

Лазеры на парах бромида меди нового поколения

О.С. Андриенко¹, Ф.А. Губарев¹, В.А. Димаки¹, А.И. Иванов¹,
М.Е. Левицкий², В.Б. Суханов¹, В.О. Троицкий¹, В.Ф. Федоров¹,
А.Г. Филонов¹, Д.В. Шиянов^{1*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

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

²ЗАО НВП «Топаз»

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

Поступила в редакцию 19.06.2009 г.

Предлагается новый тип лазеров на парах металлов (ЛПМ) — отпаянные лазеры на парах галогенидов металлов (ЛПГМ) с активным теплоизолятором (АТ), который представляет собой автономный нагревательный элемент, позволяющий поддерживать температуру внешней стенки рабочего объема на требуемом уровне при любой энергии возбуждения, вкладываемой в разряд. Именно наличие АТ дает возможность рассматривать предлагаемые лазеры в качестве полной альтернативы традиционным саморазогревным ЛПМ. Приведена блок-схема ЛПГМ-АТ, позволяющая получить представление об основных отличительных особенностях данной конструкции. Обсуждаются функциональные преимущества ЛПГМ, появляющиеся в результате использования АТ: увеличение эффективности энерговклада, возможность работы лазера в цуговом и ждущем режиме. Представлены лабораторные макеты CuBr-АТ-лазеров, выполненные в приборном варианте. Возможность ЛПГМ-АТ генерировать при низких, по сравнению с саморазогревными конструкциями, мощностях накачки, стала решающей предпосылкой для появления новых конструкций лазеров. Впервые получение генерации на самоограниченных переходах в парах металлов при возбуждении от емкостного разряда. Разработана оригинальная конструкция отпаянного CuBr-АТ-лазера с внутренним реактором галогенидов металлов. Получен значимый уровень мощности при использовании транзисторного источника питания. Обсуждается возможность использования CuBr-АТ-лазеров для прецизионной обработки металлов как наиболее перспективной области применения ЛПМ.

Ключевые слова: лазеры на парах бромида меди; CuBr laser.

Введение

На протяжении 40 лет Институт оптики атмосферы СО РАН проводит исследования в области физики лазеров на парах металлов (ЛПМ), которые были и остаются наиболее эффективными источниками когерентного излучения видимого диапазона спектра. Всегда уделяя большое внимание прикладным аспектам этой работы, Институт оказался в числе первых научных коллективов, освоивших технологию изготовления указанных лазеров и приступивших к их производству, ориентируясь, главным образом, на заказы различных научных организаций, в том числе и собственные. Необходимо отметить, что приблизительно первые 30 лет главным объектом научной деятельности в ИОА были лазеры на парах «чистых» металлов (Cu-, Au-, Pb-лазеры

и т.д.). Основные научно-практические результаты того периода представлены в трудах [1–4], где можно найти и подробную библиографию, относящуюся к этой проблематике.

Уже первые эксперименты, проведенные как в нашем Институте, так и в других научных коллективах (см., например, [5]), показали, что для создания активных лазерных сред весьма перспективными оказываются не только сами металлы, но и их галогениды, главным образом бромиды и хлориды. В качестве подтверждения сказанному отметим работы [6, 7]. В [6] сообщается о создании лазера на парах бромида меди (CuBr-лазер) с выходной мощностью более 100 Вт — результат, который до сих пор остается одним из лучших в нашей стране для любых лазеров на парах металлов. В [7] продемонстрирована возможность увеличения частоты следования импульсов (ЧСИ) CuBr-лазера вплоть до 300 кГц при стационарном режиме работы. Это значение ЧСИ оставалось рекордным для всех недиодных лазеров вплоть до появления [8], где была продемонстрирована ЧСИ ~ 400 кГц.

Не вдаваясь в детали сравнительного анализа лазеров на парах чистых металлов и их галогенидов (об этом см., например, [5, 9]), отметим лишь один достаточно бесспорный момент — температуры

* Олег Семенович Андриенко (aos@iao.ru); Федор Александрович Губарев (GFAdd@mail.ru); Виктор Анатольевич Димаки (qel@asd.iao.ru); Александр Иванович Иванов (qel@asd.iao.ru); Михаил Ефимович Левицкий (top@iao.ru); Виктор Борисович Суханов (qel@asd.iao.ru); Владимир Олегович Троицкий (qel@asd.iao.ru); Валерий Федорович Федоров (qel@asd.iao.ru); Александр Григорьевич Филонов (qel@asd.iao.ru); Дмитрий Валерьевич Шиянов (qel@asd.iao.ru).

плавления чистых металлов оказываются заметно выше, чем у соответствующих галогенидов. Например, для меди – наиболее перспективный «лазерный» металл – указанная разница температур составляет почти 1000 °С. В результате этого конструкции активных элементов (АЭ) лазеров на парах галогенидов металлов (ЛПГМ) становятся существенно более простыми и менее материалоемкими, а процессы изготовления и тренировки АЭ – существенно более быстрыми, менее трудозатратными, не требующими специального, достаточно дорогостоящего оборудования и специально обустроенных производственных площадей. Очевидным прямым следствием этого оказывается сравнительно более низкая стоимость АЭ ЛПГМ; причем отмеченная ценовая разница возрастает (до 5–7 раз) по мере увеличения рабочего объема АЭ. Такое положение дел во многом определило и наше решение, принятое около 10 лет назад: полностью переключиться на разработку и исследования отпаянных ЛПГМ и в первую очередь CuBr-лазеров. В результате на сегодняшний день ИОА СО РАН является единственной организацией в России, способной производить для CuBr-лазеров до 15 АЭ (рассчитанных на среднюю мощность до 50 Вт) в год.

ЛПМ вообще и на парах меди (во всех своих модификациях) в особенности, отличающиеся уникальной совокупностью выходных параметров, являются очень перспективным инструментом для решения широкого круга как чисто научных, так и прикладных задач [1, 5, 9]. Тем не менее, обратившись к статистике (см., например, [10]), можно с удивлением обнаружить, что в настоящее время указанные лазеры по объему продаж занимают одно из последних мест на мировом рынке лазерного оборудования. Основное объяснение такого, на наш взгляд, незаслуженно низкого спроса состоит в следующем. По сравнению с лидерами продаж [10] (CO₂- и Nd:YAG-лазеры) ЛПМ оказались очень сложным объектом как для понимания физики основополагающих процессов, так и в плане приборной реализации. В результате коммерческие «медные» лазеры появились на рынке сравнительно недавно, когда основные потребители уже отработали методы и технологии, ориентированные на отмеченные выше наиболее «продвинутое» лазеры.

Изменить такое положение дел – задача чрезвычайно сложная, тем более что современные ЛПМ в отношении «цена/качество» объективно проигрывают своим основным конкурентам. Здесь под термином «качество» будем понимать совокупность таких эксплуатационных характеристик прибора, как: надежность и стабильность работы, рабочий ресурс, возможность компьютерного управления параметрами генерации, время выхода на рабочий режим, габариты прибора, простота обслуживания и т.д. Отметим, что улучшение эксплуатационной привлекательности ЛПМ при сохранении (а в идеале при снижении) их стоимости определяет основную направленность усилий специалистов в этой области. Разумеется, Институт не является исключением.

Не трудно понять, что основным недостатком любых ЛПМ, негативно влияющим на их «качество» (в плане перечисленных выше эксплуатационных характеристик), является высокая рабочая температура, которую необходимо поддерживать в активном объеме для существования паров металлов. Важно отметить, что решающую роль в этой связи играют не очевидные дополнительные (достаточно существенные) энергозатраты, приводящие к снижению КПД лазера «от розетки», а способ поддержания требуемого теплового режима.

В частности, не самой удачной, по-видимому, следует считать наиболее распространенную сегодня (так называемую «саморазогревную») конструкцию ЛПМ. Суть «саморазогрева» состоит в том, что энергия, вкладываемая в разряд, используется и для создания рабочей температуры (для создания необходимого давления паров металла) в активном объеме – вспомогательная функция, и для возбуждения верхних лазерных уровней рабочих атомов – основная функция. В свете обсуждаемого вопроса необходимо отметить два основных момента.

1. Поскольку концентрация рабочих атомов (а значит, и мощность генерации) зависит от средней мощности, вкладываемой в разряд, то уже сравнительно небольшое изменение последней (за счет изменения импульсного энергоклада или ЧСИ) будет приводить к заметному изменению мощности генерации, обусловленному либо перегревом, либо недогревом рабочего объема. Это означает, что оперативное управление генерационным режимом в саморазогревных лазерах практически невозможно.

2. Самым уязвимым элементом современных источников питания (ИП) обсуждаемых ЛПМ являются мощные коммутаторы, среди которых в России практически единственно подходящими были и остаются тиратроны ТГИ1 (или 2)-1000/25. К сожалению, средняя мощность, которую эти тиратроны способны надежно коммутировать, ограничена примерно 2 кВт. Именно это значение и определяет максимальную мощность (~10–15 Вт) Cu-лазеров (типичные КПД ~0,5–0,7%) российского производства. Изготовители, стремясь увеличить мощность прибора, используют коммутаторы «по максимуму», что является основной причиной ненадежности и нестабильности современных ЛПМ – главные факторы, снижающие «качество» коммерческих лазеров. Отсюда следует, что использование саморазогревных конструкций, предполагающих существенные (> 50%) затраты «драгоценного» энергетического ресурса тиратрона на вспомогательные функции, нельзя на сегодняшний день считать оптимальным решением вопроса, по крайней мере тогда, когда речь идет о достаточно мощных ЛПМ.

Учитывая вышеизложенное, мы сформулировали следующую задачу: разработать для ЛПМ такую конструкцию АЭ, у которого вспомогательные функции реализуется за счет автономного источника энергии, не связанного с разрядом. Последний теперь будет обеспечивать только основные (лазерные) функции. Иными словами, предложить альтернативу саморазогревным конструкциям АЭ.

Необходимо отметить, что идея создания АЭ с независимым нагревом рабочего объема не является новой. Более того, самые первые Cu-лазеры имели как раз такую конструкцию [5]. Однако дальнейшие исследования показали, что при работе с чистой медью, которой всегда уделялось повышенное внимание, создание таких АЭ сопровождается большими техническими проблемами, которые делают независимый нагрев совершенно не целесообразным. В силу этого от указанной идеи быстро отказались, тем более что уже появились саморазогревные Cu-лазеры, с помощью которых были получены очень обнадеживающие результаты.

Тем не менее мы решили сделать еще одну попытку в этом направлении, но уже применительно к CuBr-лазерам, имеющим существенно более низкие рабочие температуры. В результате мы оказались первыми [11], кому удалось идею независимого нагрева активного объема ЛПМ довести до приборных макетов лазеров, имеющих, на наш взгляд, вполне реальную коммерческую перспективу. Диапазон эксплуатационных параметров указанных лазеров оказался настолько увеличенным (по сравнению с саморазогревными), что мы сочли возможным говорить о новом поколении ЛПМ. Цель настоящей работы состояла в том, чтобы продемонстрировать конструктивные и функциональные особенности этих новых приборов, которые будем называть ЛПГМ с активным теплоизолятором (АТ).

1. Особенности конструкции лазеров на парах бромиде меди с активным теплоизолятором

Блок-схема типичного CuBr-лазера с активным теплоизолятором (CuBr-АТ) показана на рис.1. Отметим три основных элемента конструкции, определяющих конкурентные преимущества разработанных нами лазеров.

1.1. Импульсный заряд рабочей емкости

Рабочий цикл ИП, используемого в наших лазерах, состоит из трех этапов: заряд рабочей емкости 9 (продолжительность этапа ~20 мкс); разряд энергии, запасенной в рабочей емкости, через газоразрядную трубку 1 (~1 мкс); релаксационная пауза (~10 мкс). Точные значения продолжительности этапов зависят от параметров работы ИП и в первую очередь от ЧСИ. В частности, чем ниже ЧСИ, тем больше оказывается продолжительность паузы.

Заряд рабочей емкости осуществляется стандартным образом через шунтирующую индуктивность 10 с помощью полумостовой схемы 14, импульсного высоковольтного трансформатора 13 и высоковольтного выпрямителя 12. Разряд емкости реализуется по прямой схеме — через тиратрон 11

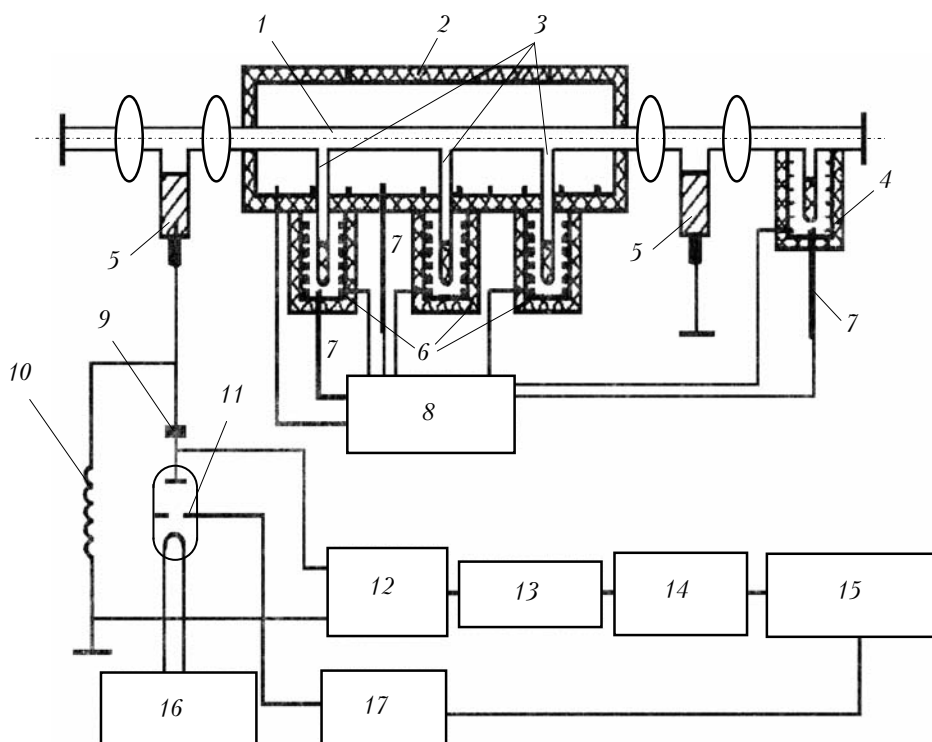


Рис. 1. Блок-схема лазера на парах бромиде меди с активным теплоизолятором: 1 – газоразрядная трубка (ГРТ); 2 – нагревательный элемент активного объема; 3 – контейнеры с CuBr; 4 – генератор НВр; 5 – электроды ГРТ; 6 – нагревательные элементы контейнеров с CuBr; 7 – термопары; 8 – трехканальный блок управления температурой; 9 – рабочая емкость; 10 – шунтирующая индуктивность; 11 – тиратрон (ТГИ1-1000/25); 12 – высоковольтный выпрямитель; 13 – импульсный высоковольтный трансформатор; 14 – полумостовая схема; 15 – блок управления и регулируемый выпрямитель; 16 – стабилизатор накала и водорода тиратрона; 17 – блок запуска тиратрона

(ТГИ1-1000/25) и электроды 5 активного элемента 1. Работа полумостовой схемы 14 и блока запуска тиратрона 17 управляется с помощью микроконтроллера, расположенного в блоке управления 15. Микроконтроллер работает либо по заданной, предварительно прошитой в нем программе – внутренний запуск, либо по командам, поступающим от компьютера, – внешний запуск. Более подробно работа такого ИП рассмотрена в [12].

Основное преимущество ИП с импульсным зарядом рабочей емкости (по сравнению с традиционными ИП постоянного напряжения) состоит в наличии указанной выше релаксационной паузы, во время которой тиратрон находится под нулевым потенциалом. Именно за счет этого газовая среда тиратрона, возмущенная во время разряда, успевает эффективно релаксировать, что и обеспечивает существенное увеличение стабильности и надежности работы как тиратрона, так и всего лазера в целом.

1.2. Генератор галогеноводорода

Хорошо известно [13], что малые (оптимальные) добавки электроотрицательных молекул (как правило, водород или галогеноводород) в активную среду ЛПМ способны заметно увеличивать КПД и среднюю мощность указанных лазеров. Следует отметить, что наибольший положительный эффект (увеличение до 5 раз) наблюдается в ЛПГМ, что можно считать их важным преимуществом по сравнению с лазерами на парах чистых металлов (максимальное увеличение ~50%). Физические процессы, объясняющие это обстоятельство, обсуждаются, например, в [13].

До недавнего времени при изготовлении отпаянных ЛПМ в качестве активной примеси наиболее часто использовался водород, причем как для лазеров на парах чистой меди [14], так и для лазеров на парах солей металлов [15]. Однако при этом возникла проблема удержания водорода в активной среде лазера, в результате чего существенно ограничивался эффект от использования активной добавки в отпаянной лазерной трубке. В первую очередь, это связано с тем, что H_2 вступает в химические реакции с компонентами активной среды (например, для «бромидных» лазеров $H_2 + CuBr \rightarrow Cu + HBr$). Именно по этой причине известные на сегодняшний день генераторы водорода серии СРНВ (ООО «Импульсные технологии», г. Рязань) не нашли применения в отпаянных ЛПГМ. Поскольку свободного водорода в указанных активных средах очень мало, то у этих генераторов исчезает свойство реверсивности, а это, в случае переизбытка водорода, может привести к уменьшению мощности генерации вплоть до ее полного срыва.

Отмеченный недостаток устранен в предложенной и разработанной нами конструкции генератора галогеноводорода (позиция 4 на рис. 1), встроенного в состав отпаянного активного элемента лазера [16]. Здесь функциональное назначение генератора примеси состоит уже не только в генерировании $HBr(HCl)$ в активную среду, но и в удалении избыточной концентрации $HBr(HCl)$ обратно в генератор. Простота

конструкции генератора и управления его работой позволяет эффективно повышать энергетические характеристики, например, $CuBr$ -лазеров [17, 18], которые представляют наибольший практический интерес среди всех известных на сегодняшний день ЛПГМ.

1.3. Внешний нагрев активного объема

Принципиальной отличительной особенностью разработанной нами конструкции лазера является внешнее нагревательное устройство (см. рис. 1, позиция 2), позволяющее поддерживать температуру внешней стенки ГРТ на требуемом (оптимальном) уровне, вне зависимости от величины энергии, вкладываемой в разряд от ИП. Из сказанного следует, что в наших АЭ нагреватель 2 играет роль некоего теплоизоляционного материала – активный теплоизолятор, свойства которого должны изменяться в зависимости от мощности, вкладываемой в разряд. Именно по этой аналогии нагревательное устройство 2 мы предложили называть «активным теплоизолятором» и использовать аббревиатуру «АТ» в названии лазеров, конструкция которых обеспечивает такой внешний нагрев активного объема.

В рассматриваемой конструкции также автономными являются нагревательные элементы 6 контейнеров с $CuBr$ 3 и генератора HBr 4. Рабочие температуры всех трех перечисленных выше нагревательных элементов контролируются термометрами 7 и поддерживаются на выбранном уровне с помощью трехканального блока управления температурой 8.

Из сказанного следует, что цель, определенную во введении, в целом можно считать выполненной. Обсуждаемые здесь $CuBr$ -АТ-лазеры являются (по определению) полной альтернативой саморазогревным лазерам. Напомним, что к категории последних относятся подавляющее большинство известных на сегодняшний день лазеров на парах чистых металлов и разработанная нами ранее [19] специальная конструкция полностью саморазогревных ЛПГМ.

2. Особенности работы $CuBr$ -АТ-лазеров

На рис. 2 представлена зависимость мощности лазера $CuBr$ -АТ-10 (последняя цифра означает расчетную среднюю мощность лазера в ваттах) от температуры внешней стенки ГРТ, поскольку именно возможность независимого варьирования последней определяет, как отмечалось выше, основную отличительную особенность рассматриваемой конструкции.

Лазер имел активный объем $V = 1000 \text{ см}^3$ и работал без добавок HBr . Последнее обстоятельство объясняет тот факт, что средняя мощность оказалась ниже расчетных 10 Вт. Все результаты получены при потребляемой от сети мощности ~1500 Вт.

Поведение кривых легко объяснить, если принять во внимания два момента. Во-первых, при любых условиях возбуждения всегда можно указать оптимальное давление паров $CuBr$ (оптимальную температуру контейнеров $CuBr$), при которой мощность

лазера становится максимальной [1, 9, 13]. Во-вторых, чем выше температура стенок ГРТ, тем выше давление паров CuBr, которое можно обеспечить в активном объеме.

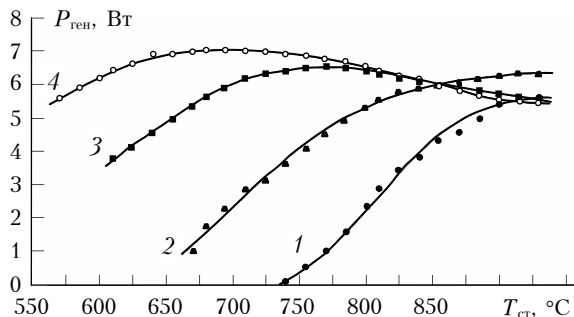


Рис. 2. Зависимость мощности генерации от температуры внешней стенки ГРТ для различных значений температуры контейнеров с CuBr: 380 °С — кривая 1; 430 °С — 2; 500 °С — 3; 540 °С — 4

Практическое значение показанных результатов также представляется достаточно очевидным — недогрев активного объема приводит к заметному уменьшению мощности лазерного излучения. Получить генерацию при низкой температуре стенок ГРТ, безусловно, возможно, увеличивая температуру контейнеров с CuBr (см. кривую 4). Однако эксплуатация лазера в таких условиях будет приводить к сокращению рабочего ресурса за счет металлизации внутренних стенок активного объема и за счет быстрого выноса CuBr из контейнеров.

Представленные результаты позволяют определить оптимальный температурный режим работы лазера: температура контейнеров должна быть ~450–480 °С, а температура стенок ГРТ ~750–800 °С. Отметим, что приведенные значения температуры контейнеров с CuBr следует рассматривать как величины относительные. Точные значения этих температур, которые, скорее всего, должны быть заметно выше, во время работы лазера измерить достаточно сложно, и мы такую задачу перед собой не ставили.

Одним из важных преимуществ CuBr-АТ-лазеров является существенное расширение динамического диапазона накачки. Сказанное иллюстрирует рис. 3, на котором представлены зависимости мощности и кпд для двух лазеров (с рабочим объемом 1000 и 2000 см³ соответственно) от величины средней мощности, вкладываемой в разряд. Все точки на графиках получены при оптимальных значениях температур контейнеров с CuBr, которые (температуры) сильно зависят от величины вкладываемой в разряд энергии [20].

Рассмотрим случай, когда лазеры работали без добавок НВг в активную среду (кривые 1). Первое, что привлекает внимание, это — очень низкое значение пороговой мощности накачки, которое практически совпадает с мощностью пробоя газовой среды. Для саморазогревных лазеров аналогичного объема пороговая мощность накачки в среднем оказывается почти на порядок выше. Второе важное обстоятельство: для обоих лазеров максимум кпд достигается

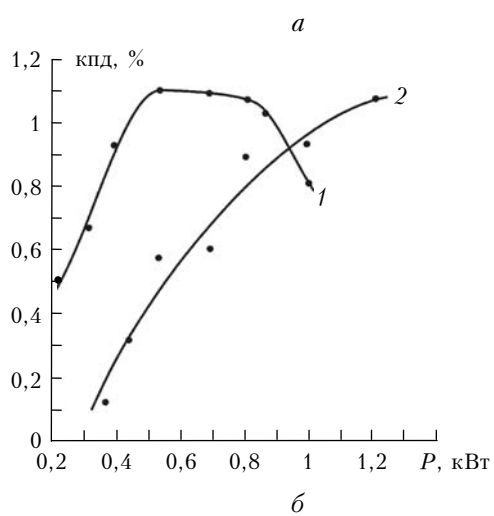
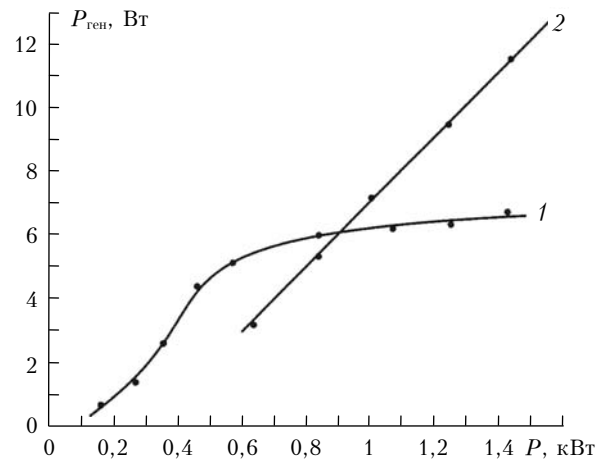


Рис. 3. Поведение мощности (а) и кпд генерации (б) CuBr-АТ-лазеров с рабочими объемами $V = 1000 \text{ см}^3$ (а) и 2000 см^3 (б) в зависимости от мощности, коммутируемой тиратроном; 1 — без НВг, 2 — с НВг

при мощности накачки $P = P_{\text{от}}(0) \approx 400\text{--}600 \text{ Вт}$. Дальнейшее почти трехкратное увеличение мощности накачки приводит к небольшому (~20%) росту мощности генерации и к существенному (~2,5 раза) уменьшению кпд. Другими словами, максимальные значения кпд и мощности лазеров достигаются при различных уровнях мощности накачки.

Сам по себе этот факт не является новым, поскольку нечто подобное наблюдается и в саморазогревных лазерах (см., например, [6]). Однако если в последних случаях это можно связать с избыточной концентрацией металла, образующейся при увеличении мощности накачки, то в данном случае такая гипотеза уже не подходит по определению. В настоящее время объяснения отмеченному существенному уменьшению кпд (рис. 3, а) мы предложить не можем и поиск ответа на этот вопрос рассматриваем как свою важнейшую первоочередную задачу. Одна из возможных гипотез обсуждается в [21].

С CuBr-АТ-10, которому соответствует рис. 3, а, был проведен еще один, на наш взгляд весьма показательный, эксперимент. Оказалось, что при дополнительном утеплении ГРТ и при максимальной

(определяемой имеющимся ИП) вкладываемой мощности (~1,5 кВт) данный лазер был способен работать и в саморазогревном режиме. Это означает, что даже при отключенном нагревателе 2 (см. рис. 1) температура стенок ГРТ оставалась близкой к оптимальному значению (см. рис. 2). В результате было установлено, что в таком саморазогревном режиме мощность и кпд лазера практически точно совпали с соответствующими значениями, приведенными на рис. 3, *a* (последние точки на кривых 1 и 2) для CuVg-АТ-лазера. Проведенное сравнение приводит к важному в практическом плане выводу. Использование АТ позволяет примерно в 3 раза уменьшить мощность, коммутируемую тиратроном, при одновременном увеличении в 2,5 раза эффективности использования энергии, вкладываемой в разряд. Это совершенно понятно, поскольку наличие АТ позволяет использовать ИП только для выполнения основной функции. Согласно сказанному во введении мы рассматриваем возможность уменьшения мощности, коммутируемой тиратроном, как важное преимущество разработанных нами лазеров, гарантирующее улучшение «качества» приборов.

Кривые 2 на рис. 3 относятся к случаю, когда CuVg-АТ-лазеры работали с добавками НВг в активную среду. В этой ситуации возможности снижения энерговыклада оказываются существенно ограниченными. Связано это с тем, что, как было впервые установлено, положительное влияние НВг начинает наблюдаться только при мощностях накачки, больших некоего эффективного порогового значения $P_{эф} \sim 1$ кВт — точка пересечения кривых 1 и 2. Поскольку эта величина $P_{эф}$ приблизительно совпадает, как было установлено в сравнительном эксперименте, с пороговой мощностью накачки саморазогревного лазера ($V = 1000$ см³, см. рис. 3, *a*), то понятно, что увеличить эффективность энерговыклада в этом случае не представляется возможным.

Тем не менее мы полагаем (пока только гипотетически), что и при добавке НВг выигрыш по кпд можно получить, но для CuVg-АТ-лазеров, имеющих рабочий объем $V > 2000$ см³. Будем рассуждать следующим образом. Обратившись к кривой 2 на рис. 3, *b* (или пересчитав для кпд результаты на рис. 3, *a*), можно предположить (показать это строго мы пока не можем по техническим причинам), что эта зависимость (как и для кривой 1) имеет максимум при мощности накачки

$$P_{оп}(НВг) \approx 1,5 \text{ кВт} \approx P_{оп}(0) + P_{эф},$$

где $P_{оп}(0)$ мы определили выше. Если это действительно так, то выигрыш от использования АТ (по сравнению с саморазогревной конструкцией аналогичного объема) следует ожидать в том случае, когда мощность саморазогрева ($P_{ср}$) будет велика по сравнению с $P_{оп}(НВг)$. Понятно, что величина $P_{ср}$ должна быстро увеличиваться по мере увеличения рабочего объема АЭ, поэтому величина возможного выигрыша будет зависеть от того, как будут себя вести $P_{оп}(0)$ и $P_{эф}$, определяющие $P_{оп}(НВг)$. Однако в пользу сделанного предположения говорит пока лишь то, что, по крайней мере, в двух рассмотренных

случаях, представленных на рис. 3, двукратное увеличение V на оптимальные значения мощности накачки практически не повлияло. Детальное выяснение зависимости $P_{оп}(НВг)$ от рабочего объема CuVg-АТ-лазеров — это еще одна важная задача на ближайшее время.

Представленные на рис. 3 результаты позволяют сделать еще одно предположение, имеющее принципиальное значение. Получается, что вопреки общепринятой точке зрения добавка оптимальной концентрации НВг в активную среду, по крайней мере двух исследованных нами CuVg-лазеров, не позволяет увеличить максимальное значение кпд, наблюдаемое при мощности накачки $P = P_{оп}(0)$ и без добавок бромистого водорода.

Действительно, на рис. 3, *b* хорошо видно, что максимальные значения кривых 1 и 2 практически одинаковы, а на рис. 3, *a* (кривая 2) кпд даже оказывается ниже. В то же время увеличение мощности лазера, безусловно, имеет место, поскольку добавка НВг смещает положение максимума кпд (на величину $P_{эф}$) в сторону увеличения мощности накачки. За счет этого даже при заметном уменьшении кпд мощность лазера все равно оказывается существенно выше.

Отметим, что при использовании высоких мощностей возбуждения ($P \geq P_{оп}(НВг)$) (что характерно для саморазогревных лазеров, с которыми получены все основные результаты) добавка НВг будет обеспечивать пропорциональный выигрыш и по мощности, и по кпд. К обсуждению физической природы представленного результата мы предполагаем вернуться позже, накопив достаточный объем фактического материала.

Диапазон ЧСИ, с которыми могут работать CuVg-АТ-лазеры, демонстрирует рис. 4.

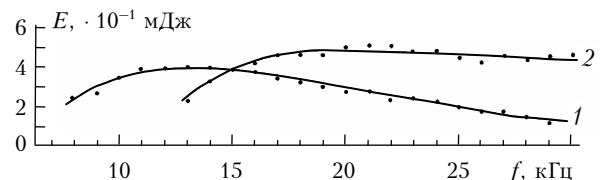


Рис. 4. Зависимость энергии в импульсе генерации CuVg-АТ-лазера от частоты следования импульсов возбуждения; 1 — без НВг; 2 — с НВг

Уникальность этих результатов состоит в том, что все точки на графиках получены при одном и том же импульсном энерговыкладе в разряд. Другими словами, величины рабочей емкости (~700 пФ) и напряжения на емкости (~15 кВ) в ходе эксперимента оставались неизменными. Чтобы подчеркнуть важность указанного обстоятельства, отметим следующее. В саморазогревных лазерах любое изменение ЧСИ при неизменных прочих условиях приводит к пропорциональному изменению среднего энерговыклада и, как следствие, к изменению рабочей концентрации металла. В результате мощность и кпд лазера будут уже не столько зависеть от ЧСИ, сколько отслеживать ход давления рабочих паров. Таким образом,

для получения достоверных результатов изменение ЧСИ должно сопровождаться обратно пропорциональным изменением импульсного энергоклада.

Однако строго обеспечить выполнение этого условия, во-первых, достаточно сложно, а во-вторых, это все равно не решает проблему полностью. Дело в том, что рабочая емкость и рабочее напряжение не только определяют импульсный энергоклад, но и влияют на генерационные характеристики непосредственно [1, 5, 9]. Именно на основании сказанного мы считаем, что на сегодняшний день представленные на рис. 4 зависимости позволяют наиболее объективно судить о влиянии ЧСИ на энергетические характеристики генерации CuBr-лазеров.

Из рис. 4 следуют два важных вывода. Во-первых, для CuBr-АТ-лазеров можно указать достаточно широкий диапазон ЧСИ (особенно для лазеров, работающих с добавкой HBr), внутри которого изменения импульсной энергии оказываются незначительными. Во-вторых, импульсная энергия заметно падает при уменьшении ЧСИ примерно от 7–8 или от 12–13 кГц при работе лазера без добавок и с добавками HBr соответственно. Первое обстоятельство мы рассматриваем как еще одно важное для прикладных задач преимущество CuBr-АТ-лазеров, а второе – как один из известных недостатков [9, 13] (присущий любым ЛПГМ), к которому мы еще вернемся ниже.

Важнейшим фактором, способствующим повышению «качества» прибора, является возможность оперативного управления параметрами лазерного излучения. В наиболее общей постановке вопроса удобно говорить о переводе лазера в цуговой режим, у которого все основные параметры (длительность цуга и интервал между двумя отдельными цугами, ЧСИ внутри цуга и амплитуда каждого отдельного импульса) управляются в процессе работы от внешней программы.

В подавляющем большинстве случаев цуговой режим реализуется с помощью дополнительных, как правило, достаточно сложных и дорогостоящих устройств. Чаще всего используют оптические модуляторы (различного принципа действия), коэффициент пропускания которых управляется от компьютера. При этом, как правило, амплитуда импульсов цуга остается постоянной.

В мощных саморазогреваемых лазерах на парах чистой меди предложено использовать дополнительный ИП [9], который позволяет в нужное время и в нужной степени подавить импульс генерации. Однако при этом нельзя варьировать величину ЧСИ. Проведенные нами предварительные исследования [21–23] позволяют утверждать, что CuBr-АТ-лазеры относятся к числу немногих, известных на сегодняшний день, лазеров, у которых цуговой режим можно реализовать, управляя непосредственно ИП. Однако и для этих лазеров определенные ограничения, по-видимому, неизбежны. Кратко остановимся на этом вопросе.

Основная проблема состоит в том, что в активном объеме ЛПГМ рабочие атомы металла появляются только во время горения разряда за счет диссоциа-

ции молекул галогенидов металла (ГМ) на соответственно атомы металла и галогена. При отключении разряда начинается обратный процесс – ассоциация указанных атомов в исходную молекулу ГМ, приводящий к уменьшению рабочей концентрации металла и, как следствие, к снижению мощности лазерной генерации. В частности, именно этим объясняется «завал» частотных характеристик, наблюдаемый на рис. 4 при уменьшении ЧСИ. При реализации управляемого режима генерации отмеченный механизм проявляется либо в снижении амплитуд первых импульсов цугов (при небольших временных интервалах (паузах) между цугами), либо вообще в исчезновении этих первых импульсов (при значительных продолжительностях паузы).

Результаты проведенных нами исследований позволяют предложить следующую физическую картину работы CuBr-АТ-лазера в цуговом режиме. Если продолжительность паузы между цугами $\Delta\tau \leq 150 \div 170$ мкс $\equiv (\Delta\tau)_0$, то никакого уменьшения амплитуд импульсов цуга не наблюдается. При увеличении паузы $\Delta\tau > (\Delta\tau)_0$ амплитуда первых импульсов начинает уменьшаться, причем тем заметнее, чем меньше порядковые номера импульсов. При $\Delta\tau \equiv (\Delta\tau)_1 \approx 600$ мкс первый импульс исчезает полностью, а стационарная, соответствующая импульсно-периодическому режиму, величина амплитуды восстанавливается только к 3–5-му импульсу. Это означает, что именно за указанные 3–5 импульсов возбуждения в активном объеме восстанавливается стационарное значение концентрации атомов меди, уменьшившееся во время паузы.

При дальнейшем увеличении продолжительности паузы $\Delta\tau > (\Delta\tau)_1$ из цуга генерации начинают последовательно исчезать вторые, третьи и т.д. импульсы. Наконец, возникает ситуация, когда исчезают все N импульсов цугов и генерация лазерного излучения прекращается. Однако в этой ситуации всегда можно подобрать такое количество импульсов в цуге – $N_{\min} > N$, при котором стабильная генерация будет снова иметь место.

Проведенные исследования показали [23], что зависимость $N_{\min} = N_{\min}(\Delta\tau)$ является монотонно возрастающей вплоть до значений $\Delta\tau \equiv (\Delta\tau)_m \approx 180$ с. Для всех $\Delta\tau > (\Delta\tau)_m$ (по крайней мере, для $\Delta\tau \leq 900$ с, поскольку более длительные паузы мы не исследовали) выполняется $N_{\min}[\Delta\tau \geq (\Delta\tau)_m] \approx \text{const} \approx 4000$, т.е. обсуждаемая зависимость выходит на насыщение.

Определенные выше величины: $(\Delta\tau)_0$, $(\Delta\tau)_1$, $(\Delta\tau)_m$ и $N_{\min} = N_{\min}(\Delta\tau)$ являются важнейшими характеристиками цугового режима генерации CuBr-АТ-лазеров, которые необходимо знать и принимать во внимание, планируя практическое использование лазера. В связи с этим выяснение зависимостей этих величин от различных условий возбуждения является еще одной нашей первоочередной задачей. Отметим, что мы ничего не говорили об оперативном управлении амплитудами импульсов цуга. Принципиальных ограничений в плане реализации такой возможности мы пока не обнаружили, но техническая сторона этого

вопроса выглядит весьма сложной и мы к этой проблеме вплотную еще не приступали.

Поскольку $N_{\min}[\Delta\tau \geq (\Delta\tau)_m] \approx \text{const}$, то логично предположить, что за время $\Delta\tau \approx (\Delta\tau)_m$ все атомы металла и галогена, имеющиеся в активном объеме, успевают объединиться в молекулы ГМ и лазерная среда переходит в некое стационарное «нерабочее» состояние. В этой связи будет правильным говорить, что величина $(\Delta\tau)_m$ определяет условную границу между собственно цуговым режимом и так называемым ждущим режимом, в котором лазер может находиться, по нашим сегодняшним представлениям, неограниченно долго. В таком случае получается, что величина $t_{\min} = N_{\min}/F$, где F — это ЧСИ, определяет минимальное время выхода из ждущего режима.

Наличие ждущего режима мы считаем весьма существенным преимуществом CuBr-AT-лазеров. Если не касаться таких субъективных моментов, как увеличение комфорта работы с лазером, то необходимо в первую очередь отметить очевидное увеличение эффективного рабочего ресурса и АЭ, и ИП, которое появляется за счет сокращения непроизводительной эксплуатации лазера. Последняя всегда имеет место при разогреве лазера и, как правило, возникает в процессе эксплуатации, особенно при использовании лазеров в научных исследованиях. Ждущий режим работы CuBr-AT-лазеров, безусловно, имеет определенные особенности, частично рассмотренные в [21, 23]. В целом же эти вопросы еще находятся в стадии исследований, которые, на наш взгляд, весьма далеки от завершения.

3. Лабораторные макеты CuBr-AT-лазеров

При разработке приборных вариантов CuBr-AT-лазеров мы используем два основных варианта конструкции: моноблок и лазер, у которого АЭ и ИП выполнены в виде отдельных независимых блоков. Внешний вид CuBr-AT-10 (моноблок) и CuBr-AT-15 (с отдельным ИП) показан на рис. 5.

Основные технические характеристики имеющихся у нас на сегодняшний день лазеров приведены ниже.

Тип АЭ	отпаянный
Объем активной зоны, дм^3	0,2–4
Состав рабочей смеси	CuBr + Ne + HBr
Длина волны, нм	510,6; 578,2
Средняя мощность, Вт	1–18
Диаметр пучка, мм	10–30
Частота повторения импульсов, кГц	2–30
Длительность импульса, нс	20–40
Время выхода на режим, мин	15–25
Режим работы	цуговый, ждущий
Управление параметрами цугов	от компьютера
Время выхода из ждущего режима, с	< 0,2
Охлаждение	воздушное
Максимальные габариты, мм	1800×400×300
Максимальная масса, кг	70

Как уже отмечалось во введении, упрощение отдельных узлов лазеров, в том числе и с целью сни-

жения их стоимости, следует считать одним из основных направлений деятельности специалистов, имеющих дело с ЛПМ. В этом плане предлагаемая нами конструкция лазеров с АТ, позволяющая получать генерацию при сравнительно низких энергозатратах в разряд, представляется весьма выигрышной. Отметим три разработки, которые в настоящее время проходят лабораторные испытания и которые своим появлением обязаны АТ-конструкции АЭ.

3.1. CuBr-AT-лазеры, возбуждаемые емкостным (С) разрядом

Сам по себе емкостной разряд в лазерной физике — процесс хорошо известный. Однако генерацию на самоограниченных переходах при таком способе возбуждении впервые удалось получить в ИОА СО РАН именно благодаря использованию АТ. Результаты исследований этого нового способа накачки ЛПМ опубликованы в [24–26]. Для нас самым существенным в этом вопросе является возможность существенно упростить конструкцию АЭ, отказавшись от внутренних, вваренных в ГРТ электродов. Роль последних в CuBr-AT-C-лазерах выполняют полосы металлической фольги, обернутые снаружи вокруг ГРТ с обеих сторон от активной зоны.

Интересно отметить, что эти электроды выполняют одновременно и роль рабочей емкости, так что величина энергозатрат в разряд становится непосредственно зависящей от геометрических размеров электродов. Полученные на сегодняшний день уровни средней мощности > 3 Вт при кпд от энергозатрат ~0,5% (что, безусловно, не является пределом) позволяют нам высоко оценивать конкурентоспособность CuBr-AT-C-лазеров, по крайней мере в тех случаях, когда высокая выходная мощностью генерации не требуется.

3.2. Лазеры с внутренним реактором (R) галогенидов металлов

Отличительная особенность CuBr-AT-R-лазеров (будем пока для определенности говорить о бромиде меди) состоит в том, что исходным рабочим веществом здесь является не бромид меди, расположенный в контейнерах (см. рис. 1), а чистая медь и чистый бром. Медь располагается в активном канале, а бром — в генераторе брома, который имеет точно такую же конструкцию, что и разработанный нами генератор HBr. С помощью АТ активный объем нагревается до рабочей температуры (как и у CuBr-лазера ~700 °С). Затем включается генератор Br, и в рабочем объеме устанавливается (и поддерживается) требуемое давление паров брома. В результате реакции брома с медью образуются молекулы CuBr, после чего лазер перестает отличаться от обычного CuBr-лазера. По своему принципу действия CuBr-AT-R-лазеры очень похожи на так называемые гибридные лазеры на парах меди [13]. Однако в отличие от последних (которые являются принципиально прокачными) внутренний реактор позволяет создавать отпаянные АЭ. CuBr-AT-R-лазеры интересны для нас в двух аспектах.



a



б

Рис. 5. Внешний вид CuVr-AT-10 (моноблок) (*a*) и CuVr-AT-15 (с отдельным ИП) (*б*)



Рис. 6. Возможности прецизионной резки тонколистовых объемных изделий сложной формы на примере изготовленного кардиоваскулярного протеза (стента)

Во-первых, рассмотренная идея позволяет существенно упростить конструкцию АЭ, исключив из нее контейнеры с CuBr и их нагревательные элементы. Особенно простая конструкция (и соответственно низкая стоимость) получается в том случае, когда CuBr-АТ-R-лазеры работают с возбуждением от емкостного разряда. Первые испытания такой конструкции позволили получить мощность генерации ~500 мВт, что, на наш взгляд, является весьма обнадеживающим результатом. Во-вторых, использование внутреннего реактора должно позволить получить генерацию в таких солях, которые готовить заранее не представляется возможным. Типичный пример – галогениды золота. Конструкция ЛПГМ-АТ-R в настоящее время патентуется.

3.3. CuBr-АТ-лазеры с транзисторным (Т) ИП

Как уже отмечалось выше, наиболее уязвимым элементом современных ЛПМ (в плане надежности и рабочего ресурса) являются мощные коммутаторы. Отметим, что для наших CuBr-АТ-лазеров тиратроны ТГИ-1-1000/25 – наиболее подходящий тип коммутаторов – на сегодняшний день являются еще и самым дорогостоящим узлом лазера, даже по сравнению с АЭ в сборе (ГРТ со всеми нагревательными элементами и следящей системой). В связи с этим наш повышенный интерес к разработкам транзисторных (без тиратронов) ИП становится совершенно понятным. Однако до последнего времени все наши попытки получить в этом направлении практически значимые уровни выходной мощности к успеху не приводили. Это было связано с тем, что известные и доступные нам транзисторы ограничивают вкладываемую в разряд мощность на уровне ~0,8 кВт. Для саморазогревных лазеров этого было явно не достаточно, а вот для АЭ с АТ такая мощность накачки (см. рис. 3) оказывается вполне рабочей. В результате на сегодняшний день идет монтаж приборного варианта CuBr-АТ-Т-лазера с выходной мощностью ~3 Вт и готовится более мощный ИП, с которым мы рассчитываем увеличить мощность до ~5 Вт.

Очень высокую конкурентоспособность CuBr-АТ-Т-лазеров мы, в первую очередь, связываем с низкой стоимостью ИП и его практически неограниченным ресурсом. Кроме того, в настоящее время исследуется уникальная возможность перевода CuBr-АТ-Т-лазера в управляемый цуговой режим без уменьшения амплитуд первых импульсов цуга (см. разд. 2).

4. Области применений CuBr-АТ-лазеров

Уникальная совокупность параметров излучения лазеров на парах меди создает предпосылки для эффективного использования данных источников излучения при решении достаточно широкого круга

как чисто научных, так и прикладных задач. Эти вопросы подробно рассмотрены в монографиях, перечисленных в списке использованной в данной статье литературы. Однако, на наш взгляд, наиболее перспективным направлением для использования Cu- и CuBr-лазеров является на сегодняшний день обширная область производственных задач, объединенных под общим названием «лазерная обработка материалов», причем в той ее наиболее бурно развивающейся части [10], которая называется «лазерная прецизионная обработка» или «лазерная микрообработка». Поясним, что под термином «обработка» понимается целый ряд технологических процессов, связанных с резкой, сверлением, скрайбированием, маркировкой, гравировкой и т.д.

Мы считаем, что именно процессы, связанные с микрообработкой, определяют ту «нишу», где достоинства «медных» лазеров выражаются наиболее ярко и где они имеют реальные конкурентные преимущества по сравнению с YAG:Nd-, эксимерными и волоконными лазерами, с помощью, главным образом, которых и осуществляется сегодня прецизионная обработка. Для микрообработки, как правило, не требуются очень мощные (> 50 Вт) лазеры, но управляемый цуговой режим является совершенно обязательным условием, обеспечивающим высокое качество обработки. Понятно, что для нас это очень важно, поскольку из этого следует, что преимущества CuBr-АТ-лазеров, о которых мы говорили выше, приобретают практическое значение.

Среди возможных приложений, связанных с прецизионной обработкой, особое место занимают биомедицинские микроэлектромеханические системы (MEMS): стенты, катетеры, зонды, аэрозольные распылители, системы микрогидродинамических датчиков (Microfluidic Systems). Суммарный объем рынка данных систем в 2005 г. превысил 14 млрд евро. Именно на этом направлении мы и пытаемся сконцентрировать свою инновационную деятельность.

Для отработки технологии лазерного раскрытия тонколистового металла был разработан и смонтирован лабораторный макет лазерной технологической установки, включающей в себя систему «генератор–усилитель» на базе двух CuBr-АТ-лазеров и двухкоординатный прецизионный привод, управляемый от компьютера. Не имея возможности останавливаться в деталях на полученных нами результатах, приведем пример 3D-обработки трубки из нержавеющей стали (рис. 6).

Заключение

Сформулируем основные результаты, изложенные в данной статье.

1. Предложен вариант технической реализации идеи создания ЛПМ с независимым нагревом АЭ – CuBr-АТ-лазер.

2. Экспериментально продемонстрированы основные преимущества CuBr-АТ-лазеров по сравнению с саморазогревными ЛПМ.

3. Представлены лабораторные макеты CuBr-АТ-лазеров, работающих в управляемом цуговом режиме

с выходной мощностью до 18 Вт, — прототипы будущих «коммерческих» приборов.

4. Представлены три новые разработки ЛПГМ, в основе которых лежит АТ-конструкция АЭ.

5. Продемонстрирована перспективность использования CuBr-АТ-лазеров в задачах, связанных с прецизионной обработкой металлов.

Несмотря на то, что мы уже пытаемся использовать свою разработку в инновационных целях, исследования, связанные с CuBr-АТ-лазерами, находятся еще на самой первой стадии. На сегодняшний день остается очень много вопросов, касающихся понимания как физических процессов, определяющих отличительные особенности CuBr-АТ-лазеров, так и технических решений, которые предстоит найти для более полной реализации преимуществ данных лазеров. Часть задач, которые мы относим к разряду первостепенных, сформулирована по ходу изложения, другая часть планируемых нами исследований осталась неозвученной. Среди последних наиболее важной задачей, на наш взгляд, является модификация разрядного контура ИП. Мы до сих пор используем так называемую прямую схему разряда рабочей емкости (см. разд. 1.1). При всей своей простоте и надежности эта схема, по имеющимся у нас сведениям, в разы снижает эффективность ЛПМ вообще и CuBr-лазеров в частности. Именно в этом мы видим реальный резерв очень существенного повышения «качества» наших приборов.

1. Солдатов А.Н., Соломонов В.И. Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов. Новосибирск: Наука, 1985. 151 с.
2. Бохан П.А. Лазеры на парах металлов со столкновительным девозбуждением нижних рабочих состояний: Докт. дис. Томск: ИОА СО АН СССР, 1988. 418 с.
3. Евтушенко Г.С. Лазеры на парах металлов и устройства на их основе для решения задач оптики атмосферы и других применений: Докт. дис. Томск: ИОА СО РАН, 1994. 305 с.
4. Клишкин В.М. Газоразрядные процессы в импульсных лазерах на парах металлов: Докт. дис. Томск: ИОА СО РАН, 2003. 305 с.
5. Батенин В.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Климовский И.И., Молодых Э.И. Лазеры на самоограниченных переходах. М.: Науч. книга, 1998. 544 с.
6. Елаев В.Ф., Лях Г.Д., Пеленков В.П. CuBr-лазер со средней мощностью генерации свыше 100 Вт // Оптика атмосфер. 1989. Т. 2. № 11. С. 1228–1229.
7. Евтушенко Г.С., Петраш Г.Г., Суханов В.Б., Федоров В.Ф. CuBr-лазер с частотой повторения импульсов до 300 кГц // Квант. электрон. 1999. Т. 28. № 3. С. 220–222.
8. 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. ТПУ. 2008. Т. 312. № 2. С. 106–107.
9. Григорьянц А.Г., Казарян М.А., Лябин Н.А. Лазеры на парах меди. Конструкция, характеристики и применения. М.: Физматлит, 2005. 312 с.
10. Кинкэйд К., Андерсон С.Дж. Лазерный рынок в 2006 г. Обзор и прогноз. Часть 1. Недиодные лазеры // Лазер-Информ. 2007. № 5 (356). С. 1–9.
11. Суханов В.Б., Троицкий В.О., Губарев Ф.А., Иванов А.И. Активный элемент лазера на парах галогенида металла: Пат. РФ на полезную модель № 62742. Патентообладатель: ИОА СО РАН.
12. Andrienko O.S., Dimaki V.A., Kolbychev G.V., Sukhanov V.B., Troitskii V.O. Low-power copper bromide laser // Atmos. and Ocean. Opt. 2004. V. 17. N 11. P. 786–790.
13. Little C.E. Metal Vapor Lasers: Physics, Engineering & Applications. Chichester (UK): John Wiley & Sons Ltd., 1998. 620 p.
14. Evtushenko G.S., Shiyarov D.V., Zhdaneev O.V., Sukhanov V.B. Influence of H₂ and HBr-additives on Cu and CuBr vapor lasers performance // Proc. SPIE. 2005. V. 5777. P. 511–518.
15. Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С., Суханов В.Б., Бочков В.Д., Кудинов В.Н. Экспериментальное исследование влияния добавок водорода на частотные характеристики CuBr-лазера // Изв. ТПУ. 2004. Т. 307. № 3. С. 74–77.
16. Андриенко О.С., Суханов В.Б., Троицкий В.О., Шестаков Д.Ю., Шиянов Д.В. Способ поддержания и регулирования концентрации галогеноводорода в газоразрядной трубке лазера и газоразрядная трубка лазера на парах галогенидов металлов: Пат. № 2295811. Патентообладатель: ИОА СО РАН.
17. Шиянов Д.В., Суханов В.Б., Евтушенко Г.С., Андриенко О.С. Экспериментальное исследование влияния добавок HBr на генерационные характеристики CuBr-лазера // Квант. электрон. 2004. Т. 34. № 7. С. 625–629.
18. Andrienko O.S., Dimaki V.A., Evtushenko G.S., Sukhanov V.B., Troitskii V.O., Shiyarov D.V. Metal and metal halide vapor lasers: new opportunities // Opt. Eng. 2005. V. 44. N 7. P. 071204-1–071204-5.
19. Евтушенко Г.С., Суханов В.Б., Чернышев А.И., Шиянов Д.В. Активный элемент лазера на парах галогенида металла: Пат. № 2243619. Патентообладатель: ИОА СО РАН.
20. Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С., Суханов В.Б. Влияние масштабирования вводимой мощности на характеристики CuBr + Ne- и CuBr + Ne + H₂-лазеров // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19. № 2–3. С. 221–223.
21. 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.
22. Губарев Ф.А., Суханов В.Б., Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С. Исследование энергетических характеристик лазера на парах бромида меди с пониженным энерговыделением в разряд // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21. № 1. С. 85–93.
23. Димаки В.А., Суханов В.Б., Троицкий В.О., Филонов А.Г. Экспериментальное исследование цугового и ждущего режимов работы лазера на парах бромида меди // Изв. ТПУ. 2009. Т. 314. № 4. С. 111–114.
24. 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.
25. Gubarev F.A., Sukhanov V.B., Evtushenko G.S., Fedorov V.F., Shiyarov D.V. CuBr Laser Excited by a Capacitively Coupled Longitudinal Discharge // IEEE J. Quantum Electron. 2009. V. 45. N 2. P. 171–177.
26. Губарев Ф.А., Федоров В.Ф., Евтушенко Г.С., Суханов В.Б. Энергетические характеристики CuBr-лазера с емкостной накачкой при использовании схемы на основе лампового коммутатора // Изв. ТПУ. 2009. Т. 314. № 4. С. 106–110.

O.S. Andrienko, F.A. Gubarev, V.A. Dimaki, A.I. Ivanov, M.E. Levitsky, V.B. Sukhanov, V.O. Troitsky, V.F. Fedorov, A.G. Filonov, D.V. Shiyanov. **New generation of CuBr lasers.**

A new type of metal vapor lasers (MVL) is suggested, i.e., sealed metal halide vapor lasers with an active heat insulator (AHI), which is an independent heating element, providing for the temperature of the external working volume wall to be maintained at a required level at any excitation energy input into a discharge. The presence of the AHI allows us to consider the suggested lasers as an alternative to common self-heating MVLs. The block-diagram of the CuBr AHI laser illustrates the principal distinctive features of the design. Function advantages of lasers appeared due to the use of the AHI are discussed: the increasing heat input efficiency and the workability in train and waiting modes. The main application results are broadboard CuBr AHI lasers. An important advantage of AHI is the possibility of laser generation at a pumping power, which is lower in comparison with the self-heating design. As a result, we succeeded to obtain for the first time the generation at self-restricted transitions in metal vapors while exciting the capacitive discharge, to work out an original design of a sealed CuBr AHI laser with an internal metal halide reactor, and to obtain a significant power level, using a transistor power supply. The use of the CuBr AHI laser in precision metalworking is described. We consider this direction as the most promising in our innovative activity.