

А.А. Мицель, В.П. Руденко, Л.Н. Сеница, А.М. Солодов

ПРОЗРАЧНОСТЬ АТМОСФЕРЫ В ОБЛАСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ АИГ–ЛАЗЕРА

Спектры поглощения атмосферы и ее основных компонентов H_2O , CO_2 , O_2 измерены на высокочувствительных лазерных спектрометрах в области генерации Nd–АИГ–лазера 1,06415 мкм. Основной поглощающей газовой компонентой атмосферы в этой области является водяной пар, поглощением других газов можно пренебречь. Численное моделирование показывает, что ослабление узкополосного излучения в области люминесценции лазера варьируется в пределах 0–20% на 10–км горизонтальной трассе.

Лазер на алюмоиттриевом гранате Nd^{3+} –Yag (АИГ) является одним из распространенных твердотельных лазеров, работающих в области 1,064 мкм.

В данной работе приводятся результаты исследований поглощения атмосферным воздухом излучения лазера на алюмоиттриевом гранате, активированном неодимом, с длиной волны $\lambda = 1,06415$ мкм и шириной полосы люминесценции $6,5 \text{ см}^{-1}$ [1, 2, 3].

Экспериментальное исследование спектров поглощения

Существующие в настоящее время атласы спектральных данных не позволяют корректно рассчитать поглощение атмосферы в области лазера на алюмоиттриевом гранате. Данные атласа GEISA (версия 1984 г.) [4] отличаются от данных атласов предыдущих версий, в частности от атласа [5], как количеством включенных в него газов, так и объемом и точностью информации о спектрах. В исследуемой нами области 1,064 мкм интенсивности линий кислорода в атласе [4] на 1,5 порядка меньше, чем в атласе [5]. Центры линий кислорода в области 1,064 мкм в атласе [4] не совпадают с экспериментальными значениями, полученными в работе [6]. Это требует проведения специальных исследований спектров поглощения молекул на высокочувствительных спектрометрах.

Исследование спектров поглощения в области излучения Nd^{3+} –Yag–лазера проводилось в несколько этапов. Первоначально спектр поглощения атмосферного воздуха был зарегистрирован с разрешением $0,08 \text{ см}^{-1}$ на внутррезонаторном (ВР) лазерном спектрометре на основе лазера на стекле с неодимом [7]. Чувствительность спектрометра $3 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-1}$ обеспечивает регистрацию линий поглощения, вызывающих 3% ослабление на 10-км трассе. Внутррезонаторные измерения спектра поглощения атмосферного воздуха в области 9100 – 9500 см^{-1} , выполненные в лабораторных условиях, уточнили картину поглощения, полученную в измерениях солнечного спектра атмосферы, когда наличие неконтролируемых компонент атмосферы и солнечной короны затрудняет идентификацию зарегистрированных линий. Так, в области излучения лазера на гранате помимо линии H_2O $9391,96 \text{ см}^{-1}$, обнаруженной в солнечном спектре атмосферы [8], зарегистрирована еще и линия $9392,50 \text{ см}^{-1}$.

На ВР–спектрометре исследованы спектры поглощения основных поглощающих компонент атмосферы O_2 , H_2O , CO_2 , N_2O , CH_4 и их изотопов. Наиболее важную роль в поглощении атмосферы в области 1,06 мкм играют водяной пар, углекислый газ и кислород. В спектре H_2O зарегистрированы линии, определяемые переходами $111 \leftarrow 000$ ($\nu_0 = 8807 \text{ см}^{-1}$), $012 \leftarrow 000$ ($\nu_0 = 9000 \text{ см}^{-1}$) с высокими значениями вращательных квантовых чисел J . Спектр поглощения углекислого газа определяется переходами $20033 \leftarrow 00001$ ($\nu_0 = 9389 \text{ см}^{-1}$), $20032 \leftarrow 00001$ ($\nu_0 = 9517 \text{ см}^{-1}$) и $21132 \leftarrow 01101$ ($\nu_0 = 9478 \text{ см}^{-1}$), причем линии последних двух полос в области $\nu < 9400 \text{ см}^{-1}$ имеют заметное поглощение только при высоких температурах $T > 600^\circ\text{K}$ и не играют роли в спектре атмосферы в диапазоне излучения лазера на алюмоиттриевом гранате.

Линии кислорода, принадлежащие переходу $1 \leftarrow 0 \Delta^1 \leftarrow {}^3\Sigma^-$, были зарегистрированы Герцбергом [6] в 1947 г. в солнечном спектре атмосферы, когда поглощающим слоем являлась вся толща атмосферы. В банках спектральных данных измеренным линиям кислорода соответствуют интенсивности, отличающиеся более чем на порядок (для линии R_Q (9) они равны $1,8 \cdot 10^{-28} \text{ см}^2/\text{мол}$ [41] и $6 \cdot 10^{-27} \text{ см}^2/\text{мол}$ [5]). Несмотря на высокую чувствительность ВР–спектрометра в лабораторных условиях при давлении $P = 1$ атм не удалось зарегистрировать линии кислорода. Пороговая чувствительность ВР–спектрометра соответствует минимальной интенсивности линий, регистрируемых на спектрометрах $S_{\text{пор}} = 3,5 \cdot 10^{-28} \text{ см}^2/\text{мол}$, которая лежит между значениями интенсивностей линий, приведенных в банках данных. Следовательно, более правильными интенсивностями линии O_2 являются значения, приведенные в [4].

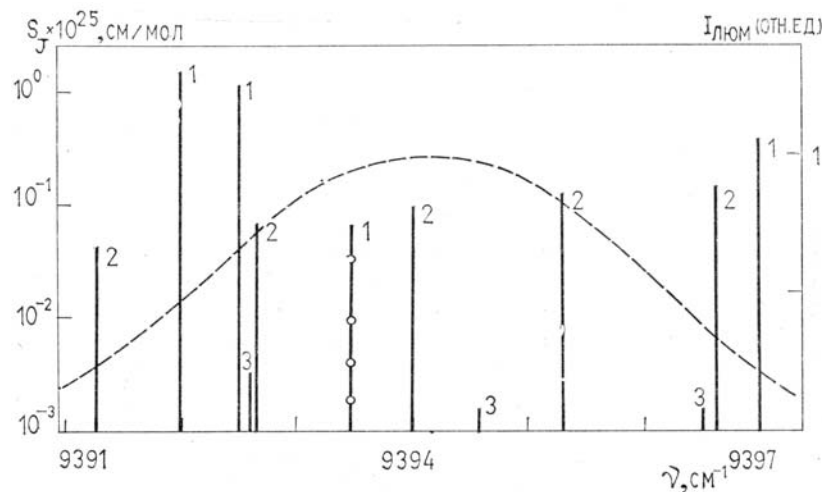


Рис. 1. Линия люминесценции АИГ-лазера с неодимом (— — —) $I_{\text{люм}}$ и спектр поглощения атмосферных газов в диапазоне $9391-9397 \text{ см}^{-1}$: 1 — H_2O ; 2 — CO_2 ; 3 — O_2 ; —○—○— ложная линия H_2O из атласа [4]

Измерение интенсивностей линий поглощения водяного пара проводилось спектрофотометрическим способом с использованием лазера на стекле с неодимом, работающего в режиме непрерывной перестройки частоты излучения в течение импульса генерации [9]. Диапазон перестройки частоты за один импульс генерации составляет $\sim 0,7 \text{ см}^{-1}$, мгновенная ширина спектра $\sim 2 \text{ МГц}$. Поворотом дисперсионной призмы, входящей в состав резонатора лазера, можно было перестраивать частоту генерации от импульса к импульсу в диапазоне $9250-9500 \text{ см}^{-1}$. Абсолютное значение частоты излучения лазера определялось спектрографом с точностью $\sim 0,1 \text{ см}^{-1}$, для относительных измерений частоты использовался термостатированный и герметизированный интерферометр Фабри-Перо с базой $103,7 \text{ мм}$, обеспечивающий точность измерений $\approx 0,001 \text{ см}^{-1}$.

Для записи спектра поглощения водяного пара использовалась многоходовая вакуумная кювета с оптической зеркальной системой Уайта. При длине кюветы, равной 3 м , длина оптического хода луча составила 280 м . Температура кюветы контролировалась с точностью $0,5^\circ\text{K}$, давление газа в кювете измерялось с погрешностью $\sim 2\%$. Полученные экспериментально контуры линий поглощения сопоставлялись затем с контуром Фойгта, и методом наименьших квадратов определялись значения S_j , γ , ν_0 .

С помощью лазерного спектрофотометра были измерены интенсивности наиболее сильных линий водяного пара в области $1,06 \text{ мкм}$, включая и интенсивность линий $9391,96 \text{ см}^{-1}$, которая равна $1,07 \cdot 10^{-25} \text{ см}^2/\text{мол}$. Интенсивности более слабых линий водяного пара с погрешностью $\sim 20\%$ были измерены на ВР-спектрометре с использованием методики, изложенной в работе [10]. В качестве реперных линий использовались линии H_2O , интенсивности которых измерены на лазерном спектрофотометре.

Полученная картина спектров поглощения атмосферных газов приведена на рис. 1.

В полосу генерации лазера на гранате попадают три линии водяного пара с интенсивностью $\sim 10^{-25} \text{ см}^2/\text{мол}$ (все три линии отсутствуют в банке спектральных данных [4]), в то же время в нем приведена линия $863 \leftarrow 836$ полосы $\nu_2 + 2\nu_3$ с центром $9393,4609 \text{ см}^{-1}$.

Линии H_2O на порядок сильнее линий CO_2 и на 3 порядка сильнее линий O_2 в этом диапазоне.

Численное моделирование ослабления излучения АИГ-лазера в атмосфере

Результаты экспериментальных исследований спектров поглощения атмосферных газов использовались для оценки пропускания атмосферой излучения АИГ-лазера. Данные по кислороду взяты из атласа [4], при этом центры линий O_2 скорректированы в соответствии с работой [6].

Пропускание атмосферы на горизонтальной трассе длиной L определяется следующим выражением:

$$T = \int g(\nu, \nu') \exp \left[- \sum_j K_j(\nu, z) \rho_j(z) \cdot L \right] d\nu \cdot \exp(-\tau_a),$$

где $g(\nu, \nu')$ — контур линии излучения; $K_j(\nu, z)$ — коэффициент поглощения j -го газа на частоте ν и высоте z ; $\rho_j(z)$ — концентрация j -го газа; τ_a — оптическая толщина аэрозольной компоненты; L — длина горизонтальной трассы.

Расчеты ослабления излучения АИГ-лазера на различных частотах в пределах полосы люминесценции проводились с помощью программной системы LARA [11].

Высотное распределение физических параметров атмосферы (давления, температуры, концентрации поглощения газов) взяты для модели лета средних широт [12, 13]. Пропускание рассчитывалось

для узкополосного излучения с гауссовой огибающей при ширине $0,07 \text{ см}^{-1}$ в диапазоне частот $9391 - 9397 \text{ см}^{-1}$ с шагом $0,04 \text{ см}^{-1}$. На рис. 2 приведены рассчитанные спектры пропускания газовой атмосферы для различных длин горизонтальных трасс, простирающихся над поверхностью земли (кривые 1, 2, 3). С увеличением длины трассы происходит изменение контура спектра пропускания. Величина T на частоте $9392,0 \text{ см}^{-1}$ изменяется от 0,91 при $L = 4 \text{ км}$ до 0,8 при $L = 10 \text{ км}$. В пределах ширины линии люминесценции значение пропускания H_2O колеблется от 0,8 до 0,999 при $L = 10 \text{ км}$.

На рис. 3 приведены спектры пропускания горизонтальных трасс на различных высотах. С подъемом трассы изменение величины пропускания на различных длинах волн становится пренебрежимо малым, а сама величина пропускания приближается к единице. Это объясняется тем, что основной вклад в поглощение дает H_2O , концентрация которого резко уменьшается с высотой.

Для оценки энергетических потерь лазерного излучения в реальной атмосфере наряду с молекулярным поглощением необходимо учитывать аэрозольное рассеяние света. Особенно важен учет аэрозольного ослабления в микроокнах прозрачности, к которым относится исследуемый спектральный участок $1,0641 \text{ мкм}$. Для расчета пропускания аэрозольной атмосферы мы использовали оптическую модель фоновой и среднециклического аэрозоля [14], отличающегося уровнем средней концентрации частиц на всех высотах. На рис. 2 спектр пропускания с учетом аэрозольной компоненты показан кривыми 4, 5. Суммарное пропускание в интервале $9391 - 9397 \text{ см}^{-1}$ изменяется от 0,4 до 0,5 для среднециклического аэрозоля. Очевидно, что с замутнением атмосферы вклад в ослабление аэрозольной составляющей станет доминирующим.

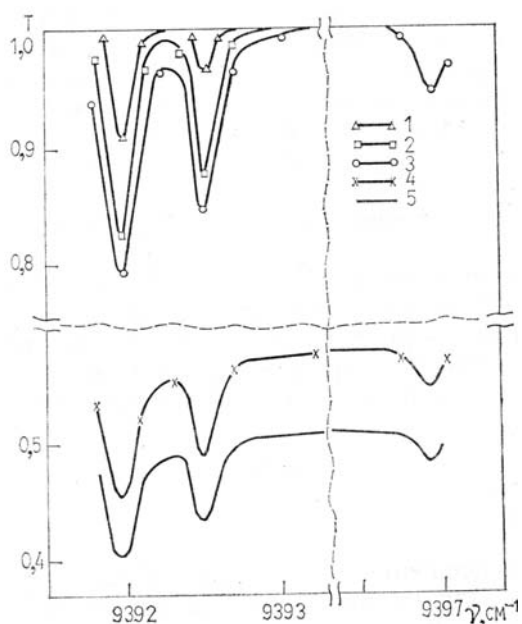


Рис. 2. Спектр пропускания газовой атмосферы для горизонтальных трасс различной длины на высоте $H = 0 \text{ км}$ в спектральном диапазоне генерации АИГ-лазера. Кривые 1, 2, 3 — без учета влияния аэрозоля, кривые 4, 5 — с учетом аэрозольной компоненты. Кривые 1, 2, 3 соответствуют $L = 4, 8, 10 \text{ км}$; кривые 4, 5 — фоновая и среднециклическая модели [14] ($L = 10 \text{ км}$)

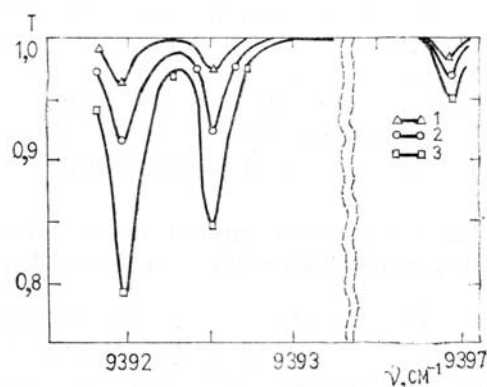


Рис. 3. Спектр пропускания газовой атмосферы для горизонтальных трасс длиной 10 км на различных высотах: 1 — $H = 4 \text{ км}$; 2 — $H = 2 \text{ км}$; 3 — $H = 0 \text{ км}$

Выводы

1. Основной поглощающей компонентой атмосферы в области излучения лазера на алюмоиттриевом гранате является водяной пар, наибольшую интенсивность $S = 1,07 \cdot 10^{-25} \text{ см}^2/\text{мол}$ имеет линия с центром $9391,96 \text{ см}^{-1}$. Вкладом CO_2 и O_2 в поглощение на 10-км трассе можно пренебречь.
2. Ослабление излучения узкополосного ($\sim 0,1 \text{ см}^{-1}$) лазера из-за молекулярного поглощения в пределах полосы люминесценции АИГ при длине трассы 10 км сильно варьируется с изменением частоты генерации лазера и достигает 20% на частоте $9391,96 \text{ см}^{-1}$, что сравнимо с величиной аэрозольного ослабления в этом диапазоне спектра.

1. Зверев Г.М., Голяев Ю.Д., Шалаев Е.А., Шокин А.А. Лазеры на алюмоиттриевом гранате с неодимом. — М.: Радио и связь, 1985. — 145 с.
2. Карлов Н.В. Лекции по квантовой электронике. — М.: Наука, 1983. — 319 с.
3. Справочник по лазерам. Т. 1 /Пер. с англ. под ред. А.М. Прохорова. — М.: Советское радио, 1978. — 503 с.
4. Chedin A., Husson N., Scott N.A. et al. The GEISA data bank 1984 version. — Laboratoire de Meteorologie Dynamique du C. N. R. S. 1986.
5. Rothman L.S. — Appl. Opt., 1981, v. 20, N 5, p. 791—795.
6. Herzberg L., Herzberg G. — Astrophys. J., 1947, v. 105, p. 353—359.
7. Синица Л.Н. — Квантовая электроника, 1977, т. 4, с. 148—150.
8. Swensson J. et al. The solar spectrum from $\lambda=7498$ to $\lambda=12016$ Å. A Table of Measures and Identification. Liege, 1970.
9. Кочанов В.П., Синица Л.Н., Солодов А.М. — ЖПС, 1984, т. 41, с. 333—338.
10. Kochanov V.P., Serdyukov V.I., Sinitsa L.N. — Optica Acta, 1985, v. 32, p. 1273—1280.
11. Зуев В.Е., Макушкин Ю.С., Мицель А.А. и др. — Докл. АН СССР. 1985, т. 283, № 2, с. 345—348.
12. Зуев В.Е., Комаров В.С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1986. — 264 с.
13. Ипполитов И.И., Комаров В.С., Мицель А.А. — В сб.: Спектроскопические методы зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1985, с. 4—44.
14. Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1986. — 255 с.
15. Зуев В.Е., Макагон М.М., Макушкин Ю.С., Мицель А.А., Пономарев Ю.Н. Прикладная спектроскопия атмосферы. Оптические модели молекулярной атмосферы. Вопросы локального газоанализа. — Томск: Изд-е ТФ СО АН СССР, 1986. — 147 с.

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР, Томск

Поступила в редакцию
25 января 1988 г.

A.A. Mitsel, V.P. Rudenko, L.N. Sinitsa, A.M. Solodov. **Atmospheric Transmittance In Nd-YAG Wavelength Range.**

Absorption spectra of ambient atmosphere and its major constituents (H_2O , CO_2 , O_2) were measured by means of high-sensitivity laser spectrometers in the vicinity of the Nd-YAG laser 1.06415 μm wavelength. Water vapour is found to be the main absorber in this spectral range. Numerical simulations show that the narrow-linewidth radiation attenuation due to molecular atmospheric absorption varies within the laser-luminescence band from 0 to 20% along the 10 km horizontal path.