

Хемоавтоколлимация в этилене излучения непрерывного CO₂-лазера

Г.И.Козлов

При фокусировке излучения непрерывного газоразрядного CO₂-лазера мощностью 35 Вт в поток этилена при атмосферном давлении обнаружено образование хемоавтоколлимационного световода длиной примерно 4 см и диаметром 150 мкм. Высокая интенсивность лазерного излучения в автоколлимационном канале приводила к иницированию пиролиза этилена, образованию ацетилена и визуализации канала.

Ключевые слова: газоразрядный CO₂-лазер, нелинейные эффекты, автоколлимация лазерного пучка, хемоавтоколлимация.

Самовоздействие мощного лазерного излучения, связанное с зависимостью показателя преломления среды от интенсивности излучения, приводит к ряду нелинейных эффектов, в том числе к самофокусировке и автоколлимации лазерного излучения. Эти чрезвычайно интересные эффекты наблюдались в основном при распространении мощных импульсных лазерных пучков в конденсированных средах [1]. Обстоятельный анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований в этом направлении можно найти в работе [2]. Что касается влияния самовоздействия на распространение лазерных пучков в газах, то следует отметить, что до настоящего времени в этой области сделано гораздо меньше. Здесь следует упомянуть работу [3], в которой в парах натрия исследовалась автоколлимация пучка перестраиваемого непрерывного лазера на красителе, а также работу [4], где наблюдалась самофокусировка излучения импульсного CO₂-лазера в резонансно поглощающих газах BCl₃ и SF₆.

В настоящей работе, исследуя закономерности воспламенения лазерным излучением потока этилена в воздухе [5], мы неожиданно обнаружили хемоавтоколлимацию в этилене пучка непрерывного CO₂-лазера мощностью всего 35 Вт. Схема эксперимента была следующей. Поток этилена через горелку плоского пламени диаметром 6 см вытекал в атмосферу и на выходе из горелки пересекал область фокусировки лазерного пучка. Непрерывный газоразрядный CO₂-лазер работал на основной моде TEM₀₀. Преимущественный вклад в излучение лазера давали переходы P(18) и P(20) полосы 10.6 мкм. Излучение лазера фокусировалось линзой из соли с фокусным расстоянием 7.5 см в пятно диаметром примерно 0.3 мм. Область фокусировки в этой серии экспериментов располагалась на расстоянии примерно 1.0 см от края горелки в зоне перемешивания потока этилена с окружающим воздухом. При некоторой мощности пучка инициировалось воспламенение этилена и образовыв-

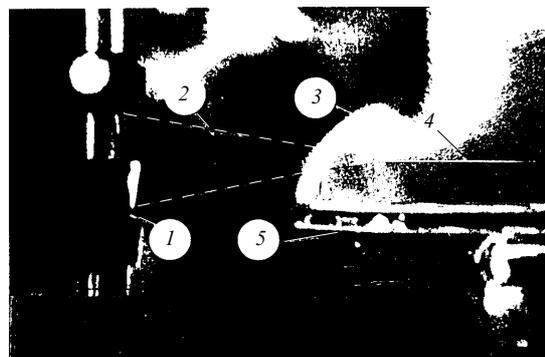


Рис.1. Видеокадр воспламенения потока этилена сфокусированным пучком непрерывного CO₂-лазера и образования автоколлимационного канала в этилене:

1 – линза; 2 – произвольные контуры сфокусированного лазерного пучка; 3 – область диффузионного фронта пламени; 4 – автоколлимационный канал; 5 – горелка.

вался фронт диффузионного пламени, который служил своеобразным экраном, препятствующим проникновению кислорода атмосферного воздуха в поток этилена. Таким образом, пучок CO₂-лазера фактически распространялся в чистом этилене, находившемся в своеобразной камере, стенками которой являлось пламя. При максимальной мощности пучка «вспыхивала» автоколлимация, которая (см. рис.1) имела вид тонкой светящейся нити длиной примерно 4 см и диаметром 150 мкм.

Автоколлимация явно возникала в области фокуса, при этом невидимый для глаза пучок CO₂-лазера превращался в светящийся автоколлимационный канал желтоватого цвета. Визуализация пучка безусловно свидетельствовала о пиролизе этилена в пределах канала. На пиролиз этилена указывали также и частички углерода, которые образовывались, за пределами автоколлимационного канала по всей его длине. Таким образом, химический процесс позволил визуализировать автоколлимационный канал, который представляет собой фактически канал волноводного действия. Не будь автоколлимации, диаметр светового пучка в месте расположения выхода канала возрос бы от 150 мкм до 4 мм.

Институт проблем механики РАН, Россия, 117526 Москва, просп. Вернадского, 101

Поступила в редакцию 21 июня 2001 г.

Но вот что любопытно: дополнительные измерения показали, что в кювете, наполненной этиленом при атмосферном давлении, нефокусированный пучок нашего лазера поглощался на длине примерно 2 см. В связи с этим возникает вопрос: как образуются автоколлимационные каналы значительно большей длины? Вероятно, все дело в том, что распространение сфокусированного излучения CO₂-лазера в этилене сопровождается значительным тепловыделением, которое, естественно, определяется интенсивностью лазерного излучения и коэффициентом поглощения этилена. Последний, по нашим оценкам, составляет примерно 1 см⁻¹. Разогрев этилена в автоколлимационном световом канале, во-первых, приводит к туннелированию, т. е. к проникновению светового пучка на большую глубину за счет уменьшения плотности поглощающих молекул. Во-вторых, протекающий в автоколлимационном канале химический процесс пиролиза молекул этилена также приводит к частичному исчезновению поглощающих молекул внутри канала и, соответственно, к существенному уменьшению затухания лазерного пучка в канале, что, вероятно, и наблюдалось в нашем эксперименте.

Каков же механизм возникновения автоколлимационного канала? В нелинейных средах показатель преломления среды n является функцией интенсивности света. Предположим, что из многочисленных нелинейных эффектов в нашем случае изменение показателя преломления среды n обусловлено увеличением поляризуемости молекул, находящихся в возбужденных колебательных состояниях [4], а зависимость n от поля имеет вид

$$n = n_0 + n_2 E_0^2, \quad (1)$$

где n_0 – показатель преломления среды в отсутствие поля; n_2 – коэффициент, характеризующий нелинейность среды; E_0 – амплитуда электрического поля световой волны.

Поскольку интенсивность излучения уменьшается по мере удаления от оси лазерного пучка, прирост n в центре светового канала будет максимальным. С увеличением интенсивности лазерного излучения показатель преломления n в пучке может возрасти настолько, что при углах падения лучей на границу светового пучка, превышающих предельный, произойдет полное внутреннее отражение от границы, в результате чего образуется световод, захватывающий лазерный пучок. При фокусировке пучка линзой с фокусным расстоянием f сама фокусировка способствует формированию световода, и в этом случае нетрудно получить следующее выражение, связывающее пороговую для возникновения автоколлимационного канала интенсивность с параметрами фокусировки лазерного пучка:

$$\frac{a^2}{2f^2} = \frac{n_2 E_0^2}{n_0 + n_2 E_0^2} \approx \frac{n_2 E_0^2}{n_0}, \quad (2)$$

где $2a$ – апертура лазерного пучка; $n_0 = 1.000696$ (здесь и далее показатели преломления приведены для длины волны 589.3 нм); n_2 , к сожалению, неизвестно, и поэтому по формуле (2) трудно оценить пороговую для возникновения автоколлимации мощность лазерного пучка W_t , с тем чтобы сравнить ее с полученным нами экспериментальным значением $W_t = 35$ Вт. Выражение для порого-

вой мощности лазерного излучения, испытывающего автоколлимацию, следует из (2) и имеет вид

$$W_t = \pi r_0^2 S = \pi (f\theta)^2 \frac{c E_0^2}{4\pi} = \frac{a^2 \theta^2 c n_0}{8 n_2}, \quad (3)$$

где $r_0 = f\theta$ – радиус пятна фокусировки; θ – расходимость лазерного пучка; S – интенсивность лазерного излучения; c – скорость света. Так как n_2 нам неизвестно, то целесообразно использовать выражение (3) для его оценки. Подставляя в (3) $a = 5$ мм, $\theta = 1.5$ мрад и значения других входящих в него параметров, находим $n_2 = 8.43 \times 10^{-6}$ см·с²/г. Затем, подставляя полученное n_2 в выражение (1), определяем показатель преломления этилена n в условиях возникновения автоколлимационного канала в описанных выше экспериментах. Он оказался равным 1.002896, что для газов действительно является очень высоким значением.

Образование светящегося световода в этилене вызывает множество вопросов. Наиболее принципиальный из них следующий: если в результате разогрева этилена в автоколлимационном канале, где интенсивность лазерного излучения составляет $10^4 - 10^5$ Вт/см², происходит пиролиз этилена (а этот факт сомнения не вызывает), то почему автоколлимационный канал оказывается столь устойчивым? Ведь молекулы этилена исчезают в ходе реакции пиролиза и, соответственно, должен был исчезнуть и автоколлимационный канал.

По-видимому, дело в том, что в результате пиролиза этилена образуется ацетилен, который не только имеет близкий к этилену показатель преломления для нормальных условий ($n_0 = 1.000606$), но, вероятно, и близкую к этилену зависимость n от интенсивности лазерного излучения. Кроме того, может иметь место и более близкое к оптимальному с точки зрения увеличения n согласование частот лазерного пучка и соответствующего колебательно-вращательного перехода молекулы ацетилена, а также увеличение поляризуемости молекул, находящихся в возбужденном состоянии, от чего, безусловно, может сильно зависеть автоколлимация. Все это требует дальнейших исследований.

Таким образом, при воздействии сфокусированного излучения непрерывного CO₂-лазера на этилен как исходную нелинейную среду реализуется целая последовательность процессов. В первые мгновения за счет резонансного поглощения в этилене возникает автоколлимация, которая приводит к образованию волноводного канала и резкому повышению интенсивности лазерного излучения в нем. Распространение интенсивного излучения в резонансно поглощающей среде ведет к разогреву этилена в канале, интенсивному возбуждению колебательных уровней и развитию пиролиза этилена. В результате пиролиза образуется ацетилен, который, возможно, еще больше усиливает автоколлимацию. Таким образом, судя по эксперименту, наблюдаемое явление, на наш взгляд, правильнее назвать хемоавтоколлимацией, подразумеваемой под этим термином автоколлимацию, возникающую в химически реагирующей системе.

1. Пилипецкий Н.Ф., Рустамов А.Р. *Письма в ЖЭТФ*, 2, 88 (1965).
2. Ахманов С.А., Сухоруков А.П., Хохлов Р.В. *УФН*, 93, 19 (1967).
3. Bjorkholm J.E., Ashkin A. *Phys. Rev. Lett.*, 32, 129 (1974).
4. Карлов Н.В., Карпов Н.А., Петров Ю.Н., Стельмах О.М. *Письма в ЖЭТФ*, 17, 337 (1973).
5. Козлов Г.И. *Письма в ЖТФ*, 23, № 24, 46 (1997).