

УДК 621.384.327

**Л. А. Назаренко**, докт. техн. наук,  
Харьковская национальная академия городского хозяйства,  
e-mail: [Lnazarenko@ksame.kharkov.ua](mailto:Lnazarenko@ksame.kharkov.ua)

**Е. П. Тимофеев**, канд. техн. наук,  
Национальный научный центр  
"Институт метрологии",  
e-mail: [timofeev@metrology.kharkov.ua](mailto:timofeev@metrology.kharkov.ua)

## **РАЗВИТИЕ ПРЕЦИЗИОННОЙ ФОТОМЕТРИИ И РАДИОМЕТРИИ**

**Введение.** Главной проблемой современной радиометрии является перекрытие широкого диапазона радиометрических измерений надежными и прослеживаемыми методами. Динамический диапазон радиометрии распространяется на более чем 13 порядков. Проблема динамического диапазона в фотометрии во многом «решается» собственно глазом. Для фотометрических измерений и для фотометрических единиц связи с системой единиц СИ реализуются через определение канделы и фотометрическую систему Международной комиссии по освещению (МКО). Для радиометрии ситуация отличается, потому что разные типы инструментов основаны на разных физических принципах. Поэтому для радиометрических величин и радиометрических единиц связь с системой единиц СИ более сложна, особенно для установления такой связи в полном динамическом диапазоне.

В классической радиометрии высоких уровней потоков первичная оптическая радиационная шкала для источников и приемников базируется на абсолютном криогенном радиометре с прослеживаемой связью с системой единиц СИ через электрические единицы. Для работ в ультрафиолетовой, глубоко ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра первичные шкалы основаны на вычисляемых источниках, таких как синхротрон или Планковский излучатель с прослеживаемостью к системе единиц СИ через единицы термометрии, электричества и длины [1-4].

Современный прогресс, произведенный в управлении и подсчете одиночных фотонов и создании источников единичных фотонов, обещает в течении ближайших нескольких лет создание радиационных потоков с точно определенным числом фотонов за секунду. Это даёт толчок к развитию в метрологии новых квантовых эталонов и новых квантовых методов калибровки. С этой целью предлагаем поддержать предложения по переопределению канделы в терминах фотонных единиц. Это переопределение рассматриваем как небольшой, но полезный шаг в направлении будущего фотометрии и радиометрии, шаг в направлении к квантовой метрологии. Эта формулировка будет также находиться в гармонии с предлагаемыми переопределениями четырех из семи базовых единиц системы СИ единиц - килограмма, ампера, кельвина и моля - в терминах фундаментальных констант [5].

Основой плана Европейской метрологической программы исследований по направлению к измерению количества и счету фотонов является международный

проект “Квантовая кандела”. “Квантовая кандела” - международный проект, финансируемый Европейской комиссией (РП7) в соответствии IMERA программой (осуществление метрологии в Европейском научном пространстве). Этот проект направлен на решение одной из наибольших проблем по фундаментальным метрологии EMRP2007, а именно пересмотр основной единицы СИ канделы с точки зрения числа фотонов (EMRP 2007, III.2.1, bullet 5, p. 26/47). Проект был составлен в ответ на предложение Международного комитета мер и весов о возможности переопределения канделы в терминах числа фотонов, а не в терминах оптической мощности. В связи, с тем, что формулировка через связь с постоянной Планка позволит добиться большей согласованности между определениями базовых единиц системы СИ и лучше обслуживать дополнительные потребности новых областей, таких как квантовых технологий, а также позволит улучшить поддержку классической радиометрии. Этот проект объединяет семь европейских национальных метрологических институтов, объединяет ресурсы как из классической радиометрии и, так и из области исследования однофотонных процессов, чтобы преодолеть разрыв между макроскопической величиной, такой как оптическая мощность и такой квантовой величиной, как фотон [6].

Все вышеперечисленное указывает на актуальность проведения постоянных метрологических работ, направленных на поиск возможных путей дальнейшего развития прецизионной радиометрии и фотометрии, показывает необходимость проведения дискуссий по возможному переопределению канделы в терминах квантовых единиц - фотонов.

Целью работы является поиск возможных путей дальнейшего совершенствования прецизионной радиометрии и фотометрии, выявление основных наиболее перспективных направлений их развития, а также разработка наиболее актуальных на данный момент времени методов и средств проведения прецизионных измерений.

Был проведен анализ основных направлений развития и совершенствования прецизионной радиометрии и фотометрии с учетом современного состояния науки и техники в Украине.

При этом решались следующие задачи:

1. Совершенствования процедуры измерения с использованием абсолютного радиометра (калориметра).
2. Совершенствования процедуры измерения с использованием трап-детектора на основе фотодиодов со 100% внутренней квантовой эффективностью за счет улучшения конструкции трап-детектора и учета дополнительных составляющих погрешности измерений.
3. Практической реализации приближения к методу счета фотонов за счет использования стабилизированного по амплитуде и частоте лазера и трап-детектора.

### **Абсолютный радиометр**

Абсолютный радиометр - это приемники с калибровкой методом замещения по электрической мощности. Абсолютный радиометр является инструментом, который может обнаружить и оценить уровень падающего оптического излучения и сравнить его с эквивалентным воздействием электрического сигнала, т.е. получить привязку к электрическим единицам системы СИ. Принцип работы абсолютного радиометра состоит в сравнении тепловой эффективности мощности оптического излучения с соответствующим количеством электрической тепловой мощности, что в настоящее время обычно называют электрическим замещением (ЭЗ).

Основой концепции ЭЗ является то, что тепловой эффект от воздействия замещающей электрической энергии непосредственно эквивалентен тепловому эффекту от воздействия измеряемой оптической мощности, т. е. тепловой поток и тепловые пути от каждого источника энергии непосредственно эквивалентны. К сожалению, в общей ситуации, особенно при воздействии окружающей среды, это не так, что подтверждается рядом экспериментов [7,8]. Это один из основных источников погрешности измерения. Можно выделить такие основные составляющие погрешности измерений.

- Потеря оптического излучения за счет неполного попадания в приемный элемент.

- Наличие зонной характеристики приемного элемента (зависимость выходного сигнала от места попадания луча в приемный элемент и относительного распределения мощности по сечению луча).

- Неэквивалентность замещения оптической мощности электрической за счет различия в условиях распространения энергии нагрева, за счет влияния токоподводящих проводов и т.п.

- Влияние фоновой засветки и других источников помех.

За последние годы был разработан широкий спектр практических приёмов и методов для улучшения характеристик абсолютных радиометров, наиболее полный обзор, которых можно найти в [7]. В конце 1970-х стало ясно, что многие из этих источников ошибок могли быть значительно уменьшены путем охлаждения радиометра до криогенных температур, в частности до температуры жидкого гелия ~ 4 К [8].

В настоящее время наиболее широко применяются абсолютные радиометры - криогенный радиометр (АКР) [9,10], применяемый для уровня мощностей порядка нескольких милливольт, и калориметр [11-15], применяемый для уровня мощностей порядка нескольких ватт или даже нескольких киловатт.

Наиболее часто используемыми источниками для абсолютной радиометрии являются модели черных тел и источники синхротронного излучения (синхротроны) на основе электронных ускорителей. Эти источники фотонов создают оптическое излучение в широком спектральном диапазоне, и их выходная мощность может быть рассчитана из фундаментальных принципов, основанных на знаниях некоторых физических параметров. Подробная информация о теории этих источников можно найти в существующей литературе [16].

Источник на основе модели черного тела используется для получения связи уровня его излучения и его температуры, т.е. для получения прослеживаемости к Международной температурной шкале. В связи с этим перспективным направлением, по нашему мнению, является использование абсолютного криогенного радиометра совместно с излучателем на основе модели четного тела привязанного к тройной точке воды.

Успехи в области лазеростроения позволяют с оптимизмом смотреть на возможность применения стабилизированных по частоте и мощности лазеров в радиометрии и фотометрии, т.е. на использование помещенного в совместное с АКР пространство стабилизированного по частоте и амплитуде лазера.

К достоинствам АКР следует отнести высокую чувствительность прибора, низкий фон паразитного излучения и, как результат всего этого, – высокую точность измерений. К существенным недостаткам АКР следует отнести:

- Низкий уровень измеряемых сигналов и узкий их динамический диапазон.
- Необходимость применения вакуумирования прибора.
- Необходимость использования при работе жидкого гелия.

Все это существенно усложняет и удорожает процесс проведения измерений с использованием АКР. Кроме того, АКР присущи и многие составляющие погрешности измерений характерных для калориметрических измерителей [7,17]. Имеются в виду описанные выше составляющие погрешности за счет зонной характеристики, неэквивалентности замещения и т.п.

К достоинством калориметрических измерителей можно отнести возможность работы с большими уровнями входных сигналов от нескольких ватт до нескольких киловатт [15]. Это позволяет получить хорошее соотношение сигнал/шум при проведении измерений в условиях использования комнатных температур, т.е. исключить применение криогенных технологий и, следовательно, существенно упростить и удешевить процесс проведения измерений.

Предварительные оценки и исследования показали что, рациональным будет применение вакуумирования источника и приемника в данном конкретном случае для уменьшения составляющих погрешности измерений за счет конвенции.

Совершенствование методики измерения с использованием калибруемого радиометра (калориметра) за счет ухода от низких температур и за счет разработки новой конструкции калибруемого по электрическому сигналу замещения калориметра позволит приблизить рабочий диапазон калориметра к энергетическому диапазону используемых современных лазерных источников, а также существенно расширить динамический диапазон калориметра при сохранении точностных характеристик прибора на уровне АКР [17]. Ранее проведенные исследования показывают, что использование секционированного калориметра позволяет существенно уменьшить зонную составляющую погрешности измерений [18,19]. Следовательно, использование секционированного вакуумированного калориметра позволит получить точностные характеристики прибора на уровне АКР при существенном ускорении и удешевлении процесса проведения измерений.

Прямое сравнение различных абсолютных радиометров служить хорошим средством исследования изменения чувствительности или изменения других характеристик АКР. Однако следует помнить, что криогенный радиометр - достаточно сложный измерительный инструмент, связанный с основными единицами системы СИ, и имеет потенциал для неизвестных и, соответственно, неучтенных систематических ошибок, которые затем могут распространяться на все другие радиометрические величины [2]. Развитие альтернативных методов измерений с сопоставимым уровнем неопределенности, в идеале связанных с фундаментальными константами, позволит проводить более надежные независимые сличения и обеспечение достоверности воспроизведения радиометрических и фотометрических единиц.

Следовательно:

1. При проведении прецизионных измерений в радиометрии и фотометрии перспективным направлением является использование абсолютного криогенного радиометра совместно с излучателем на основе модели четного тела, привязанного к тройной точке воды или помещенного в совместное с АКР пространство стабилизированного по частоте и амплитуде лазера.
2. На современном этапе развития науки и техники рациональным является при проведении прецизионных измерений на уровнях входной мощности порядка нескольких ватт использование калибруемого электрическим замещением калориметра. При этом при проведении прецизионных измерений необходимо вакуумирование калориметра и источника сигнала.
3. Использование секционированного вакуумированного калориметра позволит получить точностные характеристики прибора на уровне АКР при существенном ускорении и удешевлении процесса проведения измерений.

### Трап-детектор

Современные кремниевые фотодиоды являются наиболее широко применяемыми приемниками видимого света. Они обладают значительной чувствительностью, высокой пространственной однородностью приемного элемента и широким динамическим диапазоном при хорошей линейности. Кремниевый фотодиод обладает достаточным быстродействием и сохраняет стабильность своих параметров в течение длительного периода времени. Чувствительность кремниевого фотодиода как функция длины волны  $\lambda$  описывается следующим выражением.

$$S(\lambda) = n(\lambda) \frac{e\lambda}{hc} [1 - \rho(\lambda)][1 - \delta(\lambda)]$$

где  $n(\lambda)$  - показатель преломления воздуха для длин волн  $\lambda$  в воздухе.

$h = 6,626069 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка;

$c = 299792458$  м·с<sup>-1</sup> – скорость света в вакууме;

$\lambda$  – длина волны излучения;

$e = 1,602176 \cdot 10^{-19}$  К – заряд электрона.

$\rho(\lambda)$  - поправочный коэффициент, определяемый коэффициентом отражения от фотодиода.

$\delta(\lambda)$  - поправочный коэффициент, определяемый внутренней квантовой эффективностью фотодиода.

Последний фактор коррекции определяет внутреннюю квантовую эффективность фотодиода, в то время как внешний квантовый выход фотонов также включает потери из-за отражения.

Значение  $\delta(\lambda)=0$  соответствует идеальному детектору, где каждый из входящих фотонов создает одну электронно-дырочную пару и измеряется во внешней электрической цепи. Такой детектор работал бы как идеальный преобразователь фотонов в электроны. В реальных фотодиодах рекомбинации электронно-дырочной пары снижает чувствительность по сравнению с идеальным устройством. В 1980 году был опубликован ряд работ для определения рекомбинационных потерь в фотоприемниках [20-23]. В сочетании с учетом коэффициента отражения эти измерения позволили определить спектральную чувствительность  $S(\lambda)$  кремниевого фотодиода с неопределенностью, не превышающей 0,1% для спектрального диапазона видимых длин волн [21].

Для устранения потерь за счет зеркального отражения от приемной поверхности фотодиода предложено организовать несколько фотодиодов в конфигурации типа ловушки (трап-детектор) и проводить измерения комбинированной фототока всех диодов [24-28]. В трап-детекторе, зеркально отраженный луч света при наклонном падении последовательно направлен от одного фотодиода в другой. На рисунке 1 показана конструкция трап-детектора из трех фотодиодов, где третий фотодиод установлен под углом 90° к падающему лучу так, чтобы свет выходит из трап-детектора после пяти отражений. Уровень обратно отраженной мощности таким трап-детектором, как правило, не превышает, 0,3% входного уровня мощности, что является достаточно малой величиной, чтобы оценивать чувствительность трап-детектора с неопределенностью менее 0,01% [28].

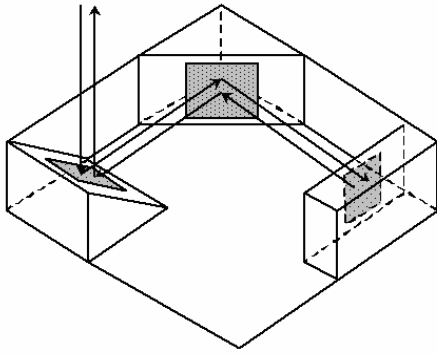


Рис. 1. - Конструкция трап - детектора из трех фотодиодов

фотонно-электронного преобразования может быть определена с расширенной неопределенности около 0,02% [31].

Анализ известных конструкций трап-детекторов, показывает, что все они, в основном, построены по одному принципу - вся совокупность  $N$  фотодиодов образует единую конфигурацию, в которой оптический луч последовательно отражается от каждого фотодиода. Последний фотодиод конфигурации устанавливается перпендикулярно оптическому лучу, заставляя его пройти еще раз всю конфигурацию в обратном направлении. Так как оптический луч отражается от каждого фотодиода (за исключением последнего, возвращающего луч обратно) два раза, то общее количество отражений равно  $(2N - 1)$ .

Интерес к разработке новых конструкций трап-детекторов не уменьшается. В последнее время появились сообщения о разработке новых конфигураций трап-детекторов, в которых общее количество отражений достигает значения  $(2N + 1)$  [32] и даже  $(2N + 3)$  [33].

Для проверки утверждения о 100% квантовой эффективности описанных выше приемников оптимальным является проведение измерений с использованием детерминированного источника одиночных фотонов и счетчика числа фотонов.

Если бы идеальные преобразователи фотонов в электрон были бы доступны, проблема измерения потока оптического излучения (особенно монохроматического) сводилась бы к потенциально более простой задаче измерения электрического тока. Кроме того, счет единичных фотонов был бы эквивалентен подсчету отдельных электронов.

Такой приемник со 100% квантовой эффективностью может в дальнейшем заменить АКР во многих прецизионных измерениях в фотометрии и радиометрии.

Следовательно, необходимо дальнейшее продолжение работ по усовершенствованию трап-детекторов на основе фотодиодов со 100% внутренней квантовой эффективностью

### Воспроизведение единиц люмена и канделы

Области фотометрии и радиометрии и связанных с ними единиц тесно связаны через нынешнее определение базового блока силы света - канделы.

В 1979 на XVI ГКМВ принято новое определение канделы: кандела - сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой  $540 \cdot 10^{12}$  Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет  $1/683$  Вт·ср<sup>-1</sup>. Так была установлена однозначная связь световых и энергетических величин, а максимальная световая эффективность  $K_m = 683$  лм/Вт

К остальным факторам, влияющим на чувствительность трап-детектора, следует отнести потери за счет диффузного отражения, поглощения фотонов без генерации носителей и потери при передаче и преобразовании сигнала. Их совместное действие может быть учтено на отдельных длинах волн с использованием лазерного излучателя путем сравнения чувствительности трап-детектора и абсолютного криогенного радиометра [29.30]. Чувствительность трап-детектора, и, таким образом, эффективность работы

фактически возведена в ранг точных (не имеющих погрешности) метрологических констант.

В 2009 г. Консультативный комитет радиометрии и фотометрии (ККРФ) рекомендовал такое определение канделы [5]:

Кандела - единица силы света в данном направлении, такова, что световая эффективность монохроматического излучения с частотой  $540 \cdot 10^{12}$  герц равна в точности 683 кандела стерадиан на ватт.

ККРФ подтвердил, что концепция «световая эффективность излучения» вполне установлена в области фотометрии, и ввел фундаментальную константу для фотометрии  $K_{cd}$ .

Таким образом, мы имеем точное соотношение  $K_{cd} = 683$  лм/Вт. Эффект этого определения в том, что кандела есть сила света в заданном направлении источника, который излучает монохроматическое излучение частотой  $540 \cdot 10^{12}$  Гц и имеет силу излучения в этом направлении  $1/683$  ватт на стерадиан. Эта сила излучения соответствует интенсивности фотонов  $(683 \cdot 540 \cdot 10^{12} \cdot 6,62606896 \cdot 10^{-34})^{-1}$  фотонов в секунду на стерадиан.

Нами были проведены экспериментальные исследования по возможной реализации единиц люмена и канделы с учетом вытекающих из вышеприведенного определения требований к наличию монохроматического источника излучению. В настоящее время наиболее стабильным источником монохроматического излучения является лазер. Вышеприведенное определение канделы соответствует длине волны излучения лазера 555.016 нм. К сожалению, стабильных лазеров на этой частоте пока нет. Но для оценки метода возможно использование лазера на другой частоте с последующим пересчетом полученной величины. В качестве счетчика фотонов можно использовать приемник со 100% внешней квантовой эффективностью на основе трап-детектора.

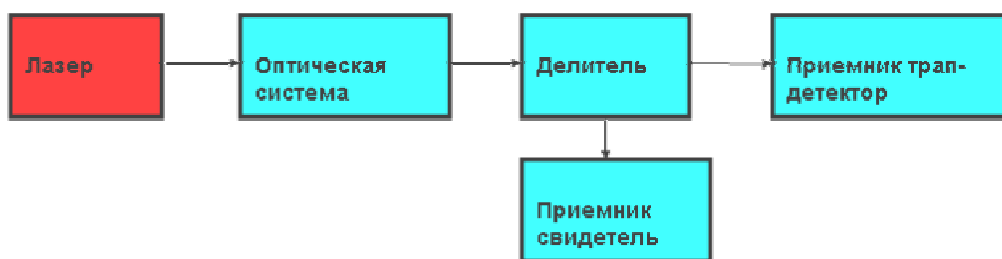


Рис 2. - Структурная схема экспериментальной установки по возможной реализации единиц люмена и канделы

На рис. 2 приведена структурная схема экспериментальной установки по возможной реализации единиц люмена и канделы с использованием стабилизированного по мощности и частоте лазера и приемника трап-детектора со 100% квантовой эффективностью. В качестве источника использовался модернизированный лазер на базе ЛГН-302.

Предварительно проведенные исследования лазера ЛГН-302 показали, что его характеристики по стабильности выходной мощности не удовлетворяют нашим требованиям. При этом одним из основных источников ухудшения характеристик лазера являются система питания лазерного излучателя и система стабилизации частоты излучения лазера ЛГН-302. В связи с этим была проведена полная замена системы питания лазерного излучателя. Используемый ранее высоковольтный блок питания на основе высокочастотного преобразователя заменен традиционным блоком с двухпериодным выпрямлением и последующей стабилизацией полученного

высоковольтного напряжения. Это позволило существенно улучшить характеристики питающего напряжения, уменьшить уровень помех и, как следствие, привело к улучшению характеристик лазерного излучателя.

Доработка системы стабилизации частоты излучения лазера ЛГН-302 была проведена с целью уменьшения амплитудных флуктуаций выходной мощности излучателя. С этой целью один из сигналов, подаваемых на компаратор сравнения, был заменен высокостабилизированным сигналом постоянного напряжения. Это позволило не менее, чем на порядок повысить стабильность выходной мощности модернизированного лазера ЛГН-302.

Относительная нестабильность частоты такого лазера не превышала  $1 \cdot 10^{-8}$  за времена усреднения не менее 1с. Относительная нестабильность мощности лазера не превышала  $1 \cdot 10^{-4}$ .

Для дополнительного контроля уровня выходной мощности использовался приемник-свидетель на основе термостабилизированного фотодиода. Для уменьшения воздействия наводок применен жидкостной термостат. Аналогичный метод термостатирования применен для трап-детектора.

Оптическая система необходима для задания точной геометрии луча при воспроизведении канделы. При этом накладываются дополнительные ограничения на характеристики и конструкцию используемого трап-детектора. При воспроизведении единицы люмена оптическая система может быть исключена.

Трап-детектор выполнен на базе фотодиодов фирмы Хамамацу S1337-1010BK. Исследования показали, что в таком устройстве внешняя квантовая эффективность на рабочей длине волны лазера 632,9 нм достигает значения 99,95 %. Выходная мощность модернизированного лазера составила 2,245 мВт. Полученная предварительная оценка погрешности измерений мощности лазерного излучения не превышает 0,05% .

Намечено проведение дальнейших работ по модернизации лазерного излучателя с целью перехода на генерацию зеленой линии 543,5 нм.

### **Выводы**

Эволюцию фотометрии, радиометрии необходимо рассматривать с точки зрения потребностей и развития как в классическом, так и в квантовом мире. Назрела необходимость проведения дискуссии по возможному переопределению канделы в терминах квантовых единиц – фотонов.

При этом первоочередной является задача по переходу от измерения мощности монохроматического излучения к измерению количества фотонов.

Перспективным направлением прецизионной радиометрии и фотометрии является использование абсолютного криогенного радиометра совместно с излучателем на основе модели четного тела, привязанного к тройной точке воды, или помещенного в совместное с абсолютным криогенным радиометром пространство стабилизированного по частоте и амплитуде лазера.

На современном этапе развития науки и техники рациональным является при проведении прецизионных измерений на уровнях входной мощности порядка нескольких ватт использование калибруемого электрическим замещением калориметра. При этом при проведении прецизионных измерений необходимо вакуумирование калориметра и источника оптического сигнала на базе стабилизированного по частоте и амплитуде лазера.

Использование секционированного вакуумированного калориметра позволит получить точностные характеристики прибора на уровне АКР при существенном ускорении и удешевлении процесса проведения измерений.



Необходимо также продолжение работ по дальнейшему усовершенствованию трап-детекторов на основе фотодиодов со 100% внутренней квантовой эффективностью.

Приведенные экспериментальные результаты подтверждают возможность реализации единиц люмена и канделя с использованием стабилизированного по мощности и частоте лазера и приемника трап-детектора со 100% квантовой эффективностью.

Полученная предварительная оценка погрешности измерений мощности лазерного излучения не превышает 0,05%, что подтверждает высокие потенциальные возможности предложенного технического решения.

#### Литература

1. Основы оптической радиометрии / Под ред. Проф. А.Ф.Котюка.-М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 544 с.
2. J. C. Zwinkels, E. Ikonen, N. P. Fox, G. Ulm, M. L. Rastello Photometry, radiometry and ‘the candela’: evolution in the classical and quantum world // Metrologia. - 2010. - №47. - P.15-32.
3. X. Zheng, H. Wu, J. Zhang a. o. High-Accuracy Primary and Transfer Standards for Radiometric Calibration //Chinese Science Bulletin, v. 45, N. 21, November 2000, - P.2009 - 2013.
4. Купко А.Д., Назаренко Л.А. Метрологическое обеспечение световых измерений в Украине //Светотехника. -2001. -№ 5. -С. 38–40.
5. Consultative Committee for Units (CCU) Report of the 19th Meeting 26-28 May 2009
6. www.quantumcandela.org.
7. Absolute radiometry: electrically calibrated thermal detectors of optical radiation , by Hengstberger, F. Boston : Academic Press, 1989. p 240.
8. Ginnings D C and Reilly M L 1972 Temperature: its Measurement and Control in Science and Industry vol 4 (New York: American Institute of Physics) pp 339-48
9. D. B. Thomas, “An International Comparison of Absolute Radiant Power Measurement Capabilities”, J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol., vol. 95, n° 5, pp. 525 – 531, 1990.
10. T. R. Gentile, J. M. Houston and C. L. Cromer, “Realization of a scale of National Institute of Standards and Technology high-accuracy cryogenic radiometer”, Applied Optics, vol. 35, n°. 22, pp. 4392 – 4403, 1996.
11. Котюк А.Ф. и др. Обеспечение единства измерений мощности лазерного излучения // Измерительная техника, 2005 г., № 11, с. 20 - 23.
- 12.Иванов В.С., Котюк А.Ф., Либерман А.А. и др. Государственный первичный эталон единицы средней мощности лазерного излучения // Измерительная техника, 2007 г., № 7, с. 3 - 6.
13. Овсик Я. Польская система метрологического обеспечения лазерной техники. Автореферат дисс. на соискание степени д.т.н., ВНИИОФИ, 1996.
14. Тимофеев Е.П. Метрологическое обеспечение в области энергетической лазерометрии //Український метрологічний журнал. – N1. – 2007. – с.29-33.
15. Тимофеев Е.П. Разработка и исследование средств измерений энергетических характеристик лазерного излучения //Український метрологічний журнал. – N2. – 2009. – с.29-35.
- 16 Holland J, Seidel J, Klein R, Ulm G, Migdall A and Ware M 2005 Primary sources for use in radiometry Optical Radiometry ed A C Parr et al (Amsterdam: Elsevier, Academic) pp 90-213
17. Загорский Я.Т., Котюк А.Ф. Основы метрологического обеспечения лазерной энергетической фотометрии. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 172с.
18. Кузьмичев В.М., Соловьев В.С., Зинченко Н.И., Тимофеев Е.П. Снижение погрешности замещения калориметрических измерительных приемников // Український метрологічний журнал. – № 2. – 1997. – с.19-21.
- 19 Кузьмичев В.М., Соловьев В.С., Зинченко Н.И., Тимофеев Е.П. Калориметрический измерительный преобразователь// Патент України N 21494 від 7.05.98
- 20 E. F. Zalewski and J. Geist, Silicon photodiode absolute spectral response self-calibration, Appl. Opt. 19 (8), 1214-1216 (1980).
- 21 J. Geist, E. F. Zalewski and A. R. Schaefer, “Spectral response self-calibration and interpolation of silicon photodiodes,” Appl. Opt. 19, 3795-3799 (1980).
22. R. Korde and J. Geist, “Quantum efficiency stability of silicon photodiodes,” Appl. Opt. 26, 5284-5290 (1987).
- 23 J. L. Gardner and F. J. Wilkinson, Response time and linearity of inversion layer silicon photodiodes, Appl. Opt. 24, 1532-1534 (1985).

24. Гурьев Н.В., Купко А.Д., Назаренко Л.А. Двухдиодный трап-детектор //Український метрологічний журнал . -2002. -Вип. 1. -С. 40–44.
25. Купко А.Д. Использование трап-детектора для световых измерений //Український метрологічний журнал . -2008. -Вип. 1. -С. 24–29.
26. N. P. Fox, Trap Detectors and their Properties, Metrologia 28, 197-202 (1991).
27. E. F. Zalewski, C. R. Duda. Silicon photodiode device with 100 % external quantum efficiency, Appl. Opt. v. **22** (18), 2867-2873 (1983).
28. P. Karha, A. Naapalinna, P. Toivanen, F. Manoocheri, and E. Ikonen, "Filter radiometry based on direct utilization of trap detectors," Metrologia 35, 255-259 (1998).
29. J. E. Martin, N. P. Fox, and P. J. Key, "A cryogenic radiometer for absolute radiometric measurements," Metrologia 21, 147-155 (1985).
30. Lorentz S.R. Intercomparison between the NIST LBIR Absolut Criogenic Radiometer and Optical Trap Detector. Metrologia, 1993, 30, p. 341 - 344.
31. L. Werner, J. Fischer, U. Johannsen and J. Hartmann, "Accurate determination of the spectral responsivity of silicon detectors between 238 nm and 1015 nm using a laserbased cryogenic radiometer", Metrologia, vol. 37, pp. 279 –284, 2000.
32. Татьяна Д.Н. Трап-детектор. Патент Украины № 87197, Бюл. № 12, 2009 р.
33. Балабан В.М., Мунтян К.И., Тимофеев Е.П. Трап-детектор. Заявка на патент Украины № а 2011 02791.

## РОЗВИТОК ПРЕЦИЗІЙНОЇ ФОТОМЕТРІЇ І РАДІОМЕТРІЇ

Л. А. Назаренко, Є. П. Тимофеев

*У роботі наведено аналіз стану метрологічного забезпечення в галузі прецизійної фотометрії та радіометрії. Наведено експериментальні результати можливої реалізації одиниць люмена і кандели з використанням стабілізованого по потужності й частоті лазера і приймача трап-детектора з 100% квантовою ефективністю. Отримана попередня оцінка похибки вимірювань потужності лазерного випромінювання не перевищує 0,05%*

## DEVELOPMENT OF PRECISION PHOTOMETRY AND RADIOMETER

L. A. Nazarenko, Ye. P. Timofeev

*The paper analyzes the state of metrological support in the field of precision photometry and radiometry. Experimental results on the possible implementation of the lumen and candela units using a stabilized power and frequency laser and a trap detector receiver with 100% quantum efficiency are presented in the paper. Estimated preliminary assessment of the measurement error of the laser radiation does not exceed 0.05%.*