(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国 际 局

(43) 国际公布日
2019 年 7 月 18 日 (18.07.2019)

WIPO | PCT

(10) 国际公布号
WO 2019/136885 A1

(51) 国际专利分类号:
G01N 25/18 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2018/085404

(22) 国际申请日: 2018 年 5 月 3 日 (03.05.2018)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201810018047.9 2018年1月9日 (09.01.2018) CN

(71) 申请人: 中 国 计 量 大 学 (**CHINA JILIANG UNIVERSITY**) [CN/CN]; 中国浙江省杭州市经济技术开发区下沙高教园区学源街258号侯德鑫, Zhejiang 310018 (CN)。

(72) 发明人: 侯 德 鑫 (**HOU, Dexin**); 中 国 浙 江 省 杭 州 市 下 沙 高 教 园 区 学 源 街 258 号, Zhejiang 310018 (CN)。 叶 树 亮 (**YE, Shuliang**); 中 国 浙 江 省 杭 州 市 下 沙 高 教 园 区 学 源 街 258 号 侯德鑫, Zhejiang 310018 (CN)。

(74) 代理人: 杭 州 奥 创 知 识 产 权 代 理 有 限 公 司 (**HANGZHOU AOCHUANG INTELLECTUAL PROPERTY AGENCY CO., LTD.**); 中 国 浙 江 省 杭 州 市 上 城 区 复 兴 路 439 号 128 室 王 佳 健, Zhejiang 310008 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明，要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL,

(54) **Title:** STEADY-STATE TEST METHOD FOR HEAT-CONDUCTING PROPERTY IN THE DIRECTION ALONG PLANE OF SHEET MATERIAL

(54) 发明名称: 一种薄片材料面向导热性能稳态测试方法

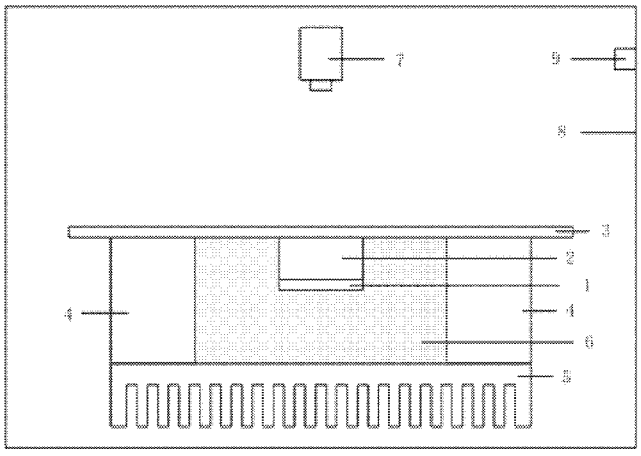


图 1

(57) **Abstract:** Disclosed is a steady-state test method for a heat-conducting property in the direction along the plane of a sheet-like test sample. In the present invention, a sheet sample is locally heated to a thermal equilibrium state, and a heat conductivity coefficient is then calculated according to the integral of a temperature gradient on a heat transfer section. The present invention is characterized in that heat flow uniformity is not required, and the test can be carried out based on a very small area of a sheet sample, so that the surface heat loss power is lower, and the impact of surface heat dissipation on the accuracy of the heat conductivity coefficient test is reduced. Meanwhile, the method characterizes the apparent heat conductivity coefficient of a small area of a sheet, so that quantitative evaluation of the spatial distribution of the heat conductivity coefficients of the non-uniform sheet can be obtained by means of changing test areas. On the basis of the same concept, the method can also be applied to a sheet material with heat conduction anisotropy in the direction along the plane after being slightly modified.

WO 2019/136885 A1

[见续页]

PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明，要求每一种可提供的地区保护)：ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

(57) 摘要：本发明公开了一种针对薄片状测试样品面向导热性能的稳态测试方法。本发明对薄片样品局部加热直到热平衡状态，然后根据传热截面上温度梯度的积分来计算导热系数。本发明特点在于不要求热流均匀，可以基于薄片样品很小的区域进行测试，表面热损失功率较小，减小表面散热对导热系数测试准确性的影响；同时该方法表征的是薄片小范围的表观导热系数，因此通过改变测试区域可获得非均匀薄片导热系数空间分布的定量评估；基于相同思想，将方法略作修改后也适用于面向导热各向异性的薄片材料。

一种薄片材料面向导热性能稳态测试方法

技术领域

本发明涉及一种材料导热性能测试方法，更具体的是一种针对薄片测试样品的面向导热性能稳态测试方法，并且可适用于面向导热性能均匀或非均匀、各向同性或各向异性的薄片。

背景技术

材料导热性能对热设计至关重要，准确测试材料导热性能是系统设计的基础，也是生产品质控制的依据。材料导热性能一般采用导热系数表示，少数时候也使用热扩散率参数表征，在已知密度和比热容的情况下，二者知其一可计算另一个。

导热性能测试目前有很多方法和标准，但这些方法大多针对传统材料，一般要求测试样品是均匀材料，是各向同性的。随着技术的发展，各种新材料和新工艺出现，出现一些传统方法测试效果不理想的情形。某些应用中的器件几何尺寸在一个维度上显著小于其它两个维度，表现出“薄”的特征，比如导热石墨膜，冲压或压铸等工艺制造的薄壁金属件等。很多时候，这些材料的导热性能与材料的结构、成型工艺等密切相关，如果专门制作满足测试要求的厚样品，则该样品的导热性能与真实应用中的材料性能可能存在差异，因此需要直接对薄片样品进行测试。

薄片类材料常规测试方法主要是闪光法，该方法主要用于测试纵向导热系数。某些厂家的导热系数测试仪提供特殊支架，使得闪光法也可以测试面向导热系数，但实践中存在准确性和重复性差的问题。更关键的是，闪光法是一种非稳态方法，对于导热石墨膜等具有多层结构的复合材料，其厚度方向不可近似为均匀材料，非稳态方法测试结果和稳态方法测试结果相比会出现偏差；而在实际应用中，这些材料一般处于近似稳态传热状态，因此稳态法测试结果可以更好的反映该材料在实际应用中的性能表现。

常规的导热系数稳态测试方法，一般需要测量热平衡状态时样品

上的热流密度和温度梯度，导热系数定义为二者比值。测试点的热流密度一般无法直接测量，需要通过参考材料上的热流密度进行估计，或者根据传热总功率除以截面积来计算。因此常规稳态方法测试时一般要求样品内热流密度在传热截面上分布均匀，且热传导过程中上下游截面上的热流总功率保持一致。为此需要在制样和测试条件控制上采取很多措施，比如样品传热截面尺寸足够大以减小表面换热的影响，从热源或接触面到测温点有足够距离以消除加热不均匀或热阻不均匀的影响，表面采用绝热材料包裹或者进行保护加热以提高样品中热流均匀性和连续性，等等。但是对于薄片材料的面向导热系数测试，由于样品厚度方向尺寸很小，面向传热时通过传热截面的热流总功率很小，表面热损失对测试影响很大，样品中热流的均匀性和连续性都难以保证，导致测试准确性和重复性较差。

发明内容

本发明要解决的技术问题是：提出一种适合薄片材料面向导热性能的稳态测试方法，可以减小表面热损失对测试的影响。

本发明解决技术问题所采取的技术方案为：

对待测薄片以恒定功率持续加热，引起平面方向的热传导，在待测薄片达到热平衡后，测量并记录薄片表面温度分布；选择一个完全截断薄片中热传导的截面为测试截面，测试截面与薄片表面的交线为测试线；根据薄片表面温度场数据，计算测试线上各点沿法线方向的温度梯度并将其沿测试线进行线积分，然后乘以薄片厚度，结果记为A；估计测试过程中通过测试截面的热流总功率，记为PT；将PT除以A，得到薄片材料面向导热系数。

进一步说，采用导热系数已知且面向导热性能与待测薄片相近的参考材料制作参考薄片，替代待测薄片进行测试；调节加热功率并检查热平衡时测试截面传热上游温度，直到所测温度均值与待测薄片测试时一致；计算测试线上各点沿法线方向的温度梯度并将其沿测试线进行线积分，然后乘以薄片厚度和参考薄片面向导热系数，结果记为PTR；记待测薄片测试时的加热功率为 PS，参考薄片测试时的加热功率为 PSR，计算待测薄片测试过程中通过测试截面的热流总功率

PT 的方法为：PT=PS-(PSR-PTR)。

进一步说，对于面向导热系数在平面不同区域有显著差异的薄片，将其表面划分为多个不重叠的单连通区，对每个单连通区中部进行局部加热直到热平衡状态，选择包围加热区域且位于该单连通区内的闭合环线为测试线，计算结果为该单连通区的表观面向导热系数；综合所有单连通区测试结果，得到该薄片面向导热系数空间分布的定量评估。

基于本发明相同思路，针对面向导热各向异性的薄片材料，本发明提供如下技术方案同时测量两个面向导热系数：

对待测薄片以恒定功率持续加热，引起平面方向的热传导，在待测薄片达到热平衡后，测量并记录薄片表面温度分布，然后采用如下方法计算两个传热主轴方向的导热系数：

1）在待测薄片上以两个正交的传热主轴方向分别为 X、Y 轴方向建立直角坐标系，记两个方向的导热系数分别为 Kx 和 Ky；选择至少两个完全截断薄片中热传导的截面为测试截面，测试截面与薄片表面的交线为测试线，记为 L(i)，其中 i 为区分不同测试线的编号。

2）对每条测试线 L(i)，计算测试线上各点沿 X 轴方向和 Y 轴方向的温度梯度，取二者沿测试线法线方向的分量沿测试线进行线积分，然后乘以薄片厚度，结果分别记为 Ax(i)和 Ay(i)。

3）估计测试过程中通过测试线 L(i)对应测试截面的热流总功率，记为 PT(i)。

4）求解如下形式的二元一次方程组，得到薄片沿两个传热主轴方向的面向导热系数 Kx 和 Ky：Kx * Ax(i) + Ky * Ay(i) = PT(i)。

本发明的有益效果：本发明并不利用单点热流密度来计算导热系数，而是对传热截面上的热流密度进行积分，利用热流总功率的连续性来计算导热系数，因此测试时不要求产生均匀热流场，降低对热源的要求，并且可以基于很小的测试区域进行导热系数测量，这带来多方面好处：第一，由于表面热损失和散热面积正相关，因此减小测试区域可以有效减小表面热损失；第二，测试区域表面的对流和辐射散热模型和周围环境有关，因此面积越大则干扰因素越复杂，减小测试

区域面积可以提高对流和辐射散热模型的稳定性和重复性，从而提高测试区域表面热损失估计的准确性；第三，由于测试基于很小的测试区域进行，测试结果代表的只是该局部区域内材料的表观导热系数，因此该方法也可用来评估非均匀材料面向导热系数在平面内的分布特性。

附图说明

图 1 为本发明实施方式 1 的测试系统剖面结构；

图 2 为本发明实施方式 1 计算导热系数时的样品表面区域划分；

图 3 为本发明实施方式 2 的测试系统剖面结构；

图 4 为本发明实施方式 2 计算导热系数时的待测样品和参考样品表面区域划分；

图 5 为本发明实施方式 3 的测试系统剖面结构；

图 6 为本发明实施方式 3 中划分不均匀待测薄片表面为多个单连通区的示意图；

图 7 为本发明实施方式 4 中计算两个平面方向导热系数时待测薄片表面区域划分。

具体实施方式

为了使本发明的目的、技术方案及优点清楚明白，以下结合附图对本发明做进一步说明：

实施方式 1

测试系统剖面结构如图 1 所示：电加热装置 1 通过导热柱 2 对待测薄片 3 中部以恒定功率进行局部加热，热量通过导热环座 4 流向热沉 5；电加热装置 1 和导热柱 2 的四周，以及待测薄片 3 的下部，都采用绝热材料 6 填充；热像仪 7 正对待测薄片 3；测试装置主体均位于恒温箱 8 中，温度传感器 9 测量恒温箱温度。

样品表面区域划分如图 2 所示：加热区域 10 位于样品中部，测试区域 11 包围加热区域，散热区域 12 位于最外侧；加热区域 10 和散热区域 12 均有垂直薄片表面方向的热传导，而测试区域 11 可近似为只有面向热传导；选择一条位于测试区域 11 中部的测试线 13，其对应的垂直薄片表面的传热截面完全截断从加热区域 10 向散热区域

12 的热传导。

测试步骤如下：

1）对待测薄片 3 的一个表面涂覆高发射率黑体涂料，待干燥后放入图 1 所示系统中进行测试，涂覆黑体涂料的表面朝向热像仪 7；所述黑体涂覆层的发射率应事先标定，或者采用黑体涂料供应商的数据，该发射率将提供给热像仪 7 以便校正测温数据。

2）电加热装置 1 开始恒定功率持续加热，热像仪 7 持续采集待测薄片 3 表面温度数据，检查其稳定性，直到连续 5 分钟内待测薄片 3 表面任意点温度变化不超过 0.2℃；此时认为样品进入热平衡状态，记录此时表面温度场数据，记录电加热源 1 加热功率 PS，然后计算待测薄片 3 面向导热系数。

计算导热系数方法如下：

1）计算温度梯度在测试截面上的积分：对测试线 13 上各点，根据热像仪 7 测量的离散温度场数据，通过相邻点差分或者局部曲线拟合方法计算该点沿测试线法线方向向外的温度梯度，再通过数值积分方法计算该温度梯度沿测试线的线积分，将其乘以薄片厚度，得到温度梯度在测试截面上的面积分，结果记为 A。

2）计算样品表面热损失功率：根据热像仪 7 测量得到的样品表面温度场数据，对每个像素相应观测区域的热损失进行估计，其中辐射损失为：

$$\mathrm{PLR}(i,j)=\varepsilon\sigma\left(\mathrm{T}(i,j)^4-\mathrm{T}_a{}^4\right)\cdot\mathrm{S}$$

其中下标 i、j 为观测点像素坐标，T 为观测点的热力学温度，T_a 为恒温箱的热力学温度，S 为每个像素点对应的样品表面区域面积，ε 为样品表面发射率，σ 为斯忒藩-玻尔兹曼常数。

对流损失为：

$$\mathrm{PLC}(i,j)=h_s\cdot\left(\mathrm{T}(i,j)-\mathrm{T}_a\right)\cdot\mathrm{S}$$

其中 h_s 为表面对流换热系数，可以凭经验设置，或者根据仿真确定，或者根据一些已知导热系数的参考材料测试结果进行调整；

测试时样品表面热损失 PL 为测试线包围区域各点辐射热损失和对流热损失之和：

$$PL = \sum_{(i,j)\in\Omega} \left(PLC(i,j) + PLR(i,j) \right)$$

其中Ω为测试线包围区域中的像素点坐标集合。

3）计算面向导热系数：将热源加热功率 PS 减去热损失功率 PL，然后除以步骤 1）计算得到的积分值 A，结果为薄片样品的导热系数。

与常规方法相比，该方法不需要实现均匀热流，因此导热柱长度、加热区域面积、测试区长度等都可以很小；比如对 50 微米厚导热石墨膜进行测试时，导热柱直径取为 5mm，导热柱长度取为 10mm，测试线选择与导热柱同心的直径 10mm 圆环，则测试时通过对流和辐射方式散热面积约 78.5mm^2，与绝热材料接触面积约 235.6mm^2。由于和周围环境换热面积减小，因此表面热损失很小，加热功率经过热损失估计和补偿修正后，通过测试截面的热流总功率估计误差可以很小，从而提高导热系数测试精度。另一方面，由于测试结果代表的是很小区域内材料的表观导热系数，因此可以用来定量评估非均匀材料面向导热系数在不同区域的大小。

实施方式 2

测试系统剖面结构如图 3 所示：主电加热装置 1 通过主导热柱 2 对待测薄片 3 中部以恒定功率进行局部加热，热量通过导热环座 4 流向热沉 9；对称的，参考电加热装置 5 通过参考导热柱 6 对参考薄片 7 以恒定功率进行局部加热，热量通过导热环座 8、流向热沉 9；主电加热装置 1 和主导热柱 2 的四周，待测薄片 3 的下部，参考电加热装置 5 和参考导热柱 6 的周围，参考薄片 7 的下部，都采用绝热材料 10 填充；热像仪 11 安装在一维平移台 12 上，可以在待测薄片 3 正上方和参考薄片 7 正上方来回移动测温；测试装置主体均位于恒温箱 14 中，温度传感器 13 测量恒温箱温度。

样品表面区域划分如图 4 所示：加热区域 20 位于样品中部，测试区域 22 包围加热区域，散热区域 21 位于最外侧；加热区域 20 和散热区域 22 均有垂直薄片表面方向的热传导，而测试区域 22 可近似为只有面向热传导；选择五条位于测试区域 22 中部的测试线 23、24、25、26、27，五条测试线对应的垂直薄片表面的传热截面均完全截断

从加热区域 20 向散热区域 21 的热传导。

测试步骤如下：

1）对待测薄片 3 和参考薄片 7 的一个表面涂覆高发射率黑体涂料，待干燥后放入图 3 所示系统中进行测试，涂覆黑体涂料的表面朝向热像仪 11；所述黑体涂覆层的发射率应事先标定，或者采用黑体涂料供应商的数据，该发射率将提供给热像仪 11 以便校正测温数据。

2）恒温箱 14 开始进行温度控制，将恒温箱 14 内部温度调节到设定的测试温度。

3）主电加热装置 1 开始恒定功率持续加热，热像仪 11 移动到待测薄片 3 正上方，持续采集待测薄片 3 表面温度数据，检查其稳定性，直到连续 5 分钟内待测薄片 3 表面任意点温度变化不超过 0.2℃，此时认为样品进入热平衡状态，记录此时表面温度场数据。

4）参考电加热装置 5 开始以设定功率加热，热像仪 11 移动到参考薄片 7 正上方，持续采集参考薄片 7 表面温度数据，检查其稳定性，直到连续 5 分钟内参考薄片 7 表面任意点温度变化不超过 0.2℃。

5）对比参考薄片 7 和待测薄片 3 在加热区 20 和测试区 22 中的平均温度，如果二者差异在 0.2℃之内，则跳转到下一步骤；否则，如果参考薄片 7 平均温度更高，则减小参考电加热源 5 的加热功率，然后跳转到步骤 3)；否则，增加参考电加热源 5 的加热功率，然后跳转到步骤 3)。

6）记录当前的待测薄片 3 表面温度场数据、参考薄片 7 表面温度场数据、主电加热源 1 加热功率 PS、参考电加热源 5 加热功率 PSR；然后计算待测薄片 3 面向导热系数。

计算导热系数方法如下：

1）计算待测薄片 3 和参考薄片 7 上的温度梯度在各测试截面上的积分：对测试环线 23、24、25、26、27 中的每一条，根据热像仪 11 测量的离散温度场数据，通过相邻点差分或者局部曲线拟合方法计算该点沿测试线法线方向向外的温度梯度，再通过数值积分方法计算该温度梯度沿测试线的线积分，将其乘以薄片厚度，得到温度梯度在测试截面上的面积分，记待测薄片 3 在五条测试环线上的结果为

AM(i)，参考薄片 7 在五条测试环线上的结果为 AR(i)，i 表示测试线编号，取值为 1~5。

2）计算参考样品 7 表面热损失功率：参考样品 7 测试时从热源 5 传热到五条测试环线过程中的热损失分别为：

$$\mathrm{PLR}(i)=\mathrm{PSR}-\mathrm{AR}(i)\cdot k_{ref}$$

其中 k_{ref} 为参考薄片的面向导热系数。

3）计算待测薄片 3 的面向导热系数：

$$k_x=\frac{1}{5}\cdot\sum_{i=1}^{5}\frac{\mathrm{PS}-\mathrm{PLR}(i)}{\mathrm{AM}(i)}$$

测试时通过测试截面的热流总功率和热源加热功率之差，一部分通过样品表面散失到周围环境中，另一部分散失到绝热材料中；由于该实施方式中待测薄片 3 和参考薄片 7 具有对称的传热路径，因此二者的热损失模型基本一致；通过调节加热功率使二者温度一致，则热损失功率的大小也基本一致；参考薄片 7 上的热损失可根据已知的参考材料导热系数计算，其结果可以很好的近似待测薄片 3 测试时的热损失功率，从而减小热损失对导热系数测试结果的影响。另外，该实施方式中通过多条测试环线计算导热系数然后取平均值，可以减小测温数据噪声的影响。

实施方式 3

测试系统剖面结构如图 5 所示：待测薄片 3 布置在导热环座 4 上，激光出光部件 1 固定在二维电动位移台 2 上，可以恒定功率发出直径 2mm 的圆光斑激光，投射在待测薄片 3 下表面；待测薄片被加热后，热量通过导热环座 4，流向热沉 5；热像仪 6 位于待测薄片 3 正上方；测试装置主体均位于恒温箱 7 中，温度传感器 8 测量恒温箱温度。

待测薄片 3 的面向导热系数分布不均匀，根据分辨力需要将其表面划分为一系列不重叠的单连通区，比如等间距网格，或者根据先验知识进行适当调整，比如认为边缘处导热系数均匀性更差则网格更密一些，或者根据其它定性评估结果进行划分；一种作为示例的区域划分结果如图 6 所示，其中实线大矩形框表示待测薄片 3，水平和竖直的虚直线表示划分的单连通区边界；对每个单连通区进行测试时，加

热区域为图 6 中的实线小圆，测试环线为图 6 中的虚线椭圆或圆。

测试步骤如下：

1）对待测薄片 3 的两个表面均涂覆高发射率黑体涂料，待干燥后放入图 5 所示系统中进行测试；所述黑体涂覆层在热像仪 6 敏感波长范围的发射率和激光 1 波长的吸收率应事先标定，或者采用黑体涂料供应商的数据，发射率数据提供给热像仪 6 以便校正测温数据，吸收率数据用于校正激光 1 的实际有效加热功率。

2）根据事先设定的图 6 所示待测薄片 3 表面单连通区划分方式，逐个单连通区进行测试，对于每个当前选定的区域执行如下步骤：

2.1）控制电动二维位移台 2，使激光 1 的光斑投射到当前测试单连通区的中心。

2.2）激光 1 开始恒定功率出光，热像仪 6 持续采集待测薄片 3 表面温度数据，检查其稳定性，直到连续 5 分钟内待测薄片 3 表面任意点温度变化不超过 0.2℃；此时认为样品进入热平衡状态，记录此时表面温度场数据，记录激光功率 PS。

2.3）计算待测薄片 3 面向导热系数，方法如下：

2.3.1）计算温度梯度在测试环线指定截面上的积分：对当前测试的单连通区的测试环线上各点，根据热像仪 6 测量的离散温度场数据，通过相邻点差分或者局部曲线拟合方法计算该点沿测试线法线方向向外的温度梯度，再通过数值积分方法计算该温度梯度沿测试线的线积分，将其乘以薄片厚度，得到温度梯度在测试截面上的面积分，结果记为 A。

2.3.2）计算样品表面热损失功率：根据热像仪 6 测量得到的样品表面温度场数据，对每个像素相应观测区域的热损失进行估计，其中辐射损失为：

$$\mathrm{PLR}(i,j)=\varepsilon\sigma\left(\mathrm{T}(i,j)^4-\mathrm{T}_a{}^4\right)\cdot\mathrm{S}$$

其中下标 i、j 为观测点像素坐标，T 为观测点的热力学温度，T_a 为恒温箱的热力学温度，S 为每个像素点对应的样品表面区域面积，ε 为样品表面发射率，σ 为斯忒藩-玻尔兹曼常数。

对流损失为：

$$\mathrm{PLC}(i,j)=h_s\cdot\left(\mathrm{T}(i,j)-\mathrm{T}_a\right)\cdot\mathrm{S}$$

其中h_s为表面对流换热系数。

测试时样品表面热损失 PL 为测试环线包围区域各点辐射热损失和对流热损失之和：

$$\mathrm{PL}=\sum_{(i,j)\in\Omega}\left(\mathrm{PLC}(i,j)+\mathrm{PLR}(i,j)\right)$$

其中Ω为测试环线包围区域中的像素点坐标集合。

2.3.3）计算面向导热系数：将激光加热功率 PS 乘以吸收率，减去步骤 2.3.2）计算得到的热损失功率 PL，然后除以步骤 2.3.1）计算得到的积分值 A，结果为薄片样品 3 在当前测试区域的表观导热系数。

3）综合所有单连通区测试结果，得到整个待测薄片 3 面向导热系数分布特性测试结果。

与常规方法相比，该方法允许待测薄片样品的导热性能在整体上存在非均匀性，只要求小范围内基本一致，可获得导热性能的空间分布的定量评估；比如激光光斑直径为 2mm 时，选择 5mm 直径的测试环线，可以获得 5mm 空间分辨力的面向导热系数空间分布测试结果。

实施方式 4

测试系统剖面结构如图 1 所示：电加热装置 1 通过导热柱 2 对待测薄片 3 中部以恒定功率进行局部加热，热量通过导热环座 4 流向热沉 5；电加热装置 1 和导热柱 2 的四周，以及待测薄片 3 的下部，都采用绝热材料 6 填充；热像仪 7 正对待测薄片 3；测试装置主体均位于恒温箱 8 中，温度传感器 9 测量恒温箱温度。

样品表面区域划分如图 7 所示：加热区域 10 位于样品中部，测试区域 11 包围加热区域，散热区域 12 位于最外侧；加热区域 10 和散热区域 12 均有垂直薄片表面方向的热传导，而测试区域 11 可近似为只有面向热传导；选择两条位于测试区域 11 中的测试线 13 和测试线 14，其对应的垂直薄片表面的传热截面均完全截断从加热区域 10 向散热区域 12 的热传导，并且二者均采用类似椭圆形状闭合环线，但两条测试线的长轴方向彼此垂直。

测试步骤如下：

1）对待测薄片 3 的一个表面涂覆高发射率黑体涂料，待干燥后放入图 1 所示系统中进行测试，涂覆黑体涂料的表面朝向热像仪 7；所述黑体涂覆层的发射率应事先标定，或者采用黑体涂料供应商的数据，该发射率将提供给热像仪 7 以便校正测温数据。

2）电加热装置 1 开始恒定功率持续加热，热像仪 7 持续采集待测薄片 3 表面温度数据，检查其稳定性，直到连续 5 分钟内待测薄片 3 表面任意点温度变化不超过 0.2℃；此时认为样品进入热平衡状态，记录此时表面温度场数据，记录电加热源加热功率 PS，然后计算待测薄片面向导热系数。

计算导热系数方法如下：

1）在待测薄片上以两个正交的传热主轴方向分别为 X、Y 轴方向建立直角坐标系，记两个方向的导热系数分别为 Kx 和 Ky。

2）计算温度梯度在测试截面上的积分：根据热像仪 7 测量的离散温度场数据，通过相邻点差分或者局部曲线拟合方法，计算图 7 中测试线 13 和测试线 14 上各点沿 X 轴方向和 Y 轴方向的温度梯度，取二者沿测试线法线方向的分量沿测试线进行线积分，然后乘以薄片厚度；将测试线 13 上计算结果记为 AX1 和 AY1，测试线 14 上结果记为 AX2 和 AY2。

3）估计测试过程中通过测试线 13 和测试线 14 相应测试截面的热流总功率：根据热像仪 7 测量得到的样品表面温度场数据，对每个像素相应观测区域的热损失进行估计，其中

辐射损失为：

$$\mathrm{PLR}(i,j)=\varepsilon\sigma\left(\mathrm{T}(i,j)^4-\mathrm{T}_a^{\,4}\right)\cdot\mathrm{S}$$

其中下标 i、j 为观测点像素坐标，T 为观测点的热力学温度，T_a 为恒温箱的热力学温度，S 为每个像素点对应的样品表面区域面积，ε 为样品表面发射率，σ 为斯忒藩-玻尔兹曼常数。

对流损失为：

$$\mathrm{PLC}(i,j)=\mathrm{h}_s\cdot\left(\mathrm{T}(i,j)-\mathrm{T}_a\right)\cdot\mathrm{S}$$

其中 h_s 为表面对流换热系数；

计算测试线 13 和测试线 14 包围区域辐射热损失和对流热损失之和：

$$PL1 = \sum_{(i,j)\in\Omega 1} \left(PLC(i,j) + PLR(i,j)\right)$$

$$PL2 = \sum_{(i,j)\in\Omega 2} \left(PLC(i,j) + PLR(i,j)\right)$$

其中Ω1为测试线 13 包围区域中的像素点坐标集合，Ω2为测试线 14 包围区域中的像素点坐标集合。

4）求解如下方程组：

$$Kx \cdot Ax1 + Ky \cdot Ay1 = PS - PL1$$

$$Kx \cdot Ax2 + Ky \cdot Ay2 = PS - PL2$$

未知量 Kx 和 Ky 求解结果即为 X 和 Y 轴方向面向导热系数。

该实施方式中构造两个形状不一样的测试线，并且积分时分别对 X 向温度梯度和 Y 向温度梯度的法向分量进行积分，因此可以将两个方向的热流分量区分开，建立以传热主轴方向导热系数为未知量的两个方程，最后求解线性方程组即可得到两个方向的导热系数。

本说明书实施例所述的内容仅仅是对发明构思的实现形式的列举，本发明的保护范围不应当被视为仅限于实施例所陈述的具体形式，本发明的保护范围也及于本领域技术人员根据本发明构思所能够想到的等同技术手段。

权 利 要 求 书

1. 一种薄片材料面向导热系数测试方法，其特征在于：对待测薄片以恒定功率持续加热，引起平面方向的热传导，在待测薄片达到热平衡后，测量并记录待测薄片表面温度分布；选择一个完全截断待测薄片中热传导的截面为测试截面，测试截面与待测薄片表面的交线为测试线；根据待测薄片表面温度场数据，计算测试线上各点沿法线方向的温度梯度并将其沿测试线进行线积分，然后乘以待测薄片厚度，结果记为 A；估计测试过程中通过测试截面的热流总功率，记为 PT；将 PT 除以 A，得到待测薄片材料面向导热系数。

2. 根据权利要求 1 所述测试方法，其特征在于：采用导热系数已知且面向导热性能与待测薄片相近的参考材料制作参考薄片，替代待测薄片进行测试；调节加热功率并检查热平衡时测试截面传热上游温度，直到所测温度均值与待测薄片测试时一致；计算测试线上各点沿法线方向的温度梯度并将其沿测试线进行线积分，然后乘以参考薄片厚度和参考薄片面向导热系数，结果记为 PTR；记待测薄片测试时的加热功率为 PS，参考薄片测试时的加热功率为 PSR，计算待测薄片测试过程中通过测试截面的热流总功率 PT 的方法为：

PT=PS-(PSR-PTR)。

3. 根据权利要求 1 所述测试方法，其特征在于：对于面向导热系数在平面不同区域有显著差异的待测薄片，将其表面划分为多个不重叠的单连通区，对每个单连通区中部进行局部加热直到热平衡状态，选择包围加热区域且位于该单连通区内的闭合环线为测试线，计算结果为该单连通区的表观面向导热系数；综合所有单连通区测试结果，得到该待测薄片面向导热系数空间分布的定量评估。

4. 一种平面方向导热各向异性的薄片材料两个面向导热系数同时测试的方法，其特征在于：对待测薄片以恒定功率持续加热，引起平面方向的热传导，在待测薄片达到热平衡后，测量并记录待测薄片表面温度分布，然后采用如下方式计算两个传热主轴方向的导热系

数：

1）在待测薄片上以两个正交的传热主轴方向分别为 X、Y 轴方向建立直角坐标系，记两个方向的导热系数分别为 Kx 和 Ky；选择至少两个完全截断待测薄片中热传导的截面为测试截面，测试截面与待测薄片表面的交线为测试线，记为 L(i)，其中 i 为区分不同测试线的编号；

2）对每条测试线 L(i)，计算测试线上各点沿 X 轴方向和 Y 轴方向的温度梯度，取二者沿测试线法线方向的分量沿测试线进行线积分，然后乘以待测薄片厚度，结果分别记为 Ax(i)和 Ay(i)；

3）估计测试过程中通过测试线 L(i)对应测试截面的热流总功率，记为 PT(i)；

4）求解如下形式的二元一次方程组，得到待测薄片沿两个传热主轴方向的面向导热系数 Kx 和 Ky：Kx * Ax(i) + Ky * Ay(i) = PT(i)。

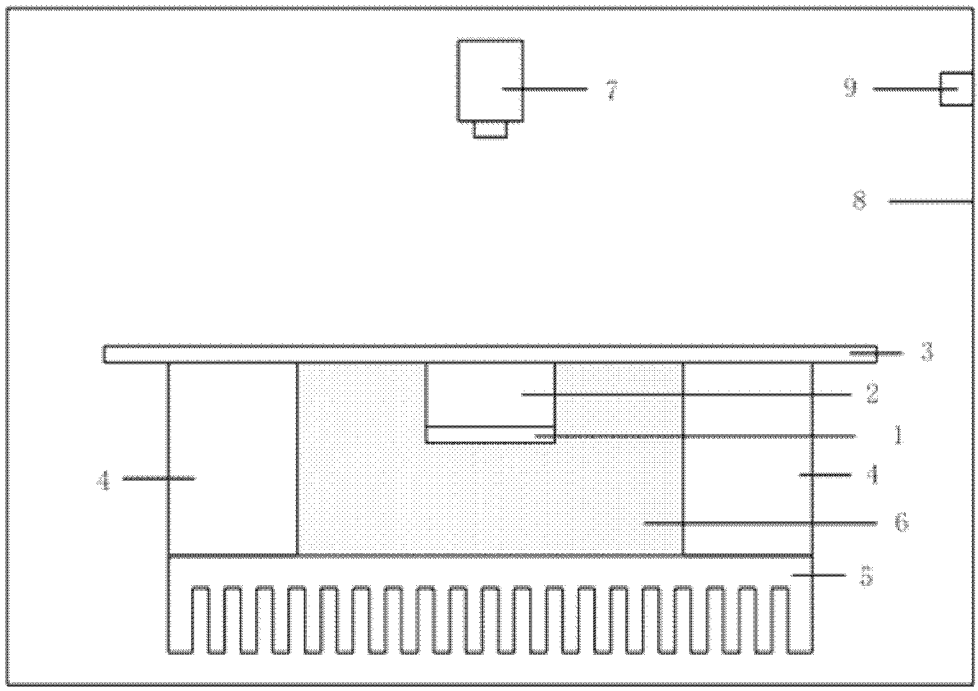


图 1

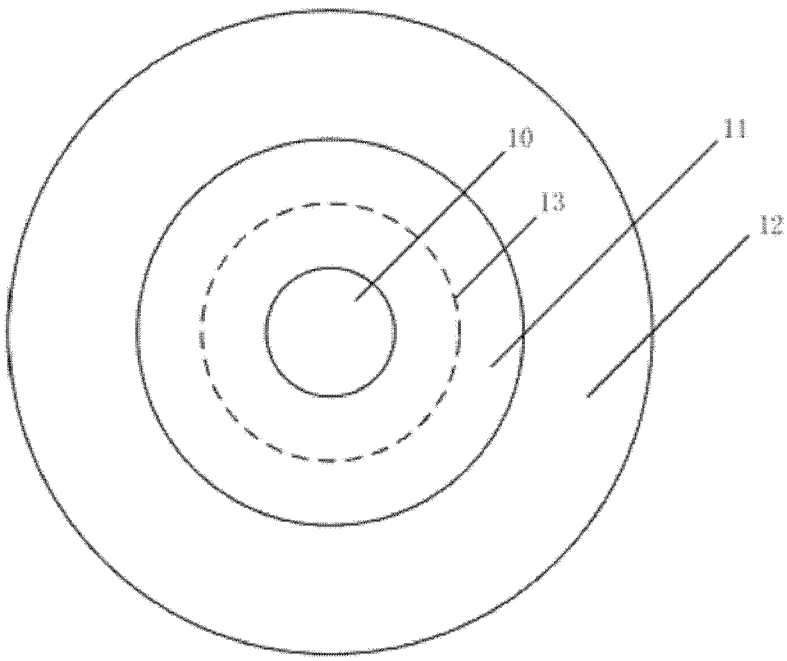


图 2

替换页（细则第26条）

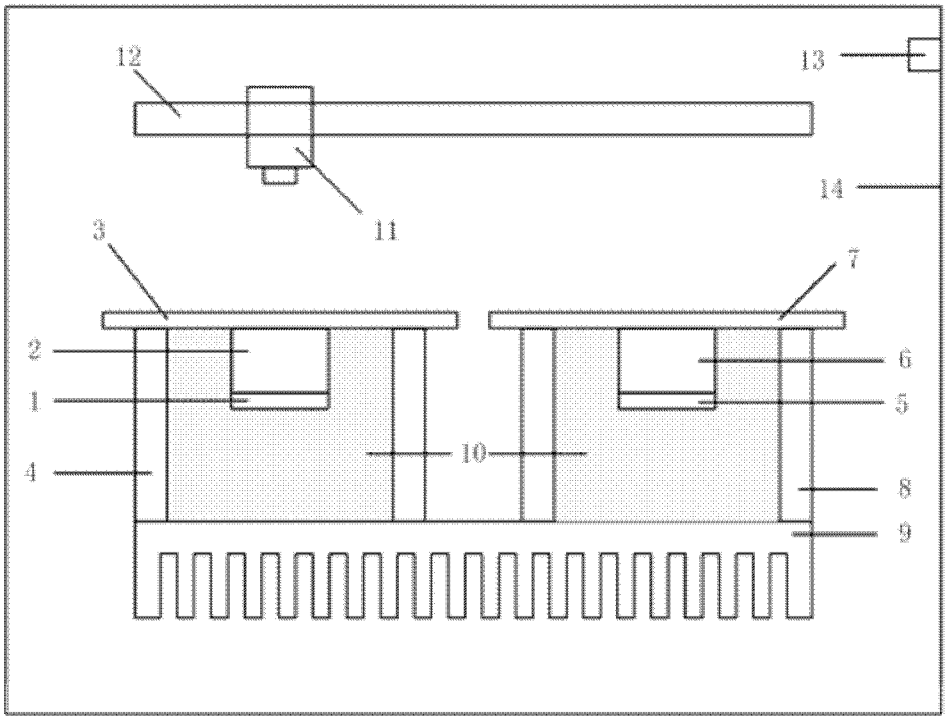


图 3

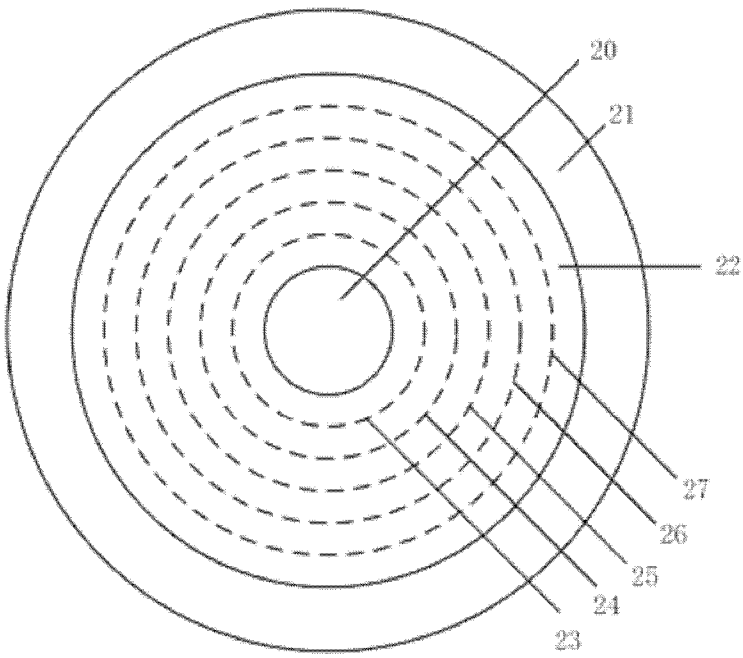


图 4

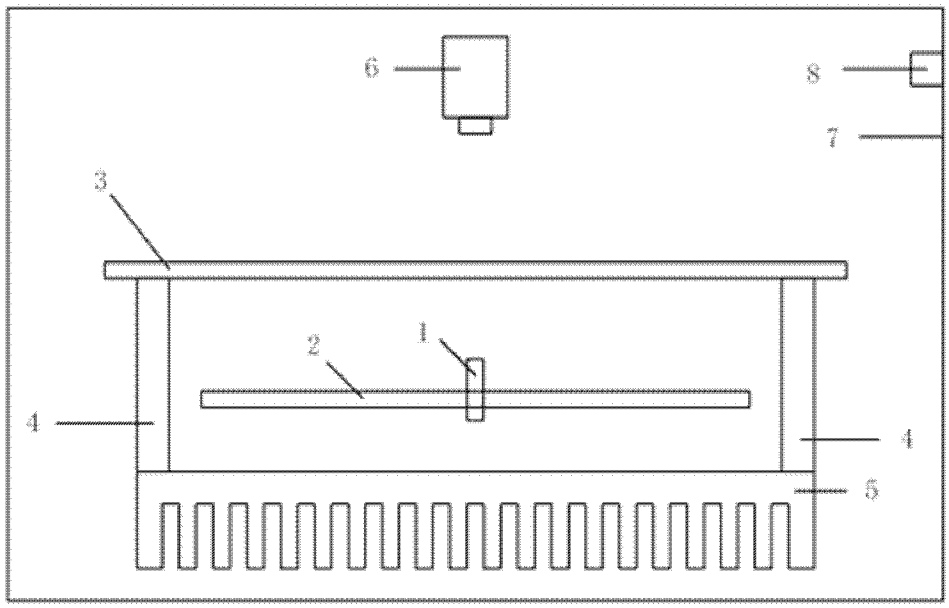


图 5

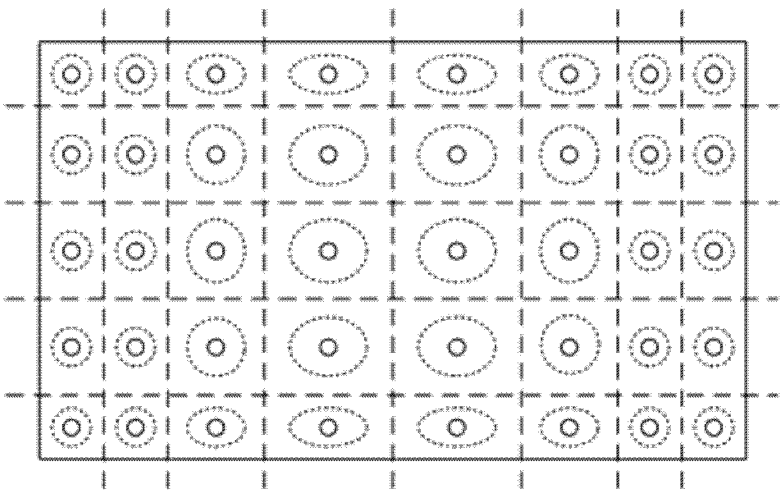


图 6

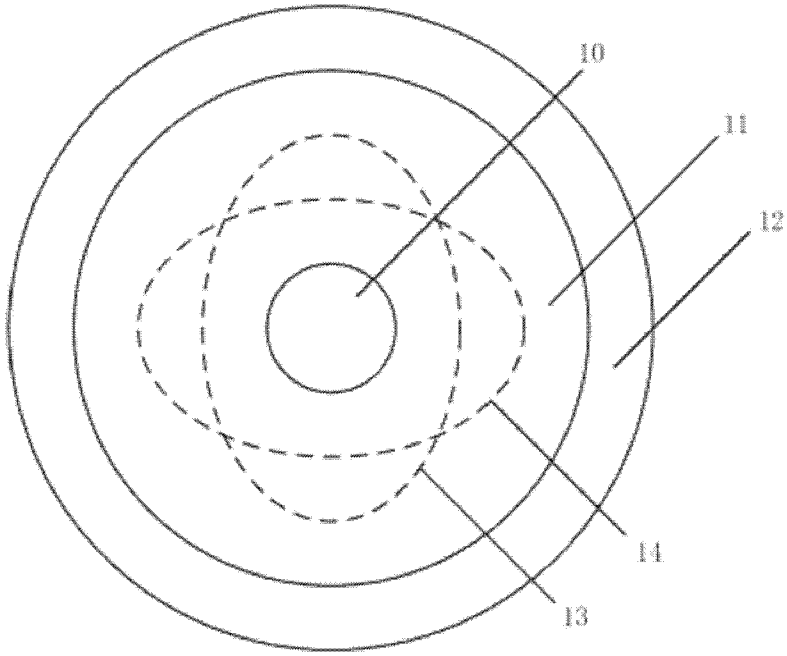


图 7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2018/085404

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01N 25/18(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01N25

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNABS; CNKI; 万方, WANFANG: 导热系数, 热导系数, 热扩散率, 薄片, 薄板, 薄膜, 平板, 二维, 面向, 石墨烯, 截断, 截止, 绝热, 稳态, 积分 VEN; CATXT; USTXT; GBTXT; EPTXT; WOTXT; ISI: thermal, conduct+, slice, sheet, lamella, film, flat, thin, two w dimensi+, integra+, isolat+

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 1589398 A (THE CIRCLE FOR THE PROMOTION OF SCIENCE AND ENGINEERING) 02 March 2005 (2005-03-02) claim 1, and description, embodiment 6	1-4
A	CN 104280419 A (BEIJING BUILDING RESEARCH INSTITUTE CO., LTD. OF CSCEC ET AL.) 14 January 2015 (2015-01-14) entire document	1-4
A	CN 1228564 A (NEC CORPORATION) 15 September 1999 (1999-09-15) entire document	1-4
A	CN 101620192 A (UNIVERSITY OF ELECTRONIC SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA) 06 January 2010 (2010-01-06) entire document	1-4
A	CN 1445535 A (SOUTHEAST UNIVERSITY) 01 October 2003 (2003-10-01) entire document	1-4
A	EP 0163466 A2 (THERMA WAVE INC.) 04 December 1985 (1985-12-04) entire document	1-4

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☑ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
22 August 2018	**04 September 2018**

Name and mailing address of the ISA/CN	Authorized officer
State Intellectual Property Office of the P. R. China **No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing** **100088** **China**	
Facsimile No. **(86-10)62019451**	Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2018/085404

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	1589398	A	02 March 2005	JP	WO2003044509	A1	24 March 2005
				US	2005002435	A1	06 January 2005
				EP	1450155	A1	25 August 2004
				WO	03044509	A1	30 May 2003
				AU	2002366137	A1	10 June 2003
CN	104280419	A	14 January 2015		None		
CN	1228564	A	15 September 1999	JP	H11260818	A	24 September 1999
				US	6513000	B1	28 January 2003
				KR	19990077715	A	25 October 1999
				TW	413772	B	01 December 2000
				KR	100299904	B1	22 November 2001
				JP	3189778	B2	16 July 2001
CN	101620192	A	06 January 2010		None		
CN	1445535	A	01 October 2003	CN	1206528	C	15 June 2005
EP	0163466	A2	04 December 1985	JP	S60256038	A	17 December 1985
				US	4679946	A	14 July 1987
				DE	3579497	D1	11 October 1990
				JP	H0684942	B2	26 October 1994
				EP	0163466	B1	05 September 1990

国际检索报告

国际申请号 PCT/CN2018/085404

A. 主题的分类

G01N 25/18(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G01N25

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称，和使用的检索词（如使用））

CNABS;CNKI;万方：导热系数，热导系数，热扩散率，薄片，薄板，薄膜，平板，二维，面向，石墨烯，截断，截止，绝热，稳态，积分 VEN;CATXT;USTXT;GBTXT;EPTXT;WOTXT;ISI:thermal,conduct+,slice,sheet,lamella,film,flat,thin,two w dimensi+,integra+,isolat+

C. 相关文件

类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
A	CN 1589398 A (财团法人理工学振兴会) 2005年 3月 2日 (2005 - 03 - 02) 权利要求1，说明书实施例6	1-4
A	CN 104280419 A (北京中建建筑科学研究院有限公司 等) 2015年 1月 14日 (2015 - 01 - 14) 全文	1-4
A	CN 1228564 A (日本电气株式会社) 1999年 9月 15日 (1999 - 09 - 15) 全文	1-4
A	CN 101620192 A (电子科技大学) 2010年 1月 6日 (2010 - 01 - 06) 全文	1-4
A	CN 1445535 A (东南大学) 2003年 10月 1日 (2003 - 10 - 01) 全文	1-4
A	EP 0163466 A2 (THERMA WAVE INC) 1985年 12月 4日 (1985 - 12 - 04) 全文	1-4

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。

☑ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型：

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件，或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件（如具体说明的）

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布，与申请不相抵触，但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件，单独考虑该文件，认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件，当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时，要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期	国际检索报告邮寄日期
2018年 8月 22日	2018年 9月 4日
ISA/CN的名称和邮寄地址 中华人民共和国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451	受权官员 金川 电话号码 86-(20)-28950380

表 PCT/ISA/210 (第2页) (2015年1月)

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2018/085404

检索报告引用的专利文件			公布日（年/月/日）	同族专利			公布日（年/月/日）
CN	1589398	A	2005年 3月 2日	JP	WO2003044509	A1	2005年 3月 24日
				US	2005002435	A1	2005年 1月 6日
				EP	1450155	A1	2004年 8月 25日
				WO	03044509	A1	2003年 5月 30日
				AU	2002366137	A1	2003年 6月 10日
CN	104280419	A	2015年 1月 14日		无		
CN	1228564	A	1999年 9月 15日	JP	H11260818	A	1999年 9月 24日
				US	6513000	B1	2003年 1月 28日
				KR	19990077715	A	1999年 10月 25日
				TW	413772	B	2000年 12月 1日
				KR	100299904	B1	2001年 11月 22日
				JP	3189778	B2	2001年 7月 16日
CN	101620192	A	2010年 1月 6日		无		
CN	1445535	A	2003年 10月 1日	CN	1206528	C	2005年 6月 15日
EP	0163466	A2	1985年 12月 4日	JP	S60256038	A	1985年 12月 17日
				US	4679946	A	1987年 7月 14日
				DE	3579497	D1	1990年 10月 11日
				JP	H0684942	B2	1994年 10月 26日
				EP	0163466	B1	1990年 9月 5日