

УДК 621.335.826:621.039

ФИЗИКА

В. Ю. БАРАНОВ, Р. К. БЕВОВ, В. С. МЕЖЕВОВ, И. В. НОВОБРАНЦЕВ,
Ю. Б. СМАКОВСКИЙ, А. Н. СТАРОСТИН, А. П. СТРЕЛЬЦОВ

ИМПУЛЬСНЫЙ CO_2 -ЛАЗЕР С КОМБИНИРОВАННЫМ СИЛЬНОТОЧНЫМ РАЗРЯДОМ

(Представлено академиком Е. П. Велиховым 4 VII 1975)

В последнее время широкое распространение получили CO_2 -лазеры высокого давления с ионизацией газа электронными пучками (^{1, 2}). Увеличение плотности тока пучка позволяет увеличить энергию, вкладываемую в колебательные степени свободы электрическим разрядом. С ростом мощности накачки растет энергия светового импульса. Применение сильноточных

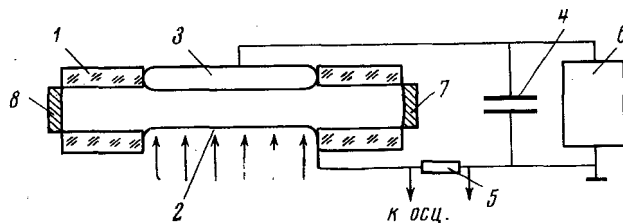


Рис. 1. Схема установки

электронных пучков открывает возможность создания высокой плотности инверсии (коэффициента усиления, близкого к максимальному) за время 10^{-7} сек., что представляет большой интерес для работы CO_2 -усилителя коротких световых импульсов. Настоящая работа продолжает исследования (³) на установке, в которой могут быть реализованы высокие степени ионизации и сильноточный несамостоятельный разряд.

1. Описание установки и результаты измерений. Схема установки приведена на рис. 1. Лазерная камера 1 изготовлена из плексигласа и рассчитана на рабочее давление до 10 ата. Размеры разрядной области составляют $7 \times 7 \times 30$ см³. Электронный пучок вводится через титановую фольгу 2 толщиной 50 мкм, являющуюся катодом лазерной камеры. Дном камеры служит анод 3 из нержавеющей стали. На торцах камеры укреплены юстировочные узлы резонатора; его длина составляет 70 см.

Разрядной емкостью 4 служит двойная симметричная полосковая линия с глицерином в качестве диэлектрика. Волновое сопротивление линии 0,5 ом, при работе на согласованную нагрузку длительность импульса разряда составляет $4 \cdot 10^{-8}$ сек. Подвод с емкости на разряд, в который встроены шунт 5, имеет индуктивность $3 \cdot 10^{-9}$ гн, что обеспечивает быстрое нарастание разрядного тока. Величина емкости $5 \cdot 10^{-8}$ ф, рабочее напряжение до 400 кв.

Разрядная емкость заряжается импульсно от генератора импульсов напряжения 6, собранного на 5 стандартных емкостях ИК100 $\times$ 0,25 мкф. Его емкость «в ударе» $5 \cdot 10^{-8}$ ф; время зарядки $6 \cdot 10^{-7}$ сек. Система син-

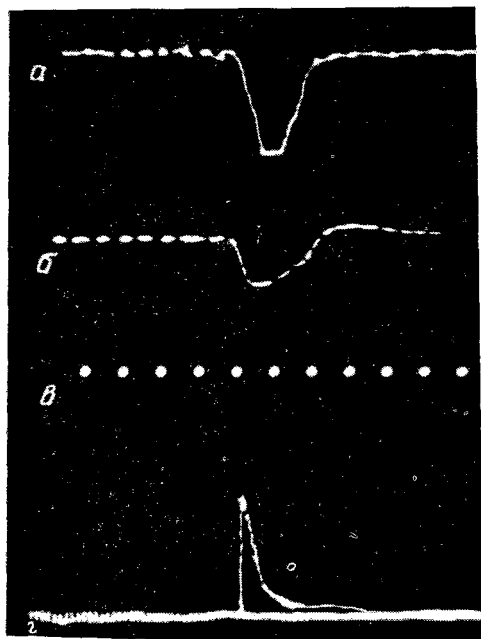


Рис. 2. *a* — импульс тока пучка, *б* — ток разряда, *в* — метки 20 нсек., *г* — импульс генерации

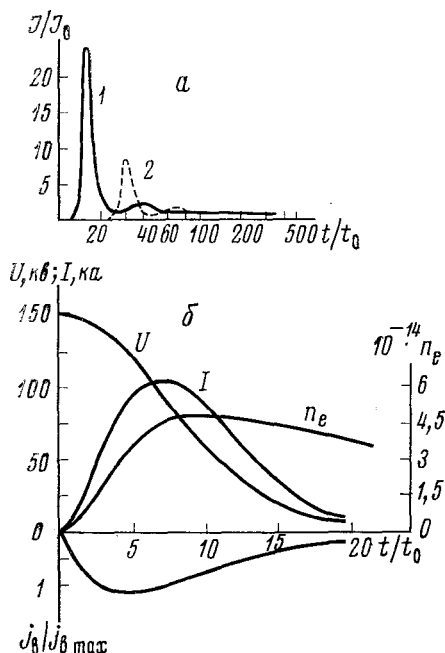


Рис. 3. Расчетные зависимости от времени: *a* — интенсивности света I/I_0 , *б* — напряжения на конденсаторе U , тока разряда I , концентрации электронов n_e и выбранная аппроксимация тока пучка j_b . $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:2:4$, $p = 1,5$ атм., $C = 5 \cdot 10^{-8}$ ф, $L = 10^{-8}$ гн, $U_0 = 150$ кв, $j_{b \text{ max}} = 25$ ка

хронизации обеспечивает срабатывание электронного ускорителя в момент максимума напряжения на емкости с разбросом не более $5 \cdot 10^{-8}$ сек.

Ускоритель создает электронный пучок с током 20–25 ка (рис. 2*a*) и средней энергией электронов 350 кэв. Плотность электронного тока на входе в лазерную камеру составляет 100 а/см^2 .

В резонаторе использовали плоское зеркало с золотым напылением 7 и полупрозрачное 8 из плоскопараллельной германиевой пластинки. Применяли рабочую смесь $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:2:4$, приготовленную в специальном баллоне. Перед напуском смеси лазерная камера откачивалась форвакуумным насосом. Давление смеси в камере составляло 1,5 ата, напряжение зарядки разрядной емкости 150 кв. На рис. 2*б* приведена осциллограмма тока разряда. С поправкой на индуктивное сопротивление пунта импульс тока представляет собой прямоугольник. Его длительность на полувысоте $4 \cdot 10^{-8}$ сек., амплитуда 120 ка, напряжение на разряде равно 80 кв. Таким образом, сопротивление разряда при этих условиях почти согласовано с волновым сопротивлением разрядной емкости (0,5 ом). Энерговклад составляет 300 дж/л.

Измеренная калориметром ТПИ энергия импульса излучения равна 75 дж, следовательно, энергетический выход составляет 50 дж/л. Форму импульса излучения снимали с помощью приемника, описанного в литературе (⁴). Импульс излучения имеет обычный для CO_2 -лазеров высокого давления вид: острый пик с последующим спадом значительно меньшей величины (рис. 2*г*); длительность пика на полувысоте 100 нсек.

Изменение рабочих параметров (состава смеси, давления вместе с напряжением зарядки) уменьшало энергию импульса излучения, так как энерговклад падал из-за рассогласования сопротивлений разряда и разрядной емкости.

2. Теоретическая модель и сравнение с экспе-

риментом. Для расчета характеристик описанного выше CO_2 -лазера использовали систему уравнений колебательной релаксации, предложенную в (5) и дополненную уравнениями для газовой температуры, интенсивности света, уравнениями баланса числа заряженных частиц и электротехническими уравнениями. Интенсивности возбуждения колебаний в модах азота и углекислого газа определяли по расчетным концентрациям электронов и значениям отношения E/N в соответствии с работой (6). Константы скоростей релаксации и их температурные зависимости брали в соответствии с (7-9).

На рис. 3 представлены результаты расчета для условий эксперимента. Кривая (рис. 3а) отвечает случаю быстрого обмена энергией между симметричной (первой) и деформационной (второй) модами колебаний молекулы CO_2 . Учет конечного времени обмена между первой и второй модами приблизительно вдвое увеличил ширину первого пика излучения, соответственно уменьшив его интенсивность (кривая 2 на рис. 3а). Энергия светового импульса уменьшилась от 100 до 80 дж.

Сравнение эксперимента с расчетом показало, что использованная модель достаточно точно предсказывает энергию светового импульса, приближенно описывает его форму и интенсивность, а также ток и напряжение разряда. Кроме того в условиях, отличных от эксперимента, была проведена серия расчетов для различных величин разрядной емкости, начального напряжения и давления смеси ($\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:1:2$). Как следует из расчетов, созданная установка при давлении $p=6$ атм, емкости $C=5 \cdot 10^{-7}$ ф и напряжении $U_0=360$ кв позволит получить энергию импульса света 10^3 дж. Ограничения на полученную на установке энергию связаны с техническими трудностями — прочностью фольги, пробоем разрядного промежутка и т.д.

Для выяснения физических ограничений на характеристики CO_2 -лазера подобного типа были проведены расчеты CO_2 -лазера при постоянных во времени степени ионизации $\xi=n_e/N$ и отношении E/N (отвечающем оптимальным константам скорости возбуждения (6)). Расчеты позволили проследить, как зависит энергия импульса излучения от величины ξ , определяемой плотностью тока пучка электронов. Максимальная энергия светового импульса достигается при $\xi=10^{-5}-10^{-4}$ и в зависимости от состава смеси составляет $\sim 0,2$ дж/(л·атм) для $\text{CO}_2:\text{N}_2=1:1$ и $0,14$ дж/(л·атм) для $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:1:8$. Коэффициент полезного действия в этих условиях составляет 4 и 10% соответственно. К моменту исчезновения импульса света энергия, вложенная в разряд, составляет от 2 до 7 дж/см³. Эти значения энергии существенно превышают предельные величины энерговклада, достигнутые в экспериментах (10). Экспериментальные величины (10) относятся к плотностям тока пучка $0,1$ а/см² с длительностью 10^{-5} сек. Причиной, ограничивающей удельную энергию накачки за такие времена, является перегревно-ионизационная неустойчивость (10-12).

Использование сильноточных электронных пучков, отвечающих более интенсивной накачке, позволяет увеличить вкладываемую энергию, так как из-за конечного времени τ_{VT} релаксации колебательной энергии в поступающую характерное время развития неустойчивости τ_x , определяемое выражением (13, 14)

$$\tau_x \sim \left(\tau_{VT} \frac{W}{\sigma E^2} \right)^{1/2}$$

(W — энтальпия газа, σ — электропроводность), существенно больше, чем $\tau \sim W/(\sigma E^2)$, полученное в работах (11, 12) в предположении мгновенной ($V-T$)-релаксации.

Расчеты показывают, что при больших энерговкладах к моменту окончания светового импульса нагрев газа несуществен. В смесях с большим временем релаксации это происходит потому, что накопившиеся на нижнем лазерном уровне возбуждения не успевают отводиться. При малом вре-

мени релаксации за преждевременное обрезание импульса света ответствен нелинейный механизм распада асимметричного кванта на три деформационных или один симметричный и один деформационный ⁽¹⁵⁾. В режиме усиления коротких импульсов излучения использование сильноточных пучков, как показывают расчеты, позволяет получить коэффициент усиления $0,2 \text{ см}^{-1}$ ($p=1 \text{ атм}$, $n_e=10^{14} \text{ см}^{-3}$, $\text{CO}_2:\text{N}_2=1:1$), что соответствует 6% энергии разряда, сосредоточенной в рабочем колебательном переходе. Расчеты генерации излучения дают, что в режимах с высокой концентрацией электронов лазер работает одновременно на 7 вращательных линиях ($P(12)-P(24)$). В сочетании с высоким коэффициентом усиления это позволяет считать сильноточные пучки перспективными для создания термоядерных лазеров.

Авторы выражают благодарность акад. Е. П. Велихову за поддержку работы.

Институт атомной энергии
им. И. В. Курчатова
Москва

Поступило
4 VII 1975

ЛИТЕРАТУРА

- ¹ O. R. Wood, Proc. IEEE, v. 62, 3, 355 (1974). ² Н. Г. Басов, Э. М. Беленов, УФН, т. 114, 213 (1974). ³ В. Ю. Баранов, Е. П. Велихов и др., Тр. XI Международн. конфер. по явлениям в ионизованных газах, Прага, 1973, стр. 162. ⁴ A. F. Gibson, M. F. Kimmit, A. C. Walker, Appl. Phys. Lett., v. 17, 75 (1970). ⁵ Б. Ф. Гордиев, А. И. Осипов и др., УФН, т. 108, 655 (1972). ⁶ W. L. Nighan, Phys. Rev., v. 2A, 1989 (1970). ⁷ R. L. Taylor, S. Bitterman, Rev. Mod. Phys., v. 41, 26 (1969). ⁸ W. A. Rosser, A. D. Wood, E. T. Gerry, J. Chem. Phys., v. 50, 4996 (1969). ⁹ E. E. Starc, Appl. Phys. Lett., v. 23, 355 (1973). ¹⁰ Н. Г. Басов, В. А. Данилычев и др., Квантовая электроника, № 11, 2529 (1974). ¹¹ Н. Г. Басов, Э. М. Беленов и др., Письма ЖЭТФ, т. 14, 421 (1971). ¹² Е. П. Велихов, И. В. Новобранцев и др., ДАН, т. 205, 1328 (1972). ¹³ R. A. Haas, Phys. Rev., v. A-8, 1017 (1973). ¹⁴ W. L. Nighan, Appl. Phys. Lett., v. 25, 633 (1974). ¹⁵ И. В. Новобранцев, А. Н. Старостин, Журн. прикл. мех. и техн. физ., № 2, 131 (1974); Теплофизика высоких температур, № 1 (1975).