

ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ ТЕПЛОВИХ ВЕЛИЧИН

УДК 536.5; 536.5.081

ОСНОВИ КВАНТОВОЇ ТЕРМОМЕТРІЇ

© Стадник Богдан, Яцишин Святослав, 2016

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра інформаційно-вимірювальних технологій,
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Доведено існування кванта температури, зумовленого дисипацією одного електрона на фонах за одиницю часу, та теоретично визначено його значення через фундаментальні фізичні сталі з установленою невпевністю, залежною від невпевностей методів визначення цих сталей. Показано можливість створення сучасного еталона температури на базі фундаментальних фізичних сталей із залученням еталона електричного опору на базі інверсного значення кванта електропровідності та еталона напруги на базі масиву переходів Джозефсона.

Ключові слова: еталон температури, перевизначення поняття “температура”, квантова одиниця термодинамічної температури.

Доказано существование кванта температуры, обусловленного диссипацией одного электрона на фонах в единицу времени, теоретически определено его значение через фундаментальные физические постоянные с установленным значением неопределенности, зависящей от неопределенности методов определения этих постоянных. Показано возможность создания современного эталона температуры на базе фундаментальных физических постоянных с привлечением эталона электрического сопротивления на основании инверсного значения кванта электропроводности и эталона напряжения на основании массива переходов Джозефсона.

Ключевые слова: эталон температуры, перевизначення поняття “температура”, квантовая единица термодинамической температуры.

At this moment the Temperature Unit remains the last, among 7 major units of SI, value that is not regulated at the atomic level. Such state of affairs cannot be deemed adequate for the advanced technology. After implementation of current CODATA “Temperature” redefinition, the next step in provision of scientific support for realizing the Temperature Measurement of new generation seems to be a creation of Quantum Standard on the basis of the fundamental physical constants.

The Boltzmann constant consideration related only to the energy of electrons scattering in process of collision with atoms may be incomplete and therefore not quite correct. While ignoring the process of acquiring energy by electrons to which may be involved in another fundamental physical constant such as Planck constant, the obtained model would be not quite perfect. These both sides of process combine a balanced approach to the problem of temperature arising as the heat manifestation (in the case of transmission of electric current through the substance) of the conduction electrons interacting with atoms. Therefore, occurrence of the Planck constant in proposed by us the Quantum Unit of Temperature becomes reasonable.

It is proved the existence of Quantum Unit of Temperature caused by single electron-phonon dissipation per second and determined its value with the uncertainty defined by the set of different physical methods. The possibility of researching the most contemporary measure of temperature on the basis of fundamental physical constants with involvement of the Standard of Electrical Resistance on the basis of Inverse of Conductance Quantum as well as the Standard of Voltage based on the Josephson junctions array is considered.

For this purpose are involved the Standard of electrical resistance on the basis of Inverse of Conductance Quantum as well as the Standard of voltage based on the Josephson junctions that can produce voltage pulses with time-integrated areas perfectly quantized in integer values of $h/2e$. As mentioned resistance we propose to study FET construction,

namely the CNTFET with built-in CNT which has to be superconductive. Source and drain have to be manufactured from two dissimilar conductive metals (for example constantan and copper) that constitute the T-type thermocouple via CNT quasi-junction. The last is inherent in resistance $R_{KI} = \frac{h}{e^2}$ which is equal to $25812.807\ 557 \pm 0.0040\ \Omega$, due to transient resistance of contacts. While studying the dissipation of electric power on such an electric resistance in temperature measurement area, it becomes able the estimation of temperature jump conjugated with $I = \frac{Ne}{t}$ which is formed per unit time t by N conduction electrons of each charge e that transfer energy $\frac{3}{2}kT$ to atoms of matter. Resulting value of temperature jump is deduced, and it is reduced later to single electron-phonon dissipation per second. Received value is identified as Reduced Quantum Unit of Temperature: $\Delta T \Big|_{\substack{\Delta \rightarrow 1.s. \\ N \rightarrow 1}} = \frac{2h}{3k_B} \left[\frac{K}{s.} \right] \cdot 1[s.]$. On condition of power supply from Johnston junctions array, it appears an opportunity to pass a discrete, clearly appointed number of electrons through Standard's CNT. The studied temperature jump is easiest to measure with minimal methodical error with help of built-in high-mentioned thermocouple.

It is determined by electric energy dissipated on CNTFET contacts at passing a current, via ratio of h and k_B and is equal to $3.199\ 493\ 42 \cdot 10^{-11}\ K$ with relative standard uncertainty $59.2 \cdot 10^{-8}$ (defined by well-known values h and k_B of NIST tables). It can be extremely helpful at Quantum Temperature Measurement Standard design.

Key words: temperature standard, redefinition of the "Temperature", quantum unit of thermodynamic temperature

Вступ. Наприкінці ХХ ст. внаслідок інтенсивних науково-дослідних досліджень у сфері нанотехнологій шість (m , A , kg , s , mol , cd) із семи основних одиниць системи СІ, окрім одиниці температури, K , виражено через фундаментальні фізичні сталі [1]. Подібний результат отримано щодо низки додаткових величин системи СІ. Створені еталони вважаються "внутрішніми – intrinsic" [2], оскільки визначені на основі згаданих сталей, а не побудовані з використанням незмінності матеріальних артефактів, як-от платино-іридієвий дріт у еталоні одиниці довжини. Їх робота ґрунтується на визначенні дискретного значення конкретної фізичної величини або її фіксованого розміру (кванта), що дає змогу побудувати шкалу цієї величини.

Аналіз досліджень у галузі. Визначення дискретного, чітко встановленого та пов'язаного з фундаментальними фізичними сталими значення температури – основне завдання сучасної термометрії. Вперше таке значення, що задовольняє вказані критерії, визначив відомий вчений Макс Планк. За результатами розгляду гравітації у Всесвіті (в момент його створення, коли гравітаційні сили стають порівнюваними за значеннями із силами інших фундаментальних взаємодій) він визначив температуру $T_p = 1,416\ 808\ (33) \cdot 10^{32}\ K$ через фундаментальні фізичні сталі – температуру, названу пізніше температурою

Планка на його честь. Цю температуру T_p М. Планк оцінив як:

$$T_p = \sqrt{\frac{hc^5}{2pGk^2}},$$

де h – стала Планка; c – швидкість світла у вакуумі; G – гравітаційна стала; k – стала Больцмана [2].

Хоча значення T_p може виконувати роль визначальної одиниці температурної шкали Планка: $0\ ^\circ C = 273,15\ K = 1,9279 \cdot 10^{-30}\ T_p$, ця температура не може слугувати одиницею розміру для квантової термометрії, оскільки це найвища температура, виражена теоретично; її не можна досягти, відтворити та виміряти.

Потребу в вимірюваному і відтворюваному квантовому еталоні температури продемонстрували праці науковців, представлені на 13-му Міжнародному симпозіумі TEMPMEKO-2016, діяльність котрого стосувалась зазначеної кардинальної проблеми термометрії: CODATA з'ясувала потребу перевизначення поняття "температура" [3], позаяк температура – фізична величина, що характеризує внутрішню енергію тіл, в наші дні не вимірюється безпосередньо. Всі засоби вимірювання перетворюють температуру на будь-яку іншу фізичну величину, яку можна зафіксувати експериментально. Оскільки температура зв'язана з енергією через сталу Больцмана, запропоновано [3] замінити температурні вимірювання енергетичними і цим уникнути методичної похибки

($\pm 0,01$ °C), зумовленої калібруванням засобів вимірювання температури в потрібній точці води T_{TPW} [4]. Низка провідних метрологічних центрів (США, Великобританія тощо) сформулювали [3], нове визначення одиниці температури: Кельвін, К, є одиницею термодинамічної температури; його розмір встановлюють, фіксуючи числове значення сталої Больцмана, що дорівнює $1.380\ 65 \dots \cdot 10^{-23}$ і виражена в одиницях $\text{с}^2\text{м}^2\text{кгК}^{-1}$, що еквівалентні Дж/К. Результат впровадження запропонованого визначення такий: 1 К визначатиметься за зміною термодинамічної температури, що призводить до зміни теплової енергії на $kT = 1.380\ 65 \dots \cdot 10^{-23}$ Дж. Це сприятиме точнішому визначенню і передаванню розміру одиниці термодинамічної температури безпосередньо методами первинної термометрії, зокрема, за дуже високих і низьких температур (первинна термометрія передбачає, що конкретний вимірювальний інструмент стосується певного межеранду (T), який можна визначити, безпосередньо обчисливши отримані результати без використання будь-яких інших невідомих величин, а лише застосовуючи фундаментальні фізичні сталі як коефіцієнти пропорційності).

У такому разі залишається попередньо визначити з якомога вищою точністю значення сталої Больцмана, що зроблено у низці досконалих праць, що ґрунтуються на різноманітних фізичних засадах. Чинне, рекомендоване CODATA, значення k визначається за результатами акустичної термометрії газів; близьке значення отримане електронним методом з використанням шумового термометра і становить $1,3806514(48) \cdot 10^{-23}$ Дж/К за відносної стандартної похибки $3,5 \cdot 10^{-6}$ за відносного зсуву від значення, рекомендованого CODATA 2010, на $+1,9 \cdot 10^{-6}$ [8]. Нещодавно “дослідники з відділу температури і вологості Національної фізичної лабораторії, Великобританія, здійснили достатньо досконале визначення сталої Больцмана за допомогою створеного ними надзвичайно точного і чутливого термометра, який вимірює температуру, зв’язану з рухом атомів” [9].

Проблеми. У результаті безпосереднє вимірювання T пропонують замінити непрямим вимірюванням, використовуючи рівняння: $T \sim E/k$. За всіма засадами метрології [5] таке вимірювання є менш точним порівняно з безпосереднім методом, оскільки його похибка δT замінюється в непрямому методі сумою двох похибок: $\delta E + \delta k$. Підміна засобів вимірювання

температури засобами вимірювання енергії неминуче спричинить низку проблем, зумовлених недостатньою теплоізоляцією і відведенням тепла, особливо інтенсивним в області низьких температур [6–7].

Метою цієї праці вважаємо доведення можливості квантування температури та вираження кванта температури через фундаментальні фізичні сталі, а також проведення досліджень щодо створення на цій основі еталона температури нового покоління.

Виклад основного матеріалу. Недостатня опрацьованість проблематики переведення розміру температури (1 К), як фізичної одиниці, на “квантову” основу спричинена почасти пересторогою щодо температури як величини, що у принципі не може бути дискретизованою. Тому архіважливим можна вважати дослідження можливості квантування температури.

Дослідження й визначення кванта температури.

Макро- та нановластивості, виражені через фундаментальні фізичні сталі у випадку температури як основної фізичної величини системи СІ. Урахування у розгляді лише сталої Больцмана, пов’язаної з енергією розсіювання електронів під час зіткнення з атомами, може бути неповним і тому не цілком коректним. Зважаючи на ігнорування процесів набуття енергії електронами, до яких можуть бути залучені інші фундаментальні фізичні сталі, до прикладу стала Планка, розглядувану модель не можна вважати досконалою. Зазначені два аспекти процесу сприятимуть формуванню збалансованого фізичного підходу до проблеми й визначенню поняття кванта температури, що виникає як прояв виділення теплової енергії (в разі пропускання електричного струму) електронами провідності під час їх взаємодії з атомами. Отже, поява сталої Планка у пропонованій нами квантовій одиниці температури стає доцільною.

Однак, існує інший, не менш ефективний шлях вивчення макровластивостей матеріалів через їх нановластивості. Він чітко показаний на прикладі аналізу результатів дослідження квантового ефекту Холла [10]: виявлено зв’язок між макрочастиною (сталою фон Клітцинга, що має розмірність опору $R_{KI} = h/e^2$), вираженою у фіксованому значенні вимірюваного електричного опору $25812.807\ 557 \pm \pm 0,0040$ Ом, або у квантові опору, з нанорозмірними характеристиками речовини, якими є заряд електрона e і стала Планка h . Подібні результати стосуються

досліджень зв'язку електричної напруги із зазначеними фундаментальними фізичними сталими [11]. Аналогічно нижче доводимо здатність виникнення кванта температури як прояву властивостей макророзмірної субстанції у зв'язку з електрон-фононою взаємодією, тобто взаємодією на нанорівні. І навпаки, для фіксування зазначеної взаємодії можна скористатись явищем термоелектрики, де наноефекти у вигляді низки елементарних вихрових струмів формують макрохарактеристику – інтегральну термо-ЕРС [13]. З її залученням можна експериментально зафіксувати мікроскопічні зміни температури з мінімальними методологічними похибками.

Можливість квантування температури та існування кванта температури. Розглянемо проходження дуже малих струмів через матеріал з вираженим ефектом Клітцинга. Ним може бути напівпровідниковий матеріал або один з видів карбонових матеріалів (графен або нанотрубки). Конкретно процес відбувається за низькосередніх температур [17] на контактах надпровідної карбонової нанотрубки, на графені або іншій речовині, де фіксується квантовий ефект Холла, з провідниковим (напівпровідниковим) матеріалом (для карбонових нанотрубок діаметром декілька нанометрів електрон провідності проявляє передусім хвильові властивості. Крізь такі нанотрубки електрони проходять так само, як світлові хвилі проходять по світловодах. Отже, електрика в наносвіті перетворюється на оптику, а джоулеве тепло розсіюється тільки на межі наносвіту, де нанотрубка з'єднується зі звичайним дротиком, тобто на контактах з підвідними дротами. Виведемо формулу: $R_{KI} = h/e^2$, що зв'язує квант опору з фундаментальними фізичними сталими. Нехай між вказаними контактами нанотрубки прикладено напругу U , а сила струму в ній становить I . Оскільки енергія не розсіюється, то її зміна між перерізами A і B становить $\Delta E = eU$. Це відбувається у проміжок часу Δt , що дорівнює часові прольоту між контактами. Співвідношення невизначеності Гейзенберга накладає обмеження на зміни ΔE ; Δt , звідки випливає, що $U \geq h/e \Delta t$. Оцінимо струм у нанотрубі як одновимірній квантовій структурі. У ній, як в атомі гелію, можуть співіснувати тільки два електрони з різними спінами. Це означає, що струм I між контактами дорівнює $I = 2e/\Delta t$. Звідси легко вивести формулу для шуканого опору: $R_{KI} = U/I = h/e^2$. Оскільки нанотрубки не гріють,

вони здатні пропускати струми величезної густини – понад 10^7 А/см². Якщо б у карбонових нанотрубок була звичайна (небалістична) провідність, то за вказаних струмів їхня температура зросла б до 20000 К, що набагато вище від температури їх згорання – 700 К.

Конструктивно пропонуємо проводити дослідження на одній з поширених конструкцій польових транзисторів, а саме на транзисторі з вбудованою, як база, надпровідною карбоною нанотрубною [13]. Витік і стік виготовлені з різних матеріалів, що разом утворюють термоелемент через нанотрубку як гарячий з'юкт. Така структура характеризується електричним опором $25812,807\ 557 \pm 0,0040$ Ом, зумовленим резистивними властивостями лише підвідних контактів. Вивчивши розсіювання електроенергії ($I^2 R = U^2 / R$) на такому електричному опорі в області вимірювання температури:

$$E = U^2 \Delta t / R_{KI} = I^2 R_{KI} \Delta t = N \frac{3}{2} kT, \quad (1)$$

зазначимо, що є можливість оцінити зміну температури ΔT , зумовлену розсіюванням N електронів. Замінюючи рівняння на $I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{Ne}{\Delta t}$ (Δt – час), ми приводимо його до такого:

$$\frac{(Ne)^2 h}{(\Delta t)^2 e^2} \Delta t = N \frac{3}{2} kT, \quad (2)$$

коли електричний струм утворюється за одиницю часу N електронами провідності, які передають власну енергію $\frac{3}{2} kT$ атомам. Звідси стрибок температури ΔT за струму I через надпровідну нанотрубку (охолодження вважається незначним) визначається як:

$$\Delta T = \frac{2hI}{3ke} = \frac{2hN}{3k\Delta t}, \quad K \quad (3)$$

Інакше: приріст температури зумовлюється релаксацією електронів на фонах у зоні контакту бази (надпровідної нанотрубки або напівпровідникового елемента із квантовим ефектом Холла) з витоком/стоком; за фіксованої кількості електронів за одиницю часу він визначається через фундаментальні фізичні сталі (h і k) і дорівнює $2h \cdot 1s / 3k = 3.2 \cdot 10^{-11}$ К за умови дисипації одного електрона за секунду. В разі живлення від масиву контактів Джозефсона з'являється змога пропустити певну контрольовану кількість електронів через елемент із квантовим ефектом Холла, до прикладу, через карбонову нанотрубку польового транзистора. Величину, зведену до дисипації одного

електрона на фононах за одиницю часу, ми назвали **приведеною квантовою одиницею температури** (ПКОТ) і визначаємо виразом:

$$\Delta T \Big|_{\substack{\Delta T \rightarrow 1s. \\ N \rightarrow 1}} = \frac{2h}{3k} \left[\frac{K}{s.} \right] \cdot 1[s.], K \quad (4)$$

Значення цієї величини не залежить від низки факторів впливу й виду речовини, а повністю визначається співвідношенням двох фундаментальних фізичних сталих (h/k).

Розглядавану ПКОТ можна рекомендувати для створення температурного еталона. Робота такого еталона ґрунтується на двох квантових ефектах (ефект Клітцинга і ефект Джозефсона); значення ПКОТ, виміряне щодо одиниць системи СІ, характеризується непевністю, що визначається сумою двох непевностей: сталої Планка h і сталої Больцмана k [14], що разом формують його сумарну відносну непевність, яка дорівнює $59,2 \cdot 10^{-8}$.

Звертаємо увагу, що непевності сталої Планка і сталої Больцмана наведено як зведені значення фізичних сталих, визначених за декількома релевантними фізичними методами. Наприклад, для вивчення сталої Планка застосовується метод балансу потужності, методи вивчення: густини кристала розсіюванням рентгенівських променів; магнітного резонансу, сталої

Фарадея, сталої Джозефсона. У результаті рекомендоване CODATA 2010 середнє значення відносної непевності сталої Планка становить $u_h = 4,4 \times 10^{-8}$.

Є різні методи вивчення сталої Больцмана. Сталу визначено вимірюванням швидкості звуку в газоподібному гелії, що містився у квазісферичному резонаторі (об'ємом 0,5 л) за температури, близької до температури потрійної точки води (273,16 К). Швидкість звуку c виводиться з вимірних експериментально акустичних резонансних частот за відомих розмірів квазісфери, причому останні отримані за допомогою одночасно проведеного мікрохвильового резонансу [15]. Оптичний (лазерний) метод вимірювання сталої Больцмана, що дає змогу досягти непевності $2 \cdot 10^{-4}$ у результаті послідовних 61-годинних вимірювань, вважається доволі перспективним [16]. Інші методи визначення також розглядаються NIST. Отримане значення сталої Больцмана визначається як середньозважене значення завдяки використанню згаданих методів, кожному з яких притаманне конкретне значення систематичної складової похибки/непевності.

За результатами проведеного дослідження запропоновано в [14] зв'язки основних одиниць СІ між собою (рис. 1) та засади визначення цих одиниць через фундаментальні фізичні сталі (рис. 2) видозмінюються, що відображають відповідні стрілки.

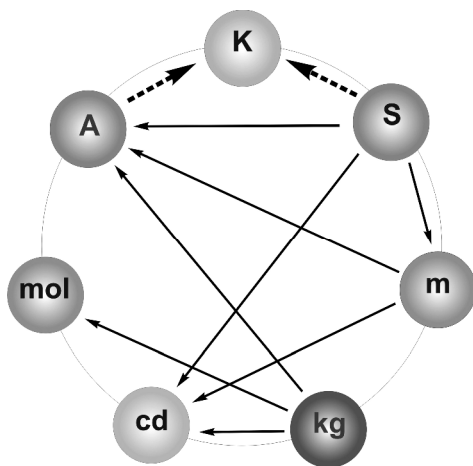


Рис. 1. Взаємозв'язки і взаємовизначення основних одиниць СІ: штрихові стрілки показують виявлений взаємозв'язок досліджуваної величини T з величиною I, A (через величини V і R) і з величиною t, c

Fig. 1. Interrelation and inter-definition of basic SI units: dashed arrows show the revealed relationship of the studied unit T (K) with unit I, A (by unit V and unit R) and with unit t, s

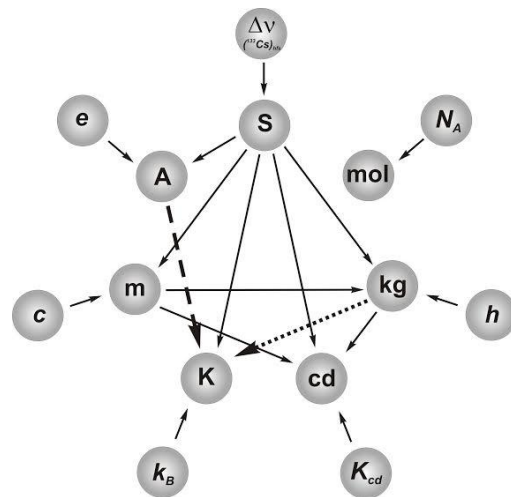


Рис. 2. Засади вивчення одиниць системи СІ через фундаментальні фізичні сталі: усунення взаємозв'язку між одиницями m і T (стрілка із точок) і поява (штрихова стрілка) взаємозв'язку між одиницями I, A і T, K

Fig. 2. Principles of mentioned units study via the fundamental physical constants of matter: elimination of interrelation between unit m and unit T (dotted arrow) as well as the emergence (dashed arrow) of interrelation between unit I, A and unit T, K

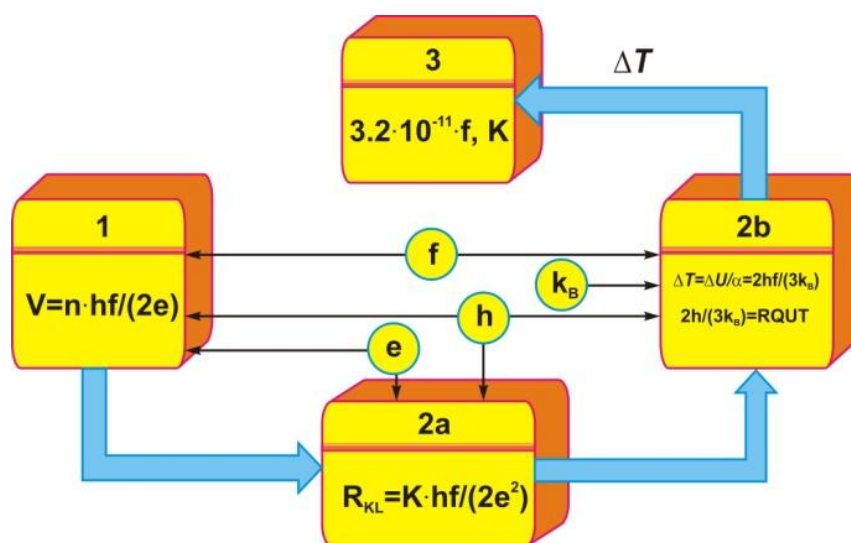


Рис. 3. Блок-схема покращеного еталона температури на основі ПКОТ і перенесення розміру одиниці від пропонованого еталона до робочих еталонів: 1 – еталон напруги на основі джозефсонівських переходів; 2a – карбонова нанотрубка як база польового нанотранзистора; 2b – блок передавання розміру одиниці; 3 – робочий еталон температури

Fig. 3. Block diagram of enhanced temperature standard based on the Reduced Quantum Unit of Temperature and the transfer of unit size of proposed Standard to the working standards: 1 – the Voltage standard based on the Josephson junctions array; 2a – carbon nanotube as field-effect transistor base; 2b – block of transfer of the unit size; 3 – the working standard of temperature

Метрологічна концепція кванта температури і можливість її реалізації. Отримана ПКОТ визначається через відомі із таблиць NIST [14] значення h та k і становить $3.199\,493\,42 \cdot 10^{-11}$ К з відносною стандартною непевністю $59,2 \cdot 10^{-8}$ для випадку дисипації одного електрона на фонах за одиницю часу.

Отримуючи мінімальні, важко зауважувані зміни температури $\sim 10^{-11}$ К, зумовлені релаксацією одного електрона на фонах за одиницю часу, ми повинні за рахунок збільшення струму отримати, завдяки інтеграційному ефекту термо-ЕРС, значення, достатнє для фіксування змін температури. Оскільки 1 А визначається як $6,2415093 \cdot 10^{18}$ електронів, що проходять через переріз провідника за 1 с, то за умови, що електронний насос спроможний відлічити 10^8 електронів за 1 с або амперметр – виміряти електричний струм $6,24 \cdot 10^{-10}$ А, ми повинні виміряти стрибок температури $3,2 \cdot 10^{-11} \text{К} \cdot 10^8 = 3,2 \cdot 10^{-3}$ К. Таке значення є вимірним: за чутливості ~ 43 мкВ/К ХК-термоелемента вимірне значення становить $\sim 0,14$ мкВ, а за десятикратно вищої чутливості напівпровідникового термоелемента

отриманого значення досягає 1,4 мкВ. Вищезазначена непевність – $59,2 \cdot 10^{-8}$ – дає змогу стверджувати, що шукана величина (стрибок температури з дискретністю $3,2 \cdot 10^{-3}$ К) визначається з абсолютною непевністю $\sim 1,9 \cdot 10^{-9}$ К.

Це становить основну перевагу еталона температури, створеного на базі фундаментальних фізичних сталей. На підставі наперед відомого значення температурного стрибка із відомою непевністю можна запропонувати методологію створення надзвичайно корисного еталона температури, який належить до первинних термометричних засобів і кваліфікується як “внутрішній еталон”.

Створення еталона температури на базі квантової одиниці температури. Дослідження показує принципову можливість і шлях створення еталона температури на основі фундаментальних фізичних сталей.

Для цього пропонується залучити чинні еталони на основі фундаментальних фізичних сталей: 1) еталон електричного опору на основі обернено-пропорційного значення кванта електропровідності (Inverse of

Conductance Quantum) [12]; 2) еталон напруги на основі джозефсонівських контактів [20], який може виробляти імпульси напруги, квантовані з цілими значеннями величини $h/2e$ з прецизійним перетворенням частоти на напругу (синтезована напруга визначається через відомі значення кількості імпульсів, тактову частоту і фундаментальні фізичні сталі).

В еталоні електричного опору, який може бути виготовлено на основі одного з поширених видів конструкцій польових транзисторів – CNT FET [13], витік і стік виготовляють із двох різнорідних провідних (напівпровідникових) матеріалів, до прикладу із нікелю та міді); останні формують термоелемент з квазізлужом у вигляді надпровідної карбонової нанотрубки (третє проміжне тіло в колі за основними законами термоелектрики), завдовжки $\sim 0,1$ мкм. У результаті отримуємо змогу виміряти термоелектричним методом стрибок температури на елементі конструкції еталона електричного опору з мінімальною методичною похибкою (або з максимальною достовірністю за підходом непевності) за умови одночасного визначення кількості електронів, які проходять через контакти нанотрубки, у разі її живлення від вищеописаного еталона напруги. У такий спосіб реалізується квантовий еталон температури.

Режим роботи установи загалом виглядає так. Той самий пристрій слугує і генератором відомого заздалегідь температурного стрибка на першому етапі, і використовується для вимірювання температури термоелектричним методом на другому етапі. Оскільки досліджуваний пристрій живиться послідовністю нетривалих ($\sim 10^{-2}$ с) імпульсів напруги, то на першому етапі на пристрій подається певний струм, а на другому етапі (за відсутності електричного струму) вимірюється приріст температури, що виконується за допомогою описаного термоелемента з мінімальною методичною похибкою.

Калібрування зразкового термоелемента за еталонном може бути реалізовано у разі розташування його гарячого злужу впритул до згаданого квазізлужу еталона температури. У разі відхилення його приросту температури від значення приросту температури еталона, що може бути зумовлене тепловтратами, вводиться коефіцієнт корекції.

Висновки

1. Зосереджуючись на творенні підвалин еталона температури, вдруге після М. Планка (який ввів температуру Планка T_P , тобто одиницю температури в системі одиниць Планка, що виступає в ролі визначальної одиниці температурної шкали Планка: $0\text{ }^\circ\text{C} = 273,15\text{ K} = 1,9279 \cdot 10^{-30} T_P$) доведено існування кванта температури, значення якого визначається швидкістю зміни температури внаслідок електрон-фононної дисипації, і виражено відношенням фундаментальних фізичних сталих (сталі Больцмана і сталі Планка) h/k ; дорівнює $3,199\,493\,42 \cdot 10^{-11}$ К/с. з відносною стандартною непевністю $59,2 \cdot 10^{-8}$.

2. Приведене до одиниці часу, для одноелектронної дисипації, це відношення становить $3,199\,493\,42 \cdot 10^{-11}$ К, що власне є квантом температури, який може бути реалізованим і використаним із залученням двох інших еталонів електричних величин на основі фундаментальних фізичних сталих: еталона електричного опору на основі обернено-пропорційного значення кванта електропровідності та еталона напруги на основі джозефсонівських контактів.

3. На основі визначеного розміру кванта температури запропоновано конструкцію еталона температури, яку можна рекомендувати для застосування як “внутрішній” еталон, тобто еталон, що не вимагає, на відміну від класичних еталонів системи СІ, проведення повторюваних вимірювань та звірювань для забезпечення й підтвердження оголошеної точності. “Внутрішні” еталони стають все важливішими метрологічними інструментами для поширення точних вимірювань, для прикладу, в кіберфізичних системах, елементи яких рознесені у просторі та часі.

Подяка

Автори вдячні ректорові Національного університету “Львівська політехніка”, проф. Ю. Бобалу за належну підтримку у проведенні досліджень та представленні їх за кордоном.

1. Mills Ia., Quinn T., Mohr P., Taylor B. and Williams E. *The New SI: units and fundamental constants (Royal Society Discussing Meeting, Jan. 2011)*. 2. Томилин К. А. *Планковские величины // 100 лет квантовой теории. ис-*

- тория. Физика. Философия : труды междунар. конф. — М.: НИИ-Природа, 2002. — С. 105–113.
3. Podesta M. de *The definition of the Kelvin in the New SI: its rationale, implementation and implications // Abstracts of XIII International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, TEMPMECO 2016, Zakopane, Polska, 26.06–01.07.2016. – P. 12.*
4. Consultative Committee for Thermometry, *Mise en Pratique for the definition of the Kelvin (Bureau International des Poids et Mesures, S'evres, France, 2006).*
5. Дорожовець М. М. *Опрацювання результатів вимірювань: навч. посібник. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2007.*
6. Hohmann M., Breitzkreutz P., Schalles M., Fröhlich T. *Calibration of heat flux sensors with small heat fluxes // In Proceedings of the 58 Internationales Wissenschaftliches Kolloquium: "In Shaping the future by engineering", p. 29 (Technische Universität, Ilmenau, Germany, 08–12 Sept. 2014).*
7. Lindeman M. *Microcalorimetry and transition-edge sensor; Thesis UCRL-LR-142199 (US Department of Energy, Lawrence Liverpool National laboratory, April 2000).*
8. Benz S. P., A. Pollarolo J. Qu, Rogalla H., Urano C., Tew W. L., Dresselhaus P. D., White D. R. *An Electronic Measurement of the Boltzmann Constant, Metrologia, 48 142 (2011), 23 p.*
9. Pitre L., Sparasci F., Truong D., Guillou A., Risegari L., Him M. *Measurement of the Boltzmann Constant k_B Using a Quasi-Spherical Acoustic Resonator, Int J Thermophys. 32:1825–1886 (2011); DOI 10.1007/s10765-011-10. 10.*
10. Giesbers A. J., Rietveld G., Houtzager E. et al. *Quantum resistance metrology in graphene, Applied Physics Letters, 93, pp. 222109-1 ... 3 (2008); DOI: 10, 1063/1.3043426.*
11. *A Practical Josephson Voltage Standard at One Volt. http://www.lee.eng.uerj.br/downloads/graduacao/medidas_eletricas/JosephsonJunction.pdf.*
12. Joyez P., Vion D., Götze M., Devoret M. and Esteve D. *The Josephson effect in nanoscale tunnel junctions, Journ. of Superconductivity, 12, 6, pp. 757–766 (1999).*
13. Sahoo R., Mishra R. *Simulations of Carbon Nanotube Field Effect Transistors, Internat. Journ. of Electronic Engineering Research, 1, 2, pp. 117–125 (2009).*
14. *The NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty, CODATA Internationally Recommended 2014 Values on Fundamental Physical Constants..*
15. Pitre L., Risegari L., Sparasci F., Plimmer M. D., Himbert M. E., Giuliano Albo P. *Determination of the Boltzmann constant from the speed of sound in helium gas at the triple point of water. Metrologia, Focus on the Boltzmann Constant, 52, 5 (BIPM & IOP Publishing, 19 Aug. 2015).*
16. Daussy C., Guinet M., Amy-Klein A., Djerroud K., et al, *First Direct Determination of the Boltzmann Constant by an Optical Method. <http://arxiv.org/ftp/quant-ph/papers/0701/0701176.pdf>.*
17. Novoselov K. S. et al. *Room-Temperature Quantum Hall Effect in Graphene. Science, 315, 1379 (2007).*