

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

Национальный исследовательский Томский государственный университет
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
Болгарская Академия наук
ООО «Научно исследовательское предприятие «Лазерные технологии»

ИННОВАТИКА-2019

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ

**XV Международной школы-конференции студентов,
аспирантов и молодых ученых
25–27 апреля 2019 г.
г. Томск, Россия**

Под редакцией А.Н. Солдатов, С.Л. Минькова

Scientific & Technical Translations



ИЗДАТЕЛЬСТВО

Томск – 2019

МНОГОВОЛНОВЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ НА ПАРАХ МЕТАЛЛОВ С НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ ИМПУЛЬСОВ ГЕНЕРАЦИИ

А.Н. Солдатов

*Национальный исследовательский Томский государственный университет
general@tic.tsu.ru*

MULTIWAVE METAL VAPOR LASER SYSTEMS WITH NANOSECOND PULSE DURATION OF GENERATION

A.N. Soldatov

*National Research Tomsk State University
general@tic.tsu.ru*

Multi-wavelength laser systems based on metal vapors have been developed that allow precision processing of glass and ceramic materials, are used in medicine as a scalpel for dissecting biological tissues, as well as in atmospheric optics.

Keywords: metal vapor laser, strontium vapor laser, self-limited generation, pulse repetition rate, scaling, multimedia active medium

Лазеры на парах металлов (ЛПМ) широко применяются для решения большого круга научных и практических задач благодаря совокупности уникальных характеристик: наносекундным длительностям импульсов излучения; высокой частоте следования импульсов генерации; высокой средней и импульсной мощностям, а также имеют высокий для газовых лазеров коэффициент полезного действия. При этом, поскольку активная среда газовая, ЛПМ имеют малую ширину линии излучения и высокую стабильность ее положения на шкале частот, высокое качество лазерного пучка, а также большой коэффициент усиления (10-100 дБ/м).

Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов работают, как правило, на нескольких длинах волн, что обусловлено особенностью строения электронных оболочек и механизмом создания инверсии. Металлы Au, Pb, Cu, Mn, Ba, Eu, Ca, Sr наглядно демонстрируют такую многочастотность, обеспечивая генерацию на более 40 спектральных линиях атомов и ионов (таблица 1). Механизм генерации и оптимальные условия работы лазеров на различных длинах волн каждого из указанных химических элементов достаточно хорошо изучены.

Параметры лазеров на парах металлов

- Диапазон длин волн: 0,31 – 6,45 мкм;
- Средняя мощность: 1 - 700 Вт;

- Плотность энергии: $> 100 \text{ Дж/см}^2$;
- Длительность импульсов: 1 - 100 нс;
- Квантовый КПД: 20 - 70%
- Частота повторения импульсов: 5 - 100 кГц;
- Дифракционно-ограниченный пучок: $< 0,1 \text{ мрад}$.

Таблица 1

Примеры генерационных длин волн в атомах и ионах металлов

Длина, нм	Атом	$E_1, \text{ см}^{-1}$	$E_2, \text{ см}^{-1}$	η
312,2	AuI	41174,3	9161,3	0,47
363,9	PbI	35287,24	7819,35	0,39
405,7	PbI	35287,24	10650,47	0,44
416,2	SrII	47736,5	24516,6	0,45
430,5	SrII	47736,5	24516,6	0,49
510,6	CuI	30783,69	11203,56	0,38
534,1	MnI	35769,97	17052,29	0,29
542,0	MnI	35725,35	17282,0	0,30
578,2	CuI	30535,30	13245,42	0,36
614,2	BaII	21952,42	5674,82	0,44
649,7	BaII	20261,56	14873,85	0,51
722,9	PbI	35287,24	21457,90	0,24
854,2	CaII	25414,43	13710,96	0,28
866,2	CaII	25191,54	13650,21	0,31
1032,7	SrII	24517,0	14556,0	0,25
1091,4	SrII	23715,0	14836,0	0,27
1130,3	BaI	18060,26	9215,52	0,31
1290,0	MnI	24802,25	17052,29	0,14
1399,9	MnI	24799,32	17637,15	0,09
1499,9	BaI	18060,26	11395,38	0,26
2,60	SrI	17823,6	13710,5	0,20
2,69	SrI	14758,9	17984,9	0,16
2,92	SrI	18549,5	15162,2	0,13
3,01	SrI	17984,9	15162,2	0,11
3,06	SrI	17823,6	15162,2	0,08
5546,0	CaI	23652,32	21849,61	0,05
6456,0	SrI	21693,0	20150,0	0,045

Первые исследования лазера на парах стронция

1. Диаметр ГРТ - 7 мм: $P = 0,2 \text{ Вт}$, $f = 12 \text{ кГц}$, $\lambda = 6,456, 3,066, 3,011, 1,03 \text{ и } 1,09 \text{ мкм}$ [1].

2. Ph. Cahuzac, Raies laser infrarouges des les vapeurs de terres rares et d'alcalino-terreux, J. Phys. (Paris) 32(7) 499-505 (1971).

3. P.A. Bokhan and V.D. Burlakov, On the laser mechanism on the $4d^3D_{1,2} - 5p^3P_{0,2}$ transitions in strontium atom, Kvant. Elektr., Vol.6, No. 3, 623 – 625 (1979).

4. Диаметр ГРТ - 10 мм: $P = 1,2$ Вт, $f = 20$ кГц, $\lambda = 6,456, 3,066, 3,011, 1,03$ и $1,09$ мкм. Распределение выходной мощности по длинам волн было следующим: 75% при $\lambda = 6,45$ мкм, 20% при ~ 3 мкм и 5% при ~ 1 мкм [1].

5. A.N. Soldatov and V.I. Solomonov, Self-Terminating Gas-Discharge Metal-Vapor Lasers [in Russian], Nauka, Novosibirsk (1985).

Экспериментальная техника

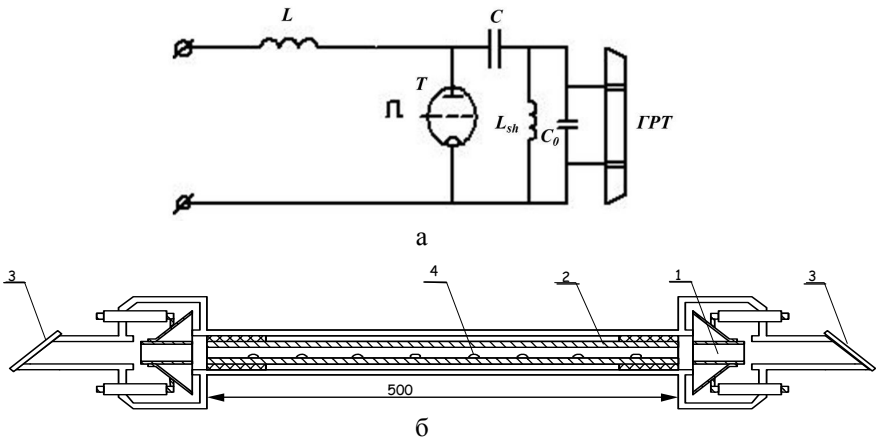


Рис. 1. Типичная электрическая схема (а) и схема газоразрядной трубки (б): 1 – электроды, 2 – газоразрядный канал, 3 – выходные окна, 4 – испаритель стронция

Объемное масштабирование лазера на парах стронция.

В [2] экспериментально было показано, что рост объема активной среды лазера на парах стронция сопровождается увеличением средней мощности генерации и КПД. $\eta = 0,1 - 0,5$ %, $P = 1 - 13$ Вт в ГРТ различного объема ($20 - 650$ см³).

Рекордные характеристики 2^х каскадной системы на парах стронция:

- средняя мощность – 28 Вт;

- расходимость пучка – 0,5 мрад;
- энергия в импульсе – 2,5 мДж;
- частота следования импульсов – от 1 до 20 000 Гц.

Т а б л и ц а 2

Изменение параметров лазерного излучения при масштабировании лазера на парах стронция

Объем	$V = 200 \text{ см}^3$	$V = 450 \text{ см}^3$
f	15 кГц	11,6 кГц
$\Sigma\lambda$, мкм	5,7 Вт	13,5 Вт
6,45 мкм	3,1 Вт	6,2 Вт
~ 3 мкм	1,5 Вт	4,5 Вт
~ 1 мкм	1,1 Вт	1,9 Вт
E	0,38 мДж	1,26 мДж

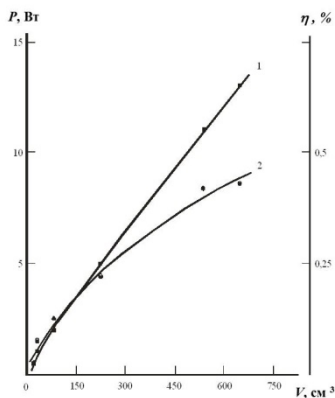


Рис. 2. Зависимость средней мощности генерации (1) и КПД (2) лазера на парах стронция от величины активного объема

Исследования высокой и предельной частоты следования импульсов в ЛПМ.

Наиболее эффективным среди ЛПМ является лазер на парах меди, исследованию которого посвящено наибольшее количество работ [3, 4]. В число факторов, ограничивающих достижимую ЧСИ генерации лазера на парах меди, могут входить высокая предимпульсная населенность метастабильных состояний и высокая предимпульсная концентрация электронов, при этом различные факторы взаимосвязаны [5], а их вклад зависит от условий и способов возбуждения активной среды [6].

Таблица 3

Предельные частоты повторения импульсов ЛПМ		
Активный элемент ЛПМ	Предельная частота повторения импульсов, кГц	Год получения
Cu	235	1980 [1]
Au	150	1980 [1]
Pb	40	1982
Bi	18	1990
Ba	320	2011
Sr	830	2011[2]
CuBr	732	2012 [3]

Реализация частоты повторения импульсов ~1 МГц

Экспериментальные исследования частотно-энергетических характеристик лазера на парах стронция ($\lambda = 1,033$ и $1,091$ мкм) методом введения перед каждым импульсом возбуждения дополнительного импульса [7] и результаты численного моделирования кинетики процессов в активной среде показали, что при уменьшении задержки между дополнительным и возбуждающим импульсами (при сравнимых энергиях накачки в обоих импульсах) не наблюдалось изменения энергии импульса генерации на самоограниченных переходах как атома SrI, так и иона SrII в дополнительном импульсе. При этом наблюдался быстрый спад энергии импульса генерации на самоограниченных переходах SrI в возбуждающем импульсе. В то же время происходило увеличение энергии импульса генерации на самоограниченных переходах SrII в импульсе возбуждения в определенном диапазоне задержек. Экспериментально достигнутая минимальная задержка между импульсами составила 720 нс, что соответствует $f \sim 1,4$ МГц ($\lambda = 1,03$ и $1,09$ мкм).

При моделировании использовались близкие к экспериментальным условиям параметры: активная длина 50 см, внутренний диаметр активного элемента 1,5 см, давление гелия 100 Тор, начальная концентрация атомов стронция $8,5 \cdot 10^{14}$ см⁻³, частота следования импульсов 15 кГц,

накопительная емкость 1000 пФ (моделировалась схема разряда накопительного конденсатора без обостряющей емкости).

Исследования SrBr₂-лазера

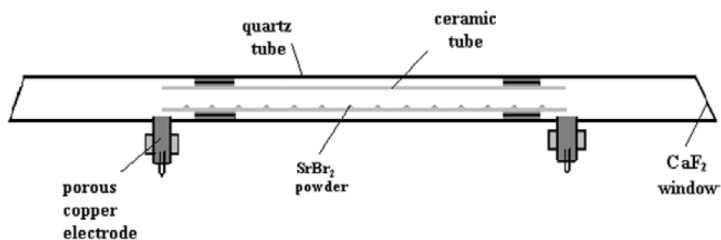


Рис. 3. Конструкция ГРТ He-SrBr₂-лазера

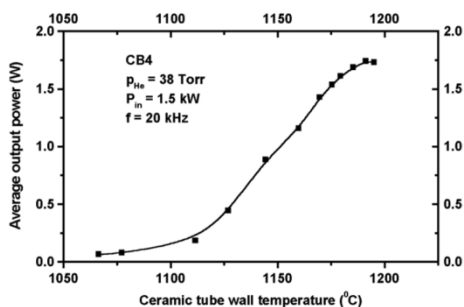


Рис. 4. Зависимость средней мощности от температуры стенки ГРТ ($P = 2,4$ Вт 80% мощности - $\lambda = 6,45$ мкм)

Исследования мультиэлементных ЛПМ с пространственно-разнесенными активными средами

Предпосылки для получения эффективной многоцветной генерации в импульсном разряде на самоограниченных переходах в мультиэлементной (многокомпонентной) среде:

- подобие механизма создания инверсной населенности;

- близкие условия возбуждения паров металлов по параметрам импульса возбуждения и микрохарактеристикам разряда;
- спектральная прозрачность газоразрядной плазмы;
- большие коэффициенты усиления.

Т а б л и ц а 4

Мультиэлементные среды

Ва+Mn+Ne λ , нм	Ва+Pb+Ne λ , нм	Сu+Ва+Pb+Ne λ , нм	Сu+Au+Ne λ , нм
-	-	-	312,3 AuI
-	-	510,6 CuI	510,6 CuI
542,0 MnI	-	-	-
-	-	578,2 CuI	578,2 CuI
614,2 BaII	614,2 BaII	614,2 BaII	-
649,7 BaII	649,7 BaII	649,7 BaII	627,8 AuI
-	722,9 PbI	722,9 PbI	-
1130 BaI	1130 BaI	1130 BaI	-
1362 MnI	-	-	-
1500 BaI	1500 BaI	1500 BaI	

Двухэлементный лазер на парах стронция и бромида меди, генерирующий на 10 дискретных линиях в диапазоне от 0,51 до 6,45 мкм, позволяет не только получать многоволновую генерацию, но и визуализировать пучок инфракрасного излучения. [8]

Многоволновые лазерные излучатели (SrI, SrII, CuBr)

Новая концепция многоволновых систем на парах металлов:

- два или более активных элемента размещены коаксиально в одном резонаторе;
- каждый активный элемент возбуждается независимым источником питания,
- генерационные характеристики каждого активного элемента могут быть независимо оптимизированы.

Преимущества мультимедийных систем:

- независимый выбор условий накачки для любого из активных элементов,
- узкая ширина спектра лазерных лучей обеспечивает минимальное поглощение любого из генерационных линий в генераторе,
- высокий коэффициент усиления на всех длинах волн обеспечивает высокую мощность импульса,
- в одном лазерном луче можно совмещать любой набор длин волн в диапазоне 0,31 - 6,45 мкм.

Предложенная схема с использованием активных элементов на парах стронция и бромида меди позволила получить генерацию на 10 длинах волн с суммарной средней мощностью 8 – 12 Вт. [9]

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 - 5 Вт.

Типичные длительности импульсов генерации по полувысоте на длинах волн 1,03 и 1,09 мкм - 50 нс, 6,45 мкм – ~ 130 нс, 2 – 3 мкм – ~70 нс.

Т а б л и ц а 5

Данные измерений

№	F, кГц	$W_{6,45}/E_{6,45}$, мВт/мкДж	W_1/E_1 , мВт/мкДж	W_3/E_3 , мВт/мкДж	W_{430}/E_{430} , мВт/мкДж	W_{510}/E_{510} , мВт/мкДж	W_{578}/E_{578} , мВт/мкДж	W_{Σ} , Вт
1	3,6	510 / 141	110 / 31	350 / 97	не изм.	не изм.	не изм.	0,97
2	3,6	650 / 180	190 / 50	440 / 122	70 / 19	*	*	1,35
3	4/20	1400 / 350	200 / 50	450 / 112,5	50 / 12,5	3600 / 180	1500 / 75	6,2
4	8	2900 / 362,5	170 / 21,25	565 / 70,6	не изм.	3850 / 481	1150 / 143,8	7,4
5	14,6	**	**	**	**	3500 / 239,7	1500 / 102,7	5,0
6	8,9	не изм.	не изм.	не изм.	не изм.	*	*	7,0
7	12,5	не изм.	не изм.	не изм.	не изм.	не изм.	не изм.	8,5
8	16	3310 / 206,9	270 / 16,9	620 / 38,8	не изм.	6800 / 425	2000 / 125	11,5
9	16	6930 / 433,1	650 / 40,6	620 / 38,8	не изм.	6800 / 425	2000 / 125	17,0

* - АЭ (CuBr) отключена; ** - АЭ (Sr) отключена; не изм. – параметр не измерялся.

Продемонстрировано получение в одном лазерном пучке многоволновой генерации в широком спектральном диапазоне (0,43 – 6,45 мкм).

Предложенная конструктивная схема на основе мультимедийного набора из двух активных элементов (на парах стронция и бромида меди) позволила получить генерацию на 12 длинах волн с суммарной средней мощностью ~ 17 Вт.

При частоте повторения импульсов 16 кГц средняя мощность на переходах атома и иона стронция составила 8,2 Вт, в то время как на переходах атома меди средняя мощность достигала $\sim 8,8$ Вт.

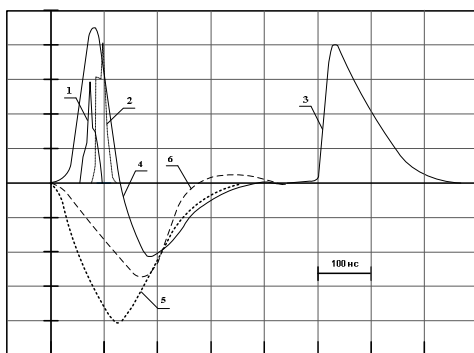


Рис. 5. Осциллограммы импульсов: генерации на $\lambda \sim 1$ мкм (Sr) 1; 3 генерации на $\lambda=510,6 + 578,2$ нм (Cu) 2; генерации на $\lambda = 430$ нм (SrI) 3; I (CuBr) 4; U (Sr) 5; I (Sr) 6

Применения лазеров на парах металлов:

- инфракрасная лазерная абляция материалов (биоткани, полимеры и т.д.) [10];
- управляемый термораскол [11];
- лазерное дистанционное зондирование малых газовых и метеорологических параметров атмосфера [12].

В заключении следует отметить, что разработанные многоволновые лазерные системы на парах металлов позволяют проводить прецизионную обработку стекла и керамических материалов, применяются в медицине в качестве скальпеля для рассеечения биологических тканей, а также в атмосферной оптике.

Использование мультимедийных систем на парах металлов позволяет создавать системы с любым набором длин волн от 0,31 до 6,45 мкм.

Экспериментально апробированы приборные варианты многоволновых лазерных систем. При использовании активных элементов на парах

стронция и бромида меди продемонстрирована работа системы на 12 длинах волн.

Использование многоволновых систем генератора-усилителя и мультимедийных ЛПМ позволяет создавать системы с наносекундной длительностью импульсов и высокими средними и импульсными мощностями.

Литература

1. J.S. Deech and J.H. Sanders, New self-terminating laser transitions in calcium and strontium, *IEEE J. Quantum Electron.* 1968. – No. 4 (7), p. 474.
2. Soldatov A.N., Filonov A.G., Polunin Yu.P. and Sidorov I.V. SrI- and SrII-Vapor Laser Active Volume Scaling//The 8-th Sino-Russian Symp. on Laser Physics and Laser Technologies, Tomsk, Russia, 10-15 August 2006. – P.5–10.
3. Солдатов А.Н. Достижения и рекорды в лазерах на парах металлов // Изв. вузов. Физика. – 1999.– Т. 42.– № 8.– С. 23-36.
4. Солдатов А.Н. Физика и техника лазеров на парах меди с управляемыми параметрами // Оптика атмосферы и океана. – 1993.– Т. 6.– № 6.– С. 650-658.
5. Солдатов А.Н., Юдин Н.А., Полуниин Ю.П., Юдин Н.Н. О механизме ограничения частотно-энергетических характеристик лазеров на парах металлов // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31, № 3. С. 191-197.
6. A. Burdin, Y. Polunin, I. Razmahnin, A. Soldatov, N. Yudin, N. Yudin. The efficiency of the pumping of the lasers based on self-terminating atomic transitions operating in the energy input cut-off mode //MATEC Web of conferences. 2018. Vol. 155. P. 01030.
7. Солдатов А.Н., Юдин Н.А., Полуниин Ю.П., Васильева А.В., Костыря И.Д., Колмаков Е.А. Лазер на парах стронция с частотой следования импульсов генерации до 1 МГц // Квантовая электроника. 2012. Т. 42, № 2. С. 31-33.
8. Солдатов А.Н., Полуниин 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.
9. Солдатов А.Н., Васильева А.В., Мирза С.Ю., Полуниин Ю.П., Романовский О.А., Шумейко А.С., Костадинов И.К. Мультимедийный лазерный излучатель на парах металлов для решения задач атмосферной оптики // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26, № 10. С. 842-845.
10. Солдатов А.Н., Костадинов И.К., Полуниин Ю.П., Шумейко А.С., Васильева А.В., Лоева Я.А. Абляция биологических тканей под действием излучения лазера на парах стронция // Известия вузов. Физика. 2013. Т. 56, № 10/2. С. 39-42.
11. Soldatov A.N., Sabotinov N.V., Latush E.L., Chebotarev G.D., Vuchkov N.K., Yudin N.A. Strontium and calcium vapour lasers. Volume 2. Sofia, Bulgaria: Prof. Marin Drinov Academic Publishing House, 2014. 292 p.
12. Солдатов А.Н., Мирза С.Ю., Полуниин Ю.П., Шумейко А.С., Костадинов И.К. Многоволновые лазерные системы на парах металлов для решения прикладных задач спектроскопии атмосферы // Журнал прикладной спектроскопии. 2014. Т. 81, № 6. С. 935-939.