

# НАКАЧКА ЛАЗЕРОВ НА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ ОПТИЧЕСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ЯДЕРНОЙ ПЛАЗМЫ И ИЗЛУЧЕНИЕМ РАДИОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КРИСТАЛЛОФОСФОРА

## PUMPING OF CONDENSED MATTER LASER BY OPTICAL RADIATION OF NUCLEAR PLASMA RADIATION AND PHOSPHORUS CRYSTAL RADIOLUMINESCENCE

*В. В. Горбунов, Л. Е. Довбыш, С. П. Мельников, А. В. Синуцын  
V. V. Gorbunov, L. E. Dovbysh, S. P. Melnikov, A. V. Sinitsyn*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Саров Нижегородской обл.

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific-Research Institute of Experimental Physics

*Представлен обзор исследований лазеров с ядерной накачкой на конденсированных средах, возбуждение которых осуществляется оптическим излучением ядерно-оптических преобразователей*

*The review on researches of nuclear-pumped lasers excited by the optical radiation from nuclear-optical converter is presented*

### Введение

Хотя наибольшие успехи в поиске лазеров с ядерной накачкой (ЛЯН) достигнуты для газовых сред высокого давления, в ряде лабораторий также проводились исследования по накачке ядерными излучениями лазеров на конденсированных средах и изучение возможности создания на их основе мощных ядерно-лазерных установок [1, 2]. Объясняется это тем, что лазеры на конденсированных средах имеют существенно большую энергоёмкость по сравнению с газовыми лазерами. Например, для неодимового лазера в режиме свободной генерации удельные энергоёмкости могут достигать  $\sim 5$  Дж/см<sup>3</sup>.

Для возбуждения ЛЯН на конденсированных средах рассматривались два варианта накачки:

1) непосредственная (прямая) накачка ядерными излучениями, когда ядерные реакции происходят внутри объема лазерной среды;

2) накачка оптическим излучением от промежуточных устройств – ядерно-оптических преобразователей или конверторов (ядерно-возбуждаемая плазма, твердотельные и жидкие сцинтилляционные среды). В первом случае область накачки и область, в которой создается инверсная населенность, совпадают, во втором случае они пространственно разделены.

Лазерную генерацию в случае прямой ядерной накачки конденсированных сред до настоящего времени получить не удалось (обзор исследований приведен в монографиях [1,2]). Причины отсутствия генерации в условиях ядерной накачки вызваны рядом принципиальных и технических трудностей. Одна из них связана с неселективным характером ядерного возбуждения и низкой эффективностью заселения верхних лазерных уровней. Другая трудность связана с изменением свойств конденсированной среды и возрастанием оптических потерь под действием ядерных излучений: образование центров окраски в твердотельных лазерах [3], радиолиз [4] и образование парогазовых пузырьков [5] на треках ядерных частиц в жидкостных лазерах.

В случае второго способа накачки при использовании ядерно-оптических преобразователей (ЯОП) непосредственное возбуждение лазерной среды осуществляется с помощью хорошо известного метода – оптической накачки. Иногда в литературе ЯОП называют конверторами или «ядерными» лампами. Впервые возможность применения ЯОП для накачки лазеров была, по-видимому, рассмотрена в патенте США [6], где в качестве ЯОП предлагались различные кристаллические и пластмассовые сцинтилляторы, жидкие и газовые люминесцирующие среды, а в качестве лазерных элементов – диэлектрические матрицы, активированные неодимом и хромом, и также другие известные к тому времени конденсированные и газовые лазерные среды. Данный доклад представляет собой обзор работ, посвященных этому способу накачки.

## 1. Основные характеристики ЯОП

При использовании ЯОП лазерный элемент может быть удален от источника ядерной энергии, что позволяет снизить требования к радиационной стойкости лазерной среды. Например, в работах [7, 8] сообщается о проведении экспериментов на импульсном реакторе TRIGA, в которых световое излучение ЯОП передавалось с помощью пучка из волоконных световодов длиной 5 м за биологическую защиту и направлялось на кристалл  $Y_3Al_5O_{12}:Nd^{3+}$ . В качестве ЯОП можно использовать как газовые, так и конденсированные среды.

Газовые ЯОП по спектрам излучения можно разделить на два типа: источники со сплошным спектром, близким к спектру излучения черного тела, и источники с линейчатым спектром, состоящим из отдельных люминесцентных линий или полос. В первом случае источником светового излучения является ядерно-возбуждаемая плазма, нагретая до достаточно высоких температур. Как показывают данные [9, 10], при облучении нейтронными потоками импульсных реакторов газовых сред атмосферного давления на основе инертных газов (криптон, ксенон и др.), содержащих изотопы  $^3He$ ,  $^{10}B$  или  $^{235}U$ , при удельных энергозатратах до  $\sim 10$  Дж/см<sup>3</sup> температура среды может достигать  $10^4$  К. При этом спектры свечения приблизительно соответствуют спектрам излучения абсолютно черного тела, на которые иногда наложены интенсивные линии, принадлежащие переходам атомов инертных газов в диапазоне 800–1000 нм.

При удельных энергозатратах  $\leq 1$  Дж/см<sup>3</sup> основной вклад в спектры излучения при  $\lambda < 1$  мкм дает люминесцентное излучение. Естественно, что для ЯОП в этом случае следует использовать газовые среды с максимальными конверсионными эффективностями. В УФ области спектра такими средами являются смеси, излучающие на эксимерных молекулах инертных газов  $R_2^*$  ( $R = Xe, Kr, Ar$ ) и галогенидов инертных газов  $RX^*$  ( $X = F, Cl, Br, I$ ) [11–13].

Для оценки максимальных значений конверсионной эффективности  $\eta_\lambda$  (табл. 1) использовалось простое выражение:  $\eta_\lambda^{\max} = hv/w_a$ , где  $hv$  – энергия кванта люминесцентного перехода,  $w_a$  – средние затраты энергии на образование одной первичной активной частицы (иона или возбужденного атома буферного газа). Такая частица в процессе последующих релаксационных процессов может преобразоваться максимум в одну возбужденную эксимерную молекулу. Используя формулу Платцмана [14], можно получить связь между  $w_a$  и потенциалом ионизации буферного газа  $V_i$ :  $w_a \approx 1,2V_i$ . Из табл. 1 следует, что для некоторых эксимерных молекул конверсионные эффективности могут достигать 50 %. В нижней строке таблицы представлены экспериментальные данные для некоторых эксимерных молекул при возбуждении газовых сред протонным [14] и электронным [15] пучками, а также ядерными излучениями [16,17].

Таблица 1

Длины волн излучения и конверсионные эффективности для некоторых эксимерных молекул в УФ области спектра

Эксимерная молекула	Ar <sub>2</sub> *	Kr <sub>2</sub> *	Xe <sub>2</sub> *	KrCl*	KrF*	XeBr*	XeCl*	XeF*
Длина волны, нм	129	147	172	222	248	282	308	351
Буферный газ	Ar	Kr	Xe	Ar	Ar	Ar	Ar	Ar
Максимальная расчетная конверсионная эффективность, %	51	50	50	30	26	23	21	19
Экспериментальные данные для конверсионной эффективности, %	29 [15] 30 [16]	12 [15]	30 [16] 68 [17]	–	23 [17]	~ 10 [18]	~ 10 [18]	14 [17]

Для эффективной накачки активных лазерных элементов на основе конденсированных сред необходимо согласование спектров их поглощения со спектрами излучения ЯОП. У рубинового и неодимового лазеров наиболее интенсивные линии поглощения расположены в видимой и ближней ИК-областях спектра. Для накачки этих лазерных сред можно использовать ЯОП на основе эксимерных щелочных молекул [8, 12, 13] или инертных газов [8, 13, 19, 20]. По оценкам [8, 12, 13], максимальные конверсионные эффективности для щелочных молекул  $Li_2^*$  ( $\lambda_{\max} = 458$  нм),  $Na_2^*$  ( $\lambda_{\max} = 436$  нм),  $K_2^*$  ( $\lambda_{\max} = 575$  нм),  $Rb_2^*$  ( $\lambda_{\max} = 601, 603, 606$  нм),  $Cs_2^*$  ( $\lambda_{\max} = 703, 713, 718$  нм) могут достигать 40–50 %.

Экспериментальные исследования [8, 19, 20] показали, что в ЯОП на смесях инертных газов почти все наиболее интенсивные линии расположены в ближнем ИК диапазоне спектра 800–1000 нм и принадлежат переходам  $(n+1)p-(n+1)s$  атомов Хе, Кг и Аг ( $n = 5,4,3$  соответственно для Хе, Кг, Аг). В табл. 2 приведены результаты исследования люминесцентных характеристик для Не, Не, Аг, Кг, Хе и их двойных смесей в спектральном диапазоне 740–1100 нм при возбуждении осколками деления урана [20]. В качестве источника нейтронов использовался импульсный реактор ВИР-2М с длительностью импульса около 3 мс [21]. Для наиболее интенсивных линий 912,3 и 965,8 нм (АгI) в смеси Не-Аг, 892,9 нм (КгI) в смеси Не-Кг и 980,0 нм (ХеI) в смеси Аг-Хе конверсионные эффективности составляли 0,1–0,15 %. В работе [19] при возбуждении смесей  $^3\text{He}$ -Аг(Кг,Хе) продуктами ядерной реакции  $^3\text{He}(n, p)^3\text{H}$  ( $q = 20$  Вт/см<sup>3</sup>) были получены близкие значения  $\eta_\lambda \leq 0,5$  % для диапазона спектра 740–840 нм.

Таблица 2

Люминесцентные характеристики инертных газов и их двойных смесей при возбуждении осколками деления урана ( $q$  – удельная мощность возбуждения;  $w_i$  и  $\eta_\lambda$  – удельная мощность люминесценции и конверсионная эффективность в диапазоне 740–1100 нм.

Газовая среда	Давление, атм	$q$ , Вт/см <sup>3</sup>	$w_i$ , мВт/см <sup>3</sup>	$\eta_\lambda$ , %
Не	1,8	60	85	0,15
Не	0,64	34	94	0,28
Аг	0,45	47	85	0,18
Кг	0,32	46	120	0,26
Хе	0,23	38	120	0,32
Не-Не (0,56 % Не)	1,8	43	51	0,12
Не-Аг (0,56 % Аг)	1,8	46	180	0,39
Не-Кг (0,56 % Кг)	1,8	46	260	0,57
Не-Хе (0,56 % Хе)	1,8	40	230	0,57
Не-Аг (1,7 % Аг)	0,64	34	260	0,76
Не-Кг (1,7 % Кг)	0,64	37	210	0,57
Не-Хе (1,7 % Хе)	0,64	34	240	0,71
Аг-Кг (2,2 % Кг)	0,45	47	85	0,18
Аг-Хе (2,2 % Хе)	0,45	44	260	0,59
Кг-Хе (3,1 % Хе)	0,32	52	150	0,29

Активным веществом для ЯОП на основе конденсированных сред является люминофор в жидкой или твердой фазе. Характеристики жидких люминесцирующих сред довольно подробно рассмотрены в монографиях [1,2]. Конверсионные эффективности жидких люминофоров невелики и не превышают 1 %.

Существенно более высокими конверсионными эффективностями обладают твердотельные люминофоры. Связано это с тем, что, например, в щелочно-галогидных кристаллах эффективность передачи возбуждения, возникающего в матрице под действием облучения, центру люминесценции, может достигать 50 %.

Рассмотрим некоторые характеристики твердотельных ЯОП, свойства которых были исследованы во ВНИИЭФ [22]. В экспериментах на импульсных реакторах ВИР-2 и БИР-2 [21] были изучены некоторые типы щелочно-галогидных кристаллов и люминесцирующих пластмасс. Наиболее подробно рассматривались кристаллы CsI(Tl), CsI(Na) и NaI(Tl), которые ранее использовались в основном при низких уровнях возбуждения в режиме счета ядерных частиц. Эксперименты показали, что спектры люминесценции этих кристаллов при поглощенных дозах  $\gamma$ -излучения  $D_\gamma \leq 5 \cdot 10^3$  Гр и нейтронных флюенсах  $\Phi \leq 5 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> изменяются незначительно (рис. 1). Другими важными параметрами, исследованными для кристаллов CsI(Tl), CsI(Na) и NaI(Tl) в зависимости от концентрации активаторов и мощности дозы  $\gamma$ -излучения, являются удельный выход люминесцентного излучения и конверсионная эффективность. Из результатов измерений можно сделать вывод, что световыход, например, кристалла CsI(Tl) увеличивается практически линейно с ростом поглощенной дозы до  $4,5 \cdot 10^3$  Гр. При такой максимальной дозе удельный световыход составляет 1,1 Дж/см<sup>3</sup>, а конверсионная эффективность – около 6 %.

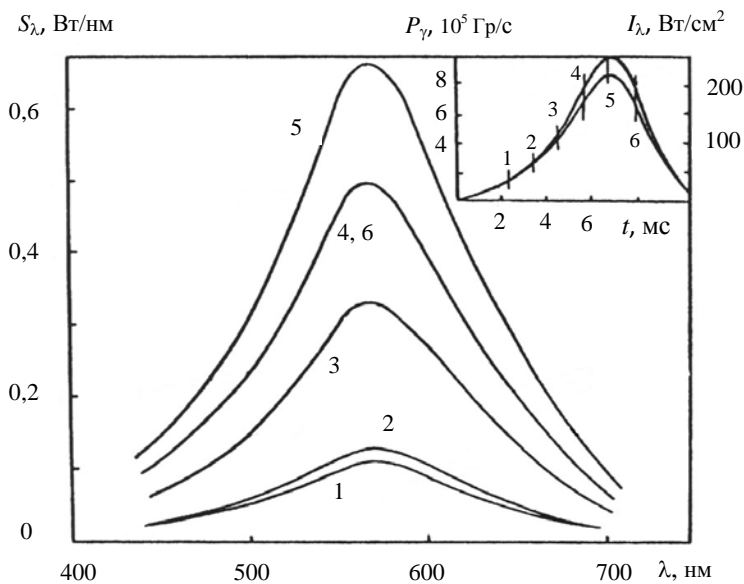


Рис. 1. Спектры люминесценции кристалла CsI(0,5 % Tl) в различные моменты импульсного облучения на реакторе ВИР-2 при  $D_\gamma = 3,5 \cdot 10^3$  Гр и  $\Phi = 4 \cdot 10^{14}$  см $^{-2}$ . На вставке приведены временные зависимости мощности дозы  $P_\gamma$  (верхняя кривая) и плотности мощности люминесцентного излучения  $I_\lambda$  (нижняя кривая) с указанием моментов времени (1, 2, 3, 4, 5, 6) регистрации спектров

## 2. Применение ЯОП для накачки лазеров

Эксперименты на импульсных реакторах по накачке твердотельных лазеров излучением ЯОП были выполнены в работах [8, 23, 24].

В серии экспериментов [8] на реакторе TRIGA использовался ЯОП на смесих  $^3\text{He-Kr}(\text{Ar, Xe})$  при возбуждении продуктами ядерной реакции  $^3\text{He}(n, p)^3\text{H}$ . Спектрально-люминесцентные характеристики этих смесей приведены в работах [8, 19]. Удельная мощность накачки в максимуме реакторного импульса длительностью 12 мс составляла около 20 Вт/см $^3$ . Схема эксперимента показана на рис. 2. Световое излучение из ЯОП, размещенного вблизи АЗ реактора, с помощью пучка из ~2000 волоконных кварцевых световодов длиной 5 м передавалось на активный лазерный элемент  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Nd}^{3+}$  диаметром 3 мм и длиной 62,5 мм. Для равномерной по объему накачки лазерного элемента торцы световодов были равномерно распределены по его поверхности (рис. 3). Генерация в этих экспериментах не была зарегистрирована, что в работе [8] объяс-

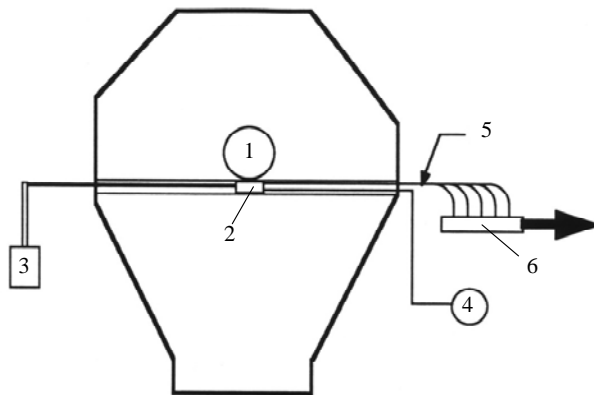


Рис. 2. Схема экспериментов на реакторе TRIGA по накачке твердотельного лазера  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Nd}^{3+}$  оптическим излучением газового ЯОП [8]: 1 – АЗ реактора; 2 – ЯОП; 3 – вакуумная система; 4 – устройство для наполнения ЯОП газами; 5 – пучок волоконных световодов; 6 – кристалл  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Nd}^{3+}$

няется низкой удельной мощностью накачки лазерной среды из-за потерь при транспортировке светового излучения и плохой корреляцией между спектром люминесценции плазмы и спектром поглощения кристалла  $Y_3Al_5O_{12}:Nd^{3+}$ .

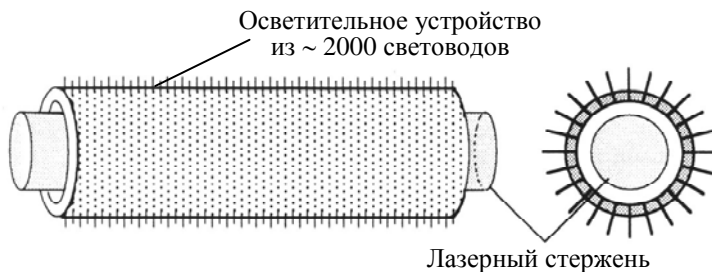


Рис. 3. Взаимное расположение осветительного устройства и лазерного стержня [8]

Более успешными были выполненные во ВНИИЭФ эксперименты по накачке волоконных неодимовых лазеров световым излучением ксеноновой плазмы [23]. Предварительные исследования показали, что спектр излучения такой плазмы, возникающей при возбуждении ксенона при давлениях  $\sim 1$  атм осколками деления урана (удельный энерговыдел  $\sim 5$  Дж/см<sup>3</sup>), близок к спектру излучения абсолютно черного тела с температурой  $\leq 6000$  К.

В экспериментах [23] на реакторе ВИР-2М лазерно-активный элемент был помещен внутри ЯОП между двух пластин с урановыми слоями. Пластины размерами  $10 \times 6$  см размещались параллельно друг другу на расстоянии 2 см. На внутренние поверхности пластин нанесены слои окиси-закуси урана с толщиной слоя по металлическому  $^{235}U$  около  $5$  мг/см<sup>2</sup>. Волоконный лазерный элемент длиной 1–4 м и диаметром волокна 40–50 мкм был намотан на рамку и помещен симметрично между урановыми слоями. Облучение ЯОП проводилось на дне центрального канала реактора. В этой серии экспериментов была получена генерация при использовании волоконных неодимовых лазеров на основе силикатного и фосфатного стекл. Результаты одного из экспериментов для неодимового лазера на основе фосфатного стекла при наполнении ЯОП ксеноном с давлением 0,5 атм (температура плазмы 4700 К) показаны на рис. 4. Максимальная энергия лазерного излучения за импульс составляла 2,5 Дж.

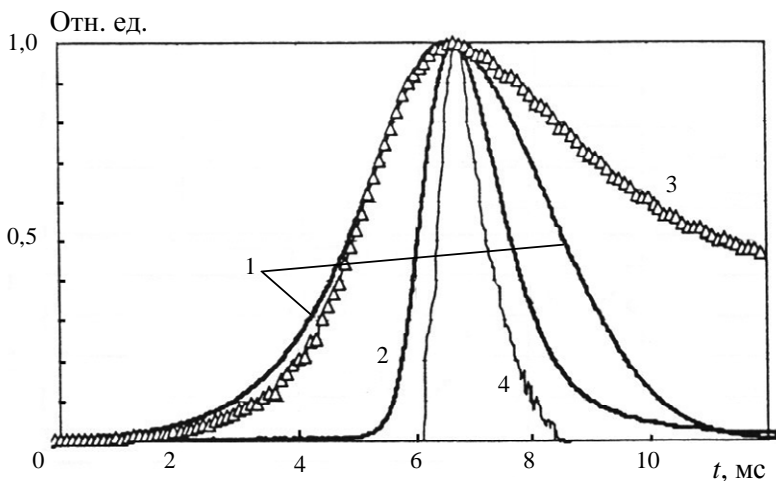


Рис. 4. Осциллограммы импульсов реакторного излучения (1), светового излучения ЯОП (2), давления в ЯОП (3) и генерации (4) для волоконного лазера на основе фосфатного стекла при заполнении ЯОП ксеноном с давлением 0,5 атм [41]

Кроме газовых ЯОП для накачки неодимовых лазеров во ВНИИЭФ использовался также ЯОП на основе твердотельного люминофора. В краткой информации [24] об этих экспериментах сообщается о получении генерации при накачке лазерного элемента на основе неодимового стекла радиолуминесцентным излучением кристалла CsI(Tl). Лазерный элемент вместе с кристаллом CsI(Tl) облучались в полости активной зоны импульсного реактора БР-1 [21]. Максимальная мощность генерации равнялась 4 кВт при длительности лазерного импульса около 60 мкс.

Следует упомянуть также работу [25], в которой для накачки лазера на кристалле YAP:Tm<sup>3+</sup> ( $\lambda = 1,85\text{--}2,0$  мкм) в качестве ЯОП применялись ЛЯН на переходах атомов Ar ( $\lambda = 1,79$  мкм) и Xe ( $\lambda = 1,73$  мкм). Эксперименты были выполнены на импульсном реакторе ЭБР-Л [21]. Длина активной области лазерного кристалла составляла 5 мм, объем – около 4 мм<sup>3</sup>. При использовании в качестве источника накачки ксенонового ЛЯН ( $\lambda = 1,73$  мкм) пороговая удельная мощность накачки составляла около 35 кВт/см<sup>3</sup>, а эффективность преобразования поглощенной энергии накачки в лазерное излучение равнялась 4 %. Такое низкое значение лазерной эффективности является довольно неожиданным, так как предварительные исследования показали, что эффективность преобразования лазерного излучения на линиях 1,73 и 1,79 мкм в люминесцентное излучение равняется соответственно 54 и 76 %.

### 3. Некоторые схемы ядерно-лазерных устройств на конденсированных средах

Для ЛЯН на конденсированных средах пока получены довольно скромные результаты: осуществлена лишь накачка стеклянных неодимовых лазеров оптическим излучением ЯОП, причем подробная информация о характеристиках таких лазеров отсутствует. Несмотря на это, в литературе предлагались схемы мощных ядерно-лазерных установок на основе конденсированных лазерных сред. Рассмотрим некоторые предложения без обсуждения проблем, связанных с возможностью их реализации.

Коллоидный ядерный реактор → оптическое тепловое излучение → жидкостная лазерная среда. В работе [25] рассмотрена одна из первых конструкций ядерно-лазерного устройства на конденсированных лазерных средах. В упрощенном виде такая установка представляет собой два коаксиальных цилиндра, причем жидкостная лазерная среда  $\text{POCl}_3\text{-ZrCl}_4\text{:Nd}^{3+}$  расположена в объеме внутреннего цилиндра с прозрачной оболочкой, а активная зона (АЗ) реактора занимает пространство между двумя цилиндрическими оболочками. Коллоидная АЗ реактора, работающего в непрерывном режиме, состоит из взвеси частиц карбида урана размерами 0,5–5 мкм (общая масса 4,5 кг) в вихревом потоке гелия. Плотность мощности, которая будет выделяться внутри АЗ, по оценкам, составляет 20 кВт/см<sup>3</sup>. Предполагается, что накачка лазерной среды осуществляется оптическим излучением частиц топлива, которые нагреваются до температуры 3000 К. Геометрические размеры и энергетические характеристики этой установки в работе [25] не приводятся.

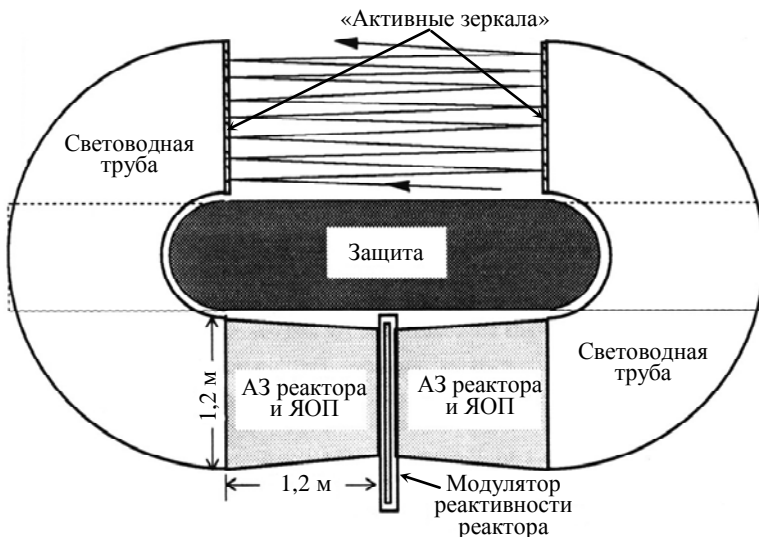


Рис. 5. Схема ядерно-лазерной установки [8, 26]

Реактор с аэрозольной АЗ → люминесцентное излучение → твердотельная лазерная среда.

В работах [8, 26] была рассмотрена ядерно-лазерная установка (рис. 5), работающая в импульсно-периодическом режиме с частотой 1 Гц и длительностью импульса около 1 мс. Возбуждение газовой среды осуществляется в ЯОП за счет осколков деления, вылетающих из делящегося материала – аэрозольных частиц урана диаметром несколько микрон. Люминесцентные фотоны, отражаясь от частиц делящегося вещества и стенок ЯОП, проходят через окно, а затем с помощью световодной трубы передаются на активную лазерную среду. Лазерная среда изготовлена в виде пластины и представляет собой так называемое «активное зеркало». Расчетный анализ [8] различных конфигураций «кювета-труба» показывает, что эффективность вывода светового излучения из кюветы и его транспортировки до лазерной среды может достигать 70–80 %.

Активная зона реактора состоит из двух частей, внутри которых находится смесь из аэрозольного уранового топлива (частицы  $UO_2$  с размерами 2–5 мкм) и люминесцентной газовой среды. Между частями АЗ расположены три вращающихся с разной частотой диска, содержащих  $^{235}U$ ,  $^{10}B$  и  $Be$ . С помощью этих дисков, которые представляют собой модуляторы реактивности АЗ, осуществляется пульсирующий режим работы реактора. Параметры предложенного в работах [8,26] реактора: объем АЗ 2,3 м<sup>3</sup>; загрузка по урану 0,5 г/см<sup>3</sup>; частота повторения импульсов 1 Гц; средняя мощность 400 кВт (170 Вт/см<sup>3</sup>); пиковая плотность потока нейтронов  $2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>.

С помощью световодных труб люминесцентное излучение из двух частей АЗ реактора выводится за биологическую защиту. На концах световодных труб установлены два плоских мозаичных блока из лазерных элементов. Каждый из этих блоков состоит из нескольких десятков «активных зеркал», изготовленных из кристаллов ГСГГ:  $Cr^{3+}:Nd^{3+}$  толщиной 0,5 см и диаметром до 20 см. В качестве люминесцентной среды предлагается использовать газовые смеси на основе эксимерных щелочных молекул, конверсионная эффективность для которых принята равной 30 %. При таких условиях оцененная пиковая мощность лазерного излучения составляет 12 МВт (средняя мощность 12 кВт) при полном КПД преобразования выделившейся в АЗ реактора ядерной энергии в лазерное излучение 3 %.

Реактор (слои урана или гексафторид урана) → оптическое тепловое излучение → твердотельная лазерная среда. Выполненные во ВНИИЭФ исследования различного типа ЯОП и возбуждаемых с их помощью неодимовых лазеров позволили рассмотреть ряд схем импульсных реакторов-лазеров на основе неодимовых активных элементов с энергией лазерного излучения ≤10 МДж, предназначенных для исследований по проблеме инерциального термоядерного синтеза [23, 27].

Один из вариантов представляет собой конструкцию, состоящую из отдельных модулей. Модули размещаются в реакторной матрице, которая содержит ядерное топливо, органы управления реактором, замедлитель, отражатель и др. Внутри модуля с внешним диаметром 80 см находятся около 100 неодимовых стержней диаметром 45 мм и длиной 1200 см (рис. 6,а). Пространство между стержнями, расположенными в гексагональной решетке с шагом 80 мм, заполнено смесью  $UF_6$ -Xe (4:1) при давлении 2 атм. Накачка лазерных стержней осуществляется оптическим излучением плазмы (температура ≤ 10<sup>4</sup> К), которая образуется под действие нейтронного импуль-

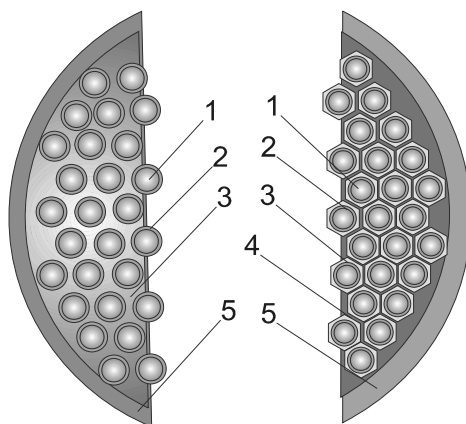


Рис. 6. Схема лазерного модуля [27] с гексафторидом урана (а) и с урановыми слоями (б): 1 – лазерные элементы; 2 – фильтры, поглощающие УФ-излучение; 3 – ЯОП; 4 – корпус ЯОП с урановым слоем; 5 – корпус модуля

са длительностью  $\sim 3$  мс и флюенсом  $\sim 3 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>. Полная энергия лазерного излучения из одного модуля составляет около 400 кДж при эффективности преобразования выделившейся ядерной энергии в лазерное излучение  $\sim 2,5$  %.

Возможен другой вариант конструкции модуля, в котором для возбуждения ксеноновой плазмы используются осколки деления урана, вылетающие из урановых слоев (рис.6,б). Урановые слои наносятся на внутреннюю поверхность шестиугольного в сечении корпуса ЯОП, который заполнен ксеноном при давлении  $\sim 1$  атм. Количество лазерных элементов при тех же габаритных размерах модуля составляет 60–70, а энергия лазерного излучения – до 250 кДж. При использовании такого варианта конструкции модуля КПД будет примерно в 10 раз ниже из-за меньшей эффективности передачи энергии осколков деления газовой среде, что потребует увеличения полного энерговыделения в модуле.

Следует отметить, что рассматриваемые модули обладают заметным коэффициентом размножения нейтронов и, следовательно, дают вклад в суммарную реактивность реакторной системы. Это обстоятельство позволяет уменьшить загрузку дополнительного ядерного топлива в реактор.

Реактор-лазер на основе таких модулей с энергией лазерного излучения  $\sim 10$  МДж можно представить, например, в виде конструкции из 18 модулей, расположенных в 6 каналах в трех ярусах (рис. 7) [27]. В центральной части располагается «запальный» реактор с органами управления. Все элементы установки размещаются в матрице-замедлителе нейтронов и составляют единую ядерно-физическую систему. Длительность импульса ядерных делений и лазерного излучения в режиме свободной генерации может составлять 1–10 мс. Характерные линейные размеры установки около 3 м, суммарная масса до 100 т.

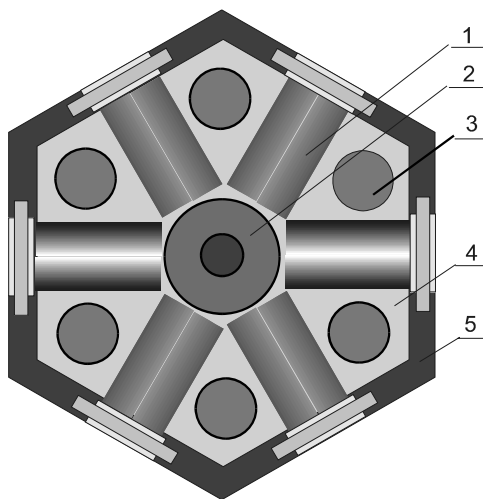


Рис. 7. Схема импульсного реактора-лазера [27]: 1 – лазерный модуль; 2 – «запальный» реактор; 3 – периферийный реакторный модуль-размножитель; 4 – замедлитель нейтронов; 5 – корпус реактора

«Запальный» реактор → подкритический размножающий блок с лазерной средой. В отличие от представленных выше схем, в которых используется принцип ЯОП, в работах [28–30] рассматривается возможность создания мощной импульсно-периодической лазерной установки с прямым преобразованием кинетической энергии осколков деления в лазерное излучение. Такую установку можно использовать в схемах инерциального термоядерного синтеза в качестве конечного усилительного каскада для лазерного драйвера.

Схема импульсно-периодической установки, основанная на принципе разделения реакторного и подкритического лазерного блока, показана на рис. 8. Лазерный блок представляет собой цилиндрическую конструкцию с продольной полостью, в которой размещается АЗ «запального» импульсного реактора с модулятором реактивности. Лазерный блок заполнен лазерной средой, содержащей делящееся вещество, и включает в себя элементы конструкции замедлителя. Нейтронно-физические расчеты [29, 30] показали, что для такой системы, работающей с частотой  $\leq 5$  Гц, при энерговыделении за импульс в лазерном блоке около 8 МДж можно обеспечить удельную мощность накачки лазерной среды  $\sim 1$  кВт/см<sup>3</sup> при длительности импульса 1–5 мс.



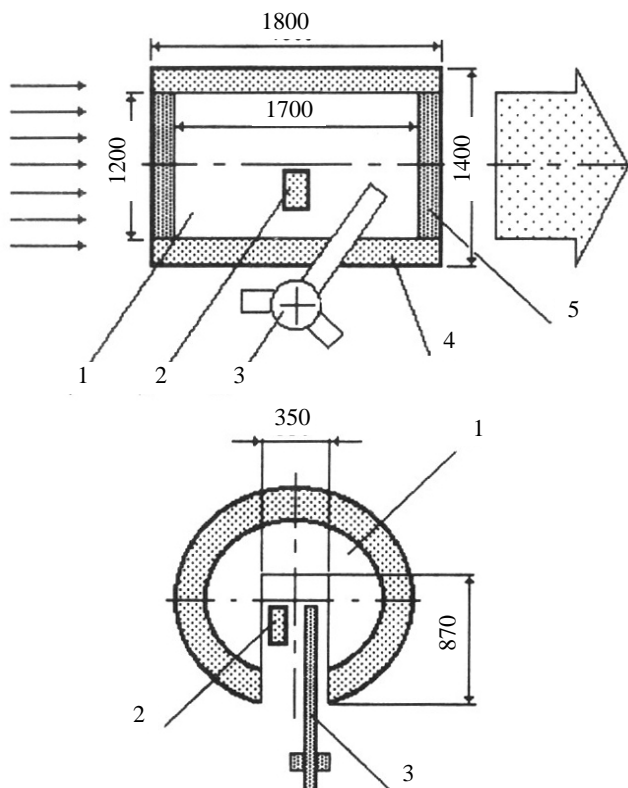


Рис. 8. Схема импульсно-периодического реактора-лазера [28–30]: 1 – лазерный блок; 2 – импульсный реактор; 3 – модулятор реактивности импульсного реактора; 4 – отражатель нейтронов; 5 – оптические окна

При оценке энергетических характеристик лазерного излучения предполагалось, что эффективность преобразования ядерной энергии, поглощенной в лазерной среде, в лазерное излучение  $\eta_l = 2,0\%$ . В качестве лазерных сред предлагаются неорганические апротонные лазерные жидкости (например,  $\text{POCl}_3\text{-ZrCl}_4\text{:Nd}^{3+}$ ) с растворенным в них ураном. По мнению авторов [28] не исключена также возможность использования в рассматриваемой конструкции газовых лазерных сред. Однако в этом случае необходимо, по крайней мере, решить проблему эффективного вклада энергии в газовую среду и найти лазерную среду, обладающую не только высоким значением  $\eta_l$ , но и большим временем жизни ( $\sim 1$  мс) верхнего лазерного уровня.

### Список литературы

1. Мельников С. П., Сизов А. Н., Синянский А. А. Лазеры с ядерной накачкой. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2008.
2. Melnikov S. P., Sizov A. N., Sinyanskii A. A., Miley G. H. Lasers with nuclear pumping. New York: Springer, 2015.
3. Бреховских С. М., Викторова Ю. Н., Ланда Л. М. Радиационные эффекты стекол. М.: Энергоиздат, 1982.
4. Пикаев А. К. Современная радиационная химия. Радиолит газы и жидкостей. М.: Наука, 1986.
5. Сизов А. Н. Распространение света через жидкость, возбуждаемую осколками деления. – Труды 2-й международной конф. «Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой», Арзамас-16, 1995. Т. 1. С. 397–398.
6. Held K., Solon L. R. Phosphor transducer means for pumping coherent light generators by nuclear energy sources. – 1969, U.S. Patent 3,470,490 (filled November 12, 1963).

7. Miley G. H. Dual-media nuclear-pumped lasers. – Proc. Int. Symp. “Short-Wavelength Lasers and Their Applications”, Osaka, 1988. P. 14–25.
8. Boody F. P. Nuclear-driven fluorescence pumped solid-state lasers. – Ph. D. Dissertation, University of Missouri-Columbia, 1991.
9. Voinov A. M., Dovbysh L. E., Krivonosov V. N., Krotov V. A., Lazhintsev B. V., Mkhitarayan L. C., Nor-Arevyan V. A., Sizov A. N., Sinitzin A. V., Sinyanskii A. A. Glass 1-MJ laser for laser fusion with nuclear-optical pumping on the pulse reactor. – Proc. 8th Int. Conf. on Emerging Nuclear Energy Systems, Obninsk, 1996. v. 1, p. 310–321.
10. Воинов А. М., Довбыш Л. Е., Кривонос В. Н., Сизов А. Н., Синецын А. В., Синянский А. А. Импульсные реакторы-лазеры с ядерно-оптической накачкой. – Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2000, № 2/3, с. 16–18.
11. Wilson J. W., Shapiro A. Nuclear-induced excimer fluorescence. – J. Appl. Phys., 1980, v. 51, No. 5, p. 2387–2393.
12. Boody F. P., Prelas M. A. Efficient visible nuclear-driven fluorescer lamps. – Труды отраслевой конф. «Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой», Обнинск, 1992. Т. 1, с. 161–165.
13. Prelas M. A., Lin Li-Te, Bahns J. T. Progress in nuclear-driven flashlamps. – Int. Embedded Topical Meeting on Physics, Safety, and Applications of Pulse Reactors, Washington, 1994, p.155–162.
14. Platzman R.L. Total ionization in gases by high-energy particles: An appraisal of our understanding. – Intern. J. Appl. Radiation and Isotopes, 1961, v.10, No.2/3, p. 116–127.
15. Stewart T.E., Hurst G.S., Bortner T.E., Parks J.E., Martin F.W., Weidner H.L. Proton excitation of continuous emission in the noble gases. – J. Opt. Soc. Am., 1970, v.60, No.10, p.1290–1297.
16. Wiser J., Murnick D. E., Ulrich A., Huggins H. A., Liddle A., Brown W. L. Vacuum ultraviolet rare gas excimer light source. – Rev. Sci. Instrum., 1997, v. 68, No. 3, p. 1360–1364.
17. Walters R. A., Cox J. D., Schneider R. T., Hagefstration J. Generation, measurement, and utilization of xenon excimer radiation produced by nuclear reaction products. – Trans. Amer. Nucl. Soc., 1980. V. 34. No. 1. P. 808–810.
18. Мавлютов А. А., Миськевич А. И., Саламаха Б. С. Спектральные характеристики эксимерных активных сред при ядерной накачке. – Труды 2-й международной конф. «Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой», Арзамас-16, 1995, т. 1, с. 162–171.
19. Boody F. P., Prelas M. A. Absolutely calibrated spectra of nuclear-driven rare gases, 400–950 nm. – Труды отраслевой конф. «Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой», Обнинск, 1993, т. 2, с. 149–155.
20. Abramov A. A., Gorbunov V. V., Melnikov S. P., Mukhamatullin A. Kh., Pikulev A. A., Sinitzin A. V., Sinyanskii A. A., Tsvetkov V. M. Luminescence of nuclear-induced rare-gas plasmas in near infrared spectral range. – Proceedings of SPIE, 2006. v. 6263, p. 279–296.
21. Колесов В. Ф. Аперриодические импульсные реакторы. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1999.
22. Воинов А. М., Довбыш Л. Е., Кривонос В. Н., Мельников С. П., Синянский А. А. Методическое обеспечение исследований по радиационной стойкости оптических элементов лазеров с ядерной накачкой. – Труды 2-й международной конф. «Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой», Арзамас-16, 1995. т. 1, с. 52–69.
23. Voinov A. M., Dovbysh L. E., Krivonosov V. N., Krotov V. A., Lazhintsev B. V., Mkhitarayan L. C., Nor-Arevyan V. A., Sizov A. N., Sinitzin A. V., Sinyanskii A. A. Glass 1-MJ laser for laser fusion with nuclear-optical pumping on the pulse reactor. Proc. 8th Int. Conf. on Emerging Nuclear Energy Systems, Obninsk, 1996. v. 1, p. 310–321.
24. Воинов А. М., Довбыш Л. Е., Кривонос В. Н., Мельников С. П., Синянский А. А. Лазеры с накачкой оптическим излучением конвертора на основе радиоломинесцентного и плазменного источников света. – Труды отраслевой конф. «Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой», Обнинск, 1993. т. 3, с. 224–226.
25. Cox J. D., Schneider R. T., Tang Y. S. Nuclear pumped lasers utilizing radiant transfer. – Laser Interaction and Related Plasma Phenomena, 1984. v. 6, p. 73–85.
26. Boody F. P., Prelas M. A. Design of a large-scale nuclear-driven fluorescer pumped solid-state laser system // Труды отраслевой конф. «Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой», Обнинск, 1993. т. 3, с. 95–97.
27. Воинов А. М., Довбыш Л. Е., Кривонос В. Н., Сизов А. Н., Синецын А. В., Синянский А.А. Импульсные реакторы-лазеры с ядерно-оптической накачкой // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2000. № 2/3, с. 16–18.

28. Дьяченко П. П., Зродников А. В., Кононов В. Н., Пупко В. Я., Коробкин В. В., Прохоров А. М. Комбинированная термоядерная установка с реакторно-лазерным драйвером для промышленного получения электроэнергии. Препринт ФЭИ, № 2097. Обнинск, 1990.

29. Барзилов А. П., Гулевич А. В., Дьяченко П. П., Зродников А. В., Кононов В. Н., Кухарчук О. Ф., Пупко В. Я., Коробкин В. В. Лазерная система импульсно-периодического действия с накачкой от ядерного реактора типа ИБР-2 // Труды 2-й международной конф. «Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой», Арзамас-16, 1995. Т. 2. С. 186–194.

30. Barzilov A. P., Gulevich A. V., Dyachenko P. P., Kukharchuk O. F., Pashin E. A., Satin S. S. Investigation of a pulse periodic nuclear pumped laser system // Proc. 9th Int. Conf. on Emerging Nuclear Energy Systems. Tel-Aviv, 1998. V. 2. P. 897–904.