

В.В. Валуев, М.Н. Духин, Ю.А. Коняев, Я.И. Малашко, В.В. Морозов, Р.Ш. Цвык*

Влияние атмосферы на распределение плотности мощности и расходимость широкоапертурного пучка излучения непрерывного CO₂-лазера

НПО «Алмаз», г. Москва

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 20.04.2000 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований характеристик излучения при испытаниях мощного излучения непрерывного CO₂-лазера на приземных атмосферных трассах. Полученные результаты проанализированы с учетом тепловой дефокусировки, фазовых искажений излучения на выходе лазера и в системе формирования, дифракции и регулярной расходимости. Анализируется влияние участка «ввода» на расходимость излучения и некоторые методы уменьшения этого влияния.

Нелинейное взаимодействие мощных лазерных пучков, распространяющихся на протяженных атмосферных трассах, определяется энергетикой и геометрией излучения, условиями распространения и теплопереноса на трассе. Такие исследования представляют собой достаточно сложную экспериментальную задачу, так как проводятся на фоне случайных процессов турбулентного уширения, общего энергетического ослабления атмосферными газами и аэрозолями, искажений волнового фронта на выходе источника, вносимых оптико-механическим трактом (ОМТ).

Дополнительные сложности в такого рода экспериментах определяются тем, что измерительные трассы по проявлению эффектов тепловой нелинейности являются, как правило, неоднородными. Обычно они включают начальный (застойный) участок «ввода» от лазера до выходной апертуры, где происходит формирование пучка, и собственно атмосферный участок, где излучение чаще всего фокусируется. Начальный участок характеризуется малой длиной, малыми скоростями движения воздуха и относительно высокими плотностями энергии излучения. Соответственно проявление нелинейных эффектов здесь максимально. Для атмосферного участка характерны значительная протяженность и наличие ветра. Фокусировка излучения на этом участке осуществляется большими апертурами, вследствие чего плотность передаваемой энергии по сравнению с начальным участком невелика и нелинейные эффекты проявляются в меньшей степени. Влияние атмосферы на характеристики излучения в конце трассы определяется совокупным влиянием обоих участков трассы.

Измерение теплового расплывания пучка на атмосферных трассах предполагает использование специальных методик анализа получаемых в эксперименте данных. В немногочисленных публикациях по экспериментальным исследованиям эффективности концентрации энергии мощных лазеров технологического типа на приземных трассах [1–5] описываются возможные подходы к решению этой проблемы и приводятся результаты исследова-

ний и оценки влияния тепловой нелинейности на эффективность фокусировки лазерных пучков в атмосфере.

В предлагаемой статье приводятся результаты экспериментальных исследований с непрерывным CO₂-лазером в условиях реальной атмосферы.

Для внешнего участка атмосферы в [3] получено выражение для оценки диаметра пучка d_f на расстоянии L при излучении с гауссовым распределением интенсивности и с учетом искажающих факторов, таких как тепловая дефокусировка, фазовые искажения и начальная расходимость на выходе оптической системы, дифракции и искажения за счет атмосферной турбулентности.

Распределение фазы на выходной апертуре можно представить в первом приближении в виде двух составляющих. Первая – регулярная составляющая (средний фазовый фронт), определяющая регулярную расходимость пучка θ_p , в которую включается расходимость на выходе самого лазера, а также дополнительная, вызванная влиянием тепловой дефокусировки на участке ввода. Вторая – отклонение фазового фронта от среднего, т.е. искажения, вносимые оптической системой и искажения, присущие излучению мощных лазеров. Эту составляющую нерегулярной расходимости Φ_{nr} можно характеризовать дисперсией σ_0^2 и радиусом корреляции l_0 .

Для широкоапертурного пучка параметр $\Omega = k_0 a_0^2 / 2L$ обычно много больше единицы ($k_0 = 2\pi/\lambda$, λ – длина волны излучения; a_0 – радиус пучка на выходе оптической системы). При малых оптических толщах $\alpha L < 1$ (α – коэффициент поглощения), которые реализуются в чистой атмосфере для CO₂-лазера при малой влажности на трассах протяженностью до 1 км, выражение для диаметра пучка в конце трассы d_f можно записать в виде

$$d_f^2 = [d_{f0}(1 + N)]^2 + (2a_0Q)^2; \quad (1)$$

$$N = N_c a_0 / a_{f0} = N_c a_0 / L \theta_p, \quad (2)$$

где $N_c = \frac{dn}{dT} \frac{\alpha I_0 L^2}{n_0 \rho c_p a_0 V_{\perp}}$ – параметр нелинейности для кол-

лимированного пучка [4]; N – параметр нелинейности с учетом регулярной расходимости пучка θ_p ; I_0 – интенсивность на оси пучка на выходе оптической системы; n_0 , ρ , c_p – средний показатель преломления, плотность и удельная теплоемкость среды; V_{\perp} – перпендикулярная оси пучка составляющая скорости ветра; $Q = [\sigma_0^2 + D_s(l_0) + l_0^2/a_0^2] (k_0 d_0^2/2L)^{-1}$; $D_s(l_0) = 3,2C_0^2 k_0 L l_m^{-1/3} l_0^2$ – структурная функция флуктуаций фазы; $\sigma_0^2 = (2\pi l_0 \phi_{\text{нр}}/2\lambda)^2$ – дисперсия нерегулярной расходимости $\phi_{\text{нр}}$; l_0 – радиус корреляции нерегулярной составляющей расходимости на выходе ОМТ; $d_{j0} = 2a_{j0} = 2\theta_p L$ – диаметр пучка за счет регулярной расходимости; C_n^2 – структурная функция флуктуаций показателя преломления атмосферы; $l_m \approx 0,1$ см – внутренний масштаб атмосферной турбулентности.

Как видно из (1), размер пучка d_f определяется двумя составляющими. Первая – учитывает регулярную составляющую расходимости d_{j0} и тепловое уширение пучка, определяемое параметром нелинейности N , который пропорционален поглощенной энергии и обратно пропорционален регулярной расходимости θ_p . Предполагается, что регулярная составляющая расходимости, определяемая усредненной поверхностью волнового фронта, в первом приближении, может быть компенсирована сферической или цилиндрической оптикой. Вторая составляющая учитывает фазовые флуктуации на выходной апертуре, турбулентное и дифракционное уширение пучка.

Как показывают оценки и экспериментальные данные для реальных атмосферных трасс и характерных параметров непрерывного излучения CO₂-лазеров, тепловое уширение пучка может превышать уширение за счет второй составляющей. В этом случае средняя интенсивность на оси пучка, фокусированного на расстояние L , определяется соотношением [4]:

$$I = I_0 \exp(-\alpha L - N) \approx I_0 \exp(-N). \quad (3)$$

Методика измерений

В наших исследованиях использовалась установка, включающая быстропотоочный CO₂-лазер с самостоятельным разрядом и систему формирования с увеличением $\Gamma = 4,4$. Экспериментальное определение характеристик излучения на измерительной трассе выполнялось средствами, описанными в [3].

Эксперименты проводились на трассах длиной 900 и 2500 м, проходивших на высоте нескольких метров над ровной подстилающей поверхностью. Трасса была в основном закрытой с двух сторон, так что теплоперенос вследствие ветрового движения воздушных масс был ограничен, а влажность воздуха во многих случаях достаточно высокой. Это определило возможность измерений при больших значениях параметра нелинейности N на атмосферной части трассы и ее главенствующую роль, по сравнению с участком ввода, в нелинейных искажениях пучка.

Измерение энергетических характеристик излучения на выходе лазера осуществлялось сканирующим измерителем мощности (СИМ) и сеточными измерителями (СИ) размером 1×1 м как на выходе лазера, так и на выходе ОМТ. В конце трассы мощность измерялась сеточным измерителем тех же размеров, а распределение плотности

мощности по сечению пучка – с помощью матрицы приемников (ИМП) с плотной упаковкой датчиков и обработкой на ЭВМ. Калибровка сеточных измерителей и определение коэффициентов передачи энергии излучения на различных участках проводились путем сравнения показаний СИМ, ИМП и СИ.

Исследования сопровождались измерениями следующих метеопараметров: температуры, градиента температуры, влажности, направления и скорости ветра. По метеопараметрам рассчитывались коэффициент поглощения α , обобщенный параметр нелинейности N и искажения за счет турбулентности.

Общее энергетическое ослабление излучения CO₂-лазера с длиной волны 10,6 мкм в атмосфере определяется поглощением парами воды $\alpha(\text{H}_2\text{O})$, углекислого газа $\alpha(\text{CO}_2)$ и рассеянием на аэрозолях α_e , т.е. суммарный коэффициент ослабления излучения α включает 3 составляющие

$$\alpha = \alpha(\text{H}_2\text{O}) + \alpha(\text{CO}_2) + \alpha_e. \quad (4)$$

Формула, использовавшаяся в эксперименте для оценки $\alpha(\text{H}_2\text{O})$ на длине волны $\lambda = 10,6$ мкм, имеет вид [6]:

$$\alpha(\text{H}_2\text{O}) = 1,76 \cdot 10^{-3} a(1 + 1,78 \cdot 10^{-3} p) + 0,42 \cdot 10^{-6} a^2 \exp(2273/T), \quad (5)$$

где $a = 13,25(e/T) \exp[17,58/(T-31,3)]$ – абсолютная влажность воздуха (г/м³), рассчитанная по измеренным значениям относительной влажности e (%), температуре T (К) и давлению p (мбар).

Коэффициент поглощения $\alpha(\text{CO}_2)$ рассчитывался для средней объемной концентрации углекислого газа в атмосфере (0,033%) [7]:

$$\alpha(\text{CO}_2) = 386T^{1,5} \exp[2232(1/296-1/T)]. \quad (6)$$

Коэффициент ослабления излучения аэрозолями $\alpha_e(10,6)$ определялся из результатов измерения коэффициента ослабления в видимом диапазоне длин волн $\alpha_e(\lambda)$ ($\lambda = 0,63$ мкм) с использованием формул пересчета [8].

Для максимального уменьшения влияния участка «ввода» на расходимость излучения необходимо на нем свести к минимуму коэффициент поглощения. Это можно сделать путем продувания участка ввода слабо поглощающим воздухом. Такой стенд продува при стендовых испытаниях вводился в состав установки.

Результаты измерений

Из независимых измерений [3] были определены дисперсия нерегулярной составляющей расходимости $\sigma_0^2 = 2$ и радиус корреляции $l_0 = 11,2$ мм.

Коэффициенты поглощения излучения ($\lambda = 10,6$ мкм) атмосферой в районе испытаний, рассчитанные по результатам оперативного контроля атмосферы по формуле (4), изменяются в пределах $0,1 \div 0,6 \text{ км}^{-1}$, что согласуется с прямыми измерениями с маломощным CO₂-лазером.

Анализ месячных вариаций соотношения α/V_{\perp} , значение которого при постоянных выходных характеристиках пучка и длины трассы определяет изменение величины параметра нелинейности N_c , показал, что осенью атмосферные условия для наземных испытаний, как правило, наилучшие (значения $N_c < 1$ – около 65%), а летом наи-

худшие (почти 90% составляют значения $N_c > 1$), значения α/V_{\perp} меняются от 0,02 в апреле до 2 в августе.

Структурная постоянная флуктуаций показателя преломления C_n^2 изменялась в пределах $10^{-14} \div 10^{-15} \text{ м}^{2/3}$.

На рис. 1 приведены результаты измерений коэффициента передачи излучения $\kappa_{и}$ от лазера в апертуру сеточных измерителей ($\kappa_{и} = P_{сн}/P_{снм}$ – отношение мощности в конце трассы к мощности на выходе лазера), установленного на отметке «900» м в зависимости от коэффициента пропускания атмосферы T_p .

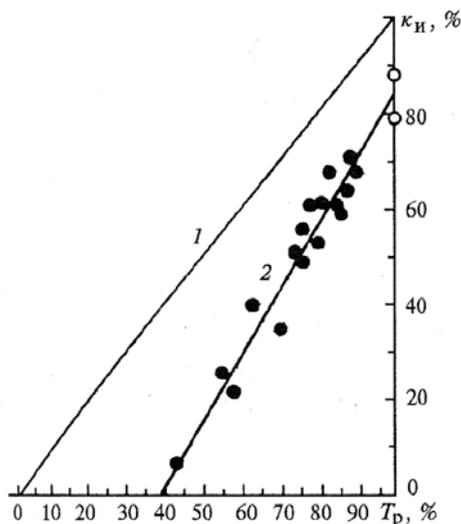


Рис. 1. Зависимость коэффициента передачи излучения $\kappa_{и}$ от коэффициента пропускания атмосферы T_p

Прямая 1 приведенная на рис. 1, соответствует уравнению $\kappa_{и} = T_p$, прямая 2 рассчитана методом наименьших квадратов $\kappa_{и} = -49,5 + 1,33 T_p$. Пересечение прямой 2 с осью ординат при $T_p = 100\%$ определяет величину коэффициента передачи ОМТ. Коэффициенты передачи ОМТ, измеренные сеточными измерителями на выходе лазера и ОМТ и приведенные на рис. 1 (светлые кружки) при $T_p = 100\%$, подтверждают этот факт. То, что наклон экспериментальной прямой, равный 1,33, отличается от 1, указывает на нелинейный характер взаимодействия излучения при распространении излучения непрерывного CO_2 -лазера в атмосфере.

На рис. 2 приведена экспериментальная зависимость максимальной энергии E_m от дифракционного параметра нелинейных искажений $N_d = N_c a_0/a_d = \frac{dn}{dT} \frac{\alpha I_0 L^2}{n_0 \rho c_p a_d V_{\perp}}$, т.е.

в параметре N (формула (2)) регулярная расходимость $a_0 = \theta_p L$ заменена на предельную дифракционную $a_d = \theta_d L$.

Сплошной линией 2 показана зависимость, построенная по аппроксимационной формуле $E_m = 3,2(1 + 0,025 N_d^{2,2})$, предложенной в [4], пунктирная кривая 1, $E_m = 3,2 \exp(-0,14 N_d)$, подобрана методом наименьших квадратов. Видно, что энергия E_m как функция N_d хорошо описывается как сложной формулой степенного вида, так и более простой для применения экспоненциальной зависимостью.

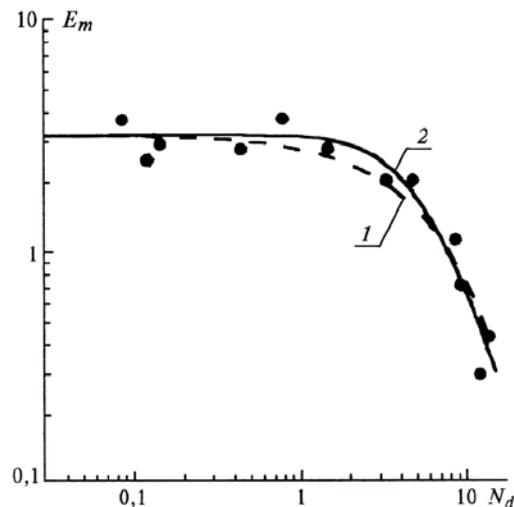


Рис. 2. Зависимость максимальной энергии E_m , зарегистрированной матрицей ИМП, от дифракционного параметра нелинейности N_d

Полученные экспериментальные данные о зависимости E_m позволяют получить оценку регулярной расходимости θ_p . Действительно, параметр N_d связан с параметром $N = N_c(a_0/a_0)$ соотношением $N_d = N_c(a_0/a_d)$. Как показывают оценки, параметр нелинейности N в экспериментах принимал значения $N \approx 1$, величина $Q^2 \approx 0,16$ и тепловые искажения пучка преобладали. Далее, из формулы (3) следует, что уменьшение интенсивности на оси пучка до уровня $e^{-1} I_0$ должно происходить при значении $N \approx 1$. Из рис. 2 видно, что $E_m(N_d) = e^{-1} E_m(0)$ примерно при $N_d = 8$, откуда следует, что $a_0/a_d \approx 8$, т.е. регулярная расходимость при фокусировке излучения равна $\theta_p = 8\theta_d$, что согласуется с результатами стендовых испытаний [3]. Оценка расходимости излучения по размеру пятна на матрице, когда атмосферные искажения мощного пучка были минимальны, т.е. $N_c \approx 0$, дает такую же величину.

Одним из реальных способов снижения регулярной расходимости, увеличенной тепловым взаимодействием на участке «ввода» при малых значениях N на атмосферной трассе, является оптимальная фокусировка системой формирования. За счет фокусировки излучения на расстояние $\sim 0,5 L$ удалось уменьшить площадь фокального пятна в три раза, что соответствует уменьшению регулярной расходимости в 1,7 раза.

Уменьшить влияние теплового самовоздействия на участке «ввода» можно, если свести к минимуму коэффициент поглощения воздуха и обеспечить его движение поперек этого участка. Такая система продува осушенным воздухом была изготовлена и испытана. Осушенный воздух с расходом $2,5 \text{ м}^3/\text{с}$, температурой $T \approx 20^\circ\text{C}$, коэффициентом поглощения $\alpha = 0,07 \text{ км}^{-1}$ (определяется поглощением углекислым газом) подавался через распределительную систему на пути мощного излучения (длина участка 7 м) перпендикулярно оси пучка. Таким образом, удалось уменьшить величину α/V_{\perp} в 10 раз. Измерения показали, что использование продува дает уменьшение регулярной расходимости на выходе системы формирования примерно в 3 раза.

Заключение

Как видно из результатов исследований, при слабом влиянии теплового взаимодействия на атмосферном участке трассы вклад участка «ввода» оказывается существенным.

Введение в установку системы «продува» этого участка слабо поглощающим газом (осушенным воздухом) приводит к уменьшению расходимости до значений, определяемых расходимостью лазера и термоупругими искажениями охлаждаемых зеркал системы формирования. Это позволяет эффективнее уменьшить расходимость излучения по сравнению с компенсацией тепловых искажений с помощью сферической оптики (в нашем эксперименте в два раза).

1. Аксенов В.П., Банах В.А., Валуев В.В., Зуев В.Е., Морозов В.В., Смалихо И.Н., Цвык Р.Ш. Мощные лазерные пучки в случайно-неоднородной атмосфере / Под ред. В.А. Банаха. Новосибирск: Изд. СО РАН, 1998, 341 с.

2. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Зуев В.Е., Кабанов М.В., Погодаев В.А. Нелинейная оптика атмосферного аэрозоля. Новосибирск: Изд. СО РАН, 1999, 260 с.
3. Валуев В.В., Морозов В.В. Экспериментальные результаты по измерению расходимости излучения при стендовых испытаниях установок на основе непрерывного газоразрядного CO₂-лазера // Изв. РАН. 1985. Т. 59. № 12. С. 156–161.
4. Смит Д.К. Распространение мощного лазерного излучения. Тепловые искажения пучка. ТИИЭР. Т. 65. № 12. С. 59–103.
5. Valuev V.V., Dukhin M.N., Konyaev Yu.A., Morozov V.V., Tsvyk R.Ch. The Influence of Atmosphere on power Density Distribution and Divergence of Continuous CO₂-laser wide-aperture beam // Lasers'96. Portland. 1996. V. 2201. P. 1395–1408.
6. Арефьев В.Н., Дианов-Клоков В.Н. К оценке влияния метеорологических факторов на ослабление лазерного излучения 10,6 мкм континуумом водяного пара в чистой атмосфере // Квантовая электроника. 1976. Т. 3. № 4. С. 923–924.
7. Блоховская Т.В., Мицель А.А. Инженерная методика оценки характеристик молекулярного поглощения в области 10,6 мкм / Томск: Изд. СО РАН, 1982. С. 67–80.
8. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех). М.: Сов. Радио, 1977. 368 с.

V.V. Valuev, M.N. Dukhin, Yu.A. Konyaev, Ya.I. Malashko, V.V. Morozov, R.Sh. Tsvyk. Effect of the atmosphere on distribution of power density and divergence of cv CO₂ laser wide-aperture radiation beam.

The experimental results on characteristics of high-power cv CO₂ laser radiation propagating along ground atmospheric paths are presented. Analysis of the obtained results takes into account the effects of thermal blooming and phase distortions of the laser radiation at the optical system output as well as in the system of its formation, diffraction, and regular divergence. Influence of the system «output» on the radiation divergence is also under analysis. Some methods are examined decreasing this effect.