

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 621.373.8

РЕГЕНЕРАТИВНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА
С АКТИВНОЙ СРЕДОЙ ХРОМ-ФОРСТЕРИТ И МНОГОМОДОВЫМ
ЛАЗЕРОМ НАКАЧКИ

©2026 г. А. В. Овчинников^{а,*}, Д. С. Ситников^а, О. В. Чефонов^а,
М. Б. Агранат^а, Д. А. Гоман^б, А. Е. Гулевич^б

^аОбъединенный институт высоких температур

Российской академии наук

Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2

^бЗАО “СЛС Прайм Технолоджи”

Беларусь, 220012, Минск, ул. Толбухина, 3А, оф. 110

*E-mail: a.ovtch@gmail.com

Поступила в редакцию 20.03.2026

После доработки 01.06.2026

Принята к публикации 01.07.2026

Представлены результаты экспериментального исследования работы регенеративного усилителя тераваттной фемтосекундной хром-форстеритовой лазерной системы при использовании лазера накачки с многомодовым пространственным распределением пучка. Наносекундный импульсно-периодический лазер с диодной накачкой и воздушным охлаждением позволял получить импульсы с длиной волны 1064 нм, длительностью около 10 нс, энергией до 160 мДж и частотой повторения 10 Гц. Показано, что при оптимальном согласовании диаметров пучков усиливаемого излучения и накачки достигается стабильный режим усиления. При энергии накачки приблизительно 12 мДж выходная энергия составила 670 мкДж. Продемонстрирована возможность одновременного использования данного лазера для накачки регенеративного и многопроходного усилителей. После шести проходов в многопроходном усилителе была получена энергия импульса с длиной волны 1240 нм примерно 3 мДж.

Ключевые слова: лазер накачки, фемтосекундный лазер, регенеративный усилитель, хром-форстерит, диодная накачка.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время разработано большое количество фемтосекундных лазерных систем, которые позволяют получить генерацию излучения в достаточно широком спектральном диапазоне с различными длительностями и энергиями импульса, а также с различными частотами их повторения [1]. Такое разнообразие лазеров позволяет использовать их в различных научных исследованиях и для решения актуальных прикладных задач. Многие

фемтосекундные лазерные системы с высокой интенсивностью построены по схеме усиления чирпированных импульсов [2], которая обычно состоит из задающего генератора, временного расширителя импульса (стретчера), регенеративного и/или многопроходного усилителя и временного компрессора. Для лазерных систем с высокой энергией и, соответственно, большой пиковой интенсивностью импульса характерна низкая частота повторения импульсов, ограниченная диапазоном 1–20 Гц. Большое распространение в последние десятилетия получили фемтосекундные лазерные системы с активной средой титан-сапфир, позволяющие получить импульсы длительностью от единиц до десятков фемтосекунд с энергией в импульсе до нескольких десятков джоулей [3]. Активная среда в таких фемтосекундных лазерных системах характеризуется высоким значением коэффициента усиления и широким спектром генерации в диапазоне длин волн 680–1100 нм [4]. В качестве источников лазерной накачки в таких системах используются непрерывные и импульсные наносекундные лазеры с длиной волны излучения 527 или 532 нм. Оптическая схема таких лазеров накачки требует дополнительного модуля для преобразования излучения на основной длине волны (1064 или 1054 нм) в излучение на длине волны второй гармоники, что может приводить к снижению стабильности энергии или мощности лазерного излучения, надежности и увеличению стоимости прибора.

Альтернативным решением создания фемтосекундной лазерной системы с высокой энергией в импульсе является использование активной среды хром-форстерит ($\text{Cr:Mg}_2\text{SiO}_4$), которая позволяет получить генерацию излучения в спектральном диапазоне 1130–1370 нм [5] и достигать тераваттного уровня мощности в импульсе [6]. Недостатком кристаллов хром-форстерит является низкий коэффициент усиления, в связи с чем требуется большое количество усилительных каскадов для достижения требуемой энергии импульса. Преимуществом данных фемтосекундных лазерных систем является возможность использовать в качестве накачки лазеры с длиной волны излучения 1064 или 1054 нм, что существенно сказывается на стабильности параметров излучения, надежности всей системы и уменьшении ее стоимости. Хром-форстеритовая лазерная система [6] была разработана по схеме усиления чирпированных импульсов, она состояла из задающего генератора, стретчера, регенеративного усилителя и четырех многопроходных усилителей, а также временного компрессора. Средняя выходная мощность генератора составляла примерно 200 мВт при частоте следования импульсов 73 МГц, а его накачка осуществлялась непрерывным волоконным лазером с длиной волны 1064 нм и мощностью 10 Вт. Для накачки регенеративного усилителя использовался импульсно-периодический лазер с ламповой накачкой, работающий в режиме модуляции добротности с энергией в импульсе до 30 мДж и одномодовым пространственным распределением пучка. Накачка многопроходных

усилителей осуществлялась двумя лазерами с энергией в импульсе до 600 мДж и многомодовым пространственным распределением пучка. Один из лазеров использовался для накачки трех многопроходных усилителей, а второй – для накачки четвертого усилителя. В результате после компрессора энергия импульса достигала приблизительно 80 мДж при длительности импульса примерно 80 фс.

Одним из перспективных направлений применения фемтосекундной хром-форстеритовой лазерной системы является использование излучения с длиной волны 1240 нм для генерации импульсов терагерцевого излучения методом оптического выпрямления фемтосекундных импульсов в нелинейных органических кристаллах. Данный метод был продемонстрирован в ряде работ [7–9], которые показали высокую эффективность преобразования лазерного излучения в излучение в терагерцевой области спектра. В связи с этим исследования, связанные с увеличением ресурса, надежности и стабильности работы хром-форстеритовой лазерной системы, являются актуальными.

В последнее время широкое распространение получили твердотельные лазеры с диодной накачкой, которые обеспечивают значительно больший ресурс работы по сравнению с лазерами с ламповой накачкой, а также обладают более высокой стабильностью излучения. Основной целью данной работы являлось экспериментальное исследование возможности применения импульсного твердотельного лазера с диодной накачкой (DPSS) Azurit 150 (ЗАО “СЛС Прайм Технолоджи”, Беларусь) с многомодовым пространственным распределением пучка для накачки регенеративного усилителя фемтосекундного хром-форстеритового лазера с длиной волны излучения 1240 нм.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для экспериментального исследования параметров генерации регенеративного усилителя хром-форстеритового лазера была использована кольцевая схема резонатора (рис. 1), подробно описанная в работе [10]. Применение такой схемы не требует использования изолятора Фарадея, и при точной настройке направления распространения инжектируемого излучения вдоль оси резонатора достигается однонаправленная генерация, при которой излучение в обратном направлении полностью отсутствует. Помимо этого, использование кольцевого резонатора обеспечивает улучшение контраста по интенсивности излучения на выходе из регенеративного усилителя по сравнению с линейной схемой резонатора [11].

Рис. 1. Схема резонатора регенеративного усилителя хром-форстеритового лазера

Резонатор регенеративного усилителя был сформирован четырьмя зеркалами: двумя плоскими (5, 6) и двумя сферическими (3, 4) с одинаковыми радиусами кривизны 70 см.

Активный элемент $\text{Cr:Mg}_2\text{SiO}_4$ представлял собой прямоугольный параллелепипед длиной 20 мм вдоль кристаллической оси a и размерами $3.2 \times 3.2 \text{ мм}^2$ в поперечном сечении (оси b и c). Торцевые грани элемента были скошены под углом Брюстера для минимизации потерь на отражение. Для увеличения выходной энергии и стабильности энергии лазерного импульса активный элемент охлаждался до температуры 10°C с помощью элемента Пельтье и термоконтроллера. В качестве источника накачки использовался компактный твердотельный Nd:YAG-лазер с диодной накачкой и воздушным охлаждением. На его выходе формировались наносекундные импульсы с длиной волны 1064 нм, энергией до 160 мДж, длительностью импульса примерно 10 нс и частотой повторения до 30 Гц. Стабильность энергии импульсов составляла $\pm 1\%$. Модульная схема лазера предусматривает возможность использования сменных генераторов гармоник (532 нм, 355 нм и 266 нм), расширяющих возможности его применения при работе с другими активными средами. Конструкция лазера обеспечивает длительную непрерывную эксплуатацию при стабильных параметрах излучения, что делает данный источник накачки удобным инструментом. Отличительной особенностью применения данного лазера является многомодовый режим генерации, который ранее для накачки регенеративного усилителя с активной средой $\text{Cr: Mg}_2\text{SiO}_4$ не использовался.

На рис. 2 представлено пространственное распределение лазерного пучка, измеренное в фокальной плоскости положительной линзы с фокусным расстоянием 400 мм, которая использовалась для фокусировки излучения накачки в схеме регенеративного усилителя. Диаметр пятна по уровню $1/e^2$ составлял примерно 440 мкм в горизонтальном сечении и примерно 313 мкм в вертикальном вследствие различных значений расходимости лазерного пучка.

Рис. 2. Пространственное распределение излучения накачки в фокальной плоскости

Оптическая схема резонатора регенеративного усилителя с двумя сферическими зеркалами, между которыми устанавливался активный элемент, обеспечивает различные значения диаметра основной поперечной моды TEM_{00} усиливаемого сигнала в зависимости от положения относительно зеркал. Минимальный размер моды достигается на одинаковых удалениях от сферических зеркал, а максимальный – на их поверхности. Таким образом, изменяя положение активного элемента относительно сферического зеркала, можно подобрать размер моды в активном элементе для оптимального согласования с областью инверсии населенности, создаваемой накачкой. Также необходимо учитывать максимальную интенсивность импульса на оптических элементах регенеративного усилителя, чтобы избежать их повреждения.

С учетом выполненных измерений пространственного распределения излучения накачки (рис. 2) активный элемент в резонаторе регенеративного усилителя был установлен на

таком расстоянии от сферического зеркала, чтобы диаметр пучка усиливаемого импульса на длине волны излучения 1240 нм составлял 460 мкм по уровню $1/e^2$. В этом случае обеспечивалась достаточно однородная инверсная населенность активной среды, диаметр пучка накачки по одной координате составлял примерно 1100 мкм, а по другой – примерно 800 мкм (на уровне $1/e^2$). Обычно для оптимальной работы регенеративного усилителя отношение диаметра пучка накачки к диаметру пучка усиливаемого сигнала составляет 1.2–1.3. В частности, в исходном конструктивном исполнении хром-форстеритовой лазерной системы при использовании лазера с ламповой накачкой и одномодовым пространственным распределением пучка это отношение составляло 1.3. В наших экспериментах это отношение составило значительно большую величину вследствие конструктивных особенностей хром-форстеритовой лазерной системы, в которую встраивался новый лазерный источник. Ограничения на положение фокусирующей линзы не позволили получить оптимального соотношения между диаметрами пучков накачки лазера Azurit 150 и усиливаемого сигнала.

Для определения оптимальной плотности энергии накачки в активном элементе была измерена зависимость коэффициента усиления за один проход от плотности энергии накачки (рис. 3). Как видно на рисунке, насыщение усиления наблюдается при плотности энергии 3–3.5 Дж/см², а максимальное значение коэффициента усиления составляет примерно 1.55. В этом случае достигаются максимальные значения энергии и стабильности импульса из регенеративного усилителя. Для получения плотности энергии накачки 3.5 Дж/см² энергия падающего на активный элемент импульса составляла примерно 12 мДж. Регулировка энергии импульса осуществлялась с помощью поляризационного ослабителя, состоящего из полуволновой пластины и поляризатора.

Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления активного элемента от плотности энергии накачки

В качестве источника лазерных импульсов для регенеративного усилителя использовался фемтосекундный задающий генератор, позволяющий получить импульсы длительностью примерно 65 фс и энергией около 12 нДж с частотой повторения 73 МГц на длине волны 1240 нм. Увеличение длительности фемтосекундных импульсов осуществлялось в стретчере, собранном по схеме с одной дифракционной решеткой, примерно до 45 пс по уровню 0.5 от максимума интенсивности. Частота следования импульсов регенеративного усилителя определялась частотой повторения лазера накачки, в экспериментах она составляла 10 Гц.

Для синхронизации работы лазера накачки, момента инжектирования растянутых во времени импульсов задающего генератора и вывода усиленного импульса из резонатора регенеративного усилителя применялся блок синхронизации (Pulse Picker OG-8, “Авеста”).

Этот блок также использовался в качестве источника высоковольтных импульсов для управления электрооптическим затвором в резонаторе регенеративного усилителя.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В результате применения в качестве лазера накачки регенеративного усилителя многомодового наносекундного лазера с диодной накачкой была получена энергия импульсов 670 мкДж, а время достижения максимальной энергии составляло 375 нс, что соответствовало примерно 31 проходу по усилителю. Нестабильность энергии импульса из регенеративного усилителя не превышала 1.5% (среднее квадратическое отклонение). Для оценки влияния многомодового режима работы лазера накачки на качество пучка, выходящего из регенеративного усилителя, было измерено пространственное распределение пучка внутри резонатора регенеративного усилителя (в области активного элемента) и на выходе из него.

Для измерения пространственного распределения лазерного пучка в активном элементе регенеративного усилителя в резонатор была установлена плоскопараллельная стеклянная пластина под углом 45° к оптической оси резонатора. Пластина была установлена таким образом, чтобы излучение, которое распространялось по направлению к активному элементу, отражалось на ПЗС-камеру. Расстояние от пластины до активного элемента выбиралось равным расстоянию от пластины до матрицы камеры. В этом случае на матрице ПЗС-камеры регистрировалось пространственное распределение лазерного пучка, соответствующее пространственному распределению на активном элементе. На рис. 4 представлены соответствующие пространственные распределения: видно, что оба пространственных распределения хорошо описываются функцией Гаусса. Основным критерием оценки качества лазерного пучка является параметр M^2 , который показывает, во сколько раз расходимость лазерного пучка превышает расходимость идеального гауссова пучка. Для определения параметра M^2 были получены экспериментальные зависимости (рис. 5) радиуса пучка излучения от расстояния до перетяжки для двух ортогональных осей (x и y). По оси x параметр M^2 составил величину 1.13, а по оси y – 1.17.

Рис. 4. Пространственное распределение пучка:

Рис. 5. Зависимость радиуса пучка излучения от расстояния до перетяжки:

Таким образом, применение лазера Azurit 150 с многомодовым пространственным профилем пучка для накачки регенеративного усилителя хром-форстеритового лазера позволяет получить хорошее качество пространственного распределения пучка.

Одним из преимуществ лазера, работающего в режиме многомодовой генерации, является более высокая энергия импульса по сравнению с режимом одномодовой генерации. В связи с этим один лазер можно использовать для накачки нескольких усилительных каскадов,

в частности регенеративного и многопроходного усилителей. Поскольку энергия лазерного импульса накачки составляла 160 мДж, а для накачки регенеративного усилителя используется только около 12 мДж, оставшаяся часть излучения накачки была использована для накачки многопроходного усилителя. На рис. 6 представлена оптическая схема многопроходного усилителя, собранного на дискретных плоских зеркалах и обеспечивающего шесть проходов через активный элемент. Активный элемент представлял собой цилиндр диаметром 6.3 мм и длиной 21 мм с контуром охлаждения. На торцы активного элемента было напылено просветляющее покрытие на длину волны 1240 нм. Излучение накачки делилось на два пучка и направлялось на активный элемент с двух сторон для создания более однородной инверсной населенности.

Рис. 6. Оптическая схема многопроходного усилителя

Фокусировка излучения накачки осуществлялась с помощью линз с фокусным расстоянием 500 мм. Как и в случае настройки регенеративного усилителя, была измерена зависимость коэффициента усиления от плотности энергии накачки (рис. 7).

Рис. 7. Зависимость коэффициента усиления активного элемента многопроходного усилителя от плотности энергии накачки

Как видно на рис. 7, коэффициент усиления в активном элементе многопроходного усилителя ниже, чем в активном элементе регенеративного усилителя. Это объясняется тем, что использование одного и того же импульса накачки для регенеративного и многопроходного усилителей не является оптимальным решением для последнего. За время прохода усиливаемого импульса по регенеративному усилителю (около 400 нс) инверсная населенность в активном элементе многопроходного усилителя уменьшается и, следовательно, уменьшается коэффициент усиления. Использование многопроходного усилителя, работающего не в оптимальном режиме усиления, позволило увеличить энергию сигнала примерно до 3 мДж, что соответствует среднему коэффициенту усиления за один проход примерно 1.3. Преимуществом использования единого лазера для накачки является то, что схема фемтосекундной системы становится проще и компактнее.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты применения импульсного периодического лазера с диодной накачкой Azurit 150 для накачки регенеративного и первого многопроходного усилителей хром-форстеритовой лазерной системы. Получена высокая стабильность энергии импульса хром-форстеритового лазера за счет высокой стабильности энергии импульса накачки, а также за счет выбора оптимального значения плотности энергии накачки в активном элементе. Максимальная энергия импульса на выходе регенеративного усилителя на длине волны излучения 1240 нм составляла 670 мкДж, что соответствовало среднему

коэффициенту усиления за проход примерно 1.55. Нестабильность энергии импульса не превышала 1.5%. Использование излучения накачки одновременно для регенеративного и многопроходного усилителей позволило получить энергию в импульсе 3 мДж.

Компактные размеры и полностью воздушное охлаждение используемого лазера накачки Azurite 150 делают его максимально удобным для применения в научно-исследовательских целях, а также позволяют легко интегрировать его в действующие установки. Длительные межсервисные интервалы и повышенная стабильность выходных параметров обеспечиваются технологией диодной накачки. Прочная монолитная конструкция обеспечивает исключительную механическую и температурную стабильность, позволяя использовать Azurite 150 даже в сложных условиях окружающей среды. Также стоит обратить внимание, что все критически важные элементы и комплектующие лазеров Azurite производятся на территории союзного государства, а сам лазер внесен в реестр промышленного оборудования, что может являться важным критерием при проектировании и разработке фемтосекундных хром-форстеритовых лазеров, использующихся на территории Российской Федерации.

Эксперименты выполнены в центре коллективного пользования “Лазерный фемтосекундный комплекс” ОИВТ РАН.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание № 075-00270-26-00)

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sibbett W., Lagatsky A.A., Brown C T.A.* Opt. Express. 2012. V. 20. № 7. P. 6989. <https://doi.org/10.1364/OE.20.006989>
2. *Strickland D., Mourou G.* Opt. Commun. 1985. V. 56. № 3. P. 219. [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(85\)90120-8](https://doi.org/10.1016/0030-4018(85)90120-8)
3. *Chu Y., Liang X., Yu L. et al.* Opt. Express. 2013. V. 21. № 24. P. 29231. <https://doi.org/10.1364/OE.21.029231> .
4. *Rapoport W.R., Khattak C.P.* Appl. Opt. 1988. V. 27. № 13. P. 2677. <https://doi.org/10.1364/AO.27.002677> .
5. *McKinnie I.T., Gloster L.A.W., Jiang Z.X., King T.A.* Appl. Opt. 1996. V. 35. № 21. P. 4159. <https://doi.org/10.1364/AO.35.004159> .

6. *Агранат М.Б., Ашитков С.И., Иванов А.А., Конященко А.В., Овчинников А.В., Фортвов В.Е.* Квантовая электроника. 2004. Т. 34. № 6. С. 506. <https://www.mathnet.ru/rus/qe2714>
7. *Vicario C., Ovchinnikov A.V., Ashitkov S.I., Agranat M.B., Fortov V.E., Hauri C.P.* Opt. Lett. 2014. V. 39. № 23. P. 6632. <https://doi.org/10.1364/OL.39.006632> .
8. *Vicario C., Jazbinsek M., Ovchinnikov A.V., Chefonov O.V., Ashitkov S.I., Agranat M.B., Hauri C.P.* Opt. Express. 2015. V. 23. № 4. P. 4573. <https://doi.org/10.1364/OE.23.004573> .
9. *Румянцев Б.В., Пушкин А.В., Сулейманова Д.З., Жидовцев Н.А., Потемкин Ф.В.* Письма в ЖЭТФ. 2023. Т. 117. № 8. С. 571. <https://doi.org/10.31857/S1234567823080025>.
10. *Агранат М.Б., Ашитков С.И., Иванов А.А., Конященко А.В., Овчинников А.В., Подшивалов А.А.* Квантовая электроника. 2004. Т. 34. № 11. С. 1018. <https://www.mathnet.ru/rus/qe2791>
11. *Yanovsky V., Felix C., Mourou G.* Appl. Phys. B. 2002. V. 74 (Suppl). P. S181. <https://doi.org/10.1007/s00340-002-0887-7>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Схема резонатора регенеративного усилителя хром-форстеритового лазера: 1, 2 – зеркала на длину волны излучения 1064 нм; 3, 4 – сферические зеркала резонатора; 5, 6 – плоские зеркала резонатора; 7 – выходное зеркало; Л – линза; П – поляризаторы; М – электрооптический модулятор
- Рис. 2.** Пространственное распределение излучения накачки в фокальной плоскости
- Рис. 3.** Зависимость коэффициента усиления активного элемента от плотности энергии накачки.
- Рис. 4.** Пространственное распределение пучка: **а** – внутри резонатора регенеративного усилителя, **б** – на выходе регенеративного усилителя
- Рис. 5.** Зависимость радиуса пучка излучения от расстояния до перетяжки: **а** – по оси x , **б** – по оси y
- Рис. 6.** Оптическая схема многопроходного усилителя: Л – линза, РУ – регенеративный усилитель, Т – телескоп
- Рис. 7.** Зависимость коэффициента усиления активного элемента многопроходного усилителя от плотности энергии накачки

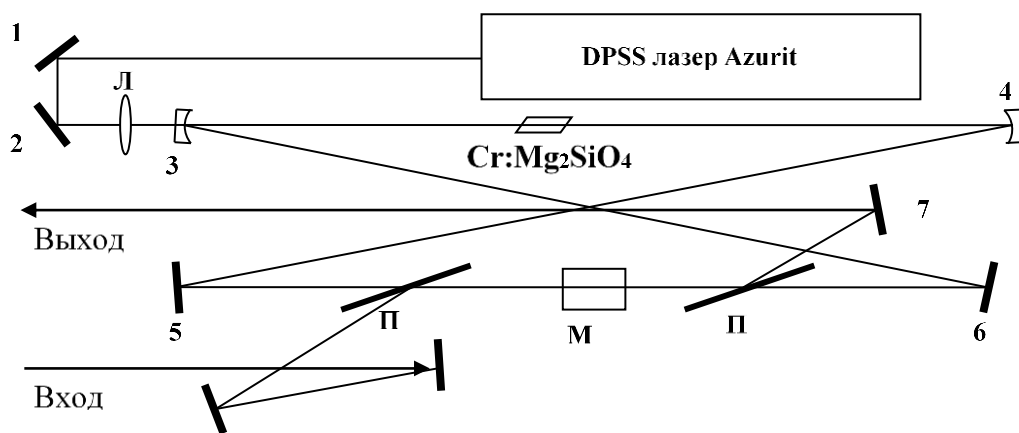


Рис. 1.

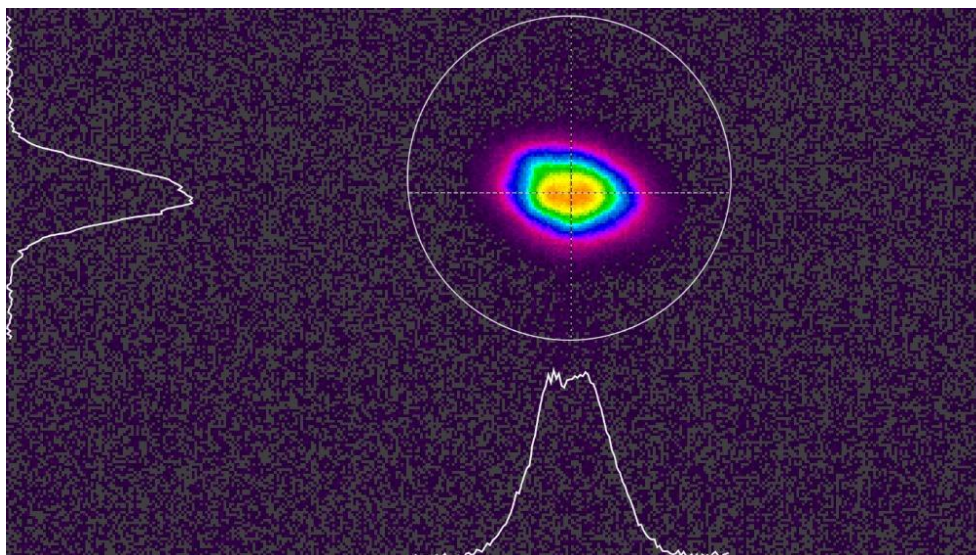


Рис. 2.

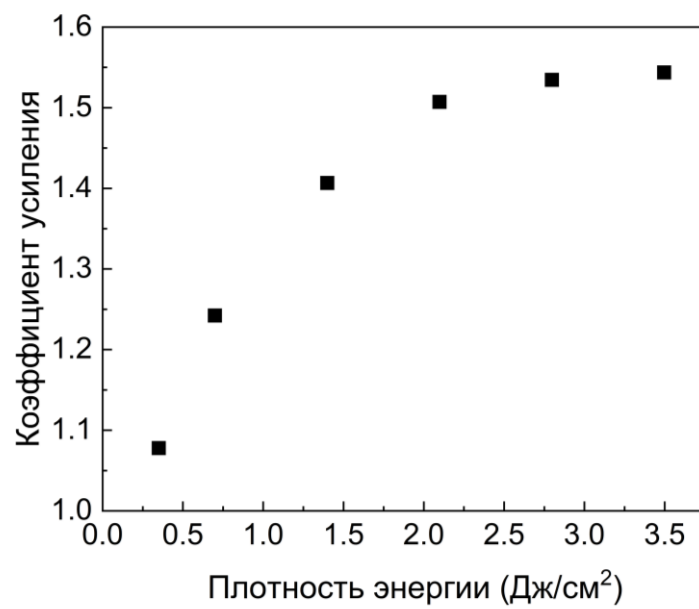


Рис. 3.

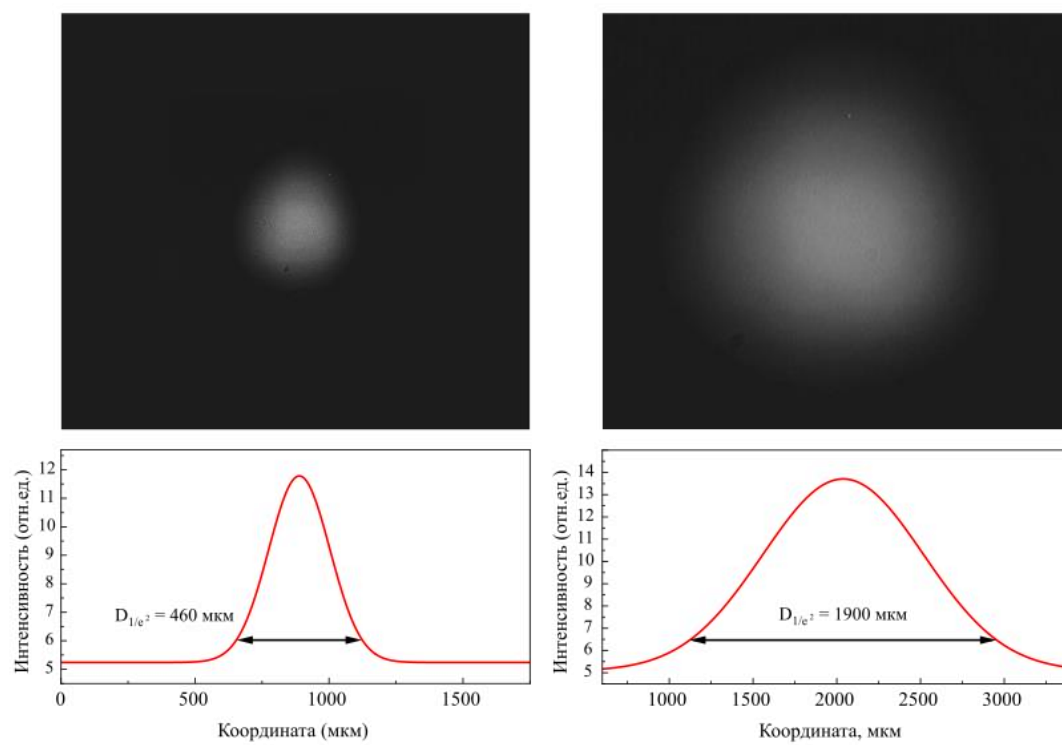


Рис. 4.

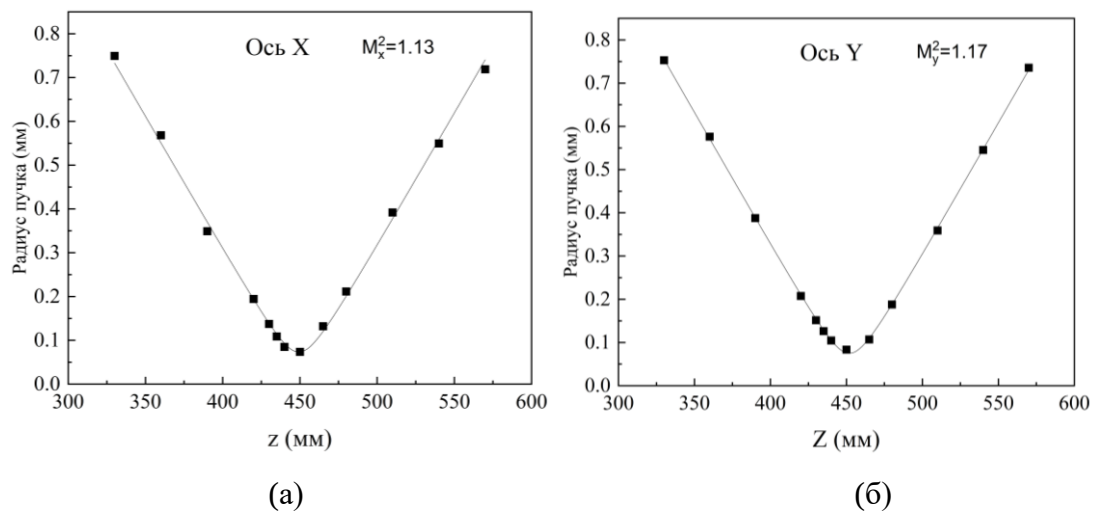


Рис. 5.

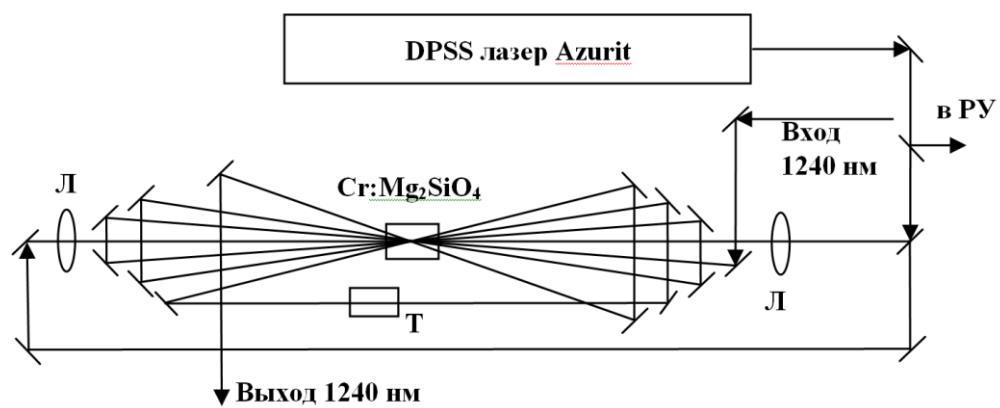


Рис. 6.

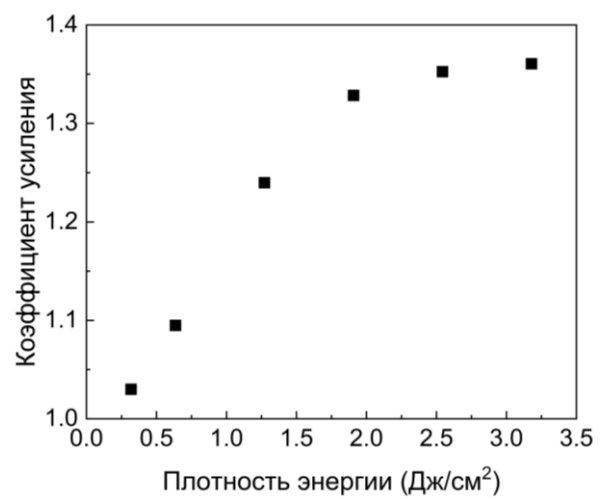


Рис. 7.