

Лабораторна робота 88

ВИЗНАЧЕННЯ СТАЛОЇ СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА ЗА ДОПОМОГОЮ ОПТИЧНОГО ПІРОМЕТРА

Мета роботи: познайомитись з будовою та принципом роботи оптичного пірометра, визначити за його допомогою постійну Стефана–Больцмана.

Прилади і матеріали: змонтоване на планшеті електричне коло, оптичний пірометр, кінолампа, лабораторне джерело живлення (ЛПП–1), реостат, вольтметр, амперметр. Лист міліметрового паперу.

Теоретичні відомості

Тепловим називається електромагнітне випромінювання, яке відбувається за рахунок хаотичного, теплового руху молекул речовини. Фізична природа такого процесу полягає в перетворенні енергії теплового руху молекул і атомів речовини в енергію електромагнітного випромінювання.

Згідно закону Стефана–Больцмана енергетична світність чорного тіла R_T прямо пропорційна четвертому ступеню абсолютної температури тіла:

$$R_T = \sigma T^4, \quad (88.1)$$

де $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$ – стала Стефана–Больцмана.

Енергетична світність, або інтегральна випромінювальна здатність R_T , – це кількість енергії W , яка випромінюється з одиниці площі S за одиницю часу t хвилями всіх довжин:

$$R_T = \frac{W}{S \cdot t}, \quad (88.2)$$

$$[R] = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Якщо випромінювання чорного тіла виникає в середовищі з температурою T_0 , то втрата тілом енергії внаслідок випромінювання буде дорівнювати:

$$R_T = \sigma(T^4 - T_0^4). \quad (88.3)$$

Основними джерелами світла є розжарені тіла. Так як вони не є чорними, то для них в закон Стефана–Больцмана вводиться коефіцієнт k , чисельне значення якого визначається експериментально. Тобто

$$R_T = k\sigma(T^4 - T_0^4) \quad (88.4)$$

де k – коефіцієнт який визначається як відношення інтегральної випромінювальної здатності даного тіла R_T до інтегральної випромінювальної здатності чорного тіла R_T^* :

$$k = \frac{R_T}{R_T^*}.$$

Для виміру високих температур широко застосовуються оптичні методи, засновані на використанні теплового випромінювання нагрітих тіл. Прилади, що служать для визначення температури на основі вимірів теплового випромінювання, називаються *оптичними пірометрами*, а галузь експериментальної фізики, яка розробляє принципи виміру температури оптичними методами, носить назву *оптичної пірометрії*.

Теплове випромінювання нагрітих тіл може різними способами використовуватися для виміру їх температури. Один із способів, заснований на порівнянні яскравості нагрітого тіла з яскравістю чорного тіла в тому ж спектральному інтервалі, має найбільше технічне поширення. Такі пірометри називаються *пірометрами із зникаючою ниткою*.

Яскравістю джерела світла V_φ називається відношення потоку променистої енергії $d\Phi$, надісланому в даному напрямку φ одиницею поверхні цього джерела S всередину малого тілесного кута $d\Omega$, до величини цього тілесного кута (рисунок 88.1).

$$B_{\varphi} = \frac{d\Phi}{S \cos \varphi d\Omega} \quad (88.5)$$

Припустимо, що ми маємо чорне тіло, яке нагріто до деякій температури, а на його фоні розташована нитка накалу спеціальної пірометричної лампи.

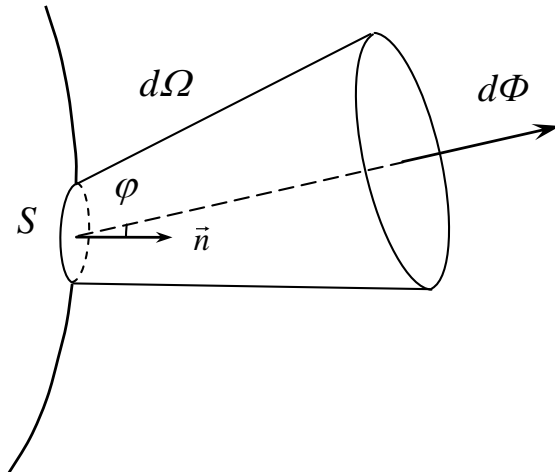


Рисунок 88.1

Ми розглядаємо нитку і тіло через світлофільтр, що виділяє із спектрів обох об'єктів випромінювання певної довжини хвилі (зазвичай це буває випромінювання з довжиною хвилі 660 нм). Регулюючи струм накалу в нитці лампи, ми можемо добитися того, що нитка перестане бути видимою – зникне на тлі розжареного

чорного тіла. Це матиме місце, коли яскравості чорного тіла і нитки для використовуваної довжини світлової хвилі порівнюються. Знаходячи значення сили струму накалу нитки за цих умов, а також виміривши температуру чорного тіла яким-небудь іншим способом – за допомогою термометра опору, термопари і тому подібне – і виконавши цю операцію при різних температурах, ми прокалібруємо таким чином в шкалі температур яскравість нитки залежно від струму напруження. Після цього нитку лампи можна застосовувати, у свою чергу, як термометр.

Допустимо, що нам треба виміряти температуру якогось нагрітого тіла. Помістимо прокалібровану нитку на тлі цього тіла та, змінюючи в ній струм накалу I , доб'ємося її зникання. Користуючись калібрувальним графіком, ми можемо знайти відповідну цьому струму температуру чорного тіла. Якщо випромінювання нашого тіла відрізняється від випромінювання чорного тіла, то знайдене значення температури потребує деякої поправки, оскільки воно відповідає не дійсній, а *яскравісній температурі*. Під нею розуміється *температура чорного тіла, яке*

для $\lambda = 600$ нм має ту ж саму яскравість, що і дане нам тіло за умов спостереження.

Яскравісна температура тіла $T_{\text{яскр}}$ буде завжди нижча за його термодинамічну температуру T , оскільки, згідно закону Кирхгофа, будь-яке тіло випромінює при тій же температурі менше, ніж чорне тіло. Отже, довільне тіло, що має в даний момент однакову з чорним тілом яскравість (для певної довжини хвилі), має термодинамічну температуру вище за температуру чорного тіла, тобто вище за ту температуру яскравості, яка визначається за допомогою пірометра.

Відмінність між температурами яскравісної і термодинамічної може бути значною. Зв'язок між ними встановлюється співвідношенням:

$$T = T_{\text{яскр}} + \Delta T \quad (88.6)$$

де

$$\Delta T = \alpha T_{\text{яскр}}^2 \quad (88.7)$$

Коефіцієнт пропорційності α залежить від природи випромінюючого тіла та визначається з досвіду. Зокрема, для вольфраму

$$\alpha = 4,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}.$$

Схема пірометра, описаного вище, представлена на рисунку 88.2. Об'єктив пірометра 3 проектує зображення досліджуваного тіла в площину розташування нитки напруження пірометричної лампи 1. Нитка напруження лампи має форму петлі або підкови. Нитка і зображення досліджуваного об'єкту, що дається об'єктивом, розглядаються спостерігачем через окуляр 5. У цьому ж окулярі розташований червоний світлофільтр 4, проникний для світла певної довжини хвилі $\lambda = 600$ нм. Цей світлофільтр може виводитися з поля зору обертанням рифленого кільця на окулярі пірометра для зручності фокусування об'єкту в білому світі.

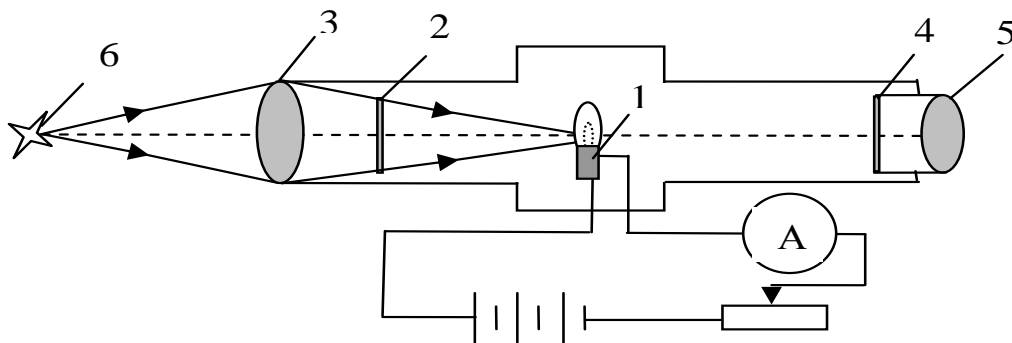


Рисунок 88.2

1 – еталонна лампочка; 2 – діафрагма; 3 – об’єктив;
4 – світлофільтр; 5 – окуляр; 6 – кінолампа.

Окрім червоного світлофільтру, в пірометрі є ще один червонуватий світлофільтр 2, показаний на рисунку 88.2. Він призначений для попереднього ослаблення яскравості досліджуваних тіл, температура яких перевищує 1400°C , оскільки при таких температурах нитка лампи починає інтенсивно випаровуватися. При введеному захисному світлофільтрі за допомогою нашого пірометра можна вимірювати температуру тіл, нагрітих до 2000°C , для чого пірометр забезпечений другою шкалою температур, проградуєваною відповідним чином.

Описаний пірометр має різні конструктивні втілення. Одне з них – пірометр конструкції Гартмана і Брауна – показаний на рисунку 88.3.

У наукових дослідженнях застосовуються і інші види пірометрів – радіаційні, що вимірюють *радіаційну температуру*, пірометри, що вимірюють так звану *колірну температуру*. Всі вони набагато менш зручні для практичного використання і тому не знайшли широкого вживання.



Рисунок 88.3

Опис установки

Лабораторна установка представлена на рисунку 88.4. Установка складається з оптичного пірометра 1, кінолампи 2, амперметра 3, вольтметра 4 та реостата 5. Ці елементи з'єднанні в ланцюг, електрична схема якого приведена на рисунку 88.5.

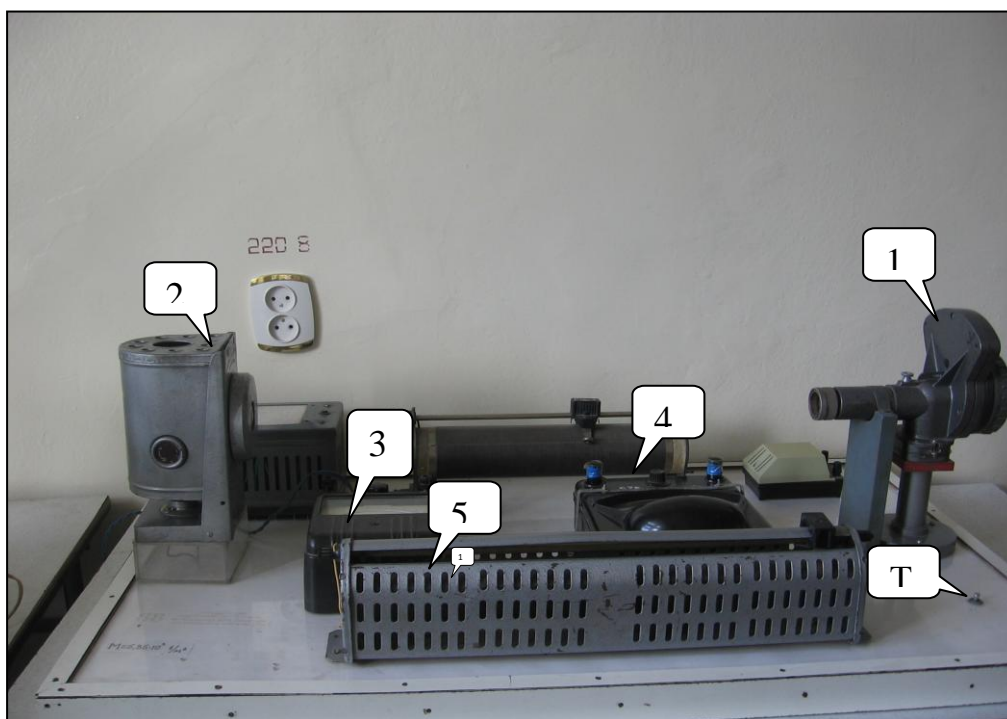


Рисунок 88.4

За допомогою амперметра A та вольтметра V знаходять силу струму I та напругу U на джерелі світла – кінолампи L , яка є досліджувальним тілом.

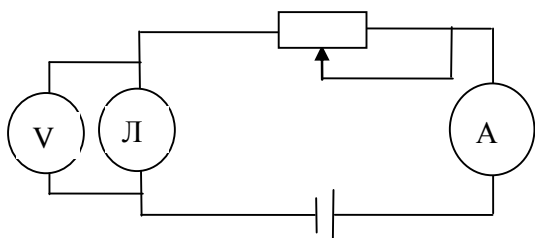


Рисунок 88.4

Відлік температури за шкалою пірометра роблять тоді, коли яскравості нитки розжарення еталонної лампочки пірометра і поверхні досліджуваного тіла будуть однаковими (рисунки 88.6.).

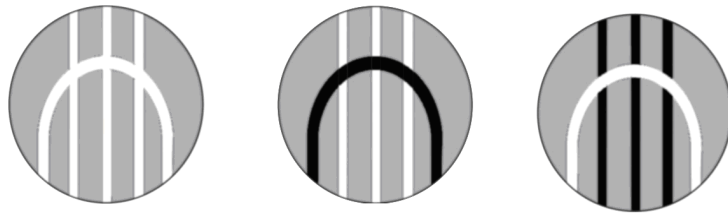


Рисунок 88.6

Якщо підведена енергія витрачається тільки на випромінювання, то потужність струму дорівнює:

$$P = IU = \sigma(T^4 - T_0^4) \cdot S \quad (88.8)$$

де T – температура спіралі лампи, T_0 – кімнатна температура, S – площа.

Оскільки спіраль не є чорним тілом, це враховується за допомогою коефіцієнта k . Підведена до лампи енергія випромінюється не повністю, тому (88.8) слід записати у вигляді:

$$K' \cdot IU = k \sigma S(T^4 - T_0^4) \quad (88.9)$$

де K' – коефіцієнт, котрий показує, яка доля енергії їде на випромінювання. Коефіцієнти K' , k та площу S можливо замінити єдиним множником M :

$$M = \frac{K'}{kS}, \quad [M] = m^{-2}. \quad (88.10)$$

В області температур ~ 1000 К T_0^4 складає приблизно 0,25% від T^4 , тому ним можна знехтувати. Тоді з (88.9) та (88.10) отримуємо

$$M \cdot IU = \sigma T^4. \quad (88.11)$$

З цього співвідношення можливо знайти коефіцієнт Стефана–Больцмана:

$$\sigma = \frac{M \cdot IU}{T^4}, \quad [\sigma] = \frac{Vm}{m^2 \cdot K^4}. \quad (88.12)$$

Порядок виконання роботи

- 1 Підготувати пірометр до роботи. Для цього:
 - при вимкненому живленні пірометра перевірити “0” стрілки пірометра, повернувши дисковий регулятор на пірометрі в крайнє ліве положення;
 - перевести тумблер T у положення „вкл.”;
 - встановити в пірометрі червоний (димчастий) світлофільтр.
- 2 Встановити за допомогою реостату силу струму в кінолампі $I = 1\text{A}$ та виміряти напругу U за допомогою вольтметра.
- 3 Регулятором пірометра встановлювати розжарення еталонної лампочки таким, щоб яскравість її нитки співпадала з яскравістю нитки кіно лампи.

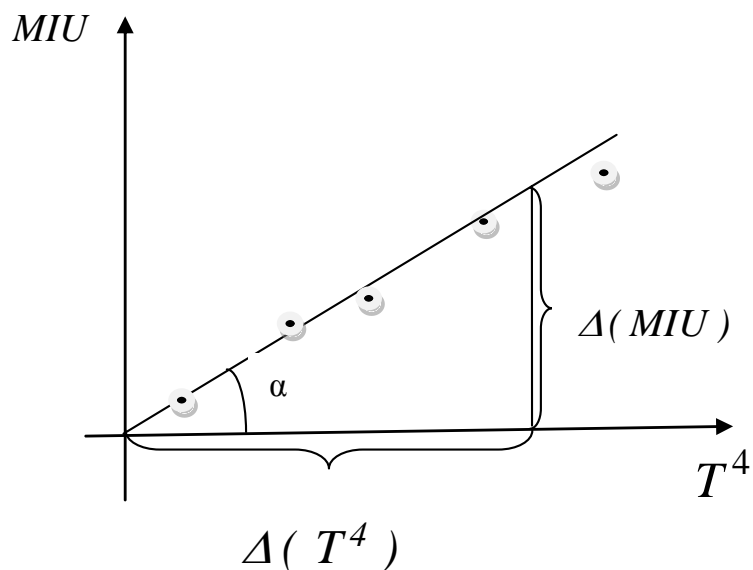


Рисунок 88.7

- 4 Знайти температуру t по шкалі пірометра та перерахувати її значення в температуру по Кельвіну T .
- 5 Результати вимірювань і розрахунків записати в таблицю 88.1.

- 6 Повторити пункти 2-3 для значення сили струму 1,1А; 1,2А; 1,3А; 1,4А.
- 7 За даними таблиці накреслити на міліметровому папері графік залежності добутку MIU від T^4 : $MIU = f(T^4)$.
- 8 За графіком знайти постійну Стефана–Больцмана. Визначити за формулою (88.12) тангенс α кута нахилу прямої до вісі T^4 (рисунок 88.7).

$$\operatorname{tg} \alpha = \sigma = \frac{\Delta(M \cdot IU)}{\Delta(T^4)}. \quad (88.12)$$

- 8 Підготувати відповіді на контрольні питання.

Звіт за виконану роботу

- 1 Робоча формула:

$$\sigma = \frac{\Delta(MIU)}{\Delta(T^4)}, \quad [\sigma] = \frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$$

- 2 Величини, що вказані на установці:

$$M = 6,86 \cdot 10^3 \text{ м}^{-2}.$$

- 3 Результати експерименту

Таблиця 88.1.

№ з.п	Сила струму кіноламп I, А	Різниця потенціалів U, В	Температура пірометра		MIU	T ⁴ К ⁴	Потійна Стефана- Больцмана $\sigma = \frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$
			t, °С	T, К			
1							
2							
3							
4							
5							

Контрольні питання

- 1 Що таке люмінесценція? Які види люмінесценції вам відомі?
- 2 Чим відрізняється теплове випромінювання від люмінесценції?
- 3 Що називається енергетичною світимістю тіла? Спектральною щільністю випромінювання? Намалювати графік залежності спектральної щільності випромінювання тіла від довжини хвилі.
- 4 Сформулюйте закон Кірхгофа. Що називається чорним тілом?
- 5 Приведіть формулювання закону Стефана-Больцмана.
- 6 Що стверджує закон зміщення Віна?
- 7 Запишіть формулу Релея-Джінса. При яких значеннях частоти вона збігається з експериментом?
- 8 Яку гіпотезу висунув М.Планк для пояснення ходу кривій спектральної щільності випромінювання чорного тіла?
- 9 Яке значення мало відкриття Планком дискретності випромінювання енергії для подальшого розвитку фізики мікросвіту?
- 10 Для чого призначені оптичні прилади, звані пірометрами, і який принцип їх дії?
- 11 Що називається яскравісною температурою тіла? Дайте розгорнуту характеристику цьому поняттю.

Література

- 1 Ландсберг Г.С. Оптика. Изд. "Наука", М., 1989, 760 с.