

ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 535:371.623

Частотно-импульсное кодирование генерации CuBr-лазера

Ф.А. Губарев^{1,2}, Г.С. Евтушенко^{2*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

Поступила в редакцию 8.09.2014 г.

Исследованы режимы работы CuBr-лазера при частотно-импульсной модуляции излучения. Такой способ модуляции может использоваться при реализации атмосферных бистатистических каналов связи. Модуляция осуществлялась в соответствии с цифровым кодом, поступающим с персонального компьютера. Представлены экспериментальные результаты по влиянию передаваемого цифрового кода на энергию в импульсах генерации при различных величинах несущей частоты и отклонения периода повторения импульсов от периода несущей частоты. Показано, что в зависимости от режима работы лазера может наблюдаться существенное (до 17%) варьирование энергии генерации при передаче логических «0» и «1».

Ключевые слова: лазер на парах металла, CuBr-лазер, оптическая связь, загоризонтная связь, беспроводная связь, частотная модуляция излучения; metal-vapor laser, copper-bromide laser, optical communication, wireless communication, over-the-horizon link, pulse-frequency modulation.

Введение

Лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов (ЛПМ) находят применение для решения ряда практических задач, таких как микрообработка материалов, импульсное воздействие на среду, дистанционное зондирование атмосферы, усиление яркости изображения и др. [1–4]. ЛПМ, в частности лазеры на парах бромида меди, позволяют получать энергию в импульсе генерации – единицы миллиджоулей, что делает их подходящими для реализации каналов атмосферно-оптической связи (АОС) [5].

Существует два варианта реализации канала АОС: а) когда передатчик и приемник излучения располагаются в зоне прямой видимости и б) не в зоне прямой видимости (в частности, загоризонтная связь) [5–10]. В загоризонтной связи используется сигнал, отраженный от атмосферных объектов, например аэрозолей. Такая система позволяет передавать информацию на большие расстояния. Наиболее длинная известная авторам линия АОС реализована между островом Тасмания и материковой Австралией и составляет 288 км [7]. Авторами реализована передача данных в режиме частотно-импульсной модуляции с несущей частотой 1 кГц. В качестве передатчика применялся блок сверхъярких светодиодов.

Частота следования импульсов генерации лазеров на парах металлов, в частности лазеров на парах бромида меди, достигает сотен килогерц [11]. Это позволяет существенно увеличить скорость пе-

редачи данных. При этом высокая энергия в импульсе генерации дает возможность получения сигнала-отклика, достаточного для устойчивого приема с использованием ФЭУ [5].

Впервые частотно-импульсное кодирование излучения лазера на парах бромида меди было реализовано в работе [10]. Передатчик и приемник излучения располагались в зоне прямой видимости. В работе [5] сообщается об успешной реализации линии АОС с использованием данного типа лазеров и передаче текстовой информации в цифровом формате на расстояние более 10 км. Частота работы лазера (несущая частота) составляла 15 кГц, отклонение периода повторения импульсов от периода несущей частоты при кодировании информации равнялось ± 1 мкс. Авторами работы [5] отмечается наличие ошибок при передаче информации, связанных с изменением оптической плотности атмосферного объекта (дымового шлейфа) или аппаратурными ошибками. Возможной причиной ошибок может являться изменение энергии в импульсах генерации лазера в процессе передачи информации. Меньшей энергии в импульсе генерации будет соответствовать меньшее соотношение сигнал-шум при приеме.

В связи с этим в настоящей статье рассмотрено влияние передаваемой информации, т.е. изменений периода следования импульсов в процессе передачи информации, на энергию генерации CuBr-лазера.

Техника эксперимента

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. В качестве источника излучения использовался лазер на парах бромида меди, аналогичный

* Федор Александрович Губарев (gubarevfa@tpu.ru); Геннадий Сергеевич Евтушенко (ime@tpu.ru).

применяемому в работе [5] и исследованному в работах [12–14]. Активная область газоразрядной трубки (ГРТ) имела длину 90 см, внутренний диаметр 5 см.

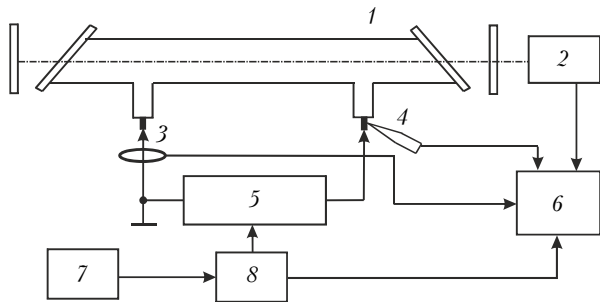


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – лазер; 2 – фотоприемник; 3 – датчик тока; 4 – высоковольтный щуп; 5 – импульсный источник питания; 6 – осциллограф; 7 – персональный компьютер; 8 – интерфейсный блок

Применялся независимый нагрев активной зоны ГРТ и контейнеров, что обеспечивало постоянный температурный режим независимо от параметров возбуждения. Эксперименты проводились как без добавки НВг, так и с активной добавкой НВг, вводимой для повышения средней мощности генерации и кнд [2]. Средняя мощность генерации при частоте следования импульсов (ЧСИ) 19,2 кГц и мощности накачки 1,2 кВт (мощность, потребляемая высоковольтным импульсным источником питания от сети) составляла 5,1 Вт без добавки НВг. В этом режиме проводилась калибровка фотоэлемента ФК-22, который использовался для регистрации импульсов генерации.

С добавкой НВг средняя мощность генерации составляла 9 Вт при мощности накачки 1,4 кВт. Источник накачки лазера реализован на основе схемы прямого разряда накопительного конденсатора через тиратрон (ТГИ1-1000/25). Величина емкости накопительного конденсатора составляет 500 пФ. Заряд накопительного конденсатора осуществляется импульсно и управляется микроконтроллером [13]. Схема управления источником накачки имеет вход синхронизации, позволяющий контролировать период следования импульсов возбуждения.

Для записи осциллограмм применялся цифровой осциллограф LeCroy WJ-324. Регистрация импульсов тока и напряжения производилась с помощью датчика тока Pearson Current Monitors 8450 и пробника напряжения Tektronix P6015A. Средняя мощность генерации измерялась прибором Ophir 30C-SH.

Интерфейсный блок (см. рис. 1), реализованный на основе микроконтроллера AVR Atmega16, служит для формирования импульсов запуска для схемы управления лазером. Схема интерфейсного блока и некоторые результаты исследования режима модуляции излучения CuVg-лазера представлены в работе [15]. Лазер работает в двух режимах: обычный режим и режим передачи данных. В обыч-

ном режиме интерфейсный блок формирует импульсы запуска с постоянным периодом повторения, соответствующим несущей частоте. Данный режим использовался во время разогрева лазера и выхода на номинальный режим генерации. Исследования проводились на трех несущих частотах f_c : 19,2 (период несущей частоты $T_c = 52$ мкс), 15 (66,7 мкс) и 10 кГц (100 мкс).

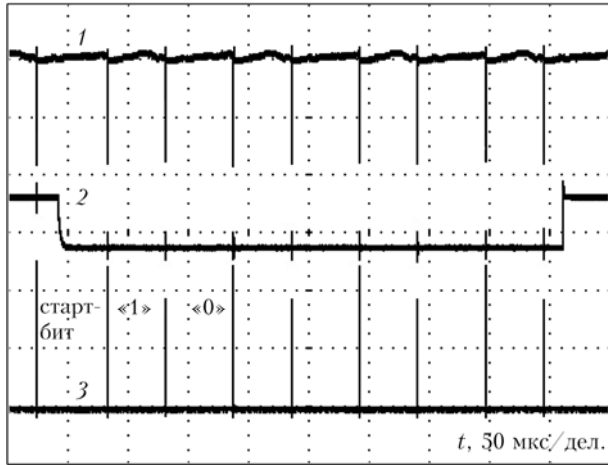
В режиме передачи данных интерфейсный блок принимает данные с персонального компьютера и в зависимости от того, какие данные передаются, изменяет временной интервал между импульсами. Если передается логическая единица, то период уменьшается, если передается логический ноль, то увеличивается. Поскольку при передаче данных изменяется время между импульсами, для устойчивой синхронизации осциллографа интерфейсным блоком формируется дополнительный импульс синхронизации перед началом передачи байта информации. Нами рассмотрены три варианта частотно-импульсной модуляции излучения с разным отклонением ΔT от периода несущей частоты: ± 4 , ± 2 и ± 1 мкс. В табл. 1 приведены временные параметры последовательности импульсов при передаче логического «0» и логической «1», T^0 – время между импульсами возбуждения при формировании «0», T^1 – время между импульсами возбуждения при формировании «1». При формировании старт-бита, необходимого для асинхронной передачи данных, время между импульсами T^s увеличивалось дополнительно на 2 мкс.

Таблица 1

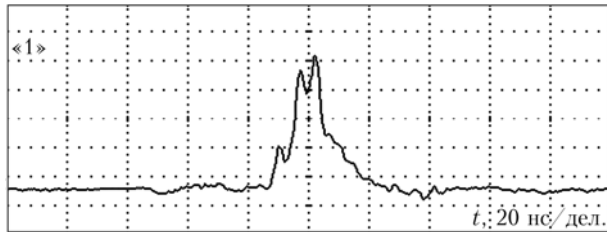
Параметры частотно-импульсного кодирования генерации CuVg-лазера

f_c , кГц	ΔT , мкс	T^0 , мкс	T^1 , мкс	T^s , мкс
19,2	± 1	53	51	55
	± 2	54	50	56
	± 4	56	48	58
15	± 1	67,7	65,7	69,7
	± 2	68,7	64,7	70,7
	± 4	70,7	62,7	72,7
10	± 1	101	99	103
	± 2	102	98	104
	± 4	104	96	106

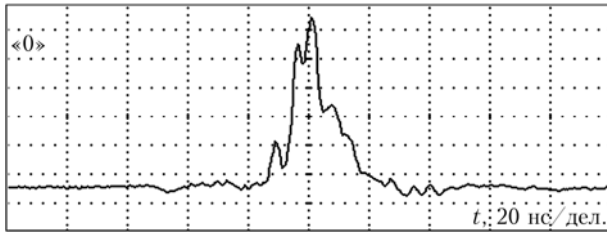
На рис. 2 показаны последовательности импульсов напряжения на ГРТ и генерации при передаче числа #10101010b (бинарный код), которые демонстрируют, как кодируются логические «1» и «0», а именно как изменяется период следования импульсов накачки и генерации в процессе передачи информации. На рис. 2 также представлены импульсы генерации при уменьшенном времени развертки. Можно заметить, что импульсы генерации, соответствующие «0» и «1», имеют разную энергию. Значения энергии в импульсе генерации, рассчитанные по осциллограммам, составляют 275 мкДж для $\Delta T = +4$ мкс и 234 мкДж для $\Delta T = -4$ мкс. Разница энергии генерации $\Delta E = 41$ мкДж.



a



б



в

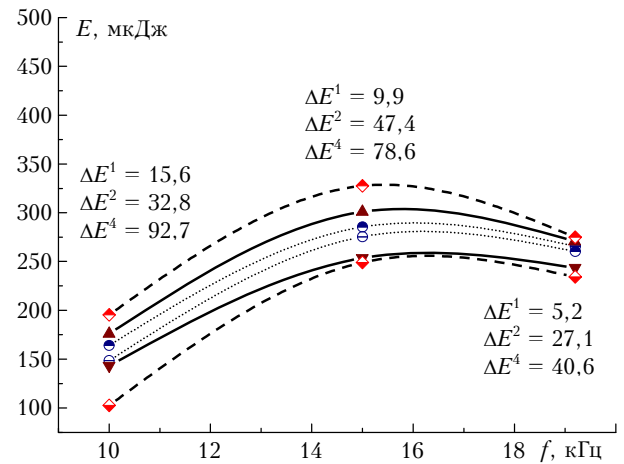
Рис. 2. Осциллограммы в режиме передачи числа #10101010b: *a* – 1 – напряжение на ГРТ (5 кВ/дел.); 2 – импульсы синхронизации (5 В/дел.); 3 – последовательность импульсов генерации (5 В/дел.); *б* – импульс генерации, соответствующий передаче «1» (2 В/дел.); *в* – импульс генерации, соответствующий передаче «0» (2 В/дел.). $f_c = 19,2$ кГц, $\Delta T = \pm 4$ мкс, без добавки НВг

Результаты экспериментов и их обсуждение

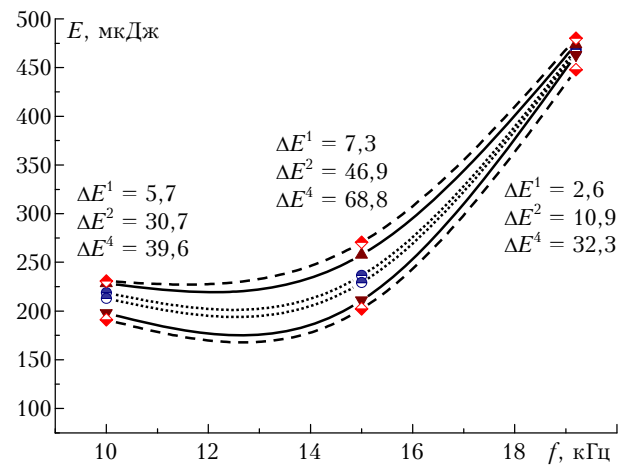
В работах [16, 17] исследовался цуговой режим работы CuVg-лазера при различных частотах повторения импульсов в цуге и паузах между цугами. ГРТ имела диаметр 3,5 см и длину активной зоны 56 см. ЧСИ в цуге составляли 12,2; 17,2 и 23,3 кГц, активная добавка не вводилась. В работе [18] исследовался цуговой режим работы CuVg-лазера с добавкой НВг при ЧСИ 20 кГц. ГРТ имела внутренний диаметр 3,8 см и длину активной области 90 см. Представленные в работах [16–18] зависимости пиковой мощности генерации от паузы

между цугами носят спадающий характер, близкий к экспоненциальному. Снижение энергии в импульсе авторами связывается со снижением концентрации атомов меди в основном состоянии. Записав аппроксимирующие кривые и оценив разброс энергии генерации при изменении периода повторения импульсов от $(T_c - 4)$ до $(T_c + 4)$ мкс, можно показать, что разброс энергии составляет не более 7%.

На рис. 3 приведены значения энергии генерации при различной величине несущей частоты и отклонения от несущей частоты при частотно-импульсном кодировании излучения CuVg-лазера.



a



б

Рис. 3. Зависимости энергии в импульсе генерации от несущей частоты при различной величине отклонения ΔT от периода несущей частоты без добавки (*a*) и с добавкой НВг (*б*): точечные линии – $\Delta T = \pm 1$ мкс, сплошные линии – $\Delta T = \pm 2$ мкс, пунктирные линии – $\Delta T = \pm 4$ мкс; большее значение энергии соответствует большему периоду при той же величине несущей частоты

Здесь же приведены значения ΔE разности энергии в импульсах при увеличении и уменьшении периода повторения импульсов: $\Delta E = E(T^0) - E(T^1)$. ΔE^1 соответствует $\Delta T = \pm 1$ мкс, ΔE^2 – $\Delta T = \pm 2$ мкс и ΔE^4 – $\Delta T = \pm 4$ мкс. Как следует из представленных

данных, разброс энергии может достигать 90% (по отношению к минимальному значению). Причем энергия генерации возрастает с увеличением межимпульсного периода. Таким образом, можно сделать вывод, что снижение энергии в импульсе генерации в представленных экспериментах не связано с концентрацией атомов меди.

Снижение энергии генерации можно объяснить увеличением концентрации электронов и атомов меди в метастабильном состоянии при уменьшении периода повторения импульсов, даже если период уменьшается незначительно. Об увеличении концентрации электронов свидетельствуют уменьшение напряжения на ГРТ при передаче логической «1» (6–7%) и некоторое увеличение тока (1,5–2%) [15].

Из трех ЧСИ, на которых проводились исследования, оптимальная с точки зрения наибольшей энергии генерации является ЧСИ 15 кГц без добавки НВг и 19,2 кГц с добавкой НВг. При этом наименьшая разница энергии ΔE в обоих случаях соответствует ЧСИ 19,2 кГц. Таким образом, наиболее подходящей несущей частотой для передачи информации является ЧСИ 19,2 кГц и выше.

При введении добавки НВг в активную среду CuBr-лазера энергия в импульсе генерации возрастает примерно в 2 раза, что имеет существенное значение при передаче информации на большие расстояния. При этом уменьшается разница энергии в импульсах генерации при увеличении и уменьшении периода повторения импульсов (при кодировании информации), что снижает вероятность появления ошибок при передаче. Если без добавки НВг разброс энергии генерации ΔE может достигать ~90%, то с добавкой НВг максимальный разброс составляет ~35%. Для ЧСИ 19,2 кГц $\Delta E_{\max} = 17,3\%$ без добавки НВг и $\Delta E_{\max} = 7,2\%$ с добавкой.

В табл. 2 представлены значения энергии генерации в импульсах при передаче чисел #11h (#00010001b) и #77h (#01110111b) при $\Delta T = \pm 4$ мкс.

Таблица 2

Энергия в импульсах генерации при циклической передаче чисел #00010001b, #01110111b

Число		E^0 , мкДж		E^1 , мкДж	
#11h	без НВг	276	260	265	245
	с НВг	480	476	469	440
Число		E^0 , мкДж		E^1 , мкДж	
#77h	без НВг	271	245	255	253
	с НВг	474	440	434	446

На рис. 4 приведены осциллограммы импульсов генерации для режима передачи #00010001b. Из полученных данных следует, что энергия генерации, соответствующая логическому «0» (или логической «1»), меняется менее чем на 6% при передаче слов с различным количеством логических «0» (логических «1») при работе без добавки НВг и менее чем на 2,5% при работе с добавкой.

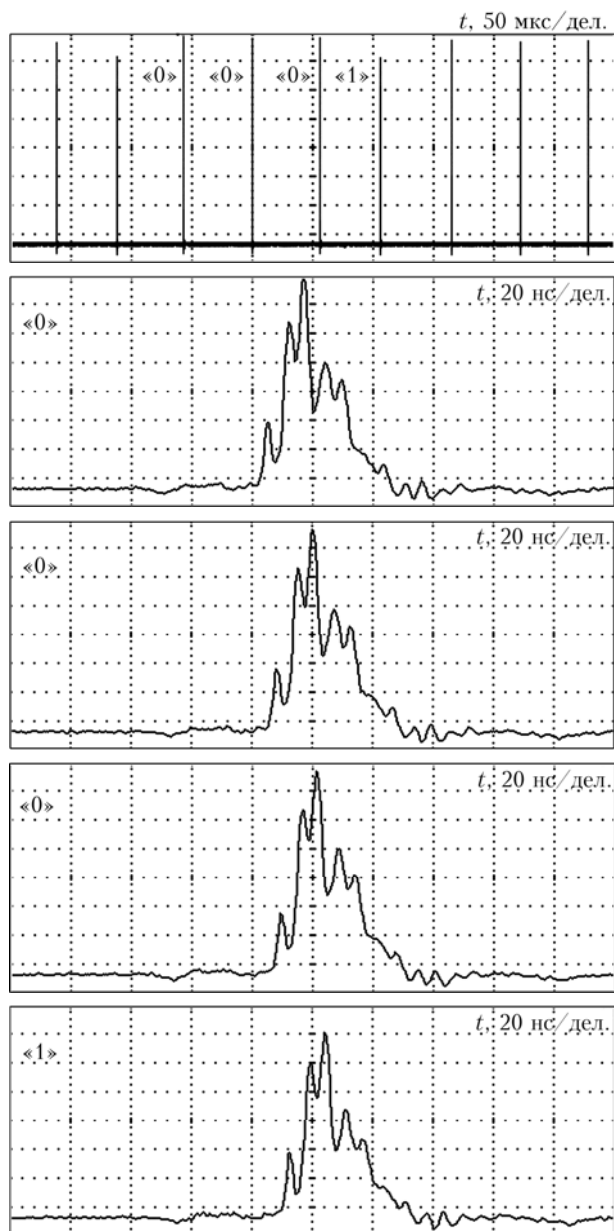


Рис. 4. Осциллограммы четырех импульсов генерации (отн. ед.) при передаче числа #00010001b; $f_c = 19,2$ кГц, $\Delta T = \pm 4$ мкс, с добавкой НВг

Заключение

Рассмотрен вариант беспроводной передачи данных при помощи импульсного газового лазера на парах бромида меди. Реализовано частотно-импульсное кодирование излучения CuBr-лазера в соответствии с цифровым кодом, поступающим с персонального компьютера.

В зависимости от режима работы лазера может наблюдаться существенное (до 17%) варьирование энергии генерации при передаче логических «0» и «1». Наибольший разброс энергии генерации наблюдается при отклонении периода повторения импульсов от периода несущей частоты ± 4 мкс. Уменьшить разброс энергии можно несколькими

способами: повышая частоту следования импульсов, уменьшая величину отклонения от несущей частоты при кодировании «0» и «1», вводя активную добавку НВг. Путем оптимизации условий работы активного элемента CuBr-лазера удалось достичь минимального разброса энергии генерации 0,6% при несущей частоте повторения импульсов 19,2 кГц.

При реализации линии АОС на основе CuBr-лазера следует также иметь в виду, что при частотно-импульсном кодировании информации меньшему периоду повторения импульсов соответствует меньшая энергия в импульсе генерации. Поэтому логическую «1» следует кодировать путем увеличения периода следования импульсов, а логический «0» — путем уменьшения.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, Госзадание № 5.1307.2014.

1. Солдатов А.Н., Соломонов В.И. Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов. Новосибирск: Наука, 1985. 152 с.
2. Евтушенко Г.С., Шиянов Д.В., Губарев Ф.А. Лазеры на парах металлов с высокими частотами следования импульсов. Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2010. 276 с.
3. Бохан П.А., Евтушенко Г.С., Солдатов А.Н. Лазеры на парах металлов в Институте оптики атмосферы СО РАН. Физика, техника, применения. К 50-летию запуска первого лазера // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 10. С. 860–864.
4. Evtushenko G.S., Trigub M.V., Gubarev F.A., Evtushenko T.G., Torgaev S.N., Shiyonov D.V. Laser monitor for non-destructive testing of materials and processes shielded by intensive background lighting // Rev. Sci. Instrum. 2014. V. 85. P. 033111-1–033111-5.
5. Белов В.В., Тарасенков М.В., Абрамочкин В.Н., Иванов В.В., Федосов А.В., Троицкий В.О., Шиянов Д.В. Атмосферные бистатические каналы связи с рассеянием. Часть 1. Методы исследования // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 4. С. 261–267.
6. Украинацев Ю.Д., Цветов М.А. История связи и перспективы развития телекоммуникаций. Ульяновск: УЛГТУ, 2009. 128 с.
7. 288 km Cloudbouce from Tasmania to the Australian Mainland / By R. Moncur, D. Smith, J. Gelston, J. Giles-Clark. 2009. [Электронный ресурс]. URL: <http://reast.asn.au/optical.php>

8. Mooradian G.C., Geller M., Levine P.H., Stotts L.B., Stephens D.H. Over-the-horizon optical propagation in a maritime environment // Appl. Opt. 1980. V. 19, N 1. P. 11–30.
9. Милютин Е.Р. Загоризонтные оптические линии связи // Вестн. связи. 2005. № 4. С. 196–199.
10. Васильев А.С., Губарев Ф.А., Федоров В.Ф. Передача информации с использованием лазера на парах бромиды меди // Современные техника и технологии: Сб. трудов XVII Междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3 т. Т. 1. Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2011. С. 166–167.
11. Нехорошев В.О., Федоров В.Ф., Евтушенко Г.С., Торгаев С.Н. Лазер на парах бромиды меди с частотой следования импульсов до 700 кГц // Квант. электрон. 2012. Т. 42, № 10. С. 877–879.
12. Губарев Ф.А., Тригуб М.В., Федоров К.В., Евтушенко Г.С. Влияние индуктивности разрядного контура на энергетические характеристики CuBr-лазера // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 7. С. 604–609.
13. Димаки В.А., Суханов В.Б., Троицкий В.О., Филонов А.Г. Стабилизированный лазер на бромиде меди с автоматизированным управлением режимами работы со средней мощностью генерации 20 Вт // Приборы и техн. эксперим. 2012. № 5. С. 95–99.
14. Gubarev F.A., Evtushenko G.S., Vuchkov N.K., Sukhanov V.B., Shiyonov D.V. Modeling technique of capacitive discharge pumping of metal vapor lasers for electrode capacitance optimization // Rev. Sci. Instrum. 2012. V. 83. P. 055111–055115.
15. Degtyarev A.E., Gubarev F.A. Copper bromide laser for optical communications // 15th Int. Conf. Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices: IEEE Proc. Novosibirsk: IEEE Russia Siberia Section, 2014. P. 314–318.
16. Губарев Ф.А., Суханов В.Б., Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С. Исследование энергетических характеристик лазера на парах бромиды меди с пониженным энерговкладом в разряд // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 1. С. 85–93.
17. Торгаев С.Н., Губарев Ф.А., Бойченко А.М., Евтушенко Г.С., Жданев О.В. Восстановление молекул бромиды меди в плазме CuBr-лазера в межимпульсный период // Изв. вузов. Физ. 2011. Т. 54, № 2. С. 81–84.
18. Филонов А.Г. О влиянии добавки НВг на характеристики излучения лазера на парах CuBr // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 7. С. 608–613.

F.A. Gubarev, G.S. Evtushenko. Pulse-frequency modulation of CuBr laser emission.

This paper presents the results of study of CuBr laser operation in a mode of pulse-frequency modulation of lasing. This modulation method can be used for implementation of atmospheric bistatic optical communication links. Modulation has been performed in accordance with a digital code coming from a personal computer. Experimental results are presented illustrating the effect of the transmitted digital code on the lasing pulse energy at different carrier frequencies and deviation of the pulse repetition period from the period of the carrier frequency. It is shown that, depending on the mode of laser operation, a significant (up to 17 %) variation of lasing energy can be observed when transmitting logical “0” and “1”.