

04

Индикатриса рассеяния при лазерном воздействии на пластиковые мишени

© Л.М. Лавров, Е.В. Поздняков, В.М. Ямщиков, М.А. Ямщикова

Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл., Россия
E-mail: oefimova@otd13.vniief.ru

Поступило в Редакцию 13 апреля 2026 г.

В окончательной редакции 15 мая 2026 г.

Принято к публикации 29 мая 2026 г.

На установке „Искра-5“ получены индикатрисы рассеянного излучения от лазерной плазмы с использованием пластиковых мишеней. Проведено сравнение с индикатрисами, полученными с использованием металлических (алюминий, медь, цинк) и германиевых мишеней. Согласно результатам, появляется дополнительное направление рассеянного излучения, которое распространяется в плоскости поляризации.

Ключевые слова: индикатриса рассеянного излучения, лазерная плазма, фотобумага, вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюэна, вынужденное комбинационное рассеяние.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.17.63477.20724

Получение индикатрисы рассеянного излучения в лазер-плазменных экспериментах является одной из основных задач, так как позволяет определить величину потерь на рассеяние, выявить механизмы взаимодействия лазерного излучения с плазмой и др. Однако регистрация индикатрисы в широком диапазоне углов с высоким пространственным разрешением до сих пор представляет собой трудновыполнимую задачу. Использование ограниченного количества фотоприемников (CCD-матрицы, калориметры и др.) не позволяет в полной мере решить эту задачу. Так, в работе [1] отмечается, что в случае использования даже ~ 100 фотоприемников из-за существенной анизотропии картины рассеяния получаемая таким образом индикатриса не позволяет с достаточно высокой точностью определить величину потерь и судить о механизмах лазер-плазменных взаимодействий.

Решение этой задачи, как показано в работе авторов [2], возможно с использованием калиброванной фотобумаги. Разработанная методика позволяет получать индикатрисы рассеянного от лазерной плазмы излучения с погрешностью $\sim 20\%$ с высоким пространственным разрешением ($25\ \mu\text{m}$) и в широком диапазоне углов ($\sim 4\pi$).

С использованием этой методики можно исследовать влияние материала мишени на характер рассеяния. В экспериментах [3–5], связанных с исследованием лазер-плазменных взаимодействий, приведен характерный вид индикатрис, полученных при воздействии лазерного излучения на мишени, которые выполнены из металла (алюминий, медь, цинк) или полупроводника (германий). Целью настоящей работы является определение индикатрисы рассеянного излучения от пластиковых мишеней.

Исследования проводились на установке „Искра-5“ с длиной волны лазерного излучения $1.315\ \mu\text{m}$. Форма фокального пятна круглая либо в виде строчки (полоска, длина которой $\sim 10\ \text{mm}$, а ширина $\sim 0.2\ \text{mm}$). Параметры лазерного излучения в проведенных на установке „Искра-5“ экспериментах варьировались в следующих диапазонах: 1) длительность импульса $0.3\text{--}3\ \text{ns}$; 2) энергия в импульсе $10\text{--}300\ \text{J}$; 3) размер фокального пятна $0.2\text{--}14\ \text{mm}$; 4) величина потока $10^{11}\text{--}10^{15}\ \text{W/cm}^2$.

Оптическая схема экспериментов по исследованию рассеяния, проведенных на установке „Искра-5“, приведена на рис. 1.

В экспериментах, описанных в работе [4], использовался предимпульс для создания протяженной плазмы. В схеме на рис. 1 предимпульс формировался с помощью зеркала 3, повернутого тыльной стороной по отношению к падающему на него лазерному излучению. Величина задержки предимпульса относительно основного импульса в этом случае определяется временем пробега световой волны через двойную толщину зеркала.

Фотобумага 8 располагалась по внутренней поверхности цилиндра. Для вывода излучения, идущего вдоль строчки (вдоль поверхности мишени и перпендикулярно плоскости поляризации), в цилиндре и фотобумаге были проделаны отверстия. Более подробное описание схемы измерений и методики регистрации рассеяния представлено в работах [2,3].

В экспериментах, проведенных с мишенями из указанных выше материалов, получено, что индикатриса рассеяния зависит только от параметров лазерного излучения. С преодолением порога по величине интенсивности падающего лазерного излучения индикатриса рассеянного излучения состоит из конуса, направленного в сторону фокусирующей оптики, и боковых направлений, перпендикулярных плоскости поляризации. При этом с

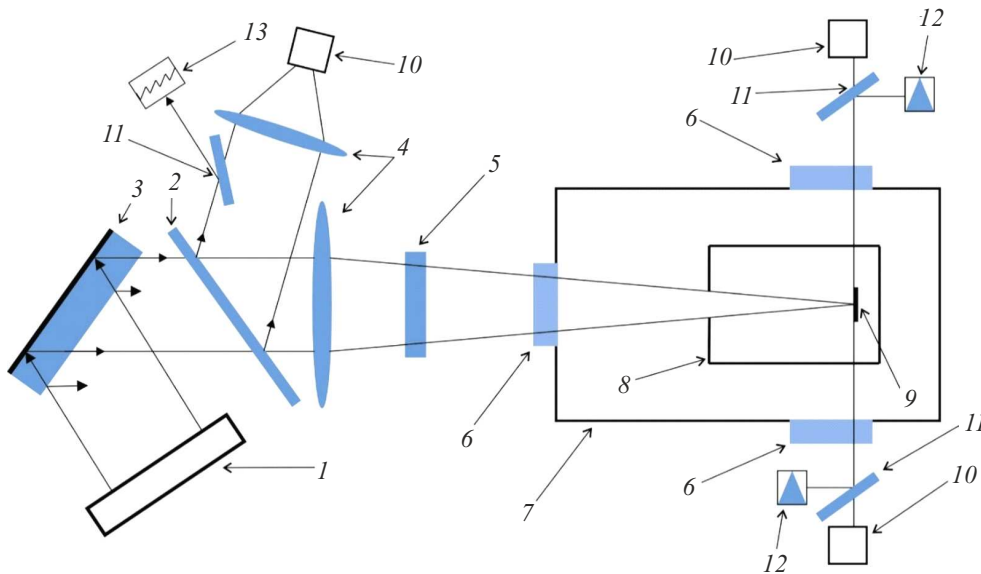


Рис. 1. Оптическая схема измерений. 1 — генератор лазерного импульса, 2 — плоская пластина из стекла, 3 — зеркало, 4 — сферическая линза, 5 — цилиндрическая линза, 6 — окна камеры взаимодействия, 7 — камера взаимодействия, 8 — бокс с фотобумагой, 9 — мишень, 10 — калориметры, 11 — оптический клин, 12 — призмный спектрограф, 13 — спектрограф с дифракционной решеткой.

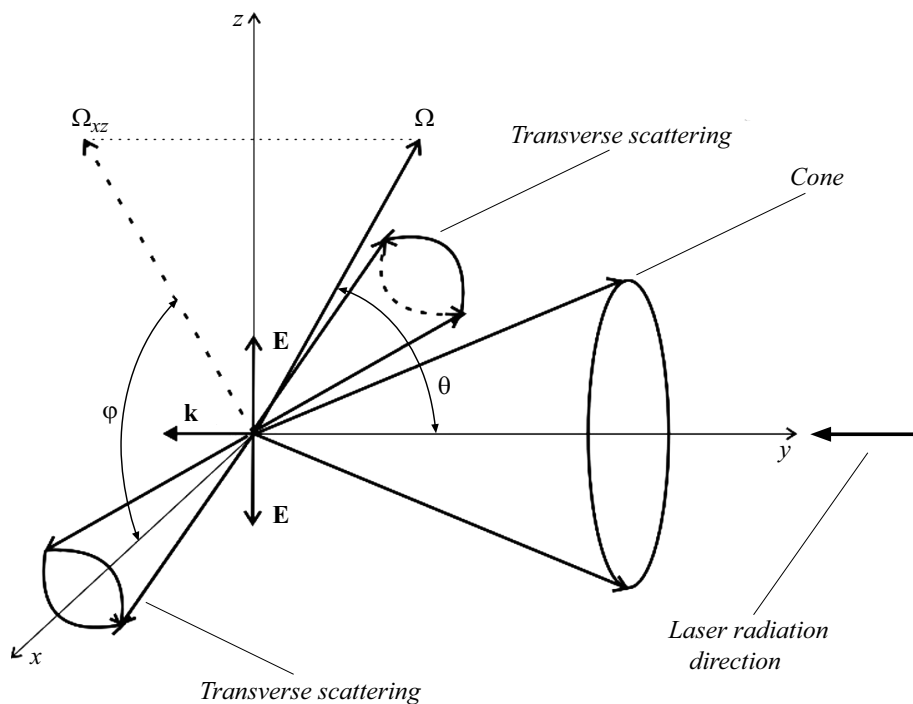


Рис. 2. Диаграмма направленности рассеянного излучения.

дальнейшим ростом интенсивности картина рассеяния остается неизменной, а увеличивается только величина рассеянной энергии.

На рис. 2 построена схематичная диаграмма направленности, полученная с использованием металлических мишеней. Символом \mathbf{k} обозначен волновой вектор лазерного излучения; \mathbf{E} — вектор электрического поля лазерной волны, совершающий линейные колебания в

плоскости xy ; Ω — вектор направления распространения рассеянного излучения; Ω_{xz} — проекция вектора Ω на плоскость xz ; θ (зенитный угол) — угол между осью y и вектором Ω ; φ (азимутальный угол) — угол между Ω_{xz} и осью x . Углы θ и φ указываются далее на рисунках с индикатрисой рассеяния.

На рис. 3 приведена типичная индикатриса рассеяния, полученная с использованием мишеней из различных

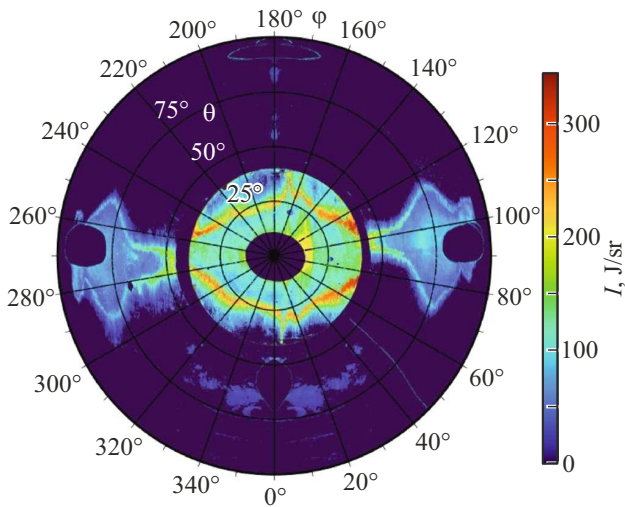


Рис. 3. Характерная индикатриса рассеяния при интенсивности свыше $3 \cdot 10^{13} \text{ W/cm}^2$ ($\lambda = 1.315 \mu\text{m}$, вектор электрического поля направлен вертикально).

металлов и германия. Отметим, что подобные эксперименты, проведенные на другой установке с длиной волны лазерного излучения $0.532 \mu\text{m}$, дают аналогичную картину рассеяния [5].

По имеющимся представлениям [6,7] рассеяние в виде конуса (угол θ от 0 до $\sim 40^\circ$) возникает за счет дифракции лазерного излучения на периодической структуре в плазме, которая образуется за счет интерференции падающей и отраженной от критического слоя волн и под действием пондеромоторной силы. Рассеяние в сторону фокусирующей оптике также образуется за счет вынужденного рассеяния Манделъштама–Бриллюэна и обратного вынужденного комбинационного рассеяния [6,7].

Боковое рассеяние (угол θ от ~ 40 до 90°), которое перпендикулярно плоскости поляризации, вероятно, возникает за счет бокового вынужденного комбинационного рассеяния. Предположение основано на том, что спектр рассеянного излучения в этом направлении лежит в области частоты $3/2\omega_0$ (ω_0 — частота лазерной волны) и имеет большую ширину ($\sim 100 \text{ nm}$) [4].

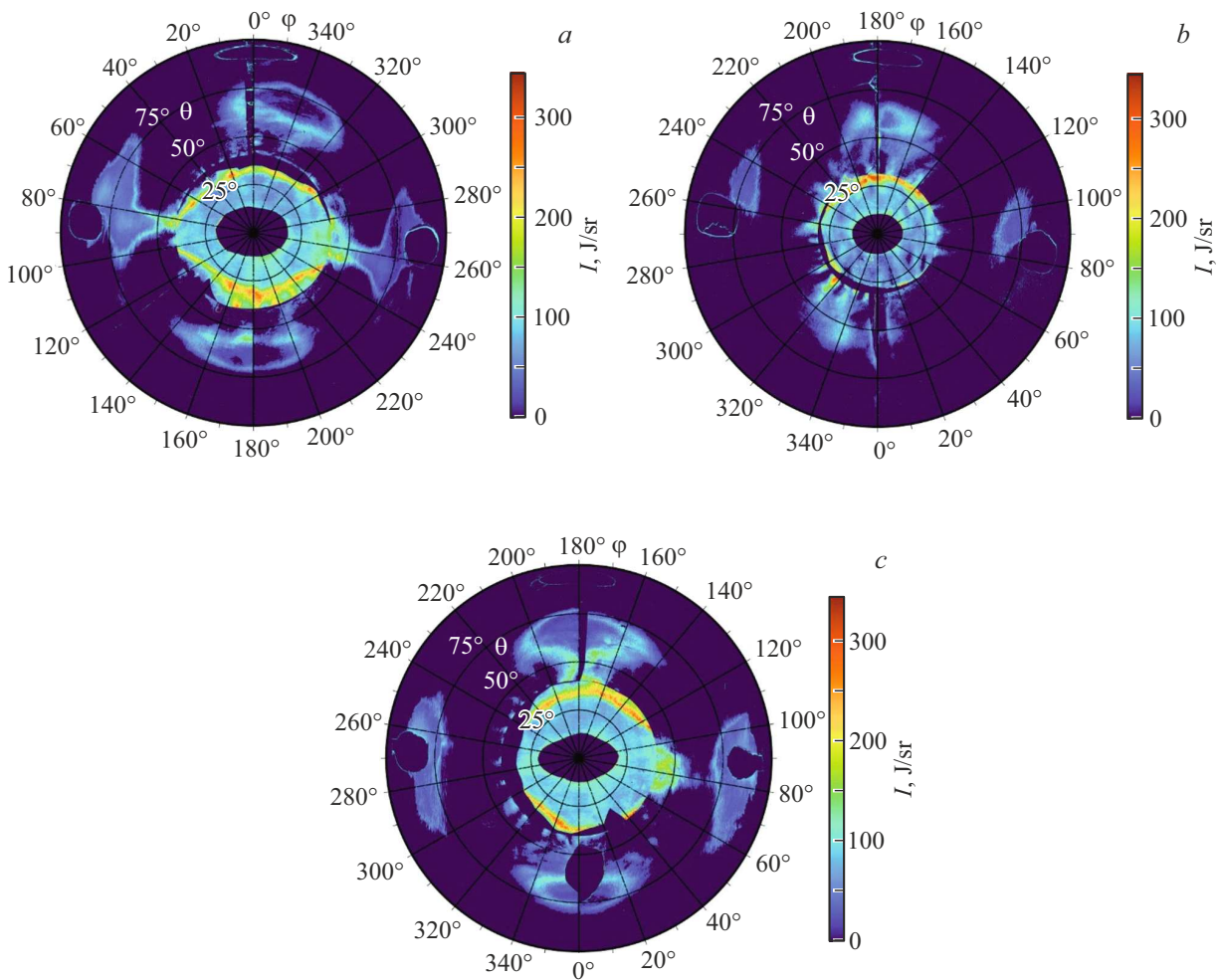


Рис. 4. Индикатриса рассеянного излучения от пластиковой мишени при интенсивностях лазерного излучения $2.7 \cdot 10^{13}$ (a), $3 \cdot 10^{13}$ (b) и $6 \cdot 10^{13} \text{ W/cm}^2$ (c).

В случае использования мишеней из пластика картина рассеяния существенно изменяется. Появляется дополнительное направление рассеянного излучения, лежащее в плоскости поляризации и также имеющее вид конуса. На рис. 4 представлена индикатриса рассеянного излучения от пластиковых мишеней, полученная при различных интенсивностях лазерного излучения.

Отметим, что рассеянное излучение, направленное вдоль плоскости поляризации, распространяется в диапазоне углов θ от 50° до 75° , в то время как боковое рассеяние, перпендикулярное плоскости поляризации, лежит в диапазоне углов θ от 50° до 90° , как это видно из рис. 4. Обратим внимание на то, что на рис. 4, *a* и *c* в появившемся направлении рассеяния периферийная часть конуса имеет повышенную интенсивность. При этом рассеянное излучение, направленное в сторону фокусирующей оптики в виде конуса, а также боковое рассеяние, направленное перпендикулярно плоскости поляризации, сохраняются.

На данный момент нет строгого объяснения возникновения рассеяния вдоль плоскости поляризации. Однако характер рассеяния в виде конусов указывает на их дифракционную природу. О возникновении периодических структур в лазерной плазме, приводящих к диффрагированию падающего излучения, сообщается в работе [8].

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] K. Glize, X. Zhao, Y.H. Zhang, C.W. Lian, S. Tan, F.Y. Wu, C.Z. Xiao, R. Yan, Z. Zhang, X.H. Yuan, J. Zhang, *Phys. Plasmas*, **30** (12), 122706 (2023). DOI: 10.1063/5.0180607
- [2] Л.М. Лавров, Е.В. Поздняков, Е.А. Ульмов, В.М. Ямщиков, М.А. Ямщикова, ПТЭ, № 6, 35 (2023). DOI: 10.31857/S0032816223050324 [L.M. Lavrov, E.V. Pozdnyakov, E.A. Ul'mov, V.M. Yamshchikov, M.A. Yamshchikova, *Instrum. Exp. Tech.*, **66** (6), 926 (2023). DOI: 10.1134/S0020441223050329].
- [3] Л.М. Лавров, А.В. Бессараб, Д.И. Марцовенко, Ф.А. Стариков, А.А. Андреев, К.Ю. Платонов, *Оптика и спектроскопия*, **111** (2), 214 (2011). [L.M. Lavrov, A.V. Bessarab, D.I. Martsovenko, F.A. Starikov, A.A. Andreev, K.Yu. Platonov, *Opt. Spectrosc.*, **111** (2), 184 (2011). DOI: 10.1134/S0030400X11080200].
- [4] Л.М. Лавров, Е.В. Поздняков, В.М. Ямщиков, М.А. Ямщикова, *ЖТФ*, **95** (4), 686 (2025). DOI: 10.61011/JTF.2025.04.60003.136-24 [L.M. Lavrov, E.V. Pozdnyakov, V.M. Yamshchikov, M.A. Yamshchikova, *Tech. Phys.*, **70** (4), 642 (2025). DOI: 10.61011/TP.2025.04.61204.136-24].
- [5] Л.М. Лавров, Е.В. Поздняков, В.М. Ямщиков, А.С. Мокеев, М.А. Ямщикова, *Письма в ЖТФ*, **52** (5), 18 (2026). [L.M. Lavrov, E.V. Pozdnyakov, V.M. Yamshchikov, A.S. Mokeev, M.A. Yamshchikova, *Tech. Phys. Lett.*, **52** (3), 14 (2026)].
- [6] J.D. Moody, P. Datte, K. Krauter, E. Bond, P.A. Michel, S.H. Glenzer, L. Divol, C. Niemann, L. Suter, N. Meezan, B.J. MacGowan, R. Hibbard, R. London, J. Kilkenny, R. Wallace, J.L. Kline, K. Knittel, G. Frieders, B. Golick, G. Ross, K. Widmann, J. Jackson, S. Vernon, T. Clancy, *Rev. Sci. Instrum.*, **81**, 10D921 (2010). DOI: 10.1063/1.3491035
- [7] G. Cristoforetti, L. Antonelli, S. Atzeni, F. Baffigi, F. Barbato, D. Batani, G. Boutoux, A. Colaitis, J. Dostal, R. Dudzak, L. Juha, P. Koester, A. Marocchino, D. Mancelli, Ph. Nicolai, O. Renner, J.J. Santos, A. Schiavi, M.M. Skoric, M. Smid, P. Straka, L.A. Gizzi, *Phys. Plasmas*, **25** (1), 012702 (2018). DOI: 10.1063/1.5006021
- [8] Z.M. Huang, Qing Wang, R.J. Cheng, X.X. Li, S.Y. Lv, D.J. Liu, Z.Y. Xu, S.T. Zhang, Z.J. Chen, Qiang Wang, C.Z. Xiao, Z.J. Liu, L.H. Cao, C.Y. Zheng, X.T. He, *Matter Radiat. Extrem.*, **10** (5), 057403 (2025). DOI: 10.1063/5.0278141