

*Краткие сообщения по физике № 4 1983*

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИОГЕННОГО ЭИ  
СО-ЛАЗЕРА ПРИ ПЛОТНОСТЯХ АКТИВНОЙ СРЕДЫ ДО  
4 АМАГА

Н. Г. Басов, А. П. Дриманов, И. Б. Ковш, И. А. Леснов,  
В. Н. Пахсов, В. А. Соболев, Б. М. Уриш

УДК 621.373.826.038.823

Показано, что кинетика возбуждения и генерации в ЭИ СО-лазере с охлаждаемой активной средой не претерпевает каких-либо существенных изменений при увеличении плотности рабочей газовой смеси до 4 Амага.

Повышение плотности  $\rho$  рабочей газовой смеси криогенного ( $T_T \leq 100$  К) электрооптического (ЭИ) СО-лазера представляет большой интерес как один из возможных путей дальнейшего увеличения объемного энергоудельного в этом высокоэффективном лазере.

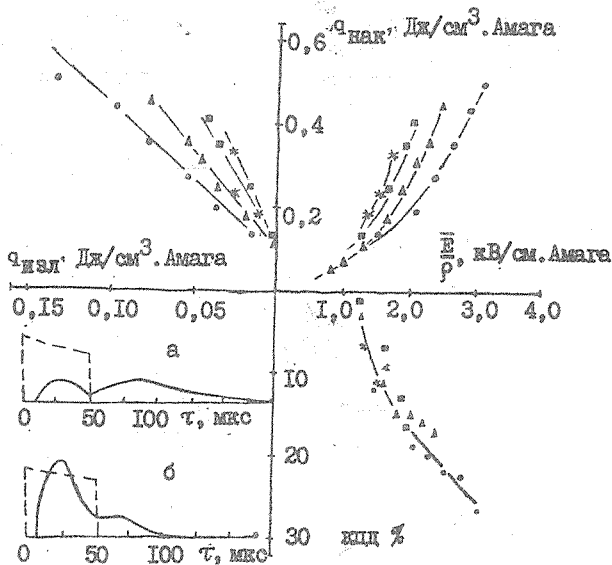
Кроме того, высокая плотность активной среды является необходимым условием для реализации возможности плавной перестройки частоты излучения лазера на колебательно-вращательных переходах. К сожалению, существующая теория ЭИ СО-лазеров пока не позволяет точно рассчитывать их генерационные характеристики, а экспериментальных данных для  $p \geq 0,5$  Амага, по существу, нет. Генерация в криогенном ЭИ СО-лазере при  $p = 1 - 10$  Амага была получена лишь в одной из первых экспериментальных работ по таким лазерам /1/ на установке с очень малым активным объемом ( $\sim 6 \text{ см}^3$ ). Как показали дальнейшие исследования, режим возбуждения, использованный в работе /1/, был далек от оптимального, поэтому полученные в ней результаты не позволили сделать однозначных выводов о возможности и целесообразности повышения плотности активной среды в ЭИ СО-лазере.

В настоящей работе на специально созданной установке экспериментально исследовались характеристики криогенного ЭИ СО-лазера при плотностях активной среды до 4 Амага. Разрядный объем внутри охлаждаемой жидким азотом лазерной камеры составлял  $\sim 1$  л, активная область объемом  $\sim 0,4$  л располагалась в центральной части разрядного промежутка, длина ее 80 см. Температура газа в активной области 90 К. Резонатор образовывали вогнутое сферическое медное зеркало с радиусом кривизны 10 м и диэлектрическое зеркало с коэффициентом отражения 60%, напыленное на плоскую подложку из  $\text{CaF}_2$ . Питание ЭИ разряда осуществлялось от батареи конденсаторов, питание электронной пушки с термокатодом - от генератора Аркадьева-Маркса с отсечкой тока. Плотность тока в электронном пучке на входе в разрядный промежуток поддерживалась на уровне 2-5  $\text{мА/см}^2$ . Исследования проводились для типичных рабочих смесей криогенных ЭИ СО-лазеров /2/  $\text{CO:N}_2 = 1:6$ ,  $\text{CO:He} = 1:6$ ,  $\text{CO:N}_2:\text{He} = 1:6:7$ .

На рис. 1-2 представлены типичные зависимости энергетических характеристик лазера от уровня возбуждения при плотностях 0,5-4 Амага. Измерения показали, что зависимость приведенного удельного энерговклада от приведенной напряженности поля  $E/p$ , плотности тока электронного пучка  $j_e$ , длительности импульса возбуждения  $\tau_{\text{нак}}$  и плотности рабочей газовой смеси  $p$  во всем исследованном диапазоне условий накачки описывается известным выражением /3/

$$q_{\text{нак}} = k(E/\rho)^2 \rho^{1/2} j_e^{1/2} \tau_{\text{нак}}$$

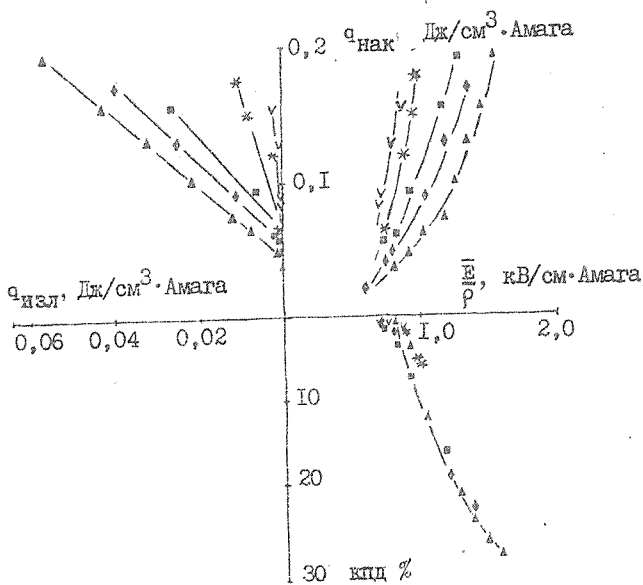
где  $k$  — коэффициент, зависящий от состава газовой смеси и энергии быстрых электронов в пучке. Объемный ЭИ разряд в смесях  $\text{CO}:\text{N}_2:\text{He}$  и при повышенных значениях  $\rho$  сохраняет рекомбинационный характер. Рост объемного энерговклада с плотностью газа ограничивался развитием пробоя, порог которого (по  $E/\rho$ ) несколько снижается с повышением  $\rho$ . Максимальная величина удельной накачки для смесей  $\text{CO}:\text{N}_2$  и  $\text{CO}:\text{N}_2:\text{He}$  составляла в



Р и с. 1. Зависимости удельной приведенной энергии накачки, удельного приведенного энергосъема и КПД лазера на смеси  $\text{CO}:\text{N}_2 = 1:6$  от уровня возбуждения,  $\rho = 0,5$  (○), 1 (△), 2 (■) и 3 Амага (×),  $\tau_{\text{нак}} = 60$  мкс. На врезке — типичные формы импульсов лазерного излучения при  $\rho = 0,5$  Амага (а) и 3 Амага (б). Смесь  $\text{CO}:\text{N}_2:\text{He}$ ,  $\tau_{\text{нак}} = 50$  мкс,  $q_{\text{нак}} = 140$  Дж/л·Амага. Штриховые линии — импульсы разрядного тока

эксперименте  $0,9 - 1,0 \text{ Дж/см}^3$ . Полученные данные пока не позволяют однозначно определить механизм развития пробоя в активной среде ЭИ СО-лазера, однако можно предположить, что существенную роль при этом играет ступенчато-ионизационная неустойчивость, аналогичная рассмотренной в работе /4/, поскольку для условий эксперимента характерно наличие большого количества долгоживущих молекул СО, возбужденных на высокорасположенные колебательные уровни. Косвенным подтверждением этого предположения может служить и отмечавшееся нами ранее /5/ снижение порога пробоя при охлаждении активной среды ЭИ СО-лазера, поскольку при охлаждении увеличивается заселенность и время жизни высокорасположенных колебательных уровней молекулы СО.

Форма импульсов излучения ЭИ СО-лазера в исследованных условиях (рис. 1) была типичной для таких лазеров /2/, продолжи-



Р и с. 2. То же, что на рис. 1 для смеси СО:Не = 1:6.  $\rho = 1$  ( $\Delta$ ), 1,5 ( $\diamond$ ), 2 ( $\blacksquare$ ), 3 ( $\times$ ) и 4 Ампера ( $\nabla$ ),  $\tau_{\text{нак}} = 50 - 110 \text{ мкс}$

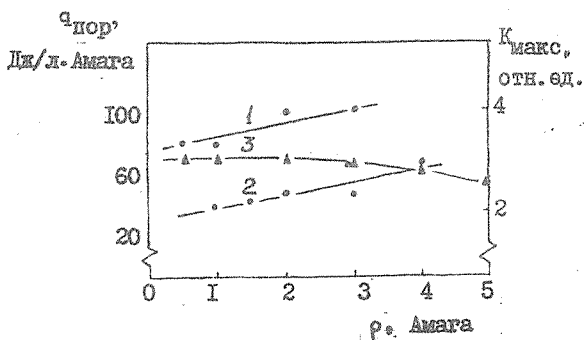
тельность генерации при  $\rho = 1$  Амага и  $\tau_{\text{нак}} = 50$  мкс составляла от 50 мкс для смеси  $\text{CO}:\text{He}$  до 200 мкс для смеси  $\text{CO}:\text{N}_2:\text{He}$ .

Рост плотности газовой смеси до  $\rho = 2 - 3$  Амага приводил к заметному сокращению длительности импульса излучения, увеличению крутизны его переднего фронта и увеличению интенсивности излучения во время импульса разряда. Эти изменения импульса излучения полностью аналогичны наблюдавшимся при повышении мощности возбуждения в охлаждаемом ЭИ  $\text{CO}$ -лазере с плотностью активной среды 0,5 Амага /6/.

Как легко видеть из рис. 1-2, общий вид зависимостей удельного энергосъема и КПД от  $\rho_{\text{нак}}$  качественно не меняется с ростом  $\rho$  до 3-4 Амага. Достигнутый уровень их значений определялся практически только устойчивостью разряда. При фиксированных значениях  $E/\rho$ ,  $\tau_{\text{нак}}$  и  $J_0$  КПД лазера от величины  $\rho$  зависит слабо и энергия излучения с единицы объема активной среды монотонно растет с увеличением  $\rho$  в соответствии с ростом  $\rho_{\text{нак}}$ . Например, для смеси  $\text{CO}:\text{N}_2$  при  $E/\rho = 1,7$  кВ/см Амага величина  $\rho_{\text{изл}}$  увеличилась от 10 Дж/л при  $\rho = 0,5$  Амага до 85 Дж/л при  $\rho = 3$  Амага, а для смеси  $\text{CO}:\text{N}_2:\text{He}$  удельный энергосъем при том же значении  $E/\rho$  вырос от 50 до 150 Дж/л с увеличением  $\rho$  от 1 до 2 Амага. Вообще говоря, с увеличением  $\rho$  должно расти резонансное самопоглощение в активной среде /7/ из-за увеличения перекрытия ударно уширенных линий усиления и поглощения в Р- и В-ветвях соответственно. Расчеты величины максимального (по спектру) коэффициента усиления в чистой окиси углерода при электроионизационном возбуждении, выполненные по методике /8/ с учетом перекрытия линий, показали, что увеличение плотности  $\text{CO}$  от 0,5 до 5 Амага не должно приводить к существенному снижению усиления, если только не меняется приведенная удельная энергия накачки. Эти результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными по порогу генерации (рис. 3). Наблюдавшееся в эксперименте небольшое увеличение пороговой энергии накачки и снижение дифференциальной эффективности ЭИ  $\text{CO}$ -лазера при повышенных плотностях объясняется, по-видимому, тем, что с увеличением  $\rho$  растет удельная мощность накачки и соответственно уменьшается величина  $E/\rho$ , необходимая для достижения заданной величины энерговклада при фиксированных  $\tau_{\text{нак}}$  и  $J_0$ . Например, пороговое

значение  $E/\rho$  при  $\tau_{\text{нак}} = 60$  мкс и  $j_e = 3$  мА/см<sup>2</sup> для смеси Со:Не = 1:6 при увеличении  $\rho$  от 1 до 4 Амага уменьшается от 1 до 0,65 кВ/см.Амага (кривая 2 на рис. 3). Поэтому при одном и том же удельном энергокладе генерация при повышенных значениях  $\rho$  происходила при меньших значениях  $E/\rho$  и соответственно меньшей эффективности колебательного возбуждения молекул СО и N<sub>2</sub> и большей скорости прямого нагрева газа.

Таким образом, проведенные эксперименты и расчеты позволяют сделать вывод, что кинетика возбуждения и генерации в охлаждаемом ЭИ СО-лазере не претерпевает каких-либо существенных изменений при повышении плотности активной среды до 3-4 Амага, зависимость энергетических характеристик лазера от плотности в указанном диапазоне практически полностью определяется соответствующим изменением удельного энергоклада, поэтому объемный энергоъем такого лазера может быть существенно увеличен по сравнению с достигнутым ранее при  $\rho = 0,5$  Амага. Предельный уровень энергоъема определяется в первую очередь устойчивостью объемного ЭИ разряда при больших  $\rho$ . Полученные данные (см. рис. 1) свидетельствуют о возможности реализа-



Р и с. 3. Зависимости пороговой энергии накачки (1-2) и коэффициента усиления (3) от плотности активной среды. Рабочие смеси СО:N<sub>2</sub> = 1:6 (1) и СО:Не = 1:6 (2),  $E/\rho$  1 кВ/см·Амага. Расчет (3) проведен при  $q_{\text{нак}} = 300$  Дж/л·Амага,  $E/\rho = 3$  кВ/см·Амага.

ции в ЭИ СО-лазере на смесях  $\text{CO:N}_2$  и  $\text{CO:N}_2:\text{He}$  энергосъема в несколько сот Джоулей на литр уже при  $\rho = 2 - 3$  Амага и  $E/\rho = 3$  кВ/см·Амага. Развитие пробоя при этом может быть предотвращено, например, за счет использования наряду с импульсным включением электронной пушки также импульсного питания основного разряда.

Поступила в редакцию  
10 ноября 1982 г.

#### Л и т е р а т у р а

1. Н. Г. Басов, А. А. Юнин и др., Письма в ЖТФ, 3, 817 (1976).
2. Н. Г. Басов, И. Б. Ковш и др., Труды ФИАН, 116, 54 (1980).
3. И. Б. Ковш, Кандидатская диссертация, ФИАН, 1975 г.
4. С. А. Голубев, А. С. Ковалев и др., ДАН СССР, 228, 77 (1976).
5. Н. Г. Басов, И. Б. Ковш и др., ЖТФ, 49, 2629 (1979).
6. Н. Г. Басов, В. С. Казакевич и др., ЖТФ, 53, № 9 (1983).
7. W. B. Lacina, C. I. McAllister, Appl. Phys. Lett., 26, 86 (1975).
8. Н. Г. Басов, Б. М. Урин и др., Квантовая электроника, 8, 772 (1982).