimaki V.A., Evtushenko G.S., Sukhanov V.B., Troitskiy V.O., Shiyonov D.V.* Metal and Metal Halide Vapor Lasers: New Opportunities // Opt. Eng. 2005. V. 44, N 7. P. 071204-1–071204-5.
53. *Андрюченко О.С., Губарев Ф.А., Димаки В.А., Иванов А.И., Левицкий М.Е., Суханов В.Б., Троицкий В.О., Федоров В.Ф., Филонов А.Г., Шиянов Д.В.* Лазеры на парах бромида меди нового поколения // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22, № 10. С. 999–1009.
54. *Пат. (Россия) № 2363080* Способ возбуждения лазеров на парах галогенидов металлов и активный элемент лазера на парах галогенидов металлов. Патентообладатель ИОА им. В.Е. Зуева СО РАН, авторы: Суханов В.Б., Троицкий В.О., Губарев Ф.А., Федоров В.Ф.
55. *Суханов В.Б., Федоров В.Ф., Губарев Ф.А., Троицкий В.О., Евтушенко Г.С.* Лазер на парах бромида меди, возбуждаемый емкостным разрядом // Квант. электрон. 2007. Т. 37, № 7. С. 603–604.
56. *Gubarev F.A., Sukhanov V.B., Evtushenko G.S., Fedorov V.F., Shiyonov D.V.* Capacitively Coupled Longitudinal Discharge // IEEE J. Quantum. Electron. 2009. V. 45, N 2. P. 171–177.
57. *Евтушенко Г.С., Губарев Ф.А., Суханов В.Б., Шиянов Д.В., Торгаев С.Н., Тригуб М.В.* Скоростная визуализация микрообъектов посредством активных сред лазеров на парах металлов в условиях мощной засветки // Изв. Томского политехн. ун-та. 2009. Т. 315, № 4. С. 141–146.

P.A. Bokhan, G.S. Evtushenko, A.N. Soldatov. Metal vapor lasers developed at Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Science. Physics, Engineering, and Applications. To the 50th anniversary of the launch of the first laser.

History of study and development of metal vapor lasers, which have been making at V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics are described. Well-known results are presented in more detailed.