

УДК 535.853-2 : 621.373 : 535

АТМОСФЕРНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ СПЕКТРОМЕТР С ВЫНОСНЫМ ЗЕРКАЛОМ РЕЗОНАТОРА

А. П. Годлевский, А. К. Иванов и Ю. Д. Копытин

В работе приведены экспериментальные результаты исследования внутрирезонаторного лазерного спектрометра на рубине с резонатором в реальной атмосфере на трассе до 160 м. Исследована кинетика генерации лазера при различных метеоусловиях в резонаторе. Определена чувствительность и ошибка измерения влажности при низких отрицательных температурах в атмосфере.

Необходимость измерения фоновое содержание малых газовых примесей в атмосфере возникает в ряде практически важных задач, связанных, например, с дистанционным обнаружением мест разгерметизации на нефте- и газопроводах, контролем загрязнений воздушного бассейна, определением влажности воздуха при низких температурах. Для газов, не обладающих сильными линиями поглощения в областях генерации лазеров, традиционный метод абсорбционной спектроскопии малоэффективен, так как требует оптической длины луча в атмосфере один и более километров.

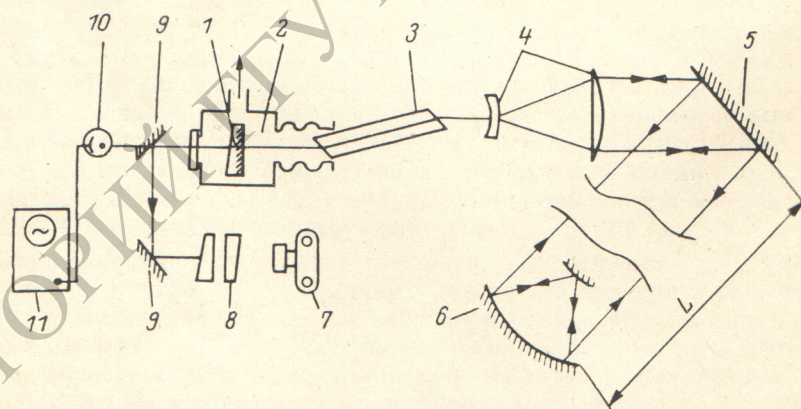


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — зеркало резонатора $R=85\%$, 2 — вакуумная камера резонатора, 3 — рубиновый элемент, 4 — телескоп Галилея, 5 — поворотное алюминиевое зеркало, 6 — алюминиеванный телескоп Кассегрена, 7 — фоторегистратор, 8 — интерферометр Фабри-Перо, 9 — диэлектрические поворотные зеркала, 10 — фотоприемник, 11 — осциллограф.

В настоящее время достаточно хорошо изучена высокая концентрационная чувствительность лазера к селективному поглощению газов, помещенных в резонатор лазера [1-3]. Данным методом, с высокой чувствительностью к коэффициенту поглощения до $5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-1}$, в лабораторных условиях измерялся спектр поглощения газов, при этом длина резонатора лазера составляла более сотни метров [3, 4]. При газоанализе в реальной атмосфере, когда практически всегда измерения ведутся при различных метеоусловиях, атмосфера в резонаторе может существенно влиять на спектрально-кинетический режим генерации лазера.

Цель настоящей работы состояла в исследовании возможности высокочувствительного газоанализа, в частности влажности, в реальной атмосфере при различных метеоусловиях, на основе лазерного спектрометра на рубине.

Для этой цели лазер на рубине удобен тем, что в спектр излучения его попадают не перекрывающиеся линии паров воды $\lambda=694.3$ нм и линия кислорода $\lambda=694.6$ нм, которую можно использовать в качестве «внутреннего» эталона при измерении относительной интенсивности спектральной линии паров воды.

Контроль измеряемой влажности производился по отношению интегральных интенсивностей линии паров воды к линии кислорода A_{H_2O}/A_{O_2} . Схема

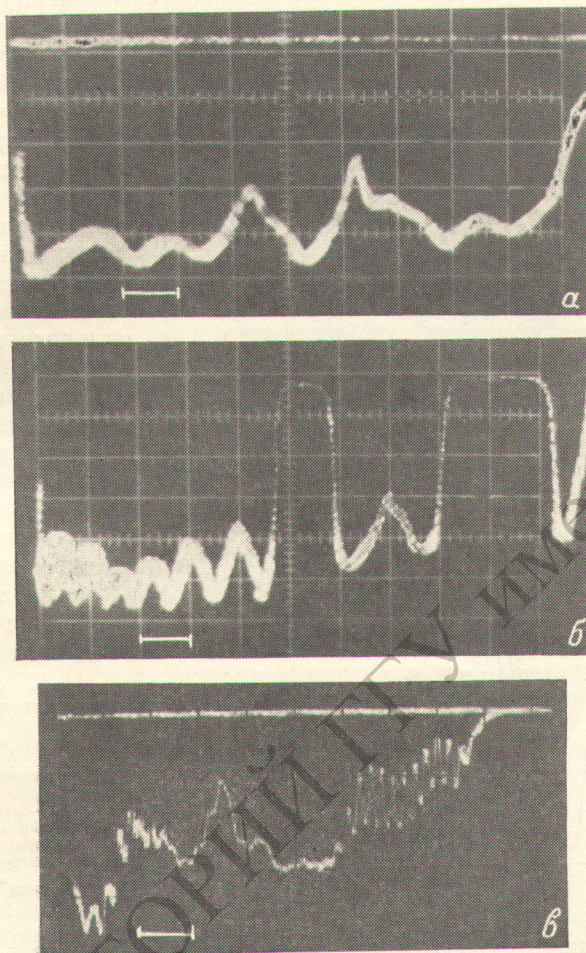


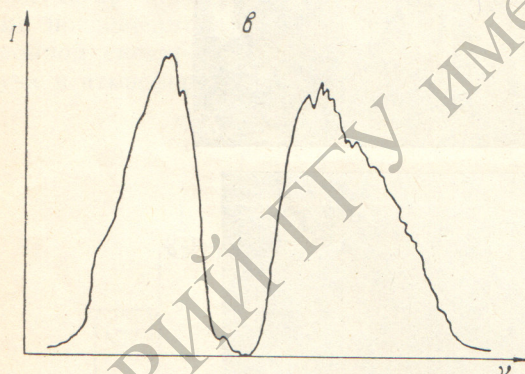
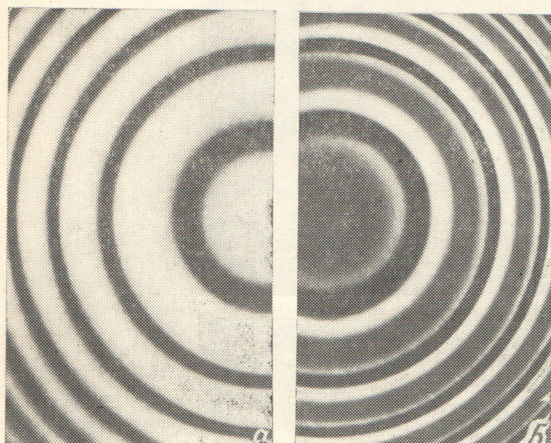
Рис. 2. Осциллограммы генерации лазера при различных метеоусловиях.

a — при безветрии и в снегопаде; *b* — при скорости ветра 8 ± 10 м/с и плюсовой температуре воздуха (скорость развертки 100 мкс/дел); *c* — в дожде при скорости выпадания 6 ± 8 мм/час (скорость развертки 5 мкс/дел).

установки приведена на рис. 1. Как видно из схемы, резонатор лазера образован полупрозрачным диэлектрическим зеркалом 1 и телескопом Кассегрена с алюминированными зеркалами 6, на которые, после телескопа Галилея, пучок диаметром 250 мм попадал от поворотного зеркала 5. Трасса резонатора между поворотным зеркалом и телескопом Кассегрена достигала $L_{рез}=160$ м и проходила над поверхностью земли на высоте 5 м. При измерениях на трассе до 70 м телескоп Кассегрена заменялся плоским алюминированным зеркалом. Для исключения влияния на спектр паров воды лабораторного воздуха, промежуток резонатора между зеркалом 1 и торцом рубина вакуумировался до 10^{-2} Тор. Спектр излучения разрешался интерферометром Фабри—Перо с зазором между зеркалами 7 мм и регистрировался фотографическим методом.

На данном спектрометре исследовались спектрально-кинетические характеристики генерации лазера при снегопаде, слабом ветре, при скорости ветра $8 \div 10$ м/с, в отсутствие осадков и безветрии и при дожде при скорости выпада-

ния $\sim 6-8$ мм/час. Замечено существенное изменение кинетики генерации лазера в зависимости от метеоусловий атмосферы. На рис. 2 показаны примеры осциллограмм генерации. Из приведенных данных следует отметить существенное увеличение длительности квазинепрерывной генерации до 1.1 мс при снегопаде и температуре воздуха ниже $t_{\text{возд}} -10^\circ \text{C}$, тогда как в лабораторных условиях генерация лазера с длинным резонатором 3 не превосходила $0.5-0.6$ мс. В случае пассивной модуляции добротности, когда в резонатор лазера помещался фильтр КС-19, длительность генерации моноимпульса составляла



~ 50 мкс. Такую большую длительность импульса можно объяснить непрерывным сбоем фазы в резонаторе, что приводит к более равномерному пространственному выгоранию инверсии населенности в активном элементе, а также дополнительным вкладом в энергию излучения лазера за счет рассеяния частицами снега на трассе. В случае сильного ветра, когда турбулентность атмосферы значительна, наблюдалась квазинепрерывная генерация со срывами до 200 мкс (рис. 2, б). Срывы генерации вызваны виньетированием пучка при проектировании излучения телескопом 4 на активный элемент. В дожде стабильно наблюдалась модуляция излучения 2 МГц. Следует отметить, что при превыше-

Рис. 3. Спектр излучения лазера.

а — интерферограмма спектра при расстройке частоты излучения лазера и линии поглощения; б — при совпадении частоты излучения и линии поглощения паров воды $\lambda = 694.38$ нм; в — микрофотограмма одной стороны интерференционного кольца при $t_{\text{возд}} = -15.8^\circ \text{C}$.

нии накачки над порогом в $3-4$ раза, генерация наблюдалась на трассе 160 м в снежной метели при дальности видимости 250-300 м. Регистрируемый интегральный во времени спектр излучения во всех случаях был достаточно «гладким» с гауссовским распределением и ширина его составляла $0.5-0.65$ см $^{-1}$.

Проведены измерения спектра излучения лазера при совпадении частоты излучения лазера с частотой поглощения вышеуказанных линий паров H_2O и O_2 при температуре атмосферного воздуха $t_{\text{возд}} = 5-16^\circ \text{C}$. (Перестройка частоты излучения производилась за счет изменения температуры рубина, который помещался в водяную рубашку).

Примеры интерферограмм и микрофотограмма одной стороны интерференционного кольца при $t_{\text{возд}} = -15.8^\circ \text{C}$ и $L_{\text{рез}} = 60$ м приведены на рис. 3, а, б, в. Интерферограммы обрабатывались на микрофотометре фирмы Joyce 3CS (Англия). Обработка интерферограмм показала, что при температуре воздуха до -16°C ($P_{\text{H}_2\text{O}} \approx 1.5$ Тор), в спектре генерации наблюдается полное поглощение на линиях H_2O и O_2 соответственно 694.3 и 694.6 нм, причем, ширина плоской вершины линии H_2O в $2-2.5$ раза больше ее ширины, которая равна в приземном слое атмосферы $\gamma = 0.18-0.2$ см $^{-1}$. Исходя из параметров данной линии, измеренных в работах [5, 6], и учитывая, что $\gamma = \gamma^0 (P_1 + \sigma P_2)$ здесь P_1 , P_2 — давление «буферного» и поглощающего газов, γ^0 — ширина линии

при нормальных условиях, σ — эффективное сечение столкновений, получены оценки минимально регистрируемого парциального давления P_{H_2O} на уровне $I/I_0=0.5$, которое составило 0.1 Тор, т. е. упругость паров воды при $t_{\text{возд}}=-45^\circ\text{C} \div -50^\circ\text{C}$. (Здесь I, I_0 — спектральные интенсивности излучения на линии и вне линии поглощения $\lambda=694.38$ нм). Следует отметить, что в связи с высокой концентрационной чувствительностью спектрометра при температурах выше $t_{\text{возд}}=-20^\circ\text{C}$, регистрируются крылья линии. При измерении влажности, при $t_{\text{возд}}=-5^\circ\text{C}$ и выше, спектральная ширина крыла линии поглощения становится соизмеримым и даже шире контура линии генерации, что снижает диапазон измерения влажности. Кроме того, распределение спектральной интенсивности в крыле линии нелинейно зависит от концентрации уже при $|\omega - \omega_0| \simeq 3\gamma$ (ω_0 — частота центра линии, ω — переменная частота) [8], что увеличивает погрешность при калибровке спектрометра. В связи с этим, возникает необходимость в регулировке чувствительности спектрометра.

Варьирование чувствительностью за счет изменения длины трассы резонатора мало эффективно, так как глубина «провала» на линии поглощения в спектре излучения определяется, в основном, временем генерации и коэффициентом поглощения линии $k(\omega)$ [9] $I \sim \exp[-k(\omega)ct/2]$. Нами не было замечено существенного изменения чувствительности спектрометра при уменьшении длины трассы от 160 до 70 м. Для регулировки чувствительности спектрометра, наиболее подходящим может быть лазер на основе трехзеркального резонатора [10, 11]. На данном спектрометре трехзеркальный резонатор реализован следующим образом. Рубиновый активный элемент 3 с брестеровскими торцами заменялся рубином с одним плоским торцом, на который напылялось диэлектрическое покрытие с различным коэффициентом отражения. Другой торец был скошен под углом Брюстера и также подсоединялся к вакуумной камере с зеркалом 1. В этом случае резонатор лазера состоял из активной части (зеркало 1 и плоский торец рубина) и пассивной, в которой находилась исследуемая атмосфера (торец рубина и отражатель 6).

Перестройка чувствительности измерялась по линии кислорода $\lambda=694.6$ нм, концентрацию которого в атмосфере можно считать постоянной. Величина перестройки чувствительности в зависимости от коэффициента отражения торца рубина приведена в таблице. Здесь A, A_0 соответственно площади «провалов»

$R_{\text{торц}}, \%$	6	20	50	70
A/A_0	0.9	0.9	0.85	0.6

в спектре генерации на линии поглощения в случае трех- и двух-зеркального резонаторов. Из таблицы видно, что заметное уменьшение чувствительности наблюдалось при $R_{\text{торц}} \geq 50\%$.

Очевидно, что увеличением коэффициента отражения торца активного элемента можно как угодно сильно загрузить чувствительность спектрометра, что позволит измерять максимальную концентрацию водяных паров, реализуемых в земной атмосфере.

Проведенная серия измерений в течение месяца показала, что точность контроля влажности по отношению A_{H_2O}/A_{O_2} составляет не выше $12 \div 14\%$ и определяется в основном флуктуациями контура линии излучения при перестройке частоты лазера от линии H_2O к O_2 . В этом случае оптимальным представляется, с точки зрения точности, одновременная генерация двух лазеров на частотах измеряемого газа и эталонного.

В заключение следует отметить, что в данном методе использование соотвествующих лазеров с широким спектром усиления, совпадающим со спектральным поглощением различных газов атмосферы, включая загрязнение, даст возможность высокочувствительного газоанализа малых примесей атмосферы в широком диапазоне концентраций и при различных метеоусловиях.

Литература

- [1] А. Ф. Сучков. Препринт ФИАН, № 12, М., 1970.
- [2] N. C. Peterson. J. Opt. Soc. Am., 61, 1971.
- [3] А. П. Годлевский, В. П. Лопасов, С. Ф. Лукьяненко. Квант. электрон., 4, № 8, 1977.
- [4] B. Linford, E. Peressin. Appl. Opt., 13, № 2, 1974.
- [5] А. П. Годлевский, В. А. Капитанов. Ж. прикл. спектр., 28, 204, 1978.
- [6] Н. Ф. Борисова, К. П. Василевский, В. В. Евстафьев, И. Н. Ладыгин, В. М. Осипов. Тез. докл. 5 Всесоюз. симп. по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. 2, 214, Томск, 1978.
- [7] А. П. Годлевский, Ю. Д. Копытин. Опт. и спектр., 44, 320, 1978.
- [8] Л. И. Несмелова, С. Д. Творогов, В. В. Фомин. Спектроскопия крыльев линий. «Наука», Новосибирск, 1977.
- [9] Т. П. Беликова, Э. А. Свириденков, А. Ф. Сучков. Квант. электрон., 7, 830, 1974.
- [10] В. С. Бураков, А. А. Ставров. Способ широкодиапазонной ВРС с ОКГ на растворах органических соединений. Препринт ИФ АН БССР, № 144, 45, Минск, 1978.
- [11] А. П. Годлевский, Ю. Д. Копытин. Тез. докл. 5 Всесоюз. симп. по лазерному и акустическому зондированию, 2, 123, Томск, 1978.

Поступило в Редакцию 20 декабря 1980 г.