

## Мультимедийный лазерный излучатель на парах металлов для решения задач атмосферной оптики

А.Н. Солдатов<sup>1</sup>, А.В. Васильева<sup>1</sup>, С.Ю. Мирза<sup>1</sup>, Ю.П. Полунин<sup>1</sup>,  
О.А. Романовский<sup>2</sup>, А.С. Шумейко<sup>1</sup>, И.К. Костадинов<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, Россия

<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1, Россия

<sup>3</sup>ООО «Pulslight»  
1784, г. София, Цареградское шоссе, 72, Болгария

Поступила в редакцию 28.03.2013 г.

Представлены предварительные результаты испытания оригинальной конфигурации мультимедийного лазерного излучателя на парах металлов, перспективного для многих применений, в частности для дистанционного зондирования параметров атмосферы. Новизна подхода заключается в том, что два газоразрядных активных элемента (на парах стронция и на парах бромида меди) помещаются в единый резонатор, причем накачка каждого из них осуществляется от автономного источника питания, что позволяет проводить их независимую оптимизацию по условиям возбуждения и тем самым дает возможность оперативно регулировать суммарный набор длин волн генерации и их относительное распределение по мощности в выходном пучке, что делает описываемую конструкцию весьма привлекательной для ряда научных и технологических приложений.

*Ключевые слова:* лазер на парах металлов, резонатор, мультимедийный лазерный излучатель; metal vapor laser, resonator, multimedia laser.

### Введение

Для решения многих задач атмосферной оптики, в частности дистанционного зондирования параметров атмосферы, таких как температура, влажность, концентрация и размер аэрозолей того или иного рода, включая техногенные продукты, применяются лазеры и лазерные системы [1, 2], излучающие на различных длинах волн во всем оптическом диапазоне от ближней УФ- до средней ИК-области и работающие в непрерывном, импульсном и импульсно-периодическом режимах. Среди последних достаточно широко представлены лазеры на парах металлов (ЛПМ) [3].

Наиболее эффективными из ЛПМ являются лазеры на парах меди [3] и стронция [4, 5], работающие с частотами следования импульсов (ЧСИ) от единиц до сотен килогерц. При этом энергия в импульсе может достигать нескольких миллиджоулей, а средняя мощность ~ 100 и более ватт. Высокие коэффициенты усиления за проход, характерные для активных сред ЛПМ, позволяют приме-

нять для формирования пучков с дифракционной расходимостью неустойчивые резонаторы [6], что существенно повышает пространственное разрешение и дальность зондирования.

При проектировании многоволновых лазерных систем типа лидарного передатчика [7, 8] возникает задача сведения отдельных генерационных пучков в единый выходной пучок, решение которой на практике приводит к энергетическим потерям, экономическим и материальным издержкам. В работах [3, 9] была проверена эффективность и работоспособность конструкций мультимедийных активных элементов на парах металлов с продольно и радиально-разнесенными средами.

В [10] изложены результаты исследования лазера на двух активных средах (парах стронция и бромида меди), положенные в основу созданного многоволнового лазерного источника, генерирующего на 10 дискретных линиях в диапазоне от 0,51 до 6,45 мкм. Серьезным недостатком вышеперечисленных технических решений является сложность (а часто и невозможность) независимой оптимизации условий возбуждения по каждой конкретной активной среде.

В настоящей статье предлагается новая концепция построения многоволновых систем, заключающаяся в том, что несколько газоразрядных активных элементов (АЭ) (два и более) помещаются

\* Анатолий Николаевич Солдатов (general@tic.tsu.ru); Анна Викторовна Васильева (anita\_tomsk@mail.ru); Сергей Юрьевич Мирза; Юрий Петрович Полунин; Олег Анатольевич Романовский; Алексей Семенович Шумейко; Иван Кириллович Костадинов.

соосно в единый (общий) резонатор. Поскольку каждый АЭ запитывается от своего собственного высоковольтного источника питания, то это позволяет производить абсолютно независимый подбор условий накачки для любой выбранной активной среды. Фактически единственным ограничением в реализации данной конструкции служит требование отсутствия значимого поглощения у всех выбранных активных сред на любой из генерационных линий совокупного набора длин волн. Настоящая статья посвящена описанию и анализу предварительных результатов исследования предложенной конфигурации на основе использования двух АЭ (на парах Sr и на парах CuBr), расположенных в общем резонаторе.

### Описание экспериментальной установки

На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки. Плоскопараллельный резонатор был образован «глухим» высокоотражающим зеркалом с алюминированным покрытием 1 и выходным зеркалом 2, в роли которого выступала плоскопараллельная пластинка из CaF<sub>2</sub>. Внутри резонатора, длина которого составляла немногим более 2 м, были соосно установлены газоразрядные активные элементы: самонагреваемый АЭ на парах стронция 3 и АЭ на парах бромида меди 4 с внешним контейнером, содержащим бромид меди, помещаемым в нагреваемую печь 7 с независимым источником питания 8. Это позволяло контролировать концентрацию вводимых в активный канал паров рабочего вещества. Длина и диаметр канала газоразрядных активных элементов составляли  $l = 1000$  мм,  $d = 27$  мм и  $l = 500$  мм,  $d = 20$  мм для АЭ на парах Sr и АЭ на парах CuBr соответственно. Выходные окна обоих газоразрядных трубок (ГРТ) были выполнены из флюорита кальция, который оптически прозрачен во всем суммарном диапазоне генерации (0,5–6,45 мкм). Высоковольтные импульсно-периодические источники питания 5, 6, в которых в качестве коммутаторов использовались водородные тиратроны ГГИ

1000/25, могли работать как независимо друг от друга, так и от общего двухканального блока запуска и синхронизации (на рисунке не показан). Частота следования импульсов варьировалась от 6 до 20 кГц.

При работе по стандартной схеме прямого разряда рабочей емкости напряжение на электродах АЭ равнялось 8–15 кВ. В процессе экспериментов фиксировались такие параметры, как частота повторения импульсов, давление буферного газа (He и/или Ne), средняя мощность генерации, а с помощью четырехканального осциллографа регистрировалась форма импульсов тока, напряжения и импульса генерации.

### Экспериментальные исследования и обсуждение результатов

В проведенных экспериментах была получена генерация на следующих длинах: 0,51; 0,58; 1,03; 1,09; 2,6; 2,69; 2,92; 3,01; 3,06 и 6,45 мкм. Параметры соответствующих лазерных переходов (энергии верхнего и нижнего уровней, квантовая эффективность, рабочая температура активной среды) приведены в табл. 1.

Предварительные испытания предложенной конструкции на парах CuBr и Sr проводились следующим образом. Сначала включалась система накачки АЭ на парах CuBr (при этом АЭ с парами Sr оставался выключенным) и измерялись генерационные параметры лазера (средняя мощность  $W_2$ , ЧСИ  $F_2$ , форма импульса излучения). В табл. 2 результаты одного из включений CuBr-лазера соответствуют строке под № 1. Во второй строке представлены результаты одного из включений лазера на парах Sr. Суммарная мощность генерации  $W_1$  на 8 длинах волн SrI и SrII (от 1,03 до 6,45 мкм) составила ~7,5 Вт. В табл. 2 знаком «+» обозначено включение активных элементов с парами стронция либо с парами CuBr. Строка 3 соответствует работе активного элемента с парами Sr, но ЧСИ (в отличие от строки 2)  $F_1$  равнялась 8,9 кГц.

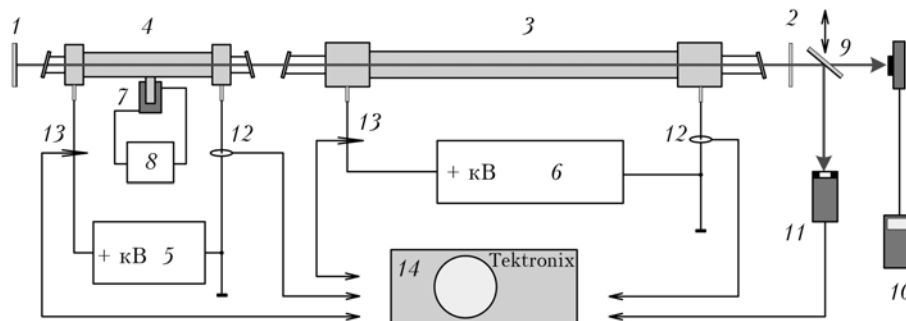


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – заднее высокоотражающее зеркало; 2 – плоскопараллельная пластинка из CaF<sub>2</sub>; 3 – ГРТ на парах Sr; 4 – ГРТ на парах CuBr; 5, 6 – высоковольтные источники питания; 7 – внешний нагреваемый контейнер с CuBr; 8 – источник питания спирали нагревателя; 9 – поворотное зеркало; 10 – измеритель мощности «OPHIR»; 11 – ФЭК; 12 – пояс Роговского; 13 – делитель напряжения; 14 – многоканальный осциллограф «Tektronix»

Таблица 1

## Характеристики спектральных линий на лазерных переходах в атомах стронция и меди и ионе стронция

Длина волны, мкм	Обозначения	Атом (ион)	Рабочий переход	$E_v, \text{см}^{-1}$	$E_n, \text{см}^{-1}$	$\eta$	$T, \text{К}$
0,51	$\lambda_1$	CuI	$4p^2P_{3/2}^0 - 4s^2D_{5/2}$	30783,69	11203,56	0,38	1690
0,58		CuI	$4p^2P_{1/2}^0 - 4s^2D_{3/2}$	30535,30	13245,42	0,36	1690
1,03	$\lambda_2$	SrII	$5p^2P_{3/2}^0 - 4d^2D_{5/2}$	24517,0	14556,0	0,25	900
1,09		SrII	$5p^2P_{1/2}^0 - 4d^2D_{3/2}$	23715,0	14836,0	0,27	900
2,60	$\lambda_3$	SrI	$4d^3D_1 - 5p^3P_0$	17823,65	13710,5	0,20	900
2,69		SrI	$4d^3D_2 - 5p^3P_1$	14758,95	17984,95	0,16	900
2,92		SrI	$4d^3D_3 - 5p^3P_2$	18549,5	15162,2	0,13	900
3,01		SrI	$4d^3D_2 - 5p^3P_2$	17984,95	15162,2	0,11	900
3,06	$\lambda_4$	SrI	$4d^3D_1 - 5p^3P_2$	17823,65	15162,2	0,08	900
6,45		SrI	$5p^1P_0^1 - 4d^1D_2$	21693,0	20150,0	0,045	900

Таблица 2

## Сводка экспериментальных данных

№ строки	ГРТ-1 (Sr)*	ГРТ-2 (CuBr)*	$F_1, \text{кГц}$	$F_2, \text{кГц}$	$P_{\text{Ne}}(1), \text{тогг}$	$P_{\text{Ne}}(2), \text{тогг}$	$P_{\text{He}}, \text{тогг}$	$W_1, \text{Вт}$	$W_2, \text{Вт}$	$W_{\text{сум}}, \text{Вт}$
1	—	+	—	14,6	—	40	—	—	5	5
2	+	—	12,5	—	20	—	100	7,5	—	7,5
3	+	—	8,9	—	20	—	100	7	—	7
4	+	+	12,5	12,5	20	40	100	—	—	8,5

\* «+» — ГРТ была включена, «—» — ГРТ выключена.

В каждом из вышеприведенных случаев рабочая длина активной зоны составляла менее 50% от длины резонатора, а оптические окна газоразрядных АЭ, расположенные под углом  $88^\circ$  (между поверхностью окон и оптической осью резонатора), не имели просветляющих покрытий. Несмотря на это, энергетические параметры генерации, как в парах CuBr, так и в парах Sr, были достаточно высокими, что связано, на наш взгляд, с экстремально высокими коэффициентами усиления, присущими активным средам на самоограниченных переходах в парах металлов. В строке № 4 приведены характеристики лазерной системы, генерирующей одновременно на парах бромида меди и стронция (средняя мощность на 10 дискретных линиях достигала величины  $W_{\text{сум}} \sim 8,5 \text{ Вт}$ ).

Отметим, что тщательной оптимизации ни по параметрам генерации, ни по условиям возбуждения во всех экспериментах не проводилось.

Известно, что активные среды на парах Cu и парах Sr являются оптически взаимно-прозрачными. В нашем случае внутри рабочего канала АЭ на парах CuBr присутствует ряд соединений (CuBr,  $\text{Vr}_2$  и пр.), имеющих определенную структуру молекулярных полос поглощения, что могло привести к возрастанию внутрирезонаторных потерь для генерационных линий на переходах стронция. Полученные в четвертом цикле измерений экспериментальные данные эти опасения в значительной степени сняли, подтвердив выводы, полученные ранее в работе [10]: заметного поглощения генерационных линий SrI и SrII при прохождении через АЭ на парах CuBr не наблюдалось.

На рис. 2 показано взаимное расположение импульса тока через АЭ (CuBr) и импульса генерации лазера на парах бромида меди. Видно, что последний располагается на переднем фронте импульса тока, а длительность генерации по основанию составляет  $\sim 40 \text{ нс}$ , что является типичным для лазеров на парах меди и ее соединений при изменении ЧСИ в пределах 10–20 кГц.

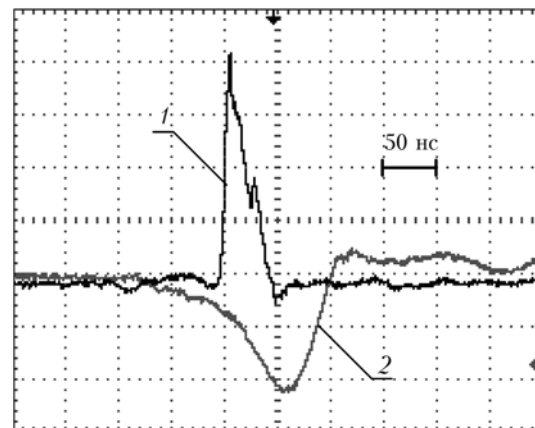


Рис. 2. Оциллограммы импульсов генерации (1) и импульса тока через АЭ на парах CuBr (2)

Оциллограммы импульсов генерации на переходах в атоме и ионе стронция приведены на рис. 3.

Длительность импульса генерации на ионных линиях стронция  $\lambda_2 \sim 1 \text{ мкм}$  составляет 50 нс и близка к длительности импульса генерации CuBr-лазера.

Длительность импульса (по полувысоте) на самой мощной линии генерации стронция  $\lambda_4 = 6,45$  мкм составляет около 130 нс, длительность суммарной генерации на  $m-m$  переходах стронция  $\lambda_3 \sim 3$  мкм равна  $\sim 70$  нс. Параметры генерации на переходах атома и иона стронция в мультимедийном (мультиэлементном) лазере мало отличаются от параметров генерации одноэлементного Sr-лазера [4].

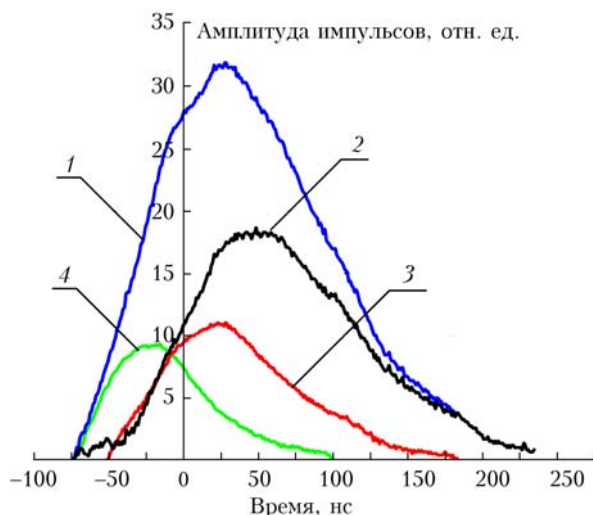


Рис. 3. Осциллограммы импульсов генерации лазера на парах стронция: 1 – суммарный импульс генерации; 2 – импульс генерации на  $\lambda_4 = 6,45$  мкм; 3 – импульс генерации  $\sim 3$  мкм; 4 – импульс генерации  $\sim 1$  мкм

### Заключение

В работе предложен и экспериментально апробирован режим многоволновой генерации при использовании активных сред на переходах SrI, SrII, CuI, помещенных в общий резонатор. Продемонстрировано получение в одном лазерном пучке многоволновой генерации на парах стронция и меди.

Предложенная конструктивная схема на основе мультимедийного набора из двух активных элементов (на парах стронция и бромида меди) позволила получить генерацию на 10 длинах волн с суммарной средней мощностью 8–12 Вт. При частоте повторения импульсов 12,5 кГц средняя мощность на переходах атома и иона стронция составила 7,5 Вт, в то время как на атомах меди средняя мощность достигала  $\sim 5$  Вт.

Апробированное схемотехническое решение в принципе позволяет получить в одном лазерном пучке многоволновую генерацию при использова-

нии любого (с учетом указанных ограничений) набора активных сред на парах металлов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (ГК № 14.518.11.7038) и гранта РФФИ № 15-05-98074.

1. Бурлаков В.Д., Майер Г.В., Матвиенко Г.Г., Романовский О.А., Солдатов А.Н. Лазерные технологии дистанционного зондирования атмосферы // Изв. вузов. Физ. 2010. № 5/2. С. 11–20.
2. Arshinov Yu.F., Zuev V.E., Naats I.E., Soldatov A.N., Fadeev V.Ya. Metal Vapor Lasers and Their application to Atmospheric Optics // Proc. Intern. Conf. on Lasers'82. STS Press McLean, New Orleans. 1982. P. 486–492.
3. Солдатов А.Н., Соломонов В.И. Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов. Новосибирск: Наука, 1985. 152 с.
4. Солдатов А.Н., Латуш Е.Л., Чеботарев Г.Д., Юдин Н.А., Васильева А.В., Полуни Ю.П., Пруцаков О.О. Импульсно-периодические лазеры на парах стронция и кальция / Под ред. А.Н. Солдатова, Е.Л. Латуша. Томск: ТМЛ-Пресс, 2012. 526 с.
5. Солдатов А.Н., Бочковский Д.А., Васильева А.В., Матвиенко Г.Г., Полуни Ю.П., Романовский О.А., Харченко О.В., Юдин Н.А., Яковлев С.В. Применение лазера на парах стронция для решения задач лазерного зондирования газового состава атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 11. С. 985–989.
6. Земсков Л.И., Исаев А.А., Казарян М.А., Петраш Г.Г., Раутиан С.Г. Применение неустойчивых резонаторов для получения дифракционной расходимости излучения импульсных газовых лазеров с большим усилением // Квант. электрон. 1974. Т. 1, № 4. С. 863–869.
7. Бутаков А.Л., Воронов В.И., Евтушенко Г.С., Зув В.В., Кириллов А.Е., Мальцев А.Н., Мирза С.Ю., Полуни Ю.П., Суханов В.Б., Троицкий В.О. Многоцветный лазерный излучатель лидара для зондирования параметров атмосферы // Оптика атмосф. 1989. Т. 2, № 8. С. 869–875.
8. Бутаков А.Л., Воронов В.И., Евтушенко Г.С., Зув В.В., Кириллов А.Е., Мальцев А.Н., Мирза С.Ю., Полуни Ю.П., Суханов В.Б., Троицкий В.О., Иванов А.И. Лазерный передатчик многочастотного лидара для контроля параметров атмосферы // Тезисы докл. 3-й Всесоюз. конф. «Применение лазеров в технологии и системах передачи и обработки информации». Таллин, 1987. Ч. 4. С. 9–10.
9. Солдатов А.Н. Лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов с управляемой генерацией: Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Томск, 1996. Гл. 6. С. 186–204.
10. Солдатов А.Н., Полуни Ю.П., Васильева А.В., Колмаков Е.А., Куксгаузен Д.А., Костыря И.Д. Двухэлементный лазер, генерирующий на 10 дискретных линиях в диапазоне от 0,51 до 6,45 мкм // Фотоника. 2012. Т. 35, № 5. С. 30–33.

A.N. Soldatov, A.V. Vasilieva, S.Ju. Mirza, Ju.P. Polunin, O.A. Romanovskii, A.S. Shumeiko, I.K. Kostadinov. **Multimedia metal vapor laser emitter for solving problems of atmospheric optics.**

Preliminary test data for an original configuration of a multimedia metal vapor laser emitter are presented. The emitter is promising for many applications, in particular, for remote sensing of atmosphere parameters. The novelty of the approach is that two (strontium and copper bromide vapor) gas discharge active elements are placed into a common cavity and each of them is pumped separately from an independent power supply. This permits one to optimize them independently by excitation conditions and, consequently, makes it possible to timely regulate the total set of generation wavelengths and their relative distribution with respect to power in the output beam. This makes the described construction very attractive for a series of scientific and technological applications.