

مروری بر روش‌های اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت هدایتی مواد توده‌ای و فیلم نازک

مهدی جعفری وردنجانی^{*۱}

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

چکیده

هدایت حرارتی و رسانایی حرارتی تماسی نقش مهمی را در امر طراحی محصولات حرارتی مهندسی ایفا می‌کنند. تا به امروز انواع مختلفی از تکنیک‌های اندازه‌گیری مواد جامد و فیلم نازک شناخته شده است. به طور کلی این روش‌ها در دو دسته پایدار و گذرا تقسیم‌بندی می‌شوند که هر یک با توجه به ماهیت و دقت مورد نیاز اندازه‌گیری، نسبت به نمونه مورد نظر، مورد استفاده قرار می‌گیرند. به طور کلی رایج‌ترین چالش تکنیک‌های اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت رسانشی در دستیابی به خطای کمتر از ۵ درصد مربوط می‌شود که به واسطه انتقال حرارت توده‌ای و یا تماسی ایجاد می‌شود. از این جهت انتخاب روش اندازه‌گیری مناسب به منظور اندازه‌گیری کمی و دقیق نمونه مورد نظر نیاز به دانشی در زمینه ویژگی‌های ترموفیزیکی، هندسه و روش آماده‌سازی نمونه دارد. همچنین درک اصول و محدودیت‌های روش‌های آزمایش و منابع خطای احتمالی که نتایج نهایی را تحت تأثیر قرار می‌دهند، از اهمیت بالایی برخوردار است. در این راستا در مطالعه حاضر، پس از بررسی وجوه مختلف روش‌های اندازه‌گیری پایدار و گذرا شامل نوع نمونه، دقت قابل دستیابی، هزینه‌ها، فعالیت‌های مورد نیاز جهت آماده‌سازی، و سایر موارد مرتبط، مقایسه‌ای بین آنها صورت گرفته، در نهایت با توجه به پارامترهای زمان اندازه‌گیری، اندازه مناسب نمونه، هزینه، و پیچیدگی تکنیک، روش مناسب با توجه به نمونه مورد نظر مورد توصیه قرار گرفته است.

کلیدواژگان

ضریب انتقال حرارت، فیلم نازک، مواد توده‌ای، انتقال حرارت تماسی

A Review on Heat Transfer Coefficient Measuring Methods in Bulk and Film Specimens

Mehdi Jafari Vardanjani^{1*}

1- Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

Abstract

Thermal conductivity and contact thermal conductivity play an important role in the design of engineering thermal products. To date, various types of solid and thin film measurement techniques are known. In general, these methods are divided into two categories: stable and transient, each of which is used according to the nature and accuracy required of the measurement, relative to the target test sample. In general, the most common challenge of the techniques for measuring the conductive heat transfer coefficient is related to achieving an error of less than 5%, which is caused by bulk or contact heat transfer. For this reason, choosing the appropriate measurement method for quantitative and accurate measurement of the target sample requires knowledge in the field of thermophysical characteristics, geometry and sample preparation method. It is also important to understand the principles and limitations of testing methods and possible sources of error that affect the final results. In this regard, in the present study, after examining the various aspects of stable and transient measurement methods, including the type of sample, achievable accuracy, costs, activities required for preparation, and other related matters, a comparison has been made between them; finally, the appropriate method has been recommended according to the target sample considering the parameters of measurement time, appropriate sample size, cost, and complexity of the technique.

Keywords

Heat transfer coefficient, Thin film, Bulk materials, Conductivity

۱- مقدمه

با ایجاد تفاضل دمایی ثابت مستقل از زمان اندازه‌گیری می‌شوند. در روش‌های گذرا معمولاً میزان پراکندگی انرژی نمونه به صورت وابسته به زمان اندازه‌گیری می‌شود. هر یک از این روش‌ها بسته به ویژگی‌های حرارتی، پیکربندی نمونه، و دمای اندازه‌گیری، با توجه به معایب و مزایای خود برای محدوده خاصی از مواد قابل استفاده هستند.

مواد نازک یا فیلمی شکل با ضخامت‌هایی بین چند نانومتر تا چندصد میکرون به صورت گسترده‌ای در سامانه‌های مهندسی کاربرد دارند. این مواد جهت ارتقای عملکرد مکانیکی، نوری، الکتریکی، و حرارتی در صنایع ریزپردازنده [۹]، فوتونیک [۱۰]، سلول‌های خورشیدی [۱۱] و ترموالکترونیک [۱۲] به کار می‌روند. این مواد فیلمی ممکن است به همراه یک زیرلایه یا به صورت چندلایه، یا حتی آزاد مورد استفاده قرار گیرند. معمولاً رسانایی حرارتی فیلم‌های نازک به صورت ناهمسان و وابسته به ضخامت هستند. همچنین روش آماده‌سازی و زیرلایه فیلم نیز از عوامل مؤثر بر رسانش این مواد به شمار می‌رود. معمولاً روش‌های اندازه‌گیری ضریب رسانش حرارتی مواد توده‌ای به دلیل ابعاد بزرگ، برای مواد نازک و فیلم قابل استفاده نیستند. بنابراین با توجه به پیشرفت‌های حاصل در زمینه انتقال حرارت در ابعاد میکرو و نانو طی ۳۰ سال اخیر، روش‌های خاصی در این زمینه ابداع شده است [۱۳-۱۸]. این روش‌ها عمدتاً شامل تکنیک‌های، و بازتاب حرارتی می‌شوند.

رسانایی حرارتی (k) قابلیت رسانش حرارت یک ماده را نشان می‌دهد. این پارامتر به انرژی حرارتی (Q) عبور کننده از داخل ضخامت (L) در جهت عمود بر سطح (A) وابسته است. با فرض پایداری شرایط، تفاضل دمای ایجاد شده در طرفین ضخامت نمونه ($T_h - T_c$) نیز بر مقدار این پارامتر مؤثر می‌باشند. محدوده مقادیر ضریب رسانایی حرارتی (k) برای مواد جامد، در دمای اتاق، بین $0.015 \frac{W}{m \cdot K}$ تا $3000 \frac{W}{m \cdot K}$ شناسایی شده است. این پارامتر می‌تواند به صورت تابع دما یا تابع جهت شار حرارت نیز باشد.

رسانایی حرارتی تماسی نیز به نسبت شار حرارتی عبورکننده بین دو سطح تماس بر تفاضل دمایی آن دو سطح گفته می‌شود. این موضوع برای مواد جامد اغلب به دلیل زبری سطوح تماس رخ می‌دهد. این پارامتر متأثر از عواملی چون زبری سطح، سختی سطح، ناخالصی‌ها، ضریب رسانایی حرارتی دو سطح تماس، و فشار تماس می‌باشد [۱]. برای مواد نازک (فیلم)، موضوع رسانش تماسی و افت دمای ناشی از آن به استحکام چسبندگی و تفاوت مواد بستگی دارد. در این راستا باید توجه نمود که مقاومت تماسی حرارتی و مقاومت مرزی حرارتی به ترتیب جهت توصیف قابلیت رسانش حرارتی سطح تماس مواد توده‌ای و فیلم نازک به کار می‌روند [۲، ۳]. شناخت رسانش حرارتی و رسانش حرارتی تماسی از ملزومات طراحی سامانه‌های حرارتی به شمار می‌روند. در این مقاله، روش‌های اندازه‌گیری این پارامتر جهت مشخصه‌یابی رسانش حرارتی و رسانش حرارتی تماسی مواد جامد توده‌ای و فیلمی مرور و مقایسه شده‌اند تا با توجه به پارامترهای زمان اندازه‌گیری، اندازه مناسب نمونه، هزینه، و پیچیدگی تکنیک، روش مناسب با توجه به نمونه مورد نظر مورد توصیه قرار گیرد.

از دهه ۱۹۵۰ میلادی تلاش‌های گسترده‌ای جهت تشخیص ضریب رسانش حرارتی و رسانش حرارتی تماسی مواد در مواد توده‌ای صورت گرفته است [۴-۸]. برخی از رایج‌ترین روش‌های مورد استفاده را که می‌توان آنها را در گروه کلی روش پایدار و گذرا جای داد نشان می‌دهد. در روش‌های حالت پایدار خواص حرارتی

جدول ۱- روش‌های مشخصه‌یابی حرارتی رایج مورد اشاره

نمونه	پایدار	ناپایدار	
		فرکانس	زمان
توده‌ای	• مطلق		
	• مقایسه‌ای	توان پالسی	
	• شعاعی		
	• موزی		
فیلم	حرارتی و الکتریکی	• 3ω	• بازتاب حرارتی
		• بازتاب حرارتی	

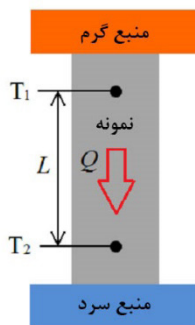
معیارهای مختلفی جهت طبقه‌بندی روش‌های اندازه‌گیری و

پایدار، در طول مشخصی از نمونه اندازه‌گیری می‌شود. حسگرهای دما می‌توانند از نوع ترموکوپل یا دماسنج باشند. به دلیل وسعت کاربرد و دقت بالای ترموکوپل‌ها معمولاً از این نوع حسگر برای اندازه‌گیری دما استفاده می‌شود. خطای اندازه‌گیری دما (Δ) ناشی از حسگر دما باید کمتر از ۱٪ باشد. بنابراین ضریب انتقال حرارت (k) را می‌توان به کمک قانون فوریه محاسبه نمود:

$$k = \frac{QL}{A\Delta T} \quad (1)$$

$$Q = p - Q_{loss} \quad (2)$$

که در آن Q مقدار جریان حرارتی داخل نمونه، A سطح مقطع نمونه، L فاصله بین دو حسگر دما، ΔT تفاضل دمای موجود بین دو حسگر دما، p توان گرمایشی به کار رفته در سمت منبع حرارتی و Q_{loss} اتلاف حرارتی ناشی از تابش، رسانش و همرفت در محیط است.



شکل ۲- طرح‌واره روش مطلق

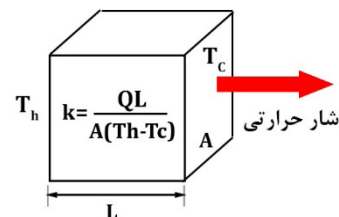
چالش اصلی روش مطلق در تعیین شار حرارتی Q نمونه، در ضمن وجود اتلاف حرارتی Q_{loss} و اندازه‌گیری دقیق تفاضل دما ΔT است. اتلاف حرارتی شامل همرفت و تابش به محیط اطراف و رسانش از طریق مفتول‌های ترموکوپل است. عموماً اتلاف حرارتی باید طوری کنترل شود که ۲٪ کل شار حرارتی در محیط باشد. جهت کمینه‌سازی همرفت و تابش، اکثر اندازه‌گیری‌ها در خلأ و حفاظت تابشی انجام می‌شود. همچنین سعی می‌شود مفتول‌های ترموکوپل با ضریب هدایت پائین و سطح مقطع کم انتخاب شود. مهم‌ترین معایب روش مطلق شامل موارد زیر است:

محاسبه ضریب انتقال حرارت رسانشی مواد در نظر گرفته شده است که شامل معیارهای ایستایی یا دینامیکی بودن روش، تماسی یا غیر تماسی بودن روش، پایدار یا ناپایدار بودن مواد و سایر موارد می‌شود. در اینجا معیار در نظر گرفته شده جهت طبقه‌بندی و بحث روی این روش‌ها بر اساس ماهیت نمونه در نظر گرفته شده است که می‌تواند توده‌ای یا فیلم نازک باشد. بر این اساس سایر معیارهای مذکور نیز در قالب این طبقه‌بندی مورد اشاره و بحث قرار گرفته است. به این ترتیب ویژگی‌ها، روابط و جنبه‌های مختلف روش‌های اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت تماسی مورد بحث قرار گرفته، در پایان مقایسه‌ای از لحاظ زمان مورد نیاز و اندازه نمونه قابل اندازه‌گیری انجام شده است.

۲- مواد توده‌ای^۱

۱-۲- روش حالت پایدار

در حالت پایدار (شکل ۱)، رسانایی حرارتی تماسی با اندازه‌گیری تفاضل دمایی یک فاصله معین، در شرایط شار حرارتی پایدار Q داخل نمونه تعیین می‌شود. این روش شامل تکنیک‌های مطلق، مقایسه‌ای، شعاعی و موازی می‌شود.



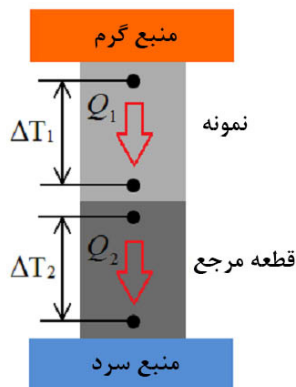
شکل ۱- طرح‌واره مکانیزم انتقال حرارت رسانشی

پایدار

۱-۱-۲- تکنیک مطلق

روش مطلق معمولاً برای نمونه‌های منشوری یا استوانه‌ای استفاده می‌شود. در زمان انجام اندازه‌گیری، نمونه مورد آزمایش بین یک منبع حرارتی و یک دافع حرارت قرار داده می‌شود (شکل ۲). نمونه توسط یک منبع حرارتی با توان ورودی ثابت معلوم گرم شده، افت دمای حاصل (ΔT)، پس از توزیع دمایی حالت

است. در این تکنیک به جای قطعه استاندارد، از یک مبدل شار حرارتی استفاده می‌شود. بدین ترتیب با کالیبراسیون مناسب مبدل شار حرارتی، به کمک یک نمونه با ضریب انتقال حرارتی معلوم، می‌توان ضریب انتقال حرارتی نمونه مورد نظر را به سادگی و به کمک قانون فوریه محاسبه نمود. از این روش معمولاً برای موادی با ضریب انتقال حرارت پائین، از قبیل مواد عایق کاری ساختمان استفاده می‌شود.



شکل ۳- طرح‌واره روش مقایسه‌ای

۲-۱-۳- تکنیک شعاعی

دو روش پایدار شرح داده شده فوق از یک پیکربندی طولی جهت اندازه‌گیری ضریب رسانایی حرارتی نمونه‌ها استفاده می‌کنند. این امر برای دماهای پائین قابل قبول است. اما، برای اندازه‌گیری در دماهای خیلی بالا (مثلاً بالای ۱۰۰۰k)، اتلاف حرارتی ناشی از تابش از طریق گرم‌کن و سطوح نمونه قابل چشم‌پوشی نیست و می‌تواند در هنگام محاسبه شار حرارتی نمونه باعث ایجاد عدم قطعیت شود. جهت غلبه بر این مشکل، نمونه‌های استوانه‌ای در روش شار حرارتی شعاعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این روش نمونه به صورت داخلی، در محور خود گرم شده، گرما همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است به صورت شعاعی به خارج جریان می‌یابد. یک شیب دمایی پایدار در جهت شعاعی ایجاد می‌شود. همچنین از ترموکوپل‌ها جهت سنجش دما، با دقت $\pm 0.1^\circ\text{C}$ استفاده می‌شود. بنابراین ضریب انتقال حرارت را می‌توان از طریق قانون فوریه^۱، در مختصات استوانه‌ای

- نمونه باید به اندازه کافی بزرگ باشد (در محدوده چند سانتی‌متر و بزرگ‌تر)
- جهت دستیابی به تعادل دمایی کامل، معمولاً تست باید طی چند ساعت انجام شود.

۲-۱-۲- تکنیک مقایسه‌ای

بزرگ‌ترین چالش روش اندازه‌گیری مطلق در تعیین شار حرارتی عبورکننده از نمونه است. حال اگر جنس استاندارد در دسترس باشد که ضریب انتقال حرارت آن معلوم است، می‌توان تکنیک مقایسه‌ای را بدون نیاز به اندازه‌گیری مستقیم شار حرارتی به کار برد. شکل ۳ پیکربندی مورد استفاده در تکنیک مقایسه‌ای را نشان می‌دهد که شبیه روش مطلق است. حداقل دو حسگر باید در این روش به کار برده شود. انتخاب تعداد حسگرهای دمایی به ابعاد دستگاه، محدوده دمایی، نمونه و گاز داخل سیستم بستگی دارد. از آنجا که شار حرارتی عبورکننده از مواد استاندارد برابر شار حرارتی عبوری از داخل نمونه مورد نظر است، می‌توان ضریب انتقال حرارتی نمونه مورد نظر را به صورت زیر محاسبه نمود:

$$k_1 = k_2 \cdot \frac{A_2 \Delta T_2 L_1}{A_1 \Delta T_1 L_2} \quad (3)$$

که در آن ضرایب ۱ و ۲ به ترتیب مربوط به نمونه و جنس استاندارد است. با به کارگیری جنس استاندارد با ضریب انتقال حرارت معلوم، می‌توان ضریب انتقال حرارت نمونه مورد نظر را طبق رابطه (۳) بدون نیاز به اندازه‌گیری شار حرارتی، محاسبه نمود. بنابراین خطاهای ناشی از اندازه‌گیری شار حرارتی از بین می‌رود. البته باید ملاحظات را جهت اطمینان از برابری شار حرارتی بین قطعه استاندارد و نمونه آزمایشی، مد نظر قرار داد. هنگامیکه ضریب انتقال حرارت نمونه مورد نظر، با ضریب انتقال حرارت جنس استاندارد قابل مقایسه باشد، بالاترین دقت در این روش به دست می‌آید. این روش یکی از متداول‌ترین روش‌ها در اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت محوری به شمار می‌رود.

نوع دیگری از روش مقایسه‌ای، تکنیک سنجش شار حرارتی

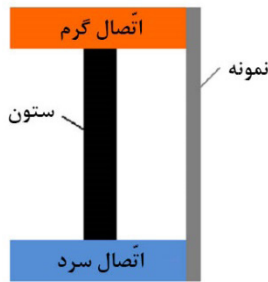
^۱ Fourier

محاسبه نمود:

نیاز به محاسبه سطح مقطع چنین نمونه کوچکی است. عدم دقت در اندازه‌گیری سطح مقطع می‌تواند به عدم قطعیت در رسانایی حرارتی محاسبه‌شده منجر شود.

$$k = \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi H \Delta T} \quad (4)$$

که در آن r_1 و r_2 شعاع‌هایی هستند که در آنها حسگرهای دمایی قرار داده شده‌اند. H ارتفاع نمونه است.



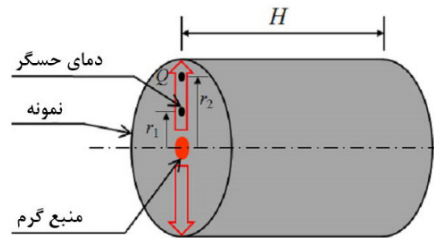
شکل ۵- روش ضریب رسانایی موازی برای نمونه‌های سوزنی

۲-۲- روش حالت ناپایدار

به منظور رفع مسائل مربوط به روش‌های پایدار از قبیل اتلاف حرارت مزاحم، حسگرهای دمایی مقاومت تماسی و مدت زمان نسبتاً طولانی مورد نیاز برای دستیابی به اختلاف دمای پایدار، مجموعه‌ای از تکنیک‌های گذرا (ناپایدار) گسترش یافته‌اند. منابع حرارتی مورد استفاده در روش‌های گذرا به صورت متناوب یا پالسی فراهم می‌آیند که به تغییرات دمایی متناوب (خروجی سیگنال فاز) یا گذرا (خروجی سیگنال دامنه) در نمونه منجر می‌شود. در اینجا چهار تکنیک گذرا شامل تکنیک توان پالسی، مفتول گرم، منبع صفحه‌ای ناپایدار^۲ و تکنیک نفوذ حرارتی پرتوی لیزر تشریح می‌شود.

۲-۲-۱- تکنیک توان پالسی

تکنیک توان پالسی در ابتدا توسط مالدونادو^۳ جهت اندازه‌گیری توان ترموالکتریک و رسانایی حرارتی معرفی شد [۲۰]. این تکنیک در واقع نوع دیگری از همان تکنیک مطلق روش پایدار است، با این تفاوت که در آن از یک جریان الکتریکی متناوب جهت گرمایش استفاده شده است. اصول این تکنیک از لحاظ گرمایش، بسیار نزدیک به روش آنگستروم^۴ است [۲۱، ۲۲]. اما تفاوت آن در دمای دافع حرارت است که تغییرات آن طی



شکل ۴- طرح‌واره روش شار حرارتی شعاعی

۴-۱-۲- تکنیک موازی

مشخصه‌یابی مواد توده‌ای کوچک چالش بزرگی به حساب می‌آید زیرا سنجش دما توسط ترموکوپل‌ها و اندازه‌گیری شار حرارت در آنها بسیار دشوار است. تکنیک سنجش رسانایی حرارتی موازی توسط تریث^۱ و همکاران برای نمونه‌های سوزنی شکل معرفی شده است [۱۹]. شکل ۵ پیکربندی مناسب این آزمایش را نشان می‌دهد که در واقع نوع دیگری از تکنیک مطلق است که برای نمونه‌هایی که نمی‌توان در آنها از گرم‌کن و ترموکوپل استفاده کرد، ابداع شده است. در این روش یک نگهدارنده نمونه یا سکو بین منبع گرما و دافع حرارت قرار داده شده‌اند. ترموکوپل تفاضلی بین سطح گرم و ستون و مابین سطح سرد و ستون قرار داده شده است. پیش از اندازه‌گیری رسانایی حرارتی نمونه، یک بار عمل اندازه‌گیری برای نگهدارنده نمونه انجام می‌شود تا اتلاف حرارتی مربوط به عضو نگهدارنده نمونه تعیین شود. سپس نمونه به نگهدارنده متصل شده، ضریب رسانایی حرارتی مجدداً اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین رسانایی حرارتی نمونه را می‌توان با در نظر گرفتن تفاضل این دو مقدار با ضرب طول نمونه و تقسیم آن بر سطح مقطع نمونه محاسبه نمود. عیب اصلی این روش در

^۱ Tritt

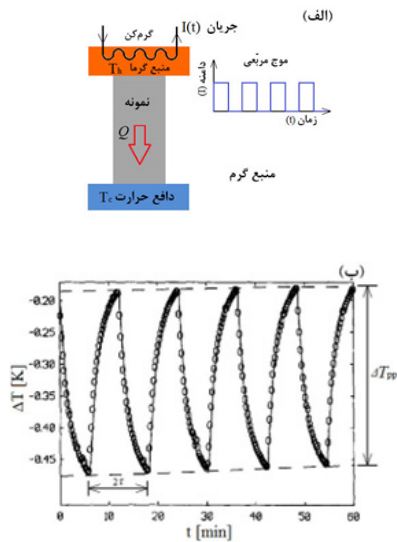
^۲ TPS

^۳ Maldonado

^۴ Angstrom

$$k = \frac{RJ_0^2}{\Delta T_{pp}} \tanh\left(\frac{K\tau}{2C}\right) \quad (۶)$$

که در آن τ نصف دوره تناوب جریان گرمایشی، C ظرفیت گرمایی حجمی، R مقاومت حرارتی و I_0 دامنه جریان الکتریکی است. از آنجائیکه تمام پارامترها به عنوان تابعی از دما در دسترس هستند، جهت یافتن عبارت ضریب انتقال حرارت در رابطه (۶) می‌توان از روش عددی و تکرار آن استفاده نمود. همانطور که در مطالعات دیگر [۲۴، ۲۵] اشاره شده است این تکنیک قابلیت اندازه‌گیری را در محدوده ۱.۹k تا ۳۹۰k را دارد و آنطور که مالدونادو گزارش داده است، عدم قطعیت روش در حد ۳٪ است.



شکل ۶ - (الف) نمای شماتیک تکنیک توان پالسی (ب) تفاضل دمای وابسته به زمان

طبق آنچه که در زمینه روابط این روش گفته شد، مشکل عمده آن نیاز به محاسبات پیچیده و غیرمستقیم جهت دستیابی به ضریب انتقال حرارت رسانشی است که احتمال خطای محاسباتی را افزایش می‌دهد.

۲-۲-۲- تکنیک مفتول گرم

روش مفتول گرم یک تکنیک گذرا محسوب می‌شود که در آن افزایش دما از یک فاصله معین تا منبع گرمایی خطی (همان مفتول گرم از جنس پلاتین یا تانتالیم) قرارگرفته در نمونه، اندازه‌گیری می‌شود. این روش جریان حرارتی را در داخل نمونه به صورت تک‌بعدی ایده‌آل ایزوتروپیک و همگن فرض می‌نماید،

عمل اندازه‌گیری بسیار آهسته است. شکل ۶-الف نمای شماتیک پیکربندی عمومی را برای روش توان پالسی نشان می‌دهد. نمونه که معمولاً به شکل استوانه یا مکعب است بین منبع حرارت و دافع گرما نگه داشته می‌شود. جریان گرمایشی مورد استفاده می‌تواند به صورت پالس‌های مربعی یا سینوسی باشد [۲۳]. در حین انجام آزمایش یک جریان الکتریکی متناوب با دوره تناوب 2τ روی منبع حرارتی اعمال می‌شود، در حالیکه دمای حمام دافع حرارت روی T_c قرار می‌گیرد. در این وضعیت شیب حرارتی ملایم $\Delta T = T_h - T_c$ (معمولاً در حدود ۰.۳k) بین منبع حرارتی (با دمای T_c) و دافع حرارت (با دمای T_h) ایجاد می‌شود که توسط یک ترموکوپل Au-Fe قابل اندازه‌گیری است [۲۰]. معادله تعادل حرارت بین حرارت انتشار یافته توسط گرمکن و گرمای منتقل شده از طریق نمونه در زیر ارائه شده است:

$$Q = C(T_h) \cdot \frac{dT_h}{dt} = R_e(T_h) I^2(t) - k \left(\frac{T_c + T_h}{2} \right) \Delta T(t) \quad (۵)$$

که در آن $R_e(T_h)$ مقاومت الکتریکی گرم‌کن وابسته به دما، $C(T_h)$ ظرفیت گرمایی حجمی گرم‌کن وابسته به دما، و $I(t)$ شدت جریان الکتریکی وابسته به زمان است. با توجه به اندازه‌گیری دمای T_h ، امکان محاسبه ضریب انتقال حرارت k به عنوان تابعی از دما وجود دارد. البته رابطه (۵) غیرخطی است و محاسبه تحلیلی آن مشکل خواهد بود. بنابراین معمولاً جهت خطی‌سازی این رابطه، $C(T_c)$ ، $R(T_c)$ و $k(T_c)$ به ترتیب به جای $C(T_h)$ ، $R(T_h)$ و $k\left(\frac{T_c + T_h}{2}\right)$ قرار داده می‌شوند. از آنجائیکه تفاضل بین T_c و T_h (همان ΔT) خیلی اندک است (شکل ۶-ب)، فرضیات اولیه به هم نمی‌خورد. همچنین فرض بر این است که T_c ثابت بوده، در مقایسه با جریان متناوب، تغییرات بسیار آهسته‌ای دارد. همانطور که شکل ۶-ب نشان می‌دهد، پاسخ نهایی به صورت آه‌ای خواهد بود. منحنی‌های خط‌چین پیوسته به صورت مماس به مقادیر حداکثر و حداقل این منحنی از‌های شکل رسم شده‌اند. با در نظر گرفتن تفاضل این دو منحنی ΔT_{pp} ، رابطه‌ی زیر جهت محاسبه ضریب انتقال حرارت نمونه به دست می‌آید [۲۰]:

$$T(r,t) = \frac{p}{4\pi kL} \left[\ln\left(\frac{4\alpha t}{r^2}\right) + \frac{r^2}{4\alpha t} - \frac{1}{4}\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) - \dots - \gamma \right] \quad (7)$$

که در آن α نفوذپذیری حرارتی و γ ضریب ثابت مربوط به جنس است. برای مدت زمان طولانی t ، از عبارت $r^2/4\alpha t$ صرف نظر می‌شود. رابطه فوق را می‌توان به صورت زیر ساده‌سازی نمود:

$$T(r,t) = \frac{p}{4\pi kL} \left[\ln\left(\frac{4\alpha t}{r^2}\right) - \gamma \right] \quad (8)$$

افزایش دمای یک نقطه از نمونه را می‌توان برای زمان t_1 تا t_2 به صورت زیر بدست آورد:

$$\Delta T = T(t_2) - T(t_1) = \frac{p}{4\pi kL} \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (9)$$

بنابراین ضریب رسانش حرارتی را می‌توان از طریق افزایش دما (ΔT) در مقابل لگاریتم طبیعی زمان به صورت زیر به دست آورد:

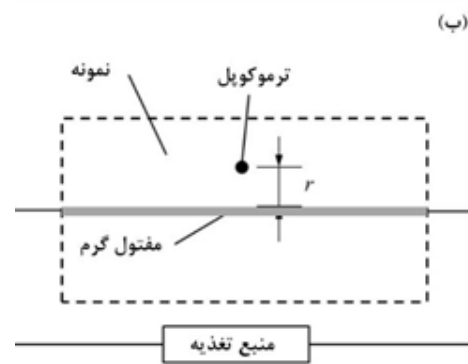
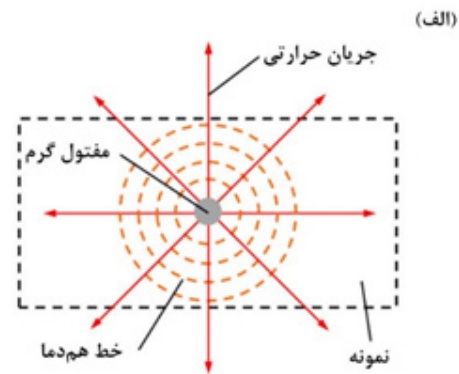
$$k = \frac{p}{4\pi [T(t_2) - T(t_1)] L} \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (10)$$

باید توجه داشت که زمانی که r در رابطه (۸) برابر ۰ است، مفتول هم به عنوان یک گرم‌کن خطی و هم به عنوان یک داماسنج مقاومتی عمل می‌کند. در صورتیکه از این روش به درستی استفاده شود، عدم قطعیت آن برای گازها، مایعات و جامدات ۱% و برای نانوسیال‌ها زیر ۲% است [۳۰]. علیرغم دقت بالای این روش، استفاده از آن خیلی محدود است که دلیل احتمالی آن، ظرافت بالای مفتول مورد استفاده است که به سرعت به سطوح مختلف می‌چسبد.

۲-۲-۳- تکنیک دیسک گرم (منبع مسطح گذرا)

روش منبع مسطح گذرا یا همان دیسک گرم از یک تسمه یا دیسک فلزی نازک به عنوان یک منبع حرارت مسطح پیوسته و حسگر دمایی به صورت توأم استفاده

به این ترتیب طبق شکل ۷ منبع حرارتی خطی با طول بی‌نهایت و قطر بسیار کوچک در نظر گرفته می‌شود. هنگامیکه یک جریان الکتریکی با شدت ثابت از مفتول می‌گذرد، رسانایی حرارتی نمونه را می‌توان با توجه به تغییرات دمای ایجادشده در فاصله مشخصی از مفتول، طی یک مدت زمان معین به دست آورد.



شکل ۷- اصول روش مفتول گرم با (الف) فرض بر جریان حرارتی تک‌بعدی نمونه؛ (ب) با عبور جریان الکتریکی ثابت از داخل مفتول گرم [۲۹]

این روش معمولاً برای اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت موادی با رسانایی حرارتی پائین از قبیل خاک‌ها [۲۶]، هسته‌های یخی [۲۷، ۲۸] و مواد نسوز کاربرد دارد. همچنین از این روش برای اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت مایعات استفاده می‌شود.

هم‌زمان با تولید پالس حرارتی ایجادشده توسط مفتول گرم در یک زمان محدود و توان گرمایشی ثابت، خطوط هم‌دمایی با تعادل حرارتی در یک ماده واسطه همگن بی‌نهایت ایجاد می‌شود. بدین ترتیب دمای گذرا را می‌توان با تقریب خوبی، برای یک زمان نسبتاً طولانی از ابتدای شروع گرمایش، به صورت زیر محاسبه نمود [۲۹]:

- مقاومت حرارتی تماسی بین حسگر و نمونه‌های آزمایشی
 - اینرسی حرارتی حسگر
 - ورودی توان اندازه‌گیری شده متأثر از ظرفیت گرمایی فیلم‌های ایزولاسیون الکتریکی
 - تغییر مقاومت الکتریکی دیسک‌های فلزی حسگر
- ۲-۴- تکنیک پرتوی لیزر برای نفوذ حرارتی

مقاومت تماسی حرارتی معمولاً یک منبع خطایی مهم در اندازه‌گیری دما به شمار می‌آید. روش پرتوی لیزر جهت دستیابی به دقت بالا از یک تکنیک غیرتماسی غیر مخرب بهره می‌برد [۳۶]. این روش در ابتدا توسط پارکر^۱ و همکاران [۳۷] معرفی شد. در این روش از یک تکنیک گرمایش نوری به عنوان منبع حرارتی لحظه‌ای، به همراه تکنیک ترموگرافیک جهت سنجش سریع دما استفاده می‌شود. نمونه آزمایشی معمولاً در هنگام اندازه‌گیری رسانایی حرارتی یک جسم تخت و در هنگام بررسی مقاومت تماسی گرمایی، ساختاری چندلایه دارد. پیکربندی متداول اندازه‌گیری با پرتوی لیزر در شکل ۹-الف نمایش داده شده است. در این روش از یک منبع نوری لحظه‌ای جهت گرم کردن یکنواخت سطح جلوی نمونه استفاده شده، یک حسگر، افزایش دمای وابسته به زمان را در سطح پشتی اندازه‌گیری می‌کند. فرض بر این است که انتقال حرارت به صورت تک‌بعدی انجام می‌شود (اتلاف حرارتی جانبی وجود ندارد). نمونه آزمایشی معمولاً با اسپری کردن یک لایه گرافیتی روی دو سطح آن آماده‌سازی می‌شود. این لایه ایجادشده در سطح جلویی به عنوان جاذب و در سطح پشتی به عنوان ساطع‌کننده، جهت سنجش دما عمل می‌کند [۳۸]. دماسنج مادون قرمز پشتی باید به اندازه کافی جهت پاسخ به سیگنال‌های ساطع شده بالا باشد. دقت کالیبراسیون دمایی معمولاً ± 0.2 K است. منحنی پاسخ دمایی پشتی (شکل ۹-ب) جهت برازش نفوذ حرارتی مورد استفاده قرار گرفته است. هرچه نفوذ حرارتی نمونه بیشتر باشد، انتقال حرارت و افزایش دمای سطح پشتی بیشتر است.

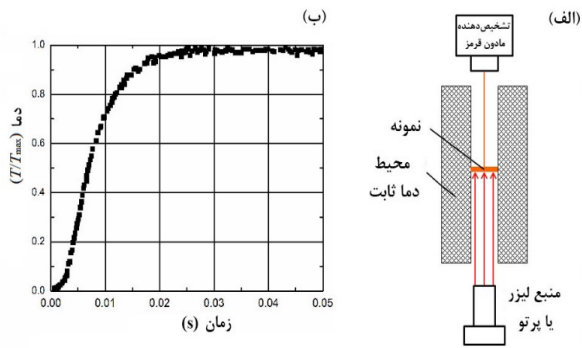
می‌کند (شکل ۸-الف). دیسک فلزی ابتدا از لحاظ الکتریکی عایق‌بندی شده، سپس بین دو نمونه آزمایشی مشابه قرار می‌گیرد. سایر سطوح نمونه‌های آزمایشی از لحاظ حرارتی عایق‌بندی شده‌اند. طی انجام آزمایش، یک جریان ثابت کوچک روی دیسک فلزی اعمال می‌شود تا آن را گرم کند. از آنجائیکه افزایش دمای دیسک فلزی وابستگی شدیدی به دو نمونه متصل به آن دارد، خواص حرارتی نمونه‌های آزمایشی را می‌توان با بررسی افزایش دما در یک محدوده زمانی کوتاه یافت. بازه زمانی عموماً تنها چند ثانیه است تا بتوان دیسک فلزی را در تماس با نمونه‌های بزرگ، طی فرآیند ثبت سیگنال گذرا بررسی نمود. بنابراین افزایش دما در سطح حسگر (ΔT) را می‌توان به صورت تابعی از زمان اندازه‌گیری نمود. دقت اندازه‌گیری حسگر دما (دماسنج مقاومتی دمایی) معمولاً $\pm 0.01^\circ\text{C}$ است. سپس، برازش منحنی‌های روابط (۱۱) و (۱۲) روی ΔT باعث دستیابی به معکوس ضریب انتقال حرارت ($1/K$) می‌شود [۳۱، ۳۲].

$$\Delta T(\phi) = \frac{Q}{\pi^{1.5}rk} D(\phi) \quad (11)$$

$$\phi = \sqrt{\frac{t\alpha}{r^2}} \quad (12)$$

که در آن r شعاع حسگر و $D(\phi)$ یک عبارت تئوری بی‌بعد مربوط به زمان است که رسانایی حرارتی حسگر را نشان می‌دهد (شکل ۸-ب).

طبق مطالعات انجام‌شده [۳۳، ۳۴]، این روش جهت اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت با مقداری بین 0.005 W/mK تا 500 W/mK در بازه دمایی 120 K تا 500 K، شامل حالات مایع، آئروژل و جامد کاربرد دارد. عیب مهم این روش نیاز به تختی کامل سطح دو نمونه است. این قضیه، عمل اندازه‌گیری را برای موادی مثل پودرها یا گرانول‌ها دشوار می‌کند [۳۵]. همچنین منابع خطایی این روش شامل موارد زیر می‌شود:



شکل ۹- (الف) نمای شماتیک روش پرتوی لیزر؛ (ب) نمونه‌ای از منحنی افزایش دما در سطح پشتی [۴۰]

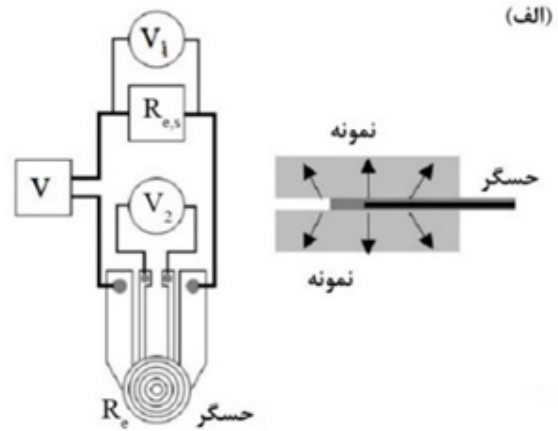
که در آن T_{max} دمای حداکثر سطح پشتی را نشان می‌دهد. ترکیب روابط (۱۳) تا (۱۵) به رابطه زیر منجر می‌شود:

$$W = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp(-n^2 \eta) \quad (16)$$

هنگامی که W برابر 0.5 باشد (دمای سطح پشتی به نصف دمای بیشینه رسیده باشد)، η برابر 1.38 خواهد بود، بنابراین نفوذپذیری حرارتی α به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\alpha = \frac{1.38d^2}{\pi^2 t_{\frac{1}{2}}} \quad (17)$$

که در آن $t_{\frac{1}{2}}$ مدت زمان مورد نیاز جهت گرم کردن نمونه تا نصف دمای بیشینه در سطح پشتی است. روش پرتوی لیزر قابلیت اندازه‌گیری در محدوده دمایی -120°C تا 2800°C را داشته، عدم قطعیت آن برابر 3% گزارش شده است [۴۱]. مزایای این روش نه تنها سرعت آن (معمولاً بین 1 s تا 2 s برای اغلب جامدات)، بلکه قابلیت استفاده آن برای نمونه‌های کوچک (مثلاً با قطر 5 mm تا 12 mm) می‌باشد. چالش‌هایی نیز در این روش وجود دارد. اول اینکه ظرفیت گرمایی و چگالی را باید در آزمایش‌های مجزا اندازه‌گیری نمود که ممکن است به عدم قطعیت‌ها یا خطاهای انباشته منجر شود. اگر اثر گرمایش نگهدارنده نمونه به درستی در نظر گرفته نشود، می‌تواند منجر به خطای قابل توجهی در اندازه‌گیری شود [۴۲]. گرچه این روش را می‌توان برای نمونه‌های نازک به کار برد، ضخامت نمونه معمولاً توسط اشکال زمانی پالس گرمایشی و حسگر مادون قرمز محدود



شکل ۸- (الف) نمای فوقانی و سطح مقطع روش SPT [۹۳]؛ (ب) $D(\phi)$ به صورت تابعی از ϕ در رابطه [۱۳]

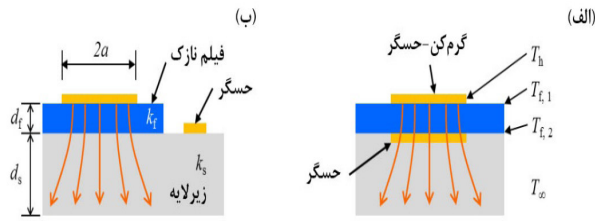
از لحاظ تئوری، افزایش دمای سطح پشتی را می‌توان به صورت تابعی از زمان نوشت [۳۷]:

$$T(t) = \frac{q}{\rho c_p d} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp\left(\frac{-n^2 \pi^2}{d^2} \alpha t\right) \right] \quad (13)$$

که در آن d ضخامت نمونه و α نفوذپذیری حرارتی است. جهت ساده‌سازی رابطه (۱۳)، دو پارامتر بی‌بعد W و η تعریف شده‌اند:

$$W(t) = \frac{T(t)}{T_{max}} \quad (14)$$

$$\eta = \frac{\pi^2 \alpha t}{d^2} \quad (15)$$



شکل ۱۰- روش‌های پایدار برای اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت قائم فیلم؛ (الف) جهت اندازه‌گیری مستقیم، (ب) فاصله معین گرم‌کن [۶]

۳-۱-۲- اندازه‌گیری رسانش حرارتی درون صفحه‌ای

روش اندازه‌گیری رسانش حرارتی درون صفحه‌ای به منظور غلبه بر خطاهای احتمالی روش قائم ابداع شده است لیکن چالش اصلی این روش، ارزیابی شار حرارتی فیلم، در حضور افت حرارتی مزاحم داخل زیرلایه است. جهت افزایش دقت اندازه‌گیری ولکلین^۱ [۳۲، ۴۳] به این نتیجه دست یافت که باید حاصلضرب ضریب انتقال حرارت رسانشی درون صفحه‌ای فیلم $(k_{f,p})$ در ضخامت فیلم d_f ، برابر یا بزرگتر از همین حاصلضرب برای زیرلایه باشد $(k_{f,p}d_f \geq k_s d_s)$. البته جهت حذف کامل افت حرارت مزاحم از داخل زیرلایه، نیاز به یک ساختار معلق می‌باشد که زیرلایه را به طور کامل حذف نماید (شکل ۱۱) که این کار روند آماده‌سازی نمونه را پیچیده‌تر خواهد نمود.

همانطور که شکل ۱۱-الف نشان می‌دهد [۴۴]، تسمه فلزی رسوب داده شده روی فیلم نازک نقش گرم‌کن و حسگر را ایفا می‌کند. هنگامیکه جریان مستقیم از این تسمه عبور می‌کند، دما به صورت تابعی از پارامترهای توان گرمایش، ضریب انتقال حرارت فیلم، دمای محیط، ضخامت (d_f) و عرض (L_f) فیلم افزایش می‌یابد. بنابراین ضریب انتقال حرارت درون صفحه‌ای را می‌توان بدون عوض کردن باقی پارامترها، از تفاضل افزایش دمای گرم‌کن-حسگر در دو اندازه‌گیری صورت گرفته روی دو عرض متفاوت فیلم نازک به دست آورد. در روش دیگر نشان داده شده در شکل ۱۱-ب، حسگر دیگری جهت اندازه‌گیری دمای دافع گرما مورد استفاده قرار گرفته است که در آن می‌توان ضریب انتقال حرارت را به طور مستقیم به صورت زیر نوشت:

می‌شود. بسته به نفوذپذیری نمونه، تجهیزات اندازه‌گیری پرتوی لیزر، می‌توانند نمونه‌هایی با ضخامت $100 \mu\text{m}$ و بیشتر را اندازه‌گیری کنند.

۳- فیلم نازک

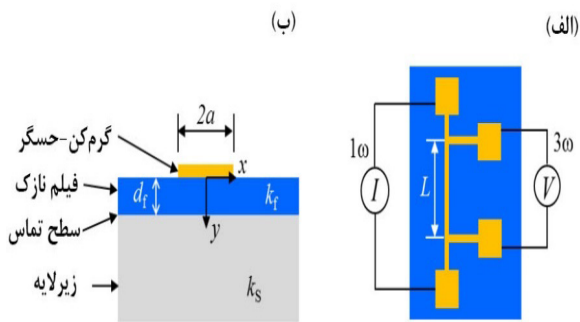
۳-۱- روش حالت پایدار

۳-۱-۱- اندازه‌گیری رسانش حرارتی قائم

به منظور اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت فیلم نازک، باید افت دمای ایجادشده در ضخامت فیلم نازک اندازه‌گیری شود. ایجاد و اندازه‌گیری این افت دما زمانی که ضخامت نمونه کمتر از چند میکرون باشد، کار مشکلی خواهد بود. شکل ۱۰ دو پیکربندی اندازه‌گیری حالت پایدار متداول را نشان می‌دهد. در هر دو پیکربندی، فیلم با ضخامت d_f روی زیرلایه‌ای با رسانایی حرارتی بالا و زبری سطح ناچیز رسوب داده می‌شود. سپس یک تسمه فلزی به طول L و عرض $2a$ ($L \gg 2a$) روی فیلم نازکی که ضریب انتقال حرارتی آن باید مورد ارزیابی قرار گیرد رسوب داده می‌شود. تسمه فلزی باید دارای یک ضریب مقاومت دمایی بالا (در حد فیلم Cr/Au) باشد. در حین انجام آزمایش، تسمه فلزی توسط یک جریان مستقیم عبورکننده از آن گرم می‌شود. این تسمه فلزی به طور هم‌زمان به عنوان گرم‌کن الکتریکی و حسگر دمای خود (T_h) عمل می‌کند.

دمای سطح فوقانی فیلم $T_{f,1}$ معمولاً هم‌اندازه با دمای متوسط گرم‌کن (T_h) فرض می‌شود. به نظر می‌رسد که قرار دادن یک حسگر دیگر زیر فیلم جهت اندازه‌گیری دمای تحتانی آن $(T_{f,2})$ منطقی به نظر برسد. اما این راه حل فرآیندهای آماده‌سازی نمونه را پیچیده‌تر خواهد نمود. راه حل دیگر استفاده از حسگر دیگر قرار داده شده در فاصله‌ای معین از گرم‌کن-حسگر است تا افزایش دمای زیرلایه زیر فیلم را اندازه‌گیری کند (شکل ۱۰-ب). بنابراین جهت یافتن افزایش دمای زیرلایه در موقعیت گرم‌کن-حسگر نسبت به افزایش دمای زیرلایه در موقعیت حسگر، از یک مدل انتقال حرارت دوبعدی استفاده می‌شود.

$L = 1000 \sim 10000 \mu m$ و به طول $a = 10 \sim 50 \mu m$ است که از لحاظ تئوری بی‌نهایت فرض می‌شود. تسمه فلزی به عنوان یک گرم‌کن الکتریکی و حسگر دمایی عمل می‌کند (شکل ۱۲).



شکل ۱۲- نمای (الف) فوقانی و (ب) سطح مقطع روش 3ω برای مشخصه‌یابی فیلم نازک [۴۵].

در این روش یک جریان متناوب با فرکانس ω از گرم‌کن یا حسگر عبور می‌کند که از رابطه زیر پیروی می‌کند:

$$I(t) = I_0 \cdot \cos(\omega t) \quad (19)$$

که به واسطه مقاومت الکتریکی گرم‌کن-حسگر، باعث ایجاد حرارت ژولی با فرکانس 2ω در آن می‌شود. چنین گرم‌مازی در فرکانس 2ω باعث تغییرات دمایی گرم‌کن-حسگر در فرکانس 2ω ، به صورت زیر می‌شود:

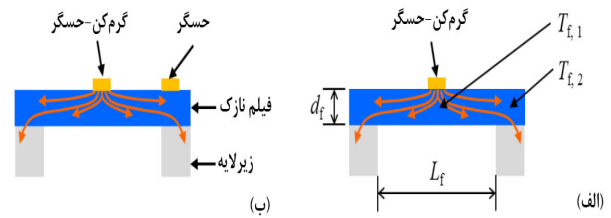
$$\Delta T(t) = \Delta T_0 \cos(2\omega t + \phi) \quad (20)$$

که در آن ΔT_0 مقدار تغییرات دما و ϕ فاز است. اینکار باعث تغییر مقاومت الکتریکی گرم‌کن-حسگر در فرکانس 2ω می‌شود:

$$R_e(t) = R_{e,0} (1 + \alpha_R \Delta T) = R_{e,0} [1 + \alpha_R \Delta T_0 \cos(2\omega t + \phi)] \quad (21)$$

که در آن α_R ضریب دمایی مقاومت گرم‌کن-حسگر است. $R_{e,0}$ مقاومت الکتریکی در وضعیت اولیه است. هنگامیکه این پارامتر در جریان محرک 1ω ضرب شود، یک سیگنال ولتاژ کوچک را می‌توان در فرکانس 3ω روی گرم‌کن-حسگر تشخیص داد:

$$k_{f,P} = \frac{QL_f}{2d_f(T_{f,1} - T_{f,2})} \quad (18)$$



شکل ۱۱ - (الف) اندازه‌گیری رسانایی حرارتی درون صفحه‌ای، از طریق تفاضل افزایش دمای گرم‌کن-حسگر [۴۴]؛ (ب) با یک گرم‌کن-حسگر و یک حسگر دمایی اضافی

که در آن Q توان پخش‌شده در گرم‌کن فلزی، در واحد طول، $L_f/2$ فاصله گرم‌کن تا دافع گرما و $T_{f,1}$ دمای فیلم نازک، دقیقاً زیر گرم‌کن-حسگر است که برابر با دمای گرم‌کن-حسگر فرض شده است. $T_{f,2}$ دمای لبه فیلم نازک مماس با زیرلایه است.

برای اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت یک نمونه رسانا یا نیمه‌رسانای الکتریکی، عایقی بین گرم‌کن-حسگر و فیلم مورد نیاز است که این امر تحلیل داده را خیلی پیچیده خواهد نمود. جهت اطمینان از انتقال حرارت تک‌بعدی باید اتلاف حرارت مزاحم را به حداقل رساند که شامل اتلاف حرارت رسانشی در طول جهت گرم‌کن-حسگر و اتلاف حرارت همرفت و تابشی به محیط می‌شود. اتلاف حرارت رسانشی گرم‌کن-حسگر را می‌توان از طریق روش‌های ساخت میکرووی پیشرفته، جهت کمینه‌سازی سطح مقطع آن کاهش داد. جهت کاهش اتلاف حرارت همرفتی، آزمایش معمولاً در محیط خلأ صورت می‌گیرد. همچنین جهت کاهش اتلاف حرارت تابشی، معمولاً اختلاف دمایی موجود کوچک در نظر گرفته شده، از پوششی با ضریب تابش استفاده می‌شود.

۳-۲- روش حالت ناپایدار

۳-۲-۱- تکنیک 3ω

در این روش فیلم نازک مورد نظر روی یک زیرلایه ایجاد می‌شود. همچنین یک تسمه فلزی (آلمینیوم، طلا، یا پلاتین) روی نمونه قرار داده می‌شود. ابعاد تسمه فلزی معمولاً نصف عرض

ثابت، i برابر $\sqrt{-1}$ ، k رسانایی حرارتی، p/L توان الکتریکی بیشینه برای واحد طول و f_{linear} تابع خطی $\ln \omega$ است. واضح است که می‌توان رسانایی حرارتی ایزوتروپیک زیرلایه k_S را به عنوان یک تابع خطی فرکانس لگاریتم $\ln(\omega)$ ، از شیب بخش حقیقی اندازه دما، طبق رابطه (۲۳) بدست آورد.

به دلیل وجود یک فیلم روی زیرلایه، جهت یافتن ضریب رسانایی حرارتی قائم $k_{f,\perp}$ (شکل ۱۳-الف) نیاز به تخمین افت دما در طول فیلم نازک وجود خواهد داشت. دمای سطح فوقانی فیلم معمولاً برابر دمای گرم‌کن-حسگر است زیرا مقاومت‌های تماسی معمولاً خیلی کوچک ($10^{-7} - 10^{-8} \text{ m}^2\text{K/W}$) [۱۴] است. متداول‌ترین روش تعیین دمای سطح تحتانی از طریق شار حرارتی آزمایشی محاسبه‌شده با رسانایی حرارتی زیرلایه k_S است که معمولاً می‌توان آن را به وسیله روش 3ω در رابطه (۲۳) اندازه‌گیری نمود. با فرض رسانش تک‌بعدی در طول فیلم نازک (شکل ۱۲-الف)، رسانایی حرارتی فیلم نازک را می‌توان به سادگی از طریق رابطه زیر یافت:

$$\Delta T_{S+f} = \Delta T_S + \frac{pd_f}{2aLk_{f,\perp}} \quad (24)$$

که در آن f نماینده خواص فیلم و $S+f$ نماینده ساختار فیلم نازک روی زیرلایه بوده، $k_{f,\perp}$ با برازش داده رشد دمای اندازه‌گیری‌شده تحت تأثیر اعمال مجموعه‌ای از فرکانس‌های گرمایش ω روی رابطه (۲۴) بدست می‌آید.

روش 3ω را می‌توان جهت اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت داخل صفحه‌ای فیلم نازک نیز مورد استفاده قرار داد. در این حالت در مقایسه با اندازه‌گیری رسانش حرارتی قائم، به منظور ایجاد حساسیت فیلم به رسانایی حرارتی درون‌صفحه‌ای و قائم، از یک گرم‌کن باریک‌تر استفاده می‌شود (شکل ۱۳-ب). نصف عرض گرم‌کن a باید جهت برآورده کردن شرط زیر، به اندازه کافی باریک باشد [۴۵]:

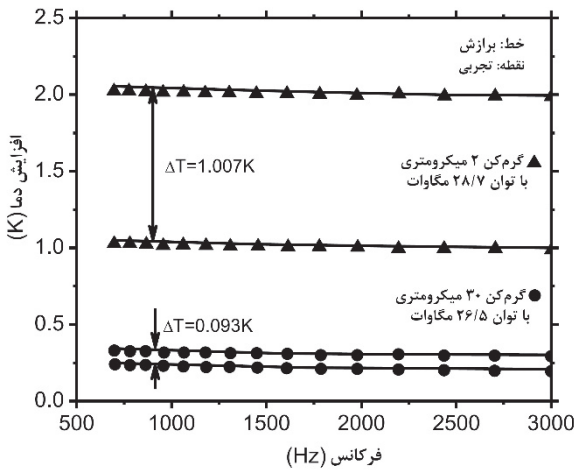
$$V(t) = R_e I_0 \left[\cos(\omega t) + 0.5\alpha_R \Delta T_0 \cos(\omega t + \varphi) + 0.5\alpha_R \Delta T_0 \cos(3\omega t + \varphi) \right] \quad (22)$$

این تغییرات ولتاژ ($V(t)$) در فرکانس 3ω حاوی اطلاعاتی در زمینه انتقال گرما در داخل نمونه است. البته از آنجائیکه سیگنال ولتاژ 3ω (دامنه $\frac{R_0 I_0 \alpha_R \Delta T_0}{2}$) خیلی ضعیف است، معمولاً از یک تقویت‌کننده دائمی برای پیاده‌سازی چنین تکنیکی استفاده می‌شود. در هنگام اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت یک نمونه رسانا یا نیمه رسانای الکتریکی، بایستی یک لایه عایق بین گرم‌کن-حسگر و فیلم نازک قرار گیرد. بسته به عرض گرم‌کن، می‌توان رسانایی حرارتی درون‌صفحه‌ای یا قائم فیلم‌ها را با استفاده از روش 3ω اندازه‌گیری نمود. معمولاً از عبارات تحلیلی تخمینی جهت تعیین رسانایی درون‌صفحه‌ای یا قائم استفاده می‌شود. تاسکیوک^۱ پاسخ عمومی انتقال حرارت را در راستای یک مجموعه فیلم چندلایه روی زیرلایه ارائه داده است [۱۳]. دامس نیز حالت کلی چارچوب توابع انتقال حرارتی و الکتریکی را توضیح داده است [۴۶، ۴۷].

برای ساده‌ترین وضعیت که در آن یک گرم‌کن-حسگر فلزی، بدون فیلم نازک روی یک زیرلایه ایزوتروپیک قرار گرفته باشد، در صورتی که عمق نفوذ حرارتی $L_p = \sqrt{\alpha_S / 2\omega}$ خیلی بزرگتر از نصف عرض گرم‌کن-حسگر (a) باشد، می‌توان گرم‌کن-حسگر را به عنوان یک منبع خطی فرض نمود. α_S ضریب دمایی مقاومت فیلم-زیرلایه است. با انتخاب فرکانس گرمادهی مناسب جریان حرارتی، نفوذ حرارتی را می‌توان در داخل زیرلایه به طور موضعی شناسایی نمود. بنابراین افزایش دمای گرم‌کن-حسگر به صورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$\Delta T = \frac{p}{\pi Lk} \left[0.5 \ln \left(\frac{\alpha}{a^2} \right) - 0.5 \ln(\omega) + \eta \right] - i \left(\frac{p}{4Lk_S} \right) = \frac{p}{\pi Lk_S} f_{linear}(\ln \omega) \quad (23)$$

که در آن زیرنویس S به زیرلایه مربوط شده، η یک مقدار



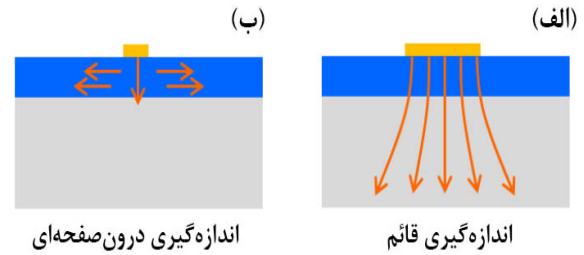
شکل ۱۴- افزایش دمای اندازه‌گیری شده نقاط [۱۳].

روش 3ω به نمونه‌هایی محدود می‌شود که دارای تانسورهای رسانش حرارتی ایزوتروپیک هستند یا محورهای اصلی تانسور آنها با دستگاه مختصات کارتزین تعریف شده توسط خط گرم‌کن و سطح نمونه هم‌جهت است. اخیراً می‌شرا^۱ و همکاران نوعی از روش 3ω را ابداع کرده‌اند که می‌تواند تانسور رسانش حرارتی غیر ایزوتروپیک دلخواه را اندازه‌گیری نماید [۴۹]. در این راستا یک تانسور انتقال حرارت غیر ایزوتروپیک با عبارات غیرقطری مورد بررسی قرار گرفته است. به این ترتیب یک پاسخ بسته بدست آمده است و به طور عددی اعتبارسنجی شده است.

یک مزیت اصلی روش 3ω نسبت به روش‌های پایداری سنتی این است که خطای مربوط به افت تابش حرارتی به شدت کاهش یافته است. خطای ناشی از تابش در روش 3ω ، حتی برای دمای 1000 K، کمتر از 2% است [۵۰]. از روش 3ω می‌توان برای اندازه‌گیری فیلم‌های نازک رسانا، نیمه‌رسانا و نارسانای الکتریکی استفاده نمود. چالش‌های روش 3ω شامل موارد زیر است:

- مواد رسانا و نیمه‌رسانای الکتریسیته باید از لحاظ الکتریکی نسبت به گرم‌کن-حسگر عایق‌سازی شوند [۵۱، ۵۲] که این امر باعث ایجاد مقاومت حرارتی اضافی شده، دقت و حساسیت روش اندازه‌گیری را کاهش می‌دهد.

- ساخت گرم‌کن-حسگر نیاز به روش‌های ساخت



شکل ۱۳- نمای شماتیک اندازه‌گیری روش 3ω ؛ (الف) قائم؛ (ب) درون صفحه‌ای [۴۸]

$$\frac{a}{d_f} \left(\frac{k_{f,\perp}}{k_{f,p}} \right)^{\frac{1}{2}} \leq 0.1 \quad (25)$$

که در آن $k_{f,p}$ و $k_{f,\perp}$ به ترتیب ضریب انتقال حرارتی قائم و درون‌صفحه‌ای هستند. d_f ضخامت فیلم است. به دلیل پخش حرارت جانبی که به رسانش گرمایی درون‌صفحه‌ای نیز حساس هست، نیاز به استفاده از یک مدل انتقال حرارت دوبعدی می‌باشد تا برای کاهش داده‌ها مورد استفاده قرار گیرد. افت دما روی فیلم نازک به صورت زیر [۱۳] بدست می‌آید:

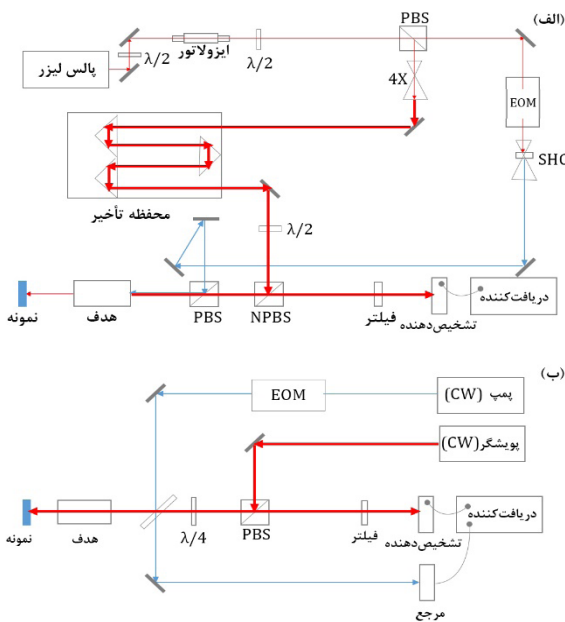
$$\Delta T_f = \frac{p}{\pi L} \left(\frac{1}{k_{f,\perp} k_{f,p}} \right)^{\frac{1}{2}} \int_0^\infty \frac{\sin^2 \lambda}{\lambda^3} \tanh \left[\lambda \left(\frac{d_f}{a} \right) \left(\frac{k_{f,p}}{k_{f,\perp}} \right)^{\frac{1}{2}} \right] d\lambda \quad (26)$$

رابطه فوق افت دمایی فیلم را به صورت نرمالیزه شده نسبت به مقدار انتقال حرارت تک‌بعدی مطلق داخل فیلم می‌دهد که به عنوان تابعی از ضریب انتقال حرارتی داخل صفحه‌ای و قائم و نصف عرض گرم‌کن-حسگر a است. در عمل، معمولاً $k_{f,\perp}$ در ابتدای امر با گرم‌کن-حسگری با عرض بسیار بزرگتر اندازه‌گیری می‌شود که صرفاً به ضریب انتقال حرارت قائم حساس است. سپس $k_{f,p}$ با یک عرض بسیار کوچک‌تر اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۱۴).

میکرو دارد که هزینه‌بر خواهد بود.

۲-۲-۳- تکنیک بازتاب حرارتی ناپایدار

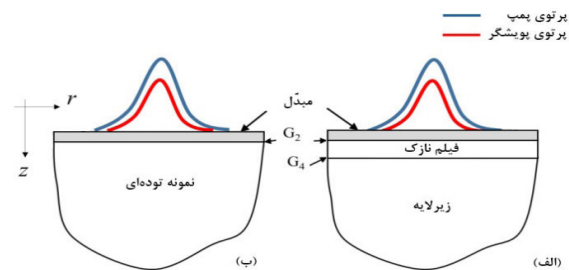
تکنیک بازتاب حرارتی ناپایدار یک روش سنجش نوری غیرتماسی خواص حرارتی (رسانایی حرارتی، ظرفیت گرمایی و رسانایی حرارتی تماسی) مواد توده‌ای و فیلم نازک به شمار می‌آید. نمونه‌ها معمولاً با یک فیلم نازک آلومینیومی یا تنگستنی (لایه میبدل فلزی)، که در طول موج لیزر میزان بازتاب آنها با افزایش دما تغییر می‌کند، پوشانده می‌شوند. این امر باعث می‌شود که بتوان پاسخ حرارتی را با نظارت تغییر بازتاب تشخیص داد. شکل ۱۵ دیگرام شماتیک پیکربندی نمونه را برای فیلم نازک و یک ماده توده‌ای تحت اندازه‌گیری پرتوهای پمپ و پوشگر که به طور منطبق متمرکز شده‌اند نشان می‌دهد. تکنیک بازتاب حرارتی در ابتدا در دهه ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰، هنگامیکه منابع نوری موج پیوسته جهت گرم کردن نمونه مورد استفاده قرار گرفت گسترش یافت [۵۳]. این تکنیک اخیراً جهت اندازه‌گیری رسانایی حرارتی غیرایزوتروپیک فیلم‌های نازک [۵۴] و پوشش انتقال فونون طیفی [۵۵] مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۱۶- (الف) نمای شماتیک یک سیستم RTDT دو رنگ. (ب) شماتیک سیستم RTDF [۶۱].

شکل ۱۶-الف یک سیستم آزمایشی شماتیک را نمایش می‌دهد. خروجی لیزر به دو پرتو تقسیم می‌شود. یک پرتو جهت ایجاد گرما به پمپ و یک پرتو جهت سنجش به پوشگر وارد می‌شود. پرتوی پمپ پیش از تمرکز روی نمونه، توسط یک مدولاتور صوتی-نوری^۱ یا مدولاتور الکترو-اپتیک^۲ در فرکانس چند kHz تا چند MHz مدوله می‌شود. پرتوی پوشگر پس از ایجاد یک تأخیر مکانیکی (معمولاً چند پیکوثانیه تا چند نانوثانیه)، پس از آن که نمونه توسط پالس گرم شده است تشخیص داده می‌شود. سپس سیگنال استخراج و تقویت می‌شود.

نمایشی از دریافت داده در شکل ۱۷ نشان داده شده است. پالس‌های مدله شده پمپ در فرکانس ω_0 (شکل ۱۷-الف) نمونه را به صورت دوره‌ای گرم می‌کنند. سپس پاسخ نوسانی دمای نمونه (شکل ۱۷-ب) توسط پرتوی پوشش، با یک تأخیر زمانی τ_0 تشخیص داده می‌شود. در این مورد، پاسخ بازتاب حرارتی در فرکانس مدولاسیون ω_0 به عنوان حاصل جمع پاسخ‌های پالس واحد $h(t)$ در دامنه زمان بیان می‌شود:



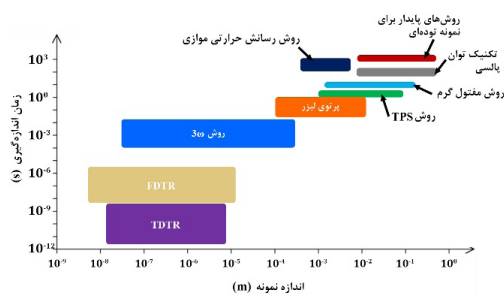
شکل ۱۵- پیکربندی متداول نمونه برای اندازه‌گیری خواص حرارتی (الف) فیلم نازک روی زیرلایه و (ب) نمونه توده‌ای

تکنیک بازتاب حرارتی ناپایدار را می‌توان به عنوان روش بازتاب حرارتی در دامنه زمان^۱ [۵۶، ۵۷] و روش بازتاب حرارتی در دامنه فرکانس^۲ [۵۴، ۶۰-۵۸] پیاده‌سازی نمود. این روش پاسخ بازتاب حرارتی را بعنوان تابعی از تأخیر مابین دریافت پالس در پوشگر و پمپ در سطح نمونه اندازه‌گیری می‌کند.

۱ TDTR
۲ FDTR
۳ AOM
۴ EOM

پرتوی پمپ، R_2 ضریب بازتاب در طول موج پرتوی پوشگر و $\frac{dR_2}{dT}$ ضریب بازتاب حرارتی مبدل در طول موج پوشگر است.

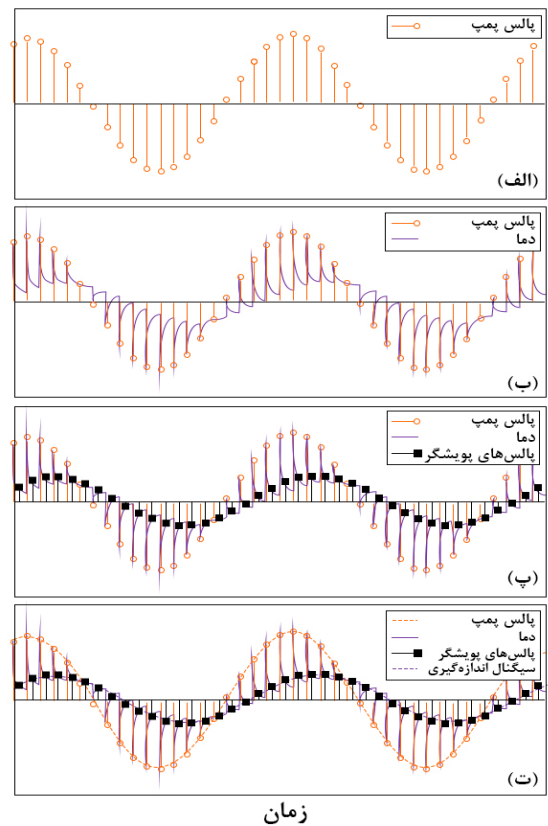
شکل ۱۸ مقایسه‌ای را از جهت اندازه نمونه و مدت زمان مورد نیاز برای اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت رسانشی نشان می‌دهد. منظور از اندازه نمونه در این نمودار، طول شیب دمایی ایجاد شده در نمونه است. مدت زمان اندازه‌گیری، زمان ایجاد تغییرات دمایی (با منبع حرارتی پیوسته یا پالسی)، یا بازه زمانی تغییرات دما (منبع حرارتی متناوب پیوسته) طی آزمایش است. همانطور که دیده می‌شود، روش‌های پایدار قابلیت اندازه‌گیری نمونه‌های بزرگ را در طولانی‌ترین زمان داده‌برداری دارند، در حالیکه روش بازتاب حرارتی ناپایدار (FDTR و TDTR) قادر به اندازه‌گیری این پارامتر برای نازک‌ترین فیلم، در کوتاه‌ترین زمان ممکن می‌باشد. شکل ۱۹ به طور کلی محدودیت‌ها و کاربردهای روش‌های مختلف مورد بررسی را نمایش می‌دهد.



شکل ۱۸- اندازه نمونه و زمان اندازه‌گیری برای روش‌های مختلف اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت رسانشی

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به تحلیل و مقایسه صورت گرفته در مورد روش‌های مختلف اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت رسانشی و مواد مختلف در زمینه پارامترهای پایداری یا گذرا بودن روش، وضعیت توده‌ای یا لایه‌ای (فیلم) بودن نمونه، جنس مواد، مدت زمان مورد نیاز آزمایش، هزینه، میزان دقت قابل دستیابی، محدوده دمای قابل استفاده از روش، پیچیدگی پیکربندی آزمایش، عوامل بروز خطا، روابط تئوری مورد استفاده و کاربردهای هر روش می‌توان به این نتیجه دست یافت که طبق شکل ۱۸ و شکل ۱۹ هر یک از



شکل ۱۷- تصویر شماتیک تشخیص RTDT: (الف) مدولاسیون

الکترو-اپتیک یا صوتی-نوری؛ (ب) پاسخ دمای سطح نمونه؛ (پ) بازتاب پالس‌های پوشگر؛ (ت) المان‌های هارمونیک پوشگر [۶۲]

$$z(\omega_0, \tau_d) = V_{in} + iV_{out} \quad (27)$$

بنابراین

$$z(\omega_0, \tau_d) = \beta \cdot \frac{2\pi}{\omega_s} \sum_{n=0}^{\infty} h \left(n \cdot \frac{2\pi}{\omega_s} + \tau_d \right) e^{-i\omega_0(nT_0 + \tau_d)} \quad (28)$$

که در آن $z(\omega_0, \tau_d)$ پاسخ بازتاب حرارتی در فرکانس مدولاسیون ω_0 ، بخش حقیقی پاسخ (سیگنال درون-فاز)، V_{in} بخش موهومی پاسخ (سیگنال برون-فاز)، τ_d زمان تأخیر، $\frac{2\pi}{\omega_s}$ مدت زمان بین دو پالس متوالی در فرکانس لیزر ω_s و β مقدار ثابتی است که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\beta = G_{det} P_1 (1 - R_1) \left(\frac{dR_2}{dT} \right) P_2 R_2 \quad (29)$$

که در آن G_{det} ضریب بهره آشکارساز نوری، P توان پرتوی پمپ، P_2 توان پرتوی پوشگر، R_1 ضریب بازتاب در طول موج

اندازه‌گیری دما به شمار می‌آید. از این روش پرتوی لیزر یا بازتاب حرارتی جهت دستیابی به دقت بالا توسعه یافته است. البته نباید خطای ناشی از انتقال حرارت تابشی را در این روش‌ها نادیده گرفت و باید شرایط مناسبی را جهت اندازه‌گیری غیرتماسی فراهم نمود. همچنین در روش‌های تماسی معمولاً فرض بر این است که انتقال حرارت به صورت تک‌بعدی انجام می‌شود (اتلاف حرارتی جانبی وجود ندارد).

در مجموع می‌توان گفت که طبق مقایسه صورت‌گرفته، روش‌های پایدار قابلیت اندازه‌گیری نمونه‌های بزرگ را در طولانی‌ترین زمان داده‌برداری دارند، در حالی که روش بازتاب حرارتی ناپایدار قادر به اندازه‌گیری این پارامتر برای نازک‌ترین فیلم، در کوتاه‌ترین زمان ممکن می‌باشد.

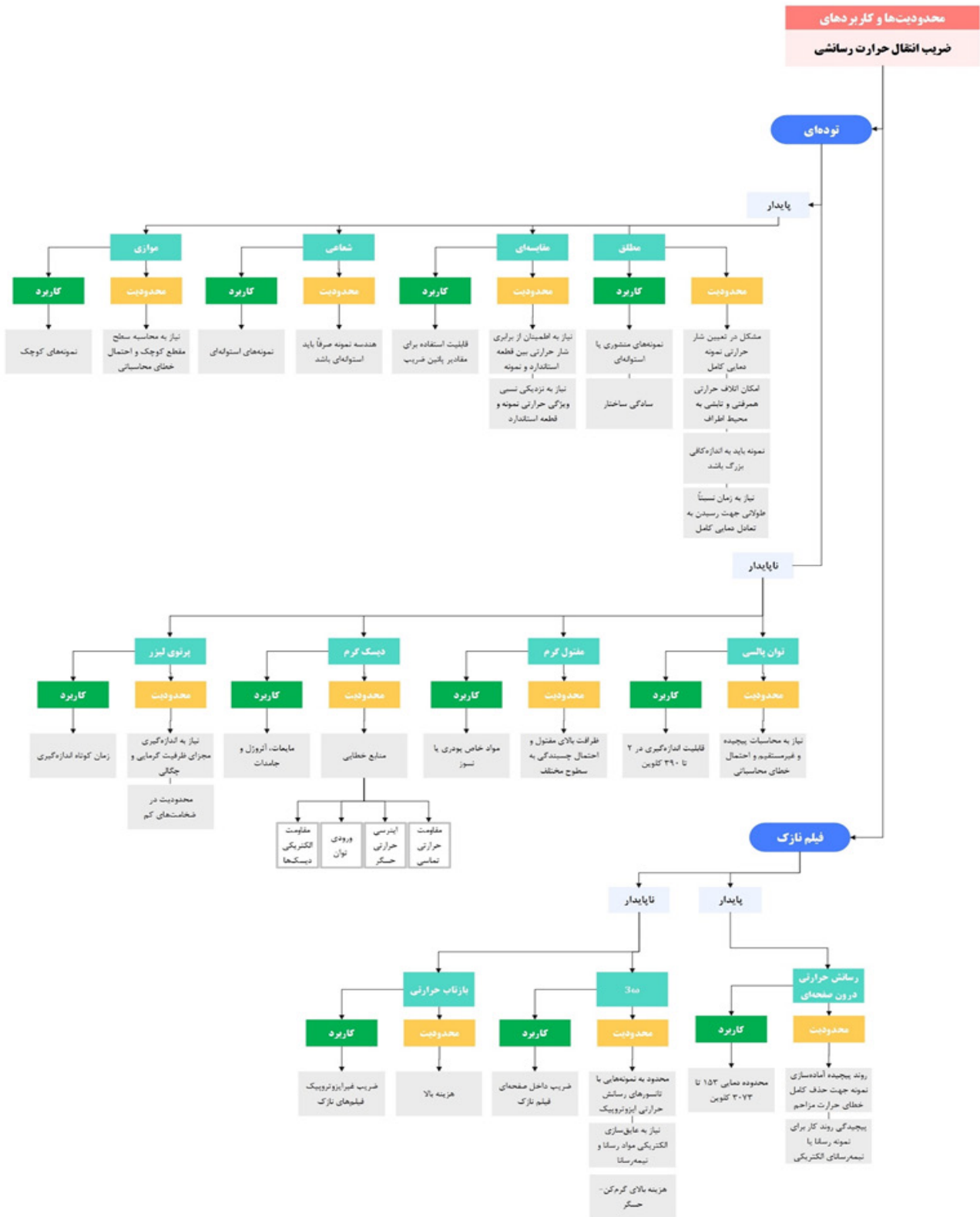
روش‌ها کاربردها و محدودیت‌های خاص خود را دارد و انتخاب آنها بسته به پارامترهای مذکور می‌باشد و نمی‌توان روالی یکسان را برای تمام مواد، و شرایط مختلف در نظر گرفت. برای مثال بزرگ‌ترین چالش روش اندازه‌گیری مطلق در تعیین شار حرارتی عبورکننده از نمونه است. که برای رفع این مشکل از یک قطعه استاندارد (مرجع) با ضریب انتقال حرارت معین استفاده شده است. بدین ترتیب می‌توان تکنیک مقایسه‌ای را بدون نیاز به اندازه‌گیری مستقیم شار حرارتی استفاده کرد.

همچنین پیکربندی‌های طولی دارای محدودیت بازه دمایی مناسب هستند. برای مثال برای اندازه‌گیری در دماهای خیلی بالا (مثلاً بالای ۱۰۰۰ کلوین)، اتلاف حرارتی ناشی از تابش از طریق گرم‌کن و سطوح نمونه قابل چشم‌پوشی نیست و می‌تواند در هنگام محاسبه شار حرارتی نمونه باعث ایجاد عدم قطعیت شود. بنابراین جهت غلبه بر این مشکل، نمونه‌های استوانه‌ای در روش شار حرارتی شعاعی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

روش‌های ناپایدار نیز به منظور غلبه بر محدودیت‌های روش‌های پایدار شامل اتلاف حرارت مزاحم، حسگرهای دمایی مقاومت تماسی و مدت زمان نسبتاً طولانی مورد نیاز برای دستیابی به اختلاف دمای پایدار گسترش پیدا کرده‌اند که مهم‌ترین آنها روش 3ω می‌شود.

از سوی دیگر توده‌ای یا لایه‌ای بودن نمونه باعث می‌شود که نتوان از هر روش به طور دلخواه جهت اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت رسانشی در مواد استفاده نمود و باید با توجه به دقت مورد نیاز، روش مناسب را انتخاب نمود. به عنوان مثال مشخصه‌یابی مواد توده‌ای کوچک میلیمتری چالش بزرگی به حساب می‌آید زیرا سنجش دما توسط ترموکوپل‌ها و اندازه‌گیری شار حرارت در آنها بسیار دشوار است.

تماسی یا غیرتماسی بودن روش اندازه‌گیری نیز باعث ایجاد محدودیت یا مزیت در روش مورد نظر می‌شود. به عنوان مثال مقاومت تماسی حرارتی معمولاً یک منبع خطایی مهم در



شکل ۱۹- محدودیت‌ها و کاربردهای روش‌های مختلف اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت

۵- فهرست علائم

β	مقدار ثابت روش بازتاب حرارتی ناپایدار	A	سطح مقطع نمونه
γ	ضریب ثابت جنس روش مفتول گرم	C	ظرفیت گرمایی حجمی
\ddot{A}	تفاضل	c	دافع حرارت
η	ضریب ثابت روش 3ω	c_p	ظرفیت گرمایی ویژه
λ	متغیر زمان	D	عبارت تئوری بی‌بعد مربوط به زمان
ρ	چگالی جرم	d	ضخامت نمونه، عملگر دیفرانسیل
τ	نصف دوره تناوب جریان گرمایشی	f	فیلم
ϕ	متغیر وابسته به زمان و شعاع در روش دیسک گرم، فاز	f_{linear}	تابع خطی $\ln \omega$
ω	فرکانس زاویه‌ای	G_{det}	ضریب بهره آشکارساز نوری
ω_s	فرکانس لیزر	H	ارتفاع نمونه
P	موازی	I_0	دامنه جریان الکتریکی
\perp	عمود	h	منبع گرم
		k	ضریب انتقال حرارت
		n	متغیر جمع گسسته
		P_1	توان پرتوی پمپ
		P_2	توان پرتوی پویشرگر
		L	فاصله بین دو حسگر دما
		L_p	عمق نفوذ حرارتی
		P	توان گرمایشی
		Q	شار حرارتی پایدار
		q	شار حرارتی
		Q_{loss}	اتلاف حرارتی ناشی از تابش
		R	مقاومت حرارتی
		R_1	ضریب بازتاب در طول موج پرتوی پمپ
		R_2	ضریب بازتاب در طول موج پرتوی پویشرگر
		R_e	مقاومت الکتریکی
		$R_{e,0}$	مقاومت الکتریکی وضعیت اولیه
		r	شعاع
		S	زیرلایه
		T	دما
		T_{pp}	دمای قلّه یا درّه روی نمودار دما
		t	زمان
		$t_{\frac{1}{2}}$	مدّت گرم کردن نمونه تا نصف دمای بیشینه
		V	ولتاژ
		V_{in}	بخش حقیقی پاسخ
		V_{out}	بخش موهومی پاسخ
		W	پارامتر بی‌بعد روش تکنیک پرتوی لیزر
		z	پاسخ بازتاب حرارتی
		α	نفوذپذیری حرارتی
		α_R	ضریب دمایی مقاومت گرم‌کن-حسگر
		α_S	ضریب دمایی مقاومت فیلم-زیرلایه

۶- منابع

- [1] Savija, I., et al., Review of Thermal Conductance Models for Joints Incorporating Enhancement Materials. Journal of Thermophysics and Heat Transfer - J THERMOPHYS HEAT TRANSFER, 2003. 17: p. 43-52.
- [2] Pollack, G.L., Kapitza Resistance. Reviews of Modern Physics, 1969. 41(1): p. 48-81.
- [3] Borumand, F., and Esmailian, M., Design and Analysis of the Marine Permanent Magnet Motor Cooling System, Science and Technology in Mechanics, 2023. 2(1): p.145-156. (in persian)
- [4] Hamilton, R.L. and O.K. Crosser, Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 1962. 1(3): p. 187-191.
- [5] Prasher, R., Thermal Interface Materials: Historical Perspective, Status, and Future Directions. Proceedings of the IEEE, 2006. 94: p. 1571-1586.
- [6] Tritt, T.M., Thermal Conductivity: Theory, Properties, and Applications. 2006: Springer US.
- [7] Yüncü, H. and S. Kakaç, Thermal Contact Conductance - Theory and Applications, in Cooling of Electronic Systems, S. Kakaç, H. Yüncü, and K. Hijikata, Editors ,1994 .Springer Netherlands: Dordrecht. p. 677-702.
- [8] Zeller, R.C. and R.O. Pohl, Thermal Conductivity and Specific Heat of Noncrystalline Solids. Physical Review B, 1971. 4(6): p. 2029-2041.

- Instruments, 2001. 72: p. 1770-1774.
- [20] Maldonado, O., Pulse method for simultaneous measurement of electric thermopower and heat conductivity at low temperatures. *Cryogenics*, 1992. 32(10): p. 908-912.
- [21] Pawlik, K., A. Kucharczyk, and M. Podpora, Method of determining thermal diffusivity on the basis of measurements of linear displacements. *Measurement*, 2023. 211: p. 112624.
- [22] Sundqvist, B., Thermal diffusivity measurements by Ångström's method in a fluid environment. *International Journal of Thermophysics*, 1991. 12(1): p. 191-206.
- [23] Romao, C.P., et al., Thermal, vibrational, and thermoelastic properties of $\text{Y}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ and their relations to negative thermal expansion. *Physical Review B*, 2014. 90(2): p. 024305.
- [24] Kennedy, C.A. and M.A. White, Unusual thermal conductivity of the negative thermal expansion material, ZrW_2O_8 . *Solid State Communications*, 2005. 134: p. 271.
- [25] Whitman, C.A., M.B. Johnson, and M.A. White, Characterization of thermal performance of a solid-solid phase change material, di-n-hexylammonium bromide, for potential integration in building materials. *Thermochimica Acta*, 2012. 531(Complete): p. 54-59.
- [26] Abu-Hamdeh, N., A. Khair, and R. Reeder, Comparison of two methods used to evaluate thermal conductivity for some soils. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001. 44: p. 1073-1078.
- [27] Fešta, C. and A. Rossi, Apparatus for routine measurements of the thermal conductivity of ice cores. *Annals of Glaciology*, 1999. 29: p. 151-154.
- [28] Huang, W., et al., Effective thermal conductivity of reservoir freshwater ice with attention to high temperature. *Annals of Glaciology*, 2013. 54(62): p. 189-195.
- [29] Franco, A., An apparatus for the routine measurement of thermal conductivity of materials for building application based on a transient hot-wire method. *Applied Thermal Engineering*, 2007. 27(14): p. 2139-2147.
- [9] Machlin, E.S., Chapter V - Structure of amorphous films, in *Materials Science in Microelectronics I (Second Edition)*, E.S. Machlin, Editor. 2005, Elsevier: Oxford. p. 141-172.
- [10] Peumans, P., A. Yakimov, and S. Forrest, Small molecular weight organic thin-film photodetectors and solar cells. *Journal of Applied Physics*, 2003. 93: p. 3693-3723.
- [11] Xi, J.Q., et al., Optical thin-film materials with low refractive index for broadband elimination of Fresnel reflection. *Nature Photonics*, 2007. 1(3): p. 176-179.
- [12] Dresselhaus, M.S., et al., New Directions for Low-Dimensional Thermoelectric Materials. *Advanced Materials*, 2007. 19(8): p. 1043-1053.
- [13] Borca-Tasciuc, T., A.R. Kumar, and G. Chen, Data reduction in 3ω method for thin-film thermal conductivity determination. *Review of Scientific Instruments*, 2001. 72(4): p. 2139-2147.
- [14] Cahill, D.G., et al., Nanoscale thermal transport. II. 2003-2012. *Applied Physics Reviews*, 2014. 1(1): p. 011305.
- [15] Cahill, D.G., K. Goodson, and A. Majumdar, Thermometry and Thermal Transport in Micro/Nanoscale Solid-State Devices and Structures. *Journal of Heat Transfer*, 2001. 124(2): p. 223-241.
- [16] Marconnet, A.M., M.A. Panzer, and K.E. Goodson, Thermal conduction phenomena in carbon nanotubes and related nanostructured materials. *Reviews of Modern Physics*, 2013. 85(3): p. 1295-1326.
- [17] Shi, L., et al., Evaluating Broader Impacts of Nanoscale Thermal Transport Research. *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering*, 2015. 19(2): p. 127-165.
- [18] Khorrami, A., Emamian, A., Amiri Delouei, A., Three-dimensional heat transfer simulation of a non-Newtonian droplet considering the effects of surface evaporation, *Science and Technology in Mechanics*, 2023. 2(1): p.41-49. (in persian)
- [19] Zawilski, B., R. Littleton, and T.M. Tritt, Description of the parallel thermal conductance technique for the measurement of the thermal conductivity of small diameter samples. *Review of Scientific*

- laser flash method .in Fifteenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (Cat. No.99CH36306). 1999.
- [41] Abdulgatov, I., et al., Thermal-Diffusivity and Heat-Capacity Measurements of Sandstone at High Temperatures Using Laser Flash and DSC Methods. *International Journal of Thermophysics*, 2015. 36: p. 658-691.
- [42] Khuu, V., et al., Considerations in the Use of the Laser Flash Method for Thermal Measurements of Thermal Interface Materials. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2011. 1: p. 1015-1028.
- [43] Völklein, F., H. Reith, and A. Meier, Measuring methods for the investigation of in-plane and cross-plane thermal conductivity of thin films. *physica status solidi (a)*, 2013. 210(1): p. 106-118.
- [44] Völklein, F., Thermal conductivity and diffusivity of a thin film SiO₂/Si₃N₄ sandwich system. *Thin Solid Films*, 1990. 188(1): p. 27-33.
- [45] Dames, C., Measuring the thermal conductivity of thin films: 3 omega and related electrothermal methods. *Annual Review of Heat Transfer*, 2012. 16.
- [46] Dames, C. Chapter 2 Measuring the Thermal Conductivity of Thin Films : 3 Omega and Related Electrothermal. 2013.
- [47] Sekimoto, Y., et al., Error factors in precise thermal conductivity measurement using 3ω method for wire samples. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2023. 148(6): p. 2285-2296.
- [48] Liu, J., et al., Simultaneous measurement of thermal conductivity and heat capacity of bulk and thin film materials using frequency-dependent transient thermoreflectance method. *Rev Sci Instrum*, 2013. 84(3): p. 034902.
- [49] Mishra, V., et al., A 3 omega method to measure an arbitrary anisotropic thermal conductivity tensor. *Review of Scientific Instruments*, 2015. 86(5): p. 054902.
- [50] Cahill, D.G. and R.O. Pohl, Thermal conductivity of amorphous solids above the plateau. *Physical Review B*, 1987. 35(8): p. 4067-4073.
- [51] Feser, J.P., et al., Ultralow Thermal Conductivity p. 2495-2504.
- [30] Assael, M.J., K.D. Antoniadis, and W.A. Wakeham, Historical Evolution of the Transient Hot-Wire Technique. *International Journal of Thermophysics*, 2010. 31(6): p. 1051-1072.
- [31] Bouguerra, A., et al., Measurement of thermal conductivity, thermal diffusivity and heat capacity of highly porous building materials using transient plane source technique. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2001. 28(8): p. 1065-1078.
- [32] Johra, H., *Thermal Properties of Building Materials - Review and Database*. 2021.
- [33] Gustafsson, S.E., Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials. *Review of Scientific Instruments*, 1991. 62(3): p. 797-804.
- [34] He, Y., Rapid thermal conductivity measurement with a hot disk sensor: Part 1. Theoretical considerations. *Thermochimica Acta*, 2005. 436(1): p. 122-129.
- [35] Afriyie, E.T., et al., Textural and thermal conductivity properties of a low density mesoporous silica material. *Energy and Buildings*, 2014. 75: p. 210-215.
- [36] Min, S., J. Blumm, and A. Lindemann, A new laser flash system for measurement of thermophysical properties. *Thermochimica Acta*, 2007. 455: p. 46-49.
- [37] Parker, W.J., et al., Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity. *Journal of Applied Physics*, 1961. 32: p. 1679.
- [38] Ruoho, M., K. Valset, and T. Finstad, Measurement of thin film thermal conductivity using the laser flash method. *Nanotechnology*, 2015. 26: p. 195706.
- [39] Gong, L., et al., Porous mullite ceramics with low thermal conductivity prepared by foaming and starch consolidation. *Journal of Porous Materials*, 2014. 21.
- [40] Campbell, R.C., S.E. Smith, and R.L. Dietz, Measurements of adhesive bondline effective thermal conductivity and thermal resistance using the

2008. 79 11: p. 114902.

in Polycrystalline CdSe Thin Films with Controlled Grain Size. *Nano Letters*, 2013. 13(5): p. 2122-2127.

[52] Roy-Panzer, S., et al., Thermal characterization and analysis of microliter liquid volumes using the three-omega method. *Review of Scientific Instruments*, 2015. 86(2): p. 024901.

[53] Rosencwaig, A. and A. Gersho, Theory of the photoacoustic effect with solids. *Journal of Applied Physics*, 1976. 47(1): p. 64-69.

[54] Schmidt, A.J., R. Cheaito, and M. Chiesa, Characterization of thin metal films via frequency-domain thermoreflectance. *Journal of Applied Physics*, 2010. 107(2): p. 024908.

[55] Wilson, R.B. and D.G. Cahill, Anisotropic failure of Fourier theory in time-domain thermoreflectance experiments. *Nature Communications*, 2014. 5(1): p. 5075.

[56] Capinski, W.S., et al., Thermal-conductivity measurements of GaAs/AlAs superlattices using a picosecond optical pump-and-probe technique. *Physical Review B*, 1999. 59(12): p. 8105-8113.

[57] Hu, Y., et al., Spectral mapping of thermal conductivity through nanoscale ballistic transport. *Nature nanotechnology*, 2015. 10(8): p. 701-706.

[58] Malen, J.A., et al., Optical Measurement of Thermal Conductivity Using Fiber Aligned Frequency Domain Thermoreflectance. *Journal of Heat Transfer*, 2011. 133(8): p. 081501.

[59] Mikolajek, M., et al., Temperature Measurement Using Optical Fiber Methods: Overview and Evaluation. *Journal of Sensors*, 2020 :2020 .p. 8831332.

[60] Sekine, M. and M. Furuya, Development of Measurement Method for Temperature and Velocity Field with Optical Fiber Sensor. *Sensors*, 2023. 23(3): p. 1627.

[61] Zhu, J., et al., Ultrafast thermoreflectance techniques for measuring thermal conductivity and interface thermal conductance of thin films. *Journal of Applied Physics*, 2010. 108: p. 094315.

[62] Schmidt, A., X. Chen, and G. Chen, Pulse accumulation, radial heat conduction, and anisotropic thermal conductivity in pump-probe transient thermoreflectance. *The Review of scientific instruments*,