تداخل‌سنج

مریم اویسی فُردویی
دبیر فیزیک دبیرستان شاهد

مقدمه

تداخل نور هنگامی رخ می‌دهد که نور از منبع تا آشکارساز مسیرهای متفاوتی را طی کند و اختلاف طول مسیر پرتوها کمتر از طول همدوسی زمانی منبع باشد. آنگاه شدت در آشکارساز کمتر، برابر و یا بیشتر از مجموع شدت پرتوها خواهد شد. پدیدهٔ تداخل اولین بار در قرن هفدهم مورد توجه بویل و هوک قرار گرفت و در قرن هجدهم یانگ با آزمایش دو شکافی خود توانست وجود تداخل را اثبات کند. بعدها مایکلسون در سال ۱۸۸۱ تداخل‌سنج معروف خود را طراحی کرد که کاربردهای وسیعی در اثبات عدم وجود اتر، آزمون اپتیکی و نجوم پیدا کرد.

با اختراع لیزر، آشکارسازهای دوبعدی مانند CCD و رایانه تحولات زیادی در تداخل‌سنجی صورت گرفت. از جمله کاربردهای جدید تداخل‌سنجی در عصر حاضر می‌توان به استفاده از تداخل‌سنج در آشکارسازی امواج گرانشی، آزمون قطعات اپتیکی بزرگ تا چند متر، تلسکوپ‌های دوقلو جهت افزایش قدرت تفکیک، با استفاده از تداخل نور دو تلسکوپ، و آزمون سطوح غیرکروی نام برد.

کلیدواژه‌ها: تداخل‌سنج، فریز، همدوسی، مایکلسون

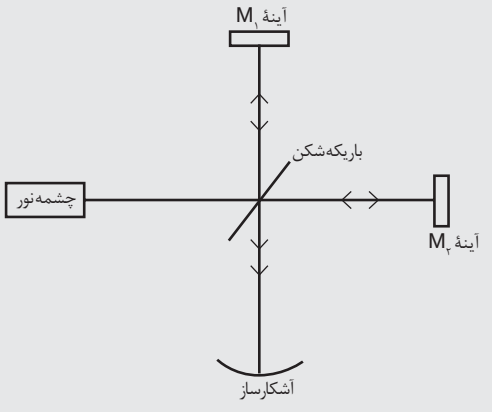
۱. اصول تداخل‌سنجی

تداخل‌سنجی در واقع روش اندازه‌گیری اختلاف فاز دو موج با استفاده از پدیدهٔ تداخل است. مهم‌ترین مفهوم در تداخل‌سنجی جبهه موج است که مکان هندسی نقاطی با فاز یکسان است. از برهم‌نهی دو جبهه موج که شرایط تداخل را دارا باشند، فریز تداخلی یا نقش تداخلی تولید می‌شود و فریز تداخلی مکان هندسی نقاطی با فاز یکسانِ است.

شرایط تداخل عبارت است از اینکه اولاً اختلاف راه نوری دو موج کمتر از طول همدوسی باشد، و ثانیاً دو موج هم قطبش باشند.

همدوسی زمانی

برایِ نشان دادن و اندازه‌گیری همدوسی زمانی یک چشمه اصولاً از تداخل سنج مایکلسون استفاده می‌شود.



▲ شکل ۱. طرح ساده‌ای از تداخل‌سنج مایکلسون

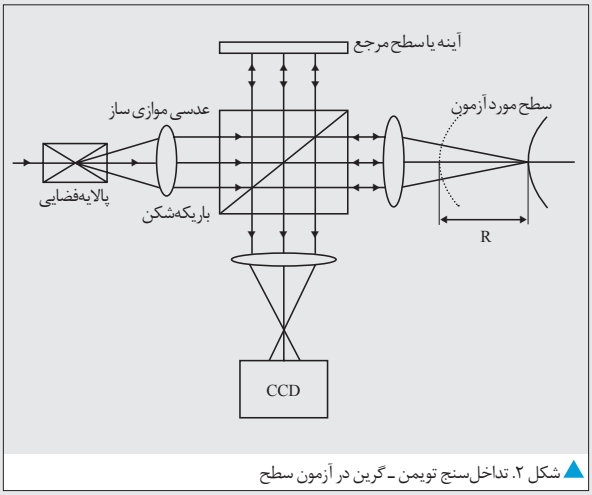
در صورتی‌که بین دو مسیر اختلاف زمانی وجود داشته باشد آنگاه مطابق شکل ۱، بسته‌های موج همپوشانی کامل نخواهد داشت و لذا نمایانی فریزها کاهش می‌یابد. اندازه یا پهنای بسته موج‌ها با پهنای طیف منبع نور رابطهٔ معکوس دارد و از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$Lc = \frac{\lambda^2}{2\pi\Delta\lambda}$$

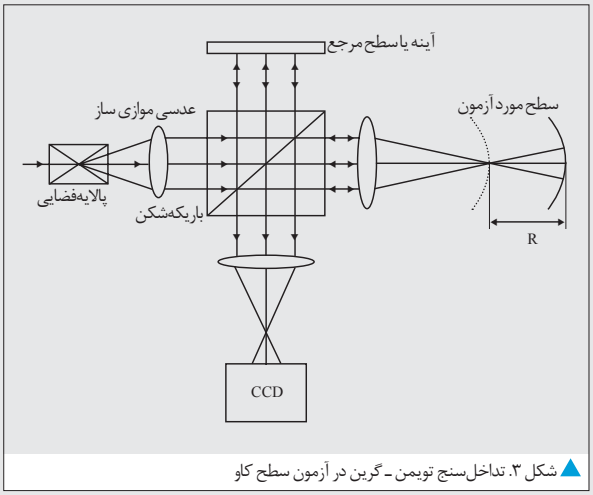
۲. تداخل‌سنج‌های متداول در آزمون قطعات اپتیکی

۲-۱. تویمن گرین

شکل ۲ آرایهٔ تداخل‌سنج تویمن ـ گرین در آزمون سطح کروی محدّب و اندازه‌گیری شعاع خمیدگی آن را نشان می‌دهد. تداخل‌سنج تویمن ـ گرین شامل دو بازوی مرجع و آزمون است. که عموماً بازوی مرجع شامل یک سطح تخت مرجع با همواری قابل قبول است. نکته قابل توجه در این تداخل‌سنج این است که طول دو بازوی آن را می‌توان برابر کرد به‌طوری که منبع لیزر کوتاه همدوس نیز قابل استفاده باشد. با جابه‌جایی سطح مورد آزمون در امتداد محور اپتیکی، در دو مکان نور برگشتی به تداخل‌سنج مجدداً موازی می‌شود.



شکل ۲. تداخل‌سنج تویمن ـ گرین در آزمون سطح



شکل ۳. تداخل‌سنج تویمن ـ گرین در آزمون سطح کاو

اختلاف فاصله مکانی‌ای دو مکان معادل شعاع خمیدگی سطح است. این روش برای سطوح کاو نیز به روش شکل ۳ به کار می‌رود. در این تداخل‌سنج فرض بر این است که عدسی مرکب همگراکننده دارای کیفیت قابل قبول باشد.

۲-۲ فیزو

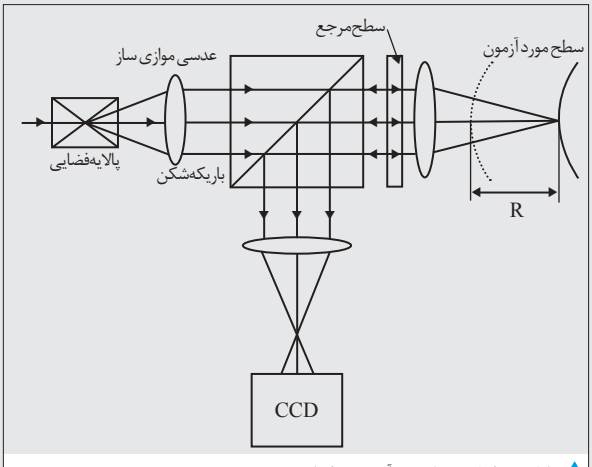
تداخل‌سنج فیزو از نوع تداخل‌سنج‌های دارای مسیر مشترک است. در این تداخل‌سنج‌ها هم مرجع و هم باریکهٔ باز تابیده از قطعهٔ مورد آزمون، در قسمت اعظم تداخل‌سنج، مسیر مشترکی را طی می‌کنند که این امر سبب می‌شود حساسیت به ارتعاش محیطی و متلاطم هوا کمتر باشد. به همین دلیل تداخل‌سنج فیزو برای محیط‌های کارگاهی بسیار مناسب است.

این تداخل‌سنج علاوه بر آزمون سطوح تخت، مطابق شکل ٤ و برای آزمون سطوح کوژ و کاو نیز استفاده می‌شود. سطح مرجع یک تیغهٔ شیشه‌ای است که یک سطح آن دارای کیفیت همواری قابل قبول باشد. البته فرض بر این است که سطوح مورد آزمون نیز ضریب بازتابی حدود شیشه داشته باشند. در غیر این صورت نمایانی فریزها کاهش می‌یابد. در این تداخل‌سنج طول همدوسی زمانی منبع باید بیشتر از دو برابر اختلاف راه نوری سطح مورد آزمون مرجع باشد.

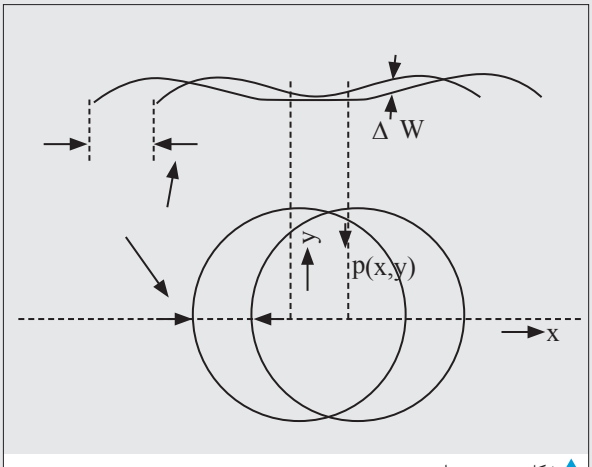
تداخل‌سنج فیزو در آزمون سطوح عدسی‌های کوچک یا ریزعدسی نیز کاربرد دارد.

۲-۳ تداخل‌سنج چینشی جانبی

اساس این تداخل‌سنج، ایجاد یک نسخه از جبههٔ موج و جابه‌جایی آن به طور جانبی نسبت به اولی و تداخل این دو بار با هم است (شکل ۵) به عبارتی موج با نسخه خودش تداخل داده می‌شود و به جبهه موج مرجع نیاز نیست. چیدمان‌های مختلفی برای ایجاد چینش جانبی وجود دارد که از تیغه شیشه‌ای برای ایجاد چینش استفاده می‌شود و یک سطح تخت مورد آزمون قرار می‌گیرد. بازوی همانند تداخل‌سنج‌های بخش‌های پیشین طراحی می‌شود لذا آن را تکرار نمی‌کنیم.



شکل ٤. تداخل‌سنج فیزو در آزمون سطح کوژ

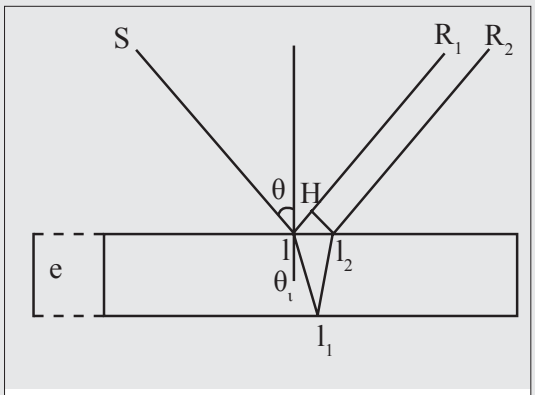


شکل ۵. چینش جانبی دو جبهه موج

اگر مقدار جابه‌جایی عرضی کوچک باشد در واقع اختلاف فاز دو نقطهٔ مجاور از سطح موج آزمون با این دو روش اندازه‌گیری می‌شود که با تقسیم آن بر مقدار جابه‌جایی مشتق توزیع فاز موج آزمون حاصل می‌شود. به عبارت دیگر در این تداخل‌سنج مشتق سطح موج از تحلیل فریزهای تداخلی به دست می‌آید.

۲ـ۴ تداخل‌سنجی با تیغه شیشه‌ای با سطوح متوازی

فرمول‌بندی و مطالعه دقیق این نوع تداخل‌سنج اولین بار توسط دکتر توسلی از دانشگاه تهران صورت گرفت. [۱] این تداخل‌سنج مطابق شکل ٦ شامل یک تیغه شیشه‌ای شفاف با سطوح موازی و یک چشمه نور است که در آن ضخامت تیغه e و ضریب شکست آن N است.



شمل ٦. تداخل‌سنجی با یک تیغه شیشه‌ای شفاف

و فاصله دو پرتو بازتابیده از هم از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$L = \frac{eSin2\theta}{(n^2 - Sin^2\theta)^{1/2}}$$

با قرار دادن یک چشمه خطی یا یک شکاف در محل چشمهٔ S، روی صفحه فریزهای دو شکافی یانگ مشاهده خواهد شد.

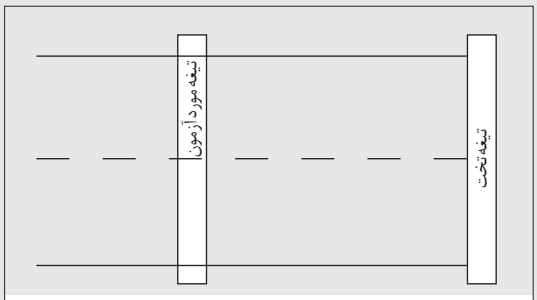
۳. چند نمونه از کاربرد تداخل‌سنج‌ها

۳ـ۱ آزمون سطوح کروی

بازوی آزمون نمایش داده شده در شکل ۲ و شکل ۳ روش آزمون سطوح کروی و اندازه‌گیری شعاع انحنای آن‌ها را نشان می‌دهد. آزمون سطوح کوژ حداکثر با قطری برابر با اندازه قطر باریکه مرجع امکان‌پذیر است، در حالی که برای آزمون سطوح کاو این محدودیت وجود ندارد. با جابه‌جا کردن سطح کروی و قرار دادن سطح آن در مکان کانون عدسی دوباره فریزهای تداخلی به تعداد کم ایجاد می‌شود. با اندازه‌گیری دقیق میزان جابه‌جایی سطح کروی نسبت به مکان قبل می‌توان شعاع خمیدگی سطح را اندازه‌گیری کرد، در این اندازه‌گیری دقت اندازه‌گیری فاصله کانونی به دقت اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی بستگی دارد.

۳ـ۲ آزمون همگنی ضریب شکست یا ضخامت تیغه شیشه‌ای

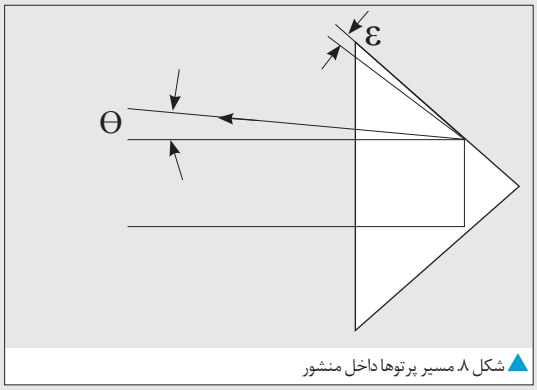
برای آزمون همگنی تیغه شیشه‌ای به روش شکل ۷، تیغهٔ مورد آزمون در مسیر باریکه قرار می‌گیرد و باریکه دو بار از تیغه عبور می‌کند، که در نتیجه حساسیت تداخل‌سنج دو برابر می‌شود. با این روش اگر دو سطح تیغه موازی و صاف باشد، می‌توان ناهمگنی در محیط تیغه را در فریزهای تداخلی مشاهده کرد. تیغهٔ تخت موجود در طرح مانند تیغهٔ مرجع دارای سطح صاف با دقت است. این تیغه باید عمود بر باریکهٔ فرودی باشد تا باریکهٔ بازتابی لیزر همان مسیر قبلی را در جهت معکوس طی کند.



شکل ۷. آزمون همگنی تیغه شیشه‌ای

۳ـ۳ آزمون منشور

با قرار دادن منشور مطابق شکل زیر، دقت زاویه ۹۰ درجه اندازه‌گیری می‌شود. البته منشور باید متساوی‌الاضلاع باشد. در صورتی که زاویهٔ ۹۰ درجه دقیق نباشد، فریزهای تداخلی دو نیمه هیچ‌گاه موازی نمی‌شوند. زیرا باریکه لیزر ورودی از بالای منشور از نیمه پایین منشور و باریکه ورودی از پایین منشور از نیمه بالا خارج می‌شود. حال اگر زاویهٔ منشور ۹۰ درجه نباشد، این دو باریکه خروجی موازی یکدیگر نخواهند بود و در نتیجه یکی از دو باریکه با باریکهٔ مرجع زاویه‌ای متفاوت با دیگری دارد که نتیجهٔ آن ایجاد زاویه بین فریزهای تداخلی است. از رابطه زیر خطای زاویهٔ ۹۰ درجه، محاسبه می‌شود:



شکل ۸. مسیر پرتوها داخل منشور

منابع

1.M.T. Tavassoly, A simple method for measuring the refractive index of a plate, Optics and Lasers in Engineering 35 (2001) 397 - 402 Ehsan

2. A.Akhlaghi, Ahmad Darudi, and M. Taghi Tavassoly, Reconstructing the phase distribution of two Interfering wavefronts by analysis of their nonlocalized fringes with an interactive method, Optics Express, Vol. 19, Issue 17, pp.15976-15981,2011.