

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
Інститут фізики НАН України



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директором Інституту фізики НАН
України, член-кор. НАНУ, д.ф.-м.н.

М.В. Бондар

(підпис)

«25» лютого 2021 р.

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

ДВА.09

Динамічна голографія і спектроскопія нелінійних ґраток

для аспірантів

спеціальності: 104 Фізика і астрономія

третього (освітньо-наукового) рівня
вищої освіти – доктор філософії

Київ - 2021

Розробник:

Старший науковий співробітник відділу фізики кристалів Інституту фізики НАНУ,
доктор. фіз.-мат. наук _____/С.А. Бугайчук/

Робочу програму узгоджено науково-методичною радою

Протокол № _____ від _____ 20__ р.

Головою науково-методичної ради  /М.В. Бондар/

Робочу програму затверджено Вченою радою Інституті фізики НАНУ

Протокол № _____ від _____ 20__ р.

Голова Вченої ради _____/М.В. Бондар/

Робочу програму погоджено з гарантом освітньо-наукової програми зі спеціальності 104 «Фізика та астрономія» _____20__р.

Гарант освітньої програми  /М.В. Бондар/

Пролонговано Вченою радою Інституту фізики НАН України:

навчальні роки продовження	Голова Вченої ради ІФ НАН України	підпис	№ протоколу	дата протоколу
20____/20____				
20____/20____				
20____/20____				
20____/20____				

1. Загальні відомості

Найменування показників	Характеристика дисципліни за денною формою навчання
Вид дисципліни	вибіркова
Мова викладання, навчання та оцінювання	українська
Загальний обсяг кредитів / годин	4/120
Курс	2
Семестр	2
Кількість змістових модулів з розподілом	1
Обсяг кредитів	4
Обсяг годин, В тому числі:	120
Лекції	20
Індивідуальні заняття	25
Самостійна робота	75
Форма підсумкового контролю	екзамен

2. Мета, завдання та очікувані результати навчальної дисципліни

Робоча програма навчальної дисципліни ДВА.09 «Динамічна голографія і спектроскопія нелінійних ґраток» є нормативним документом, який розроблений на основі освітньо-наукової програми, далі ОП, (затверджена Вченою радою Інституту фізики НАН України, протоколом № 10 від 21 жовтня 2021 року) підготовки здобувача третього рівня відповідно до навчального плану спеціальності 104 «Фізика та астрономія»

Передумова вивчення. Навчальний курс ДВА.09 «Динамічна голографія і спектроскопія нелінійних ґраток» є складовою циклу професійної підготовки фахівців третього освітньо-кваліфікаційного рівня “доктор філософії”. Програма курсу орієнтована на аспірантів, які вже знайомі з загальним курсом фізики оптики, твердого тіла, молекулярної фізики, термодинаміки та математичною фізикою.

Мета навчальної дисципліни. ДВА.09 «Динамічна голографія і спектроскопія нелінійних ґраток»: отримання базових знань в галузі нелінійної оптики, зокрема методів перетворень лазерних пучків і оптичних зображень при їх взаємодії в нелінійних середовищах, ознайомлення з експериментальними методами дослідження та обробки результатів, вивчення методів виконання досліджень нелінійно-оптичних властивостей неорганічних та органічних матеріалів, ознайомлення з технологіями виготовлення голограм різних типів та впливу технологічних особливостей на реальні властивості досліджуваних структур.

Зміст навчальної дисципліни. Теоретичні та практичні знання, набуті при вивченні дисципліни ДВА.09 ««Динамічна голографія і спектроскопія нелінійних ґраток», поглиблене ознайомлення з сучасними знаннями в області експериментальних і теоретичних досліджень методів динамічної голографії, фізичних явищ, що лежать в їх основі, запису динамічних ґраток в різних нелінійно-оптичних середовищах, включаючи наноккомпозити на основі органічних матеріалів; з сучасними використаннями динамічної голографії, зокрема, в системах обробки і перетворення оптичної інформації та в системах голографічної пам'яті, перспективними напрямками майбутніх застосувань; набуття студентами навичок у творчому розв'язуванні відповідних фізичних задач (з використанням ПК); сприяння розвитку логічного й аналітичного мислення студентів — майбутніх фізиків-науковців і викладачів.

Предметом навчальної дисципліни ДВА.09 ««Динамічна голографія і спектроскопія нелінійних ґраток» є викладання базових знань з області динамічної голографії.

Основними завданнями навчальної дисципліни ДВА.09 «Динамічна голографія і спектроскопія нелінійних ґраток» є формування базису знань в межах матеріалу, що вивчається. Дисципліна готує аспірантів до сприймання матеріалу інших спецкурсів, передбачених програмою спеціалізації.

Фахові програмні результати навчання (вимоги до знань та вмінь)

В результаті вивчення навчальної дисципліни аспірант повинен

Знати: фундаментальні основи динамічної голографії: методи описання взаємодії лазерних пучків в нелінійних середовищах, фізику фоторефрактивного ефекту в електрооптичних кристалах та в органічних матеріалах, включаючи рідкі кристали; фізику фототрансформацій в фотохромних молекулах і в біологічних фоточутливих молекулах (бактеріородопсині); перетворення лазерних пучків при їх самодифракції на динамічних ґратках; обернення хвильового фронту; сучасні застосування динамічної голографії, зокрема, для перетворення зображень і для створення елементів голографічної пам'яті.

Вміти: проводити теоретичне моделювання ефектів самодифракції лазерних пучків в різних нелінійних середовищах; створювати теоретичні моделі, що описують механізми нелінійно-оптичного відкугу і утворення динамічних ґраток в різних середовищах; розробляти експериментальні установки для перетворення лазерних пучків і зображень, що базуються на методах динамічної голографії.

Завданням навчальної дисципліни (відповідно до переліку ОП) ДВА.09 «Динамічна голографія і спектроскопія нелінійних ґраток» набути компетентностей:

Загальні: ЗК1, ЗК2, ЗК3, ЗК4, ЗК5, ЗК6, ЗК7, ЗК8.

Фахові: ФК1, ФК2, ФК3, ФК7

Програмні результати навчання ПРН2, ПРН3, ПРН4, ПРН5, ПРН6, ПРН7, ПРН8, ПРН9, ПРН10, ПРН11, ПРН12, ПРН13, ПРН14.

3. Тематичний план

(структура залікового кредиту)

з навчальної дисципліни ДВА.09 «Динамічна голографія і спектроскопія нелінійних ґраток»
(2 курс – 2 семестр)

№	Зміст	Лекції, год.	Індивідуальні заняття, год.	Самостійна робота, год.	Разом, год.
1.	Лекція 1. Вступна лекція.	2	2,5	7	11,5
2.	Лекція 2 Бреггівські ґратки і тонкі ґратки. Рівняння зв'язаних хвиль для Бреггівських ґраток (рівняння Когельника). Стаціонарні розв'язки для двох-пучкової взаємодії на тонких ґраток. Використання методу самодифракції хвиль для визначення нелінійно-оптичних констант в тонких середовищах.	2	2,5	7	11,5
3.	Лекція 3. Стаціонарні розв'язки взаємодії хвиль в Бреггівському режимі. Локальний відгук – перекачка фаз. Нелокальний відгук – перекачка енергії. Коефіцієнт підсилення. Рівняння Стурмана – залежність коефіцієнта підсилення від співвідношення інтенсивностей хвиль.	2	2,5	8	12,5
4.	Лекція 4. Механізми утворення динамічних голографічних ґраток в різних нелінійно-оптичних середовищах.	2	2,5	7	11,5
5.	Лекція 5. Фоторефрактивний механізм створення динамічних ґраток. Рівняння Кухтарева для фоторефрактивних кристалів (ФРК).	2	2,5	7	11,5
6.	Лекція 6. Стаціонарні розв'язки для дифузійного і дрейфового механізмів формування просторового заряду в ФРК.	2	2,5	8	12,5
7.	Лекція 7. Обернення хвильового фронту. Багатопучкова взаємодія. Лазери на голографічних ґратках. Системи голографічної пам'яті. Цифрова голографія.	2	2,5	8	12,5

8.	Лекція 8. Фотовольтаїчний ефект. Гіротропний ефект. Поляризаційні умови (векторна взаємодія). Динамічна голографія на поляризаційних ґратках.	2	2,5	8	12,5
9.	Лекція 9. Просторові модулятори світла на основі рідких кристалів (РК). Механізми нелінійно-оптичного відгуку в РК. Поверхнево-індукований фоторефрактивний ефект в РК. Електро-оптичні просторово-часові модулятори світла на фоторефрактивних кристалах.	2	2,5	8	12,5
10.	Лекція 10. Надшвидка спектроскопія матеріалів при взаємодії нано- і фемтосекундних імпульсів – методика pump-probe. Сповільнення світла в фоторефрактивних кристалах. Перетворення кольору при взаємодії фемтосекундних імпульсів в ФРК.	2	2,5	7	11,5
Всього		20	25	75	120

Методичне забезпечення навчальної дисципліни забезпечують:

опорні конспекти лекцій, бібліотечні посібники зі списку рекомендованої літератури, електронні посібники, мультимедійні презентації, діючі нормативно-правові законодавчі акти України, довідково-інформаційні інтернет-джерела тощо.

4. Зміст навчальної дисципліни

ДВА.09 «Динамічна голографія і спектроскопія нелінійних ґраток»

Тема 1. Вступна лекція.

Історія розвитку динамічної голографії. Ефект перекачки енергії в фоторефрактивних кристалах. Схема експериментальних установок по дослідженню взаємодії хвиль. Голографічне підсилення оптичних пучків. Системи «світло-управляє-світлом». Схеми чисто оптичних перемикачів при чотирьох-пучковій взаємодії (ЧПВ) в фоторефрактивних кристалах. Оптичні логічні елементи на базі ЧПВ. Динамічна голографія в сучасних приладах оптоелектроніки і в наукових дослідженнях. Запис фотонних суперґраток. Голографічні сенсори. Використання динамічної голографії в оптичних комунікаційних мережах.

* Огляд роботи [3]: D.L. Staebler, J.J. Amodei. Coupled wave analysis of holographic storage in LiNbO₃. J. Applied Physics, (1972), Vol. 43, P. 1042-1049.

Література: 1-5.

Тема 2. Бреггівські ґратки і тонкі ґратки. Рівняння зв'язаних хвиль для Бреггівських ґраток (рівняння Когельника). Стаціонарні розв'язки для двох-пучкової взаємодії на тонких ґратках.

Використання методу самодифракції хвиль для визначення нелінійно-оптичних констант в тонких середовищах.

Нелінійно-оптичні ефекти. Ефект Керра. Нелінійно-оптичні константи. Розповсюдження хвиль в анізотропних нелінійних середовищах. Рівняння зв'язаних хвиль. Виведення рівнянь Когельника для двох зв'язаних хвиль. Експерименти по дифракції Рамана-Ната і дифракції Брегга лазерного променя на акустичних хвилях. Двох-пучкова взаємодія. Дифракційна ефективність. Умови Брегга. Тонкі фазові ґратки. Параметр Кука-Кляйна. Стаціонарні розв'язки рівнянь зв'язаних хвиль для тонких фазових ґраток при наближенні само-дифракції Рамана-Ната. Метод двох-пучкової взаємодії для визначення нелінійно-оптичних констант в плівках і тонких зразках.

* Властивості динамічних голограм, які використовуються для розробки голографічних сенсорів.

Література: 6-9.

Тема 3. Стаціонарні розв'язки взаємодії хвиль в Бреггівському режимі. Локальний відгук – перекачка фаз. Нелокальний відгук – перекачка енергії. Коефіцієнт підсилення. Рівняння Стурмана – залежність коефіцієнта підсилення від співвідношення інтенсивностей хвиль.

Рівняння зв'язаних хвиль для умов Бреггівської самодифракції при двох-пучковій взаємодії. Розв'язок для інтенсивностей і фаз двох взаємодіючих хвиль – рівняння Хуїґнарда. Перекачка енергії, перекачка фази та їх залежність від співвідношення інтенсивностей вхідних хвиль в фоторефрактивних кристалах, матеріалах з Керрівською нелінійністю та в напівпровідникових підсилювачах. Двох-пучкова взаємодія в середовищах з чисто нелокальним відгуком – рівняння Стурмана. Залежність коефіцієнта підсилення при двох-пучковій взаємодії від співвідношення інтенсивностей вхідних хвиль.

* Розв'язки Когельника для дифракційної ефективності амплітудно-фазових ґраток. Спектральна чутливість і кутова чутливість Бреггівських ґраток.

Література: 10-13.

Тема 4. Механізми утворення динамічних голографічних ґраток в різних нелінійно-оптичних середовищах.

Загальна схема фоторефрактивного ефекту. Фоторефрактивні кристали. Дифузійний механізм запису динамічних ґраток, перекачка енергії. Дрейфовий механізм запису ґраток, перекачка фази. Механізми нелінійно-оптичного відгуку в різних нелінійно-оптичних матеріалах. Теплова нелінійність. Резонансна нелінійність в напівпровідниках. Оптичне параметричне підсилення лазерних пучків в напівпровідникових матеріалах. Фотохромний ефект. Цис-транс фотоізомеризація молекул барвників. Нелінійність насичення поглинання. Трансформаційні перетворення фоточутливих органічних молекул (бактеріородопсину).

* Фактор локального поля в композитних матеріалах з напівпровідниковими і металевими наночастинками.

Література: 12,14,15

Тема 5. Фоторефрактивний механізм створення динамічних ґраток. Рівняння Кухтарева для фоторефрактивних кристалів (ФРК).

Процеси формування неврівноваженого просторового заряду в фоторефрактивних кристалах (ФРК). Фоточутливі центри в кристалах LiNbO_3 . Умова локальної електронейтральності. Електро-оптичний ефект в ФРК. Рівняння Кухтарева для ФРК. Основне наближене рівняння для поля просторового заряду в ФРК. Дифузійна довжина екранування. Дрейфова довжина екранування.

* П'ять основних ефектів в сегнетоелектричних напівпровідниках, що лежать в основі утворення динамічної ґратки в ФРК – математичне описання.

Література: 3-4,10,16

Тема 6. Стаціонарні розв'язки для дифузійного і дрейфового механізмів формування просторового заряду в ФРК.

Стаціонарні розв'язки рівнянь Кухтарева для інтенсивностей взаємодіючих хвиль та їх фаз. Коефіцієнт підсилення при енергообміні пучків в ФРК. Характерний час і швидкість запису голограм. Ефекти пов'язані з насиченням пасток. Експерименти по перекачці енергії в кристалах

BaTiO₃, KNbO₃, недопованих кристалах LiNbO₃. Підсилення лазерних пучків при дрейфовому механізмі фоторефрактивного ефекту. Експерименти по перекачці енергії в доповани кристалах LiNbO₃ та в кристалах КТР.

* Залежність дифракційної ефективності динамічних ґраток в ФРК від різноманітності умов запису при дрейфовому механізмі.

Література: 2-4,10,16

Тема 7. Обернення хвильового фронту. Багатопучкова взаємодія. Лазери на голографічних ґратках. Системи голографічної пам'яті. Цифрова голографія.

Фізичні основи обернення хвильового фронту (ОХФ) в оптиці. Способи математичного описання ОХФ. Отримання ОХФ в статичній голографії. Отримання ОХФ методом вимушеного розсіювання світла. Отримання ОХФ методом об'ємної динамічної голографії при чотирьох-пучковій взаємодії (ЧПВ). Умови збереження імпульсу при ЧПВ. Базова схема подвійного ОВФ-дзеркала. Перекачка енергії в схемі подвійного ОХФ-дзеркала; залежність від співвідношення інтенсивностей вхідних хвиль. Практичні використання ОХФ-дзеркал. Лазери на динамічних голографічних ґратках. Поріг генерації лазерів. Схеми з лінійним резонатором ЧПВ. Схеми з кільцевим резонатором ЧПВ. Лазери з ОХФ-дзеркалом на основі ФРК. Голографічна пам'ять. Методи створення елементів голографічної пам'яті. Постійна і динамічна голографічна пам'ять на ФРК. Відтворення зображень в схемах динамічної голографії. Асоціативна голографічна пам'ять. Методи мультиплексування зображень. Цифрова голографія.

* Використання ОХФ-дзеркал для покращення діаграми направленості напівпровідникових лазерів.

Література: 12,17-20.

Тема 8 Фотовольтаїчний ефект. Гіротропний ефект. Поляризаційні умови (векторна взаємодія). Динамічна голографія на поляризаційних ґратках.

Фотовольтаїчний ефект. Характеристики кристалів SPN. Експериментальні схеми по вимірюванню фотовольтаїчного ефекту в ФРК. Ефект оптичної активності. Електро-оптичний ефект в оптично ативних кристалах. Фоторефрактивні кристали Bi₁₂SiO₂₀ (BSO), Bi₁₂TiO₂₀ (BTO). Поляризаційна голографія. Метод формування поляризаційних динамічних ґраток. Формування рельєфних поверхневих ґраток в полімерних матеріалах методом поляризаційної голографії. Використання поляризаційної голографії для дослідження трансформацій молекул бактеріородопсину під дією лазерного випромінювання. Голографічні оптичні фільтри, сенсори. Голографічні оптичні пінцети.

* Використання голографічних оптичних пінцетів для дослідження біологічних об'єктів.

Література: 2,6-7,10,12.

Тема 9. Просторові модулятори світла на основі рідких кристалів (РК). Механізми нелінійно-оптичного відгуку в РК. Поверхнево-індукований фоторефрактивний ефект в РК. Електро-оптичні просторово-часові модулятори світла на фоторефрактивних кристалах.

Просторово-часові модулятори світла на основі рідких кристалів (spatial light modulators – SLM). Використання SLM в системах голографічної пам'яті. Орієнтаційна оптична нелінійність в рідких кристалах (РК). Поверхнево-керований фоторефрактивний ефект в РК. Експериментальні дослідження запису динамічних ґраток в РК комірках. Поздовжній і поперечний електро-оптичні ефекти в фоторефрактивних кристалах. Електро-оптичні просторово-часові модулятори світла на ФРК.

* Фізичні механізми, що лежать в основі створення голографічних дисплеїв.

Література: 2,20-21.

Тема 10. Надшвидка спектроскопія матеріалів при взаємодії нано- і фемтосекундних імпульсів – методика pump-probe. Сповільнення світла в фоторефрактивних кристалах. Перетворення кольору при взаємодії фемтосекундних імпульсів в ФРК.

Основи методики спектроскопії з надшвидкою часовою роздільною здатністю – pump-probe. Приклади використання методу pump-probe для виявлення механізмів нелінійно-оптичного відгуку в ФРК і в напівпровідниках. Взаємодія лазерних імпульсів в ФРК. Захоплення, зберігання і

вивільнення лазерних імпульсів в ФРК. Сповільнення світла в ФРК при двох-пучковій взаємодії, і при чотирьох-пучковій взаємодії. Теоретичне моделювання сповільнення світла. Формування солітона огинаючої амплітуди ґратки при взаємодії світла в ФРК. Взаємодія фемтосекундних імпульсів в фоторефрактивних матеріалах. Динаміка формування інтерференційної картини і еволюції глибини модуляції ґратки в залежності від частоти взаємодіючих лазерних імпульсів. Експерименти по перетворенню кольору при взаємодії хвиль в ФРК.

*Методика pump-probe в Інституті фізики НАН України, та її використання для наукових досліджень.

Література: 22-24.

Примітка: * Позначені теми для опрацювання в самостійній роботі.

5. Індивідуальні заняття

з навчальної дисципліни ДВА.09 «Динамічна голографія і спектроскопія нелінійних ґраток»

Практичне закріплення лекційного матеріалу та наукові доповіді аспіранта пов'язані з темами лекцій і є частиною змісту дисципліни.

6. Самостійна робота

з навчальної дисципліни ДВА.09 «Динамічна голографія і спектроскопія нелінійних ґраток»

№	Зміст самостійної роботи аспірантів	Обсяг, годин
1.	Вивчення матеріалу лекції	30
2.	Опрацювання матеріалу, що винесений на самостійне вивчення	45
Усього за навчальну дисципліну		75

7. Методи викладання:

з навчальної дисципліни ДВА.09 «Динамічна голографія і спектроскопія нелінійних ґраток»

У процесі викладання дисципліни використовуються такі методи:

- 1) методи організації та здійснення навчально-пізнавальної діяльності (бесіда, лекція; ілюстрація; лабораторні роботи, реферати; самостійна робота студентів);
- 2) методи стимулювання й мотивації навчально-пізнавальної діяльності (навчальні дискусії, модульно-рейтингова система знань);
- 3) методи контролю (самоконтролю, взаємоконтролю), корекції (самокорекції, взаємокорекції) за ефективністю навчально-пізнавальної діяльності.

8. Рейтингова система оцінювання

з навчальної дисципліни ДВА.09 «Динамічна голографія і спектроскопія нелінійних ґраток»

Основними формами організації контролю у процесі вивчення студентами даної дисципліни є індивідуальна, групова та фронтальна перевірка знань, вмінь та навичок студентів (усна та письмова). Рейтинг аспіранта складається з наступних отриманих балів:

1. Експрес-контроль – 20 балів. (усне опитування чи самостійні роботи під час навчального процесу)
2. Практичні заняття та самостійна робота – 40 балів.
3. Екзамен – 40 балів.

Заохочувальні та штрафні бали

1. При відсутності на лекції/практичному занятті без поважних причин -2 бали

2. Подана в журнал стаття чи виступ на конференції за темою курсу +10 балів.

Сума як штрафних так і заохочуваних балів розраховується за формулою $0,1R$, де R – загальна кількість балів, і не має перевищувати в цілому 10 балів.

Шкала рейтингів.

Загальна кількість балів, яку аспіранта може отримати під час вивчення курсу складається із суми вагових балів отриманих протягом вивчення дисципліни

$$R=20+40+40=100 \text{ (балів)}$$

Шкала відповідності оцінок

Рейтингова оцінка	Значення оцінки	Рейтинг у відсотках, %
A	Відмінно – відмінний рівень знань (умінь) в межах обов’язкового матеріалу з, можливими незначними недоліками.	90-100
B	Дуже добре – достатньо високий рівень знань (умінь) в межах обов’язкового матеріалу без суттєвих (грубих) помилок.	82-89
C	Добре – добрий рівень знань (умінь) в межах обов’язкового матеріалу з незначною кількістю помилок.	75-81
D	Задовільно – посередній рівень знань (умінь) в межах обов’язкового матеріалу із значною кількістю недоліків, достатній для подальшого навчання або ж професійної діяльності.	69-74
E	Достатньо - мінімально можливий допустимий рівень знань (умінь) в межах обов’язкового матеріалу.	60-100
FX	Незадовільно з можливістю повторного складання – незадовільний рівень знань (умінь) в межах обов’язкового матеріалу з можливістю повторного перескладання після самостійного доопрацювання.	35-59
F	Незадовільно з з обов’язковим повторним вивченням курсу – низький рівень знань (умінь) в межах обов’язкового матеріалу, що вимагає повторного вивчення матеріалів курсу.	1-34

9. Орієнтовний перелік екзаменаційних питань

з навчальної дисципліни ДВА.09 «Динамічна голографія і спектроскопія нелінійних ґраток»

I. Фізичні основи динамічної голографії

1. “Товсті” і “тонкі” голографічні ґратки. Умова Кука-Кляйна. Умови Бреґґа. Амплітудні ґратки. Фазові ґратки.
2. Рівняння зв’язаних хвиль для Бреґґівських ґраток. Рівняння Когельника. Коефіцієнт зв’язку.
3. Стаціонарні розв’язки для “тонких” ґраток при самодифракції хвиль. Визначення нелінійно-оптичних коефіцієнтів по двох-пучкової взаємодії в тонких зразках.
4. Стаціонарні розв’язки зв’язаних хвиль для умови Бреґґа. Перекачка енергії. Перекачка фази. Дифракційна ефективність. Коефіцієнт підсилення.
5. Рівняння Кухтарева для фоторефрактивних кристалів.
6. Електрооптичний ефект.
7. Основне наближене рівняння для поля просторового заряду в фоторефрактивних кристалах.
8. Схеми двопучкової взаємодії. Багатопучкова взаємодія.
9. Обернення хвильового фронту. Методи отримання ОХФ.

II. Практичні застосування систем динамічної голографії

11. Нелінійні матеріали, що використовуються в схемах динамічної голографії.
12. Залежність дифракційної ефективності від співвідношення інтенсивностей хвиль.
13. Відтворення зображень в схемах динамічної голографії.
14. Системи голографічної пам'яті. Цифрова голографія.
15. Динамічна голографія на поляризаційних ґратках.
16. Просторово-оптичні модулятори світла (SLM).
17. Захоплення, зберігання і звільнення оптичних імпульсів в РФК.
18. Сповільнення світла в фоторефрактивних кристалах.
19. Перетворення кольору при взаємодії хвиль в фоторефрактивних кристалах.
20. Pump-probe експерименти. Нелінійна спектроскопія з високою часовою роздільною здатністю.

10.Рекомендована література:

з навчальної дисципліни ДВА.09 «Динамічна голографія і спектроскопія нелінійних ґраток»

Основна:

1. В.Л. Винецкий, Н.В. Кухтарев. Динамическая голография. М:Наука, 1990.
2. М. П. Петров, С.И. Степанов, А.В. Хоменко. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. Санкт-Петербург:Наука, 1992.
3. D.L. Staebler, J.J. Amodei. Coupled wave analysis of holographic storage in LiNbO₃. J. Applied Physics, (1972), Vol. 43, P. 1042-1049.
4. Photorefractive materials and applications, Ed. by P. Gunter and J.-P. Huignard, TAP 61, 62. Heidelberg: Springer Verlag, 1988.
5. L. Hesselink, J. Feinberg, G. Roosen. Cluster issue on controlling light with light. J. Phys. D: Appl. Phys., (2008), Vol. 41, P. 224001-224997.
6. И.Р. Шен. Принципы нелинейной оптики. М:Наука, 1989.
7. Я. Ярив, П. Юх. Оптические волны в кристаллах. М:Мир, 1987.
8. Н. Kogelnik. Coupled wave theory for thick hologram gratings. The Bell System Technical Journal, (1969), Vol. 48, № 9, P. 2909-2947.
9. S. Bugaychuk, A. Iljin, O. Lytvynenko, L. Tarakhan, L. Karachevtseva. Enhanced nonlinear optical effect in hybrid liquid crystal cells based on photonic crystal. Nanoscale Research Letters, (2017), Vol. 12, № 449, P. 1-9.
10. P. Yeh. Introduction to photorefractive nonlinear optics. New York: John Wiley Son, 1993.
11. M. Chi, J.-P. Huignard, P. Petersen. A general theory of two-wave mixing in nonlinear media. J. Opt Soc. Am. B, (2009), Vol. 26, P. 1578-1584.
12. P. Gunter, J.-P. Huignard. Photorefractive materials and their applications, 1, 2 and 3. New York: Springer, 2006.
13. S. Sturman, E. Povidilov, M. Gorkunov. Regime of feedback-controlled beam coupling. Phys. Rev. E, (2005), Vol. 72, P. 016621-1-11.
14. Holograms — recording materials and applications, Ed. I. Naydenova, Publisher in Tech. DOI: 10.5772/751, 2011.
15. Holograms — basic principles and contemporary applications, Ed. E. Mihaylova, Publisher in Tech. DOI: 10.5772/46111, 2013.

16. L.V. Vinetski, N.V. Kukhtarev, V.B. Markov, S.G. Odoulov, M.S. Soskin. Hologram recording in electrooptic crystals. *Ferroelectrics*, (1979), Vol. 22, P. 948-964.
17. Б.Я. Зельдович, Н.Ф. Пилипецкий, В.В. Шкунов. *Обращение волнового фронта*. М:Наука, 1990.
18. Phase conjugate laser optics, Eds. A. Brignon and J.-P. Huignard. New York: Wiley, 2004.
19. С.Г. Одулов, М.С. Соскин, А.И. Хижняк. *Лазеры на динамических решетках*. М:Наука, 1990.
20. R.K. Banyal. Data storage and retrieval using photorefractive crystals (holographic memories). A Thesis presented for the degree of Doctor of Philosophy, 2005.
21. T. Haist, W. Osten. Holography using pixelated spatial light modulators — Part 2: applications. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, (2015), Vol. 14, № 4, P. 041311-1-13.
22. M. Astic, Ph. Delayer, R. Frey, et.al. Time resolved nonlinear spectroscopy at the band edge of 1D photonic crystals. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, (2008), Vol. 41, P. 224005-1-7.
23. K. Shcherbin, P. Mathey, G. Gadret, R. Guyard, H.R. Juaslin, S. Odoulov. Slowing down of light pulses using photorefractive four-wave mixing: non-trivial behavior with increasing coupling strength. *Phys. Rev. A*, (2013), Vol. 87, P. 033820-1-7.
24. S. Odoulov, A. Shumelyuk, H. Badorreck, S. Nottle, K.-M. Voit, M. Imlau. Interference and holography with femtosecond laser pulses of different colours. *Nature Communications*, (2015), Vol. 6, P. 5866-1-8.

Додаткова:

1. M. Cronin-Golomb, B. Ficher, J.O. White, A. Yariv. Theory and applicaiton of four-wave mixing in photorefractive media. *IEEE J. Quantum Electron*, (1984), Vol. QE-20, № 1, P. 12-30.
2. В.А. Максименко, А.В. Сюй, Ю.М. Карпец. *Фотоиндуцированные процессы в кристаллах ниобата лития*. М:Физматлит, 2008.
3. J. Frejlich. *Photorefractive materials: fundamental concepts, holographic recording and materials characterization*. John Wiley & Sons, 2007.
4. I. de Oliveira et. al. Photovoltaic effect in Bi₁₂TeO₅ photorefractive crystals. *Appl. Phys. Lett.*, (2015), Vol. 107, P. 151905-1-4.
5. B.I. Sturman, E.V. Podivilov, M.V. Gorkunov. Photorefractive manipulation of light pulses. *Phys. Rev. A*, (2008), Vol. 77, P. 063808-1-10.
6. E. Podivilov, B. Sturman, A. Shumelyuk, S. Odoulov. Light pulse slowing down up to 0.025 cm/s by photorefractive two-wave coupling. *Phys. Rev. Lett*, (2004), Vol. 91, № 8, P. 083902-1-4.
7. M. Jeganathan, M.C. Bashaw, L. Hesselink. Evolution and propagation of grating envelopes during erasure in bulk photorefractive media. *J. Opt. Soc. Am. B*, (1995), Vol. 12, № 7, P. 1370-1383.
8. P. Rose, B. Terhalle, J. Imbrock, C. Denz. Optically induced photonic superlattices by holographic multiplexing. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, (2008), Vol. 41, P. 224004-1-4.
9. C. Moser, L. Ho, E. Maye, F. Havermeyer. Fabrication and applications of volume holographic optical filters in glass. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, (2008), Vol. 41, P. 224003-1-7.
10. A.K. Yetisen. *Holographic sensors*. Springer Theses. Switzerland:Springer, 2015.
11. V. Marinova, Shiuan Huei Lin, Ken Yuh Hsu. Two-wave mixing in organic-inorganic hybrid structures for dynamic holography. Chapter 21 from the book «Holographic Materials and Optical Systems», Publisher in Tech. DOI: 10.5772/67190, 2017.
12. A.A. Zozulya, D.Z. Anderson. Propagation of an optical beam in a photorefractive medium in the presence of a photogalvanic nonlinearity or an externally applied electric field. *Phys. Rev. A*, (1995), Vol. 51, № 2, P. 1520-1531.
13. Danyu Chen, Fengchun Tian, et.al. Uniformity of image amplification by two-wave mixing in photorefractive crystals. *Optical Engineering*, (2014), Vol. 53, № 3, P. 033106.
14. A.V. Khomenko, I. Rocha-Mendoza. Vectorial two-beam coupling with arbitrary shifted photorefractive gratings: an analytical approach. *Phys. Rev. E*, (2004), Vol. 70, 066615.

15. T. Volk, Th. Woike, U. Döfner, et. al. Ferroelectric phenomena in holographic properties of strontium-barium niobate crystals doped with rare-earth elements. *Ferroelectrics*, (1997), Vol. 203, P. 457-470.
16. S. Sternklar, S. Weiss, M. Segev, B. Fischer. Beam coupling and locking of lasers using photorefractive four-wave mixing. *Optics Letters*, (1986), Vol. 11, № 8, P. 528-530.
17. L. Lombard, A. Brignon, J.-P. Huignard, et.al. Review of photorefractive materials: an application to laser beam cleanup. *C.R. Physique (Elsevier)*, (2007), Vol. 88, P. 234-242.
18. S. Zwick, T. Haist, M. Warber, W. Osten. Dynamic holography using pixelated light modulators. *Applied Optics*, (2010), Vol. 49, № 25, P. F47-F58.
19. I. de Olivera, D.A. Capovilla, J.F. Carvalho et al. Photovoltaic effect in $\text{Bi}_{12}\text{TeO}_5$ photorefractive crystals. *Appl. Phys. Lett.*, (2015), Vol. 107, P.151905-1-4.
20. N. Ishii, T. Kato, J. Abe. A real-time dynamic holographic material using a fast photochromic molecule. *Scientific Reports*, (2012), Vol.2, P. 819-1-5.
21. I.S.V. Yepes, M.R.R. Gesualdi, Dynamic digital holography for recording and reconstruction of 3D images using optoelectronic devices, *J. Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Appl.*, (2017), Vol. 16, № 3, P. 801-815.