

## Лазеры на парах металлов

В.А. Димаки, В.Г. Сокоиков, С.Н. Торгаев, М.В. Тригуб,  
В.О. Троицкий, Д.В. Шиянов\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 13.05.2019 г.

Рассмотрены основные этапы развития направления, связанного с разработкой и исследованием лазеров на парах металлов, которое существует в ИОА СО РАН с первых дней его основания. Представлены некоторые, наиболее интересные, по мнению авторов, результаты, имеющие как фундаментальный, так и прикладной характер. Приводится достаточно обширный список работ, выполненных в Институте по данной тематике главным образом за последние двадцать лет.

*Ключевые слова:* лазеры на парах металлов, галогениды металлов, эффективность лазера, активная теплоизоляция, генератор активной примеси, внутренний реактор, оптическая накачка, усилитель яркости, активные оптические системы; metal vapor lasers, metal halides, laser efficiency, active thermal insulation, active impurity generator, inner reactor, optical pumping, brightness amplifier, active optical systems.

### Введение

Практически с первых дней основания в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева (ИОА) СО РАН развивалось направление, связанное с исследованием физических процессов, определяющих возможности получения генерации в газоразрядных лазерах на парах металлов (ЛПМ). Интерес к этой тематике обусловлен в первую очередь достаточно уникальным набором выходных параметров, характерных для таких лазеров. Прежде всего, следует отметить самые высокие (по крайней мере, для газовых лазеров видимого диапазона спектра) коэффициенты усиления ( $> 100$  Дб) и эффективности генерации (до 3%). Важным свойством ЛПМ является то, что, будучи газовыми, т.е. сравнительно легко позволяя обеспечить качество лазерного пучка, близкое к дифракционному, эти лазеры могут генерировать энергию в импульсе  $> 10$  мДж при средней мощности в сотни ватт, что уже соизмеримо с показателями твердотельных и волоконных (разумеется, не самых мощных) лазеров. Если к этому добавить наносекундные длительности и частоты повторения импульсов, которые могут варьироваться в пределах от единиц до сотен килогерц, возможности оперативного управления режимом генерации, то в итоге получаем источник когерентного излучения с весьма широкими возможностями применения.

Вышесказанное подтверждается тем, что в настоящее время ЛПМ достаточно успешно используются в медицине (офтальмология, косметология, дерматология, физиотерапия и т.д.), в производстве (прецизионная обработка самых различных материалов), и, конечно же, в научных исследованиях, в частности, в системах визуализации, о чем будет подробно сказано ниже.

Генерация в парах металлов была впервые получена в 1965 г. [1]. Результаты уже первых исследований показали перспективность этих сред, особенно при использовании «самоограниченных» переходов (с первых резонансных на метастабильные уровни), отличающихся высокой ( $> 50\%$ ) квантовой эффективностью. В Институте активные исследования ЛПМ начались в 1969 г. За ~20 лет своей деятельности коллектив отдела квантовой электроники (КЭ) внес весомый вклад, получивший мировое признание [2], в решение как фундаментальных, так и прикладных проблем, связанных с реализацией эффективной генерации в парах металлов и определивших основные направления развития лазеров этого класса на много лет вперед. Результаты исследований того периода обобщены в первой отечественной монографии [3], непосредственно посвященной ЛПМ, и в докторских диссертациях сотрудников Института, в разное время руководивших работой отдела КЭ [4–6].

В течение упомянутого периода научная деятельность коллектива отдела КЭ была сосредоточена главным образом на исследованиях, связанных с парами «чистых» металлов в первую очередь таких, как медь, свинец, золото. Тем не менее именно в это время в Институте начались исследования еще одного класса перспективных лазерных сред — паров галогенидов металлов (ГМ), в основном бромидов

\* Виктор Анатольевич Димаки (qel@asd.iao.ru); Владимир Григорьевич Сокоиков (qel@asd.iao.ru); Станислав Николаевич Торгаев (torgaev@tpu.ru); Максим Викторович Тригуб (trigub@iao.ru); Владимир Олегович Троицкий (qel@iao.ru); Дмитрий Валерьевич Шиянов (qel@asd.iao.ru).

меди. Эти исследования привели к разработке лазера на парах бромида меди (ЛПБМ) с рекордной на тот момент средней мощностью – более 100 Вт [7]. Появление этой работы знаменует собой условное окончание первого периода деятельности отдела КЭ и начало второго, ориентированного на исследование физических механизмов, отвечающих за генерацию в парах ГМ.

Основное преимущество ЛПГМ по сравнению с ЛПМ, определившее повышенный интерес к лазерам такого типа, в том, что температура образования паров ГМ, как правило, существенно ниже, чем соответствующих «чистых» металлов. В частности, для наиболее перспективного соединения – бромида меди – рабочая температура составляет порядка 700 °С, а для чистой меди уже ~1500 °С. Благодаря этому обстоятельству для изготовления активного элемента (АЭ) ЛПГМ требуется гораздо меньше дорогостоящих материалов (высокотемпературная керамика, теплоизоляторы и т.д.), а сами процессы изготовления и испытаний АЭ менее продолжительные и трудоемкие. Важно отметить, что и в ЛПМ, и в ЛПГМ активными являются только атомы металлов, поэтому основные параметры излучения в том и другом лазере одинаковы. Как показали результаты [7], по крайней мере, если речь идет о «медных» лазерах, переход к бромиду меди позволяет рассчитывать на получение вполне соизмеримых энергетических характеристик лазерной генерации. Понятно, что у ЛПГМ, наряду с достоинствами, есть и свои недостатки. Однако сравнительная простота их изготовления стала решающим аргументом в пользу принятия решения о переориентации усилий коллектива отдела КЭ (который к тому времени был реорганизован в одну лабораторию) на исследования, связанные с ЛПГМ.

За период приблизительно с середины девяностых до 2010 г. коллективу лаборатории КЭ удалось решить несколько настолько принципиальных проблем, что это позволило нам говорить о появлении нового поколения лазеров на парах ГМ [8]. Кратко остановимся на этих результатах.

Прежде всего отметим, что на базе современной радиотехнической комплектации в лаборатории удалось разработать мощный и помехоустойчивый полумостовой преобразователь, который составил основу конструкции генератора высоковольтных наносекундных импульсов, используемого в качестве источника питания (ИП) газоразрядных лазеров на парах металлов [9]. Именно эта разработка позволила в разы уменьшить вес и габариты ИП, а реализованный в этих ИП режим импульсного заряда рабочей емкости дал возможность существенно увеличить (по сравнению с ранее используемым режимом резонансного заряда) стабильность и долговечность работы силового коммутатора (чаще всего – тиратрон ТГИ1-1000/25).

О положительном влиянии малых добавок водорода в активную среду лазеров на парах металлов было известно достаточно давно. Именно для ЛПГМ нам впервые удалось [10] разработать конструкцию реверсивного генератора активной примеси, в каче-

стве которой было предложено использовать не чистый водород, а галогенид водорода. Например, бромистый водород, если речь идет о модификации активной среды ЛПБМ. Благодаря наличию реверсивного режима появилась возможность с высокой точностью подбирать оптимальную концентрацию (которая сильно зависит от вкладываемой в разряд энергии) водородосодержащей примеси и поддерживать этот уровень на протяжении сколь угодно длительного времени. Неоспоримое практическое значение этой разработки в том, что ее использование позволило нам увеличить мощность и эффективность ЛПБМ в два и более раз (в зависимости от величины активного объема лазера) [11–14].

Важнейшим шагом в усовершенствовании конструкций активных элементов ЛПГМ стало появление лазеров с активной теплоизоляцией (АТ) рабочего объема. Суть этой идеи состоит в следующем. Поскольку температура образования паров ГМ сравнительно невысока, проблему нагрева рабочей зоны ЛПГМ технически достаточно просто решить с помощью независимого (от энергии, вкладываемой в разряд) внешнего нагревательного элемента. Добавление к этому нагревателю автоматического температурного регулятора позволило нам с требуемой точностью поддерживать температуру внешней стенки активного объема на оптимальном уровне при изменении энерговклада от нуля (ждущий режим) до максимально возможного значения, определяемого мощностью ИП. Результатом использования такого конструктивного решения стало появление лазеров с условным названием ЛПБМ-АТ, которые, по сравнению с традиционными саморазогревными конструкциями, имеют ряд важных преимуществ.

Благодаря применению АТ для поддержания рабочей температуры активного объема требуемая минимальная мощность ИП становится в разы меньше и определяется уже только устойчивостью пробы газозонного промежутка активной зоны. Это позволяет работать с лазерами больших (>1 л) объемов при сравнительно невысоких мощностях (<1,5 кВт) энерговклада. Разумеется, аналогичного эффекта можно достичь и в саморазогревных конструкциях ЛПМ, увеличивая толщину теплоизоляционного слоя, но при этом теряется еще одно важное преимущество предложенной нами конструкции [15]. ЛПБМ-АТ, в отличие от саморазогревных конструкций, могут работать в практически неограниченном диапазоне значений средней мощности, вкладываемой в разряд. Это, в свою очередь, обеспечивает возможность оперативного управления частотой следования импульсов и величиной импульсного энерговклада. Наиболее показательным вариантом такого управления следует считать работу ЛПБМ-АТ в режиме генерации цугов импульсов (с возможностью перевода лазера в ждущий режим) [16].

Внедрение АТ-конструкции дало дополнительный импульс к появлению в лаборатории нескольких новых конструкций ЛПГМ, реализовать которые раньше (в саморазогревном варианте) было затруднительно в связи с необходимостью коммутировать в разряд слишком большие энергии.

В числе таких новых разработок наиболее интересными представляются ЛПБМ-АТ с емкостным разрядом [17–19], с внутренним реактором ГМ [20, 21], с силовым коммутатором, выполненным на транзисторах [22]. Более подробное описание этих и некоторых других конструкций ЛПГМ можно найти в [8].

Говоря о наиболее интересных результатах, полученных в лаборатории КЭ, нельзя не отметить цикл работ [23–27], направленных на увеличение частоты следования импульсов ЛПМ и ЛПГМ; эта проблема имеет большое фундаментальное и прикладное значение. Именно в нашем коллективе впервые удалось получить генерацию в ЛПМ и ЛПБМ с частотами следования импульсов 230 [23] и 700 кГц [27]. Также впервые в ЛПБМ была достигнута практически значимая средняя мощность излучения 10 Вт при частоте 100 кГц [28].

К 2010 г. коллектив лаборатории КЭ в целом завершил минимально необходимый цикл исследований, нацеленных на понимание основных принципов конструирования и изготовления лабораторных макетов отпаянных ЛПГМ-АТ, рассчитанных на выходную среднюю мощность до ~20 Вт с возможностью управления режимами генерации от внешней программы. Основные технические характеристики лазеров такого типа можно найти в [8].

Нельзя не отметить, что накопленных коллективом знаний недостаточно для того, чтобы полностью реализовать все возможности активных сред на парах металлов. В первую очередь необходимо сказать о КПД лазерной генерации, который в наших экспериментах оставался на уровне <1,5% даже при работе с наиболее эффективными «медными» лазерами. Понятно, что при таких КПД технически сложно изготовление приборных макетов лазеров с выходной средней мощностью >20–30 Вт. Следовательно, пока трудно рассчитывать и на высокие значения импульсной энергии лазерного излучения — параметр, во многом определяющий практическую значимость лазера. Проведение исследований, нацеленных на увеличение энергетических показателей лазеров на парах металлов, — это одна из основных задач лаборатории. О некоторых результатах, полученных в этом направлении, сказано в разд. 1.

По понятным причинам значительная часть упоминавшихся выше результатов имеет непосредственное отношение к различным модификациям лазеров на парах меди. Однако спектр научных исследований, проводимых сотрудниками лаборатории КЭ, более широк. Наиболее интересные результаты в смежных направлениях также представлены в статье.

## 1. Увеличение КПД ЛПБМ

Как уже отмечалось во введении, увеличение эффективности ЛПМ — наиболее важная задача, во многом определяющая успех дальнейшего развития лазеров этого класса. Сравнительно невысокий КПД (который в дальнейшем будем определять от энергии, коммутируемой тиратроном, а не от «розетки»)

современных ЛПМ объясняется тем, что энергия от ИП, вкладываемая в разряд, выполняет сразу несколько функций. Кроме основной — возбуждения верхних лазерных уровней, она используется для поддержания высокой рабочей температуры в активном объеме саморазогреваемых ЛПМ и для диссоциации молекул ГМ, если речь идет о ЛПГМ. Исследования наших коллег [29] показали, что именно необходимость выполнения отмеченных вспомогательных функций заставляет коммутировать в разряд мощности, существенно большие, чем необходимо для возбуждения имеющихся в среде атомов металла. Поэтому неудивительно, что КПД ЛПМ оказывается в разы меньше, чем предсказывают теоретические оценки.

Чтобы кардинально изменить сложившуюся ситуацию, необходима такая конструкция ЛПМ, в которой энергия, вкладываемая в разряд, будет отвечать за выполнение только основной функции — создание в среде инверсной населенности (лазер с «полностью автономным» активным элементом). Для этого, если речь идет о генерации в чистых металлах, нужно каким-то образом создать оптимальное давление паров металла в активном объеме при отсутствии разряда. Тогда после включения разряда будет наблюдаться генерация, параметры которой не будут зависеть от средней мощности энергоклада. Только в такой конструкции лазера можно, оптимизируя форму и энергию импульса возбуждения, рассчитывать на достижение максимально высокой эффективности лазерной генерации. Это подтверждается результатами работы [29], авторам которой удалось обеспечить «автономность» активного элемента, но только в нестационарном режиме работы лазера. Некоторые варианты конструкций лазеров на парах чистых металлов с автономным нагревом активной зоны обсуждаются в [4, 6]. Однако эти разработки не получили широкого распространения в силу серьезных технических проблем, связанных с их изготовлением и эксплуатацией, эффективно решить которые пока не удается.

На настоящий момент наиболее просто реализуемым вариантом лазера с «полностью автономным» активным элементом является ЛПГМ-АТ, работающий в режиме сдвоенных импульсов. АТ-конструкция активного элемента позволяет создавать в нем рабочее давление паров ГМ, не зависящее от энергии, вкладываемой в разряд, а режим сдвоенных импульсов обеспечивает «независимую» диссоциацию молекул ГМ.

Режим сдвоенных импульсов известен очень давно [30], и в наших экспериментах он был реализован следующим образом. Разряд в активной среде (использовался ЛПБМ-АТ с рабочим объемом 31,4 см<sup>3</sup>) поддерживался парами импульсов возбуждения, каждый из которых обеспечивался отдельным ИП. Пары подавались в среду с частотой следования 50 Гц, которая гарантировала отсутствие генерации в стандартном импульсно-периодическом режиме. Временной сдвиг между импульсами пары мог контролируемым образом изменяться от нуля до нескольких миллисекунд.

В проведенных нами экспериментах первый импульс возбуждения каждой пары обеспечивал диссоциацию молекул бромида меди, в результате чего в активной среде появлялись атомы меди в основном состоянии. Каждый второй импульс переводил образованные атомы меди в возбужденное состояние, что и сопровождалось появлением генерации. Уменьшение энергии в любом из импульсов приводило к уменьшению мощности генерации вплоть до ее полного исчезновения. В результате проведения этих исследований [31, 32] был зафиксирован КПД генерации ~2%, что является мировым рекордом для ЛПМ с таким небольшим рабочим объемом. Максимальный КПД наблюдался при оптимальном временном сдвиге (~200 мкс) между «диссоциирующими» и «генерирующими» импульсами возбуждения. Исследования показали, что при оптимальных сдвигах обеспечивается наиболее полное согласование волновых сопротивлений разрядного контура (источник) и активного объема (нагрузка). Возможности данной экспериментальной установки, безусловно, реализованы не в полном объеме, и исследования в этом направлении продолжаются.

На сегодняшний день конструкции ЛПМ с «полностью автономными» АЭ остаются сложными и дорогостоящими. Их следует рассматривать как весьма перспективные экспериментальные установки для проведения чисто научных исследований кинетики лазерных процессов. Для практических задач, когда речь идет о приборных вариантах достаточно мощных ЛПМ, наиболее перспективным способом увеличения эффективности лазеров является модификация схемы разрядного контура ИП.

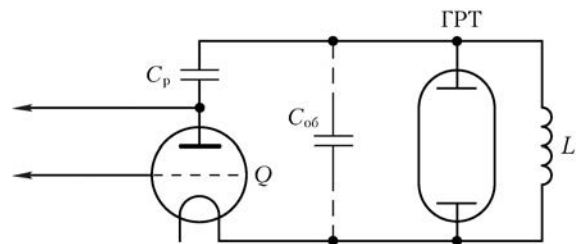
На рис. 1 показаны два варианта подключения АЭ к ИП. Подробную информацию можно найти в [33], а здесь отметим только основной результат сравнения. Использование схемы на рис. 2, б не увеличивает потребляемую от сети мощность, но позволяет увеличить мощность и КПД ЛПБМ-АТ в ~1,5 раза.

Не вызывает сомнений, что существенные резервы увеличения КПД ЛПБМ-АТ заложены в конструкции газоразрядной трубки (ГРТ). Исследования в этом направлении пока только планируются.

## 2. Лазеры на парах галогенидов металлов с внутренним реактором

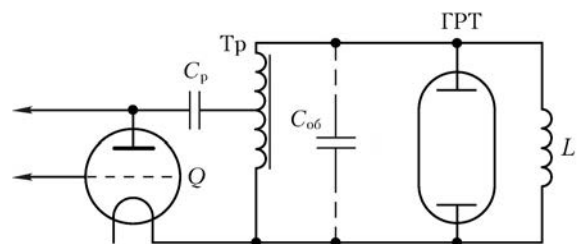
В 2008 г. в лаборатории КЭ ИОА СО РАН была разработана новая модификация ЛПМ – лазеры на парах ГМ с внутренним реактором (ЛПГМ-ВР) [34, 35]. Под внутренним реактором понимается то, что рабочее вещество, т.е. ГМ, образуется непосредственно в рабочей зоне отпаянной ГРТ за счет использования генератора галогена.

На рис. 2 показана конструкция активного элемента ЛПГМ-ВР, совмещающая в себе возможности использования как емкостной накачки с внешними электродами, так и традиционной – с внутренними электродами.



Мощность энерговклада	1350 Вт
$C_p \cdot U_p^2 / 2 = 1,65 \text{ нФ} \cdot (12,2 \text{ кВ})^2 / 2$	
Мощность генерации	14 Вт
КПД генерации	1,03%

а

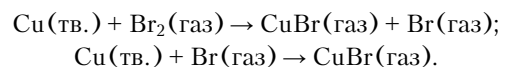


Мощность энерговклада	1350 Вт
$C_p \cdot U_p^2 / 2 = 1,65 \text{ нФ} \cdot (12,2 \text{ кВ})^2 / 2$	
Мощность генерации	21 Вт
КПД генерации	1,5%

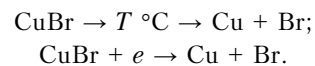
б

Рис. 1. Сравнение двух схем разрядного контура: а – стандартная схема прямого разряда рабочей емкости ( $C_p$ ); б – схема разряда  $C_p$  через импульсный автотрансформатор ( $K_{тр} = 2$ );  $C_{об}$  – обострительный конденсатор,  $Q$  – тиратрон,  $L$  – индуктивность,  $Tr$  – автотрансформатор

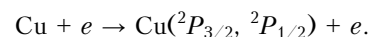
Принцип работы ЛПГМ-ВР заключается в следующем. Во время рабочего цикла в активный объем 1 из генератора галогена 7 с помощью нагревателя 9 подается галоген в чистом виде ( $I_2, Br_2, Cl_2$ ), который взаимодействует с кусочками металла 3, расположенными по каналу ГРТ 1, и образуется ГМ (на примере CuBr-лазера):



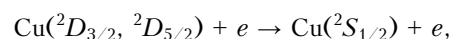
Затем ГМ диссоциирует в разряде термически и за счет электронного удара:



В дальнейшем происходит возбуждение атомов меди из основного состояния электронным ударом на верхний лазерный уровень:



В межимпульсный период активная среда релаксирует за счет девозбуждения метастабильных атомов металла в соударениях с медленными электронами в основное состояние:



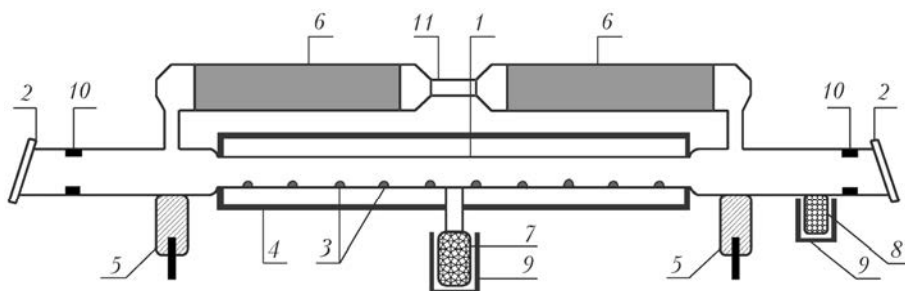
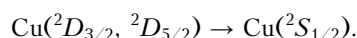
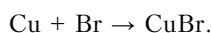


Рис. 2. Конструкция ГРТ CuBr-лазера с внутренним реактором: 1 – рабочий канал ГРТ; 2 – выходные окна; 3 – рабочее вещество – медь; 4 – печь рабочего канала; 5 – внутренние электроды; 6 – внешние электроды; 7 – генератор галогена; 8 – генератор галогеноводорода; 9 – нагревательные элементы генераторов галогена и галогеноводорода; 10 – диафрагмы для защиты от запыления выходных окон; 11 – межэлектродная перемычка для замыкания разряда через рабочий канал

и диффузии с последующей дезактивацией метастабильных атомов на стенке ГРТ:



На последнем этапе образуется исходная молекула ГМ путем окислительной реакции



При работе с Br и Cl в качестве генераторов галогенов используются разработанные нами реверсивные генераторы примесей на цеолитовой основе [10]. Для йода, обладающего высокой летучестью, в конструкции генератора отсутствует адсорбирующая составляющая.

За прошедшее время были проведены исследования частотно-энергетических и усилительных характеристик следующих активных сред: CuBr, CuCl, CuI, PbBr<sub>2</sub>, MnCl<sub>2</sub>, MnBr<sub>2</sub> [20, 21, 34–39]. Основные исследования проводились с ГРТ диаметром 2 см и длиной 50 см. Диаметр ГРТ CuBr-лазера с внутренним реактором составлял 1,7 см, длина – 40 см.

На рис. 3 показаны зависимости мощности генерации исследуемых лазеров от основных рабочих параметров.

Оптимальные значения давления буферного газа, температуры стенки ГРТ, частот следования импульсов этих лазеров сравнимы с соответствующими характеристиками их аналогов – ЛПГМ. Введение в активную среду водородосодержащих добавок также позволяет увеличить выходную мощность и КПД ЛПГМ-ВР. Для выяснения возможности повышения энергетических характеристик таких систем была разработана ГРТ CuBr-лазера с внутренним реактором объемом активной зоны 1130 см<sup>3</sup> (диаметр 4 см, длина 90 см) с обычной и емкостной накачкой. Результаты испытаний показали, что такие системы позволяют реализовывать выходные мощности более 10 Вт.

Предложенный способ получения генерации создал предпосылки к реализации многоволновой генерации с использованием нескольких металлов в одном активном объеме, например сплавов металлов. В [39] впервые продемонстрирована возможность получения одновременной генерации на нескольких линиях в сплавах Cu + Mn и Cu + Pb с йодом в качестве галогена. Так, в первом случае была

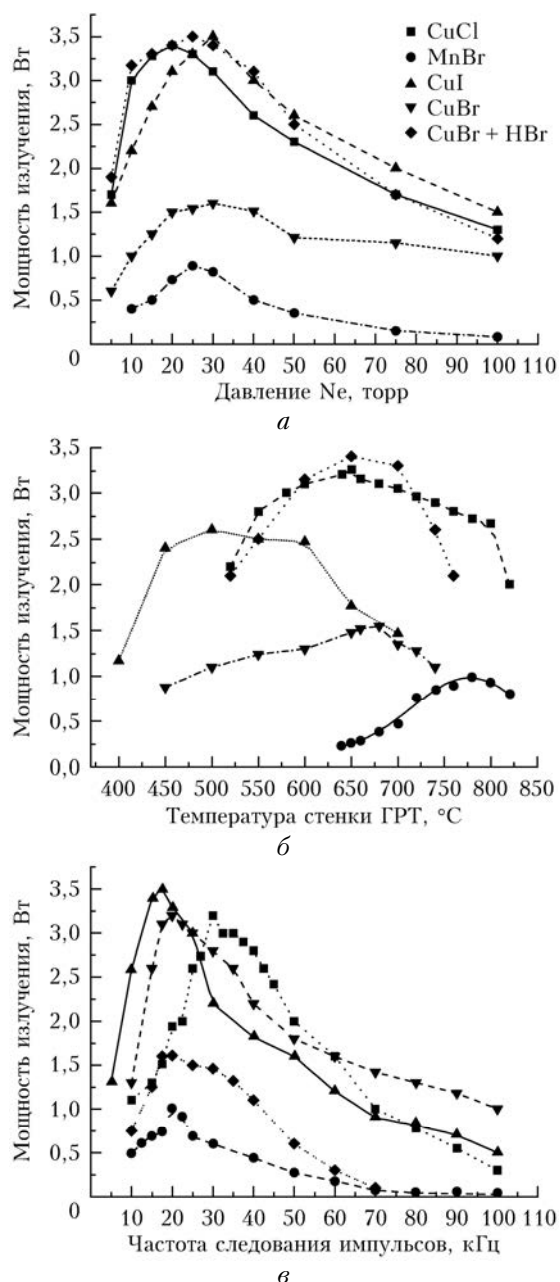


Рис. 3. Зависимость мощности излучения ЛПГМ-ВР: а – от давления буферного газа; б – температуры стенки ГРТ; в – частоты следования импульсов накачки

получена одновременная генерация на переходах атомов меди (510,6 и 578,2 нм) и марганца (534,1; 542,0; 1289,0; 1332,0; 1362,0 нм). Суммарная мощность излучения составляла ~0,5 Вт для ГРТ диаметром 2 см. Кроме того, в случае сплава Cu + Pb показана возможность перестройки излучения с генерацией на переходах одной компоненты сплава к генерации на переходах другой при изменении условий накачки. При низкой температуре стенки ГРТ (~500 °С) возможна генерация только на переходах атома меди (510,6 нм; 578,2 нм). При увеличении температуры стенки до ~700 °С исчезает генерация на меди и появляется красная линия (722,9 нм) атома свинца. Такое поведение объясняется разной температурой, необходимой для образования оптимальной концентрации паров CuI и паров PbI.

Полученные результаты позволили сделать вывод, что активные элементы ЛПГМ-ВР, работающие в режиме «генератора солей», будут обладать следующими преимуществами перед известными аналогами.

1. Простота и безопасность в получении безводных галогенидов (в обычных лазерах на галогенидах металлов рабочее вещество готовится отдельно и потом загружается в ГРТ).

2. Возможность регулирования паров галогена с температурой 20–150 °С, что гораздо ниже температуры контейнеров с галогенидом металла в обычных ЛПГМ (450–550 °С).

3. Возможность получения любых солей в одной ГРТ.

4. Уменьшение времени выхода лазера на рабочий режим.

5. Мобильность системы благодаря отпаянному режиму работы в отличие от гибридных лазеров.

6. Возможность работы ГРТ в вертикальном положении при жесткой фиксации металла.

7. Обеспечение более высокой степени чистоты разряда при использовании емкостной накачки, что в конечном итоге приводит к увеличению срока службы активного элемента.

### 3. Моделирование процессов в активной среде ЛПМ

Одним из эффективных способов изучения процессов в активных средах на парах металлов является подробное кинетическое моделирование. Первые работы по моделированию проводились совместно с отделом кинетики Института общей физики РАН для лазерных сред на парах меди. Разработанная кинетическая модель включала в себя более 200 кинетических уравнений как объемных процессов, так и диффузионных. Моделирование проводилось в пакете прикладных программ ПЛАЗЕР [40, 41]. Были подробно изучены процессы в плазме лазера на парах меди, в том числе при наличии активных водородосодержащих добавок. В результате моделирования были выявлены причины улучшения генера-

ционных характеристик лазеров на парах меди с модифицированной кинетикой, т.е. при активных добавках H<sub>2</sub>, HBr и HCl [42].

Дальнейшее развитие ЛПМ привело к созданию подробной кинетической модели активной среды ЛПБМ. Целью моделирования было выявление механизмов ограничения предельных частот следования импульсов, в том числе при наличии активных добавок. Было показано, что добавки H<sub>2</sub> или HBr повышают мощность излучения и увеличивают оптимальную частоту следования импульсов генерации, при этом происходит смена механизма, ограничивающего ее дальнейший рост. Без добавок водорода или бромоводорода это предимпульсная концентрация электронов, а при добавках — предимпульсные концентрации атомов меди в метастабильных состояниях [43]. Результаты моделирования показали, что достижение высоких частот следования импульсов генерации возможно в режиме пониженного энергозатрата в разряд. На основе модельных данных впервые была получена частота следования импульсов генерации 700 кГц [27].

Использование активных сред на парах меди и бромида меди в качестве усилителей яркости в активных оптических системах требует получения равномерного радиального профиля излучения/усиления. Для теоретических исследований пространственно-временных характеристик усиления была создана радиальная модель, которая позволяет изучать усилительные характеристики активных сред на парах меди/бромида меди, работающих в режимах сверхизлучения и однопроходowego усиления, т.е. при наличии входного оптического сигнала [44, 45]. На рис. 4 представлены пространственно-временные характеристики усиления в различные моменты времени от начала импульса накачки.

Анализ модельных данных показал, что концентрация электронов на периферии ГРТ меньше, чем в центре, а процессы накачки верхнего и нижнего резонансных уровней идут медленнее, что приводит к запаздыванию в формировании инверсии населенности. В основном именно этим обусловлена значительная неоднородность радиального профиля (рис. 4, а).

Также было выполнено подробное моделирование усилительных характеристик при различной мощности входного оптического сигнала. Было показано, что увеличение мощности заводимого в активную среду излучения снижает коэффициент усиления и мощность собственной генерации вследствие эффекта насыщения активной среды. Насыщение активной среды происходит сильнее там, где коэффициент выше, в частности, в поздней, более длительной стадии существования инверсии населенности, которая является рабочей при использовании усилителей яркости в лазерных мониторах. Здесь коэффициент усиления вблизи стенок ГРТ снижается в большей мере при увеличении мощности входного излучения, что приводит к выравниванию радиального профиля коэффициента усиления (рис. 4, б).

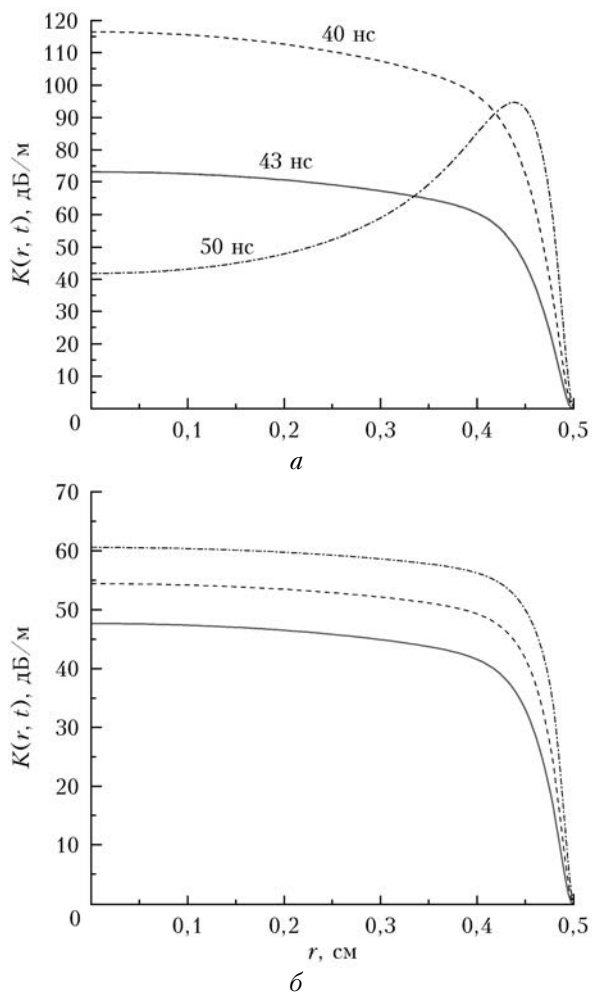


Рис. 4. Временная зависимость коэффициента усиления  $K(r, t)$  в разные моменты времени при мощности накачки  $P_{\text{нак}} = 0$  (а); 400 Вт (б)

#### 4. Процессы в парах металлов при оптическом лазерном возбуждении

Это направление научных исследований поддерживалось в лаборатории КЭ с первых дней ее существования и было призвано решить две основные задачи: получение новых знаний о наиболее важных свойствах активных сред на парах металлов и использование этих сред для преобразования излучения накачки в различные спектральные области. Кратко остановимся на наиболее интересных результатах, полученных в ходе этих исследований.

В качестве основного инструмента для исследований активных сред на парах металлов применялся метод модуляции населенности (ММН). Суть метода и примеры его применения подробно рассмотрены в [46–49]. Использование ММН позволило измерить и сравнить скорости накачки столкновительного He–Eu<sup>+</sup>-лазера и рекомбинационного He–Sr<sup>+</sup>-лазера, а также проследить за траекторией движения населенности по возбужденным ионным со-

стояниям He–Eu<sup>+</sup>-лазера и установить наличие связи между ионным и атомным спектром этого лазера. Наличие такой связи было положено в основу рекомбинационной гипотезы о механизме быстрой релаксации Eu<sup>+</sup>(5d<sup>7</sup>D<sub>5</sub><sup>0</sup>)-уровня. ММН позволил обнаружить оптогальванический эффект в ЛПМ.

Если в ММН для возмущения активной среды использовалось собственное лазерное излучение, то в ходе исследования активной среды [49], состоящей из паров иттербия и гелия, применялось излучение дополнительного лазера на красителе (ЛК). Метод оптического возбуждения, в отличие от газоразрядного, позволяет осуществлять раздельную накачку верхних лазерных уровней Cu(4p<sup>2</sup>P<sub>1/2,3/2</sub><sup>0</sup>). В ходе раздельной накачки резонансного дублета атома было обнаружено явление асимметрии [50]. Конструктивные особенности кюветы, предназначенной для приготовления паров ртути атмосферного давления, позволили на основе измерения перемещения луча вычислить показатель преломления паров ртути на  $\lambda = 308$  нм для диапазона их концентраций  $1,2 \cdot 10^{18} - 1,8 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup> [51].

Результаты исследований процессов преобразования лазерного УФ-излучения в парах щелочноземельных и редкоземельных элементов обобщены в [52], там же приведена подробная библиография по этим вопросам. Указанные процессы по их физической природе можно разделить на несколько самостоятельных групп. Ниже кратко представлены наиболее интересные результаты по каждой группе.

Процессы *электронного вынужденного комбинационного рассеяния* (ЭВКР) на длине волны  $\lambda = 422$  нм впервые наблюдались при возбуждении смеси паров тулия и гелия излучением ХеСl\*<sup>\*</sup>-лазера. Подуровни расщепленного основного состояния тулия <sup>2</sup>F<sub>7/2</sub><sup>0</sup> и <sup>2</sup>F<sub>5/2</sub><sup>0</sup> выступали в качестве начального и конечного уровней в схеме ЭВКР. При оптическом возбуждении смеси паров самария и гелия излучением ХеF\*<sup>\*</sup>-лазера было впервые получено ЭВКР на длинах волн  $\lambda = 589,1$  и  $608,2$  нм [53]. В наблюдаемом процессе ЭВКР в парах самария участвовал возбужденный подуровень основного состояния <sup>7</sup>F<sub>2</sub> в качестве начального и четные уровни <sup>9</sup>D<sub>2</sub> и <sup>9</sup>D<sub>3</sub> в качестве конечных. Оптическая накачка смеси паров европия и гелия излучением эксимерного КгF\*<sup>\*</sup>-лазера (248,6 нм) сопровождалась появлением множества линий усиленного спонтанного излучения (УСИ), генерирующих в видимом диапазоне. Вместе с тем в ИК-диапазоне впервые были обнаружены две интенсивные линии ЭВКР с  $\lambda = 2501$  и  $2414$  нм [53].

Несмотря на значительную величину отстройки  $\Delta = |v_p - v_H| < 400$  см<sup>-1</sup> частоты накачки  $v_H$  от частоты сильного резонансного перехода  $v_p$ , верхний уровень последнего в результате действия процессов *поглощения, индуцированного столкновениями*, оказывается сильно заселенным. Радиационный и столкновительный распад этого уровня на нижние незаселенные уровни сопровождается появлением множества линий. Так, в ходе экспериментов по оптической накачке смеси паров бария и гелия излучением ХеСl\*<sup>\*</sup>-лазера ( $\lambda = 308$  нм) в спектре преобразованного

излучения было зарегистрировано множество линий УСИ, обусловленных атомными переходами бария. В работах [52, 54] представлены результаты, полученные при квазирезонансной оптической накачке паров иттербия излучением KгF\*-лазера ( $\lambda = 248$  нм). Было обнаружено множество интенсивных линий УСИ, идентификация которых показала, что они обусловлены переходами между группами четных ( $6s5d^1D_2$ ,  $6s6d^3D_{1,2,3}$ ) и нечетных уровней ( $6s6p^1P_1^0$ ,  $6s6p^3P_{1,2}^0$ ) атома иттербия. Зарегистрировано когерентное излучение на резонансных линиях иттербия с  $\lambda = 398,8$  и  $555,6$  нм. При облучении смеси паров самария и гелия излучением ХеСl\*-лазера наблюдалось большое количество интенсивных линий УСИ, генерирующих в видимом диапазоне. Наиболее сильные линии УСИ ( $599,5$  и  $600,4$  нм) принадлежали переходам  $^7H_3^0 - ^7F_4$  и  $^5G_2^0 - ^7F_2$  атома самария [53]. Кроме ИК-линий, обусловленных процессом ЭВКР [8], в ходе оптической накачки смеси паров европия и гелия излучением KгF\*-лазера ( $248$  нм) также впервые наблюдались многочисленные атомные линии УСИ [52, 53], в том числе линии  $459,4$ ;  $576,5$ ;  $601,8$ ;  $626,7$ ;  $629,1$  нм, принадлежащие резонансным переходам атома европия. Анализ литературных и экспериментальных данных, полученных при исследовании оптической накачки паров Ва, Yb, Sm и Eu, позволил предложить общий механизм генерации атомных линий УСИ [52–54].

В спектре преобразованного излучения, наблюдаемого при квазирезонансной накачке паров бария излучением эксимерного ХеСl\*-лазера, были обнаружены длинноволновые сателлиты  $\lambda = 556$ ;  $557$  и  $351,0$ ;  $351,3$  нм вблизи резонансных линий  $6p^1P_1^0 \rightarrow 6s^1S_0$  ( $553,6$  нм) и  $5d6p^1P_1^0 \rightarrow 6s^1S_0$  ( $350,1$  нм) соответственно [52]. Было установлено, что за генерацию этих компонент ответственны *четырёхволновые параметрические процессы* (ЧВПП) генерации разностной частоты. Процесс начинается с основного состояния атома бария  $6s^1S_0$  и на нем же заканчивается. Причина генерации парных сателлитов во всех рассмотренных случаях обусловлена наличием в спектре излучения ХеСl\*-лазера накачки двух сильных полос генерации  $\lambda = 307,9$  и  $308,1$  нм. Длинноволновые сателлиты были обнаружены и у некоторых линий УСИ, имеющих в качестве нижнего уровня метастабильное состояние бария  $5d^1D_2$ . Например, сателлиты с  $\lambda = 1516,1$  и  $1522,4$  нм, наблюдаемые вблизи линии УСИ бария с  $\lambda = 1499$  нм (переход  $6p^1P_1^0 \rightarrow 5d^1D_2$ ) при оптическом возбуждении паров бария излучением ХеСl\*-лазера. Было установлено, что генерация этих сателлитов также обусловлена действием ЧВПП, с той лишь разницей, что в ЧВПП, наблюдаемом вблизи линии УСИ с  $\lambda = 1499$  нм, в качестве излучения накачки выступают линии ЭВКР с  $\lambda = 474,2$  и  $474,8$  нм, а сам процесс начинается и заканчивается на уровне бария ( $5d^1D_2$ ).

Природу когерентного излучения на самих резонансных линиях бария ( $350,1$ ;  $553,6$  нм), как, впрочем, и на резонансных линиях европия ( $459,4$ ;

$576,5$ ;  $601,8$ ;  $626,6$ ;  $629,1$  нм), иттербия ( $398,8$ ;  $555,6$  нм) и самария ( $548,5$ ;  $592,8$ ;  $599,5$ ;  $600,4$  нм), однозначно установить не удалось. Предположительно, природа резонансного излучения может быть связана либо с ЧВПП, либо с образованием инверсии на резонансном переходе [52]. Отдельного рассмотрения требует случай генерации резонансного излучения Al ( $4s^2S_{1/2} \rightarrow 3p^2P_{1/2,3/2}^0$ ), наблюдаемый нами при облучении паров алюминия излучением ХеСl\*-лазера или излучением вторых гармоник ЛК [55].

При накачке паров бария ХеСl\*-лазером ( $308$  нм) наиболее интересным и неожиданным оказалось появление в спектре преобразованного излучения линий с  $\lambda = 455,4$  и  $614,2$  нм, обусловленных вынужденными переходами между уровнями  $6p^2P_{3/2}^0 \rightarrow 6s^2S_{1/2}$  и  $6p^2P_{3/2}^0 \rightarrow 5d^2D_{5/2}$  иона бария [56]. Инверсия населенности на ионных переходах бария была следствием *процесса двухфотонной селективной ионизации* (ДФСИ), обусловленного двухфотонным переходом с основного состояния  $6s^1S_0$  атома бария в одно из его двухэлектронных автоионизационных состояний. Распад такого состояния сопровождается образованием иона бария в возбужденном состоянии  $6p^2P_{3/2}^0$ . Систематическое исследование процесса двухфотонной ионизации позволило обнаружить еще два канала ДФСИ при облучении паров европия УФ-излучением вторых гармоник ЛК с длинами волн  $\lambda_1 = 265,8$  нм,  $\lambda_2 = 256,8$  нм или более интенсивным излучением четвертой гармоники Nd:YAG-лазера ( $\lambda_1 = 266,1$  нм). В результате двухфотонного перехода, осуществляемого непосредственно с основного состояния атома  $6s^8S_{7/2}^0$ , происходило преимущественное образование резонансных ионов европия  $Eu^+(6p^{7,9}P_J)$  [57]. Селективный характер ионизации автоматически обеспечивал инверсию населенности между резонансными  $Eu^+(6p^{7,9}P_J)$ -уровнями и расположенными ниже «пустыми»  $^7S_3^0$ ,  $^9S_4^0$  и  $^7,9D_J^0$  состояниями иона европия.

## 5. Активные оптические системы с усилителями яркости

Активная среда лазеров на самоограниченных переходах атомов металлов может быть использована в качестве усилителя яркости [58] для построения активных оптических систем [59]. Работы по исследованию и применению усилителей яркости для решения прикладных задач велись различными научными группами. В [60] представлен обзор наиболее интересных результатов по этой тематике. Одно из главных преимуществ таких систем — возможность наблюдения объектов при их экранировании фоновым излучением.

В ИОА СО РАН совместно с Томским политехническим университетом начиная с 2009 г. ведутся разработка, исследование и испытания высокочастотных усилителей яркости на парах ГМ. Наиболее перспективной оказалась среда на парах бромида меди. Благодаря разработанной в лаборатории КЭ конструкции активного элемента [15] удалось



детально исследовать усилительные характеристики активных элементов в различных условиях работы. В первую очередь было определено влияние концентрации паров рабочего вещества и водородосодержащей добавки на профиль усиления [61]. В монографии [62] анализируется зависимость профиля однопроходового усиления и мощности сверхизлучения от концентрации  $\text{CuBr}$  в активной среде. На рис. 5 приведены зависимости мощности сверхизлучения ( $P_0$ ), коэффициента однопроходового усиления ( $K$ ), а также профиль излучения в случае отсутствия или присутствия  $\text{HBr}$  в среде.

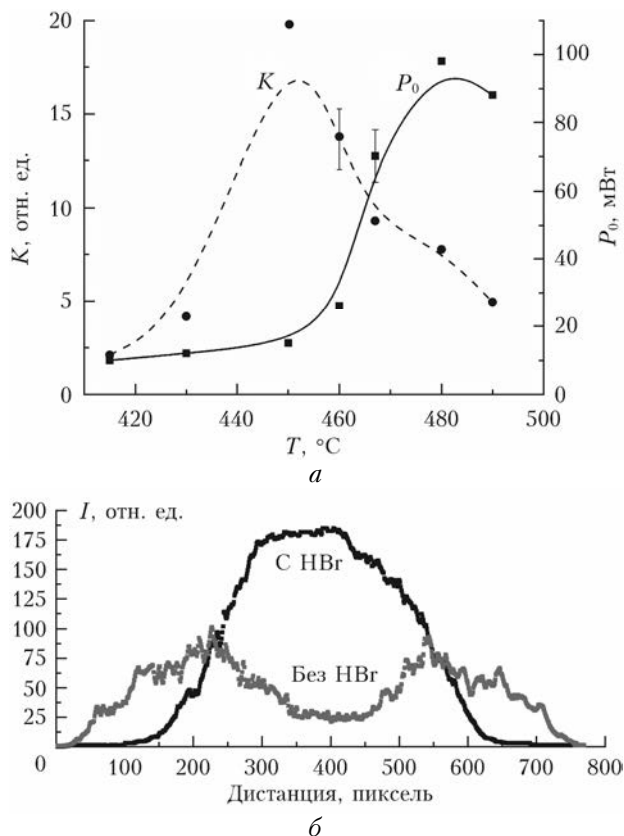


Рис. 5. Зависимость коэффициента однопроходового усиления и мощности сверхсветимости: *a* — от температуры контейнеров с бромидом меди; *б* — профиля однопроходового излучения при отсутствии и наличии  $\text{HBr}$

Для получения максимальной мощности генерации, т.е. при работе активного элемента в режиме генератора, необходимо обеспечить высокий коэффициент усиления и высокую мощность сверхизлучения. Результаты экспериментальных исследований показали, что это возможно при температуре контейнеров с бромидом меди порядка 470–480 °C. В таком режиме уменьшается диаметр профиля усиления, что приводит к уменьшению поля зрения в лазерном мониторе [62]. Оптимальная концентрация паров рабочего вещества, при которой активный элемент обеспечивает минимальные искажения усиленного изображения, создается при температуре контейнеров 440–450 °C. В этом случае коэффициент однопроходового усиления максимален, а фоно-

вое излучение (сверхсветимость) не оказывает существенного влияния на контраст формируемых изображений. Интересно, что концентрация водородосодержащей добавки, при которой активный элемент имеет оптимальные усилительные характеристики, ниже, чем необходимая для получения максимальной мощности генерации. Более того, при такой концентрации добавка  $\text{HBr}$  позволяет «оптимизировать» профиль усиления [62].

На основе результатов исследований, подробно представленных в монографии [63], был сделан вывод, что оптимальный режим работы активного элемента в режиме усилителя яркости изображения отличается от режима, обеспечивающего максимальную мощность генерации. Оптимизация усилительных характеристик и параметров возбуждения, а также разработка высокочастотных источников питания позволили реализовать усилитель яркости с временным разрешением 10 мкс [64], в том числе для активной среды на переходах атома марганца [65].

Одной из особенностей самоспряженной схемы лазерного монитора (моностатический лазерный монитор) является то, что один активный элемент выполняет функцию подсветки и усиления сигнала. Это обуславливает некоторые ограничения такой системы. Во-первых, отсутствует возможность независимого изменения мощности входного сигнала и коэффициента усиления. Во-вторых, ограничена максимальная дистанция до наблюдаемого объекта [66]. Указанных недостатков лишена бистатическая схема лазерного монитора [67]. Успешная реализация такого варианта активной оптической системы стала возможной благодаря разработке модулятора [68, 69]. С его помощью была изучена работа усилителей яркости с точки зрения оптимизации условий возбуждения и синхронизации [70].

Еще одним вариантом увеличения предельной дистанции до наблюдаемого объекта является увеличение длительности импульса усиления. Достигнутые результаты [71] позволили получить изображение объекта, расположенного на расстоянии ~12 м от усилителя яркости.

Много внимания было уделено разработке диагностической системы на основе усилителя яркости, которая могла бы успешно применяться для решения практических задач. Важным шагом стала разработка лазерного монитора с так называемой покадровой регистрацией изображения [72]. Такой подход позволяет регистрировать изображения, формируемые за время импульса усилителя (30–50 нс). В результате был создан макет системы, используемый для визуализации различных процессов [73, 74]: самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (совместно с сотрудниками отдела структурной макрокинематики ТНЦ СО РАН); развития коронного разряда в воздухе (в сотрудничестве с лабораторией оптических излучений ИСЭ СО РАН) [75]; взаимодействие мощного лазерного излучения с тугоплавкими оксидами с целью получения нанопорошка (совместно с сотрудниками лаборатории квантовой электроники ИЭФ УрО РАН) [76]; процесс

роста алмаза (вместе с сотрудниками ИОФ РАН). В сотрудничестве с ИФПМ СО РАН были проведены исследования искажений, вносимых усилителем яркости в формируемые изображения [77].

Полученные результаты демонстрируют перспективность применения усилителей яркости для создания диагностических систем. Задачи повышения их эффективности, быстродействия и надежности являются приоритетными для лаборатории КЭ.

### Заключение

В представленном материале ничего не говорилось о следующих интересных направлениях, имеющих прямое отношение к обсуждаемой теме. Разработка генераторов мощных наносекундных импульсов, в которых силовыми ключами являются не тиратроны, а полупроводниковые устройства. Исследования возможностей оптического возбуждения паров металлов, уже позволившие создать лазеры со средней мощностью  $>1$  кВт. Поскольку ЛПМ, как правило, не имеют мощных линий, лежащих в УФ-диапазоне, а спрос на такое коротковолновое излучение весьма велик, большие значения приобретают исследования возможностей эффективного преобразования излучения ЛПМ в нелинейных кристаллах. Обсуждение результатов, полученных нами в этих направлениях, потребовало бы много места, поэтому эти вопросы будут рассмотрены в следующем обзоре.

Авторы считают своим приятным долгом выразить глубокую признательность всем своим коллегам, которые в разное время принимали и принимают участие в научной деятельности отдела/лаборатории КЭ ИОА СО РАН, и чей вклад в решение многочисленных задач, связанных с разработками ЛПМ и систем на их основе, трудно переоценить.

1. *Fowles G.R., Silfvast W.T.* High-gain laser transition in lead vapor // *Appl. Phys. Lett.* 1965. V. 6, N 12. P. 236–237.
2. *Bertolotti M.* Twenty-five years of the laser: The European contribution to its development // *Opt. Acta.* 1985. V. 32, N 9. P. 961–980.
3. *Солдатов А.Н., Соломонов В.И.* Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов. Новосибирск: Наука, 1985. 152 с.
4. *Бохан П.А.* Лазеры на парах металлов со столкновительным девозбуждением нижних рабочих состояний: Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Том. гос. ун-т им. В.В. Куйбышева. Томск, 1988. 418 с.
5. *Евтушенко Г.С.* Лазеры на парах металлов и устройства на их основе для решения задач оптики атмосферы и других применений: Дис. ... докт. техн. наук. Ин-т оптики атмосфер. им. В.Е. Зуева СО РАН. Томск, 1994. 350 с.
6. *Солдатов А.Н.* Лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов с управляемой генерацией: Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Том. гос. ун-т. Томск, 1996. 355 с.
7. *Елаев В.Ф., Лях Г.Д., Пеленков В.П.* CuBr-лазер со средней мощностью генерации свыше 100 Вт // *Оптика атмосфер. и океана.* 1989. Т. 2, № 11. С. 1228–1229.

8. *Андриенко 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.
9. *Андриенко О.С., Димаки В.А., Колбычев Г.В., Суханов В.Б., Троицкий В.О.* Лазер на парах бромида меди малой мощности // *Оптика атмосфер. и океана.* 2004. Т. 17, № 11. С. 890–894.
10. *Способ* поддержания и регулирования концентрации галогеноводорода в газоразрядной трубке лазера и газоразрядная трубка лазера на парах галогенидов металлов: Пат. 2295811. Россия, МПК, H01S 3/03. Андриенко О.С., Суханов В.Б., Троицкий В.О., Шестаков Д.Ю., Шиянов Д.В.; Ин-т оптики атмосфер. им. В.Е. Зуева СО РАН. № 2004132665/28; Заявл. 9.11.2004; Оpubл. 20.03.2007. Бюл. № 8.
11. *Филонов А.Г., Шиянов Д.В.* Реверсивный источник HBr для лазера на парах бромида меди // *Приборы и техника эксперимента.* 2013. № 3. С. 112–115.
12. *Andrienko O.S., Dimaki V.A., Evtushenko G.S., Sukhanov V.B., Troitskii V.O., Shiyonov D.V.* Metal and metal halide vapor lasers: new opportunities // *Opt. Eng.* 2005. V. 44, N 7. P. 071204-1–5.
13. *Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С., Суханов В.Б.* Влияние состава газовой смеси и условий накачки на характеристики CuBr–Ne–H<sub>2</sub>(HBr)-лазера // *Квант. электрон.* 2007. Т. 37, № 1. С. 49–52.
14. *Филонов А.Г.* О влиянии HBr на кинетику активной среды лазера на парах CuBr // *Оптика атмосфер. и океана.* 2011. Т. 24, № 7. С. 623–629.
15. *Активный элемент лазера на парах галогенида металла:* Пат. 62742. Россия, МПК, H01S 3/08. Суханов В.Б., Троицкий В.О., Губарев Ф.А., Иванов А.И.; Ин-т оптики атмосфер. им. В.Е. Зуева СО РАН. № 2005130448/28; Заявл. 30.09.2005; Оpubл. 27.04.2007.
16. *Димаки В.А., Суханов В.Б., Троицкий В.О., Филонов А.Г., Шестаков Д.Ю.* Лазер на бромиде меди с компьютерным управлением импульсно-периодического, цугового и ждущего режимов // *Приборы и техн. эксперим.* 2008. № 6. С. 119–122.
17. *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.
18. *Gubarev F.A., Sukhanov V.B., Evtushenko G.S., Fedorov V.F., Shiyonov D.V.* CuBr laser excited by a capacitively coupled longitudinal discharge // *IEEE J. Quant. Electron.* 2009. V. 45, N 2. P. 171–177.
19. *Shiyonov D.V., Sukhanov V.B., Gubarev F.A.* Influence of peaking capacitance on the output power of capacitive-discharge-pumped metal halide vapor laser // *IEEE J. Quant. Electron.* 2018. V. 54, N 2. P. 1–7.
20. *Шиянов Д.В., Суханов В.Б., Евтушенко Г.С., Каченко Н.Ю.* Лазер на парах иодида меди с внутренним реактором // *Оптика атмосфер. и океана.* 2012. Т. 25, № 8. С. 721–726.
21. *Тригуб М.В., Шиянов Д.В., Суханов В.Б., Евтушенко Г.С.* Активная среда на парах бромида марганца с внутренним реактором при частоте следования импульсов до 100 кГц // *Оптика атмосфер. и океана.* 2014. Т. 27, № 4. С. 321–325; *Trigub M.V., Shiyonov D.V., Sukhanov V.B., Evtushenko G.S.* MnBr vapor active medium with a built-in reactor at 100-kHz pulse repetition frequency // *Atmos. Ocean. Opt.* 2014. V. 27, N 5. P. 458–462.
22. *Тригуб М.В., Торгаев С.Н., Федоров В.Ф.* Полупроводниковые источники накачки CuBr-лазеров // *Изв. Том. политехн. ун-та.* 2010. Т. 317, № 4. С. 164–168.

23. Солдатов А.Н., Федоров В.Ф. Лазер на парах меди с частотой следования импульсов до 230 кГц // Изв. вузов. Физика. 1983. Т. 26, № 9. С. 80–84.
24. Евтушенко Г.С., Полунин Ю.П., Федоров В.Ф. Исследование импульсно-периодической генерации в парах золота при высоких частотах (до 100 кГц) // Журн. прикл. спектроскопии. 1987. Т. 46, № 6. С. 1009–1011.
25. Евтушенко Г.С., Петраш Г.Г., Суханов В.Б., Федоров В.Ф. CuVg-лазер с частотой повторения импульсов до 300 кГц // Квант. электрон. 1999. Т. 28, № 3. С. 220–222.
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. Том. политехн. ун-та. 2008. Т. 312, № 2. С. 106–107.
27. Нехорошев В.О., Федоров В.Ф., Евтушенко Г.С., Торгаев С.Н. Лазер на парах бромида меди с частотой следования импульсов до 700 кГц // Квант. электрон. 2012. Т. 42, № 10. С. 877–880.
28. Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С., Суханов В.Б., Федоров В.Ф. Лазер на парах бромида меди с высокой частотой следования импульсов // Квант. электрон. 2002. Т. 32, № 8. С. 680–682.
29. Солдатов А.Н., Федоров В.Ф., Юдин Н.А. Эффективность лазера на парах меди с частичным разрядом накопительной емкости // Квант. электрон. 1994. Т. 21, № 8. С. 733–734.
30. Бохан П.А., Соломонов В.И. О механизме генерации ОКГ на парах меди // Квант. электрон. 1973. № 6. С. 53–57.
31. Федоров А.И., Шиянов Д.В. CuVg-лазер с высоким КПД в режиме двоянных импульсов накачки // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43, вып. 5. С. 10–16.
32. Федоров А.И., Шиянов Д.В. Повышение эффективности CuVg-лазера в режиме двоянных импульсов накачки // Успехи прикл. физ. 2017. Т. 5, № 3. С. 288–298.
33. Тригуб М.В., Власов В.В., Шиянов Д.В., Суханов В.Б., Троицкий В.О. Повышение эффективности возбуждения CuVg-лазера за счет модификации разрядного контура // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 12. С. 1069–1072.
34. Суханов В.Б., Шиянов Д.В., Андриенко О.С. Активный элемент лазера на парах металла с внутренним реактором галогенида металлов // Симпоз. «Лазеры на парах металлов»: Тез. докл. Ростов-на-Дону: ООО «Диапазон-Плюс», 2008. С. 84.
35. Активный элемент лазера на парах галогенида металла: Пат. 2420844. Россия, МПК, H01S 3/03. Андриенко О.С., Суханов В.Б., Троицкий В.О., Шиянов Д.В.; Ин-т оптики атмосф. им. В.Е. Зуева СО РАН. № 2009101603/28; Заявл. 19.01.2009; Опубл. 10.06.2011. Бюл. № 20.
36. Тригуб М.В., Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С. Усиленные характеристики активного элемента лазера на парах хлорида меди с внутренним реактором // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 10. С. 46–50.
37. Шиянов Д.В., Тригуб М.В., Суханов В.Б., Евтушенко Г.С., Власов В.В. Частотно-энергетические и усиленные характеристики CuCl-лазера с внутренним реактором // Журн. техн. физ. 2015. Т. 85, вып. 4. С. 93–96.
38. Shiyonov D.V., Sukhanov V.B., Evtushenko G.S. Metal halides vapor lasers with inner reactor and small active volume // Proc. SPIE. V. 10614. P. 1061404.
39. Sukhanov V.B., Shiyonov D.V. MVLs based on metal alloys. Multiline lasing // Atomic and Molec. Pulsed Lasers. Tomsk, Russia, September 2011. P. 26.
40. Бойченко А.М., Евтушенко Г.С., Жданев О.В., Яковленко С.И. Теоретический анализ механизмов влияния добавок водорода на генерационные характеристики лазера на парах меди // Квант. электрон. 2003. Т. 3, № 12. С. 1047–1058.
41. Бойченко А.М., Евтушенко Г.С., Жданев О.В., Яковленко С.И. Исследование влияния добавок бромводорода на работу лазера на парах меди: Препринт. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2003. № 5. С. 1–20.
42. Жданев О.В. Моделирование процессов в лазерах на парах меди с модифицированной кинетикой: Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Ин-т оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН. Томск, 2004. 231 с.
43. Boychenko A.M., Evtushenko G.S., Nekhoroshev V.O., Shiyonov D.V., Torgaev S.N. CuBr–Ne–HBr laser with a high repetition frequency of the lasing pulses at a reduced energy deposition in the discharge // Phys. Wave Phenom. 2015. V. 23, N 1. P. 1–13.
44. Evtushenko G.S., Torgaev S.N., Trigub M.V., Shiyonov D.V., Evtushenko T.G., Kulagin A.E. High-speed CuBr brightness amplifier beam profile // Opt. Commun. 2017. V. 383. P. 148–152.
45. Torgaev S.N., Kulagin A.E., Evtushenko T.G., Evtushenko G.S. Kinetic modeling of spatio-temporal evolution of the gain in copper vapor active media // Opt. Commun. 2019. V. 440. P. 146–149.
46. Клишкин В.М. Газоразрядные процессы в импульсных лазерах на парах металлов: Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Ин-т оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН. Томск, 2004. 236 с.
47. Клишкин В.М., Прокопьев В.Е., Сокоиков В.Г. Экспериментальное исследование взаимосвязи ионных и атомных спектров Eu- в Eu–Ne-смеси // Оптика атмосф. и океана. 1993. Т. 6, № 6. С. 628–634.
48. Клишкин В.М., Сокоиков В.Г. Бейтлеровские лазеры // Оптика атмосф. и океана. 1997. Т. 10, № 11. С. 1306–1315.
49. Клишкин В.М., Прокопьев В.Е., Сокоиков В.Г. Исследование зависимости мощности генерации на ИК-линиях иттербия от частоты следования накачки // Квант. электрон. 1982. Т. 8, № 4. С. 722–725.
50. Сокоиков В.Г., Клишкин В.М., Шестаков Д.Ю., Воробьева Л.П. Асимметрия оптического возбуждения резонансного дублета атома меди // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 11. С. 1004–1009.
51. Клишкин В.М., Сокоиков В.Г. Экспериментальное исследование показателя преломления паров ртути при атмосферном давлении на длине волны 308 нм // Оптический журн. 2007. Т. 74, № 6. С. 70–74.
52. Сокоиков В.Г. Исследование процессов преобразования УФ-излучения в парах металлов. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Ин-т оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН. Томск, 2013. 183 с.
53. Сокоиков В.Г., Клишкин А.В. Вынужденное комбинационное рассеяние излучения XeF\*- и KrF\*-лазеров в парах самария и европия // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 4. С. 295–301; Sokovikov V.G., Klimkin V.M. Stimulated Raman scattering of XeF\* and KrF laser radiation in samarium and europium vapors // Atmos. Ocean. Opt. 2014. V. 27, N 5. P. 447–453.
54. Сокоиков В.Г., Прокопьев В.Е., Клишкин А.В. Атомные линии усиленного спонтанного излучения, наблюдаемые при оптической накачке паров иттербия излучением KrF\*-лазера // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 3. С. 186–190; Sokovikov V.G., Prokopiev V.E., Klimkin V.M. Atomic lines of amplified spontaneous emission during optical pumping of Yb by KrF\* laser radiation // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 4. P. 419–423.
55. Клишкин В.М., Сокоиков В.Г. Лазерные эффекты при резонансном оптическом возбуждении паров алюми-

- ния // Оптика атмосфер. и океана. 2006. Т. 19, № 2–3. С. 229–231.
56. Климкин В.М., Николаев В.Н., Соколов В.Г., Щеголов В.Б. Генерация в основном и метастабильные состояния Ва<sup>+</sup> при двухфотонной ионизации паров Ва излучением ХеСl\*-лазера // Письма в ЖЭТФ. 1980. Т. 34. С. 111–114.
  57. Соколов В.Г., Климкин В.М., Прокопьев В.Е. Генерация вынужденного излучения на переходах в основном и метастабильные состояния иона европия при оптической накачке // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 5. С. 359–363.
  58. Оптические системы с усилителями яркости / под ред. Г.Г. Петраша // Тр. ФИАН. Т. 206. М.: Наука, 1991. 152 с.
  59. Земсков К.И., Исаев А.А., Казарян М.А., Петраш Г.Г. Лазерный проекционный микроскоп // Квант. электрон. 1974. Т. 1, № 1. С. 14–15.
  60. Evtushenko G.S. From a metal vapor laser projection microscope to a laser monitor (by the 50 year-anniversary of metal vapor lasers) // Proc. SPIE. 2015. V. 9810. P. 98101F.
  61. Gubarev F.A., Troitsky V.O., Trigub M.V., Sukhanov V.B. Gain characteristics of large volume CuBr laser active media // Opt. Commun. 2011. V. 284, iss. 10–11. P. 2565–2568.
  62. Тригуб М.В., Евтушенко Г.С. Высокоскоростной лазерный монитор для неразрушающего контроля. Германия: Lap Lambert Academic Publishing, 2015. 173 с.
  63. Евтушенко Г.С., Казарян М.А., Торгаев С.Н., Тригуб М.В., Шиянов Д.В. Скоростные усилители яркости на индуцированных переходах в парах металлов. Томск: STT, 2016. Вып. 1. 245 с. (Сер. Излучение. Пучки. Плазма).
  64. Trigub M.V., Evtushenko G.S., Torgaev S.N., Shiyonov D.V., Evtushenko T.G. Copper bromide vapor brightness amplifiers with 100 kHz pulse repetition frequency // Opt. Commun. 2016. V. 376. P. 81–85.
  65. Тригуб М.В., Шиянов Д.В., Суханов В.Б., Евтушенко Г.С. Активная среда на парах бромида марганца с внутренним реактором при частоте следования импульсов до 100 кГц // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 4. С. 321–325.
  66. Тригуб М.В., Федоров К.В., Евтушенко Г.С. Визуализация объектов, расположенных на удалении до 5 м от CuBr-усилителя яркости, с импульсом излучения типичной длительности // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 9. С. 850–853.
  67. Тригуб М.В., Торгаев С.Н., Евтушенко Г.С., Троицкий В.О., Шиянов Д.В. Бистатический лазерный монитор // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42, № 12. С. 51–56.
  68. Высоковольтный модулятор: Пат. 185671. Россия, МПК, Н03К 3/53. Васнев Н.А., Тригуб М.В., Димаки В.А., Евтушенко Г.С., Троицкий В.О., Власов В.В.; Ин-т оптики атмосфер. им. В.Е. Зуева СО РАН. № 2018135717; Заявл. 09.10.2018; Опубл. 13.12.2018. Бюл. № 35.
  69. Тригуб М.В., Васнев Н.А., Евтушенко Г.С., Димаки В.А. Система синхронизации импульсно-периодического режима работы активных сред на самоограниченных переходах в парах металлов // Приборы и техн. эксперим. 2019. № 1. С. 1–6.
  70. Васнев Н.А., Тригуб М.В., Евтушенко Г.С. Особенности работы усилителя яркости на парах бромида меди в схеме бистатического лазерного монитора // Оптика атмосфер. и океана. 2019. Т. 32, № 3. С. 247–253.
  71. Тригуб М.В., Власов В.В., Торгаев С.Н., Евтушенко Г.С. Усилитель яркости на парах бромида меди с увеличенной длительностью импульса // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43, № 18. С. 17–23.
  72. Evtushenko G.S., Trigub M.V., Gubarev F.A., Evtushenko T.G., Torgaev S.N., Shiyonov D.V. Laser monitor for non-destructive testing of materials and processes shielded by intensive background lighting // Rev. Sci. Instrum. 2014. V. 85, iss. 3. N 033111. P. 1–5.
  73. Evtushenko G.S. Methods and Instruments for Visual and Optical Diagnostics of Objects and Fast Processes. Nova Science Publishers Inc. 2018. 184 p.
  74. Trigub M.V., Platonov V.V., Osipov V.V., Evtushenko T.G., Evtushenko G.S. Laser monitors for high speed imaging of materials modification and production // Vacuum. 2017. V. 143. P. 486–490.
  75. Белоплотов Д.В., Тригуб М.В., Тарасенко В.Ф., Евтушенко Г.С., Ломаев М.И. Визуализация газодинамических процессов при импульсно-периодическом разряде, инициируемом убегающими электронами, в воздухе атмосферного давления с помощью лазерного монитора // Оптика атмосфер. и океана. 2016. Т. 29, № 2. С. 157–161.; Beloplotov D.V., Trigub M.V., Tarasenko V.F., Evtushenko G.S., Lomaev M.I. Laser monitor visualization of gas-dynamic processes under pulse-periodic discharges initiated by runaway electrons in atmospheric pressure air // Atmos. Ocean. Opt. V. 29, N 4. P. 371–375.
  76. Тригуб М.В., Платонов В.В., Федоров К.В., Евтушенко Г.С., Осипов В.В. CuBr-лазер в задачах визуализации процессов получения наноматериалов // Оптика атмосфер. и океана. 2016. Т. 29, № 3. С. 249–253; Trigub M.V., Platonov V.V., Fedorov K.V., Evtushenko G.S., Osipov V.V. CuBr laser for nanopowder production visualization // Atmos. Ocean. Opt. V. 29, N 4. P. 376–380.
  77. Тригуб М.В., Бурков М.В., Любутин П.С., Торгаев С.Н. Исследование искажений, вносимых усилителем яркости на парах бромида меди, в формируемые лазерным монитором изображения // Оптика атмосфер. и океана. 2016. Т. 29, № 10. С. 850–854.

V.A. Dimaki, V.G. Sokovikov, S.N. Torgaev, M.V. Trigub, V.O. Troitskii, D.V. Shiyonov. **Metal vapor lasers.**

The main stages of development of the direction associated with the engineering and research of metal vapor lasers, which has been existing at IAO SB RAS since the first days of its foundation, are considered. Some of the most interesting, on the authors opinion, results of both fundamental and applied nature are presented. A fairly extensive list of works published on this subject is given, mainly in the last twenty years.