

## ЭФФЕКТ ПЛАЗМЕННОГО ЗЕРКАЛА ПРИ ПРОБОЕ ВОЗДУХА В РЕЗОНАТОРЕ $\text{CO}_2$ -ЛАЗЕРА

*Н. В. Карлов, В. М. Комиссаров, Г. П. Кузьмин,  
А. М. Прохоров*

В этой статье сообщается о наблюдавшемся впервые образовании плазменного зеркала и самомодуляции лазерного излучения при инфракрасном пробое воздуха в резонаторе лазера. Обнаружено, что гладкий импульс генерации длительностью 10 *мксек* при большой плотности мощности в фокальной области сложного резонатора в предпробойном состоянии преобразуется в серию регулярных импульсов длительностью 400 – 500 *нсек*. При превышении некоторого порогового значения возникает пробой, при этом регулярность модуляции импульса генерации исчезает. Увеличение плотности плазмы, происходящее в соответствии с развитием импульса генерации, приводит к возникновению плазменного зеркала. После этого импульс генерации становится гладким.

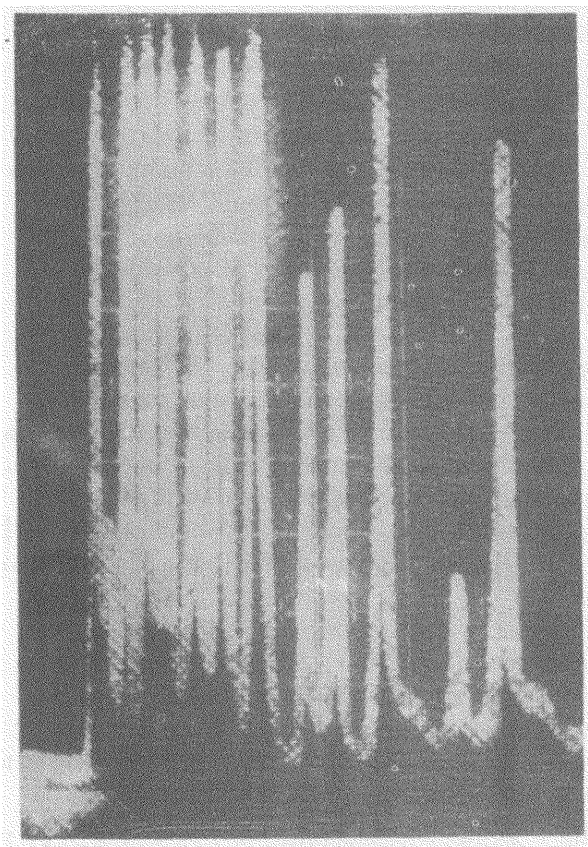
К настоящему времени пробой воздуха излучением  $\text{CO}_2$ -лазеров стал сравнительно легко достижим благодаря применению систем с поперечным разрядом [1 – 3]. В работе [4] пробой лазерным импульсом длительностью 200 *нсек* наблюдался в фокусе сложного резонатора. Малая длительность лазерного импульса позволила наблюдать лишь срыв генерации при возникновении пробоя, объясняемый авторами [4] поглощением в плазме. При существенно большей длительности возможно наблюдение новых эффектов.

Эксперимент выполнен с помощью  $\text{CO}_2$ -лазера с поперечным возбуждением длиной 5 *м*, позволяющего получать в режиме свободной генерации импульсы излучения длительностью 10 *мксек* с энергией 10 *дж*. Применение сложного резонатора с линзой и короткофокусным зеркалом позволяет в области диаметром  $5 \cdot 10^{-2}$  *см* заметно превышать порог пробоя воздуха при атмосферном давлении излучением на волне 10,6 *мк* [3]. Возникающая в фокальной области сложного резонатора плазма исследовалась как с помощью ФЭУ, так и путем покадровой съемки на СФР. Структура импульса генерации исследовалась как в предпробойном состоянии, так и при пробое с помощью приемника Ge – Zn.

При приближении интенсивности лазерного излучения к порогу пробоя в предпробойном состоянии происходит самомодуляция излучения. Общая длительность генерации увеличивается с 10 до 30 *мксек*, импульс преобразуется в практически регулярную серию коротких импульсов (рис. 1). Интенсивность каждого из них нарастает до максимального значения за время около 100 *нсек*, затем происходит столь же резкий срыв генерации.

Срыв генерации происходит из-за самодефокусировки, возникающей в фокальной области резонатора. Самофокусировка обусловлена умень-

шением показателя преломления, вызванного развитием электронной лавины в предпробойном состоянии. Для срыва генерации оказывается достаточной электронная концентрация  $5 \div 10 \cdot 10^{-16} \text{ см}^{-3}$ . При этом потери на поглощение не играют определяющей роли, а увеличение показателя преломления, связанное с возбуждением атомов и молекул относительно мало. Генерация возникает вновь через характерное время релаксации всей системы. Самомодуляция такого типа наблюдалась ранее [5], когда в фокус сложного резонатора помещались прозрачные кристаллы, в которых происходила самофокусировка.



**Рис. 1.** Структура импульса излучения  $\text{CO}_2$ -лазера при предпробойном уровне мощности внутри резонатора. Одно деление —  $10 \text{ мксек}$

Самоуодуляция приводит к росту пиковой интенсивности, что облегчает достижение порога пробоя. По достижении порога в фокальной области происходит пробой. При пробое самоуодуляция излучения имеет хаотический характер, что обусловлено неоднородностью плазменной искры. Светимость плазмы с небольшим запаздыванием следит за изменениями мощности лазерного излучения. На рис. 2 представлены осциллограммы светимости и соответствующие ей выборочные кадры скоростной фоторегистрации.

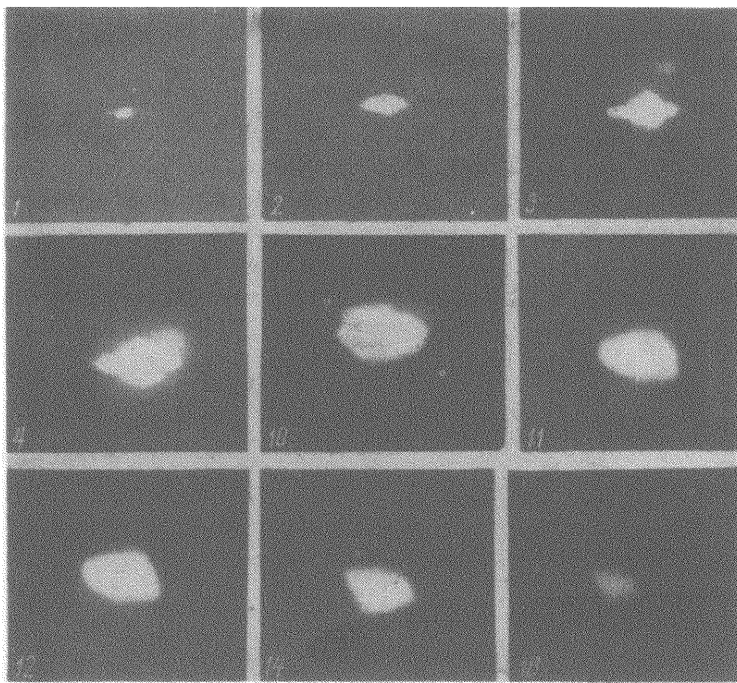


Рис. 2. Выборочные кадры скоростной фоторегистрации и соответствующая им зависимость светимости плазмы, полученная с помощью ФЭУ. Время экспозиции одного кадра – 3,6 мксек

Полное время существования плазмы составляет 80 мксек. Плазма быстро прорастает вдоль оптической оси резонатора и расширяется в радиальном направлении. Пиковая структура импульса излучения сохраняется до тех пор, пока плазменный сгусток не примет стационарную форму, расширенную в части обращенной к активной среде лазера. Эта часть сгустка работает как полупрозрачное зеркало, что и обеспечивает устойчивость генерации лазера. Граница плазмы со стороны активной среды четко очерчена, ее форма определяется распре-

делением интенсивности в поперечном сечении лазерного луча. С противоположной стороны плазма остывает, объем ее уменьшается.

Эффект плазменного зеркала при пробое воздуха внутри резонатора  $\text{CO}_2$ -лазера возникает, когда в результате действия нескольких пиков генерации плотность электронов плазмы возрастает настолько, что коэффициент отражения на частоте излучения  $\text{CO}_2$ -лазера становится больше некоторого значения, определяемого усилением в активной среде лазера. В нашем случае коэффициент усиления превышал 100, поэтому при 10%-м отражении условия самовозбуждения сильно перевыполнены. Такое значение коэффициента отражения достигается уже при концентрации электронов  $7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

Отметим, что контрольный эксперимент, в ходе которого в фокальной области резонатора лазера зажигался дуговой разряд, показал, что генерация в лазере действительно возникает, когда одно из зеркал лазера заменено плазменным сгустком.

Таким образом, пробой воздуха при атмосферном давлении импульсом десятимикронного излучения большой длительности позволил наблюдать такие эффекты, как самомодуляция излучения лазера в предпробойном состоянии и образование плазменного зеркала. Определяющее влияние на природу этих видов самовоздействия оказывает изменение действительной части диэлектрической проницаемости среды под действием излучения мощного  $\text{CO}_2$ -лазера.

Авторы благодарны Е.К.Карловой, Н.А.Карпову за помощь в проведении экспериментов и Ф.В.Бункину за обсуждение.

Физический институт  
им. П.Н.Лебедева  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
30 мая 1972 г.

### Литература

- [1] R.W.Mepherson, M.Gravel. *Opt. Comm.*, 4, 2, 160, 1971.
- [2] M.Gravel, W.J.Robertson, M.J.Alcock, K.Büchl, M.C.Richardson. *Appl. Phys. Lett.*, 18, 3, 75, 1971.
- [3] D.C.Smith. *Appl. Phys. Lett.*, 19, 10, 405, 1971.
- [4] J.Tulip, K.Mares, H.J.Seguin. *Appl. Phys. Lett.*, 19, 10, 433, 1971.
- [5] Е.К.Карлова, Н.В.Карлов, Г.П.Кузьмин. Краткие сообщения по физике, ФИАН СССР, вып. 6, 1972.
- [6] Я.Б.Зельдович, Ю.П.Файзер. *ЖЭТФ*, 47, 1150, 1964.