

**ВИЗНАЧЕННЯ АКУСТООПТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА
ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНИЙ КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРІЇ ЗРАЗКІВ**

Method and experimental setup for acoustooptic efficiency definition for solid-state material specimens by Bragg diffraction are described. Preliminary specimen geometry control by interferometric technique was proposed to increase reliability of experimental results and appropriate setup scheme was shown.

Keywords: *acoustic wave, acoustooptic efficiency, Bragg diffraction, interferometric control.*

Описано методику та схему експериментальної установки для визначення акустооптичної ефективності зразків твердотільних матеріалів методом Брегівської дифракції. Для підвищення достовірності експериментальних результатів запропоновано проводити попередній контроль геометрії зразків інтерферометричним методом та наведено схему відповідної установки.

Ключові слова: *акустична хвиля, акустооптична якість, Брегівська дифракція, інтерферометричний контроль.*

Одним із сучасних експериментальних методів визначення акустооптичної ефективності твердотільних матеріалів є метод з використанням Брегівської дифракції (БД) [1]. Особливістю цього методу є використання під час досліджень ультразвукових хвиль з частотами 100...300 МГц. Суть методу для визначення пружнооптичних коефіцієнтів p_{ij} чи коефіцієнта акустооптичної якості M_2 полягає у вимірюванні інтенсивності світла, що продифрагувало у твердотільному зразку, який досліджується, і порівняння цієї інтенсивності з інтенсивністю світла, що продифрагувало в твердому тілі або рідині з відомими фотопружними властивостями. Вперше експериментальна установка для досліджень за таким методом була розроблена та застосована Смітом і Корпелом [2]. Під час експериментальних досліджень короткі ультразвукові імпульси вводять за допомогою п'єзоперетворювача в акустооптичну комірку (комірку Брега), що містить зразок твердого тіла (досліджуваного матеріалу), який розміщений у середовищі рідини з відомими властивостями. Проте за допомогою цієї методики не можна визначити акустооптичну ефективність для зсувних (поперечних) акустичних хвиль (АХ), оскільки такі хвилі не поширюються в рідинах. Ці труднощі можна долати, застосовуючи методики, запропоновані Діксон та Коен [3]. Вони замінили еталонну рідину твердим тілом, через яке добре поширюються зсувні АХ. До так званого буфера (акустооптичної комірки) з плавненого кварцу (SiO_2) з відомими фотопружними властивостями приклеюється зразок, що досліджується (див. рис. 1).

Методика та експериментальна установка визначення параметрів акустооптичної якості. Згідно з методикою Діксона–Коена, спочатку спостерігають дифракцію лазерного променя на ультразвукових імпульсах в буфері, а потім у зразку, що приклеєний до буфера (див. рис. 1). Проводять дві серії вимірювань, за яких як детектор використовують швидкісний фотоприймач, сигнал з якого подається на осцилограф. У процесі кожного вимірювання лазерний промінь посилюється і приймається під відповідними кутами Брега (різними для еталону і матеріалу зразка).

На рис. 2а показано вигляд осцилограми імпульсів світла, що продифрагувало в буфері. Перший світловий імпульс I_1 відповідає акустичному імпульсу, що поширюється в буфері у напрямку від п'єзоперетворювача до зразка (див.

рис. 1б). Другий імпульс I_2 пов'язаний з частковим відбиванням АХ від шару речовини, що склеює буфер і зразок, назад в буфер. Третій імпульс I_3 відповідає дифракції на акустичному імпульсі, що проходить через шар клею (склейку) у зразок, потім відбивається від вільної грані, і знову через склейку повертається у буфер.

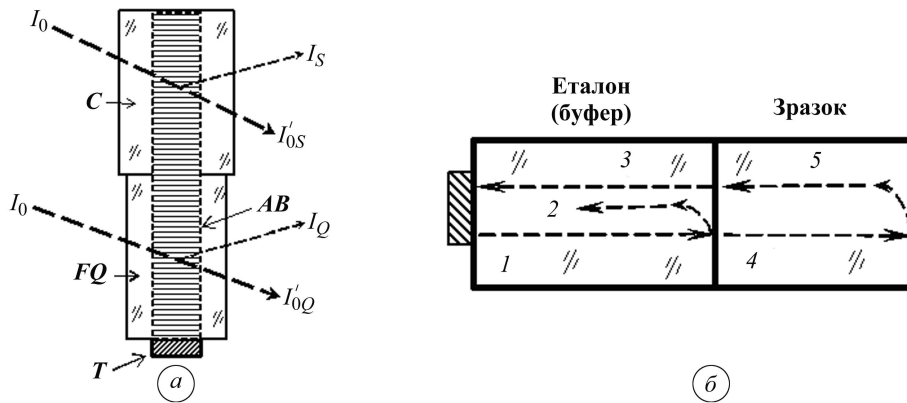


Рис. 1. Схеми визначення акустооптичної якості для поздовжніх і поперечних АХ за методом Діксона–Коена (а) та поширення АХ в буфері і зразку, що досліджується (б). FQ – буфер з плавненого кварцу; T – п'єзоперетворювач; C – кристалічний зразок заданої орієнтації; AB – пучок АХ; I_Q – дифрагований промінь у буфері; I_S – дифрагований промінь у зразку; I'_0 – нульовий порядок дифракції.

На рис. 2б показана осцилограма дифрагованих світлових імпульсів для випадку дифракції лазерного променя у зразку. Тут перший світловий імпульс I_4 пов'язаний з дифракцією на акустичному імпульсі, що поширюється від склейки до вільної грані. Другий імпульс I_5 відповідає акустичному імпульсу, що відбився від вільної грані. Інтенсивності розглянутих імпульсів визначаються співвідношенням [1]:

$$\left(\frac{n_s^6 p_s^2}{\rho_s v_s^3} \right) / \left(\frac{n_Q^6 p_Q^2}{\rho_Q v_Q^3} \right) = \frac{M_S}{M_Q} = \sqrt{\frac{(I_4 I_5)_S}{(I_1 I_3)_Q}}, \quad (1)$$

де n – показники заломлення; p – пружнооптичні коефіцієнти; ρ – густини матеріалів; v – швидкості АХ; M – коефіцієнти акустооптичної якості. У цьому співвідношенні величини з індексом s відносяться до зразка, а з індексом Q – до кварцового буфера. При цьому припускається, що це співвідношення не залежить від властивостей клею між буфером та зразком, оскільки вважається, що коефіцієнт пропускання склейки є однаковим для АХ, що поширюються в протилежних напрямках. Втрати в середовищі клею також не впливають на співвідношення (1).

У роботі [3] при визначенні пружнооптичних коефіцієнтів p_{ij} в $\text{Cd}_2(\text{MoO}_4)_3$ використовували вираз, що відрізняється від (1) врахуванням втрат, які зумовлені різницею показників заломлення буфера та зразка:

$$\left[\left(\frac{n_s^6 p_s^2}{\rho_s v_s^3} \right) \cdot \frac{n_s^2}{(n_s^2 + 1)^4} \right] = \left[\left(\frac{n_Q^6 p_Q^2}{\rho_Q v_Q^3} \right) \cdot \frac{n_Q^2}{(n_Q^2 + 1)^4} \right] \sqrt{\frac{(I_4 I_5)_S}{(I_1 I_3)_Q}}. \quad (2)$$

У роботі [4] цю методику використовували для дослідження акустооптичних властивостей кристалів ТГС. У всіх випадках похибка визначення p_{ij} становила $\sim 10\%$.

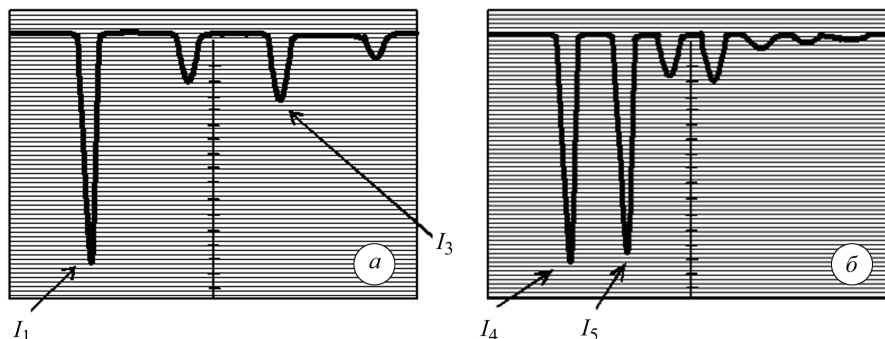


Рис. 2. Вигляд осцилограм сигналів з фотоприймача при дифракції в буфері (а) та досліджуваному зразку (б) під час визначення акустооптичної якості зразка методом БД.

На рис. 3. показано блок-схему розробленої автором експериментальної установки для вимірювання пружнооптичних коефіцієнтів методом БД. Джерелом світлового випромінювання 1 був одномодовий He-Ne лазер з вихідною потужністю 1,5 mW та діаметром променя \varnothing 0,8 mm. Світлозвукопроводи буферів 3 виготовляли з плавленого кварцу і мали розмір 12 mm вздовж напрямку поширення АХ. Для збудження АХ використовували п'єзоперетворювачі 7, які виготовляли з LiNbO_3 відповідної товщини і орієнтації – для поздовжньої та поперечної АХ. Сигнали керування на п'єзоперетворювачі подавали з високочастотного генератора 6, що мав вихідну потужність до 1 W.

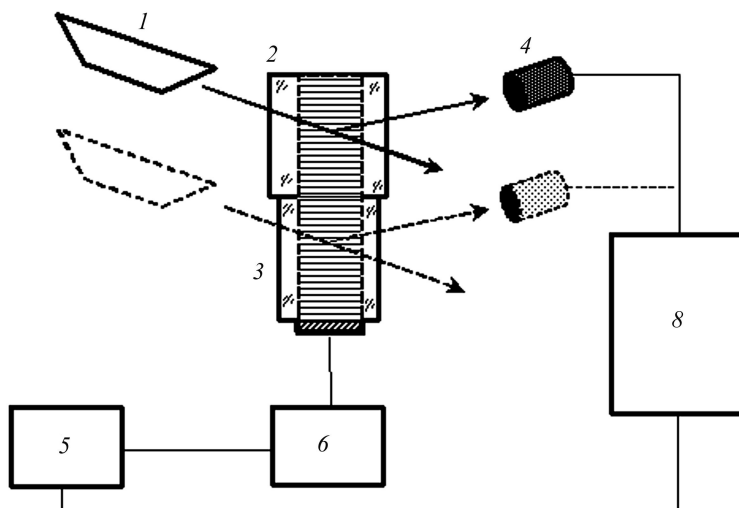


Рис. 3. Блок-схема установки для визначення акустооптичної якості твердотільних зразків методом БД: 1 – лазер; 2 – зразок; 3 – буфер; 4 – фотоприймач; 5 – імпульсний генератор; 6 – високочастотний генератор; 7 – п'єзоперетворювач; 8 – осцилограф.

Під час проведення досліджень з імпульсного генератора 5 подавали імпульсний сигнал (тривалість імпульсу $\tau \leq 0,4 \mu\text{s}$, період $T \geq 10 \mu\text{s}$) на входи амплітудного модулятора генератора 6 та осцилографа 8. Цим імпульсом модулювалася АХ (частота АХ $\sim 150 \text{ MHz}$), що поширювалася у матеріалі буфера 3 чи зразка 2. Дифрагований лазерний пучок приймався фотоприймачем 4, сигнал з

якого подавався на осцилограф 8. За допомогою осцилографа 8 проводилось вимірювання амплітуд сигналів, що відповідали інтенсивностям імпульсів I_1 , I_3 , I_4 та I_5 (див. рис. 2). В експериментальній установці використано лазер ЛГН-207А, високочастотний генератор Г4-143, імпульсний генератор Г5-75, осцилограф С1-99 та кремнієвий PIN фотодіод з попереднім підсилювачем серії S6468-02 фірми HAMAMATSU (Японія). Буфер разом із зразком кріпили на спеціальному координатному столику, що давав змогу їх пересувати вздовж напрямку поширення АХ та орієнтувати під кутом Брега відповідно для кожного матеріалу та частоти АХ.

Під час експериментальної апробації цієї установки на різних зразках зі скла та кристалічних матеріалів для одних зразків спостерігалася висока повторюваність отриманих результатів – середнє квадратичне відхилення σ не перевищувало 5%, для інших ця похибка досягала 50%, а для деяких зразків визначити їх акустооптичну ефективність взагалі не вдалося. Такі три випадки спостерігали як для скляних зразків, так і кристалічних з різних матеріалів та різних кристалографічних зрізів (орієнтацій). У випадку малого значення σ результати досліджень збігалися з літературними даними, а за великого були явно заниженими. Причиною випадку, коли акустооптичну ефективність не вдалося визначити, була відсутність сигналу, що відповідав інтенсивності імпульсу I_3 (див. рис. 2а).

Контроль геометрії зразків. Детальний огляд зазначених зразків виявив, що ті з них, для яких спостерігався великий розкид експериментальних результатів чи їх відсутність, мали значну непаралельність протилежних граней (клиновидність). Крім того, для деяких зразків ці протилежні грані мали ще й відхилення від площинності. Після такого огляду стала зрозумілою причина великого розкиду експериментальних результатів чи їх відсутності. Адже під час відбивання від перекошеної вільної грані АХ не буде поширюватися в протилежному напрямі, а під деяким кутом, який дорівнює подвійному куту перекошу грані α (див. рис. 4а). В такому випадку умова БД не буде одночасно виконуватись для імпульсів I_4 та I_5 , тобто результат вимірювання завжди буде заниженим. І за певної величини цього перекошу сигнал, що відповідає імпульсу I_3 , взагалі неможливо буде зареєструвати (див. рис. 4б). Такий випадок спостерігався для зразків, що були виготовлені у формі куба, розмір ребра становив ~ 10 mm, а перекош протилежних граней $\alpha \sim 1^\circ$.

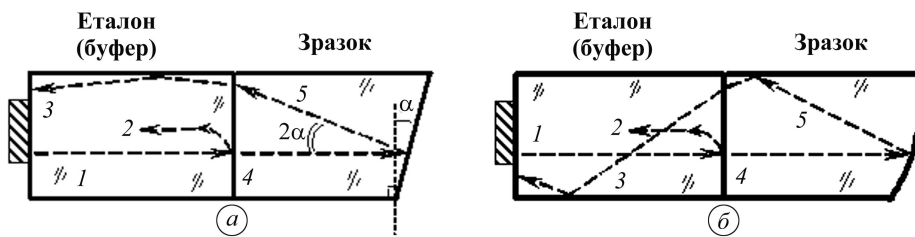


Рис. 4. Схеми поширення АХ у буфері і зразках зі скошеними вільними гранями: а – вільна грань, скошена під кутом α ; б – вільна грань, скошена та неплоска.

Отже, виникла необхідність контролю геометрії зразків на непаралельність протилежних граней, через які мала б поширюватись і відбиватись АХ, а також на відхилення їх від площинності. Якщо, наприклад, протилежні грані плоскі і кут між ними $\alpha \sim 1^\circ$, то для зразків з розміром ребра ~ 10 mm це можна проконтролювати за допомогою мікрометра, визначаючи різновтовщинність. Однак, якщо грані не плоскі, або кут $\alpha < 0,1^\circ$, то необхідно використовувати оптичні методи контролю геометрій поверхонь, зокрема інтерферометричні.

На рис. 5 зображено схему інтерферометричної установки, яка була запропонована автором для контролю геометрії поверхонь зразків із кристалічних та інших оптичних матеріалів. Установка побудована на базі інтерферометра Маха–Цендера і містить, крім інтерферометра, одномодовий лазер 1 з розширювачем променя 2, екран 8 для спостереження інтерференційних картин, та відеокамеру 9, що під'єднана до комп'ютера 10 – для реєстрації інтерференційних картин. Діаметр розширеного лазерного променя приблизно в 1,5 рази перевищував розміри поверхонь зразків.

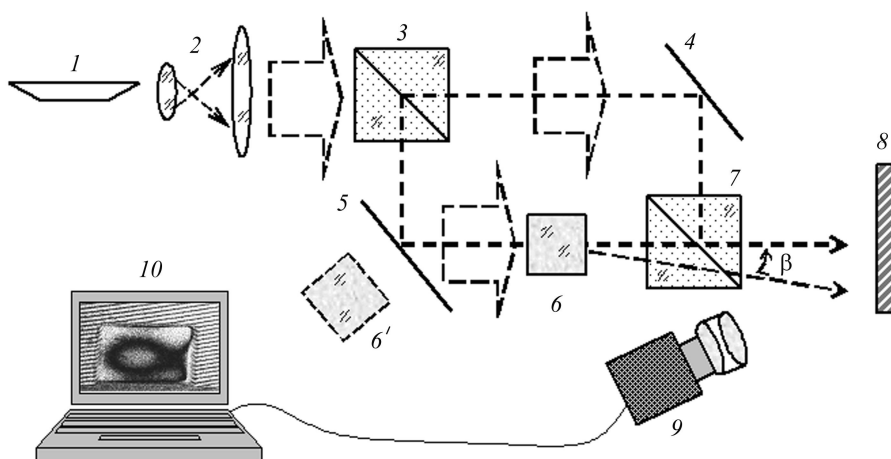


Рис. 5. Схема інтерферометричної установки: 1 – лазер; 2 – розширювач променя; 3, 7 – світлоподільники; 4, 5 – поворотні дзеркала; 6, 6' – зразок; 8 – екран; 9 – відеокамера; 10 – ПК.

Під час контролю зразок 6 розміщувався в одному з плечей інтерферометра. Якщо протилежні грані паралельні, то промінь, що пройшов через зразок, не змінює свого напрямку поширення і період інтерференційної картини на екрані 8 не зміниться. За наявності між протилежними гранями кута α промінь після зразка відхилиться на кут β і відповідно зміниться інтерференційна картина. Період інтерференційної картини Λ та кут β пов'язані співвідношенням [6]:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2 \cdot \sin \beta / 2}, \quad (3)$$

де λ – довжина хвилі лазерного випромінювання. Якщо кут перекошу грані $\alpha < 6^\circ$, то співвідношення між кутами α і β знаходять за виразом $\alpha = \frac{\beta}{(n_s - 1)}$, або, враховуючи (3), за виразом [6]:

$$\alpha = \frac{2}{(n_s - 1)} \arcsin \frac{\lambda}{2\Lambda},$$

де n_s – показник заломлення матеріалу зразка. Методика визначення кута α , різновитчинності та геометрії граней зразка за інтерферограмами детально описана в роботі [6]. Знаючи геометрію зразка, можна передбачити напрями поширення в ньому АХ і, в результаті, коректніше вимірювати амплітуди імпульсів I_3 , I_4 та I_5 . Якщо зразки мають перекошені та неплоскі грані, то амплітуди імпульсів I_1 , I_3 , I_4 та I_5 необхідно міряти окремо, кожен раз добиваючись їх максимального значення, тобто не за двома осцилограмами, як показано на рис. 2, а за чотирма. За використання такої методики у процесі апробації вищеописаної установки (рис. 3) розбіжність експериментальних даних не перевищувала 7%.

ВИСНОВКИ

Описано методику та схему експериментальної установки для визначення акустооптичної ефективності зразків твердотільних матеріалів методом Брегівської дифракції. Простежено, що для підвищення достовірності результатів експериментальних досліджень необхідно проводити попередній контроль геометрії зразків. Запропоновано проводити такий контроль інтерферометричним методом та наведено схему відповідної установки.

1. *Нарасимхамурти Т.* Фотоупругие и электрооптические свойства кристаллов. – М.: Мир, 1984, – 624 с.
2. *Smith T., Korpel A.* Measurement of light-sound interaction efficiencies in solids // IEEE J. Quantum Electron. – 1965. – № 1. – P. 283.
3. *Dixon R. W., Cohen M. G.* A new technique for measuring magnitudes of photoelastic tensors and its application to lithium niobate // Appl. Phys. Lett. – 1966. – № 9. – P. 190.
4. *Рассеяние света на упругих волнах в кристаллах молибдата гадолиния / С. Х. Есяян, Х. С. Багдасаров, В. В. Леманов и др.* // ФТТ. – 1974. – **16**, вип. 1. – С. 143–151.
5. *Акустооптические свойства кристаллов ТГС / Б. А. Струков, А. В. Давтян, К. А. Минаев, А. А. Горпаев* // Изв. АН СССР. Серия физ. – 1983. – **47**, № 3. – С. 611–615.
6. *Вороняк Т. І., Юркевич О. В., Андрущак А. С.* Технологія контролю геометрії оптичних поверхонь зразків із кристалічних матеріалів // Вісн. НУ “Львівська політехніка”. Сер. “Електроніка”. – 2007. – № 592. – С. 157–163.

*Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка
НАН України, Львів*

*Одержано
28.01.2013*