

Г.С. Евтушенко^{1,2}, О.В. Жданеев^{1,2}, А.В. Павлинский¹, В.Б. Суханов¹,
Д.Ю. Шестаков^{1,3}, Д.В. Шиянов¹

Лазер на парах бромида свинца с высокой частотой повторения импульсов

¹ Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

² Томский политехнический университет

³ Томский государственный университет

Поступила в редакцию 25.10.2002 г.

Проведено экспериментальное и теоретическое исследование лазера на парах бромида свинца при частотах повторения импульсов возбуждения до 80 кГц. Получено, что средняя мощность генерации в трубке с внутренним диаметром 1,2 см и длиной рабочей зоны 42 см имеет оптимум по частоте следования импульсов возбуждения в диапазоне 55–65 кГц. Результаты модельных расчетов свидетельствуют о перераспределении при частоте повторения импульсов свыше 50 кГц мощности, отбираемой от выпрямителя, между коммутирующим элементом и газоразрядной трубкой в пользу коммутатора, что приводит к снижению как частотных, так и энергетических характеристик лазера. Экспериментально показана возможность реализации отпаянного варианта лазера на парах бромида свинца.

Введение

Импульсные лазеры на переходах с резонансного уровня на метастабильный представляют большой интерес, так как для них характерны высокие значения квантового кпд, средней мощности излучения, высокой частоты повторения импульсов. Лазер на парах свинца был одним из первых лазеров на парах металлов, для которых была получена «самоограниченная» генерация (на переходе $6p7s^3P_1^0 \rightarrow 6p^2 \ ^1D_2$ PbI, $\lambda = 722,9$ нм) [1]. Затем запущены лазеры на парах других металлов. На сегодняшний день лучшие выходные характеристики получены для лазеров на парах меди и бромида меди [2, 3]. Благодаря своим высоким энергетическим и эксплуатационным характеристикам, эти лазеры нашли широкое применение в различных областях [2, 4–6]. Лазер на парах свинца широкого применения не получил. Одна из причин – малый ресурс активного элемента, связанный с выносом рабочего металла из зоны разряда (вынос существенно больше, чем для лазера на парах меди). Вместе с тем этот лазер представляет определенный интерес, так как рабочие переходы лежат не только в красной, но и в фиолетовой области спектра, а квантовый кпд на переходе $6p7s^3P_1^0 \rightarrow 6p^2 \ ^1D_2$ является рекордным для этого класса лазеров.

Упрощенная схема уровней и рабочих переходов для атома свинца приведена на рис. 1.

Для получения генерации на переходах в коротковолновой области спектра авторы [7] использовали импульсный кабельный трансформатор. В работе [8] на линии 722,9 нм получена средняя выходная мощность 4,4 Вт при кпд 0,1–0,2% и реализованы частоты

повторения импульсов (ЧПИ) излучения до 40 кГц. В большинстве работ пары свинца в газоразрядной трубке (ГРТ) создавались нагреванием твердых кусочков свинца в активной зоне до температуры 800–1000 °С. Однако имеется и небольшое количество работ [9–11], где в качестве рабочего вещества используются летучие молекулярные соединения свинца.

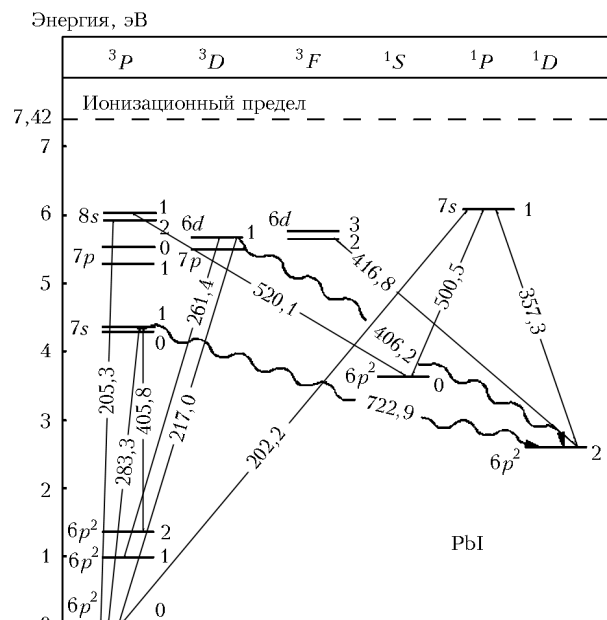


Рис. 1. Упрощенная схема уровней атома свинца

Это позволяет значительно снизить рабочие температуры и, следовательно, упростить конструкции газоразрядных трубок, а в отдельных случаях и продлить

срок службы активных элементов. Так, Чен [9] закладывал твердый $PbCl_2$ в ГРТ, которая нагревалась до 420–560 °С, и получал генерацию на линии 722,9 нм атома свинца, используя сдвоенные импульсы. Первый импульс служил для диссоциации молекул хлорида свинца, а второй для возбуждения атомов свинца. Авторы работы [10] создали лазер на парах $Pb(CH_3)_4$ со сдвоенными импульсами и получили генерацию на линиях 722,9 и 406,2 нм. Затем Фелдман с соавт. [11] получили генерацию на красной линии в лазере на парах иодида свинца. Джонс и Литтл [12] использовали прокачку НВг с буферным газом Ne над кусочками твердого свинца. Они получили генерацию на линиях 722,9 и 406,2 нм при температуре в рабочей зоне 400–500 °С, тем самым реализовав так называемый «гибридный лазер на парах свинца».

Мы поставили перед собой задачу реализовать беспороочной лазер на парах бромида свинца, способный обеспечить работу активного элемента в отпаянном режиме.

Техника эксперимента

Конструкция исследуемого активного элемента $PbVg_2$ -лазера является типичной для класса лазеров на галогенидах металлов (рис. 2,а), в частности для $CuVg$ -лазера [2, 3].

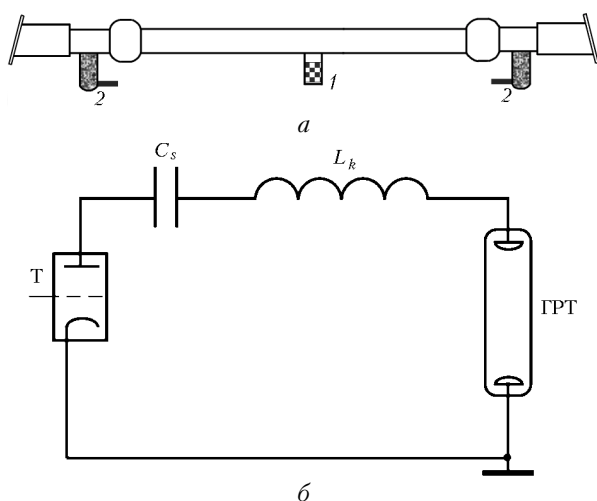


Рис. 2. Конструкция газоразрядной трубки: 1 – нагреваемый внешней печью отросток с бромидом свинца; 2 – электроды (а); схема разрядного контура (б)

Более низкая рабочая температура в сравнении с лазерами на парах чистых металлов позволяет использовать для изготовления ГРТ плавящийся кварц. Поддержание необходимой температуры в рабочем канале обеспечивается теплоизолятором – каолиновой ватой. В качестве электродов 2 применялись кварцевые стаканы, заполненные медной стружкой, электрический подвод к которым осуществлялся электродами от ламп ИФП-1200(800). Расстояние между электродами равнялось 42 см, внутренний диаметр канала – 1,2 см. Твердый бромид свинца помещался

в специальный отросток 1, нагреваемый внешней печью, что позволяло контролировать давление паров независимо от температуры в активной зоне. Давление буферного газа Ne изменялось от 3 до 30 торр. Некоторые эксперименты были выполнены с небольшими добавками водорода (до 0,3 торр). Оптический резонатор был образован глухим алюминиевым зеркалом и плоскопараллельной кварцевой пластинкой. Идентификация линий генерации проводилась с использованием монохроматора МДР-23, откалиброванного по излучению ртутной лампы.

Для возбуждения ГРТ использовалась обычная схема накачки с прямым разрядом накопительной емкости (C_H) через ГРТ и коммутатор (рис. 2,б), описанная в работе [13]. Резонансная зарядка C_H позволяет получить на электродах ГРТ удвоенное напряжение источника питания. В качестве коммутатора на частотах следования импульсов до 15 кГц использовался тиратрон ТГИ1-1000/25. Для исследования характеристик лазера на повышенных частотах до 80 кГц применялся таситрон типа ТГУ1-5/12.

Контроль импульсов тока и напряжения осуществлялся осциллографом С1-122А, сигналы на который подавались с пояса Роговского и малоиндуктивного делителя напряжения. Длительность и форма импульсов генерации регистрировались с помощью коаксиального элемента типа ФК-19. Средняя мощность излучения измерялась на ИМО-2 и ИМО-2Н. Для контроля температуры стенки ГРТ применялась хромель-алюмелевая термопара.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Анализ спектра излучения разряда в ГРТ $PbVg_2$ -лазера показал, что без включения внешней печи отростка с бромидом свинца в спектре излучения разряда наблюдаются линии неона и водорода. Известно, что водород всегда присутствует в газах в виде неконтролируемой примеси, а специальных мер по очистке мы не предпринимали. Кроме того, в спектре излучения наблюдались значительно более слабые линии примесей, прежде всего атома меди, поскольку электроды ГРТ содержали медные опилки. При нагревании отростка с бромидом свинца в спектре излучения появляются атомные и ионные линии свинца (появление свободных атомов свинца в активной зоне мы связываем с электронной диссоциацией молекул $PbVg_2$, либо напрямую, либо через свободный радикал $PbVg$ в разряде). Через 10–15 мин после включения накала отростка появлялась генерация на двух длинах волн – 722,9 и 406,2 нм. Генерация на фиолетовой линии не устойчива. Она наблюдается в узком температурном диапазоне и при малых давлениях неона (единицы торр).

Рабочие переходы на линиях 722,9 и 406,2 нм имеют общий нижний уровень (см. рис. 1). Верхний уровень для фиолетовой линии лежит существенно выше, поэтому для эффективного его заселения тре-

буется большая энергия электронов, чем для реализации генерации на красной линии. Однако даже при увеличении напряжения до 16 кВ не удается реализовать устойчивый режим генерации на фиолетовой линии. При добавлении в трубку небольших количеств водорода фиолетовая линия исчезает, мощность же на красной линии возрастает.

В отличие от лазера на парах чистого свинца в данном лазере генерация на фиолетовой линии наблюдается при более пологом переднем фронте импульса тока и без применения специальных систем сжатия импульса накачки. Возможно, это связано с тем, что в лазере на парах бромида свинца создаются более благоприятные условия возникновения инверсии населенности. Это может происходить по причине «увода» низкоэнергетических электронов из разряда вследствие диссоциативного прилипания электронов к молекулам Br_2 либо HBr в начальной стадии импульса тока.

Как было отмечено выше, для исследования лазера в широком частотном диапазоне мы использовали различные коммутаторы: от 1 до 12 кГц – тиратрон, от 30 до 80 кГц – таситрон. На рис. 3,а приведены

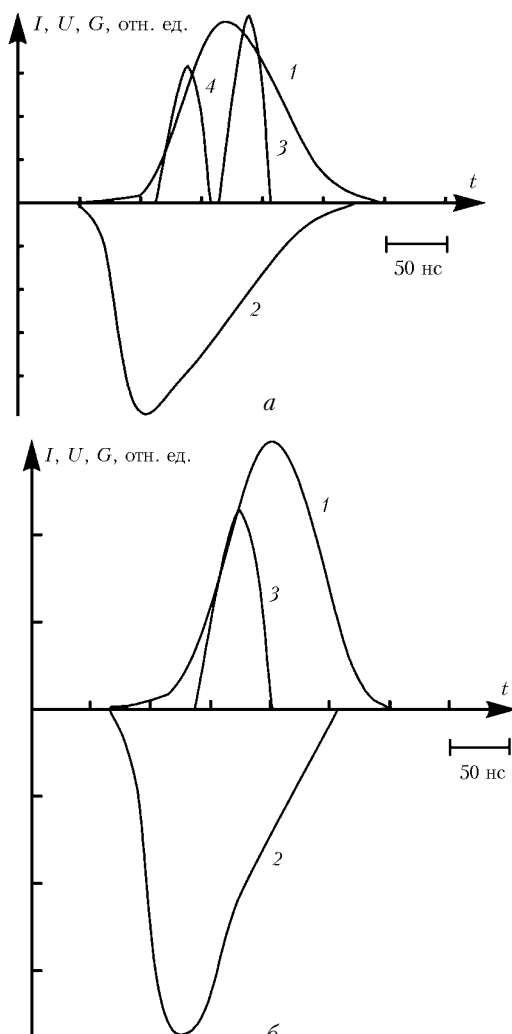


Рис. 3. Осциллограммы импульсов тока (1), напряжения (2), и генерации на красной (3) и фиолетовой (4) линиях при ЧПИ: а – 8 кГц; б – 65 кГц

осциллограммы импульсов напряжения, тока и генерации на двух длинах волн.

При тиратронной коммутации была достигнута максимальная выходная мощность на красной линии 180 мВт при частоте следования импульсов накачки 8 кГц и с добавлением 0,3 торр водорода. Максимальная выходная мощность на красной линии в цепи с таситроном достигла 250 мВт при ЧПИ 65 кГц (осциллограммы импульсов напряжения, тока и генерации при этих условиях приведены на рис. 3,б). Чтобы обеспечить работу лазера на больших частотах повторения импульсов возбуждения, для сохранения уровня вводимой мощности необходимо снижать величину накопительного конденсатора. Однако уменьшение емкости накопительного конденсатора ограничено значением собственной (паразитной) емкости коммутатора.

Основными механизмами ограничения срока службы лазера на парах свинца являются вынос вещества из рабочей зоны [2, 12] и напыление металла на внутренней стенке трубки [14]. В лазере на парах бромида свинца удалось существенно увеличить срок службы активного элемента (до 100 ч). Это можно объяснить взаимодействием свободных атомов свинца с бромом с образованием молекулы PbBr_2 (аналогично металлогалогенному циклу в галогенных лампах).

В ходе экспериментов было установлено, что задержка между импульсами тока и напряжения составляет около 40–50 нс даже при высокой частоте повторения импульсов возбуждения (вплоть до 80 кГц). Это свидетельствует о низкой предимпульсной проводимости плазмы активной среды.

Результаты модельных расчетов

Анализ влияния параметров схем возбуждения и реагентов среды газоразрядной трубки на генерационные характеристики был осуществлен на основе численных экспериментов. Нами разработана математическая модель на основе описанной ранее в [15] для лазера на парах меди. Математическая модель состоит из двух блоков уравнений, описывающих параметры электрической цепи возбуждения и параметры плазмы ГРТ. В уравнения Кирхгофа входит временная зависимость сопротивления плазмы, которую можно выразить через временные зависимости концентрации и температуры электронов.

В свою очередь, изменение концентрации и температуры электронов зависит от тока, протекающего через ГРТ и нагревающего электроны. Уравнения Кирхгофа имеют вид

$$\frac{dU_{Cs}}{dt} = -\frac{I_r}{C_s},$$

$$\frac{dI_r}{dt} = \frac{U_{Cs} - R_d(N_e, T_e)I_r - R_{th}(I_r)I_r}{L_k},$$

где I_r – ток, протекающий в контуре; U_{Cs} – напряжение на накопительном конденсаторе; $R_d(N_e, T_e)$ – сопротивление плазмы; $R_{th}(I_r)$ – сопротивление тиратрона; L_k – индуктивность контура. Сопротивление

тиратрона представлено экспоненциальной зависимостью и изменяется в течение нескольких наносекунд от 1 ГОм до единиц Ом.

Концентрацию и температуру электронов можно получить с помощью системы уравнений

$$\frac{dN_e}{dt} = k_{iPb} N_e N_{Pb},$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{3}{2} T_e N_e \right) = -Q_i - Q_{\Delta T} - Q_{wall} + Q_j,$$

где k_{iPb} – скорость ионизации атомов свинца [16–19]; T_e – температура электронов;

$$Q_j = \rho(N_e, T_e) j^2(t)$$

– плотность мощности, которая идет на джоулев нагрев; $\rho(N_e, T_e)$ – удельное сопротивление плазмы;

$$Q_i = (J_{iPb} k_{iPb}(T_e) N_e [N_{Pb} - N_{Pb^+}] + J_{iNe} k_{iNe}(T_e) N_e [N_{Ne} - N_{Ne^+}])$$

– плотность мощности, которая идет на ионизацию атомов неона и свинца;

$$Q_{\Delta T} = 2 \left\{ \frac{m_e}{m_{Ne}} k_{Ne} N_{Ne} + \frac{m_e}{m_{Pb}} k_{ei} N_{Pb^+} \right\} N_e [T_e - T_{gas}]$$

– плотность мощности, которая идет на охлаждение электронов за счет упругих столкновений с атомами буферного газа неона, ионами свинца; N_{Ne} , N_{Pb} , N_{Ne^+} , N_{Pb^+} – концентрации атомов и ионов буферного газа неона и свинца соответственно; k_{Ne} , k_{ei} – скорости упругих столкновений электронов с атомами неона и ионами;

$$Q_{wall} = \frac{5,41 \cdot 10^4 T_e^{1,5} N_e}{R^2 \sigma_{eNe} N_{Ne}}$$

– плотность мощности теплоотвода на стенки, Вт/см³. Здесь R – радиус трубки, см; T_e – в эВ; $\sigma_{eNe}(T_e)$ – транспортное сечение упругого столкновения электрона с атомом неона, которое слабо зависит от температуры в области 2 эВ и приблизительно равно $1,5 \cdot 10^{-16}$ см²;

$$\rho(N_e, T_e) = 0,043 [a_1(T_e) + a_2(N_e, T_e)], \text{ Ом} \cdot \text{см},$$

где

$$a_1(T_e) = 4/T_e^{3/2},$$

$$a_2(N_e, T_e) = 7,4 \cdot 10^{-2} N_{Ne} T_e^{1/2}/N_e,$$

a_1 и a_2 – вклады, отвечающие соответственно за электрон-ионные и электрон-атомные столкновения; N_e – концентрация электронов, см⁻³. Из соотношения квазинейтральности плазмы $N_e = N_{Pb^+} + N_{Ne^+}$.

Уравнение баланса для температуры газа не рассматривалось, так как время интегрирования уравнений не превышает межимпульсный интервал, за который температура газа практически не меняется.

Система уравнений численно решалась с использованием алгоритма Гира для решения жестких систем дифференциальных уравнений.

Характерный вид зависимостей температуры и концентрации электронов от времени представлен на рис. 4.

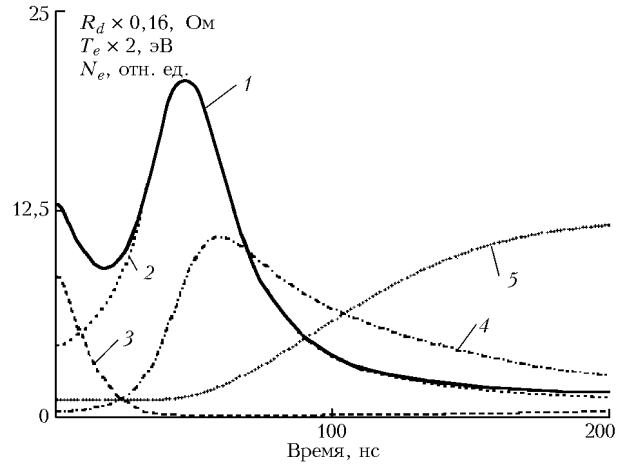


Рис. 4. Рассчитанные временные зависимости сопротивления плазмы: общее (1), при учете только электрон-атомных столкновений (2), при учете только электрон-ионных столкновений (3); температуры электронов (4); изменения концентрации электронов относительно начальной концентрации (5)

Имея эти данные, можно получить расчетную зависимость сопротивления ГРТ от времени. Немонотонное поведение сопротивления связано с наличием вкладов от электрон-атомных и электрон-ионных столкновений в общее сопротивление, приведенных на рис. 4. При этом необходимо заметить, что в начальный интервал импульса возбуждения преобладает вклад кулоновских электрон-ионных столкновений (см. рис. 4).

На рис. 5 приведены рассчитанные временные зависимости мощности, вводимой в активную среду лазера, а также мощностей, которые идут на ионизацию атомов неона и свинца и на нагрев газа в упругих столкновениях.

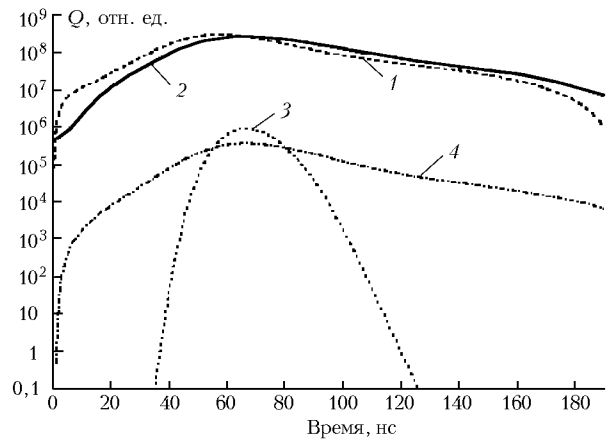


Рис. 5. Временные зависимости мощности, вводимой в плазму ГРТ (1), идущей на ионизацию свинца (2), идущей на ионизацию неона (3), затрачиваемой на нагрев газа в упругих столкновениях (4)

Видно, что ионизация свинца существенна, в то время как неон ионизирован незначительно. Можно также отметить, что основная ионизация происходит еще на участке роста тока.

При сопоставлении полученных экспериментальных и рассчитанных временных зависимостей тока и напряжения на ГРТ было получено удовлетворительное согласие.

Исходя из проведенных расчетов, было установлено, что существует оптимальная концентрация паров свинца, при которой наблюдаются наиболее благоприятные условия для возбуждения (уменьшение фронта импульсов тока и напряжения), это относится как к току, так и к напряжению на ГРТ. При данных условиях можно ожидать и максимального значения мощности генерации. При увеличении индуктивности контура и индуктивности ГРТ (которые в расчете были представлены суммарной величиной) также наблюдается ухудшение условий накачки (затяжка импульсов возбуждения). Высокая предимпульсная концентрация электронов приводит к перераспределению мощности, отбираемой от выпрямителя, между коммутирующим элементом и газоразрядной трубкой в пользу коммутатора, что может снижать как энергетические, так и частотные характеристики лазера [20].

Заключение

Реализована устойчивая работа лазера на парах бромида свинца при частотах повторения импульсов накачки до 80 кГц. Из экспериментов следует, что средняя мощность генерации в трубке с внутренним диаметром 1,2 см и длиной рабочей зоны 42 см имеет оптимум по частоте следования импульсов возбуждения в диапазоне 55–65 кГц, что несколько выше, чем для CuBr-лазера аналогичного диаметра.

Результаты модельных расчетов свидетельствуют о том, что при частоте повторения импульсов возбуждения более 50 кГц в реальных схемах накачки PbBr₂-лазера, вследствие высокой предимпульсной концентрации электронов, происходит перераспределение мощности, отбираемой от выпрямителя между коммутирующим элементом и газоразрядной трубкой в пользу коммутатора. Это приводит к снижению как частотных, так и энергетических характеристик PbBr₂-лазера, так же как в лазере на парах меди [20].

Экспериментально показана возможность реализации отпаянного варианта лазера на парах бромида свинца со сроком службы не менее 100 ч.

1. *Fowles G.R. and Silfvast W.T.* High-gain laser transition in lead vapor // *Appl. Phys. Lett.* 1965. V. 6. N 12. P. 236–237.
2. *Little C.E.* Metal Vapor Lasers: Physics, Engineering & Applications. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, UK, 1998. 620 p.
3. *Батенин В.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Климовский И.И., Молодых Э.И.* Лазеры на самоограниченных

- переходах атомов металлов. М.: Научн. книга, 1998. 544 с.
4. *Солдатов А.Н., Соломонов В.И.* Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов. Новосибирск: Наука, 1985. 152 с.
 5. *Webb C.* Metal vapor lasers: new development and applications // XIII Intern. Symp. on Gas Flow and Chemical Lasers & High Power Laser Conf. Florence, Italy, September, 2000 // *Proc. SPIE.* 2001. V. 4184. P. 183–190.
 6. *Евтушенко Г.С., Клишкин В.М.* Лазеры на парах металлов. Применения в атмосферной оптике // *Оптика атмосф. и океана.* 1999. Т. 12. № 9. С. 875–884.
 7. *Исаев А.А., Петраш Г.Г.* Новые линии генерации и сверхсветимости на парах свинца // *Письма в ЖЭТФ.* 1969. Т. 10. Вып. 6. С. 188–192.
 8. *Дивин В.Д., Исаков В.К.* Исследование импульсного лазера на парах свинца при повышенных частотах следования импульсов возбуждения // *Квант. электрон.* 1986. Т. 13. № 8. С. 1657–1664.
 9. *Chen J.C.* Lead laser using lead chloride as a lasant // *Appl. Phys. Lett.* 1974. V. 45. N 10. P. 4663–4664.
 10. *Chou M.S., Cool T.A.* Laser operation by dissociation of metal complexes: New transitions in As, Bi, Ga, Ge, Hg, In, Pb, Sb, and Tl // *J. Appl. Phys.* 1976. V. 47. N. 3. P. 1055–1061.
 11. *Feldman D.W., Liu C.S., Pack J.L., Weaver L.A.* Long-lived lead-vapor lasers // *J. Appl. Phys.* 1978. V. 49. № 7. P. 3679–3683.
 12. *Jones D.R., Little C.E.* A lead bromide laser operating at 722.9 and 406.2 nm // *IEEE J. Quantum Electron.* 1992. V. 28. № 3. P. 590–593.
 13. *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.
 14. *Клишкин В.М.* Проблемы неустойчивости продольных импульсно-периодических разрядов в лазерах на парах металлов. Препр. / ИОА СО РАН (Томск). 1999. № 1. С. 1–25.
 15. *Boichenko A.M., Evtushenko G.S., Yakovlenko S.I., Zhdaneev O.V.* The influence of the initial density of metastable states and electron density on the pulse repetition rate in a copper vapor laser // *Laser Phys.* 2001. V. 11. № 5. P. 580–588.
 16. *Алексахин И.С., Боровик А.А., Стародуб В.П., Шафранович И.И.* Эффективные сечения возбуждения спектральных линий атома свинца // *Оптика и спектроскопия.* 1979. Т. 46. Вып. 6. С. 1125–1129.
 17. *Bartschat K.* Low-energy scattering of electron by lead atoms // *J. Phys. B.* 1985. V. 18. № 8. P. 2519–2524.
 18. *Freund R.S., Wetzel R.C., Shul R.J., Hayes T.R.* Cross-section measurements for electron-impact ionization of atoms // *Phys. Rev. A.* 1990. V. 41. № 7. P. 3575–3595.
 19. *Держиев В.И., Жидков А.Г., Яковленко С.И.* Излучение ионов в неравновесной плотной плазме. М.: Энергоатомиздат, 1986. 160 с.
 20. *Evtushenko G.S., Zhdaneev O.V.* Numerical study of influence of excitation circuits element on CVL performance // *Proc. VI Int. Conf. «Atomic and molecular pulsed lasers».* Tomsk, September, 2001. IAO SB RAS, 2001. P. 118.

G.S. Evtushenko, O.V. Zhdaneev, A.V. Pavlinskii, V.B. Sukhanov, D.Yu. Shestakov, D.V. Shiyanhov.
Lead bromide vapor laser with high pulse repetition frequency.

Experimental and numerical modeling study of a lead bromide vapor laser shows that it can operate at two lines of 722.9 nm and 406.2 nm with high pulse repetition frequency (PRF). Optimal PRF for a tube 1.2 cm in diameter and 42 cm in active length is in the range of 55–65 kHz. These values are higher than those for CuBr-laser with similar dimensions. Unfortunately, essential losses in the switch (tacitron) at high PRF (more than 50 kHz) take place. It leads to decrease of the laser output parameters. Sealed-off mode is experimentally tested.