

SEALED-OFF STRONTIUM VAPOR LASER

Anatoly N. Soldatov, Nikolay A. Yudin, Yury P. Polunin, Anatoly E. Kirilov,
Igor V. Reimer, Egor A. Kolmakov
Tomsk State University, 36 Lenin Avenue, Tomsk 634050, Russia

Abstract

A number of investigations aimed at an increase in the output characteristics of nanosecond strontium vapor laser, working in the IR spectrum on 8 wavelengths, were performed. Record energy characteristics were achieved, including total average lasing power of 13.5 W, lasing power at two wavelengths in the region of 3 μm of 4.5 W, lasing power at two wavelengths in the region of 1 μm of 1.9 W, and lasing power at wavelength 6.45 μm of 8 W.

The laboratory model of a multi-wavelength strontium vapor laser with output power of 5–7 W was developed and manufactured.

Key words: *sealed-off laser, strontium vapour laser, infrared generation*

1. ВВЕДЕНИЕ

Лазеры на парах металлов, работающие на самоограниченных переходах, обладают высокой эффективностью генерации. К ним относятся лазеры на парах меди, золота, свинца и др. Постоянно проводимый поиск возможностей улучшения энергетических характеристик этих лазеров идёт как по пути увеличения активного объёма, так и за счёт увеличения частоты следования импульсов возбуждения.

Актуальность исследований лазера на парах стронция обусловлена возможностью его применения в микро- и нанотехнологиях, а также зондировании атмосферы. Кроме того, процесс формирования инверсной населенности в лазере на парах стронция имеет ряд существенных особенностей по сравнению с формированием генерации в лазере на парах меди.

В лазере на самоограниченных переходах атома и иона стронция в настоящее время получена генерация на восьми длинах волн: 6,45 мкм, 3,06 мкм, 3,01 мкм, 2,60 мкм, 2,69 мкм, 2,92 мкм, 1,09 мкм и 1,03 мкм.

Генерация на длинах волн 6,456, 1,033 и 1,092 мкм впервые была получена Deech и Sanders [1] в 1968 г. Генерацию на $\lambda = 3,01$ мкм и 3,06 мкм на атомах стронция впервые наблюдал Cahuzac в моноимпульсном разряде в 1971 году [2]. Впоследствии Бохан и др. подробно исследовали уменьшение заселенностей нижних энергетических уровней этих лазерных линий [3]. Наши исследования Sr-лазера начались с опубликованной в 1978 г. работы [4]. Исследования проводились с газоразрядной трубкой (ГРТ) диаметром 10 мм, полученная средняя выходная мощность составляла 1,2 Вт. Результаты данных исследований вошли в первую в мире монографию по лазерам на парах металлов. [5]

Ранее был разработан непрокачной лазер на парах стронция, предназначенный для абляции костных тканей [6]. Лазер представлял собой единый блок, в котором были расположены схема возбуждения, резонатор и активный элемент. Возбуждение

активной среды осуществлялось модифицированной схемой Блумляйна. Неустойчивый резонатор телескопического типа позволял получать излучение с расходимостью, близкой к дифракционной. Генерация осуществлялась на пяти линиях атома стронция: 2,06 мкм; 2,69 мкм; 2,92 мкм; 3,01 мкм; 6,45 мкм и двух линиях иона стронция: 1,03 и 1,09 мкм. Средняя мощность генерации составляла 1 – 2,5 Вт.

Целью данной работы являлась разработка и создание мощного отпаянного лазера на парах стронция для практических применений.

2. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

На основании работ [7,8] по увеличению мощности излучения в ГРТ с различными активными объемами, в которых была получена рекордная средняя суммарная мощность генерации по всем линиям – 13,5 Вт, был разработан активный элемент с диаметром разрядного канала 20 мм и рабочим объемом 157 см³. Активный объем лазера ограничивался стенками керамической трубки из BeO, а по торцам трубки – электродами, выполненными из ниобия. Вакуумная оболочка выполнена из плавленого кварца, окна – из кристалла BaF₂. На рис. 1 приведена типичная конструкция отпаянной газоразрядной трубки лазеров на парах металлов, используемая в данном случае.

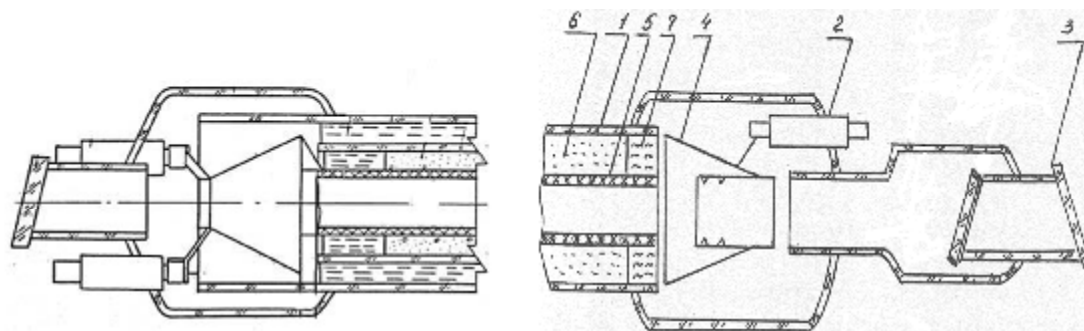


Рис. 1. Отпаянный активный элемент лазеров на парах металлов: 1 – вакуумный кожух, 2 – электрические вводы, 3 – выходные окна, 4 – электродные узлы, 5 – газоразрядный канал, 6 – теплоизоляционный объем, 7 – узел герметизации.

Генерация осуществлялась на шести линиях атома стронция (6,45, 3,06 3,01, 2,60, 2,69 и 2,92 мкм) и двух линиях иона стронция (1,09 и 1,03 мкм). В качестве буферного газа использовалась смесь гелия и неона при давлении 90 Торр. Частота следования импульсов возбуждения составляла 15 кГц. Для формирования импульсов возбуждения использовалась схема Блумляйна. Емкость накопительных конденсаторов тиратронно-магнитного накопителя импульсов C_1 и C_2 была равна 1053 и 1000 пФ соответственно. Напряжение на аноде тиратрона составляло 6 кВ. Излучение в лазерном активном элементе формировалось неустойчивым резонатором телескопического типа с увеличением $M = 200$.

Регистрация импульсов тока, напряжения и генерации проводилась с помощью пояса Роговского, пробника напряжения Tektronix P6015A и фотоприёмника ФЭК-24. Регистрируемые датчиками сигналы подавались на осциллограф Tektronix TDS-3034B. Средняя мощность генерации контролировалась измерителем мощности Nova II (OPHIR). Для

исследования спектрального состава генерации использовались светофильтры СЗС-8 для линий в области 3 мкм и светофильтры СЗС-20 для линий в области 1 мкм.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Одним из важных показателей качества пучка генерации является его расходимость. Малая расходимость позволяет сфокусировать излучение на меньшей поверхности мишени, повысив тем самым плотность излучения на единицу поверхности. Уменьшение расходимости в лазерах на самоограниченных переходах достигается применением неустойчивого резонатора телескопического типа [6]. Экспериментально удалось найти режим работы с равномерным распределением интенсивности по диаметру пучка генерации. Распределение по диаметру фиксировалось при максимальной мощности генерации. Оценка дифракционного предела θ_d для излучения с $\lambda = 6,45$ мкм и однородным распределением в ближней зоне производилась по формуле:

$\theta_d = 2,44 \cdot \lambda / D$; где D – диаметр пучка.

Поскольку апертура в нашем случае составляла 20 мм, то дифракционная расходимость составила $\theta_d = 0,75$ мрад. Выделяя диафрагмой долю излучения с дифракционной расходимостью, было определено, что оно составляет 75% от суммарного. Распределение мощности генерации в фокусе сферического зеркала радиусом кривизны 10 м носит гауссов характер. Важной особенностью таких пучков является возможность их фокусировки в пятно минимальных размеров с диаметром порядка длины волны.

Распределение энергии излучения по спектру генерации зависит от температуры стенки рабочего канала. На рис. 2 отображено распределение мощности генерации в спектральных линиях по мере разогрева ГРТ. Сначала начинается генерация блока линий 3 мкм, далее по мере увеличения давления паров Sr появляется генерация на ионных линиях – 1,03 и 1,09 мкм и затем на $\lambda = 6,45$ мкм. Дальнейшее увеличение температуры рабочего канала приводит к снижению мощности генерации на длинах волн в области 3 мкм и ионных линиях генерации с последующим существованием генерации преимущественно на линии генерации 6,45 мкм. Из рис. 2 следует, что при данных условиях накачки время выхода от начала генерации на рабочий квазистационарный режим составляет 15 минут.

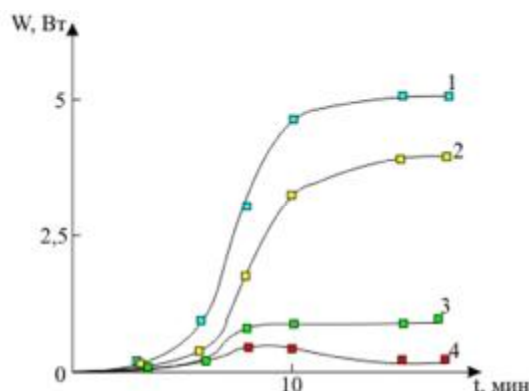


Рис. 2. Распределение мощности генерации в спектральных линиях по мере разогрева ГРТ: 1 – суммарная средняя мощность, 2 – средняя мощность на $\lambda = 6,45$ мкм, 3 – средняя мощность в области 3 мкм, 4 – средняя мощность в области 1 мкм.

На рис. 3 представлены осциллограммы импульсов возбуждения и суммарного импульса генерации, из которых видно, что длительность суммарного импульса генерации по полувывсоте составляет ~ 50 нс. В данной ГРТ с активным объемом 157 см^3 максимальная энергия в импульсе по всем спектральным линиям достигла $0,33 \text{ мДж}$, а энергия в импульсе генерации на длине волны $6,45 \text{ мкм}$ – $0,27 \text{ мДж}$.

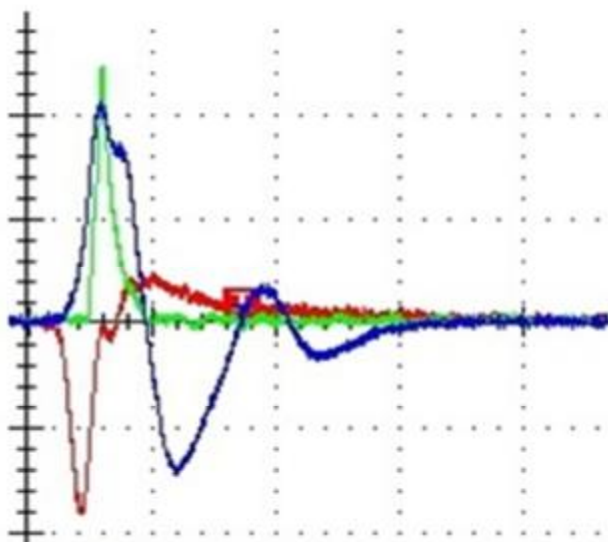


Рис. 3. Осциллограммы импульсов возбуждения и одномикронного импульса излучения.
 $P_{\text{He+Ne}} = 90 \text{ Торр}$, $f = 15 \text{ кГц}$, $W_{\text{ср.сум.}} = 5 \text{ Вт}$, $W_{\text{ср.1 мкм}} = 0,32 \text{ Вт}$.

На рис. 4 приведен внешний вид отпаянного лазера на парах стронция. Основные технические характеристики данного лазерного источника приведены в таблице 1. Источник питания разработан ООО «Научно-производственное предприятие ВЭЛИТ» (г. Истра).



Рис. 4. Отпаянный лазер на парах стронция мощностью 5 Вт KULON-5Sr

Таблица 1. Технические характеристики отпаянного лазера на парах стронция KULON-5Sr.

Максимальная частота следования импульсов генерации, кГц	15
Длина волны излучения, мкм	1,03; 1,09; 2,60; 2,69; 2,92; 3,06; 3,01 и 6,45
Максимальное значение суммарной средней мощности, Вт	5
Максимальное значение средней мощности для $\lambda = 6,45$, Вт	4
Расходимость лазерного излучения, мрад	0,75
Длительность импульса излучения на полувысоте, нс	50
Апертура излучения, мм	16
Охлаждение принудительное	воздушное
Потребляемая мощность от однофазной сети ~ 220 В, 50 Гц, не более, кВт	2,5
Гарантийная наработка на отказ, не менее, час	500
Длина активной зоны, мм	500
Давление буферного газа (гелий, неон), Торр	90
Габаритные размеры установки, мм	355*185*1260

Импульсный газоразрядный лазер на парах стронция KULON-5Sr, излучающий в ближнем и среднем ИК – диапазоне, предназначен для выполнения фундаментальных исследований в области лазерной физики, зондирования атмосферы, биологии и медицины, а также для решения прикладных задач в области микро- и нанотехнологий.

4. ПРИМЕНЕНИЯ ОТПАЯННОГО ЛАЗЕРА НА ПАРАХ СТРОНЦИЯ

4.1. Управляемый лазерный термораскол стекла

В работе [9] показаны преимущества двухволнового способа управляемого термораскола стекла при использовании лазера на парах стронция (рис. 5). Эксперименты показали, что скорость термораскола стекла толщиной 0,7 – 1,0 мм увеличивается в 2 – 3 раза по сравнению с СО₂-лазером; сколы и микронеровности на полученных образцах стекла минимальны. Отмеченное уменьшение дефектов наблюдалось при плотности энергии лазера на парах стронция 40 – 80 Дж/см².

Это подтверждает, что излучение Sr-лазера может явиться основным инструментом для лазерного управляемого термораскалывания при создании плоских панелей дисплеев LCD и тонких стекол для термооптического покрытия космических радиаторов.

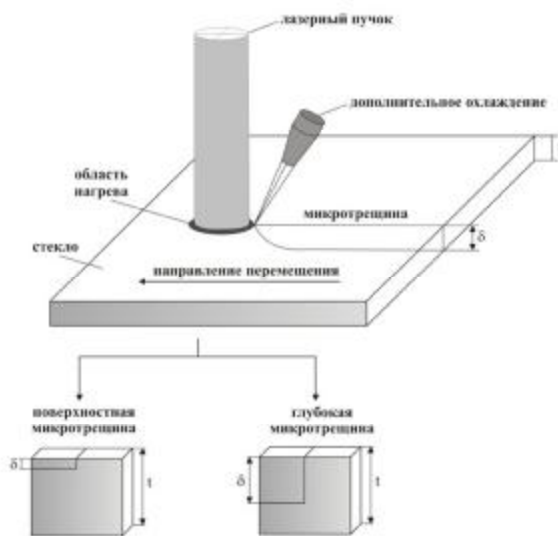


Рис. 5. Схема управляемого лазерного термораскола стекла

4.2. Дистанционный измеритель влажности на $\lambda = 6,45$ мкм

Водяной пар - один из основных и наиболее изменчивых комплексов атмосферного воздуха, определяет процессы погодообразования на планете, тепловой и водяной режимы тропо- и стратосферы. Поэтому для решения важных научных и практических задач, включая прогноз погоды, нужна информация о пространственно-временном распределении водяного пара в атмосфере. Наибольшими потенциальными возможностями обладает метод дистанционного зондирования на базе эффекта резонансного поглощения излучения, позволяющий получать пространственное распределение водяного пара атмосферы с высоким разрешением и до расстояний в несколько десятков километров. Для этой цели можно применять и импульсный лазер на парах Sr.

В работе [10] измерялся коэффициент поглощения парами воды излучения ЛПС с длиной волны генерации $\lambda=6,45$ мкм. Измеренный коэффициент поглощения оказался слишком большим для исследования атмосферного водяного пара на трассах порядка сотен метров (при прохождении трассы ~ 100 метров остается всего лишь $2 \cdot 10^{-4}$ % посланной мощности). Однако была показана возможность осуществления контроля влажности атмосферы на коротких трассах. Кроме того, был разработан и изготовлен лабораторный макет малогабаритного малоинерционного измерителя влажности на основе лазера на парах стронция. Возможность создания измерителя влажности на длинных трассах на основе ЛПС, генерирующего в области $1 - 3$ мкм, было обосновано сотрудниками Института оптики атмосферы СО РАН [11].

Представленные в [11] результаты численного моделирования, а также полученные экспериментальные данные подтверждают возможность применения Sr-лазера в качестве частотно-селективного источника ИК лазерного излучения для зондирования атмосферы с целью дистанционного измерения метеопараметров и, потенциально, зондирования малых концентраций различных атмосферных примесей в лабораторных и лидарных дистанционных измерениях.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в Томском государственном университете исследования лазера на парах стронция позволили определить оптимальную конструкцию газоразрядной трубки с разрядным каналом из BeO-керамической трубки длиной 50 см и диаметром 2 см для создания мощного отпаянного элемента на парах стронция.

Созданы отпаянные многоволновые Sr-лазеры ($\lambda = 6,45, 3,01, 3,06, 2,92, 2,69, 2,60, 1,03$ и $1,09$ мкм) средней мощностью 1 – 5 Вт со сроком службы более 1000 часов.

Показана перспективность применения лазера на парах стронция в микро- и нанотехнологиях, зондировании атмосферы и т.д.

Данная работа выполнена в рамках реализации гранта НШ-4297.2010.2 и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы (государственный контракт № 02.740.11.0444).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Deech, J.S. and Sanders, J.H. (1968) New self-terminating laser transitions in calcium and strontium, IEEE J. Quantum Electron, 4 (7), pp. 474–478.
2. Cahuzac, Ph. (1971) Raies laser infrarouges des les vapeurs de terres rares et d'alcalineo-terreux, J. Phys. (Paris), 32(7), pp. 499–505.
3. Бохан, П.А., Бурлаков, В.Д. (1979) О механизме генерации на переходах $4d\ ^3D_{1,2} - 5p\ ^3P_{0,2}$ атома стронция, Квантовая электроника, 6 (3), с. 623–625.
4. Платонов, А.В., Солдатов, А.Н., Филонов, А.Г. (1978) Импульсный лазер на парах стронция, Квантовая электроника, 5 (1), с. 198–201.
5. Солдатов, А.Н., Соломонов, В.И. (1985) Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов, Новосибирск: Наука, 152 с.
6. Soldatov, A.N., Filonov, A.G., Shumeiko, A.S., Kirilov, A.E., Ivanov, B., Haglund, R., Mendenhall, M., Gabella, B. and Kostadinov, I. (2004) A Sealed-off Strontium-Vapor Laser, SPIE, 5483, pp. 252–261.
7. Солдатов, А.Н. (1999) Достижения и рекорды в лазерах на парах металлов, Изв. вузов. Физика, 42 (8), с. 23–36.
8. Soldatov, A.N., Polunin, Yu.P., et al. (2008) Scaling of strontium-vapor laser active volume, SPIE, 6938, NO6938-22.
9. Polischuk, G.M., Sysoev, V.K., Vyatlev, P.A., Turichin, K.A., Soldatov, A.N., Vasilieva, A.V. (2008) Proc. of the 9th Russian-Chinese Symp. on Laser Physics and Laser Technologies, October 21-26, 2008, Tomsk, Russia, pp. 182–186.
10. Маричев, В.Н. Платонов, А.В. Солдатов, А.Н. (1977) Сб.: Измерительные приборы для исследования приземных слоев атмосферы, с. 80–87.
11. Vasilieva, A.V., Polunin, Y.P., Romanovskii, O.A., Soldatov, A.N., Kharchenko, O.V., Yudin, N.A., (2009) Optical memory and neural networks, 18 (2), pp. 108–119.