

## ЛАЗЕРЫ КАК ПРЕДМЕТ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

*Л.В. Грищенко, Ю.П. Мачехин*

*Проведены анализ и обобщение результатов работ, выполненных в ХГНИИМ, в области измерений параметров лазерного излучения. Рассмотрены перспективные направления развития метрологического обеспечения данного вида измерений.*

### ВВЕДЕНИЕ

Лазеры и лазерная техника, создаваемая на их базе, всегда были особо привлекательны для измерительной техники и метрологии. Высокоточные средства измерений на базе стабилизированных по частоте лазеров практически определили стратегическое направление развития метрологии в области время-частотных и линейно-угловых измерений на десятки лет вперед. Применение лазеров в технологических производственных процессах и медицине определило цели метрологии в области измерения энергетических параметров лазерного излучения. Использование лазерного излучения в специальных оптических средах, к которым относятся оптические волокна, привело к появлению оптической связи, являющейся в настоящее время доминирующей по темпам развития среди наземных видов связи. Естественно, появились новые средства измерений, которые потребовали создания для них специального метрологического обеспечения.

Развитие методов лазерной спектроскопии как наиболее высокоточных и чувствительных привело к созданию прецизионных средств измерений концентрации веществ и газов (лидаров). Лазерная спектроскопия сверхвысокого разрешения, которая находит все больше прикладных применений, широко используется и в метрологии. На ее базе создаются оптические стандарты частоты (длины волны), разрабатываются приборы измерения концентрации веществ и газов со сверхвысокой чувствительностью.

Не ставя перед собой задачу описания всех возможных путей использования лазеров в метрологии, остановимся только на наиболее тесно связанных с метрологическими исследованиями, которые проводятся в ХГНИИМ в течение длительного времени.

### ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Среди целого ряда параметров лазерного излучения наиболее важными практически для всех лазерных технологий являются энергетические (мощность и энергия). В связи с этим развитию метрологического обеспечения измерений энергетических характеристик лазерного излучения в Украине в последние годы уделяется значительное внимание. Одним из основных вопросов при реализации эталонных средств

измерительной техники является обеспечение необходимой точности измерений, которая, в основном, определяется оптимальным выбором первичного измерительного преобразователя. Для средних уровней мощности и энергии лазерного излучения (от 0,1 до 1 Вт и от 0,1 до 1 Дж соответственно) минимальную погрешность измерений (менее 0,1 %) могут обеспечить измерительные преобразователи калориметрического типа, работающие по принципу электрического замещения оптической мощности.

В ХГНИИМ на базе такого неселективного эталонного первичного калориметрического измерительного преобразователя был создан государственный специальный эталон единиц средней мощности и энергии лазерного излучения [1,2], возглавляющий государственную поверочную схему [3]. В эталоне объединены функции воспроизведения, хранения и передачи единиц двух физических величин – средней мощности и энергии лазерного излучения.

Действующий государственный эталон Украины, в значительной мере удовлетворяющий современным потребностям в обеспечении единства данного вида измерений, однако, не перекрывает диапазон низких и сверхнизких (до  $10^{-10}$  Вт) уровней мощности, необходимость измерения которых с минимальной погрешностью является весьма актуальной в связи с быстрым развитием и широким распространением систем передачи информации на основе волоконно-оптических линий связи, а также для целей дозиметрии лазерного излучения. Это потребовало проведения разработки и исследования новых методов и эталонных средств измерений энергетических характеристик лазерного излучения на основе фотоэлектрических первичных измерительных преобразователей.

Развитие приемной энергетической фотометрии лазерного излучения (энергетической лазерометрии) в части совершенствования характеристик фотоэлектрических приемников излучения традиционно осуществлялось по двум направлениям. Работы, проводимые по первому направлению, касались физики твердого тела, физики полупроводников и квантовой электроники и ставили своей целью создание чувствительных элементов, способных регистрировать оптическое излучение и вырабатывать электрический сигнал, пропорциональный мощности этого излучения. Основными характеристиками, по которым определялась область применения этих чувствительных элементов, являлись спектральный диапазон чувствительности, диапазон уровней регистрируемых мощностей и коэффициент преобразования оптической мощности в электрический сигнал.

Второе направление развития фотометрии связано с применением чувствительных элементов и разработкой на их базе методов и аппаратуры измерения оптической мощности с максимально достижимой точностью. Естественно, что оба этих направления взаимосвязаны, так как параметры существующих чувствительных элементов определяют направление разработок измерительной аппаратуры, и наоборот, технические параметры, которыми должны обладать измерительные приборы, ставят задачу разработки новых чувствительных элементов. Поэтому любое новое решение в лазерной фотометрии одновременно связано как с созданием новых чувствительных элементов, так и с разработкой новых методов измерений и новой измерительной аппаратуры.

Практические потребности высокоточного измерения малых уровней когерентного излучения, в том числе и в таких актуальных областях, как волоконная оптика и оптическая связь, ставят задачу поиска физических эффектов, на базе которых можно было бы создать абсолютный измеритель малых уровней оптической мощности.

К таким эффектам относится эффект 100-процентной внутренней квантовой эффективности у специальных кремниевых фотодиодов. Принципиальной особенностью этого эффекта является связь между измеряемым током  $I$  (в амперах) в цепи фотодиода, длиной волны излучения  $\lambda$  (в нанометрах) и мощностью излучения  $P$  (в ваттах), определяемой по следующей формуле:

$$P = \frac{1239,84 \cdot I}{QE \cdot \lambda}$$

Здесь коэффициент  $QE$  определяет квантовую эффективность фотодиода и в пределах установленной погрешности равен единице.

На базе таких фотодиодов, которые иначе называются самокалибрующимися, были созданы trap-детекторы (приемники-ловушки), которые позволяют с погрешностью менее 0,05 % измерять мощность оптического излучения [4].

В настоящее время в ХГНИИМ разработан trap-детектор [5], в котором используются кремниевые фотодиоды S1337-1010 (спектральный диапазон чувствительности этих фотодиодов от 400 до 1000 нм) производства фирмы "Hamamatsu". По завершении комплексных исследований средства измерений, изготовленные на их базе, станут основой создаваемых в Украине эталонов в области энергетической лазерометрии.

Одним из направлений работ, связанных с обеспечением абсолютным измерителем мощности спектрального диапазона от 1000 до 1600 нм, используемого в волоконно-оптических системах передачи информации, является создание trap-детектора как практически единственное решение в плане создания аппаратуры для прецизионного измерения мощности малых уровней в данном спектральном диапазоне.

Естественно, что создание trap-детектора возможно лишь при наличии фотодиода с внутренней квантовой эффективностью, близкой к 100 %. В настоящее время ведутся исследования по созданию trap-детектора в ИК-диапазоне до 1600 нм, построенные на разработке самокалибрующихся ИК-фотодиодов на основе технологии поверхностно-барьерных структур с использованием ртутно-индиевого теллурида. Разработка такого фоточувствительного материала была проведена в Черновицком государственном университете. Предварительные исследования этих фотодиодов показали, что их внутренняя квантовая эффективность близка к 100 % и их можно использовать для создания trap-детекторов. Однако при этом следует учесть, что предлагаемые фотодиоды не имеют аналогов и необходимо проведение детальных исследований фотодиодов. На тот период, когда были изготовлены указанные фоточувствительные структуры и проведены предварительные исследования, интерес к высокоточным измерениям мощности в ближнем ИК-диапазоне (до 1600 нм) еще не проявился в должной мере. Сейчас, когда актуальность и необходимость данных измерений стала очевидной, эти фотодиоды планируется использовать для создания trap-детектора после проведения исчерпывающих исследований.

Отдельного рассмотрения требуют вопросы, связанные с использованием лазерного излучения в здравоохранении. С учетом широкого распространения лазерной терапии в медицинской практике, чрезвычайно актуальной является проблема контроля параметров излучения для обеспечения не только положительного лечебного эффекта, но и защиты организма пациента от возможных негативных последствий, связанных с неправильной дозировкой. Широкое внедрение лазерных методов исследований и практическое применение лазерного излучения в медицине и биологии выдвигают на первый план вопросы метрологического обеспечения измерений параметров лазерного излучения.

В соответствии с Законом Украины "Про метрологію та метрологічну діяльність", измерения, результаты которых используются при работах по обеспечению охраны здоровья и работах по обеспечению защиты жизни и здоровья граждан, относятся к сфере государственного метрологического надзора. В связи с этим в ХГНИИМ выполняются работы по созданию в Украине системы метрологического обеспечения лазерной медицины, проводимые в нескольких направлениях.

Одно из основных направлений работ заключается в обеспечении и проведении периодической аттестации по энергетическим характеристикам излучения лазерных медицинских аппаратов и установок, эксплуатируемых в лечебных учреждениях. Кроме этого, в ХГНИИМ – Головной организации по обеспечению единства измерений в Украине – после введения в эксплуатацию государственного

специального эталона единиц средней мощности и энергии лазерного излучения осуществляются поверка и аттестация рабочих эталонов и рабочих средств измерений энергетических параметров лазерного излучения, в том числе и для обеспечения лазерной медицины.

ХГНИИМ в настоящее время проводит постоянную работу по аттестации медицинских лазерных установок по энергетическим характеристикам выходного излучения в Харьковском регионе и за его пределами (Донецк, Луганск, Крым). Только в 2000 г. для медицинских организаций Харьковского региона аттестовано более 50 лазерных установок.

В настоящее время в Украине производство средств измерений энергетических характеристик лазерного излучения, внесенных в Государственный реестр средств измерительной техники Украины, не освоено. С учетом сложившейся ситуации, в ХГНИИМ разработан ряд измерителей мощности лазерного излучения [6], ориентированных по своим характеристикам на возможность измерения параметров большинства используемых в настоящее время лазеров в медицине и биологии. Ведутся работы по расширению возможностей и модернизации разработанной измерительной аппаратуры.

#### ЛАЗЕРЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В КАЧЕСТВЕ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ (ДЛИНЫ ВОЛНЫ)

Использование стабилизированных по частоте лазеров в качестве стандартов частоты (длины волны) обсуждается практически на каждой Генеральной конференции по мерам и весам, которые проводились в последние годы. В резолюциях этих конференций подчеркивается, что требования науки и техники связаны с повышением точности в реализации метра и, соответственно, с повышением воспроизводимости оптической частоты (длины волны) излучения, используемого в практической реализации метра. Поэтому национальным метрологическим лабораториям рекомендовано продолжать исследования в области оптических стандартов частоты (длины волны), чтобы улучшить уже будущую экспериментальную базу Международной системы единиц физических величин.

Развитие измерительной лазерной техники было стремительным еще до принятия нового определения метра в 1983 г. Лазерные интерферометры для линейных измерений начали появляться еще в 70-х гг. В качестве исходной меры в них использовалась длина волны стабилизированных по частоте He-Ne лазеров с  $\lambda = 0,63$  мкм. По мере развития лазерных интерферометров и их применения в промышленности возникла необходимость организации метрологической аттестации как самих интерферометров, так и входящих в них лазерных источников как рабочих средств измерения длины. Если для интерферометров, к тому времени, уже существовала метрологическая база для их аттестации и поверки, то для лазерных источников такой

базы не было ни у разработчиков, ни тем более у предприятий, которые выпускали их серийно.

ХГНИИМ был и остался одним из лидирующих институтов по работам, направленным как на создание самих лазеров, так и на их использование в метрологической практике.

В деятельности института можно выделять три этапа, характеризующих развитие работ в ХГНИИМ по лазерной тематике: первый – создание стабилизированных по частоте лазеров и аппаратуры для их аттестации и поверки по длине волны излучения; второй – создание вторичных эталонов, обеспечивающих поверку рабочих эталонов, использование которых определялось задачами потребителей; третий – создание государственного эталона единицы длины на базе лазерных стандартов частоты (длины волны) как финальный этап создания метрологического обеспечения измерений длины на базе лазеров.

Основные вопросы, которые необходимо было решать на протяжении всех трех этапов, следующие: какие лазерные источники необходимо использовать, какую технологию их изготовления выбрать и где изготавливать, как обеспечить их метрологические характеристики (стабильность частоты излучения, номинальное значение длины волны излучения). На каждом этапе были свои технические требования к конструктивному исполнению и метрологическим характеристикам лазеров. Так, на первом этапе для обеспечения лазерных измерительных интерферометров потребовались одночастотные одномодовые лазеры со стабильностью частоты излучения не хуже  $10^{-8}$  и способностью работать не только в лабораторных, но и в полевых условиях. Были разработаны лазерные резонаторы с плавающими юстировочными узлами, в которых закреплялись зеркала лазеров. Кроме того, активные элементы были разработаны и изготавливались при полном контроле параметров активной среды. Комплексные исследования лазеров в целом и отдельно активных элементов показали, что можно добиться воспроизводимости параметров лазера при его производстве и тем самым получить оптическое излучение с требуемыми характеристиками. В значительной степени этот этап был связан с технологическими и производственными задачами изготовления лазеров и активными исследовательскими работами по изучению различных конструкций лазеров и характеристик их излучения. Этот первый опыт дал большой объем информации, которая была эффективно использована на втором этапе, когда необходимо было начать разработку лазеров метрологического назначения, стабильность частоты которых уже была на уровне от  $10^{-10}$  до  $10^{-11}$ . Мощность этих лазеров находилась в интервале от 300 мкВт до 1 мВт в зависимости от длины резонатора. Типовыми были две конструкции: первая – лазеры для интерферометров, имеющие одночастотное одномодовое излучение с контрастным провалом Лэмба, который использовался для стабилизации частоты

излучения; вторая – двухчастотные лазеры, которые использовались в лазерных дальномерах. Характерной особенностью этих лазеров было то, что разность частот между двумя продольными модами поддерживалась фиксированной и использовалась в дальномерных измерениях.

Использование разработанных конструкций резонаторов с активными элементами компактной конструкции и ячейками поглощения, наполненными поглощающими средами (неоном, парами йода, метаном), позволило создать лазеры, в которых стабилизация осуществлялась по пикам насыщенного поглощения в этих газах. Разработка таких лазеров позволила создать целую серию гетеродинных установок для аттестации лазеров по стабильности частоты излучения, которые используются в интерферометрических измерениях. Подобные установки для метрологической аттестации лазеров были созданы в ХГНИИМ впервые в бывшем СССР и пользовались большим спросом. Основу этих установок, как было отмечено выше, составляли He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$  лазеры. К моменту их использования уже детально были изучены эффекты насыщенного поглощения и структура пиков поглощения в йоде, внутррезонаторные эффекты, влияющие на стабильность и воспроизводимость частоты излучения лазеров. При проведении работ по модернизации вторичного эталона единицы длины для спектроскопии впервые в состав эталона в качестве оптического стандарта частоты был включен He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$  лазер. Подготовка лазера для включения в состав эталона позволила получить самую детальную информацию о его метрологических и эксплуатационных характеристиках. Это позволило в 1994 г. впервые в истории института участвовать в международных сличениях He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$  лазеров, которые проводились под эгидой Международного бюро мер и весов в Братиславе (Словакия).

Результаты сличений показали, что представленный на сличение He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$  лазер КИМ-2 имеет сдвиг по отношению к лазеру ВРМ-4 8,4 кГц, а это означало, что КИМ-2 по своим метрологическим характеристикам полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к стандартам частоты (длины волны), используемым в национальных эталонах единицы длины.

В это же время были начаты работы по созданию государственного эталона единицы длины, в основу которого должен быть положен стабилизированный по частоте лазер.

Вопрос обеспечения лазерными источниками как первичными мерами национальных эталонов оказался сложным и неоднозначным. Прежде всего, это касается процесса выбора самого источника. В рекомендованном списке источников первоначально было семь типов, по стабильности и воспроизводимости существенно отличающихся друг от друга. He-Ne/ $\text{CH}_4$  лазер с  $\lambda = 3,39$  мкм имел наивысшую стабильность, но был неудобен тем, что в этом диапазоне отсутствовали рабочие эталоны. В то же время

наиболее широко используемые в интерферометрических измерениях He-Ne лазеры с  $\lambda = 0,63$  мкм могли быть метрологически обеспечены He-Ne/ $\text{I}_2$  лазером, воспроизводимость частоты длины волны которого была ниже, но при этом было легче передавать единицу от эталона к вторичным эталонам гетеродинным способом.

Поэтому, учитывая возможности института по созданию He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$  лазеров, было принято решение о включении в состав эталона группы He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$  лазеров. Такая группа, состоящая из трех лазеров, позволяет осуществлять хранение и воспроизведение единицы длины без необходимости частых международных сличений.

Тем не менее, в рамках программы КОOMET были проведены сличения лазеров, уже входящих в состав государственного эталона, с лазерами России, Словакии и Германии, также входящих в состав национальных эталонов этих стран. Результаты этих сличений были опубликованы в периодической печати Украины и России.

#### НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ В РАЗВИТИИ ЛАЗЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

В последнее время (в течение 7–8 лет) основные усилия национальных метрологических центров европейских стран направлены на создание оптических стандартов частоты (длины волны) на базе полупроводниковых лазеров. Первоначальная цель этих исследований – заменить в стандартах частоты (длины волны) газовые лазеры на полупроводниковые как на более удобные в эксплуатации. Позднее были сформулированы требования к стандартам частоты, которые используются в когерентной оптической связи. И в том и в другом случаях необходимо осуществлять стабилизацию частоты излучения по естественным внешним реперам.

Несколько лет назад в ХГНИИМ были начаты работы по созданию оптического стандарта частоты (длины волны) на базе полупроводникового лазера с  $\lambda = 633$  нм, в котором стабилизация частоты осуществляется по пикам насыщенного поглощения в парах йода. Была выбрана литтмановская конструкция внешнего резонатора лазера, позволяющая убрать дополнительную моду и значительно уменьшить ширину линии излучения. Разработанная конструкция оптического стандарта состоит из двух секций: секции диодного излучателя и поглощающей секции. Поскольку длина волны излучения зависит лишь от типа диодного лазера, который используется, то разработанная конструкция пригодна как для видимого диапазона, так и для инфракрасного. В зависимости от длины волны излучения меняется поглощающая ячейка. На данном этапе для отработки идеологии и конструкции оптической части и системы стабилизации использовались лазер с длиной волны 633 нм и поглощающая ячейка с  $\text{I}_2$ .

Преимущество разрабатываемых стандартов частоты (длины волны) заключается в том, что их

метрологічні та експлуатаційні характеристики дозволяють використовувати дані стандарти як стандарти довжини хвилі практично в усіх робочих еталонах територіальних органів Госстандарта України.

С другої сторони, важливим є підвищення точності воспроизведення значення довжини хвилі у джерелах, використовуваних в робочих та вихідних еталонах, що, в свою чергу, позитивно вплине на метрологічні характеристики останніх.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе кратко описаны основные направления развития метрологии в области измерения параметров лазерного излучения и совершенствования самих лазеров как стандартов частоты (длины волны). Эти направления характеризуют общую тенденцию развития международной метрологии, которая своей основной целью ставит скорейшее внедрение новых научных достижений в метрологическую практику. Именно на этом принципе основаны и работы, проводимые в ХГНИИМ.

#### Список литературы

1. Грищенко Л.В., Соловйов В.С., Тимофеев С.П. //Український метрологічний журнал. -1998. -Вип.3. -С.36-41.

2. Grishchenko L.V., Solovyov V.S., Timofeyev Y.P. //Optoelectronic Metrology. Proceedings of SPIE. -1999. -V. 4018. -P. 29-37.
3. ДСТУ 3539-97 Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань середньої потужності лазерного випромінювання та енергії імпульсного лазерного випромінювання в діапазоні довжин хвиль від 0,3 до 12,0 мкм.
4. Грищенко Л.В., Мачехин Ю.П.//Метрологія в електроніці-2000: Наук. праці III Міжнар. наук.-техн. конф. у 2-х томах. Т.2.-Харків: ХДНДІМ, 2000. -С.68-70.
5. Grishchenko L.V., Krasnogorov A.J., Machekhin Yu.P. //Laser and Fiber-Optical Network Modeling: Proc. of 3<sup>rd</sup> International Workshop. -Kharkiv: KSTURE, 2001. -P.150-152.
6. Грищенко Л.В.//Метрологія та вимірювальна техніка: Наук. праці II Міжнар. наук.-техн. конф. у 2-х томах. Т. 2. -Харків: ХДНДІМ, 1999. -С. 63-65.

#### LASERS AS THE SUBJECT OF METROLOGICAL RESEARCH

L.V.Grishchenko, Y.P.Machekhin

*The analysis and generalization of the results of the works in the field of measurement of laser radiation parameters, which have been realized at KSSRIM, are conducted. The long-term directions of this kind of measurements metrological assurance development are considered.*

#### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

- Грищенко Леонід Вікторович – начальник відділу ХДНДІМ, м.Харків
- Мачехин Юрій Павлович – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, заступник директора ХДНДІМ, м.Харків