

ДИАГНОСТИКА ПАРОВ ВОДЫ С ПОМОЩЬЮ ДИОДНО-ЛАЗЕРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ В БЛИЖНЕМ ИК ДИАПАЗОНЕ

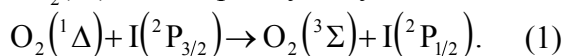
© 2004 В.Н. Аяззов, А.К. Чернышов, А.В. Меженин

Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

AlGaAs/GaAs квантово-размерный диодный лазер (824 нм) с коротким внешним резонатором использовался для диагностики паров воды в откачанной кювете. При сканировании тока накачки лазер обеспечивал 63 ГГц диапазон непрерывной перестройки оптической частоты и спектральную ширину линии генерации 0,2 ГГц. Получена линейная зависимость сигнала поглощения от давления паров воды в диапазоне 0,4-5 торр при отношении сигнал-шум равном 4.

Введение

Химический кислородно-йодный лазер (ХКЙЛ) работает на электронном переходе атома йода $I(^2P_{1/2}) \Rightarrow I(^2P_{3/2})$. Возбуждение верхнего лазерного уровня осуществляется в ходе быстрой квазирезонансной передачи электронной энергии от синглетного кислорода $O_2(^1\Delta)$ к атомарному йоду:

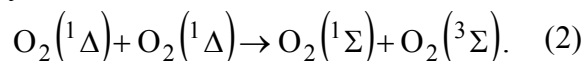


Синглетный кислород образуется в результате газожидкостной реакции молекулярного хлора со щелочным раствором перекиси водорода. В газовом потоке на выходе газожидкостного генератора синглетного кислорода помимо основных компонентов неизбежно присутствуют пары воды. Молекулы воды являются эффективным тушителем возбужденного атомарного йода. Допустимое относительное содержание паров H_2O в кислородном потоке не должно превышать нескольких процентов.

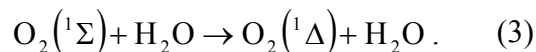
Источником атомов йода является молекулярный йод, пары которого инжектируются в кислородный поток. В среде синглетного кислорода молекулы I_2 быстро диссоциируют на атомы. Механизм диссоциации йода до конца не ясен. Хорошо установлено [1], что вода замедляет темп диссоциации йода и увеличивает число затрачиваемых на диссоциацию I_2 молекул синглетного кислорода.

Процессы с участием молекул воды занимают важное место в кинетике формирования активной среды лазера. Традиционно [2], концентрация паров воды на выходе ге-

нератора синглетного кислорода определяется эмиссионной методикой из сравнения интенсивностей излучения молекул кислорода на полосах $O_2(^1\Sigma) > O_2(^3\Sigma)$ и $O_2(^1\Delta) > O_2(^3\Sigma)$ с длинами волн 762 и 1268 нм, соответственно. Электронно-возбужденная молекула $O_2(^1\Sigma)$ образуется в так называемой реакции "пуллинга":



Молекула $O_2(^1\Sigma)$ эффективно тушится молекулой воды



В стационарных условиях концентрация молекул $O_2(^1\Sigma)$ с хорошей точностью может быть найдена из равенства скоростей их образования в реакции (2) и дезактивации в реакции (3)

$$[O_2(^1\Sigma)] = \frac{K_2 \cdot [O_2(^1\Delta)]^2}{K_3 \cdot [H_2O]}, \quad (4)$$

где $[O_2(^1\Delta)]$, $[O_2(^1\Sigma)]$, $[H_2O]$ – концентрации молекул кислорода в электронно-возбужденных состояниях и паров воды, соответственно. Амплитуды сигналов фотодетекторов, регистрирующих излучение кислорода на длинах волн 1268 и 762 нм пропорциональны соответственно: $I_{1268} \sim [O_2(^1\Delta)]$, $I_{762} \sim [O_2(^1\Sigma)]$. С учетом этого и соотношения (4) можно получить следующее выражение для концентрации паров воды:

$$[H_2O] = C \cdot \frac{I_{1268}^2}{I_{762}}, \quad (5)$$

где C – калибровочный коэффициент. Использование эмиссионной методики сталкивается со сложностью определения калибровочного коэффициента C . К тому же данная методика непригодна для проведения измерений концентрации $[H_2O]$ в смесях, содержащих йод. Излучение молекулярного йода на переходе $I_2(B) \Rightarrow I_2(X)$ перекрывается с излучением кислорода на длинах волн 762 и 1268 нм.

Появление недорогих, компактных, перестраиваемых диодных лазеров, излучающих вблизи полос поглощения воды 820 и 1390 нм, открыло новые возможности для количественного определения содержания паров воды в ХКЙБЛ [3]. Цель данной работы заключается в экспериментальной апробации методики измерения концентрации воды с помощью диодного лазера.

Экспериментальная установка

Схема эксперимента показана на рис. 1. В качестве источника когерентного излучения в установке использовался AlGaAs/GaAs квантово-размерный диодный лазер DL, излучающий вблизи 825 нм. Крышка корпуса лазерного излучателя с выходным окошком была предварительно удалена. Излучение DL коллимировалось в параллельный пучок с помощью микрообъектива L_1 и затем с помощью двух поворотных зеркал направлялось в ячейку с парами воды (рис. 1). Для гарантированной работы в одномодовом режиме между коллиматором L_1 (рабочий отрезок 2 мм) и диодным лазером устанавливалось тонкое (≈ 100 мкм) покровное стекло M от микроскопа. Покровное стекло фиксировалось с помощью клея на пьезокерамической подвижке M , которая прикреплялась к выступу основания вблизи лазерного держателя. Излучение, отраженное покровным стеклом, поступало обратно в активную область лазера, что приводило к слабой оптической обратной связи, стабилизирующей работу излучателя [4]. Промежуток между покровным стеклом и лазерной гранью устанавливался равным приблизительно 50-100 мкм для надежной селекции единственной продольной моды в пределах широкого контура оптиче-

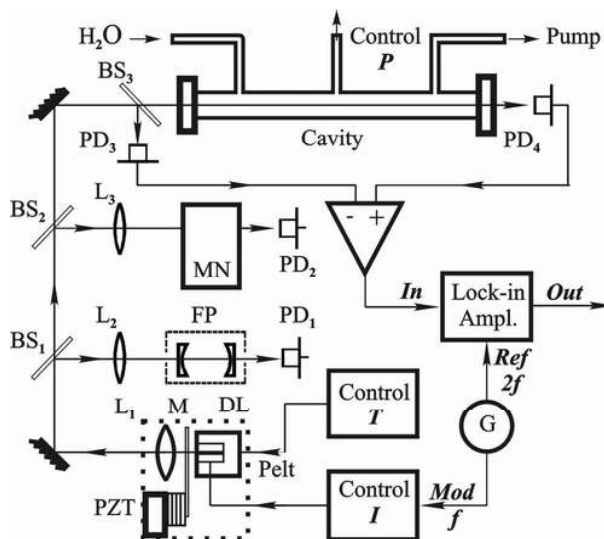


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: DL-диодный лазер; М-покровное стекло; L_1 -коллимирующий микрообъектив ($F=6\text{mm}$; $NA=0,4$); PZT-пьезокерамическая подвижка; Pelt-микрохолодильник Пельтье; FP- конфокальный интерферометр ($FSR=1,5$ ГГц; $F=35$); MN-монохроматор; PD- фотодиоды; BS – делители пучка; L_2, L_3 – сферические линзы; Cavity – газовая кювета; Control P – измеритель давления; Pump-вакуумный насос; Control T - контроллер температуры; Control I - контроллер тока; G – генератор пилообразного напряжения; Lock-in Amp – синхронный детектор

кого усиления диодного лазера. Контроль спектральных характеристик лазерного излучения выполнялся с помощью монохроматора (MN) и конфокального интерферометра Фабри–Перо (FP).

Исследуемые водяные пары находились в металлической кювете длиной 54 см, на торцах которой были закреплены стеклянные окошки. Кювета с помощью резиновых шлангов была подключена к вакуумному насосу (Pump), индикатору давления (Control P) и колбе, содержащей дистиллированную воду. Поскольку поглощение паров воды в окрестностях 830 нм довольно слабое, использовалась разностная схема регистрации и синхронное детектирование. С этой целью сигналы от двух фотоприемников PD_3 и PD_4 , пропорциональные оптической мощности до и после прохождения газовой кюветы, подавались на разностный усилитель, а затем на синхронный детектор (Lock-in Amp). Синхронный детектор был настроен таким образом, чтобы его выходное напряжение было пропорционально второй производной от входного сигнала.

Грубая настройка излучаемой длины

волны обеспечивалась изменением температуры диодного лазера с помощью микроохладителя Пельтье (Pelt) в диапазоне от 16 до 25 °С. Затем с помощью пьезокерамической подвижки прецизионно подбирался промежуток между покровным стеклом и лазерной гранью, тем самым навязывая диодному лазеру режим устойчивой одномодовой генерации. Сканирование оптической частоты излучения DL осуществлялось путем изменения тока накачки по пилообразному закону с частотой 40-60 Гц. На рис. 2 представлены осциллограммы, демонстрирующие изменения выходной оптической мощности диодного лазера и резонансы пропускания FP. Из рисунка видно, что при изменении тока накачки от порогового значения (20 мА) до максимально допустимого (64 мА) интервал непрерывной перестройки оптической частоты составляет 63 ГГц. Оценка ширины линии генерации DL выполнялась по форме резонансов FP. Поскольку собственная полная ширина резонанса интерферометра равна $FSR/F \approx 40 \text{ МГц}$, то наблюдаемое на рис. 2b уширение резонанса FP до 0,2 ГГц определяется преимущественно линией генерации диодного лазера. При ширине ожидаемого контура поглощения воды порядка 1-2 ГГц полученного интервала перестройки оптической частоты и спектральной ширины лазерной линии генерации вполне достаточно.

Доступная выходная оптическая мощность DL при токе накачки 64 мА составляла 10 мВт.

Результаты и обсуждение

На рис. 3а показана типичная форма сигнала второй производной от поглощения водяного пара в кювете при температуре 20 °С и давлении 16 Торр. Полная ширина контура поглощения оценивалась по интервалу между точками пересечения нуля второй производной сигнала. В данном случае ширина контура составляет 1,5 ГГц. Небольшие пички на рисунке справа и слева от основного пика связаны со сменой знака в изменении пилообразного напряжения добавляемого в ток накачки. Диодный лазер работал в окрестности 823,9 нм с диапазоном сканирования оптической частоты 22 ГГц. Экспериментально измерялась зависимость амплитуды (H) сигнала второй производной от давления паров воды (P) в кювете. Результаты измерений представлены на рис. 3б. Видно, что в области давлений менее 6 торр зависимость носит линейный характер с коэффициентом 1,2 мм/Торр. При давлениях больших, чем 6 торр зависимость насыщается, и чувствительность метода резко снижается. Для минимального давления паров 0,37 Торр, которое определялось производительностью использованного насоса, отношение сигнал/шум было равно 4 и определенный потенциал для его увеличе-

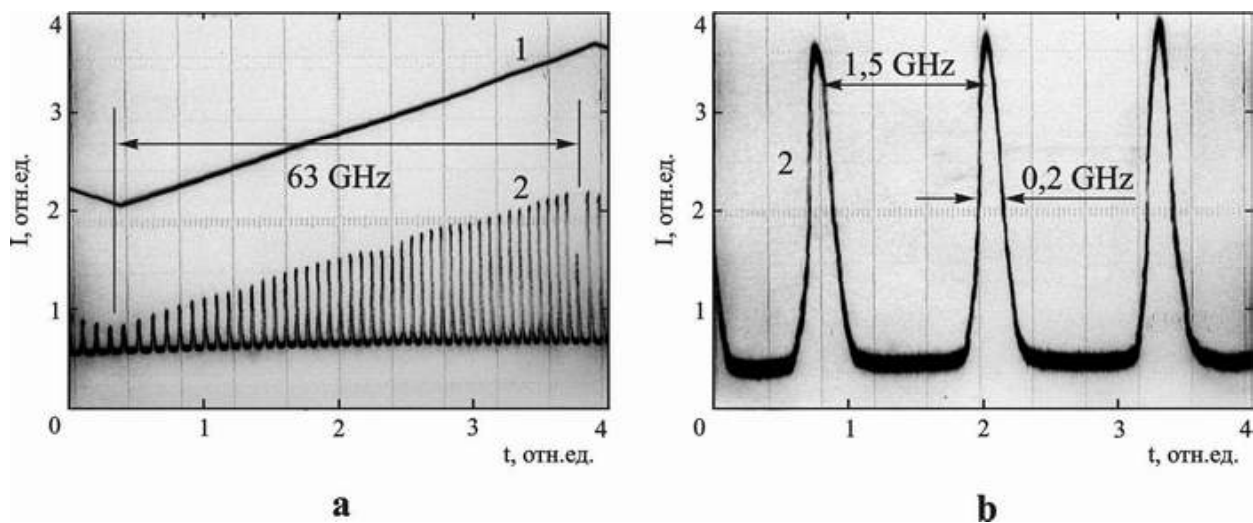


Рис. 2. Спектральные перестроенные характеристики диодного лазера при сканировании тока накачки:

- а) полный интервал перестройки;
- б) увеличенный фрагмент характеристики;
- кривая 1 - изменение выходной оптической мощности;
- кривая 2 - резонансы пропускания конфокального интерферометра FP

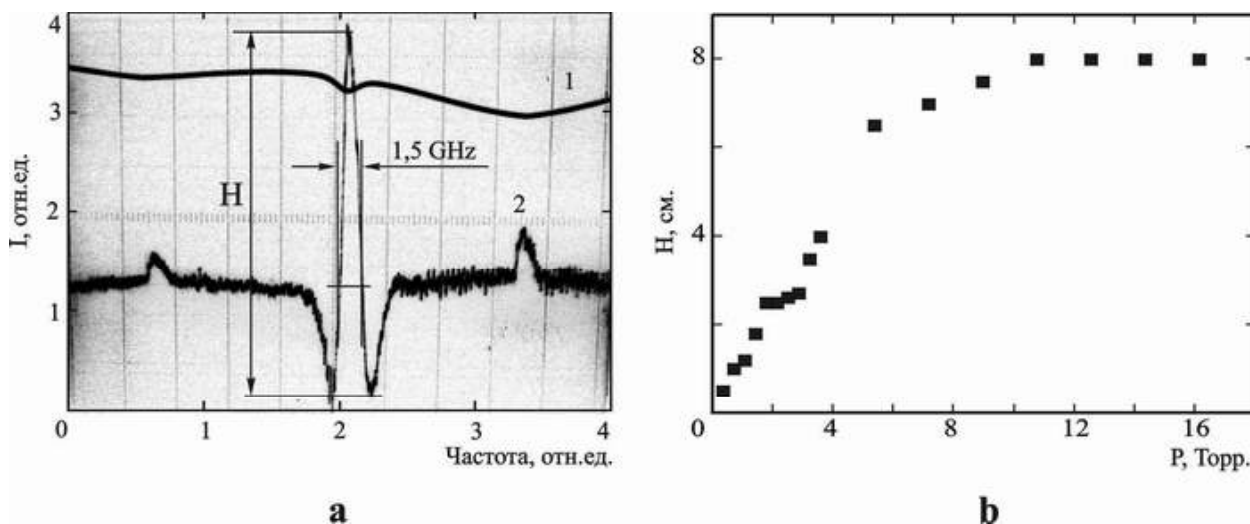


Рис. 3. Диагностика паров воды в кювете:

- а) резонанс поглощения на 823,9 нм. Кривые 1 и 2 показывают изменения входного и выходного сигналов синхронного детектора, соответственно;
 б) зависимость амплитуды выходного сигнала от давления пара в кювете.

ния еще имеется. Причиной насыщения поглощения паров воды с ростом давления является влияние столкновительного уширения. Полученная зависимость степени поглощения качественно согласуется с тем, что наблюдалось другими исследователями в окрестности длины волны 1400 нм [3].

Таким образом, проведенные исследования наглядно показали возможность использования отечественных диодных лазеров в конфигурации с коротким внешним низкодобротным резонатором для диагностики паров воды в диапазоне от 0,4 до 5 Торр при комнатной температуре. В дальнейшем для создания надежного датчика концентрации воды в активной области ХКЙЛ предполагается заменить излучающий с граней диодный лазер на VCSEL-структуру, что значительно упростит настройку и эксплуатацию установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Heidner III R.F., Gardner C.E., Segal G.I., El-Sayed T.M.* Chain-reaction mechanism for I_2 dissociation in the $O_2(^1D)$ -I atom laser // *J. Phys. Chem.* 1983. Vol. 62. № 13.
2. *Davis S.J.* Historical perspective of COIL diagnostics // *Proc. SPIE.* 2002. Vol. 4631.
3. *Allen M.G., Carelton K.L., Davis S.J., Kessler W.J., McManus K.R.* Diode laser-based measurements of water vapor and ground state oxygen in chemical oxygen iodine lasers // *25th AIAA Plasmadynamics and lasers conference.* June 20-23, 1994. Colorado Springs, CO.
4. *Zybin A., Neimax K.* Improvement of the wavelength tunability of etalon-type laser diodes and mode recognition and stabilization in diode laser spectrometers // *Spectrochimica Acta Part B.* 1997. Vol. 52.

WATER VAPOUR DIAGNOSTICS USING NEAR IR DIODE LASER SPECTROSCOPY

© 2004 V.N. Azyazov, A.K. Chernyshov, A.V. Megenin

Samara Branch of Physics Institute named for P.N. Lebedev of Russian Academy of Sciences

The AlGaAs/GaAs quantum-well diode laser with the short external cavity was used for the water vapour diagnostics in the pumped out cell. The laser provided the 63 GHz continuous tuning of the optical frequency and the 0,2 GHz spectral linewidth of the oscillation by the scanning of a laser current. The linear relation between an absorption signal and a water vapour pressure in the range 0,4-5 Torr is obtained at the signal-to-noise ratio equal to 4.