

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

**Факультет радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем**

**С.М.Гойса, Зубрікова О.Г., Л.В.Іщук**

**Методичні вказівки до лабораторних робіт  
з курсу загальної фізики (розділ 2, "Молекулярна фізика")  
частина II**

**Видавнича лабораторія радіофізичного факультету  
Київського університету імені Тараса Шевченка**

**Київ 2019**

УДК 539.18 (075.8)  
ББК 22.383я73

Рецензент  
д-р фіз.-мат. наук, проф. Ю.С.Жаркіх

**Гойса С.М., Зубрікова О.Г., Іщук Л.В.**

Методичні вказівки до лабораторних робіт із курсу загальної фізики (розділ 2, "Молекулярна фізика") частина II.

Друга частина методичних рекомендацій до лабораторних робіт з курсу "Молекулярна фізика" присвячена визначенню молекулярних характеристик рідин та твердих тіл. В роботі 1 використовується метод капілярно-гравітаційних хвиль для визначення коефіцієнта поверхневого натягу деяких рідин. В роботі 2 визначається питома теплоємність деяких металів калориметричним методом. В роботі 3 вивчається явище фазового переходу метал-рідина, визначається питома теплота, необхідна для цього процесу, та зміна ентропії системи. Робота 4 присвячена методу визначення сталої кристалічної ґратки та індексів Міллера на моделях кристалів кубічної сингонії.

В кожній роботі коротко викладена фізична суть явищ, описані експериментальні установки та методики вимірювань, запропоновані завдання, контрольні запитання та рекомендована література. Виконання наведених лабораторних робіт сприятиме більш глибокому розумінню фізичних явищ у рідинах та твердих тілах.

Для студентів фізичних та радіофізичних спеціальностей університетів.

*Затверджено вченою радою радіофізичного факультету  
(протокол №2 від 9 жовтня 2017 року)*

УДК 539.18(075.8)  
ББК 22.383я73

© Гойса С.М., Зубрікова О.Г., Іщук Л.В., 2019  
© Видавнича лабораторія радіофізичного факультету  
Київського університету імені Тараса Шевченка

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

### ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИН МЕТОДОМ КАПІЛЯРНИХ ХВИЛЬ

**Мета роботи:** опанування методу капілярних хвиль для вимірювання коефіцієнта поверхневого натягу рідини; визначення коефіцієнта поверхневого натягу різних рідин вказаним методом.

**Прилади та обладнання:** генератор звукових частот, строботометр, мікроскоп, електромагнітний вібратор, кювета для рідини.

#### Завдання:

1. Ознайомитись з експериментальною установкою та методикою визначення коефіцієнту поверхневого натягу капілярним методом.
2. Виміряти довжини капілярних хвиль для декількох рідин (за вказівкою викладача).
3. Розрахувати коефіцієнт поверхневого натягу для вказаних рідин.
4. Знайти похибку вимірів.

#### Короткі теоретичні відомості

Робота, яку треба виконати, щоб ізотермічно і квазістатично (оборотно) збільшити поверхню рідини на одиницю при незмінному об'ємі, називається *коефіцієнтом поверхневого натягу*  $\sigma$ , або просто *поверхневим натягом*.

Для ізотермічного процесу робота  $A$ , виконана системою, дорівнює втраті вільної енергії  $F$  ( $F = U - TS$ , де  $U$  – внутрішня енергія системи,  $T$  – температура,  $S$  – ентропія).

$$-dF = \delta A.$$

Вільну енергію рідини, на яку не діють зовнішні сили, можна подати у вигляді

$$F = F_{об} + F_{пов},$$

де  $F_{об}$  – об'ємна складова вільної енергії,  $F_{пов}$  – її поверхнева складова. Величина  $F_{об}$  є сталою. Для тонкої плівки  $F_{об}$  можна знехтувати.

За означенням поверхневого натягу для збільшення площі поверхні плівки  $a$  на величину  $da$  над нею треба виконати роботу  $\sigma da$ . Сама плівка при цьому виконує від'ємну роботу  $\delta A = -\sigma da$ .

З цього рівняння приходимо до математичного виразу для коефіцієнта поверхневого натягу

$$\sigma = \left( \frac{\partial F}{\partial a} \right)_T,$$

тобто означення *коефіцієнта поверхневого натягу* можна сформулювати і як зміну вільної енергії на одиницю зміни площі поверхні рідини за сталої температури.

Також коефіцієнт поверхневого натягу можна визначити як такий, що чисельно дорівнює силі, яка діє на одиницю довжини лінії, яка є межею поверхні рідини, перпендикулярно до цієї межі по дотичній до поверхні рідини.

Якщо поверхню рідини вивести із стану рівноваги, то по ній будуть розповсюджуватись капілярно-гравітаційні хвилі. *Капілярно-гравітаційними хвилями* називають хвилі, які розповсюджуються по поверхні рідини під дією сил поверхневого натягу та сили тяжіння.

Теорія капілярно-гравітаційних хвиль базується на рівняннях гідродинаміки для рідин, що не стискаються. У пласкій біжучій синусоїдальній хвилі малої амплітуди кожна частинка рідини рухається по колу, розташованому у вертикальній площині, яка проходить через напрямок розповсюдження хвилі. Радіус кола  $r$  малий у порівнянні з довжиною поверхневої хвилі  $\lambda$ . Якщо хвиля розповсюджується із швидкістю  $v$ , то в системі відліку, яка рухається з тією ж швидкістю і у тому ж напрямку, хвилі будуть стояти на місці. Рух частинки буде складатись із рівномірно-поступального із швидкістю  $v$ , та рівномірно-обертального по колу радіусом  $r$ . Якщо вісь  $x$  направити у напрямку розповсюдження хвилі, а вісь  $z$  - перпендикулярно до неї униз, то рух частинки на поверхні рідини описується рівняннями

$$x = vt, \quad z = r \sin \frac{2\pi vt}{\lambda},$$

а траєкторія – синусоїдою

$$z = r \sin \frac{2\pi x}{\lambda}. \quad (1.1)$$

Таку траєкторію мають всі частинки як на поверхні, так і в середині рідини. Виділимо трубку току поблизу поверхні рідини (рис.1.1). Якщо  $v'$  - швидкість обертання частинки по колу, то в точці А швидкості поступального і обертального руху віднімаються, а в точці В – додаються, а різниця висот точок А і В становить  $h = 2r$ .

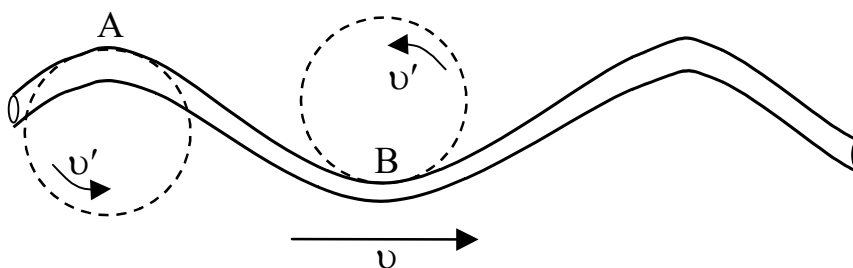


Рис.1.1 Рух частинок поблизу поверхні рідини

Тоді за рівнянням Бернуллі

$$p_A + \frac{\rho}{2}(v - v')^2 + 2\rho gr = p_B + \frac{\rho}{2}(v + v')^2,$$

або

$$(p_A - p_B) + 2\rho gr = 2\rho vv', \quad (1.2)$$

де  $p_A, p_B$  – тиск у точках А і В відповідно,  $\rho$  – густина рідини,  $g$  – прискорення вільного падіння. Оскільки

$$v' = \frac{2\pi r}{T} = \frac{2\pi r v}{\lambda}, \quad (1.3)$$

$T$  – період зміни фази хвилі, а за формулою Лапласа для додаткового тиску над викривленою поверхнею (у даному випадку циліндричної форми)

$$p_A = p_0 + \frac{\sigma}{R}, \quad p_B = p_0 - \frac{\sigma}{R}, \quad (1.4)$$

де  $p_0$  – атмосферний тиск,  $R$  – радіус кривизни синусоїди в точках А і В.

Кривизна поверхні  $k = 1/R$  визначається у цих точках як  $k = \left| \frac{d^2 z}{dx^2} \right|$ , отже з рівняння (1.1) маємо

$$R = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r}. \quad (1.5)$$

Підставивши (1.3)-(1.5) у (1.2), отримаємо для швидкості розповсюдження капілярно- гравітаційних хвиль вираз

$$v = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} + \frac{2\pi\sigma}{\rho\lambda}}, \quad (1.6)$$

В теорії хвиль ця величина називається *фазовою швидкістю*, тобто швидкістю, з якою розповсюджується фаза хвилі.

З рівняння (1.6) видно, що за умови

$$\frac{g\lambda}{2\pi} \gg \frac{2\pi\sigma}{\rho\lambda}$$

(довгі хвилі) швидкість розповсюдження визначається тільки гравітаційними силами, а при

$$\frac{g\lambda}{2\pi} \ll \frac{2\pi\sigma}{\rho\lambda} \quad (1.7)$$

(короткі хвилі) – тільки силами поверхневого натягу.

При певній довжині хвилі

$$\lambda_1 = 2\pi \sqrt{\frac{\sigma}{\rho g}} \quad (1.8)$$

швидкість розповсюдження *в рівній мірі* залежить, як від гравітаційних сил, так і від сил поверхневого натягу.

Отже, за умови (1.7) формула для швидкості розповсюдження поверхневої хвилі спрощується:

$$v = \sqrt{\frac{2\pi\sigma}{\rho\lambda}} \quad (1.9)$$

Формула (1.9) дає зв'язок між швидкістю розповсюдження капілярної хвилі і величиною поверхневого натягу рідини. Оскільки швидкість розповсюдження хвилі пов'язана із частотою  $\nu$  джерела, яке її збуджує, як  $v = \lambda \nu$ , то

$$\sigma = \frac{\rho}{2\pi} \lambda^3 \nu^2. \quad (1.10)$$

## Опис установки для вимірювань

Принципова схема установки для дослідження розповсюдження капілярних хвиль наведена на рис.1.2. Рідини (за вказівкою викладача) наливаються у посудину П.

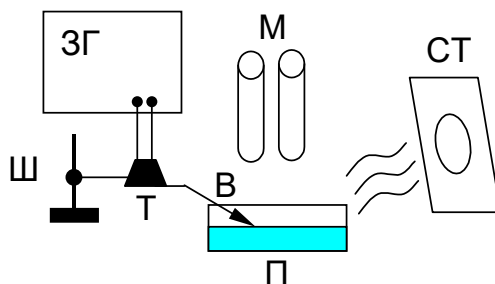


Рис.1.2 Схема установки для дослідження розповсюдження капілярних хвиль

Коливання в рідині створюються за допомогою електромагнітного вібратора В, що являє собою стрижень, припаяний верхнім кінцем до мембрани телефону Т, яка закріплена на штативі Ш. Коливання мембрани телефону збуджуються звуковим генератором ЗГ. Для того, щоб спостерігати картину хвиль на поверхні рідини і щоб ця картина була нерухомою, для освітлення поверхні використовують строботометр СТ. Оскільки потрібно збуджувати капілярні хвилі довжиною порядку 1 мм, щоб виконувалось співвідношення (1.7), для їх спостереження і вимірювання застосовують мікроскоп М.

### Вказівки до виконання роботи

1. Перед початком роботи вимийте кювету і налейте досліджувану рідину (дистильовану воду, спирт, тощо). При заповненні кювети будьте уважні. Пам'ятайте, що навіть незначні сліди бруду можуть істотно змінити коефіцієнт поверхневого натягу. **Не занурюйте пальці у кювету!**

2. Після ознайомлення з роботою строботометра та звукового генератора підключить їх до електричної мережі.

3. Подайте на телефон напругу з частотою  $\leq 300$  Гц від звукового генератора. Освітїть поверхню рідини лампою, занурте кінець вібратора у воду, сфокусуйте на поверхні рідини мікроскоп так, щоб кінець вібратора знаходився у полі зору.

4. Змінюючи частоту напруги, яка подається на вібратор від звукового генератора і глибину занурення кінця вібратора, отримайте появу помітних оком рухомих хвиль на поверхні рідини.

5. На строботометрі встановіть частоту спалахів рівною або кратною частоті коливань стрижня.

6. Виміряйте за допомогою окулярного мікрометра довжину хвилі капілярних хвиль для декількох різних частот. Перехідна таблиця шкали окулярного мікрометра дана в таблиці 1.1.

7. Аналогічні виміри виконайте для інших рідин, запропонованих викладачем.

8. Знаючи  $\lambda$  та  $\nu$ , за формулою (1.10) обчисліть коефіцієнт поверхневого натягу рідин.

9. Обчисліть похибки вимірювань.

Таблиця 1.1 Ціна поділки мікроскопа

Множник збільшення мікроскопа	Найменша поділка на шкалі окуляра (0,1 мм) відповідає величині
0,6	0,17 мм
1	0,1 мм
2	0,05 мм
4	0,025 мм
7	0,015 мм

**Увага: щоб лампа строботометра не перегоріла, через кожні 10 хв. вимикайте її для охолодження.**

### Контрольні запитання

1. Наведіть три визначення фізичної величини “коефіцієнт поверхневого натягу”.

2. Які поверхневі хвилі можна вважати капілярними?

3. При якій частоті строботометра картина поверхневих хвиль буде нерухомою, а довжина хвилі  $\lambda$  визначена коректно?

4. Що являє собою “поверхневий шар” рідини? Яка його товщина?

5. Як коефіцієнт поверхневого натягу залежить від температури. Поясніть, чому існує саме така залежність.

6. Як впливає на коефіцієнт поверхневого натягу кількість домішок, розчинених в рідині?

7. Для чого в роботі використовується стробоскопічний ефект?

8. При яких співвідношеннях кратності спалахів строботометра і довжини хвилі остання буде визначена коректно?

9. Розрахуйте довжину хвилі  $\lambda_1$  для рідини за вказівкою викладача.

### Література

1. Клим М.М., Якібчук П.М. “Молекулярна фізика”. – Львів, “ЛНУ імені Івана Франка”. – 2003. – с. 392-414.

2. Шиманський Ю.І., Шиманська О.Т. “Молекулярна фізика”. – К., “Києво-Могилянська академія”. – 2007. – с.279-282.

3. Булавін “Молекулярна фізика”. – К., “Києво-Могилянська академія”. – 2007. – с.465-473.

4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.2, “Термодинамика и молекулярная физика”. – М., ФИЗМАТЛИТ. – 2005. – с.407-415, 430-433.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

### ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОЇ ТЕПЛОЄМНОСТІ МЕТАЛІВ

**Мета роботи:** опанування користуванням рідинним калориметром; визначення питомої теплоємності твердих тіл за допомогою калориметра.

**Прилади та обладнання:** рідинний калориметр, метали для досліджень (мідь, алюміній, тощо), електроплитка, ємність для нагрівання зразків, двоканальний електронний термометр, пінцет.

#### Завдання:

1. Ознайомитись з експериментальною установкою та методикою визначення питомої теплоємності твердих тіл за допомогою калориметра.
2. З рівняння теплового балансу знайти питомі теплоємності заданих матеріалів.
3. Перевірити закон Дюлонга і Пті.
4. Знайти похибку вимірів.

#### Короткі теоретичні відомості

Якщо змінити енергію системи на  $dQ$ , її температура змінюється на  $dT$ . Мірою такої зміни є величина

$$C = \frac{dQ}{dT},$$

яка називається *теплоємністю*. Теплоємність визначається кількістю теплоти, необхідної для зміни температури тіла на 1 К.

Розрізняють *питому теплоємність*  $c$  (теплоємність одиниці маси речовини),

$$cm = C,$$

де  $m$  – маса речовини, а також *молярну теплоємність*  $C'$  (теплоємність 1 моля речовини),

$$c\mu = C',$$

де  $\mu$  – молярна маса речовини.

Прилади для вимірювання кількості теплоти називаються *калориметрами*. Найбільш поширеними є рідинні калориметри. Найпростіший калориметр складається із двох посудин циліндричної форми (співвідношення висоти до діаметра порядку 1,2...1,5), ізольованих одна від одної речовиною із низькою теплопровідністю (наприклад, пінопласт), щоб запобігти теплообміну із навколишнім середовищем. Внутрішня посудина виготовляється із матеріалу з високою теплопровідністю (мідь, алюміній, латунь, тощо), щоб калориметрична система якнайшвидше приходила у стан рівноваги. Такі калориметри комплектуються мішалкою з метою швидшого вирівнювання температури у калориметричній рідині. У якості калориметричної рідини зазвичай використовується дистильована вода. Температура у калориметрі визначається термометром з високою чутливістю.



Після занурення у калориметр, розігрітий зразок буде віддавати тепло, яке йтиме на нагрів води та самого калориметра. При встановленні рівноваги у калориметрі (нехтуючи втратами тепла на розігрів зовнішньої посудини) виконується рівняння теплового балансу

$$c_x m_x (t_1 - t_K) = c_B m_B (t_K - t_0) + c_K m_K (t_K - t_0), \quad (2.1)$$

де  $c_x, m_x$  – питома теплоємність та маса досліджуваного металу,  $c_B, m_B$  – питома теплоємність та маса води,  $c_K, m_K$  – питома теплоємність та маса внутрішньої посудини калориметра,  $t_0$  – початкова температура води у калориметрі,  $t_1$  – температура розігрітого зразка у ємності для нагрівання,  $t_K$  – температура у калориметрі із зразком після встановлення рівноваги. З рівняння (2.1) знаходимо шукану питому теплоємність зразка

$$c_x = \frac{(c_B m_B + c_K m_K)(t_K - t_0)}{m_x (t_1 - t_K)}. \quad (2.2)$$

У класичній теорії теплоємності тверде тіло розглядається як набір класичних осциляторів. Тобто атоми коливаються з однаковими частотами навколо фіксованих положень рівноваги, якими є вузли кристалічної ґратки, і ці коливання є гармонічними (див. *гармонічна модель* у лабораторній роботі № 2 “Визначення коефіцієнту лінійного розширення твердих тіл методом Менделєєва”: С.М.Гойса, Л.В.Іщук, О.Г.Зубрікова, “Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу загальної фізики (розділ “Молекулярна фізика”), частина III, <https://rex.knu.ua/for-students/books-for-study/>).

Напрямок коливань хаотично змінюється із часом, але кожне коливання можна розкласти на складові уздовж трьох взаємно перпендикулярних напрямків. Також постулюється взаємна незалежність руху всіх атомів. Крім того, у класичній теорії припускається справедливість законів класичної механіки і, як наслідок, справедливість закону про рівномірний розподіл енергії за всіма ступенями вільності.

Згідно з теоремою про рівномірний розподіл енергії за ступенями вільності на один ступінь вільності коливального руху припадає енергія, рівна  $kT$ ,  $k$  – стала Больцмана. Внутрішня енергія одного моля твердого тіла  $U$  становить  $3N_A kT$ , або, враховуючи, що  $N_A k = R$ ,  $U = 3RT$ , де  $N_A$  – число Авогадро,  $R$  – універсальна газова стала.

Тоді молярна теплоємність простого твердого тіла за сталого об'єму

$$C'_V = \left( \frac{dU}{dT} \right)_V = 3R \approx 25 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}},$$

тобто не залежить від температури і є однаковою для всіх простих твердих тіл.

В 1819 р П'єр Луї Дюлонг і Алексіс Перез Пті експериментально встановили що: “... добуток питомої теплоємності і атомної ваги для простих тіл в кристалічному стані є величиною майже сталою”. Закон (правило) Дюлонга і Пті визначає питому теплоємність як

$$c = \frac{C'_V}{\mu} = \frac{3R}{\mu}. \quad (2.3)$$

Закон Дюлонга і Пті добре узгоджується із класичною теорією при температурах, далеких від абсолютного нуля. При наближенні до абсолютного нуля температури теплоємності всіх тіл прямують до нуля згідно із наслідками з теплової теореми Нернста (третьої закон термодинаміки). Пояснити це можна лише в межах квантової теорії.

### Опис установки для вимірювань

Експериментальна установка схематично зображена на рис.2.1. Рідинний калориметр являє собою дві циліндричні ємності з алюмінію, розділені пінопластом. Калориметр закривається кришкою із отворами (на рис.2.1 не наведена) для мішалки, датчика температури та занурення зразків.

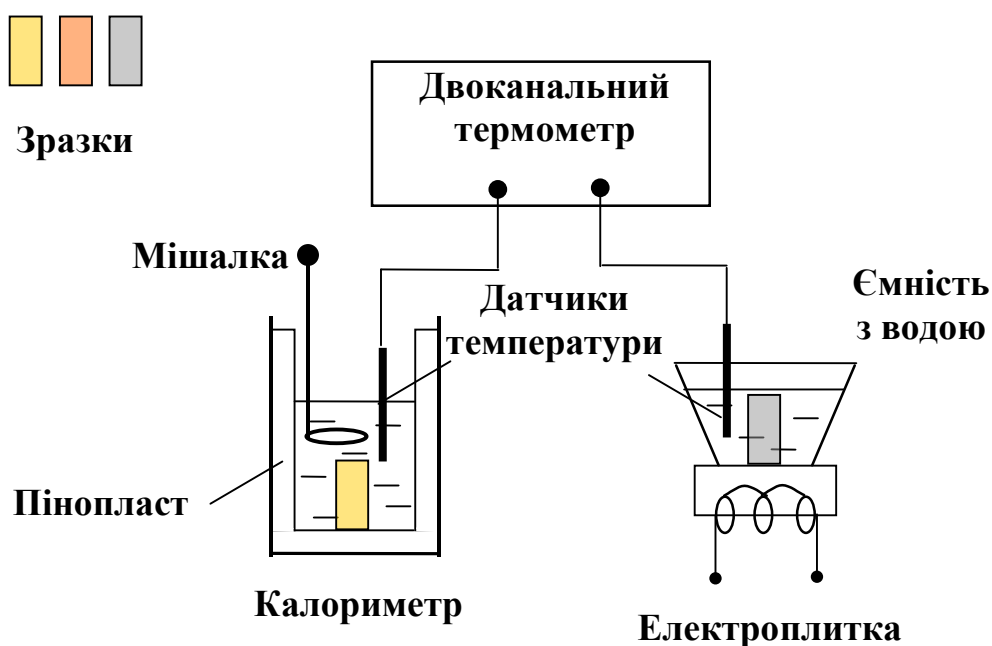


Рис.2.1 Установка для вимірювань

Зразки нагріваються у ємності з водою на електроплитці. Температури у ємності з водою для нагрівання зразків та у калориметрі визначаються електронними датчиками температури і подаються на двоканальний електронний термометр. Електронний термометр може вимірювати температуру як за шкалою Цельсія, так і за шкалою Кельвіна.

### Вказівки до виконання роботи

1. Перед початком роботи ознайомтесь з обладнанням. На двоканальному електронному термометрі виберіть відповідні входи та встановіть режим вимірювань температури на обох каналах за однаковою шкалою температур (або за шкалою Цельсія, або за шкалою Кельвіна).

2. До калориметра залити 100 мл води, занурити один з датчиків температури термометра, записати початкову температуру води  $t_0$ .

3. У ємність з водою помістити зразки металів так, щоб вода покривала їх повністю, занурити другий датчик температури. Увімкнути електроплитку.

4. Зразки у ємності з водою довести до кипіння води, кип'ятити 5 хв. Температуру кипіння приймаємо за температуру зразка  $t_1$ .

5. Потім пінцетом обережно захопити один зразок і швидко перенести його у калориметр, отвір у кришці калориметра закрити пробкою, щоб уникнути втрат тепла. За допомогою мішалки перемішувати воду у калориметрі доки не встановиться стала температура. Записати температуру  $t_k$ .

6. Витягнути зразок з калориметра і повторити пункт 5 для інших зразків записуючи для кожного відповідні  $t_0$ ,  $t_1$  і  $t_k$ .

7. Кілька разів змінити воду в калориметрі і повторити пункти 4-6, змінюючи послідовність зразків.

### Контрольні запитання

1. Дайте загальне означення теплоємності, питомої та молярної теплоємностей.

2. Запишіть рівняння теплового балансу для калориметра за наявності внутрішньої посудини та за її відсутності. Використовуючи експериментальні дані, проаналізуйте необхідність врахування кількості теплоти, що йде на нагрівання калориметра.

3. Поясніть, чому немає різниці, за якою шкалою визначається температура, але шкала має бути однаковою для обох каналів термометра?

4. Користуючись теоремою про рівномірний розподіл енергії за ступенями вільності отримайте закон Дюлонга і Пті. За яких умов він виконується?

### Література

1. Клим М.М., Якібчук П.М. “Молекулярна фізика”. – Львів, “ЛНУ імені Івана Франка”. – 2003. – с. 459-461.

2. Шиманський Ю.І., Шиманська О.Т. “Молекулярна фізика”. – К., “Києво-Могилянська академія”. – 2007. – с.248-267.

3. Булавін “Молекулярна фізика”. – К., “Києво-Могилянська академія”. – 2007. – с.396-402.

4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.2, “Термодинамика и молекулярная физика”. – М., ФИЗМАТЛИТ. – 2005. – с.65-67, 220-227.

5. Фізичний практикум. Т.1. /Під редакцією В.П. Дущенко. –К., “Вища школа”. – 1981. – с.188-191.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

### ДОСЛІДЖЕННЯ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДУ ПЛАВЛЕННЯ-КРИСТАЛІЗАЦІЯ

**Мета роботи:** визначення питомої теплоти і температури плавлення твердих кристалічних тіл та розрахунків зміни ентропії шляхом зняття кривої плавлення.

**Прилади та обладнання:** тигелі, штатив, терези, спиртовий пальник, термopара, мультиметр, зразки досліджуваних металів.

#### Завдання:

1. Ознайомитись з експериментальною установкою та методикою визначення питомої теплоти і температури плавлення твердих кристалічних тіл та розрахунку зміни ентропії в процесі кристалізації шляхом зняття кривої плавлення.
2. Зняти криві кристалізації для декількох твердих тіл.
3. За кривими кристалізації знайти температури плавлення зразків та розрахувати питому теплоту плавлення.
4. Для кожної речовини визначити зміну ентропії у процесі кристалізації.
5. Знайти похибку вимірів.

#### Короткі теоретичні відомості

В термодинамічній системі речовина може одночасно знаходитись у декількох агрегатних станах (наприклад, термодинамічна система  $\text{H}_2\text{O}$  може одночасно містити лід, воду, пару). *Фазою* називають гомогенну (однорідну) частину неоднорідної системи, відокремлену від інших частин фізичними границями розділу так, що вона може бути видалена із системи механічним шляхом. Процеси, при яких речовина переходить із однієї фази в іншу, називаються *фазовими переходами*.

*Фазові перетворення I роду* відбуваються із виділенням або поглинанням теплоти. До них відносяться плавлення, випаровування, сублімація, кристалізація, тощо.

*Фазові перетворення II роду* відбуваються без теплообміну, але супроводжуються зміною однієї або декількох з величин :

- питомої теплоємності  $c_p$ ;
- коефіцієнта теплового розширення  $\alpha = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p$  ;
- коефіцієнта ізотермічного стискання  $\gamma = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_T$  .

При нагріванні твердого кристала збільшується амплітуда ангармонічних теплових коливань структурних одиниць (а отже і кінетична енергія). Це призводить до послаблення міжструктурних зв'язків і, врешті-решт, – до руйнування кристалічної ґратки, внаслідок чого тіло стає рідким. *Плавлення* –

це рівноважний фазовий перехід I роду кристалічного тіла в рідкий стан, який супроводжується поглинанням тепла. *Температура плавлення* – температура рівноважного фазового переходу твердого тіла в рідке при постійному тискові.

Кристалічні тіла мають фіксовану температуру плавлення. Аморфні тверді тіла плавляться не при певній фіксованій температурі, а в певному інтервалі температур (інтервал розм'якшення).

*Питома теплота плавлення* ( $\lambda$ ) – це кількість теплоти, що потрібна для розплавлення одиниці маси кристалічної речовини, взятої при температурі плавлення.

Одним з поширених методів визначення температури плавлення  $T_{\text{пл}}$  є метод зняття кривої плавлення  $T = f(t)$  при незмінних зовнішніх умовах. Оскільки  $T_{\text{пл}}$  суттєво залежить від чистоти речовини, для визначення  $T_{\text{пл}}$  найчастіше користуються кінетикою кристалізації (тверднення) (рис.3.1). Ділянка 1-2 відповідає охолодженню тіла до початку кристалізації, 2-3 – кристалізації, а ділянка 3-4 – охолодженню твердого тіла. Температура  $T_2$  є температурою плавлення (тверднення, кристалізації) речовини ( $T_2 = T_{\text{пл}}$ ).

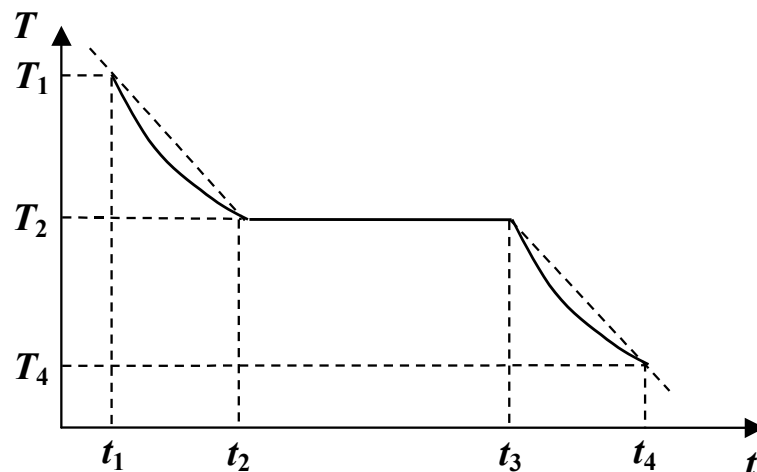


Рис.3.1 Кінетика кристалізації твердого тіла

Для визначення питомої теплоти плавлення (кристалізації) реальна крива тверднення замінюється ідеалізованою (пунктирні лінії на рис.3.1).

Кількість теплоти, що в середньому віддається тверднучим оловом разом з тиглем за одиницю часу,

$$q_1 = \frac{Q_1}{t_2 - t_1} = (mc + m_1c_1) \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1}, \quad (3.1)$$

де  $m$  і  $c$  – маса і питома теплоємність рідкої фази досліджуваної речовини (для рідкого олова  $c = 2,66 \cdot 10^2$  Дж/(кг·К));  $m_1$  і  $c_1$  – маса і питома теплоємність тигля.

Кількість теплоти, що виділяється в одиницю часу при кристалізації олова (ділянка 2-3 на рис.3.1),

$$q_1 = \frac{Q_2}{t_3 - t_2} = \frac{\lambda m}{t_3 - t_2}. \quad (3.2)$$

Кількість теплоти, що виділяється при охолодженні твердого олова (ділянка 3-4 на рис.3.1),

$$q_3 = \frac{Q_3}{t_4 - t_3} = (mc' + m_1c_1) \frac{T_2 - T_4}{t_4 - t_3}, \quad (3.3)$$

де  $c'$  – питома теплоємність твердої фази досліджуваної речовини ( $c' = 2,46 \cdot 10^2$  Дж/(кг·К) – для твердого олова).

За умови  $t_3 - t_2 = t_2 - t_1 = t_4 - t_3$  величину  $q_2$  можна визначити як середнє арифметичне значень  $q_1$  і  $q_3$

$$q_2 = \frac{q_1 + q_3}{2}. \quad (3.4)$$

Підставивши (3.1)–(3.3) у (3.4), після очевидних перетворень отримаємо

$$\lambda = \frac{1}{2m} [(mc + m_1c_1)(T_1 - T_2) + (mc' + m_1c_1)(T_2 - T_4)]. \quad (3.5)$$

Процес тверднення і наступного охолодження твердого олова супроводиться зміною ентропії. *Ентропія* – це функція стану, яка характеризується тим, що різниця ентропій у двох різних точках дорівнює сумі зведених теплот  $\left(\frac{\delta Q}{T}\right)$ , які треба витратити на перехід з початкового стану 1 у кінцевий стан 2 оборотним шляхом

$$S_2 - S_1 = \Delta S = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}.$$

За кривою кристалізації зміну ентропії обчислюють як

$$\Delta S = S_4 - S_1 = \int_1^4 \frac{\delta Q}{T} = \int_{T_1}^{T_{\text{пл}}} cm \frac{dT}{T} + \frac{\lambda m}{T_{\text{пл}}} + \int_{T_{\text{пл}}}^{T_4} c'm \frac{dT}{T}.$$

Остаточнo

$$\Delta S = m \ln \left[ \left( \frac{T_{\text{пл}}}{T_1} \right)^c \left( \frac{T_4}{T_{\text{пл}}} \right)^{c'} \right] + \frac{\lambda m}{T_{\text{пл}}}. \quad (3.6)$$

### Опис установки для вимірювань

Для проведення вимірів використовується установка, зображена на рис.3.2. Тигель з оловом і термopарою закріплений на штативі над спиртовим пальником. Термopара підключена до цифрового мультиметра, який має функцію вимірювання температури. Для фіксації часу кристалізації можна використовувати будь-який таймер.

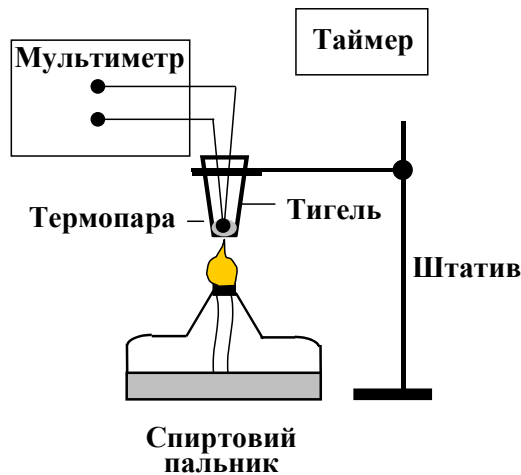


Рис.3.1 Установа для вимірювань

### Вказівки до виконання роботи

1. На технічних терезах визначити маси досліджуваних речовин (за вказівкою викладача)  $m$  і тиглів  $m_1$ .
2. Визначити питому теплоємність зразків і тиглів, якщо вони невідомі (див. вказівки до лабораторної роботи №2 “Визначення питомої теплоємності металів”).
3. Закріпити тигель із зразком на штативі. Термопару під’єднати до цифрового мультиметра.
4. Під тиглем розмістити спиртовий пальник, запалити його. Розплавити зразок та опустити у розплав термопару. Стежити за температурою на цифровому мультиметрі. При досягненні температури  $250^{\circ}\text{C}$  загасити пальник.
5. Зняти залежність температури зразка від часу із кроком 5с до температури  $(100\dots120)^{\circ}\text{C}$  (в залежності від температури плавлення матеріалу).
6. Побудувати графік  $T(t)$ . Щоб знайти точки 1 і 4 (рис.3.1), відкласти від точок  $t_2$  і  $t_3$  ліворуч і праворуч, відповідно, відрізки, що дорівнюють  $t_3 - t_2$ . За необхідності апроксимувати експериментальну залежність до необхідних значень (штрихована лінія на рис.3.1). Визначити з графіка температури  $T_1$ ,  $T_2 = T_3 = T_{\text{пл}}$  і  $T_4$ , які відповідають точкам 1, 2 (3) і 4. За формулою (3.5) обчислити значення  $\lambda$ .
7. За формулою (3.6) знайти зміну ентропії  $\Delta S$  для процесу охолодження і кристалізації кожного зразка.
8. Обчислити похибки результатів вимірювання.

### Контрольні запитання

1. Дайте означення фази, фазового перетворення.
2. У чому полягає молекулярно-кінетичне тлумачення процесів плавлення, кристалізації твердих тіл.

3. Як змінюються питомі об'єми твердих кристалів при плавленні? Наведіть приклади.

4. Що таке питома теплота плавлення? Отримайте вираз для її знаходження за кривою кристалізації.

5. Поясніть, чому  $q_2 = \frac{q_1 + q_3}{2}$ .

6. Дайте означення ентропії. Поясніть, як знайти зміну ентропії за кривою кристалізації.

### Література

1. Клим М.М., Якібчук П.М. “Молекулярна фізика”. – Львів, “ЛНУ імені Івана Франка”. – 2003. – с. 476-485, 488-495.

2. Шиманський Ю.І., Шиманська О.Т. “Молекулярна фізика”. – К., “Києво-Могилянська академія”. – 2007. – с.305-319.

3. Булавін “Молекулярна фізика”. – К., “Києво-Могилянська академія”. – 2007. – с.434-445.

4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.2, “Термодинамика и молекулярная физика”. – М., ФИЗМАТЛИТ. – 2005. – с.434-445.

5. Фізичний практикум. Т.1. /Під редакцією В.П. Дущенко. –К., “Вища школа”. – 1981. – с.208-210.



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

### ВИЗНАЧЕННЯ СТАЛОЇ КРИСТАЛІЧНОЇ ҐРАТКИ НА МОДЕЛІ КУБІЧНОГО КРИСТАЛУ

**Мета роботи:** ознайомлення з методами визначення сталої кристалічної ґратки; визначення сталої кристалічної ґратки на моделях кристалів кубічної сингонії.

**Прилади та обладнання:** моделі кристалів кубічної сингонії, джерело електромагнітних хвиль, джерело живлення (УІП-1), індикатор інтенсивності електромагнітних хвиль, гоніометричний столик.

#### Завдання:

1. Ознайомитись з методами визначення сталої кристалічної ґратки.
2. Визначити сталу кристалічної ґратки для кубічної простої, об'ємноцентрованої кубічної (ОЦК) та гранецентрованої кубічної (ГЦК) ґраток.
3. Визначити індекси Міллера сімейств площин, на яких відбувається інтерференція відбитого випромінення.
4. Знайти похибку вимірів.

#### Короткі теоретичні відомості

Тверді тіла можуть знаходитись у кристалічному або аморфному стані. Належність речовини до кожного з станів визначається взаємним розташуванням атомів у речовині.

У аморфних речовин існує так званий ближній порядок, тобто деяка узгодженість у розташуванні у просторі сусідніх частинок. Із збільшенням відстані від вибраного атома така узгодженість зникає.

У кристалічній речовині атоми розташовані впорядковано. Певний структурний елемент стало повторюється, утворюючи *кристалічну структуру*.

Атомна структура називається ідеальним кристалом, якщо в ній є три некопланарних вектори  $\vec{a}_1$ ,  $\vec{a}_2$  і  $\vec{a}_3$ , що утворюють праву трійку векторів, при зсуві на кожний з яких вона інваріантна. Зсув на кожний з таких векторів називається *трансляцією*. Об'єм паралелепіпеда, побудованого на цих векторах, буде дорівнювати

$$\Omega = \vec{a}_1 \cdot [\vec{a}_2 \times \vec{a}_3] = \vec{a}_2 \cdot [\vec{a}_3 \times \vec{a}_1] = \vec{a}_3 \cdot [\vec{a}_1 \times \vec{a}_2]. \quad (4.1)$$

Якщо вектори  $\vec{a}_1$ ,  $\vec{a}_2$  і  $\vec{a}_3$  вибрані таким чином, що об'єм паралелепіпеда  $\Omega$  має мінімально можливе значення, то ці вектори називають *трансляційними* або *основними векторами трансляції*, а побудований на них паралелепіпед - *елементарною коміркою* кристала.

Якщо відомі основні вектори трансляції, можна знайти сукупність точок

$$\vec{r}' = \vec{r} + n_1 \vec{a}_1 + n_2 \vec{a}_2 + n_3 \vec{a}_3, \quad (4.2)$$

де  $\vec{r}$  – довільна точка, а  $n_{1,2,3}$  – довільні цілі числа (додатні, від'ємні та нуль). Ця сукупність точок при довільних значеннях  $n_{1,2,3}$  утворює *кристалічну ґратку*, а самі точки мають назву *вузлів кристалічної ґратки*. Довільна сукупність атомів чи молекул, але завжди однакова біля кожного вузла, називається *базисом*. Разом із кристалічною ґраткою він утворює кристалічну структуру.

Площина в кристалі, у якій знаходяться принаймні три його атоми, називається *атомною площиною кристалу*. Унаслідок трансляційної симетрії атомна площина ідеального кристалу містить нескінченну кількість атомів. Множина паралельних рівновіддалених атомних площин називається *сімейством атомних площин*. Для кубічної кристалічної ґратки найбільша відстань між атомними площинами називається *сталюю ґратки*.

Для визначення атомних площин розглянемо рівняння площини у кубічному кристалі, яка не паралельна жодній з координатних осей (рис.4.1). Воно має вигляд  $Ax + By + Cz + D = 0$ . Площина відтинає на осях відрізки

$$s_x a = -\frac{D}{A}, \quad s_y a = -\frac{D}{B}, \quad s_z a = -\frac{D}{C}, \quad \text{де } A, B, C \neq 0.$$

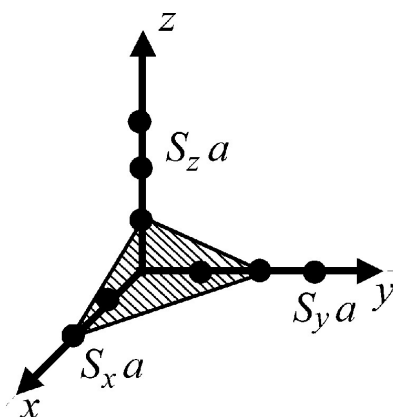


Рис.4.1 Визначення індексів Міллера

Складемо відношення обернених величин відтятих відрізків

$$\frac{1}{s_x a} : \frac{1}{s_y a} : \frac{1}{s_z a} = \frac{1}{s_x} : \frac{1}{s_y} : \frac{1}{s_z}$$

і виразимо його через відношення трьох найменших цілих чисел  $h$ ,  $k$  і  $l$ , щоб виконувалось співвідношення  $\frac{1}{s_x} : \frac{1}{s_y} : \frac{1}{s_z} = h : k : l$ . Числа  $h$ ,  $k$  і  $l$  називають

*індексами Міллера* ( $hkl$ ) атомної площини. Індокси Міллера ( $hkl$ ) характеризують усе сімейство атомних площин.

Якщо кристал розглядати як сукупність паралельних атомних площин, віддалених одна від одної на відстань  $d$ , то при опроміненні їх електромагнітними хвилями процес дифракції можна уявити як відбиття випромінення від сукупності цих площин. Напрямки виникнення при цьому максимумів інтенсивності (*дифракційних максимумів*) пружно розсіяного на кристалі рентгенівського випромінення визначається умовою *Вульфа-Брегга*. Умову Вульфа-Брегга для кожної даної системи атомних площин можна отримати із загальних умов інтерференції на тривимірній ґратці, вибираючи відповідним чином систему координат.

Дифракційні максимуми виникають тільки в тих напрямках, в яких всі хвилі, відбиті даною системою атомних площин, мають однакові фази. Це можливо, якщо різниця ходу  $AB+BC$  (рис.4.2) між двома відбитими від сусідніх площин хвилями 1 і 2, що дорівнює  $2d \sin \theta$ , кратна цілому числу  $n$  довжин хвиль  $\lambda$ .

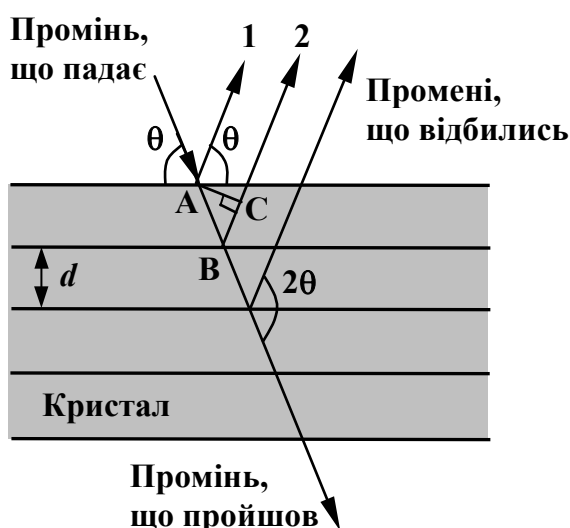


Рис.4.2 Виникнення дифракції Вульфа-Брегга

Таким чином, умова Вульфа-Брегга має вигляд

$$2d \sin \theta = n\lambda, \quad (4.3)$$

де ціле додатне число  $n$  називається порядком відбиття,  $\theta$  - кут ковзання променя, що падає (кут між променем і атомною площиною). Якщо  $\theta$  задовольняє умові (4.3), він називається *кутом Брегга*. Дифракційний (відбитий) промінь поширюється під кутом  $2\theta$  від первинного променя.

Слід зазначити, що рівняння (4.3) отримано без урахування ефекту заломлення і для необмеженого (ідеального) кристала, що має ідеально-періодичну будову.

Умова Вульфа-Брегга дозволяє визначати міжплощинні відстані  $d$  в кристалі, оскільки довжина хвилі  $\lambda$  зазвичай відома, а кути  $\theta$  вимірюються експериментально.

За міжплощинними відстанями можна визначити сталу кристалічної ґратки  $a$  та індекси Міллера відповідних сімейств атомних площин (рис.4.3). Для простого кубічного кристалу найбільша міжплощинна відстань  $d = a$ , вона утворена сімейством площин (100),  $d' = d/\sqrt{2}$  відповідає сімейству (110),  $d'' = d/\sqrt{5}$  – сімейству (210).

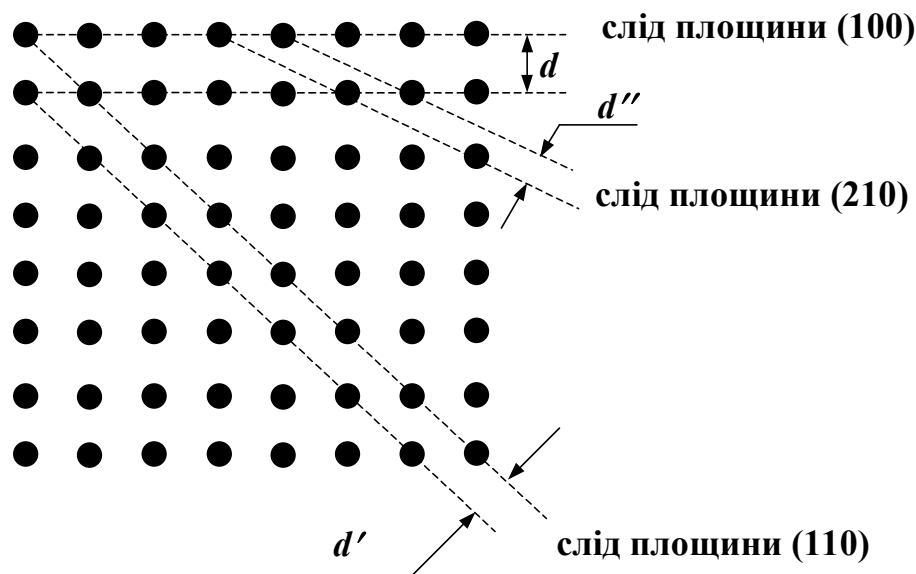


Рис.4.3 Атомні площини у кубічному кристалі та їх індекси Міллера

### Опис установки для вимірювань

Досліди проводяться на *моделях* кристалів кубічної сингонії з простою кубічною (рис.4.4,*а*), об'ємноцентрованою кубічною (ОЦК) (рис.4.4,*б*) та гранецентрованою кубічною (ГЦК) (рис.4.4,*в*) ґратками.

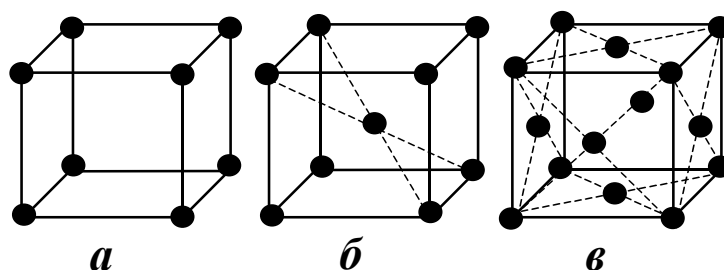


Рис.4.4 Кристалічні ґратки кубічної сингонії

Моделі виготовлені з пластинок пінопласту, у які впресовані металеві циліндри, центри яких відповідають розташуванню атомів у відповідних кристалічних ґратках.

Основні частини установки – це джерело електромагнітних хвиль та індикатор інтенсивності електромагнітних хвиль, що розміщені на гоніометричному столі (рис.4.5).

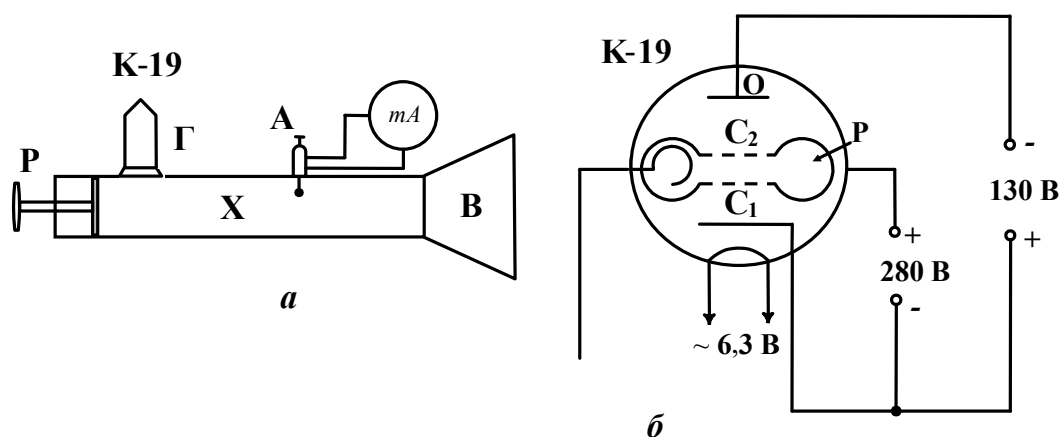


Рис.4.5 Джерело електромагнітних хвиль (а) та конструкція і схема живлення клістронного генератора типу К-19 (б)

Джерело електромагнітних хвиль (рис.4.5,а) складається з клістронного генератора типу К-19, хвилеводу Х, який закорочений з одного кінця і має рупор В з іншого, джерела живлення УІП-1, що живить клістрон, підставки, яка може переміщуватись і на якій закріплено хвилевід з клістроном.

Клістрон являє собою електронну лампу (рис.4.5,б), в яку вставлений об'ємний резонатор Р, що являє собою порожнину у вигляді тора. Резонатор розміщений між відбивачем О і катодом так, щоб площини сіток  $C_1$  і  $C_2$  були перпендикулярні до потоку електронів, що рухаються від катода до відбивача. На резонатор подається додатній відносно катода потенціал, на відбивач – від'ємний. У порожнину резонатора вставлено петлю зв'язку з вібратором – антеною А, що введена у хвилевід Х.

Хвилі поширюються по хвилеводу до рупора В, з якого випромінюються у вільний простір.

Панелька клістрона, до якої безпосередньо підводяться провідники від джерела УІП-1 для живлення клістрона, жорстко закріплена на хвилеводі.

**Увага! У даній роботі використовується висока напруга!** На резонатор клістрона подається додатній потенціал відносно катода 280 В, на відбивач – від'ємний потенціал 80-130 В, для розжарювання катода клістрона потрібна змінна напруга 6,3 В.

З боку закритого кінця хвилеводу є поршень Р, що може переміщуватися гвинтом, це дозволяє змінювати віддаль між вібратором і закритим кінцем хвилеводу і тим самим досягати максимального відбору енергії.

Як індикатор інтенсивності електромагнітного поля вживається рупорний приймач, що складається з хвилеводу, відкритий кінець якого з'єднаний з рупором, а закритий має поршень, що може переміщуватися, і спеціальну головку-держак, в яку вміщена детектор-антена.

Рупорний приймач закріплений на гоніометричному столику на рухомій платформі, що дозволяє знімати кутовий розподіл інтенсивності електромагнітного поля.

### Вказівки до виконання роботи

1. Для виконання роботи необхідно визначити довжину хвилі випромінювання. Скористайтесь результатом виконання лабораторної роботи № 3 “Вивчення дифракції, поляризації та відбиття електромагнітних хвиль” циклу “Коливання і хвилі” або проведіть необхідні виміри (С.М.Гойса, Л.В.Іщук, Г.С.Фелінський. Методичні вказівки до лабораторних робіт циклу “Коливання і хвилі”. <https://rex.knu.ua/for-students/books-for-study/>).

2. На гоніометричному столі зафіксуйте підставку і розмістіть на ній модель кристалу. Встановіть кут між випромінювачем і приймачем  $55^\circ$ . Обертаючи підставку з кубом, знайдіть максимальний сигнал приймача. Виміряйте розподіл максимальної інтенсивності  $I$  відбитої хвилі у залежності від кута, збільшуючи кут між випромінювачем і приймачем до  $145^\circ$  із кроком  $3^\circ$ .

3. Користуючись рис.4.2 знайдіть кути ковзання променя  $\theta$ , що падає на атомну площину.

4. Побудуйте залежність  $I(\theta)$  та знайдіть кути Брегга. Для кожного кута Брегга обчисліть відстань між атомними площинами та сталу кристалічної ґратки.

5. Повторіть пп.2-4 для інших моделей кубічного кристалу.

6. Обчисліть похибки вимірювань.

### Контрольні запитання

1. Порівняйте структурні властивості кристалічних та аморфних твердих тіл.
2. Чим відрізняється кристалічна ґратка від кристалічної структури?
3. Дайте означення атомної площини. Що таке сімейство атомних площин?
4. За рис.4.2 отримайте формулу Вульфа-Брегга. За яких умов кут ковзання променя, що падає на атомну площину, називається кутом Брегга?
5. Знайдіть індекси Міллера площини, зображеної на рис.4.1, або за вказівкою викладача.
6. Поясніть, чим диктується вибір меж зміни кутів між випромінювачем і приймачем від  $55^\circ$  до  $145^\circ$ ?

### Література

1. Клим М.М., Якібчук П.М. “Молекулярна фізика”. – Львів, “ЛНУ імені Івана Франка”. – 2003. – с. 423-438.
2. Шиманський Ю.І., Шиманська О.Т. “Молекулярна фізика”. – К., “Києво-Могилянська академія”. – 2007. – с.238-244.
3. Булавін “Молекулярна фізика”. – К., “Києво-Могилянська академія”. – 2007. – с.387-396.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.2, “Термодинамика и молекулярная физика”. – М., ФИЗМАТЛИТ. – 2005. – с.498-518.

## З М І С Т

### **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1**

ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ РІДИН МЕТОДОМ КАПІЛЯРНИХ ХВИЛЬ .....	3
Короткі теоретичні відомості.....	3
Опис установки для вимірювань.....	6
Вказівки до виконання роботи.....	6
Контрольні запитання.....	7
Література.....	7

### **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2**

ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОЇ ТЕПЛОЄМНОСТІ МЕТАЛІВ .....	8
Короткі теоретичні відомості.....	8
Опис установки для вимірювань.....	10
Вказівки до виконання роботи.....	11
Контрольні запитання.....	11
Література.....	11

### **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3**

ДОСЛІДЖЕННЯ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДУ ПЛАВЛЕННЯ- КРИСТАЛІЗАЦІЯ.....	12
Короткі теоретичні відомості.....	12
Опис установки для вимірювань.....	14
Вказівки до виконання роботи.....	15
Контрольні запитання.....	15
Література.....	16

### **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4**

ВИЗНАЧЕННЯ СТАЛОЇ КРИСТАЛІЧНОЇ ҐРАТКИ НА МОДЕЛІ КУБІЧНОГО КРИСТАЛУ.....	17
Короткі теоретичні відомості.....	17
Опис установки для вимірювань.....	20
Вказівки до виконання роботи.....	22
Контрольні запитання.....	22
Література.....	22

Навчальне видання

*ГОЙСА Сергій Миколайович*  
*ЗУБРИКОВА Ольга Георгіївна*  
*ІЩУК Лариса Вадимівна*

## **МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

**до лабораторних робіт з курсу загальної фізики**  
**(розділ 2, "МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА")**  
**частина II**

Підписано до друку 12.10.2018. Формат 60x80<sup>16</sup>.  
Гарнітура Arial. Папір офсетний. Друк офсетний.

Видавнича лабораторія радіофізичного факультету  
Київського національного університету імені Тараса Шевченка