

КОНСТРУКТИВНІ І ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ РЕАЛІЗАЦІЇ ОПТИКОАКУСТИЧНОГО МЕТОДУ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АРОМАТИЧНИХ СПОЛУК ТА ЇХ ФТОРОВАНІХ АНАЛОГІВ

Олександр БУРМІСТРОВ

Донецький національний медичний університет, Україна
burmistrov1937@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-8328-0091>

Людмила СУХОВІРСЬКА ✉

Донецький національний медичний університет, Україна
suhovirska2011@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-0353-9354>

Василь БОЛІЛИЙ

Центральноукраїнський державний педагогічний університет імені Володимира Винниченка, Україна
vasyl.bolilyj@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1923-1058>

АНОТАЦІЯ

Формулювання проблеми. Дослідження акустичних спектрів ароматичних сполук та їх фторованих аналогів, показує, що в цих рідинах спостерігається проста область акустичної дисперсії, яка обумовлена процесами коливної релаксації – передачі енергії поступального руху молекул коливним ступеням вільності і зворотно. Розбіжності в трактуванні молекулярних механізмів акустичної релаксації пояснюються тим, що до останнього часу були відсутні експериментальні дані про акустичні спектри ароматичних сполук та їх фторованих аналогів в широких інтервалах температур і частот.

Матеріали і методи. У дослідженні розглядається метод акустичної спектроскопії Мандельштама-Бріллюена, удосконалений автоматизованою експериментальною установкою.

Для досягнення поставленої мети були використані такі методи дослідження: емпіричні (спостереження, порівняння), теоретичні (аналіз матеріалів, ідеалізація, уявний експеримент) та комп'ютерне моделювання.

Результати. Сучасні досягнення Мандельштам-Бріллюєнської спектроскопії дозволяють проводити надійні виміри швидкості і поглинання гіперзвукових хвиль в прозорих рідинах при різних температурах (включаючи навіть критичну), а також досліджувати спектри релеевського розсіювання в рідких кристалах, металах, напівпровідниках. Вдосконалена експериментальна установка дозволила проводити вимірювання поглинання і швидкості звуку в більш широкому інтервалі температур і діапазоні частот (до 7,0 ГГц) в ряді ароматичних сполук та їх фторованих аналогів, з'ясувати молекулярні механізми, відповідальні за акустичну релаксацію.

Висновки. В даній роботі досліджено підхід до пояснення молекулярних механізмів релаксаційних процесів в рідких ароматичних сполуках та їх фторованих аналогах, який ґрунтується на врахуванні ролі слабких міжмолекулярних зв'язків. Сформувані основні позитивні особливості експериментальної установки.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: акустичний спектр; ароматична сполука; спектроскопія Мандельштама-Бріллюена; оптична установка; експеримент.

Для цитування:	Бурмістров О., Суховірска Л., Болілій В. Конструктивні і технологічні аспекти реалізації оптикоакустичного методу дослідження термодинамічних властивостей ароматичних сполук та їх фторованих аналогів. <i>Фізико-математична освіта</i> , 2024. Том 39. № 4. С. 7-13. https://doi.org/10.31110/fmo2024.v39i4-01
	Бурмістров, О., Суховірска, Л., & Болілій, В. (2024). Конструктивні і технологічні аспекти реалізації оптикоакустичного методу дослідження термодинамічних властивостей ароматичних сполук та їх фторованих аналогів. <i>Фізико-математична освіта</i> , 39(4), 7-13. https://doi.org/10.31110/fmo2024.v39i4-01
For citation:	Burmistrov, O., Sukhovirska, L., & Bolilyi, V. (2024). Constructive and technological aspects of the implementation of the optic-acoustic method for researching the thermodynamic properties of aromatic compounds and their fluorinated analogues. <i>Physical and Mathematical Education</i> , 39(4), 7-13. https://doi.org/10.31110/fmo2024.v39i4
	Burmistrov, O., Sukhovirska, L., & Bolilyi, V. (2024). Konstruktivni i tekhnolohichni aspekty realizatsii optykoakustychnoho metodu doslidzhennia termodynamichnykh vlastyvostei aromatichnykh spoluk ta yikh ftorovanykh analogiv [Constructive and technological aspects of the implementation of the optic-acoustic method for researching the thermodynamic properties of aromatic compounds and their fluorinated analogues]. <i>Fizyko-matematychna osvita – Physical and Mathematical Education</i> , 39(4), 7-13. https://doi.org/10.31110/fmo2024.v39i4-01

CONSTRUCTIVE AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF THE IMPLEMENTATION OF THE OPTIC-ACOUSTIC METHOD FOR RESEARCHING THE THERMODYNAMIC PROPERTIES OF AROMATIC COMPOUNDS AND THEIR FLUORINATED ANALOGUES

Oleksandr BURMISTROV

Donetsk National Medical University, Ukraine
burmistrov1937@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-8328-0091>

Liudmyla SUKHOVIRSKA ✉

Donetsk National Medical University, Ukraine
suhovirskaya2011@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-0353-9354>

Vasyl BOLILYI

Volodymyr Vynnychenko Central Ukrainian State Pedagogical University, Ukraine
vasyl.bolilyj@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1923-1058>

ABSTRACT

Formulation of the problem. The study of acoustic spectra of aromatic compounds and their fluorinated analogs shows that a simple area of acoustic dispersion is observed in these liquids, which is due to the processes of vibrational relaxation – the transfer of the energy of translational motion of molecules to the vibrational degrees of freedom and vice versa. Differences in the interpretation of molecular mechanisms of acoustic relaxation are explained by the fact that, until recently, there was no experimental data on the acoustic spectra of aromatic compounds and their fluorinated analogs in wide ranges of temperatures and frequencies.

Materials and methods. The study examines the Mandelstam-Brillouin method of acoustic spectroscopy, improved by an automated experimental setup.

To achieve the goal, the following research methods were used: empirical (observation, comparison), theoretical (material analysis, idealization, imaginary experiment), and computer modeling.

Results. Modern advances in Mandelstam-Brillouin spectroscopy make it possible to reliably measure the velocity and absorption of hypersonic waves in transparent liquids at different temperatures (including even the critical ones), as well as to study the Rayleigh scattering spectra in liquid crystals, metals, and semiconductors. The improved experimental setup made it possible to measure the absorption and speed of sound in a wider temperature range and frequency range (up to 7.0 GHz) in a number of aromatic compounds and their fluorinated analogs, to clarify the molecular mechanisms responsible for acoustic relaxation.

Conclusions. This work investigates an approach to explaining the molecular mechanisms of relaxation processes in liquid aromatic compounds and their fluorinated analogs, which is based on taking into account the role of weak intermolecular bonds.

KEYWORDS: *acoustic spectrum; aromatic compound; Mandelstam-Brillouin spectroscopy; optical installation; experiment.*

ВСТУП

Постановка проблеми. Ароматичні сполуки (арени) та їх фторовані аналоги володіють властивостями, необхідними в самих різних областях людської діяльності. Вони широко використовуються в техніці (виготовлення тротилу, фенолу, бензилхлориду, парфумерна і харчова промисловість, в фармакології і медицині, змащування, теплоносії, розчинники, різні тепло- і електроізоляційні матеріали, тощо). Ряд фторорганічних сполук володіють поверхнево-активними властивостями і в зв'язку з цим широко використовуються для гідрофотизації поверхонь, наприклад скла, кераміки та ін. За своїми властивостями вони суттєво відрізняються від вуглецевих аналогів. Широкі можливості практичного використання фторорганічних сполук вказують на необхідність пошуку різних методів всебічного дослідження їх фізичних і хімічних властивостей.

Мета статті. На основі удосконалення методу акустичної спектроскопії Мандельштама-Бріллюена описати оригінальну автоматизовану експериментальну установку для дослідження ароматичних сполук та їх фторованих аналогів через вимірювання коефіцієнту поглинання і швидкості поширення звуку в діапазоні частот від 1,0 до 7,0 ГГц.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для досягнення поставленої мети були використані такі методи дослідження:

- теоретичні – аналіз наукової літератури з проблеми акустичних спектрів ароматичних сполук та їх фторованих аналогів, метод акустичної спектроскопії Мандельштама-Бріллюена;
- емпіричні – порівняння проведеного експерименту методом акустичної спектроскопії Мандельштама-Бріллюена із аналізами результатів дослідження на вдосконаленій експериментальній установці;
- комп'ютерне моделювання результатів дослідження.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Одним із найважливіших типів взаємодії випромінювання з речовиною є процес розсіяння світла. Це явище виникає в результаті існування в реальних фізичних об'єктах певних неоднорідностей діелектричної або магнітної проникності і зв'язане з динамікою цих неоднорідностей, яка в свою чергу визначається рухом молекул досліджуваної системи. У випадку поляризованих спектрів релеєвського розсіяння фізичною причиною вказаних неоднорідностей є флуктуації густини, які спричиняють флуктуації показника заломлення світла.

Послідовний аналіз показує, що спектральна інтенсивність світла, розсіяного на флуктуаціях густини в рідині далеко від критичної точки, пропорційна просторово-часовому Фур'є-образу кореляційної функції густини $S(\vec{k}, \omega)$:

$$I(\vec{R}, \omega) = \frac{I_0 V \sin^2 \varphi \omega_0^4}{R^2 16 \pi^2 c^4} \left[\frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} \right]_T^2 S(\vec{k}_0, \omega), \tag{1}$$

де I_0 – інтенсивність поляризованого падаючого світла; \vec{k}_0 – хвильовий вектор; ω – частота падаючого світла розсіяного в напрямку R під кутом φ до напрямку вектора падаючого світла; V – розсіюючий об'єм; ε, ρ – відповідно діелектрична проникність і густина середовища; c – швидкість поширення світла.

Із співвідношення (1) легко перейти до відомої формули Ейнштейна, яка зв'язує інтегральну інтенсивність розсіяного світла з термодинамічними параметрами досліджуваного зразка рідини:

$$I(R) = \frac{I_0 V \sin^2 \varphi \omega_0^4}{R^2 16 \pi^2 c^4} \left[\frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} \right]_T^2 \rho^2 K_B T \beta_T, \tag{2}$$

де β_T – ізотермічна стисливість рідини, $\beta_T = \frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_T$; T – абсолютна температура; K_B – постійна Больцмана.

Щоб отримати акустичні характеристики досліджуваного зразка із спектру розсіяного світла, необхідно розрахувати $S(\vec{k}, \omega)$ (Bialkowski, Astrath, Proskurnin, 2019; Picqué, Hänsch, 2019; Kargar, Balandin, 2021; Ballmann, Meng, Yakovlev, 2019). Розв'язуючи лінеаризовані рівняння гідродинаміки, Маунштейн отримав вираз для $S(\vec{k}, \omega)$ в гідродинамічному наближенні:

$$S(\vec{k}, \omega) = \rho^2 K_B T \beta_T \left\{ \frac{c_P - c_\vartheta}{c_P} \frac{\frac{2\kappa K^2}{\rho \cdot c_P}}{\left[\frac{\kappa K^2}{\rho c_P} \right]^2 + \omega^2} + \frac{c_\vartheta}{c_P} \left[\frac{\Gamma K^2}{\Gamma K^2 + (\omega + cK)^2} - \frac{\Gamma K^2}{\Gamma K^2 + (\omega - cK)^2} \right] \right\}. \tag{3}$$

Перший член – незміщена компонента або релеєвська компонента, контур якої має вид функції Лоренца з напівшириною

$$\delta \omega_P = \frac{2\kappa K^2}{\rho \cdot c_P}, \tag{4}$$

де κ – коефіцієнт теплопровідності.

Два других члени описують відомий дублет, передбачений Мандельштамом і вперше виявлений Гроссом (Barone et al., 2021; Kargar & Balandin, 2021; Li et al., 2022; Ballmann et al., 2019).

Компоненти дублета зміщені відносно частоти ω_0 на величину $\mp \Delta \omega$, яка дорівнює частоті звуку,

$$\mp \Delta \omega = \mp \vartheta_\Gamma \cdot K, \tag{5}$$

де $\vartheta_\Gamma = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_S}$ – адіабатична швидкість звуку (Besley, 2021; Ma et al., 2022).

Контури зміщених компонент мають вид функції Лоренца, напівширина ω_{MB} якої зв'язана з декрементом затухання звуку Γ співвідношенням:

$$\delta \omega_{MB} = 2\Gamma K^2, \tag{6}$$

де

$$\Gamma = \frac{1}{2\rho} \left[\frac{4}{3} \eta_S + \eta_V + \kappa \left(\frac{1}{c_V} - \frac{1}{c_P} \right) \right]. \tag{7}$$

Із співвідношень (5) і (6) відповідно випливають формули для розрахунку швидкості поширення і амплітудного коефіцієнта поглинання звуку:

$$\vartheta_\Gamma = \frac{c_0}{2n} \cdot \frac{\Delta \omega_{MB}}{\omega_0} \cdot \frac{1}{\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} = \frac{c_0}{n} \cdot \frac{\Delta \vartheta_{MB}}{\vartheta_0} \cdot \frac{1}{\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}, \tag{8}$$

$$\alpha = \frac{\delta \omega_{MB}}{2\vartheta_\Gamma} = \frac{\pi c_0}{\vartheta_\Gamma} \cdot \Delta \vartheta_{MB}, \tag{9}$$

де c_0 – швидкість поширення світла у вакуумі; n – показник заломлення світла в дослідному зразку; θ – кут розсіяння; $\Delta \omega_{MB}$ і $\delta \omega_{MB}$ – відповідно зміщення і напівширина компонент Мандельштама-Бриллюена; ω_0 – циклічна частота випромінювання лазера.

Величина спектрального зміщення дублету Мандельштама-Бриллюена в рідинах $\approx 0,1 \text{ см}^{-1}$, що відповідає частоті звукової хвилі $\approx 3 \text{ ГГц}$. Таким чином, вимірювання зміщення і напівширин зміщених компонент дозволяє згідно співвідношень (8) і (9) визначити швидкість звуку і коефіцієнт поглинання в гіперзвуковому діапазоні частот, поки ще не доступно для вимірювання прямим і імпульсним акустичними методами (Picqué & Hänsch, 2019; Ciucci, 2019).

Єдине обмеження умови: $\delta \omega_P$ і $\delta \omega_{MB} \ll \Delta \omega$, при яких отримані формули (8) та (9) (Mukamel et al., 2020; Pureza et al., 2020).

Зауважимо, що експериментальне визначення величини зміщення напівширин бокових компонент пов'язане із значними труднощами. Це пояснюється малим розщепленням спектральної лінії і малою інтенсивністю розсіяного випромінювання в порівнянні з падаючим (Wildi et al., 2020; Ma et al., 2022).

Сучасні досягнення Мандельштам-Бріллюєнської спектроскопії дозволяють проводити надійні виміри швидкості і поглинання гіперзвукових хвиль в прозорих рідинах при різних температурах (включаючи навіть критичну), а також досліджувати спектри релеєвського розсіяння в рідких кристалах, металах, напівпровідниках. Принципіальна схема відомих із літератури установок для дослідження спектрів Мандельштама-Бріллюєна в рідинах однакова. Відмінність між ними полягає в реєструючій частині. В літературі (Bialkowski et al., 2019; Piergrossi et al., 2019; Barone et al., 2021; Picqué & Hänsch, 2019; Maiuri et al., 2019; Ciucci, 2019; Mukamel et al., 2020; Pupeza et al., 2020; Besley, 2021) описані різні експериментальні установки для отримання і дослідження спектрів Мандельштама-Бріллюєна в рідинах, але вони мають, на нашу думку, деякі недоліки:

а) відсутність можливості проводити багатокутові вимірювання, що обмежує частотний діапазон досліджень, а в результаті як наслідок – не дозволяє вивчати такі фундаментальні характеристики речовин як розміри, форму частинок, прослідкувати утворення більш складних структур (великих молекул, кластерів і т.п.);

б) сканування тиском, яке реалізується на принципі зміни показника заломлення робочої рідини інтерферометра Фабрі-Перо, розміщеного в барокамері, що позбавляє можливості проводити виміри при слабких сигналах і потребує довготривалого накопичення;

в) відсутність контролю інтенсивності збуджуючих джерел випромінювання, що також ускладнює реєстрацію слабких спектрів;

г) вузький температурний інтервал вимірювань та ін.

Для дослідження ароматичних сполук та їх фторованих аналогів, вимірюючи коефіцієнт поглинання і швидкість поширення звуку в діапазоні частот від 1,0 до 7,0 ГГц, під час лабораторних занять, студенти Донецького національного медичного університету, використовували метод акустичної спектроскопії Мандельштама-Бріллюєна, суттєво удосконаливши його.

Оптична установка, яка нами досліджується, оригінальна і позбавлена вказаних вище недоліків, її блок-схема представлена на рис.1.

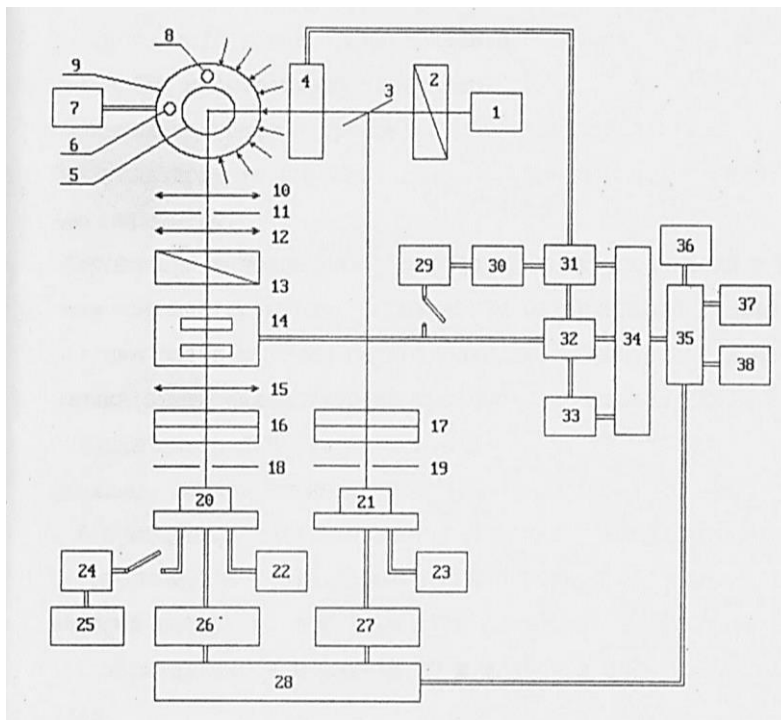


Рис. 1. Блок-схема оптичного спектрометра Мандельштама-Бріллюєна

Джерело: авторська розробка.

Вертикально поляризоване випромінювання лазера (1) після призми Глана (2) з допомогою світлороздільної пластинки (3) розділяється на два канали: опорний, для врахування можливої нестабільності випромінювання лазера, який поступає в фотоелектронний помножувач ФЕП-79-21 і далі в блок опорного сигналу, і вимірвальний – в ФЕП-79-20 і далі в блок вимірвального сигналу.

Блок реєстрації опорного сигналу включає в себе світлороздільну пластинку (3) і блок ФЕП-79-21. Останній складається із кожуха спеціальної конструкції, всередині якого розміщено ФЕП-79. На вхідному вікні кожуха ФЕП-79 прикріплено тримач реєструємої діафрагми (19) і нейтральних світлофільтрів (17). На задній кришці кожуха ФЕП-79 встановлено два роз'єми типу CP50-73 Ф. Один – для підключення високовольтного блоку БНВ 30 – 01 33, другий – для підключення виносного підсилювача – який формує імпульси (27).

Фотоприймач ФЕП-79-21 перетворює оптичне неперервне випромінювання лазера в електричні імпульси, які через підсилювач-формував (27) поступають в частотомір 50–41 28, який працює в режимі підрахунку фотонів, де порівнюється з поступаючими туди ж імпульсами з блоку реєстрації каналу сигналу.

Оптико-спектральний блок складається із вхідної лінзи (10), польової діафрагми (11), вхідного об'єктива (12), призми Глана (13), скануючого інтерферометра (14) і вихідного об'єктива (15).

Всі оптичні елементи цього блоку розраховані і виготовлені таким чином, щоб в фокальній площині вихідного об'єктива (15) створювалось збільшене зображення польової діафрагми (11).

Із випромінювання, розсіяного досліджуванним зразком, яке пройшло польову діафрагму (11), з допомогою вхідного об'єктива «Таір-33» (12) формується паралельний пучок, в якому повинен працювати інтерферометр Фабрі-Перо.

З метою вибору оптимальних умов освітлення інтерферометра вхідний об'єктив (12) закріплений в юстировочному тримачі, з допомогою якого можна плавно переміщувати об'єктив у взаємно перпендикулярних напрямках.

Щоб зберегти бажану поляризацію досліджуваного променя між вхідним об'єктивом (12) і інтерферометром (14) в спеціальному утримувачі з лімбовими поділками можна встановлювати поляризаційну призму Глана (13). Тримач дозволяє переміщувати призму Глана в площині, перпендикулярній оптичній вісі системи.

Центральний вузол блоку – скануючий інтерферометр Фабрі-Перо (14) оригінальної конструкції, змонтований на сталій основі, до якої кріпляться тримачі дзеркал. Одне із дзеркал закріплене в оправі жорстко, друге – приклеєне на полий циліндр із п'єзокераміки ЦТС-19, яка в свою чергу також приклеєна до тримача.

Внутрішня і зовнішня поверхні п'єзокерамічного циліндру металізовані і створюють циліндричний конденсатор, до виводів якого подається пилкоподібна напруга 0 – 300 В і частотою 100 Гц, яка генерується генератором пилкоподібної напруги ГПНВ (29). П'єзокерамічний циліндр дозволяє періодично змінювати базу інтерферометра на величину порядку довжини хвилі і забезпечувати його настройку на різні моди лазера.

Дзеркала інтерферометра мають багат шарове інтерференційне покриття з коефіцієнтом відбиття $\rho \approx 0,95-0,96$ в області довжин хвиль світла $\lambda = 560-800$ нм. Якість обробки поверхні дзеркал $\approx \frac{1}{100}$. Апертура – 20 мм.

Обертанням накатаної гайки, яка забезпечує поступальний рух вздовж оптичної вісі одного із дзеркал, можна вручну плавно, в межах від 0,2 см до 2,0 см, змінювати базу t інтерферометра без його суттєвої розюстировки.

З метою ступінчатої зміни бази інтерферометра виготовлено 7 еталонів для значень бази t : 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4. Точність фіксування певного значення бази не перевищує 25 мкм.

Дослідження інтерферометра показали, що при подачі на п'єзокерамічний елемент пилкоподібної напруги від 0 до 200 В забезпечується сканування по спектру в діапазоні (8) інтерференційних порядків. Дослідження проводились із одномодовим одночастотним лазером, генеруючим довжину хвилі $\lambda = 0,63$ мкм.

Для контролю юстировки подається одночасно на вхідний об'єктив інтерферометра (12) – випромінювання лазера, на виводи п'єзокераміки рухомого дзеркала інтерферометра – пилкоподібна напруга. З виходу вимірювального ФЕП-79 (21) через аналоговий підсилювач УПТ (22) на екрані ЕО (25) реєструється сигнал, відповідний модовій структурі отриманого на екрані лазерного випромінювання. Процес оптимізації юстировки (лінійність сканування) заключається в досягненні однакової інтенсивності всіх порядків інтерференції сигналу, отриманого на екрані ЕО (25).

Установка інтерферометра в горизонтальній площині (горизонтування) здійснюється за допомогою чотирьох вітових ніжок, вгвинчених в основу. Юстировка забезпечується двома мікрометричними гвинтами, закріпленими на тримачі рухомого дзеркала. Критерій юстировки – за візуальним спостереженням інтерференційних кілець – відсутність «дихання» кілець при зміщенні очей перпендикулярно оптичній вісі.

ОБГОВОРЕННЯ

Проаналізувавши будову удосконаленої нами оригінальної автоматизованої експериментальної установки, виділили основні позитивні особливості:

а) наявність для досліджуваного зразка кювети і оптичного термостата спеціальної конструкції дозволяє здійснювати виміри під різними кутами;

б) спеціальний блок керування кутом повороту падаючого променя дозволяє автоматично вибирати кут спостереження спектрів розсіяння;

в) застосування в якості селектуючого пристрою скануючого інтерферометра Фабрі-Перо дозволяє виділяти вузькі ділянки спектрів (розширення $\cong 0,002$ см⁻¹);

г) система реєстрації спектрів працює в режимі рахування фотонів;

д) присутність опорного каналу дозволяє уникати впливу нестабільності роботи лазера на процес реєстрації спектрів, що значно підвищує їх якість;

с) управління установкою, реєстрація і обробка спектрів здійснюється автоматично і оперативно контролюється на екрані дисплея;

к) використання графопобудовників або графічних дисплеїв дозволяє візуалізувати спектри, динаміку зміни, вираховувати характерні параметри.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

В даній роботі ми представили презентацію удосконаленої нами оригінальної автоматизованої експериментальної установки.

Удосконалена установка дозволила нам дослідити ароматичні сполуки та їх фторовані аналоги за допомогою методу акустичної спектроскопії Мандельштама-Бріллюена для вимірювання коефіцієнту поглинання і швидкості поширення звуку в діапазоні частот від 1,0 до 7,0 ГГц.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bialkowski, S.E., Astrath, N. G.C., & Proskurnin, M. A. (2019). *Photothermal spectroscopy methods*. John Wiley & Sons.
2. Piergrossi, V., Fasolato, C., Capitani, F., Monteleone, G., Postorino, P., & Gislon, P. (2019). Application of Raman spectroscopy in chemical investigation of impregnated activated carbon spent in hydrogen sulfide removal process. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(3), 1227-1238.
3. Barone, V., Alessandrini, S., Biczysko, M., Cheeseman, J. R., Clary, D. C., McCoy, A. B., ... & Puzzarini, C. (2021). Computational molecular spectroscopy. *Nature Reviews Methods Primers*, 1(1), 1-27.
4. Picqué, N., & Hänsch, T. W. (2019). Frequency comb spectroscopy. *Nature Photonics*, 13(3), 146-157.
5. Maiuri, M., Garavelli, M., & Cerullo, G. (2019). Ultrafast spectroscopy: state of the art and open challenges. *Journal of the American Chemical Society*, 142(1), 3-15.
6. Ciucci, F. (2019). Modeling electrochemical impedance spectroscopy. *Current Opinion in Electrochemistry*, 13, 132-139.
7. Mukamel, S., Freyberger, M., Schleich, W., Bellini, M., Zavatta, A., Leuchs, G., ... & Laussy, F. (2020). Roadmap on quantum light spectroscopy. *Journal of physics B: Atomic, molecular and optical physics*, 53(7), 072002.
8. Pupeza, I., Huber, M., Trubetskov, M., Schweinberger, W., Hussain, S. A., Hofer, C., ... & Krausz, F. (2020). Field-resolved infrared spectroscopy of biological systems. *Nature*, 577(7788), 52-59.
9. Besley, N. A. (2021). Modeling of the spectroscopy of core electrons with density functional theory. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Molecular Science*, 11(6), e1527.
10. Blanco-Cuaresma, S. (2019). Modern stellar spectroscopy caveats. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 486(2), 2075-2101.
11. Chide, B., Maurice, S., Murdoch, N., Lasue, J., Bousquet, B., Jacob, X., ... & Wiens, R. C. (2019). Listening to laser sparks: a link between Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, acoustic measurements and crater morphology. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 153, 50-60.
12. Wildi, T., Voumard, T., Brasch, V., Yilmaz, G., & Herr, T. (2020). Photo-acoustic dual-frequency comb spectroscopy. *Nature communications*, 11(1), 1-6.
13. Ma, Y., Hong, Y., Qiao, S., Lang, Z., & Liu, X. (2022). H-shaped acoustic micro-resonator-based quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy. *Optics Letters*, 47(3), 601-604.
14. Lee, I. H., Yoo, D., Avouris, P., Low, T., & Oh, S. H. (2019). Graphene acoustic plasmon resonator for ultrasensitive infrared spectroscopy. *Nature nanotechnology*, 14(4), 313-319.
15. Mohebbifar, M. R. (2020). The laser power effect on the performance of gas leak detector based on laser photo-acoustic spectroscopy. *Sensors and Actuators A: Physical*, 305, 111914.
16. Pham, M. T., Darst, J. J., Finegan, D. P., Robinson, J. B., Heenan, T. M., Kok, M. D., ... & Shearing, P. R. (2020). Correlative acoustic time-of-flight spectroscopy and X-ray imaging to investigate gas-induced delamination in lithium-ion pouch cells during thermal runaway. *Journal of Power Sources*, 470, 228039.
17. Kargar, F., & Balandin, A. A. (2021). Advances in Brillouin-Mandelstam light-scattering spectroscopy. *Nature Photonics*, 15(10), 720-731.
18. Li, T., Li, F., Liu, X., Yakovlev, V. V., & Agarwal, G. S. (2022). Quantum-enhanced stimulated Brillouin scattering spectroscopy and imaging. *Optica*, 9(8), 959-964.
19. Ballmann, C. W., Meng, Z., & Yakovlev, V. V. (2019). Nonlinear Brillouin spectroscopy: what makes it a better tool for biological viscoelastic measurements. *Biomedical Optics Express*, 10(4), 1750-1759.
20. Kargar, F., & Balandin, A. A. (2020). Brillouin-Mandelstam Light Scattering Spectroscopy: Applications in Phononics and Spintronics. *arXiv preprint arXiv:2011.08352*.
21. Kuang, S. Q., Dai, L. Y., Kang, X. W., & Yao, D. L. (2020). Pole analysis on the hadron spectroscopy of $\Lambda_b \rightarrow J/\psi p K^-$. *The European Physical Journal C*, 80(5), 1-11.

REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. Bialkowski, S.E., Astrath, N. G.C., & Proskurnin, M. A. (2019). *Photothermal spectroscopy methods*. John Wiley & Sons.
2. Piergrossi, V., Fasolato, C., Capitani, F., Monteleone, G., Postorino, P., & Gislon, P. (2019). Application of Raman spectroscopy in chemical investigation of impregnated activated carbon spent in hydrogen sulfide removal process. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(3), 1227-1238.
3. Barone, V., Alessandrini, S., Biczysko, M., Cheeseman, J. R., Clary, D. C., McCoy, A. B., ... & Puzzarini, C. (2021). Computational molecular spectroscopy. *Nature Reviews Methods Primers*, 1(1), 1-27.
4. Picqué, N., & Hänsch, T. W. (2019). Frequency comb spectroscopy. *Nature Photonics*, 13(3), 146-157.
5. Maiuri, M., Garavelli, M., & Cerullo, G. (2019). Ultrafast spectroscopy: state of the art and open challenges. *Journal of the American Chemical Society*, 142(1), 3-15.
6. Ciucci, F. (2019). Modeling electrochemical impedance spectroscopy. *Current Opinion in Electrochemistry*, 13, 132-139.
7. Mukamel, S., Freyberger, M., Schleich, W., Bellini, M., Zavatta, A., Leuchs, G., ... & Laussy, F. (2020). Roadmap on quantum light spectroscopy. *Journal of physics B: Atomic, molecular and optical physics*, 53(7), 072002.
8. Pupeza, I., Huber, M., Trubetskov, M., Schweinberger, W., Hussain, S. A., Hofer, C., ... & Krausz, F. (2020). Field-resolved infrared spectroscopy of biological systems. *Nature*, 577(7788), 52-59.
9. Besley, N. A. (2021). Modeling of the spectroscopy of core electrons with density functional theory. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Molecular Science*, 11(6), e1527.
10. Blanco-Cuaresma, S. (2019). Modern stellar spectroscopy caveats. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 486(2), 2075-2101.
11. Chide, B., Maurice, S., Murdoch, N., Lasue, J., Bousquet, B., Jacob, X., ... & Wiens, R. C. (2019). Listening to laser sparks: a link between Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, acoustic measurements and crater morphology. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 153, 50-60.
12. Wildi, T., Voumard, T., Brasch, V., Yilmaz, G., & Herr, T. (2020). Photo-acoustic dual-frequency comb spectroscopy. *Nature communications*, 11(1), 1-6.
13. Ma, Y., Hong, Y., Qiao, S., Lang, Z., & Liu, X. (2022). H-shaped acoustic micro-resonator-based quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy. *Optics Letters*, 47(3), 601-604.
14. Lee, I. H., Yoo, D., Avouris, P., Low, T., & Oh, S. H. (2019). Graphene acoustic plasmon resonator for ultrasensitive infrared spectroscopy. *Nature nanotechnology*, 14(4), 313-319.
15. Mohebbifar, M. R. (2020). The laser power effect on the performance of gas leak detector based on laser photo-acoustic spectroscopy. *Sensors and Actuators A: Physical*, 305, 111914.

16. Pham, M. T., Darst, J. J., Finegan, D. P., Robinson, J. B., Heenan, T. M., Kok, M. D., ... & Shearing, P. R. (2020). Correlative acoustic time-of-flight spectroscopy and X-ray imaging to investigate gas-induced delamination in lithium-ion pouch cells during thermal runaway. *Journal of Power Sources*, 470, 228039.
17. Kargar, F., & Balandin, A. A. (2021). Advances in Brillouin–Mandelstam light-scattering spectroscopy. *Nature Photonics*, 15(10), 720-731.
18. Li, T., Li, F., Liu, X., Yakovlev, V. V., & Agarwal, G. S. (2022). Quantum-enhanced stimulated Brillouin scattering spectroscopy and imaging. *Optica*, 9(8), 959-964.
19. Ballmann, C. W., Meng, Z., & Yakovlev, V. V. (2019). Nonlinear Brillouin spectroscopy: what makes it a better tool for biological viscoelastic measurements. *Biomedical Optics Express*, 10(4), 1750-1759.
20. Kargar, F., & Balandin, A. A. (2020). Brillouin-Mandelstam Light Scattering Spectroscopy: Applications in Phononics and Spintronics. *arXiv preprint arXiv:2011.08352*.
21. Kuang, S. Q., Dai, L. Y., Kang, X. W., & Yao, D. L. (2020). Pole analysis on the hadron spectroscopy of $\Lambda b \rightarrow J/\Psi p K^-$. *The European Physical Journal C*, 80(5), 1-11.

Матеріал надійшов до редакції 20.05.2024р.

