

АНОТАЦІЯ

Мистецький В. А. Оптичне керування параметрами лазерних пучків методом двопрменевої взаємодії в нематичних рідких кристалах та їх композитах з золотими наночастинками. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія», 10 “Природничі науки” – Інститут фізики Національної Академії Наук України. – Київ, 2026.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню **фоторефрактивних та плазмонних механізмів зміни показника заломлення в комірках нематичних рідких кристалів (РК) та їх композитів з наночастинками (НЧ) золота** під дією лазерних пучків і прикладеної електричної напруги.

Використовується метод динамічної голографії – двопрменева взаємодія (ДПВ) лазерних пучків в реверсивних фоточутливих матеріалах. Тому основним предметом дослідження являються властивості фазових динамічних ґраток, що записуються в нематичних РК без домішок і в РК-нанокомпозитах з НЧ золота; виявлення фізичних параметрів РК та їх композитів, а також характеристик взаємодіючих лазерних пучків, які впливають на величину глибини модуляції динамічної ґратки та її часові константи запису і стирання.

Дисертаційна робота представляє комплекс теоретичних досліджень по ДПВ в різних РК системах. Це пов'язано з тим, що накопичено досить багато експериментальних результатів запису динамічних ґраток в РК-нанокомпозитах, але єдиної теорії, яка окреслює перспективи отримання передових характеристик при такому записі та нових напрямків його використання досі відсутні.

При виконанні дисертаційної роботи розроблялися теоретичні моделі, що описували процеси утворення динамічної фазової ґратки, а також самодифракції і дифракції лазерних пучків на ній; проводились чисельні експерименти і розрахунки; результати теоретичних розрахунків співставлялися з експериментальними даними.

Були досліджені наступні системи і отримані нові наукові результати:

У **другому розділі** розраховано кінетику переорієнтації директора в нематичній РК комірці та відповідну зміну незвичайного показника заломлення світла, що пройшло. Моделювання проведено з метою визначення закономірностей часів переорієнтації директора залежно від пружних і в'язких властивостей РК середовища, величини напруженості електричного поля та ефектів просторового обмеження. Була використана модель Еріксена-Леслі для опису переорієнтації директора РК під дією постійних електричних полів. Моделювання виконано для просторово однорідного електричного поля, а також для просторово модульованого синусоїдального поля. Отримані результати показують формування швидких динамічних ґраток показника заломлення під дією постійного просторово модульованого синусоїдального електричного поля. Для РК з великим коефіцієнтом в'язкості, динамічна ґратка стає квазістаціонарною.

У **третьому розділі** аналізуються експериментальні дослідження номінально чистих нематичних рідких кристалів (НРК), в яких отримано запис динамічних голографічних ґраток не тільки в комірках з гомеотропною орієнтацією, так і з

планарною. Пояснення можна знайти виходячи із фоторефрактивного механізму запису ґратки, особливістю якого являється формування нерівноважного заряду на поверхні підкладинки комірки під дією просторово неоднорідного світлового поля. Поява внутрішнього тангенціального електричного поля (вздовж підкладинок комірки), разом зі зовнішнім електричним полем, що прикладається нормально до підкладинок комірки, призводить до додаткових можливостей у керуванні напрямку вектора результуючого електричного поля. В даному розділі розроблена і аналізується модель зміни інтенсивностей лазерних променів при їх самодифракції і дифракції на динамічній ґратці, створеній в номінально чистих НРК. Динамічна фазова ґратка формується завдяки механізму колективної періорієнтації РК молекул, в результаті чого змінюються характеристики подвійного заломлення в НРК комірниці. Відповідно до цієї моделі отримано новий результат, що максимальна дифракційна ефективність досягається вже для невеликих кутів періорієнтації директора (до 0.5 радіан ($\sim 28^\circ$) в тонких комірниках) відносно початкового стану. Результати проведених розрахунків вихідних інтенсивностей лазерних променів в перших порядках самодифракції і дифракції добре узгоджуються з експериментальними вимірюваннями. Зокрема вони пояснюють залежність дифракційної ефективності від величини зовнішньої прикладеної напруги, що має добре виражений максимум.

У **четвертому розділі** проведений теоретичний аналіз комплексної діелектричної проникності нематичних рідкокристалічних наноконкомпозитів з наночастинками золота НЧ(Au), які вбудовані в об'ємі комірки. Механізм зміни показника заломлення пов'язаний зі збудженням локалізованого поверхневого плазмонного резонансу (ЛППР) в НЧ(Au) у видимій області спектру, що супроводжується збільшенням фактора локального поля. Цей механізм призводить до значного зменшення часу відгуку запису та стирання динамічної ґратки порівняно з механізмом колективної переорієнтації молекул РК. Отримані нами дані показують, що динамічна ґратка показника заломлення може бути зареєстрована при дуже малій об'ємній частці НЧ(Au) менше 0,01 через сильне поглинання при ЛППР при лазерному збудженні на довжині хвиль у видимому діапазоні. При цьому, якщо записувати ґратки He-Ne лазером, довжина хвилі якого далека від максимуму ЛППР, ефективність фазової ґратки може бути значною – 35-45% в режимі самодифракції. Отримані теоретичні результати узгоджуються з експериментальними даними, при яких спостерігається запис лише теплових ґраток у РК-наноконкомпозитах з НЧ(Au), оскільки в них об'ємна частка НЧ(Au) значна і не контрольована.

У **п'ятому розділі** теоретично аналізуються експериментальні результати по дослідженню самодифракції і дифракції в гібридних РК-комірках (ГРК), які містять плівку наноострівців Au на одній із підкладинок комірки. ГРК характеризуються більш швидким часом відгуку. Запис динамічних ґраток відбувається за рахунок поверхнево-індукованого фоторефрактивного механізму. Методика двопроменевої взаємодії застосована в режимі запису під дією періодичних прямокутних імпульсів або лазерного пучка, або прикладеної електричної напруги. Експериментально було отримано перетворення форми лазерного імпульсу при використанні ГРК. Нами було розроблено теоретичну модель двопроменевої взаємодії і проведені чисельні експерименти. Співставлення експериментальних даних по аналізу зміни форми

лазерних імпульсів і результатів чисельного моделювання по розробленій нами динамічній моделі дозволяє оцінити часові константи для запису і релаксації динамічної ґратки в конкретному РК-матеріалі. При цьому мінімальний час релаксації ґратки визначає швидкодію переключення оптичного сигналу.

Результати, отримані в дисертаційній роботі, сприятимуть: 1) створенню нових ефективних матеріалів на базі РК для фотоніки, які включають нано- (мікро-) структури та мають значно покращені експлуатаційні характеристики; 2) створенню теоретичної моделі поверхнево-індукованого фоторефрактивного ефекту, що виникає при одночасній дії світлових пучків та електричних полів на інтерфейсі неорганічна-органічна речовин; 3) розробці ефективних технологій виготовлення сучасних багатофункціональних гібридних РК-матеріалів з великою швидкодією для оптоелектроніки, багатофункціональність та безкристалічна інтеграція в яких досягається за рахунок використання просторово неоднорідних світлових пучків або інтерференційних світлових структур; 4) вивченню нових ефектів для керування оптичними пучками в РК-комірках з метою розробки нових застосувань для сенсорів та пристроїв керування оптичними пучками і зображеннями.

Ключові слова: Рідкі кристали, органічні молекули, нематична фаза, лазерне випромінювання, дифракція, дифракційні ґратки, голографічні ґратки, дифракція високих порядків, Брегівське відбиття, спектроскопія, наночастинки, плазмоніка, поверхневий плазмонний резонанс, ефективність, дво-хвильова інтерференція.

SUMMARY

Mystetskyi V.A. Optical control of laser beam parameters by two-wave mixing technique in nematic liquid crystals and their composites with gold nanoparticles. – Quilified scientific work on the rights of manuscript.

Dissertation for the scientific degree of Doctor of Philosophy in the field of 104 “Physics and Astronomy”, 10 “Natural Sciences” – Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine. – Kyiv, 2026.

The dissertation work is devoted to **the study of photorefractive and plasmonic mechanisms of refractive index change in the cells of nematic liquid crystals (LC) and their composites with gold nanoparticles (NPs)** under the action of laser beams and applied electric voltage.

The method of dynamic holography is used, namely two-wave mixing (TWM) of laser beams in reversible photosensitive materials. Therefore, the main subject of the study is the properties of phase dynamic grating recorded in pure nematic LCs and in LC-nanocomposites with gold NPs; identification of physical parameters of LCs and their composites, as well as characteristics of interacting laser beams that affect the value of the modulation depth of the dynamic grating and its recording and erasing time constants.

This dissertation presents a complex of theoretical studies on the TWM in various LC systems. This is due to the fact that quite a lot experimental results have been accumulated on the recording of dynamic grating in LC nanocomposites, but there is still no unified theory that outlines the prospects for obtaining advanced characteristics with such recording, as well as new areas of its applications.

In the course of the dissertation, theoretical models are developed to describe the processes of formation of a dynamic phase grating, and also self-diffraction and diffraction of laser beams on it; numerical experiments and calculations are performed; the results of theoretical calculations are compared with experimental data.

The following systems are investigated and new scientific results are obtained:

In the **second section**, the kinetics of director reorientation in a nematic LC cell and the corresponding change in the extraordinary refractive index of the transmitted light are calculated. The modeling is conducted to identify regularities in the reorientation time of LC director depending on the elastic and viscous properties of the LC medium, the electric field strength, and the spatial confinement effects. The Erickson-Leslie model is used to describe the reorientation of the LC director under the action of DC electric fields. The simulations is performed for a spatially homogeneous electric field as well as for a spatially modulated sinusoidal field. The obtained results show the formation of fast dynamic grating of the refractive index under the action of a DC spatially modulated sinusoidal electric field. For LC with a high viscosity value, the dynamic grating becomes quasi-stationary.

In the **third section**, an analysis of experimental studies of nominally pure nematic LCs (NLCs) is performed, in which one obtained the recording of dynamic holographic gratings not only in cells with homeotropic orientation but also with planar orientation. The explanation can be found on the basis of the photorefractive mechanism of grating recording, which is characterized by the formation of a nonequilibrium charge on the surface of the cell substrate under the influence of a spatially inhomogeneous light field. The emergence of an internal tangential electric field (along the cell substrates), together with an external electric field applied normally to the cell substrates, opens up additional possibilities for controlling the direction of the resulting electric field vector. In this section, we develop and analyze a model of laser beam intensity changes due to self-diffraction and diffraction on a dynamic grating created in nominally pure NLCs. The dynamic phase grating is formed due to the mechanism of collective reorientation of LC molecules, which leads to a change in the characteristics of birefringence in the NLC cell. According to this model, a new result is obtained that the maximum diffraction efficiency is achieved for small angles for reorientation of LC director (up to 0.5 radians ($\sim 28^\circ$) in thin cells) relative to the initial state. The results of the calculations for the output intensities of laser beams in the first orders of self-diffraction and diffraction are in good agreement with experimental measurements. In particular, they explain the dependence of the diffraction efficiency on the value of the external applied voltage, which has a well-defined maximum.

In the **fourth section** it is presented a theoretical analysis of the complex dielectric permittivity of nematic LC-nanocomposites with Au NPs embedded in the cell volume. The mechanism of refractive index change is associated with the excitation of localized surface plasmon resonance (LSPR) in Au NPs in the visible spectral region, which is accompanied by an increase in the local field factor. This mechanism leads to a significant decrease of time constants for dynamic grating recording and erasure compared to the mechanism of collective reorientation of the LC molecules. Our results show that the dynamic grating of the refractive index can be recorded at a very small volume fraction of

NPs(Au) less than 0.01 due to the strong absorption at the LSPR at visible wavelengths. At the same time, if the grating is recorded with a He-Ne laser, whose wavelength is far from the maximum of the LSPR, the efficiency of the phase grating can be significant: 35-45% in the self-diffraction regime. The theoretical results obtained are in good agreement with the experimental data, according to which only thermal gratings are recorded in the LC-nanocomposites with NPs(Au), since the volume fraction of NPs(Au) in them is significant and uncontrollable.

In the **fifth section**, a theoretical analysis is conducted of the experimental results on the study of self-diffraction and diffraction in hybrid LC cells (HLCs) containing a gold nano-island film on one of the cell substrates. HLCs are characterized by a faster response time. The recording of dynamic grating occurs due to the surface-induced photorefractive mechanism. The technique of two-wave mixing is used in the recording mode under the influence of periodic rectangular pulses generated either by a laser beam or by an applied electric voltage. Modifications to the shape of laser pulses were experimentally obtained in TWM using HLC. We have developed a theoretical model of the TWM and performed numerical experiments. By comparing experimental data obtained from the analysis of changes in the shape of laser pulses with the results of numerical simulations using the dynamic model developed by us, we can estimate the time constants for recording and relaxation of the dynamic grating in a particular LC material. In this case, the minimum relaxation time of the grating determines the speed of optical signal switching.

Results obtained in the dissertation work will contribute to: 1) creation of new effective materials based on LCs for photonics, incorporating nano-(micro-)structures and exhibiting significantly improved performance characteristics; 2) creation of a theoretical model of the surface-induced photorefractive effect arising from the simultaneous action of light beams and electric fields at the inorganic-organic interface; 3) development of effective technologies for the manufacture of modern multifunctional hybrid LC materials with high performance for optoelectronics, multifunctionality and pixel-free integration in which is achieved through the use of spatially inhomogeneous light beams or interference light structures; 4) studying new effects for controlling optical beams in LC cells to develop new applications for sensors and devices designed to control optical beams and images.

Keywords: Liquid crystals, organic molecules, nematic phase, laser radiation, diffraction, diffraction gratings, holographic gratings, high-order diffraction, Bragg reflection, spectroscopy, nanoparticles, plasmonics, surface plasmon resonance, efficiency, two-beam interference.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:
Статті у періодичних фахових виданнях, віднесених до першого —
третього квартилів (Q1—Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and
Country Rank або Journal Citation Reports:*

1. В.А. Мистецький, С.А. Бугайчук, **Керування інтенсивністю лазерного випромінювання у рідкокристалічних вентилях при записі об'ємної динамічної ґратки**, *Укр. Фіз. Журнал*, **68(7)**, сс. 476-489, 2023, <https://doi.org/10.15407/ujpe68.7.474>.

Особистий внесок здобувача полягає в розробці розрахункових моделей, проведенні всіх розрахунків і аналізі результатів, участі у написанні статті, підготовці графіків для публікації у статті.

Статті у періодичних фахових виданнях, віднесених до четвертого квартилу (Q4) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports:

2. S. Bugaychuk, V. Mystetskyi, **Kinetics of dynamic refractive index gratings in nematic liquid crystals in spatially inhomogeneous electric fields**, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **747(1)**, pp. 64-71, 2022, <https://doi.org/10.1080/15421406.2022.2066793>.

Особистий внесок здобувача полягає в розробці розрахункової моделі періорієнтації молекул РК на базі рівняння Еріксена-Леслі, проведенні всіх розрахунків, аналізі отриманих теоретичних даних, участі у написанні статті, підготовці графіків для публікації у статті.

3. S. Bugaychuk, O. Gridyakina, Yu. Kurioz, S. Kredentser, V. Mystetskyi, L. Fedorenko, A. Evtukh, J. Kaupužs, P. Onufrijevs, **Laser pulse shape transformation in hybrid LC cells containing gold nano-island films**, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **768(8)**, pp. 150-163, 2024, <https://doi.org/10.1080/15421406.2024.234819>.

Особистий внесок здобувача полягає в участі в розробці розрахункової моделі динаміки двопучкової взаємодії в комірках РК, проведенні чисельного експерименту, проведенні співставлення отриманих теоретичних результатів з експериментальними даними, участі у написанні статті, підготовці графіків для публікації у статті.

Апробація результатів дисертації

1. S. Bugaychuk, V. Mystetskyi, Yu. Kurioz, A. Taki, **Optical dielectric spectroscopy related to plasmon resonance in LC-nanocomposites with embedded low-sized Au nanoparticles**, *Journal of Molecular Structure*, **1349(1)**, Article 143532, 5 January 2026, Q2, <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2025.143532>.

2. V. A. Mystetskyi, S. A. Bugaychuk, **Modeling of surface-induced photorefractive mechanism in nematic liquid crystal cells**, *International research and practice conference Nanotechnology and Nanomaterials*, NANO-2021, Lviv, Ukraine, p. 144, 25-27 August 2021.

3. V. A. Mystetskyi, S. A. Bugaychuk, **Surface guiding optical anisotropy in nematic liquid crystals cells**, *XXV Galyna Puchkovska International School-Seminar, Spectroscopy of Molecules and Crystals*, Kyiv, Ukraine, p. 79, 21-24 September 2021.
4. V. A. Mystetskyi, S. A. Bugaychuk, **Recording of dynamic gratings in planar oriented cells of nematic liquid crystals**, *XXIII International young scientists conference on applied physics ICAP 2023*, p. 25-26, Kyiv, Ukraine Taras Shevchenko National University of Kyiv Faculty of RadioPhysics, Electronics and Computer Systems, May 16-20 2023.
5. V. A. Mystetskyi, S. A. Bugaychuk, **Recording of phase dynamic gratings using photorefractive mechanism in hybrid nematic LC cells with gold nano-island films**, *International research and practice conference Nanotechnology and Nanomaterials, NANO-2023*, Bukovel, Ukraine, 16-19 August 2023.
6. V. Mystetskyi, S. Bugaychuk, **Laser beam steering in liquid crystal valves**, *20th Optics of Liquid Crystal Conferences*, Szczecin, Poland, 17-22 September 2023.
7. V. Mystetskyi, S. Bugaychuk, Yu. Kurioz, S. **Ability to record phase dynamic gratings in LC-nanocomposites containing Au nanoparticles**, *2024 IEEE 42th International Conference on Electronics and Nanotechnology, IEEE ELNANO-2024*, Kyiv, Ukraine, 13-16 August 2024.
8. V. Mystetskyi, S. Bugaychuk, Yu Kurioz, **Local field factor in liquid crystal nanocomposites depending on either the volume or surface distribution of gold nanoparticles**, *12th International Conference, Nanotechnologies and Nanomaterials, NANO-2024*, p. 132, Uzhhorod, Ukraine, 21-24 August 2024.
9. S. Bugaychuk, Yu Kurioz, S. Kredentser, A Gridyakina., V. Mystetskyi, J. Parka, **Nanostructured inorganic-organic interface built in liquid crystals for advanced applications in optical and terahertz photonics**, *12th International Conference, Nanotechnologies and Nanomaterials, NANO-2024*, p. 126-127, Uzhhorod, Ukraine, 21-24 August 2024.
10. S. Bugaychuk, V. Mystetskyi, Yu. Kurioz, **Optical dielectric spectroscopy associated with plasmonic resonance in LC nanocomposites with gold nanoparticles**, *XXVI Galyna Puchkovska International School-Seminar, Spectroscopy of Molecules and Crystals*, p. 27, Wojanow, Poland, 22-25 September 2024.