

# Оптимизация мультидискового криогенного усилителя высокоинтенсивной лазерной системы с высокой частотой следования импульсов

В.В.Петров, Г.В.Купцов, В.А.Петров, А.В.Лаптев, А.В.Кирпичников, Е.В.Пестряков

*Проведена модификация кристаллодержателей активных элементов мультидискового многопроходного усилителя безжидкостным замкнутым циклом криогенного охлаждения. Экспериментально исследованы зависимости равновесной температуры активных элементов от мощности диодной накачки для модифицированных кристаллодержателей, а также зависимость коэффициента усиления от температуры активных элементов. Получено усиление слабого сигнала с коэффициентом до 1.2 за один проход через активный элемент.*

**Ключевые слова:** диодная накачка, лазерная система с высокой пиковой мощностью, высокая частота следования импульсов, криогенные температуры, лазерный усилитель.

## 1. Введение

Одним из перспективных направлений исследований в области лазерной физики является разработка физических основ, способов создания и структуры источников импульсов излучения, имеющих одновременно высокую пиковую и среднюю мощности [1–4]. Такие системы позволяют, в частности, проводить исследования в области астрофизики, создавая условия для возбуждения плазмы, близкой по параметрам к звездной плазме [5]. К другим важным применениям таких систем относится ускорение элементарных частиц, когда высокая частота следования лазерных импульсов обеспечивает необходимый уровень потока частиц за короткий промежуток времени [6]. К актуальным задачам в настоящий момент относится и генерация аттосекундных импульсов излучения для метрологических исследований. Для эффективной генерации высоких гармоник оптических частот необходимы импульсы предельно малой длительности со стабилизацией фазы несущей относительно огибающей [7, 8], имеющие одновременно высокие среднюю и пиковую мощности излучения [9].

В Институте лазерной физики СО РАН (Новосибирск) разрабатывается источник аттосекундных импульсов из-

лучения с высокими пиковой и средней мощностями. Его основой является малопериодная фемтосекундная твердотельная лазерная система [10], используемая в качестве источника излучения для дальнейшего параметрического усиления, и масштабируемая полностью твердотельная лазерная система с диодной накачкой, генерирующая импульсы высокоинтенсивного излучения с большой частотой следования [11, 12] для накачки параметрического усилителя. Малопериодная фемтосекундная твердотельная лазерная система генерирует импульсы с частотой следования 1 кГц со стабилизированной на уровне 0.18 рад фазой несущей частоты относительно огибающей импульса (СЕР-стабилизация).

## 2. Экспериментальная установка

Масштабируемая лазерная система с диодной накачкой, схема которой приведена на рис. 1, состоит из задающего генератора с предусилителем и двух синхронизованных параллельных каналов: канала лазерного усиления субджоульного класса и канала параметрического усиления [13].

Твердотельный лазер на основе охлаждаемой жидким азотом  $\text{Yb}^{3+}:\text{Y}_2\text{O}_3$ -керамики с диодной накачкой генерирует импульсы излучения со следующими параметрами: энергия  $\sim 1$  нДж, длительность 1 пс, частота следования  $\sim 80$  МГц, центральная длина волны 1030 нм, полная ширина спектра на полувысоте  $\sim 2$  нм. Импульсы поступают в волоконный стретчер, где происходит уширение их спектра до 6 нм и увеличение длительности до  $\sim 0.5$  нс, энергия импульсов на выходе стретчера составляет  $\sim 0.15$  нДж. Затем импульсы направляются в регенеративный усилитель на основе кристалла  $\text{Yb}:\text{KYW}$  с диодной накачкой. На выходе усилителя импульсы следуют с частотой 1 кГц и имеют энергию 0.5 мДж. После усиления излучение разделяется на две части: одна часть, с энергией импульсов  $\sim 0.05$  мДж ( $\sim 10\%$ ), направляется в канал параметрического усиления, а другая используется в качестве входного излучения канала лазерного усиления. Разделение на каналы позволяет параметрически усиливать как излучение, полученное путем сверхуширения из-

**В.В.Петров.** Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2; Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630093 Новосибирск, просп. К.Маркса, 20; e-mail: vpstv@laser.nsc.ru

**Г.В.Купцов, Е.В.Пестряков.** Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2

**В.А.Петров.** Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630093 Новосибирск, просп. К.Маркса, 20

**А.В.Лаптев, А.В.Кирпичников.** Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3

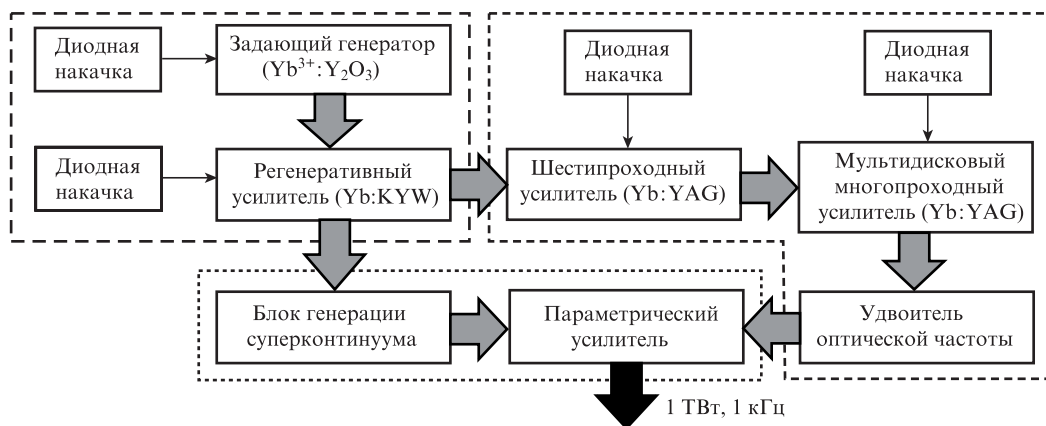


Рис.1. Схема масштабируемой полностью твердотельной лазерной системы с диодной накачкой, генерирующей импульсы излучения с большой частотой следования.

лучения задающего генератора, так и импульсы внешне-го источника, в том числе СЕР-стабилизированные.

Канал параметрического усиления состоит из блока генерации суперконтинуума и параметрического усилителя на нелинейно-оптическом кристалле группы  $\beta$ -бариевых боратов и должен обеспечивать энергию импульсов на выходе канала более 10 мДж. Для достижения мощности 1 ТВт на выходе системы, блок генерации суперконтинуума обеспечивает спектральную ширину импульса  $\sim 150$  нм, что позволяет получать после компрессора импульсы длительностью менее 10 фс. Сверхширение спектра осуществляется в фотонно-кристаллическом волокне с большой нелинейностью.

Канал лазерного усиления образован двумя каскадами лазерного усиления с диодной накачкой и нелинейно-оптическим кристаллом для удвоения оптической частоты. Первый каскад усиления состоит из криогенного шестипроходного лазерного усилителя на кристалле Yb:YAG (10 ат.%) с двухсторонней накачкой излучением диодных лазеров общей мощностью 250 Вт. На этом этапе импульсы усиливаются до энергии 10 мДж. Вторым каскадом усиления является мультидисковый многопроходный усилитель с безжидкостным замкнутым циклом криогенного охлаждения (рис.2). Он основан на диффузионно-сваренных кристаллах YAG-Yb:YAG (10 ат.%), прикрепленных попарно к массивным медным кристаллодержателям [4].

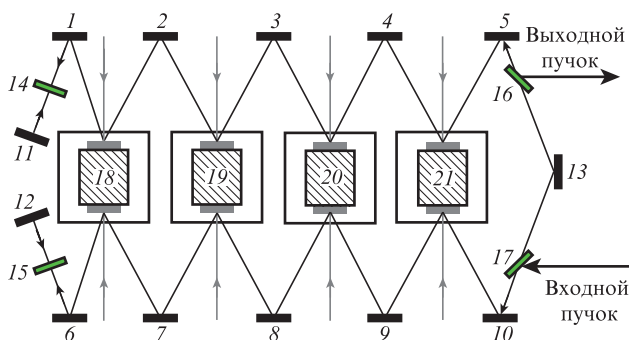


Рис.2. Схема мультидискового многопроходного усилителя с безжидкостным замкнутым циклом криогенного охлаждения: 1-13 – зеркала с высокоотражающими диэлектрическими покрытиями; 14, 15 – четвертьволновые пластинки; 16, 17 – поляризаторы; 18-21 – медные кристаллодержатели с двумя активными элементами. Серыми стрелками, перпендикулярными криостатам, показана диодная накачка.

Каждый активный элемент (АЭ) накачивается импульсами излучения диодных лазеров со средней мощностью 100 Вт на центральной длине волны 936 нм со спектральной шириной 4 нм. При этом диаметры пучков накачки для каждой пары АЭ составляют 4 и 7 мм соответственно. Охлаждение АЭ лазерного усилителя осуществляется с помощью криостатов на основе пульсирующих трубок с замкнутым циклом циркуляции гелия. Охладители данного типа позволяют достичь температуры 40 К и поддерживать рабочую температуру кристаллов  $\sim 120$  К при полной мощности диодной накачки. Многопроходный усилитель разработан для получения импульсов с энергией, превышающей 300 мДж, при энергии входных импульсов 10 мДж. Основное внимание на этом этапе работы было сосредоточено на получении импульсов с частотой следования до 1 кГц на выходе канала лазерного усиления, однако для получения возможности усиливать импульсы было необходимо провести модернизацию системы охлаждения многопроходного усилителя из-за вибрации компрессоров системы охлаждения [14].

### 3. Система криогенного охлаждения мультидискового многопроходного усилителя

Охладители на пульсирующих трубках имеют пониженный уровень вибраций, однако на этапе тестирования мультидискового криогенного усилителя были выявлены кратковременные циклические и долговременные случайные угловые смещения лазерного пучка, не позволяющие использовать излучение на выходе канала лазерного усиления для накачки параметрического усилителя. Характерные положения координат центра пространственного профиля излучения (центроида пучка), полученные в течение 128 с с интервалом фиксации каждого положения центроида, равным 1 с, представлены на рис.3.

Кратковременные циклические смещения центроида заключались в отклонении пучка от направления распространения на  $50 \pm 5$  мкрад после отражения от АЭ с частотой несколько герц, совпадающей с рабочей частотой цикла сжатия-расширения гелия в криогенных охладителях. Долговременные смещения порядка единиц миллирадиан приводили к расстройке юстировки оптической системы за время полного цикла работы (комнатная температура – криогенная температура – комнатная температура), что не позволяло получать воспроизводимые результаты. Данные по долговременным смещениям пред-

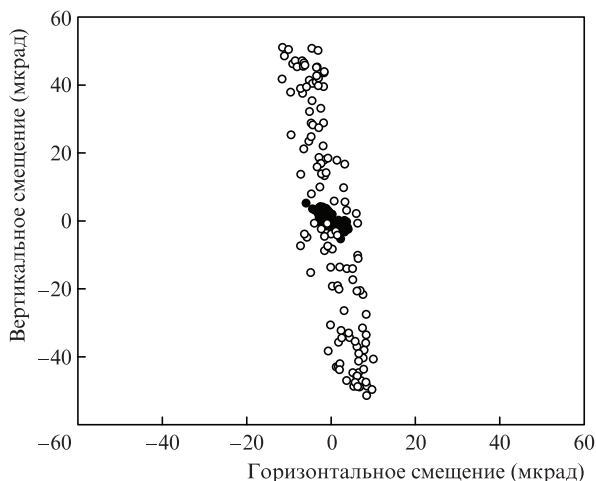


Рис.3. Карта смещений центра пучка пробного лазера после отражения от АЭ при включенном (○) и выключенном (●) компрессоре.

ставлены на рис.4. Предполагается, что долговременные смещения связаны с двумя факторами. Во-первых, при включении компрессора происходит резкий скачок давления (~30 бар) в линиях подачи-откачки гелия, оказывающий механическое воздействие на вакуумную камеру, в которой находится криостат. Во-вторых, в процессе охлаждения-нагрева происходит постепенное изменение моментов затяжки резьбовых соединений и линейное смещение деталей кристаллодержателя относительно друг друга из-за наличия в системе охлаждения элементов с разными коэффициентами линейного расширения.

Для решения проблемы вибраций в криогенной системе охлаждения был использован гибкий тепловой мост кристаллодержателя. Недостатком такого подхода является снижение охлаждающей способности вследствие увеличения эффективного расстояния между криостатом и кристаллодержателем, что приводит к ухудшению лазерных характеристик АЭ и, как следствие, уменьшению коэффициента усиления. Для выбора оптимального теплофизического режима работы системы охлаждения АЭ при рабочих параметрах усилителя необходимо знать распределение температуры в системе охлаждения и в АЭ. Для

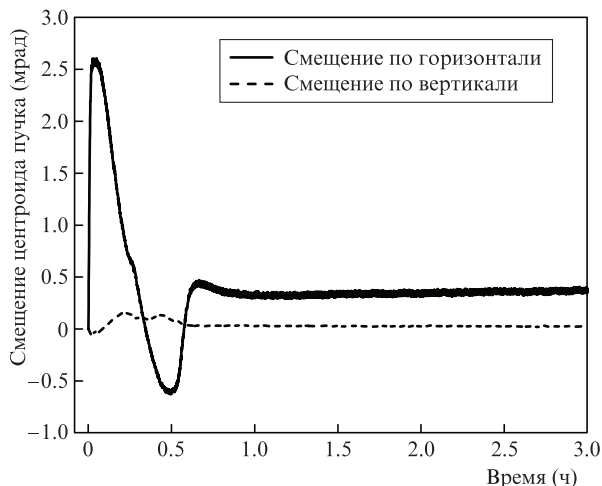
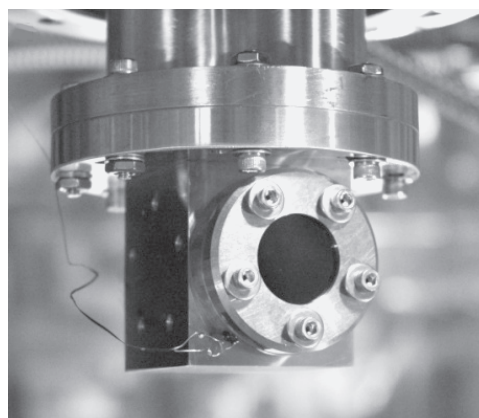


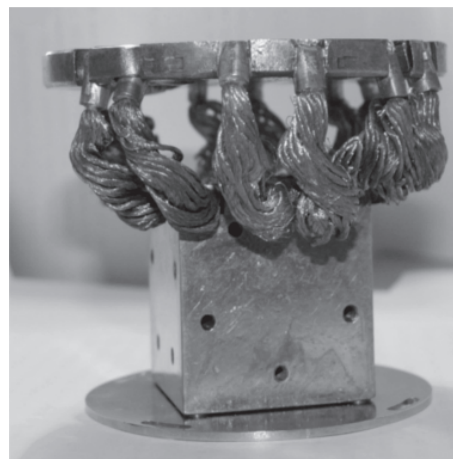
Рис.4. Долговременные смещения центра пучка пробного лазера после отражения от АЭ при охлаждении. Момент начала работы компрессора соответствует нулю на оси времени.

этого методом конечно-разностной аппроксимации на основе неявной схемы с пространственным расщеплением численно моделировалось трехмерное нестационарное уравнение теплопроводности с соответствующими граничными условиями. На границе материалов с разными физическими параметрами реализована неравномерная пространственная сетка вдоль оптической оси, что позволяет учесть, в том числе, тонкие многослойные контакты, находящиеся в системе охлаждения АЭ, без потери точности расчета и скорости вычисления [15]. Для верификации результатов моделирования были экспериментально исследованы зависимости температуры АЭ от мощности накачки при использовании цельных (исходных) кристаллодержателей. Исследование проводилось в пределах средней мощности накачки каждого диодного лазерного источника до 70 Вт. Данные моделирования находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными [15].

По результатам численного моделирования нами были разработаны разрезные кристаллодержатели с тепловым мостом на основе 12 гибких теплопроводов, каждый из которых является витым медным проводом с сечением 10 мм<sup>2</sup>. Кристаллодержатели крепятся одной частью к головке криогенного охлаждения, а другой – к жесткому основанию (рис.5). Использование разрезных кристаллодержателей позволило уменьшить смещения центра пучка после отражения от АЭ. Результаты измерений кратковременных циклических смещений центра пучка при использовании разрезных, а также цельных кристаллодержателей представлены на рис.6. Видно, что после модификации системы охлаждения АЭ поведение



a



б

Рис.5. Фотографии цельного кристаллодержателя, прикрепленного к охлаждающей головке (а), и разрезного кристаллодержателя с гибким тепловым мостом (б).

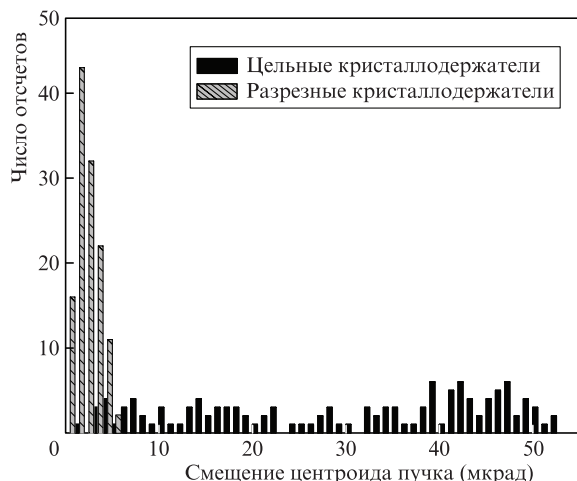


Рис.6. Статистика кратковременных угловых смещений центра пучка от среднего положения при использовании цельных и разрезных кристаллодержателей.

пучка лазера на выходе усилителя качественно изменилось. В случае разрезных кристаллодержателей характер колебаний имеет вид нормального распределения со средним значением 2.3 мкрад и дисперсией 1.2 мкрад. Максимальное отклонение составляет  $5 \pm 1.2$  мкрад. В случае цельных кристаллодержателей гистограмма смещения центра пучка имеет распределение, которое свидетельствует о маятниковом характере движения.

Результаты измерений долговременных случайных смещений центра пучка представлены на рис.7. Они показывают тенденцию возврата системы охлаждения в исходное состояние после первоначального смещения. При этом использование разрезных кристаллодержателей позволило подавить смещение центра пучка до  $\sim 0.2$  мрад после включения компрессора, обеспечивая воспроизводимость экспериментальных результатов.

Также были проведены эксперименты по определению теплотехнических свойств модифицированных кристаллодержателей. Производилась накачка двумя лазерными диодами двух АЭ, прикрепленных к одному кристаллодержателю. Зависимости их равновесной темпера-

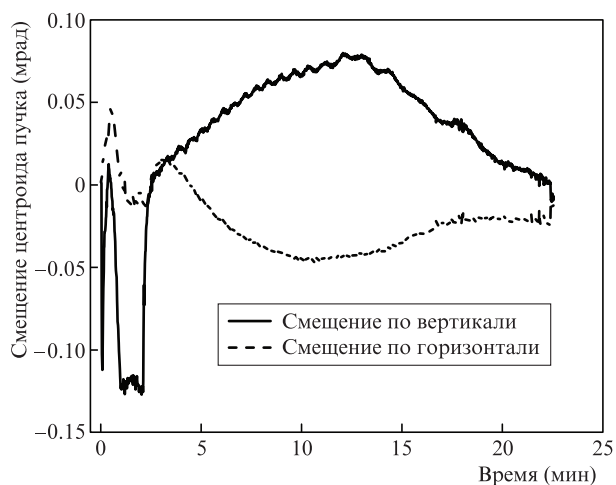


Рис.7. Долговременные смещения центра пучка пробного лазера после отражения от АЭ при использовании разрезных кристаллодержателей. Момент начала работы компрессора соответствует нулю на оси времени.

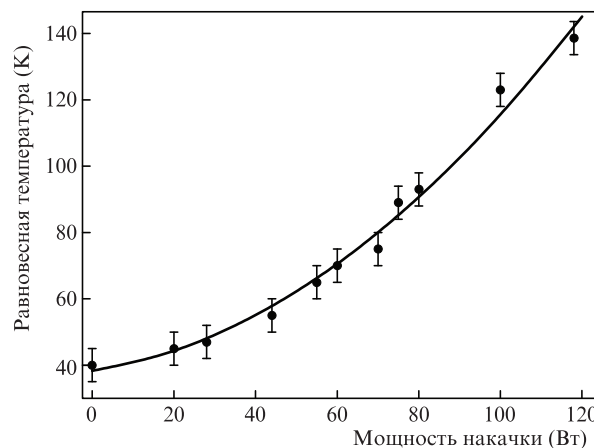


Рис.8. Зависимость равновесной температуры АЭ от средней мощности накачки  $P$ : точки – экспериментальные данные, сплошная кривая – аппроксимация параболой  $T = a + bP + cP^2$  ( $a = 38.3$ ,  $b = 0.18$ ,  $c = 5.88 \times 10^{-3}$ ).

туры от средней мощности диодной накачки при использовании модифицированных кристаллодержателей приведены на рис.8. Экспериментально определенная средняя мощность накачки, обеспечивающей рабочий тепловой режим, составила 100 Вт. При этом в случае цельной конструкции кристаллодержателей рабочий тепловой режим поддерживался при мощности накачки 200 Вт. Предполагается, что недостаточная эффективность разрезных кристаллодержателей связана с особенностями технологии их изготовления.

#### 4. Усиление сигнала

Модернизация системы охлаждения АЭ позволила снизить амплитуду циклических кратковременных смещений пучка до уровня менее 5 мкрад. После модернизации экспериментально были определены коэффициенты усиления излучения за один проход через АЭ. Схема эксперимента приведена на рис.9. Энергия входного импульса измерялась в точке I, затем излучение направлялось в АЭ (первый проход) при помощи системы зеркал. Энергия импульса после первого прохода измерялась в точке II. Далее излучение направлялось через пластинку  $\lambda/4$  на зеркало и отражалось обратно, после чего совершало

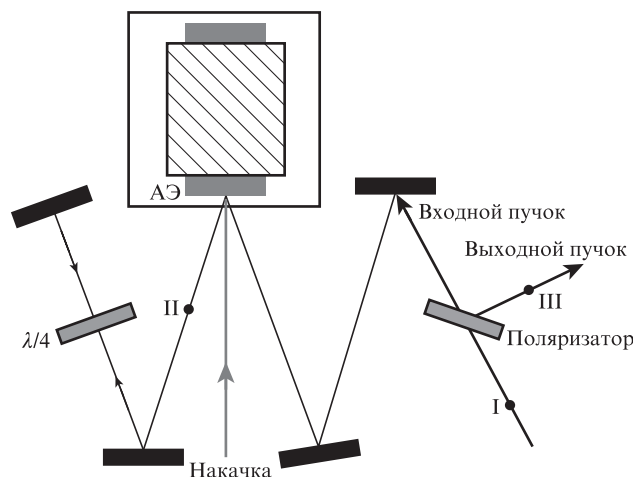


Рис.9. Схема эксперимента по определению коэффициента усиления АЭ за один проход излучения.

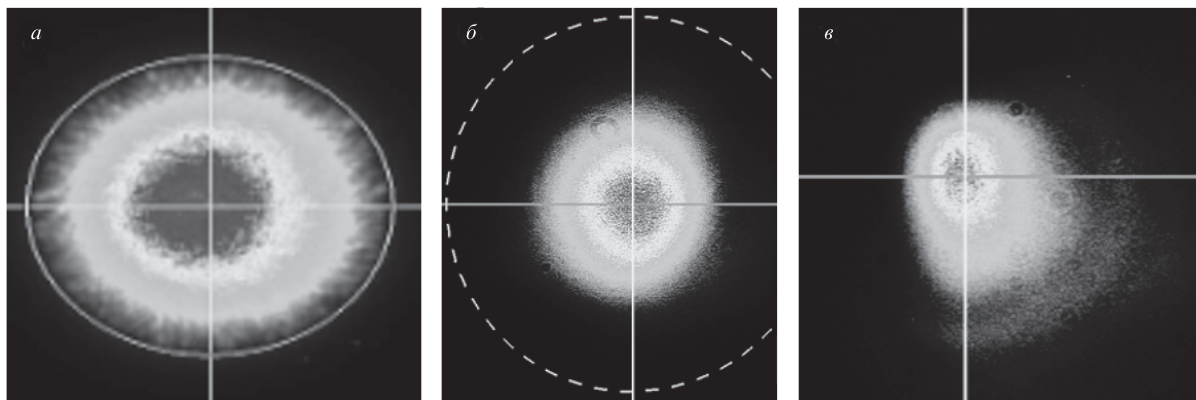


Рис.10. Пространственные распределения интенсивностей излучения диодной накачки (а), входного (б) и усиленного (в) излучений.

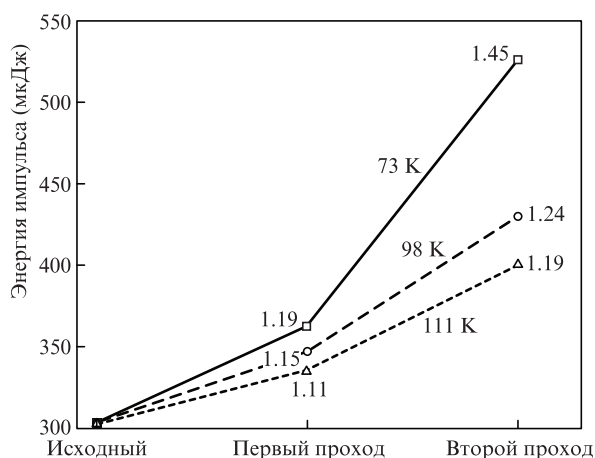


Рис.11. Зависимости энергии импульсов от количества их проходов через АЭ при различных температурах АЭ. Цифры рядом с точками – коэффициенты усиления за проход.

второй проход через АЭ. Энергия импульса после второго прохода измерялась в точке III. Эксперименты проводились при диаметре пучка диодной накачки 4 мм, средней мощности 100 Вт, скважности импульсов 2 и частоте их следования 1 кГц. Импульсы входного излучения имели следующие параметры: энергия 300 мкДж, длительность 500 пс, диаметр пучка 4 мм, частота следования 1 кГц. Пространственные распределения интенсивностей излучения накачки, входного излучения в точке I и излучения после усиления (в точке III) приведены на рис.10. Время выхода системы охлаждения на температурный режим составляет десятки минут, позволяя провести эксперименты при различных температурах АЭ. На рис.11 представлены данные эксперимента по определению коэффициента усиления за проход излучения через АЭ. Полученный коэффициент усиления слабого сигнала для температуры 111 К составляет 1.1–1.2 за проход, что согласуется с теоретическими данными [16], и позволяет получить импульс с энергией 300 мДж на выходе мультидискового многопроходного усилителя масштабируемой лазерной системы.

## 5. Заключение

В работе проведена оптимизация мультидискового многопроходного усилителя с безжидкостным замкнутым циклом криогенного охлаждения. Экспериментально ис-

следованы зависимости равновесной температуры АЭ от мощности диодной накачки для модифицированных кристаллодержателей системы охлаждения многопроходного усилителя. Определена допустимая средняя мощность диодной накачки, которая не приводит к превышению рабочей температуры АЭ. Получено усиление сигнала с коэффициентом 1.1–1.2 за проход через АЭ. Полученные результаты будут использоваться при создании и разработке масштабируемой полностью твердотельной лазерной системы с диодной накачкой, генерирующей импульсы высокоинтенсивного излучения с большой частотой следования.

Работа поддержана программами Президиума РАН «Экстремальные световые поля и их взаимодействие с веществом» и СО РАН.

- Puppin M., Deng Y., Prochnow O., Ahrens J., Binhammer T., Morgner U., Krenz M., Wolf M., Ernstorfer R. *Opt. Express*, **23** (2015), 1491 (2015).
- Baumgarten C., Pedicone M., Bravo H., Wang H., Yin L., Menoni C.S., Rocca J.J., Reagan B.A. *Opt. Lett.*, **41** (14), 3339 (2016).
- Zapata L.E., Reichert F., Hemmer M., Kartner F.X. *Opt. Lett.*, **41** (3), 492 (2016).
- Brown D.C., Tornegard S., Kolis J. *High Power Laser Sci. Eng.*, **4**, e15 (2016).
- Remington B.A., Drake R.P., Takabe H., Arnett D. *Phys. Plasmas*, **7** (5), 1641 (2000).
- Borghesi M., Fuchs J., Bulanov S.V., MacKinnon A.J., Patel P.K., Roth M. *Fusion Sci. Technol.*, **49** (4), 412 (2006).
- Kirpichnikov A.V., Petrov V.V., Kuptsov G.V., Laptev A.V., Petrov V.A., Pestryakov E.V., Trunov V.I. *ЖИЭС*, **83** (6-16), 668 (2016).
- Drescher M., Hentschel M., Kienberger R., Tempea G., Spielmann C., Reider G.A., Corkum P.B., Krausz F. *Science*, **291** (5510), 1923 (2001).
- Wu Y., Cunningham E., Zang H., Li J., Chini M., Wang X., Wang Y., Zhao K., Chang Z. *Appl. Phys. Lett.*, **102**, 201104 (2013).
- Kirpichnikov A.V., Petrov V.V., Kuptsov G.V., Laptev A.V., Petrov V.A., Pestryakov E.V., Trunov V.I. *Proc. SPIE* (2018) (in press).
- Петров В.В., Пестряков Е.В., Лаптев А.В., Петров В.А., Купцов Г.В., Трунов В.И., Фролов С.А. *Квантовая электроника*, **44** (5), 452 (2014) [*Quantum Electron.*, **44** (5), 452 (2014)].
- Купцов Г.В., Петров В.В., Лаптев А.В., Петров В.А., Пестряков Е.В. *Квантовая электроника*, **46** (9), 801 (2016) [*Quantum Electron.*, **46** (9), 801 (2016)].
- Kuptsov G.V., Petrov V.V., Petrov V.A., Kirpichnikov A.V., Laptev A.V., Pestryakov E.V. *ЖИЭС*, **83** (6-16), 533 (2016).
- Petrov V.V., Laptev A.V., Kuptsov G.V., Petrov V.A., Kirpichnikov A.V., Pestryakov E.V. *Proc. SPIE* (2018) (in press).
- Petrov V.A., Kuptsov G.V., Petrov V.V., Kirpichnikov A.V., Laptev A.V., Pestryakov E.V. *AIP Conf. Proc.*, **1893**, 030121 (2017).
- Petrov V.V., Pestryakov E.V., Petrov V.A., Kuptsov G.V., Laptev A.V. *Laser Phys.*, **24** (7), 074014 (2014).