

Модель жидкостного лазера с ядерно-оптической накачкой

А.А.Серёгин, П.П.Дьяченко, Е.А.Серёгина

Построена модель жидкостного лазера с ядерно-оптической накачкой, позволяющая анализировать его характеристики при различных параметрах установки и импульса накачки, составах сред конвертора и активных элементов. Выполнены расчеты генерационных характеристик жидкостного лазера, использующего в качестве среды конвертора тяжёловодный раствор $^{245}\text{Ст}$, а в качестве активного элемента – неодимсодержащую среду на основе оксихлорида фосфора (хлористый фосфорил). Из проведенных расчетов следует, что лазерный эффект с этими средами может быть получен при накачке нейтронами реактора БАРС-6.

Ключевые слова: жидкостной лазер, ядерно-оптическая накачка, активные среды.

1. Введение

Для осуществления инерциального термоядерного синтеза, промышленного лазерного разделения изотопов и других крупных проектов требуются мощные и в то же время дешевые источники лазерного излучения. Такими источниками вполне могут стать импульсные лазеры и оптические квантовые усилители с ядерной накачкой. В настоящее время разрабатываются два вида подобных лазеров, которые отличаются по способу накачки: лазеры с прямой ядерной накачкой и лазеры с ядерно-оптической накачкой (ЯОН). В случае прямой ядерной накачки лазерно-активная среда (ЛАС) возбуждается непосредственно осколками деления, при этом область накачки и область снятия инверсии совмещены. В случае ЯОН – наоборот, эти области разделены. Область ядерной накачки (конвертор) играет роль «ядерной лампы», которая преобразует энергию деления ядер в световую, и этим светом накачивается активный элемент обычного лазера. Ожидается, что КПД лазеров с прямой ядерной накачкой будет выше КПД лазеров с ЯОН. Однако последние будут иметь более низкую тепловую нагрузку на ЛАС, что позволит существенно уменьшить нежелательные явления (возникновение перегрева среды, активных потерь, термооптических линз и клиньев).

В первых моделях лазеров с ЯОН [1, 2] в качестве среды конвертора предлагалось использовать благородные газы или смеси газов ХеF и HgBr, которые накачивались осколками деления или продуктами ядерных реакций, а в качестве ЛАС – стекла, активированные ионами неодима или хрома. В работе [3] была получена генерация при накачке активного элемента на основе неодимового стекла радиолюминесцентным свечением кристалла CsJ(Tl), облучаемого в активной зоне реактора. Разрабатывается и

мощный лазер с ЯОН, в котором неодимовое стекло накачивается радиолюминесцентным свечением смеси ксенона с другими благородными газами под действием осколков деления [4].

В настоящей работе рассматривается модель жидкостного лазера с ЯОН, в котором и среда конвертора, и ЛАС активного элемента – жидкие, что дает возможность произвести гомогенную ядерную накачку с высокой эффективностью, увеличивает мощность лазера и позволяет осуществить прокачную систему охлаждения. Следует подчеркнуть, что других проектов создания жидкостной лампы в настоящее время не существует.

2. Лазер с ядерно-оптической накачкой

Простейшая схема лазера с ЯОН представлена на рис.1. Ее основными составляющими являются конвертор и активные элементы. Конвертор представляет собой зеркально отражающий цилиндр, заполненный хорошо люминесцирующим под действием осколков деления веществом, внутрь которого вставлены активные элементы. Люминесцирующее вещество конвертора должно содержать в своем составе изотопы, хорошо делящиеся медленными нейтронами (^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu и т. д.), и иметь линии люминесценции, совпадающие с линиями поглощения ЛАС активного элемента. Активные элементы представляют собой расположенные вдоль оси конвертора цилиндрические кюветы с ЛАС, которая содержит ионы редкоземельных элементов. На торцах кювет размещаются зеркала резонатора.

Лазер с ЯОН работает следующим образом. Во время импульса ядерного реактора поток быстрых нейтронов падает на конвертор, который окружен слоем замедлителя, замедляющего нейтроны до тепловых энергий. Поток тепловых нейтронов, проникая внутрь конвертора, вызывает деление ядер в заполняющем его веществе. Образовавшиеся осколки деления, двигаясь в веществе конвертора, ионизуют и возбуждают его молекулы, атомы и ионы, которые, переходя в основное состояние, люминесцируют. Радиолюминесценция, в свою очередь, создает инверсию в ЛАС. Очевидно, что осуществление

А.А.Серёгин, П.П.Дьяченко, Е.А.Серёгина. ФГУП «ГНЦ РФ – Физико-энергетический институт им. А.И.Лейпунского», Россия, 249033 Обнинск, Калужская обл., пл. Бондаренко, 1; e-mail: seregina@ippe.obninsk.ru

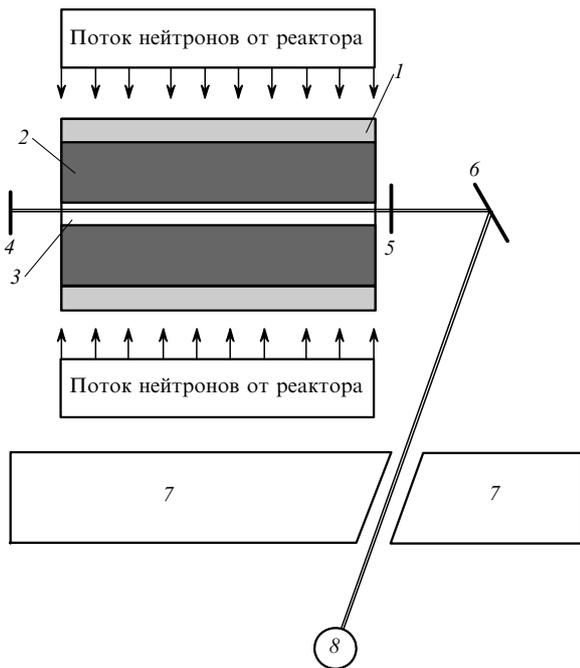


Рис.1. Схема лазера с ядерно-оптической накачкой: 1 – замедлитель нейтронов; 2 – конвертор; 3 – активный элемент; 4 – глухое зеркало; 5 – полупрозрачное зеркало; 6 – поворотное зеркало; 7 – биологическая защита; 8 – приемник лазерного излучения.

ЯОН накладывает значительные ограничения на выбор делящихся элементов и ЛАС. Проведенный нами анализ литературных источников показал, что в настоящее время ЯОН можно реализовать в двух вариантах, один из которых будет рассмотрен ниже.

В этом варианте люминесцентным веществом конвертора служит водный раствор солей ^{245}Cm , а в активные элементы залита лазерно-активная жидкость $\text{POCl}_3\text{-SnCl}_4\text{:Nd}^{3+}$. Сечение деления ^{245}Cm тепловыми нейтронами равняется 2145 ± 60 барн, что в 3,7 раза больше, чем у ядра ^{235}U . При делении ядра ^{245}Cm образуются два осколка со средней суммарной кинетической энергией 184 МэВ и 3,8 нейтрона со средней кинетической энергией 2,25 МэВ.

Сильная линия поглощения электромагнитного излучения ионов Cm находится в районе 0,352 мкм и имеет ширину 0,08 мкм. Радиолюминесцентные свойства ионов Cm исследовались в Институте физической химии РАН [5]. В частности, была изучена объемная радиолюминесценция водного раствора ^{244}Cm , который является мощным источником α -частиц. Согласно [5] полоса люминесценции ионов ^{244}Cm при их возбуждении собственными α -частицами совпадает со спектром фотолюминесценции Cm^{3+} , простирается от $\lambda = 0,56$ до 0,62 мкм (рис.2), и выход люминесценции растет пропорционально концентрации ионов кюрия. На рис.2 представлен также коэффициент поглощения ионов Nd в растворе $\text{POCl}_3\text{-SnCl}_4\text{:Nd}^{3+}$. Видно, что люминесценция Cm интенсивно поглощается ионами неодима активного элемента ($\text{POCl}_3\text{-SnCl}_4\text{:Nd}^{3+}$). В результате в ЛАС накачивается верхний лазерный уровень $^4F_{3/2}$ иона Nd^{3+} и появляется возможность получения генерации с $\lambda = 1,052$ мкм. При этом мы предполагаем, что механизмы возбуждения среды α -частицами и осколками деления ядер Cm тождественны.

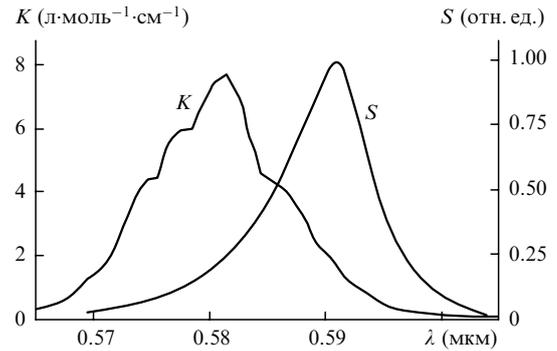


Рис.2. Спектр люминесценции S водного раствора солей ^{244}Cm под действием собственных α -частиц [6] и коэффициент поглощения K ионов неодима в растворе $\text{POCl}_3\text{-SnCl}_4\text{:Nd}^{3+}$.

3. Оценки возможности наблюдения генерации жидкостного лазера с ядерно-оптической накачкой на импульсном реакторе БАРС-6

Выше обсуждались возможности создания жидкостного лазера с ЯОН. Однако пока не ясно, насколько его реально осуществить и можно ли его запустить, например на импульсном реакторе. Проведем расчет типичного эксперимента по обнаружению генерации на импульсном реакторе БАРС-6. Схема предполагаемого эксперимента приведена на рис.3. Так как конвертор с люминесцентным веществом окружен полиэтиленом, то быстрые нейтроны от реактора замедляются почти до тепловых энергий. Под действием этих нейтронов ядра ^{245}Cm делятся на два осколка. Ранее [7] среднюю плотность делений в урансодержащем растворе, окруженном поли-

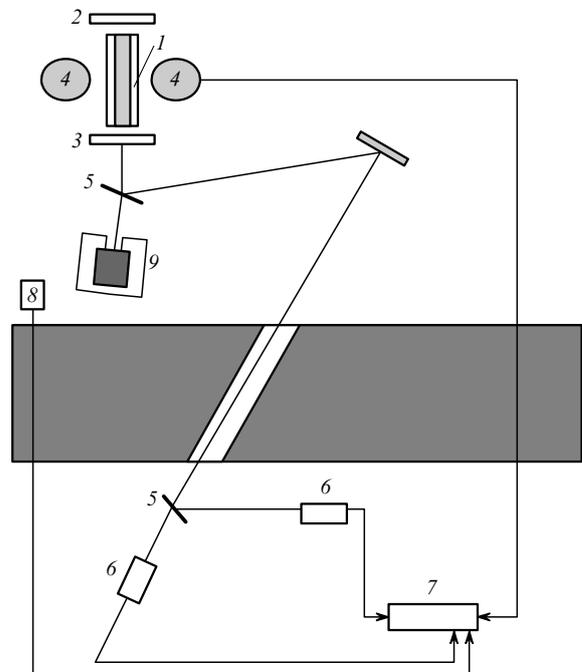


Рис.3. Схема эксперимента на реакторе БАРС-6: 1 – конвертор и активный элемент в полиэтиленовом замедлителе нейтронов; 2 – глухое зеркало; 3 – выходное зеркало; 4 – активные зоны реактора; 5 – светоделительные пластины; 6 – фотодиоды ФД-24; 7 – плата многоканального анализатора L-1211; 8 – детектор нейтронов; 9 – измеритель мощности ИМО-2Н.

этиленовым замедлителем, рассчитывали по формуле из работы [8] и получали хорошее согласие с экспериментом. Воспользуемся этой же формулой и для расчета средней удельной мощности делений в конверторе с водным раствором Cm

$$N_f(t) = \frac{\sigma_f C_{Cm} n \kappa}{2\tau_m} \exp\left(\frac{\tau_r^2}{4\pi\tau_m^2} - \frac{t}{\tau_m}\right) \times \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{\pi}t}{\tau_m} - \frac{\tau_r}{2\tau_m\sqrt{\pi}}\right)\right], \quad (1)$$

где $\sigma_f = 2145$ барн – сечение деления ядер ^{245}Sm тепловыми нейтронами; $C_{Cm} = 5 \times 10^{19}$ $см^{-3}$ – концентрация ядер ^{245}Sm в конверторе; $n = 2 \times 10^{17}$ – число делений в двух зонах реактора; $\kappa \approx 1.1915 \times 10^{-4}$ $см^{-2}$ – геометрический фактор (подгоночный параметр); $\tau_r \approx 80$ мкс – длительность нейтронного импульса в активной зоне реактора; $\tau_m \approx 100 - 140$ мкс – длительность нейтронного импульса в конверторе после замедления; $\operatorname{erf}(x)$ – функция ошибок. Зная выделяемую в одном акте деления ядра ^{245}Sm энергию $\varepsilon_f = 184$ МэВ, можно найти зависимость выделенной удельной энергии от времени $E_f = \varepsilon_f N_f(t)$.

Как упоминалось выше, для водного раствора ^{244}Sm благодаря [5] не только известен выход фотонов радиоломинесценции G_α на 100 эВ поглощенной энергии α -частиц, но и показано, что в D_2O он возрастает в 16 раз. К сожалению, пока не известен выход фотонов радиоломинесценции G_f в водном растворе солей ^{245}Sm под действием осколков деления, и в расчете будем предполагать, что он в 2 раза меньше, чем выход фотонов радиоломинесценции под действием α -частиц. Это вполне реальная величина, т. к. выходы фотонов радиоломинесценции ионов Nd^{3+} под действием осколков деления и α -частиц в растворе $POCl_3 - SnCl_4 : Nd^{3+}$ различаются менее чем на 30 %.

В жидкой ЛАС на основе $POCl_3 - SnCl_4 : Nd^{3+}$ активными являются ионы неодима, на которых происходит генерация по четырехуровневой схеме [9]. Так как время жизни в состояниях 1 и 3 мало по сравнению со временем жизни в состоянии 2 ($\tau_1 \approx \tau_3 \approx 10^{-9}$ с, а $\tau_2 \approx 10^{-4}$ с), то для описания лазерной генерации можно ограничиться следующими упрощенными скоростными уравнениями [9]:

$$\begin{aligned} \frac{dN_2}{dt} &= W(t)N_g - BqN_2 - \frac{N_2}{\tau_2}, \\ \frac{dq}{dt} &= \left(vBN_2 - \frac{1}{\tau_{ph}}\right)q, \\ N_{Nd} &= N_g + N_2, \\ N_1 &= N_3 = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

с начальными условиями

$$N_2(0) = 0, \quad q(0) = q_0,$$

где q_0 – малое число фотонов в резонаторе, необходимое для возникновения генерации; N_1, N_2, N_3 – концентрации ионов неодима в возбужденных состояниях 1, 2 и 3; N_g – концентрация ионов неодима в основном состоянии; N_{Nd} – концентрация ионов неодима в лазерно-активной жидкости; $W(t)$ – скорость накачки; B – коэффициент Эйнштейна; q – число фотонов в резонаторе; τ_2 – время жизни

в возбужденном состоянии 2; v – объем, занимаемый модой в активной среде; τ_{ph} – среднее время жизни фотона в резонаторе.

Аналитического решения этой системы не существует, и поэтому она решалась численно методом Гира, реализованным в подпрограмме DGEAR из библиотеки IMSL.

4. Результаты расчетов и их анализ

Решение системы уравнений (2) находили для указанной выше ЛАС при типичных ее параметрах: концентрации атомов неодима 1.2×10^{20} $см^{-3}$, сечения вынужденного перехода из состояния $^4F_{3/2}$ в $^4I_{11/2}$ $\sigma = 8 \times 10^{-20}$ $см^2$, $\tau_2 = 250$ мкс, коэффициенты внутренних потерь среды $\mu = 0.003$ $см^{-1}$. Полагалось, что длина конвертора равна 30 см, его внутренний радиус – 3.3 см, концентрация кюрия в конверторе – 5×10^{19} $см^{-3}$, длина активного элемента с лазерно-активной жидкостью – 30 см, его внутренний радиус – 0.5 см и внешний радиус – 0.8 см. Длина резонатора $L = 50$ см, одно зеркало полагалось глухим, коэффициент пропускания другого зеркала оптимизировался, коэффициент преломления среды $k = 1.46$. Длительность импульса быстрых нейтронов реактора составляла 80 мкс, а длительность импульса тепловых нейтронов – 120 мкс, удельное энерговыделение в конверторе в расчетах варьировалось.

Скорость накачки ионов неодима активного элемента определялась следующим выражением:

$$W(t) = \frac{\delta G_f \varepsilon_f N_f(t) V_c}{100 V_a N_g}, \quad (3)$$

где δ – эффективность накачки ионов неодима активного элемента; $G_f = 3.3 \times 10^{-2}$ квант./100 эВ; $\varepsilon_f = 184$ МэВ; V_c – объем конвертора; V_a – объем активного элемента. Для оценки эффективности накачки δ найдем потери энергии излучения кюрия при прохождении им слоя раствора $POCl_3 - SnCl_4 : Nd^{3+}$, толщина которого равна внутреннему радиусу трубки. Оказалось, что данный раствор поглощает 18 % излучения Sm . Поэтому, если положить, что КПД осветителя на коаксиальной «ядерной» лампе такой же, как и КПД осветителя на аналогичной ксеноновой лампе, т. е. равен 0.5, то в расчетах можно принять $\delta = 0.09$.

Система уравнений (2) с указанными выше параметрами решалась численно, и при этом решения анализировались в зависимости от значений различных параметров. Наиболее интересными представляются временные зависимости мощности

$$P(t) = chvq(t) \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2L'}, \quad (4)$$

и энергии

$$E = \int P(t) dt \quad (5)$$

лазерного излучения от энергоклада. В этих соотношениях c – скорость света; $hv = 1.17$ эВ – энергия фотона лазерного излучения иона неодима; γ_1 и γ_2 – логарифмические потери на зеркалах; $L' = L + (k - 1)d$; L – длина резонатора; d – длина активной среды.

Из расчетов следует, что при выбранных размерах конструкции конвертора и кюветы и для указанных выше

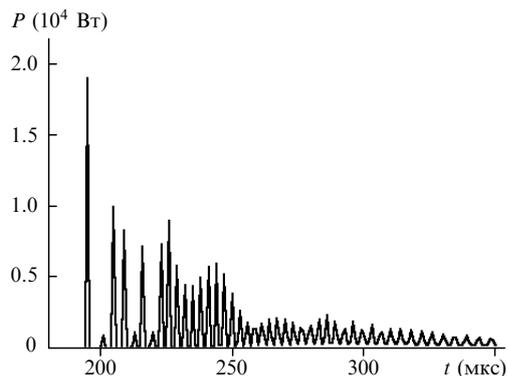


Рис.4. Временная зависимость выходной мощности излучения при накачке экспериментального лазера нейтронами от реактора БАРС-6 с удельной энергией накачки 15 Дж/см^3 (результаты численного моделирования).

параметров сред конвертора и активного элемента при накачке нейтронами от реактора БАРС-6 порог генерации равняется 9 Дж/см^3 . Результаты расчетов временной зависимости мощности выходного излучения при удельной энергии накачки $E_p = 15 \text{ Дж/см}^3$ приведены на рис.4. Полная энергия излучения оказалась равной $E_g = 0.2 \text{ Дж}$. При увеличении энергии накачки растет и выходная энергия. Так, при $E_p = 20$ и 25 Дж/см^3 энергия генерации будет равна 0.28 и 0.37 Дж соответственно.

Таким образом, проведенные расчеты указывают на возможность получения лазерной генерации с ядерно-оптической накачкой на указанных выше жидких средах при облучении на импульсном реакторе БАРС-6.

5. Заключение

Итак, в настоящей работе, во-первых, создана модель жидкостного лазера с ЯОН, в рамках которой можно

рассчитывать и анализировать его характеристики в зависимости от параметров ЛАС и среды конвертора, параметров установки и импульса накачки.

Во-вторых, предложены конкретные среды для конвертора (тяжеловодный раствор соли ^{245}Cm) и активного элемента ($\text{POCl}_3 - \text{SnCl}_4 : \text{Nd}^{3+}$).

В-третьих, из выполненных расчетов следует, что на экспериментальном жидкостном лазере с тяжеловодным раствором ^{245}Cm и с неодимсодержащей ЛАС на основе оксихлорида фосфора в качестве активного элемента может быть получена лазерная генерация при накачке на импульсном реакторе БАРС-6.

Авторы выражают благодарность А.Б.Юсову за обсуждение данной работы и полезные замечания.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 01-02-16551).

1. Woody F.P. *Nuclear-driven fluorescence pumped solid-state lasers. A dissertation presented to faculty of the graduate school university of Missouri-Columbia* (1991).
2. Prelas M.A. *Труды конф. «Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой» (ЛЯН-92)* (Обнинск, 1992, т. 1, с. 75).
3. Воинов А.М., Довбыш Л.Е., Кривоносов В.Н. и др. *Труды конф. «Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой» (ЛЯН-92)* (Обнинск, 1992, т. 3, с. 224).
4. Voinov A.M., Dovbysh L.E., Krivonosov V.N., et al. *Proc. VIII Intern. Conf. Emerging Nucl. Energy Syst. (ICENES'96)* (Obninsk, 1997, v. 1, p. 310).
5. Юсов А.Б., Перминов В.П., Крот Н.Н., Казаков В.П. *Радиохимия*, **28**, 403 (1986).
6. Beitz J.V., Hessler J.P. *Nucl. Techn.*, **51**, 169 (1980).
7. Serёgina E.A., Dobrovolskiy A.F., Dyachenko P.P., et al. *Proc. IX Intern. Conf. Emerging Nucl. Energy Syst. (ICENES'98)* (Tel-Aviv, 1998, p. 824).
8. Kononov V.N., Bokhovko M.V., Dyachenko P.P., et al. *Proc. VIII Intern. Conf. Emerging Nucl. Energy Syst. (ICENES'96)* (Obninsk, 1997, v. 1, p. 336).
9. Звелто О. *Физика лазеров* (М.: Мир, 1979).