

09

Система повышения контраста мощных фемтосекундных лазерных импульсов на основе эффекта плазменных зеркал

© С.Ф. Ковалёва, Н.А. Федоров, Д.О. Замураев, А.Л. Шамраев, А.С. Тищенко, К.В. Сафронов, С.В. Геращенко, В.Н. Горнов, А.В. Потапов

Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. акад. Е.И. Забабахина, Снежинск, Челябинская обл., Россия
E-mail: dep5@vniitf.ru

Поступило в Редакцию 3 апреля 2026 г.
В окончательной редакции 5 мая 2026 г.
Принято к публикации 10 мая 2026 г.

Для фемтосекундной лазерной установки 100 TW класса создана и испытана система повышения контраста, основанная на эффекте двойного плазменного зеркала. Измерена энергетическая эффективность системы в рабочих пусках при значениях плотности энергии на плазменных зеркалах $10\text{--}800\text{ J/cm}^2$. Исследовано влияние системы на длительность ультракороткого лазерного импульса. Рабочий диапазон энергетических флюенсов на поверхности плазменных зеркал для проведения лазер-плазменных экспериментов составляет $50\text{--}350\text{ J/cm}^2$.

Ключевые слова: ультракороткие лазерные импульсы, временной контраст, предимпульсы, двойное плазменное зеркало.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.16.63424.20713

Для проведения лазер-плазменных экспериментов на мультитераваттных фемтосекундных лазерных установках одним из необходимых условий является высокий временной контраст ультракороткого лазерного импульса (УКИ). Временным контрастом УКИ принято называть отношение интенсивности основного импульса к интенсивности предшествующего излучения различной природы и длительности, существующего на наносекундном и пикосекундном удалении от основного импульса [1–3]. При высоких интенсивностях взаимодействующего с мишенью лазерного излучения низкий временной контраст УКИ приводит к ионизации мишени до прихода основного рабочего импульса. Возникающая вблизи поверхности мишени „предплазма“ изменяет механизм взаимодействия основного лазерного импульса с мишенью. Недостаточный временной контраст лазерного импульса может привести к трудностям интерпретации результатов экспериментов. В некоторых случаях (например, для мишеней малой толщины и массы) энергии и интенсивности предимпульсов может оказаться достаточно для полного разрушения мишени до прихода основного лазерного импульса [4]. Существуют методы подавления уже сгенерированного „паразитного“ излучения. Одним из таких методов является применение эффекта самоиндуцированного плазменного зеркала (ПЗ) [5–7], который заключается в следующем. Лазерный импульс фокусируется в пятно небольшого размера на поверхности диэлектрического зеркала с низким коэффициентом отражения $\sim 10^{-3}$. Низкоинтенсивная составляющая излучения (предимпульсы) проходит сквозь зеркало. Передний фронт высокоинтенсивного УКИ образует плазменный слой на поверхности зеркала, при этом очищенный от предимпульсов ос-

новной УКИ отражается от поверхности критической плотности плазмы, затем реколлимируется и направляется в исследовательскую мишенную камеру. Известно, что одиночное ПЗ повышает временной контраст на наносекундном масштабе времен на величину $\sim 10^2$, а системы на основе двойного ПЗ — на величину $10^3\text{--}10^4$ [6]. Типичные схемы таких систем широко описаны в литературе [8–12].

В рамках настоящей работы нами была создана система контрастирования лазерного излучения (СКЛИ) [13] на основе двух плазменных зеркал для мультитераваттной фемтосекундной титан-сапфировой ($\lambda = 800\text{ nm}$) лазерной установки. Отработан метод юстировки системы, собраны и испытаны вспомогательные оптические стенды для регистрации фокальных пятен и определения значения флюенса на поверхностях ПЗ. Измерены основные характеристики СКЛИ, определены оптимальные значения плотности мощности на поверхности ПЗ для проведения лазер-плазменных экспериментов.

СКЛИ размещается в вакуумированном объеме, между выходным патрубком вакуумного компрессора фемтосекундных импульсов (КФИ) и входным патрубком вакуумной мишенной камеры (ВМК). Оптическая принципиальная схема приведена на рис. 1.

В состав СКЛИ входят два осевых параболических зеркала (ОПЗ) APM_1 и APM_2 , два зеркальных поворотных элеватора E_1 и E_2 , два плазменных зеркала PM_1 и PM_2 . Элеватор E_1 меняет плоскость поляризации подаваемого на вход системы рабочего излучения с горизонтальной на вертикальную. Для s -поляризованного света коэффициент отражения выше и, следовательно, повышается энергетическая эффективность СКЛИ. Элеватор E_2 соответственно возвращает плоскость поля-

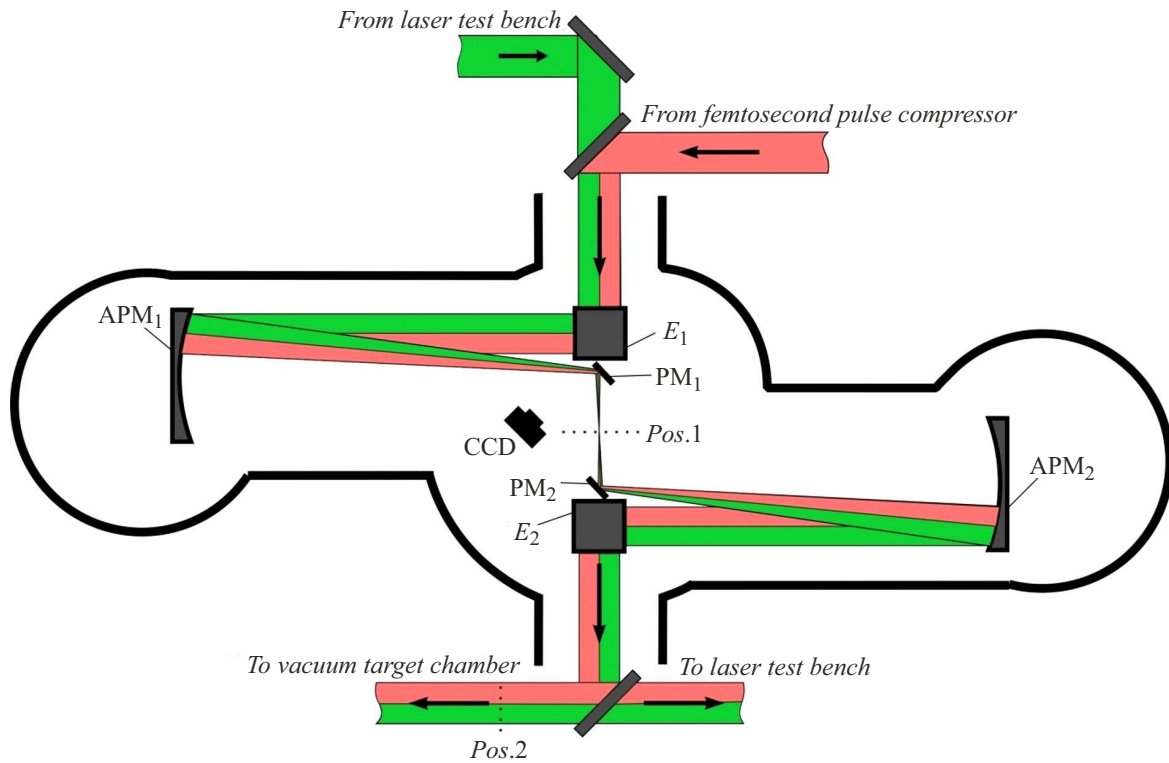


Рис. 1. Оптическая принципиальная схема СКЛИ. АРМ₁, АРМ₂ — осевые параболические зеркала; E₁, E₂ — элеваторы; CCD — ПЗС-камера; РМ₁, РМ₂ — плазменные зеркала; Pos. 1 и Pos. 2 — места установки юстировочных зеркал.

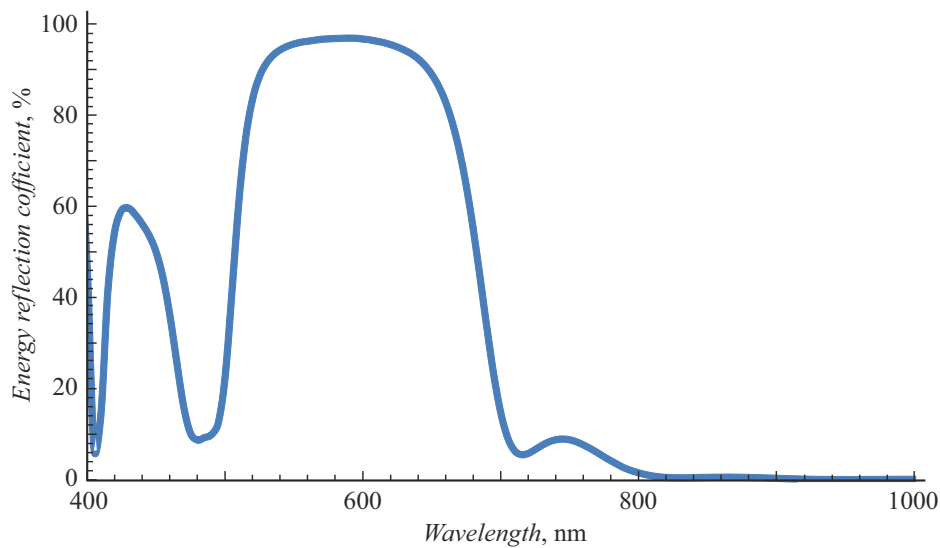


Рис. 2. Зависимость измеренных значений коэффициента отражения от длины волны для угла падения излучения 45° .

ризации излучения в исходное горизонтальное состояние. Осевые параболические зеркала (\varnothing 250 mm) с фокусными расстояниями $f = 1524$ mm предназначены для фокусировки (АРМ₁) и последующей коллимации (АРМ₂) лазерного излучения и работают во внеосевой геометрии (ось падающего пучка смещена относительно центральной оси зеркала по горизонтали на 40 mm). Плазменные зеркала РМ₁ и РМ₂ представляют собой плоские стекла с диэлектрическими покрытиями, кото-

рые имеют спектральную характеристику, обеспечивающую пропускание на длинах волн рабочего лазерного излучения ($\lambda = 770\text{--}830$ nm) 93–99% и коэффициент отражения для длины волны юстировочного лазера ($\lambda = 527$ nm) около 95% (рис. 2).

Конструкция СКЛИ позволяет регулировать плотность энергии F (флюенс) рабочего лазерного импульса на поверхности ПЗ в диапазоне 10–800 J/cm² за счет смещения элеваторов и ПЗ к центру и смещения ОПЗ

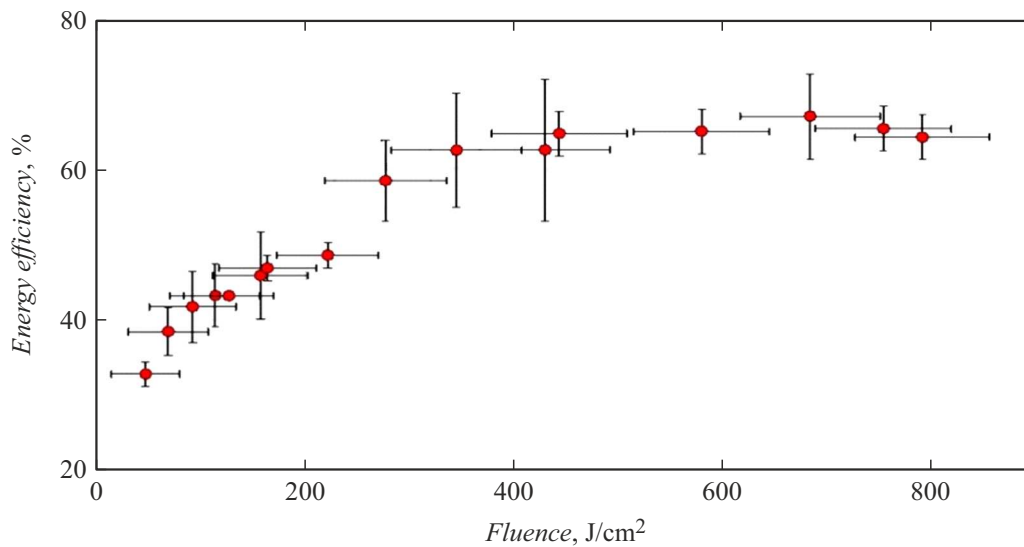


Рис. 3. Зависимость энергетической эффективности от значения флюенса на поверхности плазменных зеркал.

так, чтобы сохранить расстояние между осью пучка и осью ОПЗ.

Для настройки СКЛИ и наведения на мишень в ВМК используется оптический стенд, который формирует юстировочный пучок лазера непрерывного действия ($\lambda = 527 \text{ nm}$) с пространственно-угловыми характеристиками (диаметр, расходимость, направление), идентичными характеристикам мощного рабочего излучения. Юстировочный пучок вводится в оптический тракт лазерной установки через вакуумную камеру компрессора лазерных импульсов. Точная настройка положений оптических элементов СКЛИ осуществляется с помощью специальных зеркал с высоким коэффициентом отражения, устанавливаемых в оптический тракт системы на время юстировки (места установки показаны пунктирными линиями на рис. 1). Для настройки первого комплекта элементов (E_1 –APM₁–PM₁) юстировочное зеркало устанавливается в центр вакуумной камеры по нормали к юстировочному пучку (Pos. 1 на рис. 1). Автоколлимационное изображение поверхности зеркала регистрируется видеокамерой, входящей в состав оптического стенда. Достижение минимального размера пятна на ПЗС-камере (CCD) указывает на то, что APM₁ установлено в правильное положение. Затем производится юстировка PM₁ и PM₂. Плазменные зеркала устанавливаются таким образом, чтобы размеры пятен юстировочного лазера на них соответствовали требуемому флюенсу. Для этого применяются ПЗС-камера и объектив с фокусным расстоянием 16 mm. Данная система позволяет фотографировать поверхности зеркал с разрешением 25 μm . Для юстировки второго комплекта элементов (E_2 –APM₂–PM₂) юстировочное зеркало устанавливается в оптический тракт на выходе СКЛИ (Pos. 2 на рис. 1). Оптическим стендом регистрируется автоколлимационное изображение перетяжки пучка в центре вакуумной камеры СКЛИ. Минимальный

размер этого изображения указывает на правильность установки PM₂.

Для измерения входной и выходной энергий были собраны два диагностических оптических тракта на входе и на выходе СКЛИ соответственно, которые направляли небольшую долю рабочего излучения ($\sim 1\%$), просочившуюся сквозь поворотные зеркала, на абсолютно калиброванные калориметры. Предварительно была измерена относительная эффективность этих трактов в экспериментах, когда лазерное излучение направлялось в мишенную камеру „в обход“ СКЛИ. Далее с использованием данных трактов были произведены измерения пропускания СКЛИ в рабочих пусках при различных значениях флюенса лазерного импульса на плазменных зеркалах. Флюенс F рассчитывался как отношение энергии лазерного излучения, измеренной входным диагностическим трактом, к размеру пятна на плазменных зеркалах СКЛИ, задаваемому в процессе юстировки. Относительная погрешность отдельного измерения энергетической эффективности СКЛИ с учетом приборных погрешностей калориметров и точностей измерения эффективностей диагностических трактов не превышала 4%. Результаты измерений энергетической эффективности СКЛИ при различных значениях флюенса излучения на поверхности плазменных зеркал в диапазоне 10–800 J/cm² представлены на рис. 3. Точки на графике являются усреднением по трем-пяти экспериментам с близкими параметрами. Максимальное пропускание системы составляет $\sim 65\%$ и достигается при флюенсе лазерного излучения на плазменных зеркалах $\sim 400 \text{ J/cm}^2$.

Настройка базы КФИ лазерной установки для обеспечения минимальной длительности импульса на мишени в штатном режиме осуществляется с использованием автокоррелятора. В автокоррелятор направляется часть фемтосекундного импульса из вакуумной камеры

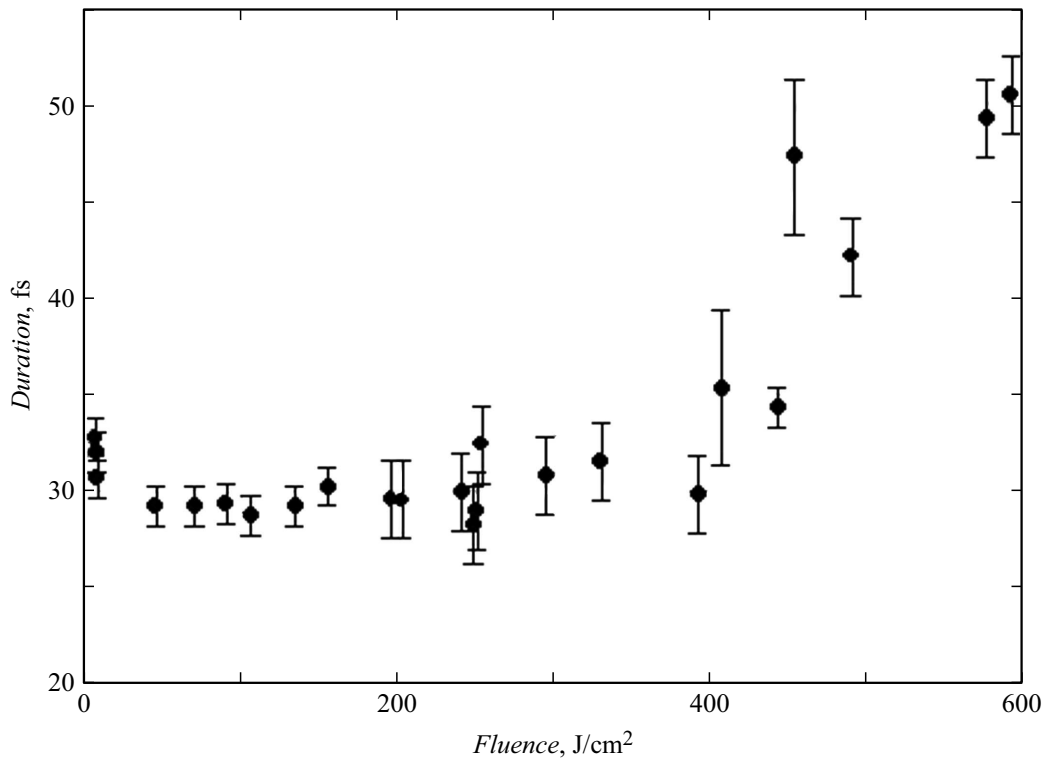


Рис. 4. Зависимость длительности лазерного импульса от плотности энергии на плазменных зеркалах.

КФИ после компрессии. Вывод пучка осуществляется сквозь лавсановое окно толщиной $100\ \mu\text{m}$. Измерения выполняются при работе лазера на частоте $10\ \text{Hz}$ без включения мощного выходного усилителя (энергия лазерного импульса $\sim 1\ \mu\text{J}$). Типичное значение УКИ в этих измерениях составляет $26.0 \pm 0.5\ \text{fs}$. Для измерения длительности лазерных импульсов после СКЛИ был применен другой автокоррелятор аналогичной конструкции. На его вход направлялась часть рабочего импульса из ВМК (после СКЛИ) сквозь лавсановое окно. Измерения производились в режиме одиночных импульсов при включении всех усилителей (энергия $\sim 2\ \text{J}$). Для того чтобы мощность излучения не превышала диапазон регистрации автокоррелятора, перед ним был установлен attenuator переменного пропускания, состоящий из полуволновой пластинки и пары отражающих поляризаторов. Коэффициент ослабления attenuator при измерениях составлял 1–5. В таком режиме (без оптических элементов в вакуумной камере СКЛИ) длительность импульсов, усредненная по пяти измерениям, составила $28 \pm 1\ \text{fs}$. Незначительное увеличение длительности по сравнению с измерениями на выходе КФИ, вероятно, связано с дисперсией импульса при прохождении дополнительных зеркал и attenuator. После установки оптических элементов СКЛИ были произведены измерения длительности импульсов вторым автокоррелятором при различных значениях флюенса F на плазменных зеркалах. Результаты измерений представлены на рис. 4. Каждая точка на графике

является результатом усреднения трех-пяти измерений при близких значениях F .

Измерения показали, что в интервале флюенсов $50\text{--}300\ \text{J}/\text{cm}^2$ индуцированная на поверхностях ПЗ плазма заметного влияния на длительность УКИ не оказывает, она остается в пределах $29 \pm 1\ \text{fs}$. Резкое увеличение наблюдается при $F > 400\ \text{J}/\text{cm}^2$. Этот эффект, вероятно, связан с тем, что при высоком флюенсе образование плазмы на поверхности ПЗ происходит задолго до основного импульса. К моменту его прихода на ПЗ формируется плазменный слой с протяженным градиентом плотности. Отражение коротковолновой компоненты лазерного импульса происходит на больших глубинах внутри этого слоя, так как критическая плотность плазмы обратно пропорциональна квадрату длины волны. Это приводит к растяжению импульса при отражении [14,15]. На графике также можно наблюдать некоторое увеличение длительности импульса в диапазоне поверхностной плотности энергии $< 10\ \text{J}/\text{cm}^2$. Это может быть связано с более поздним временем образования плазмы на поверхности зеркал и, как следствие, с большими потерями в формирующейся плазме длинноволновой части спектра рабочего излучения, что приводит к сужению спектра УКИ [16]. По результатам этих измерений можно сделать вывод, что эффект самоиндуцированного плазменного зеркала не оказывает влияния на длительность импульса в диапазоне флюенсов $50\text{--}350\ \text{J}/\text{cm}^2$. Этот диапазон выбран нами в качестве „рабочего“, в котором в дальнейшем будет

проводиться лазер-плазменные эксперименты. Отметим, что на верхней границе рабочего диапазона контраст минимален, на нижней границе, наоборот, максимален.

В дальнейшем планируется проведение измерения величины контраста, обеспечиваемого созданной системой на различных временных масштабах. О хорошем качестве лазерного излучения после СКЛИ можно косвенно судить по результатам выполненных нами тестовых экспериментов по лазерному ускорению протонов [17]. В этой работе применение разработанной системы позволило наблюдать пучки лазерно-ускоренных частиц с высоким зарядом из алмазоподобных пленок толщиной 100 nm.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S. Keppler, A. Sävert, J. Körner, M. Hornung, H. Liebetrau, J. Hein, M.C. Kaluza, *Laser Photon. Rev.*, **10** (2), 264 (2016). DOI: 10.1002/lpor.201500186
- [2] N.V. Didenko, A.V. Konyashchenko, A.P. Lutsenko, S.Yu. Tenyakov, *Opt. Express*, **16** (5), 3178 (2008). DOI: 10.1364/OE.16.003178
- [3] K. Zeil, S.D. Kraft, S. Bock, M. Bussmann, T.E. Cowan, T. Kluge, J. Metzkes, T. Richter, R. Sauerbrey, U. Schramm, *New J. Phys.*, **12**, 045015 (2010). DOI: 10.1088/1367-2630/12/4/045015
- [4] S. Fourmaux, S. Payeur, S. Bufféchoux, P. Lassonde, C. St-Pierre, F. Martin, J.C. Kieffer, *Opt. Express*, **19** (9), 8486 (2011). DOI: 10.1364/OE.19.008486
- [5] G. Doumy, F. Quéré, O. Gobert, M. Perdrix, P. Martin, *Phys. Rev. E*, **69**, 026402 (2004). DOI: 10.1103/PhysRevE.69.026402
- [6] A. Lévy, T. Ceccotti, P. D'Oliveira, F. Réau, M. Perdrix, F. Quéré, P. Monot, M. Bougeard, H. Lagadec, P. Martin, *Opt. Lett.*, **32** (3), 310 (2007). DOI: 10.1364/OL.32.000310
- [7] Y.H. Kim, H. Kim, S.C. Park, Y. Kwon, K. Yeom, W. Cho, T. Kwon, H. Yun, J.H. Sung, S.K. Lee, T.T. Luu, C.H. Nam, K.T. Kim, *Nat. Commun.*, **14**, 2328 (2023). DOI: 10.1038/s41467-023-38087-3
- [8] S. Feldman, G. Dyer, D. Kuk, T. Ditmire, *Phys. Rev. E*, **95**, 031201 (2017). DOI: 10.1103/PhysRevE.95.031201
- [9] G.M. Dyer, A.C. Bernstein, B.I. Cho, J. Osterholz, W. Grigsby, A. Dalton, R. Shepherd, Y. Ping, H. Chen, K. Widmann, T. Ditmire, *Phys. Rev. Lett.*, **101**, 015002 (2008). DOI: 10.1103/PhysRevLett.101.015002
- [10] B. Hidding, O. Karger, T. Königstein, G. Pretzler, G.G. Manahan, P. McKenna, R. Gray, R. Wilson, S.M. Wiggins, G.H. Welsh, A. Beaton, P. Delinikolas, D.A. Jaroszynski, J.B. Rosenzweig, A. Karmakar, V. Ferlet-Cavrois, A. Costantino, M. Muschitiello, E. Daly, *Sci. Rep.*, **7**, 42354 (2016). DOI: 10.1038/srep42354
- [11] S.C. Wilks, A.B. Langdon, T.E. Cowan, M. Roth, M. Singh, S. Hatchett, M.H. Key, D. Pennington, A. MacKinnon, R.A. Snavely, *Phys. Plasmas*, **8** (2), 542 (2001). DOI: 10.1063/1.1333697
- [12] P.L. Poole, L. Obst, G.E. Cochran, J. Metzkes, H.-P. Schlenvoigt, I. Prencipe, T. Kluge, T. Cowan, U. Schramm, D.W. Schumacher, K. Zeil, *New J. Phys.*, **20**, 013019 (2018). DOI: 10.1088/1367-2630/aa9d47
- [13] С.Ф. Ковалёва, Ю.Ю. Смирнов, Н.А. Федоров, Н.Н. Шамаева, *Устройство контрастирования лазерного излучения*, патент № 240399 (публ. 22.07.2025).
- [14] A.I. Achiezer, *Plasma electrodynamics: linear theory* (Pergamon, 1975). DOI: 10.1016/C2013-0-02586-8
- [15] B. Gilicze, A. Barna, Z. Kovács, S. Szatmári, I.B. Földes, *Rev. Sci. Instrum.*, **87**, 083101 (2016). DOI: 10.1063/1.4960089
- [16] X. Ge, X. Yuan, Y. Fang, W. Wei, S. Yang, F. Liu, M. Chen, L. Zhao, Z. Sheng, J. Zang, *Chin. Opt. Lett.*, **16** (10), 103202 (2018). DOI: 10.3788/COL201816.103202
- [17] A.A. Bushukhin, K.V. Safronov, S.A. Gorokhov, V.A. Flegentov, D.O. Zamuraev, A.L. Shamraev, S.F. Kovaleva, N.A. Fedorov, A.V. Potapov, *Plasma Phys. Rep.*, **51** (1), 72 (2025). DOI: 10.1134/S1063780X25602184