

ЭФФЕКТИВНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ИМПУЛЬСОВ СО₂ ЛАЗЕРА В УСИЛИТЕЛЕ

А. Н. Балабаев, А. А. Лосев, Ю. А. Сатов, И. А. Хрисанов, А. В. Шумиуров

ФГБУ ГНЦ РФ «ИТЭФ» НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва

Актуальность работы определяется широким кругом приложений импульсных СО₂ лазеров в науке и технике, таких как спектроскопия молекул, изучение колебательного возбуждения и релаксации молекул, локация и экологическая диагностика атмосферы, исследования лазерной плазмы и т. п. В ИТЭФ мощные СО₂ лазеры применяются для создания плазмы мишеней из различных элементов и генерации пучков многозарядных ионов, моделирования космической плазмы и астрофизических процессов, металлургических приложений. Целью работы является существенное увеличение выходной мощности импульса излучения, формируемого в генератор-усилительной схеме установки ЗГ-Л100. Применяемая в установке лазерная схема основана на эффекте «компрессии» импульса излучения в процессе взаимодействия с нелинейно-усиливающей средой [1]. Эволюция формы импульса в усилителе в этом случае определяется характером функции $r(t) = I(t)/[dI(t)/dt]$, где $I(t)$ – временная зависимость интенсивности на фронте входного излучения. В схеме ЗГ-Л100 для формирования фронта излучения задающего генератора (ЗГ) применяется газовая ячейка с резонансным поглотителем SF₆.

В работе экспериментально и расчетными методами проведено исследование изменения формы импульса излучения ЗГ при распространении в резонансных средах поглотителя и усилителя в соответствии с оптической схемой на рис. 1. Импульсы излучения стабилизированного генератора I [2] на линии Р(20) 10-мкм полосы длительностью 80 нс на полувысоте и энергией около 150 мДж направлялись в нелинейно-поглощающую ячейку 2 со смесью SF₆ + N₂, где формировался «крутой» участок нарастания на его фронте. Для улучшения пространственной формы лазерного пучка и геометрического согласования с усилителем 5 применяется пространственный фильтр 3 с увеличением $M = 3$. Усиление импульса осуществляется по четырехпроходовой схеме с помощью внеосевого зеркального телескопа 4.

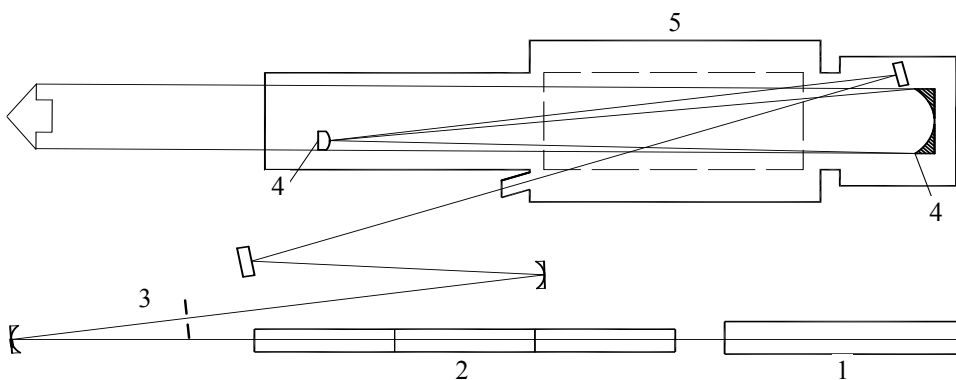


Рис. 1. Оптическая схема ЗГ-Л100: 1 – задающий генератор, 2 – поглощающая ячейка, 3 – пространственный фильтр, 4 – внеосевой телескоп, 5 – усилитель Л-100

Для расчета процесса поглощения в SF₆ использовалась упрощенная двухуровневая квантовая модель, параметрами которой являются сечение поглощения, начальная разность населенностей и время релаксации верхнего уровня, а входное излучение задается экспериментальной осциллограммой. Пучок предполагался плоским и однородным. Для настройки параметров проводились сравнения измеренной и расчетной формы импульса после нелинейной ячейки длиной 90 см.

Сшивка модели с экспериментом проведена при использовании в ячейке смеси $\text{SF}_6 + \text{N}_2$ атмосферного давления при парциальном давлении SF_6 0,36 мбар. В других условиях расчета сечение поглощения и время релаксации среды полагались обратно пропорциональными полному давлению, а начальная разность населенностей – содержанию SF_6 , что качественно учитывало столкновительный характер уширения линии поглощения. На рис. 2 даны измеренные и расчетные формы фронта импульсов в логарифмическом масштабе, а также расчетные формы $r(t)$ до и после ячейки атмосферного давления.

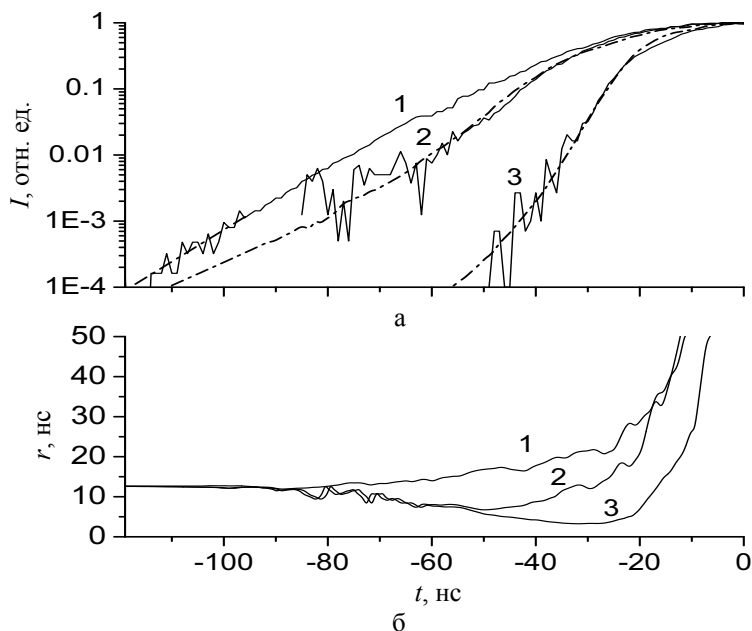


Рис. 2. Нормированные осциллограммы (сплошные линии) и расчетные (штриховые) формы импульсов (а); расчетные зависимости $r(t)$ (б): 1 – 3Г, 2 – после ячейки $p(\text{SF}_6) = 0,12$ мбар, 3 – $p(\text{SF}_6) = 0,36$ мбар

Расчеты и измерения показали, что в практически интересных случаях наибольшая эффективность обострения фронта нарастания импульса 3Г достигается с помощью ячейки длиной около метра и полным давлением близким к атмосферному. На рис. 3 приведены сравнительные результаты измерений и расчетов параметров импульса на выходе такой ячейки как функции парциального давления поглощающей компоненты (длина ячейки 90 см, полное давление равно атмосферному). Учитывая насыщающийся характер изменения минимума r_m функции $r(t)$ и нарастающую роль потерь с ростом давления SF_6 , можно считать оптимальным его содержание около 0,5 мбар. Эти условия соответствуют предельным возможностям односекционной ячейки в качестве обострителя фронта нарастания импульса.

Как показало численное моделирование, существенное увеличение крутизны импульса при прохождении нелинейно-поглощающей среды может достигаться при изменяющихся по мере распространения импульса характеристиках поглощения, а именно, интенсивность насыщения должна уменьшаться, а коэффициент поглощения слабого сигнала нарастать. В простейшем случае такие условия мощно реализовать в секционированной ячейке, части которой напускаются дифференцированно различным давлением и составом смеси $\text{SF}_6 + \text{N}_2$.

На рис. 4,а,б приведены данные для r_m и A , рассчитанные в различных точках по длине поглощающей среды в односекционной (1) и трехсекционной (2) ячейке, состоящей из частей длиной по 30 см.

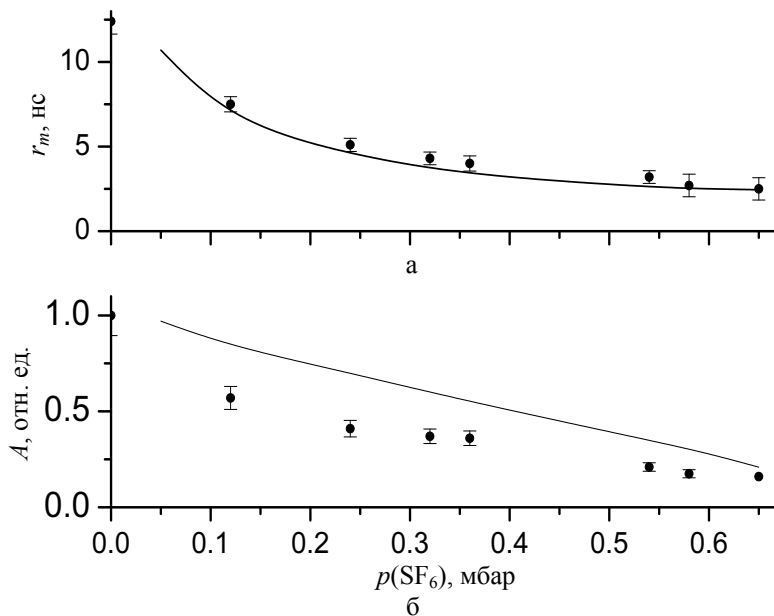


Рис. 3. Расчетные (сплошные линии) и измеренные (точки) зависимости минимума r_m функции $r(t)$ (а) и амплитудного пропуска ячейки A (б) от давления SF_6 в ячейке атмосферного давления длиной 90 см

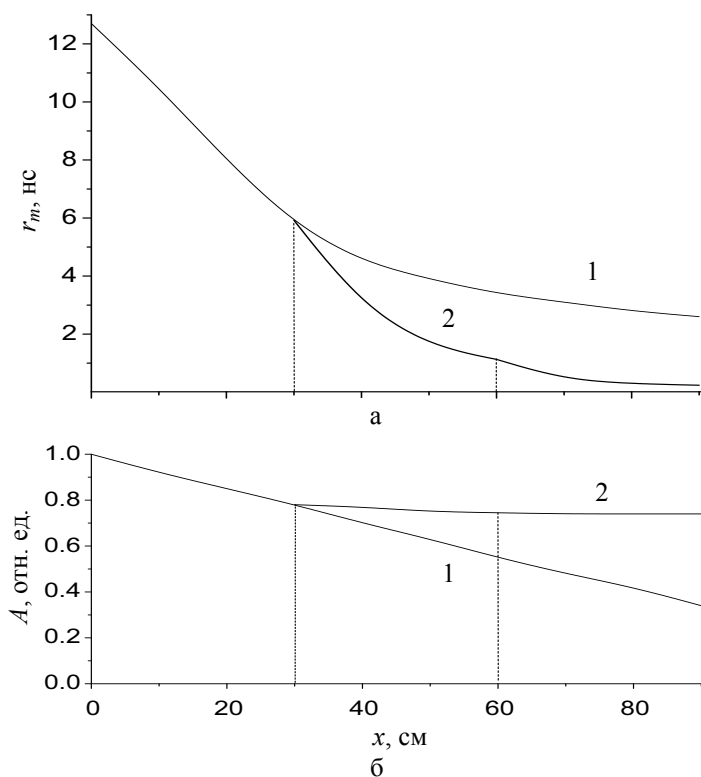


Рис. 4. Расчетные зависимости минимума r_m функции $r(t)$ (а) и амплитудного пропуска ячейки A (б) от длины поглощения в односекционной (1) и трехсекционной (2) с дифференцированным напуском ячейках

Односекционная ячейка и первая секция трехсекционной ячейки «наполнялись» смесью состоящей из 0,54 мбар SF_6 и N_2 атмосферного давления, каждая последующая секция имела давление равное четверти давления в предыдущей секции и вдвое большую концентрацию SF_6 . Видно, что

секционирование поглощающей среды позволяет на порядок увеличить в определенные моменты времени характеристику нарастания излучения и, одновременно, заметно сократить амплитудные потери импульса. Соответствующие формы импульсов, включая импульс задающего генератора, показаны на рис. 5 в шкале плотности мощности на выходе ячейки.

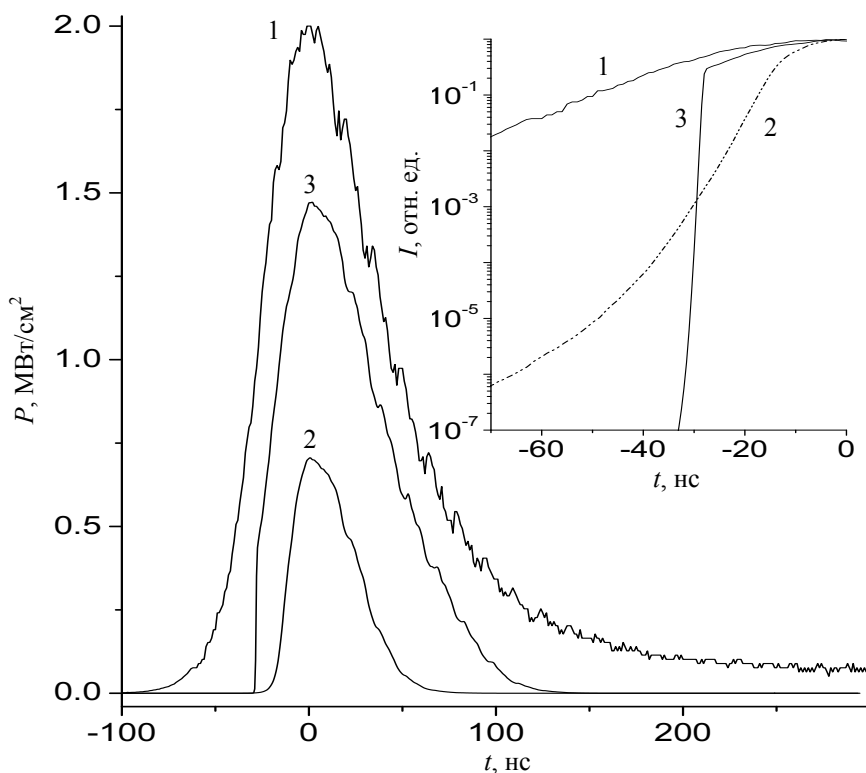


Рис. 5. Форма импульса задающего генератора (1) и расчетные формы импульсов на выходе поглощающей ячейки. 2-односекционная ячейка длиной 90 см атмосферного давления, 3-трехсек-ционная ячейка с дифференцированным напуском

Результаты измерений характеристик пропускания импульса ЗГ (1) для односекционной (2) и трехсекционной ячейки (3) в тех же условиях, как в расчетах, показаны осциллограммами на рис. 6. Хотя динамический диапазон измерений ограничен и не позволяет достаточно подробно изучить интенсивность на фронте импульса, качественно отличия пропускания односекционной и трехсекционной ячейки совпадают с расчетными. Более определенные данные могут быть получены в процессе усиления импульса после оптического затвора. Такие приложения к проведенным в данной работе исследованиям запланированы на лазерной системе ЗГ-Л100 в ИТЭФ.

Расчет усиления импульса на линии Р(20) 10-мкм полосы проводился по модели [3], учитывающей колебательно-вращательную релаксацию. Пространственное распределение предполагалось однородным, его диаметр изменялся в геометрическом приближении в соответствии со схемой на рис. 1. На рис. 7 представлены данные измерения и расчета формы импульса на выходе установки в случае использования односекционной (а, а') и трехсекционной ячейки (б), описанных на рис. 5. Коэффициент усиления слабого сигнала в расчете полагался равным $2,5 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$ в соответствии с измеренной величиной. Учитывая то, что реальная схема имеет искровой затвор, предназначенный для ослабления «хвоста» импульса и защиты от отраженного назад исследуемой мишенью излучения, который не описывался в модели, можно отметить хорошее согласие данных для схемы с односекционной ячейкой. Использование трехсекционной ячейки, как показывает моделирование, дает существенное увеличение мощности импульса на выходе усилителя при неизменном уровне накачки лазерной активной среды.

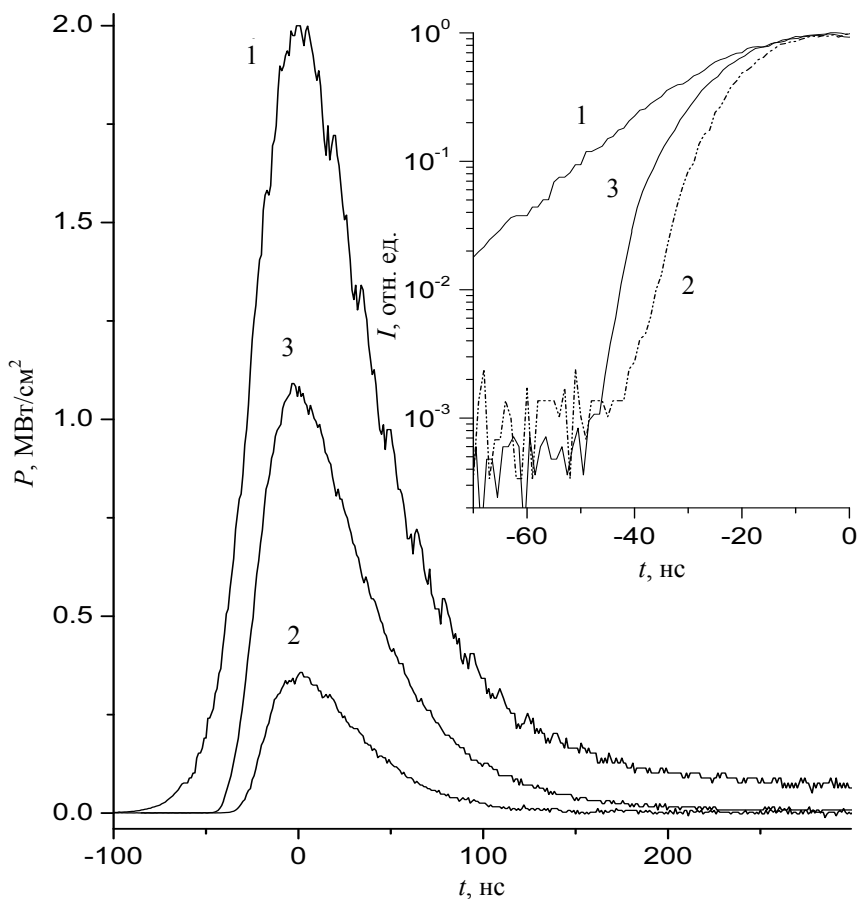


Рис. 6. Измеренные формы импульсов до (1) и после (2, 3) поглощающей ячейки: 2 – односекционная ячейка атмосферного давления с парциальным давлением SF_6 0,65 мбар, 3 – трехсекционная ячейка, напущенная смесью $\text{SF}_6:\text{N}_2$ в соответствии с расчетом на рис. 5

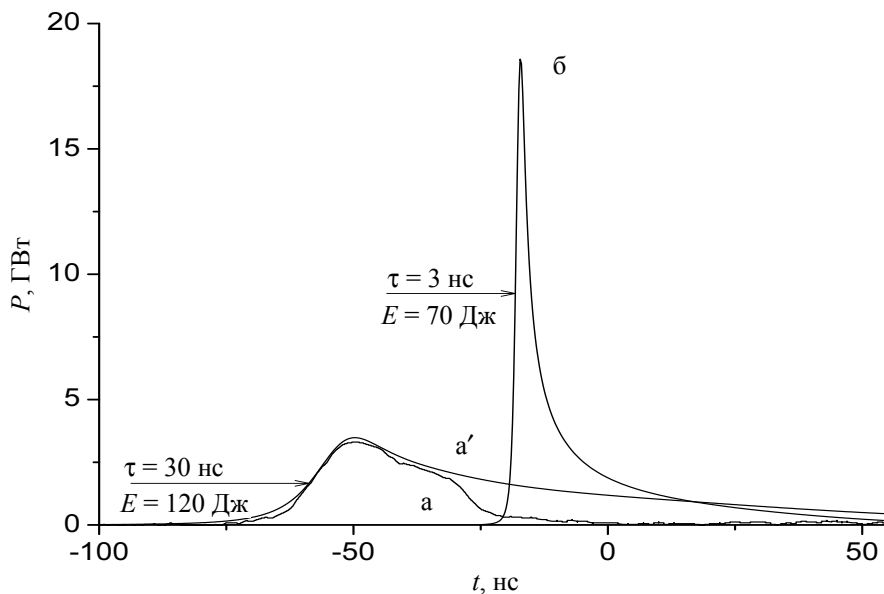


Рис. 7. Измеренная (а) и расчетные (а', б) формы импульсов на выходе установки ЗГ-Л100 для случаев использования односекционной (а') и трехсекционной ячеек (б). Параметры ячеек те же, что на рис. 5

Полученные результаты позволяют надеяться на существенное повышение скорости просветления оптического затвора на основе секционной ячейки по сравнению с традиционно используемым. Прямое подтверждение этому предполагается получить в экспериментах по усилению импульсов в CO_2 лазерном усилителе.

Список литературы

1. Макаров К. Н., Малюта Д. Д., Рерих В. К. и др. Исследование динамики распространения импульсов CO_2 лазера в цепочке нелинейных поглощающих и усиливающих сред. Квант. электр. 2001. Т. 31, № 1. С. 23–29.
2. Сатов Ю. А., Шарков Б. Ю., Алексеев Н. Н. и др. Стабилизированный CO_2 -лазер импульсно-периодического действия для лазерно-плазменного генератора высокозарядных ионов». ПТЭ. 2012, № 3. С. 107–115.
3. Schappert G. T. Rotational relaxation effects in short-pulse CO_2 amplifiers. Appl. Phys. Lett. 1973. Vol. 23, N 6. P. 319–321.
4. Балабаев А. Н., Сатов Ю. А., Хрисанов И. А., Шумшуров А. В. Моделирование процесса формирования лазерного импульса в схеме ЗГ-Л100. Препринт ИТЭФ 4-14. (М. 2014).
5. Балабаев А. Н., Сатов Ю. А., Хрисанов И. А., Шумшуров А. В. Разработка быстрого оптического затвора на основе газовой поглощающей ячейки для излучения CO_2 лазера длиной волны 10,6 мкм. Препринт ИТЭФ 1-16. (М. 2016).