

О.С. Андриенко, В.А. Димаки, Г.В. Колбычев, В.Б. Суханов, В.О. Троицкий

## Лазер на парах бромида меди малой мощности

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 23.09.2004 г.

Сообщается о выполненной в ИОА СО РАН разработке лазера на парах бромида меди с выходной средней мощностью 1,5 Вт. Предполагается, что данная модель будет использована в качестве базового образца для организации мелкосерийного производства лазеров указанного типа. Обсуждаются особенности конструкции активного элемента и источника питания лазера. Приводятся: блок-схема лазера, его внешний вид, основные технические и эксплуатационные параметры.

### Введение

В настоящее время среди различных модификаций лазеров на парах меди наибольший практический интерес представляют лазеры на парах чистой меди (ЛПМ) и лазеры на парах бромида меди (ЛПБМ), которые могут работать в отпаянном режиме. Однако если коммерческие ЛПМ выпускаются достаточно большим числом компаний и в нашей стране, и за рубежом, то, по имеющимся у нас сведениям, мелкосерийное производство ЛПБМ освоено только в Болгарии (фирма «Pulse Light»). Такое положение нельзя считать правильным, поскольку ЛПБМ, в чем-то, безусловно, проигрывая ЛПМ, имеют и ряд достаточно важных преимуществ. В частности, ЛПБМ работают при более высоких оптимальных частотах повторения импульсов и соответственно при прочих равных условиях имеют более высокие кпд. При этом, что очень важно в плане рыночной конкуренции, себестоимость активных элементов ЛПБМ оказывается в два-три раза ниже, чем у ЛПМ аналогичной мощности.

В настоящей статье сообщается о выполненной в ИОА СО РАН разработке ЛПБМ малой мощности, который может быть использован в качестве базовой модели для мелкосерийного производства таких лазеров. Внешний вид лазера показан на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид лазера

### Основные технические характеристики

Длина волны генерации, нм	510,6; 578,2
Режим работы	импульсно-периодический
Частота повторения импульсов, кГц	~30
Средняя мощность генерации на обеих линиях, Вт	
рабочая	1,5–2
при отключенном генераторе НВг	0,5–0,7
Потребляемая мощность, кВт	1,1
Расходимость излучения с п/п резонатором, мрад	5
Диаметр пучка, мм	15
Ожидаемый ресурс работы, ч	> 1000
Охлаждение	воздушное
Габаритные размеры, см	40×25×100
Масса, кг	~30

Блок-схема лазера представлена на рис. 2.

### 1. Конструкция активного элемента

Разработанные у нас активные элементы (АЭ) имеют две отличительные особенности: они являются полностью саморазогреваемыми [1] и имеют встроенный генератор бромистого водорода (НВг). Остановимся на этих моментах более подробно.

Под термином «саморазогреваемой» следует понимать то, что для создания рабочей концентрации паров металла используется энергия разряда, зажигаемого в буферном газе (для лазеров на парах меди чаще всего используется неон). Другой вариант доведения металла до температуры плавления связан с использованием внешних (независимых от разряда) источников нагрева активной зоны газоразрядной трубки. В частности, по этому принципу были устроены первые ЛПМ, а что касается ЛПБМ, то такая конструкция и в настоящее время является наиболее распространенной. По-видимому, оба указанных способа получения паров металла имеют и свои достоинства, и свои недостатки. Мы не собираемся детально анализировать эти вопросы, а отметим лишь те основные моменты, которые побудили нас при конструировании ЛПБМ отказаться от внешних источников нагрева.

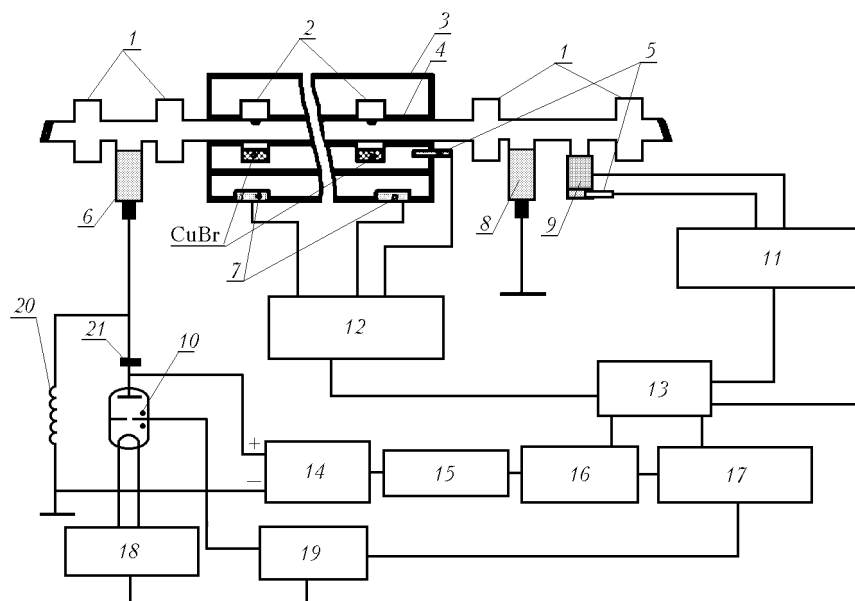


Рис. 2. Блок-схема лазера: 1 – ловушка; 2 – контейнеры с CuBr; 3 – тепловая камера; 4 – теплоизолятор; 5 – термопара; 6 – катод; 7 – вентилятор; 8 – анод; 9 – генератор HBr; 10 – тиратрон; 11 – регулятор давления HBr; 12 – регулятор температуры камеры; 13 – регулируемый выпрямитель; 14 – высоковольтный выпрямитель; 15 – трансформатор; 16 – полумостовая схема; 17 – система управления и защиты; 18 – стабилизатор накала и водорода тиратрона; 19 – схема запуска тиратрона; 20 – зарядная индуктивность; 21 – рабочая емкость

*Первое* – это соображения рациональности и целесообразности. Действительно, имея естественным образом полученную «печь» мощностью несколько киловатт, кажется очень нелогичным усложнять конструкцию лазера, вводя в нее дополнительные нагреватели мощностью на порядок меньше.

*Второе.* Поскольку технически очень сложно сделать контейнеры с CuBr (2 на рис. 2) абсолютно изолированными от тепла, выделяемого в разряде, то процесс парообразования оказывается связанным с двумя источниками нагрева. Это означает, что любое (сознательное или случайное) варьирование энергии, вкладываемой в разряд, обязательно отразится и на температуре контейнеров. В результате мощность лазерной генерации может измениться весьма заметно, что потребует соответственного изменения температуры внешнего нагревателя. И наоборот, уменьшение или увеличение температуры контейнеров немедленно приведет к изменению проводимости активного канала и, как следствие, к нарушению установленного теплового режима.

Наиболее неприятным результатом такой взаимной зависимости может оказаться перегрев контейнеров с CuBr – появление в активном объеме лазера большого количества CuBr сказывается резко отрицательно на величине рабочего ресурса АЭ. А поскольку незапланированные колебания энерговыклада – явление достаточно распространенное, то обслуживание лазера во время его эксплуатации требует непрерывного внимания персонала, который, кроме того, должен иметь и соответствующую, достаточно высокую, подготовку. Указанная проблема снимается, если все питающие напряжения будут стабилизированными. Для лазеров с малой мощностью обеспечить это условие вполне возможно, а вот при больших вкладываемых мощностях задача становится технически очень непростой.

И наконец, последнее. Внешние источники нагрева, по понятным причинам, располагаются в непосредственной близости от разрядного канала. При этом резко возрастает вероятность высоковольтного пробоя на токоведущие части нагревателя, в результате чего АЭ может полностью выйти из строя. Указанный механизм становится тем более существенным, чем больше мощность ЛПБМ, т.е. чем более высокие напряжения прикладываются к АЭ. Обезопаситься от такого рода повреждений возможно, если все контейнеры с металлом поместить внутрь единого достаточно объемного кожуха, подогреваемого снаружи. Приблизительно такую конструкцию используют разработчики уже упоминавшейся фирмы «Pulse Light». Понятно, что при этом проблема снимается за счет усложнения и удорожания конструкции.

Заканчивая обсуждение способов создания рабочей концентрации паров металла в активном объеме ЛПБМ, необходимо отметить следующее. Все перечисленные выше проблемы не являются умозрительными или надуманными. Со всем этим мы постоянно сталкивались на практике, когда использовали ЛПБМ с внешними нагревателями. Поэтому переход к саморазогревным конструкциям АЭ является, с нашей точки зрения, совершенно естественным и практически необходимым этапом разработки коммерческих ЛПБМ.

Теперь несколько слов о второй особенности конструкции наших АЭ – встроенный генератор бромистого водорода (HBr) (9 на рис. 2)

Давно известно [2], что малые добавки электроотрицательных примесей (H<sub>2</sub>, HBr, HCl и т.д.) в активную среду приводят к очень заметному увеличению энергетических параметров (частота повторения импульсов, средняя мощность, КПД) лазеров

на парах металлов. Проблема, таким образом, сводилась к решению чисто технической задачи — как в отпаянном АЭ поддерживать оптимальную концентрацию примеси в течение всего рабочего ресурса лазера. Дело в том, что в наших первых экспериментах, исследуя генерационные характеристики ЛПБМ с добавками водорода, мы обнаружили следующий эффект. Разовая оптимальная добавка водорода (из внешнего резервуара) повышает энергетические параметры лазера на весьма ограниченный период времени — несколько десятков часов. По истечении этого периода КПД и выходная мощность лазера начинают падать, возвращаясь к своим первоначальным (без водорода) значениям. Таким образом, мы пришли к выводу о том, что конструкция отпаянного АЭ должна включать в себя регулируемый генератор водорода.

Однако реализовать эту идею на практике не удалось. Опробованные нами генераторы водорода СРНВ-1 и СРНВ-2 [3], которые, по определению, являются реверсивными, не смогли обеспечить откачку водорода из активного объема лазера (что по понятным причинам является совершенно необходимым условием для нормальной работы с лазером). В то же время в тестовых экспериментах реверсивный режим работы натекаателей водорода полностью соответствовал паспортным значениям. Эти результаты мы для себя объяснили тем, что в активном объеме ЛПБМ водород в свободном состоянии находиться не может, и, следовательно, для наших целей эта примесь оказывается малоподходящей.

Задачу удалось решить после того, как нами был предложен, разработан и изготовлен генератор бромистого водорода, работающий приблизительно по тому же принципу, что и СРНВ. При нагревании генератора из него выделяется НВг и в объеме АЭ устанавливается равновесная концентрация бромистого водорода, величина которой прямо связана с температурой нагрева. При охлаждении начинается обратный процесс — всасывание НВг. Исследования ЛПБМ с встроенными генераторами НВг позволили сделать два принципиально важных для нас вывода.

Во-первых, в плане улучшения энергетических параметров ЛПБМ добавки водорода и бромистого водорода оказываются совершенно идентичными [4].

Во-вторых, оба режима генератора НВг (прямой и обратный) можно использовать при любых температурах АЭ — от комнатной до рабочей.

Таким образом, задача поддержания в АЭ оптимальной концентрации электроотрицательной добавки оказалось полностью решенной.

Следует отметить еще одну очень полезную функцию, которую в нашей конструкции АЭ выполняет генератор НВг. В режиме откачки из активного объема лазера удаляются не только излишек НВг, но и, по-видимому, какие-то вредные продукты наработки. Косвенным подтверждением сказанному служит тот факт, что отслужившие свой срок АЭ после нескольких циклов очистки начинали работать на тех же уровнях выходной мощности, что и непосредственно после их изготовления. Это позволяет нам рассчитывать на то, что рабочий ресурс АЭ, снабженных генераторами НВг, будет заметно больше.

Для реализации саморазогревного режима рабочая зона АЭ помещается в тепловую камеру 3 (см. рис. 2), которая представляет собой металлический негерметичный кожух, в нашем случае имеющий прямоугольную форму. Нагрев камеры осуществляется за счет тепла, выделяемого разрядом, а охлаждение — за счет продувки камеры вентиляторами 7, расположенными на днище кожуха. Температура контролируется термопарой и автоматически поддерживается на выбранном уровне с помощью регулятора температуры 12. Зависимость выходной средней мощности лазера (с отключенным генератором НВг) от температуры в тепловой камере показана на рис. 3.

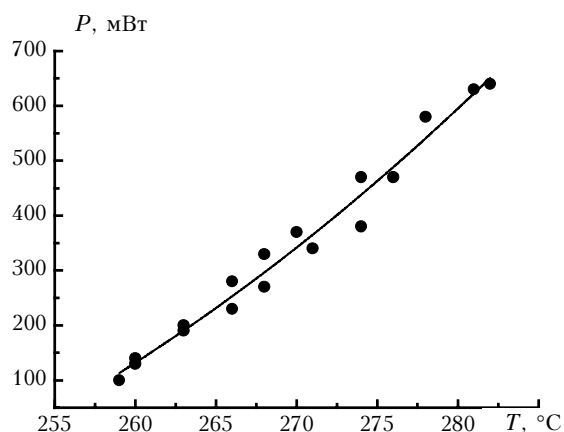


Рис. 3. Выходная средняя мощность лазера (при отключенном генераторе НВг) в зависимости от температуры в тепловой камере

Тепловая камера может работать в режиме принудительного продува (вентиляторы работают непрерывно), включение которого пока осуществляется оператором. Приблизительно за 3 мин такого принудительного продува температура контейнеров с  $\text{CuVg}$  уменьшается настолько, что лазерная генерация прекращается полностью. По нашим предположениям, использование этой операции непосредственно перед выключением лазера является весьма важным моментом. В этом режиме, за счет эффективного охлаждения контейнеров, концентрация молекул  $\text{CuVg}$  в активной зоне оказывается ниже, чем концентрация этих молекул, вынесенных в приэлектродные области в процессе работы лазера. В результате этого установление равновесной концентрации сопровождается теперь переносом рабочих молекул обратно в активную зону. Таким образом осуществляется очистка электродов, т.е. уменьшается влияние одного из основных механизмов, ответственного за «старение» АЭ.

Генератор НВг 9 представляет собой отдельный контейнер, встроенный в АЭ и помещенный в нагревательный элемент. Температура нагревателя контролируется термопарой и автоматически поддерживается на выбранном уровне с помощью регулятора температуры 11. Уровень рабочей температуры генератора подбирается экспериментально по максимуму выходной средней мощности лазера.

## 2. Блок питания лазера

Переходим теперь к описанию источника питания ЛПБМ, блок-схема которого также показана на рис. 2. При разработке последнего мы ставили перед собой две основные задачи: сделать источник питания по возможности более компактным и максимально облегчить условия работы тиратрона — важная и наиболее ненадежная часть практически любого источника питания для лазеров на парах металлов. Для решения первой задачи блок питания было предложено собрать по полумостовой схеме и разместить его в одном общем корпусе с АЭ. Для более надежной работы тиратрона был выбран режим импульсной зарядки рабочей емкости.

В общих чертах принцип работы источника питания выглядит следующим образом. Сетевое напряжение, выпрямленное в блоке 13 (максимальное значение 250 В), подается на полумостовой преобразователь 16. Нагрузкой разнополярных импульсов полумоста служит первичная обмотка высоковольтного импульсного трансформатора 15 (коэффициент трансформации равен 40). Высоковольтные импульсы, наведенные во вторичной обмотке трансформатора, после высоковольтного выпрямителя 14 приобретают одинаковую полярность и через индуктивность 20 заряжают рабочую емкость 21 максимум до 10 кВ. В нужный момент на сетку тиратрона от блока управления тиратроном 19 подается импульс запуска. Тиратрон отпирается, и рабочая емкость разряжается через тиратрон и АЭ. Блок питания лазера не имеет стабилизатора сетевого напряжения, поэтому изменения последнего будут, в конечном итоге, автоматически отражаться на величине выходной средней мощности лазера. Такая зависимость представлена на рис. 4.

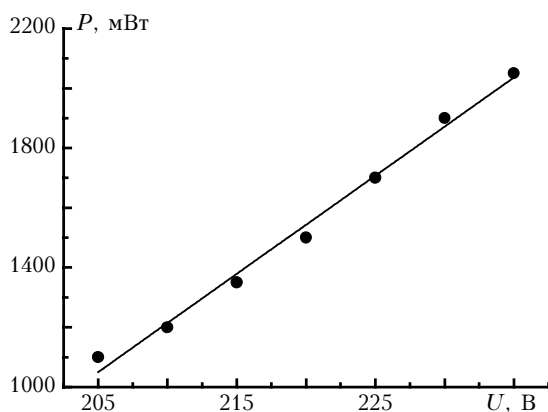


Рис. 4. Выходная средняя мощность лазера (при оптимальной концентрации HBr) в зависимости от величины сетевого напряжения

Полумостовая схема 16 собрана на мощных полевых транзисторах, режимом работы которых управляет микроконтроллер, расположенный в блоке управления 17. Отличие использованной нами полумостовой схемы от классической состоит в следующем. Во-первых, рабочие емкости в процессе рабочего цикла перезаряжаются от нуля до максимального значения. Во-вторых, для уменьшения мощности,

рассеиваемой на транзисторах, включение и выключение последних осуществляются в те моменты времени, когда прямой ток через транзистор прекращается. Это достигается подбором значений рабочих емкостей полумоста и индуктивности дросселя, который ставится последовательно с первичной обмоткой высоковольтного трансформатора.

Рабочий цикл полумоста выглядит следующим образом (рис. 5). Сначала открывается один из транзисторов, и через первичную обмотку трансформатора 15 протекает импульс тока длительностью ~20 мкс. При этом рабочая емкость 21 заряжается до максимального напряжения. Затем транзистор закрывается, а через 5 мкс на сетку тиратрона от блока 19 подается импульс запуска и происходит разряд конденсатора 21 через АЭ. После этого следует пауза длительностью 11 мкс, открывается другой транзистор и все повторяется с точностью до полярности импульса тока через транзистор и первичную обмотку 15. Таким образом, длительность одного рабочего цикла составляет 36 мкс, а частота повторения импульсов лазера оказывается равной ~27,7 кГц. Во время упомянутой выше паузы анод тиратрона находится под нулевым потенциалом, что обеспечивает эффективное протекание процессов деионизации в газовой среде тиратрона. Это обстоятельство и определяет основную практическую ценность выбранного нами режима импульсной зарядки рабочей емкости.

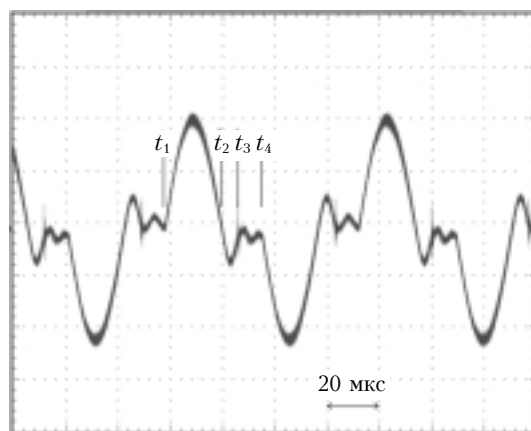


Рис. 5. Осциллограмма импульсов тока в первичной обмотке высоковольтного трансформатора. Момент времени  $t_1$  — открывается первый транзистор полумоста;  $t_2$  — закрывается первый транзистор полумоста;  $t_3$  — открывается тиратрон;  $t_4$  — открывается второй транзистор полумоста

Изменение величины рабочего напряжения источника осуществляется с помощью регулируемого тиристорного выпрямителя 13. Регулировка постоянного напряжения в пределах от 0 до 250 В может осуществляться вручную или в автоматическом режиме. В последнем случае тиристорным выпрямителем управляет микроконтроллер, расположенный в блоке управления 17. Программа повышения рабочего напряжения построена таким образом, чтобы вывод лазера на рабочий режим осуществлялся поэтапно. При этом электрофизические параметры газоразрядного канала, зависящие от температуры АЭ,

изменяются плавно и весь источник питания в целом начинает работать устойчиво.

Высоковольтный трансформатор 15 намотан на два ферритовых кольца диаметром 125 мм и помещен в резервуар с маслом. Первичная обмотка трансформатора имеет 30 витков, а вторичная разделена на шесть последовательно соединенных секций по 200 витков каждая. Высоковольтный выпрямитель 14 собран по мостовой схеме на 60 высокочастотных диодах. В качестве коммутатора 10 в нашей разработке использован тиратрон ТГИ 500/16. Накалы катода и генератора водорода тиратрона (блок 18) независимы и стабилизированы. За счет этого тиратрон работает в оптимальном режиме при изменениях сетевого напряжения от 190 до 250 В.

В процессе работы лазера осуществляется постоянный контроль тока в первичной обмотке трансформатора 15 и тока, потребляемого источником от регулируемого выпрямителя 13. Величины этих токов с помощью компаратора сравниваются с заранее подобранными значениями. Если один или оба контролируемых тока превысят эти установленные значения, то система защиты, расположенная в блоке 17, прекращает подачу отпирающих импульсов на затворы полевых транзисторов и сбрасывает до нуля напряжение на тиристорном выпрямителе 13. После паузы длительностью 1 с напряжение на выходе 13 плавно за 3 с нарастает до максимального значения и возобновляется подача управляющих импульсов на затворы транзисторов.

Причинами срабатывания защиты могут быть преждевременный пробой тиратрона, нештатные процессы в непрямоточном АЭ, наводки на систему управления. Чтобы уменьшить влияние последних и обеспечить устойчивую работу источника питания в целом, были предприняты следующие меры. Микроконтроллер вместе со стабилизатором питания и оба терморегулятора помещены в металлические корпуса. Управляющие сигналы с микроконтроллера снимаются через оптроны. Блок управления тиратроном 18 имеет отдельный источник питания. В регулируемом выпрямителе 13 использован оптоэлектронный модуль. Таким образом, основные узлы источника питания оказываются гальванически развязанными друг от друга.

Управление лазером осуществляется с помощью четырех двухпозиционных переключателей, выведенных на заднюю панель корпуса лазера. Это — тумблеры включения и выключения сети, высокого напряжения и напряжения на нагревателе генератора НВг, а также тумблер переключения работы тепловой камеры с режима автоматического контроля температуры на режим принудительной продувки. Внутри корпуса лазера расположены еще пять подстроечных резисторов, позволяющих изменять величины: рабочего напряжения, температуры

срабатывания регуляторов тепловой камеры и генератора НВг, напряжения накалов катода и генератора водорода тиратрона.

Предполагается, что уже в следующих моделях вывод лазера на рабочий режим и его отключение будут осуществляться полностью автоматически. Последовательность всех необходимых для этого операций будет запрограммирована в дополнительном контроллере.

## Заключение

В качестве основного итога проделанной работы необходимо отметить следующее. В данном случае речь идет, по-видимому, о первой для России попытке разработать промышленный образец лазера на парах бромида меди. Как правило, в процессе изготовления нового прибора всегда возникают идеи, позволяющие улучшить уже утвержденную конструкцию. В этом плане наш случай не является исключением. Более того, процесс усовершенствования уже начался, и закончится он, вероятно, еще очень не скоро. Тем не менее мы рассчитываем на то, что уже сейчас, благодаря своим достаточно приемлемым техническим, эксплуатационным и экономическим параметрам, предлагаемая модель сможет создать конкуренцию традиционным типам лазеров, используемых при решении задач в сфере научных исследований, медицины, шоу-бизнеса. К настоящему моменту безусловным лидером на рынке лазеров малой мощности являются так называемые диодные лазеры, конкурировать с которыми — задача очень тяжелая. В связи с этим, отмечая самостоятельную практическую ценность разработанной нами модели, мы в большей степени склонны рассматривать ее как некую базовую. Под этим следует понимать то, что большая часть технических решений, найденных нами в ходе проделанной работы, будет использована и в разработках источников питания для уже имеющихся у нас АЭ-лазеров на парах бромида меди, рассчитанных на выходную среднюю мощность до 50 Вт.

1. Суханов В.Б., Евтушенко Г.С., Шиянов Д.В., Чернышев А.И. Саморазогревной CuBr-лазер // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13. № 11. С. 1053–1055.
2. Бохан П.А., Силантьев В.И., Соломонов В.И. О механизме ограничения частоты следования импульсов в лазере на парах меди // Квант. электрон. 1980. Т. 7. № 6. С. 1264–1269.
3. Бочков В.Д., Гошева-Маразова М., Климовский И.И. Излучатели лазеров на парах металлов, снабженные генератором водорода с большим сроком службы // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 11. С. 1027–1029.
4. Андриенко О.С., Евтушенко Г.С., Жданев О.В., Суханов В.Б., Шиянов Д.В. Влияние добавок НВг в активную среду лазеров на парах меди и галогенида меди // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17. № 2–3. С. 112–119.

*O.S. Andrienko, V.A. Dimaki, G.V. Kolbychev, V.B. Sukhanov, V.O. Troitskii. Low-power copper bromide laser.*

The paper reports the development of a copper bromide vapor laser with the mean output power of 1.5 W at the Institute of Atmospheric Optics SB RAS. It is assumed that this model will be used as a basic prototype for small-scale production of lasers of this type. The paper discusses peculiarities in designs of active elements and a laser power supply and presents as the laser block-diagram, external appearance, and basic engineering and operating parameters.