

4. Крутиков В. Н., Кононогов С. А., Золотаревский Ю. М. Нормативно правовое обеспечение единства измерений. М.: Логос, 2014.

5. Кузнецов В. А., Исаев Л. К., Шайко И. А. Метрология. М.: Стандартиформ, 2005.

6. Квантовая метрология и фундаментальные константы: Сб. статей / Пер. с англ.; под ред. Р. Н. Фаустова, В. П. Шелеста. М.: Мир, 1981.

7. Пронкин Н. С. Основы метрологии: практикум по метрологии и измерениям. М.: Логос, 2007.

8. Сергеев А. Г. Метрология. М.: Логос, 2005.

9. Иванов В. С., Золотаревский Ю. М., Котюк А. Ф., Либерман А. А., Саприцкий В. И., Столяревская Р. И. Основы оптической радиометрии. М.: Физматлит, 2003.

10. Метрологическое обеспечение нанотехнологий и продукции наноиндустрии: учебное пособие. Под ред. В. Н. Крутикова. М.: Логос, 2011.

Дата принятия 03.09.2015 г.

553.535.2

## Государственный первичный эталон единицы средней мощности лазерного излучения ГЭТ 28—2013

А. А. КОВАЛЕВ, А. А. ЛИБЕРМАН, А. С. МИКРЮКОВ, С. А. МОСКАЛЮК,  
М. В. УЛАНОВСКИЙ

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений,  
Москва, Россия, e-mail: mrsergik@mail.ru

*Описан усовершенствованный Государственный первичный эталон единицы средней мощности лазерного излучения ГЭТ 28—2013, позволяющий решать актуальные проблемы метрологического обеспечения единства измерений энергетических характеристик полупроводниковых лазеров и лазерных диодов, характерная особенность которых — большая расходимость и достаточно высокая нестабильность выходного излучения.*

**Ключевые слова:** эталон, лазерное излучение, полупроводниковый лазер.

*The state primary standard of unit of laser power GET 28—2013 is described. Advanced standard allows to solve actual problems of measurements of power characteristics of semiconductor lasers and laser diodes.*

**Key words:** standard, laser radiation, semiconductor laser.

В настоящее время лазерная техника используется практически во всех сферах деятельности: медицине, технике, науке и на производстве. Диапазон мощностей распространяется от уровней счета фотонов до мегаватт, спектральный диапазон — от короткого ультрафиолетового до субмиллиметрового; неуклонно повышаются требования к точности рабочих средств измерений (СИ), парк которых представлен на рынке России как зарубежными фирмами, так и отечественными производителями.

Интенсивное развитие лазерных технологий привело к созданию полупроводниковых лазеров на квантоворазмерных структурах: квантовых ямах и точках. Полупроводниковые лазеры неуклонно вытесняют газовые, твердотельные и другие источники когерентного излучения из всех областей их практического применения. За последние годы в физике и технологии полупроводников сформировалось направление мощных полупроводниковых лазеров на базе асимметричных лазерных гетероструктур раздельного ограничения с малыми внутренними оптическими потерями [1]: мощность оптического излучения одиночного источника превышает

16 Вт, а коэффициент полезного действия достигает 75 % [2—4].

Усовершенствованный государственный первичный эталон (ГПЭ) единицы средней мощности лазерного излучения ГЭТ 28—2013 работает в широком динамическом диапазоне  $5 \cdot 10^{-3} - 2$  Вт дополнительно на двух новых длинах волн 0,912 и 1,053 мкм. Разработанный алгоритм обработки результатов измерений позволил полностью сохранить его метрологические характеристики.

Структурная схема оптической системы ГПЭ 28—2013 представлена на рис. 1. Во время проведения измерений на длинах волн 0,532 и 1,064 мкм используется один и тот же оптический тракт. Излучение отражается от поворотных зеркал 5, 6, 11 и попадает на фокусирующую линзу 17, потом на плоскопараллельную пластину 19. Часть излучения проходит дальше и поступает на вход эталонного первичного измерительного преобразователя (ЭПИП) 24, а другая часть отражается на вход приемника 18, выступающего в качестве приемника-свидетеля, используемого для контроля нестабильности лазерного излучения. При измерениях на длине

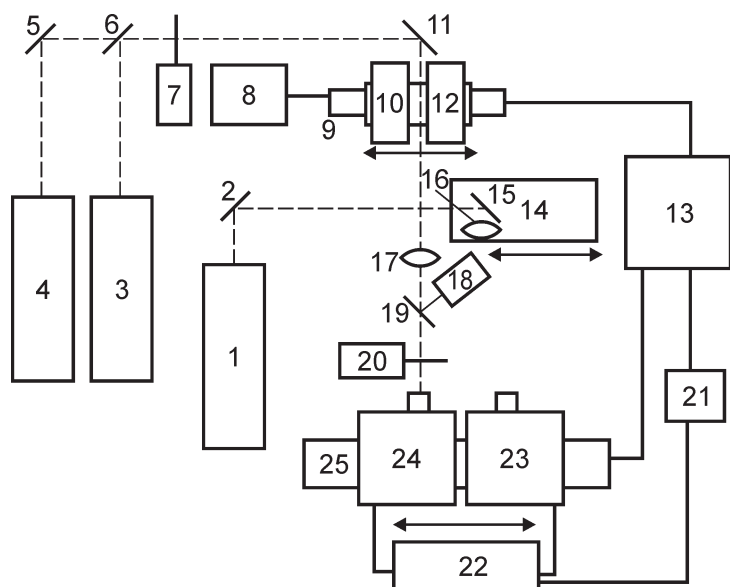


Рис. 1. Структурная схема усовершенствованной оптической системы ГПЭ СМ:

1 — лазер GEM SELECT 50 (10,6 мкм); 2, 5, 6, 11, 15 — поворотные зеркала; 3 — лазер Compass 1064—4000 (1,064 мкм); 4 — лазер Verdi V8 (0,532 мкм); 7, 20 — затворы-шторки; 8 — блоки питания полупроводниковых лазеров; 9 — высокоточная подвижка LTM60-150; 10 — полупроводниковый лазер EMS-1060-50; 12 — полупроводниковый лазер ЕМНО-910-3СS; 13 — контроллер PS90; 14 — подвижка для ввода в оптическую схему длины волны 10,6 мкм; 16, 17 — фокусирующие линзы соответственно из AsGa и BaF<sub>2</sub>; 18 — приемник-свидетель; 19 — плоскопараллельная пластина; 21 — персональный компьютер; 22 — блок управления и коммутации; 23 — поверяемый приемник; 24 — эталонный первичный измерительный преобразователь (ЭПИП); 25 — высокоточная подвижка LIMES 170-600

волны 10,6 мкм в оптическую систему вводится подвижка 14 с линзой 16 и поворотным зеркалом 15. Далее, как и ранее, излучение попадает на плоскопараллельную пластину 19, части — на входы ЭПИП и приемника 18. Для полупроводниковых лазеров 10, 12, введенных в состав усовершенствованного эталона, смена длины волны происходит с помощью высокоточной подвижки 9. Управление двумя подвижками 9, 25 происходит через контроллер 13, который подсоединен к персональному компьютеру 21 с помощью USB-интерфейса, и управляющую программу.

В режиме воспроизведения и передачи единицы мощности лазерного излучения с участием полупроводниковых лазеров 3 или 4 выбирается конкретная длина волны лазерного излучения. В управляющей программе для высокоточных подвижек задается фиксированное значение шагов для установки подвижки в положение, когда излучение выбранного лазера полностью попадает в приемное окно ЭПИП.

При измерениях на всех длинах волн сигналы с термопары и обмотки электрического замещения поступают на вход мультиметра Keithley 2002, далее сигналы по GPIB-интерфейсу попадают на вход персонального компьютера для дальнейшей обработки. После измерения мощности лазерного излучения с помощью ЭПИП на его место помещают измерительный преобразователь, которому передается единица мощности. Все измерения проводятся в автомати-

ческом режиме по разработанному алгоритму обработки выходных сигналов и соответствующей программе.

Процесс воспроизведения и передачи заключается в последовательной подаче электрической мощности в обмотку замещения, затем оптической мощности в приемную полость ЭПИП и вновь электрической мощности в обмотку замещения сначала на ЭПИП, а потом повторения этой же последовательности действий для поверяемого СИ. Приемник-свидетель измеряет изменение мощности лазерного излучения в течение всей процедуры воспроизведения и передачи единицы средней мощности. По измеренным сигналам мощность лазерного излучения находят из соотношения

$$P_{\text{опт}} = \frac{1}{K_{\text{экв}}} \left\{ P_{\text{эл}} + \frac{(V_{\text{опт}} - V_{\text{н}}) - (V_{\text{эл}} - V_{\text{н}})[1 + \gamma(t_{\text{опт}} - t_{\text{эл}})]}{A_{\text{эл}}} \right\},$$

где  $K_{\text{экв}}$  — коэффициент эквивалентности замещения оптической мощности электрической;  $P_{\text{эл}}$  — электрическая мощность, выделяемая в обмотке замещения;  $V_{\text{опт}}$ ,  $V_{\text{эл}}$  — выходные сигналы ЭПИП при подаче  $P_{\text{опт}}$  и  $P_{\text{эл}}$ ;  $V_{\text{н}}$  — начальное значение выходного сигнала ЭПИП;  $\gamma$  — коэффициент, характеризующий скорость дрейфа эталонного измерительного преобразователя и системы измерений;  $t_{\text{опт}}$ ,  $t_{\text{эл}}$  — моменты времени, в которые подаются  $P_{\text{опт}}$ ,  $P_{\text{эл}}$ ;  $A_{\text{эл}}$  — коэффициент преобразования при подаче в его обмотку замещения  $P_{\text{эл}}$ .

Оптическую мощность на входе поверяемого СИ получают из соотношения

$$P_{\text{опт}}^{\text{СИ}} = P_{\text{опт}} P_{\text{опт}}^{\text{ПС}} / P_{\text{опт}}^{\text{ПС}},$$

где  $P_{\text{опт}}^{\text{ПС}}$ ,  $P_{\text{опт}}^{\text{ПС}}$  — оптические мощности на входе приемника-свидетеля (ПС) во время измерений на поверяемом СИ и ЭПИП.

Во вновь разработанном программно-математическом алгоритме используется метод, позволяющий проводить измерения с помощью эталонного приемника (массивного теплового приемника более высокой разрядности, чем поверяемые) даже при существенно нестабильной мощности лазерного излучения. Метод основан на том, что характерное время установления теплового равновесия в поверяемом приемнике значительно меньше постоянной времени  $\tau_{\text{эт}}$  ЭПИП. Процедура состоит из двух этапов. Вначале определяют коэффициент передачи единицы мощности лазерного излучения от ЭПИП приемнику-свидетелю либо фотоэлектрическому приемнику, либо тепловому приемнику с постоянной времени  $\tau_{\text{св}} \approx 1...3$  с. Затем на место ЭПИП в той же оптической схеме помещают поверяемый приемник. Процедура измерений повторяется. В результате мощность на поверяемом приемнике выражается через полученные из этих двух экспериментов коэффициенты передачи единицы мощности приемнику-свидетелю и, в конечном счете, через мощность на ЭПИП. Следует обратить внимание, что абсолютная величина единицы мощности лазерного излучения приемнику-свидетелю в процессе этих измерений не передается. В процессе передачи единицы средней мощ-

ности используются только относительные измерения приемника-свидетеля.

На каждом этапе таких измерений участвуют два приемника. Рассмотрим первую пару: ЭПИП — приемник-свидетель, полагая, что полученные результаты несложно обобщить на вторую пару: приемник-свидетель —веряемый приемник. Сигналы от первых двух приемников можно представить в виде

$$u_{\text{ЭП}}(t) = \alpha_{\text{ЭП}} \int dt' P(t-t') G_{\text{ЭП}}(t'); u_{\text{СВ}}(t) = \alpha_{\text{СВ}} \int dt' P(t-t') G_{\text{СВ}}(t'), \quad (1)$$

где  $\alpha_{\text{ЭП}}, \alpha_{\text{СВ}}$  — размерные коэффициенты, характеризующие долю поглощенной мощности соответствующими приемниками;  $P(t)$  — мощность излучения на выходе из лазера;  $t$  — текущее время;  $G_{\text{ЭП}}(t), G_{\text{СВ}}(t)$  — импульсные функции ЭПИП и приемника-свидетеля.

Выражая  $P(t)$  из (1) и приравнявая результаты, получаем

$$\alpha_{\text{СВ}} G_{\text{СВ}}(t) \otimes u_{\text{ЭП}}(t) = \alpha_{\text{ЭП}} G_{\text{ЭП}}(t) \otimes u_{\text{СВ}}(t). \quad (2)$$

Применяя к (2) преобразование Фурье, имеем

$$\tilde{G}_{\text{СВ}}(\omega) \tilde{u}_{\text{ЭП}}(\omega) \alpha_{\text{СВ}} / \alpha_{\text{ЭП}} = \tilde{G}_{\text{ЭП}}(\omega) \tilde{u}_{\text{СВ}}(\omega). \quad (3)$$

Выражая  $\tilde{G}_{\text{СВ}}(\omega)$  из (3) и используя обратное преобразование Фурье, находим

$$\alpha_{\text{СВ}} G_{\text{СВ}}(t) / \alpha_{\text{ЭП}} = \frac{1}{2\pi} \int \tilde{G}_{\text{ЭП}}(\omega) \frac{\tilde{u}_{\text{СВ}}(\omega)}{\tilde{u}_{\text{ЭП}}(\omega)} e^{i\omega t} d\omega. \quad (4)$$

Интегрирование (4) по  $t$  в пределах от 0 до  $\infty$  с учетом нормирования импульсной функции  $\int_0^\infty G_{\text{СВ}}(t) dt = 1$  дает

$$a = \frac{\alpha_{\text{ЭП}}}{\alpha_{\text{СВ}}} = \frac{\tilde{u}_{\text{ЭП}}(0)}{\tilde{u}_{\text{СВ}}(0)} = \int_0^\infty u_{\text{ЭП}}(t) dt / \int_0^\infty u_{\text{СВ}}(t) dt \quad (5)$$

— коэффициент передачи единицы средней мощности от ЭПИП приемнику-свидетелю.

При использовании ПС, для которого  $\tau_{\text{СВ}} \ll \tau_{\text{ЭП}}$ , можно получить приближенное решение, отличное от (5), предположив, что импульсную функцию приемника-свидетеля можно заменить на дельта-функцию Дирака, т. е. зарегистрировав временной профиль мощности падающего лазерного излучения. Далее вычисляется импульсная функция ЭПИП.

В результате измерений был получен сигнал ЭПИП, представленный на рис. 2. Для нахождения импульсной функции ЭПИП идеальным представляется участок измерений  $u_{\text{спад}}$  на интервале  $[t_2, t_3]$ , поскольку на нем отсутствует влияние нестабильности лазера и других внешних факторов. Импульсную функцию, которая вычисляется по формуле  $G_{\text{ЭП}}(t) = -du_{\text{спад}}(t)/dt$ , необходимо нормировать, чтобы она не искажала абсолютное значение сигнала.

Следующий шаг заключается в вычислении сигнала ЭПИП  $u'_{\text{ЭП}}(t)$  с помощью свертки полученной импульсной функции и сигнала ПС. Согласно сделанному выше упроще-

нию  $u_{\text{ЭП}}(t) = au'_{\text{ЭП}}(t)$ , где коэффициент  $a$  определяется по методу наименьших квадратов минимизацией функционала

$$\chi^2 = \int_{t_0}^{t_1} (u(t) - au'(t))^2 dt.$$

Результат процедуры минимизации можно представить в виде

$$a = \int_{t_0}^{t_1} u(t) u'(t) dt / \int_{t_0}^{t_1} u'^2(t) dt.$$

Следует отметить, что изложенное выше базируется на предположении о линейности по температуре показаний термопар обоих приемников. В первом приближении такой подход обоснован как вследствие малого интервала температур нагрева приемников, так и слабой нелинейности эффекта [5].

Для вычисления дрейфа нуля во время измерения сигнала использованы элементы теории фильтров линейного предсказания [6], основанной на нахождении таких характеристик линейной системы, которые в статистическом смысле обеспечивают близость прогнозируемого сигнала к исходному. Это означает, что автокорреляционные функции прогнозируемого и исходного сигналов должны совпадать.

Прогноз дрейфа нуля в области спада импульса (см. рис. 2) вычисляли с помощью модели авторегрессионного процесса [7]:

$$\begin{aligned} \hat{u}_{\text{СВ}}^f(t) &= \int_0^T a^f(\tau) u_{\text{СВ}}(t - \tau - \Delta t) d\tau; \\ \hat{u}_{\text{СВ}}^b(t) &= \int_0^T a^b(\tau) u_{\text{СВ}}(t + \tau + \Delta t) d\tau, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $T$  — период времени, на котором определены характеристики линейного предсказания вперед  $a^f(\tau)$  и назад  $a^b(\tau)$ ;

$\hat{u}_{\text{СВ}}^f(t), \hat{u}_{\text{СВ}}^b(t)$  — прогноз сигнала;  $\Delta t$  — шаг дискретизации исходного сигнала.

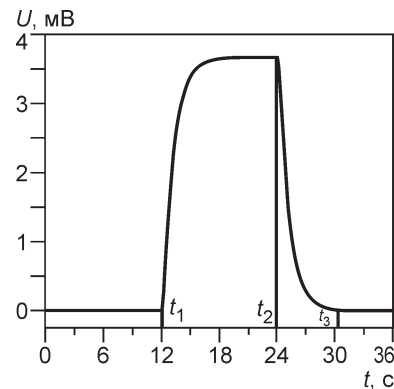


Рис. 2. Сигнал, измеренный эталонным измерительным преобразователем, при стабильном источнике излучения

Работоспособность предложенного метода проверяли экспериментально. Для этих целей использовали высокостабильный лазер Coherent Verdi V8 и полупроводниковый лазер на гетероструктурах EVS-1060-50; в качестве ЭПИП — тепловой приемник ПИ-15, а в качестве теплового приемника-свидетеля — Coherent PM-3. С применением данного оборудования определили коэффициент передачи единицы средней мощности лазерного излучения приемнику-свидетелю. Итоговая импульсная функция была получена усреднением по пяти измерениям.

По сигналу ПС вычисляли прогноз дрейфа нуля по формулам (6), который вычитали из исходного сигнала. Амплитуда флуктуаций мощности измеряемого излучения на тепловом ПС от излучения полупроводникового лазера не выходила за пределы 10 %. Проведенные измерения с использованием предложенного метода для фотоэлектрического ПС показали, что относительное отличие передаваемой единицы мощности лазерного излучения от исходной составило 0,003 %, а для теплового ПС — 0,03 %.

Таким образом, применение описанного метода с полупроводниковыми лазерами в качестве источников излучения позволило сохранить суммарную неопределенность передачи единицы мощности на уровне 0,1 %. Для сравнения приведем значения неопределенностей, характеризующих точность национальных эталонов единицы средней мощности лазерного излучения ведущих метрологических институтов: США, NIST (на базе С-калориметра) — 0,34 %; Германия, PTB (LM7) в диапазоне 350–1064 нм — 0,1 % и при 10,6 мкм — 0,2 %; Великобритания, NPL (на базе криогенного радиометра) — 0,01 %; Китай, NIM — 1,2 %; Украина — 0,4 %; Беларусь — 0,4 %.

В 2013 г. были добавлены три строки в таблицу калибровочных и измерительных возможностей (СМС-таблицы) (Calibration and Measurement Capabilities) на сайте МБМВ по чувствительности и мощности лазерного излучения от ВНИИОФИ. Эти строки появились в результате дополнительных сличений ГПЭ 28—2013, которые проходили в период с 2009 по 2012 гг. и зарегистрированы в COOMET 17.03.2009 г. № 33-7/285 под порядковым номером 461/RU/09. Название темы: «Сличения эталонов единиц средней мощности лазерного излучения на длинах волн 0,532, 1,064 и 10,6 мкм». Партнерами были: ВНИИОФИ и PTB. Информация о сличениях размещена на сайте МБМВ и в [8].

**Заключение.** Государственный первичный эталон единицы средней мощности лазерного излучения ГЭТ 28—2013 обеспечивает воспроизведение и передачу единицы сред-

ней мощности лазерного излучения с помощью вторичных и разрядных рабочих эталонов в диапазоне длин волн 0,3 — 12 мкм рабочим СИ. По своим точностным характеристикам эталон находится на уровне национальных эталонов единицы средней мощности лазерного излучения ведущих метрологических институтов. Единица воспроизводится со средним квадратическим отклонением результата измерений  $S_0 \leq 0,03 \cdot 10^{-2}$  при неисключенной систематической погрешности  $\Theta_0 \leq 0,04 \cdot 10^{-2}$ , при этом расширенная неопределенность составляет  $\hat{U}_{0,95} = 0,033 \%$  и  $\hat{U}_{0,99} = 0,046 \%$ .

## Л и т е р а т у р а

1. Слипченко С. О., Винокуров Д. А., Пихтин Н. А., Соколова З. Н., Станкевич А. Л., Тарасов И. С., Алферов Ж. И. Сверхнизкие внутренние оптические потери в квантово-размерных лазерных гетероструктурах раздельного ограничения // Физика и техника полупроводников. 2004. Т. 38. № 12. С. 1477—1487.
2. Тарасов И. С. Мощные полупроводниковые лазеры на основе гетероструктур раздельного ограничения. Обзор // Квантовая электроника. 2010. Т. 40. № 8. С. 661—682.
3. Pikhitin N. A., Slipchenko S. O., Sokolova Z. N., Stankevich A. L., Vinokurov D. A., Tarasov I. S., Alferov Zh. I. 16 W continuous-wave output power from 100 m-aperture laser with quantum well asymmetric heterostructure // Electronics Lett. 2004. V. 40. N. 22. P. 1413—1431.
4. Crump P., Blume G., Paschke K., Staske R., Pietrzak A., Zeimer U., Einfeldt S., Ginolas A., Bugge F., Häusler K., Ressel P., Wenzel H., Erbert G. 20 W continuous wave reliable operation of 980 nm broad-area single emitter diode lasers with an aperture of 96  $\mu\text{m}$  // Proc. SPIE. 2009. N. 7198, 719814.
5. Таблицы физических величин: Справ. пособие / Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.
6. Марпл.-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990.
7. Робинсон Э. А. История развития теории спектрального оценивания // ТИИЭР. 1982. Т. 70. № 9. С. 6—32.
8. Moskalyuk S. A., Liberman A. A., Kück S., Brandt F. Final report on supplementary comparison COOMET.PR-S4: Laser power responsivity (COOMET project 461/RU/090) // Metrologia. 2012. V. 49. P. 02001.

Дата принятия 03.09.2015 г.