



УДК 621.384.327

## КВАНТОВА РАДІОМЕТРІЯ ТА ФОТОМЕТРІЯ

**Л.А. Назаренко**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Харківської національної академії міського господарства

**П.І. Нежмаков**, кандидат технічних наук, перший заступник генерального директора з наукової роботи ННЦ "Інститут метрології", м. Харків

**Є.П. Тимофеев**, кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник ННЦ "Інститут метрології", м. Харків



Л.А. Назаренко



П.І. Нежмаков



Є.П. Тимофеев

*Наведено аналіз стану метрологічного забезпечення в галузі квантової фотометрії та радіометрії. Показано необхідність проведення дискусії щодо можливого перевизначення кандели в термінах квантових одиниць – фотонів.*

*The metrological assurance of quantum radiometry and photometry is analyzed. The need for discussion of the possible candela redefinition in terms of quantum units, photons, is shown.*

### Вступ

Сучасне визначення кандели пов'язує фотометричні величини, виражені в люменах, з відповідними радіометричними величинами, вираженими у ватах, тільки на одній фіксованій частоті оптичного випромінювання (відповідній довжині хвилі 555 нм у повітрі). Радіометрія описує оптичне випромінювання і його характеристики в чисто фізичних термінах, у той час як фотометрія бере до уваги фізичні характеристики потужності випромінювання, що збуджують зорову систему, і спектральну чутливість останньої. Сумарний ефект такого впливу є істотно суб'єктивним, і ряд фотометричних величин не завжди знаходиться у простому зв'язку з фізичними величинами [1].

У теперішній час бурхливо розвиваються традиційні галузі науки і техніки, які вимагають високоточних фотометричних і радіометричних вимірювань, це – світлотехнічне конструювання, виробництво і використання оптичних джерел, приймачів, оптичних компонентів, кольорових матеріалів та устаткування для вимірювання оптичного випромінювання. У цьому класичному підході первинні оптичні ра-

діаційні шкали, загалом, ґрунтуються на криогенному радіометрі, пов'язаному із системою одиниць СІ через електричні одиниці. Для роботи в області ультрафіолету, глибокого ультрафіолету та інфрачервоної області спектра первинними джерелами шкал є розрахункові джерела, такі, як синхротрон і планківський випромінювач (або АЧТ – абсолютно чорне тіло) з прив'язкою до одиниць СІ – температури, довжини, електричних одиниць. Стандартна невизначеність у первинній детекторній шкалі на теперішній момент перебуває на рівні 0,005 % [2–5].

Шкала первинних джерел, зокрема, у видимій області, виводиться з первинної детекторної шкали через використання фільтрової радіометрії, і невизначеність таких вимірювань знаходиться на рівні 0,2 %. Детекторна шкала і шкала джерел установлюються на дискретних довжинах хвиль, а потім інтерполюються і стають спектрально неперервними через характеристики еталонів-переносників, таких, як трап-детектор і АЧТ.

При зменшенні потужності і переході до режиму рахування фотонів з'являються природні втрати у точності вимірювань, яких неможливо уникнути. Для прецизійної абсолютної радіометрії на квантовому рівні необхідні прогнозовані певні квазіоднотонні джерела і однотонні детектори. Методи квантової оптики дають можливість покращити невизначеність у цьому режимі, тому що вони прямо застосовуються для вимірювань на рівні рахування фотонів і можуть забезпечити прямий і, отже, більш ефективний шлях проведення вимірювань у режимі рахування фотонів [6, 7].

Недавні досягнення, отримані в області управління і підрахунку індивідуальних фотонів, а також в області створення однофотонних джерел, виглядають багатообіцяюче [8, 9]. Найближчим часом слід очікувати створення потоків випромінювання з точно встановленим числом фотонів за секунду, що дозволить отримати безпрецедентну прецизійність вимірювань. Більш того, можливість надійного маніпулювання індивідуальними фотонами сприятиме розвитку нових типів приладів, які, у свою чергу, вимагають подальшого розвитку мет-

рології для створення нових методів калібрування та відповідних еталонів, що ґрунтуються на квантових принципах. З цих міркувань передбачається перевизначення кандели в термінах фотонних одиниць. Це перевизначення розглядається як невеликий, проте корисний і необхідний крок у напрямку майбутнього розвитку фотометрії, радіометрії та визначення кандели у квантовому підході. Наприклад, галузі нанотехнологій і квантової комунікації, що виникають, забезпечують нові технології. У той же час це вимагає розробки нових метрологічних підходів для надійного проведення вимірювань на рівні наношквал. Передбачення бурхливого прогресу цих технологій вимагає випереджаючого розвитку точних вимірювань, прив'язаних до СІ, що використовують квантові радіометричні одиниці. Технологічна революція може приводити до нових реалізацій одиниць на квантовій основі з покращеною точністю.

### Квантове наближення

Головною проблемою сучасної радіометрії є складність перекриття широкого діапазону радіометричних вимірювань надійними простежуваними методами. Динамічний діапазон радіометрії поширюється більш ніж на 15 порядків. Проблема динамічного діапазону у фотометрії “вирищується” власне оком, яке має різні типи рецепторів, що діють при різних рівнях яскравості. Таким чином, для фотометричних вимірювань і для фотометричних одиниць зв'язки із системою СІ реалізуються через визначення кандели, дане Міжнародним бюро мір і ваг (МБМВ), і через фотометричну систему Міжнародної комісії з освітлення (МКО). Ситуація у цьому випадку відрізняється від радіометрії, тому що різні типи приладів базуються на різних фізичних принципах, які використовуються для вимірювання радіометричних величин різного рівня потоків. Таким чином, для радіометричних величин і радіометричних одиниць у повному динамічному діапазоні встановлення зв'язку із системою одиниць СІ є більш складним завданням.

У класичній радіометрії високих рівнів потоків первинні оптичні радіаційні шкали на базі джерел і приймачів в основному ґрунтуються на криогенній радіометрії з окресленим зв'язком із системою одиниць СІ через електричні одиниці. У видимому діапазоні детекторна шкала і шкала на базі джерела встановлюються на дискретних довжинах хвиль у динамічному діапазоні від 0,1 до 1 мВт. При дуже низьких потоках при наближенні до квантових рівнів у радіометрії використовується техніка підрахунку фотонів. Для високоточної абсолютної радіометрії на квантовому рівні необхідні надійні фотонні джерела, що розраховуються, і однофотонні приймачі.

Ключовою вимогою прогресу квантових інформаційних технологій є створення джерел, які гарантовано виробляють поодинокі фотони (в ан-

гломовному трактуванні “*photons on demand*” – “фотони на замовлення”).

З недавнього часу стало можливим застосування однофотонних джерел випромінювання, які використовують пуассонівську генерацію одиничних фотонів.

Лазерний пучок може бути описаний однофотонним когерентним станом з пуассонівським розподілом числа фотонів:

$$p(n) = \frac{\mu^n}{n!} \cdot e^{-\mu},$$

де  $\mu$  – фотонне число в пучку.

Таким чином, сильно ослаблений лазерний імпульс з дуже малим  $\mu$  досить добре апроксимує однофотонний стан з імовірністю отримання одиничного фотона, коли  $\mu$  наближається до нуля ( $\mu \rightarrow 0$ ). На жаль, частка вакуумних станів потім різко збільшується. Більш того, значення фотонного числа не можна зробити як завгодно низькими через детекторний темновий фон.

Квазіодиночні фотонні стани можуть бути отримані більш ефективно при використанні пари фотонів, що генеруються спонтанним параметричним перетворенням вниз (СПП, в англомовному варіанті – “*spontaneous parametric down conversion*”). Можливий розпад фотона, що падає на кристал, на пару корельованих фотонів (які традиційно називаються “холостий” і “сигнал”) із сумарною енергією фотона, що падає. Такі процеси пояснюють явище параметричного розсіювання світла.

Параметричне розсіювання дає унікальну можливість створення двофотонних станів поля і, крім того, відрізняється рядом інших цікавих особливостей.

Із безлічі ефектів нелінійної оптики особливий інтерес викликають явища, пов'язані з випромінюванням фотонів парами (пари фотонів, що виникають одночасно, часто називають “біфотонами”).

Параметричне перетворення частоти дозволяє проводити абсолютні (які не вимагають калібрування) вимірювання яскравості світла [6, 7]. Крім того, одночасність і спрямованість вильоту фотонів у парах при параметричному розсіянні дозволяє створити еталонний генератор фотонів, що випромінює відоме число фотонів:

$$\vec{k}_1 + \vec{k}_2 = \vec{k}_3,$$

де  $\vec{k}_1$  – хвильовий вектор спостережуваного розсіяного світла (сигнальний);  $\vec{k}_3$  – хвильовий вектор підкачки;  $\vec{k}_2$  – хвильовий вектор так званої холостої хвилі. Це дозволяє створити певне однофотонне джерело, в якому число фотонів розподілено за пуассонівським законом. Відмінною рисою такого процесу є сильна часова кореляція між фотонами в парі. Ідеально, якщо лічильник фотонів виявляє один фотон на шляху холостого, тоді через надзвичайно короткий інтервал, порядку сотень фемтосекунд, інший фотон з пари виявляється у сигнальному

пучку. Однак утрати в сигнальному пучку та тепловий фон детектора можуть ускладнити фіксацію фотонів у сигнальному пучку.

### Однофотонні детектори та детектори числа фотонів

Традиційні детектори однофотонного рахування не можуть розрізняти фотони, які прибувають в один і той же момент часу, тому вони не підходять для вимірювання розподілу числа фотонів від однофотонних випромінювачів. Найбільш поширеними лічильниками фотонів є лавинні фотодіоди.

Для детекторів одиничних фотонів застосовуються класичні засоби калібрування, що базуються на використанні сильно ослабленого лазерного джерела, каліброваного послаблювача і традиційного вимірювача потужності неослабленого лазерного джерела. Невизначеність такого вимірювання принципово обмежено невизначеністю калібрування дуже низького коефіцієнта пропускання, необхідного для досягнення однофотонного рівня [6, 7].

Це обмеження стимулює вивчення альтернативних засобів калібрування, що ґрунтуються на використанні фотонів, що продукуються за допомогою СПП, де фотони генеруються парами, строго корельованими за напрямком, довжиною хвилі і поляризацією. Більш того, два фотони тієї ж пари генеруються в межах часу когерентності десятків фемтосекунд один від одного. Оскільки спостереження фотона пари у певному напрямку (“сигнал”) припускає присутність іншого із цієї пари у сполучному напрямку (“холостий”), то відсутність останнього свідчить про відмінність квантової ефективності детектора від одиниці. Отже, цим методом може бути визначена квантова ефективність детектора. Цей абсолютний метод і його варіанти є перспективними для національних метрологічних інститутів при реалізації абсолютних радіометричних еталонів, оскільки в їхній основі лежить простий підрахунок отриманих відліків, і, отже, не потрібно ніяких еталонів порівняння.

Схема калібрування детекторів одиничних фотонів, що використовує СПП [6, 10], базується на специфічних властивостях процесу, коли фотони пучка накачування (зазвичай лазерного пучка) “розпадаються” усередині нелінійного кристала на два фотони меншої частоти 1 і 2 (“холостий” і “сигнал”) так, що енергія й імпульс зберігаються.

$$\omega_{\text{ритр}} = \omega_1 + \omega_2;$$

$$\vec{k}_{\text{ритр}} = \vec{k}_1 + \vec{k}_2,$$

Ці співвідношення зазвичай називають умовами досконалого фазового узгодження. Процес може бути спонтанним (СПП), коли немає мод випромінювання, виключаючи моди накачування, які інжектуються через вхідну поверхню кристала К.

Схему вимірювань наведено на рис. 1.

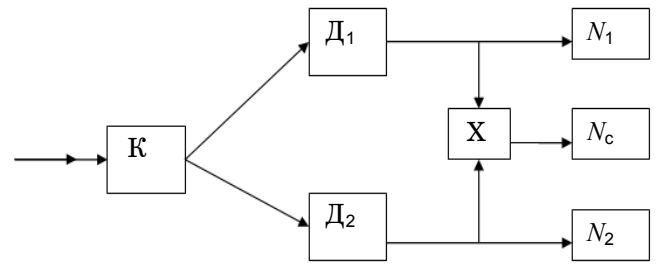


Рис. 1. Схема калібрування детекторів одиничних фотонів: К – нелінійний кристал; Д1 і Д2 – детектори фотонів; Х – схема збігів

По суті, калібрувальна процедура полягає в розташуванні двох детекторів рахування фотонів Д1 і Д2 за нелінійним кристалом К, уздовж напрямку поширення корельованих фотонних пар для вибраних пар частот. Виявлення події одним із двох детекторів з певністю гарантує (завдяки властивостям СПП) присутність фотона з фіксованою довжиною хвилі у сполучному напрямку, тобто в іншому детекторі.

Якщо  $N$  є загальне число фотонних пар, емітованих з кристала в заданий інтервал часу,  $\langle N_1 \rangle$ ,  $\langle N_2 \rangle$  і  $\langle N_C \rangle$  означає число подій, зареєстрованих у той же інтервал часу відповідно сигнальним детектором, холостим детектором і схемою збігів, ми маємо такі очевидні співвідношення:

$$\langle N_1 \rangle = \eta_1 \cdot N;$$

$$\langle N_2 \rangle = \eta_2 \cdot N,$$

де  $\eta_1$  і  $\eta_2$  – ефективності детектування в сигнальному і холостому плечах.

Число збігів

$$\langle N_C \rangle = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot N$$

викликано статистичною незалежністю двох детекторів. Тоді ефективність детектування може бути знайдена як

$$\eta_1 \langle N_C \rangle = \frac{\langle N_C \rangle}{\langle N_2 \rangle}.$$

Це просте співвідношення, трохи модифіковане відніманням фону і скориговане на час підрахунку, є основою для абсолютного калібрування детекторів одиничних фотонів за допомогою СПП. Цей метод тепер реалізує вимірювання з невизначеностями, порівнянними з традиційними методами [10]. Детальний аналіз бюджету невизначеностей методу СПП був проведений С.В. Поляковим і А.Л. Мігдалом (NIST) [10], які показали, що невизначеність цього методу (0,18 %) порівнянна з традиційними методами (0,17 %), і що два методи погоджені у межах 0,14 %.

Основною складністю у створенні детекторів для оптичного випромінювання, що базується на квантових принципах, є складність розробки детекторів одиничних фотонів, здатних надійно розпізнавати число фотонів, емітованих світловим імпульсом.

Істотний прорив у технології створення детекторів із розрізненням поодиноких фотонів відбувся через розвиток криогенних приладів, що ґрунтуються на надпровідності і працюють близько до температури переходу (transition-edge sensors, TES). Ці сенсори складаються із надпровідних тонких плівок, що електрично зміщують напругу в резистивному переході. Їх чутливість – результат сильної залежності опору від температури в переході й низька специфічна теплова та температурна провідності матеріалів при типово робочих температурах, близьких до 100 мК. Поглинання єдиного фотона переводить прилад із надпровідного стану до нормального з великою зміною електричного опору. Прилад виробляє електричний сигнал, пропорційний теплу, яке виникає через поглинання фотонів. Працюючи при температурі нижче 0,4 К, TES здатні розрізняти число поглинутих фотонів. На рис. 2 показано усереднені амплітуди імпульсів приймача TES при поглинанні одиничних фотонів [11].

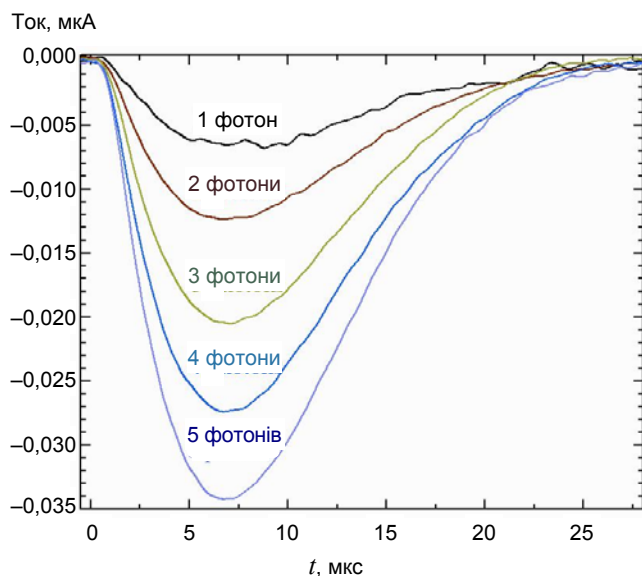


Рис. 2. Усереднені амплітуди імпульсів приймача TES при поглинанні одиничних фотонів

### Кандела: можливе перевизначення

Канделу було формально включено в систему одиниць СІ в 1954 р. як основну одиницю сили світла. До 1948 р. одиниця сили світла ґрунтувалася на подум'ї або еталонах на лампах розжарення. Її було замінено “новою канделою”, що базувалася на яскравості планківського випромінювача (чорне тіло) при температурі точки затвердіння платини. Цю модифікацію було підготовлено МКО і МБМВ. Її було ратифіковано в 1948 р. на 9-й Генеральній конференції з мір та ваг (ГКМВ) (Резолюція 7), яка прийняла нове міжнародне визначення одиниці світла – кандели (символ – cd). У 1967 р. 13-та ГКМВ (Резолюція 5) дала поліпшену версію визначення. Було вирішено дати таке визначення кандели: “Кандела є сила світла, що випроміню-

ється в перпендикулярному напрямку поверхні в  $1/600000$  квадратного метра чорного тіла при температурі затвердіння платини при тиску в  $101325$  ньютонів на квадратний метр”.

Проте існували експериментальні труднощі у виготовленні платинового чорного тіла і точного вимірювання температури неплатинового випромінювача чорного тіла. До того ж температура цих реалізацій на базі таких джерел була значно нижче температур сучасних джерел світла, що створювало суттєву невизначеність при передачі одиниці. У цей же час з'явилися нові можливості вимірювання оптичної потужності випромінювання з більшою точністю. Тому в 1979 р. на 16-й ГКМВ було прийнято нове визначення кандели (Резолюція 3): “Кандела – сила світла в заданому напрямку джерела, що емітує монохроматичне випромінювання частоти  $540 \cdot 10^{12}$  Гц, енергетична сила світла якої у цьому напрямку становить  $1/683$  Вт/ср”.

Визначення дали в термінах монохроматичного випромінювання, а не широкосмугового випромінювання, яке передбачає визначення за допомогою чорного тіла. Таким чином, це було фундаментальне зрушення у визначенні кандели. Значення  $1/683$  Вт/ср, яке з'явилося у цьому визначенні, було вибрано таким чином, щоб забезпечити кращу спадкоємність із попереднім визначенням.

Теоретичне значення кандели  $1/682$  базується на  $T(P_t) = 2042$  К (температура затвердіння платини) і значенні радіаційних констант, тоді як національними метрологічними інститутами в цей час були отримані експериментальні значення в діапазоні від  $1/673$  до  $1/687$  Вт/ср. Таким чином, кандела розвивалася від дуже обмеженого визначення, що ґрунтується на артефакті – певному джерелі світла, – до більш загального визначення, яке дозволяє використовувати різні методи реалізації – фотометричний або радіометричний – з точно відомим чисельним співвідношенням люмен/ват на єдиній певній частоті.

Однак важливо зрозуміти, що фотометричні величини інтегруються в широкому діапазоні хвиль, і щоб вивести фотометричні величини з радіометричних спектральних вимірювань, необхідно “спектрально зважити” радіометричну величину відповідною стандартизованою функцією світлової ефективності. Таким чином, радіометрія і фотометрія стають тісно пов'язаними, коли фотометричні величини можуть бути отримані з радіометричних вимірювань, чим забезпечується основа для більш точних вимірювань.

Для забезпечення практичного керівництва в імплементації нового визначення Консультативний комітет з фотометрії та радіометрії (ККФР) схвалив у 1983 р. монографію “Principles Governing Photometry” [1], яка зібрала визначення і таблиці чисельних значень, уже прийнятих (або рекомендованих) ГКМВ, МБМВ і МКО. У квітні 2007 р. спеціальна робоча група підписала Меморандум про

взаєморозуміння та Угоду про співпрацю, де було прийнято, що МБМВ відповідальне за визначення і простежуваність кандели у системі СИ, а МКО – за стандартизацію спектральної чутливості людського ока.

Нинішнє визначення кандели, прийняте в 1979 р., пропонує користувачам більше гнучкості у виборі методу реалізації. Ця еволюція дає величезну перевагу – відкриває перспективу нових методів реалізації кандели без зміни визначення базової одиниці. Сьогодні більшість національних метрологічних інститутів реалізують канделу радіометричними методами. Ця реалізація може бути проведена прямим методом, при якому еталонна лампа прямо калібрується за силою світла абсолютним радіометром. Однак у більшості реалізацій кандели використовують непрямий метод калібрування еталонним фотометром (фотометром-переносником), який є фільтровим радіометром і калібрується за допомогою криогенного радіометра на декількох довжинах хвиль за потоком випромінювання, і потім інтерполують ці калібрувальні дані на інші довжини хвиль. Коли використовуються еталонні фотометри, створені на базі кремнієвих фотодіодів, еталонні лампи можуть калібруватися на основі непрямого радіометричного методу з розширеною невизначеністю вимірювань сили світла на рівні 0,2 % [12–15]. Еталонні фотометри також можуть бути використані для зберігання одиниці сили світла, проте поки немає консенсусу в цьому питанні і еталонні лампи все ще широко використовуються для зберігання фотометричних одиниць, забезпечуючи або відому силу світла в цьому напрямі, або відомий світловий потік. Таким чином, зв'язки між фотометрією та радіометрією збільшилися за останні 30 років і фотометрія стає в багатьох випадках прикладною частиною радіометрії. Ця еволюція поліпшила порівнянність між фотометрією та радіометрією в наукових і комерційних галузях. Знаменно, що функцію спектральної ефективності МКО  $V(\lambda)$  включено у визначення кандели 1979 р. лише непрямим способом. Це сталося тому, що в найближчому майбутньому очікувалися зміни Рекомендацій МКО для стандартного фотометричного спостереження, через те що стала можливою поліпшена модель для візуальної системи. Історія показала, що в той час, як модифікована і більш точна версія  $V(\lambda)$  стала можливою, використання первісної функції  $V(\lambda)$  збереглося, оскільки вона продовжувала адекватно служити спільноті користувачів.

У 2005 р. Консультативний комітет з одиниць (ККО) рекомендував нові визначення кілограма, ампера, кельвіна і моля. Їхні пропозиції полягали в перевизначенні цих чотирьох базових одиниць через фіксовані значення сталої Планка, елементарного заряду, сталої Больцмана і сталої Авогадро відповідно. На останніх зборах ККО у 2009 р. також дискутувалося питання щодо нового визна-

чення кандели так, щоб воно було гармонізовано з визначенням усіх семи основних одиниць, тобто через точні константи.

У 2009 р. це питання бурхливо обговорювалося на засіданні ККФР. Результатом цих дискусій стала в основному згода з пропозицією ККО з деякими змінами. З урахуванням рекомендації ККФР, офіційне визначення кандели через точну константу було сформульовано так [16]: *“Кандела, одиниця сили світла в заданому напрямку, є такою, що світлова ефективність монохроматичного випромінювання частоти  $540 \cdot 10^{12}$  Гц дорівнює в точності 683 кандел  $\text{sr}/\text{Wm}$ ”*.

ККФР підтвердив, що концепція “світлова ефективність випромінювання” є добре встановленою в галузі фотометрії. Враховуючи необхідність визначення кандели через точну константу, ККФР уперше ввів фундаментальну константу  $K_{cd}$  для фотометрії (індекс  $cd$  відноситься до кандели) і зробив таку рекомендацію: *“Таким чином, ми маємо точне співвідношення  $K_{cd} = 683 \text{ лм}/\text{Вт}$ . Ефект цього визначення полягає в тому, що кандела є сила світла в даному напрямку джерела, яке випромінює монохроматичне випромінювання частоти  $540 \cdot 10^{12}$  Гц і який має енергетичну силу випромінювання у цьому напрямку в  $1/683 \text{ Вт}/\text{ср}$ . Ця енергетична сила випромінювання відповідає фотонній силі випромінювання в  $(683 \cdot 540 \cdot 10^{12} \times 6,62606896 \cdot 10^{-34})^{-1}$  фотонів за секунду на стереадіан”*.

Ця нова фундаментальна константа для фотометрії подібна іншими фундаментальним константам у тому сенсі, що це константа природна і може бути виміряна експериментально. Саме останнє “краще значення” фотометричної константи було офіційно прийнято МБМВ у 1979 р., і воно тепер рекомендувалося ККО і ККФР як нова фундаментальна константа, тобто як одна із семи фундаментальних констант, які використовуються для встановлення системи одиниць СИ і приймають певні значення без невизначеності. Таким чином, у майбутньому, навіть якщо МКО встановить альтернативну функцію світлової ефективності, значення  $K_{cd}$  залишатиметься незмінним. Тут одиниця “фотони за секунду на стереадіан” використовується для фотонів сили випромінювання. Це відповідає запропонованому перевизначенню ампера, в якому одиниця “елементарний заряд за секунду” використовується для електричного струму. Відзначимо, що обидві величини “енергетична сила випромінювання” і “фотонна сила випромінювання” добре визначені МКО у світлотехнічному словнику [17].

Додаткова пропозиція в пояснювальному тексті була компромісом між прихильниками формулювання енергетичної сили світла всередині ККФР і тими, хто підтримує формулювання фотонної інтенсивності. Додання цієї пропозиції ніякою мірою не змінило поточного визначення точної одиниці,

однак зробило пропонувану версію прийнятною для обох сторін усередині ККФР. Останні досягнення у твердотільній фотоніці, оптоелектроніці та в галузі розробки оптичних детекторів обіцяють нові методи створення, обробки та детектування одиничних фотонів, і вони будуть сприяти створенню нових фотонних квантових технологій і нових галузей їх застосування. Таким чином, запропоновані пояснювальні пропозиції із включення квантових радіометричних термінів у визначення кандели, таких, як фотонна інтенсивність, можуть бути корисними для задоволення тих вимог квантової метрології, що виникають.

### Висновки

Еволюцію фотометрії, радіометрії та визначення кандели слід розглядати в термінах як класичного, так і квантового підходів. Метрологічна основа цих фізичних величин і пов'язана з ними основна одиниця системи СІ прив'язані до важливих біологічних процесів людського зору, які загалом описуються в термінах фотонних взаємодій. Прогрес у галузі метрології зумовлюється розвитком нових, покращених методів вимірювань на базі нових джерел або нових первинних детекторів. Недавні досягнення у створенні новітніх джерел одиничних фотонів і приймачів одиничних фотонів виявили проблему точних вимірювань у цьому діапазоні. Збільшення кількості і зростання потенційних можливостей квантових приладів, які використовують нові джерела і приймачі, значною мірою обмежується відсутністю квантової оптичної метрології. У довгостроковій перспективі ККФР необхідно переглядати визначення і практичну реалізацію кандели та інших фотометричних і радіометричних одиниць для більш повного забезпечення вимірювальної практики, враховуючи неухильно зростаючі потреби суспільства і необхідність у розвитку квантової радіометрії.

### Список літератури

1. *Principes regissant la photometrie: Principles Governing Photometry* VIPM Monographic / G. Wysocki, W.R. Blevin, K.G. Kessler, K.D. Mielenz. – 1983. – 32 p.
2. *Основы оптической радиометрии* / под ред. проф. А.Ф. Котюка. – М.: Физматлит, 2003. – 544 с.
3. *Zheng X. High-Accuracy primary and transfer standards for radiometric calibration* / X. Zheng, H. Wu, J. Zhang // *Chinese science bulletin*. – November 2000. – Vol. 45, No 21. – P. 2009–2013.

4. *Photometry, radiometry and “the candela”: evolution in the classical and quantum world* / J.C. Zwinkels, E. Ikonen, N.P. Fox [et al.] // *Metrologia*. – 2010. – No 47. – P. 15–32.
5. *Купко А.Д. Метрологическое обеспечение световых измерений в Украине* / А.Д. Купко, Л.А. Назаренко // *Светотехника*. – 2001. – № 5. – С. 38–40.
6. *Клышко Д.Н. Об использовании двухфотонного света для абсолютной калибровки фотоэлектрических детекторов* / Д.Н. Клышко // *Квантовая электроника*. – 1980. – Т. 7, № 9. – С. 1932–1940.
7. *Клышко Д.Н. Перспективы квантовой фотометрии* / Д.Н. Клышко, А.Н. Пеннин // *УФН*. – 1989. – Вып. 4. – С. 653–665.
8. *Measurement of sub-shot-noise spatial correlations without background subtraction* / G. Brida, L. Caspani, A. Gatti [et al.] // *Physical review letters*. – 2009. – Vol. 102.
9. *Brida G. Experimental realization of sub-shot-noise quantum imaging* / G. Brida, M. Genovese, R. Berchera // *Nature Photonics*. – 2010. – Vol. 4. – P. 227–230.
10. *Sergienko F. High accuracy verification of a correlated photon-based method for determining photon-counting detection efficiency* / F. Sergienko, S.V. Polyakov, A.L. Migdall // *Optics Express*. – 2007. – Vol. 15, No 4. – P. 1390–1407.
11. *Photon-number discriminating superconducting transition-edge sensors* / M. Rajteri, E. Taralli, C. Portesi [et al.] // *Metrologia*. – 2009, No 46. – P. 283–287.
12. *Goodman T.M. The NPL radiometric realization of the candela* / T.M. Goodman, P.J. Key // *Metrologia*. – 1988. – No 25. – P. 29–40.
13. *The detector-based candela scale and related photometric calibration procedures at NIST* / Y. Ohno, C.L. Cramer, J.E. Handts, G. Eppeldauer // *Journal of the Illuminating engineering society*. – Winter 1994. – P. 89–98.
14. *Erb W. PTB network for realization and maintenance of the candela* / W. Erb, G. Sauter // *Metrologia*. – 1997. – No 34. – P. 115–124.
15. *Realization of the unit of luminous intensity at the HUT* / P. Toivanen, P. Karha, F. Manoocheri, E. Ikonen // *Metrologia*. – 2000. – No 37. – P. 131–140.
16. *Consultative Committee for units (CCU): report of the 19<sup>th</sup> meeting*. – 26–28 May 2009.
17. *Международный светотехнический словарь* / под общ. ред. Д.Н. Лазарева. – 3-е изд. – М.: Рус. яз., 1979. – 280 с.