

НЕКОТОРЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДИНАМИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОВОРОТОМ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В.В. Кузнецов, А.И. Долгушин

ФГБОУ ВО «МИРЭА-Российский технологический университет», пр. Вернадского, д. 78, Москва, Россия, 119454

E-mail: kuznetsov@mirea.ru

Использование лазерного излучения в высокоточных измерительных комплексах, а также в технологических целях прецизионной обработки материалов неизбежно приводит к необходимости учета и использования такого параметра электромагнитного излучения, как его поляризация. На практике обычно используют излучение с круговой поляризацией, что связано с техническими трудностями управления плоскостью поляризации при резке деталей произвольной формы. Настоящая статья посвящена вопросу динамического управления поворотом плоскости поляризации мощного лазерного излучения в процессе технологической обработки материалов. В работе рассмотрен один из достаточно простых в реализации способов динамического управления поворотом поляризации CO₂ лазера. Приведены результаты исследования экспериментального макета, позволяющего поворачивать плоскость поляризации мощного лазерного излучения CO₂ лазера в технологическом процессе резки материалов на примере фанеры. Представленные данные проведенных исследований подтверждают, что динамическое управление поворотом плоскости поляризации способно скорректировать потери эффективности при резке в различных направлениях поляризованным излучением CO₂ лазера, а потери мощности выходного излучения при введении устройства поворота плоскости поляризации могут быть значительно снижены за счет качества изготовления составных частей устройства. Результаты могут быть полезны при проектировании более сложных устройств динамического управления плоскостью поляризации лазерного излучения в технологических установках резки и прецизионной поверхностной обработки различных материалов.

Ключевые слова: лазер, лазерное излучение, поляризация, лазерная резка, поворот плоскости поляризации, вращение плоскости поляризации, управление плоскостью поляризации

SOME POSSIBILITIES OF DYNAMIC CONTROL OF ROTATION OF THE PLANE OF POLARIZATION OF LASER RADIATION

V.V. Kuznetsov, A.I. Dolguchin

MIREA-Russian technological university, 78, Vernadsky Ave, Moscow, Russian Federation 119454

E-mail: kuznetsov@mirea.ru

The use of laser radiation in high-precision measuring systems, as well as for technological purposes of precision processing of materials, inevitably leads to the need to take into account and use such a parameter of electromagnetic radiation as its polarization. In practice, radiation with circular polarization is usually used, which is associated with technical difficulties in controlling the plane of polarization when cutting parts of arbitrary shape. This article is devoted to the issue of dynamic control of the rotation of the plane of polarization of powerful laser radiation in the process of technological processing of materials. The work considers one of the fairly simple in implementation methods of dynamic control of the rotation of the polarization of a CO₂ laser. The results of the study of an experimental model that allows rotating the plane of polarization of powerful CO₂ laser radiation in the technological process of cutting materials using plywood as an example are presented. The presented data of the conducted studies confirm that dynamic control of the rotation of the plane of polarization is capable of correcting the losses of efficiency during cutting in different directions with polarized radiation of a CO₂ laser, and the losses of output radiation

power when introducing a device for rotating the plane of polarization can be significantly reduced due to the quality of manufacturing of the component parts of the device. The results can be useful in designing more complex devices for dynamic control of the plane of polarization of laser radiation in technological installations for cutting and precision surface treatment of various materials.

Keywords: laser, laser radiation, polarization, laser cutting, rotation of the plane of polarization, rotation of the plane of polarization, control of the plane of polarization

Для цитирования:

Кузнецов В.В., Долгушин А.И. Некоторые возможности динамического управления поворотом плоскости поляризации лазерного излучения. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2025. Т. LXIX. № 1. С. 73–79. DOI: 10.6060/rcj.2025691.14.

For citation:

Kuznetsov V.V., Dolguchin A.I. Some possibilities of dynamic control of rotation of the plane of polarization of laser radiation. *Ros. Khim. Zh.* 2025. V. 69. N 1. P. 73–79. DOI: 10.6060/rcj.2025691.14.

В настоящее время лазерное излучение находит применение в различных областях науки и техники – от оптических измерений и скоростной передачи информации до технологического использования в процессах резки, сварки, поверхностной обработки и др. [1–4].

Оптическое излучение, как и все электромагнитные волны, характеризуется несколькими параметрами: амплитуда (интенсивность), частота (длина волны), направление распространения (волновой вектор) и поляризация. При использовании лазерного излучения, характеризующегося узкой шириной спектра, малой расходимостью и высокой степенью когерентности, приходится учитывать все указанные выше характеристики. Как правило, при выполнении основных технологических операций, требующих использования лазерного излучения высокой мощности, редко уделяют внимание такому параметру, как поляризация. Хотя известно, что в результате борьбы за снижение потерь в лазерном резонаторе (ряд газовых и твердотельных лазеров) выходное излучение оказывается поляризованным и игнорировать этот факт нельзя, поскольку и процесс фокусировки такого излучения на объекте обработки имеет свои особенности [5–8].

Помимо перечисленных параметров лазерного излучения, влияющих на процесс его фокусировки, а, следовательно, и на воздействие на материалы, это форма распределения энергии излучения в пятне фокусировки, например, [9]. Возможности управления распределением энергии лазерного излучения в пятне фокусировки различными способами описаны также в работах [10–12].

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объекта исследований, проведенных в данной работе, была выбрана поляризация мощного лазерного излучения, особенности

использования поворота плоскости поляризации в процессе воздействия на обрабатываемые материалы. В работе использовались анализ теоретических расчетов и экспериментальные исследования результатов воздействия мощного лазерного излучения на обрабатываемые материалы.

В качестве источников лазерного излучения были взяты лазерный станок Trotec Speedy 100R на основе керамического CO₂ лазерного излучателя мощностью 60 Вт и CO₂ лазер RECI со стеклянной лазерной трубкой мощностью 100 Вт. Оба варианта CO₂ лазеров на выходе дают длинноволновое инфракрасное поляризованное излучение с длиной волны 10,6 мкм.

В последние годы в нашей стране и за рубежом ведутся исследования по изучению использования определенного вида поляризации лазерного излучения в различных режимах обработки материалов [5–8].

В работе [9], например, рассматривается возможность получения сверхразрешения при фокусировке лазерного излучения с радиальной поляризацией, используя цилиндрическую градиентную микролинзу Микаэляна и конический микроаксикон. Численным моделированием показано, что площадь пятна фокусировки при этом оказывается меньше площади кружка Эйри. Но указанная модель не учитывает поляризацию лазерного излучения.

Поляризация лазерного излучения зачастую игнорируется при рассмотрении воздействия мощного излучения на материалы в технологических процессах. Однако, она оказывает значительное влияние на процессы почти всех видов лазерной обработки материалов, а особенно на процесс резки [1–8]. Воздействие поляризованным лазерным излучением может быть использовано при прецизионной коррекции дефектов различных фото и других шаблонов, в том числе упоминаемых, например, в

[17] (коррекция дефектов, влияющих как на процесс трафаретной печати, так и на конечную печатную продукцию). В технологических процессах 3D печати, использующих метод селективного лазерного спекания (SLS) мелкодисперсных композитных порошков (например, [18-20]), получение качественных малоразмерных структур неизбежно приведет к необходимости использования поляризованного лазерного излучения и динамического поворота плоскости поляризации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Еще из работ Френеля начала 19 века известно, что взаимодействие излучения с материалами сильно зависит от поляризации этого излучения относительно плоскости падения.

Типовой вариант схемы воздействия лазерного излучения на материал в процессе его обработки показан на рис. 1а [5].

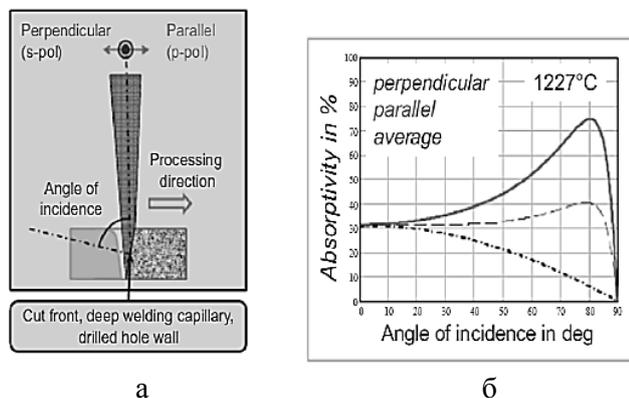


Рис. 1. Типовая схема воздействия лазерного излучения на материал (а); расчетные значения поглощательной способности горячего чугуна в зависимости от угла падения для Р и S поляризаций (б)

Для процессов, показанных на рис. 1а, видно, что воздействие на обрабатываемую поверхность идет по периметру поперечного сечения пучка.

На рис. 1б в качестве примера зависимости характера воздействия лазерного излучения на материалы от его поляризации приведены графики, иллюстрирующие расчетные значения поглощательной способности горячего чугуна в зависимости от угла падения для Р и S поляризаций [5]. Как видно из графиков, поглощательная способность существенно зависит от типа поляризации лазерного излучения. Между поглощательной способностью для Р и S поляризованного света видна достаточно большая разница. На графике рис. 2 б эта разница еще более заметна. Для углов, превышающих 80°, Р-поглощение на порядок выше чем S-поглощение.

Авторами показано, что одним из преимуществ цилиндрически-поляризованных лазерных пучков является их торообразное распределение интенсивности, приводящее к более крутому уклону графика распределения в пятне фокусировки по сравнению с распределением Гаусса. Для обработки материалов такой вариант хорошо подходит, так как крутизна распределения интенсивности приближена к идеальному распределению с плоской вершиной и без ограничения глубины фокусировки.

Для резки материалов поглощение излучения на режущей поверхности является основным физическим процессом, определяющим в конечном счете его параметры. В работе [8] авторы показали, что излучение Р-поляризации формирует форму с изломом внизу (V-образная форма). Эта форма возникает из-за низкого поглощения излучения на стенках реза, что ограничивает его конечную глубину, поскольку область с преобладающим поглощением Р-волн исчезает. Для осесимметричных типов поляризации (круговой и радиальной) такое ограничение не действует.

В работе [7] авторы показали сильную зависимость коэффициента поглощения от угла падения лазерного излучения и его поляризации. Они теоретически подтвердили, что максимальная глубина реза при круговой поляризации значительно больше, чем при линейной. Типичная форма лазерного реза с использованием эллиптически поляризованного излучения показана на рис. 2.

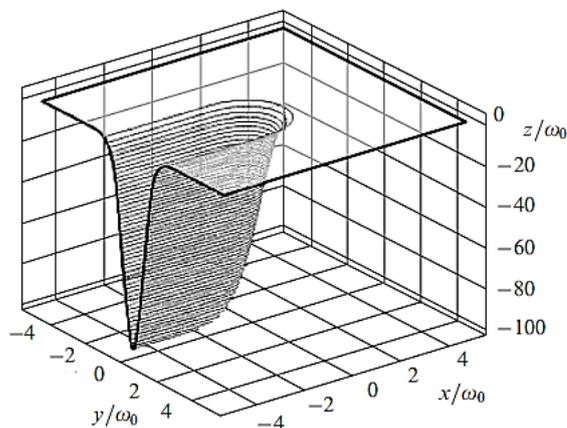


Рис. 2. Форма поверхности реза при использовании эллиптически поляризованного излучения

Авторы указывают, что максимально эффективным может быть излучение с ориентированной по направлению движения луча эллиптической поляризации с $b/a=0,75$.

На практике обычно используют излучение с круговой поляризацией, что связано с техниче-

скими трудностями управления плоскостью поляризации при резке деталей произвольной формы, которая и представляет интерес в некоторых случаях.

Способов управления поляризацией излучения не так много. Чаще всего применяется внутрирезонаторное управление с помощью анизотропных элементов или непосредственного воздействия на активную среду магнитного или электрического полей [13–16].

В данной работе мы рассмотрим один из достаточно простых в реализации способов динамического управления поворотом поляризации CO₂ лазера.

Для поворота плоскости поляризации лазерного излучения можно использовать призму Довэ, способную оборачивать изображение с сохранением поляризационных свойств проходящего через нее излучения. При повороте призмы вокруг оси луча изображение и, соответственно, поляризация поворачиваются на удвоенный угол, что увеличивает динамические свойства поворота плоскости поляризации.

Так как обычная призма Довэ, изготовленная из стекла, не может быть использована совместно с CO₂ лазером, то было выбрано решение использовать зеркальный аналог такой призмы, схематически показанный на рис. 3.



Рис. 3. Зеркальный аналог призмы Довэ

Исходя из существующих размеров зеркал для излучения 10,6 мкм, общих компактных габаритных размеров и способов крепления зеркал и их юстировки, были выбраны зеркала диаметром 25 мм. Угол зеркала 1 при этом составил 25° по отношению к оси входящего луча.

На рис. 4 представлена схема такого устройства.

Такая система, изготовленная в виде монолитной детали, не будет требовать юстировки отдельных плоскостей. Для макетирования работоспособности устройства зеркала 1 и 3 (рис. 4) были заменены трехгранной призмой, выполненной из алюминия, две грани которой являются отражающими плоскостями, заменяющими эти зеркала.

Итоговый макетный вариант аналога призмы Довэ, использованный в экспериментах, представлен на рис. 5.

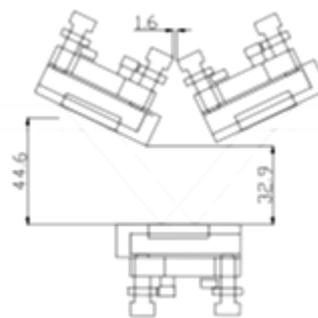


Рис. 4. Трехзеркальная схема с юстируемыми оправами

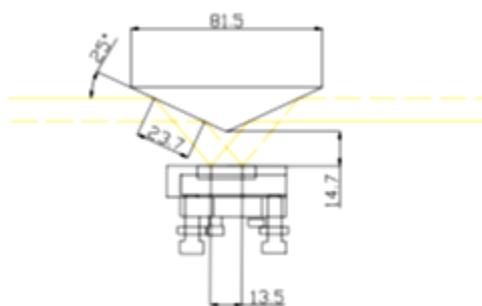


Рис. 5. Экспериментальный образец трехзеркальной схемы

Узел вращения плоскости поляризации, закрепленный в подшипниках качения, поворачивался с помощью шагового двигателя. Общий вид устройства показан на рис. 6.



Рис. 6. Общий вид экспериментального образца устройства поворота плоскости поляризации

Эксперименты проводились на двух лазерных установках. Первая включает в себя лазерный станок Trotec Speedy 100R на основе CO₂ лазера. Вторая установка включает в себя CO₂ лазер RECI мощностью 100 Вт. Обе установки на выходе дают плоско поляризованное излучение.

В качестве материалов для проверки воздействия поляризованного излучения выбраны фанера и пластик, хорошо поглощающие длинноволновое ИК излучение.

Фигурой сканирования лазерного луча по поверхности обрабатываемого материала, был выбран равнобедренный прямоугольный треугольник, один из катетов которого был ориентирован вдоль исходной плоскости поляризации излучения.

Результаты обработки поверхности фанеры показаны на рис. 7-8. Вертикальный катет совпадает с плоскостью поляризации выходного лазерного излучения в отсутствие поворота плоскости поляризации.



Рис. 7. Результаты резки на установке Trotec. Слева – без поворота плоскости поляризации, справа – при использовании динамического поворота плоскости поляризации

Аналогичные результаты были получены на пластике.

На установке с CO₂ лазером RECI был проведен ряд экспериментов для подтверждения эффективности устройства вращения плоскости поляризации (далее УВПП).

При выходной мощности CO₂ лазера 132 Вт без использования УВПП предельная скорость резки листа фанеры толщиной 3 мм при напряжении накачки 24 мА составила 15 мм/с по оси Y, 12 мм/с по оси X и 12 мм/с при резке под углом 45° между

осями X и Y. Таким образом максимальная возможная скорость резки без дефектов по всем направлениям одновременно составила 12 мм/с.

При введении с лазерную установку УВПП, выходная мощность снизилась до 114 Вт из-за потерь, обусловленных не очень качественным изготовлением устройства. При отключенном УВПП максимальная скорость резки листа фанеры без дефектов составила 13 мм/с по оси Y, 10 мм/с по оси X и 10 мм/с при резке под углом 45 градусов между осями X и Y, что соответствует потерям мощности около 14 процентов. При этом максимальная скорость одновременной резки по всем направлениям ограничена скоростью резки по оси X и под углом к оси Y и составляет 10 мм/с.



Рис. 8. Результаты резки на установке с CO₂ лазером RECI. Слева – без поворота плоскости поляризации, справа – при использовании динамического поворота плоскости поляризации

Эксперименты с активным УВПП (рис. 9) показали скорость резки без дефектов 13 мм/с по оси Y, 12 мм/с по оси X и 13 мм/с при резке под углом 45° между осями X и Y. При этом скорость резки по всем осям одновременно составит 12 мм/с. С активным УВПП прирост скорости резки по всем направлениям составляет 20%.

Результаты проведенных исследований подтверждают, что динамическое УВПП способно скорректировать потери эффективности при резке в различных направлениях поляризованным излучением

СО₂ лазера, а потери мощности выходного излучения при введении устройства поворота плоскости поляризации могут быть значительно снижены за счет качества изготовления составных частей устройства.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

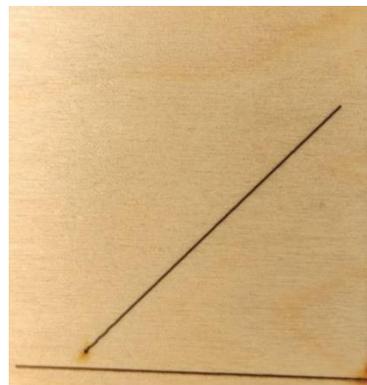
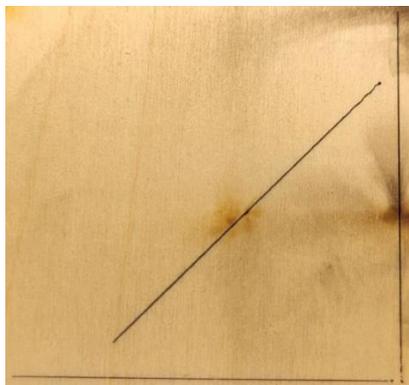


Рис. 9. Результаты резки с УВПД на установке с СО₂ лазером RECI. Слева – с отключенным УВПД, справа – при активном УВПД

ЛИТЕРАТУРА

REFERENCES

1. Петровский В. Н., Менушенков А. П. Физические основы лазерной резки металлов-Учебное пособие // М., НИЯУ МИФИ.2012, 23 с.
2. Чирков А.М., Очин О.Ф. Гибридные и комбинированные технологии лазерной обработки материалов/ [Электронный ресурс]: учебное пособие / А.М. Чирков, О.Ф. Очин; под ред. А.Б. Ушакова - М.: МИРЭА - Российский технологический университет, 2019.
3. Евтихийев Н.Н., Очин О.Ф., Бегунов И.А. Лазерные технологии // М.: Интеллект. 2020.-240 с.
4. Ковалев О.Б., Фомин В.М. Физические основы лазерной резки толстых листовых материалов // М.: ФИЗМАТЛИТ. 2013.-256 с.
5. Weber R., Michalowski A., Abdou-Ahmed M., Onuseit V., Rominger V., Kraus M., Graf T. Physics Procedia. 2011. 12. P. 21–30. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.004.
6. Weber R., Abdou-Ahmed M., Michalowski A., Berger P., Gärtner P., Onuseit V., Kraus M., Voß A., Graf T. “Radial and azimuthal polarization in laser cutting, welding and drilling”, Advanced Laser Technologies ALT2010, Egmond-aan-Zee, Netherlands – 2010.
7. Зайцев А. В., Ковалев О. Б., Оришнич А. М., Фомин В. М. Квантовая электроника. 2005. 35. P. 200–204.
8. Niziev V. G., Nesterov A. V. Journal of Physics D: Applied Physics. 1999. V. 32. N 13. P. 1455–1461. DOI: 10.1088/0022-3727/32/13/304.
9. Котляр В.В., Ковалев А. А., Стафеев С. С. Компьютерная оптика. 2008. V. 32. № 2. P. 155–167.
10. Преобразование поляризационных и частотно-временных параметров акустооптических элементов с линейной и цилиндрической симметриями пространственных распределений / И.Н. Абросимов, В.В. Кузнецов, О.Н. Осинцев, Н.И. Абросимов // Технологии и материалы для экстремальных условий: материалы XIV Всероссийской научной конференции, с. Агой, Россия, 16–20 сентября 2019 года. – с. Агой, Россия: Межведомственный центр аналитических исследований в области физики,
1. Petrovsky V.N., Menushenkov A.P. Physical foundations of laser cutting of metals - Tutorial// М., NRNU MEPHI. 2012, 23 p.
2. Chirkov A.M., Ochin O.F. Hybrid and combined technologies of laser processing of materials / [Electronic resource]: tutorial/ A.M. Chirkov, O.F. Ochin; edited by A. B. Ushakov - М.: MIREA - Russian Technological University, 2019.
3. Evtikhiev N.N., Ochin O.F., Begunov I. A. Laser technologies // М.: Intellect. 2020.-240 p.
4. Kovalev O.B., Fomin V.M. Physical foundations of laser cutting of thick sheet materials // М.: FIZMATLIT. 2013.-256 p.
5. Weber R., Michalowski A., Abdou-Ahmed M., Onuseit V., Rominger V., Kraus M., Graf T. Physics Procedia. 2011. 12. P. 21–30. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.03.004.
6. Weber R., Abdou-Ahmed M., Michalowski A., Berger P., Gärtner P., Onuseit V., Kraus M., Voß A., Graf T. “Radial and azimuthal polarization in laser cutting, welding and drilling”, Advanced Laser Technologies ALT2010, Egmond-aan-Zee, Netherlands – 2010.
7. Zaitsev A. V., Kovalev O. B., Orishich A. M., Fomin V. M. Quantum Electronics. 2005. 35. P. 200–204.
8. Niziev V. G., Nesterov A. V. Journal of Physics D: Applied Physics. 1999. V. 32. N 13. P. 1455–1461. DOI: 10.1088/0022-3727/32/13/304.
9. Kotlyar V.V., Kovalev A.A., Stafeyev S.S. Computer Optics. 2008. V. 32. N 2. P. 155–167.
10. Transformation of Polarization and Time-Frequency Parameters of Acousto-Optic Elements with Linear and Cylindrical Symmetries of Spatial Distributions / I.N. Abrosimov, V.V. Kuznetsov, O.N. Osintsev, N.I. Abrosimov // Technologies and Materials for Extreme Conditions: Proceedings of the XIV All-Russian Scientific Conference, p. Agoy, Russia, September 16–20, 2019. – p. Agoy, Russia: Interdepartmental Center for Analytical Research in Physics, Chemistry and Biology under the Presidium of the Russian Academy of Sciences, 2019. P. 260–265. DOI: 10.26103/MZ.2019.18.50.037.
11. Abrosimov I. N. Analysis of the parameters of electromagnetic radiation modulated by signals with periodic and cylin-

- химии и биологии при Президиуме Российской академии наук, 2019. С. 260-265. DOI: 10.26103/MZ.2019.18.50.037.
11. *Абросимов И. Н.* Анализ параметров электромагнитного излучения, модулированного сигналами с периодическим и цилиндрическим пространственными распределениями / И.Н. Абросимов, В.В. Кузнецов, О.Н. Осинцев // Международная научно-техническая конференция "Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике" ("МНТК ФТИ-2017"): Сборник научных трудов, Москва, 06–07 апреля 2017 года / Под редакцией Булатова М.Ф. – Москва: Московский технологический университет (МИРЭА), 2017. С. 643-647. EDN YPAAPF.
 12. Параметры оптических щелевых антенн с линейным и кольцевым распределением стационарных элементов / В.В. Кузнецов, И.Н. Абросимов, Ю.П. Бородин, П.И. Малинина // Инновационные технологии, в электронике и приборостроении: сборник докладов Российской научно-технической конференции с международным участием, Москва, 05–12 апреля 2021 года. – Москва: МИРЭА - Российский технологический университет, 2021. С. 226-231.
 13. *Дорохин М. В., Звонков Б. Н., Демина П. Б. [и др.]* Журнал технической физики. 2021. Т. 91. № 9. С. 1409–1414. DOI: 10.21883/JTF.2021.09.51221.39-21.
 14. *Антонов С. Н.* Журнал технической физики. 2004. Т. 74. № 10. С. 84–89.
 15. Бинарные субволновые решетки для управления поляризацией света / С. С. Стафеев, А. Г. Налимов, М. В. Котляр [и др.] // Информационные технологии и нанотехнологии: Сборник трудов ИТНТ-2018, Самара, 24–27 апреля 2018 года / Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева. – Самара: Предприятие "Новая техника", 2018. С. 468-474.
 16. *Прокопенко В.Т., Суворова Н.Ю., Трофимов В.А.* Управление параметрами световой волны. – СПб: НИУ ИТМО, 2013 97 с.
 17. *Грязнова М.И., Лугвищук Д.С., Караева А.Р., Мордкович В.З.* Углеродная паста на основе поливинилхлорида для трафаретной печати электродов. Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2024. Т. 67. Вып. 10. С. 99–104. DOI: 10.6060/ivkkt.20246710.3y.
 18. *Минаев Н.В., Демина Т.С., Минаева С.А. и др.* Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2020. Т. 84. № 11. С. 1530–1536. DOI: 10.31857/S0367676520110204.
 19. *Минаева Е. Д.* Исследования различий внутренней структуры трёхмерных структур, сформированных из порошков различных фракций методом поверхностно-селективного лазерного спекания / Е.Д. Минаева, Н.В. Минаев // X международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов X Международной конференции по фотонике и информационной оптике, Москва, 27–29 января 2021 года. – Москва: Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 2021. С. 149–150.
 20. *Гусаров С., Кудинова О., Рывкина Н., Маклакова И., Ладыгина Т., Новокишнова Л.* Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва). 2023. Т. LXVII. № 4. С. 3–7. DOI: 10.6060/rcj.2023674.1.
 - dical spatial distributions / I. N. Abrosimov, V. V. Kuznetsov, O. N. Osintsev // International Scientific and Technical Conference "Informatics and Technology. Innovative Technologies in Industry and Informatics" ("MNTK FTI-2017"): Collection of scientific papers, Moscow, April 6-7, 2017 / Edited by Bulatov M. F. - Moscow: Moscow Technological University (MIREA), 2017. P. 643–647.
 12. Parameters of optical slot antennas with linear and ring distribution of stationary elements / V.V. Kuznetsov, I. N. Abrosimov, Yu.P. Borodin, P.I. Malinina // Innovative technologies in electronics and instrument mking: collection of reports of the Russian scientific and technical conference with international participation, Moscow, April 5-12, 2021. - Moscow: MIREA - Russian Technological University . 2021. P. 226–231.
 13. *Dorokhin M.V., Zvonkov B.N., Demina P.B. [et al.]* Journal of Technical Physics. 2021. V. 91. N 9. P. 1409–1414. DOI: 10.21883/JTF.2021.09.51221.39-21.
 14. *Antonov S.N.* Journal of Technical Physics. 2004. V. 74. N 10. P. 84–89.
 15. Binary subwavelength gratings for controlling light polarization / S. S. Stafeev, A. G. Nalimov, M. V. Kotlyar [et al.] // Information technology and nanotechnology: Collection of works of ITNT-2018, Samara, April 24–27, 2018 / Samara National Research University named after academician S.P. Korolev. – Samara: Enterprise "New Technology", 2018. P. 468–474.
 16. *Prokopenko V.T., Suvorova N.Yu., Trofimov V.A.* Control of light wave parameters. - SPb: NRU ITMO, 2013 - 97 p.
 17. *Gryaznova M.I., Lugvishchuk D.S., Karaeva A.R., Mordkovich V.Z.* ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2024. V. 67. N 10. P. 99–104. DOI: 10.6060/ivkkt.20246710.3y.
 18. *Minaev N.V., Demina T.S., Minaeva S.A. et al.* Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physical Series. 2020. V. 84. N 11. P. 1530–1536. DOI 10.31857/S0367676520110204.
 19. *Minaeva E. D.* Studies of differences in the internal structure of three-dimensional structures formed from powders of different fractions by surface-selective laser sintering / E.D. Minaeva, N.V. Minaev // X International Conference on Photonics and Information Optics: Collection of scientific papers of the X International Conference on Photonics and Information Optics, Moscow, January 27-29, 2021. - Moscow: National Research Nuclear University MEPhI, 2021. P. 149–150.
 20. *Gusarov S.S., Kudinova O.I., Rывкина N.G., Maklakova I.A., Ladygina T.A., Novokshonova L.A.* Ros. Khim. Zh. 2023. V. 67. N 4. P. 3–7. DOI: 10.6060/RCJ.2023674.1.

Поступила в редакцию (Received) 08.02.2024
 Принята к опубликованию (Accepted) 18.04.2024