

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Несын Г.В., Манжай В.Н., Илюшников А.В. Промышленный синтез и оценка гидродинамической эффективности потенциальных агентов снижения сопротивления в нефтепроводах // Инженерно-физический журнал – 2003. – Т. 76. – № 3. – С. 1–5.
2. Pat. 4837249 USA. ISF B05D 005/08. Rapid dissolving polymer composition and uses therefore / D.P. O'Mara, A.F. Nadermann, J.C. Tripp.
3. Пат. 2314912 РФ. МПК⁷ B29B 17/00. Способ разрушения полиоктена / Г.Л. Лобанова, В.В. Лопатин, Г.В. Несын, Ю.В. Сулейманова, Э.Н. Таракановский, Г.П. Филатов. Заявлено 18.04.2005; Опубл. 20.01.2008.
4. Курец В.И., Усов А.Ф., Цукерман В.А. Электроимпульсная дезинтеграция материалов. – Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2002. – 324 с.
5. Пат. 2050276 РФ. МПК⁷ B29B 17/02. Способ разрушения эластичных материалов / В.И. Курец, Э.Н. Таракановский, Г.П. Филатов, Ю.Г. Юшков, Г.М. Самойленко. Заявлено 20.06.1993; Опубл. 20.12.1995.
6. Несын Г.В., Манжай В.А., Гареев М.М., Полякова Н.М. и др. Промышленные испытания полимерной добавки «Виол», снижающей гидродинамическое сопротивление нефти // Нефтяное хозяйство. – 1995. – № 5–6 – С. 81–82.

Поступила 16.03.2009 г.

УДК 621.373.8

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ CuBr-ЛАЗЕРА С ЕМКОСТНОЙ НАКАЧКОЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СХЕМЫ НА ОСНОВЕ ЛАМПОВОГО КОММУТАТОРА

Ф.А. Губарев^{1,2}, В.Ф. Федоров², Г.С. Евтушенко¹, В.Б. Суханов²

¹Томский политехнический университет

E-mail: ime@tpu.ru

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск

E-mail: qel@asd.iao.ru

Представлены результаты исследования CuBr-лазера с накачкой емкостным разрядом при использовании схемы на основе модуляторной лампы ГМИ-32Б. Показано, что схема с ламповым коммутатором может иметь преимущество при работе с газоразрядными трубками с малым диаметром внешних электродов, т. к. обеспечивает относительно высокий КПД при малом энергокладе в разряд.

Ключевые слова:

Лазер на парах бромида меди, емкостный разряд, схемы накачки, модуляторная лампа, пониженный энергоклад, активные добавки.

Введение

Лазеры на парах меди и ее соединений, генерирующие когерентное излучение на длинах волн 510,6 и 578,2 нм, являются наиболее мощными и эффективными среди лазеров на самоограниченных переходах в парах металлов [1, 2]. Прогресс в исследовании и разработке лазеров данного класса связан, с одной стороны, с увеличением эффективности генерации, с другой стороны, с повышением срока службы активных элементов. В лазерах на парах металлов, в частности, в CuBr-лазерах, для создания активной среды традиционно применяется разряд продольного типа, возбуждаемый между двумя электродами, расположенными внутри газоразрядной трубки (ГРТ). Наличие внутренних электродов является одним из факторов, ограничивающих срок службы активных элементов лазеров, особенно, если лазерная среда содержит активные примеси (HBr, HCl и др.). Присутствие активных примесей модифицирует кинетические процессы в плазме лазера и приводит к существенному улучшению выходных характеристик [3, 4]. В связи с этим актуальна задача разработки и исследования лазера

на парах металлов, в котором бы отсутствовал непосредственный контакт материала электродов с газовой средой. В работах [5, 6] предложена и исследована конструкция излучателя CuBr-лазера, где электроды располагались на внешней стенке трубки. При таком расположении электродов электрическая связь плазмы внутри ГРТ со схемой накачки носит емкостный характер. Проведенные исследования показали, что CuBr-лазеры с емкостной накачкой практически не уступают по эффективности CuBr-лазерам с традиционной накачкой [6].

Важной с точки зрения получения высоких частотных и энергетических характеристик задачей является повышение эффективности ввода энергии в разряд, а значит, поиск наиболее эффективных схем накачки, в частности, при работе с емкостным разрядом. Настоящая работа посвящена исследованию CuBr-лазера с емкостным возбуждением при использовании схемы накачки, в которой в качестве коммутатора применялась модуляторная лампа ГМИ-32Б. Подобная схема возбуждения использовалась ранее при работе с CuBr-лазером с традиционной накачкой [7].

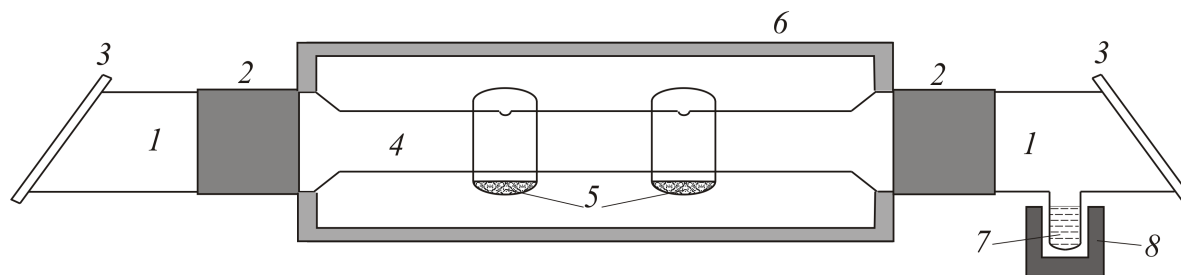


Рис. 1. Конструкция активного элемента: 1) кварцевая трубка; 2) электроды; 3) выходные окна; 4) рабочий канал; 5) порошок бромида меди; 6) внешний нагреватель; 7) генератор НВг; 8) нагреватель

1. Техника эксперимента

В экспериментах использовалась кварцевая ГРТ с длиной рабочего канала 38 см и внутренним диаметром 1,0 см (рис. 1). Танталовые электроды располагались на внешней стенке трубки на расстоянии 44 см друг от друга и имели ширину 10 см и диаметр 5 см. Порошок бромида меди помещался в кольцевые резервуары, внутри которых разрядный канал имел отверстия для выхода паров рабочего вещества [8]. Резервуары располагались равномерно по длине разрядного канала. ГРТ заполнялась буферным газом неоном при давлении 4 кПа. Введение активной добавки НВг осуществлялось с помощью реверсивного генератора НВг [9]. Активная зона ГРТ помещалась во внешний нагреватель. Такая конструкция позволяла поддерживать требуемую температуру внешней стенки ГРТ (750...770 К) независимо от мощности, вводимой от высоковольтного источника питания.

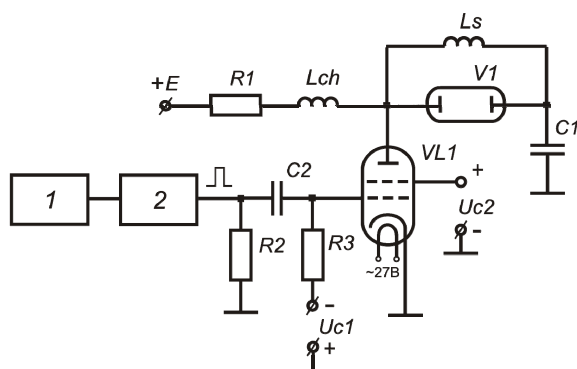


Рис. 2. Схема накачки лазера: 1) генератор импульсов; 2) формирователь импульсов; V1 – газоразрядная трубка; VL1 – модуляторная лампа; U_{c1}, U_{c2} – источники сеточного напряжения смещения; C1 – рабочая емкость; C2 – разделительный конденсатор; R1-R3 – резисторы; Ls – шунтирующая индуктивность; Lch – зарядная индуктивность

Схема возбуждения показана на рис. 2. Накачка активного объема осуществлялась в режиме частичного разряда рабочей емкости. Емкость C1 состояла из трех конденсаторов типа КВИ-3 по 4700 пФ, включенных последовательно. Величина шунтирующей индуктивности Ls составляла 2,2 мГн, зарядной Lch – 1 мГн. Запуск лампы осуществлялся импульсами прямоугольной формы

длительностью 150...300 нс, амплитудой 700...1000 В, длительность переднего фронта <50 нс. Частота следования импульсов (ЧСИ) задавалась с помощью стандартного генератора импульсов Г5-60 и изменялась от 33 до 100 кГц. Величина анодного напряжения E варьировалась до 14 кВ. Сеточное смещение U_{c1} задавалось в диапазоне –(600...800) В, U_{c2} составляло 1,8...2 кВ. Регистрация импульсов тока и напряжения производилась с помощью датчиков тока Pearson Current Monitors 8450 и пробника напряжения Tektronix P6015A. Импульсы генерации контролировались с использованием коаксиального фотоэлемента ФК-22. Регистрируемые датчиками сигналы подавались на осциллограф LeCroy WJ-324. Средняя мощность излучения контролировалась измерителем мощности Ophir 20C-SH.

2. Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис. 3, а, приведены зависимости средней мощности генерации P_r CuBr-лазера с емкостной накачкой от мощности, потребляемой от высоковольтного выпрямителя, при различных ЧСИ. Как следует из зависимостей (рис. 3, а), с увеличением ЧСИ, мощность накачки, при которой средняя мощность генерации (суммарная по обеим линиям) при этой частоте максимальная, уменьшается. Уменьшается и напряжение питания, соответствующее максимальной мощности генерации (рис. 4). Наибольшая суммарная средняя мощность генерации без добавки НВг в рассматриваемой схеме соответствовала ЧСИ 50 кГц и составляла 750 мВт при потребляемой от выпрямителя мощности P_v менее 550 Вт. При таком уровне P_v при других рассмотренных ранее схемах накачки генерация в данной ГРТ не реализуется [6]. Для сравнения в таблице приведены характеристики CuBr-лазера с емкостной накачкой при возбуждении с использованием схемы на основе лампы ГМИ-32Б и схем с тиратронным коммутатором [6]. В отсутствие добавки НВг эффективность схемы с ламповым коммутатором существенно выше по сравнению с другими схемами, несмотря на несколько меньшую среднюю мощность генерации. Таким образом, при использовании данной схемы накачки наиболее наглядно реализуется режим пониженного энерговклада в разряд.

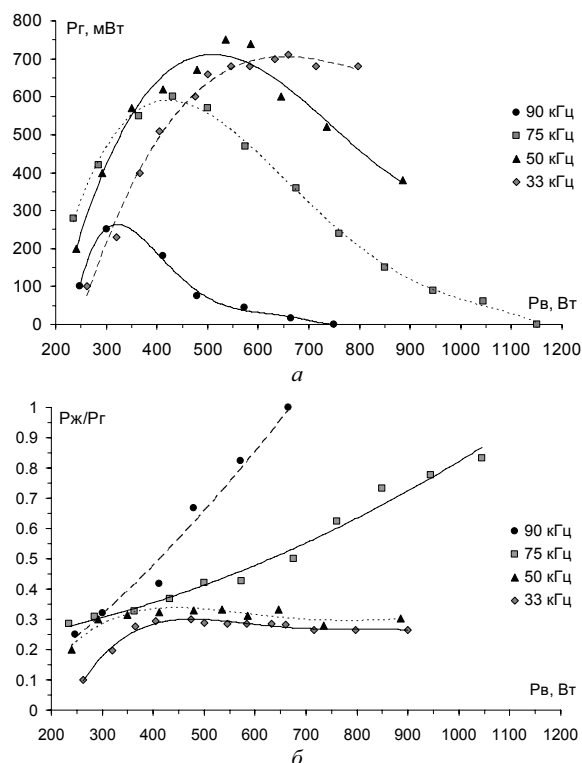


Рис. 3. Зависимость средней мощности генерации CuBr-лазера от мощности накачки при различных частотах повторения импульсов (диаметр разрядного канала 1 см, длина 38 см): а) суммарная по обеим линиям средняя мощность генерации, б) отношение средней мощности генерации на желтой линии к суммарной средней мощности генерации

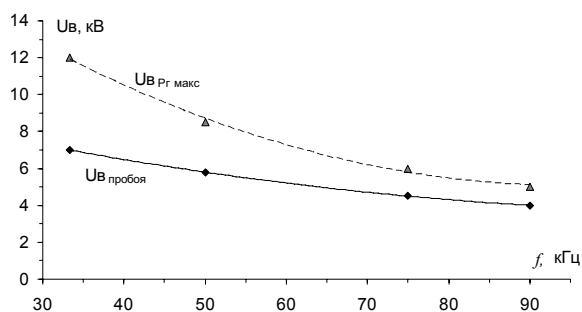


Рис. 4. Зависимости напряжения на выходе выпрямителя, при котором происходит пробой, и напряжения, при котором мощность генерации максимальна, от частоты следования импульсов

Таблица. Сравнительные характеристики CuBr-лазера при различных схемах накачки

Схема накачки	Наличие НВг	ЧСИ, кГц	$P_{в}$, кВт	$P_{г}$, Вт	КПД, %
Прямой разряд накопительного конденсатора	—	57	1,4	1,0	0,07
	+	57	1,3	0,29	0,02
Удвоение напряжения Блюмляйна	—	29	1,3	1,1	0,085
	+	29	1,26	1,32	0,105
Без внешнего накопительного конденсатора	—	37	1,26	0,85	0,067
	+	57	1,6	2,0	0,125
С модуляторной лампой ГМИ-32Б	—	50	0,54	0,75	0,14
	+	50	0,48	0,2	0,04

Интересно отметить, что с увеличением ЧСИ уменьшается минимальное напряжение на высоковольтном выпрямителе $U_{в пробой}$, при котором происходит «пробой» разрядного промежутка (рис. 4). Под «пробоем» понимается момент образования проводящего плазменного канала с высокой плотностью заряженных частиц, о чем свидетельствуют световая вспышка и существенное увеличение разрядного тока. При увеличении частоты повторения с 33 до 90 кГц $U_{в пробой}$ уменьшается с 7 до 4 кВ (рис. 4). Чтобы произошел пробой разрядного промежутка, необходимо, чтобы степень ионизации достигла некоторой пороговой величины. Таким образом, при импульсном характере накачки пробой может происходить после нескольких импульсов возбуждения при условии, что происходит накопление заряженных частиц от импульса к импульсу. Соответственно, с ростом ЧСИ пробой разрядного промежутка должен происходить после меньшего количества импульсов при одинаковом напряжении, приложенном к ГРТ. И наоборот, снижение напряжения пробоя может быть достигнуто за счет повышения ЧСИ.

На рис. 3, б, показано изменение доли желтой линии излучения $P_{ж}/P_{г}$ в зависимости от мощности накачки для разных ЧСИ. При ЧСИ менее ~50 кГц до $P_{в} \approx 300 \dots 350$ Вт наблюдается рост $P_{ж}/P_{г}$, затем $P_{ж}/P_{г}$ остается примерно на одном уровне. При более высокой частоте повторения (более ~50 кГц) $P_{ж}/P_{г}$ растет во всем диапазоне изменения $P_{в}$, причем, чем выше ЧСИ, тем рост более крутой. Такое поведение $P_{ж}/P_{г}$ скорее всего, вызвано увеличением газовой температуры внутри ГРТ за счет повышения вводимой мощности при увеличении ЧСИ. Для поддержания постоянного уровня вводимой мощности, с увеличением ЧСИ необходимо снижать энергию в импульсе накачки. При работе с емкостной накачкой это сопряжено со снижением емкости электродов. Следовательно, реализация режима с высокими частотами повторения импульсов при емкостной накачке затруднительна в трубках с относительно большой электродной емкостью (~0,2 нФ), т. е. с большим диаметром электродов.

Потребляемая от высоковольтного выпрямителя мощность имеет две составляющие: непосредственно, мощность, вкладываемая в ГРТ (колебательный контур ГРТ-Ls), и мощность потерь, выделяемая, преимущественно, в коммутаторе (лампа ГМИ-32Б) и ограничивающем сопротивлении R1 во время открытого состояния лампы (рис. 2). Вкладываемая в ГРТ энергия определяется напряжением на ГРТ и временем протекания тока через ГРТ. В случае емкостного разряда это время будет определяться величиной электродных емкостей, образованных внешним электродом и плазменным слоем внутри электродной зоны трубки. Таким образом, для обеспечения эффективной накачки (минимальных потерь), лампа должна находиться в проводящем состоянии только во время заряда электродных емкостей. Причем сопротивление

лампы в открытом состоянии должно быть минимальное.

Осциллограммы напряжения на ГРТ, тока и генерации для схемы с ламповым коммутатором представлены на рис. 5. Измерялись напряжения U_{VL1} на аноде лампы и U_{C1} на емкости C1. За время проводимости лампы рабочая емкость C1 практически не разряжалась, поэтому U_{C1} считалось постоянным. Напряжение на ГРТ находилось как $U_{V1} = U_{C1} - U_{VL1}$.

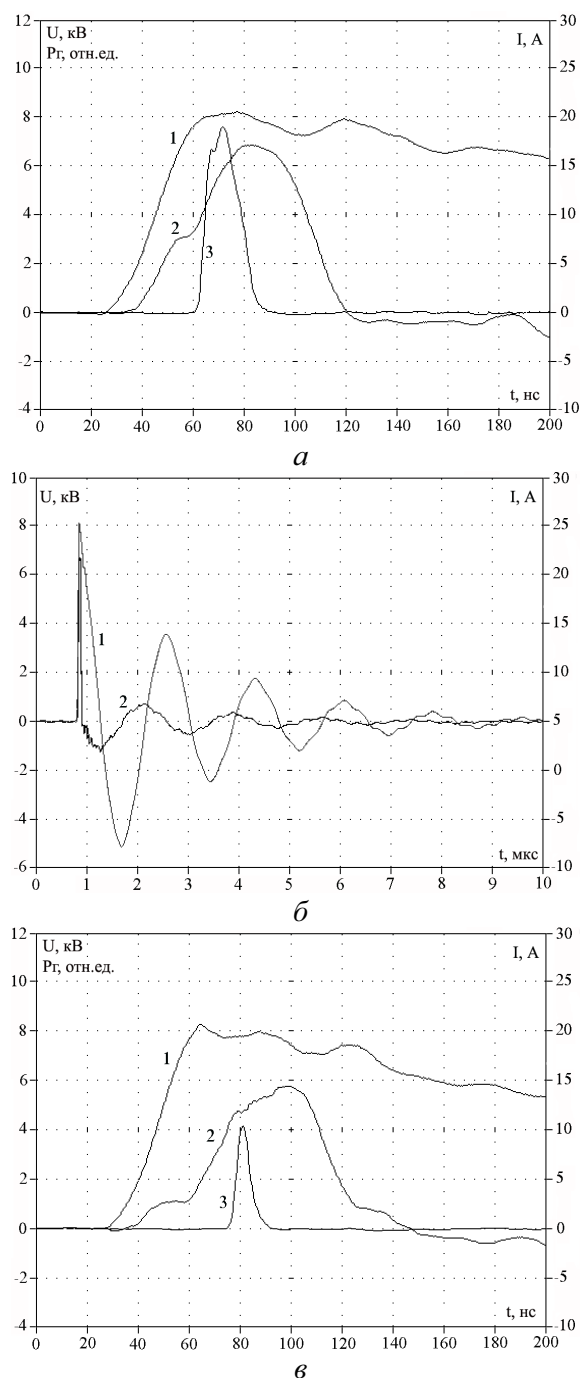


Рис. 5. Осциллограммы импульсов напряжения на ГРТ (1), тока (2) и генерации (3): а, б) без HBr ($P_r=0,75$ Вт), в) с HBr ($P_r=0,2$ Вт). $U_b=8,5$ кВ

Особенностью схем накачки, в которых ГРТ подключается последовательно рабочей емкости и шунтируется индуктивностью на время заряда рабочей емкости, является ударный характер возбуждения. Поэтому напряжение и ток через ГРТ в схеме с ламповым коммутатором (рис. 5, б), как и в схеме прямого разряда накопительного конденсатора и схеме удвоения напряжения Блюмляйна [5, 6], носят колебательный характер. При этом накачка лазерных переходов происходит во время протекания тока заряда электродных емкостей. Дальнейшие колебания напряжения и тока через ГРТ (в данном случае с периодом $\sim 1,8$ мкс) определяются величиной шунтирующей индуктивности L_s и суммарной емкостью $C_2 = C_i + C_p$, где C_i – собственная емкость ГРТ, C_p – паразитная емкость.

В отличие от водородных тиратронов и таситронов, разряд в модуляторной лампе контролируемый и не развивается лавинно, т. е. проводимость лампы зависит от напряжения на аноде. По мере роста напряжения на ГРТ в течение импульса накачки напряжение на аноде лампы ГМИ-32Б падает от величины $\sim U_b$ до нуля. Поэтому ток не может развиться до больших значений, близких к предельным параметрам лампы (~ 50 А). Поэтому величина тока через ГРТ (рис. 4) существенно меньше по сравнению с таситронными схемами накачки [6].

Введение добавки HBr приводит к снижению амплитуды и к значительному затягиванию фронта импульса тока через ГРТ (рис. 5, в), что обычно наблюдается при традиционной накачке CuBr-лазера сильноточным тлеющим разрядом [4]. Однако, в отличие от традиционной накачки, происходит уменьшение, как амплитуды, так и длительности импульса генерации. Средняя мощность генерации существенно снижается (практически до срыва) и не увеличивается с увеличением напряжения источника питания. Излучение на длине волны 510,6 нм практически пропадает, остается только желтая линия 578,2 нм. Аналогичное влияние добавки HBr наблюдается и при работе со схемой прямого разряда накопительного конденсатора с той же ГРТ, средняя мощность генерации при введении HBr существенно уменьшается (см. таблицу). Это связано с малой величиной энерговклада в разряд, которая составляет порядка 2...5 мДж. Из-за потерь энергии на возбуждение молекул HBr при введении добавки, этой энергии оказывается недостаточно для эффективного возбуждения лазерных уровней. Для схемы удвоения Блюмляйна и схемы без внешнего накопительного конденсатора энерговклад составляет 10...20 мДж, соответственно, введение добавки HBr приводит к увеличению мощности генерации (см. таблицу). При этом увеличивается крутизна переднего фронта импульса тока [6].

Заключение

Проведенные исследования показали, что схема накачки на основе модуляторной лампы ГМИ-32Б может успешно применяться для работы

с CuBr-лазерами с емкостным возбуждением. В ГРТ диаметром 1 см достигнута средняя мощность генерации 750 мВт с КПД 0,14 % при потребляемой от выпрямителя мощности менее 0,55 кВт. Несмотря на относительно невысокую среднюю мощность генерации, схема с ламповым коммутатором при работе с ГРТ малого активного объема без добавки HBr по эффективности превосходит рассмотренные ранее схемы накачки CuBr-лазеров с внешними электродами. Следует отметить, что максимальный КПД 0,125 % для данной ГРТ в предшествующих исследованиях имел место в схеме без внешнего накопительного конденсатора при мощности накачки ~1,6 кВт с добавкой HBr (0,067 % без добавки) [6].

Схема с ламповым коммутатором может иметь преимущество при работе с ГРТ с малым диаметром электродов, т. к. обеспечивает относительно высокий КПД при малом энергокладе. В данной схеме при высокой частоте повторения нагрев кварцевой стенки ГРТ в области электродов будет меньше по сравнению с другими схемами накачки. Перспективным направлением дальнейших исследований является изучение возможности применения схем с ламповым коммутатором для накачки CuBr-лазеров с большим активным объемом.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Проекты: РНП.2.1.1.5450, РНП.2.1.2.1425.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батенин В.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Молодых Э.И., Климовский И.И. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. — М.: Научная книга, 1998. — 544 с.
2. Little C.E. Metal Vapor Lasers: Physics, Engineering & Applications. — Chichester: UK, John Wiley & Sons Ltd., 1998. — 620 p.
3. Withford M.J., Brown D.J.W., Mildren R.P., Carman R.J., Marshall G.D., Piper J.A. Advances in copper laser technology: kinetic enhancement // Progress in Quantum Electronics. — 2004. — V. 28. — P. 165–196.
4. Шиянов Д.В., Суханов В.Б., Евтушенко Г.С., Андриенко О.С. Экспериментальное исследование влияния добавок HBr на генерационные характеристики CuBr-лазера // Квантовая электроника. — 2004. — Т. 34. — № 7. — С. 625–629.
5. Суханов В.Б., Федоров В.Ф., Губарев Ф.А., Троицкий В.О., Евтушенко Г.С. Лазер на парах бромида меди, возбуждаемый емкостным разрядом // Квантовая электроника. — 2007. — Т. 37. — № 7. — С. 603–604.
6. Gubarev F.A., Sukhanov V.B., Evtushenko G.S., Fedorov V.F., Shiyonov D.V. CuBr Laser Excited by a Capacitively Coupled Longitudinal Discharge // IEEE J. Quantum Electronics. — 2009. — V. 45. — № 2. — P. 171–177.
7. 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 // Известия Томского политехнического университета. — 2008. — Т. 312. — № 2. — С. 106–107.
8. Суханов В.Б., Евтушенко Г.С., Шиянов Д.В., Чернышев А.И. Саморазогревный CuBr-лазер // Оптика атмосферы и океана. — 2000. — Т. 13. — № 11. — С. 1053–1054.
9. Пат. 2295811 РФ. МПК⁸ H01S 3/22. Способ поддержания и регулирования концентрации галогеноводорода в газоразрядной трубке лазера и газоразрядная трубка лазера на парах галогенидов металлов / О.С. Андриенко, В.Б. Суханов, В.О. Троицкий, Д.Ю. Шестаков, Д.В. Шиянов. Заявлено 09.11.2004; Опубл. 20.03.2007, Бюл. № 8. — 6 с.: ил.

Поступила 04.02.2009 г.