

**ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА**

УДК 621.373.826

**ФЕМТОСЕКУНДНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ГЕНЕРАТОР
НА КРИСТАЛЛЕ Yb:KGW**

©2025 г. С. А. Чижов^{а,*}, И. И. Кузнецов^а, О. В. Палашов^а

^аФедеральный исследовательский центр

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова

Российской академии наук

Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

e-mail: s.chizhov@ipfran.ru

Поступила в редакцию 06.03.2025 г.

После доработки 11.06.2025 г.

Принята к публикации 08.07.2025 г.

Разработан лазерный генератор фемтосекундных импульсов, выполненный на кристалле Yb:KGW, с частотой следования 78 МГц и средней мощностью 2.3 Вт. Длительность генерируемых импульсов составляет около 170 фс при ширине спектра по полувысоте, равной примерно 7 нм, с центральной длиной волны 1031 нм. Высокая стабильность средней мощности и дифракционное качество излучения позволяют использовать устройство в качестве прецизионного источника фемтосекундных импульсов для различных мощных усилителей, включая широко используемые усилители на кристаллах Yb:YAG.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время фемтосекундные лазеры применяются достаточно широко в различных сферах и продолжают захватывать новые области человеческой деятельности в промышленности, медицине, науке и т.д. [1]. В качестве источников фемтосекундных импульсов наибольшее развитие получили лазеры, генерирующие импульсы на длинах волн около 1 мкм при использовании различных механизмов быстрой нелинейности на основе волоконных и объемных активных элементов (АЭ). Волоконные источники фемтосекундных импульсов обладают широко известными достоинствами: компактностью, надежностью, высокой стабильностью, доступностью в широком спектральном диапазоне. Однако, по сравнению с объемными АЭ, они ограничены низкой энергией импульса (десятки пДж) и как следствие низкой средней мощностью (единицы-десятки милливатт) [2, 3]. Кроме того, длительность импульсов, как правило, существенно (примерно в 2 раза) превышает длительность спектрально-ограниченного импульса. Поэтому для генерации максимально

коротких импульсов и со значительно большей энергией (десятки нДж) предпочтительнее использование объемных АЭ.

Благодаря своим лазерным и тепловым свойствам (большим значениям сечений поглощения и люминесценции, малому квантовому дефекту, высокой теплопроводности) материалы, допированные Yb^{3+} (среди которых наиболее популярными являются Yb:YAG , Yb:KGW , Yb:KYW , Yb:YSO , Yb:CALGO , Yb:CALYO , Yb:CYA), являются сегодня доминирующими в лазеростроении с высокой и средней мощностью как в научных лабораториях, так и коммерческих приборах [4–6]. При этом спектральный диапазон лазерного излучения, несмотря на одинаковость допанта, довольно широк, он определяется не только матрицей кристалла, но и в ряде случаев ориентацией кристаллографических осей. Так, например, для Yb:KGW (N_p -срез) центральная длина волны генерации обычно составляет 1035 нм, для Yb:YAG она равна 1030 нм, для Yb:CALYO – 1050 нм. Наиболее короткие импульсы (менее 100 фс) в кристаллах, содержащих иттербий, генерируются при средней лазерной мощности – от сотен милливатт до нескольких ватт. Высокая средняя мощность 350 Вт достигнута на активных элементах Yb:YAG в геометрии “тонкого диска” при существенно больших (940 фс) длительностях импульсов [7]. Поиск новых перспективных лазерных материалов продолжается непрерывно [8].

Цель данной работы – разработка простого, надежно работающего малогабаритного устройства, генерирующего фемтосекундные импульсы на центральной длине волны, близкой к длине волны максимального усиления в кристалле Yb:YAG ($\lambda_{\text{Yb:YAG}} = 1030$ нм), – практически безальтернативного сегодня материала активной среды в лазерах с одновременно высокими пиковой и средней по времени мощностями. Очевидно, активная среда генератора должна иметь не только близкие к усилителю спектрально-люминисцентные характеристики, но и высокий нелинейный показатель преломления n_2 материала для “включения” сверхбыстрой модуляции усиления (потерь) на основе керровской линзы. Таким требованиям хорошо удовлетворяет кристалл Yb:KGW , имеющий достаточно высокое значение n_2 ($2 \cdot 10^{-15}$ см²/Вт) [9] и близкое значение максимума сечения усиления в ориентации $E \parallel N_m$.

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований изготовлен фемтосекундный (длительность импульса менее 200 фс) генератор на кристалле Yb:KGW , работающий в режиме синхронизации мод со средней мощностью более 2 Вт. Выходное излучение на длине волны около 1030 нм обладает высокой стабильностью средней мощности и высоким пространственным качеством, близким к дифракционному пределу.

2. ОПИСАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ГЕНЕРАТОРА

На рис. 1 приведена оптическая схема прибора, выполненная по так называемой линейной z-схеме резонатора. В качестве активного элемента использовался кристалл $\text{Yb}^{3+}(5\text{ат.}\%):\text{KGW}$ (N_p -срез, $3 \times 3 \text{ мм}^2$, толщина 2 мм, CASTECH, Китай).

Рис. 1. Оптическая схема фемтосекундного лазера.

Излучение лазерного диода накачки (BWT, Китай) на выходе волокна диаметром 105 мкм имело степень поляризации 90%, которая согласовывалась с N_m -осью максимального поглощения кристалла с помощью полуволновой пластинки. Такая степень поляризации достигнута за счет использования короткого выходного волокна (длиной около 10 см). Выходное излучение генерации поляризовано в направлении оси N_m , в нашем случае ориентированной в горизонтальной плоскости. Спектр излучения лазерного диода стабилизировался элементом Пельтье на длину волны максимального поглощения 980 нм при максимальной мощности накачки 9 Вт. Изображение торца волокна переносилось в центр кристалла с помощью коллимирующего и фокусирующего ахроматических дублетов с фокусными расстояниями 60 мм. В схеме использовались три плоских chirпированных зеркала (LAYERTEC, Германия) с общей дисперсией групповой задержки (GDD), равной -1350 фс^2 на проход, и насыщающийся поглотитель с начальным поглощением 2% и временем релаксации 1 пс (БАТОР, Германия). Все chirпирующие зеркала имеют высокий коэффициент отражения ($R > 99.9\%$) и слабую зависимость отрицательной GDD в широком диапазоне спектра (около 100 нм) вблизи длины волны 1030 нм [10]. Плотность энергии насыщения, согласно данным производителя, составляет примерно 60 мкДж/см^2 [11].

Конструкция излучателя представляет собой термостабилизированный моноблок, выполненный из алюминия, в котором оптические элементы генератора размещены в верхней части, а диодная накачка и теплоотводы – в нижней. Внешний вид оптического блока прибора приведен на рис. 2а. На рис. 2б показаны блоки управления и охлаждения.

Рис. 2. Оптический блок прибора (а), блоки управления и охлаждения (б).

3. АНАЛИЗ РАБОТЫ УСТРОЙСТВА

На рис. 3 приведены расчеты (при помощи ABCD-формализма) радиуса пучка (каустики) вдоль оси резонатора в следующих режимах: без керровской линзы (неустойчивый резонатор, рис. 3а) и с керровской линзой при максимальной мощности накачки 9 Вт (устойчивый резонатор на рис. 3б, режим III на рис. 4). В генераторе в режиме с керровской линзой (рис. 3б) благодаря использованию chirпирующих зеркал (рассчитанных с учетом дисперсии резонатора) формируется фундаментальный солитон формы sech^2 , что

подтверждается экспериментально измерением сканирующего автокоррелятора (который требует для своей корректной работы высокой стабильности энергии и повторяемости формы импульсов, обеспечиваемых только в режиме генерации фундаментального солитона).

Рис. 3. Радиус пучка вдоль оси резонатора в следующих режимах: без керровской линзы (а) и с керровской линзой

На рис. 4 приведена зависимость мощности генерации P_L от мощности накачки P . На графике зависимости можно выделить три характерных режима работы лазера, наблюдаемых при увеличении мощности накачки:

- непрерывный режим I;
- нестабильный режим синхронизации мод с модуляцией спектра и амплитуды импульсов во времени II;
- стабильный режим генерации солитоноподобных импульсов при использовании керровской линзы III.

Рис. 4. Зависимость средней мощности генерации от мощности накачки...

В режиме I резонатор находится на краю зоны устойчивости и внутрирезонаторной мощности недостаточно для просветления насыщающегося поглотителя – реализуется непрерывный режим генерации. Далее с увеличением мощности накачки начинается просветление насыщающегося поглотителя и возникает импульсный режим II. При достижении уровня внутрирезонаторной мощности, достаточной для “включения” керровской линзы, происходит переход в режим III, характеризующийся стабилизацией выходного спектра и амплитуды импульсов.

Интегральный КПД генератора при максимальной мощности диодной накачки (около 9 Вт) составил примерно 25% и ограничивался этой мощностью. Дифференциальный КПД прибора при этом достигал 40%. Использование более мощной накачки, по нашим оценкам, позволит существенно расширить область устойчивого режима III (генерации при использовании керровской линзы и стабилизации насыщающимся поглотителем). На рис. 5, 6 приведены осциллограммы импульсов, полученные с помощью быстрого $p-i-n$ -фотодиода (5 ГГц) и осциллографа (RIGOL, DS4034, 350МГц) с разрешением около 1 нс в режимах II (рис. 5) и III (рис. 6) для разных временных шкал. Приведенные осциллограммы показывают процесс стабилизации режима синхронизации мод при переходе из области II в область III, в котором формируется “гладкий” спектр, и амплитуды импульсов стабильны на больших временных интервалах. Точное положение насыщающегося поглотителя определяется экспериментально (по динамике переходного процесса, в результате которого генератор переводится из режима II (рис. 5в) в режим III (рис. 6в)).

Рис. 5. Режим II для временных шкал: 1 нс/дел (а), 10 нс/дел (б), 1 мкс/дел (в).

Рис. 6. Режим III для временных шкал: 1 нс/дел (а), 20 нс/дел (б), 1 мкс/дел (в).

На рис. 7 показан спектр лазерных импульсов в режиме III, измеренный с разрешением 0.5 нм (осциллограф AvaSpec-DUAL, Avantes). Необходимо отметить, что центральная длина волны в основном определяется характеристиками дихроичных зеркал DM1, DM2 (рис. 1) и за счет изменения их спектральных характеристик она может варьироваться в диапазоне $\lambda_0 = 1030(\pm 2)$ нм без существенного изменения мощности излучения.

Рис. 7. Спектр выходных импульсов.

Ожидаемая длительность спектрально-ограниченного импульса генерации в режиме синхронизации мод с керровской линзой с центральной длиной волны $\lambda_0 = 1031$ нм и шириной спектра по полувысоте $\Delta\lambda=7$ нм может быть оценена по формуле

$$\Delta\nu \Delta\tau_{\text{TL}} = 0.315 \operatorname{sech}^2 \quad (1)$$

и составляет $\Delta\tau_{\text{TL}} = 160$ фс. На рис. 8 приведена автокорреляционная функция импульса, измеренная сканирующим автокоррелятором (IRA-VISIR V7, AVESTA). Длительность импульса по полувысоте τ_p и измеренная длительность автокорреляционной функции $\tau_{\text{АКФ}}$ в предположении формы импульса, описываемой функцией sech^2 , связаны соотношением $\tau_{\text{АКФ}} = \tau_p \cdot 1.543$. Таким образом $\tau_p \approx 170$ фс. Произведение $\Delta\nu_p \cdot \Delta\tau_p$ равно 0.34, что всего лишь в 1.08 раза превышает теоретический предел (т.е. практически полностью отсутствует фазовая модуляция выходных импульсов).

Рис. 8. Автокорреляционная функция импульса. Длительность импульса $\tau_p \approx 170$ фс (sech^2).

Пространственное качество лазерного излучения оценивалось с помощью параметра M^2 , который измерялся по стандарту ISO 11146 (BeamSquared, Ophir). Параметр M^2 рассчитывается по процедуре приближения, оценивающей изменение диаметра пучка вдоль направления распространения в каустике при фокусировке измерительной линзой. На рис. 9 приведены измерения диаметра пучка D_x, D_y в каустике и профиль пучка на расстоянии 1 м от выхода. Полученные значения параметров $M^2_x=1.07$ и $M^2_y=1.05$ свидетельствуют о близости качества пучка к дифракционному пределу. Также можно отметить, что астигматизм практически полностью отсутствует.

Рис. 9. Измерения параметра M^2 (точки – измеренные значения диаметра пучка, сплошные кривые – аппроксимация гиперболой).

Результаты измерений стабильности средней мощности $P_{\text{вых}}$ генерируемого излучения от времени приведены на рис. 10. Наблюдения проводились в течение 1.5 ч, после включения генератор выходит на рабочий режим с минимальным (менее получаса) временем

прогрева. Далее лазерная мощность стабильна, среднеквадратическое отклонение σ не превышает $\pm 0.5\%$ за время наблюдения более 10 мин. Режим синхронизации мод является самостартующим.

Рис. 10. Зависимость средней мощности от времени после включения

В табл. 1 приведены основные параметры лазерного излучения предлагаемого устройства в сравнении с аналогами, включая коммерческие. Видно, что предлагаемое устройство не уступает мировым аналогам, а по ряду параметров превосходит их. Например, средняя мощность устройства превышает среднюю мощность лазеров из работ [12, 13], к тому же, длина волны значительно ближе к 1030 нм, подходящей для дальнейшего усиления в Yb:YAG. В работе [14] достигнута большая средняя мощность, но при существенно (примерно в 2.8 раза) большей длительности импульса. В работе [15] также получена средняя мощность 2.3 Вт, но при длительности импульсов 240 фс. В работе [16] демонстрируется возможность генерации в широком диапазоне спектра в зависимости от ориентации кристалла, однако достигнутые средние мощности не превышают ваттного уровня.

Коммерческий лазерный генератор отечественного производства [17] имеет ряд характеристик (средняя мощность и длительность импульса), превосходящих характеристики предлагаемого устройства, однако, это излучение не может эффективно усиливаться в усилителях на кристаллах Yb:YAG (практически безальтернативного сегодня материала для лазеров с одновременно высокими пиковой и средней мощностями), поскольку центральная длина волны генерируемого излучения существенно отличается от максимума усиления Yb:YAG. Необходимо отметить наиболее близкий по характеристикам лазерный генератор [18], изготавливаемый компанией Light Conversion, который, насколько нам известно, является лидером по средней мощности излучения. Однако приобретение данного устройства сопряжено с большими рисками из-за недружественности страны-производителя. К тому же, разработанный в рамках импортозамещения в нашем коллективе генератор допускает масштабирование выходных параметров и при переходе на более мощную накачку (например, примерно в 2.5 раза), что может позволить, по нашим оценкам, увеличение выходной мощности примерно до 7 Вт. (Однако создание надежно работающего генератора с таким уровнем средней мощности представляет собой отдельную задачу.)

Необходимо отметить также существование целого ряда коммерческих лазерных систем (например, описанных в работе [19]) с мощным излучением на желаемой длине волны 1030 нм, однако это принципиально другие источники — гораздо более сложные, громоздкие и дорогие устройства (как правило, включающие в себя стретчер, компрессор, регенеративный усилитель и т.п.).

В схемах, использующих технологию “тонкого” диска на Yb:YAG возможно укоротить импульсы, применяя внешнюю компрессию чирпирующими зеркалами (в работе [20] мощность составила 17 Вт), либо дополнительные внутрирезонаторные керровские элементы (в работе [21] средняя мощность достигла 155 Вт), однако это существенно усложняет и удорожает лазерные системы (из-за схемы заведения накачки, технологии изготовления активного элемента и т.п.).

Таблица 1. Основные параметры лазерного излучения предлагаемого устройства в сравнении с аналогами

Активная среда, ориентация кристалла	Средняя мощность, Вт	Центральная длина волны, нм	Ширина спектра, нм	Длительность импульсов, фс	Поляризация	Ссылка
Yb:KGW $E \parallel N_m$	2.3	1031	7	170	Горизонтальная	Настоящая работа
Yb:KGW $E \parallel N_m$	~1.1	1035	9	~120	Вертикальная	[12]
Yb:KGW $E \parallel N_p$	~1.5	1043	12.5	~90	Вертикальная	[12]
Yb:KGW $E \parallel N_m$	~2	1036	11.5	~175	Вертикальная	[13]
Yb:KYW $E \parallel N_m$	4.5	1032	2.6	480	Горизонтальная	[14]
Yb:KGW $E \parallel N_p$	2.3	1030	4.7	240	—	[15]
Yb:YLF $E \parallel a, E \parallel c$	0.2	1025–1047	—	200	Горизонтальная	[16]
Yb:- нет данных	12	1055	>7.5	<150	Горизонтальная	[17]
Yb:KGW	До 20	1030±10	39	<50	Горизонтальная	[18]
Yb:KGW	>20	1030±3	—	<350	Вертикальная	[19]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан генератор фемтосекундных лазерных импульсов с диодной накачкой на кристалле Yb:KGW с центральной длиной волны 1031 нм. При мощности накачки 9 Вт средняя выходная мощность составила 2.3 Вт при частоте следования импульсов 78 МГц, что соответствует энергии импульсов 30 нДж. Длительность импульсов составила 170 фс, что соответствует пиковой мощности 0.17 МВт. Режим синхронизации мод является самостартующим. Конструкция термостабилизированного корпуса генератора обеспечивает высокую кратковременную и долговременную стабильность средней мощности. Лазерное излучение обладает высоким пространственным качеством $M^2_{x,y} = 1.07 \cdot 1.05$, близким к

дифракционному пределу. Разработанный лазер будет использоваться в качестве задающего генератора в МОРА лазерной системе с Yb:YAG-усилителями с высокими средней и пиковой мощностями.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-12-00199, <https://rscf.ru/project/23-12-00199/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Femtosecond Laser Pulses: Principles and Experiments. / Ed. by C. Rulliere, Springer, 2005.
2. <https://avesta.ru/applications/>
3. <https://fluence.technology/products/oscillator/>
4. <https://lightcon.com/product/flint-high-repetition-rate-lasers/#specifications>
5. Kilinc M., Demirbas U., Thesinga J. et al. // Opt. Lett. 2024. V. 49. P. 18. <https://doi.org/10.1364/OL.537902>
6. Tian W., Xu R., Zheng L., Zhang D., Xu X., Zhu J., Xu J., Wei Z. // Opt. Lett. 2021. V. 46. P. 1297. <http://dx.doi.org/10.1364/OL.419370>.
7. Saltarelli F., Graumann I.J., Lang L., Bauer D., Phillips C.R., Keller U. // 2019 CLEO/Europe-EQEC. Munich, Germany, 2019. P. 1. <https://doi.org/10.1109/CLEOE-EQEC.2019.8873033>.
8. Meng X., Iv C., Liu Q., Zhang X., Li Y., Xi X., Zhao B. // Appl. Phys. B. 2019. V. 125. P. 166. <https://doi.org/10.1007/s00340-019-7281-1>.
9. Mayor A., Nikolokakos I., Aitchison J.S., Ferguson A.I., Langford N., Smith P.W.E. // Appl. Phys. B. 2003. V. 77. P. 433. <https://doi.org/10.1007/s00340-003-1252-1>
10. https://www.layertec.de/en/coatings/ultrafast-laser-coatings/ultrafast-laser-coatings-GTI/#_RandomId-1975078133.
11. <https://www.batop.de/products/saturable-absorber/saturable-absorber-mirror/data-sheet/saturable-absorber-mirror-1040nm/saturable-absorber-mirror-SAM-1040-2-1ps.pdf>
12. Кум Г.Х., Янг Ч., Лу Д. и др. // Квантовая электроника. 2012. Т. 42. С. 292. <https://elibrary.ru/item.asp?id=23452545>
13. Kim D.J., Park E.J., Lee B. et al. // Jpn. J. Appl. Phys. 2018. V. 57. P. 122702. <https://doi.org/10.7567/JJAP.57.122702>
14. Leburn C.G., Ramírez-Corral C.Y., Thomson I.J., Hall D.R., Baker H.J., Reid D.T. // Opt. Express. 2012. V. 20. P. 17367. <https://doi.org/10.1364/OE.20.017367>
15. Akbari R., Major A. // Appl. Opt. 2017. V. 56. P. 8838. <https://doi.org/10.1364/AO.56.008838>

16. *Demirbas U., Thesinga J., Kellert M., Reuter S., Pergament M., Kartner F.* // Opt. Lett. 2022. V. 47. P. 933. <http://dx.doi.org/10.1364/OL.450706>
17. <https://avesta.ru/products/lasers/itterbieviye-tverdotelnie-femtosekundnie-lazery/>
18. <https://lightcon.com/products/flint-high-repetition-rate-lasers/>
19. https://avesta.ru/wp-content/uploads/pdf/datasheets/eng/TETA_datasheet.pdf.
20. *Pronin O., Brons J., Grasse C. et al.* // Opt. Lett. 2012. V. 37. P. 3543. <https://doi.org/10.1364/OL.37.003543>
21. *Brons J., Pervak V., Bauer D., Sutter D., Pronin O., Krausz F.* // Opt. Lett. 2016. V. 41. P. 3567. <https://doi.org/10.1364/OL.41.003567>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Оптическая схема фемтосекундного лазера: HR1, HR2 – плоские чирпированные зеркала с $R(1030\text{нм}) = 100\%$, $GDD = -550 \text{ фс}^2$; DM1, DM2 – сферические дихроичные зеркала с $R(1030\text{нм}) = 100\%$, $T(980\text{нм}) = 95\%$ и радиусом кривизны 100 мм; HR3 – плоское зеркало с $R(1030\text{нм}) = 100\%$; HR4 – плоское чирпированное зеркало с $R(1030\text{нм}) = 100\%$, $GDD = -250 \text{ фс}^2$; HR5 – сферическое зеркало с $R(1030\text{нм}) = 100\%$ и радиусом кривизны 250 мм; OC – выходное зеркало с $T(1030\text{нм}) = 8\%$; SAM – насыщающийся поглотитель; AD1 – коллимирующий ахроматический дублет ($F=60 \text{ мм}$); AD2 – фокусирующий ахроматический дублет ($F=60 \text{ мм}$); LD – лазерный диод накачки; $\lambda/2$ – полуволновая пластина; Yb:KGW – активный элемент.
- Рис. 2.** Оптический блок прибора (а), блоки управления и охлаждения (б).
- Рис. 3.** Радиус пучка вдоль оси резонатора в следующих режимах: а – без керровской линзы, б – и с керровской линзой при максимальной мощности накачки 9 Вт; зеленый цвет – тангенциальная плоскость, красный – сагиттальная.
- Рис. 4.** Зависимость средней мощности генерации от мощности накачки: I – непрерывный режим, II – режим синхронизации мод с модуляцией спектра и амплитуды импульсов, III – стабильный режим синхронизации мод керровской линзой.
- Рис. 5.** Режим II для разных временных шкал: 1 нс/дел (а), 10 нс/дел (б), 1 мкс/дел (в).
- Рис. 6.** Режим III для разных временных шкал: 1 нс/дел (а), 20 нс/дел (б), 1 мкс/дел (в).
- Рис. 7.** Спектр выходных импульсов.
- Рис. 8.** Автокорреляционная функция импульса. Длительность импульса $\tau_p \approx 170 \text{ фс}$ (sech^2).
- Рис. 9.** Измерения параметра M^2 (точки – эксперимент, сплошные кривые – аппроксимация гиперболой).
- Рис. 10.** Зависимость средней мощности от времени после включения.

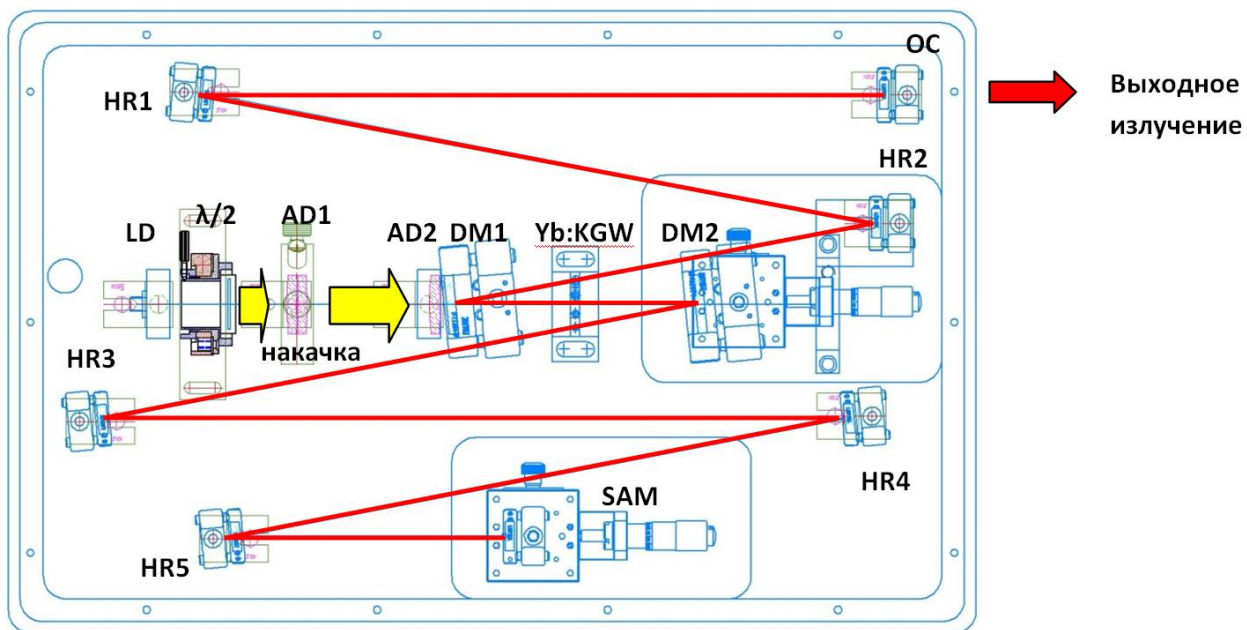
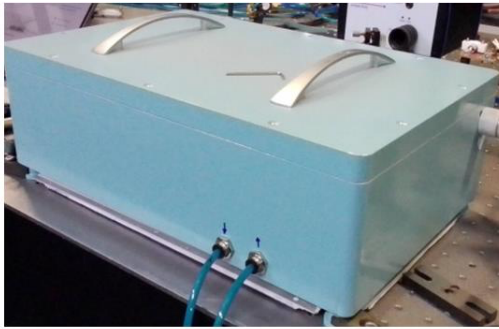


Рис. 1.



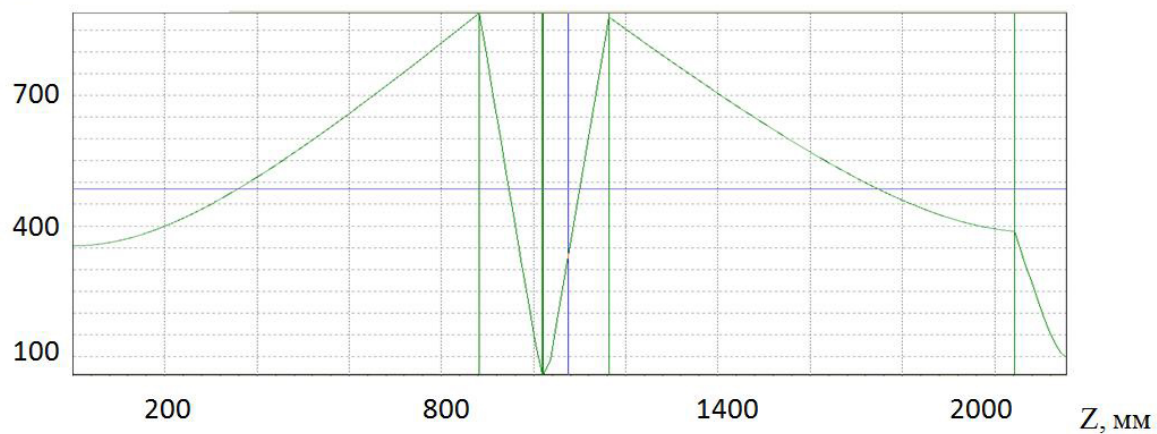
(a)



(б)

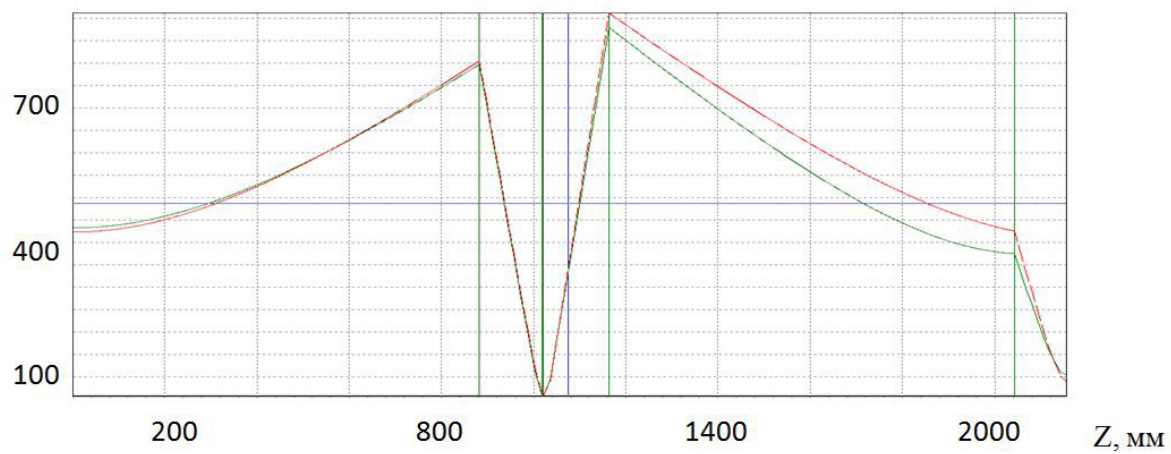
Рис. 2.

Радиус пучка, мкм



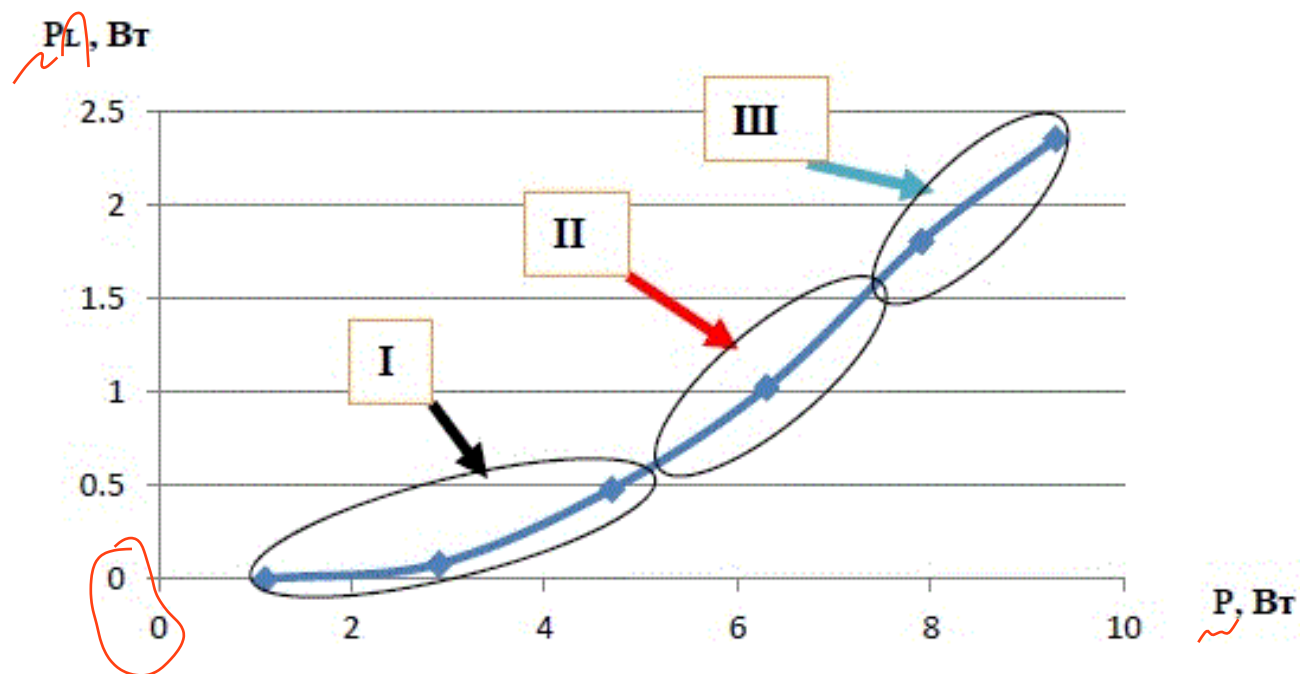
(a)

Радиус пучка, мкм



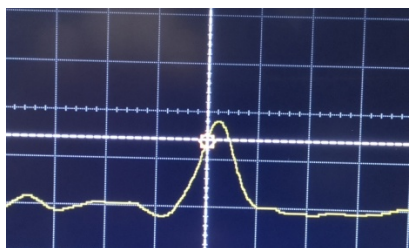
(б)

Рис. 3.

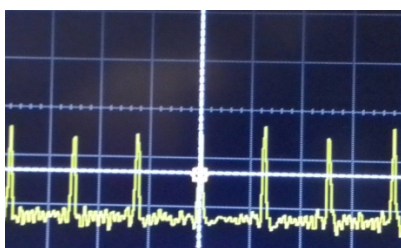


общий нуль

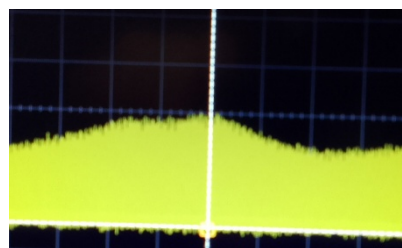
Рис. 4



(a)

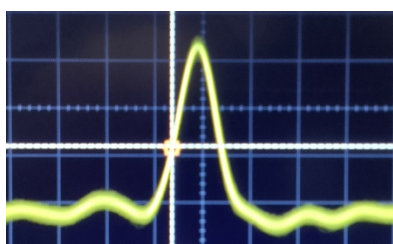


(б)

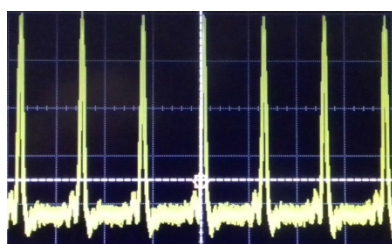


(в)

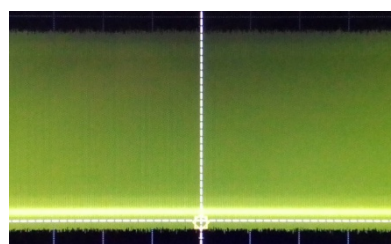
Рис. 5



(a)



(б)



(в)

Рис. 6

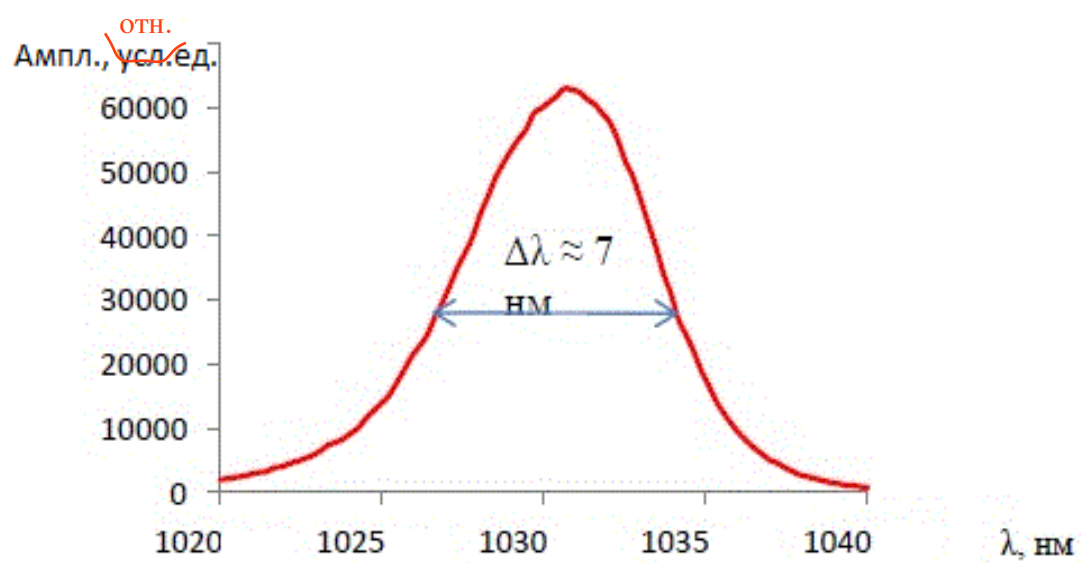


Рис. 7

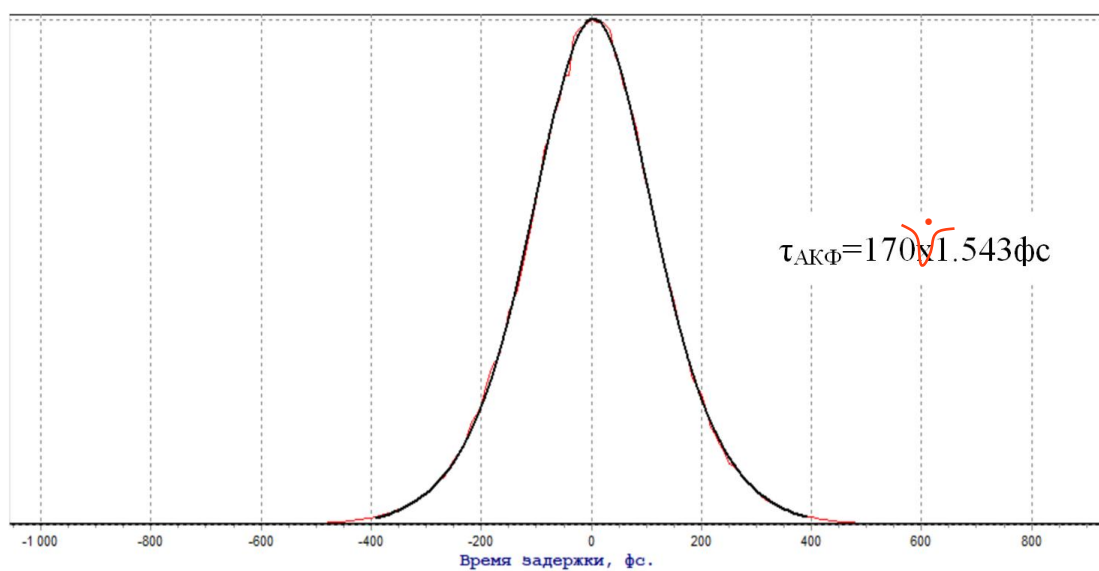


Рис. 8.

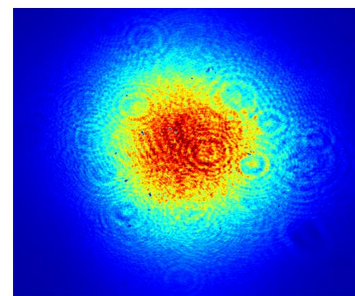
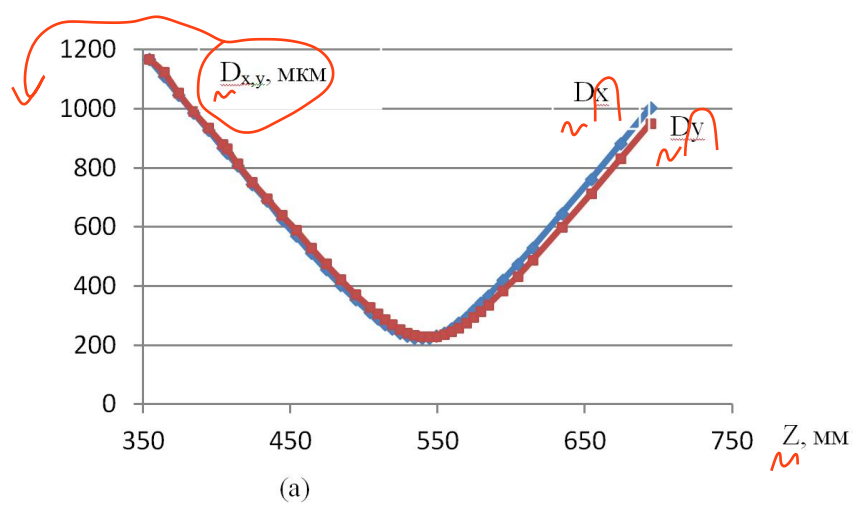


Рис. 9.

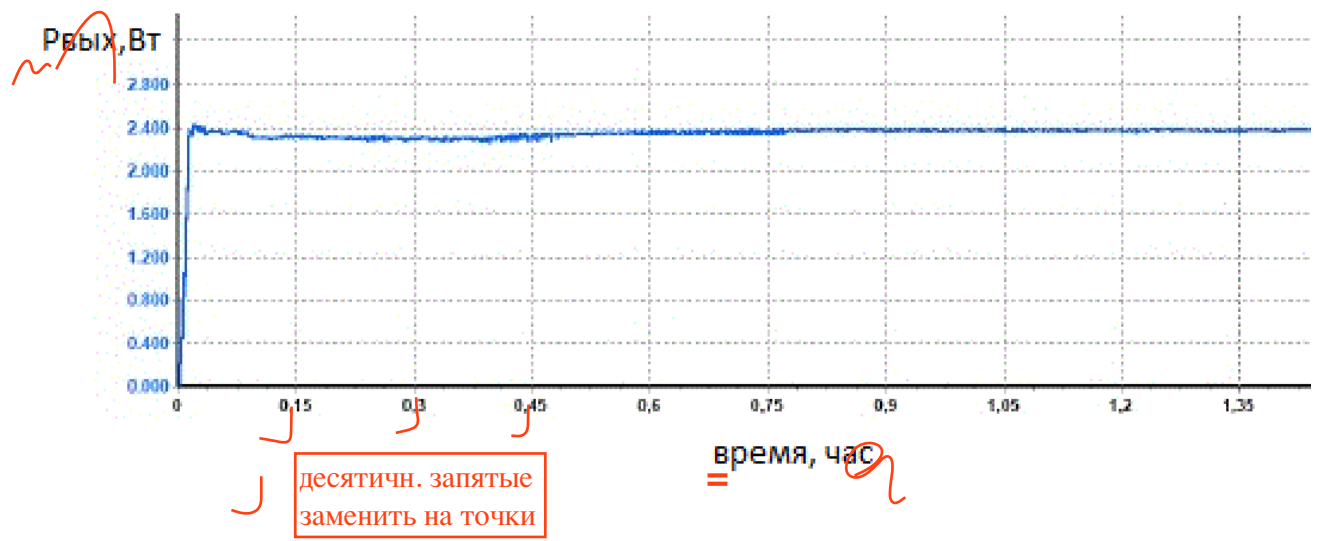


Рис. 10