

09

Твердотельный лазер на основе Nd:YAG с пассивной модуляцией добротности для очистки поверхности нержавеющей стали

© М.Д. Чебан¹, С.А. Филатова¹, Я.В. Кравченко¹, Д.Н. Мамонов², К.А. Щербаков²,
С.М. Климентов²

¹ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“, Москва, Россия

E-mail: chebanmd@kapella.gpi.ru

Поступило в Редакцию 28 февраля 2025 г.

В окончательной редакции 4 июля 2025 г.

Принято к публикации 4 июля 2025 г.

Представлены результаты разработки твердотельного лазера на основе Nd:YAG с пассивной модуляцией добротности, работающего на длине волны 1064 nm. Лазерный излучатель генерирует импульсы длительностью 8 ns с энергией 15.9 mJ. Для передачи излучения используется оптическое волокно с прямоугольным профилем преломления, сердцевинной диаметром 600 μm и числовой апертурой 0.22. Эффективность передачи энергии через световод составила 75 %. Проведен анализ параметров лазерного излучения, условий его ввода в волокно, а также факторов, влияющих на потери и распределение энергии в оптической системе. Полученные результаты могут быть полезны при разработке лазерных систем, предназначенных для очистки и дезактивации металлических поверхностей.

Ключевые слова: твердотельный лазер, Nd:YAG, пассивная модуляция добротности, многомодовое оптическое волокно.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.19.61146.20302

Дезактивация радиационно опасных объектов требует удаления радиоактивных загрязнений, сосредоточенных в поверхностном слое материалов [1–4]. Применяются механические (шлифовка, струйная очистка) и химические (кислоты, щелочи, поверхностно-активные вещества) методы, но они создают радиоактивные отходы, требующие значительных затрат и сложных технологических манипуляций для захоронения.

Лазерно-плазменная очистка лишена этих недостатков [5,6]. Лазерная абляция вызывает плавление, испарение и ионизацию материала, а расплав удаляется пароплазменным давлением. При очистке в жидкой среде дополнительно действует кавитация [7]. Вклад механизмов зависит от параметров излучения, прежде всего от длительности импульса.

Микросекундные импульсы вызывают сильный нагрев и модификацию материала [8,9], фемтосекундные и пикосекундные позволяют удалять загрязнения, минимизируя тепловое воздействие [10], но изделия, генерирующие такие импульсы, сложны и дорогостоящи. Короткие наносекундные импульсы (менее 10 ns) оптимально сочетают эффективность очистки, технологическую доступность и низкое тепловое воздействие [11,12].

Лазеры с длиной волны 1064 nm широко применяются в задачах лазерной очистки. Для стали коэффициент поглощения на этой длине волны составляет порядка 15–30 % в зависимости от угла падения, состояния поверхности и других факторов [13,14]. Характерным источником излучения на этой длине волны является Nd:YAG-лазер. Его использование позволяет достигать плотности мощности $\sim 10^7$ W/cm² в наносекундных

импульсах [15], что создает условия, необходимые для эффективной абляции.

Лазеры на второй гармонике Nd:YAG (532 nm) также находят применение в задачах очистки [16,17], поскольку сталь поглощает излучение на этой длине волны более эффективно. Однако такие источники требуют использования нелинейных оптических преобразователей, что усложняет конструкцию, снижает энергоэффективность и увеличивает стоимость системы. В прикладных задачах, где приоритетами являются надежность, простота и универсальность, длина волны 1064 nm остается более практичным выбором, особенно в условиях полевой и промышленной дезактивации.

Nd:YAG-лазеры востребованы благодаря высокой надежности, оптической однородности активной среды и эффективному теплоотводу. В режиме пассивной модуляции добротности с использованием кристалла Sr⁴⁺:YAG в качестве поглотителя такие лазеры (особенно с поперечной диодной накачкой) способны формировать импульсы длительностью менее 10 ns [18,19].

В случае очистки металлических поверхностей, в частности нержавеющей стали, механизм взаимодействия лазерного излучения с материалом существенно отличается от задач селективной очистки хрупких или многослойных структур. Для длины волны 1064 nm поглощательная способность ряда загрязнений (например, оксидов или радионуклидных осадков) может быть сопоставима или даже ниже, чем у самой металлической подложки. В режиме наносекундных импульсов очистка зачастую реализуется за счет термомеханического воздействия: энергия импульса вызывает локальное ис-

парение вещества и формирование подповерхностного давления, что способствует удалению загрязнений, в том числе при участии теплового отклика основного материала. При правильно подобранной плотности энергии удается эффективно удалять плотные загрязнения, такие как устойчивые оксидные пленки или радиоактивные отложения. При этом тепловое воздействие на подложку минимизируется, что позволяет снизить ее повреждения.

Настоящая работа направлена на разработку и оптимизацию Nd:YAG-лазера с пассивной модуляцией добротности. Выбор наносекундного режима обусловлен необходимостью обеспечить эффективную абляцию загрязнений при минимальной глубинной модификации основного материала, а также технологической доступностью и компактностью такой схемы.

В результате предварительных экспериментов и анализа данных был сконструирован источник лазерного излучения (рис. 1), основанный на монокристалле Nd³⁺:YAG с поперечной диодной накачкой (диаметр кристалла 5 mm, длина 60 mm). Излучение от трех импульсных полупроводниковых диодных линеек ($\lambda = 808$ nm) направлялось в активный элемент с трех сторон, что обеспечивало равномерное распределение оптической накачки в объеме кристалла, снижало термические градиенты и повышало стабильность генерации. Длительность импульса накачки составляла 250 μ s, а частота повторения импульсов — 100 Hz. Значение частоты выбрано с учетом ограничений по доступной мощности диодных накачивающих матриц и представляет собой компромисс между достижением требуемой энергии в импульсе и обеспечением стабильной генерации в заданном режиме.

Для модуляции добротности использовался пассивный затвор на основе кристалла Cr⁴⁺:YAG (начальное пропускание 30%), установленного под малым углом к оптической оси. Такое расположение предотвращало нежелательные переотражения и формирование конкурентного резонатора, а просветленные поверхности минимизировали отражательные потери. Затвор был закреплен в оправке с теплопроводящей подложкой, обеспечивающей пассивное охлаждение. Такое решение использовалось для обеспечения стабильности работы затвора и предотвращения перегрева, который мог бы повлиять на его оптические характеристики. В конструкции резонатора применялась апертурная диафрагма для пространственной фильтрации мод, что позволило получить выходное излучение с высоким качеством пучка.

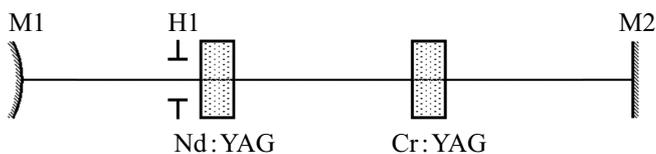


Рис. 1. Оптическая схема резонатора (M1 — глухое зеркало, M2 — выходное зеркало, Nd³⁺:YAG — активный элемент, Cr⁴⁺:YAG — пассивный затвор, H1 — диафрагма).

Для предварительной оценки необходимой плотности используемых зеркал были проведены измерения усиления слабого сигнала рабочего излучения в квантроне. Для этого через квантрон пропускалось пробное излучение ($\lambda = 1064$ nm) Nd:YAG-лазера с наносекундной длительностью импульса. Максимальная величина усиления за проход в используемом квантроне (11.3) достигнута при мощности накачки 3 kW (напряжение на диодных матрицах 120 V, ток 25 A).

В процессе работы в активном элементе лазера возникает термическая линза, влияющая на выходные параметры. Величина термической линзы зависит от энергии накачки и частоты работы лазера. Для стабилизации термической линзы режим работы лазера поддерживался при постоянных параметрах: частота повторения импульсов 100 Hz, мощность накачки 3 kW. Измерения термической линзы с помощью пробного луча He:Ne-лазера показали, что ее величина (фокусное расстояние) при рабочих энергиях накачки составляет $F \sim 1400$ mm. Для улучшения качества пучка и увеличения устойчивости генерации в качестве глухого зеркала использовалось выпуклое зеркало.

Энергетические и временные характеристики лазерного импульса определяются совокупностью факторов, влияющих на процесс генерации. Влияние оказывают параметры резонатора, включая его длину, отражающую способность зеркал и точность юстировки. Также важную роль играют характеристики пассивного затвора: начальное пропускание, расположение относительно оптической оси и поведение при насыщении. Кроме того, на параметры импульса влияет коэффициент усиления в активной среде, зависящий от условий накачки. Дополнительный вклад вносят пространственно-модовые особенности генерируемого излучения.

В табл. 1 представлены результаты зависимости длительности и энергии импульсов от коэффициента отражения выходного зеркала M2. Из этой таблицы видно, что повышение коэффициента отражения выходного зеркала M2 с 20 до 50% привело к увеличению длительности импульса и его энергии. Увеличение коэффициента отражения выходного зеркала напрямую влияет на добротность резонатора, увеличивая время жизни фотона внутри него. В использованной конфигурации увеличение коэффициента отражения выходного зеркала приводит к снижению энергии, извлекаемой из резонатора, но одновременно способствует удлинению импульса за счет роста времени накопления излучения.

Таблица 1. Зависимость длительности энергии импульса от коэффициента отражения выходного зеркала M2

Коэффициент отражения зеркала M2	Энергия в импульсе, mJ	Длительность импульса, ns
20	8.65	7.2
35	11.5	7.5
50	15.7	21.3

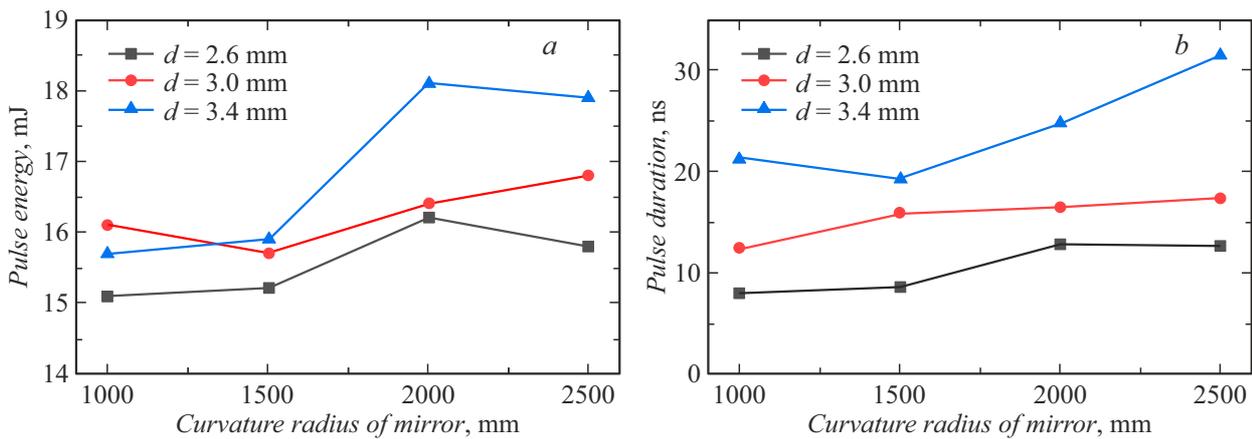


Рис. 2. *a* — зависимость энергии в импульсе от радиуса кривизны глухого зеркала M1 для разного диаметра диафрагмы; *b* — зависимость длительности импульса от радиуса кривизны глухого зеркала M1 для разного диаметра диафрагмы.

С другой стороны, применение зеркала с меньшим коэффициентом отражения требует большего усиления в активной среде, что ограничивается доступной мощностью диодной накачки. Согласно расчетам, оптимальный коэффициент отражения составляет порядка 43%. Однако на основании анализа экспериментальных данных и с учетом стабильности работы системы было принято решение использовать зеркало с коэффициентом отражения 50%, обеспечивающее наилучший компромисс между энергией и длительностью импульсов.

В резонатор была установлена апертурная диафрагма, которая служила для пространственной фильтрации мод и для стабилизации процесса генерации. Изменение диаметра ее отверстия позволяло контролировать модовый состав излучения и получать пучок с улучшенными пространственными характеристиками. При соответствующем подборе параметров диафрагмы удавалось сформировать маломодовое излучение, хорошо согласующееся с модовой структурой оптического волокна, что обеспечивало минимальные потери при вводе. Дополнительно были проведены исследования параметров выходного излучения в зависимости от радиуса кривизны глухого зеркала M1 (1000–2500 mm) и диаметра диафрагмы (2.6–3.4 mm). Результаты представлены на рис. 2. Погрешность измерения энергии импульса составляла ± 0.4 mJ, длительности ± 0.2 ns. Значения определены как стандартное отклонение по результатам пяти повторных измерений в каждой экспериментальной точке.

Согласование диаметра апертурной диафрагмы и радиуса кривизны глухого зеркала M1 позволяет сформировать устойчивую область генерации в пределах активного элемента. Варьирование параметров такой конфигурации позволяет контролировать поперечные размеры моды и эффективно подавлять высокопорядковые моды, что положительно сказывается на длительности импульса, его энергии и пространственном качестве излучения. Было решено использовать глухое зеркало с радиусом

Таблица 2. Параметры лабораторного образца твердотельного Nd³⁺:YAG-лазера с диодной накачкой

Параметр	Значение
Напряжение накачки, V	120
Ток накачки, A	25
Мощность накачки диодной матрицы, W	3000
Длина резонатора, mm	138
Пропускание выходного зеркала, %	50
Радиус кривизны глухого зеркала, mm	1000
Начальное пропускание затвора, %	30
Длина волны излучения, nm	1064
Диаметр диафрагмы, mm	2.6
Длительность импульса, ns	8
Энергия в импульсе, mJ	15.9
Частота следования импульсов, Hz	100

кривизны 1000 mm и диафрагмой $d = 2.6$ mm. Такие параметры позволили получить на выходе из резонатора излучение с длительностью импульса 8 ns (рис. 3) и энергией импульса 15.9 mJ. Частота повторения импульсов составила 100 Hz.

В результате проведенного выбора и оптимизации составляющих оптических элементов резонатора лазерный излучатель имел параметры накачки и генерации, представленные в табл. 2. Параметр количественной оценки качества пучка составил $M^2 < 2$.

Поскольку полученное лазерное излучение предполагается использовать для воздействия на поверхность материалов, для удобства подвода излучения к очищаемому объекту использовалось оптическое волокно. На рис. 4 представлена схема лабораторного образца твердотельного лазерного излучателя на основе Nd³⁺:YAG. Лазерное излучение вводилось в многомодовое волокно с числовой апертурой $NA = 0.22 \pm 0.02$. Сердцевина из диоксида кремния имела диаметр $600 \mu\text{m}$, а фтор-силикатная оболочка — $660 \mu\text{m}$. Диаметр лазерного

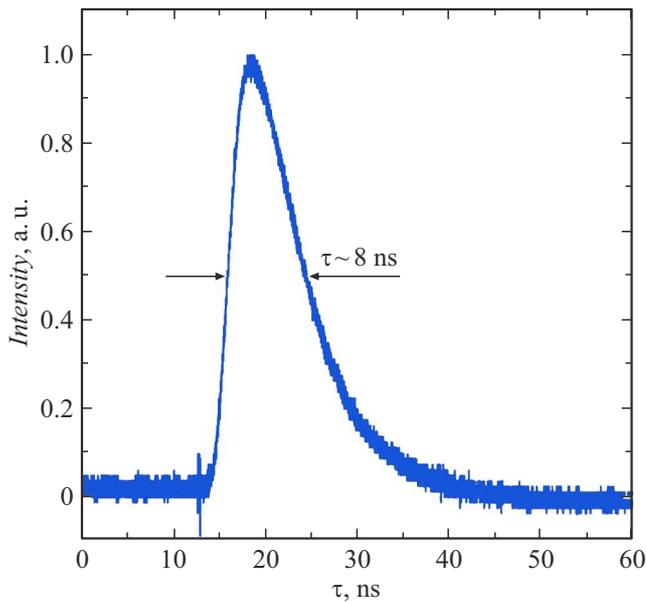


Рис. 3. Временной профиль одиночного импульса 8 ns.

луча в перетяжке составлял $120\ \mu\text{m}$. Чтобы избежать повреждения торца волокна, фокусировка излучения была смещена внутрь волокна на расстояние 3 mm от торца, в который вводилось излучение. При прохождении лазерного излучения через волокно формировалось множество мод, которые на выходе распространялись под разными углами к оси волокна. После фокусировки излучения, выходящего из волокна на поверхность образца, эта тенденция сохранялась, что обеспечивало эффективное проникновение излучения в узкие щели, каверны и шероховатости.

Тем не менее спустя 30 min работы лазерной системы в 10 mm от входного торца волокна наблюдались следы деградации и разрушения оболочки, а затем сердцевины. Сам торец оставался целым. Это указывало на утечку части мод высших порядков из сердцевины в оболочку. Для уменьшения этого эффекта была произведена зачистка полимерной оболочки [20]. В соответствии с этим подходом входной участок волокна ($\sim 20\ \text{mm}$ от торца) очищается от полимерного покрытия и размещается в свободном пространстве, что исключает контакт с держателями или другими элементами конструкции. Уда-

ление „паразитных“ мод рекомендуется осуществлять на максимально коротком участке входа, что предотвращает их неконтролируемое распространение. Хотя это снижает эффективность передачи энергии, ресурс работы системы существенно возрастает. В результате проведенных исследований удалось достичь эффективности ввода излучения в волокно около 75%. В рамках настоящей работы проводились испытания на отказ, включая непрерывную работу волоконной линии на протяжении нескольких часов (4 h за сеанс). При этом в ходе серии прикладных экспериментов по лазерной очистке общая наработка системы составила более 120 h без наблюдаемого разрушения торца волокна или деградации параметров. Эти результаты свидетельствуют о достаточном уровне устойчивости выбранного технического решения в условиях лабораторной эксплуатации.

В рамках исследования был разработан и изготовлен лабораторный образец твердотельного $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ -лазера с диодной накачкой и пассивной модуляцией добротности за счет затвора на основе кристалла $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$. Исследованы зависимости выходных параметров лазера от составляющих оптических элементов резонатора. Оптимизированы выходные параметры излучения (энергия в импульсе и длительность импульса). В результате лабораторный образец лазерной системы обладал следующими выходными характеристиками: длина волны 1064 nm, энергия в импульсе на выходе из волокна 11.9 mJ, длительность импульса $\sim 8\ \text{ns}$, частота повторения импульсов 100 Hz. Такие параметры являются перспективными для лазерной очистки, поскольку обеспечивают эффективное удаление загрязнений и оксидных пленок без значительного термического воздействия на основу.

В перспективе возможно увеличение частоты следования импульсов за счет использования более мощного квантрона или волоконного усилительного каскада, что позволит компенсировать снижение энергии отдельных импульсов за счет более высокой накачки и обеспечить стабильную генерацию при повышенной нагрузке. Повышение частоты следования позволит увеличить среднюю мощность излучения, что открывает возможности для разработки более производительных систем лазерной очистки. При этом важным направлением дальнейших исследований остается численное моделирование тепловых процессов, возникающих в мишени во время

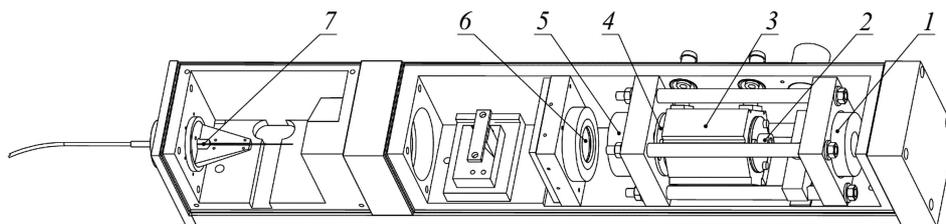


Рис. 4. Лабораторный образец твердотельного лазерного излучателя на основе $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$. 1 — глухое зеркало, 2 — диафрагма, 3 — квантрон, 4 — пассивный затвор, 5 — выходное зеркало, 6 — фокусирующая линза, 7 — многомодовое волокно.

абляции при высокочастотной генерации, с целью оценки допустимых режимов обработки и предотвращения нежелательного термического воздействия на очищаемый материал. Достижение оптимального баланса между энергией отдельных импульсов и их частотой может стать ключевым этапом в создании промышленного образца установки, адаптированной для высокоскоростной очистки различных материалов.

Разработанный лазерный источник был использован в ряде экспериментальных работ по очистке нержавеющей стали 08X18H10T (AISI 321) от покрытий, имитирующих радиоактивные загрязнения, в различных газовых средах (на воздухе, в аргоне и в технологическом вакууме), а также в жидких средах (дистиллированной воде, ацетоне, изопропиловом спирте и полимеризующемся гелевом составе на основе поливинилового спирта) [21,22]. Кроме того, были проведены эксперименты по дезактивации реальных радиационно загрязненных поверхностей нержавеющей стали в среде поливинилового спирта [22].

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] V. Kumar, R. Goel, R. Chawla, M. Silambarasan, R.K. Sharma, *J. Pharm. Bioallied Sci.*, **2** (3), 220 (2010). DOI: 10.4103/0975-7406.68505
- [2] S. Liu, Y. He, H. Xie, Y. Ge, Y. Lin, Z. Yao, M. Jin, J. Liu, X. Chen, Y. Sun, B. Wang, *Sustainability*, **14** (7), 4021 (2022). DOI: 10.3390/su14074021
- [3] L. Zhong, J. Lei, J. Deng, Z. Lei, L. Lei, X. Xu, *Prog. Nucl. Energy*, **139**, 103854 (2021). DOI: 10.1016/j.pnucene.2021.103854
- [4] A. Gossard, A. Lilin, S. Faure, *Prog. Nucl. Energy*, **149**, 104255 (2022). DOI: 10.1016/j.pnucene.2022.104255
- [5] Q. Wang, F. Wang, C. Cai, H. Chen, F. Ji, C. Yong, D. Liao, *Nucl. Eng. Technol.*, **55** (1), 12 (2023). DOI: 10.1016/j.net.2022.09.020
- [6] G. Zhu, Z. Xu, Y. Jin, X. Chen, L. Yang, J. Xu, D. Shan, Y. Chen, B. Guo, *Opt. Lasers Eng.*, **157**, 107130 (2022). DOI: 10.1016/j.optlaseng.2022.107130
- [7] A. Kumar, M. Prasad, R.B. Bhatt, P.G. Behere, D.J. Biswas, *Opt. Laser Technol.*, **100**, 133 (2018). DOI: 10.1016/j.optlastec.2017.10.005
- [8] H. Zhao, Y. Qiao, S. Chen, Q. Zhang, Y. Zang, *Phys. Scripta*, **96**, 125103 (2021). DOI: 10.1088/1402-4896/ac1bf1
- [9] A. Ignatov, V. Zhakhovskiy, A. Merzlikin, N. Inogamov, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1092**, 012051 (2018). DOI: 10.1088/1742-6596/1092/1/012051
- [10] T. Harada, S. Spence, A. Margiolakis, S. Deckoff-Jones, R. Ploeger, A.N. Shugar, J.F. Hamm, K.M. Dani, A.R. Dani, *Materials*, **10** (2), 107 (2017). DOI: 10.3390/ma10020107
- [11] L. Zhou, H. Zhao, Q. Zhang, Q. Wang, G. Ma, Y. Qiao, H. Wang, *Appl. Opt.*, **63** (6), A32 (2024). DOI: 10.1364/AO.504968
- [12] V.P. Veiko, A. Samohvalov, E.I. Ageev, *Opt. Laser Technol.*, **54**, 170 (2013). DOI: 10.1016/j.optlastec.2013.05.015
- [13] G. de la Rosa-Santana, J. Alvarez-Chavez, H. Morano-Okuno, A. Morales-Ramirez, E. Uribe, *Opt. Photon. J.*, **6** (10), 275 (2016). DOI: 10.4236/opj.2016.610028
- [14] X. Li, T. Huang, A.W. Chong, R. Zhou, Y.S. Choo, M. Hong, *Opto-Electron. Eng.*, **44** (3), 340 (2017). DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.03.009
- [15] S. Garnov, V. Konov, T. Kononenko, V. Pashinin, M. Sinyavsky, *Laser Phys.*, **14**, 910 (2004).
- [16] H.-J. Won, S.-H. Jung, C.-H. Jung, B. Choi, J.-K. Moon, K. Lee, *Asian J. Chem.*, **24**, 4136 (2012).
- [17] H.A. M. Afifi, M. Abdel-Ghani, R. Mahmoud, F.H. Alkallas, A.B.G. Trabelsi, A.M. Mostafa, *Micromachines*, **14**, 1415 (2023). DOI: 10.3390/mi14071415
- [18] Y. Zhou, X. Li, H. Xu, R. Yan, Y. Jiang, R. Fan, D. Chen, *Opt. Express*, **29** (11), 17201 (2021). DOI: 10.1364/OE.425586
- [19] Y. Jiang, M. Nie, R. Guo, X. Fu, Q. Liu, *Opt. Laser Technol.*, **129**, 106276 (2020). DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106276
- [20] S. Campbell, O. Blomster, M. Pålsson, *Proc. SPIE*, **7578**, 75781R (2010). DOI: 10.1117/12.842633
- [21] M. Cheban, S. Filatova, Y. Kravchenko, K. Scherbakov, D. Mamonov, S. Klimentov, M. Savinov, M. Chichkov, *Nucl. Eng. Technol.*, **56** (7), 2775 (2024). DOI: 10.1016/j.net.2024.02.039
- [22] M. Cheban, K. Scherbakov, D. Mamonov, P. Parabin, S. Filatova, Ya. Kravchenko, S. Klimentov, M. Chichkov, *Nucl. Eng. Technol.*, **57** (8), 103569 (2025). DOI: 10.1016/j.net.2025.103569