

Следует отметить, что ввиду исследовательского, а не препаративного характера экспериментов колонки работали периодически, а не непрерывно. Так как режим работы колонны изменялся, то возникали условия, в которых движение разделяемых элементов нарушалось, что значительно ухудшало разделение лютеция и иттербия. Если при ионообменном разделении смеси в одну операцию не выделяются чистые препараты, то объединяют фракции, содержащие преобладающее количество каждого компонента, и отправляют на доочистку в колонны меньшего размера. Повторное разделение позволит получить целевые компоненты более высокой степени чистоты.

Выводы. На основании сопоставления литературных, эмпирических и экспериментальных данных рекомендованы условия извлечения лютеция: комплексообразователь — аммонийная соль этилендиамина тетрауксусной кислоты концентрацией 0,5—1%, pH 8,1—8,4, замедлитель — элементы Fe (III), Cu (II), скорость элюирования 0,25 объем раствора/объем ионита в 1 ч, удельная загрузка не менее 6%, параметры колонки — соотношение высота:диаметр 40:1.

В экспериментах достигнуто разделение лютеция и иттербия с получением фракций, содержащих $\geq 99,9\%$ лютеция концентрацией 1 г/л

при содержании иттербия $\leq 0,5$ мг/л. Метод ионообменной хроматографии позволил выделить лютеций с обогащением растворов в 25 раз. Последующая тонкая очистка накопленных фракций с преобладающим содержанием лютеция, а также сочетание разделения редкоземельных металлов на катионитах и анионитах, изменяющее последовательность перехода элемента в фильтрат, позволит обеспечить получение конечных продуктов требуемой чистоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайличенко А.И., Михлин Е.Б., Патрикеев Ю.Б. Редкоземельные металлы. М.: Металлургия, 1987. 232 с.
2. Методы разделения редкоземельных металлов. Под ред. В.Е. Плющева, Л.Н. Комиссаровой. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1961. 361 с.
3. Ягодин Г.А., Синегрибова О.А., Чекмарев А.М. Технология редких металлов в атомной технике. М.: Атомиздат, 1974. 344 с.
4. Фирсова Л.А., Чувелева Э.А., Гелис В.М. и др. Очистка иттербия от лютеция с помощью сорбционно-хроматографического метода. — Журн. физ. химии, 2001, т. 75, № 6, с. 1068—1071.
5. Гелис В.М., Чувелева Э.А., Фирсова Л.А. и др. Оптимизация условий разделения иттербия и лютеция методом вытеснительной комплексообразовательной хроматографии. — Журн. прикладной химии, 2005, т. 78, вып. 9, с. 1444—1450.

Поступила в Редакцию 14.01.16

УДК 539.173.4

ПРОПУСКАНИЕ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА НЕОРГАНИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТЬЮ, АКТИВИРОВАННОЙ НЕОДИМОМ И УРАНИЛОМ, ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ ОСКОЛКАМИ ДЕЛЕНИЯ УРАНА

Дьяченко П.П., Куликов П.А., Серегина Е.А., Серегин А.А., Тихонов Г.В.
(АО «ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского», г. Обнинск)

Урансодержащая лазерная жидкость $\text{POCl}_3\text{—SnCl}_4\text{—}^{235}\text{UO}_2^{2+}\text{—Nd}^{3+}$ на основе бинарного апротонного растворителя, активированного ионами неодима, по некоторым параметрам является одной из наиболее подходящих для использования в качестве лазерно-активной среды оптического квантового усилителя с ядерной накачкой [1, 2]. Исследованию ее характеристик посвящено значительное число работ [3—9]. Получена лазерная генерация на ионах неодима при оптической накачке урансодержащей жидкой среды [3]. Экспериментально установлено,

что при накачке жидкости $\text{POCl}_3\text{—SnCl}_4\text{—}^{235}\text{UO}_2^{2+}\text{—Nd}^{3+}$ осколками деления урана эффективность заселения верхнего лазерного уровня Nd^{3+} составляет 2%, его время жизни 250 мкс [4]. Это примерно в 10 и 1000 раз больше значений соответствующих величин для наиболее эффективного в настоящее время газового лазера на атомарном переходе ксенона с длиной волны 2,03 мкм при гетерогенной накачке осколками деления He—Ar—Xe — смеси [10]. Следует отметить, что, кроме этой смеси, известны другие газовые среды, при ядерной

накачке которых наблюдается лазерная генерация [11]. В эксперименте [5] на импульсном реакторе БАРС-6 была зарегистрирована инверсная заселенность уровней ионов неодима при накачке лазерной жидкости осколками деления урана, которая возрастала при увеличении энерговыклада, что является необходимым условием лазерной генерации при ядерной накачке. Тем не менее в отличие от газовых сред попытки получить лазерную генерацию или усиление света при накачке осколками деления лазерной жидкости не увенчались успехом.

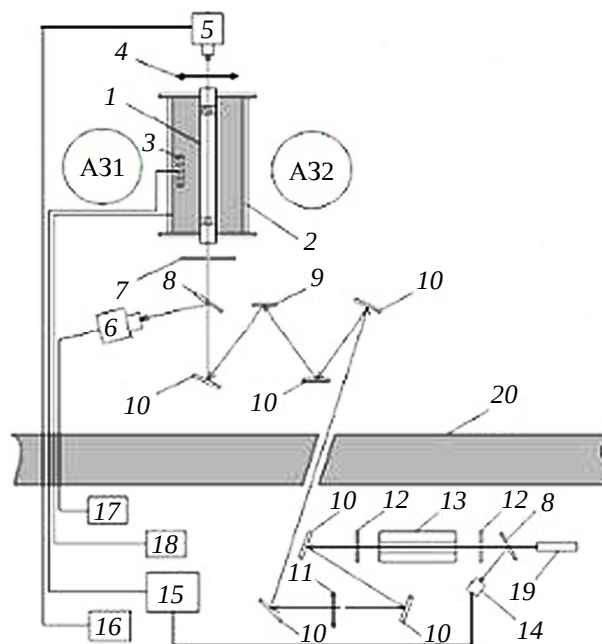
Наиболее вероятных причин этого может быть несколько. Первая — появление наведенных потерь во время действия импульса накачки за счет рассеяния света на микро неоднородностях среды, возникающих в результате образования паровых пузырьков в треках осколков деления [6]. Согласно расчетам рассеяние на паровых пузырьках экспоненциально снижается с ростом давления жидкости и при 2 МПа уменьшается примерно в 10 раз. Однако эксперименты показали [7], что наведенные осколками деления потери света с длиной волны 1,054 мкм при увеличении давления жидкости снижаются, но в 1,5—2 раза при повышении давления до 2,5 МПа. Тем не менее предполагается, что дальнейший рост давления позволит уменьшить наведенные потери до значений, при которых лазерная генерация станет достижима.

Вторая причина может быть связана с появлением макроскопических неоднородностей среды. Из-за характерной для жидкости большой термооптической постоянной возможно появление как радиальной, так и аксиальной неоднородности показателя преломления под действием излучения накачки, и в среде возникают макроскопические неоднородности типа термолинзы и термодинамика [12]. Так, при малой апертуре активного элемента появление термодинамика может приводить к потере лазерного излучения за счет отклонения пучка на стенку элемента. На возможность такого эффекта указывают эксперименты с зондированием возбужденной осколками деления урансодержащей жидкости с помощью лазерного пучка и позиционно-чувствительного фотодетектора [8, 9].

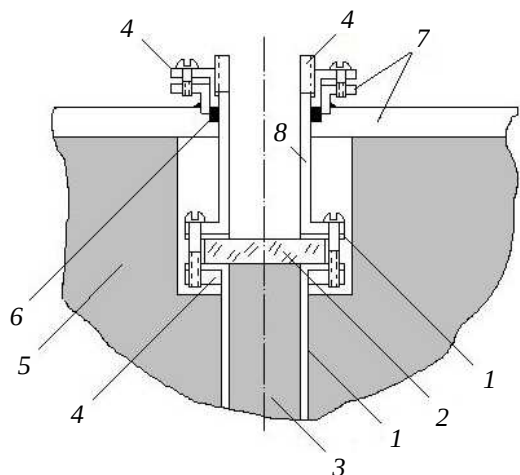
Настоящая работа посвящена дальнейшему исследованию причин рассеяния света при ядерной накачке жидких сред и поиску способов его уменьшения. С этой целью было измерено

пропускание лазерного пучка с длиной волны 1,054 мкм лазерной жидкостью $\text{POCl}_3\text{—SnCl}_4\text{—}^{235}\text{UO}_2\text{—Nd}^{3+}$ в активных элементах разной апертуры при давлении до 10,1 МПа в импульсном облучении на реакторе БАРС-6.

Экспериментальный метод. Эксперимент проводили в ГНЦ РФ — ФЭИ на двухзонном импульсном реакторе БАРС-6 стенда «Б» [13]. Схема эксперимента показана на рис. 1. Число делений в импульсе в каждой активной зоне составляло $\sim 10^{17}$ дел. Активный элемент, который представлял собой герметичную фторопластовую кювету с толщиной стенок 2,5 мм, снабженную торцевыми узлами с оптическими окнами и заполненную исследуемой жидкостью (без воздушных пузырьков), устанавливали на оси специального контейнера диаметром 150, длиной 300 мм из коррозионно-стойкой стали, заполненного замедлителем нейтронов (полиэтиленом). Контейнер выдерживал внутреннее давление до 15 МПа. Жидкость сжимали с помощью масла, нагнетаемого в контейнер по тру-



Р и с. 1. Схема эксперимента: 1 — активный элемент; 2 — контейнер; 3 — вакуумная камера деления КНТ-5; 4 — фокусирующая линза (только в опытах № 6, 7); 5 — калориметр № 1 (ИМО-2Н); 6 — калориметр № 2 (ИМО-2Н); 7 — диафрагма; 8 — светоделительная пластина; 9 — сферическое зеркало; 10 — плоское зеркало; 11 — собирающая линза; 12 — зеркало резонатора; 13 — квантрон зондирующего лазера; 14 — фотодиод; 15 — двухканальный запоминающий цифровой осциллограф TDS-1012; 16, 17 — блок регистрации калориметра № 1 и № 2 соответственно; 18 — компрессор; 19 — юстировочный He—Ne-лазер; 20 — биологическая защита (А31, А32 — активные зоны реактора БАРС-6)



Р и с. 2. Устройство торцевых узлов активного элемента и способ их герметизации во фланцах контейнера: 1 — фторопласт; 2 — кварц; 3 — лазерная жидкость; 4 — латунь; 5 — полиэтилен; 6 — маслостойкая резина; 7 — сталь; 8 — дюраль

бопроводу расположенным в измерительном зале компрессором на основе гидравлического домкрата грузоподъемностью 3 т. Для повышения эффективности передачи давления на заливном фторопластовом патрубке кюветы был предусмотрен тонкостенный участок длиной 10 мм с толщиной стенки 0,5 мм.

Устройство торцевых узлов активного элемента и способ их герметизации во фланцах контейнера показаны на рис. 2. Контейнер устанавливали посередине между активными зонами реактора. При этом ось контейнера располагалась на расстоянии 100 мм ниже оси, проходящей через центры активных зон, и перпендикулярно ей. Расстояние между активными зонами составляло 700 мм.

Зондирующий лазер располагался в измерительном зале и представлял собой работающий в режиме свободной генерации импульсный лазер с оптической накачкой с длиной волны излучения 1,054 мкм и энергией в импульсе до 1,5 Дж. Активной средой задающего лазера служила лазерная жидкость $\text{POCl}_3\text{—SnCl}_4\text{—Nd}^{3+}$ без урана. Лазер запускали либо вручную, либо системой синхронизации реактора через регулирующую задержку. Форма импульса генерации зондирующего лазера регистрировалась фотодиодом и записывалась цифровым осциллографом TDS-1012. Из измерительного зала пучок зондирующего лазера через широкоапертурную линзу с помощью системы поворотных плоских зеркал и сферического зеркала транспортиро-

вался в реакторный бокс на расстояние около 15 м и через диафрагму диаметром 4 мм подавался на вход активного элемента. На выходе он либо регистрировался калориметром ИМО-1, который в этом случае располагали в непосредственной близости от выходного окна контейнера (все опыты с элементом № 1), либо проходил через фокусирующую кварцевую линзу (фокусное расстояние 100 мм, диаметр 80 мм) и затем регистрировался ИМО-1. Диаметр входного окна калориметра был равен 14 мм. Перед входом в активный элемент часть пучка (~7%) с помощью делительной пластины направляли в калориметр-монитор ИМО-2. Для регистрации формы импульса накачки использовали вакуумную камеру деления, установленную в полиэтиленовом блоке под контейнером с активным элементом. Импульс с камеры деления записывался цифровым осциллографом.

Геометрические размеры исследованных активных элементов разной апертуры и основные параметры лазерной жидкости приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Размеры кювет и характеристики лазерной жидкости $\text{POCl}_3\text{—SnCl}_4\text{—}^{235}\text{UO}_2^{2+}\text{—Nd}^{3+}$

Параметр	Активный элемент	
	№ 1	№ 2
Кювета:		
диаметр, см	10	25
длина, см	200	100
Концентрация, 10^{20} см^{-3} :		
Nd	2,5	2,2
^{235}U	0,21	0,17
Время жизни уровня $^4\text{F}_{3/2} \text{Nd}^{3+}$, мкс	280	180

Результаты и обсуждение. Для каждого из активных элементов с разным давлением жидкости P регистрировали показания калориметров № 1 и 2, камеры деления и фотодиода при генерации импульсов реактором и зондирующим лазером. Импульсы реактора и лазера генерировали в разной последовательности, в том числе с задержкой Δt между максимумом импульса накачки и началом импульса зондирующего лазера. Фоновые показания калориметров измеряли во время реакторного импульса при отсутствии импульса лазера. Число делений в импульсе реактора составляло $(2,1 \pm 0,1)10^{17}$ за импульс. При этом средний по объему удельный энерговыход $E_{\text{уд}}$ осколков деления в жидкость

Таблица 2. Результаты измерений пропускания лазерного пучка активным элементом № 1, 2

Номер опыта	Показания ИМО-1, мДж	Показания ИМО-2, мДж	Импульс реактора	Импульс лазера	Δt , мкс	Давление, МПа	T — пропускание пучка возбужденной жидкостью	Примечания
Активный элемент № 1								
1	147	10	Нет	Есть	30	10	0,83 ± 0,07	Фон
2	150	10,2	Есть	»		10		
3	45	1,6	»	Нет		10		
4	121	11,5	Нет	Есть	10	0,98 ± 0,08		
5	158	12,5	Есть	»	130			
Активный элемент № 2								
6	120	5	Нет	Есть	85	3	0,29 ± 0,02	С линзой 4 (см. рис. 1)
7	69	6,5	Есть	»		3		С линзой 4 (см. рис. 1)
8		4,8	Нет	»		3		Отпечаток без линзы
9	35 (фон)	6	Есть	»	70	3	0,21 ± 0,02	То же
10	108	5,4	Нет	»		8		Без линзы
11	72	8	Есть	»		8		То же
12	45	1,6	»	Нет		8		Фон
13	90	5,5	Нет	Есть				Кварцевые окна
14	150	8,2	Есть	»	115		0,97 ± 0,08	То же

составлял $2,7 \pm 0,5$ и $1,5 \pm 0,4$ Дж/см³ элементов № 1 и 2 соответственно. Результаты измерений приведены в табл. 2.

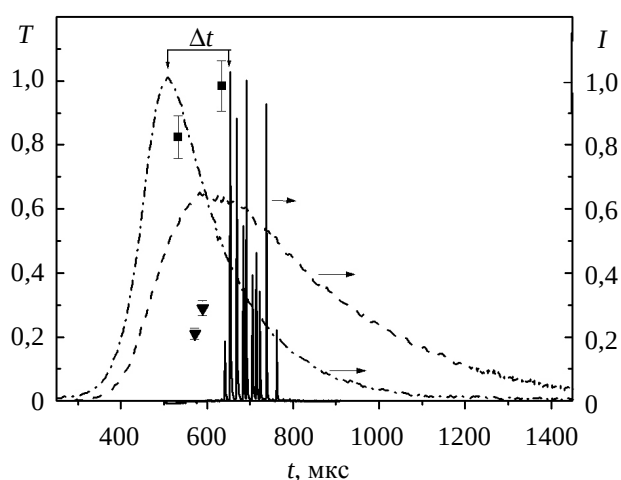
Введем обозначения: Q_1 , Q_2 — показания калориметра ИМО-1 при измерении энергии пучка зондирующего лазера, прошедшего через элемент с возбужденной жидкостью (во время реакторного импульса), и калориметра ИМО-2-монитора соответственно; Q_3 , Q_4 — показания ИМО-1 при измерении энергии пучка, прошедшего через элемент с невозбужденной жидкостью (перед реакторным импульсом), и ИМО-2-монитора соответственно; Q_{1b} , Q_{2b} — фоновые показания калориметров ИМО-1 и ИМО-2 при реакторном импульсе (зондирующий лазер выключен).

С учетом фона калориметров и возможной нестабильности воспроизведения энергии в разных импульсах зондирующего лазера для пропускания T лазерного пучка жидкостью, возбужденной осколками деления, можно записать

$$T = Q_4 (Q_1 - Q_{1b}) / Q_3 (Q_2 - Q_{2b}). \quad (1)$$

Результаты обработки экспериментальных данных, приведенных в табл. 2, в соответствии с выражением (1) показаны на рис. 3: для элемен-

та № 1 — опыты 1—3 и 4, 5, 3, для элемента № 2 — 6, 7, 9 (Q_{1b}), 12 (Q_{2b}) и 10—12. Погрешность получена из разброса серий измерений в дополнительных экспериментах без реакторного импульса. Для наглядности на рис. 3 показаны в относительных единицах характерные импульсы накачки и зондирующего лазера, регистриру-



Р и с. 3. Пропускание лазерного пучка на длине волны 1,054 мкм лазерной жидкостью при импульсном возбуждении осколками деления урана в активном элементе № 1 (■), 2 (▼), оциллограммы импульсов накачки (— · —), люминесценции жидкости (---) и зондирующего лазера (—)

емые вакуумной камерой деления и фотодиодом соответственно, а также измеренный в работе [3] импульс люминесценции среды с длиной волны 1,054 мкм, интенсивность которого пропорциональна заселенности верхнего рабочего уровня Nd^{3+} при возбуждении среды осколками деления.

На рис. 3 видно, что пропускание лазерного пучка жидкостью в элементе № 1 с апертурой 10 мм при давлении 10,1 МПа не превышает единицы. Учитывая результаты работы [6], можно сделать вывод, что увеличение давления более 2,5—3 МПа существенно не уменьшает наведенные осколками деления потери света в жидкости и дальнейшее его повышение не приводит к существенному росту пропускания света жидкостью на длине волны лазерной генерации.

Рассмотрим влияние апертуры на прохождение пучка зондирующего лазера через жидкость, возбужденную осколками деления. На рис. 3 видно, что с ростом апертуры активного элемента вместо ожидаемого увеличения пропускания лазерного пучка за счет снижения влияния потерь света из-за предполагаемого отклонения пучка на стенку элемента происходит уменьшение, причем значительное. Увеличение апертуры в 2,5 раза привело к уменьшению пропускания лазерного пучка возбужденной жидкостью примерно в 4 раза. Это неожиданный результат. Для его проверки были выполнены дополнительные эксперименты.

Из табл. 2 видно, что показания калориметра ИМО-1 при измерении энергии пучка зондирующего лазера, прошедшего через активный элемент № 2 с возбужденной жидкостью во время реакторного импульса (опыт № 7), значительно меньше показаний калориметра ИМО-1 при измерении энергии лазера до реакторного импульса (опыт № 6). Это могло быть связано, хотя и маловероятно, с отклонением зондирующего пучка от оптической оси системы за пределы входного зрачка диаметром 14 мм калориметра ИМО-1. Для проверки этого предположения в месте расположения входного зрачка калориметра ИМО-1 были сняты ожоговым методом два отпечатка лазерного пучка на копировальной бумаге до и в момент реакторного импульса (опыты № 8 и 9 соответственно). Оказа-

лось, что в обоих случаях диаметр отпечатка составлял $4,5 \pm 0,5$ мм, их форма не изменилась и они находились на оптической оси системы.

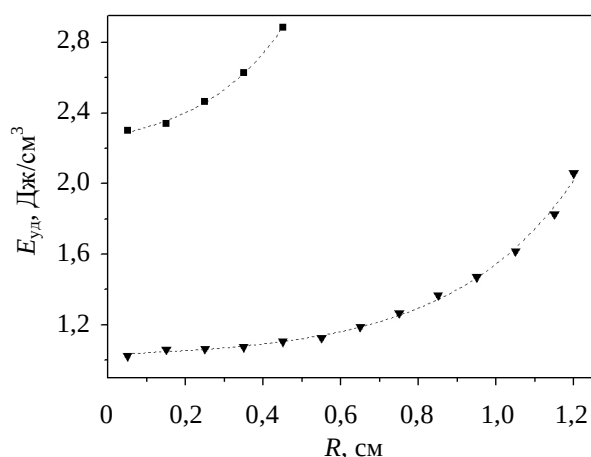
Другой причиной уменьшения пропускания лазерного пучка активным элементом № 2 могло быть снижение прозрачности фокусирующей линзы, установленной перед калориметром ИМО-1, в результате радиационного воздействия нейтронов и γ -квантов реакторного импульса. Однако без этой линзы результаты измерения пропускания (опыты № 10, 11) почти не изменились.

Пропускание лазерного пучка активным элементом № 2 могло уменьшиться и из-за наведенного реакторным излучением поглощения света оптическими окнами активного элемента. Для проверки этого предположения активный элемент № 2 был демонтирован из контейнера и в места расположения его оптических окон были установлены окна, изготовленные из той же кварцевой пластины, что и окна активного элемента № 2. Измерения (опыты № 13, 14) показали, что пропускание лазерного пучка оптическими окнами в момент реакторного импульса не изменилось и составило $0,97 \pm 0,08$. Таким образом, наведенное реакторным излучением поглощение света оптическими окнами не могло служить причиной существенного уменьшения пропускания лазерного пучка жидкостью в кювете с большой апертурой.

Поскольку кюветы активных элементов изготовлены из фторопласта, обладающего высоким диффузным отражением, результаты измерения пропускания лазерного пучка могут быть завышены за счет эффекта световода (выведения на детектор части света, рассеянного жидкостью), причем больше завышены для элемента с малым диаметром из-за геометрического фактора. Эффект световода оценили из измерений с активным элементом № 2. Совпадение отпечатков пучка с реакторным импульсом и без него (опыты № 9 и 8) свидетельствует о том, что эффект световода не может кардинально влиять на измерение пропускания лазерного пучка. Опыт № 6, 7 с линзой и № 10, 11 без линзы подтверждают, что если вклад от эффекта световода в пропускание лазерного пучка через фторопластовую кювету и есть, то он не превышает 30% (см. рис. 3, табл. 2).

Таким образом, уменьшение пропускания света лазерной жидкостью, возбужденной осколками деления урана, при увеличении апертуры активного элемента действительно есть и представляет собой физическое явление, природа которого пока не ясна. Очевидно, что разное пропускание света активными элементами № 1 и 2 может быть при различном состоянии жидкости в области прохождения зондирующего пучка.

Строго говоря, причины разного состояния жидкости есть. В частности, одна из них может быть связана с эффектом блокировки нейтронного потока ураном и особенно изотопом ^{35}Cl , имеющим высокую концентрацию в жидкости и достаточно большое сечение радиационного захвата тепловых нейтронов ~ 40 б [14]. Результаты расчета методом Монте-Карло радиального распределения удельного энерговклада $E_{\text{уд}}(R)$ для исследуемых активных элементов существенно различаются (рис. 4). В частности, удельный энерговклад на оси элемента (в области прохождения зондирующего пучка) в активном элементе № 2 в 2 раза меньше, чем в активном элементе № 1. Однако если учесть, что определяющие пропускание коэффициенты усиления и наведенного поглощения света согласно работам [5, 7] примерно пропорционально зависят от скорости удельного энерговклада и с его изменением компенсируются, то различия в энерговкладе на оси активных элементов № 1 и 2 не должны существенно влиять на прохождение зондирующего пучка.



Р и с. 4. Радиальное распределение удельного энерговклада осколков деления в лазерную жидкость для активного элемента № 1 (■), 2 (▼)

Радиальная неоднородность энерговклада в лазерной жидкости приводит к появлению термолинзы, которая может повлиять на измерение пропускания света. Расчеты фокусного расстояния для цилиндрической линзоподобной среды длиной l с учетом квадратичной зависимости коэффициента преломления от радиуса элемента согласно выражениям из работ [9, 15] показали, что в случае активного элемента № 1 формируется более короткофокусная линза, чем в активном элементе № 2, но в обоих случаях наименьшая длина фокуса была больше 1,5 м. Поскольку калориметр в эксперименте располагали от выходного окна активного элемента на расстоянии намного ближе фокусного расстояния, то формирование термолинзы также не должно влиять на результаты измерения пропускания.

Причиной наблюдаемого явления может служить рассеяние лазерного пучка на звуковых волнах плотности среды, возникающих из-за радиальной неоднородности энерговклада. При скорости звука в жидкости ~ 2000 м/с характерное время прохождения радиальной звуковой волны расстояния, равного диаметру активного элемента № 2, составляет около 10^{-5} с. За время действия импульса накачки $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ с звуковая волна успеет совершить около 50 радиальных проходов в активном элементе. При соответствующей амплитуде волны это может привести к заметному уменьшению интенсивности зондирующего пучка света за счет рассеяния. Можно показать, что для цилиндрической сходящейся волны ее амплитуда в приосевой области будет пропорциональна произведению радиальной неоднородности энерговклада $\Delta E = E_{\text{уд}}(R) - E_{\text{уд}}(0)$ и $\sqrt{R}$, где R — радиус активного элемента. Как видно на рис. 4, для элемента № 1 $\Delta E \sim 0,6$ Дж/см³, № 2 — $\Delta E \sim 1,1$ Дж/см³. Следовательно, амплитуда звуковой волны в приосевой области активного элемента № 2 будет примерно в 3 раза больше, чем у элемента № 1: $\Delta E_2 \sqrt{R_2} / \Delta E_1 \sqrt{R_1} \sim 3$. Поэтому потери света зондирующего пучка за счет рассеяния на радиальных звуковых волнах плотности среды в активном элементе № 2 будут значительно больше, его пропускание меньше, чем в активном

элементе № 1, что и наблюдается в эксперименте.

Возможно, именно это явление является причиной неудач в попытках получить лазерную генерацию при ядерной накачке урансодержащей лазерной жидкости $\text{POCl}_3\text{—SnCl}_4\text{—}^{235}\text{UO}_2^{2+}\text{—Nd}^{3+}$. Исходя из полученных в работе результатов, можно предложить два способа выравнивания энерговклада в урансодержащей лазерной жидкости: уменьшение апертуры активного элемента до минимально технически возможного ориентировочно 2—3 мм и обогащение естественного хлора лазерной жидкости изотопом ^{37}Cl . Сечение радиационного захвата нейтронов у этого изотопа примерно в 100 раз меньше, чем у ^{35}Cl , содержание которого в естественной смеси составляет 75%.

Заключение. Из работы следует, что необходимыми условиями для получения лазерной генерации при импульсной накачке неорганической жидкости $\text{POCl}_3\text{—SnCl}_4\text{—}^{235}\text{UO}_2^{2+}\text{—Nd}^{3+}$ осколками деления являются повышение давления жидкости до 2,5—3 МПа и уменьшение потерь света за счет рассеяния на радиальных звуковых волнах плотности среды. Уменьшения влияния звуковых процессов в жидкости можно добиться путем выравнивания радиального распределения энерговклада и снижения диаметра активного элемента.

В заключение авторы выражают признательность В.М. Калмыкову за изготовление деталей активных элементов, а также персоналу стенда «Б» за бесперебойную работу реактора БАРС-6.

Работа выполнена в рамках Государственного контракта № Н.4х.44.90.13.1122 от 30 мая 2013 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dyachenko P.P., Zrodnikov A.V., Pupko V.Ya. e.a. Conception of combined ICF and fission reactor-laser driver. — *Fus. Technol.*, 1991, v. 20, p. 969—976.
2. Дьяченко П.П., Фокин Г.Н. Запальный реактор и параметры импульса накачки в реакторно-лазерной системе. — *Атомная энергия*, 2012, т. 112, вып. 5, с. 277—282.
3. Dyachenko P.P., Kalinin V.V., Seregina E.A. e.a. Inorganic liquid laser doped with neodymium and uranyl. — *Laser&Particle Beams*, 1993, v. 11, p. 493—498.
4. Лапидус В.И., Добровольский А.Ф., Дьяченко П.П. и др. Эффективность накачки и время жизни уровня $^4\text{F}_{3/2}$ иона неодима в лазерной жидкости $\text{POCl}_3\text{—SnCl}_4\text{—UO}_2^{2+}\text{—Nd}^{3+}$ при импульсном облучении на реакторе БАРС-6. — *Квантовая электроника*, 2003, т. 33, с. 507—510.
5. Серегина Е.А., Добровольский А.Ф., Кабаков Д.В. и др. Исследование кинетики заселения лазерных уровней иона неодима в $\text{POCl}_3\text{—SnCl}_4\text{—UO}_2^{2+}\text{—Nd}^{3+}$ при накачке осколками деления. — Там же, 2009, т. 39, с. 705—713.
6. Серегина Е.А., Добровольский А.Ф., Дьяченко П.П. и др. Исследование с помощью лазерного излучения временной зависимости наведенного поглощения в жидкости, возбужденной осколками деления урана. — Там же, 2003, т. 33, с. 926—930.
7. Серегина Е.А., Добровольский А.Ф., Дьяченко П.П. и др. Влияние давления в лазерной среде на наведенные дополнительные потери в жидкостных лазерах с ядерной накачкой. — В сб.: *Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы*. Обнинск, ФЭИ, 2007, т. 1, с. 244—249.
8. Лапидус В.И., Дьяченко П.П., Семенова Н.Н., Серегина Е.А. Позиционно-чувствительный фотодетектор для изучения пространственно-временного распределения интенсивности излучения в лазерном пучке. — *Приборы и техника экспериментов*, 2001, № 3, с. 108—112.
9. Серегина Е.А., Добровольский А.Ф., Дьяченко П.П. и др. Термооптические характеристики урансодержащей лазерно-активной жидкости при возбуждении осколками деления: Препринт ФЭИ-2940, 2002.
10. Дюжов Ю.А., Кухарчук О.Ф., Полетаев Е.Д. и др. Лазерные характеристики Ag—Xe и He—Ag—Xe смесей при накачке осколками деления. — *Квантовая электроника*, 2010, т. 40, с. 11—18.
11. Мельников С.П., Сизов А.Н., Синянский А.А. Лазеры с ядерной накачкой. Саров, РФЯЦ — ВНИИЭФ, 2008.
12. Аникеев Ю.Г., Жаботинский М.Е., Кравченко В.Б. Лазеры на неорганических жидкостях. М.: Наука, 1986. 248 с.
13. Дьяченко П.П., Еловский О.А., Прохоров Ю.А. и др. Реакторно-лазерный комплекс Стенд «Б». — *Атомная энергия*, 2000, т. 88, вып. 6, с. 337—345.
14. Беланова Т.С., Игнатюк А.В., Пашенко А.Б., Плякин В.И. Радиационный захват нейтронов. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1986.
15. Малышев Б.Н., Салюк В.А. Действие эффективной линзы активного элемента на расходимость выходного излучения жидкостного ОКГ. — *Журн. техн. физики*, 1971, т. 40, с. 1690—1696.

Поступила в Редакцию 28.01.16