ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р ИСО 13695— 2010

ОПТИКА И ФОТОНИКА ЛАЗЕРЫ И ЛАЗЕРНЫЕ УСТАНОВКИ (СИСТЕМЫ)

Методы измерений спектральных характеристик лазеров

ISO 13695:2004
Optics and photonics — Lasers and laser-related equipment — Test methods for the spectral characteristics of lasers
(IDT)

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2011

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

Цели и принципы стандартизации в Российской Федерации установлены Федеральным законом от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании», а правила применения национальных стандартов Российской Федерации — ГОСТ Р 1.0—2004 «Стандартизация в Российской Федерации. Основные положения»

Сведения о стандарте

1 ПОДГОТОВЛЕН Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений» (ФГУП «ВНИИОФИ») на основе собственного аутентичного перевода на русский язык международного стандарта, указанного в пункте 4

2 ВНЕСЕН Управлением метрологии Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30 ноября 2010 г. № 765-ст

4 Настоящий стандарт идентичен международному стандарту ИСО 13695:2004 «Оптика и фотоника. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений спектральных характеристик лазеров» (ISO 13695:2004 «Optics and photonics — Lasers and laser-related equipment — Test methods for the spectral characteristics of lasers»).

При применении настоящего стандарта рекомендуется использовать вместо ссылочных международных стандартов соответствующие им национальные стандарты Российской Федерации, сведения о которых приведены в справочном приложении DA

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодно издаваемом информационном указателе «Национальные стандарты», а текст изменений и поправок — в ежемесячно издаваемых информационных указателях «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ежемесячно издаваемом информационном указателе «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет

© Стандартинформ, 2011

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения . . . 1
2 Нормативные ссылки . . . 1
3 Термины и определения . . . 1
4 Обозначения, единицы измерения, сокращенные термины . . . 6
5 Единство измерений (прослеживаемость результатов измерений) . . . 7
6 Измерение длины волны и ширины полосы . . . 7
6.1 Общие сведения . . . 7
6.2 Выбор методики измерений и измеряемых параметров в зависимости от требуемой точности результата . . . 8
6.3 Выбор средств измерений . . . 9
6.4 Измерения в воздухе . . . 9
6.5 Измерения с низкой разрешающей способностью . . . 10
6.6 Измерения с высокой разрешающей способностью . . . 11
7 Измерения стабильности длины волны . . . 14
7.1 Зависимость длины волны от рабочих условий . . . 14
7.2 Стабильность длины волны одночастотного лазера . . . 14
8 Протокол измерений . . . 14
Приложение А (справочное) Показатель преломления воздуха . . . 16
Приложение В (справочное) Критерий выбора дифракционного монохроматора и его принадлежностей — калибровка . . . 17
Приложение С (справочное) Критерий выбора интерферометра Фабри-Перо . . . 19
Приложение DA (справочное) Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов национальным стандартам Российской Федерации . . . 20
Библиография . . . 21

Предисловие к международному стандарту ИСО 13695:2004 «Оптика и фотоника. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений спектральных характеристик лазеров»

ИСО (Международная организация по стандартизации) — Всемирная федерация национальных органов по стандартизации (членов ассоциации). Разработкой международных стандартов обычно занимаются технические комитеты. Каждый член ассоциации, заинтересованный в тематике, для которой создан технический комитет, имеет право быть представленным в этом комитете. Международные правительственные и неправительственные организации, связанные с ИСО, также принимают участие в работе. ИСО тесно сотрудничает с Международной электротехнической комиссией (МЭК) по всем вопросам электротехнической стандартизации в области электротехники.

Проекты международных стандартов разрабатывают в соответствии с правилами, изложенными в Директивах ИСО/МЭК, часть 2.

Проекты международных стандартов, принятые техническими комитетами, рассылают членам ассоциации для голосования. Публикация в качестве международного стандарта требует одобрения по крайней мере 75 % членов ассоциации, принявших участие в голосовании.

Некоторые элементы этого документа (международного стандарта) могут быть предметом патентования. ИСО не несет ответственности за признание какого-либо или всех патентных прав.

Международный стандарт ИСО 13695 подготовлен подкомитетом ПК 9 «Электрооптические системы» Технического комитета ИСО/ТК 172 «Оптика и фотоника».

Введение
к международному стандарту ИСО 13695:2004 «Оптика и фотоника. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений спектральных характеристик лазеров»

Спектральные характеристики лазера, такие как максимальная (пиковая) длина волны или ширина спектральной линии, являются важными для его различных возможных применений. Примерами служат специфические требования к спектральным характеристикам лазеров, применяемых в интерферометрии и литографии.

В данном стандарте приведены определения основных параметров, описывающих спектральные характеристики лазера, и рекомендованы методики измерений этих параметров для распространенных типов лазеров.

Допустимый уровень неопределенности измерений длины волны зависит от предполагаемого применения лазера. Следовательно, выбор аппаратуры, методики измерений и оценки их результатов предопределен тремя классами точности выполняемых спектральных измерений. С целью унификации способов представления результатов измерений спектральных характеристик в стандарт включен образец протокола измерений.

Введение
к национальному стандарту Российской Федерации
ГОСТ Р ИСО 13695—2010 «Оптика и фотоника. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений спектральных характеристик лазеров»

Целью настоящего стандарта является прямое применение в Российской Федерации международного стандарта ИСО 13695:2004 «Оптика и фотоника. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений спектральных характеристик лазеров» как основы для изготовления и поставки на экспорт объекта стандартизации по договорам (контрактам).

ГОСТ Р ИСО 13695—2010 представляет собой полный аутентичный текст ИСО 13695:2004.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ОПТИКА И ФОТОНИКА
ЛАЗЕРЫ И ЛАЗЕРНЫЕ УСТАНОВКИ (СИСТЕМЫ)

Методы измерений спектральных характеристик лазеров

Optics and photonics — Lasers and laser-related equipment.
Test methods for the spectral characteristics of lasers

Дата введения — 2011—10—01

1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на методики измерений таких спектральных характеристик, как длина волны, ширина полосы, спектральное распределение и стабильность длины волны лазерного излучения в непрерывном и импульсном режимах генерации. Важную роль играют также условия выполнения измерений, влияющие на длину волны лазерного излучения.

2 Нормативные ссылки

Следующие нормативные документы необходимы для применения настоящего стандарта. Для датированных ссылок следует применять только указанные издания. Для ссылки без даты следует применять последнее издание документа (включая любые поправки).

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ИСО 11145 Оптика и оптические приборы. Лазеры и относящееся к лазерам оборудование. Словарь и обозначения

ИСО 12005 Лазеры и относящееся к лазерам оборудование. Методы испытаний параметров лазерных пучков. Поляризация

МЭК 60747-5-1 Дискретные полупроводниковые приборы и интегральные схемы. Часть 5-1. Оптоэлектронные устройства. Общие положения

Руководство по выражению неопределенности измерений (РНИ). МБМВ[1], МЭК, МФКХ[2], ИСО, МСТПХ[3], МСТПФ[4], МОЗМ[5], 1993. Исправлено и переиздано в 1995 г.

Международный словарь основных и общих терминов в метрологии (МСМ). МБМВ, МЭК, МФКХ, ИСО, МСТПХ, МСТПФ, МОЗМ. Женева: ИСО.

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по МСМ, ИСО 11145, МЭК 60747-5-1, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **длина волны в вакууме**, λ_0: Длина бесконечной плоской электромагнитной волны, распространяющейся в вакууме.

Примечание — Соотношение частоты f и длины волны λ_0 в вакууме описывается формулой $\lambda_0 = c/f$, где c = 299792458 м/с.

[1] Международное бюро мер и весов.
[2] Международная федерация клинической химии и лабораторной медицины.
[3] Международный союз теоретической и прикладной химии.
[4] Международный союз теоретической и прикладной физики.
[5] Международная организация законодательной метрологии.

Издание официальное

3.2 **длина волны в воздухе**, λ_{air}: Длина волны излучения, распространяющегося в воздухе, связана с длиной волны λ_0 в вакууме соотношением

$$\lambda_{air} = \lambda_0 / n_{air},$$

где n_{air} — показатель преломления воздуха (см. 6.4).

Примечание — На показатель преломления атмосферного воздуха n_{air} по трассе распространения излучения влияют влажность, давление, температура. Поэтому следует пользоваться либо значением λ_0, либо значением длины волны в стандартном воздухе (см. 6.4).

3.3 **длина волны в сухом воздухе при стандартных (нормальных) условиях**, λ_{std}: Длина волны излучения, распространяющегося в сухом воздухе (0 % влажности) при стандартных (нормальных) условиях, связана с длиной волны λ_0 в вакууме соотношением

$$\lambda_{std} = \lambda_0 / n_{std},$$

где n_{std} — показатель преломления воздуха при стандартных (нормальных) условиях (см. 6.4).

Примечание — Применительно к данному стандарту понятие воздуха при стандартных (нормальных) условиях приведено в 6.4. В литературе описаны различные варианты стандартных условий. Поэтому в протоколе измерений следует отметить параметры воздуха и условия, при которых выполнялись измерения.

3.4 **спектральное распределение мощности (энергии) излучения**, $P_\lambda(\lambda)$ [$Q_\lambda(\lambda)$]: Отношение мощности излучения $dP(\lambda)$ (или энергии излучения $dQ(\lambda)$ в случае импульсного лазера), содержащейся в распространяющемся лазерном пучке в интервале длин волн $d\lambda$, к этому интервалу:

$$P_\lambda(\lambda) = \frac{dP(\lambda)}{d\lambda};$$

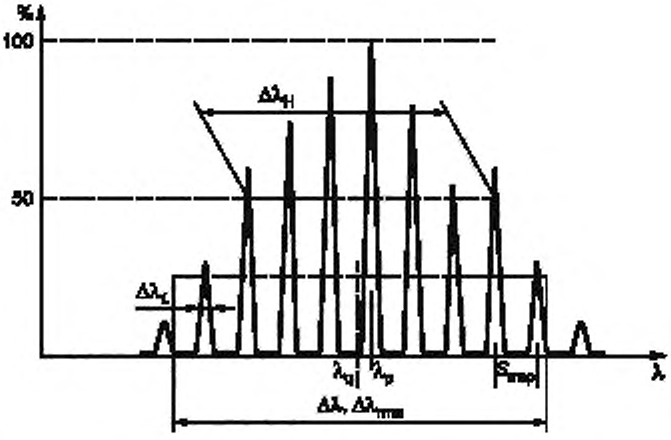
$$\left(Q_\lambda(\lambda) = \frac{dQ(\lambda)}{d\lambda} \right).$$

Примечание — Мощность (энергия) излучения в лазерном пучке, ограниченном длинами волн от λ_{low} до λ_{high}, описана интегралом:

$$P = \int_{\lambda_{low}}^{\lambda_{high}} P_\lambda(\lambda) d\lambda;$$

$$\left(Q = \int_{\lambda_{low}}^{\lambda_{high}} Q_\lambda(\lambda) d\lambda \right).$$

3.5 **длина волны максимума спектрального распределения мощности (энергии) излучения**, λ_p: Длина волны лазерного излучения (максимальная, пиковая), при которой кривая спектрального распределения достигает максимума (см. рисунок 1).



λ — длина волны

Рисунок 1 — Спектральные характеристики лазеров — иллюстрация определяемых параметров

3.6 среднее взвешенное значение длины волны (момент первого порядка), λ_g: Длина волны излучения, отображающая центр тяжести спектрального распределения мощности (энергии), описывается выражением

$$\lambda_g = \frac{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \lambda S(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} S(\lambda) d\lambda},$$

где $S(\lambda)$ — спектральное распределение мощности $P_\lambda(\lambda)$ для непрерывного излучения или спектральное распределение энергии $Q_\lambda(\lambda)$ для импульсного излучения (см. рисунок 1).

Примечание — При выборе пределов интегрирования λ_{min} и λ_{max} следует руководствоваться рекомендациями 6.2.2.

3.7 **центрированная длина волны**, $\overline{\lambda}$: Среднее взвешенное длин волн спектральных линий или мод излучения

$$\overline{\lambda} = \frac{\sum_{i=i_{min}}^{i=i_{max}} I_i \lambda_i}{\sum_{i=i_{min}}^{i=i_{max}} I_i},$$

где λ_i — длина волны i-й спектральной линии или i-й моды излучения;

I_i — относительное значение мощности излучения в i-й спектральной линии или в i-й моде излучения;

i_{min}, i_{max} — предельные (граничные) спектральные линии или моды излучения ниже и выше λ_p.

Примечания

1 Обычно пределы суммы выбирают таким образом, чтобы относительные значения мощности в спектральных линиях или модах излучения вне этих пределов не превышали 1 % относительного значения мощности при длине волны λ_p.

2 Это ограничение, в частности, полезно в случае многомодового лазера.

3.8 **средняя длина волны**, λ_{av}: Отношение скорости света c к средней частоте f_{av} оптического излучения

$$\lambda_{av} = c/f_{av}.$$

Примечание — Средняя частота f_{av} оптического излучения может быть измерена непосредственно (например, гетеродинным методом, см. 6.6.5).

3.9 **среднее квадратическое значение спектральной (-го) полосы (интервала) излучения (момент второго порядка)**, $\Delta\lambda$: Момент второго порядка спектрального распределения мощности (энергии) излучения описывает выражение

$$\Delta\lambda = \sqrt{\frac{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} (\lambda - \lambda_g)^2 S(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} S(\lambda) d\lambda}},$$

где $S(\lambda)$ — спектральное распределение мощности $P_\lambda(\lambda)$ для непрерывного излучения или спектральное распределение энергии $Q_\lambda(\lambda)$ для импульсного излучения (см. рисунок 1).

Примечание — При выборе пределов интегрирования λ_{min} и λ_{max} следует руководствоваться рекомендациями 6.2.2.

3.10 **среднее квадратическое значение спектральной (-го) полосы (интервала)**, $\Delta\lambda_{rms}$: Среднее квадратическое значение $\Delta\lambda_{rms}$ определяют по формуле

$$\Delta\lambda_{rms} = \sqrt{\frac{\int_{i=i_{min}}^{i=i_{max}} I_i(\lambda_i - \overline{\lambda})^2}{\int_{i=i_{min}}^{i=i_{max}} I_i}},$$

где λ_i — длина волны i-й спектральной линии или i-й моды излучения;

I_i — относительное значение мощности излучения в i-й спектральной линии или в i-й моде излучения;

$\overline{\lambda}$ — центрированная длина волны;

i_{min}, i_{max} — предельные (граничные) спектральные линии или моды излучения ниже и выше λ_p (см. рисунок 1).

Примечания

1 Обычно пределы суммы выбирают таким образом, чтобы относительные значения мощности в спектральных линиях или модах излучения вне этих пределов не превышали 1 % относительного значения мощности при длине волны λ_p.

2 Это ограничение, в частности, полезно в случае многомодового лазера.

3.11 **ширина спектральной полосы (на уровне половины максимальной интенсивности)**, $\Delta\lambda_H$: Максимальный интервал между длинами волн, при которых ординаты кривой спектрального распределения мощности (энергии) излучения равны половине ее пикового значения (см. рисунок 1).

Примечание — Заимствовано из ИСО 11145.

3.12 **ширина спектральной линии (на уровне половины максимальной интенсивности)**, $\delta\lambda_L$: Максимальный интервал между длинами волн в пределах $\delta\lambda$, при которых ординаты огибающей спектральной линии в спектральном распределении мощности (энергии) излучения равны половине ее пикового значения.

Примечание — Ширина спектральной линии аналогична ширине спектральной полосы (3.11), но ее определяют для одной (продольной) моды или для характерного спектрального признака в пределах интервала $\delta\lambda$.

3.13 **межмодовый интервал**, $F_{msp}(S_{msp})$: Интервал между соседними продольными модами, выраженный в единицах частоты F_{msp} или длины волны S_{msp} излучения (см. рисунок 1).

3.14 **число продольных мод**, N_m: Число продольных мод в пределах выделенной ширины полосы (обычно в пределах среднеквадратического значения спектральной (-го) полосы (интервала) $\Delta\lambda_{rms}$).

3.15 **коэффициент подавления побочной моды**, *SMS*: Коэффициент, отражающий соотношение относительных значений мощности излучения для наиболее интенсивной моды I_p при длине волны λ_p и второй наиболее интенсивной побочной моды при длине волны λ_s

$$SMS = 10 \lg\left(\frac{I_p}{I_s}\right) \text{(см. рисунок 2).}$$

Примечание — На практике эквивалентным считают соответствующее отношение пиковых значений спектрального распределения для наиболее интенсивной моды при длине волны λ_p и второй наиболее интенсивной побочной моды при длине волны λ_s

$$SMS = 10 \lg\left(\frac{S(\lambda_p)}{S(\lambda_s)}\right).$$

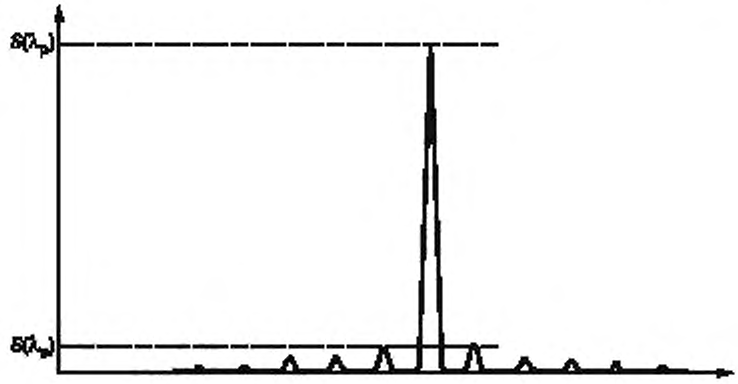


Рисунок 2 — Коэффициент подавления побочной моды

3.16 **частота следования импульсов**, f_p: Количество импульсов излучения в секунду в режиме генерации их регулярной последовательности.

3.17 **температурная зависимость длины волны**, $\delta\lambda_T$: Смещение (сдвиг) длины волны при изменении температуры T лазера

$$\delta\lambda_T = \frac{d\lambda}{dT}.$$

3.18 **зависимость длины волны от тока возбуждения генерации лазерного излучения**, $\delta\lambda_{I_0}$: Смещение (сдвиг) длины волны при изменении тока I возбуждения генерации лазерного излучения

$$\delta\lambda_{I_0} = \frac{d\lambda}{dI}.$$

3.19 **дисперсия Аллана для непрерывного лазерного излучения**, $\sigma_y^2(2, \tau)$: Дисперсия двух выборочных значений флуктуаций частоты при времени усреднения τ, описанная формулой

$$\sigma_y^2\ (2,\ \tau) = \left\langle \frac{[\overline{y}(k+1) - \overline{y}(k)]^2}{2} \right\rangle,$$

где $\langle\ \rangle$ — усреднение по бесконечной выборке данных;

$\overline{y}(k)$ — k-тое измеренное значение $\overline{y}$ в данной выборке;

$\overline{y}$ — результат измеренных значений $y(t)$ в пределах временного интервала τ.

Примечания

1 При измерениях частоты парциальную девиацию $y(t)$ описывает выражение

$$y(t) = [\nu(t) - \nu_0]/\nu_0,$$

где $\nu(t)$ — мгновенная частота;

ν_0 — номинальная частота.

Интервалы измерений должны быть одной (единой) длительности τ, причем недопустимо «мертвое время» между следующими друг за другом временными интервалами. В интервале $\tau < 100$ с должно быть получено не менее 100 отсчетов. Для бóльших интервалов число отсчетов может быть сокращено, но обязательно указано в протоколе измерений.

2 Значение $\overline{y}$ может быть определено в результате гетеродинных измерений с интегрированием разности частот $\Delta\nu$ в интервале τ и последующим нормированием к частоте ν_0.

3 Поскольку $y = \Delta\nu/\nu = -\Delta\lambda/\lambda$, $\sigma_y^2(2, \tau)$ является в то же время оценкой (мерой) стабильности частоты и длины волны.

4 Более детально эти вопросы рассмотрены в [1].

3.20 **передаточная функция измерительной аппаратуры**, $R(\lambda, \lambda_0)$: Отклик в виде выходного сигнала измерительной аппаратуры, настроенной на длину волны λ, на входное воздействие монохроматического излучения с длиной волны λ_0.

Примечание — Обычно в пределах рабочего спектрального диапазона измерительной аппаратуры $R(\lambda, \lambda_0)$ практически не зависит от λ_0, и второй аргумент в этой функции может быть опущен. Для правильно настроенной измерительной аппаратуры момент первого порядка функции $R(\lambda, \lambda_0)$ определяют как

$$\lambda_g = \frac{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \lambda R(\lambda, \lambda_0) d\lambda}{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} R(\lambda, \lambda_0) d\lambda},$$

и он должен быть равен длине волны входного излучения, т. е. $\lambda_g = \lambda_0$.

3.21 **эффективная спектральная полоса длин волн**, $\Delta\lambda_{rms}(\lambda_0)$: Момент второго порядка функции $R(\lambda, \lambda_0)$

$$\Delta\lambda_{rms}(\lambda_0) = \sqrt{\frac{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} (\lambda - \lambda_g)^2 R(\lambda, \lambda_0) d\lambda}{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} R(\lambda, \lambda_0) d\lambda}}.$$

Примечание — Если, как обычно, предположить, что $R(\lambda, \lambda_0)$ и, следовательно, $\Delta\lambda_{rms}(\lambda_0)$ практически не зависят от длины волны λ_0 входного излучения, то эффективная спектральная полоса описана символом $\Delta\lambda_{rms}$ без аргумента λ_0.

4 Обозначения, единицы измерения, сокращенные термины

Обозначение	Единица измерений	Сокращенный термин
F_{msp}	Гц	Межмодовый интервал в частотной области
f_p	Гц	Частота следования импульсов
N_m		Число продольных мод
n_{air}		Показатель преломления воздуха
n_{std}		Показатель преломления сухого воздуха при стандартных (нормальных) условиях
P_λ	Вт/м	Спектральное распределение мощности излучения
$Q(\lambda)$	Вт · с/м	Спектральное распределение энергии излучения
$R(\lambda, \lambda_0)$	1/м	Передаточная функция измерительной аппаратуры
S_{msp}	м	Межмодовый интервал в области длин волн
S_λ		Спектральное распределение мощности $P_\lambda(\lambda)$ для непрерывного излучения и энергии $Q_\lambda(\lambda)$ для импульсного излучения
SMS	дБ	Коэффициент подавления побочной моды
U_x		Расширенная стандартная неопределенность измерения величины x
$\delta\lambda_T$	м/К	Температурная зависимость длины волны
$\delta\lambda_c$	м/А	Зависимость длины волны λ от тока возбуждения генерации
λ	м	Длина волны

Окончание таблицы

Обозначение	Единица измерений	Сокращенный термин
λ_0	м	Длина волны в вакууме
λ_{air}	м	Длина волны в воздухе
λ_{av}	м	Средняя длина волны
λ_g	м	Среднее взвешенное значение длины волны (момент первого порядка)
λ_p	м	Максимальная (пиковая) длина волны
λ_{std}	м	Длина волны в сухом воздухе при стандартных (нормальных) условиях
$\overline{\lambda}$	м	Центрированная длина волны
$\Delta\lambda$	м	Ширина спектральной полосы (момент второго порядка)
$\Delta\lambda_H$	м	Ширина спектральной полосы
$\Delta\lambda_{mix}$	м	Эффективная спектральная полоса длин волн
$\Delta\lambda_L$	м	Ширина спектральной линии
$\Delta\lambda_{meas}$	м	Измеренная спектральная полоса (момент второго порядка)
$\Delta\lambda_{rms}$	м	Среднеквадратическое значение спектральной полосы
ν	Гц	Частота оптических колебаний (волны)
ν_{FSR}	Гц	Полоса пропускания интерферометра Фабри-Перо
$\sigma_y^2(2, \tau)$		Дисперсия Аллана, характеризующая стабильность λ непрерывного лазера
τ_H	с	Длительность импульса

5 Единство измерений (прослеживаемость результатов измерений)

Все результаты измерений следует представлять в единицах Международной системы единиц (СИ). Кроме того, отчетливо должна быть прослежена связь получаемых результатов с соответствующими национальными эталонами (например, измерения длины волны должны быть выполнены с использованием методики измерений, базирующейся на прослеживаемости цепочки передачи размера единицы длины к национальному эталону метра).

Примечание — Следует придерживаться рекомендаций Международного бюро мер и весов в части применения опорной (референтной) длины волны [2].

6 Измерение длины волны и ширины полосы

6.1 Общие сведения

6.1.1 Подготовка

В зависимости от вида спектральных характеристик при выбранном для испытаний (измерений) типе лазера и требуемого уровня неопределенности измерения U_λ или U_ν длины волны (частоты) определению подлежат различные значения параметров $U_\lambda/\lambda = U_\nu/\nu$, как рекомендовано в 6.2.

В случае, когда измеряемые характеристики лазера неизвестны, следует выполнить предварительные измерения для выбора наиболее подходящей измерительной аппаратуры и измеряемых параметров.

В данном стандарте изложены данные с учетом предположения, что спектральные характеристики лазерного пучка одинаковы во всех точках пространственного распределения мощности (энергии) в пучке. В противном случае необходимо выполнить измерения с соответствующей пространственной разрешающей способностью с использованием аппаратуры, имеющей меньшую апертуру.

В 6.2 рекомендованы три уровня точности выполняемых измерений спектральных характеристик.

6.1.2 Распространенные типы лазеров

Выбор параметров, отображающих спектральные характеристики излучения лазера, зависит от его типа.

Наиболее распространенные группы лазеров:

а) широкополосные лазеры, например импульсные или многомодовые лазеры, излучению которых присущи значительные и быстрые флуктуации мод;

б) многомодовые лазеры со стабильной модовой структурой в течение всего периода испытаний (измерений) их спектральных характеристик;

в) одночастотные лазеры.

Для каждой из этих трех групп лазеров рекомендуется определять следующие параметры:

- для широкополосных лазеров:

среднее взвешенное значение длины волны λ_g (момент первого порядка); среднеквадратическое значение спектральной полосы $\Delta\lambda$ (момент второго порядка) или ширину спектральной полосы (*FWHM*) $\Delta\lambda_H$; зависимость длины волны $\delta\lambda_T$ и (или) $\delta\lambda_c$ от параметров, связанных с условиями измерений, т. е. ее температурную зависимость и/или зависимость от тока возбуждения генерации соответственно;

- для многомодовых лазеров:

центрированную длину волны $\overline{\lambda}$; среднеквадратическое значение спектральной полосы $\Delta\lambda_{rms}$; межмодовый интервал в частотной области F_{msp} или в области длин волн S_{msp}; число продольных мод N_m в пределах заданной ширины полосы; зависимость длины волны $\delta\lambda_T$ и/или $\delta\lambda_c$ от параметров, связанных с условиями измерений, т. е. ее температурную зависимость и/или зависимость от тока возбуждения генерации соответственно;

- для одночастотных лазеров:

максимальную (пиковую) длину волны λ_p или среднюю длину волны λ_{av} и ширину спектральной линии $\Delta\lambda_L$, а также коэффициент подавления побочной моды *SMS*; зависимость длины волны $\delta\lambda_T$ и/или $\delta\lambda_c$ от параметров, связанных с условиями измерений, т. е. ее температурную зависимость и/или зависимость от тока возбуждения генерации соответственно; дисперсию Аллана $\sigma_y^2(2, \tau)$, характеризующую стабильность λ непрерывного лазера.

6.2 Выбор методики измерений и измеряемых параметров в зависимости от требуемой точности результата

6.2.1 Общее замечание

Предполагают, что спектральные характеристики лазеров стабильны в процессе выполнения измерений. Однако может возникнуть потребность в последующей оценке стабильности и дрейфа (см. раздел 7).

6.2.2 Измерения с низкой точностью

Результаты этих измерений полезны в типичном интервале неопределенности $U_\lambda/\lambda = U_\nu/\nu > 10^{-4}$. Это относится к широкополосным (например, импульсным или многомодовым непрерывным) лазерам, а также к измерениям, выполняемым с использованием средств измерений с низкой разрешающей способностью.

При выполнении этих измерений не требуется разложение излучения на отдельные моды, а определению подлежат λ_g и $\Delta\lambda$, а также $\delta\lambda_T$ и /или $\delta\lambda_c$ (см. таблицу раздела 4).

При определении λ_g пределы интегрирования λ_{min} и λ_{max} обычно выбирают таким образом, чтобы вне интервала между ними спектральное распределение было менее 1 % его максимального значения. При выборе других пределов интегрирования их следует указать в протоколе измерений.

Возможны случаи, когда спектральное распределение не превышает 1 % его максимального значения в очень широком диапазоне длин волн (например, при наличии узкого пика на широком слабоинтенсивном фоне). В этих случаях значительная доля суммарной мощности может находиться вне пределов интегрирования. Кроме того, при сверхузких распределениях мощности разрешающая способность применяемого средства измерений может оказывать влияние на результат измерений максимального значения $S(\lambda)$ при длине волны λ_p, что, в свою очередь, оказывает влияние на выбор пределов интегрирования. Поэтому следует принять необходимые меры, ограничивающие влияние перечисленных факторов на результат вычисления λ_g.

6.2.3 Измерения со средней точностью

Результаты этих измерений полезны в типичном интервале неопределенности $U_\lambda/\lambda = U_\nu/\nu$ в пределах от 10^{-4} до 10^{-6}. Это относится к узкополосным импульсным или непрерывным многомодовым лазерам.

При выполнении этих измерений излучение обычно разлагается на отдельные моды и определению подлежат F_{msp} или S_{msp}, N_m и *SMS*. Кроме того, должны быть определены $\overline{\lambda}$ и $\Delta\lambda_{rms}$, а также $\delta\lambda_T$ и/или $\delta\lambda_c$ (см. таблицу раздела 4).

6.2.4 Измерения с высокой точностью

Результаты этих измерений полезны в типичном интервале неопределенности $U_\lambda/\lambda = U_\nu/\nu < 10^{-5}$. Это относится к одномодовым или узкополосным импульсным лазерам.

При выполнении этих измерений должны быть идентифицированы возможные побочные моды и определен коэффициент *SMS*. Определению подлежат также λ_p или λ_{gv}, $\Delta\lambda_L$, $\delta\lambda_T$ и/или $\delta\lambda_c$. Кроме того, необходимо измерить $\sigma_y^2(2, \tau)$ (см. таблицу раздела 4).

6.3 Выбор средств измерений

Выбор средства измерений зависит от требуемой точности результата и типа лазера. Например, спектрометр с дифракционной решеткой необходим при измерениях с разрешающей способностью $R = \lambda/\Delta\lambda_{rms}$ порядка от 10^5 до 10^6.

При измерениях с импульсными лазерами, когда длительность импульса τ_H больше величины, обратной ширине полосы пропускания средства измерений, следует применять интерферометры. Для интерферометра Фабри-Перо с полосой пропускания ν_{FSR} и добротностью F минимальная длительность импульса равна F/ν_{FSR}. Для двухволнового интерферометра с максимальной разностью хода L минимальная длительность импульса равна L/c, где c — скорость света.

Требования к точности измерений длины волны часто могут быть низкими. Однако применительно к широкополосным излучателям измерения амплитуды (уровня) спектрального распределения мощности при этом необходимо выполнять с высокой точностью (например, плоскостность кривой распределения, высоты пучков и т. д.).

Все оптические элементы системы, формирующие измеряемый пучок лазерного излучения (линзы, зеркала, оптические волокна и т. д.), должны быть либо неселективными, либо сертифицированными по спектральной чувствительности в пределах диапазона измерений длин волн. Во всем диапазоне измерений длин волн должна быть обеспечена независимость от состояния поляризации лазерного излучения. При наличии зависимости от длины волны она должна быть охарактеризована, например, с использованием матриц Мюллера (см. ИСО 12005). Поляризационно-зависимая спектральная чувствительность средства измерений должна быть принята во внимание и учтена при обработке получаемых результатов. Особенно это относится к входящим в измерительную установку приемникам излучения и монохроматорам с дифракционными решетками.

Для пучков узкополосных лазеров пропускание оптической системы измерительной установки можно считать неизменным и не зависящим от состояния поляризации.

Поскольку многие типы лазеров подвержены влиянию оптической обратной связи, любые отраженные в обратном направлении и попадающие в выходную апертуру лазера потоки излучения (например, оптическими окнами, фильтрами или линзами) должны быть устранены путем наклона соответствующих оптических элементов или применения оптических изоляторов.

6.4 Измерения в воздухе

При измерениях λ_{air} результаты измерений зависят от параметров окружающей среды (температуры, атмосферного давления и влажности), влияющих на показатель преломления воздуха. Кроме того, имеет место дисперсия, т. е. зависимость самого показателя преломления от длины волны. Если в качестве опорного (референтного) используют лазер с известной длиной волны, то влияние показателя преломления на результаты измерений частично исчезает, за исключением значительно меньшего эффекта дисперсии (и ее зависимости от атмосферных условий), что и следует учитывать.

Вычисление показателя преломления следует начинать с формулы дисперсии для сухого воздуха. При стандартных условиях (температура 15 °С, давление 101325 Па, объемное содержание CO_2 $450 \cdot 10^{-6}$ и влажность 0 %) показатель преломления вычисляют по формуле (см. [3])

$$(n_{std} - 1)10^8 = 8342{,}54 + \frac{2406147}{130 - (1000\ нм/\lambda)^2} + \frac{15998}{38{,}9 - (1000\ нм/\lambda)^2}.$$

Примечания

1 Вычисления по приведенной формуле обеспечивают определение n_{air} с погрешностью не более 10^{-7} в диапазоне длин волн 300 нм < λ < 1700 нм. В видимом диапазоне формула обеспечивает получение результата с существенно более высокой точностью.

2 n_{std}(633 нм) = 1,0002765, n_{std}(532 нм) = 1,0002782, n_{std}(1530 нм) = 1,0002733.

Если приемлемый уровень неопределенности измерения λ или ν лазерного излучения $U_\lambda/\lambda_m = U_\nu/\nu_m$ превышает 10^{-4}, то атмосферные условия в явном виде можно при расчетах не учитывать.

Если приемлемый уровень неопределенности измерения λ или ν лазерного излучения $U_\lambda/\lambda_m = U_\nu/\nu_m$ меньше или равен 10^{-4}, то результаты измерений должны быть скорректированы в соответствии с формулой (см. [3])

$$(n_{air} - 1) = (n_{std} - 1)\frac{1{,}0406322 \cdot 10^{-5} p}{1 + 0{,}0036610T}(1 + \varepsilon)(1 + x) - f[3{,}7345 - 0{,}0401(1000\ нм/\lambda)^2]10^{-10},$$

где n_{air} — показатель преломления воздуха;

n_{std} — показатель преломления сухого воздуха при указанных ранее стандартных условиях и длине волны излучения измеряемого (испытываемого) лазера,

T — температура, °C;

f — парциальное давление водяного пара, Па;

p — суммарное атмосферное давление, Па;

$1 + \varepsilon = 1 \cdot 10^{-8} p\ (0{,}601 - 0{,}00972T)$ — корректирующий множитель высшего порядка, учитывающий значения p и T;

$1 + x = 1 + 0{,}54(\varphi_{CO_2} - 0{,}00045)$ — корректирующий множитель, учитывающий отклонения объемной доли углекислого газа в воздухе φ_{CO_2} от $450 \cdot 10^{-6}$.

Оба последних корректирующих множителя могут быть приравнены единице, если приемлемый уровень неопределенности измерений U_λ/λ_m при длине волны λ_m превышает 10^{-6}.

3 Показатель преломления n_{air} изменяется примерно на $1 \cdot 10^{-7}$ при следующих изменениях окружающих условий: $\Delta T = 0{,}1$ °C; $\Delta p = 30$ Па; $\Delta\varphi_{CO_2} = 600 \cdot 10^{-6}$; парциальное давление водяного пара $\Delta f = 250$ Па.

4 Приведенные выше формулы применимы к нормальному составу атмосферы. Наличие в замкнутом объеме аппаратуры или лаборатории паров масел или растворов приводит к изменению показателя преломления на $1 \cdot 10^{-7}$ и более. В частности, в ближней ИК области спектра наличие линий поглощения водяного пара, CO_2 или других газов может также потребовать корректировки результатов измерений.

Детальное рассмотрение процедуры измерения n содержится в приложении А.

Если приемлемый уровень неопределенности измерения λ или ν лазерного излучения $U_\lambda/\lambda_m = U_\nu/\nu_m$ меньше 10^{-7}, измерения длины волны следует выполнять в вакууме, а измерения частоты — методом гетеродинирования.

6.5 Измерения с низкой разрешающей способностью

6.5.1 Принцип измерений

Если параметры излучения измеряемого (испытываемого) лазера неизвестны, следует провести предварительные измерения λ_g и $\Delta\lambda_{gu}$, позволяющие выбрать подходящую измерительную аппаратуру. Наиболее подходящим для выполнения подобных предварительных измерений является умеренных размеров дифракционный монохроматор с фокусным расстоянием порядка 30 см. Однако выбор дополнительных оптических элементов и вспомогательных принадлежностей зависит от спектрального диапазона, в котором будут производить измерения (см. приложение В).

6.5.2 Методика измерений

Пучок лазерного излучения или его часть, отклоненная расщепителем пучка, должны быть направлены во входную апертуру измерительного прибора (например, во входную щель монохроматора). Относительное отверстие (светосила) прибора должно быть согласовано с размерами пучка с помощью подходящей оптической системы. Обычно это требует фокусировки пучка. При этом необходимо помнить о возможности разрушения входной апертуры прибора (например, краев щели монохроматора), если плотность мощности излучения превысит предел лучевой стойкости оптических элементов системы. Поэтому должна быть предусмотрена возможность и необходимость применения оптических ослабителей.

Проверку $\Delta\lambda_{ins}$ осуществляют с помощью узкополосного вспомогательного лазера, геометрия пучка которого максимально приближена к измеряемому (испытываемому), а ширина полосы и флуктуации дрейфа длины волны по крайней мере в 10 раз меньше $\Delta\lambda_{ins}$ (см. 6.5.3). Во многих случаях гелий-неоновый лазер в режиме свободной генерации при λ = 633 нм является подходящим для решения этой задачи.

Если измерительный прибор сканирует измеряемую спектральную полосу, шаг сканирования должен быть согласован с требуемой разрешающей способностью. Постоянная времени регистрирующего устройства должна быть существенно меньше временного интервала, необходимого для сканирования половины ширины спектральной линии. Например, десятикратное соотношение между указанными промежутками времени эквивалентно сдвигу на 0,1 ширины спектральной линии.

Динамический диапазон приемника излучения по интенсивности должен охватывать не менее двух декад.

6.5.3 Анализ результатов измерений

Описанная в 6.5.2 методика измерений должна обеспечить убедительные результаты определения спектрального распределения мощности $P_\lambda(\lambda)$ или энергии $Q_\lambda(\lambda)$ лазерного излучения. При необходимости следует выполнить коррекцию спектральной чувствительности измерительного прибора, приемника излучения и оптической системы.

a) После выполнения всех корректировок в диапазоне измеряемых длин волн вычисляют λ_g. При этом пределы интегрирования λ_{min} и λ_{max} обычно выбирают таким образом, чтобы вне интервала между ними спектральное распределение не превышало 1 % его максимального значения. В случае использования иных пределов интегрирования их следует указать в протоколе измерений.

Возможны случаи, когда спектральное распределение не превышает 1 % его максимального значения в очень широком диапазоне длин волн (например, при наличии узкого пика на широком слабоинтенсивном фоне). В этих случаях значительная доля суммарной мощности может оказаться вне пределов интегрирования. Кроме того, при сверхузких распределениях мощности разрешающая способность применяемого средства измерений может оказывать влияние на результат измерений максимального значения $S(\lambda)$ при длине волны λ_p, что, в свою очередь, оказывает влияние на выбор пределов интегрирования. Поэтому следует принять необходимые меры, ограничивающие влияние перечисленных факторов на результат вычисления λ_g.

b) Вычисляют $\Delta\lambda_{meas}$ (см. 3.9).

c) Результаты измерений регистрируют в протоколе измерений.

d) Проводят сравнение $\Delta\lambda_{meas}$ с $\Delta\lambda_{ins}$:

- если $\Delta\lambda_{meas}$ более чем в 10 раз превосходит $\Delta\lambda_{ins}$, дальнейшие измерения нецелесообразны и $\Delta\lambda = \Delta\lambda_{meas}$;

- если $\Delta\lambda_{meas}$ более чем в 2—10 раз превосходит $\Delta\lambda_{ins}$, в протоколе измерений должно быть приведено значение $\Delta\lambda$ — либо скорректированное по формуле $\Delta\lambda = \sqrt{(\Delta\lambda_{meas})^2 - (\Delta\lambda_{ins})^2}$, либо полученное путем выполнения процедуры обратной свертки.

6.6 Измерения с высокой разрешающей способностью

6.6.1 Предупреждение

Все измерения спектральных характеристик лазерного излучения с неопределенностью измерений $U_\lambda/\lambda = U_\nu/\nu < 10^{-5}$ следует выполнять в условиях стабилизации механических и тепловых воздействий окружающей среды.

6.6.2 Предварительные измерения

Если параметры излучения измеряемого (испытываемого) лазера неизвестны, следует провести предварительные измерения λ_g и $\Delta\lambda_H$, позволяющие выбрать подходящую измерительную аппаратуру. Этот выбор необходим для дальнейшего исследования (испытания) лазера в зависимости от следующих его свойств:

a) ожидаемые моды колебаний;

b) непрерывный или импульсный режим излучения (в последнем случае следует обратить внимание на длительность импульса τ_H);

c) измеряемые спектральные характеристики: длина волны или спектральное распределение мощности (энергии) излучения.

6.6.3 Измерения дифракционным спектрометром

В этом режиме предпочтительно использование дифракционной решетки с высокой разрешающей способностью, поскольку возможны измерения как длины волны, так и ширины спектральной полосы. В случае применения дифракционного спектрометра методика измерений аналогична описанной в 6.5.2.

6.6.4 Измерения интерферометром

Для измерений длины волны с высокой точностью предпочтительно применение интерферометра Физо (оптического клина) или группы интерферометров Физо. Надлежащие сочетания наиболее подходящих углов клиньев и баз нескольких интерферометров в многокаскадной схеме позволяют снизить погрешность измерений длины волны до 10^{-8}. Интерферометр Физо может быть использован при испытаниях (измерениях) непрерывных и импульсных лазеров.

При измерении только спектрального распределения мощности (энергии) излучения может быть использован сканирующий интерферометр Фабри-Перо или тот же интерферометр с фиксированными зеркалами (эталон). (Более подробно см. приложение С.) Однако при работе с импульсными лазерами

возникают ограничения. Длительность импульса $\tau_н$ должна быть больше произведения добротности F и времени пролета t волны между зеркалами интерферометра, описываемого формулой

$$t = 2nD/c,$$

где n — показатель преломления материала активной среды лазера;

D — расстояние между зеркалами интерферометра Фабри-Перо.

При сверхкоротких импульсах лазерного излучения предпочтителен дифракционный спектрометр.

Сканирующий интерферометр Фабри-Перо предпочтителен при измерениях спектрального распределения мощности непрерывных лазеров, а эталон Фабри-Перо — при измерениях спектрального распределения энергии импульсных лазеров. В любом случае оптическая длина пути между зеркалами nD и/или добротность резонатора F должна быть достаточно большой, чтобы разрешающая способность интерферометра $\Delta\lambda_{rms}$ была по крайней мере в 10 раз меньше ширины полосы измеряемого спектрального распределения. Полоса пропускания интерферометра Фабри-Перо $\nu_{FSR} = c/2nD$ должна превышать ширину полосы измеряемого спектрального распределения в 10 раз.

В сканирующем интерферометре поперечный размер входного пучка должен быть согласован (должен соответствовать) с входной апертурой прибора. Применительно к интерферометру Фабри-Перо это означает коллимированность пучка. Фокусирующая линза на выходе интерферометра Фабри-Перо должна собирать все лучи на входной поверхности приемника излучения. Профиль интенсивности излучения на чувствительной площадке приемника излучения, формируемый сканированием подвижного зеркала, отображает измеряемое спектральное распределение. Повторное сканирование спектрального распределения в каждом интервале полосы пропускания обеспечивает линейность частотной шкалы. Разрешающая способность прибора зависит от коэффициента отражения зеркал и степени коллимированности входного пучка.

Несканирующий (с фиксированными зеркалами) интерферометр требует коллимирования входного пучка в случае схемы Физо или расходящегося входного пучка в случае эталона Фабри-Перо. Обе схемы интерферометров пригодны для спектрального анализа излучения и измерений длин волн как непрерывных, так и импульсных лазеров. В плоскости изображений интерферометра Физо формируется интерференционная картина в виде прямых линий, а в схеме Фабри-Перо — кольцевая картина. Для регистрации интерферограммы может быть использована ПЗС-камера или ПЗС-линейка фотодиодов (центрированная в случае круговой интерферограммы). Спектральное распределение лазерного излучения оценивают путем сравнения либо с шагом интерферограммы (расстоянием между ее полосами), либо с ν_{FSR}. В интерферометре Физо это соотношение линейно, а в интерферограмме интерферометра Фабри-Перо представляет собой зависимость в виде квадратного корня из диаметров колец. Расстояние между зеркалами и размеры пикселей камеры должны быть согласованы с требуемой разрешающей способностью.

При измерениях длин волн любым из двух типов интерферометров проводят сравнение интерферограмм, сформированных излучениями испытываемого (измеряемого) и опорного (референтного) лазеров.

Для измерений максимальной (пиковой) длины волны λ_p наиболее подходящим является интерферометр Майкельсона. Несмотря на то, что разрешающая способность этого интерферометра обратно пропорциональна перемещению подвижного зеркала, разрешающая способность может быть увеличена при обработке интерферограммы путем определения дробных порядков интерференции.

При измерениях длины волны коллимированный пучок измеряемого лазера и пучок излучения опорного (референтного) лазера с известной длиной волны должны быть съюстированы в интерферометре таким образом, чтобы волновые фронты обоих пучков проходили по двум плечам прибора и интерферировали на выходе. Измерения длины волны проводят путем счета интерференционных полос при одновременном наблюдении в процессе перемещения зеркала интерференционных картин, формируемых обоими лазерными пучками. При этом

$$\lambda_т = \lambda_г \frac{N_г}{N_т},$$

где $\lambda_т$, $\lambda_г$ — длины волн испытываемого (измеряемого) и опорного (референтного) лазеров соответственно;

N_t, N_r — числа полос в интерферограммах испытываемого (измеряемого) и опорного (референтного) лазеров соответственно.

Разрешающая способность увеличивается по мере возрастания числа полос, т. е. при перемещении зеркала.

Для получения спектрального распределения с помощью интерферометра Майкельсона необходимо зарегистрировать всю интерферограмму (интенсивность прошедшего излучения в зоне интерференции как функцию от перемещения зеркала) и затем выполнить преобразование Фурье. Особое внимание должно быть уделено выбору базы интерферометра, частоты дискретизации и коду компьютера, при этом следует изучить документацию производителя.

Все сказанное об интерферометре Майкельсона в полной мере относится к интерферометру Маха — Цендера.

При работе с интерферометрами из-за периодичности их передаточной функции необходимо также избегать влияния на результаты измерений остаточных побочных мод.

6.6.5 Измерения способом фотоэлектрического смешения

При измерениях спектральной ширины полосы лазерного излучения между видимым и средним ИК диапазонами длин волн полезен гомодинный способ с самозапаздыванием (самозадержкой). Для измерений $\Delta\lambda_t$ испытываемого (измеряемого) лазера пучок вводится в оптическое волокно, разделенное на две ветви, в результате чего формируется оптическая разность хода обеих частей введенного пучка.

В результате их смешения на выходе волокна образуются колебания с частотой биений, а спектральную полосу пропускания измеряют радиочастотным спектроанализатором. Разрешающая способность этого способа обратно пропорциональна длине отрезка оптического волокна, используемого в качестве оптической линии задержки.

В отличие от гомодинного способ гетеродинирования — наиболее подходящий для измерений спектральных характеристик как непрерывных, так и импульсных лазеров. При этом необходимо применение опорного (референтного) лазера. Следует предварительно оценить ширины полос пропускания обоих лазеров, поскольку разрешающая способность и точность измерений длины волны в данном случае зависит только от качества опорного (референтного) лазера.

Для измерений спектрального распределения излучения в области оптических частот коллимированный пучок излучения испытываемого (измеряемого) лазера смешивают для образования частоты биений с пучком опорного (референтного) лазера. Разность частот и спектральное распределение в частотной области оптического излучения определяют радиочастотным спектрометром по частоте биений. Усредненное значение частоты биений может быть также определено с помощью электронного счетчика. Длину волны излучения в вакууме определяют по формуле

$$\lambda_{vac} = \frac{c}{\nu_r \pm \delta\nu},$$

где c = 299792458 м/с — скорость света;

ν_r — частота колебаний опорного (референтного) лазера;

$\delta\nu$ — частота биений.

6.6.6 Анализ результатов измерений, выполняемых со средней точностью ($U_\lambda/\lambda = U_\nu/\nu$ в диапазоне от 10^{-5} до 10^{-4})

Вышеописанная методика измерений должна обеспечить видимое отображение спектрального распределения мощности $P_\lambda(\lambda)$ или энергии $Q_\lambda(\lambda)$ лазерного излучения, для чего необходимо:

a) Вычислить *SMS* в соответствии с 3.15.

b) Вычислить $\overline{\lambda}$ и $\Delta\lambda_{rms}$ в соответствии с 3.7 и 3.10.

c) Определить N_m в соответствии с 3.14.

d) Определить S_{mps} в соответствии с 3.13.

e) Занести полученные результаты в протокол измерений.

f) Сравнить измеренную $\Delta\lambda_{meas}$ с $\Delta\lambda_{ins}$.

При необходимости корректировки $\Delta\lambda_{ins}$ следует воспользоваться 6.5.3 d).

6.6.7 Анализ результатов измерений, выполняемых с высокой точностью ($U_\lambda/\lambda = U_\nu/\nu < 10^{-5}$)

Вышеописанная методика измерений должна обеспечить видимое отображение спектрального распределения мощности $P_\lambda(\lambda)$ или энергии $Q_\lambda(\lambda)$ лазерного излучения, для чего необходимо:

a) Вычислить *SMS* в соответствии с 3.15:

- если *SMS* < 20 дБ, следует воспользоваться методикой анализа результатов измерений средней точности;

- если *SMS* > 20 дБ, то:

b) Определить λ_p и $\Delta\lambda_c$ в соответствии 3.5 и 3.12.

c) Занести полученные результаты в протокол измерений.

d) Сравнить спектральную ширину полосы основной (преобладающей) моды с $\Delta\lambda_{ms}$.

e) При необходимости корректировки $\Delta\lambda_{ms}$ следует воспользоваться указаниями 6.5.3 d).

7 Измерения стабильности длины волны

7.1 Зависимость длины волны от рабочих условий

Стабильность длины волны в широком спектральном диапазоне является одной из важнейших характеристик лазеров разных типов. Многие лазеры демонстрируют некоторую зависимость длины волны излучения от рабочих условий окружающей среды. Частота колебаний зависит главным образом от механических воздействий и вибраций, от температуры, а в диодных лазерах и от тока инжекции.

Температурную зависимость характеризует изменение длины волны, приходящееся на изменение температуры в один градус, причем измерения выполняют в режиме отсутствия перескока мод. В диодных лазерах зависимость от тока инжекции характеризует изменение длины волны, приходящееся на единицу измерений тока инжекции, при прочих неизменных рабочих условиях. Методика измерений аналогична описанной в 6.5 и 6.6, а также определяют зависимость для разных типов лазеров от рабочих условий длин волн λ_p, λ_g и $\overline{\lambda}$.

Поскольку длина волны излучения диодного лазера зависит главным образом от температуры и прямого тока, то именно эти зависимости подлежат определению. Для лазеров других типов обычно определяют лишь температурную зависимость.

7.2 Стабильность длины волны одночастотного лазера

При нормальных стабильных условиях выполнения измерений стабильность (нестабильность) частоты излучения одночастотного лазера может быть охарактеризована дисперсией Аллана. Эту двухвыборочную дисперсию определяют по результатам временной последовательности отсчетов частоты лазерного излучения (обычно получаемой гетеродинными методами), а также измеренным с временем интегрирования (усреднения) τ (например, с интервалом дискретизации частотомера, у которого отсутствует «мертвое время» между смежными отсчетами). Дисперсию Аллана определяют по формуле $\sigma_y^2(2, \tau)$. Значения τ следует выбирать в зависимости от длительности интервала наблюдения за стабильностью (нестабильностью) лазера: средней длительности (от 1 до 100 мс) или большой длительности (> 1 с). Дисперсию Аллана $\sigma_y^2(2, \tau)$ определяют в соответствии с 3.19.

8 Протокол измерений

Протокол измерений должен содержать следующую информацию:

a) общие сведения:

1) испытания (измерения) проведены в соответствии с ИСО 13695:2004;
2) дата проведения испытаний (измерений);
3) наименование и адрес организации, проводившей испытания (измерения);
4) фамилия, имя, отчество, должность оператора, проводившего испытания (измерения).

b) сведения об испытываемом (измеряемом) лазере:

1) тип лазера;
2) производитель;
3) товарный знак производителя;
4) серийный номер.

c) условия испытаний (измерений):

1) длина волны (волн), при которой (которых) проводили испытания (измерения);
2) температура в кельвинах (только для диодных лазеров — температура охлаждающей жидкости);
3) режим излучения лазера (непрерывный или импульсный);
4) установочные и регулируемые параметры лазера:

- мощность или энергия выходного излучения;
- ток или энергия возбуждения лазера;
- энергия импульса;
- длительность импульса;
- частота следования импульсов;

5) модовая структура (если известна);

6) состояние поляризации;

7) условия (состояние) окружающей среды:

- комнатная температура;
- влажность;
- атмосферное давление.

d) сведения о методике и средствах испытаний (измерений):

1) средство измерений:

- эффективная спектральная полоса длин волн $\Delta\lambda_{rms}$;
- сходимость результатов измерений λ или точность калибровки;

2) длительность периода времени испытаний (измерений) или число импульсов для импульсного лазера;

e) результаты испытаний (измерений) и наиболее значимые параметры, характеризующие испытываемый (измеряемый) лазер данного типа:

1) информация о том, какую из трех длин волн (λ_0, λ_{air} или λ_{std}) измеряли в ходе эксперимента;

2) в случае прямых измерений λ_0 характеристика условий окружающей среды при определении с требуемой точностью показателя преломления, а при измерениях λ_{std} — сведения о стандартных условиях выполнения эксперимента;

3) графики спектральных распределений $P_\lambda(\lambda)$ или $Q_\lambda(\lambda)$ (при возможности);

4) значение максимальной (пиковой) длины волны λ_p;

5) значение центрированной длины волны $\overline{\lambda}$;

6) среднее взвешенное значение длины волны λ_g;

7) ширина спектральной линии $\Delta\lambda_L$;

8) среднеквадратическое значение спектральной полосы $\Delta\lambda_{rms}$;

9) ширина спектральной полосы (момент второго порядка) $\Delta\lambda$;

10) коэффициент подавления побочной моды *SMS*;

11) температурная зависимость длины волны $\delta\lambda_T$;

12) зависимость длины волны от тока возбуждения генерации $\delta\lambda_c$ (при необходимости);

13) мощность/энергия импульса излучения P, Q (при необходимости);

14) дисперсия Аллана (двухвыборочная дисперсия) $\sigma_y^2(2, \tau)$;

f) прочие сведения (по выбору оператора).

Приложение А
(справочное)

Показатель преломления воздуха

А.1 Определение парциального давления водяного пара

Соотношение относительной влажности и температур точек росы с давлением (упругостью) водяного пара $p_{вп}$, Па, описывает следующее уравнение (см. [4]):

$$p_{вп} = F_p \exp(AT^2 + BT + C + DT^{-1}),$$

где F_p — коэффициент преобразования сигнала к давлению 1 Па (F_p = 1 Па);

$A = 1{,}2378847 \cdot 10^{-5}$ K^{-2};

$B = -1{,}9121316 \cdot 10^{-2}$ K^{-1};

$C = 33{,}93711047$;

$D = -6{,}3431645 \cdot 10^{3}$ K;

T — абсолютная температура, K.

Пример — Для водяного пара при 20 °С, общем (суммарном) атмосферном давлении p = 101325 Па и относительной влажности 50 % парциальное давление водяного пара f = $p_{вп}$(20 °С)50 % = 1169,25 Па.

А.2 Высокоточное вычисление показателя преломления в широком диапазоне длин волн и изменений атмосферных условий

При рутинных измерениях показателя преломления и обработке результатов с использованием программируемого компьютера следует выполнять вычисления в соответствии с приводимыми в [5] уравнениями. Они выведены для всего видимого и ближнего ИК диапазонов длин волн в очень широком диапазоне атмосферных условий: относительной влажности от 0 % до 100 % и при отрицательных температурах. Нормальными при этом считают условия, идентичные приведенным в данном стандарте.

А.3 Альтернативные нормальные условия испытаний (измерений)

Исторически нормальные условия были выбраны такими, как указано в 6.4. Однако в современных лабораториях выдерживают температуру 20 °С. Поэтому данное ее значение принято стандартизованным в качестве референтного (опорного) при измерениях длины волны. Это же значение принято в уравнениях при вычислениях показателя преломления как функции температуры, давления, влажности и концентрации CO_2 (см. [4]). Эти уравнения обеспечивают высокую точность вычислений в видимом диапазоне длин волн и облегчают коррекцию результатов измерений и вычислений при незначительных отступлениях от нормальных условий, например в лабораториях с надежно контролируемыми параметрами воздуха и стабилизацией температуры 20 °С.

Приложение В
(справочное)

Критерий выбора дифракционного монохроматора и его принадлежностей — калибровка

В.1 Введение

В.1.1 Общие сведения

Возможности дифракционного монохроматора непосредственно связаны с его дифракционными параметрами, размерами дифракционной решетки. А соотношения размеров дифракционной решетки с размерами прибора в целом также зависят от спектрального диапазона, в пределах которого выполняют измерения.

В стандарте рассмотрены монохроматоры с отражательными дифракционными решетками.

Для дифракционной решетки справедлива формула

$$\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2 = kN\lambda,$$

где k — порядок дифракции;

N — число штрихов решетки на единицу длины;

λ — длина волны в тех же единицах длины, которые приведены для N.

В большинстве случаев угол падения α_1 весьма близок к углу α_2 отклонения при дифракции, т. е. $\alpha_2 \approx \alpha_1 = \alpha$. Поэтому

$$2\sin \alpha = kN\lambda.$$

В.1.2 Теоретическая разрешающая способность

Теоретическая разрешающая способность для k-го порядка дифракции

$$R_{tk} = kL_e,$$

где L_e — эффективно используемый размер (ортогональный штрихам).

В.1.3 Практическая разрешающая способность

Практическая разрешающая способность зависит не только от параметров дифракционной решетки, но также и от механических и оптических характеристик монохроматора в целом, равно как и от спектрального диапазона. Уменьшение разрешающей способности по сравнению с ее теоретическим пределом оценивает коэффициент (показатель) качества F_q

$$F_q = F_{q1}F_{q2},$$

в результате чего для k-го порядка дифракции разрешающая способность

$$R_{pk} = F_{q1}F_{q2}kRT_1.$$

Влияние оптических аберраций зависит от светосилы монохроматора L_f/L_e, где L_f — фокусное расстояние линзы-коллиматора. Соответствующие типичные значения коэффициента (показателя) качества F_{q1}:

$F_{q1} = 1$ при $L_f/L_e > 10$;

$F_{q1} = 0{,}7$ при $4 < L_f/L_e < 10$;

$F_{q1} = 0{,}5$ при $L_f/L_e < 4$.

Влияние дефектов поверхностей оптических элементов зависит от спектрального диапазона. Соответствующие типичные значения коэффициента (показателя) качества F_{q2}:

$F_{q2} = 0{,}9$ при $\lambda > 0{,}7$ мкм,

$F_{q2} = 0{,}5$ при 0,4 мкм $< \lambda < 0{,}7$ мкм;

$F_{q2} = 0{,}33$ при $\lambda < 0{,}4$ мкм.

Приведенные выражения для разрешающей способности справедливы при условии, что ширины входной и выходной щелей (или размер пикселя в случае использования ПЗС-матрицы) столь малы, что соответствуют дифракционному пределу $(\lambda L_f)/(L_e \cos \alpha)$. Это условие трудно выполнимо в коротковолновой спектральной области. Кроме того, ПЗС-матрицу часто стараются применять с предваряющей ее, увеличивающей размеры монохроматического изображения оптической системой. Эти эффекты учитывает коэффициент (показатель) качества F_{q2}.

В.1.4 Монохроматор с голографической дифракционной решеткой

Светоотдача голографических решеток в первом порядке дифракции $k = 1$ примерно постоянна (составляет от 30 % до 50 %). Поэтому спектральный диапазон монохроматора с голографической дифракционной решеткой ограничен лишь ее предельно допустимыми углами поворота α_{min} и α_{max}. Соответственно

$$\lambda_{min} < \lambda < \lambda_{max},$$

где $N\lambda_{min} = 2\sin \alpha_{min}$ и $N\lambda_{max} = 2\sin \alpha_{max}$.

В.1.5 Монохроматор с дифракционной решеткой скользящего падения

Угол скользящего падения штриховых дифракционных решеток зависит от наклона штрихового рисунка относительно поверхности подложки. Этот угол α_B соответствует углу падения, обеспечивающему максимальную эффективность дифракции излучения в первый порядок. Его ассоциируют с длиной волны скользящего падения λ_B, при которой эффективность максимальна для нормально работающего монохроматора:

$$2\sin \alpha_B = N\lambda_B.$$

Производители указывают некоторые пределы изменения эффективности дифракции в зависимости от длины волны. Например:

$$S = 0{,}5 \text{ для } \lambda = 2/3\lambda_B \text{ и } \lambda = 3/2\lambda_B.$$

$$S = 0{,}9 \text{ для } \lambda = \lambda_B.$$

Более того, решетка скользящего падения может быть использована для дифракции излучения в высшие порядки. Зависимость эффективности от угла неизменна, поэтому оптимальную эффективность всегда достигают при λ_B/k.

Практическая разрешающая способность монохроматора этого типа

$$R_{pk} = kF_qRT_1 = kF_qNL_e.$$

Практически достигаемые пределы спектрального диапазона прибора также существуют для штриховых монохроматоров, но они зависят от порядка дифракции:

$$kN\lambda_{max} = 2\sin \alpha_{max} \text{ и } kN\lambda_{min} = 2\sin \alpha_{min}.$$

В.2 Выбор монохроматора

При выборе монохроматора следует определить:

- требуемую точность определения длин волн;
- разрешающую способность, необходимую для определения ширины спектральной полосы.

При оценке неопределенности полученных значений длин волн необходимо учитывать абсолютную погрешность показаний счетчика или дисплея, а также неопределенность позиционирования. Последняя обычно составляет 1/6 эффективной ширины полосы $\Delta\lambda_{a*}$ получаемой из выражения для практической разрешающей способности (см. В.1.3). Абсолютная погрешность отсчетов зависит от качества конструкции монохроматора (его механической прочности), и ее определяют (корректируют) при калибровке (см. В.3).

В.3 Калибровка монохроматора

Калибровка является обобщающей частью методики измерений. Ее результаты должны быть внесены в протокол измерений.

В соответствии с инструкцией по эксплуатации монохроматора следует производить его периодическую калибровку. При этом определяют значения $\Delta\lambda_a$ (или коэффициента (показателя) качества F_q) и погрешность отсчета.

Приложение С
(справочное)

Критерий выбора интерферометра Фабри-Перо

Интерферометр Фабри-Перо позволяет измерять спектральное распределение излучения непрерывных и импульсных лазеров. Как сканирующий интерферометр Фабри-Перо, так и эталон Фабри-Перо (интерферометр с фиксированными зеркалами) обеспечивают измерения лазерного излучения относительно высокой спектральной чистоты, а сканирующий интерферометр Фабри-Перо — особенно высокой спектральной чистоты.

Основной характеристикой интерферометра Фабри-Перо является его полоса пропускания σ_{FSR} в обратных сантиметрах

$$\sigma_{FSR} = 1/(2nD),$$

где n — показатель преломления активной среды;

D — расстояние, см, между зеркалами.

Интерферометр Фабри-Перо измеряет спектральные характеристики излучения в пространстве волновых чисел $\sigma = 1/\lambda$. Преобразование в пространство длин волн может быть выполнено по формуле

$$P_\sigma(\sigma) = \lambda^2 P_\lambda(\lambda) \text{ или } Q_\sigma(\sigma) = \lambda^2 Q_\lambda(\lambda),$$

причем в большинстве случаев $\Delta\lambda = \lambda^2\Delta\sigma$.

Другой характеристикой интерферометра Фабри-Перо служит качество (добротность) F, связанное с коэффициентом отражения зеркал выражением

$$F = \pi\frac{\sqrt{R}}{1-R}.$$

Естественная ширина резонансной кривой резонатора интерферометра Фабри-Перо $\delta\sigma = (\sigma_{FSR})/F$, а разрешающая способность интерферометра

$$\frac{\sigma}{\delta\sigma} = \frac{2nD\cdot\pi\cdot\sqrt{R}}{\lambda(1-R)}.$$

Значения σ_{FSR} и добротности должны быть выбраны такими, чтобы обеспечить адекватный анализ (представление) спектрального распределения, т. е. чтобы ожидаемая ширина полосы в пространстве волновых чисел $\Delta\sigma$ удовлетворяла условиям:

$$\sigma_{FSR} > 3\Delta\sigma \text{ и } \Delta\sigma > 10(\sigma_{FSR})/F.$$

Выполнение этих условий предъявляет высокие требования к качеству (добротности) интерферометра Фабри-Перо.

Сканирование резонансной кривой полости оптического резонатора интерферометра Фабри-Перо осуществляют путем постепенного заполнения его объема сухим воздухом или нейтральным газом (сканирование показателя преломления n) либо разверткой относительного расстояния D между зеркалами (например, пьезоэлектрическим преобразователем либо путем углового качания одного из зеркал).

Приложение DA
(справочное)

Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов национальным стандартам Российской Федерации

Таблица DA.1

Обозначение ссылочного международного стандарта	Степень соответствия	Обозначение и наименование соответствующего национального стандарта
ИСО 11145	—	*
ИСО 12005	—	*
МЭК 60747-5-1	—	*
Руководство по выражению неопределенности измерений (РНИ). МБМВ, МЭК, МФКХ, ИСО, МСТПХ, МСТПФ, МОЗМ, 1993 г. Исправлено и переиздано в 1995 г.	IDT	РМГ 43—2001 Государственная система обеспечения единства измерений. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений»
Международный словарь основных и общих терминов в метрологии (МСМ). МБМВ, МЭК, МФКХ, ИСО, МСТПХ, МСТПФ, МОЗМ. Женева: ИСО	—	*

* Соответствующий национальный стандарт отсутствует. До его утверждения рекомендуется использовать перевод на русский язык данного международного стандарта. Перевод данного международного стандарта находится в Федеральном информационном фонде технических регламентов и стандартов.

Примечание — В настоящей таблице использовано следующее условное обозначение степени соответствия: IDT — идентичный стандарт.

Библиография

[1] Barnes J.A., et al.	Characterization of frequency stability. IEEE transaction of instrumentation and measurement, IM-20 (2), March 1971
[2] Quinn T.J.	International Report: Practical realization of the definition of the meter (1997). Metrologia, 1999, 36, pp. 211—244
[3] Birch and Downs	Metrologia, 1994, 31, pp. 315—316
[4] Bönsch and Potulski	Metrologia, 1998, 35, pp. 133—139
[5] Ciddor	Appl. Optics, 1996, 35 (9), pp. 1566—1573

УДК 537.872:006.354 ОКС 31.260, 37.020 Т35

Ключевые слова: оптика, фотоника, лазер, лазерные установки, спектр, спектральные характеристики, длина волны, лазерное излучение, оптическая частота, ширина полосы, ширина линии, монохроматор, интерферометр, методика измерений

Редактор *И.В. Алферова*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *В.Е. Нестерова*
Компьютерная верстка *В.И. Грищенко*

Сдано в набор 25.05.2011. Подписано в печать 25.07.2011. Формат 60x84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура Ариал. Печать офсетная. Усл. печ. л. 3,26. Уч.-изд. л. 2,70. Тираж 99 экз. Зак. 664.

ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 123995 Москва, Гранатный пер., 4.
www.gostinfo.ru gost.e-ecolog.ru
Набрано во ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» на ПЭВМ.
Отпечатано в филиале ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» — тип. «Московский печатник», 105062 Москва, Лялин пер., 6.

gost.e-ecolog.ru