

С.Д. Бураков, А.П. Годлевский, П.П. Шарин

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ЭКСПРЕССНОГО ГАЗОАНАЛИЗА АТМОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ КОГЕРЕНТНОГО ЛП–ЛИДАРА

Представлен теоретический анализ процесса генерации лазера, описываемого системой самосогласованных уравнений типа Статца де Марса, на двух связанных через общий верхний или нижний уровень переходах. Получены аналитические решения для интенсивностей в приближении CO_2 -лазера. Показана возможность увеличения чувствительности ЛП-лидара при использовании двухчастотного зондирования на переходах с общим нижним уровнем. Описаны результаты экспериментальных исследований метода экспрессного газоанализа атмосферы на основе когерентного ЛП-лидара. Приведены сравнительные данные по измерению концентрации паров воды на трассе длиной 500 метров ЛП-лидаром и промышленным гигрометром. Результаты хорошо согласуются при низкой турбулентности на трассе зондирования. При высокой турбулентности результаты измерений согласуются удовлетворительно.

Использование приема эхо-сигнала на лазер в целях дистанционного газоанализа было предложено в работах [1, 2], где показан целый ряд преимуществ когерентного внутрирезонаторного лазерного приема слабого излучения, особенно в ИК-области. Это прежде всего высокая помехозащищенность и более высокая чувствительность к слабому излучению, которая превосходит аналогичную характеристику выпускаемых промышленностью охлаждаемых ИК-приемников.

Настоящая работа посвящена исследованиям когерентного ЛП-лидара на CO_2 -лазере в режиме съема информации о концентрации исследуемого газа в реальном масштабе времени, а также повышению чувствительности к принимаемому эхо-сигналу. Необходимость такого исследования обусловлена требованиями к транспортируемому варианту ЛП-лидара (самолетному или космическому).

Очевидно, что при измерениях в транспортируемом варианте имеется ряд специфических особенностей, которые определяют методику измерений. В данном случае непригоден лазер с поочередной перестройкой частоты, так как за время перестройки может измениться газовая структура атмосферы (при полете вдоль трассы) и коэффициент отражения поверхности. Кроме того, при движении лидара нет необходимости модуляции частоты излучения лазера, так как сдвиг относительно опорной частоты обеспечивается продольным доплеровским эффектом. В этой ситуации наиболее приемлемым является метод двухволнового зондирования с последующим спектральным разделением частот биений и измерением их интенсивностей (спектральное разделение становится возможным вследствие зависимости величины доплеровского сдвига от частоты излучения). Однако в работе ЛП-лидара на основе двухволнового лазера имеется существенная особенность, так как при одновременной генерации лазера на двух связанных через верхний или нижний уровень переходах (He-Ne , Ag , CO_2) вклад в соотношение интенсивностей генерации этих переходов, а в связи с этим и в амплитуды биений вносит конкуренция генерирующих переходов. В связи с этим необходимо исследовать процесс генерации лазера на двух связанных переходах.

Теоретический анализ

1. Рассмотрим случай генерации излучения на двух переходах с общим верхним уровнем в CO_2 -лазере (например, P_4 и R_2). Для этого случая можно записать следующую систему балансных уравнений для плотности фотонов J_1 , J_2 и населенности соответствующих уровней N_j :

$$\begin{aligned} \frac{dJ_1}{dt} &= cJ_1(N_2\sigma_{21} - Q_{01}); \\ \frac{dJ_2}{dt} &= cJ_2(N_2\sigma_{21'} - Q_{02}), \end{aligned} \quad (1)$$

где c — скорость света; σ_j — сечение возбуждения соответствующего перехода; Q_{0j} — добротность резонатора для j -перехода; G — мощность накачки верхнего уровня; τ_j — время спонтанной дезактивации возбужденных центров j -уровня.

В предположении мгновенной разгрузки уровней 1 и 1' ($\tau_{10} \approx \tau_{1'0} \approx 0$), что достаточно справедливо, так как время жизни уровня 2 велико по сравнению с временами жизни уровней 1 и 1' (соответственно 400 μs и 20 μs), для N_j получим (с учетом $\sigma_{21} \gg \sigma_{12}$ и $\sigma_{21'}, \sigma_{1'2}$):

$$N_{\text{общ}} = N_0 + N_2;$$

$$\frac{dN_2}{dt} = G(N_{\text{общ}} - N_2) - N_2\sigma_{21}cJ_1 - N_2\sigma_{21'}cJ_2 - \frac{N_2}{\tau_{21}}. \quad (2)$$

Для системы (1), (2) существует стационарное решение, следовательно, генерация на двух переходах с общим верхним уровнем возможна только при выполнении условия $\frac{Q_{01}}{\sigma_{21}} = \frac{Q_{01'}}{\sigma_{21'}}$, что практически неосуществимо $\left(\frac{dQ_{01}}{dt} = \frac{dQ_{01'}}{dt} = 0\right)$ из-за наличия технических флуктуации параметров резонатора.

2. Рассмотрим случай генерации излучения на двух переходах с общим нижним уровнем (например, в CO_2 -лазере переходы $P(20)_{10}$ и $R(20)_{10}$). Система балансных уравнений запишется как

$$\begin{aligned} \frac{dJ_1}{dt} &= cJ_1(\sigma_{211}N_{21} - Q_{01}); \\ \frac{dJ_2}{dt} &= cJ_2(\sigma_{211}N_{22} - Q_{02}); \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dN_{21}}{dt} &= G_1N_0 - N_{21}\tau_1^{-1} - J_1\sigma_{211}cN_{21}, \quad \frac{dN_0}{dt} - \frac{dN_{11}}{dt} - \\ &- \frac{dN_{22}}{dt} - \frac{dN_2}{dt}; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{dN_{22}}{dt} = G_2N_0 - N_{22}\tau_1^{-1} - J_2\sigma_{211}cN_{22};$$

$$\frac{dN_1}{dt} = J_1\sigma_{211}cN_{211} + J_2\sigma_{221}cN_{22} + N_{21}\tau_1^{-1} + N_{22}\tau_1^{-1} + N_1\tau_2^{-1},$$

при этом полагается $\sigma_{221} \gg \sigma_{122}$, $\sigma_{211} \gg \sigma_{121}$, ($\tau_{211} \approx \tau_{221} \approx \tau_1$). При стационарной генерации $\left(\frac{dJ_1}{dt} = \frac{dJ_2}{dt} = \frac{dN_0}{dt} = \frac{dN_{21}}{dt} = \frac{dN_{22}}{dt} = \frac{dN_1}{dt} = 0\right)$ получим систему из трех линейных уравнений относительно трех неизвестных N_1, J_1, J_2 . Определитель этой системы отличен от нуля и решение для J_1 и J_2 записывается как

$$\begin{aligned} J_1 &= \frac{-A_1K_2 + A_1K_3 - K_1C_1 + K_1B_1}{A_2(A_1 + B_1 - C_1)}; \\ J_2 &= \frac{-A_1K_3 - K_2C_1 + B_1K_3 + K_1C_1}{B_2(A_1 + B_1 - C_1)}, \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} A_1 &= -G_1; \quad B_1 = -G_2; \quad C_1 = \tau_2^{-1}; \\ A_2 &= -Q_{01}c; \quad B_2 = -Q_{02}c; \quad K_1 = G_1 \left(N_0 - \frac{Q_{01}}{\sigma_{211}} - \frac{Q_{02}}{\sigma_{221}} \right) \tau_2^{-1}; \\ K_2 &= G \left(N_0 - \frac{Q_{01}}{\sigma_{211}} - \frac{Q_{02}}{\sigma_{221}} \right) - \frac{Q_{02}}{\sigma_{211}}; \quad K_3 = -\tau_2^{-1} \left(\frac{Q_{01}}{\sigma_{211}} + \frac{Q_{02}}{\sigma_{221}} \right). \end{aligned}$$

Из приведенного теоретического анализа следует, что изменение добротности резонатора для одного перехода, например, J_1 , приводит к изменению мощности генерации и на конкурирующем переходе, которое тем больше, чем $\sigma_{211} > \sigma_{221}$, $G_1 > G_2$ и чем ближе мощность накачки уровней 21 и 22 к пороговым условиям для этих переходов. Результаты расчетов изменения отношения переменной составляющей к постоянной от величины коэффициента отражения трассы R_{eff} при различных значениях генерационных характеристик CO_2 -лазера (переходы $P(20)_{10}$ и $R(20)_{10}$) приведены на рис. 1, а, б. Так, при превышении мощности накачки над порогом для слабого перехода $g = G/G_n = 1,05$ и отношении мощности генерации на сильном переходе (P_2) к мощности на слабом (P_2/P_1) = 8, при глубине модуляции в случае приема эхо-сигнала на сильном переходе $\Delta P_2/P_2 = 0,45 \cdot 10^{-6}$, глубина модуляции на слабом переходе составляет $\Delta P_1/P_1 = 0,42 \cdot 10^{-4}$. В случае $g = 1,01$ для слабого перехода и $P_2/P_1 = 10^3$, при глубине модуляции в случае приема эхо-сигнала на сильном переходе $\Delta P_2/P_2 = 10^{-6}$, глубина модуляции на слабом переходе составляет $P_1/P_1 = 10^{-3}$. Таким образом, по сравнению с од-

непроходным методом чувствительность к величине эхо-сигнала в первом случае (рис. 1,б) выше в 90 раз, и во втором (рис. 1,а) — в 10^3 раз.

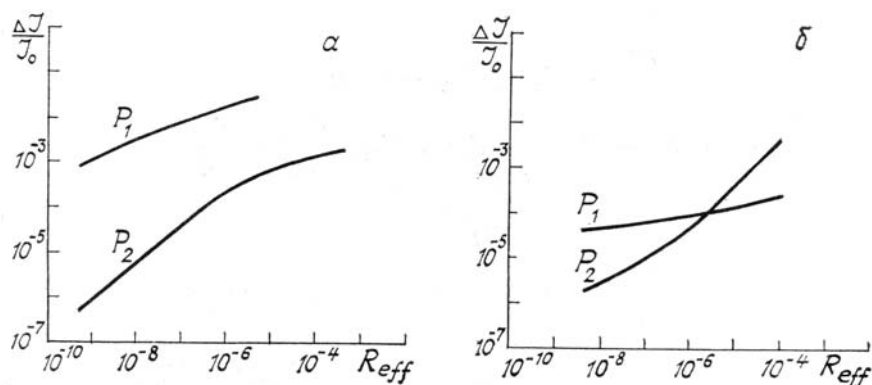


Рис. 1. Конкуренция переходов с общим нижним уровнем: зависимость глубины модуляции интенсивности $\Delta J/J_0$ на переходе P_2 при заданной глубине модуляции на переходе P_1 (при приеме эхо-сигнала с R_{eff} на переход P_1): (б) $P_2/P_1 = 8$, $g = 1,05$; (а) $P_2/P_1 = 10^3$, $g = 1,01$

Эксперимент

Проведены экспериментальные исследования режима одновременной генерации на двух конкурирующих переходах в непрерывном CO_2 -лазере при внутррезонаторном приеме эхо-сигнала от движущейся мишени, при введении в резонатор кюветы с газом, поглощающим на одном из переходов. Также в лабораторных и натуральных условиях исследовалась концентрационная чувствительность к газовым компонентам в зависимости от энергетических параметров вводимого эхо-сигнала.

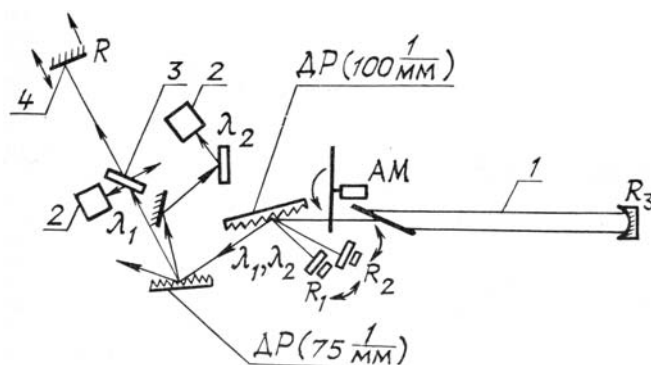


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 — газоразрядная трубка; 2 — фотоприемники; 3 — светоделитель; 4 — движущая мишень; P_1 , P_2 — зеркала резонатора; ДР — дифракционные решетки; АМ — амплитудный модулятор

Серия первых измерений была проведена в лабораторных условиях. Оптическая схема установки приведена на рис. 2. В лазере использовалась газоразрядная трубка от серийного излучателя ИЛГН-702. Конструкция резонатора лазера позволяла получать одновременную генерацию на двух длинах волн любой из полос $00^\circ 1 - 10^\circ 0$, $00^\circ 1 - 02^\circ 0$. Настройка резонатора на желаемые длины волн осуществлялась поворотом вокруг осей зеркал R_1 и R_2 . Дополнительная подстройка осуществлялась при помощи регулировки напряжения, приложенного к электродам пьезокорректоров, на которых устанавливались зеркала R_1 и R_2 . Излучение лазера выводилось через нулевой порядок дифракционной решетки Др1 и разделялось в пространстве по длинам волн при помощи второй дифракционной решетки Др2, работающей на втором порядке дифракции, и направлялось на фотоприемники ФП1 и ФП2. Эхо-сигнал от мишени с измененной фазой и частотой вводился в резонатор лазера. Модуляция фазы эхо-сигнала осуществлялась колебанием мишени с амплитудой, кратной $\lambda/2$, а частота за счет доплеровского эффекта, обусловленного равномерным поступательным движением мишени. В качестве мишени использовались различные отражатели: пластинки из NaCl , BaF_2 , грубо обработанные металлические поверхности, кирпич, дерево и т.п.

В случае одноволнового режима генерации при введении в резонатор лазера внешнего сигнала с измененной частотой, в кинетике генерации появляется переменная составляющая на частоте $\omega_0 = 2k\nu \cos(\mathbf{k}, \mathbf{v})$, где k и v — величины волнового вектора падающей волны и вектора линейной скорости мишени соответственно. В двухволновом режиме генерации на связанных через общий ниж-

ний энергетический уровень перехода любая модуляция в кинетике генерации на одном из переходов проявлялась в кинетике второго перехода (см. рис. 3,а). В этом случае сигнал на конкурирующем переходе сдвинут по фазе относительно сигнала на том переходе, куда вводится эхо-сигнал.

В случае дистанционного газоанализа атмосферы при относительном движении отражателя (естественного или искусственного) и при одновременной посылке излучений с двумя длинами волн, в кинетике генерации появляются две переменные составляющие с разнесенными по спектру частотами вследствие зависимости доплеровского сдвига от длины волны. Выделение переменных составляющих с последующим измерением интенсивности каждой из них не представляет трудностей. Экспериментально это было осуществлено на спектроанализаторе параллельного действия, состоящего из аналого-цифрового преобразователя высокого быстродействия (1107ПВ2), оперативного запоминающего устройства большой емкости и специализированного Фурье-процессора на основе микропроцессорного набора серии 580. Данный спектроанализатор позволял получать дискретный спектр мощности с регулируемой разрешающей способностью (до 10 МГц) из 2048 точек за время менее 10 с, а также последовательный набор спектров, позволяющий видеть изменение спектра мощности во времени. На рис. 3,б приведена спектрограмма мощности генерации CO_2 -лазера в двухволновом режиме на переходах $P(20)_{10}$ и $R(20)_{10}$, связанных через общий нижний уровень. В данном случае равномерно движущая мишень ставилась на пути двухволнового излучения, выходящего через нулевой порядок дифракционной решетки, а излучение регистрировалось фотоприемником ФСГ-22-3А. На спектрограмме видно четкое разделение максимумов, которые соответствуют различным длинам волн посылаемого излучения.

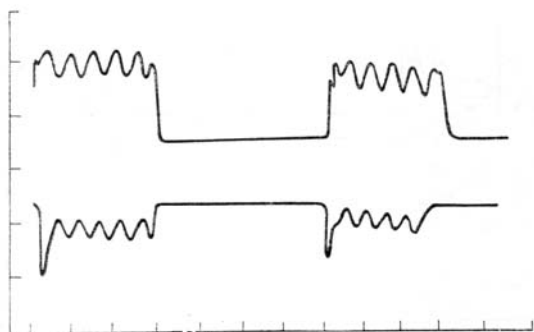


Рис. 3,а. Осциллограмма кинетики генерации лазера при приеме эхо-сигнала на один из переходов в случае связанных переходов

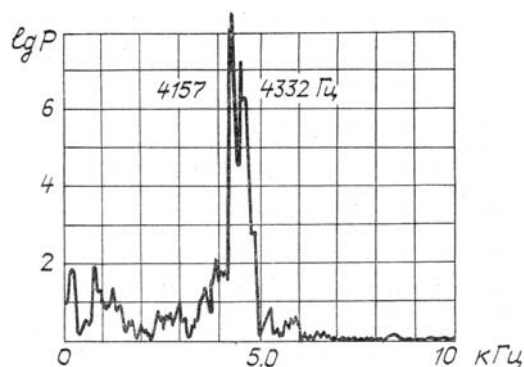


Рис. 3,б. Спектрограмма мощности генерации лазера в двухволновом режиме при приеме эхо-сигнала одновременно на два конкурирующих перехода

Как следует из проведенного выше теоретического анализа, соотношение интенсивностей переменной составляющей связанных переходов в случае ЛП-лидара, зависит от типа выбранных переходов и режима генерации, т. е. от величины превышения мощности накачки над пороговым значением. В связи с этим была проведена серия экспериментов по исследованию перераспределения интенсивностей генерации связанных переходов в зависимости от величины вводимого в резонатор эхо-сигнала. Изменение величины эхо-сигнала проводилось за счет помещения перед мишенью калиброванных по поглощению пластинок из BaF_2 или кюветы с газом, калиброванной по величине оптической толщи. На рис. 4,а приведена зависимость изменения мощности переходов $P(20)_{10}$ и $R(20)_{10}$, при изменении коэффициента отражения R_3 (т. е. добротности резонатора на одном из переходов). В этом случае зеркало R_3 и ослабители помещались на оптической оси резонатора для перехода $P(20)_{10}$, а мощность излучения на переходе $R(20)_{10}$ контролировалась. На рис. 4,б приведена зависимость величины отклика лазера на переходе $R(20)_{10}$ ($\lambda = 10,246$ мкм), нормированной на максимальное значение (при $\tau = 0$), от оптической толщи τ при коэффициенте отражения $R_3 = 0,3$. В данном эксперименте добротность выносного резонатора изменялась варьированием парциального давления паров этилового спирта в смеси с воздухом, помещенных в кювету длиной 30 см при общем атмосферном давлении. Сигнал наблюдался на конкурирующем переходе $P(20)$. Для сравнения приведены также результаты одночастотного зондирования (кривая 1) и результаты при $P_1/P_2 = 3$ и $P_1/P_2 = 8$ соответственно, а также результаты расчетов этих ситуаций из выражения (5). Такие же зависимости были измерены для ряда других переходов с различными заселенностями. Установленная зависимость $\Delta J/J_0$ от добротности резонаторов и соотношений между константами переходов качественно согласуется с выводами теоретического анализа (рис. 1,а,б).

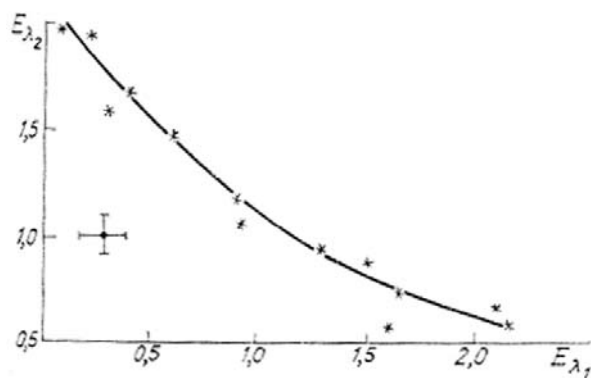


Рис. 4,а. Зависимость мощности генерации на переходе $R(20)_{10}$ от мощности генерации на конкурирующем переходе $P(20)_{10}$

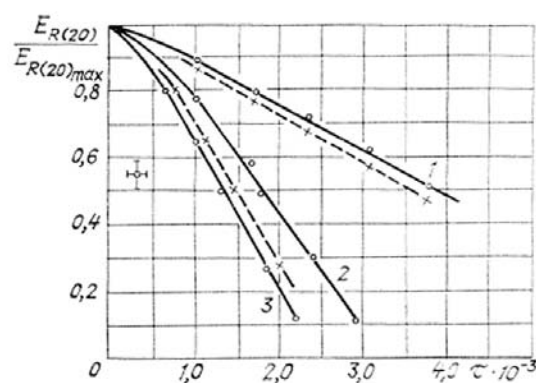


Рис. 4,б. Зависимость $E_{R(20)}/E_{R(20)_{\max}}$ на переходе $R(20)_{10}$ от оптической толщины, помещенной в резонатор, при генерации на конкурирующем переходе $P(20)_{10}$: 1 — $P(20)_{10} = 0$; 2 — $P(20)_{10}/R(20)_{10} = 3$; 3 — $P(20)_{10}/R(20)_{10} = 8$; штриховые кривые — результаты расчета

Нелинейная зависимость между изменениями интенсивностей связанных переходов в наших экспериментах наблюдалась при $R_3 > 5 \cdot 10^{-2}$ и при соотношениях интенсивностей $P_1/P_2 > 3$. При невыполнении этих условий нами не наблюдалось выигрыша в концентрационной чувствительности в сравнении с обычным методом дифференциального поглощения.

Пользовались топографические объекты с материалом, имеющим различные альбедо (кирпичная стена, стекло, дерево, матовая металлическая поверхность, вода). В качестве измеряемого газа применялся аммиак, кювета с которым помещалась перед отражающим объектом.

Натурные измерения на естественной атмосферной трассе проводились с целью исследования возможности определения вариаций концентрации газа на трассе при различных метеопараметрах атмосферы. При зондировании в натуральных условиях значительное влияние на спектр мощности принимаемого эхо-сигнала оказывают турбулентные характеристики атмосферы, сказывающиеся на флуктуациях фазы и интенсивности сигнала поля по сечению приемного телескопа. В лидере использовался перестраиваемый CO_2 -лазер, аналогичный описанному выше. Длина трассы составляла 950 м и проходила на высоте 3–6 м над поверхностью земли. Параллельно с проводимыми измерениями контролировались температура, влажность, давление, скорость и направление ветра по трассе.

В таблице представлены результаты измерений влажности описанным ЛП-лидаром и промышленным гигрометром. Сравнительные данные были получены при вариациях $C_n^2 = 2 \cdot 10^{-15} - 2 \cdot 10^{-16} \text{ см}^{-2/3}$. Отклонения данных, полученных ЛП-лидаром, от данных промышленного гигрометра наблюдались при больших значениях C_n^2 .

Время, ч	ЛП-лидар, г/м ³	Гигрометр, г/м ³
8	13,2	13,2
10	15,4	15,5
12	16,4	17,3
14	20,0	20,2
16	17,0	17,5
18	15,2	14,8
20	14,2	15,1

Выводы

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что наибольшая чувствительность лазера к эхо-сигналу при двухволновом зондировании реализуется при значительной величине отношения мощностей генерации на связанных переходах при минимальном превышении накачки «слабого» перехода над ее пороговым значением для этого перехода. В этом случае наиболее эффективна перекачка энергии из канала генерации на «сильном» переходе в канал генерации на «слабом» переходе. Данное обстоятельство также можно использовать в одноволновой схеме зондирования для снятия основного противоречия, возникающего при технической реализации лидара, основанного на внутррезонаторном приеме эхо-сигнала. Так, с одной стороны, для достижения максимальной чувствительности внутррезонаторного приема необходимо поддерживать лазер в состоянии генерации, близком к порогу, но с другой стороны, для достижения достаточной дальности зондирования, необходима значительная излучаемая мощность (порядка десятка ватт), что достигается режи-

мом генерации с большим превышением над порогом. Компромисс в этой ситуации приводит не только к падению чувствительности к эхо-сигналу, уменьшению возможной дальности зондирования, но и к необходимости выделения малого переменного сигнала на фоне большой постоянной засветки, что само по себе представляет значительную трудность и требует применения специальных фотодетекторов. Следовательно, одноволновая схема зондирования, в которой зондирование и прием эхо-сигнала ведется на «сильном» переходе, реализующем значительную мощность генерации, а регистрация сигнала на частоте биений ведется на «слабом» переходе, даст существенный выигрыш во всех отношениях. Так, расчеты с учетом конкретной, промышленно выпускаемой газоразрядной трубки, применяемой в нашем лидаре, дают выигрыш по чувствительности к эхо-сигналу в $10^2 - 10^3$ раз.

В заключение необходимо отметить, что в случае экспрессного газоанализа атмосферы целесообразно зондировать одновременно на двух «сильных» переходах с длинами волн, попадающими на линию поглощения измеряемого газа и вне ее, а регистрацию сигналов биений осуществлять на «слабых» переходах, связанных через общие нижние уровни с «сильными».

1. Годлевский А.П., Иванов А.К., Копытин Ю.Д. — Квантовая электроника, 1982, т. 9, № 9, с. 2007–2012.

2. Годлевский А.П., Зуев В.Е., Иванов А.К., Копытин Ю.Д. — ДАН СССР. 1982, т. 267, с. 343–347.

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР, Томск

Поступила в редакцию
3 мая 1988 г.

S. D. Burakov, A. P. Godlevsky, P. P. Sharin. **Study of Proximate Atmospheric Gas Analysis by Coherent Laser-Reception Lidar.**

Based on a set of the self-consistent Statz-de-Mars equations for a laser with coupled transitions (V- and Λ -type), a CO_2 -laser action is studied theoretically. Analytical solutions for the laser intensities are derived. The feasibility of enhancing the double-frequency laser transceiver sensitivity is shown for an operation on two transitions coupled through a common lower level. The results obtained from the experiments on the proximate atmospheric gas analysis using a coherent laser-reception lidar are discussed. The water vapour concentration measured by the lidar along the 500 m atmospheric path is compared with that detected by a commercial hygrometer to show good agreement for low turbulence. In the case of high turbulence the data are in reasonable agreement.