

УДК 535:371.623

## CuBr-лазер с накачкой трехкаскадным источником питания

Д.В. Шиянов, В.А. Димаки, М.В. Тригуб,  
В.О. Троицкий, П.И. Гембух\*

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

Поступила в редакцию 10.02.2021 г.

Исследована возможность повышения мощности излучения CuBr-лазера за счет увеличения энергии накачки. Для этого используется трехкаскадная система наносекундных генераторов, при последовательном включении которых происходит возбуждение активной среды лазера. Каждый источник обеспечивает мощность накачки до 2 кВт, а в качестве коммутатора используется тиратрон ТГИ1-1000/25. Источники накачки осуществляют импульсный заряд рабочей емкости, что обеспечивает стабильную работу всей системы. Использование такого источника питания для возбуждения газоразрядной трубки диаметром 5 см и длиной 90 см позволило получить мощность генерации более 40 Вт в модифицированной схеме с импульсным кабельным автотрансформатором и обострительным конденсатором. На основании проведенных испытаний источника делается заключение о том, что он может широко применяться для накачки мощных лазеров на парах металлов.

*Ключевые слова:* CuBr-лазер, энерговклад, импульсный кабельный автотрансформатор, обострительный конденсатор, длительность импульса возбуждения; CuBr laser, energy input, cable pulse autotransformer, peaking capacitor, excitation pulse duration.

### Введение

Диапазон генерации, реализованный в лазерах на парах металлов, перекрывает область спектра от ультрафиолетовой (УФ) до средней инфракрасной (ИК) [1]. Благодаря газовой рабочей среде эти лазеры обладают высокими коэффициентом усиления и спектральной яркостью, а также качеством излучения, близкими к дифракционному пределу. Это определяет их практическое применение в проекционных лазерных системах [2], в установках прецизионной микрообработки материалов [3], при разделении изотопов [4] и т.д.

Из этого класса лазеров наиболее эффективен лазер на парах меди (ЛПМ), который позволяет достигать мощности генерации свыше 600 Вт [5]. Однако в последнее время большее внимание приковано к лазеру на парах бромида меди (ЛПБМ). Его низкотемпературный режим работы по сравнению с ЛПМ позволяет значительно упростить и тем самым удешевить конструкцию всего прибора. На данный момент максимальный КПД такого лазера составляет 3% [6], а мощность излучения — 140 Вт [7] в газоразрядной трубке (ГРТ) с объемом активной зоны  $10000 \text{ см}^3$ . Следует отметить, что по эффективности ЛПБМ превосходит ЛПМ, но по средним и удельным генерационным харак-

теристикам значительно уступает ему. Поэтому актуальна задача повышения энергетических характеристик ЛПБМ.

В настоящее время эта задача решается в основном за счет увеличения рабочего объема лазера и мощности накачки с применением специальных схем возбуждения [8–12]. Коммутация больших мощностей ( $> 5 \text{ кВт}$ ) предполагает использование дорогостоящих коммутаторов и, следовательно, источников в целом. В [13] мы предложили способ многокаскадной накачки лазеров на парах металлов. Принцип работы такой системы заключается в поочередном включении трех источников питания при возбуждении ГРТ. В качестве источников питания применяются наносекундные генераторы накачки с мощностью до 2 кВт каждый, разработанные в нашей лаборатории [14–17]. Их работа стабильна, а срок службы достаточно велик. В качестве коммутатора в них выступает тиратрон ТГИ1-1000/25, поскольку на сегодняшний день он обладает наилучшим соотношением выходных параметров, КПД и стоимости и не требует водяного охлаждения. Особенность упомянутых источников питания — импульсный заряд рабочей емкости, что создает условия для стабильной работы коммутатора. Использование одного такого источника для накачки ГРТ диаметром 5 см и длиной 90 см ( $V = 1766 \text{ см}^3$ ) в модифицированной схеме с импульсным кабельным автотрансформатором (ИКТ) позволило нам в [18] получить мощность генерации 21 Вт.

В настоящей работе мы поставили задачу исследовать возможность повышения мощности излу-

\* Дмитрий Валерьевич Шиянов (shyanov73@mail.ru); Виктор Анатольевич Димаки (qel@asd.iao.ru); Максим Викторович Тригуб (trigub@iao.ru); Владимир Олегович Троицкий (qel@iao.ru); Павел Ильич Гембух (qel@iao.ru).

чения ЛПБМ за счет увеличения энергии, вкладываемой в разряд путем использования описанного трехкаскадного источника питания [13]. Кроме того необходимо изучить работу такой системы в различных модификациях схемы возбуждения по аналогии с работой [18].

## Техника эксперимента

Активный элемент исследуемого лазера представлял собой конструкцию CuVg-АТ-лазера (с активным теплоизолятором) [19]. Это позволяло поддерживать температуру стенки ГРТ на любом требуемом уровне вне зависимости от энергии, вкладываемой в разряд, при изменении частоты следования импульсов (ЧСИ) или мощности накачки. Поскольку водородсодержащие добавки в активную среду [1, 20] способны в два раза увеличивать энергетические характеристики ЛПБМ, наша ГРТ была оснащена генератором НВг [21]. Для получения максимальных мощностей генерации все эксперименты были выполнены с добавкой НВг с давлением 0,35–0,4 торр. В качестве буферного газа использовался неон. Как отмечалось выше, диаметр ГРТ составлял 5 см, а длина 90 см. Для формирования излучения использовался плоскостепенный резонатор.

Схема экспериментальной установки подробно описана в [13]. Эксперименты по увеличению энергетичности ЛПБМ проводились для нескольких вариантов схем накачки: № 1 – прямая схема без обострительной емкости ( $C_{об}$ ) и без ИКТ; № 2 – прямая схема с  $C_{об}$  без ИКТ; № 3 – схема с ИКТ без  $C_{об}$ ; № 4 – схема с ИКТ и с  $C_{об}$ . Эти схемы приведены в [18].

Задача повышения энергетических характеристик ЛПБМ связана с оптимизацией параметров накачки. Она заключается в подборе оптимального давления буферного газа неона, оптимальной величины ЧСИ, емкостей рабочих ( $C_{раб}$ ) и обострительных конденсаторов, мощности накачки, при которых выходная мощность достигнет максимального значения. Рассуждая об условиях работы ЛПБМ, необходимо отметить, что область оптимальных ЧСИ для ГРТ с разными объемами активной зоны лежит в диапазоне 16–21 кГц [1, 6, 7]. Например, при работе на ЧСИ ~ 17 кГц последовательный запуск источников питания позволит запустить каждый из них с частотой ~ 5,5 кГц. Тем самым  $C_{раб}$  могут составлять более чем 2 нФ и эффективно заряжаться до рабочего напряжения за три и более ступени. Источник питания позволял заряжать  $C_{раб}$  до 12–15 кВ в зависимости от величины рабочей емкости, которая менялась в зависимости от условий эксперимента: 1,74; 1,94; 2,2; 2,76; 3,03 и 3,87 нФ на каждом источнике.

Электрические характеристики разряда измерялись с помощью датчика тока Person TM 8450 и датчика напряжения Tektronics P6015A. Для регистрации светового импульса использовался фотоэлемент ФК-19. Средняя мощность излучения фик-

сировалась измерителем Ophir 20C-SH. При этом излучение лазера фокусировалось в головку измерителя мощности с помощью кварцевой линзы. Для измерения мощностей, превышающих 10 Вт (определяется возможностями Ophir 20C-SH), в тракт излучения устанавливался ослабитель № 10. Импульсы тока, напряжения и генерации регистрировались осциллографом LeCroy Wave Jet 324. В нашей работе ИКТ был собран на трех ферритовых кольцах K100 × 60 × 15 марки 2000НМ, обмотка которого выполнена коаксиальным кабелем РК50, число витков – 4, коэффициент трансформации – 2.

## Результаты эксперимента

На первом этапе оптимизации работы CuVg-лазера была установлена область оптимального давления буферного газа неона и ЧСИ. Для приведенного набора рабочих емкостей и схем накачки максимальная мощность излучения достигалась при давлении Ne 20–25 торр, ЧСИ – 16,6 кГц. Следующие исследования показали, что существенную роль в повышении энергетических характеристик ЛПБМ играет обострительный конденсатор емкостью 0,22–0,34 нФ. Он позволяет немного увеличить напряжение на ГРТ, видоизменить импульсы накачки и повысить выходную мощность. Для достижения высоких параметров генерации для каждого номинала рабочей емкости приходилось подбирать свою обострительную емкость.

Большой интерес представляло поведение мощности генерации при изменении параметров накачки по выпрямителю, т.е. при увеличении тока и напряжения. Изменение мощности накачки (рассчитанная как  $CU^2f/2$ ), которую обеспечивают три источника питания, от 2,63 до 4,1 кВт, что соответствует энергиям от 475 до 742,5 мДж, приводило к линейному росту средней мощности излучения. Это свидетельствует о том, что возможен дальнейший рост мощности генерации при увеличении мощности накачки (главным образом напряжения на анодах тиратронов).

Дальнейшая работа была связана с определением оптимальной рабочей емкости на частоте 16,6 кГц. Поведение мощности излучения для этого случая приведено на рис. 1.

Величины емкостей, в пределах которых мощность излучения достигает максимума, лежат в области 2,2–3,03 нФ. Максимальная мощность генерации 43 Вт получена для  $C_{раб} = 2,76$  нФ. Несмотря на то, что с увеличением  $C_{раб}$  увеличивается энерговыход, падение выходной мощности лазера можно объяснить падением напряжения на аноде тиратрона. Например, с 15 кВ при 2,2 нФ до 13 кВ при 3,87 нФ. При этом мощность накачки составила 4108 Вт и 5428 Вт соответственно. Таким образом, увеличение мощности накачки за счет повышения величины  $C_{раб}$  не приводит к линейному росту выходной мощности, как в случае увеличения тока и напряжения.

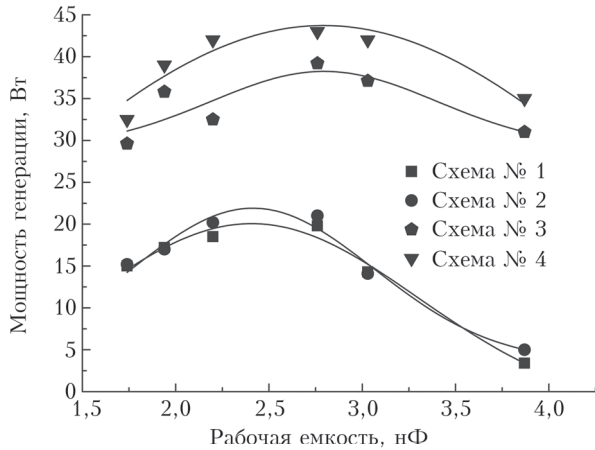


Рис. 1. Зависимость мощности излучения ЛПБМ от величины рабочей емкости для различных схем накачки

Стоит обратить внимание на то, что некоторые элементы схемы экспериментальной установки, расположенные в тракте распространения светового импульса, вносили свою погрешность при измерении энергетических характеристик лазера. Например, ослабитель излучения занижал конечные показания мощности генерации на уровне 20 Вт более чем на 1 Вт. Таким образом, при 43 Вт потери составляли более 2 Вт. То же самое касается собирающей линзы, потери в которой составляют более 5%.

Реализация таких практически значимых мощностей генерации возможна, как отмечалось и ранее, благодаря присутствию в активной среде лазера добавки НВг. Молекула НВг обладает большим

сечением диссоциативного прилипания электронов  $\text{HBr} + e = \text{H} + \text{Br}^-$ , удаляя тем самым низкоэнергетические электроны в момент развития разряда, что вносит задержку тока относительно напряжения. Таким образом создаются благоприятные условия для заселения верхних лазерных уровней. Кроме этого, благодаря молекуле НВг в межимпульсный период наблюдается более быстрое уменьшение концентрации электронов и быстрое восстановление концентрации атомов меди в основном состоянии [22].

Вернемся к рис. 1. Как видно, максимальные характеристики получены в схеме № 4. Ранее, в [18], нашим коллективом были опробованы описываемые схемы накачки при возбуждении ГРТ одним источником питания с ЧСИ 11 кГц и  $C_{\text{раб}} = 1,65$  нФ. Включение ИКТ и  $C_{\text{об}}$  позволило достичь мощность генерации 21 Вт. Вместе с тем при отключении  $C_{\text{об}}$  (схема № 3) отсутствовала задержка тока относительно напряжения. Аналогичная картина наблюдается и в схеме № 1. Кроме этого, в схеме № 3 не увеличивалась выходная мощность. Вероятнее всего, такие особенности возникают, когда давление НВг не оптимально, т.е. недостаточное, чтобы внести задержку тока относительно напряжения и получить максимальную мощность генерации. В связи с этим в представленных экспериментах мы тщательно подбирали давление добавки, которое составило 0,35–0,4 торр, исходя из ранее полученных данных для ГРТ диаметром ~ 5 см.

На рис. 2 показаны осциллограммы импульсов напряжения  $U$ , тока  $I$ , мгновенной мощности  $P$  и генерации  $L$  для четырех схем возбуждения с  $C_{\text{раб}} = 2,2$  нФ.

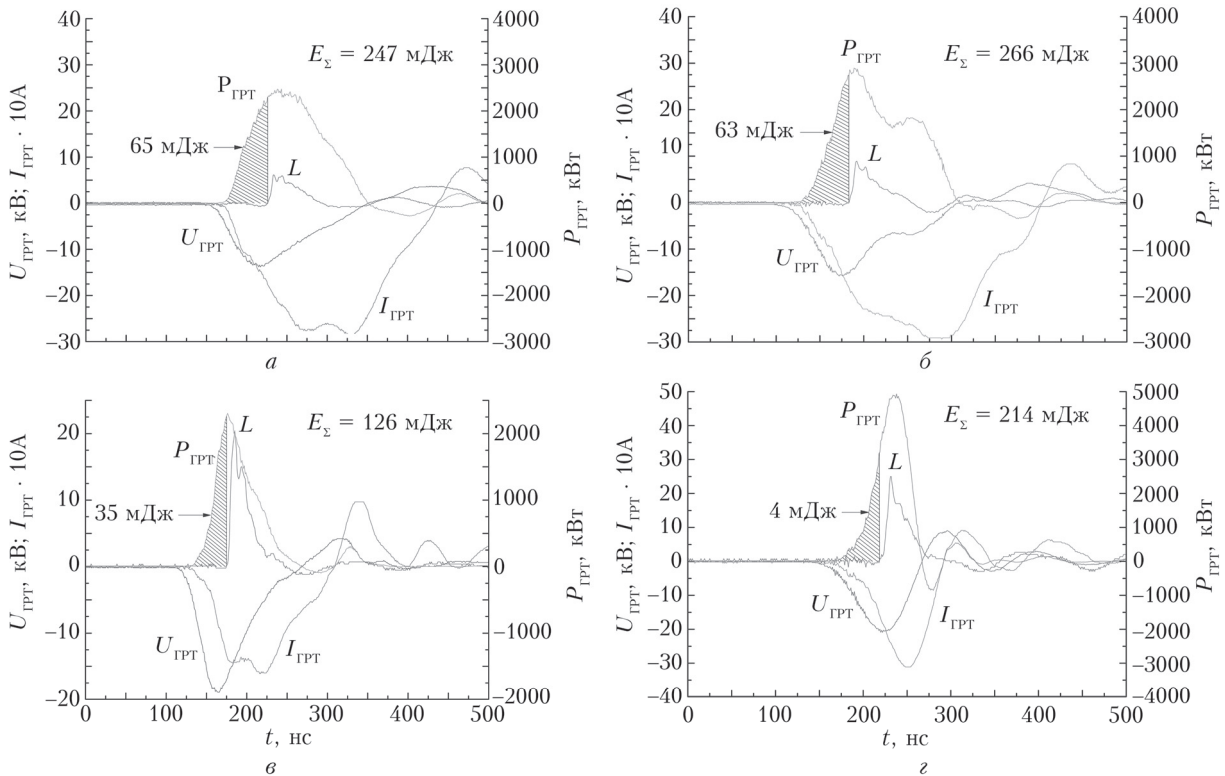


Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения  $U$ , тока  $I$ , мгновенной мощности  $P$  и генерации  $L$  для схем накачки: а – № 1; б – № 2; в – № 3; з – № 4;  $C_{\text{раб}} = 2,2$  нФ,  $f = 16,6$  кГц

Видно, что в схемах № 1, 2 без ИКТ (рис. 2, а, б) энерговыход до начала импульса генерации примерно одинаков. Включение  $C_{об} = 278$  пФ приводит к увеличению напряжения на ГРТ с 13 до 15 кВ и тока на  $\sim 30\text{--}40$  А, возрастает общий энерговыход (рис. 2, б). Как следствие, средняя мощность увеличивается с 18,5 до 20,2 Вт ( $E_{имп} = 1,2$  мДж). Однако этот эффект наблюдался не для всех рабочих емкостей. Для емкостей более 3 нФ характерны большие длительности импульсов тока, напряжения и затянутые фронты в схемах накачки № 1, 2.

Включение в схему ИКТ значительно снижает общий энерговыход и энерговыход до импульса генерации (рис. 2, в). При этом увеличивается напряжение на ГРТ до 18 кВ и уменьшается длительность импульсов. Мощность генерации становится равной 32,5 Вт (1,96 мДж). Включение  $C_{об} = 278$  пФ дополнительно укорачивает импульс напряжения до 125 нс и тока до 130 нс (более чем в два раза по сравнению со схемой № 1), а напряжение достигает 20 кВ (рис. 2, г). Энергия, вкладываемая в разряд до начала импульса генерации, увеличивается до 44 мДж. Повышается общий энерговыход относительно схемы № 3, и мощность излучения становится равной 42 Вт (2,53 мДж). Общее снижение энерговыхода в схеме накачки с ИКТ по сравнению с прямой схемой может быть связано с потерями энергии в самом ИКТ.

Необходимо отметить, что работа лазера без добавки НВг приводила к значительному снижению мощности генерации, до единиц ватт. В таком режиме оптимальная ЧСИ смещается в меньшую сторону. Использование ИКТ в таких системах становится нецелесообразным, поскольку эффективность его работы проявляется только в присутствии электроотрицательной добавки. Помимо этого происходит изменения в развитии разряда, в частности устраняется задержка между током и напряжением.

### Заключение

Использование трехкаскадной системы возбуждения ЛПБМ диаметром 5 см и длиной 90 см с общей мощностью накачки до 5 кВт показало свою эффективность и стабильность работы в течение длительного времени. Это позволило реализовать максимальную мощность излучения 43 Вт. С учетом потерь на собирающей линзе и ослабителе излучения можно сказать, что мощность генерации исследуемого лазера с объемом активной зоны  $1766\text{ см}^3$  составляет 50 Вт, что является для такого объема практически значимой удельной мощностью излучения — 28 Вт/л.

В сравнении с [18] мы не получили трехкратного увеличения мощности за счет наращивания количества источников питания. Это объясняется влиянием источников накачки друг на друга с сопутствующим снижением энергии возбуждения на 20–30%, которое описывалось в [13].

Осуществлен тщательный подбор давления добавки НВг. В отличие от [18] это позволило обес-

печить во всех схемах накачки задержку импульса тока относительно напряжения, что уже в значительной мере определяет эффективность накачки лазерных уровней. При этом введение в схемы № 2, 4 обострительного конденсатора привело к увеличению напряжения на разрядном промежутке. Включение ИКТ (схемы № 3, 4) позволяет значительно уменьшить длительности импульсов возбуждения и увеличить амплитуду напряжения на ГРТ. При этом уменьшаются общие энерговыходы до и после импульса генерации. Очень важно отметить, что для полного понимания причин увеличения мощности излучения лазера необходимо дополнительно изучать электрофизические процессы, происходящие в схемах накачки при изменении их топологии.

На основании проведенных испытаний трехкаскадного источника питания следует заключить, что он может использоваться для накачки всех известных импульсно-периодических лазеров на парах металлов и их галогенидов.

Изготовление трехкаскадной системы накачки лазеров на парах металлов выполнено в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

Исследование возможности повышения мощности излучения CuVg-лазера за счет увеличения энергии накачки при использовании трехкаскадной системы проведено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-79-10096).

1. Little C.E. Metal Vapor Lasers: Physics, Engineering & Applications. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 1998. 620 p.
2. Евтушенко Г.С., Казарян М.А., Торзаев С.Н., Тригуб М.В., Шиянов Д.В. Скоростные усилители яркости на индуцированных переходах в парах металлов. Томск: СГТУ, 2016. 246 с.
3. Григорьянц А.Г., Казарян М.А., Лябин Н.А. Лазеры на парах меди. М.: Физматлит, 2005. 312 с.
4. Бохан П.А., Бучанов В.В., Закревский Д.Э., Казарян М.А., Калугин М.М., Прохоров А.М., Фатеев Н.В. Лазерное разделение изотопов в атомарных парах. Москва: Физматлит, 2004. 208 с.
5. Kimura H., Aoki N., Kobayashi N., Kanagai Ch., Seki E., Abe M., Mori H. Development of high power copper vapor laser system // Proc. SPIE. 2000. V. 3886. P. 550–561.
6. Astadjov D.N., Dimitrov K.D., Jones D.R., Kirkov V.K., Little C.E., Sabotinov N.V., Vuchkov N.K. Copper bromide laser of 120-W average output power // IEEE J. Quantum Electron. 1997. V. 33, N 5. P. 705–709.
7. Kostadinov I.K., Temelkov K.A., Astadjov D.N., Slaveeva S.I., Yankov G.P., Sabotinov N.V. High-power copper bromide vapor laser // Opt. Commun. 2021. V. 501. N 127363.
8. Батенин В.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Климовский И.И., Молодых Э.И. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. М.: Научная книга, 1998. 544 с.
9. Елаев В.Ф., Лях Г.Д., Пеленков В.П. CuVg-лазер со средней мощностью генерации свыше 100 Вт // Опт. атмосф. 1989. Т. 2, № 11. С. 1228–1229.
10. Воронов В.И., Елаев В.Ф., Иванов А.И., Кирилов А.Е., Полунин Ю.П., Солдатов А.Н., Шумейко А.С. Исследование и разработка мощных лазеров на парах

- бромиды меди с отпаянным активным элементом // Оптика атмосф. и океана. 1993. Т. 6, № 6. С. 727–730.
11. *Astadjov D.N., Dimitrov K.D., Jones D.R., Kirkov V., Little L., Little C.E., Sabotinov N.V., Vuchkov N.K.* Influence on operating characteristics of scaling sealed-off CuBr lasers in active length // *Opt. Commun.* 1997. V. 135, N 4–6. P. 289–294.
  12. *Sabotinov N.V., Kostadinov I.K., Bergman H.W., Salimbeni R., Mizeraczyk J.* A 50-Watt copper bromide laser // *Proc. SPIE.* 2001. V. 4184. P. 203–205.
  13. *Shiyanov D.V., Dimaki V.A., Trigub M.V., Gembukh P.I., Troitskii V.O.* Three-stage power supply with a pulsed charge of the storage capacitance for metal vapor lasers // *Proc. SPIE.* 2021. V. 12086. P. 1208605.
  14. *Андриенко О.С., Димаки В.А., Колбычев В.Г., Суханов В.Б., Троицкий В.О.* Лазер на парах бромида меди малой мощности // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17, № 11. С. 890–894.
  15. *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 техника эксперимента. 2008. № 6. С. 119–122.
  16. *Димаки В.А., Суханов В.Б., Троицкий В.О., Филонов А.Г.* Стабилизированный лазер на бромиде меди с автоматизированным управлением режима работы со средней мощностью 20 Вт // Приборы и техника эксперимента. 2012. № 6. С. 95–99.
  17. *Троицкий В.О., Димаки В.А., Филонов А.Г.* Источник питания для лазера на парах бромида меди // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 3. С. 57–60.
  18. *Тригуб М.В., Власов В.В., Шиянов Д.В., Суханов В.Б., Троицкий В.О.* Повышение эффективности возбуждения CuBr лазера за счет модификации разрядного контура // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 12. С. 1069–1072.
  19. *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 атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 10. С. 999–1009.
  20. *Sabotinov N.V., Vuchkov N.K., Astadjov D.N.* Effect of hydrogen in the CuBr- and CuCl-vapor laser // *Opt. Commun.* 1993. V. 95, N 1–3. P. 55–56.
  21. *Способ поддержания и регулирования концентрации галогеноводорода в газоразрядной трубке лазера и газоразрядная трубка лазера на парах галогенидов металлов:* Патент 2295811. Россия, H01S 3/22. Андриенко О.С., Суханов В.Б., Троицкий В.О., Шестаков Д.Ю., Шиянов Д.В.; Институт оптики атмосферы СО РАН. № 2004132665/28; Заявл. 09.11.2004; Оpubл. 20.03.2007. Бюл. № 8.
  22. *Isaev A.A., Jones D.R., Little C.E., Petrash G.G., Whyte C.G., Zemskov K.I.* Characteristics of pulsed discharges in copper bromide and copper hydride lasers // *IEEE J. Quantum Electron.* 1997. V. 33, N 6. P. 919–926.

*D.V. Shiyanov, V.A. Dimaki, M.V. Trigub, V.O. Troitskii, P.I. Gembukh.* **CuBr laser pumped by a three-stage power supply.**

A possibility of increasing the radiation power of a CuBr laser by increasing the pumping energy is studied. For this purpose, a three-cascade system of nanosecond oscillators is used, which excite the active medium of the laser when connected in series. Each source provides a pump power of up to 2 kW. A TG11-1000/25 thyatron is used as a switch. The pump sources perform pulse charging of the working capacitance, which ensures stable operation of the system. The use of such a power source for excitation of a gas-discharge tube 5 cm diameter and 90 cm long provides for an output power of more than 40 W in a modified scheme with pulse cable autotransformer and peaking capacitor. Tests of the source confirm its effectiveness for pumping high power metal vapor lasers.