

Применимость лазера на парах стронция для решения задач лазерного зондирования газового состава атмосферы

Д.А. Бочковский¹, А.В. Васильева², Г.Г. Матвиенко¹,
Ю.П. Полуни², О.А. Романовский^{1,2}, А.Н. Солдатов²,
О.В. Харченко¹, Н.А. Юдин², С.В. Яковлев^{1,2*}

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

²Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 18.06.2011 г.

Исследованы возможности применения многоволнового лазера на самоограниченных переходах SrI и SrII для лазерного дистанционного зондирования методом дифференциального поглощения газовых компонентов и метеорологических параметров атмосферы. Найдены информативные длины волн зондирования малых газовых составляющих, и измерено ослабление газовых компонентов.

Ключевые слова: газовый анализ, поглощение, многоволновой Sr-лазер, атмосфера; gas analysis, absorption, multi-wave Sr laser, atmosphere.

Введение

Развитие лазерной дистанционной ИК-спектроскопии требует разработки и внедрения новых лазерных источников, способных генерировать излучение в возможно более широком диапазоне длин волн. Спектральные диапазоны, в которых расположены линии генерации стронциевого лазера, охватывают участки спектра, являющиеся наиболее информативными с точки зрения лазерного зондирования как основных малых газовых составляющих (МГС) и метеорологических параметров атмосферы, так и газовых компонентов, представляющих собой сильные загрязнители, токсины, взрывчатые или наркотические вещества. Надежное дистанционное детектирование таких веществ в настоящее время весьма актуально.

Для решения этих задач представляется перспективным использование лазера на парах стронция, имеющего ряд линий генерации в ближней и средней ИК-области спектра, где он способен конкурировать с известными химическими HF:DF-лазерами [1], с CO₂-лазерами и обертонным СО-лазером [2–5].

* Дмитрий Андреевич Бочковский (moto@iao.ru); Анна Викторовна Васильева (anita_tomsk@mail.ru); Геннадий Григорьевич Матвиенко (magg@iao.ru); Юрий Петрович Полуни (general@tic.tsu.ru); Олег Анатольевич Романовский (goa@iao.ru); Анатолий Николаевич Солдатов (general@tic.tsu.ru); Ольга Викторовна Харченко (olya@iao.ru); Николай Александрович Юдин (yudin@tic.tsu.ru); Семен Владимирович Яковлев (ysv@iao.ru).

О возможности использования в трассовом анализаторе влажности одной из линий стронциевого лазера ($\lambda = 6,456$ мкм) сообщалось в работе [6].

Измеренный коэффициент ослабления оказался слишком большим для исследования атмосферного водяного пара на трассах порядка сотен метров (при прохождении трассы ~ 100 м остается всего лишь $2 \cdot 10^{-4}\%$ посланной мощности). Однако была показана возможность осуществления контроля влажности атмосферы на коротких трассах (1–10 м).

В настоящей статье рассмотрены возможности применения многоволнового лазера на самоограниченных переходах SrI и SrII для лазерного дистанционного зондирования МГС (методом дифференциального поглощения) и метеорологических параметров атмосферы.

Результаты поиска информативных длин волн зондирования МГС атмосферы

Излучение стронциевого лазера перекрывает спектральный диапазон 1,033–6,456 мкм, являющийся информативным с точки зрения лазерного газоанализа атмосферы.

В настоящее время генерация в лазере на парах Sr получена на следующих длинах волн [7]:

$$\lambda = 6,456 \text{ мкм } (5s5p^1P_1^0 - 5s4d^1D_2),$$

$$\lambda = 3,066 \text{ мкм } (5s4d^3D_1 - 5s5p^3P_2^0),$$

$$\lambda = 3,011 \text{ мкм } (5s4d^3D_2 - 5s5p^3P_2^0).$$

В работе [8] сообщалось о получении генерации еще на трех спектральных линиях в атоме Sr:

$$\lambda = 2,601 \text{ мкм } (5s4d^3D_1 - 5s5p^3P_0^0),$$

$$\lambda = 2,692 \text{ мкм } (5s4d^3D_2 - 5s5p^3P_1^0),$$

$$\lambda = 2,923 \text{ мкм } (5s4d^3D_3 - 5s5p^3P_2^0).$$

На первом ионе стронция (SrII) генерация получена на двух спектральных линиях [7]:

$$\lambda = 1,092 \text{ мкм } (4p^65p^2P_{1/2}^0 - 4p^64d^2D_{3/2}),$$

$$\lambda = 1,033 \text{ мкм } (4p^65p^2P_{3/2}^0 - 4p^64d^2D_{5/2}).$$

Генерация на спектральной линии Sr 6,456 мкм и на ионе Sr 1,033 и 1,092 мкм относится к генерации на самоограниченных переходах, инверсии на которых создается путем прямого электронного удара [7].

Генерацию на длинах волн 2,601; 2,692; 2,923; 3,011; 3,066 мкм относят к переходам метастабиль–метастабиль ($m-m$) [8, 9]. При одинаковых условиях возбуждения средняя мощность генерации на линии 6,456 мкм и на линиях в области 3 мкм при использовании в качестве буферного газа гелия выше, чем в неоне.

Для решения задач лазерного зондирования атмосферных газов пригодны линии излучения 3-мкм диапазона. Основная мощность генерации приходится на $\lambda = 3,066$ и 3,011 мкм, это 2,47 и 0,89 Вт соответственно. Суммарная мощность генерации в диапазоне спектра 1,033–6,456 мкм по ходу эксперимента составляла 12 Вт, а мощность генерации в областях 6 мкм – 6,5 Вт, 3 мкм – 4,3 Вт и 1 мкм – 1,2 Вт соответственно [7]. Результаты этих экспериментов для области спектра 3 мкм приведены на рис. 1. Максимальная средняя мощность, полученная ранее на атомах стронция, составляла 4,25 Вт [10].

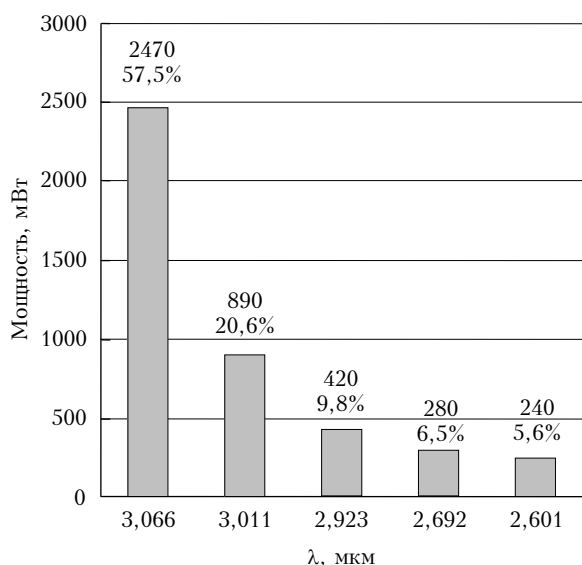


Рис. 1. Мощности генерации 3-мкм блока линий

Чтобы определить возможность применения излучения многоволнового Sr-лазера для дистанционного лазерного зондирования МГС атмосферы, нами были рассчитаны спектры пропускания атмосферы. Расчет проводился по методу *line-by-line* с использованием данных о спектральных параметрах линий поглощения основных атмосферных газов [11] для приземной трассы зондирования длиной 1 км и стандартной модели атмосферы (лето, средние широты [12]).

Для поиска информативных длин волн зондирования МГС атмосферы по методу дифференциального поглощения (МДП) в диапазоне генерации излучения стронциевого лазера нами была применена методика [13], разработанная на базе обоснованных критериев отбора линий и ускоренного алгоритма расчета.

Результаты этих расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Длина волны, волновое число, интенсивность линий излучения Sr-лазера и пропускание на них для 1-км приземной трассы зондирования (атом SrII)

Длина волны в воздухе, мкм	Волновое число в воздухе, см ⁻¹	Интенсивность излучения лазера, отн. ед.	Пропускание на 1-км трассе (водяной пар)
1,033	9680,542	12000	0,99988
1,092	9162,543	10000	0,99964
2,692	3715,400	100000	0
2,923	3421,728	125000	0
3,011	3321,156	140000	0,64634

Анализ результатов показал, что часть линий излучения стронциевого лазера весьма сложно использовать при трассовом газоанализе атмосферы из-за сильного мешающего поглощения излучения водяным паром. Но наряду с линиями, которые полностью поглощаются на трассе длиной 1 км, в спектре Sr-лазера имеются линии, которые попадают в «микроокна» прозрачности атмосферы и могут быть использованы при дистанционном зондировании по методу дифференциального поглощения.

Сильные линии поглощения водяного пара с центрами 2,692 и 2,923 мкм перспективны для измерения профилей концентраций влажности атмосферы на атмосферных трассах длиной до 100 м. На рис. 2 представлены спектры пропускания атмосферы на трассах длиной 1–100 м и положение линий излучения Sr-лазера в области спектра 2,692 и 2,923 мкм. При этом линии излучения с центрами 1,033 и 1,092 мкм можно использовать в качестве референтной частоты (см. табл. 1).

Видно, что использование линий поглощения водяного пара и совпадающих с ними линий генерации стронциевого лазера 2,692 и 2,923 мкм дает возможность определять фоновые концентрации водяного пара на трассах длиной до 100 м. Использование линий излучения стронциевого лазера с центром 3,011 мкм возможно на трассах длиной до 1 км (рис. 3).

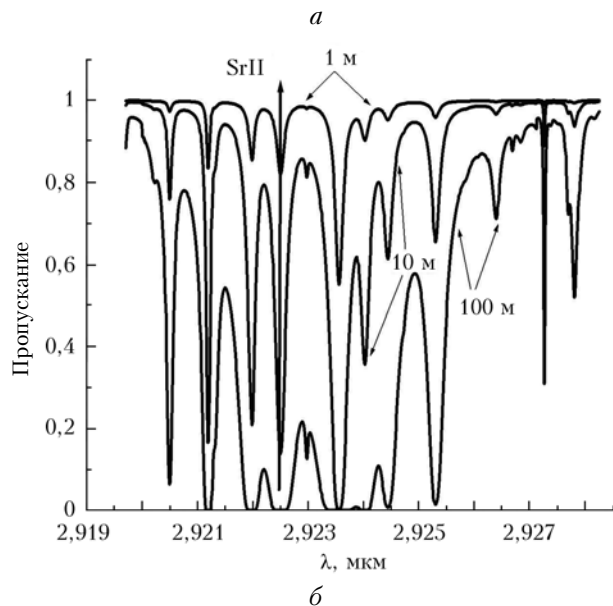
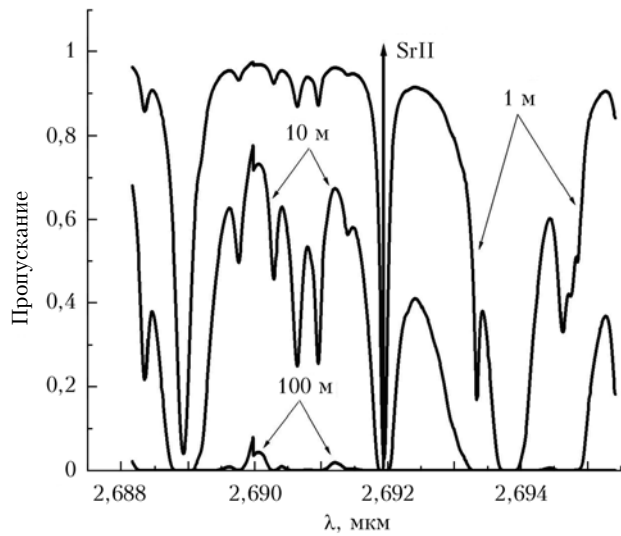


Рис. 2. Спектр пропускания атмосферы на 1–100-м приземной трассе и положение линий излучения Sr-лазера в области сильных линий поглощения водяного пара 2,692 (а) и 2,923 мкм (б)

Как показали результаты расчетов, линия излучения стронциевого лазера в области спектра 3 мкм может быть использована для обнаружения на трассах длиной 1 км выбросов HCN на уровне 0,1 ppm.

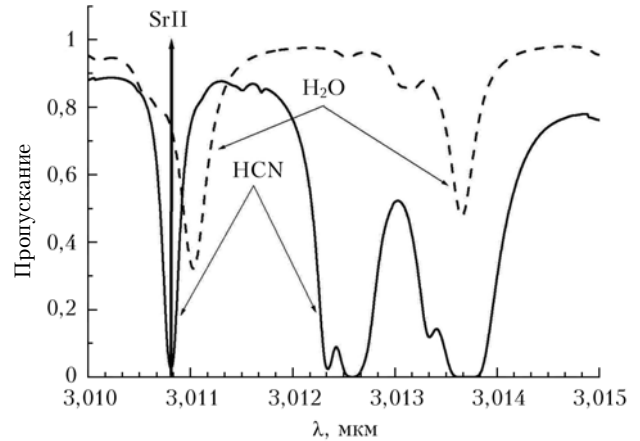


Рис. 3. Спектр пропускания водяного пара и HCN на 1-км приземной трассе и положение линий излучения Sr (мощная линия 3,011 мкм) в области линии поглощения HCN

На рис. 3 приведены спектр пропускания водяного пара и HCN на 1-км приземной трассе и положение линии излучения Sr-лазера, которая попадает практически точно в центр линии поглощения HCN.

Результаты измерения поглощения излучения стронциевого лазера

Для найденных информативных длин волн зондирования было проведено модельное (лабораторное) исследование поглощения парами воды излучения лазера на парах стронция в температурном диапазоне от 20 до 70 °С.

Для измерения коэффициента ослабления парами воды излучения лазера на парах стронция на информативных длинах волн зондирования в области 1–3 мкм было предложено использовать селектор длин волн на основе дифракционной решетки 300 штр./мм. Расчет углов дифракции производился в программной среде Maple, а геометрические построения (в соответствующем масштабе и с требуемой точностью) осуществлялись с помощью редактора Microsoft Visio, что позволило значительно упростить в дальнейшем процедуру сборки и юстировки оптической схемы установки в целом.

Лабораторная экспериментальная установка (рис. 4) включает: активный элемент (Sr-лазер) (АЭ), поворотные зеркала (ПЗ-1 и ПЗ-2), дифракционную решетку (ДР), закрепленную на поворотном столике,

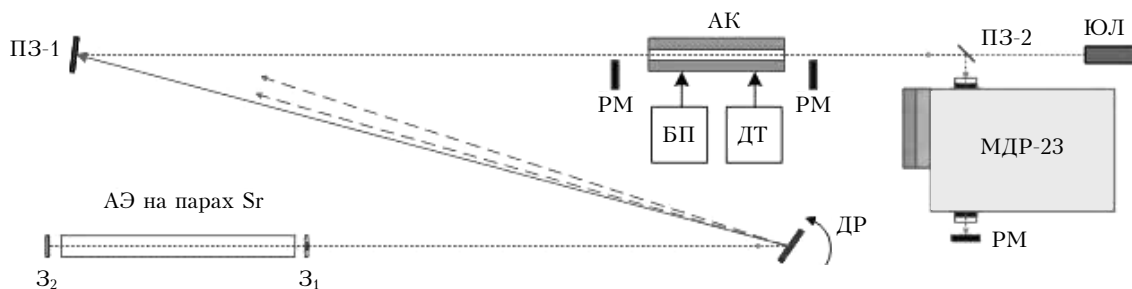


Рис. 4. Схема лабораторной экспериментальной установки

аналитическую кювету (АК) с парами воды, блок питания (БП) встроенного нагревателя, датчик температуры (ДТ), измерители мощности (РМ), юстировочный лазер (ЮЛ) и монохроматор МДР-23.

Оптическая схема селектора на основе ДР рассчитывалась таким образом, чтобы была возможность полного пространственного разрешения наиболее близких длин волн (3,011 и 3,066 мкм) в соответствии с выбранной геометрией схемы экспериментальной установки. Поэтому базовым углом падения для $\lambda = 3,066$ мкм был выбран угол $\alpha = 35^\circ$. Это полностью фиксирует углы дифракции для остальных генерационных компонент. Для заданной геометрии оптической схемы были рассчитаны необходимые углы падения луча на дифракционную решетку (углы установки ДР) для селекции нужной длины волн (табл. 2).

Таблица 2

Расчетные углы установки ДР для заданных длин волн

λ , мкм	1,033	1,091	2,601	2,692	2,923	3,011	3,066
α , °	16,4	16,9	30,6	31,4	3,6	34,5	35

Излучение лазера под заданным углом падает на дифракционную решетку, от которой в выбранном направлении (–1 порядок дифракции) дифрагирует набор монохроматических пучков, один из которых (выбранный) после отражения от поворотного зеркала проходит через аналитическую кювету с парами воды. Температура внутри кюветы регулируется нагревателем и контролируется датчиком температуры. Далее излучение направляется на входную щель монохроматора, который использовался для контроля настройки углового положения дифракционной решетки. Средняя мощность излучения до и после кюветы контролировалась измерителем мощности (РМ).

Аналитическая кювета длиной 40 см состоит из кварцевой трубки и нагревательного элемента, заключенных в теплоизолирующий кожух. Сверху в отверстие трубки помещен зонд датчика температуры, служащий для контроля температуры, которая изменялась в пределах от 20 до 70 °С.

Результаты исследования пропускания излучения в сравнении с расчетными значениями пропускания для измерения профилей концентраций влажности атмосферы на атмосферных трассах длин волн зондирования 2,692 и 2,923 мкм приведены на рис. 5.

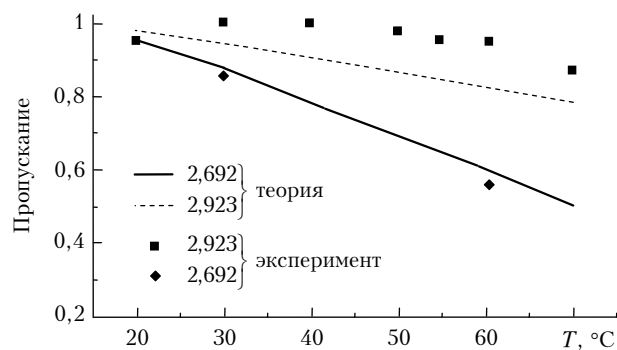


Рис. 5. Рассчитанное и измеренное пропускание для длин волн 2,692 и 2,923 мкм Sr-лазера

Из рис. 5 видно, что измеренные и рассчитанные значения пропускания достаточно хорошо согласуются во всем диапазоне изменения температуры воздуха.

Заключение

Результаты численного моделирования подтверждают перспективность применения стронциевого лазера для газоанализа по МДП. Использование сильных линий водяного пара и совпадающих с ними линий генерации стронциевого лазера в области 3 мкм дает возможность определять фоновые концентрации водяного пара на трассах длиной до 100 м. Линия излучения стронциевого лазера в области спектра 3 мкм может быть использована для обнаружения на трассах длиной 1 км выбросов HCN на уровне 0,1 ppm. При этом предварительные оценки говорят о возможности зондирования в спектральной области, перекрываемой стронциевым лазером, целого ряда других газовых компонентов атмосферы.

С помощью созданной лабораторной экспериментальной установки исследовано ослабление парами воды излучения лазера на парах стронция на выбранных информативных длинах волн зондирования в температурном диапазоне от 20 до 70°. Измеренные значения пропускания хорошо согласуются с расчетными значениями. Найдены информативные длины волн зондирования малых газовых составляющих, и измерено ослабление газовых компонент, что имеет важное значение для повышения оперативности, точности и информативности газоанализа по МДП.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (Гос. контракты № 02.740.11.0674, 14.740.11.0204, 02.740.11.0444 и 16.518.11.7067) и гранта РФФИ № 09-05-99035_р-офи.

1. Матвиенко Г.Г., Пташник И.В., Романовский О.А., Харченко О.В., Шаманов В.С. Применимость DF-лазера для детектирования аэрозольно-газовых выбросов // Прикл. физ. 2002. № 1. С. 129–136.
2. Андреев Ю.М., Гейко П.П., Грибенюков А.И., Зуев В.В., Романовский О.А. ИК параметрические преобразователи частоты в задачах лазерной спектроскопии атмосферы // Оптика атмосфер. 1988. Т. 1, № 3. С. 20–26.
3. Ионин А.А., Климачев Ю.М., Козлов А.Ю., Котков А.А., Романовский О.А., Селезнев Л.В., Синицын Д.В., Харченко О.В., Яковлев С.В. Широкодиапазонный СО-лазер в задачах лазерного зондирования малых газовых составляющих атмосферы // Изв. вузов. Физ. 2008. Т. 51, № 11. С. 76–83.
4. Karapuzikov A.I., Ptashnik I.V., Sherstov I.V., Romanovskii O.A., Matvienko G.G., Ponomarev Y.N. Modeling of helicopter-borne tunable TEA CO₂ DIAL system employment for detection of methane and ammonia leakage // Infrared Phys. and Technol. 2000. V. 41, N 2. P. 87–96.
5. Romanovskii O.A. Airborne DIAL Lidar Gas Analysis of the Atmosphere by Middle IR Gas Lasers: Numerical Modeling // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2008. V. 17, N 2. P. 131–137.

6. *Марицев В.Н., Платонов А.В., Солдатов А.Н., Со-
снин А.В., Филонов А.Г., Филонова Н.А.* Поглощение
излучения лазера на парах стронция атмосферным во-
дяным паром // Измерительные приборы для исследо-
вания параметров приземных слоев атмосферы. Томск:
Изд-е Института оптики атмосферы СО АН СССР,
1977. С. 80–86.
7. *Горбунова Т.М., Солдатов А.Н., Филонов А.Г.* О ме-
ханизме формирования инверсии на инфракрасных пе-
реходах атома SrI и иона SrII // Оптика атмосф. и
океана. 2004. Т. 17, № 2–3. С. 262–265.
8. *Pan B.-L., Chen G., Zhong J.-W., Yao Z.-X.* Emission
of Laser Pulses due to Transitions from Metastable to
Metastable Levels in Strontium Vapor // Appl. Phys.
B. 2003. N 76. P. 371–374.
9. *Soldatov A.N., Polunin Yu.P., Shumeiko A.S., Sidorov I.V.*
Record Output Energy Parameters of a SrI and SrII Vapor
Laser: Symposium proceedings // The 7-th Int. Sympos.
“Laser Physics and Laser Technologies”. Tomsk, December,
2004. Tomsk: Tomsk State University, 2004. P. 202–207.
10. *Temelkov K.A., Vuchkov N.K., Sabotinov N.V., Lyu-
tov L., Freijo-Martin I., Lema A.* Experimental study on
the spectral and spatial characteristics of a high-power
He–SrBr₂ laser // J. Phys. D. 2009. V. 42, N 11. P. 115105.
11. *Rothman L.S., Jacquemart D., Barbe A., Chris Benner D.,
Birk M., Brown L.R., Carleer M.R., Chackerian C., Jr.,
Chance K., Coudert L.H., Dana V., Devi V.M., Flaud J.-M.,
Gamache R.R., Goldman A., Hartmann J.-M., Jucks K.W.,
Maki A.G., Mandin J.-Y., Massie S.T., Orphal J., Per-
rin A., Rinsland C.P., Smith M.A.H., Tennyson J., Tolche-
nov R.N., Toth R.A., Vander Auwera J., Varanasi P.,
Wagner G.* The HITRAN 2004 molecular spectroscopic
database // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.
2005. V. 96, N 2. P. 139–204.
12. *Зуев В.Е., Комаров В.С.* Статистические модели тем-
пературы и газовых компонент атмосферы. Л.: Гидро-
метеоиздат, 1986. 264 с.
13. *Романовский О.А.* Методика и результаты поиска ин-
формативных длин волн зондирования газовых компо-
нент атмосферы // Прикл. физ. 2009. № 1. С. 24–30.

D.A. Bochkovskii, A.V. Vasilieva, G.G. Matvienko, Yu.P. Polunin, O.A. Romanovskii, A.N. Soldatov, O.V. Kharchenko, N.A. Yudin, S.V. Yakovlev. **The application of a strontium vapor laser to laser sensing of gas composition of the atmosphere.**

The possibilities of application of a multi-wave laser on the SrI and SrII transfers to laser remote sensing by DIAL (differential absorption lidar) method of gaseous components and meteorological parameters of the atmosphere are studied. The informative wavelengths for sensing the minor gas components are found and the attenuation of the gas components are measured.