

КЕРОВАНА ЕЛЕКТРИЧНИМ ПОЛЕМ ФАЗОВА РІДКОКРИСТАЛІЧНА ДИФРАКЦІЙНА ГРАТКА

У статті розглядається дифракція світла під час його проходження фазовою дифракційною ґраткою. Показано, що виготовлення фазових дифракційних ґраток, які пропускають світло, має певні технічні труднощі порівняно з виготовленням фазових дифракційних ґраток, які відбивають світло. Запропоновано спосіб формування керованого перерозподілу енергії світлових хвиль між головними максимумами дифракційної картини за допомогою рідкокристалічної фазової дифракційної ґратки, в якій профіль штриха регулюється змінним електричним полем.

Ключові слова: дифракція світла, фазова дифракційна ґратка, нематичний рідкий кристал із індукованою спіральною надмолекулярною структурою, текстура "відбитки пальців", крок спіралі, змінне електричне поле.

Вступ. Дифракційна ґратка є оптичним елементом із періодичною структурою, який здатний перерозподіляти енергію світлових хвиль у певних напрямках. Залежно від того, який параметр світлової хвилі модулюється, розрізняють амплітудні, фазові та амплітудно-фазові дифракційні ґратки. Відомо, що для амплітудних дифракційних ґраток із прямокутним профілем штриха має місце залежність інтенсивності головних максимумів від відношення ширини штриха (b) до періоду ґратки (d). Так, для $b = d/3$ зникає кожний третій головний максимум, для $b = d/4$ – кожний четвертий, для $b = d/2$ зникають усі парні головні максимуми [1]. Це є суттєвим недоліком таких дифракційних ґраток, особливо під час використання слабких джерел світла.

Фазові дифракційні ґратки позбавлені цього недоліку тим, що штрихам надається певний профіль. Із зміною профілю штриха відбувається перерозподіл енергії світлових хвиль між головними максимумами різних порядків. Це дозволяє зосередити енергію світлових хвиль у головних максимумах нижчих порядків, послаблюючи при цьому інтенсивність головних максимумів вищих порядків, оскільки фазові дифракційні ґратки не впливають на амплітуду світлових хвиль, а лише вносять періодичні зміни в їх фазу.

Аналіз публікацій та постановка задачі. У літературі показано, що в оптичних і оптично-електронних приладах, принцип дії яких ґрунтується на явищі дифракції світла, більш поширені фазові дифракційні ґратки, які відбивають світло, тому що сучасні технології дозволяють надати штрихам ґратки будь-який профіль [2]. Для їх виготовлення використовують алмазні різці, вістря яких мають спеціальну форму, тому профіль штрихів для таких ґраток залишається статичним параметром.

Принцип дії деяких оптичних і оптично-електронних приладів ґрунтується на застосуванні дифракційних ґраток, які пропускають світло. Виготовлення фазових дифракційних ґраток, які пропускають світло є певною технічною проблемою, тому що штрихи у цьому випадку являють собою непрозору частину ґратки [3]. Одним із варіантів виготовлення фазових дифракційних ґраток, які пропускають світло, є застосування так званого "плазмонного" ефекту [4], але в цілому цю проблему не можна вважати остаточно розв'язаною [5].

На думку автора, роль фазової дифракційної ґратки, яка пропускає світло, може виконати комірка з рідким кристалом, що має спіральну надмолекулярну структуру [6]. Фазовою такою ґраткою буде за умови, коли крок спіралі змінюватиметься зовнішнім змінним електричним полем. У цьому випадку профіль штрихів набуває динамічності, що дозволяє контролювати перерозподіляти енергію світлових хвиль між головними максимумами заданих порядків.

Метою цієї роботи є визначення способу формування керованого перерозподілу енергії світлових хвиль між головними максимумами дифракційної картини за допомогою рідкокристалічної фазової дифракційної ґратки, в якій профіль штриха регулюється змінним електричним полем.

Викладення основного матеріалу. Поставлена задача розв'язується за рахунок впливу змінного електричного поля частотою понад 1000 Гц на нематичний рідкий кристал із додатною анізотропією діелектричної проникності та індукованою спіральною надмолекулярною структурою. Такий вплив супроводжується розкручуванням спіральної надмолекулярної структури рідкого кристала, що є аналогічним до зміни профілю штрихів фазової дифракційної ґратки. При цьому енергія світлового

поток, що проходить коміркою з рідким кристалом, перерозподіляється між дифракційними максимумами заданих порядків і регулюється напруженістю електричного поля між електродами комірки [7].

Для формування дифракційної ґратки надмолекулярну структуру нематичного рідкого кристала змінюють на спіральну шляхом додавання до нього домішки з оптично активними молекулами.

Нематичному рідкому кристалу притаманний далекий тривимірний орієнтаційний порядок, оскільки довгі осі його видовжених молекул орієнтовані певним чином у просторі, а центри мас молекул переміщуються в цьому напрямку. Характеризують напрям переважної орієнтації довгих молекулярних осей вектором одиничної довжини \vec{L} , який називають директором.

Оптично активні молекули в момент розчинення деформують початкову орієнтацію молекул нематичного рідкого кристала. При цьому виникають пружні сили, які намагаються зменшити вільну енергію зразка закручуванням надмолекулярної структури. Отже, спіральне закручування молекул нематичного рідкого кристала є його природною реакцією на асиметрію молекул домішок. Змінюючи концентрацію оптично активного компонента в суміші, можна одержати спіральну структуру з різним значенням кроку P . Кроком спіралі є відстань між найближчими точками рідкого кристала з однаковим напрямом директора \vec{L} (рис. 1, а).

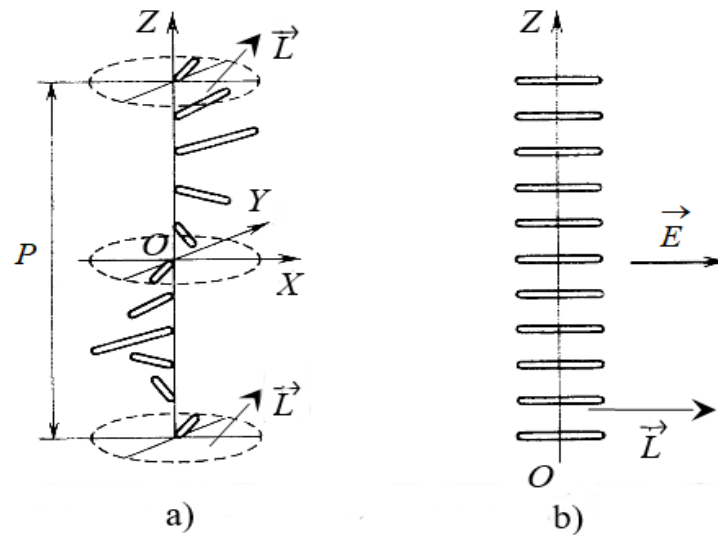


Рис. 1. Розкручування спіральної надмолекулярної структури рідкого кристала в електричному полі:
а) електричне поле відсутнє; б) зразок в електричному полі

Значення кроку спіралі змінюється за допомогою електричного поля. Для нематичних рідких кристалів з додатною анізотропією діелектричної проникності вектор дипольного моменту молекул збігається з напрямом довгої молекулярної осі. Тому із збільшенням напруженості електричного поля E молекули починають орієнтуватися вздовж ліній напруженості і крок спіралі зростає до нескінченності, тобто спіраль розкручується. (рис. 1, б). Таке перетворення надмолекулярної структури подібне до фазового переходу другого роду, оскільки воно супроводжується зміною симетрії рідкого кристала [8].

За допомогою спеціально створених граничних умов вісь спіралі орієнтується у площині опорних поверхонь комірки. При цьому за допомогою мікроскопа можна спостерігати текстуру, яку називають "відбитками пальців" (рис. 2). Внаслідок повороту молекул рідкого кристала виникає періодичність у зміні показника заломлення. Зовнішній вигляд такої періодичності проявляється в смугах з періодичною зміною інтенсивності світла, що проходить коміркою з рідким кристалом. Текстура "відбитки пальців" являє собою фазову дифракційну ґратку з періодом $P/2$. Роль штриха відіграє смуга, ширина якої дорівнює половині кроку спіралі.

Електричне поле, що прикладене до електродів комірки, буде змінювати крок спіралі й тим самим впливати на профіль штриха. Із зміною профілю штриха відбувається перерозподіл енергії світлового потоку між головними максимумами різних порядків. Це дозволяє зосередити енергію світлових хвиль у головних максимумах заданих порядків, послаблюючи при цьому інтенсивність головних максимумів вищих порядків.

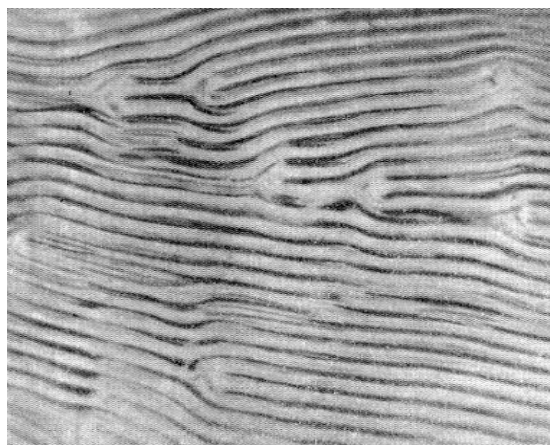


Рис. 2. Текстура "відбитки пальців"

Комірка з рідким кристалом є плоским конденсатором завтовшки 20 мкм (рис. 3). Електроди конденсатора (1) виготовлені з скляних пластин, на одну з поверхонь яких нанесено провідний шар S_nO_2 (2). Діелектриком конденсатора слугує нематичний рідкий кристал з індукованою спіральною надмолекулярною структурою (3). Товщина рідкокристалічного шару фіксується стрічками з тefлону (4). Заповнюється комірка рідким кристалом при температурі, що перевищує температуру фазового переходу рідкий кристал – ізотропна рідина (T_{NI}) завдяки дії капілярних сил. Це дозволяє звільнитися від упорядкування директора L потоком рідини й не порушити граничних умов, що може мати місце при заповненні комірки при температурі $T < T_{NI}$.

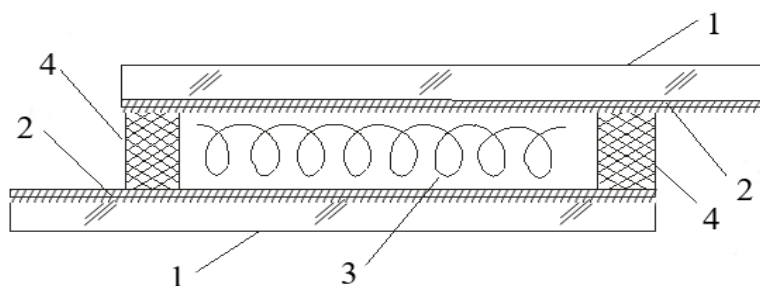


Рис. 3. Комірка з рідким кристалом

Для одержання текстури "відбитки пальців" комірка з рідким кристалом готується за певною методикою. Спочатку слід очистити поверхні скляних пластин від органічних домішок. Для цього вони втримуються 20-30 хвилин у розчині біхромату калію в концентрованій сірчаній кислоті, промиваються у дистильованій воді й висушуються у термошафі. Потім збирається плоский конденсатор.

Молекули нематичного рідкого кристала з полярними кінцевими групами орієнтуються перпендикулярно до поверхні очищених скляних пластин за рахунок диполь-дипольної взаємодії або за рахунок водневих зв'язків. Як тільки на поверхнях пластин виникає такий моношар, сили міжмолекулярної взаємодії індукують набуту орієнтацію молекул в глибину комірки.

Для нематичного рідкого кристала з спіральною надмолекулярною структурою орієнтуюча дія моношару обмежується тільки приповерхневою областю, але завдяки пружним властивостям рідкого кристала розглянуті граничні умови змушують вісь спіралі розташовуватися в площині опорних поверхонь. При цьому важливою умовою є співвідношення між значенням кроку спіралі й товщиною шару рідкого кристала: коли крок спіралі є співрозмірним з товщиною шару рідкого кристала, то сили зчеплення молекул з поверхнею розкручують спіраль; коли крок спіралі є значно меншим від товщини шару рідкого кристала, то сили зчеплення молекул з поверхнею не впливають на спіральну надмолекулярну структуру зразка в цілому й тому утворюється текстура "відбитки пальців". У даній роботі використовувалась суміш нематичного рідкого кристала 4-амил-4'-ціанобіфенила з холестерил пеларгонатом (оптично-активна домішка), що мала крок спіралі $P=3$ мкм.

Експериментальна установка складалася з гелій-неонового лазера, комірки з рідким кристалом, звукового генератора, екрана. Комірка розташовувалася перпендикулярно до площини падіння променя й в прохідному світлі на екрані спостерігалася дифракційна картина. З метою перерозподілу енергії світлового потоку між максимумами заданих порядків на електроди комірки подавалася змінна напруга від звукового генератора, при цьому, змінюючи напруженість електричного поля між електродами комірки, контролювалася і регулювалася кількість максимумів та їх інтенсивність.

Дифракційна картина при відсутності електричного поля на електродах комірки спостерігалася на екрані у вигляді концентричних кілець (рис. 3, а). Дифракційна ґратка концентрувала світло в головних максимумах перших трьох порядків та в нульовому максимумі. При відстані між коміркою і екраном, що дорівнювала 40 см, діаметр кільця максимуму третього порядку дорівнював 7 см.

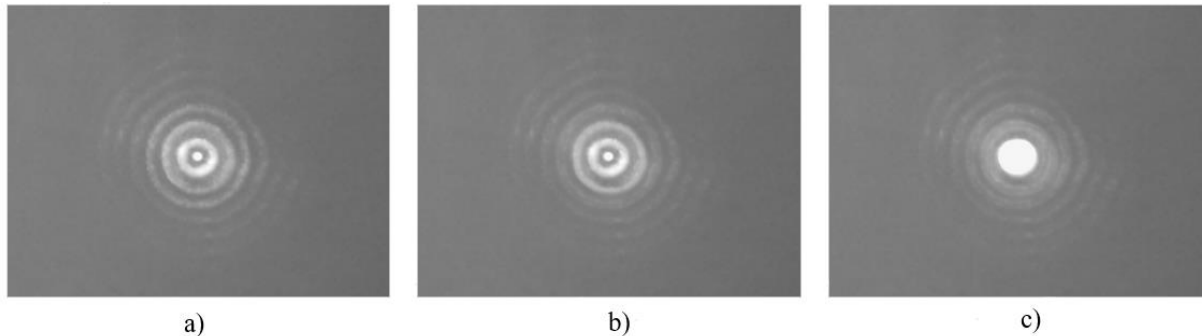


Рис. 3. Дифракційна картина для різних значень змінної напруги на електродах комірки:

а) $U = 0$, б) $U = 1,14$ В, в) $U = 1,23$ В

Із збільшенням змінної напруги на електродах комірки дифракційна картина починала змінюватися. При напрузі $U=1,14$ В зникало кільце максимуму третього порядку. При цьому залишалися кільця максимумів другого та третього порядків, а також й максимум нульового порядку (рис. 3, б). Із зменшенням кількості кілець інтенсивність світла перерозподілялась між кільцями, що залишалися, тому вони виглядали ще більш яскравими. При напрузі $U=1,23$ В зникало кільце максимуму другого порядку, а також максимум нульового порядку. На екрані спостерігався лише максимум першого порядку (рис. 3, в).

При напрузі $U=1,4$ В електричне поле повністю розкручувало спіральну надмолекулярну структуру зразка і текстура "відбитки пальців" зникала разом з дифракційною картиною. На екрані можна було побачити лише невелику пляму від лазерного променя. Якщо вимкнути генератор, то впродовж 1-2 хвилин граничні умови повністю відновлювали початкову текстуру "відбитки пальців", отже й дифракційну картину на екрані. Якщо зменшувати напругу на електродах комірки, починаючи від значення $U=1,23$ В, то знов можна послідовно одержати кільця максимумів другого і третього порядків та максимум нульового порядку.

Висновки. Таким чином, нематичний рідкий кристал із спіральною надмолекулярною структурою демонструє дію фазової дифракційної ґратки. Новизна цієї фазової дифракційної ґратки полягає в керованому перерозподілі енергії світлових хвиль між головними максимумами дифракційної картини за рахунок зміни профілю штрихів ґратки змінним електричним полем.

Використані джерела

1. Клос Е.С., Шульга М.С. Оптика в демонстраційних дослідах. Київ, 1983. 159 с.
2. Бутиков Е.И. Оптика: учеб. пособие / под ред. Н.И. Калитеевского. Москва, 1968. 512 с.
3. Одиноків С.Б., Сагателян Г.Р., Ковалёв М.С. Расчёт, конструирование и изготовление дифракционных и голограммных оптических элементов: учеб. пособие. Москва, 2014. 121 с.
4. Talebi N., Shahabadi M., Khunsin W., Vogelgesang R. Plasmonic grating as a nonlinear converter-coupler. *Optics Express*. 2012. Vol. 20, №2. P. 1342-1405.
5. Настас А.М., Иову М.С. Исследование глубины рельефа на дифракционную эффективность отражающих и пропускающих рельефно-фазовых дифракционных решёток. *Журнал технической физики*. 2015, Т. 85, №7. С. 133–134.
6. Ситников О.П. Вивчення дифракції світла за допомогою нематичного рідкого кристала з індукованою спіральною надмолекулярною структурою. *Зб. наук. пр. Кам'янець-Подільського державного універ-*

- ситету: Серія педагогічна: Дидактики дисциплін фізико-математичної та технологічної освітніх галузей. Кам'янець-Подільський, 2004, вип. 10. С. 163–165.*
7. Пат. 85397 Україна: МПХ(2009) G02F 1/13. Спосіб формування рідкокристалічної дифракційної решітки / Ситников О.П.; Чернігівський держ. ін-т економіки та управління. №200606159; заявл. 02.06.2006; опубл. 26.01.2009; бюл. №2.
8. Пикин С.А. Структурные превращения в жидких кристаллах. Москва, 1981. 336 с.

Sitnikov A.

ELECTRICALLY DRIVEN PHASE LIQUID CRYSTAL DIFFRACTION GRATING

The diffraction grating is an optical element with a periodic structure that is capable of redistributing the energy of light waves in certain directions. Depending on which parameter of the light wave is modulated, amplitude, phase and amplitude-phase diffraction gratings are distinguished. It is known that amplitude diffraction gratings with a rectangular stroke profile have a dependence of the intensity of the main maxima on the ratio of the width of the stroke to the period of the grating. This is a significant disadvantage of such a diffraction grating, especially when using weak light sources.

Phase diffraction gratings are deprived of this disadvantage by the fact that strokes are provided with a profile. With the change of the profile of the stroke, the redistribution of the energy of light waves occurs between the main maxima of various orders. This allows the energy of light waves to be concentrated in the main maxima of lower orders, while at the same time weakening the intensity of the main highs of higher orders, since the phase diffraction gratings do not affect the amplitude of light waves, but only make periodic changes in their phase.

In optic and optoelectronic devices whose principle of action is based on the diffraction phenomenon of light, more common phase diffraction gratings reflect light, because modern technologies allow to provide grid touches of any profile. The production of phase diffraction gratings that transmit light is a technical problem, since the strokes in this case represent an opaque part of the grating.

The role of a phase diffraction grid that transmits light can be performed by a cell with a liquid crystal that has a spiral supramolecular structure. A phase lattice will be provided when the step of the spiral is changed by an external variable electric field. In this case, the profile of the stroke becomes dynamic, which allows a controlled redistribution of the energy of light waves between the main maxima of the given orders.

The given problem is solved due to the influence of an alternating electric field with a frequency over 1000 Hz on a nematic liquid crystal with positive anisotropy of dielectric constant and induced by a spiral supramolecular structure. Such an effect is accompanied by the promotion of the spiral supramolecular structure of the liquid crystal, which is similar to the change in the profile of the strokes of the phase diffraction grating. In this case, the energy of the light flux passing through a cell with a liquid crystal is redistributed between the diffraction maxima of the given orders and is regulated by the electric field strength between the cells electrodes.

Key words: *diffraction of light, phase diffraction grating, nematic liquid crystal with induced spiral supramolecular structure, "fingerprint" texture, step of a spiral, alternating electric field.*

Стаття надійшла до редакції 15.03.2018 р.