INSO
17127
1st Edition
2018
Identical with
ISO 13695:
2004

جمهوری اسلامی ایران
Islamic Republic of Iran
سازمان ملی استاندارد ایران
Iranian National Standardization Organization

استاندارد ملی ایران
۱۷۱۲۷
چاپ اول
۱۳۹۷

اپتیک و فوتونیک- لیزر و تجهیزات مرتبط با لیزر- روش‌های آزمون برای مشخصه‌های طیفی لیزر

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

ICS: 31.260; 37.020

استاندارد ملی ایران شمارهٔ ۱۷۱۲۷(چاپ اول): سال ۱۳۹۷

سازمان ملی استاندارد ایران

تهران،ضلع جنوب‌غربی میدان ونک،خیابان ولیعصر، پلاک ۲۵۹۲

صندوق‌پستی: ۶۱۳۹-۱۴۱۵۵ تهران- ایران

تلفن:۵-۸۸۸۷۹۴۶۱

دورنگار: ۸۸۸۸۷۰۸۰ و۸۸۸۸۷۱۰۳

کرج، شهر صنعتی، میدان استاندارد

صندوق پستی: ۱۶۳-۳۱۵۸۵ کرج - ایران

تلفن: ۸-۳۲۸۰۶۰۳۱(۰۲۶)

دورنگار: ۳۲۸۰۸۱۱۴(۰۲۶)

رایانامه: standard@isiri.gov.ir

وبگاه: http://www.isiri.gov.ir

Iranian National Standardization Organization (INSO)

No.2592 Valiasr Ave., South western corner of Vanak Sq., Tehran, Iran

P. O. Box: 14155-6139, Tehran, Iran

Tel: + 98 (21) 88879461-5

Fax: + 98 (21) 88887080, 88887103

Standard Square, Karaj, Iran

P.O. Box: 31585-163, Karaj, Iran

Tel: + 98 (26) 32806031-8

Fax: + 98 (26) 32808114

Email: standard@isiri.gov.ir

Website:http://www.isiri.gov.ir

به نام خدا

آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران

سازمان ملی استاندارد ایران به موجب بند یک مادهٔ ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسهٔ استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱ تنها مرجع رسمی کشور است که وظیفهٔ تعیین، تدوین ونشر استانداردهای ملی (رسمی) ایران را به عهده دارد.

تدوین استاندارد در حوزه‌های مختلف در کمیسیون‌های فنی مرکب از کارشناسان سازمان، صاحب‌نظران مراکز و مؤسسات علمی، پژوهشی، تولیدی و اقتصادی آگاه و مرتبط انجام می‌شود و کوششی همگام با مصالح ملی و با توجه به شرایط تولیدی، فناوری و تجاری است که از مشارکت آگاهانه و منصفانهٔ صاحبان حق و نفع، شامل تولیدکنندگان، مصرف‌کنندگان، صادرکنندگان و واردکنندگان، مراکز علمی و تخصصی، نهادها، سازمان‌های دولتی و غیردولتی حاصل می‌شود. پیش‌نویس استانداردهای ملی ایران برای نظرخواهی به مراجع ذی‌نفع و اعضای کمیسیون‌های مربوط ارسال می‌شود و پس از دریافت نظرها و پیشنهادها در کمیتهٔملی مرتبط با آن رشته طرح و در صورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی (رسمی) ایران چاپ و منتشر می‌شود.

پیش‌نویس استانداردهایی که مؤسسات و سازمان‌های علاقه‌مند و ذی‌صلاح نیز با رعایت ضوابط تعیین شده تهیه می‌کنند درکمیته ملی طرح، بررسی و درصورت تصویب، به عنوان استانداردملی ایران چاپ و منتشر می‌شود. بدین ترتیب، استانداردهایی ملی تلقی می‌شود که بر اساس مقررات استاندارد ملی ایران شمارهٔ ۵ تدوین و در کمیتهٔملی استاندارد مربوط که در سازمان ملی استاندارد ایران تشکیل می‌شود به تصویب رسیده باشد.

سازمان ملی استاندارد ایران از اعضای اصلی سازمان بین‌المللی استاندارد(ISO)[1]،کمیسیون بین‌المللی الکتروتکنیک (IEC)[2] و سازمان بین‌المللی اندازه‌شناسی قانونی(OIML)[3] است و به عنوان تنها رابط[4] کمیسیون کدکس غذایی(CAC)[5] در کشور فعالیت می‌کند. در تدوین استانداردهای ملی ایران ضمن توجه به شرایط کلی و نیازمندی‌های خاص کشور، از آخرین پیشرفت‌های علمی، فنی و صنعتی جهان و استانداردهای بین‌المللی بهره‌گیری می‌شود.

سازمان ملی استاندارد ایران می‌تواند با رعایت موازین پیش‌بینی شده در قانون، برای حمایت از مصرف‌کنندگان، حفظ سلامت و ایمنی فردی و عمومی، حصول اطمینان از کیفیت محصولات و ملاحظات زیست‌محیطی و اقتصادی، اجرای بعضی از استانداردهای ملی ایران را برای محصولات تولیدی داخل کشور و/یا اقلام وارداتی، با تصویب شورای عالی استاندارد، اجباری کند. سازمان می‌تواند به منظور حفظ بازارهای بین‌المللی برای محصولات کشور، اجرای استاندارد کالاهای صادراتی و درجه‌بندی آن را اجباری کند. همچنین برای اطمینان بخشیدن به استفاده‌کنندگان از خدمات سازمان‌ها و مؤسسات فعال در زمینهٔ مشاوره، آموزش، بازرسی، ممیزی و صدورگواهی سیستم‌های مدیریت کیفیت و مدیریت زیست‌محیطی، آزمایشگاه‌ها و مراکز واسنجی (کالیبراسیون) وسایل سنجش، سازمان ملی استاندارد این‌گونه سازمان‌ها و مؤسسات را بر اساس ضوابط نظام تأیید صلاحیت ایران ارزیابی می‌کند و در صورت احراز شرایط لازم، گواهینامهٔ تأیید صلاحیت به آن‌ها اعطا و بر عملکرد آن‌ها نظارت میکند. ترویج دستگاه بین المللی یکاها، واسنجی وسایل سنجش، تعیین عیار فلزات گرانبها و انجام تحقیقات کاربردی برای ارتقای سطح استانداردهای ملی ایران از دیگر وظایف این سازمان است.

1- International Organization for Standardization
2- International Electrotechnical Commission
3- International Organization for Legal Metrology (Organisation Internationale de Metrologie Legals)
4- Contact point
5- Codex Alimentarius Commission

کمیسیون فنی تدوین استاندارد

«اپتیک و فوتونیک- لیزر و تجهیزات مرتبط با لیزر- روش‌های آزمون برای مشخصه‌های طیفی لیزر»

رئیس:	**سمت و/یا محل اشتغال:**
حلاجان، مهدی (کارشناسی ارشد فیزیک)	مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران
دبیر:	
ابوالحسینی، شهریار (کارشناسی ارشد فیزیک)	سازمان انرژی اتمی ایران- پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای- پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی
اعضا: (اسامی به ترتیب حروف الفبا)	
پورحسن‌نژاد، زهرا (کارشناس ارشد فیزیک)	سازمان انرژی اتمی ایران- پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای- پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی
رجبی، زهره (کارشناسی فیزیک)	سازمان انرژی اتمی ایران- پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای- پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی
سلطانی، امیر (کارشناسی ارشد برق- قدرت)	سازمان انرژی اتمی ایران
سمیع‌پور، فرهاد (کارشناسی ارشد مهندسی شیمی)	پژوهشکده سیستم‌های پیشرفته صنعتی
سیلاخوری، کاوه (کارشناس ارشد مهندسی هسته‌ای)	سازمان انرژی اتمی ایران- پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای- پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی
عجمی، عاطفه (کارشناسی ارشد مهندسی صنایع)	آزمایشگاه اپتیک جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی شریف
عربلو، رضا (کارشناسی فیزیک)	پژوهشکده سیستم‌های پیشرفته صنعتی
قشلاقی، مریم (دکتری فیزیک)	سازمان انرژی اتمی ایران- پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای- پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی
مختاری، حسین (کارشناسی ارشد مهندسی هسته‌ای)	سازمان انرژی اتمی ایران

اعضا: (اسامی به ترتیب حروف الفبا)

ویسی، فاطمه
(کارشناسی مترجمی زبان انگلیسی)

سمت و/یا محل اشتغال:

سازمان انرژی اتمی ایران- پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای- پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی

ویراستار:

حق‌بین نظرپاک، معصومه
(دکترای مهندسی پزشکی)

دانشگاه صنعتی امیرکبیر، پژوهشکده فناوری‌های نو

فهرست مندرجات

عنوان **صفحه**

پیش‌گفتار ح
مقدمه ط
۱ هدف و دامنهٔ کاربرد ۱
۲ مراجع الزامی ۱
۳ اصطلاحات و تعاریف ۲
۴ علائم و کوته‌نوشت‌ها ۱۲
۵ قابلیت ردیابی ۱۴
۶ اندازه‌گیری طول‌موج و پهنای‌باند ۱۴
۶-۱ کلیات ۱۴
۶-۱-۱ آماده‌سازی ۱۴
۶-۱-۲ انواع رایج لیزرها ۱۴
۶-۲ انواع اندازه‌گیری‌ها ۱۵
۶-۲-۱ کلیات ۱۵
۶-۲-۲ اندازه‌گیری‌های با درستی پایین ۱۵
۶-۲-۳ اندازه‌گیری‌های با توان درستی متوسط ۱۶
۶-۲-۴ اندازه‌گیری‌های با درستی بالا ۱۶
۶-۳ انتخاب تجهیزات ۱۶
۶-۴ اندازه‌گیری در هوا ۱۷
۶-۵ اندازه‌گیری با توان تفکیک پایین ۱۹
۶-۵-۱ اصول ۱۹
۶-۵-۲ روش‌اجرایی اندازه‌گیری ۱۹
۶-۵-۳ تجزیه و تحلیل ۲۰
۶-۶ اندازه‌گیری با توان تفکیک بالاتر ۲۱
۶-۶-۱ کلیات ۲۱
۶-۶-۲ آزمون مقدماتی ۲۱
۶-۶-۳ اندازه‌گیری با طیف‌سنج توری‌دار ۲۱
۶-۶-۴ اندازه‌گیری با تداخل‌سنج ۲۱
۶-۶-۵ اندازه‌گیری با روش‌های آمیختگی فوتوالکتریک ۲۴
۶-۶-۶ تجزیه و تحلیل برای درستی متوسط $\boldsymbol{U_\lambda/\lambda = U_\nu/\nu}$، در گستره 10^{-5} تا 10^{-4} ۲۵

عنوان **صفحه**

۶-۶-۷ تجزیه و تحلیل برای درستی بالا $U_\lambda/\lambda = U_\nu/\nu < ۱۰^{-۵}$ ۲۵
۷ اندازه‌گیری پایداری طول‌موجی ۲۶
۷-۱ وابستگی طول‌موج به شرایط عملیاتی ۲۶
۷-۲ پایداری طول‌موجی لیزر تک بسامد ۲۶
۸ گزارش آزمون ۲۶
پیوست الف (آگاهی‌دهنده) ضریب شکست هوا ۲۹
پیوست ب (آگاهی‌دهنده) معیار انتخاب تک‌فام‌ساز توری‌دار و لوازم جانبی – کالیبراسیون ۳۱
پیوست پ (آگاهی‌دهنده) معیارهایی برای انتخاب تداخل‌سنج فابری-پرو ۳۵
کتاب‌نامه ۳۷

پیش‌گفتار

استاندارد «اپتیک و فوتونیک- لیزر و تجهیزات مرتبط با لیزر- روش‌های آزمون برای مشخصه‌های طیفی لیزر» که پیش‌نویس آن در کمیسیون‌های مربوط بر مبنای پذیرش استانداردهای بین‌المللی به عنوان استاندارد ملی ایران به روش اشاره شده در مورد الف، بند ۷، استاندارد ملی شمارهٔ ۵ تهیه و تدوین شده، در هفتصد و پنجاه و پنجمین اجلاسیه کمیتهٔ ملی استاندارد مهندسی پزشکی مورخ ۱۳۹۷/۱۰/۰۹ تصویب شد. اینک این استاندارد به استناد بند یک مادهٔ ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱، به عنوان استاندارد ملی ایران منتشر می‌شود.

استانداردهای ملی ایران بر اساس استاندارد ملی ایران شمارهٔ ۵ (استانداردهای ملی ایران- ساختار و شیوهٔ نگارش) تدوین می‌شوند. برای حفظ همگامی و هماهنگی با تحولات و پیشرفت‌های ملی و جهانی در زمینه صنایع، علوم وخدمات، استانداردهای ملی ایران در صورت لزوم تجدیدنظر خواهند شد و هر پیشنهادی که برای اصلاح یا تکمیل این استانداردها ارائه شود، هنگام تجدیدنظر در کمیسیون‌های مربوطه، مورد توجه قرار خواهد گرفت. بنابراین، باید همواره از آخرین تجدیدنظر استانداردهای ملی ایران استفاده کرد.

این استاندارد ملی بر مبنای پذیرش استاندارد بین‌المللی زیر به روش «معادل یکسان» تهیه و تدوین شده و شامل ترجمه تخصصی کامل متن آن به زبان فارسی می‌باشد و معادل یکسان استاندارد بین‌المللی مزبور است:

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

مقدمه

مشخصه‌های طیفی لیزر، مانند طول‌موج قله یا پهنای‌خط طیفی، برای کاربردهای بالقوه لیزر دارای اهمیت است. الزامات کاربردی ویژه در تداخل‌سنجی[1] و لیتوگرافی[2]، مثال‌هایی از این مورد هستند. این استاندارد پارامترهای کلیدی توصیف کننده مشخصه‌های طیفی لیزر را تعریف می‌کند و راهنماهایی را برای انجام اندازه‌گیری‌ها به‌منظور تعیین این پارامترها برای انواع رایج لیزر ارائه می‌کند.

با توجه به کاربرد موردنظر، سطح قابل‌قبول عدم قطعیت در اندازه‌گیری طول‌موج متفاوت خواهد بود. بنابراین، روش‌های اجرایی انتخاب تجهیز، اندازه‌گیری و ارزیابی برای سه رده درستی مشخص می‌شود. برای استانداردسازی گزارش‌دهی از نتایج اندازه‌گیری مشخصه‌های طیفی، یک گزارش نمونه نیز ارائه شده است.

1- Interferometry
2- Lithography

اپتیک و فوتونیک- لیزر و تجهیزات مرتبط با لیزر- روش‌های آزمون برای مشخصه‌های طیفی لیزر

۱ هدف و دامنهٔ کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد، ارائه روش‌هایی برای اندازه‌گیری مشخصه‌های طیفی مانند طول‌موج، پهنای‌باند، توزیع طیفی و پایداری طول‌موجی باریکه لیزر می‌باشد. این استاندارد برای هر دو باریکه‌های لیزر موج پیوسته و تپی کاربرد دارد. وابستگی مشخصه‌های طیفی لیزر به شرایط عملیاتی آن نیز ممکن است مهم باشد.

۲ مراجع الزامی

در مراجع زیر ضوابطی وجود دارد که در متن این استاندارد به صورت الزامی به آن‌ها ارجاع داده شده است. بدین ترتیب، آن ضوابط جزئی از این استاندارد محسوب می‌شوند.

درصورتی‌که به مدرکی با ذکر تاریخ انتشار ارجاع داده شده باشد، اصلاحیه‌ها و تجدیدنظرهای بعدی آن برای این استاندارد الزام‌آور نیست. در مورد مراجعی که بدون ذکر تاریخ انتشار به آن‌ها ارجاع داده شده است، همواره آخرین تجدیدنظر و اصلاحیه‌های بعدی برای این استاندارد الزام‌آور است.

2-1 ISO 11145, Optics and optical instruments — Lasers and laser-related equipment — Vocabulary and symbols

یادآوری- استاندارد ملی ایران شماره ۲۱۷۳۶: سال ۱۳۹۶، اپتیک و فوتونیک - لیزر و تجهیزات مرتبط با لیزر– واژگان و نمادها، با استفاده از استاندارد ISO 11145: 2016 تدوین شده است.

2-2 ISO 12005, Lasers and laser-related equipment — Test methods for laser beam parameters — Polarization

یادآوری- استاندارد ملی ایران شماره ۶۵۶۷: سال ۱۳۹۶، لیزر و تجهیزات مرتبط با لیزر – روش‌های آزمون پارامترهای باریکه لیزر – قطبش، با استفاده از استاندارد ISO 12005: 2003 تدوین شده است.

2-3 IEC 60747-5-1, Discrete semiconductor devices and integrated circuits — Part 5-1: Optoelectronic devices — General

یادآوری- استاندارد ملی ایران شماره ۱-۵-۴۱۲۲۵: سال ۱۳۹۱، قطعات نیمه‌هادی گسسته و مدارات مجتمع – قسمت ۵-۱: قطعات الکترونیک نوری - کلیات، با استفاده از استاندارد IEC 60747-5-1 ed 1.2: 2002 تدوین شده است.

2-4 Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM), BIPM[1]), IEC, IFCC[2]), ISO, IUPAC[1]), IUPAP[2],(OIML[3]), 1993, corrected and reprinted in 1995

1- International bureau of weights and measures (bureau international des poids et measures)
2- International federation of clinical chemistry and laboratory medicine.

2-5 International vocabulary of basic and general terms in metrology (VIM). BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP,OIML, Geneva, ISO

یادآوری- استاندارد ملی ایران شماره ۴۷۲۳: سال ۱۳۹۰، واژه‌نامه اندازه‌شناسی– مفاهیم پایه و عمومی و اصلاحات مربوط با استفاده از استاندارد ISO/IEC GUIDE 99: 2007 تدوین شده است.

۳ اصطلاحات و تعاریف

در این استاندارد علاوه بر اصطلاحات و تعاریف ذکر شده در استاندارد VIM و استانداردهای ISO 11145 و IEC 60747-5-1، اصطلاحات و تعاریف زیر نیز به‌کار می‌روند:

۳-۱

طول‌موج در خلأ

wavelength in vacuum

λ_0

طول‌موج یک موج الکترومغناطیسی تخت و نامحدود منتشر شونده در خلأ است.

یادآوری - برای موجی با بسامد f، طول‌موج در خلأ مطابق با معادله (۱) تعیین می‌شود:

$$\lambda_0 = c/f \qquad (۱)$$

که در آن c = ۲۹۹۷۹۲۴۵۸ m/s است.

۳-۲

طول‌موج در هوا

wavelength in air

λ_{air}

طول‌موج تابش منتشر شونده در هوا است که با معادله (۲) به طول‌موج در خلأ مرتبط می‌شود:

$$\lambda_{\mathrm{air}} = \lambda_0 / n_{\mathrm{air}} \qquad (۲)$$

که در آن:

n_{air} ضریب شکست هوای محیط است (به زیربند ۶-۴ مراجعه شود).

1- International union of pure and applied chemistry.
2- International union of pure and applied physics.
3- International organization of legal metrology (organization international de metrologie legale.)

یادآوری – خصوصیات ویژه جوّ محیط مانند رطوبت، فشار، دما و ترکیب، همگی می‌توانند در n_{air} مؤثر باشند. بنابراین بهتر است طول‌موج در خلأ یا در هوای استاندارد گزارش داده شود. این‌ها (طول‌موج در خلأ یا در هوای استاندارد) را می‌توان از λ_{air} و n_{air} و با استفاده از معادله داده شده در زیربند ۶-۴ محاسبه کرد.

۳-۳

طول‌موج در هوای خشک تحت شرایط استاندارد

wavelength in dry air under standard conditions

$\boldsymbol{\lambda_{\mathrm{std}}}$

طول‌موج تابش منتشر شونده در هوای خشک (رطوبت ٪ ۰) تحت شرایط استاندارد است که با معادله (۳) به طول‌موج در خلأ، λ_0، مرتبط می‌شود:

$$\lambda_{\mathrm{std}} = \lambda_0 / n_{\mathrm{std}} \qquad (۳)$$

که در آن:

n_{std} ضریب شکست هوا تحت شرایط استاندارد است (به زیربند ۶-۴ مراجعه کنید).

یادآوری – در این استاندارد، هوای تحت شرایط استاندارد مطابق با تعریف ارائه شده در زیربند ۶-۴ است. توجه داشته باشید که انواع مختلف «شرایط استاندارد» در مقالات گزارش شده است. بنابراین، بیان شرایط در گزارش آزمون ضروری است.

۴-۳

توزیع طیفی توان [انرژی] تابشی

spectral radiant power [energy] distribution

$\boldsymbol{P_\lambda(\lambda), [Q_\lambda(\lambda)]}$

نسبت توان تابشی $\mathrm{d}P(\lambda)$ [یا انرژی تابشی $\mathrm{d}Q(\lambda)$ برای لیزر تپی] انتقال یافته توسط باریکه لیزر در گستره طول‌موجی $d\lambda$ به آن گستره است:

$$P_\lambda(\lambda) = \frac{\mathrm{d}P(\lambda)}{\mathrm{d}\lambda} \qquad \left[Q_\lambda(\lambda) = \frac{\mathrm{d}Q(\lambda)}{\mathrm{d}\lambda}\right] \qquad (۴)$$

یادآوری – آنگاه، توان (انرژی) تابشی آزاد شده توسط باریکه لیزر در هر پهنای‌باند λ_{low} تا λ_{high} مطابق با معادله انتگرالی (۵) تعیین می‌شود:

$$P = \int_{\lambda_{\mathrm{low}}}^{\lambda_{\mathrm{high}}} P_\lambda(\lambda)\,\mathrm{d}\lambda \qquad \left[Q = \int_{\lambda_{\mathrm{low}}}^{\lambda_{\mathrm{high}}} Q_\lambda(\lambda)\,\mathrm{d}\lambda\right] \qquad (۵)$$

۵-۳

طول‌موج قله گسیل

peak-emission wavelength

λ_{p}

طول‌موجی است که در آن توزیع طیفی توان (انرژی) تابشی، بیشینه مقدار خود را دارد.

به شکل ۱ مراجعه کنید.

۶-۳

طول‌موج میانگین وزنی (گشتاور اول)

weighted average wavelength (first moment)

λ_{g}

طول‌موجی است که گرانیگاه توزیع طیفی توان (انرژی) تابشی را نشان می‌دهد و مطابق با معادله (۶) تعریف می‌شود:

$$\lambda_{\mathrm{g}} = \frac{\int_{\lambda_{\mathrm{min}}}^{\lambda_{\mathrm{max}}} \lambda\ S(\lambda)\,\mathrm{d}\lambda}{\int_{\lambda_{\mathrm{min}}}^{\lambda_{\mathrm{max}}} S(\lambda)\,\mathrm{d}\lambda} \qquad (۶)$$

که در آن $S(\lambda)$ برای لیزر موج پیوسته، توان تابشی طیفی $P_\lambda(\lambda)$ یا برای لیزر تپی، توزیع طیفی انرژی تابشی $Q_\lambda(\lambda)$ می‌باشد.

به شکل ۱ مراجعه کنید.

یادآوری – برای انتخاب حدود انتگرال‌گیری λ_{min} و λ_{max} به زیربند ۶-۲-۲ مراجعه شود.

۷-۳

طول‌موج مرکزی

central wavelength

$\bar{\lambda}$

میانگین وزنی طول‌موج‌های خطوط طیفی یا مُدها است که مطابق با معادله (۷) تعریف می‌شود:

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum_{i=i_{\mathrm{min}}}^{i=i_{\mathrm{max}}} I_i \lambda_i}{\sum_{i=i_{\mathrm{min}}}^{i=i_{\mathrm{max}}} I_i} \qquad (۷)$$

که در آن:

λ_i طول‌موج خط طیفی i ام یا مُد i ام است؛

I_i توان تابشی نسبی خط طیفی i ام یا مُد i ام است؛

$i_{\min}$ و $i_{\max}$ حدود نهایی را برای خطوط طیفی یا مُدهای پایین و بالای λ_p مشخص می‌کند.

یادآوری ۱- معمولاً، حدود مجموع‌یابی طوری انتخاب می‌شود که توان تابشی نسبی خطوط طیفی یا مُدهای خارج از این حدود کمتر از ٪ ۱ توان تابشی نسبی قوی‌ترین خط یا مُد، در طول‌موج λ_p، باشد.

یادآوری ۲ - این تعریف به‌ویژه برای لیزر چند مُدی مفید است.

۸-۳

طول‌موج میانگین

average wavelength

λ_{av}

نسبت سرعت نور c به بسامد گسیل اپتیکی میانگین f_{av} می‌باشد:

$$\lambda_{\mathrm{av}} = c/f_{\mathrm{av}} \qquad (۸)$$

یادآوری - بسامد گسیل اپتیکی میانگین، f_{av}، را می‌توان مستقیماً اندازه‌گیری کرد، مثلاً از طریق اندازه‌گیری به روش هترودین[1] (به زیربند ۶-۶-۵ مراجعه شود).

۹-۳

ریشه میانگین مربعی[2] پهنای‌باند تابشی طیفی (گشتاور دوم)

RMS spectral radiation bandwidth (second moment)

$\Delta\lambda$

گشتاور دوم توزیع طیفی توان (انرژی) تابشی مطابق با معادله (۹) تعریف می‌شود:

$$\Delta\lambda = \sqrt{\frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} (\lambda-\lambda_{\mathrm{g}})^2\, S(\lambda)\, \mathrm{d}\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S(\lambda)\, \mathrm{d}\lambda}} \qquad (۹)$$

که در آن $S(\lambda)$ برای لیزر موج پیوسته، توان تابشی طیفی $P_\lambda(\lambda)$ یا برای لیزر تپی، توزیع طیفی انرژی تابشی $Q_\lambda(\lambda)$ می‌باشد.

یادآوری - برای انتخاب حدود انتگرال‌گیری $\lambda_{\min}$ و $\lambda_{\max}$، به زیربند ۶-۲-۲ مراجعه شود.

1- Heterodyne
2- Root mean square (RMS)

۱۰-۳

ریشه میانگین مربعی پهنای‌باند طیفی

RMS spectral bandwidth

$\Delta\lambda_{\mathrm{rms}}$

ریشه میانگین مربعی پهنای‌باند مطابق با معادله (۱۰) تعریف می‌شود:

$$\Delta\lambda_{\mathrm{rms}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=i_{\min}}^{i=i_{\max}} I_i(\lambda_i-\bar{\lambda})^2}{\sum_{i=i_{\min}}^{i=i_{\max}} I_i}} \qquad (۱۰)$$

که در آن:

λ_i طول‌موج خط طیفی i ام یا مُد i ام است؛

I_i توان تابشی نسبی خط طیفی i ام یا مُد i ام است؛

$\bar{\lambda}$ طول‌موج مرکزی است؛

$i_{\max}$ و $i_{\min}$ حدود نهایی را برای خطوط طیفی یا مُدهای پایین و بالای λ_p نشان می‌دهند.

به شکل ۱ مراجعه شود.

یادآوری ۱- معمولاً، حدود مجموع‌یابی طوری انتخاب می‌شود که توان تابشی نسبی خطوط طیفی یا مُدهای خارج از این حدود کمتر از ٪ ۱ توان تابشی نسبی قوی‌ترین خط یا مُد، در طول‌موج λ_p، باشد.

یادآوری ۲ - این تعریف به‌ویژه برای لیزر چند مُدی مفید است.

۱۱-۳

پهنای‌باند طیفی

spectral bandwidth

FWHM[1]

$\Delta\lambda_{\mathrm{H}}$

بیشترین اختلاف بین طول‌موج‌هایی است که برای آن‌ها توزیع طیفی توان (انرژی) تابشی، نصف مقدار قله آن باشد.

به شکل ۱ مراجعه شود.

1- Full-Width Half-Maximum

پهنای کامل در نیم ارتفاع

یادآوری - اقتباس شده از استاندارد ISO 11145.

۱۲-۳

پهنای‌خط طیفی

spectral linewidth

FWHM

$\Delta\lambda_L$

بیشترین اختلاف بین طول‌موج‌هایی در محدوده $\delta\lambda$ است که برای آن‌ها توزیع طیفی توان (انرژی) تابشی، نصف مقدار قله آن در محدوده $\delta\lambda$ باشد.

به شکل ۱ مراجعه شود.

با پهنای‌باند طیفی (مطابق با زیرینویس ۱۱-۳)، $\Delta\lambda_H$، مقایسه شود.

یادآوری - پهنای‌خط طیفی مشابه با پهنای‌باند طیفی (مطابق با زیرینویس ۱۱-۳) است اما برای یک مُدِ تک (طولی) یا در غیر این‌صورت مُدِ به‌وضوح قابل‌تشخیص و دارای برچسب شامل ویژگی‌های طیفی در بازه $\boldsymbol{\delta\lambda}$ تعریف می‌شود.

۱۳-۳

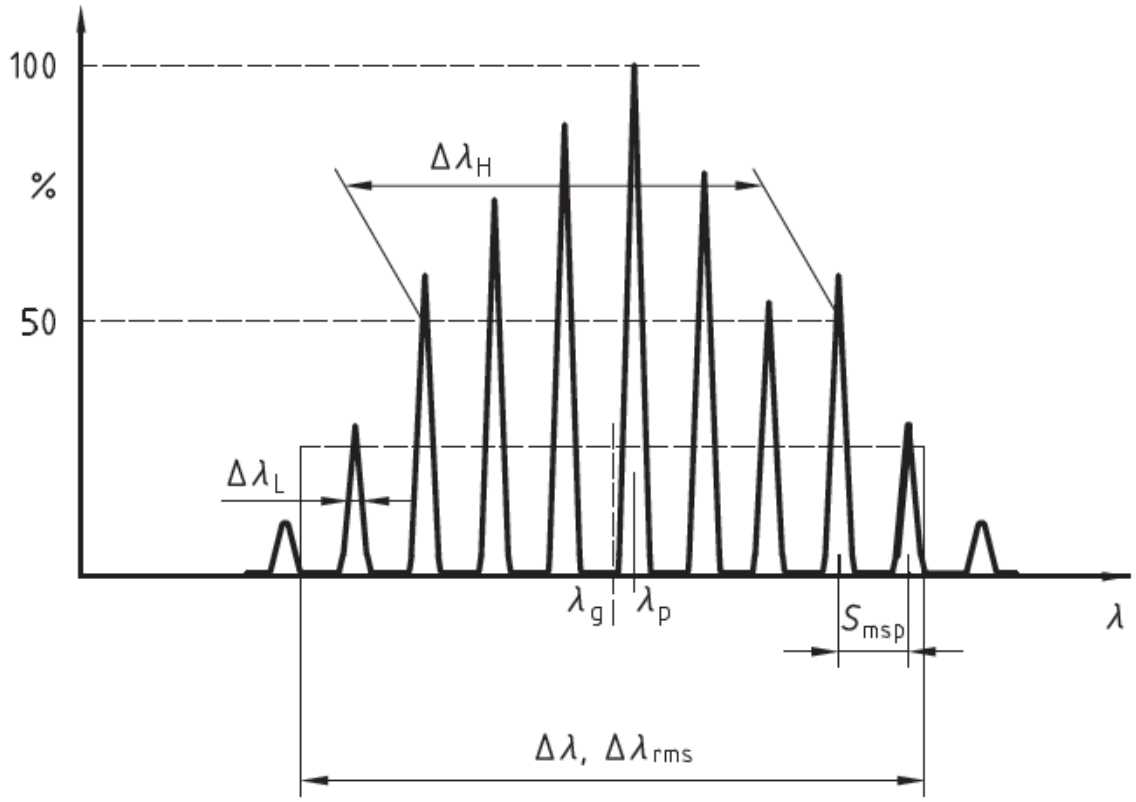
فاصله مُدی

mode spacing

F_{msp} [S_{msp}]

جدایی دو مُد طولی مجاور بیان شده برحسب بسامد (F_{msp}) [طول‌موج (S_{msp})] است.

به شکل ۱ مراجعه شود.



راهنما:

λ طول‌موج

شکل ۱ - مشخصه‌های طیفی لیزر- نمایشی از پارامترهای تعریف‌شده

۱۴-۳

تعداد مُدهای طولی

number of longitudinal modes

N_m

تعداد مُدهای طولی در یک پهنای‌باند مشخص است، که این پهنا معمولاً ریشه میانگین مربعی پهنای باند طیفی، $\Delta\lambda_{rms}$، می‌باشد.

۱۵-۳

نسبت فرونشانی مُد جانبی

side-mode suppression ratio

SMS

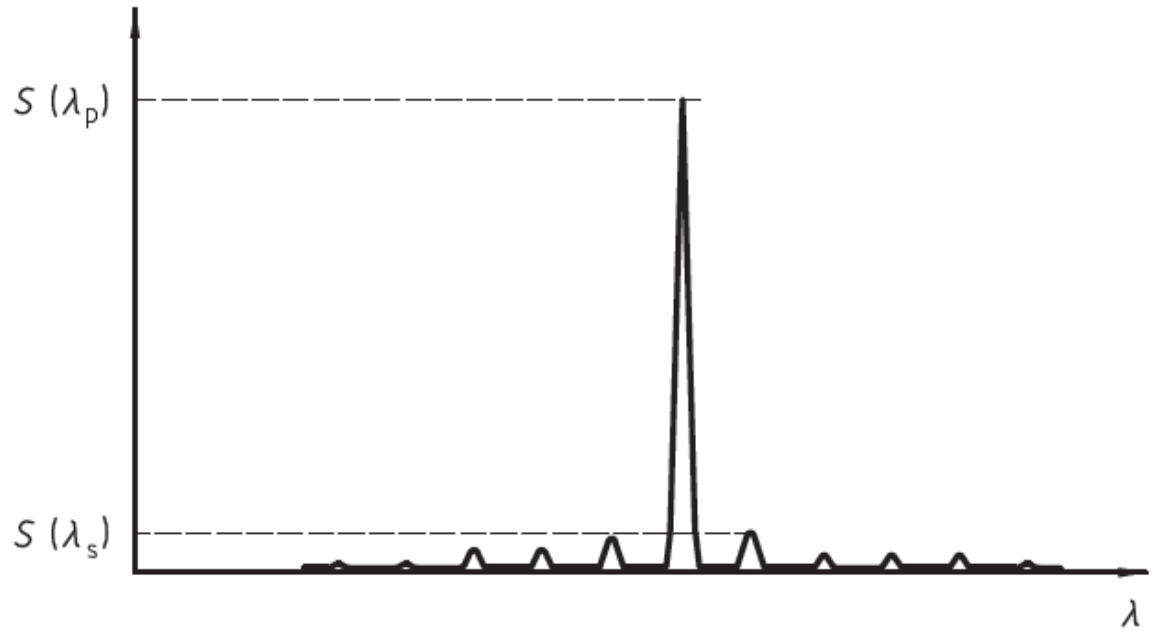
نسبت توان تابشی نسبی شدیدترین مُد، I_p، واقع در طول‌موج λ_p، به توان تابشی نسبی دومین مُد شدید، I_s، واقع در طول‌موج λ_s است که مطابق با معادله (۱۱) به دست می‌آید:

$$SMS = 10 \log\left(\frac{I_p}{I_s}\right) \quad (۱۱)$$

به شکل ۲ مراجعه شود.

یادآوری – در عمل، SMS می‌تواند برابر با نسبت مقادیر قله‌ای توزیع طیفی شدیدترین مُد به دومین مُد شدید در نظر گرفته شود:

$$SMS = 10 \log\left[\frac{s(\lambda_P)}{s(\lambda_S)}\right] \quad (۱۲)$$



راهنما:

λ طول‌موج

شکل ۲ – نسبت فرونشانی مُد جانبی

۱۶-۳

آهنگ تکرار تپ

pulse repetition rate

f_p

تعداد تپ‌های لیزری بر ثانیه برای یک لیزر تپی تکرارشونده می باشد.

۱۷-۳

وابستگی دمایی طول‌موج

temperature dependence of wavelength

$\delta\lambda_T$

جابه‌جایی طول‌موج به ازای هر تغییر در دمای T لیزر است که مطابق با معادله (۱۳) به دست می‌آید:

$$\delta\lambda_{\mathrm{T}} = \frac{\mathrm{d}\lambda}{\mathrm{d}T} \qquad (۱۳)$$

۱۸-۳

وابستگی جریانی طول‌موج

current dependence of wavelength

$\delta\lambda_{\mathrm{c}}$

جابه‌جایی طول‌موج به ازای هر تغییر در جریان I لیزر است که مطابق با معادله (۱۴) به دست می‌آید:

$$\delta\lambda_{\mathrm{c}} = \frac{\mathrm{d}\lambda}{\mathrm{dI}} \qquad (۱۴)$$

۱۹-۳

واریانس آلِن برای لیزر موج‌پیوسته

Allan variance for a cw laser

$\sigma_y^2(2,\tau)$

واریانس دو نمونه‌ای از افت و خیزهای بسامدی در زمان میانگین‌گیری τ ثانیه است که مطابق با معادله (۱۵) تعریف می‌شود:

$$\sigma_{\mathrm{y}}^2(2,\tau) = \langle\frac{[\bar{\mathrm{y}}(\mathrm{k}+1)-\bar{\mathrm{y}}(\mathrm{k})]^2}{2}\rangle \qquad (۱۵)$$

که در آن:

$\langle\,\rangle$ میانگین روی مجموعه‌ای نامتناهی از داده‌ها را بیان می‌کند؛

$\bar{y}(k)$ k امین اندازه‌گیری $\bar{y}$، در این مجموعه از داده‌ها است؛

$\bar{y}$ با میانگین‌گیری $y(t)$ دریک بازه زمانی τ به‌دست می‌آید.

یادآوری ۱ – برای اندازه‌گیری‌های بسامد، انحراف کسری $y(t)$ مطابق با معادله (۱۶) داده می‌شود:

$$y(t) = [v(t) - v_0]/v_0 \qquad (۱۶)$$

که در آن:

$v(t)$ بسامد لحظه‌ای است؛

v_0 بسامد اسمی است.

تمامی بازه‌های اندازه‌گیری دارای دیرش[1] یکسان τ هستند و بین بازه‌های اندازه‌گیری پشت‌سرهم، هیچ زمان تلف‌شده‌ای وجود ندارد. برای زمان‌های $\tau <$ ۱۰۰s، مجموعه داده‌ها باید شامل حداقل ۱۰۰ داده باشد. برای زمان‌های بزرگتر τ، ممکن است تعداد داده‌ها کاهش یابد، اما باید در گزارش آزمون بیان شود.

یادآوری ۲ – ممکن است $\bar{y}$ از اندازه‌گیری‌های هترودین به‌دست آید که در آن اختلاف بسامد $\Delta\nu$ در بازه τ انتگرال‌گیری شده و به بسامد نوسان v_0 بهنجار می‌گردد.

یادآوری ۳ – از آنجا که $y = \Delta\nu / \nu = -\Delta\lambda / \lambda$، $\sigma_y^2(2,\tau)$ همزمان مقیاسی از پایداری بسامدی و پایداری طول‌موجی است.

یادآوری ۴ – برای اطلاعات بیشتر، به منبع [۱] کتاب‌نامه مراجعه شود.

۲۰-۳

تابع پاسخ دستگاهی

instrumental response function

$\boldsymbol{R(\lambda, \lambda_0)}$

پاسخ، یا به عبارتی سیگنال خروجیِ دستگاه تنظیم شده در طول‌موج λ به طول‌موج تکفام ورودی λ_0 است.

یادآوری – معمولاً، در سرتاسر گستره طول‌موجی دستگاه، $R(\lambda, \lambda_0)$ تقریباً مستقل از طول‌موج ورودی λ_0 است و شناسه دوم حذف می‌شود. برای یک دستگاه که به‌درستی تنظیم شده، گشتاور اول تابع پاسخ دستگاهی $R(\lambda, \lambda_0)$ مطابق با معادله (۱۷) تعریف می‌شود:

$$\lambda_g = \frac{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \lambda\ R(\lambda, \lambda_0) d\lambda}{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} R(\lambda, \lambda_0) d\lambda} \qquad (۱۷)$$

که توصیه می‌شود با طول‌موج ورودی برابر باشد: $\lambda_g = \lambda_0$.

1- Duration

۲۱-۳

پهنای‌باند طیفی مؤثر دستگاهی

instrumental effective spectral bandwidth

$\Delta\lambda_{ins}(\lambda_0)$

گشتاور دوم تابع پاسخ دستگاهی $R(\lambda، \lambda_0)$ است، که مطابق با معادله (۱۸) تعریف می‌شود:

$$\Delta\lambda_{\mathrm{ins}}(\lambda_0) = \sqrt{\frac{\int_{\lambda_{\mathrm{min}}}^{\lambda_{\mathrm{max}}} (\lambda-\lambda_{\mathrm{g}})^2\, \mathrm{R}(\lambda, \lambda_0)\, \mathrm{d}\lambda}{\int_{\lambda_{\mathrm{min}}}^{\lambda_{\mathrm{max}}} \mathrm{R}(\lambda, \lambda_0)\, \mathrm{d}\lambda}} \qquad (۱۸)$$

یادآوری – اگر همان‌طور که به‌طور معمول فرض می‌شود، $R(\lambda, \lambda_0)$ و در نتیجه $\Delta\lambda_{\mathrm{ins}}(\lambda_0)$ تقریباً مستقل از طول‌موج ورودی λ_0 باشد، پهنای‌باند مؤثر $\Delta\lambda_{\mathrm{ins}}$ بدون شناسه به‌کار برده می‌شود.

۴ علائم و کوته‌نوشت‌ها

در این استاندارد، علائم و کوته‌نوشت‌های زیر به‌کار می‌روند.:

جدول ۱ - علائم و کوته‌نوشت‌ها

علامت	یکا	شرح
F_{msp}	Hz	فاصله مُدی در حوزه بسامدی
f_{P}	Hz	آهنگ تکرار تپ
N_{m}		تعداد مُدهای طولی
n_{air}		ضریب شکست هوای محیط
n_{std}		ضریب شکست هوای خشک تحت شرایط استاندارد
P_λ	W/m	توزیع طیفی توان تابشی
Q_λ	W. s/m	توزیع طیفی انرژی تابشی
$R(\lambda,\lambda_0)$	1/m	تابع پاسخ دستگاهی
S_{msp}	m	فاصله مُدی در حوزه طول‌موج
$S(\lambda)$		توان تابشی طیفی $P_\lambda(\lambda)$ برای لیزر موج‌پیوسته یا توزیع طیفی انرژی تابشی$Q_\lambda(\lambda)$ برای لیزر تپی
SMS	dB	نسبت فرونشانی مُد جانبی
U_x		عدم قطعیت استاندارد بسط‌یافته برای اندازه‌ده x
$\delta\lambda_{\mathrm{T}}$	m/K	وابستگی دمایی طول‌موج
$\delta\lambda_{\mathrm{c}}$	m/A	وابستگی جریانی طول‌موج
λ	m	طول‌موج
λ_0	m	طول‌موج در خلأ
λ_{air}	m	طول‌موج در هوا
λ_{av}	m	طول‌موج میانگین
λ_{g}	m	طول‌موج میانگین وزنی (گشتاور اول)
λ_{P}	m	طول‌موج قله گسیل
λ_{std}	m	طول‌موج در هوای خشک تحت شرایط استاندارد
$\bar{\lambda}$	m	طول‌موج مرکزی
$\Delta\lambda$	m	ریشه میانگین مربعی پهنای‌باند تابشی طیفی (گشتاور دوم)
$\Delta\lambda_{\mathrm{H}}$	m	پهنای‌باند طیفی (FWHM)
$\Delta\lambda_{\mathrm{ins}}$	m	پهنای‌باند طیفی مؤثر دستگاهی
$\Delta\lambda_{\mathrm{L}}$	m	پهنای‌خط طیفی (FWHM)
$\Delta\lambda_{\mathrm{meas}}$	m	پهنای‌باند تابشی طیفی اندازه‌گیری‌شده (گشتاور دوم)
$\Delta\lambda_{\mathrm{rms}}$	m	ریشه میانگین مربعی پهنای‌باند طیفی
ν	Hz	بسامد موج
ν_{FSR}	Hz	گستره طیفی آزاد (FSR) تداخل سنج فابری‌پرو
$\sigma_y^2(2,\tau)$		واریانس آلن مشخص کننده پایداری طول‌موجی لیزر موج‌پیوسته
τ_H	s	دیرش تپ

۵ قابلیت ردیابی

تمامی نتایج اندازه‌گیری باید با یکاهای SI قابل ردیابی باشند. به‌عنوان مثال، طول‌موج باید با یکی از روش‌های پیشنهاد شده توسط کمیته بین‌المللی اوزان و مقیاس‌ها (CIPM)[1] برحسب متر قابل ردیابی باشد.

یادآوری – برای یکای متر، معمولاً این کار با استفاده از یک طول‌موج مرجع پیشنهاد شده توسط CIPM انجام می شود. برای جزئیات بیشتر به منبع [۲] کتاب‌نامه مراجعه شود.

۶ اندازه گیری طول‌موج و پهنای‌باند

۶-۱ کلیات

۶-۱-۱ آماده‌سازی

بسته به مشخصه‌های طیفی، کاربرد درنظر گرفته‌شده برای لیزر و سطح عدم قطعیت مورد نیاز U_λ یا U_ν (همان‌طور که در استاندارد GUM تعریف شده است) در اندازه‌گیری طول‌موج (یا بسامد) لیزر، $U_\lambda/\lambda = U_\nu/\nu$، لازم است پارامترهای مختلف مورد آزمون قرار بگیرند (به زیربند ۶-۲ مراجعه شود).

برای لیزری با مشخصه‌های نامعلوم، توصیه می‌شود یک آزمون عملیاتی برای انتخاب تجهیزات کاملاً مناسب و برگزیدن بهترین پارامترهایی که باید اندازه‌گیری شوند، انجام شود.

در این استاندارد فرض می‌شود که در سراسر توزیع فضایی توان (انرژی) در باریکه، مشخصه‌های طیفی باریکه لیزر یکسان است. در غیر این‌صورت، می‌توان با روزنه‌های محدودکننده، اندازه‌گیری‌های تفکیک‌شده[2] فضایی انجام داد.

به‌عنوان راهنمایی، سه سطح آزمون پیشنهاد می‌شود (به زیربند ۶-۲ مراجعه شود).

۶-۱-۲ انواع رایج لیزرها

انتخاب مناسب‌ترین پارامترها برای توصیف مشخصه‌های طیفی یک لیزر به نوع لیزر بستگی دارد. انواع رایج لیزر عبارتند از:

الف- لیزرهای با پهنای‌باند وسیع، به‌عنوان مثال لیزرهای تپی، یا لیزرهای چند مُد که افت‌وخیزهای مُدی قابل توجه و سریعی را نشان می‌دهند؛

ب- لیزرهای چند مُد با ساختار مُدی پایدار در مقیاس زمانی مورد نظر؛

پ- لیزرهای تک بسامد.

1- Comité international des poids et mesures
2- Resolved

برای این سه نوع لیزر، استفاده از پارامترهای زیر پیشنهاد می‌شود:

- برای لیزر با پهنای‌باند وسیع:

طول‌موج میانگین وزنی (گشتاور اول) λ_g، ریشه میانگین مربعی پهنای‌باند تابش طیفی (گشتاور دوم) $\Delta\lambda$ یا پهنای‌باند طیفی (FWHM) $\Delta\lambda_H$؛ وابستگی طول‌موج به پارامترهای عملیاتی، دما و/یا جریان ورودی، $\delta\lambda_{\mathrm{T}}$ و/یا $\delta\lambda_{\mathrm{c}}$؛

- برای لیزر چند مُدی:

طول‌موج مرکزی $\bar{\lambda}$، ریشه میانگین مربعی پهنای‌باند طیفی $\Delta\lambda_{\mathrm{rms}}$، فاصله مُدی F_{msp} (حوزه بسامدی) یا S_{msp} (حوزه طول‌موجی)، تعداد مُدهای طولی در یک پهنای‌باند مشخص N_{m}؛ وابستگی طول‌موج به پارامترهای عملیاتی، دما و/یا جریان ورودی، $\delta\lambda_{\mathrm{T}}$ و/یا $\delta\lambda_{\mathrm{c}}$؛

- برای لیزر تک بسامد:

طول‌موج قله λ_{p} یا طول‌موج میانگین λ_{av}، پهنای‌خط طیفی $\Delta\lambda_{\mathrm{L}}$ و فرونشانی مُد جانبی، *SMS*؛ وابستگی طول‌موج، $\delta\lambda_{\mathrm{T}}$ و/یا $\delta\lambda_{\mathrm{c}}$ به پارامترهای عملیاتی، دما و/یا جریان ورودی، واریانس آلن $\sigma_y^2(2,\tau)$ به‌عنوان معیاری از پایداری طول‌موج.

۶-۲ انواع اندازه‌گیری‌ها

۶-۲-۱ کلیات

فرض می‌شود مشخصه‌های طیفی لیزرها در طی مدت زمان اندازه‌گیری پایدار باشند. اگرچه ممکن است این امر نیازمند ارزیابی از طریق آزمون‌های پایداری و راندگی بعدی باشد (به بند ۷ مراجعه شود).

۶-۲-۲ اندازه گیری‌های با درستی پایین

این اندازه‌گیری‌ها برای عدم قطعیت معمول $U_\lambda/\lambda = U_\nu/\nu > ۱۰^{-۴}$ کارایی دارند. این حالت برای لیزرهای با پهنای‌باند وسیع، مانند لیزرهای تپی یا لیزرهای موج پیوسته چند مُدی یا اندازه‌گیری‌های با دستگاه‌های با توان تفکیک پایین کاربرد دارد.

برای این اندازه‌گیری‌ها، نیازی به تفکیک مُدهای جداگانه نیست و توصیه می‌شود طول‌موج میانگین وزنی، λ_{g}، و ریشه مربع میانگین پهنای‌باند تابشی، $\Delta\lambda$، تعیین شوند. توصیه می‌شود پایداری طول‌موج به‌صورت تابعی از پارامترهای عملیاتی ارزیابی شود، یعنی توصیه می‌شود $\delta\lambda_{\mathrm{T}}$ و/یا $\delta\lambda_{\mathrm{c}}$ اندازه‌گیری شوند.

برای تعیین طول‌موج میانگین وزنی، معمولاً حدود انتگرال‌گیری λ_{min} و λ_{max} به‌گونه‌ای انتخاب می‌شوند که در خارج از این بازه، توزیع طیفی کمتر از ٪ ۱ مقدار بیشینهٔ آن باقی بماند. استفاده از حدود انتگرال‌گیری دیگر، باید در گزارش آزمون ارائه شود.

ممکن است در برخی موارد مقدار توزیع طیفی در بازه بسیار گسترده‌ای از طول‌موج‌ها، خیلی کمتر از ٪ ۱ مقدار بیشینهٔ آن نباشد، مانند یک قله باریک که بر روی یک پس‌زمینه گسترده قراردارد. در چنین مواردی، ممکن است کسر قابل توجهی از توان کل در خارج از حدود انتگرال‌گیری باشد. علاوه بر آن، برای توزیع‌های بسیار باریک ممکن است توان تفکیک دستگاه بر بیشینه مقدار اندازه‌گیری شده $S(\lambda)$ در λ_{p} تأثیر بگذارد، که به نوبه خود حدود انتگرال‌گیری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. توصیه می‌شود اطمینان حاصل شود که مقدار محاسبه شده λ_{g} به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر این موضوع نباشد.

۶-۲-۳ اندازه‌گیری‌های با درستی متوسط

این اندازه‌گیری‌ها در عدم قطعیت معمول $U_\lambda/\lambda = U_\nu/\nu$ از مرتبه $۱۰^{-۴}$ تا $۱۰^{-۵}$، کارایی دارند که برای لیزرهای تپی با پهنای باند باریک یا لیزرهای موج پیوسته چند مُدی کاربرد دارد.

در این اندازه‌گیری‌ها، مُدهای جداگانه معمولاً تفکیک می‌شوند و فاصله مُدی F_{msp} (حوزه بسامدی) یا S_{msp} (حوزه طول‌موجی)، تعداد مُدهای طولی در یک پهنای‌باند مشخص N_{m} و فرونشانی مُد جانبی، SMS، را می‌توان ارزیابی کرد. توصیه می‌شود طول‌موج مرکزی $\bar{\lambda}$، ریشه میانگین مربعی پهنای‌باند طیفی، $\Delta\lambda_{\mathrm{rms}}$، تعیین شود. توصیه می‌شود پایداری طول‌موج به‌صورت تابعی از پارامترهای عملیاتی، یعنی $\delta\lambda_{\mathrm{T}}$ و/یا $\delta\lambda_{\mathrm{c}}$، اندازه‌گیری شود.

۶-۲-۴ اندازه‌گیری‌های با درستی بالا

این اندازه‌گیری‌ها در عدم قطعیت معمول $U_\lambda/\lambda = U_\nu/\nu < ۱۰^{-۵}$ کارایی دارند که برای لیزرهای تک مُد یا لیزرهای تپی با پهنای‌باند باریک کاربرد دارد.

برای این اندازه‌گیری‌ها، مُدهای جانبی ممکن باید شناسایی شوند و در صورت کاربرد، فرونشانی مُد جانبی، SMS، باید تعیین شود.

توصیه می‌شود طول‌موج قله λ_{p} یا طول‌موج میانگین λ_{av} و پهنای‌خط طیفی $\Delta\lambda_{\mathrm{L}}$، وابستگی به شرایط عملیاتی $\delta\lambda_{\mathrm{T}}$ و/یا $\delta\lambda_{\mathrm{c}}$ تعیین شوند و توصیه می‌شود واریانس آلن $\sigma_y^2(2,\tau)$ به‌عنوان معیاری از پایداری طول‌موج اندازه‌گیری شود.

۶-۳ انتخاب تجهیزات

با توجه به درستی مورد نیاز و نوع لیزر باید تجهیزات مناسب انتخاب شوند. به‌عنوان مثال، یک طیف‌سنج توری‌دار[1] با تفکیک بالا می‌تواند توان تفکیک عملی، $R = \lambda/\Delta\lambda_{\mathrm{ins}}$، از مرتبه $۱۰^{۵}$ تا $۱۰^{۶}$ را داشته باشد.

در مورد لیزر تپی، تنها در صورتی می‌توان از تداخل‌سنج‌ها استفاده کرد که دیرش تپ، τ_{H}، در مقایسه با وارون پهنای‌باند دستگاه اندازه‌گیری بزرگ باشد. در یک تداخل‌سنج فابری-پرو[2] با بازه طیفی آزاد ν_{FSR} و

1- Grating spectrometer
2- Fabry-Perot interferometer

ظرافت[1]، F، کمینه دیرش تپ برابر F/ν_{FSR} است. برای یک تداخل‌سنج دو موجی با بیشینه اختلاف مسیر L، کمینه دیرش تپ برابر L/c می‌باشد، که در آن c سرعت نور است.

اغلب ممکن است برای طول‌موج، درستی پایینی مورد نیاز باشد. اگرچه ممکن است برای اندازه‌گیری دامنه توزیع طیفی توان، به‌عنوان مثال برای تعیین تختی طیفی، موجک طیفی و غیره برای چشمه‌هایی با پهنای‌باند وسیع، به درستی بالایی نیاز باشد.

توصیه می‌شود هر قطعه اپتیکی که برای جفت‌کردن باریکه لیزر با سامانه اندازه‌گیری (عدسی‌ها، آینه‌ها، فیبرهای نوری و غیره) استفاده می‌شود، در محدوده اندازه‌گیری، از لحاظ طیفی غیرحساس یا مشخصه‌یابی شده باشد. توصیه می‌شود حساسیت احتمالی آن‌ها به حالت قطبش باریکه لیزر، مستقل از طول‌موج باشد یا به‌عنوان مثال با ماتریس‌های مناسب وابسته به طول‌موج مولر[2]، مشخصه‌یابی شود (به استاندارد ISO 12005 مراجعه شود). باید پاسخ طیفی وابسته به قطبش سامانه اندازه‌گیری درنظر گرفته شود. وسیله‌هایی مانند تک‌فام‌سازهای توری‌دار، دارای منحنی عبور وابسته به قطبش هستند. همین موضوع می‌تواند برای آشکارسازها یا دیگر قطعات سامانه اندازه‌گیری درست باشد.

برای باریکه‌های لیزر با پهنای‌باند باریک، اغلب می‌توان منحنی عبور را به شکل تخت و مستقل از حالت قطبش در نظر گرفت.

از آن‌جا که بسیاری از انواع لیزرها نسبت به بازخورد اپتیکی حساس هستند، توصیه می‌شود به‌عنوان مثال با کج کردن اجزاء یا استفاده از جداکننده‌های اپتیکی از هر بازتاب نور لیزر که به لیزر برمی‌گردد، برای مثال از پنجره‌های اپتیکی، فیلترها یا عدسی‌ها، جلوگیری شود.

۶-۴ اندازه گیری در هوا

در اندازه‌گیری λ_{air}، نتایج اندازه‌گیری به شرایط محیطی مانند دما، فشار جو و رطوبت بستگی دارد زیرا که این عوامل بر ضریب شکست هوا تأثیرگذار هستند. همچنین، ضریب شکست با طول‌موج تغییر می‌کند (پاشندگی[3]). اگر لیزری با طول‌موج معلوم به عنوان مرجع استفاده شود، تأثیر ضریب شکست تا حدی حذف می‌شود، و تنها لازم است که تأثیر جزئی‌تر پاشندگی (و وابستگی آن به شرایط محیطی) در نظر گرفته شود.

محاسبه ضریب شکست با فرمول پاشندگی هوای خشک شروع می‌شود. در شرایط استاندارد، در دمای ۱۵ °C و فشار ۱۰۱۳۲۵ Pa، گاز CO_2 با کسر حجمی ۴۵۰×۱۰^{-۶} [۴۵۰ ppm[4]] و رطوبت صفر درصد، می‌توان ضریب شکست هوا را با استفاده از معادله به روز شده اِدلن[5] مطابق با معادله (۱۹) محاسبه کرد (به منبع [۳] کتاب‌نامه مراجعه شود):

1- Finesse
2- Mueller
3- Dispersion

۴- استفاده از یکای ppm منسوخ شده است.

5- Edlén

$$(n_{\mathrm{std}} - 1) \times 10^8 = 8342{,}54 + \frac{2406147}{130 - (1000\mathrm{nm}/\lambda)^2} + \frac{15998}{38{,}9 - (1000\mathrm{nm}/\lambda)^2} \qquad (۱۹)$$

یادآوری ۱ – معادله بالا برای طول‌موج‌های در گسترهٔ $۳۰۰\ \mathrm{nm} < \lambda < ۱۷۰۰\ \mathrm{nm}$ حدود یک در $۱۰^{-۷}$ درست است. این معادله در گستره مرئی، درستی بسیار بالاتری دارد.

یادآوری ۲ –

$$n_{std}(633\ \mathrm{nm}) = 1{,}0002765\ ,\ n_{std}(532\ \mathrm{nm}) = 1{,}0002782\ ,\ n_{std}(1530\ \mathrm{nm}) = 1{,}0002733 \qquad (۲۰)$$

- اگر سطح قابل قبول عدم قطعیت در اندازه‌گیری طول‌موج (یا بسامد) لیزر، $U_\lambda/\lambda_m = U_\nu/\nu_m$، بزرگتر از $۱۰^{-۴}$ باشد، نیازی نیست که شرایط جوی به‌طور صریح در نظر گرفته شود.
- اگر سطح قابل قبول عدم قطعیت در اندازه‌گیری طول‌موج (یا بسامد)، $U_\lambda/\lambda_m = U_\nu/\nu_m$، کمتر یا مساوی $۱۰^{-۴}$ باشد، باید نتایج اندازه‌گیری توسط معادله (۲۱) اصلاح شود (به منبع [۳] کتاب‌نامه مراجعه شود):

$$(n_{\mathrm{air}} - 1) = (n_{\mathrm{std}} - 1) \times \frac{1{,}0406322 \times 10^{-5} p}{1 + 0{,}0036610 \times T} \times (1 + \varepsilon) \times (1 + x) - f \times [3{,}7345 - 0{,}0401 \times (1000\mathrm{nm}/\lambda)^2] \times 10^{-10} \qquad (۲۱)$$

که در آن:

n_{air} ضریب شکست در هوا؛

n_{std} ضریب شکست در هوای خشک تحت شرایط استاندارد (به ابتدای زیربند مراجعه شود) در طول‌موج اندازه‌گیری؛

T دما، برحسب °C؛

f فشار جزئی بخار آب، بر حسب Pa؛

p فشار جو کل، برحسب Pa؛

می‌باشد و جملات تصحیح به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$1 + \varepsilon$ جمله تصحیح مرتبه بالاتر، p و T، است، و

$$1 + \varepsilon = 1 + 10^{-8} \times p \times (0{,}601 - 0{,}00972 \times T) \qquad (۲۲)$$

$1 + x$ جمله‌ای که انحراف‌های کسر حجمی CO_2، φ_{CO_2}، را از مقدار ۴۵۰×۱۰^{-۶} [۴۵۰ ppm]، درنظر می‌گیرد، و

$$1 + x = 1 + 0{,}54 \times (\varphi_{\mathrm{CO_2}} - 0{,}00045) \qquad (۲۳)$$

اگر سطح قابل قبول عدم قطعیت در طول‌موج، $U_\lambda/\lambda_{\mathrm{m}}$، بزرگتر از $۱۰^{-۶}$ باشد، می‌توان هر دو تصحیح را برابر ۱ در نظر گرفت.

$\varphi_{\mathrm{CO_2}}$ کسر حجمی CO_2 در هوا می‌باشد.

یادآوری ۳ – ضریب شکست n_{air} با هر یک از تغییرات در شرایط محیطی زیر، در حدود ۱×۱۰^{-۷} تغییر می‌کند:

دما: $\Delta T = 0{,}1\ °\mathrm{C}$، فشار: (یا $0{,}3\ \mathrm{mbar}$) $\Delta p = 30\ \mathrm{Pa}$ ، حجم CO_2: $\Delta\varphi_{\mathrm{CO_2}} = 600 \times 10^{-6}$ [600 ppm]، رطوبت: $\Delta f = 250\ \mathrm{Pa}$

یادآوری ۴ – در معادلات بالا ترکیب جو طبیعی فرض می‌شود. دستگاه‌های ضمیمه ممکن است حاوی بخارات روغن یا حلال‌هایی باشند که باعث تغییر ضریب شکست تا 1×10^{-7} یا بیشتر شوند. به‌ویژه در فروسرخ نزدیک ممکن است لازم باشد بال‌های خطوط جذبی فروسرخ بخار آب، CO_2 یا دیگر گازها در نظر گرفته شوند.

برای جزئیات بیشتر به پیوست **الف** مراجعه شود.

اگر سطح قابل قبول عدم قطعیت در اندازه‌گیری طول‌موج (یا بسامد) لیزر، $U_\lambda/\lambda_m = U_\nu/\nu_m$، کوچک‌تر از 10^{-7} باشد، اندازه‌گیری طول‌موج باید در خلأ یا توسط اندازه‌گیری بسامد با روش‌های هترودایِن انجام شود.

۶-۵ اندازه‌گیری با توان تفکیک پایین

۶-۵-۱ اصول

برای چشمه‌های نامعلوم، به‌منظور تعیین تجهیزات مورد نیاز باید اندازه‌گیری اولیه با توان تفکیک پایین از طول‌موج میانگین وزنی و پهنای‌باند تابشی طیفی انجام شود.

تک‌فام‌ساز توری‌دار با اندازه متوسط (فاصله کانونی از مرتبه ۳۰ cm) برای این آزمون مناسب است. برای همه انواع وسیله‌های لیزری می‌توان از یک تک دستگاه استفاده کرد، اما انتخاب برخی از قطعات و لوازم جانبی باید مطابق با گستره طیفی تابش لیزری انجام شود.

به منظور انتخاب دستگاه و لوازم جانبی به پیوست **ب** مراجعه شود.

۶-۵-۲ روش‌اجرایی اندازه‌گیری

باریکه لیزر اندازه‌گیری‌شونده، یا کسری از آن که از یک باریکه‌شکاف مناسب جدا شده است، باید به سمتِ ورودی دستگاه مانند شکاف ورودی تک‌فام‌ساز هدایت شود. توصیه می‌شود نسبت دهانه دستگاه با استفاده از سامانه اپتیکی مناسب با باریکه جور شود. برای این منظور معمولاً لازم است که باریکه لیزر کانونی شود. لازم به ذکر است که اگر چگالی توان استفاده شده بسیار زیاد باشد دستگاه، به عنوان مثال لبه‌های شکاف ورودی، می‌تواند آسیب ببیند و در صورت لزوم می‌توان از تضعیف‌کننده استفاده کرد.

مقدار پهنای باند طیفی مؤثر دستگاه، $\Delta\lambda_{ins}$، باید با استفاده از باریکه یک لیزر با پهنای‌خط باریک، به‌عنوان مرجع، که برای تشکیل باریکه‌ای با تقریباً همان هندسه تنظیم شده، بررسی شود. در این آزمون، منظور از یک لیزر با پهنای‌خط باریک می‌تواند هر وسیله لیزری باشد که قابلیت فراهم کردن باریکه‌ای با پهنای‌باند طیفی و افت‌وخیز رانشی طول‌موجی حداقل ۱۰ برابر کوچکتر از مقدار لازم برای $\Delta\lambda_{ins}$ (به زیربند ۶-۵-۳ مراجعه شود) را داشته باشد. در بسیاری از موارد، یک لیزر هلیم- نئون در حال کار آزاد با طول‌موج ۶۳۳ nm کفایت می‌کند.

توصیه می‌شود هنگامی‌که دستگاه در گستره طول‌موجی مورد نظر روبش می‌شود، اندازه گام‌ها برای توان تفکیک مورد نیاز مناسب باشد. ثابت زمانی ثَبّات باید بسیار کوچکتر از زمان لازم برای روبش کامل نیم‌پهنای

خط باشد. برای مثال، وجود یک ضریب ده میان این دو زمان، هنوز یک جابه‌جایی یک‌دهمی در پهنای‌خط را به‌دنبال خواهد داشت.

گستره پویایی آشکارساز باید به‌اندازه کافی بزرگ باشد به‌طوری‌که اندازه‌گیری‌های شدت، دست‌کم دو بازه ده‌تایی را در برگیرد.

۶-۵-۳ تجزیه و تحلیل

توصیه می‌شود روش‌اجرایی اندازه‌گیری بالا، امکان مشاهده توزیع طیفی توان (انرژی) تابشی ظاهری، $P_\lambda(\lambda)$ یا $Q_\lambda(\lambda)$، را فراهم کند. در صورت نیاز، حساسیت طیفی دستگاه، آشکارساز و اجزاء اپتیکی اصلاح شود.

الف- هرگونه تصحیح مقیاس طول‌موج را اعمال و گشتاور اول توزیع طیفی توان (انرژی) تابشی اندازه‌گیری‌شده، یعنی طول‌موج میانگین وزنی λ_g توزیع طیفی توان (انرژی) تابشی را محاسبه کنید.

معمولاً برای تعیین طول‌موج میانگین وزنی، حدود انتگرال‌گیری λ_{min} و λ_{max} به‌گونه‌ای انتخاب می‌شوند که توزیع طیفی خارج از این بازه کمتر از ٪ ۱ مقدار بیشینهٔ آن باشد. در غیر این صورت، باید حدود انتگرال مورد استفاده در گزارش آزمون بیان شود.

در مواردی ممکن است مقادیر توزیع طیفی در گستره خیلی وسیعی از طول‌موج‌ها بسیار کمتر از ٪ ۱ مقدار بیشینه آن نباشد، به‌عنوان مثال برای یک قلهٔ باریک که روی یک پس‌زمینه گسترده قرار گرفته است. در چنین مواردی، ممکن است کسر قابل توجهی از توان کل در خارج از حدود انتگرال‌گیری باشد. علاوه بر آن، برای توزیع‌های خیلی باریک، ممکن است توان تفکیک دستگاه بر مقدار بیشینه اندازه‌گیری شده $S(\lambda)$ در λ_P تأثیر داشته باشد، که به نوبه خود بر حدود انتگرال‌گیری اثرگذار خواهد بود. توصیه می‌شود اطمینان حاصل شود که مقدار محاسبه‌شده λ_g به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر آن نمی‌باشد.

ب- گشتاور دوم توزیع طیفی توان (انرژی) تابشی اندازه‌گیری‌شده، $\Delta\lambda_{meas}$، را محاسبه کنید (به زیربند ۳-۹ مراجعه شود).

پ- نتایج را در برگ‌داده[1] گزارش آزمون ثبت کنید.

ت- گشتاور دوم، $\Delta\lambda_{meas}$، را با پهنای‌باند دستگاهی، $\Delta\lambda_{ins}$، مقایسه کنید.

- اگر گشتاور دوم بیشتر از ۱۰ برابر پهنای‌باند دستگاهی، $\Delta\lambda_{ins}$، باشد، نیازی به اندازه‌گیری بیشتر نیست و $\Delta\lambda = \Delta\lambda_{meas}$.

1- Data sheet

- اگر $\Delta\lambda_{\mathrm{meas}}$ بین ۲ برابر تا ۱۰ برابر پهنای‌باند دستگاهی، $\Delta\lambda_{\mathrm{ins}}$، باشد، پهنای طیفی تصحیح‌شده که از معادله (۲۴) محاسبه شده یا به روش دی‌کانولوشن[1] به‌دست می‌آید را در گزارش آزمون تصریح کنید.

$$\Delta\lambda = \sqrt{(\Delta\lambda_{\mathrm{meas}})^2 - (\Delta\lambda_{\mathrm{ins}})^2} \qquad (۲۴)$$

- اگر گشتاور دوم کمتر از ۲ برابر پهنای‌باند دستگاهی باشد، برای تعیین دقیق‌تر مشخصه‌های طیفی باریکه لیزر باید دستگاه اندازه‌گیری با توان تفکیک بالاتر انتخاب شود.

۶-۶ اندازه‌گیری با توان تفکیک بالاتر

۶-۶-۱ کلیات

توصیه می‌شود تمامی اندازه‌گیری‌ها برای ارزیابی مشخصه‌های طیفی لیزر با عدم قطعیت $U_\lambda/\lambda = U_\nu/\nu < ۱۰^{-۵}$ در شرایط محیطی مکانیکی و گرمایی پایدار انجام شود.

۶-۶-۲ آزمون مقدماتی

برای چشمه‌های ناشناخته باید اندازه‌گیری مقدماتی با توان تفکیک کم از طول‌موج میانگین وزنی، پهنای‌باند طیفی تابش به‌منظور تعیین دستگاه مورد نیاز انجام شود.

انتخاب تجهیزات مورد نیاز برای مشخصه‌یابی بیشتر چشمه به خصوصیات زیر بستگی دارد:

الف- مُدهای نوسان مورد انتظار.

ب- ویژگی موج پیوسته یا تپی بودن لیزر: در حالت تپی دیرش تپ، τ_{H}، باید در نظر گرفته شود.

پ- مشخصه‌های طیفی که باید اندازه‌گیری شود: طول‌موج، یا توزیع طیفی توان (انرژی) تابشی.

۶-۶-۳ اندازه‌گیری با طیف‌سنج توری‌دار

در این روش در اغلب موارد توری با توان تفکیک بالا ترجیح داده می‌شود زیرا برای اندازه‌گیری طول‌موج و پهنای‌باند طیفی، کافی است. اگر از طیف‌سنج توری‌دار استفاده شود، روش اجرایی همانند روش ذکر شده در زیربند ۶-۵-۲ است.

۶-۶-۴ اندازه‌گیری با تداخل‌سنج

تداخل‌سنج فیزو[2] (گُوِه نوری)، یا ترجیحاً مجموعه‌ای از تداخل‌سنج‌های فیزو، ابزار ارزشمندی برای اندازه‌گیری طول‌موج با درستی بالا است. ترکیب مناسبی از زاویه‌های گُوِه و طول‌های مبنا چندین

1- Deconvolution
2- Fizeau interferometer

تداخل‌سنج در یک آرایش چند مرحله‌ای، امکان دست‌یابی به درستی نسبی تا $۱۰^{-۸}$ در اندازه‌گیری طول‌موج را فراهم می‌سازد. تداخل‌سنج فیزو را می‌توان برای باریکه لیزرهای تپی و موج پیوسته استفاده کرد.

اگر فقط باید توزیع طیفی توان (انرژی) تابشی تعیین شود، می‌توان از تداخل‌سنج روبشی یا ثابت فابری-پرو (FP)[1] استفاده کرد (به پیوست **پ** مراجعه کنید). هرچند که در استفاده از این نوع دستگاه برای لیزرهای تپی محدودیت وجود دارد. دیرش تپ، τ_{H}، باید بلندتر از حاصل‌ضرب ظرافت، F، و زمان رفت و برگشت در کاواک، t، باشد که مطابق با معادله (۲۵) داده می‌شود:

$$t = 2nD/c \qquad (۲۵)$$

که در آن :

n ضریب شکست محیط اپتیکی؛ و

D فاصله بین دو آینه FP است.

برای تپ‌های لیزری بسیار کوتاه، طیف‌سنج توری‌دار مناسب‌تر است.

ترجیح داده می‌شود که برای اندازه‌گیری توان تابش طیفی لیزرهای موج پیوسته از تداخل سنج فابری-پرو روبشی و برای اندازه‌گیری توزیع طیفی انرژی لیزرهای تپی از تداخل سنج فابری-پرو ثابت استفاده شود. در هر صورت، توصیه می‌شود طول مسیر اپتیکی بین آینه‌ها (nD) و/یا ظرافت F به اندازه کافی بزرگ باشد، به‌طوری‌که توان تفکیک دستگاهی $\Delta\lambda_{\mathrm{ins}}$ تداخل‌سنج حداقل ۱۰ برابر کوچکتر از پهنای‌باند توزیع طیفی شود. توصیه می‌شود گستره طیفی آزاد، $\nu_{\mathrm{FSR}} = c/2nD$، دستگاه تا ۱۰ برابر بزرگتر از پهنای‌باند توزیع طیفی باشد.

تداخل‌سنج روبشی نیاز به یک باریکه ورودی دارد که با دستگاه اندازه‌گیری سازگار باشد. به‌عنوان مثال برای یک تداخل‌سنج فابری-پرو با آینه تخت، باریکه موازی‌شده مورد نیاز است. عدسی کانونی‌ساز در خروجی، تمامی پرتوهایی که از تداخل‌سنج خارج می‌شوند را روی آشکارساز تصویر می‌کند. نیم‌رخ شدت در آشکارساز که توسط روبش فاصله‌ای آینه به‌دست می‌آید توزیع طیفی لیزر را نشان می‌دهد. یک مقیاس بسامدی خطی با ایجاد تکراری توزیع طیفی از هر گستره طیفی آزاد به‌دست می‌آید. توان تفکیک دستگاه اندازه‌گیری به بازتاب آینه‌ها و موازی‌سازی تابش ورودی بستگی دارد.

در تداخل‌سنج ثابت، اگر آینه‌ها با شیب کمی نسبت به هم قرار گرفته باشند (تداخل‌سنج فیزو) به یک باریکه ورودی موازی و اگر آینه‌ها موازی باشند (تداخل‌سنج فابری-پرو) به یک باریکه ورودی واگرا نیاز است. برای تجزیه و تحلیل طیفی و اندازه‌گیری طول‌موج چشمه‌های لیزری تپی یا موج پیوسته از هر دو نوع می‌توان استفاده کرد. تداخل‌سنج فیزو، الگویی با نوارهای خطی صاف تولید می‌کند؛ تداخل‌سنج فابری-پرو، نوارهای دایره‌ای روی صفحه تصویر تولید می‌کند. برای ثبت تصویر از دوربین CCD[2] یا آرایه خطی دیود نوری CCD

1- Fabry- Perot
2- Charge coupled device

(متمرکز روی نوارهای دایره‌ای) می‌توان استفاده کرد. با مقایسه فاصله بین نوارها یا گستره آزاد طیفی ($\nu_{\mathrm{FSR}} = c/2nD$) تداخل‌سنج، توزیع طیفی چشمه تعیین می‌شود. برای نوارهای فیزو این رابطه خطی است، ولی برای نوارهای فابری-پرو یک وابستگی به‌صورت ریشه مربعات قطر نوارهای دایره‌ای وجود دارد. انتخاب فاصله آینه و اندازه پیکسل‌های دوربین باید با توان تفکیک مورد نیاز برای اندازه‌گیری سازگار باشد.

در تداخل‌سنج روبشی یا تداخل‌سنج ثابت، طول‌موج چشمه با مقایسه فاصله و مکان نوارهای لیزر ورودی با یک لیزر مرجع شناخته‌شده تعیین می‌شود.

تداخل‌سنج مایکلسون[1] ابزار مؤثری برای اندازه‌گیری طول‌موج گسیل قله، λ_{p}، عمدتاً برای لیزرهای موج پیوسته است. اگرچه توان تفکیک تداخل‌سنج مایکلسون با طول جابه‌جایی آینه متحرک نسبت عکس دارد، می‌توان با استفاده از روش تقسیم نوارها در پردازش داده‌ها، توان تفکیک طول‌موجی را بهبود بخشید.

برای اندازه‌گیری‌های طول‌موج، هر دو باریکه موازی لیزر آزمون و باریکه لیزر مرجع با طول‌موج معلوم باید نسبت به تداخل‌سنج تراز شوند تا امکان حرکت جبهه‌های موج در دو بازوی دستگاه و تداخل آن‌ها فراهم شود. طول‌موج با استفاده از روش شمارش حلقه‌ها اندازه‌گیری می‌شود که در آن در حالی‌که آینه متحرک روبش می‌شود حلقه‌های لیزرهای مرجع و آزمون به‌طور همزمان مشاهده می‌گردند و طول‌موج لیزر آزمون، λ_t، با استفاده از معادله (۲۶) محاسبه می‌شود:

$$\lambda_t = \lambda_r \frac{N_r}{N_t} \qquad (۲۶)$$

که در آن:

λ_r طول‌موج لیزر مرجع؛

N_r تعداد حلقه‌ها برای طول‌موج مرجع؛

N_t تعداد حلقه‌ها برای طول‌موج لیزر آزمون است.

توان تفکیک اندازه‌گیری با تعداد حلقه‌هایی که شمارش شده‌اند، یعنی با تغییر مکان آینه متحرک، افزایش می‌یابد.

به‌منظور به‌دست آوردن توزیع طیفی باریکه لیزر با استفاده از تداخل‌سنج مایکلسون، لازم است تا یک طرح تداخلی[2] کامل (شدت تراگسیلیده در منطقه تداخل به‌صورت تابعی از تغییر مکان آینه) ثبت شده و تبدیل فوریه انجام شود. لازم است که در انتخاب خط مبنا، بسامد نمونه‌برداری و برنامه کامپیوتری دقت شود. برای پردازش مناسب به مستندات سازنده مراجعه کنید.

1- Michelson interferometer
2- Interferogram

نحوه استفاده از تداخل‌سنج ماخ-زندر[1] مشابه با تداخل‌سنج مایکلسون است.

توصیه می‌شود در کار با تداخل‌سنج‌ها، مراقبت‌های ویژه‌ای اعمال شود تا اطمینان حاصل شود که اندازه‌گیری تحت تأثیر مُدهای جانبی باقی‌مانده نباشد که با خط اندازه‌گیری شده ناشی از تابع تراگسیلش دوره‌ای دستگاه همپوشانی می‌کند.

۵-۶-۶ اندازه‌گیری با روش‌های آمیختگی فوتوالکتریک

روش هوموداین[2] خودتأخیر، ابزار مفیدی برای اندازه‌گیری پهنای‌باند طیفی گسیل‌های لیزری در گستره طول‌موجی بین مرئی و فروسرخ میانی است. برای اندازه‌گیری $\Delta\lambda_{\mathrm{L}}$ لیزر آزمون، پرتو لیزر داخل یک فیبر نوری جفت می‌شود که سپس جهت ایجاد تأخیر زمانی بین مسیرهای نوری به دو پرتو تقسیم می‌گردد. دو باریکه، پس از خروج برای تولید یک علامت خودزنشی[3] در مسیرهای فیبری خود با یکدیگر آمیخته می‌شوند. پهنای‌باند طیفی با استفاده از تحلیل‌گر طیفی RF از روی این علامت خودزنشی تعیین می‌شود. در این روش، توان تفکیک با طول فیبر نوری برای یک خط تأخیر نوری نسبت عکس دارد.

روش هترودایین ابزار قدرتمندی برای تعیین مقادیر مربوط به مشخصه‌های طیفی لیزر تپی یا موج پیوسته است. در این روش، بر خلاف روش هوموداین، یک لیزر ثانویه به‌عنوان چشمه تابش مرجع مورد نیاز است و لازم است مراقبت شود که کدام‌یک از دو لیزر دارای پهنای‌باند غالب است تا توان تفکیک و درستی اندازه‌گیری طول‌موج فقط به کیفیت چشمه تابش مرجع وابسته باشد.

برای اندازه‌گیری توزیع طیفی در حوزه بسامد نوری لیزر آزمون، باریکه موازی‌شده لیزر آزمون با باریکه لیزر مرجع آمیخته می‌شود تا یک علامت زنشی تولید کند. توزیع طیفی در حوزه بسامد نوری و اختلاف بسامدی از روی نیم‌رخ زنش با یک تحلیل‌گر طیفی RF تعیین می‌شود. با شمارش علامت زنشی توسط یک شمارنده الکترونیکی ممکن است بسامد زنش میانگین را نیز تعیین کرد. طول‌موج لیزر آزمون در خلأ برحسب بسامد علامت زنشی، مطابق با معادله (۲۷) به‌دست می‌آید:

$$\lambda_{vac} = \frac{c}{\nu_r \pm \delta\nu} \qquad (۲۷)$$

که در آن:

c سرعت نور، $c = 299792458\ \mathrm{m/s}$؛

ν_{r} بسامد نوسان لیزر مرجع؛

$\delta\nu$ بسامد علامت زنشی است.

1- Mach-Zehnder
2- Homodyne
3- Self-beat note

۶-۶-۶ تجزیه و تحلیل برای درستی متوسط $U_\lambda/\lambda = U_\nu/\nu$، در گستره 10^{-5} تا 10^{-4}

روش اجرایی اندازه‌گیری فوق باید امکان بازیافت توزیع طیفی توان (انرژی) تابشی ظاهری، به‌ترتیب $P_\lambda(\lambda)$ یا $Q_\lambda(\lambda)$، را فراهم کند.

الف- نسبت فرونشانی مُد جانبی، *SMS*، را همان‌طور که در زیربند ۳-۱۵ تعریف شده است، محاسبه کنید.

ب- طول‌موج مرکزی $\bar{\lambda}$ و ریشه میانگین مربعی پهنای‌باند طیفی، $\Delta\lambda_{rms}$، را همان‌طور که در زیربندهای ۳-۷ و ۳-۱۰ تعریف شده است، محاسبه کنید.

پ- تعداد مُدهای طولی، N_m، را همان‌طور که در زیربند ۳-۱۴ تعریف شده است، تعیین کنید.

ت- فاصله مُدی، S_msp، را همان‌طور که در زیربند ۳-۱۳ تعریف شده است، تعیین کنید.

ث- نتایج را در برگ‌داده گزارش آزمون ثبت کنید.

ج- پهنای‌خط طیفی اندازه‌گیری‌شده، $\Delta\lambda_\mathrm{meas}$، را با پهنای‌باند دستگاهی، $\Delta\lambda_\mathrm{ins}$، مقایسه کنید.

اگر نیاز به تصحیح پهنای‌باند دستگاهی باشد، از همان روش اجرایی زیربند ۶-۵-۳-(ت) استفاده کنید.

۶-۶-۷ تجزیه و تحلیل برای درستی بالا $U_\lambda/\lambda = U_\nu/\nu < 10^{-5}$

روش اجرایی اندازه‌گیری فوق باید امکان بازیافت توزیع طیفی توان (انرژی) تابشی ظاهری، به‌ترتیب $P_\lambda(\lambda)$ یا $Q_\lambda(\lambda)$، را فراهم کند.

الف- نسبت فرونشانی مُد جانبی، *SMS*، را همان‌طور که در زیربند ۳-۱۵ تعریف شده است، محاسبه کنید.

- اگر *SMS* کمتر یا برابر با ۲۰ dB باشد، از تجزیه و تحلیل مربوط به درستی متوسط استفاده کنید؛
- اگر *SMS* بزرگتر از ۲۰ dB باشد، مطابق با مرحله **ب** عمل کنید.

ب- طول‌موج قله گسیل، λ_p، و پهنای‌خط طیفی، $\Delta\lambda_\mathrm{L}$، را همان‌طور که در زیربندهای ۳-۵ و ۳-۱۲ تعریف شده است، تعیین کنید.

پ- نتایج را در برگه‌داده گزارش آزمون ثبت کنید.

ت- پهنای‌باند طیفی مُد غالب را با پهنای‌باند طیفی مؤثر دستگاهی، $\Delta\lambda_\mathrm{ins}$، مقایسه کنید.

ث- اگر پهنای‌باند طیفی مؤثر دستگاهی به تصحیح نیاز داشته باشد، از همان روش اجرایی زیربند ۶-۵-۳-(ت) استفاده کنید.

۷ اندازه‌گیری پایداری طول‌موجی

۷-۱ وابستگی طول‌موج به شرایط عملیاتی

پایداری طول‌موج از مشخصه‌های اساسی بسیاری از لیزرها در تمامی گستره طول‌موجی است. اغلب لیزرها برخی از وابستگی‌های طول‌موج گسیلی به شرایط عملیاتی را از خود نشان می‌دهند، که توصیه می‌شود مشخصه‌یابی شود. طول‌موج نوسانی عمدتاً به اعوجاج یا ارتعاش مکانیکی، دما و در لیزر دیودی به جریان ورودی دستگاه لیزر بستگی دارد. وابستگی دمایی به‌صورت تغییر طول‌موج بر واحد دما بیان می‌شود و در گستره‌ای اندازه‌گیری می‌شود که هیچ جهش مُدی رخ نمی‌دهد. در لیزرهای دیودی، وابستگی جریان به‌صورت تغییر طول‌موج بر واحد جریان لیزر دیودی، بدون تغییر سایر شرایط اندازه‌گیری، بیان می‌شود. روش‌اجرایی اندازه‌گیری همان است که در زیربندهای ۶-۵ و ۶-۶ شرح داده شده است و باید وابستگی طول‌موج اندازه‌گیری‌شده (بسته به نوع لیزر؛ طول‌موج قله گسیل، λ_{P}، طول‌موج میانگین وزنی، λ_{g}، طول‌موج مرکزی $\bar{\lambda}$)، به پارامترهای عملیاتی مشخص شود.

از آن‌جا که طول‌موج نوسان لیزر دیودی عمدتاً به دما و جریان ورودی دستگاه لیزر بستگی دارد، برای لیزر دیودی باید وابستگی دمایی و جریان مشخص شوند. برای دیگر وسیله‌های لیزری معمولاً لازم است تنها وابستگی دمایی مشخص شود.

۷-۲ پایداری طول‌موجی لیزر تک بسامد

در شرایط عملیاتی اسمی معین، ممکن است پایداری طول‌موجی یا بسامدی در تمام طول مدت عملکرد لیزر مورد نظر باشد. برای لیزر تک بسامد، (نا)پایداری بسامدی لیزر را می‌توان با واریانس آلن[1] توصیف کرد. این واریانس دو-نمونه‌ای باید از سری زمانی بسامد لیزری اپتیکی (معمولاً با روش‌های هترودایین اندازه‌گیری می‌شود) که با یک زمان یکپارچه‌سازی، τ، اندازه‌گیری می‌شود، تعیین شود، یعنی درگاه زمانی شمارنده بسامد دارای هیچ زمان از دست رفته‌ای بین اندازه‌گیری‌های متوالی نباشد. برای ارزیابی لیزر تک بسامد، یک واریانس دو-نمونه‌ای $\sigma_y^2(2,\tau)$ از روی سری زمانی تعیین می‌شود. توصیه می‌شود زمان‌های یکپارچه‌سازی مطابق با اطلاعات مورد نیاز در پایداری متوسط (۱ ms تا ۱۰۰ ms) یا طولانی مدت (بزرگتر از ۱ s) انتخاب شود.

واریانس آلن $\sigma_y^2(2,\tau)$، همان‌طور که در زیربند ۳-۱۹ مشخص شده است، محاسبه می‌شود.

۸ گزارش آزمون

گزارش آزمون باید شامل اطلاعات زیر باشد.

الف- اطلاعات کلی:

1- Allan

۱- مطابقت آزمون با این استاندارد؛

۲- تاریخ انجام آزمون؛

۳- نام و نشانی سازمان انجام‌دهندهٔ آزمون؛

۴- نام شخص آزمون‌گر.

ب- اطلاعات مرتبط با لیزر آزمون:

۱- نوع لیزر؛

۲- سازنده؛

۳- نام مدل تخصیص داده شده توسط سازنده؛

۴- شماره سریال.

پ- شرایط آزمون:

۱- طول‌موج(های) لیزر که در آن آزمون انجام شده؛

۲- در مورد لیزرهای دیودی: دما برحسب کلوین (K) (شاره خنک‌کننده لیزر دیودی)؛

۳- مُد عملیاتی (موج پیوسته یا تپی)؛

۴- تنظیمات پارامترهای لیزر:

— توان یا انرژی خروجی؛

— جریان یا انرژی ورودی؛

— انرژی تپ؛

— دیرش تپ؛

— آهنگ تکرار تپ؛

۵- ساختار مُدی (اگر معلوم باشد)؛

۶- حالت قطبش؛

۷- شرایط محیطی:

— دمای اتاق؛

— رطوبت؛

— فشار جوّ.

ت- اطلاعات مرتبط با انجام آزمون:

۱- دستگاه اندازه‌گیری:

— پهنای‌باند طیفی مؤثر $\Delta\lambda_{\mathrm{ins}}$؛

— تکرارپذیری طول‌موج یا درستی کالیبراسیون؛

۲- زمان اندازه‌گیری (تعداد تپ‌ها برای لیزرهای تپی).

ث- نتایج و مناسب‌ترین پارامترهای مشخص کننده نوع لیزر آزمون:

۱- بیان کنید که آیا طول‌موج‌ها در خلأ λ_0، طول‌موج‌ها در هوا λ_{air} یا طول‌موج‌های استاندارد (طول‌موج در هوای خشک تحت شرایط استاندارد) λ_{std} در ادامه گزارش شده‌اند.

۲- به‌جز حالتی که طول‌موج در خلأ مستقیماً اندازه‌گیری شده باشد، شرایط محیطی را با درستی مناسب مشخص کنید تا امکان تعیین درست ضریب شکست در طی اندازه‌گیری فراهم شود و برای λ_{std} شرایط استاندارد استفاده‌شده را به‌طور صریح بیان کنید.

۳- در صورت امکان، نمایش گرافیکی از چگالی طیفی $P_\lambda(\lambda)$ یا $Q_\lambda(\lambda)$ را در گزارش بگنجانید؛

۴- طول‌موج قله گسیل λ_{P}؛

۵- طول‌موج مرکزی $\bar{\lambda}$؛

۶- طول‌موج میانگین وزنی λ_{g}؛

۷- پهنای‌خط طیفی $\Delta\lambda_{\mathrm{L}}$؛

۸- ریشه میانگین مربعی پهنای‌باند طیفی $\Delta\lambda_{\mathrm{rms}}$؛

۹- پهنای‌باند تابش طیفی (گشتاور دوم) $\Delta\lambda$؛

۱۰- نرخ فرونشانی مُد جانبی SMS؛

۱۱- وابستگی دمایی $\delta\lambda_{\mathrm{T}}$؛

۱۲- وابستگی جریانی (در صورت کاربرد) $\delta\lambda_{\mathrm{c}}$؛

۱۳- توان/انرژی تابشی تپ (در صورت کاربرد) P، Q؛

۱۴- واریانس آلن (واریانس دو-نمونه‌ای) $\sigma_y^2(2,\tau)$.

ج- توضیحات (اختیاری).

پیوست الف

(آگاهی‌دهنده)

ضریب شکست هوا

الف-۱ تعیین فشار پاره‌ای بخار آب

برای تبدیل رطوبت نسبی و دماهای نقطه شبنم به فشار بخار آب، معادلـه فشـار اشـباع آب، $\boldsymbol{p_{sv}}$، برحسـب پاسکال، مطابق با معادله (الف-۱) می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد (به منبع [۴] کتاب‌نامه مراجعه شود):

$$p_{\mathrm{sv}} = F_P \times \exp\left(\mathrm{A}T^2 + \mathrm{B}T + \mathrm{C} + \mathrm{D}T^{-1}\right) \qquad \text{(الف-۱)}$$

که در آن:

F_{P} نشان ضریب تبدیل به ۱ Pa $(F_{\mathrm{P}} = 1\ \mathrm{Pa})$ است؛

A برابر با $۱٫۲۳۷۸۸۴۷ \times ۱۰^{-۵}\ \mathrm{K}^{-۲}$ است؛

B برابر با $-۱٫۹۱۲۱۳۱۶ \times ۱۰^{-۲}\ \mathrm{K}^{-۱}$ است؛

C برابر با ۳۳٫۹۳۷۱۱۰۴۷ است؛

D برابر با $-۶٫۳۴۳۱۶۴۵ \times ۱۰^{۳}\ \mathrm{K}$ است؛

T دمای مطلق، برحسب کلوین است.

مثال - برای بخار آب در دمای ۲۰ °C، فشار جوی کل، $p = 101325\ \mathrm{Pa}$ و رطوبت نسبی ٪ ۵۰، فشار پاره‌ای بخـار آب بـا معادله (الف-۲) ارائه می‌شود:

$$f = p_{\mathrm{sv}}(20\,^{\circ}C) \times 50\,\% = 1\,169{,}25\ Pa \qquad \text{(الف-۲)}$$

الف-۲ محاسبه ضریب شکست با درستی بالا در گستره وسیعی از طول‌موج‌ها و شرایط جوی

در مواردی که اندازه‌گیری‌ها به‌طور روزمره انجام می‌شود و/یا یک رایانه قابل برنامه‌ریزی در دسترس می‌باشد، ممکن است معادلات توسعه یافته توسط سیدُر[1] (به منبع [۵] کتاب‌نامه مراجعه شود) مفید باشند. این معادلات برای استفاده در کل گستره طول‌موجی فروسرخ نزدیک و مرئی و محدوده گسترده‌ای از شرایط جوی، با رطوبت نسبی بین ٪ ۰ تا ٪ ۱۰۰ و دماهای زیر صفر، توسعه یافته‌اند. شرایط استاندارد مشابه آنچه که در اینجا استفاده می‌شود، تعریف شده است.

1- Ciddor

الف-۳ شرایط استاندارد جایگزین

بنابر دلایل تاریخی، شرایط استاندارد مطابق با آنچه که در زیربند ۶-۴ تعریف شده است، انتخاب می‌شود. با این حال، در بیشتر آزمایشگاه‌های نوین دما حدود ۲۰°C ثابت نگه‌داشته می‌شود و دمای مرجع برای اندازه‌گیری‌های طول استانداردهای مواد در دمای ۲۰°C ثابت می‌شود. با تعریف شرایط استاندارد جدید، به ویژه دمای ۲۰°C، (به منبع [۴] کتاب‌نامه مراجعه شود) معادلات جایگزینی برای تعیین ضریب شکست به‌صورت تابعی از طول‌موج، دما، فشار، رطوبت و مقدار (حجم) CO_2 به‌دست آمده‌اند. این معادلات در گستره طول‌موج مرئی بسیار دقیق هستند و تصحیحاتی را که باید در هنگام کار با هوا در نزدیکی این شرایط استاندارد اعمال شوند، کاهش می‌دهند، به‌عنوان مثال در آزمایشگاهی با فشار جو به‌خوبی کنترل‌شده و دمای بسیار نزدیک به ۲۰°C.

پیوست ب

(آگاهی‌دهنده)

معیار انتخاب تک‌فام‌ساز توری‌دار و لوازم جانبی – کالیبراسیون

ب-۱ مقدمه

ب-۱-۱ کلیات

قابلیت‌های یک تک‌فام ساز توری‌دار به‌طور مستقیم به مشخصه‌های پراش و اندازه توری آن، ابعاد دستگاه نسبت به اندازه توری و گستره طیفی مورد نظر بستگی دارد.

در این‌جا، دستگاه‌های مجهز به توری‌های پراش بازتابی در نظر گرفته شده‌اند.

معادله توری به‌صورت معادله (ب-۱) قابل استفاده است:

$$\sin\alpha_1 + \sin\alpha_2 = kN\lambda \qquad (ب-۱)$$

که در آن:

k مرتبه پراش است؛

N تعداد شیارها بر واحد طول است؛

λ طول‌موج برحسب همان یکای طول است.

در بیشتر موارد، زاویه فرودی α_1 به زاویه پراش بسیار نزدیک است $\alpha_2 \approx \alpha_1 = \alpha$. بنابراین معادله (ب-۲) را خواهیم داشت:

$$2\ sin\alpha = kN\lambda \qquad (ب-۲)$$

ب-۱-۲ توان تفکیک نظری

توان تفکیک **نظری** با استفاده از مرتبه پراش k اُم تعیین می‌شود:

$$R_{tk} = k\ L_{\mathrm{e}} \qquad (ب-۳)$$

که در آن L_{e} اندازه به‌کار رفته به‌صورت موثر است (عمود بر شیارها).

ب-۱-۳ توان تفکیک عملی

توان تفکیک عملی نه تنها به توری، بلکه به مشخصه‌های مکانیکی و اپتیکی دستگاه و نیز گستره طیفی آن بستگی دارد. عموماً کاهش توان تفکیک نظری با ضریب کیفیت، F_{q}، توصیف می‌شود:

$$F_{\mathrm{q}} = F_{\mathrm{q1}}F_{\mathrm{q2}} \qquad (ب-۴)$$

چنان‌که توان تفکیک عملی در مرتبه k اُم می‌شود:

$$R_{\mathrm{pk}} = F_{\mathrm{q1}} F_{\mathrm{q2}} k\, RT_1 \qquad \text{(ب-۵)}$$

حساسیت به ابیراهی[1] اپتیکی به مقدار عدد دهانه تک‌فام‌ساز بستگی دارد و به‌صورت $L_{\mathrm{f}}/L_{\mathrm{e}}$ تعریف می‌شود، که L_f فاصله کانونی اپتیک موازی‌کننده است. مقادیر نوعی متناظر با ضریب کیفیت F_{q1} عبارتند از:

$F_{\mathrm{q1}} = 1$ اگر $L_f/L_e > 10$

$F_{\mathrm{q1}} = 0{,}7$ اگر $4 < L_f/L_e < 10$

$F_{\mathrm{q1}} = 0{,}5$ اگر $L_f/L_e < 4$

میزان حساسیت به عیوب سطحی قطعات اپتیکی به گستره طیفی بستگی دارد. مقادیر نوعی متناظر با ضریب کیفیت F_{q2} عبارتند از:

$F_{\mathrm{q2}} = 0{,}9$ اگر $\lambda > 0{,}7\mu\mathrm{m}$

$F_{\mathrm{q2}} = 0{,}5$ اگر $0{,}4\mu\mathrm{m} < \lambda < 0{,}7\mu\mathrm{m}$

$F_{\mathrm{q2}} = 0{,}33$ اگر $\lambda < 0{,}4\mu\mathrm{m}$

در عبارت فوق برای توان تفکیک فرض می‌شود که عرض شکاف ورودی و شکاف خروجی (یا اگر از یک آرایه CCD استفاده شود، اندازه پیکسل آشکارساز) می‌تواند به کوچکی اندازه اعمال‌شده با حد پراش، $(\lambda L_{\mathrm{f}})/(L_{\mathrm{e}}\cos\alpha)$، باشد. ممکن است انجام این کار در ناحیه طول‌موج کوتاه دشوار باشد. همچنین برای افزایش اندازه تصویر تک‌فام‌ساز، گاهی اوقات پس از یک سامانه اپتیکی بزرگ‌کننده از آرایه CCD استفاده می‌شود. تأثیرات عملی این ملاحظات ممکن است شامل ضریب کیفیت F_{q2} نیز بشود.

ب-۱-۴ تکفام‌ساز توری‌دار تمام‌نگاری[2]

بازده درخشندگی[3] توری‌های تمام‌نگاری تنها در مرتبه پراش $k = 1$ تقریباً ثابت (حدود ٪ ۳۰ تا ٪ ۵۰) است. بنابراین گستره طیفی یک تک‌فام‌ساز مجهز به توری تمام‌نگاری تنها با چرخش‌های مکانیکی مجاز پایه، α_{min} و α_{max}، محدود می‌شود. به همین ترتیب:

$$\lambda_{min} < \lambda < \lambda_{max} \qquad \text{(ب-۵)}$$

که در آن:

$$N\,\lambda_{min} = 2\,\sin\alpha_{min} \qquad \text{(ب-۶)}$$

و

1- Aberrations
2- Holographic
3- Luminous

$$N\,\lambda_{max} = 2\ \sin\alpha_{max} \qquad (ب-۷)$$

ب-۱-۵ تکفام ساز توری‌دار فروزشی[1]

زاویه فروزش[2] توری‌های زاویه‌دار به شیب الگوی شیار نسبت به صفحه زیرلایه بستگی دارد. زاویه فروزش α_{B} مطابق با زاویه فرودی است که بیشنه بازدهی را برای پراش مرتبه اول می‌دهد. این زاویه به طول‌موج، که به‌عنوان طول‌موج فروزش[3] λ_{B} تعریف می‌شود، بستگی دارد که بازدهی آن در عملکرد عادی تک‌فام‌ساز بیشینه است.

$$2\sin\alpha_{\mathrm{B}} = N\,\lambda_{\mathrm{B}} \qquad (ب-۸)$$

سازندگان تغییرات بازدهی نسبت به طول‌موج را می‌دهند، به‌طور نمونه:

$\mathrm{S} = 0{,}5$ برای $\lambda = 3/2\,\lambda_{\mathrm{B}}$ و $\lambda = 2/3\,\lambda_{\mathrm{B}}$

$\mathrm{S} = 0{,}9$ برای $\lambda = \lambda_{\mathrm{B}}$

علاوه بر این، توری فروزشی[4] می‌تواند برای مراتب بالاتر پراش به‌کار رود. منحنی بازدهی برحسب زاویه تغییر نمی‌کند، به‌طوری که بازدهی بهینه، حول طول‌موج λ_{B}/k یافت می‌شود.

توان تفکیک عملی می‌شود:

$$R_{\mathrm{pk}} = kF_{\mathrm{q}}\,RT_1 = kF_{\mathrm{q}}N\,L_{\mathrm{e}} \qquad (ب-۹)$$

حدود طیفی عملی برای تک‌فام‌سازهای توری‌دار شیاری نیز وجود دارند، که طبق معادلات (ب-۱۰) و (ب-۱۱) به انتخاب مرتبه پراش بستگی دارند:

$$k\,N\,\lambda_{min} = 2\ \sin\alpha_{min} \qquad (ب-۱۰)$$

و

$$k\,N\,\lambda_{max} = 2\ \sin\alpha_{max} \qquad (ب-۱۱)$$

ب-۲ انتخاب تک‌فام‌ساز

کیفیت اطلاعات طیفی در مورد باریکه لیزر آزمون، به مشخصات تک‌فام‌ساز انتخاب شده برای آن آزمون بستگی دارد. از جمله پرسش‌هایی که باید مورد توجه قرار گیرد، عبارتند از:

— کدام درستی برای مقادیر طول‌موج‌ها مورد نیاز است؟

— کدام توان تفکیکی برای مشخص کردن پهنای‌باند طیفی مورد نیاز است؟

1- Blazed grating monochromator
2- Blaze angle
3- Blaze wavelength
4- Blazed grating

توصیه می‌شود عدم قطعیت در مقادیر طول‌موج، علاوه بر عدم قطعیت در موقعیت، درستی مطلق در خوانش شمارنده یا نمایش طول‌موج را در نظر بگیرید.

این درستی آخری (نمایش طول‌موج)، به طور کلی، از مرتبه ۱/۶ پهنای‌باند مؤثر $\Delta\lambda_\alpha$ است، که از توان تفکیک عملی به دست می‌آید (به زیربند ب-۱-۳ را مراجعه شود).

درستی مطلق در خوانش‌ها به کیفیت مکانیکی دستگاه بستگی دارد؛ که توصیه می‌شود کالیبره شود (به زیربند ب-۳ مراجعه شود).

ب-۳ کالیبراسیون تکفام‌ساز

عملیات کالیبراسیون، بخشی جدایی‌ناپذیر از روش اندازه‌گیری است و توصیه می‌شود در برگ‌داده گزارش آزمون ذکر شود.

عملیات کالیبراسیون باید به‌صورت دوره‌ای بر اساس دستورالعمل‌های سازنده تک‌فام‌ساز انجام شود. این کار مقادیر واقعی پهنای‌باند طیفی مؤثر $\Delta\lambda_\alpha$ (یا ضریب کیفیت F_q) و درستی خوانش را به دست می‌دهد.

پیوست پ

(آگاهی‌دهنده)

معیارهایی برای انتخاب تداخل‌سنج فابری-پرو

تداخل‌سنج فابری-پرو (FP) ابزاری معتبر برای اندازه‌گیری توزیع طیفی لیزر موج پیوسته یا تپی است. تداخل‌سنج فابری-پرو روبشی یا اتالن[1] فابری-پرو ثابت، هر دو برای لیزرهای با خلوص طیفی خوب مناسب هستند. تداخل‌سنج فابری-پرو روبشی ممکن است برای لیزرهای با خلوص طیفی بالا مورد استفاده قرار گیرد.

ویژگی اصلی تداخل‌سنج FP گستره طیفی آزاد آن، σ_{FSR}، است که بر حسب عدد موج (cm^{-1}) مطابق با معادله (پ-۱) داده می‌شود:

$$\sigma_{\mathrm{FSR}} = 1/2nD \qquad (پ-۱)$$

که در آن:

N ضریب شکست محیط اپتیکی است؛

D فاصله، برحسب سانتیمتر، بین دو آینه با بازتابندگی بالا است.

در اصل، مشخصه‌های طیفی توسط تداخل سنج FP در فاصله عدد موج $\sigma = 1/\lambda$، تحلیل می‌شود. توصیه می‌شود تبدیل به فاصله طول‌موجی با استفاده از معادله‌های (پ-۲) یا (پ-۳) انجام شود:

$$P_\sigma(\sigma) = \lambda^2 P_\lambda(\lambda) \qquad (پ-۲)$$

یا

$$Q_\sigma(\sigma) = \lambda^2 Q_\lambda(\lambda) \qquad (پ-۳)$$

به‌ویژه برای اکثر موارد عملی $\Delta\lambda = \lambda^2\Delta\sigma$ است.

مشخصه دوم تداخل‌سنج FP، ظرافت آن، F، است که از بازتابندگی، R، آینه‌های تداخل‌سنج FP، مطابق با معادله (پ-۴) به‌دست می‌آید:

$$F = \pi \frac{\sqrt{R}}{1-R} \qquad (پ-۴)$$

بنابراین پهنای‌ذاتی تشدید کاواک FP می‌شود:

$$\sigma = (\sigma_{FSR})/F \qquad (پ-۵)$$

و توان تفکیک تداخل‌سنج مطابق مطابق با معادله (پ-۶) به‌دست می‌آید:

1- Etalon

$$\frac{\sigma}{\delta\sigma} = \frac{2nD\,\pi\sqrt{R}}{\lambda(1-R)} \qquad (پ-۶)$$

توصیه می‌شود برای یک تجزیه و تحلیل مناسب از توزیع طیفی، σ_{FSR} و ظرافت به‌گونه‌ای انتخاب شوند که پهنای‌باند مورد انتظار در فاصله عددموج، $\Delta\sigma$، شرایط زیر را برآورده کند:

$$\Delta\sigma > (\sigma_{\mathrm{FSR}})/F \qquad \text{و} \qquad \sigma_{\mathrm{FSR}} > 3\,\Delta\sigma$$

تحقق این شرایط نیازمند دستگاه‌های با ظرافت بالاست.

روبش عددموج تشدید کاواک می‌تواند با ورود مستمر هوای خشک یا یک گاز خنثی در کاواک (روبش ضریب شکست n) و یا با جاروب فاصله نسبی D بین دو آینه، به‌عنوان مثال توسط مبدل پیزوالکتریک یا توسط زاویه، انجام شود.

کتاب‌نامه

[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