

07;12

Исследование порога генерации газового лазера с ядерной накачкой в зависимости от длительности нахождения лазерно-активной среды в корпусе лазерного модуля

© А.Н. Корзенов, А.В. Гаранин, С.Л. Турутин

Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики
607190 Саров, Нижегородская область, Россия
e-mail: adv@vniief.ru

(Поступило в Редакцию 13 марта 2007 г.)

Экспериментально показано, что увеличение длительности нахождения лазерно-активной смеси в корпусе лазерного модуля перед экспериментом за время от 60 до 120 min приводит к росту порога генерации и ухудшает энергетические параметры лазера. Предполагается, что негативное изменение энергетических характеристик лазера происходит из-за накопления примесных газов. Показано, что наличие примесей в разной степени влияет на рабочие характеристики рассмотренных лазерных сред.

PACS: 42.55.Lt

Введение

Проведенные в РФЯЦ–ВНИИЭФ эксперименты по получению лазерной генерации в смесях инертных газов атмосферного давления с накачкой активной среды осколками деления урана [1] представляет собой новый этап в исследованиях прямого преобразования ядерной энергии в лазерное излучение [2]. В РФЯЦ–ВНИИЭФ на базе импульсных ядерных реакторов создано несколько экспериментальных комплексов для проведения подобных исследований [3–5].

В газовых лазерах с ядерной накачкой (ЛЯН) возбуждение лазерной среды осуществляется осколками деления ядер урана, вылетающими из урановых слоев. Эти слои нанесены на внутреннюю поверхность стенок кюветы [1]. Обычно лазеры, возбуждаемые осколками деления, имеют либо форму протяженного полого цилиндра [3], либо прямоугольного канала [4–6]. В первом случае активный делящийся материал тонким слоем ($\delta_l \sim 1\text{--}10\ \mu\text{m}$) нанесен на внутреннюю поверхность цилиндрического корпуса лазера. Во втором случае он нанесен на две противоположные параллельные внутренние поверхности канала.

Одним из наиболее важных параметров работы ЛЯН является порог генерации. В связи с тем что существует прямая пропорциональная зависимость между плотностью потока нейтронов и удельной мощностью накачки, в качестве порога генерации принимают плотность потока тепловых нейтронов, при достижении которой возникает генерация лазерного излучения в возбуждаемой газовой среде.

На начальном этапе исследований большая часть экспериментов по поиску и оптимизации лазерных сред проводилась на импульсном лазерном комплексе ЛУНА-2М/ВИР-2М [3], где импульсный ядерный реактор ВИР-2М использовался в качестве генератора

нейтронов. На основе результатов этих экспериментов были выбраны параметры активной среды для модуля непрерывного действия ЛМ-4 [4] (состав, давление и скорость прокачки газовой смеси через лазерные каналы). На лазерном модуле ЛМ-4 было произведено более 30 пусков по исследованию проблем газовых ЛЯН (см., например, [7]). Так, в 1994 г. впервые в мире была продемонстрирована работа многоканального ядерно-лазерного устройства в непрерывном режиме с длительностью генерации лазерного излучения до 1.5 s. При этом длительность генерации ограничивалась лишь временем работы источника нейтронов. Результаты исследований показали правильность заложенных в работе модуля физических принципов и технических решений. Однако в последующих сериях экспериментов было установлено, что не во всех опытах получены ожидаемые величины порогов генерации и соответственно энергетические параметры. В числе основных предполагаемых причин авторы рассматривают:

- неоптимальное оптическое качество лазерной среды, обусловленное образованием в лазерных каналах газодинамических неоднородностей [8–10],
- наличие в газовой среде примесей, оказывающих негативное влияние на ее активные свойства и приводящих к увеличению порога генерации [11–14],
- неравномерное распределение по рабочему объему модуля газов, имеющих различную плотность, составляющих лазерно-активную газовую смесь.

В настоящей статье авторами рассматривается вопрос о влиянии длительности нахождения лазерно-активной смеси в рабочем объеме лазерного модуля ЛМ-4 до эксперимента на параметры получаемого лазерного излучения (порог генерации, энергию) ЛЯН. В предлагаемой работе представлен анализ изменения порогов генерации и энергии лазерного излучения, полученных на исследовательском комплексе ЛМ-4/БИГР [5–7].

Методика

Комплекс ЛМ-4/БИГР состоит из лазерного модуля ЛМ-4 и быстрого импульсного графитового реактора БИГР [4], который используется в качестве источника нейтронов для накачки лазерных сред. В экспериментах реактор генерировал нейтронные импульсы длительностью от 0.5 до 1.5 с с формой импульса, близкой к меандру.

Установка ЛМ-4 представляет собой четырехканальный газовый лазер непрерывного действия с возбуждением лазерной среды продуктами деления ядер урана-235. Лазерный модуль находится на подвижной тележке, которая при дистанционном управлении позволяет передвигать модуль и располагать его на заданном расстоянии от боковой поверхности активной зоны (АЗ) реактора.

Лазерный модуль ЛМ-4 состоит из рабочей зоны и прокачивающего устройства, которые перед экспериментом заполняются необходимой смесью газов. Внутри рабочей зоны размещена кассета с лазерными кюветами, расположенными в вертикальной плоскости. Кассета окружена замедлителем нейтронов из органического стекла. Каждая кювета со своими оптическими элементами, расположенными на внешних панелях, составляет лазерный канал. В экспериментах на модуле ЛМ-4 средняя скорость движения лазерной смеси в лазерных каналах составляла $\sim 7.0\text{--}8.5$ м/с.

Нанесенные металлические урановые слои (обогащенные по урану-235 $\sim 90\%$) имеют среднюю толщину примерно $\delta_U = 2.6 \mu\text{м}$. Со стороны газа на эти слои нанесена „прозрачная“ для осколков деления алюминиевая пленка толщиной $\sim 0.5 \mu\text{м}$, которая препятствует эжекции ядер урана-235 в лазерную газовую среду. Ширина лазерной кюветы 0.02 м определяется расстоянием между слоями урана. Высота кюветы — это внутренний размер лазерного канала вдоль направления движения лазерной смеси — составляет 0.06 м. Длина лазерной кюветы вдоль направления оптической оси равна 1 м. Резонатор этого лазера состоит из диэлектрических зеркал — глухого сферического с радиусом кривизны 20 м и полупрозрачного плоского.

В экспериментах были использованы лазерно-активные среды, составленные на смесях газов гелия (He), неона (Ne), аргона (Ar) и ксенона (Xe) в разных сочетаниях и с максимальным рабочим давлением до 0.1 МПа.

Экспериментальная часть

К особенностям конструкции лазерного модуля ЛМ-4 нужно отнести расположение замедлителя нейтронов из органического стекла ($\text{H}_8\text{C}_5\text{O}_2$) внутри откачиваемого объема. Примесные вещества: углекислый газ (CO_2), кислород (O_2), азот (N_2), вода (H_2O) и др., которые находятся в рабочем объеме, конденсируются и абсорбируются на его поверхности. Кроме того, наряду с адсорбированными и абсорбированными газами освобождаются молекулы $\text{H}_8\text{C}_5\text{O}_2$ самого материала замедлителя нейтронов.

С целью обеспечения необходимого состава газовой среды в каждом эксперименте менялась лазерная смесь газов. Однако в период времени от наполнения до импульса она находилась в постоянном контакте с материалом замедлителя. В зависимости от длительности подготовки эксперимента в рабочей смеси происходило накопление примесей. Можно предполагать, что скорость накопления примесей от времени имеет нелинейный характер. В дальнейших исследованиях предполагается установить эту зависимость путем отбора проб газовых смесей в количестве, достаточном для проведения статистических оценок. Вакуумная система модуля ЛМ-4 обеспечивает величину остаточного давления внутренней полости до 0.5 Па.

В ходе экспериментов проводились измерения мощности лазерного излучения, генерируемого модулем. Для этого использовались лавинные фотодиоды (ЛФД), фотоспротивления (ФСА) и калориметры ИМО-2Н. Пересчет сигналов производился с учетом чувствительности фотоприемников и коэффициентов потерь в оптическом тракте, которые были оценены теоретически и измерены в ходе подготовительных работ. При обработке сигналов с приемников ЛФД и ФСА определялись пороги генерации лазерного излучения. Перед экспериментами фиксировалось время заполнения лазерной среды и подготовки к пуску реактора. Контроль процентного состава газовой среды и количество примесных веществ в рабочем объеме ЛМ проводился путем отбора специальных проб и анализа их состава.

Результаты и их обсуждение

Аналізу подвергались данные, полученные на ЛМ-4/БИГР в период с 1994 по 2002 г. В итоге для представления результатов были отобраны три серии экспериментов с лазерными смесями с рабочим давлением до 0.1 МПа, а именно: Ar–Xe (100:1, при давлении 0.05 МПа), Ne–Ar–Xe (300:100:1, при давлении 0.1 МПа) и He–Ar–Xe (100:100:1, при давлении 0.1 МПа).

Реальный период подготовки к экспериментам на лазерном модуле ЛМ-4/БИГР составляет от 60 до 120 мин. На рис. 1 показаны зависимости величины плотности потока нейтронов тепловой части спектра, нормированного на плотность потока нейтронов в момент достижения порога генерации лазерного излучения, от времени нахождения смеси в лазерном модуле. Представленные на рис. 1 точками экспериментальные данные аппроксимированы линейной зависимостью, построенной методом наименьших квадратов. Эти результаты демонстрируют, что в указанные интервалы времени после запуска газовой смеси средняя скорость роста порога генерации составляет $\sim 1.5\%$ в минуту для смеси Ar–Xe и Ne–Ar–Xe и до $\sim 3.5\%$ в минуту для смеси He–Ar–Xe.

В табл. 1 представлены данные по минимальным порогам генерации, достигнутым на рассматриваемых смесях при длине волны лазерного излучения $1.73 \mu\text{м}$ [15,16].

Таблица 1. Минимальные пороги генерации тепловых нейтронов ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)

Смесь	Ar–Xe	He–Ar–Xe	Ne–Ar–Xe
ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ	$1 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{13}$	–
ФГУП РФЯЦ-ВНИИТФ	$6 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{14}$

Таблица 2. Содержание компонентов в пробах газовой смеси, %

Наименование компонента	Смесь Ar–Xe (0.05 МПа)	Смесь He–Ar–Xe (0.1 МПа)	Относительная погрешность, %
Аргон	99.5	52.9	± 0.5
Гелий	~ 0.02	47.4	
Ксенон	0.76	0.56	
Водород	0.04	0.05	± 10
Кислород	0.04	Менее 0.01	
Азот	0.2	0.04	
Диоксид углерода	Менее 0.004	0.005	
Метан	$7 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	± 15
Этан	$4.2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	
Ацетон	$1.6 \cdot 10^{-5}$	$1.2 \cdot 10^{-5}$	
Гептан	Менее $1 \cdot 10^{-5}$	$2.7 \cdot 10^{-5}$	± 20

Одним из способов понижения порогов генерации для газовых лазеров с ядерной накачкой является очистка газовых смесей. Так, например, в [15] сообщается, что применение очистки улучшало характеристики неоновом лазера на ~ 15 –20%.

Результаты проведенного анализа проб двух- и трехкомпонентной газовой смеси методом газовой хроматографии приведены в табл. 2. Пробы газовой смеси отбирались спустя 20 h после эксперимента. Из табл. 2 видно, что содержание посторонних газов в смеси Ar–Xe (0.05 МПа) на данный момент не превышает $\sim 0.3\%$ и в смеси He–Ar–Xe (0.1 МПа) $\sim 0.1\%$. При этом необходимо отметить, что в отношении органических примесей речь нужно вести о следах, поскольку доступная методика измерений не точна в достаточной степени.

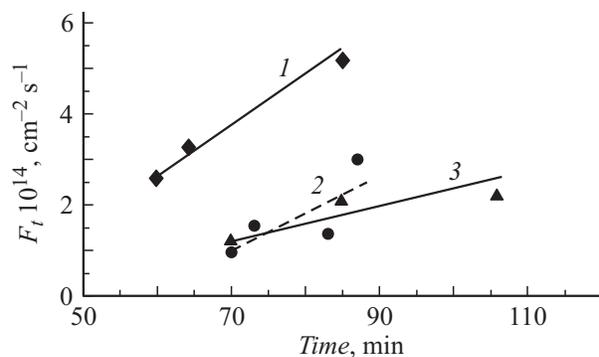
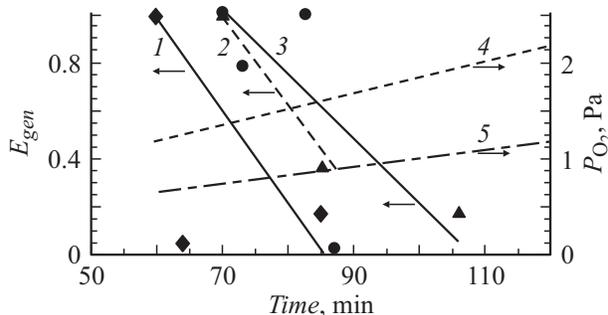
Данные табл. 2 отражают величину примесных газовых составляющих в объеме рабочей зоны ЛМ-4. Скорость натекания примесей на рассматриваемом промежутке времени оценивается следующими величинами: $\sim 2.1 \cdot 10^{-3}$ Pa/s для смеси Ar–Xe (0.05 МПа) и $\sim 1.4 \cdot 10^{-3}$ — для He–Ar–Xe (0.1 МПа). Более высокая скорость натекания в смесь Ar–Xe объясняется, очевидно, меньшим абсолютным давлением газовой смеси.

На рис. 2 иллюстрируется характер изменения энергии генерации исследуемых на модуле ЛМ-4 сред в зависимости от времени нахождения рабочей смеси в корпусе модуля. С учетом экспериментальных данных работ [11–14] и данных, представленных на рис. 1

и 2, можно сделать вывод о том, что установленное содержание примесных газов является значимым для рабочих параметров лазерного модуля ЛМ-4 и существует определенная зависимость порога генерации от времени нахождения смеси в корпусе модуля.

Одним из наиболее вредных газов для процесса генерации является кислород. Как показывают простые оценки, при начальной степени откачки объема лазерного модуля до остаточного давления 0.5 Pa парциальное давление остаточного кислорода составляет ~ 0.16 Pa. Из табл. 2 видно, что при опытах со смесью Ar–Xe (0.05 МПа) парциальное давление кислорода через 20 h достигает ~ 20.26 Pa. Для дальнейшего рассуждения нами принято предположение о линейном характере измерений на данном отрезке времени концентрации примесных газов в объеме модуля. Исходя из этого предположения парциальное давление кислорода через 60 min после напуска рабочей смеси равно ~ 1.16 Pa, а через 120 min — 2.17 Pa. Аналогичные расчеты для смеси He–Ar–Xe при давлении 0.1 МПа показывают, что парциальное давление кислорода через 60 min после напуска смеси ~ 0.66 Pa, а через 120 min — ~ 1.16 Pa.

Рис. 1 и 2 дают основания предположить, что негативное изменение энергетических характеристик лазера,

**Рис. 1.** Плотность потока тепловых нейтронов на пороге генерации: 1 — смесь He–Ar–Xe (0.1 МПа), 2 — Ar–Xe (0.05 МПа), 3 — Ne–Ar–Xe (0.1 МПа).**Рис. 2.** Относительное изменение энергии генерации от парциального давления кислорода: 1 — смесь He–Ar–Xe (0.1 МПа), 2 — Ar–Xe (0.05 МПа), 3 — Ne–Ar–Xe (0.1 МПа), 4 — парциальное давление кислорода для смеси Ar–Xe (0.05 МПа), 5 — парциальное давление кислорода для смеси He–Ar–Xe (0.1 МПа).

вызванное ростом порога генерации за время подготовки эксперимента, возникает из-за наличия вредных газовых примесей.

Заключение

Результаты проведенных исследований показывают рост величины порога генерации и снижение мощности генерации в зависимости от времени нахождения смеси в лазерном модуле. Снижение энергетических лазерных характеристик, отмеченное в последней серии экспериментов, скорее всего, произошло из-за наличия в газовой среде вредных газовых примесей.

Из полученных в работе результатов установлено, что наличие примесей в разной степени влияет на рабочие характеристики рассмотренных лазерных сред. Наиболее заметно влияние для среды с содержанием гелия He–Ar–Xe (100:100:1 при давлении 0.1 МПа). Менее выражено влияние примесей для смеси с неоном Ne–Ar–Xe (300:100:1 при давлении 0.1 МПа) и минимальное для смеси Ar–Xe (100:1 при давлении 0.05 МПа).

Вредные газовые примеси имеют энергетические уровни, располагающиеся между уровнями гелия и ксенона, что приводит к отбору части энергии возбуждения от гелия на атомы и ионы примесей. Аналогичные процессы присутствуют в смесях с неоном и аргоном. Основное отличие их от смеси He–Ar–Xe в том, что потенциал возбуждения неона и аргона ниже, чем у гелия. Можно предположить, что относительная доля энергии возбуждения, которую перехватывают атомы и ионы примесей в смеси He–Ar–Xe (100:100:1 при давлении 0.1 МПа), выше, чем у двух других исследованных смесей. По этой причине, видимо, и наблюдается более высокая скорость роста порога генерации от времени у смеси He–Ar–Xe.

Как и в работе [11], для исследуемых в этой работе газовых сред не был замечен эффект насыщения мощности генерации при уменьшении концентрации примесных газов. Однако надо заметить, что пределы изменения концентрации газовых примесей в данных экспериментах уже, чем в экспериментах [11]. Следует отметить также, что в отличие от результатов экспериментов вышеупомянутой работы замечен значительный рост порогов генерации при относительно небольшом увеличении концентрации примесей. Это отличие авторы связывают с суммированным влиянием примесей многокомпонентного состава.

В заключение следует сделать вывод о том, что соблюдение вакуумной гигиены на всех стадиях технологического цикла проведения эксперимента и контроль состава рабочей смеси, а также очистка лазерной смеси и хорошее перемешивание ее компонент непосредственно перед экспериментом позволяют улучшить энергетические характеристики ЛЯН и повторяемость экспериментальных результатов.

Можно предполагать, что сочетание перечисленных выше мероприятий и применение для каждой

конкретной рабочей среды оптимизированного теплогазодинамического режима прокачки позволит вплотную приблизить пороги генерации и мощность генерации квазинепрерывного лазерного модуля ЛМ-4 (или другого устройства подобного типа) на исследуемых смесях к величинам, достигнутым на лазерном модуле ЛУНА [6].

Список литературы

- [1] Воинов А.М., Довбыш Л.Е., Кривonosов В.Н., Мельников С.П., Казакевич А.Т., Подмошенский И.В., Снянский А.А. // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. Вып. 7. С. 422–424.
- [2] Sinyanskii A.A., Krivonosov V.N. // XII Int. Symp. on Gas Flow and Camical Lasers and High-Power Laser Conf. St. Petersburg, 1998. Vol. 3574. P. 440–448.
- [3] Voinov A.M., Dovbysh L.E., Krivonosov V.N., Melnikov S.P., Sinyanskii A.A. // Proc. 17th Int. Quantum Electronics Conf. Anaheim, USA, 1990. P. 348–350.
- [4] Богданов В.Н., Василенко А.Г., Жеребцов В.В., Турутин С.Л. и др. // Тр. 2-й Междунар. конф. „Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой“. Арзамас-16, 1995. Т. 2. С. 172.
- [5] Снянский А.А. // Тр. 3-й Междунар. конф. „Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой“. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2003. С. 377–387.
- [6] Sinyanskii A.A., Melnikov S.P. // Proc. SPIE. 1999. Vol. 3686. P. 43–55.
- [7] Patyanin S.V., Sinyanskiy A.A., Grigor'ev V.D., Korzenew A.N. et al. / The 5th Int. Conf. „Atomic and Molecular Pulsed Lasers“ Conf. Proc. Tomsk: Institute of Atmospheric Optics SB RAN, 2001. P. 20.
- [8] Боровков В.В., Лажинцев Б.В., Нор-Аревян В.А., Сизов А.Н., Снянский А.А., Федоров Г.И. // Тр. 2-й Междунар. конф. „Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой“, Арзамас-16, 1995. Т. 2. С. 399.
- [9] Корзенев А.Н., Лимарь Ю.М., Сизов А.Н., Снянский А.А. // Квант. электрон. 2005. Т. 35. № 9. С. 795–798.
- [10] Влох Г.В., Корзенев А.Н., Львов Л.В., Пикулев А.А., Фролова С.В. // Сб. тр. 2-й Междунар. конф. молодых ученых и специалистов „Оптика-2001“. СПб., 2001. С. 161.
- [11] Порхаев В.В. // Квант. электрон. 1998. Т. 25. № 12. С. 1095–1099.
- [12] Боровков В.В., Воронин В.В., Воронов С.Л., Лажинцев Б.В., Нор-Аревян В.А. // Тр. 2-й Междунар. конф. „Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой“. Арзамас-16, 1995. Т. 2. С. 246–251.
- [13] Мавлотов А.А., Миськевич А.И., Саламаха Б.С. // Тр. 2-й Междунар. конф. „Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой“. Арзамас-16, 1995. Т. 1. С. 318–328.
- [14] Tomizawa H., Wieser J., Ulrich A. // Тр. 3-й Междунар. конф. „Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой“. Снежинск, РФЯЦ-ВНИИТФ, 2003. С. 146–161.
- [15] Магда Э.П. // Тр. конф. „Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой“. Обнинск, 1992. Т. 1. С. 65–74.
- [16] Мельников С.П., Снянский А.А. // Тр. конф. „Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой“. Обнинск, 1992. Т. 2. С. 133–148.