

# Криогенный дисковый Yb:YAG-лазер с выходным импульсом наносекундной длительности

Е.А.Перевезенцев, И.Б.Мухин, И.И.Кузнецов, О.Л.Вадимова, О.В.Палашов

*Представлен криогенный дисковый Yb:YAG-лазер, модернизированный с целью увеличения его средней и пиковой мощности. Проведены существенные изменения задающей части лазера, позволившие при сохранении энергии импульса уменьшить его длительность до единиц наносекунд. Разработан криогенный дисковый квантрон с проточной системой охлаждения. На базе двух таких квантронов создан новый основной усилитель, собранный по многопроходной телескопической схеме. Суммарный коэффициент усиления по слабому сигналу криогенных каскадов составил  $\sim 10^8$ .*

**Ключевые слова:** импульсный лазер, дисковый лазер, Yb:YAG, криогенное охлаждение.

## 1. Введение

При создании лазерных систем с высокой частотой следования и большой пиковой мощностью импульсов ограничивающими факторами являются термонаведенные искажения излучения и самофокусировка. Поэтому наиболее оптимальной для активного элемента (АЭ) является дисковая геометрия, обеспечивающая при высокой средней по времени мощности лазера малую длину взаимодействия излучения с активной средой. В Институте прикладной физики РАН реализуется проект по созданию криогенного лазера с высокой средней и пиковой мощностью на Yb:YAG-дисках. Охлаждение до криогенных температур используется для повышения оптической эффективности лазера и частоты следования импульсов  $f$ . Лазер состоит из трех частей: задающей системы, предварительного усилителя (ПУ) и основного усилителя (ОУ). Сигнал из задающей системы с энергией 2–3 мДж должен быть усилен в ПУ до 30–40 мДж, а затем в ОУ – до  $\sim 500$  мДж при  $f = 1$  кГц.

Одно из основных назначений создаваемой лазерной системы – накачка параметрических усилителей фемтосекундных лазеров [1, 2]. Для получения большей пиковой мощности желательно использовать максимально короткие импульсы, вплоть до одного периода поля. Для длины волны  $\sim 1$  мкм это единицы фемтосекунд. При усилении по принципу ОРСПА (optical parametric chirped pulse amplification) короткие фемтосекундные импульсы, как правило, растягиваются до единиц пикосекунд [2]. Поскольку в параметрическом усилителе энергия не накапливается, импульсы сигнала и накачки должны быть совмещены во времени. Это означает, что создаваемый лазер должен излучать на выходе пикосекундные импульсы, усиление которых осуществляется по принципу СПА

(chirped pulse amplification) с увеличением длительности до долей или единиц наносекунд. Поэтому для испытанной усилительной части лазера достаточно наносекундного задающего генератора (ЗГ). При этом для дальнейшего сжатия импульса и перевода его в пикосекундный диапазон важно обеспечить широкую полосу усиления. В предыдущей схеме лазера [3] использовался криогенный дисковый генератор с активной модуляцией добротности при помощи ячейки Поккельса. Длительность выходных импульсов составляла  $\sim 70$  нс, к тому же имела место высокочастотная модуляция интенсивности, приводящая к увеличению пиковой мощности и к пробое оптических элементов. в связи с чем была разработана новая задающая система с выходными импульсами меньшей длительности и гладкой огибающей. Значительные изменения произошли также в конструкции и оптической схеме ОУ, что позволило решить ряд проблем, вызванных различными тепловыми эффектами (тепловая линза, термоклин и др.).

## 2. Наносекундная задающая система

Для тестирования криогенного дискового лазера в режиме работы усиления чирпированных наносекундных импульсов создана задающая система (рис.1), состоящая из ЗГ и первого предварительного усилителя (ППУ) энергии до нескольких миллиджоулей в импульсе. ЗГ представляет собой дисковый Yb:YAG-лазер, работающий при комнатной температуре с водяным охлаждением. В схеме резонатора лазера использовалась ячейка Поккельса на кристалле ВВО с двойным переключением напряжения (EKСМА, Литва), что позволило генерировать импульсы с длительностью 7 нс и энергией  $\sim 0.2$  мДж (рис.2,а). Совпадение длины волны генерации с максимумом спектра усиления криогенного дискового лазера обеспечивалось фильтром Вуда, который позволял перестраивать длину волны генерации в диапазоне 1028.5–1032 нм. На выходе ЗГ установлена дополнительная ячейка Поккельса, на которую подается полувольтное напряжение. Это дает возможность уменьшить длительность импульса до 3 нс и увеличить контраст выходящего импульса на два порядка.

Е.А.Перевезенцев, И.Б.Мухин, И.И.Кузнецов, О.Л.Вадимова, О.В.Палашов. Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ГСП-120, ул. Ульянова, 46; e-mail: palashov@appl.sci-nnov.ru, eperevezentsev@gmail.com, mib\_1982@mail.ru

Поступила в редакцию 3 марта 2014 г., после доработки – 14 марта 2014 г.

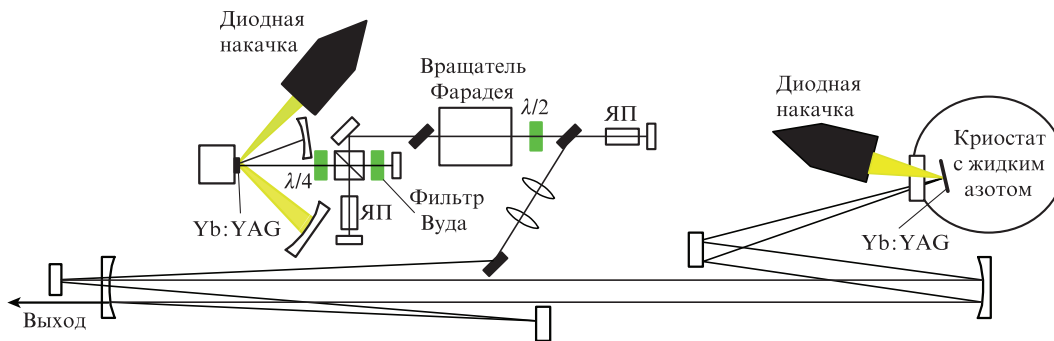


Рис.1. Принципиальная схема задающей системы (ЯП – ячейка Погкельса).

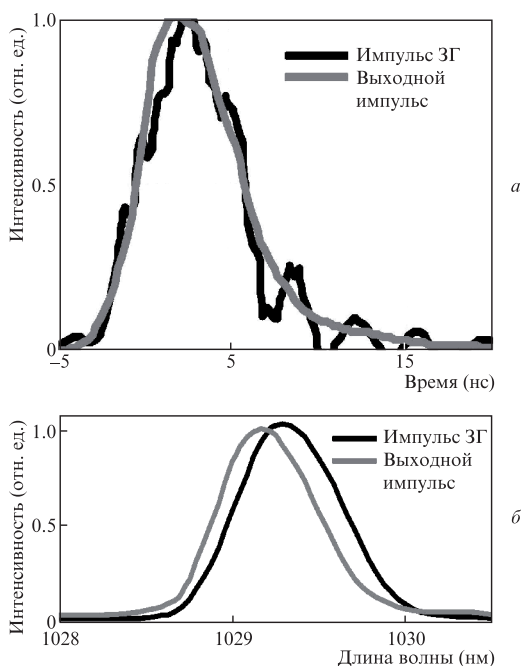


Рис.2. Временной (а) и спектральный (б) профили импульса ЗГ и импульса на выходе первого предварительного усилителя.

Сигнал с ЗГ направляется в ППУ, предназначенный для усиления пикосекундных импульсов, «растянутых» до длительности более 1 нс. Для усиления использован композитный АЭ из Yb:YAG/YAG, охлажденный до криогенных температур [4]. Многопроходная телескопическая схема усилителя позволяет осуществлять до 16 проходов через АЭ, что соответствует полному усилению схемы по слабому сигналу до  $7 \times 10^4$  и позволяет усиливать импульсы субмикроджоульного уровня до нескольких миллиджоулей при  $f \sim 1$  кГц. В первых экспериментах достигнуто усиление наносекундных импульсов из ЗГ до энергии 5 мДж при ширине спектра выходящего излучения 0.7 нм (рис.2,б). По таким параметрам, как энергия на выходе и полный коэффициент усиления, разработанная схема ППУ близка к регенеративным усилителям [2], однако избавлена от главного их недостатка – плохого контраста. Согласно выполненным измерениям, контраст импульсов в наносекундном диапазоне составлял более  $10^5$ . Кроме того, в регенеративном усилителе всегда есть обратное зеркало, и сигнал необходимо усилить до того, как развилась свободная генерация (в отличие от многопроходного усилителя, в котором обратного зеркала нет).

Соответственно порог генерации в многопроходном усилителе гораздо выше, и такой усилитель более устойчив к самовозбуждению.

### 3. Основной усилитель на базе криогенных дисковых квантронов с активным охлаждением

Сигнал из задающей системы с энергией 3–5 мДж усиливается в ПУ до энергии  $\sim 30$  мДж при  $f \leq 1$  кГц. Описание схемы ПУ представлено в [3]. Однако если на каскаде ПУ были достигнуты требуемые результаты, то в основном, двухкаскадном усилителе ранее было продемонстрировано усиление импульсов до 120 мДж с  $f = 500$  Гц (средняя мощность усиленного излучения составила при этом 60 Вт [3]). Дальнейший рост средней мощности в прежней схеме ОУ ограничивался тепловой линзой в АЭ и разъюстировкой системы при увеличении мощности накачки: происходило рассогласование пучков накачки и сигнала как по размеру, так и по местоположению. Для подавления этих эффектов можно перейти к многопроходной телескопической схеме, хорошо зарекомендовавшей себя для предыдущих каскадов усиления. Поэтому были разработаны и изготовлены новые квантроны, конструктивно похожие на используемые для дисковых лазеров, работающих при комнатной температуре [2], только проток воды был заменен протоком жидкого азота, а АЭ во избежание конденсации водяного пара находился в вакуумной камере (рис.3,б) [5]. Были проведены первые эксперименты с новой многопроходной схемой ОУ (рис.4). Удалось обеспечить до шести проходов сигнала через АЭ с коэффициентом усиления малого сигнала не менее 1.4 за один проход при диаметре пучка накачки 10 мм. Увеличение числа проходов накачки с одного до четырех позволило использовать ее более эффективно. Наблюдалась стабильная работа лазера при мощности непрерывной накачки до 1.2 кВт, качество выходного пучка значительно улучшилось.

Согласно расчетам, проведенным с помощью разработанного нами программного кода [6], при данных условиях можно рассчитывать на получение на выходе лазера энергии 250 мДж. К сожалению, продемонстрировать увеличение энергии в импульсе не удалось, что связано с большими потерями в схеме ОУ. Тем не менее видно, что выходная энергия не зависит от тепловой нагрузки (рис.5), что говорит об эффективном отводе тепла от АЭ в результате проточного охлаждения жидким азотом со скоростью до 3 л/мин. Дальнейшее увеличение запасенной энергии ограничено появлением паразитной генерации в

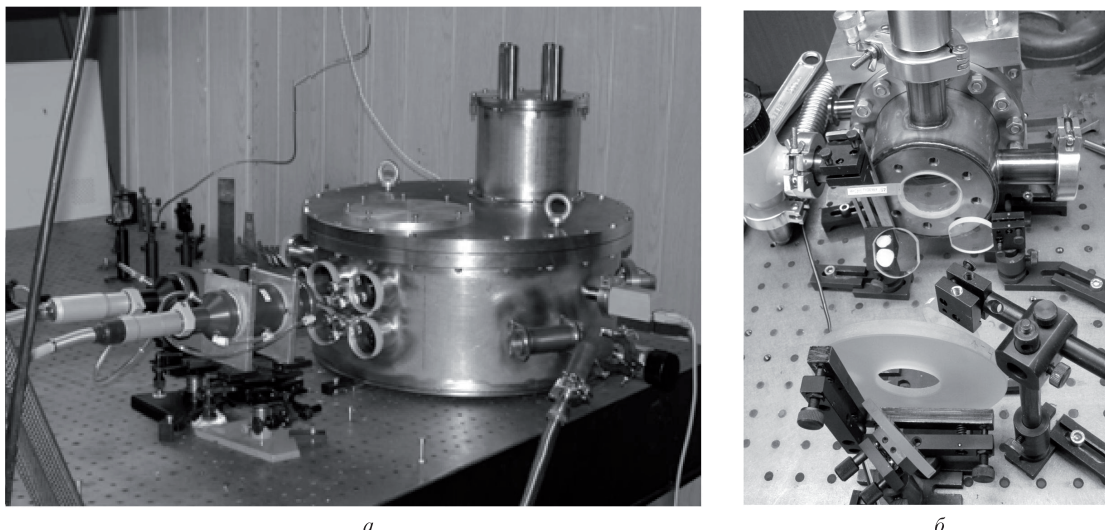


Рис.3. Внешний вид криогенной камеры основного усилителя (а) и нового криогенного дискового квантрона с оптической системой накачки (б).

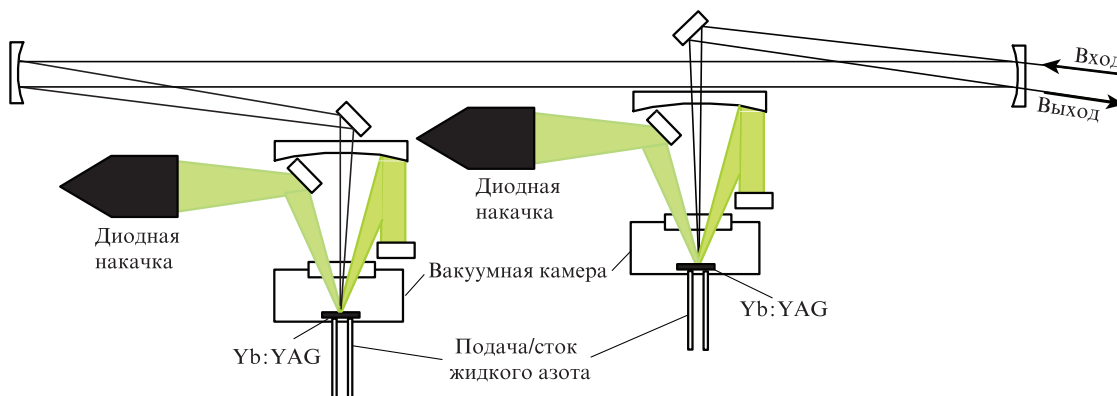


Рис.4. Принципиальная схема основного усилителя.



Рис.5. Зависимости выходной энергии лазера от пиковой мощности накачки при коэффициенте заполнения накачки 50% и при непрерывной накачке.

АЭ, что подтверждается результатами измерений зависимости интенсивности спонтанного излучения от времени. При пиковой мощности импульсов накачки более 600 Вт и их длительности 1.25 мс зависимость интенсивности спонтанного излучения от времени, а значит и от запасенной энергии, перестает расти (рис.6).

Другим важным параметром при усилении растянутых импульсов являются искажения временного и спектрального профилей импульса. Согласно нашим измерениям,

по мере прохождения импульсом усилительных каскадов оба профиля остаются неизменными (серые линии на рис.2). Ширина спектра по-прежнему равна 0.7 нм, что соответствует длительности спектрально-ограниченного импульса ~2 пс. Коэффициент усиления по слабому сигналу всей схемы составил  $10^8$ .

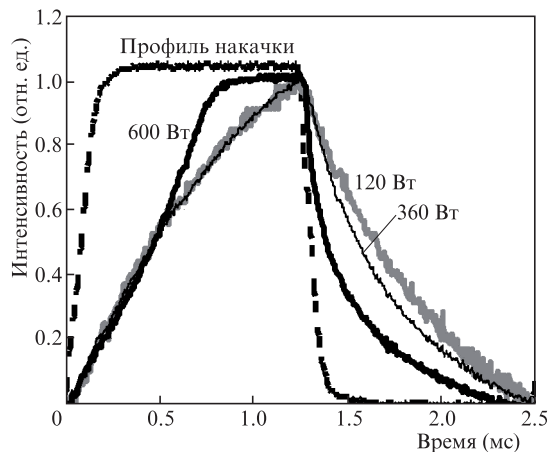


Рис.6. Зависимости интенсивности спонтанного излучения от времени при пиковых мощностях накачки 120, 360 и 600 Вт, а также профиль накачки во времени.

## 4. Заключение

Проведена модернизация задающей части лазера и основного усилителя. Криогенный генератор заменен лазером с дополнительным каскадом усиления, а на базе квантрона, работающего при комнатной температуре с водяным охлаждением, создан задающий генератор. Длительность импульсов ЗГ уменьшилась с 70 до 3–7 нс, что позволило увеличить пиковую выходную мощность до 27 МВт.

Для повышения средней мощности ОУ разработан криогенный дисковый квантрон с апертурой АЭ 20 мм. В сочетании с телескопической схемой усиления, хорошо зарекомендовавшей себя в ПУ, усилитель с двумя такими квантронами позволяет значительно улучшить согласование между пучками сигнала и накачки на кристаллах, компенсировать тепловую линзу и организовать необходимое число проходов сигнала через кристалл. Результаты первых экспериментов показали улучшение качества пучка и стабильную работу ОУ при мощности непрерывной накачки до 1.2 кВт. Запасенная энергия ограничена появлением паразитной генерации поперек АЭ. Для решения данной проблемы планируется изготовить АЭ с клaddingом по периметру. С новыми квантронами удалось реализовать четыре прохода накачки через АЭ, что позволяет использовать ее более эффективно и перейти к АЭ с более тонкой допированной частью для уменьшения

влияния негативных тепловых эффектов. Согласно нашим расчетам, после устранения паразитной генерации можно получить на выходе лазера энергию 500 мДж. Первый предварительный, предварительный и основной усилители могут представлять собой полностью криогенный лазерный усилитель, способный усиливать растянутые импульсы наносекундной длительности.

Работа выполнена при поддержке Программы РАН «Экстремальные световые поля и их приложения» и гранта РФФИ № 14-02-31517 мол\_а «Моделирование лазерных систем с высокой средней мощностью и энергией в импульсе».

1. Brown D.C., Tornegård S., Kowalewski K., Envid V., Zembek J. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **8381**, 83810R-1 (2012).
2. Klingebiel S., Wandt C., Skrobol C., Ahmad I., Trushin S.A., Major Z., Krausz F., Karsch S. *Opt. Express*, **19** (6), 5357 (2011).
3. Перевезенцев Е.А., Мухин И.Б., Кузнецов И.И., Палашов О.В., Хазанов Е.А. *Квантовая электроника*, **43** (3), 207 (2013).
4. Mukhin I., Perevezentsev E., Palashov O. *Opt. Mater. Express*, **4** (2), 266 (2014).
5. Perevezentsev E.A., Mukhin I.B., Vadimova O.L., Palashov O.V., Khazanov E.A. *Techn. Dig. 8th Laser Ceramics Symposium: International Symposium on Transparent Ceramics for Photonic Applications* (Nizhny Novgorod, Russia, 2012).
6. Вадимова О.Л., Мухин И.Б., Кузнецов И.И., Палашов О.В., Перевезенцев Е.А., Хазанов Е.А. *Квантовая электроника*, **43** (3), 201 (2013).