

СИСТЕМА СИНХРОНИЗАЦИИ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОГО РЕЖИМА РАБОТЫ АКТИВНЫХ СРЕД НА САМООГРАНИЧЕННЫХ ПЕРЕХОДАХ В ПАРАХ МЕТАЛЛОВ

© 2019 г. М. В. Тригуб^{a, b}, Н. А. Васнев^{a, *}, Г. С. Евтушенко^{a, b}, В. А. Димаки^a

^aИнститут оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
Россия, 634055, Томск, пл. Академика Зуева, 1

^bТомский политехнический университет
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 30

*e-mail: vasnev.nickol@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.04.2018 г.

После доработки 09.04.2018 г.

Принята к публикации 05.06.2018 г.

Представлены результаты разработки системы синхронизации (модулятора) двух активных элементов на парах бромида меди. Описаны основные особенности ее конструкции и работы. Работоспособность устройства была исследована в системе “генератор–усилитель”, для которой была получена усилительная характеристика. Модулятор формирует импульсы запуска на сетки тиратронов ТГИ1-1000-25 с длительностью фронта не более 100 нс. Временной сдвиг между запуском тиратронов регулируется вариометром с точностью позиционирования не хуже 1 нс. Максимальный временной сдвиг между импульсами составляет 55 нс и может быть увеличен за счет использования дополнительных кабельных линий задержки.

DOI: 10.1134/S0032816218060307

ВВЕДЕНИЕ

В лазерной технике широко распространены системы “генератор–усилитель” или МОРА-системы (Master Oscillator Power Amplifier, содержащие генератор излучения и усилитель мощности) [1, 2]. Их использование позволяет успешно решать ряд задач, в том числе, получение высокой пиковой мощности лазерного излучения с сохранением качества формируемого пучка [3], формирование ультракоротких импульсов, построение активных лазерных систем новых типов [4]. Системы на основе лазеров и усилителей на парах металлов нашли широкое применение для прецизионной микрообработки металлов, разделения изотопов и др. [5–8]. Наряду с усилением и преобразованием лазерного излучения система “генератор–усилитель” была использована и для создания активной оптической системы – бистатического лазерного монитора для неразрушающего контроля изделий и диагностики быстропротекающих процессов [9]. В работах [9–12] продемонстрированы преимущества бистатической схемы лазерного монитора над моностатической: визуализация удаленных объектов, увеличение области зрения и пространственного разрешения, возможность независимого изменения параметров подсветки и

усиления. Принципиальной особенностью таких активных оптических систем является то, что они построены на базе активных сред на парах металлов, обладающих высокой спектральной яркостью излучения и усиления. Это позволяет осуществлять визуализацию быстропротекающих процессов, экранированных мощным фоновым излучением. Для функционирования лазерных систем, содержащих несколько активных элементов, необходима синхронизация их работы. В случае бистатического лазерного монитора речь идет о согласовании работы усилителя яркости и источника подсветки. Для активных сред на самоограниченных переходах в парах металлов длительность импульсов излучения (усиления) составляет 20–40 нс [2, 13]. В течение этого времени импульс от источника подсветки (генератора) должен достигнуть объекта исследования, отразиться и поступить на вход усилителя яркости во временной интервал, соответствующий режиму усиления, с тем, чтобы яркость формируемого изображения была увеличена.

В данной работе представлена система синхронизации двух активных элементов на парах бромида меди, использование которых более предпочтительно, чем на парах чистой меди [5, 7, 8].

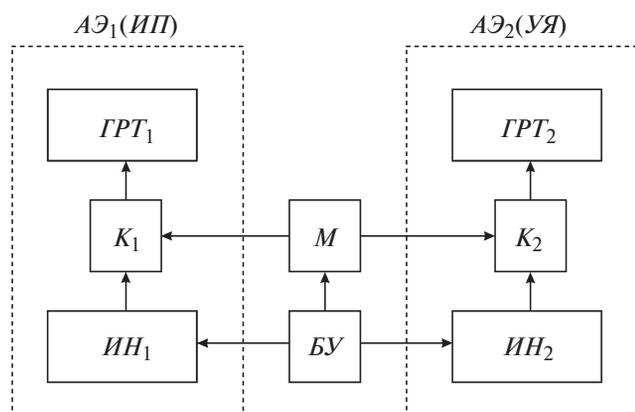


Рис. 1. Структурная схема разрабатываемой системы синхронизации. $AЭ_1$, $AЭ_2$ – активные элементы (ИП – источник подсветки, УЯ – усилитель яркости); БУ – блок управления; М – модулятор; K_1 , K_2 – коммутационные приборы; $ГРТ_1$, $ГРТ_2$ – газоразрядные трубки; $ИН_1$, $ИН_2$ – источники накачки.

Приведены экспериментальные результаты ее использования в системе “генератор–усилитель”.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ

Синхронизация активных элементов может быть обеспечена двумя способами. Во-первых, за счет синхронизации по цифровому каналу управления, формирующему необходимые импульсы для всех блоков системы “генератор–усилитель”. Во-вторых, путем синхронизации высоковольтных импульсов запуска коммутаторов (тиратронов) источников накачки каждого активного элемента. Первый метод может быть легко реализован с использованием современных микроконтроллеров, но передача цифровых импульсов через последующий тракт усиления в модуляторе неизбежно сопровождается джиттером включения тиратрона.

Второй вариант более сложный с технической точки зрения. Однако он позволяет исключить все неконтролируемые задержки и джиттеры усилителей сигналов (драйверов), входящих в блоки управления активными элементами.

На рис. 1 приведена структурная схема разработанной системы синхронизации. Блок управления (БУ) формирует общий высоковольтный импульс запуска, поступающий на управляющие электроды коммутационных приборов K_1 и K_2 с регулируемой временной задержкой друг относительно друга. Отдельная регулировка каждого импульса запуска тиратрона позволяет с высокой точностью обеспечить синхронизацию работы двух активных элементов ($AЭ_1$ и $AЭ_2$), которые в

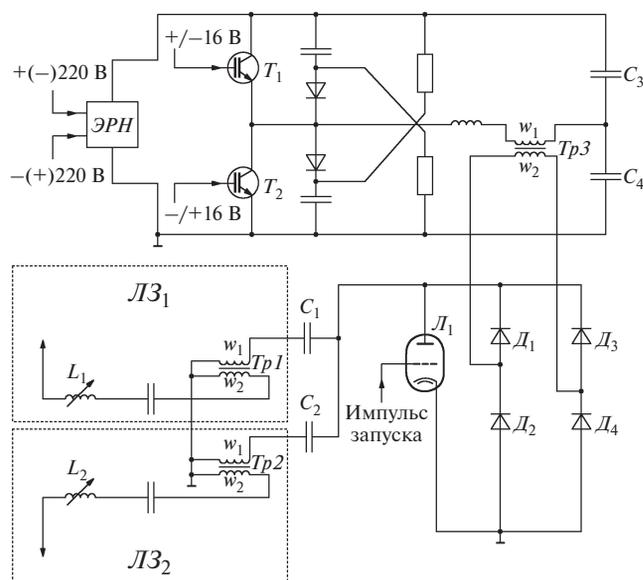


Рис. 2. Принципиальная схема высоковольтного модулятора. T_1 , T_2 – IRG4PH50UD; L_1 – ТГИ1-100-8; D_1 – D_4 – HER-308, 20 штук; C_1 , C_2 – КВИЗ-2200 пФ, C_3 , C_4 – К76-2-0.15 мкФ. ЭРН – электронный регулятор напряжения, $LЗ_1$, $LЗ_2$ – линии задержки.

случае бистатического лазерного монитора обозначены в соответствии с той функцией, которую они выполняют: ИП (источник подсветки) и УЯ (усилитель яркости). Разряд конденсаторов на соответствующую газоразрядную трубку (ГРТ) осуществляется при переключении ключей K_1 и K_2 .

Принципиальная схема высоковольтного модулятора М приведена на рис. 2. Схема представляет собой полумостовой инвертор на двух IGBT-транзисторах T_1 и T_2 и конденсаторах C_3 и C_4 , эквивалентная емкость каждого составляет 0.75 мкФ. Высоковольтный трансформатор $Tr3$ с коэффициентом трансформации 10 выполнен на двух ферритовых кольцах $K125 \times 80 \times 12$ марки 2000НМ. Сформированный сигнал выпрямляется с помощью моста D_1 – D_4 и заряжает конденсаторы C_1 и C_2 через первичную обмотку импульсных трансформаторов $Tr1$ и $Tr2$. Логика работы транзисторов T_1 , T_2 и тиратрона L_1 задается цифровой схемой управления на базе микроконтроллера ATmega8. Использование развязки с помощью оптоволоконных линий между блоком управления, модулятором и источниками накачки обеспечивает помехоустойчивость и электробезопасность.

Импульсы запуска для тиратронов источников накачки активных элементов (выходы 1 и 2) формируются тиратроном L_1 . Коммутация L_1 происходит после заряда накопительных емкостей

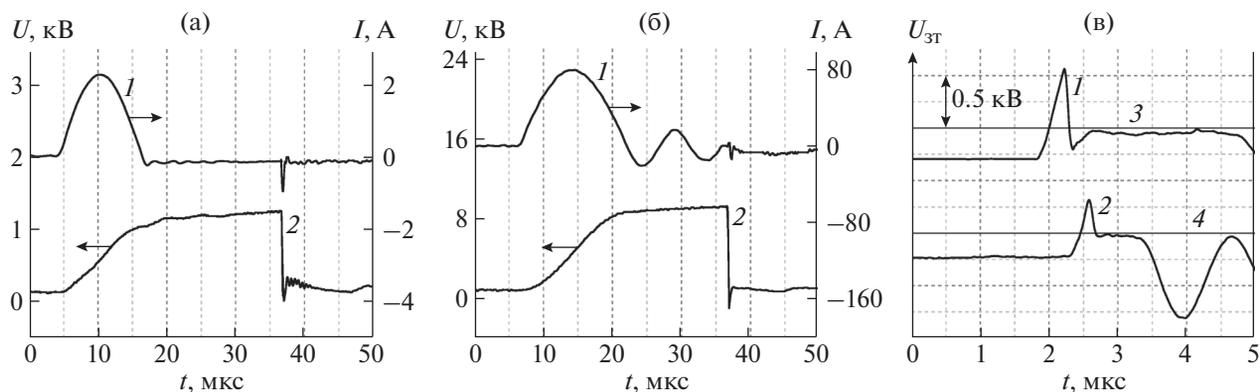


Рис. 3. Осциллограммы, поясняющие работу системы синхронизации: **а** – зарядный ток накопительного конденсатора (1) и анодное напряжение тиратрона модулятора (2); **б** – зарядный ток накопительного конденсатора (1) и анодное напряжение тиратрона источника накачки (2); **в** – импульсы запуска тиратронов модулятора (1) и источника накачки (2) с указанными нулевыми уровнями напряжения (3) и (4) соответственно.

(C_1 , C_2) до их максимальных значений (рис. 3а). Такой режим работы инвертора является наиболее предпочтительным, поскольку он позволяет минимизировать динамические потери в схеме, а также обеспечивает тиратрону время для восстановления электрической прочности, что способствует увеличению его срока службы [14, 15]. Временной сдвиг между импульсами на выходах 1 и 2 регулируется в блоке задержки (линии задержки LZ_1 и LZ_2) с помощью вариометров.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ

Тестирование модулятора проводилось при работе на активную нагрузку (резисторы типа ТВО с сопротивлением 3.9 кОм) и сетки тиратронов источников накачки активных элементов $AЭ_1$ и $AЭ_2$ соответственно. Источники выполнены по схеме с импульсным зарядом рабочей емкости с ее последующим разрядом на ГРТ [14]. В качестве коммутаторов использовались тиратроны ТГИ1-1000-25 (K_1 и K_2 на рис. 1).

Импульсы токов, напряжений и оптического излучения регистрировались с помощью датчика тока Pearson Current Monitors 8450, измерительного щупа Tektronics P6015A, коаксиальных фотоэлементов ФЭК-14К и фотодиодов Thorlabs DET10A, сигналы которых фиксировались 4-канальным осциллографом LeCroy (WJ324 A). Средняя мощность излучения измерялась с помощью приемника Ophir 30C-SH.

На рис. 3а приведены осциллограммы зарядного тока конденсаторов C_1 и C_2 , а также напряжения на аноде тиратрона L_1 модулятора. Аналогичные осциллограммы работы одного из источников накачки представлены на рис. 3б. Видно, что время заряда накопительных конденсаторов

модулятора до максимального значения составляет 12 мкс, а для восстановления электрической прочности тиратрона необходимо обеспечивать паузу между импульсами не менее 8 мкс. Исходя из этого, предельная частота коммутации тиратрона для разработанного модулятора составляет 50 кГц.

При коммутации тиратрона ТГИ1-100-8 формируются импульсы запуска источников возбуждения. Данные, представленные на рис. 3в, позволяют оценить временную задержку между коммутацией тиратрона модулятора (ТГИ1-100-8) и тиратрона источника накачки (ТГИ1-1000-25). Длительность фронта каждого из импульсов запуска не превышает 100 нс. Осциллограммы работы второго источника накачки идентичны. При таком включении оба источника работали стабильно на всем диапазоне изменения индуктивности вариометра. Таким образом, возможность синхронного управления источниками накачки лазеров на парах бромида меди была подтверждена на практике.

АПРОБАЦИЯ УСТРОЙСТВА В СИСТЕМЕ “ГЕНЕРАТОР–УСИЛИТЕЛЬ”

Испытание разработанной системы синхронизации было проведено в системе “генератор–усилитель”, схема которой приведена на рис. 4. Данная система аналогична той, что детально описана в работе [16]. В качестве активных элементов были использованы среды на парах бромида меди с активной добавкой НВг. Габаритные размеры ГРТ: для задающего генератора – $\varnothing 5$ см, длина активной зоны 90 см; для усилителя мощности – $\varnothing 5$ см, длина – 50 см. Частота следования импульсов возбуждения составила 12 кГц. Тепловой режим активных элементов поддерживался

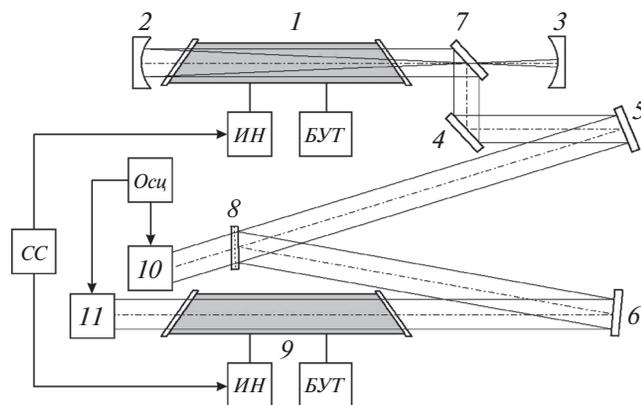


Рис. 4. Схема экспериментальной установки «генератор–усилитель». 1 – задающий генератор; 2–6 – «глухие» зеркала; 7 – зеркало с отверстием; 8 – плоскопараллельная пластина; 9 – усилитель мощности; 10, 11 – коаксиальные фотоэлементы ФЭК-14К; СС – система синхронизации, ИН – источники накачки, БУТ – трехканальные блоки управления температурой, Осц – осциллограф.

трехканальным блоком управления температурой (БУТ): температура внешних стенок газоразрядных трубок ГРТ составляла 680°C , контейнеров с $\text{CuVg} - 500^{\circ}\text{C}$ и контейнеров с $\text{HВг} - 120^{\circ}\text{C}$.

В ходе экспериментов была определена зависимость мощности излучения на выходе усилителя от временного сдвига (t_c) между импульсом задающего генератора и импульсом сверхсветимости усилителя (рис. 5). Временной сдвиг варьировался за счет изменения индуктивности в разрядном контуре модулятора по каждому каналу. Максимальная задержка между импульсами достигает 55 нс. Подстройка временного сдвига обеспечила поступление импульса излучения генератора на вход усилителя в момент максимальной инверсной населенности – об этом позволяет судить мощность излучения на выходе системы. Средняя мощность на входе усилителя составляла 430 мВт. Из полученной зависимости видно, что мощность достигает наибольшего значения при временном сдвиге в 19 нс – такой сдвиг является оптимальным с точки зрения получения максимального коэффициента усиления в разработанном лабораторном макете системы «генератор–усилитель». Отрицательный временной сдвиг означает опережение импульса сверхизлучения усилителя относительно импульса излучения задающего генератора. При расстройке сигнала генератора +25 нс и –15 нс мощность излучения системы падает до 1.36 Вт и 1.14 Вт соответственно. Временной сдвиг между импульсом генератора и импульсом сверхсветимости усилителя определялся с учетом временной задержки, которая требуется для прохождения пучком оптического пути от плоскопараллельной пластины 8 (рис. 4) до зер-

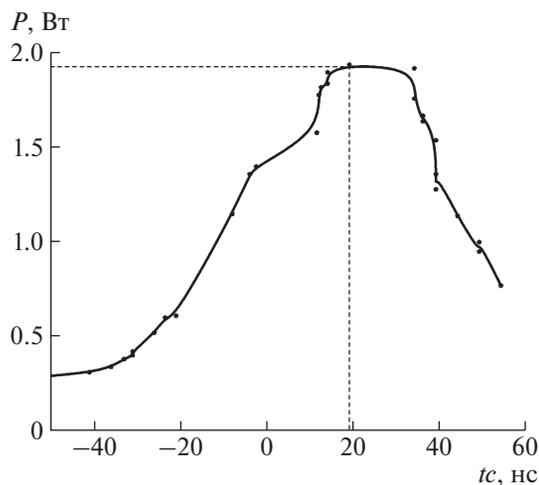


Рис. 5. Усилительная характеристика – зависимость мощности излучения системы от временного сдвига между импульсами генератора и импульсами сверхсветимости усилителя.

кала 6 и затем до активного объема усилителя мощности 9. Длина оптической трассы составила порядка 2 м, что в пересчете на временной сдвиг выражается в запаздывании сигнала задающего генератора на 6 нс. В работе [5] синхронизация световых сигналов осуществлялась с точностью не хуже ± 2 нс. Согласно полученной усилительной характеристике (рис. 5) точность позиционирования в реализованной системе достигает 1 нс. В частности, при изменении сдвига на 1 нс в области максимума усиления мощность уменьшается на 10%.

На рис. 6 представлены импульсы излучения генератора, импульс сверхсветимости усилителя и усиленный сигнал при различном временном сдвиге, обеспечиваемым модулятором.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана система синхронизации двух активных лазерных элементов на основе сред на переходах атомов металлов. Система содержит как цифровую схему управления, так и высоковольтный модулятор. Длительность фронта импульсов запуска тиратронов каждого из двух источников накачки не превышает 100 нс. Время сдвига между импульсами запуска регулируется вариометром, а точность позиционирования составляет порядка 1 нс. Максимальный временной сдвиг между импульсами составляет 55 нс и может быть увеличен за счет использования дополнительных кабельных линий задержки.

Работоспособность системы синхронизации подтверждена при работе на активную нагрузку, на тиратроны источников накачки и непосред-

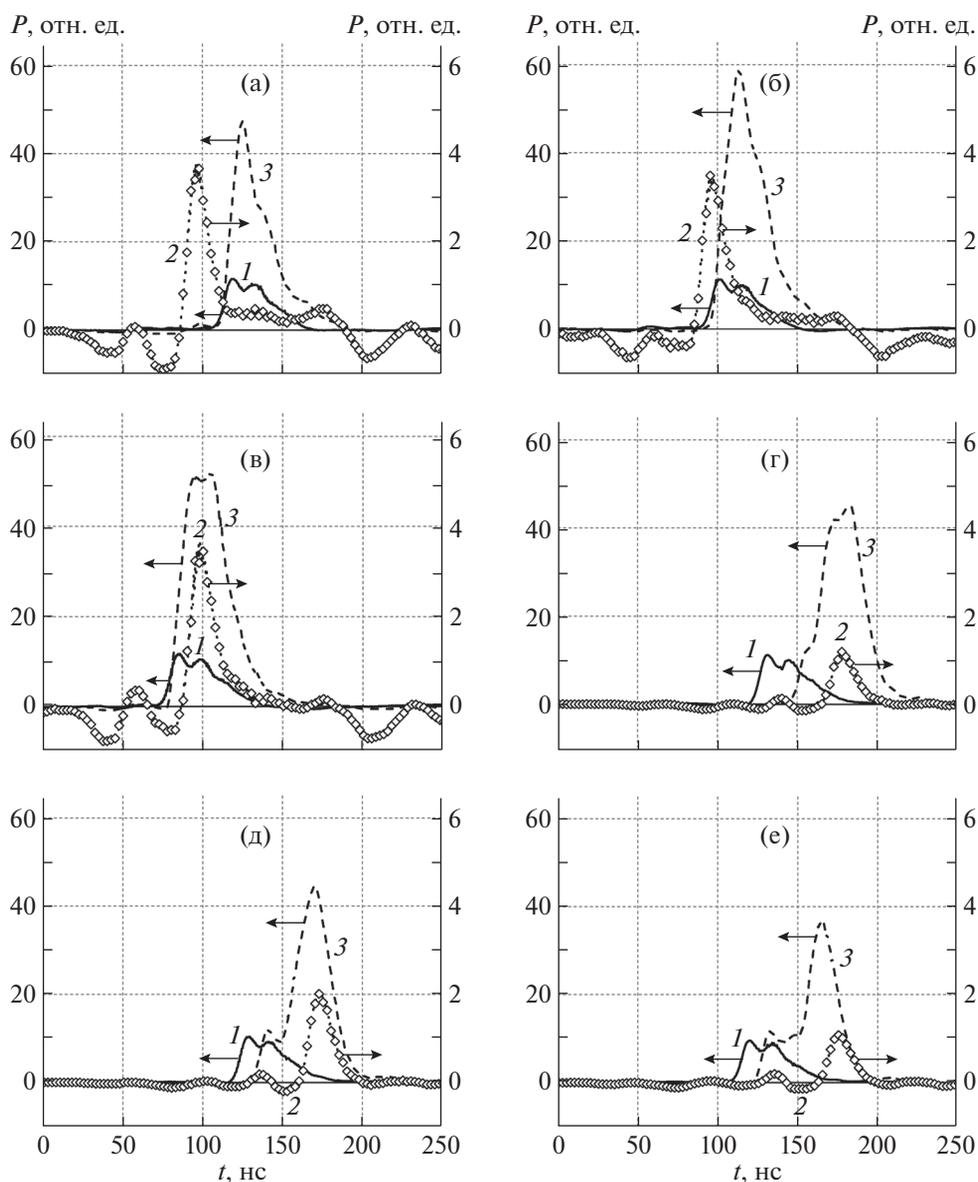


Рис. 6. Осциллограммы импульсов задающего генератора (1), импульса сверхсветимости усилителя (2) и усиленного сигнала (3). Временной сдвиг между импульсами (t_c) и средняя мощность излучения системы (P_{cp}), которая является критерием определения оптимального временного сдвига: $t_c = -21$ нс, $P_{cp} = 0.61$ Вт (а); -5 нс, 1.15 Вт (б); 19 нс, 1.94 Вт (в); 42 нс, 1.54 Вт (г); 45 нс, 1.14 Вт (д); 54 нс, 0.78 Вт (е).

ственно при работе в системе “генератор—усилитель”. Тактирование системы синхронизации в условиях эксперимента осуществлялось от внешнего сигнала задающего генератора Г5-63. Данная система позволяет синхронизировать активные элементы бистатического лазерного монитора: источника подсветки и усилителя яркости. Система может быть подвергнута дальнейшей оптимизации, которая заключается в обеспечении работы от внутреннего тактового сигнала микроконтроллера с возможностью регулировки временных и частотных параметров импульсов

управления. Изготовление высоковольтных источников накачки выполнено в рамках базового бюджета финансирования, проект № АААА-А17-117021310150-0.

Исследование усилительных характеристик выполнено в рамках гранта РФФИ № 14-19-00175.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Webb C.E., Jones J.D.C. Handbook of Laser Technology: Applications. Bristol and Philadelphia: IoP Publishing, 2004.*

2. *Little C.E.* Metal Vapor Lasers: Physics, Engineering & Applications. Chichester (UK): John Wiley & Sons Ltd, 1998.
3. *Зубов В.В., Лябин Н.А., Чурсин А.Д.* // Квантовая электроника. 1986. Т. 13. № 12. С. 2431.
4. *Chuykov V.V.* // 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). 2017. P. 1. doi 10.1364/CLEO_AT.2017.ATu3C.2
5. *Лябин Н.А.* Автореферат дис. ... д-ра техн. наук. МГТУ им. Н.Э. Баумана. М., 2014. 36 с.
6. *Бохан П.А., Бучанов В.В., Закревский Д.Э., Казарян М.А., Прохоров А.М., Фатеев Н.В.* Оптическое и лазерно-химическое разделение изотопов в атомарных парах. М.: Физматлит, 2010. ISBN 978-5-9221-1151-5.
7. *Lima S.M., Behrouzinia S., Salem M.K., Elahei M., Khorasani K., Dorranean D.* // Optical and Quantum Electronics. 2017. V. 49(11). doi 10.1007/s11082-017-1203-4
8. *Astadjov D.N., Stoychev L.I., Dixit S.K., Nakhe S.V., Sabotinov N.V.* // IEEE Quantum Electronics. 2005. V. 41. P. 1097. doi 10.1109/JQE.2005.850701
9. *Тригуб М.В., Торгаев С.Н., Евтушенко Г.С., Троицкий В.О., Шиянов Д.В.* // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. Вып. 12. С. 51.
10. *Исаков В.К., Калугин М.М., Парфенова Е.Н., Потанов С.Е.* // Журн. техн. физики. 1983. Т. 53. Вып. 4. С. 704.
11. *Земсков К.И., Казарян М.А., Матвеев В.М., Петраш Г.Г., Самсонова М.П., Скрипниченко А.С.* // Квантовая электроника. 1984. Т. 11. № 2. С. 418.
12. *Батенин В.М., Глина В.Ю., Климовский И.И., Селезнева Л.А.* // Техника высоких температур. 1991. Т. 29. Вып. 6. С. 1204.
13. *Тригуб М.В., Федоров К.В., Евтушенко Г.С.* // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 09. С. 850.
14. *Троицкий В.О., Димаки В.А., Филонов А.Г.* // ПТЭ. 2016. № 3. С. 57. doi 10.7868/S0032816216030150
15. *Тригуб М.В., Огородников Д.Н., Димаки В.А.* // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 12. С. 1112.
16. *Gubarev F.A., Troitskiy V.O., Trigub M.V., Sukhanov V.B.* // Optics Communication. 2011. V. 284. № 10–11. P. 2565.