

Лазеры с ядерной накачкой – устройства с прямым преобразованием ядерной энергии в лазерное излучение

Рассматриваются основные этапы и результаты работ, направленных на исследование лазеров с ядерной накачкой, а также на разработку и создание на их основе ядерно-лазерных устройств с прямым преобразованием ядерной энергии в лазерное излучение. Основное внимание уделяется исследованиям, выполненным во ВНИИЭФ при использовании импульсных реакторов.

**А. М. Воинов, В. Н. Кривоносов,
С. П. Мельников, А. А. Пикулев,
А. Н. Сизов, А. А. Синянский**

Введение

Обсуждение проблемы прямого преобразования ядерной энергии в лазерное излучение началось сразу после создания первых лазеров. С начала 1960-х гг. до настоящего времени развитие работ в этом направлении прошло несколько стадий, от первых предложений по использованию источников ядерной энергии для накачки лазеров до создания разнообразных лазеров с ядерной накачкой (ЛЯН). К ЛЯН относятся лазеры оптического диапазона спектра, которые возбуждаются непосредственно ядерными излучениями или с помощью промежуточных устройств, например ядерно-оптических преобразователей (ядерно-возбуждаемая плазма, сцинтилляторы). Наиболее подробно различные проблемы ЛЯН рассмотрены в монографии [1].

Интерес к проблеме прямого преобразования ядерной энергии в лазерное излучение объясняется возможностью создания мощных непрерывных ядерно-лазерных установок, которые получили название реакторов-лазеров (РЛ). В активной зоне РЛ, состоящей из делящегося вещества и лазерной среды, происходит прямое преобразование выделившейся ядерной энергии в лазерное излучение, минуя промежуточную стадию тепловой энергии.

Наибольшие успехи достигнуты для газовых ЛЯН, хотя во ВНИИЭФ и других лабораториях проводились также исследования возможности создания ЛЯН на конденсированных средах. Серьезным препятствием на пути создания ЛЯН на конденсированных средах являются их радиационные повреждения: образование смещенных атомов и центров окраски в твердотельных лазерах, радиолиз и образование парогазовых пузырьков на треках ядерных частиц в жидкостных лазерах.

Экспериментальные исследования газовых ЛЯН проводились при использовании двух источников ядерных излучений – ядерных реакторов и ядерных взрывных устройств. Сотрудники ВНИИЭФ внесли существенный вклад в развитие работ по обоим направлениям. В первом случае лазеры работали в квазинепрерывном или непрерывном режимах (длительности импульсов накачки и лазерной генерации составляли $\geq 0,1$ мс), во втором случае – в импульсном режиме при длительностях импульсов ~ 10 нс.

Характеристики импульсных ЛЯН, возбуждаемых γ -излучением ядерного взрыва, здесь не обсуждаются. Информация об этих исследованиях содержится в работах [1–5]. В данной обзорной статье кратко рассмотрены вопросы, связанные с поиском активных сред и исследованиями газовых ЛЯН, работающих в квазинепрерывном или непрерывном режимах. Более подробно результаты исследований по различным проблемам импульсных и непрерывных ЛЯН, выполненных в России и за рубежом, представлены в монографии [1].

1. Краткая историческая справка

Экспериментальные и теоретические исследования ЛЯН проводились в основном в России и США. В табл. 1 представлены участники работ и хронология относящихся к ЛЯН основных событий, причем в некоторых случаях приводятся даты этих событий (если они достоверно известны авторам), а не даты их публикаций. Публикации иногда появлялись значительно позже, так как примерно до конца 1980-х гг. исследования ЛЯН в некоторых лабораториях проводились по закрытым программам.

Таблица 1

Основные этапы развития ЛЯН

Год	Событие	Научная организация (авторы)
1964	Расчетные оценки ядерно-лазерного устройства на смеси He-Ne ($\lambda = 633$ нм)	УАС (Herwig L. O.)
1965–1972	Эксперименты в СССР и США по поиску активных сред ЛЯН (твердотельные и жидкостные среды; газовые смеси He-Ne, CO ₂ -N ₂ -He, Ne-O ₂ , ³ He-Hg, Ar, Ne, Xe, Kr и др.), которые не дали положительного результата	ANL, NL, UI, UF, NASA, GA et al. (Eerkins J. W., Miley G. H., Guyot J. C., Schneider R. T., Matovich E., Derr V. E. et al.); ВНИИЭФ (Воинов А. М., Казакевич А. Т., Кривоносов В. Н., Костенко М. Ф., Карюк В. М., Сизов А. Н., Синянский А. А. и др.); МГУ, ИАЭ (Андрияхин В. М., Письменный В. Д., Хвостонов В. Е. и др.)
1972	Первые успешные эксперименты по созданию ЛЯН (смесь He-Xe, $\lambda \approx 3$ мкм)	ВНИИЭФ (Синянский А. А., Воинов А. М., Казакевич А. Т., Мельников С. П., Довбыш Л. Е.); ГОИ (Подмошенский И. В.)
1973	Эксперименты по накачке смеси SF ₆ -C ₂ H ₆ (LANL) и газообразного ксенона (LLNL) γ -излучением ядерного взрыва	LANL (Lyons P. B., Clarke J. S., Metzger D. S.); LLNL (Ebert P. J., Ferderber J. L. et al.)
1974	Предложение о возможности создании реактора-лазера	ФИАН (Гудзенко Л. И., Яковленко С. И.)
1974–1976	Цикл экспериментальных исследований семейства ЛЯН на ИК-переходах атомов Xe, Kr и Ar (получение КПД до 2 %)	ВНИИЭФ (Воинов А. М., Кривоносов В. Н., Мельников С. П., Синянский А. А. и др.); ГОИ (Подмошенский И. В.)

Год	Событие	Научная организация (авторы)
1975	Первые успешные эксперименты в США по созданию ЛЯН: СО-лазер (5,1–5,6 мкм) и лазер на смеси He-Xe (3,51 мкм)	Sandia (McArthur D. A., Tollefsrud P. B.); LANL, UF (Helmick H. H., Fuller J. L., Schneider R. T.)
1977–1984	Разработка и создание мощных HF- и XeF-лазеров, возбуждаемых γ -излучением ядерного взрыва	ВНИИЭФ (Боношкин Е. К., Вараксин В. В., Лажинцев Б. В., Моротов А. П., Лахтиков А. Е., Павловский А. И. и др.)
1979–1982	Изучение генерации в ЛЯН на парах Cd (442, 534 и 538 нм) при накачке продуктами реакции $^3\text{He}(n, p)^3\text{H}$ и осколками деления урана	МИФИ (Миськевич А. И., Ильяшенко В. С., Саламаха Б. С., Степанов В. А. и др.); ВНИИТФ (Магда Э. П., Крыжановский В. А., Семков Л. В. и др.); ВНИИЭФ (Мельников С. П., Синянский А. А.)
1979–2013	Теоретические и экспериментальные исследования газодинамических процессов в ЛЯН	ВНИИЭФ (Сизов А. Н., Боровков В. В., Лажинцев Б. В., Пикулев А. А., Синянский А. А. и др.);
1988–1993		Sandia (Torczynski J. R., Neal D. R. et al.)
1994	Получение непрерывной генерации в режиме прокачки газа при накачке Хе-лазера осколками деления урана	ВНИИЭФ (Воинов А. М., Лажинцев Б. В., Покало А. Н., Порхаев В. В., Сизов А. Н., Синянский А. А., Турутин С. Л. и др.)
1996	Первый ЛЯН ультрафиолетового диапазона спектра (смесь He-N ₂ -H ₂ , $\lambda = 391$ нм)	ВНИИТФ (Барышева Н. М., Бочков А. В., Магда Э. П., Крыжановский В. А. и др.)
1999	Запуск демонстрационного образца импульсной реакторно-лазерной установки	ФЭИ (Гулевич А. В., Дьяченко П. П., Зродников А. В. и др.)
1986–2014	Разработка установки ИКАР – модели непрерывного реактора-лазера	ВНИИЭФ (Воинов А. М., Влох Г. В., Кривоносов В. Н., Лимарь Ю. М., Никитин И. А., Сизов А. Н., Синянский А. А., Турутов В. И. и др.)
2002–2014	Расчетные и экспериментальные исследования по сложению излучения лазерных каналов в многоканальных ЛЯН	ВНИИЭФ (Пикулев А. А., Синянский А. А., Соснин П. В., Цветков В. М.)
2011	Получение высоких энергетических параметров для ЛЯН на переходе атома Хе с $\lambda = 2,03$ мкм в импульсном режиме: энергия (мощность) – 520 Дж (1,3 МВт), КПД 3 %.	ВНИИТФ (Загидулин А. В., Бочков А. В., МIRONENKO В. В., Софиенко Г. С.)

Примечание: UAC – United Aircraft Corporation (США); ANL – Argonne National Laboratory (США); NL – Northrop Laboratories (США); UI – University of Illinois (США); UF – University of Florida (США); NASA – NASA Langley Research Center (США); GA – General Atomic (США); ВНИИЭФ – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (Саров); МГУ – Московский государственный университет (Москва); ИАЭ – Институт атомной энергии им. И. В. Курчатова (Москва); ГОИ – Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова (Санкт-Петербург); LANL – Los Alamos National Laboratory (США); LLNL – Lawrence Livermore National Laboratory (США); ФИАН – Физический институт им. П. Н. Лебедева АН СССР (Москва); Sandia – Sandia National Laboratories (США); МИФИ – Московский инженерно-физический институт (Москва); ВНИИТФ – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики (Снежинск); ИОФАН – Институт общей физики АН СССР (Москва); ФЭИ – Физико-энергетический институт им. А. И. Лейпунского (Обнинск).

В России работы по проблемам ЛЯН начались в конце 1960-х гг. практически одновременно в трех институтах – ВНИИЭФ (Саров), ИАЭ им. И. В. Курчатова (Москва) и Институте ядерной физики МГУ (Москва). В качестве нейтронных источников использовались импульсные ре-

акторы ВНИИЭФ и ИАЭ. Примерно с середины 1970-х гг. исследования по проблемам ЛЯН стали проводить в МИФИ (Москва), с конца 1970-х гг. – во ВНИИТФ (Снежинск), а с начала 1980-х гг. – в ФЭИ (Обнинск). В теоретических исследованиях ЛЯН участвовали сотрудники ФИАН (Москва) и ИОФАН (Москва).

Во ВНИИЭФ в конце 1960-х гг. для поиска активных сред ЛЯН и изучения их характеристик была создана группа, состоявшая в основном из выпускников Московского инженерно-физического института: Л. Е. Довбыш, В. М. Карюк, М. Ф. Костенко, В. Н. Кривоносов, С. П. Мельников, А. Н. Сизов, А. А. Синянский. Руководство этими работами на различных этапах исследований осуществляли А. М. Воинов, А. Т. Казакевич, А. А. Синянский. Большое внимание развитию работ по проблемам ЛЯН уделяли академики Ю. Б. Харитон и А. И. Павловский. Существенную помощь на первом этапе поисковых исследований оказывал И. В. Подмошенский (ГОИ им. С. И. Вавилова) – фактически научный консультант группы молодых исследователей. Решение об организации работ по изучению проблем ЛЯН именно во ВНИИЭФ было закономерным, так как в тот период ВНИИЭФ являлся одной из немногих организаций, обладающих разнообразными импульсными ядерными реакторами [6].

За рубежом экспериментальные и теоретические исследования ЛЯН проводились в основном в США (см. табл. 1), причем первые предложения по ЛЯН и первые экспериментальные исследования начались несколько раньше, чем в России. Наиболее существенный вклад в разработку и изучение характеристик ЛЯН за рубежом внесли Sandia National Laboratories, University of Illinois, NASA Langley Research Center, University of Florida. Отдельные исследования в области ЛЯН были проведены во Франции (Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas), Китае (Institute of Nuclear Physics and Chemistry of CAEP) и Японии (University of Tokyo, Tokyo Institute of Technology).

Первые успешные эксперименты по накачке лазеров ядерными излучениями были выполнены в 1972 г. во ВНИИЭФ на импульсном реакторе ВИР-2 при возбуждении смеси Не-Хе осколками деления урана. Авторами научного отчета, в котором сообщалось о создании первого ЛЯН, являлись А. М. Воинов, Л. Е. Довбыш, А. Т. Казакевич, С. П. Мельников, А. А. Синянский (ВНИИЭФ) и И. В. Подмошенский (ГОИ им. С. И. Вавилова). Информация об этих экспериментах появилась в обзорном докладе [7] на Международной конференции ЛЯН-94, а первая статья в открытой печати с более поздними результатами выполненных во ВНИИЭФ исследований по ЛЯН была опубликована в 1979 г. [8]. В связи с этими обстоятельствами патент за первый в мире лазер с ядерной накачкой был выдан авторам опубликованной в 1975 г. работы [9], в которой сообщалось о получении генерации при накачке молекулярного СО-лазера осколками деления урана в экспериментах на импульсном реакторе SPR-II (США).

Большинство исследований относится к поиску ЛЯН и изучению характеристик их активных сред. Основные усилия были направлены на получение максимальной эффективности преобразования поглощенной ядерной энергии в лазерное излучение (η_l) и низких порогов генерации (q_{th}). Максимальные значения η_l и наиболее низкие пороги генерации были зарегистрированы для лазера на ИК-переходах атома Хе: $\eta_l = 2-3\%$ (ВНИИЭФ, 1976 г.; Sandia, 1989 г.; ВНИИТФ, 1990 г.), $q_{th} \sim 0,02 \text{ Вт/см}^3$ (ВНИИЭФ, 1985 г.).

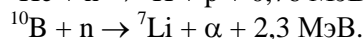
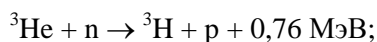
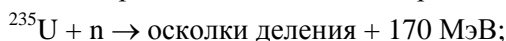
Важное место в проблеме ЛЯН занимают вопросы, связанные с особенностями накачки газовых сред тяжелыми заряженными частицами и развитием оптических неоднородностей. Расчетно-теоретические, а затем и экспериментальные исследования такого рода были начаты во ВНИИЭФ в 1979 г. Аналогичные исследования в США начались несколько позже.

Кроме работ, связанных с поиском ЛЯН и изучением их характеристик, следует отметить другие направления, относящиеся к разработке мощных ЛЯН и установок типа РЛ:

- исследование свойств ядерно-возбуждаемой плазмы (трековая структура плазмы, кинетика плазменных процессов, люминесцентные характеристики);
- выбор радиационно стойких оптических и конструкционных материалов для ЛЯН;
- разработка и создание различных ядерно-лазерных устройств;
- разработка технологии изготовления тонкопленочного уранового топлива (радиатор осколков деления и топливо для РЛ);
- выбор оптимального варианта конструкции РЛ и создание его экспериментального образца;
- оценка возможных применений РЛ.

2. Способы и источники накачки

В экспериментах по поиску активных сред и изучению характеристик квазинепрерывных и непрерывных ЛЯН в качестве нейтронных источников использовались ядерные реакторы. Непосредственное возбуждение лазерных сред в этом случае осуществлялось продуктами экзотермических ядерных реакций, протекающих при взаимодействии нейтронов с ядрами ^{235}U , ^3He и ^{10}B :



Газообразный изотоп ^3He входит в состав активной лазерной среды, а ^{235}U и ^{10}B наносятся в виде тонких слоев на внутреннюю поверхность лазерной кюветы (рис. 1). Чаще всего использовались урановые слои, оптимальная толщина которых $\sim 0,5R_f$, где $R_f = 5-10$ мкм – пробег осколка деления в материале слоя (U , UO_2 , U_3O_8). В случае объемного источника накачки неоднородность распределения энерговклада по объему лазерной кюветы вызвана поглощением тепловых нейтронов в ^3He и снижением энерговклада в пристеночной области из-за ухода продуктов реакции (^1H , ^3H) на стенки кюветы. При использовании слоев ^{235}U и ^{10}B оптимальные условия возбуждения определяются соотношением поперечного размера лазерной кюветы и длины пробега осколков деления или α -частиц в газовой среде, которая составляет для различных газов при атмосферном давлении 1–10 см.

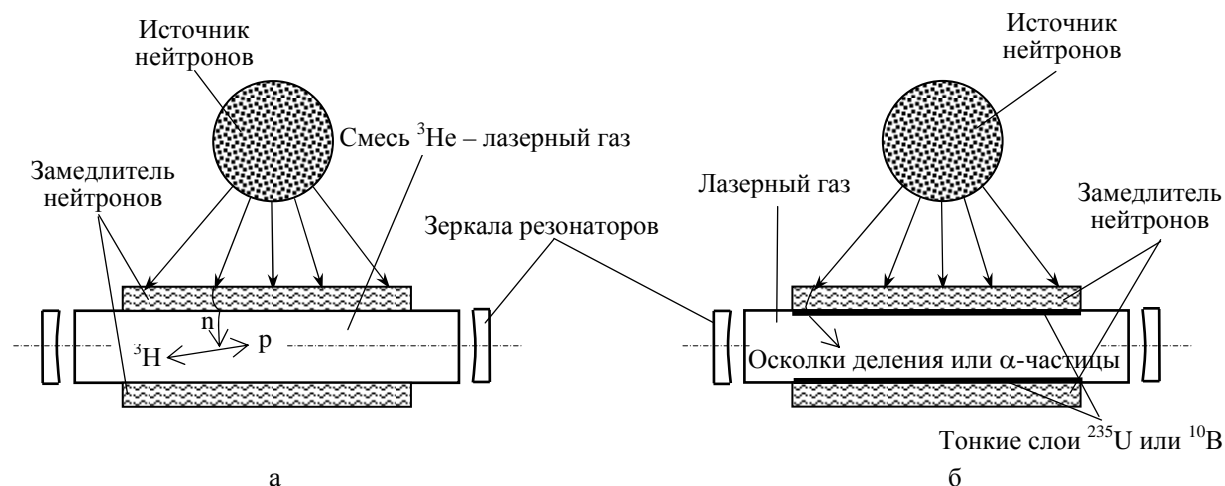


Рис. 1. Способы возбуждения газовых сред ЛЯН: а – объемный источник накачки; б – поверхностный источник накачки

Практически все экспериментальные исследования ЛЯН были выполнены при использовании аperiodических импульсных реакторов [6], которые отличаются составом и конструкцией активных зон, длительностью и флюенсом нейтронного импульса, объемом и конфигурацией пространства для облучения, частотой повторения импульсов. Длительности нейтронных импульсов варьируются от 30 мкс до ~0,1 с при плотности потока нейтронов в экспериментальных каналах $10^{17} - 10^{19} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и нейтронных флюенсах $10^{13} - 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

В разное время для исследований ЛЯН в России использовались импульсные реакторы ВИР-1, ВИР-2, ТИБР, БР-1, БИГР (ВНИИЭФ), ИИН-3 (ИАЭ), ЭБР-Л (ВНИИТФ), БАРС-6 (ФЭИ), а за рубежом – близкие по характеристикам импульсные реакторы типа Godiva, SPR, TRIGA, ACRR, APRF и др. В табл. 2 приведены характеристики некоторых из этих реакторов, а также указаны эксперименты с ЛЯН, которые на них проводились.

Таблица 2

Импульсные реакторы, использовавшиеся для исследований ЛЯН

Тип реактора	Реактор (лаборатория)	$\tau_{1/2}$, мс	Q , МДж	Φ_{max} , 10^{14} см^{-2}	Применение
Реакторы на быстрых нейтронах	ТИБР (ВНИИЭФ)	0,5	8	10	ЛЯН на переходах атомов Ar, Kr, Xe
	БР-1 (ВНИИЭФ)	0,05–0,08	12	10	Газовые ЛЯН с накачкой быстрыми нейтронами
	БАРС-1 (МИФИ)	0,05	2	5	ЛЯН на переходах иона Cd^+
	ЭБР-Л (ВНИИТФ)	0,2	4	3,5	ЛЯН на переходах атомов Ne, Ar, Xe, Cd, Hg, ионов Cd^+ , Zn^+ и молекулярного иона N_2^+
	БАРС-5 (ВНИИТФ) (две активные зоны)	0,04	7(×2)	10	ЛЯН на переходах атома Xe и Ar
	БАРС-6 (ФЭИ) (две активные зоны)	~0,2	3(×2)	~3	ЛЯН на переходах атома Xe
	БИГР (ВНИИЭФ)	$2,5 - 10^5$	300	120	Непрерывный ЛЯН на переходах атома Xe
	Godiva-IV (LANL)	0,03	2	3	ЛЯН на переходах атомов Xe
	SPR-II (Sandia) SPR-III (Sandia)	0,04 0,08	4 10	8 6	ЛЯН на переходах атомов Ne, Ar, Xe, иона Hg^+ и молекулы CO; измерение усиления на УФ переходе молекулы XeF
	APRFR (NASA)	0,07	5	5	ЛЯН на переходах атомов Ar, Kr, Xe, Cl и молекулы CO
	CALIBAN (Франция)	0,06	1,8	3,4	ЛЯН на переходах атома C
	CFBR-II (Китай)	0,19	0,4	0,9	ЛЯН на переходах атома Xe
Реакторы на тепловых и промежуточных нейтронах	ИИН-3 (ИАЭ)	~1	~10	5	Поиск генерации на переходах иона Hg^+
	ВИР-2 и ВИР-2М (ВНИИЭФ)	3–30	60	7	ЛЯН на переходах атомов Ne, Ar, Kr, Xe, C, N, O, Cl, ионов Cd^+ и Zn^+
	ИГРИК (ВНИИТФ)	2,5	60	15	ЛЯН на переходах атома Xe
	TRIGA (UI)	~10	~30	5–10	ЛЯН на переходах атомов Ne, Xe, N, C; измерение усиления на УФ переходе молекулы XeF и др.
	ACRR (Sandia)	7,0	300	60	ЛЯН на переходах атома Xe

Примечание: $\tau_{1/2}$ – длительность импульса на половине высоты; Q – максимальное энерговыделение в активной зоне реактора; Φ_{max} – максимальный флюенс нейтронов внутри активной зоны.

Первоначально импульсные реакторы разрабатывались для испытаний различных материалов и электронных устройств внутри или вблизи активных зон, поэтому большинство из них не приспособлены для проведения сложных лазерных экспериментов. Исключение составляют, пожалуй, специально разработанные для исследований ЛЯН реактор ЭБР-Л, двухзонный реактор БАРС-6, а также удачно сконструированный и позднее приспособленный для экспериментов с ЛЯН водный реактор ВИР-2М.

В экспериментах по поиску лазерных сред для ЛЯН использовались, как правило, импульсные реакторы на быстрых нейтронах типа БИР, БР-1, ЭБР, Godiva, SPR с небольшой по размеру (~30 см) активной зоной, изготовленной из металлического ^{235}U или его сплавов, и длительностью реакторного импульса 50–100 мкс. Это объясняется тем, что такие реакторы обеспечивают максимальные плотности потоков нейтронов и, соответственно, максимальные удельные мощности накачки, тем самым облегчая достижение порога генерации в ЛЯН. К недостаткам при использовании импульсных реакторов с металлическими АЗ следует отнести большую пространственную неоднородность нейтронного потока, что ограничивает длину лазерных кювет до ~50 см. Исключением являются двухзонные реакторы БАРС-5 и БАРС-6, при использовании которых можно достаточно равномерно облучать лазерные кюветы длиной до 150 см.

Лазерные кюветы размещались вблизи поверхностей активных зон импульсных реакторов или внутри этих зон. Различные варианты размещения ЛЯН в экспериментах с использованием импульсных реакторов на быстрых нейтронах показаны на рис. 2. Максимальные удельные мощности накачки газовых сред $\sim 5 \cdot 10^3 \text{ Вт/см}^3$ достигаются при размещении лазерных кювет внутри активных зон (рис. 2, б, г). Отметим, что в экспериментах на стационарных ядерных реакторах удельная мощность накачки газовых сред не превышает 1 Вт/см^3 , что существенно ограничивает возможности поиска лазерных сред для ЛЯН.

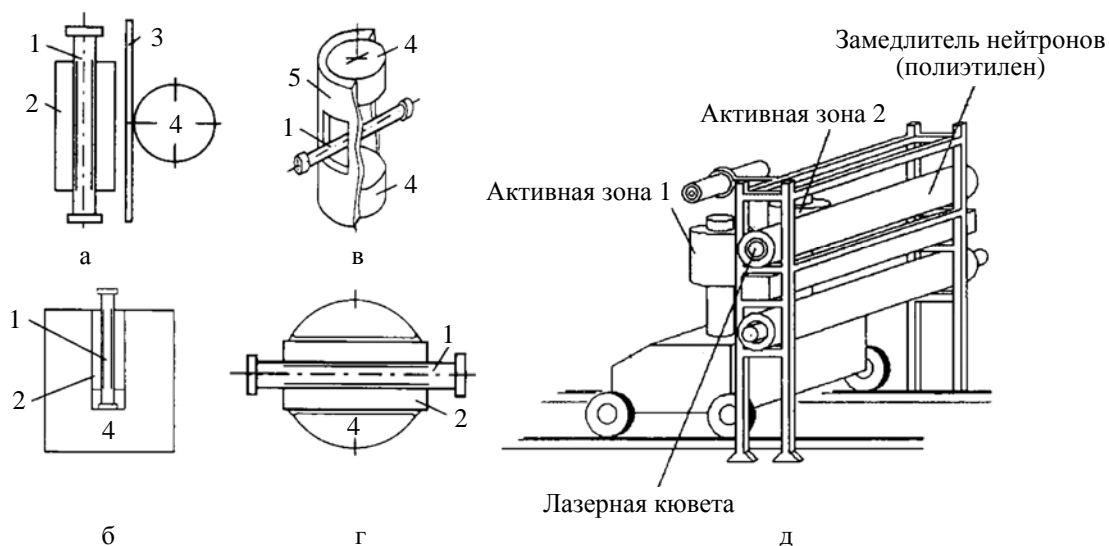


Рис. 2. Варианты размещения лазерных устройств в экспериментах на быстрых импульсных реакторах (1 – ЛЯН; 2 – замедлитель нейтронов; 3 – кадмиевый экран; 4 – активная зона реактора; 5 – отражатель нейтронов): а – размещение ЛЯН рядом с активной зоной реактора (реакторы ТИБР, Godiva-IV, SPR-II, III, APRF); б – ЛЯН с замедлителем внутри активной зоны (реактор SPR-II, эксперименты по измерению усиления на УФ-переходах молекулы XeF); в – размещение ЛЯН без замедлителя внутри активной зоны в экспериментах по накачке ЛЯН быстрыми нейтронами (реактор БР-1); г – специализированная установка ЭБР-Л; д – специализированная установка на основе двухзонного реактора БАРС-6

Оптимизацию конструкции ЛЯН (состав и параметры лазерной среды, устройство резонатора, способы отвода избыточного тепла) с целью выбора наиболее оптимального варианта ячейки ядерно-лазерной установки непрерывного или квазинепрерывного действия удобнее проводить с использованием импульсных ядерных реакторов на тепловых или промежуточных нейтронах, в состав активной зоны которых введен замедлитель: реактор ВИР-2М с активной зоной из раствора солей ^{235}U в воде; бассейновый реактор TRIGA и его модификация ACRR, твэлы которых изготовлены из сплава уран – цирконий – водород. Для этих реакторов характерна большая длительность нейтронного импульса (1–50 мс) при максимальном флюенсе нейтронов $\sim 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, а также возможность проводить лазерные эксперименты с кюветами длиной до 200 см.

Кроме достаточно простых конструкций ЛЯН (см. рис. 1), предназначенных для поиска активных сред ЛЯН и изучения их характеристик, существуют и более сложные ядерно-лазерные устройства. Они представляют собой, как правило, элементы конструкции многоканальных РЛ и предназначены для изучения особенностей их работы. Для изучения многоканальных ЛЯН во ВНИИЭФ был создан экспериментальный комплекс ЛМ-4/БИГР и ведутся работы по созданию ядерно-лазерной установки на основе реактора ИКАР-500, представляющей собой макет РЛ [1, 10]. Во ВНИИТФ и ФЭИ разрабатываются многоканальные установки ЛИРА [1, 11] и «Стенд Б» [1, 12]. Из опубликованных зарубежных работ можно отметить выполненные в лабораториях Sandia эксперименты на реакторе ACRR с использованием крупногабаритного лазерного модуля ALEC (Advanced Laser Excitation Cavity) [1, 13].

3. Кинетика плазменных процессов и механизмы генерации ЛЯН

Образование инверсной населенности уровней в активных средах ЛЯН происходит в результате плазмохимических реакций в низкотемпературной плазме высокого давления, образованной ионизирующими излучениями. Иногда такую плазму называют ядерно-возбуждаемой плазмой.

Плазма, образующаяся при торможении в газе атмосферного давления высокоэнергетичных заряженных частиц, является термодинамически неравновесной. Плазму такого типа, где концентрация электронов существенно превышает равновесное значение, называют переохлажденной или рекомбинационной. В ядерно-возбуждаемой плазме (в отличие от газоразрядной плазмы с ионизационным типом неравновесности) большинство электронов имеют энергии, близкие к тепловой, и ключевую роль в кинетике заряженных частиц играют рекомбинационные процессы.

Как показывают многочисленные исследования, отличия в энергетических спектрах электронов, а также ценах образования электронов, ионов, возбужденных атомов при воздействии на газовую среду различных видов ионизирующих частиц (тяжелые заряженные частицы, быстрые электроны, γ -кванты) несущественны. Поэтому для анализа механизмов генерации и расчета характеристик ЛЯН, возбуждаемых тяжелыми заряженными частицами и быстрыми электронами, можно использовать одни и те же кинетические модели.

Активной средой газовых ЛЯН чаще всего являются двойные смеси $A-B$, где A – буферный газ с высоким потенциалом ионизации и возбуждения, B – лазерная примесь (1–10 %) с более низким потенциалом ионизации и возбуждения. Схема основных плазменных процессов в двойной смеси показана на рис. 3.

Основными каналами передачи энергии от ионов и атомов буферного газа A атомам примеси B являются: процесс перезарядки $A^+(A_2^+) + B \rightarrow (B^+)^* + A(2A)$, реакция Пеннинга

$A^* + B \rightarrow (B^+)^* + A + e$ (если энергия возбужденного атома A^* выше потенциала ионизации атома B) или передача возбуждения $A^* + B \rightarrow B^* + A$. Как показывают результаты исследований, верхние лазерные уровни атомов или ионов примеси B могут заселяться за счет любого из этих трех процессов.

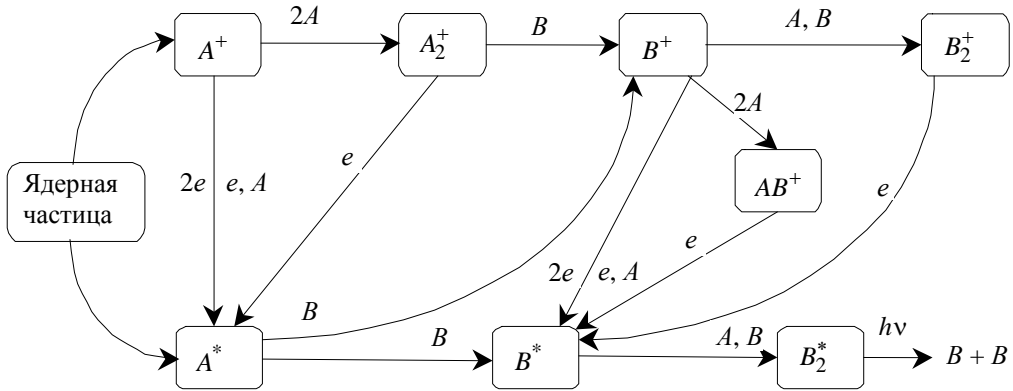


Рис. 3. Схема основных плазменных процессов в двойной смеси A-B

В плазме высокого давления основным видом ионов являются молекулярные ионы A_2^+ , B_2^+ , AB^+ , которые образуются в результате тройных процессов $A^+(B^+)+2A(A,B) \rightarrow A_2^+(B_2^+,AB^+)+A$. Нейтрализация плазмы происходит в результате рекомбинационных процессов, среди которых в зависимости от конкретных условий могут преобладать либо процессы тройной рекомбинации атомарных ионов $A^+(B^+)+2e(e,A) \rightarrow A^*(B^*)+e(A)$, либо процессы диссоциативной рекомбинации $A_2^+(B_2^+,AB^+)+e \rightarrow A^*(B^*)+A(B,A)$. Из рекомбинационных процессов главным каналом заселения верхних лазерных уровней атомов B являются процессы диссоциативной рекомбинации молекулярных ионов B_2^+, AB^+ с электронами.

Механизмы образования инверсной населенности уровней в основных типах ЛЯН, установленные в результате исследований во ВНИИЭФ и других лабораториях, кратко представлены в табл. 3. Следует отметить, что ЛЯН, которые исследовались в экспериментах на импульсных реакторах, имеют непрерывные механизмы генерации, так как характерные времена плазменных процессов, ответственных за образование инверсной населенности лазерных уровней, существенно меньше длительностей реакторных импульсов (импульсов накачки).

В ядерно-возбуждаемой плазме вслед за начальной стадией образования ионов и высоко-возбужденных атомов возникает последовательность плазмохимических процессов, которая стремится вернуть ее в равновесное состояние. При этом происходит преимущественное заселение возбужденных состояний «сверху вниз» за счет процессов рекомбинации и других релаксационных процессов. Поэтому для ЛЯН целесообразно введение предельного КПД (η_{\max}) как отношения энергии лазерного кванта $h\nu$ к энергетическим затратам на образование одной первичной активной частицы (иона или возбужденного атома буферного газа):

$$\eta_{\max} = (1 + f^*/f^+)hv/w_i = (f^+ + f^*)hv/q, \quad (1)$$

где w_i – энергетическая цена образования пары ион – электрон в буферном газе; f^+ , f^* – скорости образования ионов и возбужденных атомов при облучении среды ядерными частицами (для инертных газов $f^*/f^+ \approx 0,5$); q – удельная мощность накачки. Например, при использовании гелия в качестве буферного газа и работе ЛЯН в видимой области спектра имеем $w_i = 45$ эВ, $hv \approx 2$ эВ и $\eta_{\max} \approx 7\%$.

Таблица 3

Механизмы образования инверсной населенности уровней в ЛЯН

Активная среда	Длина волны генерации, мкм	Заселение верхних лазерных уровней	Расселение нижних лазерных уровней
<i>ИК лазеры на переходах nd-(n+1)p атомов B = Xe, Kr и Ar (n = 5,4,3 для Xe, Kr, Ar соответственно)</i>			
He-Xe, Kr, Ar; Ar-Xe; He-Ne(Ar)-Xe; Xe, Kr	26 линий в диапазоне 1,15–3,51	$B_2^+ + e \rightarrow B^*(n,d) + B$; $AB^+ + e \rightarrow B^*(n,d) + A$	«Тушение» при столкновениях с атомами A и B
<i>Лазер видимого диапазона на переходах 3p–3s атома Ne</i>			
He-Ne-M; Ne-M (M = Ar, Kr, Xe, H ₂)	0,585; 0,703; 0,725	$Ne_2^+ + e \rightarrow Ne^*(3p) + Ne$	$Ne^*(3s) + M \rightarrow M^+ + e + Ne$
<i>Лазеры на смесях инертных газов с парами металлов</i>			
He-Cd	Ион Cd ⁺ (0,442; 0,534; 0,538; 0,807; 0,853)	$He^+ + Cd \rightarrow (Cd^+)^* + He$ $He_2^+ + Cd \rightarrow (Cd^+)^* + 2He$ $He^* + Cd \rightarrow (Cd^+)^* + He + e$	Радиационный распад и (или) столкновительное «тушение»
He-Cd	Атом Cd (1,43; 1,65)	$Cd_2^+ + e \rightarrow Cd^* + Cd$	Радиационный распад и (или) столкновительное «тушение»
He-Zn	Ион Zn ⁺ (0,748)	$He^+ + Zn \rightarrow (Zn^+)^* + He$ $He_2^+ + Zn \rightarrow (Zn^+)^* + 2He$ $He^* + Zn \rightarrow (Zn^+)^* + He + e$	Радиационный распад
He-Hg	Ион Hg ⁺ (0,615)	$He^+ + Hg \rightarrow (Hg^+)^* + He$	Радиационный распад и (или) столкновительное «тушение»
He-Xe-Hg-H ₂	Атом Hg (0,546)	$He_2^+ + e \rightarrow Hg^* + Hg$	«Тушение» молекулами H ₂
<i>Лазер на переходах молекулярного иона N₂⁺ (B → X)</i>			
He-N ₂ -H ₂	0,391; 0,428	$He_2^+ + N_2 \rightarrow N_2^+(B) + 2He$	$N_2^+(X) + H_2 \rightarrow N_2H^+ + H$

Активная среда	Длина волны генерации, мкм	Заселение верхних лазерных уровней	Расселение нижних лазерных уровней
<i>Лазеры на переходах атомов С, N, O, Cl</i>			
He(Ne, Ar)-CO, CO ₂ , N ₂ , O ₂ , Cl ₂ , CCl ₄	С (0,833; 0,940; 1,45); N (0,859; 0,863; 0,905; 0,939); O (2,65; 2,76); Cl (1,59; 2,45)	Механизм генерации окончательно не установлен. Предлагались следующие процессы заселения верхних уровней: 1) диссоциативное возбуждение: $A^* + R_2 \rightarrow R^* + R$ (A^* – метастабильный атом инертного газа, R_2 – молекулярный газ); 2) ион-ионная рекомбинация: $A^+ (A_2^+) + R^- \rightarrow R^* + A(2A)$; 3) тройная рекомбинация $R^+ + e + M \rightarrow R^* + M$ ($M = e, A$)	
<i>Лазер на колебательных переходах молекулы СО</i>			
СО	5,1–5,6	Механизм генерации не установлен. В качестве процессов заселения верхних лазерных уровней рассматривались реакции рекомбинации ионов $(CO)_2^+$ или кластерных ионов $CO^+(CO)_n$ с электронами, а также прямое возбуждение при столкновениях молекул СО с плазменными электронами	

Выражение (1) записано для случая, когда в образовании верхних лазерных уровней участвуют как ионы, так и возбужденные атомы буферного газа. Если в заселении верхних лазерных уровней участвуют лишь ионы буферного газа, то выражение для η_{\max} имеет более простой вид:

$$\eta_{\max} = hv/w_i = f^+ hv/q. \quad (2)$$

В отличие от квантового КПД газоразрядных лазеров предельный КПД для ЛЯН не зависит от расположения верхнего лазерного уровня относительно основного состояния.

Значение η_{\max} возрастает с увеличением энергии кванта лазерного излучения или при уменьшении w_i . Естественно, что реальный КПД лазера с ядерной накачкой будет зависеть не только от η_{\max} , но и от ряда других параметров: соотношения скоростей релаксационных плазменных процессов, селективности процесса заселения верхнего лазерного уровня, скорости расселения нижнего лазерного уровня. Таким образом, выбор активных сред с высоким значением η_{\max} является необходимым, но недостаточным условием для создания эффективных ЛЯН.

В заключение отметим, что последовательное заселение возбужденных состояний в ЛЯН «сверху вниз» позволяет, в принципе, организовать каскад лазерных переходов. В этом случае появляется возможность получить одновременную генерацию на нескольких линиях в различных диапазонах спектра и увеличить КПД.

4. Результаты исследований активных сред ЛЯН

Известные к настоящему времени газовые ЛЯН излучают в широком диапазоне оптического спектра 390–5600 нм примерно на 50 переходах атомов Хе, Kr, Ar, Ne, С, N, Cl, I, O, Hg, Cd, ионов Cd^+ , Zn^+ , Hg^+ , молекулы СО и молекулярного иона N_2^+ [1]. Основные результаты ис-

следований активных сред ЛЯН, выполненных во ВНИИЭФ, приведены в табл. 4. Для изучения ЛЯН во ВНИИЭФ в разное время применялись импульсные реакторы ВИР-1, ВИР-2 и ВИР-2М, ТИБР-1М, БР-1, БИГР [6].

Таблица 4

Характеристики лазерных сред с ядерной накачкой (ВНИИЭФ)

Атом (ион)	λ , мкм	Смесь	p , атм	P_l , Вт	η_l , %	$F_{th} \cdot 10^{-14}$, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$F_{max} \cdot 10^{-15}$, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Реактор
Xe	1,73	He-Xe	2	80	0,2	4,0	1,1	ВИР-2
	1,73	Ar-Xe	0,5	500	2,2	0,1	1,1	ВИР-2
	1,73	He-Ar-Xe	1	410	2,5	0,1	1,1	ВИР-2
	2,03	He-Ar-Xe	1	700	1,0	0,6	2,1	ВИР-2М
	2,03	Ar-Xe	0,25	–	–	0,015	2,5	ВИР-2М
	2,48	He-Xe	1	–	–	–	26	ТИБР-1М
	2,65	He-Xe	5	2000	0,8	10	26	ТИБР-1М
	2,63; 2,81	Kr-Xe	0,35	150	0,2	0,03	2,5	ВИР-2М
	2,63; 2,65	Ar-Xe	0,5	230	2,0	0,1	1,1	ВИР-2
	2,65	He-Xe	3	250	1,2	0,6	1,1	ВИР-2
	2,65	He-Ne-Xe	1,5	520	0,6	1,2	2,5	ВИР-2М
	2,65	He-Ar-Xe	1	320	0,5	0,1	2,2	ВИР-2М
	2,65	Ne-Ar-Xe	1,1	570	0,6	0,4	2,5	ВИР-2М
	3,11 (возможно 3,37)	Ar-Xe	0,5	–	–	–	1,1	ВИР-2
3,51	Xe	0,6	90	0,1	0,8	2,5	ВИР-2М	
Kr	1,78	He-Kr	2	50	0,3	0,6	1,1	ВИР-2
	2,52	He-Kr	2	110	0,6	2,6	1,1	ВИР-2
	3,07	He-Kr	2	40	0,2	1,7	1,1	ВИР-2
	1,78; 1,87; 2,19	He-Kr	2	120	0,2	0,29	2,5	ВИР-2М
	1,78; 1,87; 2,19	He-Ne-Kr	1	140	0,2	0,19	2,5	ВИР-2М
	2,52; 3,07	He-Kr	2	420	0,6	3,2	2,5	ВИР-2М
	2,19; 2,86; 3,07	Ne-Kr	1	100	0,1	0,68	2,5	ВИР-2М
	2,19; 2,52, 2,86; 3,07	He-Ne-Kr	1	460	0,6	1,2	2,5	ВИР-2М
2,63	Kr	0,25	2	–	0,2	2,5	ВИР-2М	
Ar	1,15; 1,19	He-Ar	2	250	0,1	100	26	ТИБР-1М
	1,27	He-Ar	1	10	–	5,0	2,1	ВИР-2М
	1,69; 1,79	He-Ar	2	390	0,6	3,2	2,1	ВИР-2М
	1,69; 1,79	Ne-Ar	1	140	0,2	0,9	2,1	ВИР-2М
	2,10	He-Ar	2	220	0,3	6,3	2,5	ВИР-2М
	2,06; 2,10; 2,21	Ne-Ar	1	110	0,15	1,2	2,5	ВИР-2М
	2,40	He-Ar	1	–	–	–	26	ТИБР-1М
	2,40; 2,87	He-Ar	2	190	0,25	8,4	2,5	ВИР-2М
	2,21; 2,31; 2,40	Ne-Ar	1	60	0,1	1,3	2,5	ВИР-2М
	2,31; 2,40; 2,87	He-Ne-Ar	1,3	140	0,15	2,0	2,5	ВИР-2М
Ne	0,585	(He)-Ne-Ar(Kr, Xe)	2	35	0,1	6,0	2,5	ВИР-2М
C	0,834	Ne-CO	0,75	6	<0,01	3,6	2,4	ВИР-2М
	0,941	Ne-Ar-CO	0,75	120	0,3	3,7	2,4	ВИР-2М

Атом (ион)	λ , мкм	Смесь	p , атм	P_l , Вт	η_l , %	$F_{th} \cdot 10^{-14}$, см ⁻² · с ⁻¹	$F_{max} \cdot 10^{-15}$, см ⁻² · с ⁻¹	Реактор
O	2653; 2760	He-Ne-O ₂ (CO, NO)	2	30	0,05	3,0	2,5	ВИР-2М
N	0,859; 0,863	Ne-N ₂	0,25	5	<0,01	12	2,4	ВИР-2М
	0,905	Ne-N ₂	0,25	20	0,05	15	2,4	ВИР-2М
Cl	1,59	He-Ne-CCl ₄ (CHCl ₃)	2	130	0,2	0,2	2,2–2,5	ВИР-2М
	2,45	He-Ne-CCl ₄	2	5	<0,01	10	2,2–2,5	ВИР-2М
Cd ⁺	0,442	³ He- ¹¹⁶ Cd	1,5	12	0,05	50	10	ВИР-2М
	0,534; 0,537	³ He- ¹¹⁶ Cd	1,1	–	–	50	10	ВИР-2М
Zn ⁺	0,748	³ He-Zn	1,1	2	–	17	10	ВИР-2М

Примечание: p – давление активной среды; P_l – мощность лазерного излучения (мощность генерации); η_l – эффективность преобразования поглощенной ядерной энергии в лазерное излучение; F_{th} – средняя по длине лазерной кюветы плотность потока тепловых нейтронов, при которой достигается порог генерации (пороговая плотность потока тепловых нейтронов); F_{max} – средняя по длине кюветы плотность потока тепловых нейтронов в максимуме реакторного импульса.

Основной объем работ по изучению активных сред ЛЯН был выполнен при использовании экспериментального комплекса [14] на базе водного реактора ВИР-2М с энерговыделением в АЗ до 60 МДж и длительностью нейтронного импульса ≥ 3 мс. В состав комплекса входят лазерные установки ЛУНА-2М, ЛУНА-2П и ЛЯН-2Т, а также методики для изучения спектрально-люминесцентных, энергетических и других параметров ЛЯН. Возбуждение газовых сред осуществлялось осколками деления урана (ЛУНА-2М, ЛУНА-2П) и продуктами ядерной реакции ³He(n,p)³H (ЛЯН-2Т). Каждая из этих установок состоит из двух идентичных по конструкции и условиям облучения лазерных кювет. Установки ЛУНА-2М и ЛУНА-2П предназначены для изучения параметров газовых ЛЯН при комнатной температуре (ЛУНА-2П может работать в режиме прокачки газовых смесей), а установка ЛЯН-2Т – для ЛЯН на смесях инертных газов с парами металлов при температурах до 1000 К. Фотография одной из установок, расположенных под АЗ реактора, приведена на рис. 4.



Рис. 4. Лазерная установка ЛУНА-2М под активной зоной реактора ВИР-2М

4.1. ИК-лазеры на переходах атомов Хе, Кг и Ар

Как показали исследования, выполненные во ВНИИЭФ и в других лабораториях, максимальными среди ЛЯН энергетическими параметрами обладают лазеры на переходах атомов Хе, Кг и Ар. Генерация происходит в ИК-области спектра, причем наиболее интенсивные лазерные линии принадлежат переходам $nd-(n+1)p$ атомов Хе, Кг и Ар ($n = 5, 4, 3$ для Хе, Кг, Ар соответственно).

Наиболее высокие энергетические параметры были зарегистрированы для ЛЯН на переходах атома Хе. Активные среды Хе-лазера представляют собой смеси Не-Хе, Ар-Хе, Кг-Хе, Не-Ар-Хе, Не-Ар-Хе и чистый Хе при давлениях ≤ 6 атм. Гелий, неон, аргон и криптон являются буферными газами, а концентрация ксенона составляет 1–10 %. В зависимости от условий экспериментов (давление и состав смесей, мощность накачки, параметры зеркал резонаторов) генерация в ЛЯН на переходах атома Хе наблюдается на различных переходах $5d-6p$ в диапазоне спектра 1,7–3,5 мкм. Для линий с длинами волн $\lambda = 1,73; 2,03$ и 2,65 мкм, которые начинаются с общего верхнего уровня $5d[3/2]_1^0$, получены максимальные энергетические параметры: мощность лазерного излучения $P_l \leq 2,5$ кВт, $\eta_l = 2-3$ %. Для этих же линий наблюдались минимальные пороги генерации при плотностях потока тепловых нейтронов $F_{th} \leq 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ($q_{th} \leq 0,2 \text{ Вт/см}^3$). Самый низкий порог генерации при $F_{th} = 1,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ зарегистрирован для смеси Ар-Хе ($\lambda = 2,03$ мкм). Такие низкие пороги генерации позволяют использовать для накачки лазера на смеси Ар-Хе нейтронное излучение не только импульсных, но и стационарных ядерных реакторов.

Эффективность преобразования поглощенной мощности накачки в лазерное излучение (или КПД) – важнейший показатель для всех лазеров. В случае ЛЯН максимальными КПД преобразования поглощенной ядерной энергии в лазерное излучение обладают лазеры на переходах атомов инертных газов, причем самые высокие $\eta_l \geq 1$ % зарегистрированы для лазеров на переходах атома Хе (1,73; 2,03 и 2,65 мкм) и атома Ар (1,27 и 1,79 мкм). В табл. 5 сопоставлены результаты, полученные в различных лабораториях, а также приведены расчетные значения предельных КПД (η_{max}). Для сравнения в табл. 5 включены данные по КПД, полученные в России и за рубежом при возбуждении газовых сред электронными пучками. Из табл. 5 следует, что в некоторых случаях реальный КПД (η_l) приближается к предельному, что свидетельствует о незначительных потерях энергии в плазмохимических реакциях и высокой селективности конечного процесса заселения верхних лазерных уровней.

Таблица 5

Максимальные КПД (η_l) лазеров на переходах атомов Хе и Ар [1]

Атом	Среда	λ , мкм	Экспериментальные значения η_l , %				η_{max} , %
			Осколки деления урана			Электронный пучок	
			ВНИИЭФ	ВНИИТФ	Sandia		
Хе	He-Xe	2,65	1,2	0,15	–	1,6	1,6
	Ar-Xe	1,73	2,2	2,1	5,6	1,5 2,6	3,8
	Ar-Xe	2,63; 2,65	2,0	–	–	–	2,5
	He-Ar-Xe	1,73	2,5	1,7	3,0	–	4,0
	He-Ar-Xe	2,03	1,0	1,5	3,3	1,1	3,4
	He-Ar-Xe	2,65	0,5	0,9	2,0	–	2,6
Ар	He-Ar	1,79	0,6	1,2	1,4	1,4	2,3
	He-Ar	1,27	–	–	1,1	–	3,3

4.2. Лазеры видимого диапазона на переходах атома Ne

В спектрах атомов инертных газов имеется ряд интенсивных линий, принадлежащих переходам $(n + 1)p - (n + 1)s$ атомов инертных газов ($n = 5, 4, 3, 2$ соответственно для Хе, Кг, Аг, Ne), которые заканчиваются на метастабильных состояниях $(n + 1)s$. Эффективность заселения верхних уровней $(n + 1)p$ в ядерно-возбуждаемой плазме очень высока, поэтому эти переходы являются перспективными для поиска лазерной генерации. Однако для получения генерации на переходах $(n + 1)p - (n + 1)s$ в непрерывном режиме необходима высокая скорость расселения $(n + 1)s$ -уровней, что можно, в принципе, обеспечить с помощью дополнительных «тушащих» примесей. Такая схема была реализована в неоновом ЛЯН на переходах $3p - 3s$ атома Ne на линиях 585,3; 703,2 и 724,5 нм. «Тушение» нижних $3p$ -уровней атома Ne осуществлялось за счет реакции Пеннинга: $Ne^*(3p) + M \rightarrow M^+ + Ne + e$ ($M = Ar, Kr, Xe, H_2$).

Впервые накачка неоновых лазера ядерными излучениями была осуществлена во ВНИИЭФ на реакторе ВИР-2М в 1985 г. сразу же после первых сообщений об успешной накачке этого лазера электронным пучком. Полученные в различных лабораториях (ВНИИЭФ, ВНИИТФ, Sandia, University of Illinois) для неоновых ЛЯН эффективности преобразования $\eta_l \sim 0,1$ % существенно ниже, чем в случае ЛЯН на ИК-переходах атомов Хе, Кг и Аг, что объясняется особенностями кинетики процессов заселения и «тушения» лазерных уровней.

4.3. Лазеры на парах металлов

Смеси инертных газов с парами металлов в качестве активных сред ЛЯН представляют интерес, в первую очередь, в связи с возможностью получения генерации в видимой и ультрафиолетовой (УФ) областях спектра. Во ВНИИЭФ возможность использования смесей инертных газов с парами металлов (Li, Na, Mg, Hg, Cd и др.) в качестве активных сред ЛЯН была рассмотрена в 1975–1976 гг.

Наиболее детальные исследования ЛЯН на парах металлов (Hg, Cd, Zn) были выполнены в России (МИФИ, ВНИИТФ, ВНИИЭФ), хотя первый ЛЯН на парах металлов (смесь He-Hg, $\lambda = 615$ нм) был создан в лаборатории Sandia. Максимальные энергетические параметры ($P_l = 1$ кВт, $\eta_l = 0,4$ %) получены во ВНИИТФ на импульсном реакторе ЭБР-Л при накачке смеси He-Cd ($\lambda = 441,6$ нм) осколками деления урана.

4.4. Другие лазерные среды

Из других типов активных сред ЛЯН можно отметить смеси He, Ne, Ar с молекулярными газами CO, CO₂, N₂, NO, O₂, Cl₂, CCl₄ и др., при использовании которых генерация происходит на переходах атомов C, N, O и Cl. Наиболее подробно характеристики таких ЛЯН были изучены во ВНИИЭФ. При накачке газовых смесей ядерными излучениями была получена генерация на переходах атомов C ($\lambda = 833,5; 940,6$ и 1454 нм), N ($\lambda = 859,4; 862,9; 904,6$ и $938,7$ нм), O ($\lambda = 2653$ и 2760 нм), Cl ($\lambda = 1587$ и 2447 нм). Максимальные энергетические параметры этих ЛЯН были невелики: $P_l \leq 100$ Вт, $\eta_l \leq 0,2$ %.

Рассмотренные выше ЛЯН излучают на переходах атомов. Существуют также ЛЯН на переходах молекул CO ($\lambda = 5,1 - 5,6$ мкм) и N₂⁺ ($\lambda = 391,4$ и $427,8$ нм). Первый из этих лазеров был исследован в лаборатории Sandia, второй – во ВНИИТФ. Наибольший интерес представляет

N_2^+ -лазер, излучающий в УФ области спектра. В экспериментах, выполненных во ВНИИТФ на импульсном реакторе ЭБР-Л, при возбуждении осколками деления урана смеси He-N₂-H₂ получен КПД генерации около 0,3 %. Позже эти результаты были подтверждены в экспериментах сотрудников ФЭИ на импульсном реакторе БАРС-6.

4.5. Лазеры, возбуждаемые быстрыми нейтронами

Для накачки активных сред рассмотренных выше ЛЯН использовались продукты ядерных реакций, протекающих при взаимодействии ядер изотопов ²³⁵U, ³He, ¹⁰B с тепловыми нейтронами. Существует еще один способ накачки – за счет упругого рассеяния быстрых нейтронов на атомах (ядрах) среды. Непосредственная ионизация и возбуждение газовой среды в этом случае осуществляются ядрами отдачи. При таком способе накачки можно сравнительно однородно возбуждать газовые среды при давлениях десятки и сотни атмосфер.

Впервые накачка газовых лазеров быстрыми нейтронами была осуществлена во ВНИИЭФ в 1981 г. в экспериментах на импульсном реакторе БР-1 с длительностью импульса около 80 мкс. В этих экспериментах использовалась смесь He-Xe ($\lambda = 2,65$ мкм). Удельная мощность накачки была пропорциональна давлению гелия и составляла около 80 Вт/см³·атм. Максимальная мощность излучения зарегистрирована для смеси He-Xe (950:1) при давлении 5 атм, она составила 290 Вт ($\eta_l \sim 0,2$ %).

Исследования в области нейтронной накачки лазеров могут представлять интерес для установок на основе термоядерного синтеза, в которых основная доля энергии выделяется в виде кинетической энергии быстрых нейтронов.

5. Влияние оптических неоднородностей

Расчетные и экспериментальные исследования показали [1, 15], что в ходе импульсного возбуждения ЛЯН, работающих без прокачки газовой среды, объем газа разделяется на две характерные части, существенно отличающиеся друг от друга по своим оптическим свойствам.

В центральной части под влиянием монотонно возрастающего от оси кюветы к ее стенкам профиля энерговыделения тормозящихся в газе осколков возникает область (которую называют активной) с отрицательными значениями градиентов плотности и показателя преломления $|\nabla n| \sim 10^{-6}$ см⁻¹. В периферийной части, прилегающей к стенкам кюветы, образуется зона (так называемая пассивная зона) с большими положительными градиентами плотности и показателя преломления до $\nabla n \sim 10^{-4}$ см⁻¹. Пассивная зона возникает в области, где сильную роль играет теплоотвод к твердой стенке, теплоемкость единицы объема которой значительно превосходит теплоемкость единицы объема газа. Световые лучи, имеющие в какой-либо точке этой зоны направление, параллельное оси кюветы, отклоняются к ее стенкам и упираются в них (по крайней мере, за несколько проходов резонатора). Поэтому эта зона не должна входить в область, охваченную генерацией. В активной области, образующей положительную газовую линзу, световые лучи осциллируют около оптической оси с пространственным периодом порядка десятка метров. Было установлено, что на начальном этапе возбуждения при временах порядка миллисекунд размер пассивной зоны возрастает пропорционально \sqrt{t} . Однако, начиная с $t > 10$ мс, зависимость

этого размера от времени заметно отклоняется от указанной закономерности – пассивная зона развивается более стремительно. К моменту $t \sim 0,1$ с зона с положительным градиентом показателя преломления охватывает практически весь газовый объем. Вследствие этого в квазистационарных (с длительностью импульса накачки $> 0,1$ с) и стационарных режимах возбуждения ЛЯН без прокачки газовой среды в большей части газового объема создаются неблагоприятные для получения генерации условия. Необходимым условием получения непрерывной генерации в этих режимах является прокачка газа, при которой его полная смена в кювете осуществляется за временной интервал $\Delta t \sim 0,01$ с.

В результате проведенных исследований была предложена концепция ЛЯН с поперечной (по отношению к оптической оси) прокачкой газовой смеси. Конструкция ЛЯН представляет собой набор лазерных каналов прямоугольного сечения с плоскими урановыми слоями шириной ~ 10 см, нанесенными на внутреннюю поверхность боковых стенок каналов, параллельных направлению газового потока. Для охлаждения разогреваемой в канале смеси на его выходе размещается радиатор. Наиболее удобная и простая форма радиатора – набор тонких пластин, расположенных параллельно потоку газа и перпендикулярно урановым слоям. На входе в канал ставится такой же радиатор, который позволяет за счет теплообмена газа с пластинами задать вдоль всей длины лазера требуемую входную температуру рабочей смеси и выровнять ее скорость. За выходным радиатором может быть помещен следующий лазерный канал, для которого указанный радиатор будет входным, и т. д. Таким образом может быть построена цепочка лазерных каналов, объединенных в единый газовый контур.

Кроме того, из результатов исследований оптических неоднородностей при различных длительностях возбуждения лазерных сред однозначно следует вывод, что наиболее удобными реакторами для проведения экспериментов по накачке лазеров ядерными излучениями с использованием простых лазерных кювет без прокачки газовой среды (поиск активных сред ЛЯН и оптимизация их параметров) являются импульсные реакторы с длительностью импульса $\tau_{1/2} < 10^{-2}$ с.

6. Изучение непрерывного режима работы ЛЯН

Описанные выше ЛЯН работают в квазинепрерывном режиме при длительностях импульсов накачки и генерации $0,1 - 50$ мс. Результаты расчетов и экспериментов показали, что для работы ЛЯН в непрерывном режиме необходимо выполнить два основных условия: обеспечить необходимую удельную мощность накачки лазерной среды и организовать прокачку газовой смеси в лазерных каналах, чтобы устранить ее перегрев и уменьшить оптические неоднородности лазерной среды [1, 15].

С учетом этих условий во ВНИИЭФ был сконструирован и изготовлен в 1994 г. лазерный модуль (рис. 5) для совместной работы с мощным импульсным реактором БИГР [6], который в одном из рабочих режимов может генерировать нейтронные импульсы длительностью ≥ 1 с.

Лазерный модуль – газовый ЛЯН непрерывного действия, работающий в режиме прокачки газовых смесей. Модуль состоит из четырех одинаковых лазерных каналов. Активная длина каждого канала, определяемая длиной урановых слоев, равнялась 100 см. Слои металлического ^{235}U толщиной около 3 мкм нанесены на пластины размерами 100×6 см². Средний по активной длине лазерного канала флюенс тепловых нейтронов составлял $(5 - 7) \cdot 10^{14}$ см⁻² при длительности облучения $0,5 - 1,7$ с. Лазерные каналы модуля включены в единую газовую петлю и разделены между собой теплообменниками (радиаторами), при прокачке через которые газ охлаждается.

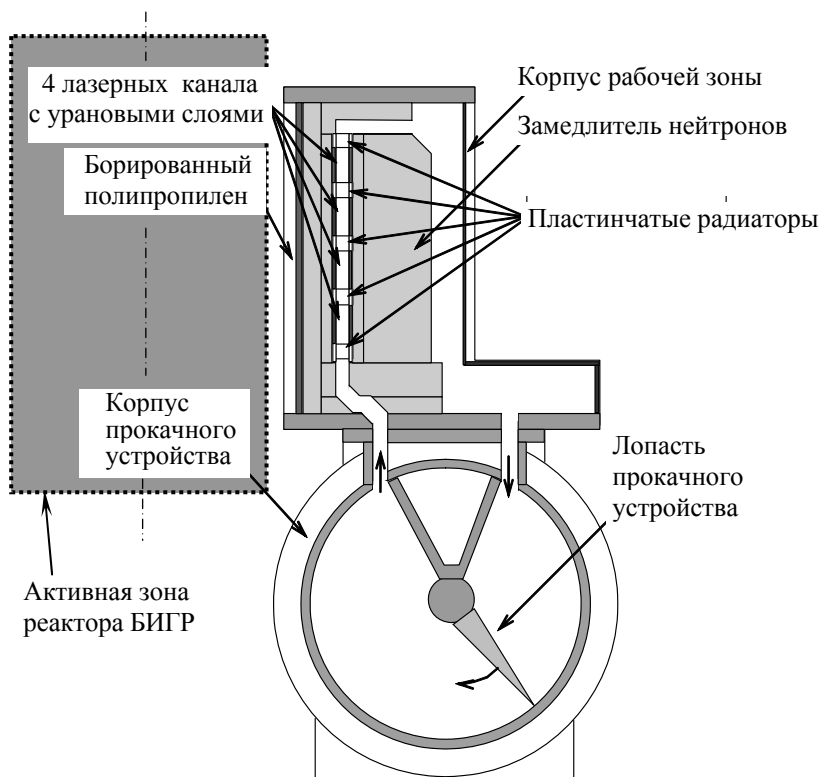


Рис. 5. Схема поперечного сечения четырехканального лазерного модуля

В экспериментах с лазерным модулем была доказана возможность работы ЛЯН в непрерывном режиме. В качестве активных сред использовались смеси (He, Ne)-Ar-Xe ($\lambda = 1,73; 2,03$ мкм). Длительность лазерной генерации до 2 с определялась длительностью работы реактора БИГР. Мощность лазерного излучения составляла около 100 Вт (энергия более 100 Дж).

В настоящее время проводятся эксперименты на 8-канальном лазерном модуле, который предназначен для проведения экспериментов по сложению лазерных пучков из отдельных каналов и позволяет работать с более чистыми газовыми смесями.

7. Проблемы создания мощных ядерно-лазерных установок

Рассмотренные выше исследования ЛЯН, выполненные на импульсных реакторах, представляют собой важный этап на пути создания мощных непрерывных ядерно-лазерных установок, которые получили название реакторов-лазеров (РЛ). Термин РЛ впервые, по-видимому, был предложен в работе [16], где отмечается принципиальная возможность выведения энергии из активной зоны реактора на релаксационной стадии в виде лазерного излучения. Наиболее интересным вариантом РЛ является такая установка, в которой вследствие пространственного совмещения ядерного топлива и лазерной среды заметная часть ядерной энергии преобразуется в лазерное излучение, минуя промежуточную стадию тепловой энергии.

Схемы реакторов-лазеров. Предложенные в литературе различные варианты непрерывных РЛ отличаются, в первую очередь, ядерным топливом, которое используется для работы реактора и накачки лазерной среды: а) газообразное соединение урана UF_6 , пары урана или аэрозольные урановые частицы; б) тонкие слои урана или его соединений на металлических подложках. Наиболее реальными в настоящее время представляются гетерогенные РЛ на тонкопленочном урановом топливе [1, 10]. Активная зона такого РЛ является набором определенного количества лазерных ячеек с урановыми слоями, заполненных газовой лазерно-активной средой. Лазерные ячейки размещаются в матрице замедлителя нейтронов (графит, бериллий и др.). Количество лазерных ячеек может составлять от сотен до нескольких тысяч штук, общее количество урана – 5–70 кг, характерные линейные размеры – 2–5 м.

На рис. 6 схематично приведены два возможных варианта лазерных ячеек активной зоны РЛ: а) цилиндрическая ячейка, в которой возможна продольная относительно оси кюветы прокачка газа; б) прямоугольная ячейка с поперечной относительно оси кюветы прокачкой (в направлении, указанном стрелками). Продольная прокачка возможна при низких уровнях мощности накачки и малых (≤ 10 м/с) скоростях газа. При высоких мощностях более эффективна поперечная прокачка со сбросом энергии на внутренних радиаторах (рис. 6,б). Такой вариант лазерной ячейки использовался в лазерных модулях (см. рис. 5) и проверен в экспериментах на реакторе БИГР. Для работы РЛ в стационарном или квазистационарном режиме лазерные ячейки должны охлаждаться теплоносителем, например тяжелой водой.

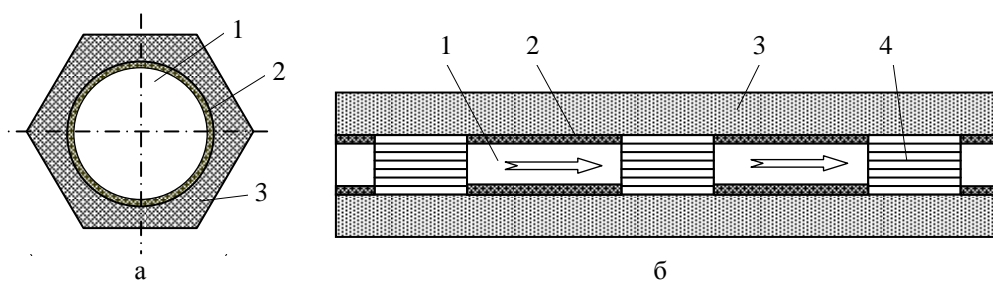


Рис. 6. Поперечные сечения лазерных ячеек для РЛ: а – цилиндрическая ячейка; б – прямоугольная ячейка с поперечной прокачкой газа (1 – лазерные каналы; 2 – урановые слои; 3 – замедлитель нейтронов; 4 – радиаторы; стрелками указано направление движения газа при прокачке)

Сложение излучения из лазерных каналов. Как показали выполненные во ВНИИЭФ расчетные и экспериментальные исследования, в многоканальных установках типа РЛ с большим количеством одинаковых лазерных каналов для повышения плотности лазерного излучения и качества лазерного пучка целесообразно использовать схемы сложных резонаторов с последовательным или параллельным объединением (сложением) оптических объемов лазерных каналов. Принципиальные схемы сложения излучения лазерных каналов показаны на рис. 7. Суммарная длина резонатора при последовательном сложении может составлять 30–50 м (~ 10 каналов), при параллельном сложении число каналов ограничивается потерями в делительных пластинах и также может быть более 10, а при смешанном (последовательно-параллельном) – соответственно, более 100 каналов. При этом лазерное излучение выводится из РЛ несколькими (от 2–4 до 20–30) лучами с мощностью излучения в каждом ~ 100 –200 кВт. Эти лучи могут либо складываться внешними системами (в том числе и когерентно), либо по отдельности направляться на объект воздействия независимо.

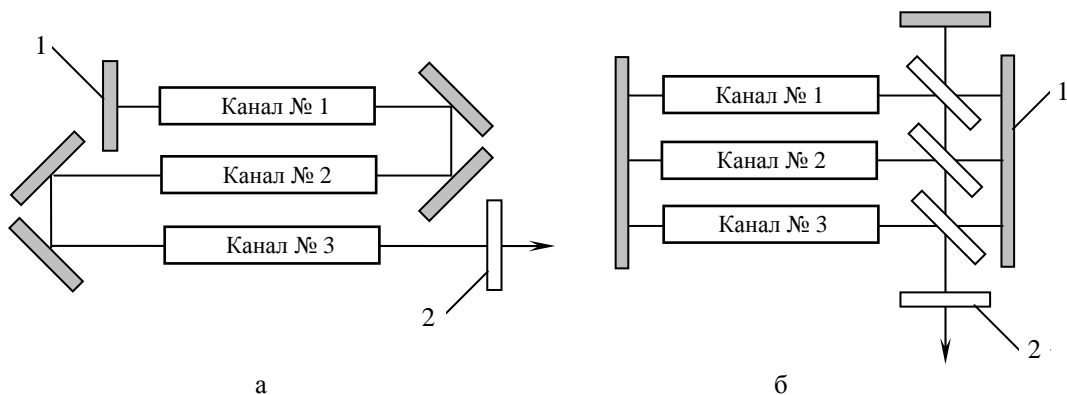


Рис. 7. Схемы сложения излучения лазерных каналов: а – последовательное сложение; б – параллельное сложение; 1 – глухое зеркало; 2 – полупрозрачное зеркало

Наиболее подробно схемы последовательного и параллельного сложения излучения каналов ЛЯН были исследованы в экспериментах на комплексе ЛУНА-2М/ВИР-2М [14] при использовании двух идентичных лазерных каналов с урановыми слоями. Основные результаты этих исследований представлены в табл. 6. В качестве активных лазерных сред использовались смеси He-Ar-Xe (380:380:1) при давлении 1 атм ($\lambda = 2,03$ мкм) и Ar-Xe (380:1) при давлении 0,5 атм ($\lambda = 1,73$ мкм).

Таблица 6

Максимальные энергетические параметры при последовательном и параллельном сложении излучения двух лазерных каналов установки ЛУНА-2М

λ , мкм	Смесь	Давление	Тип лазерного канала	$r_{\text{опт}}$, %	E , Дж	P_l , кВт
2,03	He-Ar-Xe (380:380:1)	1 атм	A	71	1,5	0,54
			B	0	1,0	0,49
			C	46	1,8	1,0
			D	0	1,9	0,87
1,73	Ar-Xe (380:1)	0,5 атм	A	68	0,96	0,52
			B	0	0,94	0,49
			C	47	1,1	0,62
			D	0	1,7	0,98

Примечание: A – один стандартный канал (двухзеркальный резонатор с выводом излучения в продольном относительно оптической оси направлении); B – один канал с поперечным относительно оптической оси выводом излучения (четыре зеркала + плоскопараллельная кварцевая пластина внутри резонатора); C – два последовательно сложенных лазерных канала; D – два параллельно сложенных лазерных канала; $r_{\text{опт}}$ – оптимальный коэффициент отражения полупрозрачного зеркала, через которое выводится лазерное излучение; E – энергия лазерного излучения за импульс; P_l – максимальная в процессе импульса мощность лазерного излучения.

Из табл. 6 видно, что мощность излучения из двух последовательно ($\lambda = 2,03$ мкм) и параллельно ($\lambda = 1,73$ мкм) сложенных каналов практически вдвое превосходит мощность излучения из одного канала. В экспериментах также был выявлен эффект масштабируемости схемы параллельного сложения лазерных каналов: форма импульсов излучения из нескольких параллельно сложенных каналов не зависит от числа лазерных каналов, а мощность и энергия генерации пропорциональна их числу. Данная закономерность является следствием того, что при параллельном

сложении (в отличие от последовательного) не происходит аккумуляции оптических неоднородностей. Это делает схему параллельного сложения весьма перспективной для использования в многоканальных ЛЯН.

Модель реактора-лазера. В настоящее время во ВНИИЭФ проводятся работы по созданию ядерно-физической установки – модели РЛ непрерывного действия, работающего в режиме прокачки газовой среды [1, 10]. Установка включает в себя реактор ИКАР-500 и 16-канальный лазерный модуль (рис. 8). Схема лазерного модуля аналогична схеме, приведенной на рис. 5.

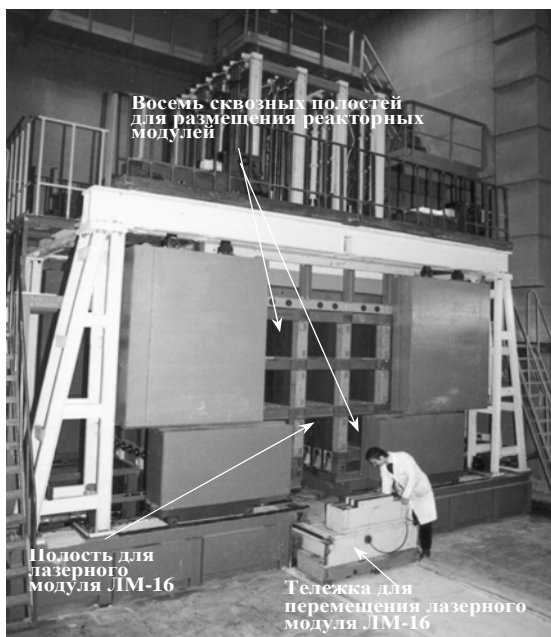


Рис. 8. Общий вид реактора ИКАР-500

Активная зона реактора ИКАР-500 представляет собой графитовую матрицу (куб со стороной 2400 мм) с девятью сквозными ячейками сечением 500×500 мм, в которых размещаются реакторные модули. В графитовой матрице (между модулями) сверху и сбоку установлены циркониевые каналы для размещения систем управления реактором. В одной из сквозных ячеек вместо реакторного модуля можно расположить лазерный модуль. Планируемое энерговыделение в активной зоне за время работы длительностью от долей секунды до десятков секунд составляет 500 МДж. Схема активной зоны реактора ИКАР-500 показана на рис. 9.

В настоящее время осуществлена сборка активной зоны установки ИКАР-500. Экспериментальные и расчетные исследования [17] ядерно-физических характеристик этой установки, которая на первом этапе работает в режиме критического стенда, позволили определить эффективный коэффициент размножения нейтронов ($k_{эф}$) на различных этапах сборки и показали возможность прогнозирования критмассовых параметров РЛ. В ходе работ были определены $k_{эф}$ примерно для 40 различных конфигураций активной зоны. Подбор критической конфигурации активной зоны сопровождался расчетами $k_{эф}$ методом Монте-Карло. По мере получения новых экспериментальных данных проводилась корректировка расчетной модели, что, в конечном счете, позволило достаточно точно описывать размножающие свойства реактора типа ИКАР.

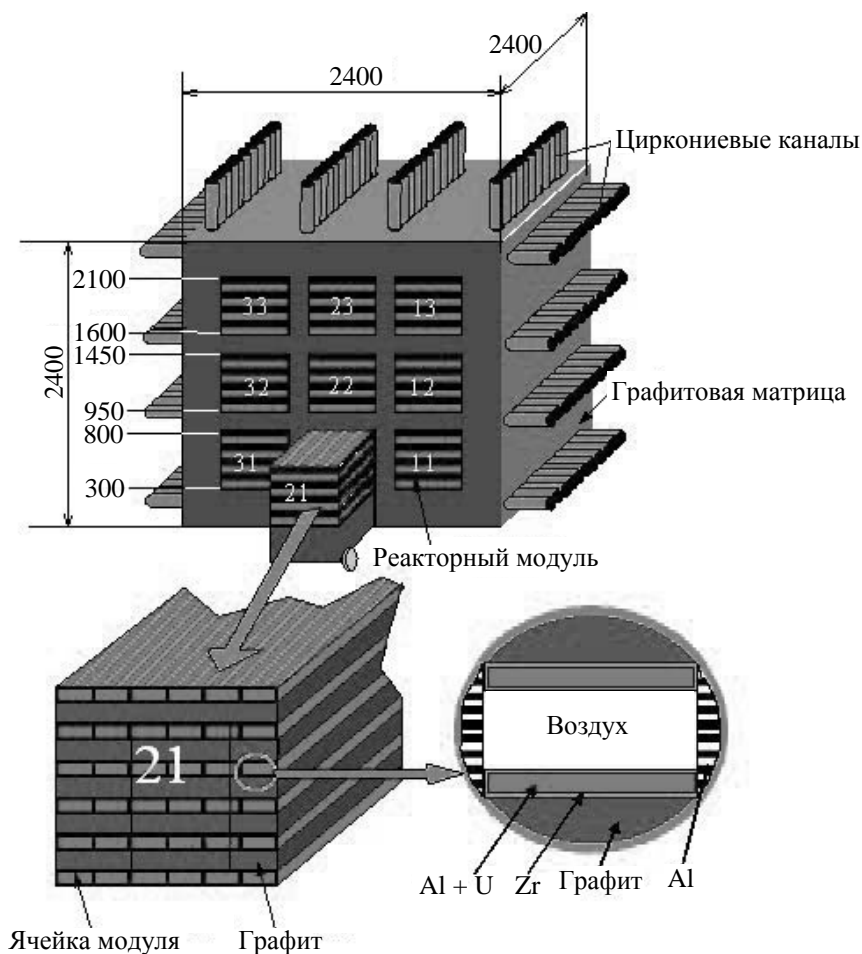


Рис. 9. Схема активной зоны реактора ИКАР-500

Исследования на ядерно-физическом комплексе ИКАР помогут решить ряд проблемных вопросов создания РЛ, в том числе:

- разработать принципы и системы управления РЛ с быстрым выходом на заданную мощность и оперативным управлением ею;
- разработать принципы и схемы формирования поля лазерного излучения РЛ и провести экспериментальные исследования параметров таких схем;
- определить основные конструкторские и технологические решения РЛ и апробировать их на экспериментальных лазерных модулях в составе комплекса ИКАР.

Другие ядерно-лазерные устройства. В отличие от ВНИИЭФ, где разрабатывается концепция автономного непрерывного РЛ, в ФЭИ и ВНИИТФ рассматривались проекты мощных импульсных ядерно-лазерных установок на основе оптических усилителей с ядерной накачкой: во ВНИИТФ – установка ЛИРА [11], а в ФЭИ – оптический квантовый усилитель с ядерной накачкой [12]. В состав таких установок, работающих по схеме *задающий генератор – усилитель*, входят реакторный и лазерный блоки. В качестве реактора, который иногда называют запальным, предполагается использовать импульсный реактор.

Лазерный блок, состоящий из большого количества лазерных элементов с урановыми слоями, представляет собой бустерную подкритическую зону, в которой происходит размножение нейтронов. Приведенные в работе [18] максимально возможные энергетические параметры

устройств, работающих по такой схеме, показывают, что полная энергия лазерного импульса может достигать ~2,5 МДж при длительности импульса ~5 мс.

Недавно сотрудниками ВНИИТФ в экспериментах [19] были получены высокие энергетические параметры при облучении на реакторном комплексе БАРС-5 + РУН-2 многоканального ЛЯН, состоящего из 37 параллельно расположенных лазерных кювет с полным активным объемом 16 л. При использовании смеси He-Ar-Xe ($\lambda = 2,03$ мкм) зарегистрирована энергия лазерного излучения 520 Дж при длительности импульса на половине высоты около 400 мкс (мощность генерации 1,3 МВт, $\eta_l \sim 3$ %).

Вопросы применения ЛЯН и РЛ, работающих как в непрерывном, так и в импульсном режимах, обсуждались почти во всех обзорных работах и более подробно – в специальных работах. Обзор этих публикаций содержится в монографии [1].

Область применения РЛ зависит, естественно, от его характеристик, в первую очередь, от мощности, длины волны и расходимости лазерного излучения, а также от режима и длительности работы. Для наиболее реальных в настоящее время вариантов РЛ на тонкопленочном урановом топливе полный КПД (η_{rl}) по отношению к выделившейся в АЗ ядерной энергии не превышает 0,4 %: $\eta_{rl} = \varepsilon \eta_l$, где $\varepsilon \leq 20$ % – доля от полной энергии, поглотившаяся в газовой лазерной среде, $\eta_l \leq 2$ % – эффективность преобразования поглощенной ядерной энергии в лазерное излучение. Для увеличения η_{rl} и расширения области применения РЛ необходим поиск более эффективных лазерных сред в различных диапазонах спектра и таких конструкций РЛ, в которых будет возможна более эффективная передача ядерной энергии лазерной среде.

Список литературы

1. Мельников С. П., Сизов А. Н., Синянский А. А. Лазеры с ядерной накачкой. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2008.
2. Bonyushkin E. K., Il'kaev R. I., Pavlovski A. I. et al. About testing experiment with targets for gain based on using of the powerful pulsed lasers pumped by γ -radiation of the underground nuclear explosion // Proc. of the Int. Conf. on Laser Interaction with Matter. – Oxford, 1994. P. 89–91.
3. Павловский А. И., Бонюшкин Е. К., Вараксин В. В. и др. Исследование характеристик мощного НФ-лазера, возбуждаемого гамма-излучением ядерного взрыва // Труды 2-й Международной конф. «Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1995. Т. 2. С. 214–218.
4. Алехин Б. В., Бонюшкин Е. К., Вараксин В. В. и др. Исследование формирователя лазерного излучения с накачкой гамма-излучением ядерного взрыва // Там же. Т. 1. С. 338–341.
5. Кривоносов В. Н., Лахтиков А. Е., Мельников С. П. и др. Газовые лазеры с ядерной накачкой // 65 лет ВНИИЭФ. Физика и техника высоких плотностей энергии. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011. Вып. 2. С. 376–393.
6. Колесов В. Ф. Аперидические импульсные реакторы. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1999.
7. Синянский А. А. Исследования по созданию ядерно-лазерных устройств непрерывного действия во ВНИИЭФ // Труды 2-й Международной конф. «Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1995. Т. 1. С. 16–36.
8. Воинов А. М., Довбыш Л. Е., Казакевич А. Т. и др. Инфракрасные лазеры с ядерной накачкой на переходах ArI, KrI и XeI // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5, № 7. С. 422–424.

9. McArthur D. A., Tollefsrud P. B. Observations of laser action in CO gas excited only by fission fragments // Appl. Phys. Lett. 1975. Vol. 26, N 4. P. 187–190.
10. Воинов А. М., Воронцов С. В., Кривонос В. Н. и др. Работы, выполненные во ВНИИЭФ, по исследованию возможности создания реактора-лазера // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 2007. Вып. 2. С. 19–28.
11. Магда Э. П., Погребов И. С., Путников И. С. и др. Лабораторная лазерно-реакторная установка ЛИРА // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 2001. Вып. 1/2. С. 39–43.
12. Дьяченко П. П. О состоянии исследований в ГНЦ РФ-ФЭИ им. А. И. Лейпунского по прямому преобразованию энергии деления ядер в энергию лазерного излучения // Труды 3-й Международной конф. «Проблемы лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы». – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2003. С. 5–30.
13. Bodette D. E., Neal D. R., McArthur D. A. et al. Reactor pumped laser research at the Sandia National Laboratories pulsed reactor facilities // Proc. of the Int. Embedded Topical Meeting on Physics, Safety, and Applications of Pulse Reactors. – Washington, 1994. P. 163–171.
14. Воинов А. М., Довбыш Л. Е., Кривонос В. Н. и др. Экспериментальный комплекс на основе реактора ВИР-2М для исследования лазеров с ядерной накачкой // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 2000. Вып. 2/3. С. 63–68.
15. Сизов А. Н. О связи пространственных неоднородностей накачки с мощностью генерации лазеров, возбуждаемых осколками деления урана // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20, № 9. С. 64–67.
16. Гудзенко Л. А., Яковленко С. И. Атомный реактор-лазер // Краткие сообщения по физике. 1974. Вып. 2. С. 14–15.
17. Воинов А. М., Влох Г. В., Воронцов С. В. и др. Стенд критических сборок ИКАР-С. Результаты физического пуска // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 2007. Вып. 2. С. 29–33.
18. Магда Э. П., Бочков А. В., Лукин А. В. и др. О предельных характеристиках импульсных газовых лазеров с ядерной накачкой // Труды 3-й Международной конф. «Проблемы лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы». – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2003. С. 395–403.
19. Загидулин А. В., Бочков А. В., Мироненко В. В., Софиенко Г. С. 500-джоульный лазер с ядерной накачкой // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38, № 23. С. 31–39.

Nuclear-Pumped Lasers – Devices with Direct Conversion of Nuclear Energy into Laser Radiation

A. M. Voinov, V. N. Krivonosov, S. P. Melnikov, A. A. Pikulev,
A. N. Sizov, A. A. Sinyanskiy

The basic stages of studies aimed at investigations of nuclear-pumped lasers and designing of nuclear-laser facilities with direct conversion of nuclear energy into laser radiation are considered. The main attention is paid to studies which were carried out in VNIIEF with help of pulsed nuclear reactors.