

дальнейшем необходимо отказаться от разделённого во времени измерения значений с витков, вместо этого планируется использовать многоканальный измеритель, в котором значения будут регистрироваться одновременно. Это позволит исключить из процедуры диагностики шаги 1 и 2 и значительно повысит точность измерений.

Повышение точности также позволит изучить динамику поля в момент работы контрактора, системы, увеличивающей эффективность захвата электронов в процесс ускорения.

Список использованных источников

1. Чахлов В.Л. и др. Разработка, организация и применение малогабаритных источников рентгеновского и электронного излучений // Известия Томского политехнического университета–2008– Том 312– № 2–С. 23–32
2. Ананьев Л.М., Воробьев А.А., Горбунов В.И. Индукционный ускоритель электронов - бетатрон– Москва: Госатомиздат–1961–351 с.
3. Родимов Б.Н. Теоретические основы получения больших токов в бетатроне : Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Томск, 1966– 339 с.
4. Носков Д.А. Потенциальная функция фокусирующих сил магнитного поля бетатрона и её практическое применение при настройке ускорителей // Известия ТПИ–1957– Том. 87– С. 151–155
5. Сухарников К.В., Рычков М.М. Анализатор магнитных полей бетатронов // Приборы и техника эксперимента– 2015– С. 132–133

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ АКТИВНЫЕ СРЕДЫ НА ПАРАХ МЕТАЛЛОВ В ЗАДАЧАХ ВИЗУАЛЬНО-ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Торгаев С.Н.^{1,2,3}, Тригуб М.В.^{1,2}, Евтушенко Г.С.¹

¹Томский политехнический университет

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

³Томский государственный университет

Введение

На сегодняшний день многие научно-технические задачи связаны с необходимостью визуального контроля различных объектов и процессов, экранированных мощной широкополосной фоновой засветкой, в режиме реального времени. Примерами таких процессов могут быть – высокотемпературный самораспространяющийся синтез, взаимодействие мощных потоков энергии с поверхностью, сварка, плазма разряда и т.д. Визуализация таких процессов возможна при использовании активных оптических систем с усилителями яркости, например, лазерного монитора [1–3].

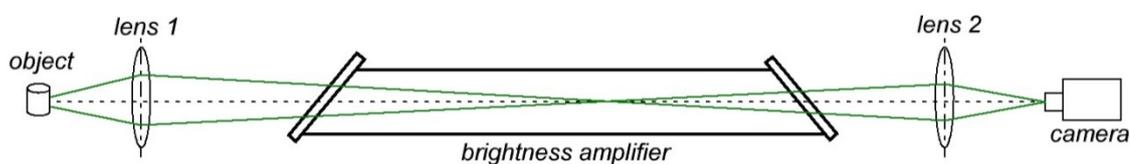
Активные оптические системы, построенные на основе усилителей яркости на парах металлов, обладают рядом достоинств. Такими как высокая спектральная яркость излучения, высокое усиление в узком спектральном диапазоне (2-5 пм), работа в импульсно-периодическом режиме. Для визуализации быстропротекающих процессов необходимо использовать высокочастотный усилитель яркости. Типичная частота следования импульсов излучения усилителей яркости на парах металлов, например, на парах бромида меди, составляет порядка 10-30 кГц. Ограничение частот следования импульсов генерации связано с рядом плазмохимических процессов, протекающих в активном теле усилителя яркости. В ряде работ [4,5] было показано, что получение высоких частот следования импульсов генерации возможно при работе усилителя яркости в режиме пониженного энерговыделения в разряд. В этом случае отрицательное влияние накопительных эффектов в плазме разряда частично нивелируется. Обеспечение такого

режима работы возможно при накачке усилителя яркости высокочастотными импульсами малой длительности (20-50 нс, при типичных длительностях 200-300 нс), а также при работе в слаботочном режиме, т.е. когда ток через газоразрядную трубку (ГРТ) на порядок ниже типичных значений и составляет единицы ампер [6].

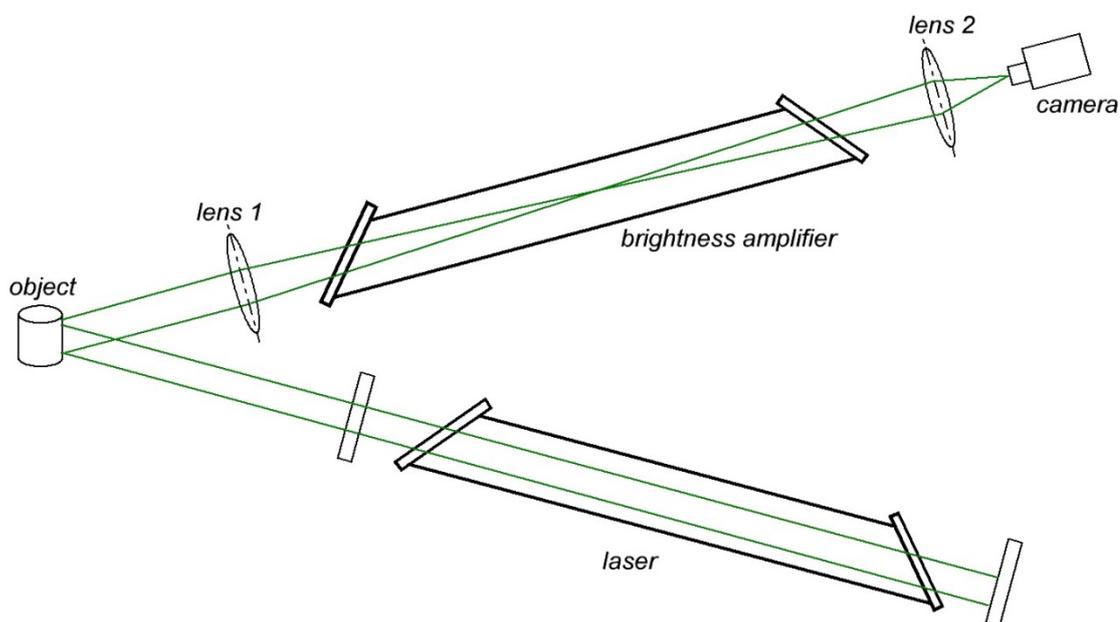
Схемные решения. Анализ расчетных и экспериментальных данных

Отличительная черта активных сред на самоограниченных переходах в парах металлов состоит в том, что они могут эффективно работать как в режиме генерации излучения, так и в режиме усилителя яркости. Причем, работая в режиме усилителя яркости, наряду с высоким коэффициентом усиления активной среды – до 100 Дб/м, активные среды на парах металлов излучают достаточно мощное сверхизлучение, составляющее 20-30% от мощности генерации лазера.

Указанные достоинства активных сред на парах металлов легли в основу создания лазерных проекционных микроскопов, а впоследствии, и лазерных мониторов [1,3,7,8]. Лазерные мониторы могут строиться по двум схемам: моностатической [7] и бистатической [9]. В первой из них активная среда является источником излучения и усилителем яркости, одновременно (Рис. 1,а). В бистатической схеме освещение объекта (подсветка) осуществляется одной активной средой, работающей в режиме генератора (лазера), а усиление – другой аналогичной активной средой (Рис. 1,б).



а



б

Рис. 1. Оптические схемы лазерного монитора: а) моностатическая, б) бистатическая

Высокая частота следования (300 кГц, а затем и 400 кГц) в лазере на парах бромида меди была получена в работах [10,11]. В работе [11] использовалась ГРТ диаметром 0,5 см и длиной 24 см. Впоследствии, в работе [12], при использовании ГРТ диаметром 0,7 см и длиной активной зоны 14 см, была реализована частота следования импульсов генерации до 700 кГц. При этом в указанных работах лазер работал в режиме пониженного

энерговклада в разряд, реализованный за счет накачки активной среды лазера высоковольтными импульсами малой длительности. Было отмечено, что режим высоких частот следования импульсов реализуется в ГРТ малых диаметров. Это связано с необходимостью межимпульсной рекомбинации плазмы за счет диффузионных процессов. Однако применение лазеров (усилителей яркости) с малым диаметром ГРТ в активных оптических системах является неэффективным, в связи с уменьшением поля зрения. Таким образом, актуальной является задача получения высоких частот следования импульсов генерации (и усиления), до 100 кГц и выше, в ГРТ с диаметром более 1 см [13].

В данной работе проводится анализ экспериментальных данных, а также сделаны теоретические оценки энергетических характеристик для двух ГРТ. Параметры эксперимента и ГРТ представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры эксперимента и ГРТ

	ГРТ №1	ГРТ №2
Диаметр ГРТ, см	2	0,7
Длина активной зоны, см	50	14
ЧСИ, кГц	5-40	630
Давление буферного газа (Ne), торр	20	20-25
Температура стенки ГРТ, °С	650	-

Как отмечалось выше, высокие частоты следования импульсов генерации усилителей яркости на парах металлов, в частности на парах меди и бромида меди, возможны при работе в режиме пониженного энерговклада в разряд. Однако при использовании такого режима происходит снижение энергии генерации, что подтверждается, как модельными, так и экспериментальными результатами. На рис. 2 представлены зависимости энергии генерации лазера (зеленая линия 510.6 нм) на парах бромида меди, полученные экспериментально и модельно, при увеличении частоты следования импульсов накачки от 10 до 40 кГц [5] для ГРТ № 1.

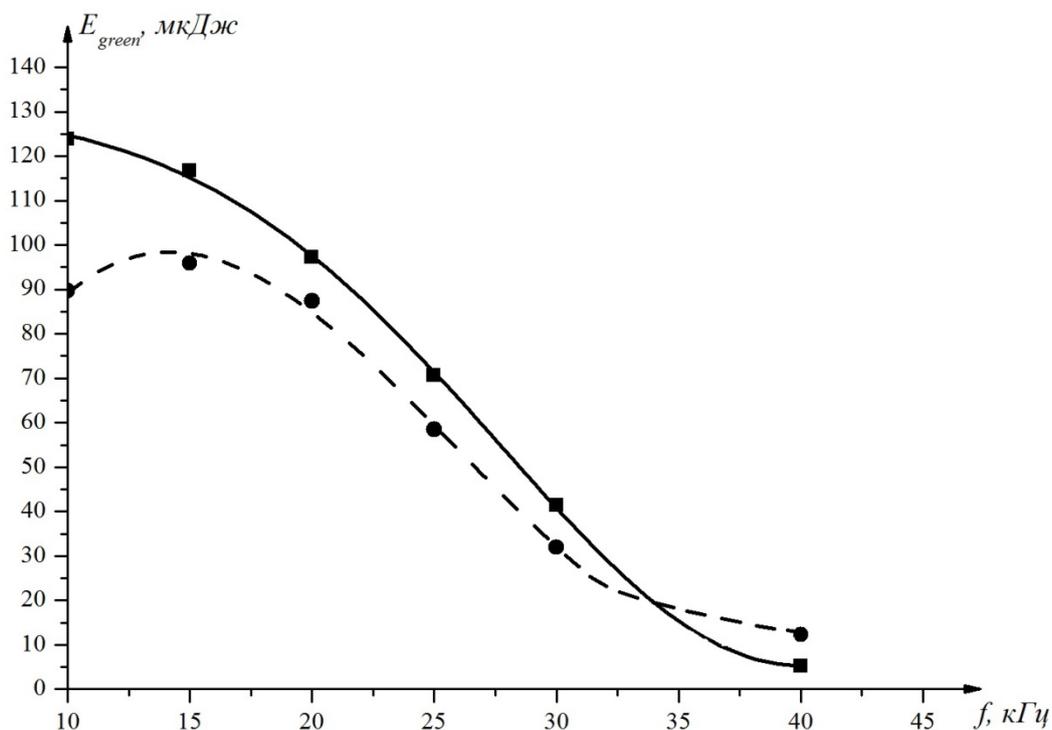


Рис. 2. Зависимость энергии излучения (зеленая линия 510.6 нм) от частоты: эксперимент (сплошная линия), расчет (штриховая линия)

В ряде практических задач снижение энергии генерации (сверхизлучения) может оказаться достаточно критичным. Например, при визуализации объектов с высоким коэффициентом поглощения на длинах волн усилителя яркости. При этом энергии излучения, отражённой от объекта и попавшей в усилитель, может не хватить для усиления. Иными словами, энергия входного сигнала может оказаться меньше энергии собственных шумов усилителя яркости. И в этом случае не будет усиления входного сигнала, несущего изображение. Например, для ГРТ № 1 при частоте следования импульсов генерации 40 кГц энергия собственных шумов усилителя составляет $E_{ш_ГРТ\ №1} = P_{ш_ГРТ\ №1} \cdot \tau = 2.8 \cdot 10^{-12}$ Дж. При этом энергия излучения $E_{ГРТ\ №1} = 5 \cdot 10^{-6}$ Дж (для зеленой линии излучения). А при работе усилителя яркости на частоте 630 кГц (ГРТ № 2) энергия собственных шумов усилителя составляет $E_{ш_ГРТ\ №2} = 8,7 \cdot 10^{-12}$ Дж, при этом энергия излучения $E_{ГРТ\ №2} = 0,12 \cdot 10^{-6}$ Дж (для зеленой линии излучения) [5]. В данном случае экспериментальные данные приведены для активного элемента на парах бромида меди, работающего в режиме генератора. При использовании его в качестве усилителя яркости работа осуществляется в режиме сверхсветимости (в отсутствие резонатора). В этом случае энергия излучения будет меньше примерно в 5 раз. Следовательно, при работе в режиме усилителя яркости энергии излучения для представленных выше ГРТ будут примерно $E_{ГРТ\ №1} = 1 \cdot 10^{-6}$ Дж и $E_{ГРТ\ №2} = 6.8 \cdot 10^{-9}$ Дж для ГРТ №1 и №2, соответственно.

Представленные оценки показывают, что с повышением частоты следования импульсов генерация энергия излучения снижается намного быстрее, чем энергия собственных шумов, но остается выше, что и позволяет проводить визуализацию, хотя и со снижением качества изображения. Импульсная энергия собственных шумов усилителя яркости определяется соотношением [14]:

$$E_{ш} = h \cdot \nu \cdot \Delta \nu \cdot \tau_{инв} \cdot \left(\frac{d^2}{\lambda \cdot L} \right)^2,$$

где $\tau_{инв}$ – длительность импульса генерации, $\Delta \nu$ – ширина линии генерации за счет доплеровского уширения, ν – частота основной линии генерации, d – диаметр ГРТ, L – длина активной зоны ГРТ. Данное соотношение показывает, что энергия шумов усилителя яркости напрямую не зависит от частоты. Повышение частоты следования импульсов генерации приводит к уменьшению длительности инверсии (длительности выходного импульса, $\tau_{инв}$). Однако экспериментальные данные показывают, что при изменении частоты накачки от 10 до 40 кГц длительность лазерного импульса (по полувысоте) уменьшается в 1.5 раза, в то время как энергия излучения снижается более чем в 20 раз (Рис. 2). При получении излучения в ГРТ с диаметром активной зоны более 1 см, что необходимо для применения его в качестве усилителя яркости, необходимо будет снижать энергозатраты, что также приведет к снижению энергии излучения.

Таким образом, с повышением частоты следования импульсов накачки происходит значительное снижение энергии излучения. При использовании активного элемента в качестве усилителя яркости в моноэлектронной схеме лазерного монитора (рис. 1,а) для визуализации объектов с малым коэффициентом отражения на соответствующей длине волны энергия сигнала поступающего в усилитель может оказаться одного порядка с энергией шума. Данный эффект приведет к значительному ухудшению формируемого лазерным монитором изображения. Для визуализации таких объектов целесообразно использовать усилитель яркости с активными добавками, что позволит увеличить энергию генерации. Для визуализации удаленных объектов и объектов с малым коэффициентом отражения целесообразно использовать бистатическую схему лазерного монитора (Рис.

1,б). В этой схеме есть возможность существенно увеличить энергию подсветки за счет использования независимого источника, работающего в режиме генератора и согласованного по времени с усилителем яркости.

Проведенный анализ свидетельствует о возможности построения усилителя яркости с частотой следования до 100 кГц, при работе в режиме пониженного энергозатрата. При этом временное разрешение лазерного монитора составит 10^{-5} с. А применение активных добавок (например, НВг) позволит увеличить эффективность рекомбинации плазмы лазера в межимпульсный период за счет объемных процессов. Что приведет к увеличению апертуры активной среды усилителя яркости и частоты следования импульсов.

Результаты визуализации

Опираясь на проведенные оценки, была реализована моностабильная схема лазерного монитора, позволяющая получать изображения, формируемые одиночным импульсом сверхсветимости. Особенностью являлось то, что усилитель яркости мог работать на частотах до 60 кГц, т.е. с временным разрешением ≈ 16.7 мкс. Для получения достаточного пространственного разрешения решено было использовать ГРТ с внутренним диаметром активной зоны 2 см. Дальнейшее увеличение ЧСИ ограничивалось возможностями используемого источника питания. Результаты визуализации тест-объекта (металлической сетки) при различных ЧСИ представлены на рисунке.

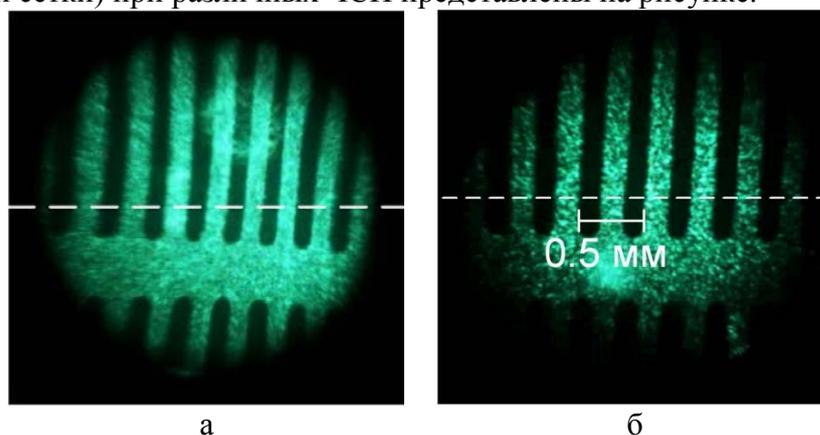


Рис. 3. Визуализация металлической сетки с использованием лазерного монитора при различной ЧСИ: 30 кГц (а) и 60 кГц (б)

В эксперименте с увеличением частоты происходит уменьшение диаметра пучка сверхсветимости с 1.2 см при 30 кГц до 0.5 см на частоте 60 кГц. Визуализация осуществлялась в схеме лазерного монитора с покадровой регистрацией изображения. На рис. 3 видно, что уменьшение диаметра пучка, а, следовательно, и ширины профиля усиления, уменьшает область зрения.

На рис. 4. представлены результаты визуализации развития коронного разряда, полученные посредством лазерного монитора [15] в различные моменты времени.

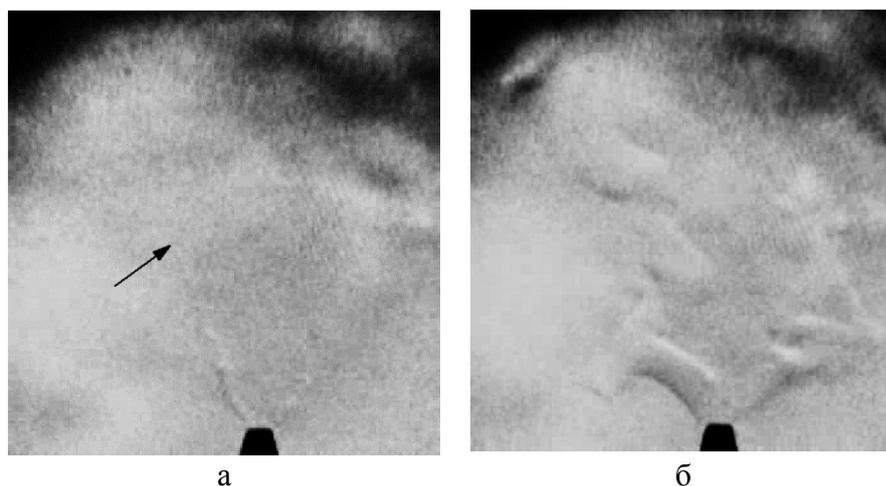


Рис. 4. Визуализация процесса развития коронного разряда в различное время: 375 мкс (а) и 1125 мкс (б)

Видно, что лазерный монитор позволяет визуализировать процессы, происходящие при развитии коронного разряда, изучить их динамику. В частности, используя покадровый режим регистрации, можно рассчитать скорости развития разряда, движения теплового фронта и т.д.

Заключение

Таким образом, в работе показано, что высокочастотные усилители яркости на парах бромида меди могут быть использованы для разработки скоростных лазерных мониторов. Получение высоких частот следования усилителя яркости возможно при реализации режима пониженного энергозатрата в разряд. Проведенные оценки показывают, что в ряде задач целесообразно использование бистатической схемы лазерного монитора, которая позволит осуществлять визуализацию объектов, в том числе удаленных, с малым коэффициентом отражения на рабочей длине волны.

Экспериментально подтверждено, что использование усилителей яркости в составе лазерного монитора с покадровой регистрацией позволяет получать изображения достаточно высокого качества с временным разрешением до 20 мкс.

Авторы работы выражают благодарность старшему научному сотруднику ИОА СО РАН Шиянову Дмитрию Валерьевичу.

Работа поддержана грантом РНФ, проект № 14-19-00175.

Список использованных источников

1. Батенин В.М., Климовский И.И., Селезнева Л.А. Исследование поверхностей электродов угольной дуги во время ее горения//Доклады АН СССР– 1988– Т. 303–№ 4–С. 857–860
2. Прокошев В.Г. Микро- наноструктуры и гидродинамические неустойчивости, индуцированные лазерным излучением на поверхности твердых тел, и их диагностика методами лазерной и зондовой микроскопии: Дисс. ... доктор физ.-мат.наук. Владимир. 2009г. 310с.
3. Evtushenko G.S., Trigub M.V., Gubarev F.A., Evtushenko T.G., Torgaev S.N., Shiyarov D.V. Laser monitor for non-destructive testing of materials and processes shielded by intensive background lighting // Review of Scientific Instruments– 2014– Vol. 85– Issue 3–PP. 1–5
4. Torgaev S.N., Boychenko A.M., Evtushenko G.S., Shiyarov D.V. Simulation of a CuBr–Ne–HBr laser with high pump pulse repetition frequencies // Russian Physics Journal– 2013– Vol. 55 –№. 9.– P. 1039–1045

5. Boichenko A.M., Evtushenko G.S., Nekhoroshev V.O., Shiyanov D.V., Torgaev S.N. CuBr-Ne-HBr laser with a high repetition frequency of the lasing pulses at a reduced energy deposition in the discharge // Physics of Wave Phenomena – 2015– Vol. 23– Issue 1– PP. 1–13
6. Федоров В.Ф., Федоров К.В., Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С. Слаботочный разряд в лазере на парах меди // Лазеры на парах металлов (ЛПМ - 2014): сборник трудов симпозиума, Верхнее Лоо, 22-26 Сентября 2014– Ростов-на-Дону: ЮФУ–2014–С. 84
7. Земсков К.И., Исаев А.А., Казарян М.А., Петраш Г.Г. Лазерный проекционный микроскоп//Квантовая электроника–1974–№ 1– С. 14–15
8. Кузнецов А.П., Бужинский Р.О., Губский К.Л., Савелов А.С., Саранцев С.А., Терехин А.Н. Визуализация плазмоиндуцированных процессов проекционной системой с усилителем яркости на основе лазера на парах меди // Физика плазмы – 2010 – Т.36 – №5 – С.463–472
9. Buzhinskij O.I., Vasiliev N.N., Moshkunov A.I., Slivitskaya I.A., Slivitsky A.A. Copper vapor laser application for surface monitoring of divertor and first wall in ITER // Fusion Engineering and Design – 2002 – No 60– PP. 141–155
10. Евтушенко Г.С., Петраш Г.Г., Суханов В.Б., Федоров В.Ф. CuBr-лазер с частотой следования импульсов до 300 кГц // Квантовая электроника – 1999. – Т.28. – №3. – С. 220–222
11. Евтушенко Г.С., Губарев Ф.А., Федоров В.Ф., 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
12. Nekhoroshev V. O. , Fedorov V. F. , Evtushenko G. S. , Torgaev S. N. Copper bromide vapour laser with a pulse repetition rate up to 700 kHz // Quantum Electronics– 2012– Vol. 42– №. 10– PP. 877–879
13. Trigub M. V. , Shiyanov D. V. , Vlasov V. V. Brightness Amplifiers with PRF up to 100 kHz // 15th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM-2014): proceedings, Алтай, 30 June-4 July 2014– Novosibirsk: NSTU–2014– PP. 301–304
14. Пасманик Г.А., Земсков К.И., Казарян М.А. и др. Оптические системы с усилителями яркости// ИПН АФ СССР. Горький, 1988. –173 с.
15. Рыбка Д. В. , Андроников И. В. , Евтушенко Г. С. , Козырев А. В. , Кожевников В. Ю. , Костыря И. Д. , Тарасенко В. Ф. , Тригуб М. В. , Шутько Ю. В. Коронный разряд в воздухе атмосферного давления при модулированном импульсе напряжения длительностью 10 мс // Оптика атмосферы и океана– 2013– Т. 26– №. 1 – С. 85–90

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРОВЕДЕНИЯ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Герасимов С.И. , Сыч Т.В., Кулешов В.К.¹

Сибирский государственный университет путей сообщения

¹Томский политехнический университет

Акустико-эмиссионный (АЭ) метод контроля является перспективным методом неразрушающего контроля, который находит широкое применение при контроле литых деталей, сосудов и цистерн, трубопроводов. Наиболее ответственным узлом в акустико-эмиссионном канале регистрирующей аппаратуры является преобразователь акустической эмиссии, который преобразует акустическое смещение поверхности объекта контроля (ОК) в электрическое напряжение, поступающее в АЭ систему. АЭ преобразователи выполняются на основе пьезоэлектрической керамики, работающей на