

4. Шорин С. Н. Динамика сгорания твердых топлив во взвешенном состоянии // Изв. ВТИ.— 1935.— № 2.— С. 16—22.
5. Ганюгов И. М., Недоспасов А. В., Побережский Л. П. и др. К расчету электропроводности продуктов сгорания // Письма в ЖТФ.— 1975.— 1, вып. 11.— С. 502—504.
6. Нигматуллин Р. И. Динамика многофазных сред.— М.: Наука, 1987.
7. Стернин Л. Е. Основы газодинамики двухфазных течений в соплах.— М.: Машиностроение, 1974.

г. Томск

Поступила в редакцию 30/V 1990,
после доработки — 16/V 1991

УДК 662.017.224.2

М. Х. Вергасов, А. Ф. Леонов, Н. А. Макаровец, Ю. А. Трофимов

ОПТИЧЕСКАЯ НАКАЧКА ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРА ГАЗОВОЙ КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУЕЙ

Оценены характеристики лазера на стекле, активированном неодимом, с оптической накачкой излучением ионизованного воздуха за фронтом ударной волны, возникающей при движении газовой кумулятивной струи со скоростью 10—12 км/с. Для определения времени механической стойкости конструкции проведена фоторегистрация излучения накачки и определена задержка между излучением накачки и выходом детонации на торец кумулятивного заряда, которая составляла около 150 мкс. Экспериментально определена энергия модельного лазера с подобным принципом накачки (3 Дж) при длительности импульса ~50 мкс.

Давно обоснована принципиальная возможность использования сильных ударных волн (УВ) в газах как высокотемпературного мощного излучателя. Создавая с помощью конденсированных ВВ ударные волны в плотных газах, можно получать большие потоки излучения при малых размерах устройств. Особенно эффективны в этом отношении УВ в тяжелых инертных газах.

Для получения сильных УВ в газах используются заряды ВВ с цилиндрическим кумулятивным каналом. Кумулятивная струя в канале таких зарядов образуется при схлопывании продуктов детонации (газовая кумуляция). В работе [1] показано, что скорость струи u линейно связана со скоростью детонации v соотношением

$$\frac{n^2}{n^2-1} = (x-1)^2 + \frac{n^2}{n^2-1} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{1/n} \left[(\gamma+1) \frac{\rho_0}{\rho_{ВВ}} \right]^{\frac{n-1}{n}} x^{\frac{2n-2}{n}}, \quad (1)$$

где $x = u/v$ — безразмерная скорость струи; γ — эффективный показатель адиабаты ударно-нагретого газа; ρ_0 — начальная плотность газа; n — показатель в уравнении состояния продуктов взрыва $p = A\rho^n$.

Приведенное решение достаточно правильно описывает процессы детонации в заряде ограниченных размеров. После инициирования детонационная волна выходит на дно канала заряда и возбуждает УВ в газе. В результате последующего схлопывания продуктов в канале образуется опережающая детонационный фронт струя. Скорость струи растет, соответственно растет скорость УВ. Пройдя путь ~8—10 диаметров канала, УВ набирает максимальную скорость и сохраняет ее при дальнейшем движении.

Распространение сильной УВ в газе сопровождается интенсивным свечением. Несмотря на кратковременность процесса это свечение всегда наблюдается визуально в виде ослепительно яркой вспышки в момент взрыва. Газ, находившийся при атмосферном давлении и комнатной температуре, испытывает в УВ приблизительно десятикратное сжатие и нагревается в зависимости от амплитуды УВ до температуры $T \approx 10^4$ К. За фронтом УВ до поверхности разрыва воздух при таких условиях полностью диссоциирован и в значительной степени ионизован [3]. Излуча-

тельные свойства такого столба ионизованного газа полностью совпадают со свойствами абсолютно черного тела до скоростей ударной волны 30—40 км/с, к нему применимо понятие оптической плотной плазмы [1].

Высокие яркостные температуры (до 70 000 К) ставят УВ в один ряд с наиболее яркими излучателями. По мощности излучения УВ, как источник света, превосходит широко распространенные импульсные газоразрядные лампы, что позволяет создать твердотельный лазер с новым источником оптической накачки активной среды. Элементы теории процессов накачки твердотельной активной среды и генерации излучения подробно рассмотрены, например, в [2].

Решение системы дифференциальных уравнений, описывающих перенос излучения в геометрическом приближении в активной среде, работающей по четырехуровневой схеме в условиях стационарной генерации, позволяет сделать оценки таких характеристик лазера, как время задержки генерации τ_* , выходной мощности P_Σ , оптимального коэффициента пропускания резонатора r_{2opt} в зависимости от температуры излучателя (излучателем в этом случае является ударно-ионизованный газ с характеристиками абсолютно черного тела):

$$\begin{aligned} r_{2opt} &= \exp \left[-2\beta l \left(\sqrt{\frac{\sigma_{32} n_0}{\beta} \frac{W_{14} \tau_{32}}{W_{14} \tau_{32} + 1}} - 1 \right) \right], \\ P_\Sigma &= \frac{h\nu_{32} n_0 V_0 \ln 1/r_{2opt}}{\tau_{32} (2\beta l - \ln r_{2opt})} \left[W_{14} \tau_{32} - (W_{14} \tau_{32} + 1) \frac{2\beta l - \ln r_{2opt}}{2\sigma_{32} n_0 l} \right], \\ \tau_* &= \frac{1}{W_{14} + \frac{1}{\tau_{32}}} \ln \left[\frac{1}{1 - \frac{\Delta_*}{W_{14} n_0} \left(W_{14} + \frac{1}{\tau_{32}} \right)} \right]. \end{aligned} \quad (2)$$

Характерные и паспортные значения параметров для образцов стекла, активизированного неодимом, размером 10×130 мм марки ГЛС-6, принятые в расчетах: $n_0 = 2 \cdot 10^{20}$ 1/см³ — концентрация ионов Nd³⁺, V_0 — объем активного элемента, l — длина активного элемента, $\tau_{32} = 5 \cdot 10^{-4}$ с — время жизни метастабильного состояния, $\sigma_{32} = 1,64 \times 10^{-21}$ см² — сечение взаимодействия, $\beta = 0,57 \cdot 10^{-3}$ 1/см — коэффициент поглощения материала активного элемента на длине волны $\lambda = 1,06$ мкм, $\gamma_{32} = c/\lambda$ — частота излучения, Δ_* — стационарное значение инверсии населенностей, находится из условия стационарной генерации $\Delta_* = \frac{2\beta l + r_{2opt}}{2\sigma_{32} l}$ и является верхним пределом интегрирования при шахождении τ_* из уравнения: $\frac{d\Delta}{d\tau} = W_{14} (n_0 - \Delta) - \frac{\Delta}{\tau_{32}}$, W_{14} — скорость накачки активной среды, рассматриваемая как параметр, определяемый температурой за фронтом УВ.

В общем случае вероятность возбуждения микрочастицы при воздействии накачки (скорость накачки)

$$W_{14} = \int \frac{v}{h\nu} \sigma_{14}(v) \rho_{14}(v) dv,$$

где $\rho_{14}(v)$ — спектральная плотность энергии абсолютно черного тела; $\kappa_{14}(v) = \kappa(v)/n_0$ — сечение поглощения в единичном частотном интервале; $\kappa(v)$ — величина, характеризующая спектр поглощения стекла, активированного Nd при температуре 300 К (в расчетах принималась по данным [2]). Следовательно,

$$W_{14} = \frac{8\pi}{n_0 c^2} \int_{\nu_1}^{\nu_2} \frac{v^2 \kappa(v)}{\exp\left(\frac{h\nu}{RT}\right) - 1} dv, \quad (3)$$

и скорость накачки существенно зависит от температуры струи T при заданном диапазоне частот спектра поглощения активной среды

$$(\nu_1 = 3,33 \cdot 10^{14} \text{ Гц}, \nu_2 = 7,5 \cdot 10^{14} \text{ Гц}).$$

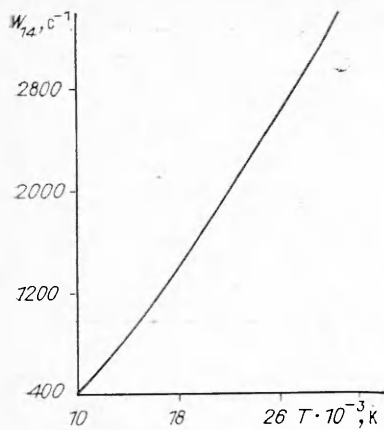


Рис. 1. Зависимость скорости накачки от температуры.

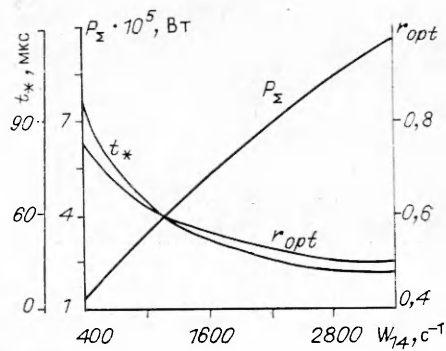


Рис. 2. Задержка генерации t_* , оптимальный коэффициент пропускания r_{opt} и выходная мощность стационарной генерации P_z при r_{opt} для образцов размером 10×130 мм.

По результатам численного интегрирования (3) построены зависимости $W_{14}(T)$. Представленные на рис. 1 данные и соотношения (2) позволяют найти зависимости основных энергетических характеристик лазера (рис. 2). По ним легко определить характеристики лазера по параметрам сильной УВ при газовой кумуляции. Конкретная эффективность светопередачи отражательной системой легко интерпретируется как снижение температуры излучателя или скорости УВ.

Использовались активные элементы из стекла ГЛС-6, на торцы которых напыляли диэлектрические покрытия с отражением 99 % (глухое зеркало) и 75 % (выходное зеркало). Предварительные расчеты показали, что такой активный элемент позволяет при яркостной температуре кумулятивной струи 17 000 К получить выходную мощность стационарной генерации лазерного излучения ~ 136 кВт, со временем задержки генерации ~ 80 мкс.

На рис. 3 представлена схема и основные размеры лазерного устройства с накачкой активного элемента излучением сильной УВ, распространяющейся перед газовой кумулятивной струей. Источник излучения накачки, состоящий из кумулятивного заряда ВВ 2 с детонатором 1, размещенными в камере с ослабленным сечением 3, и пристыкованной к нему стеклянной трубкой 4, и активный элемент 5 расположены внутри прочного корпуса 6. Оси их строго параллельны. Для передачи энергии излучения накачки на активный элемент служит отражатель-рефлектор 7, имеющий замкнутую цилиндрическую поверхность овального сечения, установленный во внутренней полости корпуса. Оптические элементы

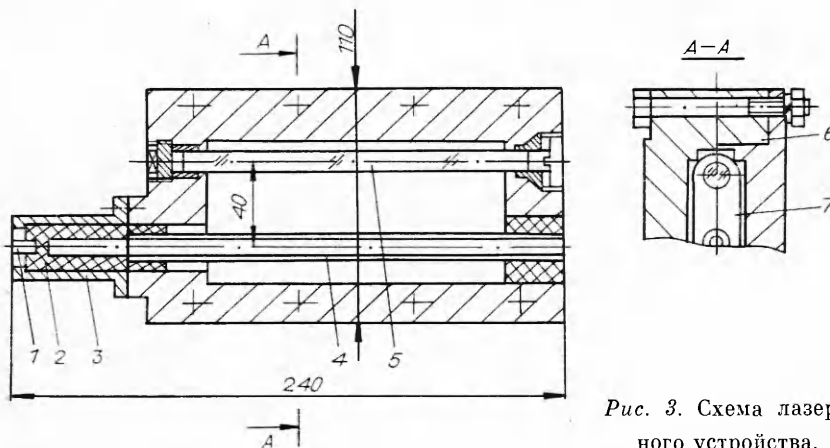


Рис. 3. Схема лазерного устройства.

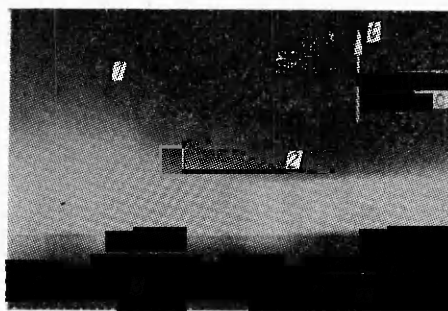


Рис. 4. Фотохронограмма задержки разрушения элемента относительно накачки.

1 — разлет продуктов детонации; 2 — свечение после выхода детонации на торец заряда; 3 — свечение ударно-нагретого воздуха и кумулятивной струи.

резонатора — плоские зеркальные покрытия выполнены на торцах активного элемента. Заряд изготовлен из ТГ 40/60 с наружным диаметром 20, диаметром канала 8 и длиной канала 40 мм.

При снятых крышке и отражателях конструкция позволяла фотографировать процесс свечения ударно-ионизованного газа. Необходимость в таких предварительных экспериментах обусловлена следующим обстоятельством. Если принять, что накачка осуществляется только с поверхности столба ионизованного воздуха, заключенного между УВ и продуктами детонации ВВ (газовой кумулятивной струей), то время задержки генерации, полученное путем оценки, оказывается в 2—3 раза больше времени прохождения ионизованного газа по стеклянной трубке.

Целью экспериментов по фотографической регистрации газовой кумулятивной струи было нахождение ее параметров, так как для использованных габаритов заряда и типа ВВ они хорошо экспериментально изучены [1]. Для приведенной конструкции более важно являлось определение времени задержки между существованием излучения в струе и выходом детонации на торец заряда ВВ, после чего по корпусу распространяется УВ, приводящая к разрушению активного элемента. Поэтому фоторегистрация проводилась на медленно движущуюся пленку со скоростью до 25 м/с со щелью, установленной параллельно оси трубки. Вид фотохронограммы представлен на рис. 4. Время между свечением трубки и выходом детонации на торец заряда составило ~ 150 мкс, что позволяло рассчитывать на достижение лазером стационарной генерации.

Испытания лазера дали следующие энергетические характеристики: длительность импульса генерации — (50 ± 5) мкс, энергия импульса генерации — $(3 \pm 0,2)$ Дж. Снижение выходной мощности от начала импульса до момента резкого прерывания генерации связано, видимо, с разрушением активного элемента и составило 40 дБ.

В результате проведенных экспериментов показана практическая применимость излучения сильных УВ, возникающих при газовой кумуляции, для оптической накачки твердотельных лазеров. Время накачки оказывается существенно большим, чем время прохождения ударно-ионизованного воздуха вдоль активного элемента. Характерное снижение выходной мощности за время импульса связано с переходом от накачки излучением оптически плотной плазмы к накачке низкотемпературным излучением продуктов детонации (видимо, сажистых частиц) после прохождения поверхности разрыва вдоль активного элемента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цикулин М. А., Попов Е. Г. Излучательные свойства ударных волн в газах.— М.: Наука, 1977.— 172 с.
2. Микаэлян А. Л., Тер-Микаэлян М. Л., Турков Ю. Г. Оптические генераторы на твердом теле.— М.: Сов. радио, 1967.— 383 с.
3. Баум Ф. А., Станюкович К. П., Шехтер Б. И. Физика взрыва.— М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1959.— 799 с.

г. Ленинград

Поступила в редакцию 26/II 1991