

# НАЦИОНАЛЬНАЯ СИСТЕМА МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНИКИ И ОПТИКИ



**Вячеслав Длугунович,**  
заведующий Центром  
испытаний лазерной  
техники Института физики  
НАН Беларуси, доктор  
физико-математических  
наук



**Анатолий Исаевич,**  
заместитель заведующего  
Центром испытаний  
лазерной техники Института  
физики НАН Беларуси,  
кандидат физико-  
математических наук



**Сергей Никоненко,**  
старший научный сотрудник  
Центра испытаний лазерной  
техники Института физики  
НАН Беларуси

Лазерно-оптические технологии играют все возрастающую роль в производственных процессах, науке, здравоохранении, экологии, обороне, а также при передаче и обработке информации, в том числе измерительной. Именно с ними западные эксперты связывают сегодня возможность решения многих стоящих перед человечеством проблем в области безопасности, энергетики, здравоохранения, охраны окружающей среды, информационного обеспечения, промышленного производства.

Республика Беларусь – одна из немногих стран с развитой оптико-механической промышленностью, основу которой составляют свыше 20 предприятий с уровнем экспорта более 80%. Развитие данного сектора экономики невозможно без современного метрологического обеспечения. Поэтому в результате совместной деятельности Института физики НАН Беларуси и Республиканского унитарного предприятия «Белорусский государственный институт метрологии» – БелГИМ создана и развивается национальная система метрологического обеспечения республики в области оптики и лазерной техники, включающая:

- *национальные эталоны единиц физических величин, используемых в оптике, лазерной и оптоэлектронной технике;*
- *установки высокой точности для измерения характеристик оптического (в том числе лазерного) излучения и калибровки средств измерений этих характеристик;*

- государственные стандарты Республики Беларусь в области оптики и лазерной техники;
- программы и методики метрологической аттестации (экспертизы) эталонов, измерительных и калибровочных установок, методики измерений и калибровки средств измерений.

Национальные эталоны единиц величин являются национальным достоянием, неотъемлемым атрибутом государственности, и их состояние определяет научный, технический и культурный уровень страны. Наличие национальной эталонной базы – законодательно закрепленный элемент государственной структуры большинства промышленно развитых стран, а в некоторых из них, как, например, в России, объект конституционного права. Соответствующая база Республики Беларусь в области фотоники включает 10 национальных эталонов, 4 из которых разработаны, созданы и эксплуатируются в Институте физики НАН Беларуси: Национальный эталон единиц средней мощности и энергии лазерного излучения (ЛИ) НЭ РБ 56–19, Национальный эталон единиц средней мощности, ослабления и длины волны оптического излучения для волоконно-оптических систем связи и передачи информации (ВОСП) НЭ РБ 25–15, Национальный эталон единицы поляризационной модовой дисперсии в оптическом волокне НЭ РБ 54–19 и Национальный эталон единиц спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ), спектральной плотности энергетической освещенности (СПЭО) и силы излучения в диапазоне длин волн от 0,2 до 3,0 мкм НЭ РБ 51–19.

Измерения энергетических характеристик излучения (мощности непрерывного и энергии импульсного ЛИ), а также производных



Рис. 1. Национальный эталон единиц средней мощности и энергии лазерного излучения НЭ РБ 56–19

от них величин являются самыми распространенными. Поэтому для организации метрологического контроля в области лазерной техники был создан Национальный эталон единиц средней мощности и энергии лазерного излучения НЭ РБ 56–19 (рис. 1) [1]. Он обеспечивает воспроизведение и хранение в спектральном диапазоне от 0,3 до 10,6 мкм единицы средней мощности ЛИ в динамическом диапазоне от  $10^{-9}$  до 2 Вт и единицы энергии ЛИ в спектральном диапазоне от 0,3 до 1,1 мкм в диапазоне от  $10^{-7}$  до 1 Дж, а также передачу единицы средней мощности ЛИ на длинах волн 0,532; 0,808; 1,064 и 10,6 мкм и единицы энергии ЛИ на длинах волн 0,532; 0,808 и 1,064 мкм эталонам низшего звена, калибровочным (поверочным) установкам и рабочим СИ энергетических характеристик ЛИ. Расширенная неопределенность воспроизведения единицы средней мощности ( $k=2$ ,  $P=95\%$ ) в диапазоне от  $5 \cdot 10^{-3}$  до 2 Вт составляет не более 0,04%, в диапазоне от  $10^{-9}$  до  $5 \cdot 10^{-3}$  Вт – не более 0,15%.

Основой эталона является эталонный измерительный преобразователь, специальная конструкция приемного элемента которого позволила минимизировать неконтролируемые тепловые потери с его поверхности в окружающую среду, обусловленные теплопроводностью, конвекцией и излучением, и достичь высокой эквивалентности мощности поглощенного оптического излучения и мощности постоянного электрического тока замещения. Необходимая точность измерений мощности оптического излучения достигается путем замещения последней мощностью электрического тока, которая при калибровке эталонного измерительного преобразователя измеряется с высокой точностью.

Эталон позволяет обеспечить единство измерений средней мощности и энергии ЛИ в здравоохранении, промышленности, охране труда, способствует повышению качества и конкурентоспособности выпускаемой продукции, в том числе специального и двойного назначения. С помощью эталона осуществляется калибровка и поверка эталонов низшего звена и других рабочих средств измерений энергетических характеристик ЛИ для организаций и учреждений Минздрава, Госстандарта, Госкомвоентпрома, Минобразования, Минпрома и др.

В настоящее время волоконно-оптические системы связи и передачи информации – основное направление развития телекоммуникационных систем. Они обладают рядом существенных

преимуществ перед аналогичными видами. Совершенствование телекоммуникационной системы Республики Беларусь, которая относится к стратегической национальной инфраструктуре, невозможно без метрологического обеспечения ВОСП как необходимого элемента развития нашего государства как IT-страны и способствует достижению информационной безопасности. С учетом важности этой отрасли было разработано и создано 2 национальных эталона Республики Беларусь: Национальный эталон единиц средней мощности, ослабления и длины волн оптического излучения для волоконно-оптических систем связи и передачи информации (ВОСП) НЭ РБ 25–15 [2] и Национальный эталон единицы поляризационной модовой дисперсии в оптическом волокне НЭ РБ 54–19 [3].

Первый (рис. 2) предназначен для хранения, воспроизведения и передачи размера единиц средней мощности, ослабления и длины волны оптического излучения эталонам более низкого ранга и высокоточным средствам измерений, применяемым в ВОСП, путем их поверки и калибровки. Эталон воспроизводит значения средней мощности оптического излучения на фиксированных длинах волн спектральной области от 650 до 1700 нм с расширенной неопределенностью ( $k=2$ ,  $P=95\%$ ) не более 0,13% в диапазоне от  $1 \times 10^{-4}$  до  $5 \times 10^{-3}$  Вт и не более 2,7% в диапазоне от  $1 \times 10^{-11}$  до  $1 \times 10^{-4}$  Вт.

Расширенная неопределенность размера единицы ослабления оптического излучения в ВОСП, воспроизводимой эталоном ( $k=2$ ,  $P=95\%$ ) на фиксированных длинах волн спектральной области от 650 до 1700 нм в диапазоне от 0,05 до 60,00 дБ, не более 0,09 дБ.

Эталон воспроизводит значения длины волны оптического излучения в спектральном диапазоне от 650 до 1700 нм на фиксированных длинах волн 655, 852, 1309, 1489, 1548, 1627 нм с расширенной неопределенностью ( $k=2$ ,  $P=95\%$ ) не более  $1,2 \cdot 10^{-5}\%$ .

Функционально эталон для ВОСП состоит из:

- комплекса средств измерений, предназначенного для хранения, воспроизведения и передачи единицы средней мощности оптического излучения в ВОСП и включающего эталонные калориметрическую систему и шаровой ваттметр и оптоэлектронные преобразователи ОЭП-2 с системой регистрации;
- комплекса средств измерений для хранения, воспроизведения и передачи размера



Рис. 2. Национальный эталон единиц средней мощности, ослабления и длины волны оптического излучения для волоконно-оптических систем связи и передачи информации (ВОСП) НЭ РБ 25–15

*единицы ослабления в процессе его работы в составе эталона для ВОСП при калибровке и поверке рабочих эталонов и средств измерений, а также для автономной работы при измерении ослабления, и включающего пере-страиваемые одномодовые и многомодовые аттенюаторы и установку для измерения нелинейности градуировочной характеристики приемников оптического излучения;*

- комплекса средств измерений, предназначенного для хранения, воспроизведения и передачи размера единицы длины волны лазерного излучения в процессе его работы в составе эталона для ВОСП при калибровке и поверке рабочих эталонов и средств измерений, а также для автономной работы при измерении спектральных характеристик источников оптического излучения и включающего измеритель длины волны оптического излучения и спектроанализатор;
- средств коммутации и транспортировки оптического излучения, визуализации и контроля поверхностей оптических коннекторов;
- прибора контроля параметров окружающей среды;
- блоков стабилизированных источников лазерного излучения с длинами волн 655, 852, 1309, 1489, 1548, 1627 нм;
- системы управления, регистрации и обработки результатов измерений на основе персонального компьютера со специальным программным обеспечением.

Создание эталона для ВОСП позволяет осуществлять поверку (калибровку) рабочих эталонов, ваттметров средней мощности, рефлектометров, источников оптического излучения, оптических аттенюаторов для ВОСП, а также

измерения характеристик (мощность, затухание и длину волны) различных волоконно-оптических устройств в соответствии с отечественными стандартами, гармонизованными с международными нормами. Это повышает качество выпускаемой и используемой в Республике Беларусь оптоэлектронной продукции для ВОСП, поднимает ее конкурентоспособность на внутреннем и внешнем рынках, существенно уменьшает затраты за счет сокращения расходов на проведение измерений за пределами страны.

Национальный эталон единицы поляризационной модовой дисперсии (ПМД) в оптическом волокне НЭ РБ 54–19 (рис. 3) обеспечивает хранение, воспроизведение и передачу единицы ПМД поляриметрическим методом на длине волны 1550 нм в диапазоне от 0,05 до 0,5 пс с расширенной неопределенностью ( $k=2$ ,  $P=95\%$ ), не превышающей 0,008 пс, и интерферометрическим методом на фиксированных длинах волн 1310 и 1550 нм в диапазоне от 0,5 до 120,0 пс с расширенной неопределенностью 0,006–0,8 пс соответственно.

Принцип действия эталона единицы ПМД в оптическом волокне на основе поляриметрического метода базируется на определении матрицы Джонса, связывающей параметры состояния поляризации излучения на входе и выходе исследуемого объекта (компаратора-имитатора). Состояние поляризации излучения описывают с помощью параметров вектора Стокса. Для входного излучения данные параметры являются фиксированными и описывают три линейно поляризованных волны с углом наклона плоскости поляризации  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $90^\circ$ . При изменении длины волны излучения фазовые соотношения ортогонально поляризованных составляющих световой волны в исследуемом объекте изменяются, и, как следствие, трансформируется матрица Джонса. Это связано с дифференциальной груп-



Рис. 3. Национальный эталон единицы поляризационной модовой дисперсии в оптическом волокне НЭ РБ 54-19

повой задержкой (ДГЗ). Результат измерений ДГЗ определяется алгоритмом нахождения собственных значений матрицы Джонса исследуемого объекта, построенного с помощью аппарата линейной матричной алгебры. В зависимости от типа связи мод ПМД вычисляется как среднее или среднеквадратичное результата измерений ДГЗ.

Принцип действия эталона единицы ПМД в оптическом волокне на основе интерферометрического метода основан на измерении временной задержки между ортогонально поляризованными модами излучения, вносимой двулучепреломляющей средой. Данный метод основан на анализе с помощью интерферометра излучения широкополосного источника, прошедшего указанную среду. Интерферограмма такого излучения содержит боковые автокорреляционные пики, симметрично расположенные вокруг центрального пика. Воспроизведение и передачу размера единицы ПМД в оптическом волокне осуществляют следующим образом. Производится измерение расстояния между боковым и центральным пиками интерференционных полос, что, при соответствующем пересчете, является искомой усредненной временной задержкой, то есть ПМД в оптическом волокне.

Работа оптоэлектронной техники, применяемой в оптических методах неразрушающего контроля и диагностики в промышленности, сельском хозяйстве, медицине и санитарии, охране окружающей среды, контроле безопасных условий труда и др., основана на измерении радиометрических и спектрометрических характеристик твердых, жидких и газообразных сред и испускаемого ими оптического излучения. Создание и развитие метрологического обеспечения этой техники, прогнозирование ее ресурса, увеличение уровня точности и достоверности измерений параметров и характеристик оптического излучения способствует удовлетворению потребностей субъектов различных форм собственности в метрологическом контроле, улучшению качества выпускаемой и используемой отечественной продукции, повышению ее конкурентоспособности на внутреннем и внешнем рынках.

Национальный эталон единиц спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ), спектральной плотности энергетической освещенности (СПЭО) и силы излучения в диапазоне длин волн от 0,2 до 3,0 мкм НЭ РБ 51–19 (рис. 4) [4] предназначен для хранения, воспроизведения и передачи основных характеристик оптического излучения. Функционально он состоит из трех

основных систем: комплекса средств измерений для воспроизведения единиц СПЭЯ излучения и создаваемой СПЭО, основой которого является модель высокотемпературного черного тела (МВЧТ) ВВ3500М производства ВНИИОФИ (Россия); системы для измерений СПЭО и СПЭЯ в ультрафиолетовой области спектра, системы для калибровки широкоапертурных средств измерений. Принцип действия эталона основан на расчете по формуле Планка значений СПЭЯ излучения МВЧТ, температура излучающей полости которого измеряется прецизионным пирометром.

Основные метрологические характеристики эталона в спектральном диапазоне от 0,2 до 3,0 мкм следующие:

- диапазон воспроизведения единицы СПЭЯ от  $1 \times 10^{-1}$  до  $1 \times 10^{12}$  Вт·м<sup>-3</sup>·ср<sup>-1</sup> с расширенной неопределенностью ( $k=2$ ,  $P=95\%$ ) от 2,03% до 0,69% в зависимости от длины волны излучения;
- диапазон воспроизведения единицы СПЭО от  $4,5 \times 10^{-3}$  до  $2,8 \times 10^{10}$  Вт·м<sup>-3</sup>·с расширенной неопределенностью от 2,03% до 0,70% в зависимости от длины волны излучения;
- диапазон воспроизведения силы излучения от  $2 \times 10^{-1}$  до  $1 \times 10^2$  Вт·ср<sup>-1</sup> с расширенной неопределенностью не более 0,3%.

Международные сличения эталонов позволяют лабораториям из разных стран мира обеспечивать сопоставимость результатов измерений и нивелировать возможные несоответствия данных, полученных в процессе исследования состава или свойств одних и тех же объектов. Проведенные международные сличения созданных эталонов Республики Беларусь в области лазерной техники и оптики подтвердили соответствие мировому уровню их основных метрологических характеристик. Это позволило разместить БелГИМ 11 строк (из 296 строк по всей национальной эталонной базе страны) в базе данных о калибровочных и измерительных возможностях на сайте Международного бюро мер и весов.

В соответствии с принятой в нашей стране поверочной схемой калибровку (поверку) рабочих средств измерений проводят, применяя эталоны более низкого ранга, чем национальные с обязательной прослеживаемостью до последних. Эталонами более низкого ранга могут выступать установки высокой точности. По сравнению с национальными эталонами они обладают более широкими диапазонами значений измеряемых величин, но худшими точностными

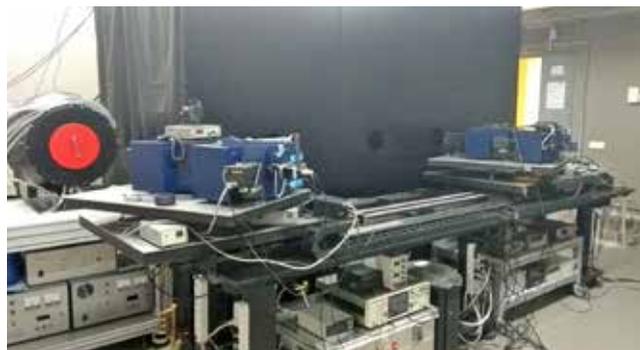


Рис. 4. Внешний вид эталона единиц спектральной плотности энергетической яркости, спектральной плотности энергетической освещенности и силы излучения в диапазоне длин волн от 0,2 до 3,0 мкм НЭ РБ 51–19

характеристиками и используются для испытаний лазеров и оптоэлектронной техники.

В Институте физики НАН Беларуси создано 17 установок и комплексов высокой точности для осуществления метрологического контроля энергетических, временных, пространственных, спектральных и поляризационных характеристик ЛИ, а также фотометрических, спектрорадиометрических и пространственных характеристик излучения светодиодов и других источников оптического излучения. Данное оборудование используется для метрологического контроля средств измерений и испытаний лазерной и оптоэлектронной техники, выпускаемой и эксплуатируемой предприятиями и организациями как Республики Беларусь, так и в странах СНГ и дальнего зарубежья.

Одновременно с созданием, совершенствованием, хранением и применением эталонно-измерительного комплекса метрологического контроля лазерно-оптической отрасли страны Институт физики НАН Беларуси и БелГИМ разрабатывают единые метрологические требования к средствам измерений, методикам и результатам измерений, методикам калибровки средств измерений и порядку проведения работ по метрологическому контролю в области лазерной техники и оптики.

Одним из важнейших направлений в данной деятельности является разработка национальных стандартов, нормирующих технические требования к методам и условиям выполнения измерений и осуществления калибровки средств измерений.

Закон Республики Беларусь от 24.10.2016 г. №436-З «О внесении изменений и дополнений в Закон Республики Беларусь «О техническом нормировании и стандартизации» одной из целей

ставит приоритетное использование международных стандартов. Они играют важную роль в мировой экономике, так как способствуют устранению технических барьеров в международной торговле и повышают эффективность функционирования конкретных отраслей экономики благодаря установлению норм для взаимного соответствия технических характеристик различных товаров и услуг. Во всех передовых в техническом отношении странах вопросы стандартизации имеют высокий приоритет как средства ускорения технического прогресса и улучшения качества продукции. Разработкой международных стандартов занимаются технические комитеты в рамках Международной организации по стандартизации (ISO), Международной электротехнической комиссии (IEC), Международного союза электросвязи (ITU), Международной комиссии по освещению (CIE) и др. Международные стандарты обобщают лучший мировой опыт, на их основе государства принимают свои национальные стандарты.

Поэтому важнейшее направление деятельности нашего института в области метрологии, технического нормирования, стандартизации и подтверждения соответствия в области оптики, лазерной и оптоэлектронной техники – разработка государственных стандартов Республики Беларусь, гармонизованных с международными нормами. Подготовлено и постановлением Госстандарта утверждено и введено в действие более 50 государственных стандартов Республики Беларусь, относящихся к лазерной технике, оптоэлектронике, оптике, волоконно-оптическим системам связи и передаче информации, лазерной безопасности.

Наряду с государственными стандартами необходимы такие нормативные документы, как методики выполнения измерений, калибровки и поверки средств измерений, программы и методики метрологической аттестации эталонов единиц величин и измерительных установок высокой точности для измерений параметров лазерной и оптоэлектронной техники и калибровки средств измерений характеристик оптического излучения, методология оценки стабильности и надежности функционирования Системы обеспечения единства измерений республики.

Разработано около 80 программ и методик метрологической аттестации, методик выполнения измерений, калибровки и поверки средств измерений. Созданная документация служит нормативно-методической

основой функционирования национальной системы метрологического обеспечения страны в области лазерной техники и оптики.

Эталоны и установки высокой точности для измерений характеристик оптического излучения, а также нормативная и методическая документация, включенная в Систему обеспечения единства измерений Республики Беларусь, позволили провести аккредитацию лабораторий Института физики НАН Беларуси на соответствие требованиям стандарта ГОСТ ISO/IEC 17025 в Системе аккредитации Республики Беларусь как испытательной лаборатории на проведение измерений характеристик ЛИ (аттестат аккредитации ВУ/112 02.1.0.0421 от 02.02.2004 г. и аттестат аккредитации ВУ/112 1.1790 от 01.08.2016 г.) и как калибровочной лаборатории на проведение калибровки средств измерений мощности и энергии ЛИ, а также ослабителей ЛИ (аттестат аккредитации ВУ/112 02.5.0.0013 от 11.07.2005 г.). Аккредитация испытательных и калибровочных лабораторий Института физики НАН Беларуси на соответствие требованиям ГОСТ ISO/IEC 17025 позволила осуществлять в нашей стране метрологическое обеспечение и контроль лазерной и оптоэлектронной техники.

Национальная система метрологического обеспечения в области лазерной техники и оптики была создана на основе выполненных научных исследований и опытно-конструкторских разработок с учетом передовых мировых достижений, соответствует мировому уровню и является элементом суверенитета Республики Беларусь. ■

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. В.А. Длугунович, А.В. Исаевич, Д.О. Дунец, Е.А. Круплевич, Л.Н. Насенник. Создание Национального эталона единиц средней мощности лазерного излучения и энергии импульсного лазерного излучения Республики Беларусь // Украинский метрологический журнал. – 2018. №4. С. 25–34.
2. В.А. Длугунович, А.И. Глазов, А.В. Зотов, А.В. Исаевич, М.Л. Козаченко, С.В. Никоненко, А.Б. Светличный, С.В. Тихомиров. Эталон единиц средней мощности и ослабления оптического излучения для волоконно-оптических систем связи и передачи информации // Измерительная техника. 2014. №11. С. 15–17.
3. Длугунович В.А., Жумарь А.Ю., Механиков А.В. Национальный эталон единицы поляризационной модовой дисперсии в оптическом волокне // Метрология-2019: Тезисы докладов Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27–28 марта 2019 г. / Под общ. ред. канд. техн. наук Гуревича В.Л. – Мн., 2019. С. 191–195.
4. Dlugunovich V.A., Kreidzich A.V., Nikanenka S.V., Rzhetski M.V., Scums D.V., Lutsenko E.V. National standard of Belarus of the units of radiant intensity, spectral radiance and irradiance in the spectral range from 0.2  $\mu\text{m}$  to 3.0  $\mu\text{m}$  // NEWRAD 2021: Proceedings of 14th International Conference on New Developments and Applications in Optical Radiometry (NEWRAD 2021), Boulder, USA, June 21–24, 2021. – Boulder: NIST, 2021. P. 136–137.