УДК 621.375 DOI 10.36910/6775.24153966.2021.71.10

В.Я. Павленко
Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України, м. Київ[1]

БУДОВА ТА КОНФІГУРАЦІЯ ОПТИЧНОЇ ЛАЗЕРНОЇ СИСТЕМИ

У статті розкрито поняття лазера, історію виникнення та основні концепції квантових генераторів. Вилучені головні компоненти необхідні для належного функціонування лазерів та у вигляді таблиці запропоновано опис їх функцій та приклади застосування. Здійснено розкриття будови оптичної лазерної систем, яка у своєму складі має джерело енергії, робоче тіло пристрою та систему дзеркал («оптичний резонатор»). Підкреслено, що випромінювання лазера може бути неперервним, з постійною напругою, або імпульсним, що досягає гранично високих показників напруги. Фундаментальною основою лазера виступають: система накачування, лазерний активний елемент та оптичний резонатор. Наголошено, що оптичний резонатор це система відображаючих, заломлюючих, фокусуючих і інших оптичних елементів, в просторі між якими можуть порушуватися хвилі оптичного діапазону. Запропоновано схематично структуру оптичної лазерної системи та описано процес взаємодії усіх складових. Обґрунтовується, що лазер перетворює енергію низької якості в когерентне випромінювання, тобто у гранично високоякісну форму енергії, або, використовуючи терміни термодинаміки, можна сказати наступне: енергія накачування, що має низьку температуру і високу ентропію, перетворюється в лазерне випромінювання з винятково високою еквівалентною температурою і гранично низькою ентропією. Наголошено, що виконання умов посилення лазерного випромінювання при наявності позитивного зворотного зв'язку через оптичний резонатор дає необхідні енергетичні передумови для само генерації випромінювання. Наведено математичний аспект формування синтезу оптично-лазерної системи на основі лазерного активного елементу. Зазначено, що забезпечення малих спотворень розподілу поля вихідного лазерного пучка, як основної властивості оптичної лазерної системи, характеризує якість реальної оптичної лазерної системи, з якою вона формує лазерний пучок у порівнянні з ідеальним перетворенням вихідного лазерного пучка.

Ключові слова: *оптична лазерна система, будова, конфігурація, резонатор, середовище, випромінювання.*

СТРОЕНИЕ И КОНФИГУРАЦИИ ОПТИЧЕСКИЙ ЛАЗЕРНЫЙ СИСТЕМЫ

В статье раскрыто понятие лазера, историю возникновения и основные концепции квантовых генераторов. Полученные главные компоненты необходимы для надлежащего функционирования лазеров и в виде таблицы предложено описание их функций и примеры применения. Осуществлено раскрытие строения оптической лазерной систем, которая в своем составе имеет источник энергии, рабочее тело устройства и систему зеркал («оптический резонатор»). Подчеркнуто, что излучение лазера может быть непрерывным, с постоянным напряжением, или импульсным, достигающим предельно высоких показателей напряжения. Фундаментальной основой лазера выступают: система накачки, лазерный активный элемент и оптический резонатор. Отмечено, что оптический резонатор это система отражающих, преломляющих, фокусирующих и других оптических элементов, в пространстве между которыми могут нарушаться волны оптического диапазона. Предложено схематично структуру оптической лазерной системы и описан процесс взаимодействия всех составляющих. Обосновывается, что лазер превращает энергию низкого качества в когерентное излучение, то есть в предельно высококачественную форму энергии, или, используя термины термодинамики, можно сказать следующее: энергия накачки, имеющий низкую температуру и высокую энтропию, превращается в лазерное излучение с исключительно высокой эквивалентной температурой и предельно низкой энтропией. Отмечено, что выполнение условий усиления лазерного излучения при наличии положительной обратной связи через оптический резонатор дает необходимые энергетические предпосылки для же генерации излучения. Приведено математическое аспект формирования синтеза оптически лазерной системы на основе лазерного активного элемента. Указано, что обеспечение малых искажений распределения поля исходного лазерного пучка, как основного свойства оптической лазерной системы, характеризует качество реальной оптической лазерной системы, с которой она формирует лазерный пучок по сравнению с идеальным преобразованием выходного лазерного пучка.

Ключевые слова*: оптическая лазерная система, строение, конфигурация, резонатор, среда, излучения.*

THE STRUCTURE AND CONFIGURATION OF THE OPTICAL LASER SYSTEM

The article reveals the concept of laser, the history of origin and basic concepts of quantum generators. The extracted main components are necessary for the proper functioning of lasers and a description of their functions and examples of application is offered in the form of a table. The structure of the optical laser system, which includes an energy source, a working body of the device and a system of mirrors ("optical resonator"), has been revealed. It is emphasized that the laser radiation can be continuous, with constant voltage, or pulsed, reaching extremely high voltage. The fundamental basis of the laser are: pumping system, laser active element and optical resonator. It is emphasized that an optical resonator is a system of reflecting, refracting, focusing and other optical elements, in the space between which waves of the optical range can be excited. The structure of the optical laser system is proposed schematically and the process of interaction of all components is described. It is substantiated that the laser converts low-quality energy into coherent radiation, ie into extremely high-quality form of energy, or, using the terms of thermodynamics, we can say the following: pump energy with low temperature and

© В.Я. Павленко

high entropy is converted into laser radiation with exceptionally high temperature and extremely low entropy. It is emphasized that the fulfillment of the conditions of amplification of laser radiation in the presence of positive feedback through the optical resonator provides the necessary energy prerequisites for the self-generation of radiation. The mathematical aspect of formation of synthesis of optical-laser system on the basis of laser active element is given. It is noted that the provision of small distortions of the field distribution of the output laser beam, as the main property of the optical laser system, characterizes the quality of the real optical laser system with which it forms a laser beam in comparison with the ideal conversion of the output laser beam.

Keywords: *optical laser system, structure, configuration, resonator, medium, radiation*.

Вступ та постановка проблеми дослідження. З появою нових технологій у світі виникло питання про модернізацію виробництва на підприємствах з метою зменшення ймовірності виготовлення неякісної продукції. Останнім часом для більш точних розрахунків та контролю виробленої продукції використовують оптичні лазерні системи.

Оптична лазерна система у своїй будові має: джерело енергії, робоче тіло пристрою та систему дзеркал («оптичний резонатор»). Актуальність застосування опричних лазерних систем ґрунтується на таких якостях, як гостра спрямованість світлового випромінювання та узгодженість внутрішніх коливань, монохроматичність та висока щільність енергії.

Розвиток сучасних технологій ставить перед підприємствами вимогу щодо модернізації процесу виробництва та запровадження новітніх методів контролю якості виробленого продукту, адже з появою інновацій також з'являються нові вимоги до тих чи інших сфер промисловості. На сьогодні, враховуючи стрімкий розвиток сучасної наукової думки, сформовано фундаментально нові та ефективні оптичні лазерні системи, покликані вивести на новий рівень застосування їх у різноманітних технологічних процесах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Початок розвитку наукових надбань у сфері лазерного випромінювання припадає на 1916 рік, саме тоді Альберт Ейнштейн [1] винайшов концепцію вимушеного випромінювання, яка є основою оптичного квантового генератора. З кінця XX століття у світі спостерігається чимала кількість наукових досягнень у сфері досліджень оптичних лазерних систем як українських так і зарубіжних спеціалістів, що складає фундаментальну основу за сферою.

Конфігурацію сучасних оптичних систем та будову лазерів з відокремленням елементів структури дослідив О. М. Шеховцов [2]. Дослідник розробив технології вирощування монокристалів подвійних ортоборатів і ортованадатів, вольфраматів, молібдатів для виготовлення елементів активних середовищ лазерних приладів, які працюють на довжинах хвиль 1,06 мкм і 1,53 мкм.

В. Г. Петрук, І. В. Васильківський та С. М. Кватернюк [3] розкрили принципи дистанційного спектрополяриметричного контролю полідисперсних аерозольних середовищ в екологічному моніторингу. Авторами здійснено аналіз сучасного стану систем контролю і локації полідисперсних середовищ. Досліджено математичні моделі розповсюдження лазерного випромінювання в полідисперсних аерозольних середовищах. Розроблено автоматизовану контрольно-вимірювальну систему для локації і контролю полідисперсних аерозольних середовищ та її метрологічне забезпечення. Розроблено мультиспектральні методики локації і контролю забруднення.

Елементи та пристрої квантової електроніки структурували Ю.І. Колесник, А.В. Кіпенський [4]. Науковці розглянули застосування різних типів лазерів у науці, техніці, спеціальних технологіях, а також в медицині.

Є. М. Травніков, Г. Г. Власюк, В. В. Пілінський, В. М. Співак, В. Б. Швайченко [5] здійснили дослідження оптичних систем реєстрації інформації, їх будову та компонентний склад. Авторами описано оптико-залерні системи реєстрації: швидкість передавання інформації, конструкції рушійних механізмів оптичних дисків. Запропоновано детальний опис магнітооптичної системи реєстрації з відокремленням технології запису даних та магнітооптичні диски. Розкрито принципи оптико-фотоелектронної та фото-статичної реєстрації.

Із зарубіжних авторів варто відмітити роботи таких вчених як: Stephen Norman, Mikhail Zervasa, Andrew Appleyarda, Michael Durkina, Ray Horleya, Malcolm Varnhama, Johan Nilssonb, Yoonchan Jeongb [6], Yue Wang, Guangyao Xu, Shilin Xiong, та Guanhao Wu [7], F. Peng, J. Wu, Z. Fang, S. Yuan, R. Yan, та Q. Bai Wu [8], X. Chen та H. Rong [9], S. Shin, K. Kim, K. Lee, S. Lee, та Y. Park [10], S. Chen, W. Lu, W. Chen, та G. Tie [11] та інші.

© В.Я. Павленко

Однак, не зважаючи на масштабність наукових досягнень у сфері оптичного лазерного випромінювання, питання будови та конфігурації сучасних оптичних лазерних систем залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

Мета та завдання статті. Розкрити поняття лазерів (квантових генераторів), будови та конфігурації оптичних лазерних систем.

До основних завдань варто віднести: розкрити будову оптичної лазерної системи; здійснити опис компонентів оптичної лазерної системи та їх взаємозв'язок; запропонувати математичний аспект формування синтезу оптично-лазерної системи на основі лазерного активного елементу.

Викладення основного матеріалу дослідження. Фізичною основою будь-якого лазера є квантово-механічне явище вимушеного (індуційованого) випромінювання. Випромінювання лазера може бути неперервним, з постійною напругою, або імпульсним, що досягає гранично високих показників напруги.

Будова лазера показана на рис. 1, його фундаментальною основою виступають: система накачування, лазерний активний елемент та оптичний резонатор. Функції та приклади кожного з компонентів наведено у таблиці 1.

Зазвичай лазери класифікують за їх активними елементами або за типом випромінюваних частинок, які викликають стимульоване випромінювання. Останні включають в себе атоми та молекули в розрідженому газі, органічні молекули, розчинені при відносно низькій концентрації у різких розчинах, напівпровідникові матеріали та діелектрики (до них відносять кристалічні тверді тіла або скло) з впровадженням високої концентрації іонів.

Таблиця 1

Функції та приклади основних компонентів лазеру [2, 4, 7, 10]

Компонент	**Функція**	**Приклад**
Посилююче середовище	Служить для інверсії населеності шляхом переходу атомів робочої середи у збуджений стан, визначає властивості квантового випромінювання.	Атомарні або молекулярні гази (Ne, Ar, CO_2), іони в кристалах або склі (Nd, Er, Yb, Cr), напівпровідники (GaAs, InGaAsP).
Джерело накачування	Виступає джерелом енергії для інверсійної населеності.	Електричний розряд або дугова лампа, інший лазер, електричний струм.
Резонатор	Забезпечує механізм зворотного зв'язку для підсилення.	Об'ємні дзеркала у твердотілих лазерах, зрізані чи покриті грані у лазерному діоді, брегівські відбивачі у волокнистому лазері.

Такі категорії генераторів називаються газовими, рідинними, напівпровідниковими та твердотілими.

Оптична лазерна система (рис. 2) у своєму складі має випромінювач лазеру, який складається з системи накачування, лазерного активного елементу, оптичного резонатору. У загальному випадку оптичний резонатор – це система відображаючих, заломлюючих, фокусуючих і інших оптичних елементів, в просторі між якими можуть порушуватися хвилі оптичного діапазону.

Виконання умов посилення лазерного випромінювання при наявності позитивного зворотного зв'язку через оптичний резонатор дає необхідні енергетичні передумови для само генерації випромінювання.

Процес збудження лазерної речовини, що приводить до виникнення лазерного активного середовища, називається накачуванням лазера.

© В.Я. Павленко

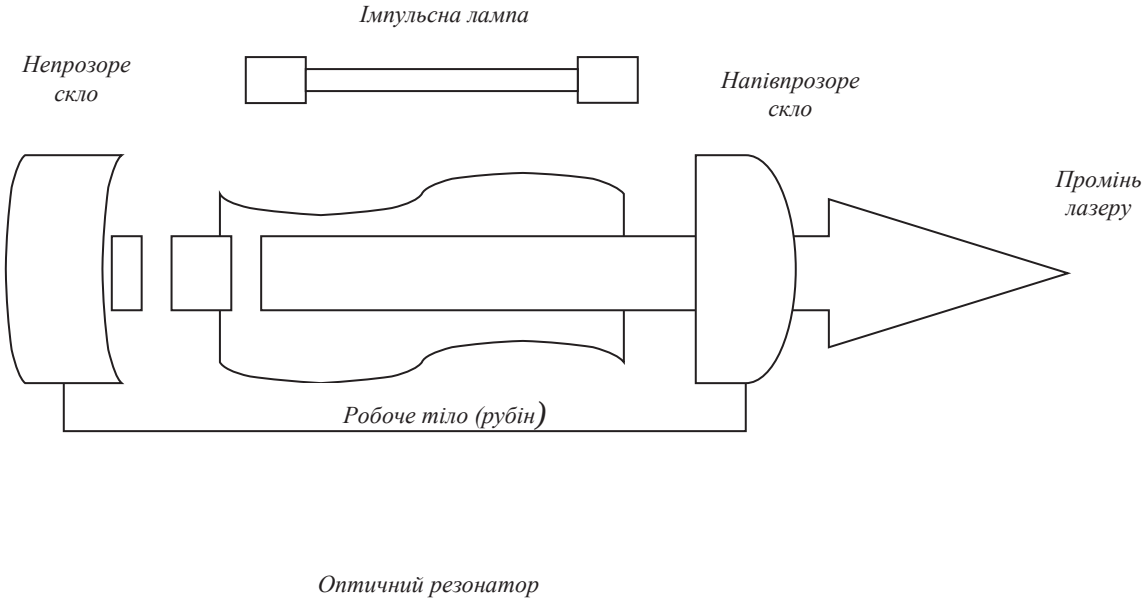

Рис. 1. **Будова оптичного лазера**
**власна розробка автора на основі [4,11]*

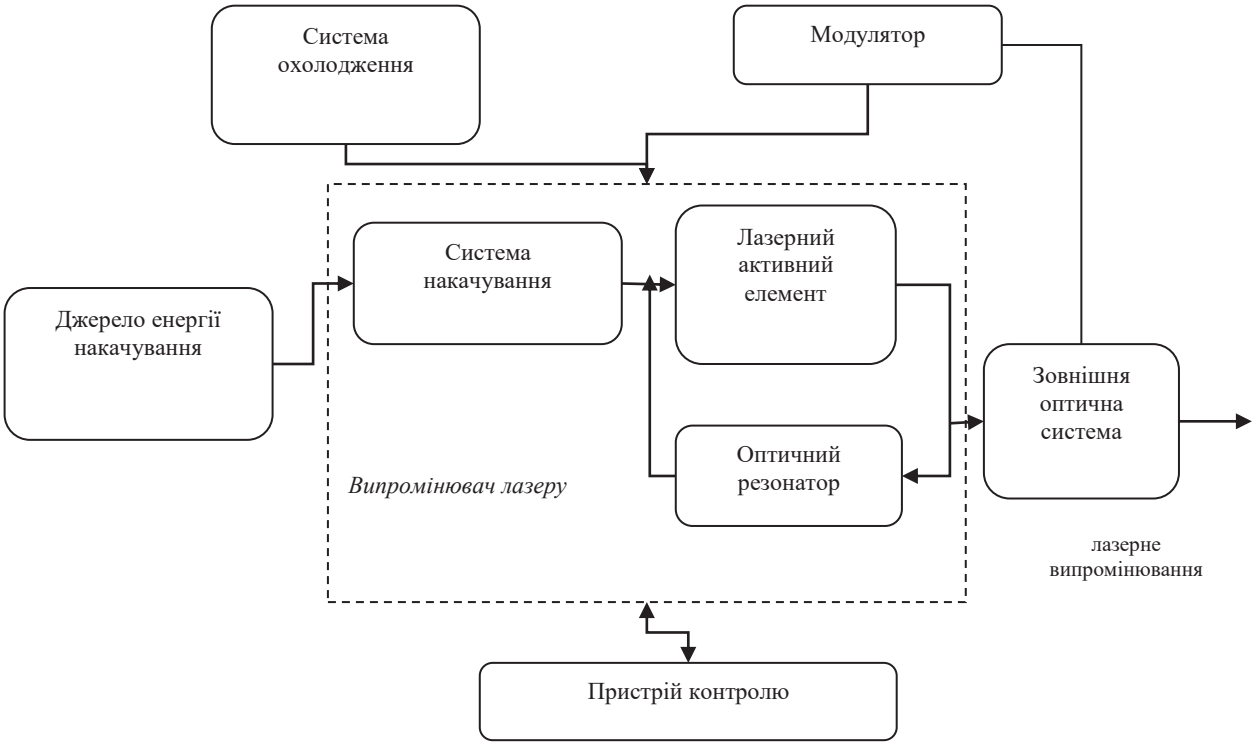

Рис. 2. **Структура оптичної лазерної системи**
**власна розробка автора на основі [5,12]*

Значення енергії накачування значно більше енергії лазерного випромінювання, тобто лазер – неекономічний генератор. Але за своїми якісними показниками лазерне випромінювання унікально. Перша найважливіша властивість лазерного випромінювання полягає в його спрямованості, яка пов'язана з просторовою когерентністю: лазерне випромінювання

поширюється у вигляді майже плоскої хвилі, розбіжність якої може наближатися до мінімально граничної дифракційної розбіжності.

Лазерне випромінювання високо монохроматично [13], так як лазер генерує когерентні оптичні коливання на частоті максимального посилення і мінімальних втрат випромінювання в резонаторі. Таким чином, лазер перетворює енергію низької якості в когерентне випромінювання, тобто у гранично високоякісну форму енергії, або, використовуючи терміни термодинаміки, можна сказати наступне: енергія накачування, що має низьку температуру і високу ентропію, перетворюється в лазерне випромінювання з винятково високою еквівалентною температурою і гранично низькою ентропією.

Лазер є генератором електромагнітного випромінювання оптичного діапазону, тому повинен містити, по-перше, елементи, що забезпечують накачування лазера, по-друге, лазерну речовину, в якій в процесі накачування може бути створене лазерне активне середовище.

Математичний аспект формування синтезу оптично-лазерної системи на основі лазерного активного елементу реалізовано на наступних співвідношеннях:

$$z'_{k2} = z_{k1}\alpha;$$

$$z'_{p2} = \left(z_{p1} + \Delta\frac{z_{p1}^2 + z_{k1}^2}{f_1'^2}\right)\alpha;$$

$$L = 2(f_1' - f_2') - z_{p1}(1-\alpha) + \Delta\left(1 + \alpha\frac{z_{p1}^2 + z_{k1}^2}{f_1'^2}\right)$$

$$Nd_1 = \frac{f_1'}{D_{св1}} = \frac{f_1'}{2K_d h_{p1}\sqrt{1 + \left[\frac{f_1' - z_{p1}}{z_{k1}}\right]^2}};$$

$$Nd_2 = \frac{f_2'}{D_{св2}} = \frac{f_2'}{2K_d h'_{p2}\sqrt{1 + \left[\frac{f_2' - z'_{p2}}{z'_{k2}}\right]^2}};$$

де z_{k1} та z'_{k2} – параметри конфокальності пучка на вході та виході;

z_{p1} – положення перетяжки вхідного пучка відносно переднього фокусу F_1 першого компонента оптичної системи (відповідає положенню торця волокна);

z'_{p2} – положення перетяжки вихідного пучка відносно заднього фокусу F'_2 другого компонента оптичної системи;

Δ – відстань між фокусами F_1 та F_2 оптичної системи;

f_1' та f_2' – задні фокусні відстані компонентів оптичної системи;

L – довжина системи, тобто відстань від перетяжки вхідного пучка до перетяжки вихідного пучка;

$Nd_{1,2}$ – діафрагменні числа компонентів (відношення фокусної відстані до його світлового діаметру);

K_d – коефіцієнт, що визначає перевищення світлового діаметра компонента над діаметром пучка, що перетворюється на ньому (діаметр пучка на якому зосереджено 86,5 % потоку випромінювання);

α – еквівалентне повздовжнє збільшення двокомпонентної лазерно-оптичної системи,

$$\alpha = \left(\frac{f_2'}{f_1'}\right)^2 \frac{1}{P(z_{p1}, \Delta)}$$

де $P(z_{p1}, \Delta)$ – поліном, що характеризує залежність повздовжнього збільшення двокомпонентної лазерно-оптичної системи від її конструктивних параметрів та параметрів вхідного пучка,

$$P(z_{p1}, \Delta) = \left(1 + \frac{z_{p1}\Delta}{f_2'}\right)^2 + \left(\frac{z_{k1}\Delta}{f_2'}\right)^2.$$

© В.Я. Павленко

В умовах сьогодення, вельми важливим завданням розробки оптичної лазерної системи є забезпечення малих спотворень розподілу поля вихідного лазерного пучка. Ця властивість характеризує якість реальної оптичної лазерної системи, з якою вона формує лазерний пучок у порівнянні з ідеальним перетворенням вихідного лазерного пучка.

Висновки та перспективи подальших досліджень. На сьогоднішній день питання модернізації виробництва та збільшення його точності посягає чи не перше місце серед глобальних питань. З кожним роком змінюються міжнародні вимоги до стандартів виробництва та контролю якості виробленої продукції чи наданої послуги.

З появою лазерних технологій, з'явилися нові методи досліджень, нові способи виробництва та інноваційні способи вирішення складних питань, які потребують більшої точності від спеціаліста.

Доступність та економічна ефективність надійного лазерного обладнання будуть і у подальшому визначати широке практичне використання лазерної техніки в промисловості. Вірогідно, що найближчим часом з'являться ще більш надійні та сильніші установки, які дозволять прискорити темпи запровадження використання лазерів у різноманітних сферах науки та техніки.

Список використаних джерел:

1. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. – М.: Наука, 1966. – Т.3. – С. 393-406. – 632с.
2. Технології отримання монокристалів боратів, ванадатів, вольфраматів та молібдатів для активних елементів лазерів з довжинами хвиль 1,06 і 1,5 мкм [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук : 05.27.06 / Шеховцов Олексій Миколайович ; Нац. ун-т "Львів. політехніка". – Львів, 2019. 346 с.: рис., табл.
3. Петрук, В. Г. Дистанційний спектрополяриметричний контроль полідисперсних аерозольних середовищ в екологічному моніторингу: монографія [Електронний ресурс] / В. Г. Петрук, І. В. Васильківський, С. М. Кватернюк. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 187 с.
4. Колесник Ю.І. К60 Елементи та пристрої квантової електроніки : навч. посіб. / Ю.І. Колесник, А.В. Кіпенський. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – 318 с.
5. Конструювання та технологія виробництва техніки реєстрації інформації: Навчальний посібник / Є. М. Травніков, Г. Г. Власюк, В. В. Пілінський, В. М. Співак, В. Б. Швайченко. За загальною редакцією В. Б. Швайченка – К.: «КАФЕДРА», 2013. – 216 с.
6. Latest development of high power fiber lasers in SPI / Stephen Norman, Mikhail Zervasa, Andrew Appleyarda, Michael Durkina, Ray Horleya, Malcolm Varnhama, Johan Nilssonb // Yoonchan Jeongb SPI, 170 Knowles Drive, Los Gatos CA95032 USA; 3 Wellington Park, Hedge End, SO30 2QU, UK. b Optoelectronics Research Centre (ORC), University of Southampton. https://www.spilasers.com/wp-content/uploads/2020/01/PW04-5335-33-SN.pdf
7. Wang, Y., Xu, G., Xiong, S., & Wu, G. Large-field step-structure surface measurement using a femtosecond laser // Optics Express. - 2020. – No. *28*(15). – P. 22946-22961.
8. Peng F., Wu J., Fang Z., Yuan S., Yan R., Bai Q. Modeling and controlling of surface micro-topography feature in micro-ball-end milling // *Int. J. Adv. Des. Manuf. Technol.* – 2013.– No. 67(9-12). – P. 2657–2670.
9. Chen X., Rong H., In situ measurement of MEMS topography based on phase-shifting interferometry // Opt. Eng. - 2015. - No. 54(2). – P. 024103.
10. Shin S., Kim K., Lee K., Lee S., Park Y., Effects of spatiotemporal coherence on interferometric microscopy //Optics express. – 2017. – No. 25(7). – P. 8085-8097.
11. Chen S., Lu W., Chen W., Tie G. Efficient subaperture stitching method for measurement of large area microstructured topography //Optics and Lasers in Engineering. – 2020. – No. 127. – P. 105974.
12. Yan Z., Mou C., Wang Y., Li J., Zhang Z., Liu X., ... & Zhang L. 45°-tilted fiber gratings and their application in ultrafast fiber lasers //Fiber Laser. – 2016. – P. 245.
13. Bae E., Kim Y., Park S., & Kim S. W. Large-aperture ground glass surface profile measurement using coherence scanning interferometry // Opt. Express. – 2017 – No.25(2). – P. 1106–1113.