

УДК 621.373.826

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИХ ЛАЗЕРОВ НЕПРЕРЫВНОЙ ГЕНЕРАЦИИ

© 2023 г. Академик РАН С. Г. Гаранин¹, В. Н. Деркач¹, К. Н. Макаров^{2,*}, В. А. Островский², М. И. Пергамент², М. В. Путилин², Д. В. Сизмин¹

Поступило 19.07.2023 г.

После доработки 19.07.2023 г.

Принято к публикации 27.07.2023 г.

Рассматриваются современные тенденции создания высокоэнергетических импульсно-периодических лазеров непрерывной генерации с энергией импульсов десятки и сотни джоулей. Анализируются активные среды на предмет их использования в таких лазерах. Экспериментально исследуются при температуре от 100 до 295 К Yb:YAG активные кристаллические и керамические элементы российского производства. Приводятся данные системы криогенного охлаждения активных элементов. Описываются диодная система накачки активных элементов и гомогенизатор ее излучения. Приводятся физико-технические характеристики системы накачки. Экспериментально измеряются френелевские потери на поглощение и потери за счет усиленного спонтанного излучения, уменьшающие энергию, запасаемую в инверсной населенности. Приводятся результаты измерения усиления в многопроходных схемах с различным набором активных элементов.

Ключевые слова: импульсно-периодические лазеры, диодная накачка, газовое (криогенное) охлаждение

DOI: 10.31857/S2686740023060068, **EDN:** HTWWNJ

Высокоэнергетические импульсно-периодические лазеры непрерывной генерации сегодня широко востребованы как в науке, так и в промышленности. В мировой практике главным направлением создания лазерных установок с большой энергией импульсов и высокой средней мощностью является использование усилительных модулей (УМ) с диодной продольной накачкой, с дисковыми активными элементами, в зазорах между которыми прокачивается охлаждающий газ. Для создания усилительных модулей требуется выполнить разработку и провести исследования экспериментальных образцов усилительных модулей с диодной накачкой и частотой повторения импульсов до 10 Гц для отработки физических принципов и конструкторских реше-

ний создания лазерных установок с энергией в импульсе 2–10 кДж. Ключевыми элементами таких лазерных установок являются активные элементы (АЭ) с поглотителем (клатдингом) лазерного излучения по торцам АЭ для предотвращения развития паразитного усиленного спонтанного излучения (УСИ). Достичь требуемой эффективности с АЭ без клатдинга практически невозможно. В РФ существует производство АЭ из оптической керамики Yb:YAG с клатдингом и кристаллических Yb:YAG АЭ. В то же время увеличение энергии генерируемых импульсов – это прежде всего увеличение световой апертуры, т.е. увеличение размеров АЭ, желательно, по крайней мере, до размеров 300 × 300 мм, поскольку лучевая прочность просветляющих покрытий при частоте 10 Гц резко падает. (В действующих лазерах, работающих при частоте 10 Гц, она не превышает 2 Дж/см².) Однако при увеличении размеров АЭ до размеров 300 × 300 мм резко возрастает УСИ, становясь основным препятствием. Поэтому необходимы физические и инженерные исследования, чтобы найти путь снижения эффекта паразитного усиленного спонтанного излучения, что позволит достичь требуемой эффективности и увеличить размеры АЭ. Другая задача – технологическая – повысить лучевую прочность просветляющих и

¹Российский федеральный ядерный центр
Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики,
Институт лазерно-физических исследований,
Саров, Нижегородская область, Россия

²Государственный научный центр Российской Федерации
Троицкий институт инновационных и термоядерных
исследований, Троицк, Москва, Россия

*E-mail: makarov@triniti.ru

зеркальных покрытий оптических элементов до значений 3–5 Дж/см².

В науке создание таких лазеров — это, прежде всего, проблемы лазерного термоядерного синтеза (ЛТС — создание лазерного драйвера для гибридного термоядерного реактора) и накачка усилителей chirпированных петаваттных импульсов для компактных ускорителей частиц. В промышленности такие лазеры также найдут широкое практическое применение, в частности, для модификации и упрочнения структуры поверхности изделий с использованием ударных волн — например, лопаток турбин авиационных двигателей. Такие применения известны, но не могут быть реализованы в РФ из-за отсутствия необходимого опыта и, тем более, ряда ключевых элементов лазерных систем.

За рубежом разработка высокоэнергетических импульсно-периодических лазеров непрерывной генерации началась за 15 лет до начала работ в этой области в РФ. Были разработаны лазерные системы Mercury [1] (первая установка такого типа, 55 Дж, 10 Гц, 2006 г.), DiPOLE100 [2] (100 Дж, 10 Гц, 2015 г.), NAPLS [3] (200 Дж, 10 Гц, 2018 г.). Разрабатываются проекты лазерных систем ЛТС, с энергией импульса в канале в несколько килоджоулей, например HiPER [4], LIFE [5]. Полученные результаты опубликованы.

Но в научных статьях сообщается, какие результаты получены, но не какие трудности встретились по пути и, главное, как они были преодолены. Так что проблемы остаются. Как можно будет увидеть из дальнейшего, в РФ уже многое сделано для решения этих проблем, а оставшиеся решаются.

В сообщении рассматриваются основные научные, инженерные и технологические аспекты разработки усилительных модулей и их составных частей на основе АЭ отечественного производства; обсуждаются основные проблемы разработки высокоэнергетических лазерных систем высокой средней мощности и пути преодоления существующих трудностей.

1. АКТИВНЫЕ СРЕДЫ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИХ ЛАЗЕРОВ НЕПРЕРЫВНОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Основная проблема при создании промышленных высокоэнергетических лазеров — это реализация работы лазеров с частотой порядка 10 Гц и эффективностью преобразования электрической энергии в лазерную лучше, чем 10%. Существующие исследовательские установки ЛТС (NIF, LMJ) имеют достаточную энергию импульсов в одном канале (около 20 кДж в первой гармонике), но частота их работы (около 10⁻⁴ Гц) и

КПД (доли процента) очень далеки от необходимых, что связано с использованием неодимового стекла в качестве активной среды и ламповой накачки.

Для повышения частоты следования импульсов и эффективности следует использовать: 1) накачку лазерными диодами, 2) активные элементы с высокой теплопроводностью (кристаллические или керамические) и малым квантовым дефектом, 3) эффективное (газовое или жидкостное) охлаждение активной среды. Применение активной среды с большим временем жизни возбужденного состояния позволяет уменьшить необходимую мощность системы накачки, которая определяет основную часть стоимости лазерной системы.

Одним из наиболее перспективных материалов для активной среды лазеров с большой энергией импульсов, работающих в частотном режиме, считается иттриево-алюминиевый гранат, легированный иттербием (Yb:YAG) [6]. Он обладает совокупностью важных свойств: высокой теплопроводностью, лучевой и механической прочностью, малым квантовым дефектом, большим временем жизни возбужденного состояния (0.95 мс). Положение и ширина полосы поглощения Yb:YAG находятся вблизи длины волны 940 нм, что обеспечивает эффективное поглощение излучения лазерных диодов на гетероструктурах InGaAs, используемых для накачки. Простота структуры уровней энергии Yb³⁺ в матрице YAG обуславливает отсутствие концентрационного тушения и ап-конверсии, что, в сочетании с малой разностью радиусов Yb³⁺ и Y³⁺, позволяет делать кристаллы с высоким уровнем легирования, и это особенно полезно для лазеров на тонких дисках. Основным недостатком Yb:YAG является квазитрехуровневая схема лазерного усиления, что является обратной стороной малого квантового дефекта. Нижний лазерный подуровень имеет энергию всего 0.076 эВ и населенность 4.6% при комнатной температуре, поэтому для повышения эффективности лазерных усилителей Yb:YAG необходимо использовать криогенное охлаждение. Еще одним недостатком является относительно высокий нелинейный коэффициент показателя преломления YAG (по различным сведениям, от 6 до 8) × 10⁻⁷ см²/ГВт, т.е. в 2–3 раза больше, чем у стекол), который, однако, меньше, чем у большинства других оксидных лазерных кристаллов.

При охлаждении до криогенных температур свойства Yb:YAG улучшаются: растут сечение вынужденного излучения на лазерной длине волны 1030 нм и сечение поглощения на длине волны накачки 940 нм, уменьшается коэффициент теплового расширения и dn/dT и увеличивается теплопроводность.

Для подавления усиленного спонтанного излучения и предотвращения паразитной генерации периферийные зоны активных элементов должны быть выполнены в виде кладдинга — области с таким же показателем преломления, как у активной среды, но с высоким коэффициентом поглощения на лазерной длине волны. На практике в качестве кладдинга АЭ Yb:YAG чаще всего используется $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$, хотя могут применяться и другие материалы, например, $\text{Co}^{3+}:\text{YAG}$, коэффициент поглощения которого на 1030 нм меньше зависит от температуры [7].

Среди других материалов для активных элементов следует отметить Yb:CaF₂, который имеет большее время затухания люминесценции (1.9 мс), что в сочетании с малым показателем преломления ($n = 1.43$) и малым сечением вынужденного излучения ($\sigma_e \approx 3 \times 10^{-21} \text{ см}^2$ [8]) обеспечивает высокую эффективность накачки. Теплопроводность Yb:CaF₂ почти так же высока, как YbYAG, а коэффициент теплового расширения и производная dn/dT имеют разный знак, что снижает термонаведенные aberrации. Полоса поглощения на 980 нм в Yb:CaF₂ имеет достаточно большую ширину для использования обычной диодной накачки, что позволяет работать с особо малым квантовым дефектом 5%, при генерации на 1030 нм, или даже 1.2%, если использовать полосу усиления на 992 нм [9] (тогда как YbYAG накачивается на длине волны 940 нм и имеет квантовый дефект 9%). Нелинейный коэффициент показателя преломления Yb:CaF₂ в 5 раз меньше, чем у Yb:YAG. Существует технология производства керамики Yb:CaF₂ большого размера [10]. Однако низкое сечение усиления приводит к малой эффективности извлечения запасенной энергии. Лазерная система на Yb:CaF₂ будет обладать намного меньшей эффективностью преобразования энергии накачки в лазерное излучение, чем при использовании Yb:YAG, поэтому она бесперспективна для использования при создании промышленных высокоэнергетических лазеров. Однако мощность диодов накачки, необходимая для получения той же энергии импульса, может быть, напротив, в несколько раз меньше. Следовательно, применение Yb:CaF₂ эффективно в приложениях, где нет высоких требований на КПД, но важны капитальные затраты, особенно для лазерных систем, предназначенных для прямого усиления ультракоротких (чирпированных) импульсов, поскольку Yb:CaF₂ обладает широкой полосой усиления. Пример подобной системы — лазерная установка Polaris [11].

2. АКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Итак, иттриево-алюминиевый гранат, легированный иттербием (Yb:YAG), считается одним из

наиболее перспективных материалов для создания высокоэнергетических лазеров. Для моделирования процессов накачки и усиления необходимо знать зависимости сечений поглощения $\sigma_a(\lambda, T)$ и вынужденного излучения $\sigma_e(\lambda, T)$ от длины волны и температуры. Сечения поглощения $\sigma_a(\lambda, T)$ рассчитывались из спектральной зависимости коэффициента пропускания образцов, измерение которой производилось спектрофотометром СФ-56 (ЛОМО, Ст. Петербург). Для расчета сечения вынужденного излучения $\sigma_e(\lambda, T)$ использовался метод Фюхтбауэра—Ладенбурга [12], который основывается на измерении спектра люминесценции $I(\lambda, T)$ времени затухания люминесценции. Для накачки среды использовался диодный модуль с оптоволоконным выходом. Спектр люминесценции $I(\lambda, T)$ измерялся с помощью спектрометра “Колибри-2” (ООО “ВМК-Оптоэлектроника”, Новосибирск) в диапазоне длин волн 912–1046 нм, а время затухания люминесценции τ_{rad} вычислялось по форме импульса люминесценции, которая измерялась фотодиодом. Нами проведены измерения спектров поглощения и времени затухания люминесценции образцов лазерной керамики Yb:YAG в диапазоне температур от 100 до 295 К. По полученным данным рассчитаны сечения поглощения и сечения вынужденного излучения.

Образцы лазерной керамики Yb:YAG, изготовленной ФКП ГЛП “Радуга”, представлены на рис. 1. Размер образцов 55 × 55 мм, толщина 5 мм. Концентрация иттербия 0.9 ат. %. На лицевые поверхности образцов нанесено двустороннее просветляющее покрытие с коэффициентом отражения $\leq 0.2\%$ для длин волн 940 и 1030 нм.

Для захлаживания образцов лазерной керамики при их испытаниях использовался заливной азотный оптический криостат LN-120-XL (ООО “Криотрейд инжиниринг”, Москва) с образцом в вакууме. Криостат позволяет регулировать температуру образца в диапазоне от 78 до 420 К.

При измерении спектральной зависимости коэффициента пропускания спектрофотометр использовался в режиме сканирования в диапазоне длин от 850 до 1100 нм.

На рис. 2 показаны спектры поглощения $\sigma_a(\lambda, T)$ и вынужденного излучения $\sigma_e(\lambda, T)$ Yb:YAG при различной температуре. И то и другое совпадает с литературными данными. Близки к ним и наши измерения спектров поглощения и вынужденного излучения Yb:YAG кристаллов. Заметим, кстати, что, как это следует из работы [13], генерационные характеристики Yb:YAG кристаллов с кладдингом и Yb:YAG керамики и их зависимость от температуры практически идентичны (в том числе и коэффициенты усиления слабого сигнала). В РФ кристаллы более доступны, чем кера-

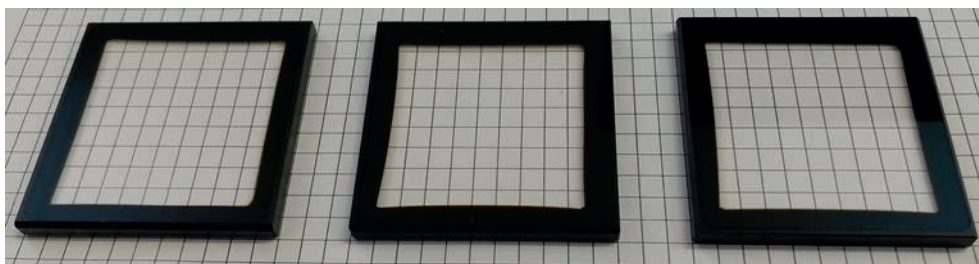


Рис. 1. Образцы лазерной керамики ГЛЦ “Радуга” с кладдингом, концентрация иттербия 0.9 ат. %.

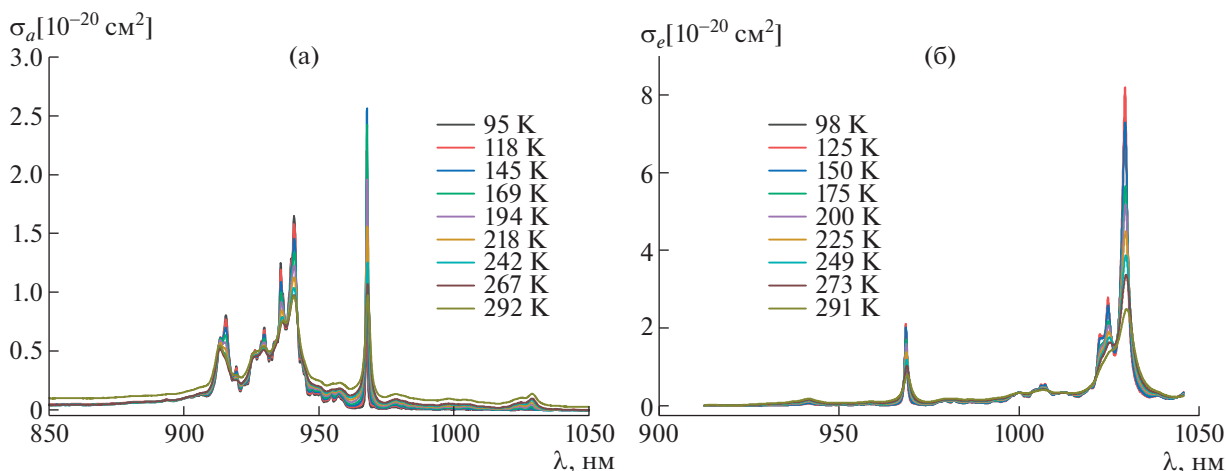


Рис. 2. Спектры поглощения (а) и вынужденного излучения (б) Yb:YAG при различной температуре.

мика, так что задача кладдинга для кристаллов стоит очень остро. Поэтому сегодня начаты работы по изготовлению “градиентного” кладдинга с плавным изменением концентрации легирования хромом Cr^{4+} от границы кристалла к краю АЭ, чтобы избежать, насколько это возможно, тепловой нагрузки на кристалл, и методов сварки кладдинга и кристалла.

3. СИСТЕМА КРИОГЕННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Криогенная система охлаждения АЭ состоит из двух частей — системы приготовления охлаждающей среды и УМ, содержащего АЭ. Системы генерации охлаждающей среды разработаны совместно с МГТУ им. Н.Э. Баумана. Был разработан и изготовлен для охлаждения и поддержания температуры лазерных активных элементов типоряд криогенных систем приготовления охлаждающей среды в диапазоне криогенных температур 100–295 K и мощностью охлаждения 2 кВт и 6 кВт, с массовой скоростью ее циркуляции в системе 25 и 56 г/см² соответственно, а также криорефрижератор замкнутого цикла с производительностью 200 г/с и мощностью охлаждения

6 кВт, для диапазона температур от 173 до 320 K, не нуждающийся в жидком азоте.

Криогенная система приготовления охлаждающей среды представляет собой замкнутый контур, в котором циркулирует газообразный гелий чистотой 99.999% и рабочим давлением до 20 атм. Поток гелия снимает тепло с активных элементов, а сам охлаждается в теплообменном устройстве гелий — жидкий азот за счет кипящего при атмосферном давлении жидкого азота. Для регулировки и поддержания заданной температуры гелия используются криогенный вентилятор, обеспечивающий скорость прокачки гелия через систему, и два клапана с электроприводами, которые перераспределяют поток гелия между контуром теплообменного устройства и байпасной линией. Высокооборотный криогенный вентилятор, обеспечивающий циркуляцию гелия в контуре, состоит из электродвигателя с частотой вращения до 80000 об/мин и проточной части. Управление скоростью вращения осуществляется с помощью преобразователя частоты. Охлаждение электродвигателя осуществляется как за счет продувки двигателя, так и за счет внешнего пассивного охлаждения статора. В установке предусмотрена возможность быстрого нагрева системы от рабочих температур до температур окружающей среды.

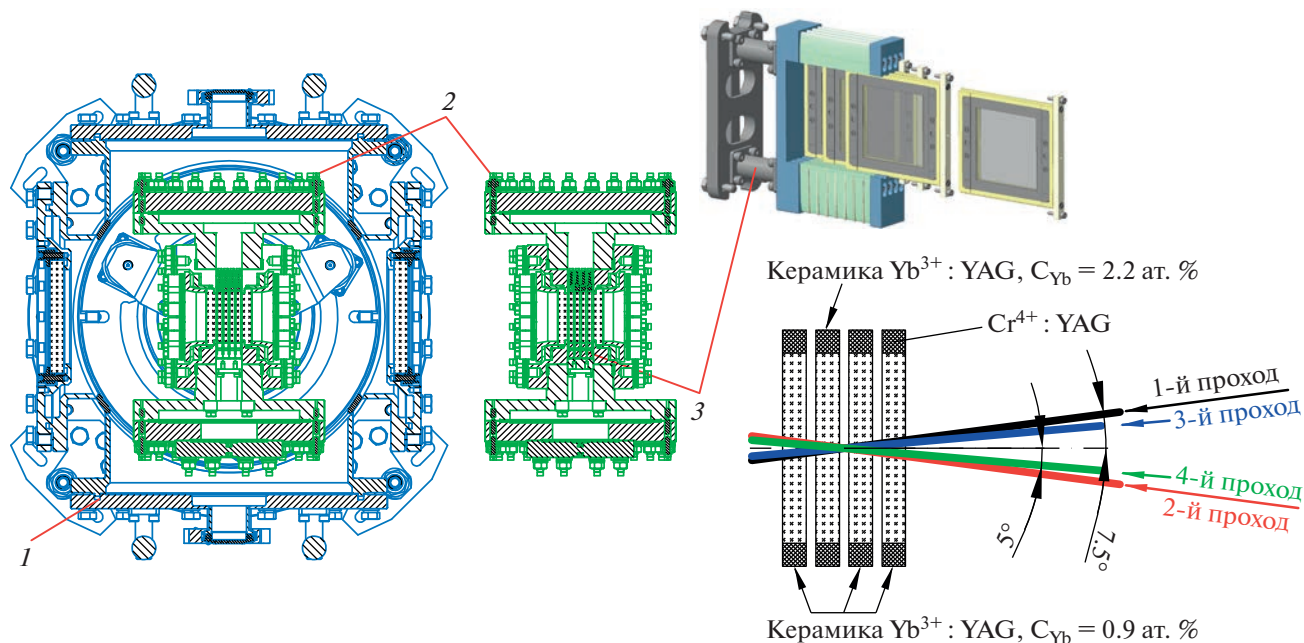


Рис. 3. Конструкция усилительного модуля: 1 – вакуумная камера; 2 – криогенная камера; 3 – кассета с АЭ.

Для этого в системе установлен электрический нагреватель с регулируемой мощностью до 1.5 кВт. Система соединяется с камерой гибкими трубопроводами с вакуумной изоляцией. Для защиты системы от избыточного давления предусмотрен предохранительный клапан на 20 атм.

Установка автоматизирована, задание параметров работы системы осуществляется с сенсорной панели оператора, управление ею происходит с помощью программируемого логического контроллера. Предусмотрена возможность удаленного управления системой. Температура гелия в контуре поддерживается с точностью ± 1.0 К.

Конструкция усилительного модуля понятна из рис. 3. Охлаждающий газ прокачивается перпендикулярно чертежу, сверху и снизу вакуумной камеры расположены фланцы для ее откачки, в правом нижнем углу рис. 3 представлен использованный нами набор керамических АЭ и показан ход лучей в многопроходной схеме усиления. Вакуумная камера откачивается до давления порядка 10^{-7} Торр, что необходимо для теплоизоляции находящейся внутри нее камеры с криогенной температурой и, прежде всего, для того, чтобы избежать запотевания окон, через которые вводятся усиливаемые лучи. Описанная конструкция претерпела десятки циклов захолаживания с целью смены комплектов АЭ, чем доказала свою надежность.

4. ДИОДНАЯ СИСТЕМА НАКАЧКИ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Для накачки активных элементов усилительного модуля использовалась система из двух (в ряде экспериментов четырех) одинаковых комплектов, каждый из которых состоит из следующих частей: 1) диодного излучателя – матрицы (набора линеек) лазерных диодов, смонтированных в теплоотводящем корпусе с опорно-юстировочным устройством; 2) блока питания диодного излучателя; 3) системы водяного охлаждения диодного излучателя; 4) оптических систем гомогенизации и трансляции излучения.

Каждый диодный излучатель обеспечивает:

- генерацию излучения на длине волны 940 ± 5 нм;
- среднюю мощность излучения импульса не менее 18 кВт в телесном угле $0.5 \times 11^\circ$;
- длительность импульса излучения до 1.5 мс, при частоте следования импульсов до 10 Гц;
- непрерывную работу устройства не менее 8 ч.

При этом размер излучающей площадки излучателя составляет 80 мм вдоль быстрой оси и 11 мм вдоль медленной оси.

Блок питания диодного излучателя обеспечивает генерацию импульсов тока накачки лазерных диодов с параметрами, необходимыми для получения излучения с характеристиками, указанными выше. Передний фронт импульсов питания имеет длительность менее 200 мкс, а задний – менее 100 мкс. Система охлаждения позволяет охлаждать диодные излучатели и поддерживать в

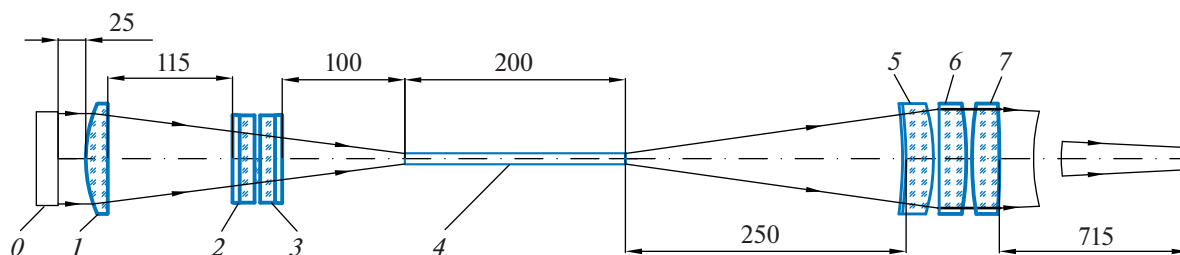


Рис. 4. Оптическая система гомогенизации. 0 — диодный излучатель; 1 — линза цилиндрическая; 2 — линза цилиндрическая; 3 — линза цилиндрическая; 4 — световод; 5—7 — сферические линзы.

автоматическом режиме их температуру в диапазоне от 10 до 40°C с точностью $\pm 1^\circ\text{C}$. Оптическая система накачки дает возможность гомогенизировать излучение накачки для получения минимальной неоднородности ее излучения в активной среде и доставку излучения в зону активных элементов усилительного модуля в виде квадратного пучка заданного размера; а также обеспечивает наведение пучка в центр активной среды с точностью 0.5 мм в поперечном направлении и 10 мм в продольном направлении.

Для гомогенизации излучения в действующих образцах используются световоды. Оптическая схема гомогенизации приведена на рис. 4. Пучок накачки от диодной матрицы фокусируется одной цилиндрической линзой (1) в вертикальном направлении (по быстрой оси) и парой цилиндрических линз (2 и 3) в горизонтальном направлении (по медленной оси) в световод квадратного сечения (4), размером $10 \times 10 \times 200$ мм, в котором, за счет многократного полного внутреннего отражения, происходит перемешивание и гомогенизация излучения. Изображение выходного торца световода перестраивается с увеличением в активную среду системой из трех сферических линз (5—7). На рис. 4 приведены габариты устройства. Точка 0 соответствует выходному торцу матрицы накачки, крайняя правая точка чертежа — центру сборки АЭ в усилительном модуле. В настоящее время рассматривается возможность использования линзового раstra для гомогенизации излучения взамен достаточно сложной, описанной выше оптической схемы.

Измерения параметров диодной накачки подтвердили, что мощность излучения каждой из них практически равна 18 кВт. Поскольку потери в системах гомогенизации и трансляции излучения составляют ~15%, в зону активных элементов приходит ~15 кВт от каждого излучателя. Результаты спектральных измерений, сделанных при токе питания матрицы накачки 260 А, представлены на рис. 5. Как видно из рисунка, необходимая длина волны излучения 940 нм достигается только при предельно возможной температуре в 40°C. Естественно, что такая ситуация определе-

на параметрами тех полупроводниковых диодов, из которых сформирована матрица. Заметим, что производная длины волны по температуре $d\lambda/dT \approx 0.3 \text{ нм}/^\circ\text{C}$.

Измерение формы пучка производилось с помощью профилометра лазерного луча на основе камеры ПЗС (Camera Beam Profiler BC106N-VIS/M, компания Thorlabs, Германия) с объективом Индустар 50/3.5. Синхронизация кадра ПЗС с лазерным импульсом осуществлялось синхроимпульсом задающего генератора PLS-NS-1030 (ООО «Авеста-Проект»). Задержка синхроимпульса относительно лазерного импульса регулируется в широком диапазоне программным образом.

Распределение мощности накачки одного излучателя в зоне усилительного модуля представлено на рис. 6. Причиной недостаточно равномерного (особенно по оси Y) распределения интенсивности является неполное перемешивание излучения в световоде. Из-за малой расходимости излучения диодной матрицы вдоль быстрой оси происходит недостаточное количество отражений от граней световода. Повысить равномерность можно, увеличивая длину световода или расходимость излучения на входе в него за счет уменьшения фокусного расстояния цилиндрической линзы. Например, показано, что, при введении в состав оптической системы накачки рассеивателя (матового стекла) перед вводом излучения в световод, наблюдается резкое повышение однородности пучка, однако мощность излучения в этом случае уменьшается более чем в 2 раза, главным образом из-за сильного рассеяния. Отметим, что при использовании двух или тем более четырех модулей накачки однородность суммарного распределения интенсивности в активной среде будет выше.

5. МНОГОПРОХОДНЫЕ СХЕМЫ УСИЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ С РАЗЛИЧНЫМИ АКТИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Описанные ниже и исследованные многопроходные оптические схемы отличаются от обычных лишь тем, что в качестве собственно усилите-

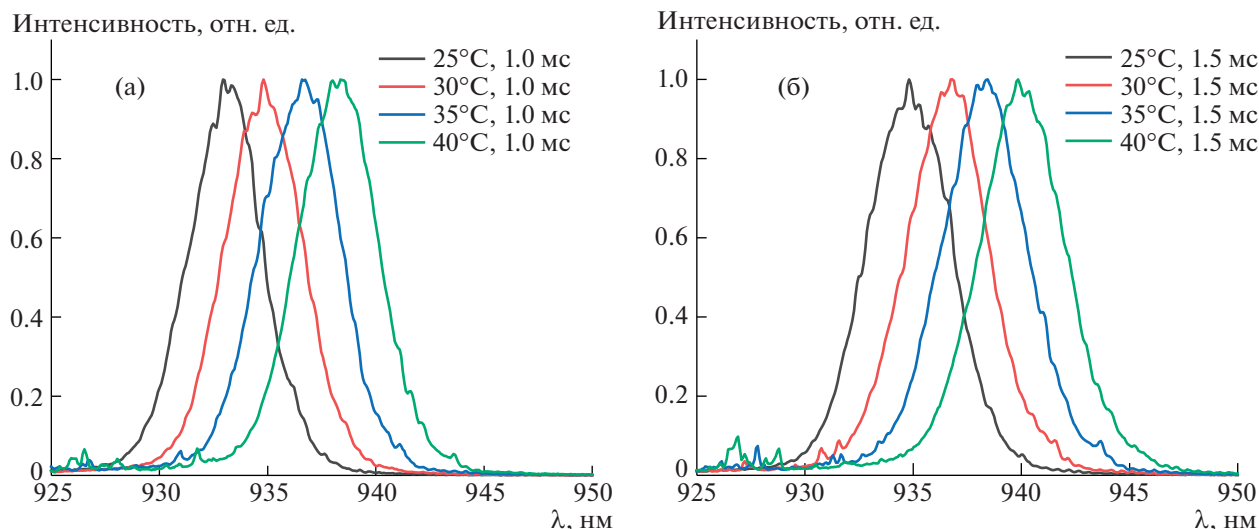


Рис. 5. Спектры излучателя в зависимости от температуры и длительности импульса: $f = 10$ Гц, $I = 260$ А, $\tau = 1$ мс (а), $\tau = 1.5$ мс (б).

для излучения в них используется усилительный модуль (см. рис. 3). Исследованы, в том числе при отладке методики измерения, конфигурации активных элементов: с 4 монокристаллами Yb:YAG (без кладдинга) и с 4 керамическими образцами (с кладдингом). Исследована зависимость коэффициента усиления слабого сигнала от температуры активной среды, длительности импульса накачки, количества проходов, длины волны зондирующего лазерного излучения.

Методика измерения стандартная: на вход усилительной схемы подается известный сигнал и исследуется сигнал на выходе системы. В качестве входного лазерного импульса использовалось излучение, формируемое лазерным задающим генератором (ЗГ, модель PLS-NS-1030, ООО «Авеста-проект»). Измерения проводились для импульса со следующими параметрами: длительность $\tau = 10$ нс, энергия $E \leq 5$ мДж, луч 10 мм в диаметре. На рис. 7 представлены временная форма лазерного импульса и пространственный профиль лазерного пучка, формируемые ЗГ.

Активная среда усилительного модуля состоит из четырех АЭ, которые помещаются в кассету, как показано на рис. 3. В свою очередь, кассета помещается в криогенную камеру УМ (рис. 3), что позволяет контролируемым образом менять температуру АЭ. Система охлаждения АЭ за счет потока гелия при давлении до 20 атм позволяет снимать тепловую нагрузку с активной среды и изменять температуру АЭ в диапазоне от 100 до 295 К.

При измерении коэффициента усиления лазерного импульса в УМ необходимо синхронизовать момент прохождения лазерным импульсом активной среды с моментом достижения максимума инверсной населенности. Система, позво-

ляющая контролировать синхронизацию срабатывания системы накачки и генерации лазерного импульса, работает следующим образом. Сигнал регенеративного усилителя ЗГ запускает источники питания лазерных диодов и с задержкой τ_{delay} сигнал ЗГ. Задержка формируется контроллерами ЗГ и может быть изменена в пределах от 0 до 10 мс с точностью до наносекунды.

При измерениях коэффициента усиления использовались два модуля диодной накачки со следующими параметрами: ток питания диодных излучателей $I = 360$ А, напряжение $U = 120$ В, длительность импульса диодной накачки τ_{pump} от 0.5 до 1.5 мс, температура охлаждающей воды $T_{\text{охл}} = 20^\circ\text{C}$. При указанных выше параметрах мощность диодных излучателей примерно равна 18 кВт, а мощность на входе в активную среду около 15 кВт. Эксперименты проводились в монопериодном режиме. При необходимости задержка τ_{delay} между началом импульса диодной накачки и моментом прохождения лазерного импульса через усилитель варьировалась в пределах от 0 до 1.5 мс.

Измерение коэффициента усиления k_{amp} керамических АЭ с концентрацией 0.9 и 2.2 ат. % на четырех проходах проводилось на длине волны $\lambda = 1030$ нм. Длительности импульса накачки τ_{pump} составляли 0.5, 1.0 и 1.5 мс, а температура охлаждения АЭ от 100 до 240 К. Комбинация АЭ в кассете показана на рис. 3. (Вообще говоря, такая композиция не оптимальна с точки зрения накачки.) Результаты измерений представлены на рис. 8. Температура потока гелия измерялась на выходе из криогенной камеры, измерения коэффициента усиления проводились в монопериодном ре-

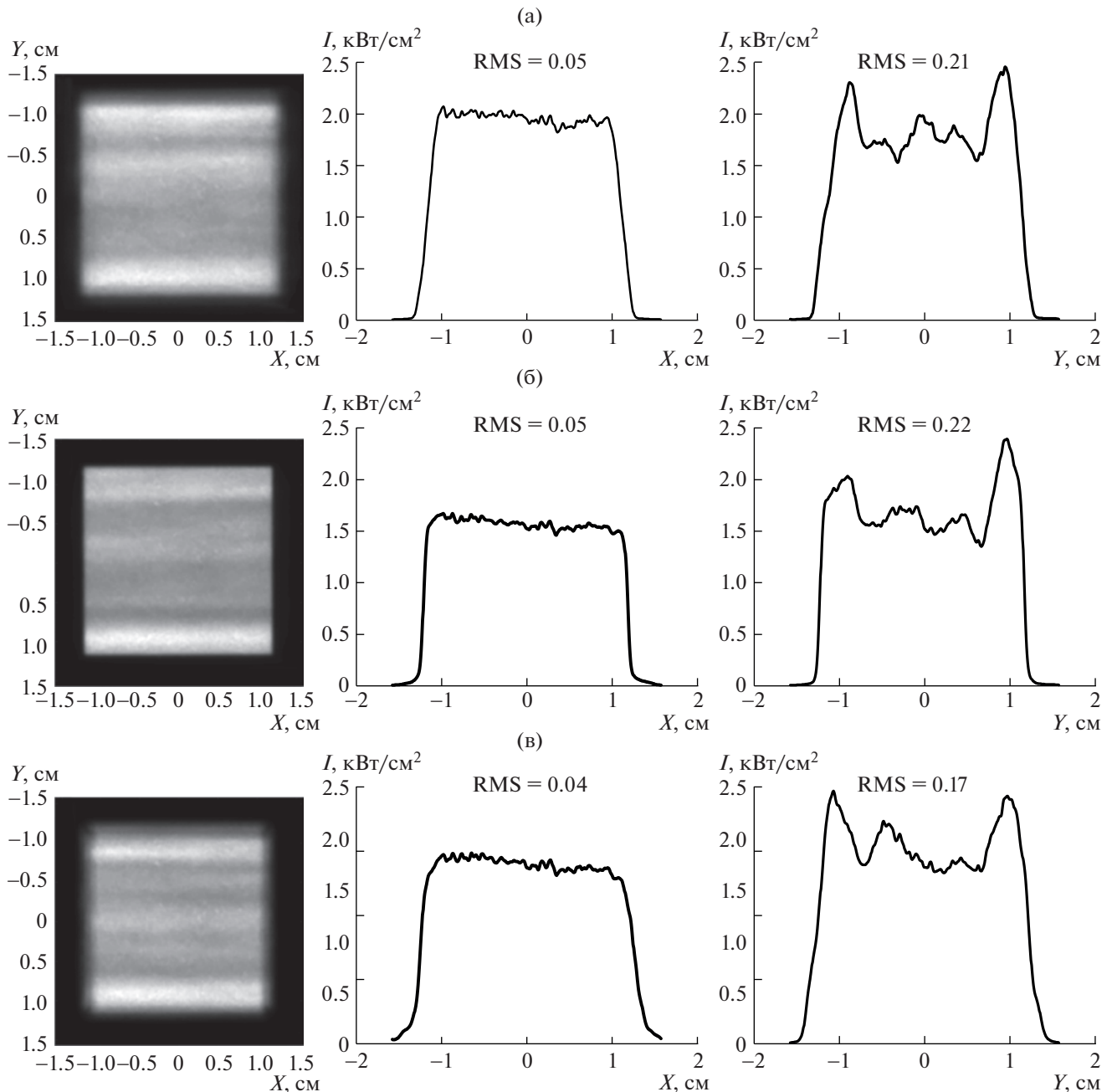


Рис. 6. Распределение мощности накачки одного излучателя в зоне усилительного модуля. $\Delta z = -25$ мм от плоскости центра АЭ в усилительном модуле (а), $\Delta z = 0$ мм (б), $\Delta z = +25$ мм (в).

жиме, поэтому температура АЭ должна быть равна температуре гелия. После достижения необходимой температуры потока гелия измерения проводились с задержкой в 5 мин. Контроль совпадения геометрического положения лазерного луча и области диодной накачки проводился с помощью ПЗС-камеры. Следует отметить, что если три образца лазерной керамики Yb:YAG с концентрацией 0.9 ат. % были переданы ГЛП “Радуга” в ТРИНИТИ для испытаний в 2022 г., то образец с

концентрацией 2.2 ат. % был изготовлен “Радугой” в 2020 г. Этот образец, в отличие от изготовленных позднее, имел окрашенную центральную часть и повышенное поглощение в длинноволновой области спектра. Вероятно, при его изготовлении часть хрома из кладдинга попала в световую зону.

Используя результаты измерений энергии импульсов в многопроходной схеме, можно рассчитать коэффициенты усиления на каждом проходе. Зависимости коэффициентов усиления при длительности накачки 1.5 мс после одного, двух,

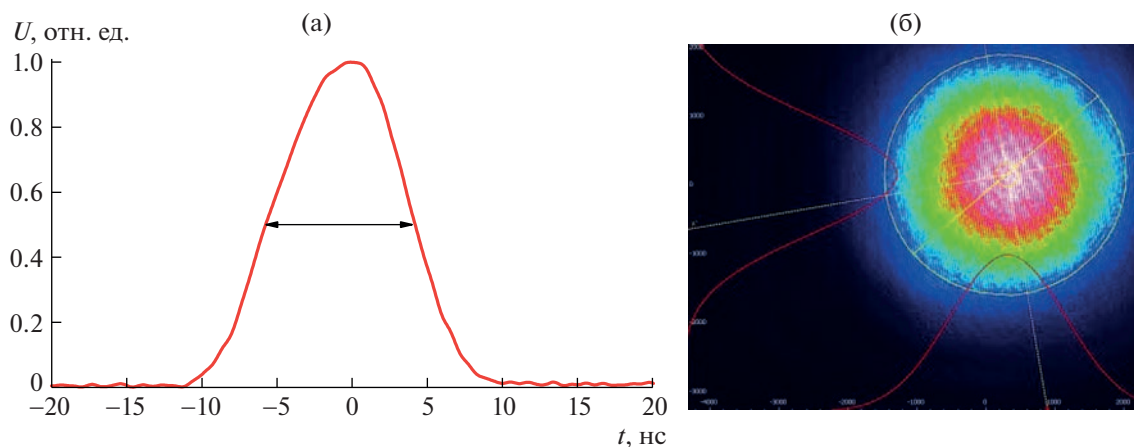


Рис. 7. Форма импульса задающего генератора (а) и пространственный профиль пучка 3Г (б).

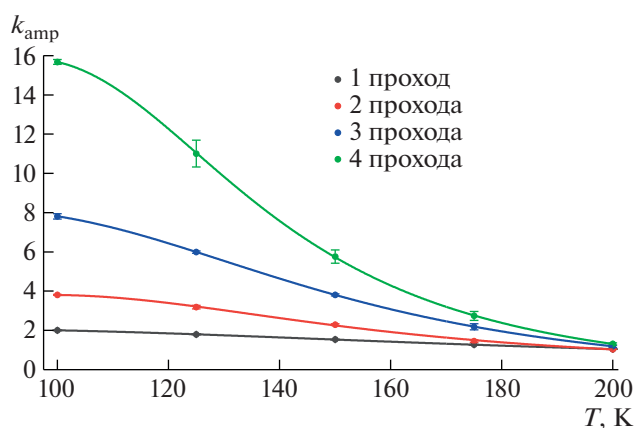


Рис. 8. Зависимость коэффициента усиления от температуры АЭ после одного, двух, трех и четырех проходов.

трех и четырех проходов от температуры активной среды приведены на рис. 8.

На все оптические элементы четырехпроходной оптической схемы (зеркала, линзы, окна) нанесены многослойные диэлектрические покрытия, обеспечивающие потери для s - и p -поляризации $\leq 0.2\%$ (согласно ТЗ) на отражение или при прохождении одной поверхности. При каждом проходе четырехпроходной оптической схемы лазерный луч проходит 20 поверхностей. Если полагать, что при прохождении (отражении) любой из поверхностей коэффициент пропускания равен T_{sur} , то общий коэффициент пропускания при прохождении N поверхностей будет равен $T_{pass}^{cal} = T_{sur}^N$. Из сравнения экспериментально измеренного значения T_{pass}^{exp} расчетным значением T_{pass}^{cal} следует, что величина экспериментально измеренного коэффициента пропускания колеблется в пределах от 99.4 до 99.5%, что существенно хуже значения, указанного в ТЗ, и значений измеренных при

входном контроле только что изготовленных компонент T_{sur} (99.8%).

Все приведенные выше результаты получены для p -поляризации зондирующего лазерного излучения. Сравнение результатов измерения показало, что при s -поляризации зондирующего излучения величина коэффициента отражения меньше, но не существенно, чем в случае p -поляризации (всего на 6%). Коэффициенты пропускания для p - и s -поляризаций лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 1029.5$ нм одинаковы в пределах ошибки измерения.

ВЫВОДЫ

1. Проведенные исследования позволили выявить и проанализировать основные физические принципы и концепции создания высокоэнергетических импульсно-периодических лазеров непрерывной генерации.

2. Из анализа перечня свойств активных сред сделан вывод, что Yb:YAG керамика и Yb:YAG

кристаллы с кладдингом являются наилучшими кандидатами для использования в высокоэнергетических импульсно-периодических лазерах.

3. Показано, что их спектры поглощения $\sigma_a(\lambda, T)$ и вынужденного излучения $\sigma_e(\lambda, T)$, коэффициенты усиления слабого сигнала ничем не уступают лучшим зарубежным аналогам.

4. Начаты работы по изготовлению “градиентного” кладдинга с плавным изменением концентрации легирования хромом Cr^{4+} от границы кристалла к краю АЭ и методов сварки кладдинга и кристалла.

5. Проведенные испытания систем криогенного охлаждения АЭ в диапазоне криогенных температур 100–295 К и мощностями охлаждающей способности систем 2 и 6 кВт, а также криорефрижератора замкнутого цикла с мощностью охлаждающей способности 6 кВт, для диапазона температур от 173 до 320 К, свидетельствуют о том, что разработанные совместно с МГТУ им. Н.Э. Баумана системы генерации охлаждающей среды надежны и могут быть рекомендованы для широкого применения.

6. Эксплуатация усилительного модуля показала его надежность и эффективность. Он также может быть рекомендован для использования в многопроходных схемах усиления непрерывно генерирующих лазеров, требующих криогенного охлаждения АЭ.

7. Исследование гомогенизатора системы криогенного охлаждения АЭ показало недостаточность сглаживания луча накачки вдоль быстрой оси (Y). Повысить однородность излучения без потерь энергии можно, если увеличить расходимость излучения по вертикальной оси перед световодом. Другой путь создания однородной структуры пучка накачки исследовать возможность применения для гомогенизации линзового растра.

8. Реализована четырехпроходная схема усиления и проведены ее исследования.

9. Проведенные измерения доказали соответствие экспериментальных результатов расчетным оценкам и позволяють рассчитывать на получение заданных показателей разработки.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках Государственного контракта от 21.04.2023 № Н.4к.241.09.23.1068.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликтов интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bayramian A., Armstrong P., Ault E. et al. The Mercury Project: A High Average Power, Gas-Cooled Laser for

Inertial Fusion Energy Development // Fusion Science and Technology. 2007. V. 52. P. 383.

2. Mason P., Divoky M., Ertel K. et al. Kilowatt average power 100 J-level diode pumped solid state laser // Optica. 2017. V. 4 (4). P. 438–439.

3. Haefner C.L., Bayramian A., Spinka T. et al. HAPLS: A Robust Driver for High Intensity Laser Matter Interactions Enabling Precision Science and Commercial Applications // The Review of Laser Engineering. 2018. V. 46 (3). P. 138–141.

4. Chanteloup J.C., Albach D., Lucianetti A. et al. Multi kJ level Laser Concepts for HiPER Facility // J. Phys.: Conf. Ser. 2010. V. 244. P. 012010.

5. Bayramian A., Aceves S., Anklam T. et al. Compact, Efficient Laser Systems Required for Laser Inertial Fusion Energy // Fusion Science and Technology. 2011. V. 60. P. 28.

6. Albach D. Amplified Spontaneous Emission and Thermal Management on a High Average-Power Diode-Pumped Solid-State Laser – The Lucia Laser System / PhD Thesis, P.: École Polytechnique, 2010.

7. Hamamoto K., Tokita S., Yoshida H. et al. Temperature-dependent absorption assessment of YAG ceramics as cladding material // Opt. Mater. Express. 2018. V. 8 (8). P. 2378–2386.

8. Körner J., Jambunathan V., Hein J. et al. Spectroscopic characterization of Yb³⁺ doped laser materials at cryogenic temperatures // Appl. Phys. 2014. B 116. P. 75–81.

9. Ricaud S., Papadopoulos D.N., Pellegrina A. et al. High-power diode-pumped cryogenically cooled Yb:CaF₂ laser with extremely low quantum defect // Opt. Lett. 2011. V. 36 (9). P. 1602–1604.

10. Handbook of solid-state lasers: Materials, systems and applications / Eds B. Denker, E. Shklovsky. Cam.: Woodhead Publishing, 2013.

11. Hornung M., Liebetrau H., Keppler S. et al. 54 J pulses with 18 nm bandwidth from a diode-pumped chirped-pulse amplification laser system // Opt. Lett. 2016. V. 41. P. 5413–5416.

12. Payne S.A., Chase L.L., Smith L.K. et al. Infrared cross-section measurements for crystals doped with Er³⁺, Tm³⁺, and Ho³⁺ // IEEE J. Quantum Electron. 1992. V. 28 (11). P. 2619–2630.

13. Divoky M., Pilar Y., Hanus M., Navratil P., Sawickachyla M., De vido M., Phillips P.J., Ertel K., Butcher T., Fibrich M., Green Y.T., Koselja M., Preclikova Y., Kubat Y., Houzvicka Y., Rus B., Collier J., Lucianetti A., and Moeck T. Performance comparison of Yb:YAG ceramics and crystal gain material in a large-area, high-energy, high average-power diode-pumped laser and crystal gain material in a large-area, high-energy, high average-power diode-pumped laser // Optics Express 3636. 2020. V. 28. № 3 (February).

CURRENT TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF HIGH-ENERGY LASERS

Academician of the RAS S. G. Garanin^a, V. N. Derkach^a, K. N. Makarov^b,
V. A. Ostrovskiy^b, M. I. Pergament^b, M. V. Putilin^b, and D. V. Sizmin^a

^a*The Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics,
Institute of Laser Physical Research, Sarov, Nizhny Novgorod Region, Russia*

^b*State Research Center of the Russian Federation Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research,
Troitsk, Moscow, Russia*

Current trends in developing high-energy lasers with pulse energies in the tens and hundreds of joules are considered. Active media are analyzed for their use in such lasers. Yb:YAG active crystalline and ceramic elements (AE) of Russian production are experimentally investigated at temperatures from 100 K to 295 K. The data of the AE cryogenic cooling system are presented. A diode pumping system for AE and a homogenizer of its radiation are described. The physical and technical characteristics of the pumping system are given. Fresnel losses, absorption losses, and losses due to amplified spontaneous emission (ASE), which reduce the energy stored in an inverted population, are experimentally measured. The results of measuring the gain in multipass circuits with different sets of AEs are presented.

Keywords: repetitively pulsed lasers, diode pumping, gas (cryogenic) cooling