

СТОХАСТИЗАЦІЯ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ, РОЗСІЯНОГО В ПРОЦЕСІ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДУ В НЕМАТИЦІ

Наведено результати дослідження поведінки максимального показника Ляпунова та півширини автокореляційної функції інтенсивності оптичного випромінювання розсіяного нематичним рідким кристалом під час фазового переходу рідина - рідкий кристал для різних товщин кристала. Встановлено, що збільшення товщини кювети з рідким кристалом приводить до зростання хаотичності розсіяного поля.

This paper represents the results of investigating Lyapunov's maxim index and of autocorrelation function half-width of optical radiation intensity scattered by nematic liquid crystal during phase transition liquid – liquid crystal and liquid crystal – liquid from crystal thickness. It has been shown that chaos in the scattered field increases with the growth of plate thickness of liquid crystal.

Під час фазового переходу в рідкому кристалі його фізичні властивості кардинально змінюються. Особливо часто в різних галузях науки та техніки використовують фазовий перехід рідина-рідкий кристал або рідкий кристал-рідина [1]. В залежності від швидкості нагрівання чи охолодження, цей процес характеризується певною тривалістю і належать до класу перехідних процесів, що адекватно описуються теорією хаотичних і стохастичних коливань. Поле когерентного оптичного випромінювання, розсіяного рідким кристалом під час фазового переходу, також стає хаотичним.

Ми дослідили ступінь хаотичності та часову кореляцію флуктуацій інтенсивності в полі оптичного випромінювання, розсіяного нематичним рідким кристалом під час фазового переходу рідина-рідкий кристал. Для кількісної оцінки хаосу було використано максимальний показник Ляпунова флуктуацій інтенсивності поля. Додатне значення максимального показника Ляпунова вказує на можливість існування хаосу в системі, а величина цього показника характеризує ступінь хаотичності [2].

Показники Ляпунова характеризують середню швидкість експоненціальної розбіжності близьких фазових траєкторій. Якщо d_0 – початкова відстань між двома вихідними точками фазових траєкторій, то через час t відстань між траєкторіями, що виходять із цих точок, буде такою:

$$d(t) = d_0 e^{\lambda t}. \quad (1)$$

Величину λ називають показником Ляпунова. Кожна динамічна система характеризується спектром показників Ляпунова λ_i ($i=1,2,\dots,n$), де n – кількість диференціальних рівнянь, необхідних для опису системи. Для експериментальних даних, які отримані при спостереженні за динамічними системами, наявність додатного показника Ляпунова може бути ознакою існування хаосу в системі. Взагалі кажучи, для хаотичної системи характерно розбіжність фазових траєкторій в одних напрямках та їх збіжність у інших. Тобто в хаотичній системі обов'язково є як додатні, так і від'ємні показники Ляпунова. При цьому сума усіх показників від'ємна, тобто ступінь збігання траєкторій перевищує ступінь розбіжності. Якщо ця умова не виконується, динамічна система нестійка й поведінка такої системи легко упізнається. Таким чином, в більшості випадків достатньо обчислити тільки максимальний показник Ляпунова. Додатне значення максимального коефіцієнта Ляпунова вказує на можливість існування хаосу в системі, а величина цього показника характеризує ступінь хаотичності.

Автокореляційна функція є кількісною інтегральною характеристикою форми сигналу і визначається інтегралом від добутку двох копій сигналу $I(t)$, зрушених відносно один одного на час n . У випадку дискретного сигналу, при інтервалі дискретизації даних $\Delta t = \text{const}$ (у нашому випадку $\Delta t = 0,0001$ с) обчислення автокореляційної функції виконується по інтервалах $\Delta \tau = \Delta t$. Дискретний сигнал звичайно задається у вигляді

числового масиву визначеної довжини з нумерацією відліків $0, 1, \dots, N$ (в нашому випадку $N=50000$), а обчислення дискретної автокореляційної функції виконується, в односторонньому варіанті, з урахуванням довжини масивів за формулою:

$$B_s(n) = \frac{N \cdot \Delta t}{N+1-n} \sum_{k=0}^{N-n} I_k \cdot I_{k-n} \quad (2)$$

Множник $N/(N+1-n)$ у даній функції є поправковим коефіцієнтом на поступове зменшення кількості чисел, що перемножуються і сумуються (від N до $N-n$) у міру збільшення зміщення по n . Значення τ_p , при якому $B_s(\tau_p) = 0,5 \cdot B(0)$, називається півшириною автокореляційної функції.

Схема експерименту для вимірювання часової залежності флуктуацій інтенсивності поля оптичного випромінювання розсіяного рідкими кристалами зображена на рис. 1.

Пучок He-Ne лазера 1 очищається від розсіяних променів за допомогою мікрооб'єктива 2 та мікронної діафрагми 3. Об'єктив 4, через поворотне дзеркало 5, фокусує випромінювання на кюветі змінної товщини 6. Фотоелектронний помножувач 8 реєструє розсіяне випромінювання. Розмір діафрагми 7 повинен бути меншим за

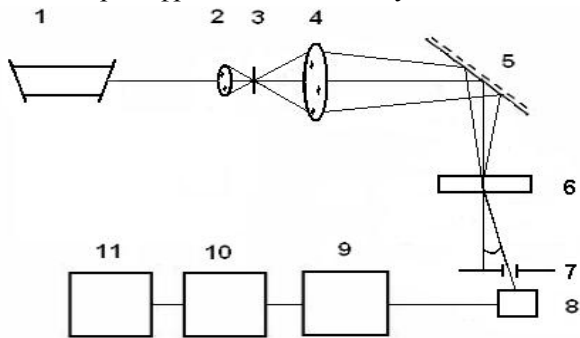


Рис. 1. Схема експерименту

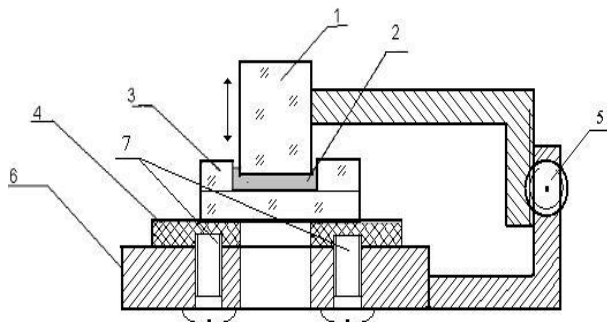


Рис. 2. Будова кювети змінної товщини

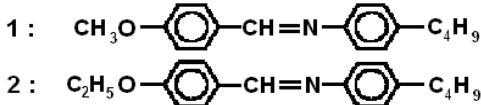


Рис. 3. Структурні формули МББА (1) і ЕББА (2)

розмір спеклів у розсіяному полі. Електричний сигнал від фотоприймача підсилюється за допомогою операційного підсилувача 9 і через АЦП 10 поступає в комп'ютер 11.

Будова кювети змінної товщини зображена на рис. 2. Між двома скляними пластинками 1 та 3 (пластинка 3 з прямокутним заглибленням) розміщується рідкий кристал 2, товщина якого регулюється мікрометричним гвинтом 5. Для нагрівання рідкого кристала використовувалась термоелемент 4. Плоскопаралельність предметного столика 6 встановлюється регулюючими гвинтами 7.

Об'єктом дослідження був нематичний рідкий кристал Н8 (евтектична суміш – п-оксібензаль-п-бутиланіліна і п-метоксібензаль-п-бутиланіліну, структурні формули зображені на рис. 3). Термодинамічні властивості Н8 достатньо добре вивчені [4]. Він має широкий температурний інтервал існування мезофази (від 263 до 326 К при атмосферному тиску). Фазовий перехід у кристалі досягався за рахунок зміни температури рідкого кристала.

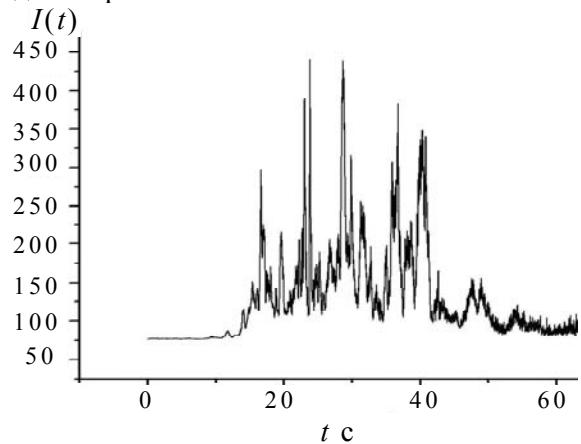


Рис. 4. Часова залежності інтенсивності поля випромінювання для товщини кювети 50 мкм

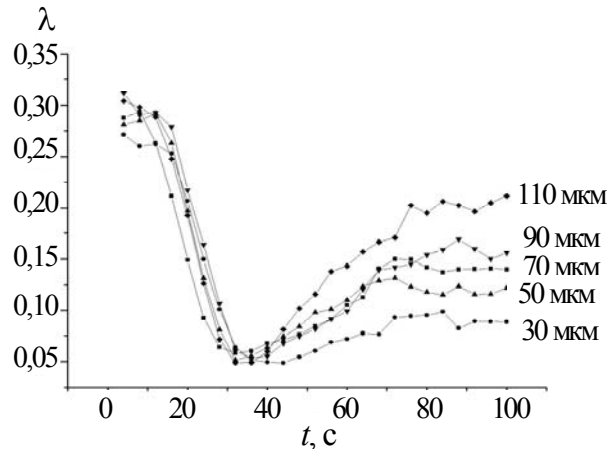


Рис. 5. Часова залежність показників Ляпунова для товщин кювети $h = 30, 50, 70$ та 110 мкм

Експериментально досліджувалось світло-розсіювання рідкими кристалами для товщин кювети від 10 мкм до 110 мкм. Приклад часової залежності флуктуацій інтенсивності поля розсіяного під кутом 6° для кювети товщиною 50 мкм наведено на рис. 4.

Розрахунок показників Ляпунова проводився на інтервалах, значно менших за всю часову реалізацію, де сигнал у певному наблизенні можна вважати статистично однорідним, при послідовному зсуві аналізованого динамічного ряду. На рис. 5 наведені часові залежності показника Ляпунова розсіяного випромінювання для товщин кювети $h = 30, 50, 70$ та 110 мкм. З наведених графіків видно, що хаотичність поля випромінювання в процесі фазового переходу рідина-рідкий кристал змінюється, що дає можливість краще оцінити критичні точки переходу і поведінку системи. Причому хаотичність практично не залежить від товщини на початку процесу (біля рідкої фази) і залежить від товщини кювети в кінці фазового переходу (біля рідкокристалічної фази). Цю особливість більш наглядно демонструє рис. 6, де зображено залежність показника Ляпунова від товщини кювети на початку фазового переходу (крива 1 відповідає 16-й секунді від початку процесу) та в кінці цього процесу (крива 2 відповідає 90-й секунді відповідно). Наприкінці фазового переходу показник Ляпунова практично лінійно зростає зі збільшенням товщини кювети.

Крім показників Ляпунова, ми розраховували часові кореляційні функції флуктуацій інтенсивності для тих самих динамічних інтервалів даного процесу при послідовному зсуві аналізованого динамічного ряду. Інформативною виявилася напівширина автокореляційної функції τ_p , яка характеризує усереднений обернений частотний склад сигналу, прив'язаний до конкретного часу. Приклад часової залежності напівширини автокореляційної функції для товщини кювети 50 мкм наведено на рис. 7. З графіка видно, по частотному складу флуктуацій інтенсивностей випромінювання, розсіяного нематиком, весь процес можна розбити на 3 однорідні інтервали. На початку процесу (біля рідкої фази) середня частота найвища і становить близько 1000 Гц. По середині процесу частота різко зменшується до рівня 50 Гц. А в кінці фазового переходу (біля рідкокристалічної фази) середня частоти знову наростає і встановлює на рівні 200 Гц.

Отже, визначення часової залежності напівширини автокореляційної функції флуктуацій

інтенсивностей випромінювання, розсіяного нематиком, дозволяє віділити 3 етапи фазового переходу, а дослідження показників Ляпунова показали, що збільшення товщини кювети з рідким кристалом, приводить до зростання хаотичності розсіяного поля наприкінці фазового переходу.

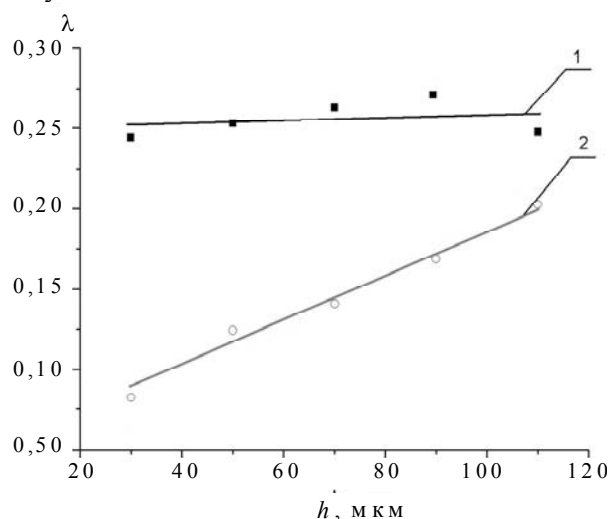


Рис. 6. Залежність показників Ляпунова від товщини (крива 1 відповідає 16-й секунді від початку процесу, а крива 2 – 90-й секунді)

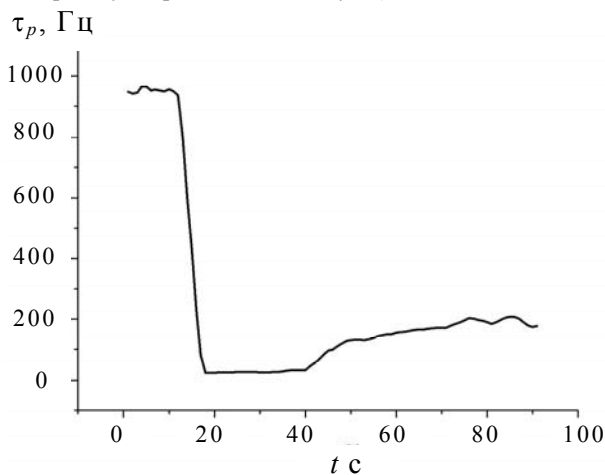


Рис. 7. Часова залежності напівширини автокореляційної функції для товщини кювети 50 мкм

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Де Жен П.Ж. Физика жидких кристаллов. – М.: Мир, 1977.
2. Неймарк Ю.И., Ланда П.С. Стохастические и хаотические колебания. – М.: Наука, 1987.
3. Rosenstein M.T., Collins J.J., Luca Carlo J. De. A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets. – MA 02215: Boston University, 1992.
4. Богданов Д.Л. Исследование ориентационных свойств жидких кристаллов в переменных полях акустическим методом. – М.: ВЗМИ, 1980.