

(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 6 月 27 日 (27.06.2019)



(10) 国际公布号
WO 2019/119988 A1

(51) 国际专利分类号:
G01N 25/20 (2006.01) **G01N 21/65** (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2018/113421

(22) 国际申请日: 2018 年 11 月 1 日 (01.11.2018)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201711384573.9 2017 年 12 月 20 日 (20.12.2017) CN

(71) 申请人: 清华大学 (TSINGHUA UNIVERSITY)
[CN/CN]; 中国北京市海淀区清华园,
Beijing 100084 (CN)。

(72) 发明人: 张兴 (ZHANG, Xing); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。 樊傲然 (FAN, Aoran); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。 胡玉东 (HU, Yudong); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。 马维刚 (MA, Weigang); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。

(74) 代理人: 北京清亦华知识产权代理事务所 (普通合伙) (TSINGYIHUA INTELLECTUAL PROPERTY LLC); 中国北京市海淀区清华园清华大学照澜院商业楼 301 室, Beijing 100084 (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, 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))。

(54) Title: DUAL-PULSE FLASH RAMAN METHOD AND SYSTEM FOR REPRESENTING THERMOPHYSICAL PROPERTY OF TWO-DIMENSIONAL NANOMATERIAL

(54) 发明名称: 表征二维纳米材料热物性的双脉冲闪光拉曼方法及系统

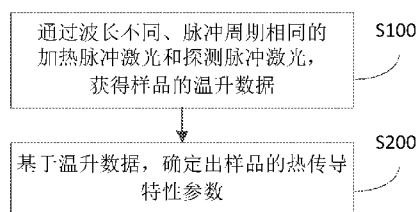


图 1

S100 Obtain temperature rise data of a sample by means of a heating pulse laser and a detection pulse laser which are different in wavelengths and are the same in pulse periods

S200 Determine thermal conduction characteristic parameters of the sample on the basis of the temperature rise data

(57) Abstract: A dual-pulse flash Raman method and system for representing thermophysical property of a two-dimensional nanomaterial. The dual-pulse flash Raman method for representing the thermophysical property of the two-dimensional nanomaterial comprises: obtaining temperature rise data of a sample (A) by means of a heating pulse laser and a detection pulse laser which are different in wavelengths and are the same in pulse periods; and determining thermophysical property parameters of the sample (A) on the basis of the temperature rise data.

(57) 摘要: 一种表征二维纳米材料热物性的双脉冲闪光拉曼方法及系统。表征二维纳米材料热物性的双脉冲闪光拉曼方法包括: 通过波长不同、脉冲周期相同的加热脉冲激光和探测脉冲激光, 获得样品(A)的温升数据; 基于温升数据, 确定出样品(A)的热物性参数。

WO 2019/119988 A1

表征二维纳米材料热物性的双脉冲闪光拉曼方法及系统

优先权信息

本申请请求 2017 年 12 月 20 日向中国国家知识产权局提交的、专利申请号为 201711384573.9 的发明的专利申请的优先权和权益，并且通过参照在先文本的全文并入此
5 处。

技术领域

本申请涉及微纳米尺度热物性测试领域，具体的，本申请涉及一种表征二维纳米材料热物性的双脉冲闪光拉曼方法及系统。更具体的，本申请涉及表征二维纳米材料热物性的
10 双脉冲闪光拉曼方法、用于表征二维纳米材料热物性的双脉冲闪光拉曼系统。

背景技术

纳米薄膜材料在光电元件、机械元件和储存介质等领域均有着重要的应用前景，而对纳米薄膜材料的性质的准确测定，则是其应用的先决条件。

15 接触式方法，作为传统的热传导特性测量方法，被广泛应用于二维纳米材料的测量。2013 年，Xie. 等人（Xie H, et al., Applied Physics Letters, 2013, 102(11): 111911.）通过通电自加热法测量了悬架石墨烯纳米条带的热导率。同年，Jang. 等人（Jang W, et al., Applied Physics Letters, 2013, 103(13): 133102.）通过 T 型法测量了悬架多层石墨烯的热导率。此外，悬浮微器件法也被广泛应用于二维纳米材料的测量。然而，接触式方法往往会引入无法消
20 除的接触热阻和接触电阻，给测量带来不必要的误差；需要制备微电极，样品制备困难，加大了测量难度；由于存在漏电影响，通常不适用于有基底的样品。由于界面效应的影响，有基底和悬架的纳米薄膜性质存在差异，因此，还需使用非接触式方法测定有基底的二维纳米材料热传导特性。

拉曼光谱法作为一种非接触式方法，可被用于测量有基底二维纳米材料的热传导特性：
25 通过连续激光加热有基底的二维材料样品，再通过测量二维材料拉曼特征峰峰位的偏移确定二维材料温升，即可确定其热传导特性。然而，在此类测量中需要假设二维材料的激光吸收率和基底温升，引入了不必要的误差。2016 年，Li. 等人（Li Q Y, et al., International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 95: 956-963.）开发了变光斑拉曼闪光法，分别使用
30 脉冲激光和连续激光加热有基底二维纳米材料，通过改变光斑尺寸获得基底和二维材料激光吸收率之比及二维材料的热导率，通过比较脉冲激光和连续激光加热的温升消除二维纳米材料激光吸收率的影响，进而通过改变脉冲激光时间获得二维材料的热扩散率。然而，这一方法需要通过调整焦平面距样品的距离改变光斑大小，在测量中会引入一定的误

差；激光吸收率之比和二维材料热导率的区分度较低，也会导致一定的测量误差；加热激光同时作为探测光，加热功率过大会引起激光器热漂，加热功率过小会导致样品温升过小，均会影响测量精度。

综上所述，现有实验研究尚不能精确的测定有基底二维纳米材料的热传导特性，亟待开发更简便、更高精度的有基底二维纳米材料热传导特性确定方法。

发明内容

为了准确地测量二维纳米材料的热物性参数，本申请提供了一种用于表征二维纳米材料热物性的双脉冲闪光拉曼法。其中，针对有基底的二维纳米材料样品，可使用一束较强的加热脉冲激光来加热样品和基底；在加热脉冲激光的间隔时间 t_c 内，使用另一束不同波长的探测脉冲激光进行拉曼信号探测，并利用拉曼光谱峰位偏移和温升的线性关系，可以测定出探测脉冲激光时间 t_p 内样品和基底表面的温升。而且，还可通过双通道信号发生器，来调控探测脉冲激光与加热脉冲激光的时间偏差 t_d ，可以同时测定样品和基底表面的温升随时间的变化曲线，由此即可获得二维纳米材料样品热扩散率 α 、热导率 λ 及二维纳米材料与基底之间的接触热阻 g 等热物性参数。此外，上述方法同样可测定悬架二维纳米材料温升随时间的变化，从而得到悬架二维纳米材料的热扩散率 α 。

有鉴于此，本申请的一个目的在于提出一种通过双激光束实现非接触式、测量精度更高、灵敏度更高或者同时适用于有基底和悬架设置的二维纳米材料热物性参数的方法。

在本申请的第一方面，本申请提出了一种表征二维纳米材料热物性的双脉冲闪光拉曼方法。

根据本申请的实施例，所述方法包括：通过波长不同、脉冲周期相同的加热脉冲激光和探测脉冲激光，获得样品的温升数据；基于所述温升数据，确定出所述样品的热物性参数。

发明人意外地发现，采用本申请实施例的方法，针对二维纳米材料样品，可使用一束较强的加热脉冲激光来加热样品，然后在加热脉冲激光的间隔时间内，使用另一束不同波长的探测脉冲激光进行探测，可以测定出样品在降温段的温升数据，并依据该数据确定样品的热物性参数，如此，该方法无需调焦而避免了测量误差，分别采用加热脉冲激光和探测脉冲激光可避免加热功率对测量精度的影响，测量降温段温升数据可以消除激光吸收率对测量的影响，从而使该方法测量的二维纳米材料样品热物性参数的精度更高、准确性更好且灵敏度更高。

另外，根据本申请上述实施例的方法，还可以具有如下附加的技术特征：

根据本申请的实施例，所述获得样品的温升数据的步骤进一步包括：通过加热脉冲激光，在第一脉冲时间 t_h 内使所述样品的温度从环境温度 T_1 升至稳态 T_2 ；所述样品在第一间隔时间 t_c 内，从所述稳态 T_2 冷却至环境温度 T_1 ，且从所述第一间隔时间 t_c 内的时间偏差 t_d 开始，通过探测脉冲激光在第二脉冲时间 t_p 内对所述样品进行拉曼信号探测，以便获得所述样品的拉曼光谱；基于所述拉曼光谱中所述二维纳米材料的特征峰偏移值，确定所述样品在第二脉冲时间 t_p 内的温升 T_3 。

根据本申请的实施例，所述样品的下表面设有基底；而且，所述获得所述样品的拉曼光谱的步骤进一步包括：通过所述探测脉冲激光在所述第二脉冲时间 t_p 内对所述样品进行拉曼信号探测，以便获得所述样品和所述基底的拉曼光谱；且，所述确定所述样品在第二脉冲时间 t_p 内的温升 T_3 的步骤进一步包括：基于所述拉曼光谱中所述二维纳米材料和所述基底各自的特征峰偏移值，确定出第二脉冲时间 t_p 内所述样品的温升 T_3 和所述基底的温升 T_4 。

根据本申请的实施例，所述二维纳米材料为非金属二维纳米薄膜材料，所述非金属二维纳米薄膜材料为石墨烯、硅烯或磷烯，所述基底的材料为二氧化硅或其他有拉曼特征峰的非金属材料。

根据本申请的实施例，所述加热脉冲激光和探测脉冲激光都是连续激光通过电光调制器和信号发生器的调制而形成的。

根据本申请的实施例，所述探测脉冲激光的波长大于所述加热脉冲激光的波长。

根据本申请的实施例，所述探测脉冲激光照射在所述样品的上表面的强度小于 3mW。

根据本申请的实施例，所述获得样品的温升数据的步骤在真空环境下进行，并且所述真空环境的真空度小于 10^{-3} Pa。

根据本申请的实施例，所述热物性参数包括热导率、热扩散率和接触热导的至少之一；并且，所述确定出所述样品的热物性参数的步骤进一步包括：建立降温阶段的非稳态导热方程组；对所述非稳态导热方程组进行无量纲化处理；基于所述温升数据，对所述无量纲化处理的非稳态导热方程组进行多参数拟合处理，以便获得所述样品的热物性参数。

根据本申请的实施例，在所述建立降温阶段的非稳态导热方程组的步骤中，对于设有基底的所述样品，耦合有所述基底的样品在降温阶段的非稳态导热方程组如下所示：

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 \theta_s(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta_s(r,t)}{\partial r} - \frac{g(\theta_s(r,t) - \theta_s(r,0,t))}{\lambda_s \delta} = \frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial \theta_s(r,t)}{\partial t} \\ \frac{\partial^2 \theta_b(r,z,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta_b(r,z,t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta_b(r,z,t)}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha_b} \frac{\partial \theta_b(r,z,t)}{\partial t} \\ \frac{\partial \theta_s(0)}{\partial r} = \frac{\partial \theta_b(0,z)}{\partial r} = 0 \end{array} \right.$$

$$\begin{cases}
 \theta_s(\infty, t) = \theta_b(\infty, z, t) = 0 \\
 \theta_b(r, \infty, t) = 0 \\
 -\lambda_b \frac{\partial \theta_b(r, 0, t)}{\partial z} = g(\theta_s(r, t) - \theta_b(r, 0, t)) \\
 \theta_s(r, 0) = \theta_{s0}(r) \\
 \theta_b(r, z, 0) = \theta_{b0}(r, z)
 \end{cases}$$

其中, 所述样品的高斯平均温升为 $\bar{\theta}_s(t) = 2\pi \int_0^\infty \theta_s(r, t) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$,

所述基底的表面高斯平均温升为 $\bar{\theta}_b(t) = 2\pi \int_0^\infty \theta_b(r, 0, t) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$,

所述样品的稳态温升为 $\bar{\theta}_{s0} = 2\pi \int_0^\infty \theta_{s0}(r) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$,

所述基底的稳态温升为 $\bar{\theta}_{b0} = 2\pi \int_0^\infty \theta_{b0}(r, 0) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$,

所述探测激光的高斯平均常数为 $q_p = 1 / \pi r_p^2$, α_s 、 α_b 分别为所述样品和所述基底的热扩散率, g 为所述样品和所述基底之间的接触热导。

根据本申请的实施例, 在所述建立降温阶段的非稳态导热方程组的步骤中, 对于悬架设置的所述样品, 所述样品在降温阶段的非稳态导热方程组如下所示:

$$\begin{cases}
 \frac{\partial^2 \theta_s(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta_s(r, t)}{\partial r} = \frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial \theta_s(r, t)}{\partial t} \\
 \frac{\partial \theta_s(0)}{\partial r} = 0 \\
 \theta_s(\infty, t) = 0 \\
 \theta_s(r, 0) = \theta_{s0}(r)
 \end{cases}$$

其中, 所述样品的高斯平均温升为 $\bar{\theta}_s(t) = 2\pi \int_0^\infty \theta_s(r, t) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$,

所述样品的稳态温升为 $\bar{\theta}_{s0} = 2\pi \int_0^\infty \theta_{s0}(r) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$,

所述探测激光的高斯平均常数为 $q_p = 1 / \pi r_p^2$, α_s 为所述样品的热扩散率。

在本申请的第二方面, 本申请提出了一种用于表征二维纳米材料热物性的双脉冲闪光拉曼系统。

根据本申请的实施例, 所述系统包括: 样品室, 所述样品室用于放置样品; 加热装置, 所述加热装置的第一出光光路连接所述样品室, 且所述加热装置形成的加热脉冲激光用于加热所述样品; 探测装置, 所述探测装置的第二出光光路连接所述样品室, 且所述探测装

置形成的探测脉冲激光用于探测所述样品的温升数据；热物性参数确定装置，所述热物性参数确定装置基于所述温升数据，确定所述样品的热物性参数；其中，所述第一出光光路与所述第二出光光路部分重合，且所述加热装置形成的加热脉冲激光和所述探测装置形成的探测脉冲激光的波长不同、脉冲周期相同。

5 发明人意外地发现，本申请实施例的系统，其包括加热装置和探测装置，该加热装置可向样品室提供加热脉冲激光，而探测装置可向样品室提供探测脉冲激光，如此，加热装置形成的较强的加热脉冲激光可加热样品，然后在加热脉冲激光的间隔时间内，探测装置形成另一束不同波长的探测脉冲激光对样品进行探测，而热物性参数表征装置可根据探测获得的样品温升数据确定出样品的热物性参数，并且，该测试系统的准确性更高、测量精
10 度更好且灵敏度更高。

另外，根据本申请上述实施例的系统，还可以具有如下附加的技术特征：

根据本申请的实施例，所述加热装置包括：第一激光器，所述第一激光器用于形成加热激光；以及第一电光调制器，所述第一电光调制器设置在所述加热激光的光路上，且用于将所述加热激光转换为加热脉冲激光；所述探测装置包括：第二激光器，所述第二激光
15 器用于形成探测激光；以及第二电光调制器，所述第二电光调制器设置在所述探测激光的光路上，且用于将所述探测激光转换为探测脉冲激光；所述系统进一步包括：双通道信号发生器，所述双通道信号发生器分别与所述第一电光调制器、所述第二电光调制器电相连，用于调控加热脉冲激光和探测脉冲激光的脉冲周期；拉曼光谱仪，所述拉曼光谱仪同时设在所述第一出光光路和所述第二出光光路上，且与所述样品室相连，并采集所述探测脉冲
20 激光下所述样品的拉曼信号；温升确定单元，所述温升计算单元与所述拉曼光谱仪相连，且基于所述拉曼信号中所述二维纳米材料的特征峰偏移值，确定出所述样品的温升数据。

根据本申请的实施例，对于下表面设有基底的所述样品，所述拉曼光谱仪可采集所述探测脉冲激光下所述样品和所述基底的拉曼信号，所述温升计算单元基于所述拉曼信号中所述二维纳米材料和所述基底各自的特征峰偏移值，分别确定出所述样品的第一温升数据
25 和所述基底的第二温升数据。

根据本申请的实施例，所述二维纳米材料为非金属二维纳米薄膜材料，所述非金属二维纳米薄膜材料为石墨烯、硅烯或磷烯，而所述基底的材料为二氧化硅或其他有拉曼特征峰的非金属材料。

根据本申请的实施例，所述探测脉冲激光的波长大于所述加热脉冲激光的波长。

30 根据本申请的实施例，所述探测脉冲激光照射在所述样品的上表面的强度小于 3mW。

根据本申请的实施例，所述样品室与真空泵相连，且所述样品室的真空度可小于 10^{-3} Pa。

根据本申请的实施例，所述热物性参数确定装置包括：建模单元，所述建模单元用于

建立所述样品在降温阶段的非稳态导热方程组；数据处理单元，所述数据处理单元与所述建模单元相连，且用于对所述非稳态导热方程组进行无量纲化处理；热物性参数确定单元，所述热物性参数确定单元与所述数据处理单元相连，且用于对所述无量纲化处理的非稳态导热方程组进行多参数拟合处理，并确定所述样品的热物性参数。

5 根据本申请的实施例，所述热物性参数包括热导率、热扩散率和接触热导的至少之一。

根据本申请的实施例，所述建模单元被配置为对于有基底的所述样品，耦合有所述基底的样品在降温阶段的非稳态导热方程组如下所示：

$$\begin{cases}
 \frac{\partial^2 \theta_s(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta_s(r,t)}{\partial r} - \frac{g(\theta_s(r,t) - \theta_s(r,0,t))}{\lambda_s \delta} = \frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial \theta_s(r,t)}{\partial t} \\
 \frac{\partial^2 \theta_b(r,z,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta_b(r,z,t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta_b(r,z,t)}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha_b} \frac{\partial \theta_b(r,z,t)}{\partial t} \\
 \frac{\partial \theta_s(0)}{\partial r} = \frac{\partial \theta_b(0,z)}{\partial r} = 0 \\
 \theta_s(\infty, t) = \theta_b(\infty, z, t) = 0 \\
 \theta_b(r, \infty, t) = 0 \\
 -\lambda_b \frac{\partial \theta_b(r, 0, t)}{\partial z} = g(\theta_s(r, t) - \theta_b(r, 0, t)) \\
 \theta_s(r, 0) = \theta_{s0}(r) \\
 \theta_b(r, z, 0) = \theta_{b0}(r, z)
 \end{cases}$$

其中，所述样品的高斯平均温升为 $\bar{\theta}_s(t) = 2\pi \int_0^\infty \theta_s(r,t) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$,

所述基底的表面高斯平均温升为 $\bar{\theta}_b(t) = 2\pi \int_0^\infty \theta_b(r,0,t) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$,

所述样品的稳态温升为 $\bar{\theta}_{s0} = 2\pi \int_0^\infty \theta_{s0}(r) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$,

所述基底的稳态温升为 $\bar{\theta}_{b0} = 2\pi \int_0^\infty \theta_{b0}(r,0) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$,

20 所述探测激光的高斯平均常数为 $q_p = 1 / \pi r_p^2$, α_s 、 α_b 分别为所述样品和所述基底的热扩散率， g 为所述样品和所述基底之间的接触热导。

根据本申请的实施例，所述建模单元被配置为对于悬架设置的所述样品，所述样品在降温阶段的非稳态导热方程组如下所示：

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 \theta_s(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta_s(r, t)}{\partial r} = \frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial \theta_s(r, t)}{\partial t} \\ \frac{\partial \theta_s(0)}{\partial r} = 0 \\ \theta_s(\infty, t) = 0 \\ \theta_s(r, 0) = \theta_{s0}(r) \end{array} \right.$$

- 5 其中, 所述样品的高斯平均温升为 $\bar{\theta}_s(t) = 2\pi \int_0^\infty \theta_s(r, t) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$,
 所述样品的稳态温升为 $\bar{\theta}_{s0} = 2\pi \int_0^\infty \theta_{s0}(r) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$,
 所述探测激光的高斯平均常数为 $q_p = 1 / \pi r_p^2$, α_s 为所述样品的热扩散率。

附图说明

- 10 图 1 是本申请一个实施例的表征二维纳米材料热物性的双脉冲闪光拉曼方法流程图;
 图 2 是本申请一个实施例的表征方法步骤 S100 的流程示意图;
 图 3 是本申请一个实施例的表征方法步骤 S200 的流程示意图;
 图 4 是本申请一个实施例的用于表征二维纳米材料热物性的双脉冲闪光拉曼系统结构示意图;
- 15 图 5 是本申请另一个实施例的用于表征二维纳米材料热物性的双脉冲闪光拉曼系统结构示意图;
- 图 6 是本申请一个实施例的系统中热物性确定装置的结构示意图;
 图 7 是本申请一个实施例的有基底的二维纳米材料样品的物理模型示意图;
 图 8 是本申请一个实施例的加热脉冲和探测脉冲的序列、样品温度以及基底温度的变化示意图;
- 20 图 9 是本申请一个实施例的有基底样品的热扩散率灵敏度为 $\pm 20\%$ 的样品无量纲温升曲线;
- 图 10 是本申请一个实施例的有基底样品的热扩散率灵敏度为 $\pm 20\%$ 的基底无量纲温升曲线;
- 25 图 11 是本申请一个实施例的有基底样品的热导率灵敏度为 $\pm 20\%$ 的样品无量纲温升曲线;
- 图 12 是本申请一个实施例的有基底样品的热导率灵敏度为 $\pm 20\%$ 的基底无量纲温升曲线;

图 13 是本申请一个实施例的有基底样品的接触热导灵敏度为 $\pm 20\%$ 的样品无量纲温升曲线；

图 14 是本申请一个实施例的有基底样品的接触热导灵敏度为 $\pm 20\%$ 的基底无量纲温升曲线；

5 图 15 是本申请另一个实施例的悬架样品的热扩散率灵敏度为 $\pm 20\%$ 的样品无量纲温升曲线。

附图标记

- A 样品
- 10 B 基底
- 100 样品室
- 110 真空泵
- 120 温控平台
- 200 加热装置
- 15 a 第一出光光路
- 210 第一激光器
- 220 第一电光调制器
- 300 探测装置
- b 第二出光光路
- 20 310 第二激光器
- 320 第二电光调制器
- 400 热物性参数确定装置
- 410 建模单元
- 420 数据处理单元
- 25 430 热物性参数确定单元
- 500 双通道信号发生器
- 600 拉曼光谱仪
- 700 温升确定单元
- 810 平面反射镜
- 30 820 半透半反镜

具体实施方式

下面详细描述本申请的实施例，本技术领域人员会理解，下面实施例旨在用于解释本申请，而不应视为对本申请的限制。除非特别说明，在下面实施例中沒有明确描述具体技术或条件的，本领域技术人员可以按照本领域内的常用的技术或条件或按照产品说明书进行。

5

在本申请的一个方面，本申请提出了一种表征二维纳米材料热物性的双脉冲闪光拉曼方法。参照图 1~4、7~15，对本申请的方法进行详细的描述。根据本申请的实施例，参照图 1，该表征二维纳米材料热物性的双脉冲闪光拉曼方法包括：

10 S100：通过波长不同、脉冲周期相同的加热脉冲激光和探测脉冲激光，获得样品的温升数据。

在该步骤中，发明人采用两种波长不同、脉冲周期相同的脉冲激光，其中，先使用加热脉冲激光对样品进行加热，再使用探测脉冲激光对样品进行探测，如此，在不同时段分别采用加热脉冲激光加热样品、探测脉冲激光探测样品，可避免加热功率对测量精度的影响，并且无需调焦而避免了测量误差，测量降温段数据消除了激光吸收率的影响，从而使
15 该方法确定的样品热物性参数的准确性更好、灵敏度更高。

本申请的发明人经过研究发现，现有的热传导特性测量方法中，接触式方法引入的接触热阻和接触电阻是无法消除的而会给测量带来偏差，且其所需的微电极制备困难而增加了测试的难度，并且其存在的漏电影响而使其不适用于有基底的样品；而变光斑拉曼闪光法作为一种非接触式测量方法，由于其光斑大小的调整是通过变焦实现的而容易引入测量
20 误差，且激光吸收率之比和二维材料热导率的区分度较低也会导致一定的测量误差，并且加热激光同时作为探测光也会影响测量的精度。

所以，针对二维纳米材料样品，本申请的发明人经过长期的研究发现，可先使用一束较强的加热脉冲激光来加热样品，然后在加热脉冲激光的间隔时间内，使用另一束不同波长的探测脉冲激光进行探测，可以测定出样品的温升数据，并依据该数据确定样品的热物
25 性参数，如此，该方法无需调焦而避免了测量误差，分别采用加热脉冲激光和探测脉冲激光可避免加热功率对测量精度的影响，从而使该方法表征出的二维纳米材料样品热物性参数的精度更高、准确性更好且灵敏度更高。

根据本申请的实施例，步骤 100 可以是真空环境下进行，并且真空环境的真空度小于 10^{-3}Pa ，如此，利用真空泵和分子真空泵的两级抽真空的真空系统，可有效地消除样品室内
30 自然对流对测试精度的影响。

根据本申请的实施例，参照图 2，步骤 S100 可具体包括：

S110：通过加热脉冲激光，在第一脉冲时间内使样品的温度从环境温度升至稳态。

在该步骤中, 参照图 8, 在第一脉冲时间 t_h 内使样品的温度从环境温度 T_1 升至稳态 T_2 。

根据本申请的实施例, 环境温度 T_1 的控温精度为 $\pm 0.1K$, 如此, 采用上述高精度的温控平台, 可使获得的二维纳米材料样品热物性参数的精度更高、准确性更好。

根据本申请的实施例, 加热脉冲激光可以是连续激光通过电光调制器和信号发生器而形成的, 如此, 通过电光调制器将连续激光转换成脉冲激光, 可获得波长不同、脉冲周期相同的加热脉冲激光和探测脉冲激光。

在一些具体示例中, 对于下表面设有基底的样品, 参照图 8, 加热脉冲激光可同时加热样品和基底, 所以, 基底也会在第一脉冲时间 t_h 内从环境温度 T_1 升至稳态 T_2' 。而在另一些实施例中, 对于悬架设置的样品, 加热脉冲激光只加热样品, 所以, 只有样品在第一脉冲时间 t_h 内使样品的温度从环境温度 T_1 升至稳态 T_2 。

S120: 样品在第一间隔时间内, 从稳态冷却至环境温度, 且从第一间隔时间内的时间偏差开始, 通过探测脉冲激光在第二脉冲时间内对样品进行拉曼信号探测。

在该步骤中, 参照图 8, 样品在第一间隔时间 t_c 内, 从稳态 T_2 冷却至环境温度 T_1 , 且从第一间隔时间 t_c 内的时间偏差 t_d 开始, 通过探测脉冲激光在第二脉冲时间 t_p 内对样品进行拉曼信号探测, 以便获得所述样品的拉曼光谱。

根据本申请的实施例, 探测脉冲激光可以是连续激光通过电光调制器和信号发生器的调制而形成的。并且, 探测脉冲激光的波长大于加热脉冲激光的波长, 如此, 以探测脉冲波长为基准测定的拉曼光谱才不会受加热脉冲信号的干扰。而且, 探测脉冲激光照射在样品的上表面的强度小于 $3mW$, 如此, 采用上述强度范围的探测脉冲激光才不会引起二维纳米材料样品的温升。

根据本申请的实施例, 二维纳米材料可以为非金属二维纳米薄膜材料, 如此, 非金属材料的二维纳米薄膜样品获得的拉曼特征峰的强度更好, 从而有利于更准确地推算出样品的温升数据。在本申请的一些实施例中, 二维纳米材料可以为石墨烯、硅烯或磷烯, 如此, 采用上述这些具有显著拉曼特征峰的二维纳米薄膜材料, 可使用于该方法, 且该方法测试出的热物性参数的准确性更高。

根据本申请的实施例, 样品的下表面可以设有基底。根据本申请的实施例, 基底的材料为二氧化硅, 如此, 采用二氧化硅下材料的基底也具有拉曼特征峰, 从而可测出基底的温升, 进而可更准确地计算出二维纳米材料的热物性参数。

在本申请的一些具体示例中, 对于下表面设有基底的样品, 步骤 **S120** 可进一步包括: 通过探测脉冲激光在第二脉冲时间 t_p 内对样品进行拉曼信号探测, 以便同时获得样品和基底的拉曼光谱。

在本申请的一些实施例中, 在步骤 **S100** 之前可预先进行步骤 **S140**: 使用探测连续激

光扫描一系列不同环境温度下的二维纳米材料样品的拉曼光谱。并从拉曼光谱中二维纳米材料的特征峰随环境温度的偏移值，可标定出样品的拉曼特征峰的峰位置偏移与温升的关系曲线，由此，步骤 S220 可借助拉曼光谱中相应的特征峰偏移值直接推导出样品的温升，方便快捷。在一些具体示例中，对于下表面设有基底的样品，在一系列不同环境温度下可测得样品和基底的拉曼光谱，并从拉曼光谱中二维纳米材料和基底各自的特征峰随环境温度的偏移值，可分别标定出样品的拉曼特征峰的峰位置偏移与温升的关系曲线、基底的拉曼特征峰的峰位置偏移与温升的关系曲线。

根据本申请的实施例，拉曼信号探测的具体测试参数不受特别的限制，具体例如探测脉冲激光的光斑直径 r_p 等，本领域技术人员可根据样品和基底的具体材料进行相应地选择，在此不再赘述。需要说明的是，“光斑半径”是指激光光斑功率密度衰减到激光中心功率密度 $1/e$ 处的半径，即激光光斑尺寸。

S130: 基于拉曼光谱中二维纳米材料的特征峰偏移值，确定样品在第二脉冲时间内的温升。

在该步骤中，基于拉曼光谱中二维纳米材料的特征峰偏移值，确定样品在第二脉冲时间 t_p 内的温升 T_3 。在本申请的一些具体示例中，对于下表面设有基底的样品，步骤 S130 可进一步包括：基于拉曼光谱中二维纳米材料和基底各自的特征峰偏移值，确定出第二脉冲时间 t_p 内样品的温升 T_3 和基底的温升 T_4 。需要说明的是，由于脉冲时间 t_p 很短时，可近似视为 t 时刻的温度。

S200: 基于温升数据，确定出样品的热物性参数。

在该步骤中，基于步骤 S100 获得的样品的温升数据，可确定出样品的热物性参数。根据本申请的实施例，热物性参数可包括热导率 α 、热扩散率 λ 和接触热导 g 的至少之一。在本申请的一些具体示例中，对于下表面设有基底的样品，步骤 S200 获得的热物性参数包括样品的热导率 α_s 、样品的热扩散率 λ_s 和样品与底座之间的接触热导 g 。在本申请的另一一些具体示例中，对于悬架设置的样品，步骤 S200 获得的热物性参数为样品的热导率 α_s 。

根据本申请的实施例，参照图 3，步骤 S200 可具体包括：

S210: 建立降温阶段的非稳态导热方程组。

在该步骤中，根据样品的具体类型建立降温阶段的非稳态导热方程组。

在一些具体示例，对于设有基底的样品，耦合有基底的样品在降温阶段的非稳态导热方程组如下所示：

$$\frac{\partial^2 \theta_s(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta_s(r, t)}{\partial r} - \frac{g(\theta_s(r, t) - \theta_s(r, 0, t))}{\lambda_s \delta} = \frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial \theta_s(r, t)}{\partial t}$$

$$\frac{\partial^2 \theta_b(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta_b(r, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta_b(r, z, t)}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha_b} \frac{\partial \theta_b(r, z, t)}{\partial t}$$

$$\begin{cases}
 \frac{\partial \theta_s(0)}{\partial r} = \frac{\partial \theta_b(0, z)}{\partial r} = 0 \\
 \theta_s(\infty, t) = \theta_b(\infty, z, t) = 0 \\
 \theta_b(r, \infty, t) = 0 \\
 -\lambda_b \frac{\partial \theta_b(r, 0, t)}{\partial z} = g(\theta_s(r, t) - \theta_b(r, 0, t)) \\
 \theta_s(r, 0) = \theta_{s0}(r) \\
 \theta_b(r, z, 0) = \theta_{b0}(r, z)
 \end{cases}$$

其中, 样品的高斯平均温升为 $\bar{\theta}_s(t) = 2\pi \int_0^\infty \theta_s(r, t) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$,

基底的表面高斯平均温升为 $\bar{\theta}_b(t) = 2\pi \int_0^\infty \theta_b(r, 0, t) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$,

样品的稳态温升为 $\bar{\theta}_{s0} = 2\pi \int_0^\infty \theta_{s0}(r) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$,

基底的稳态温升为 $\bar{\theta}_{b0} = 2\pi \int_0^\infty \theta_{b0}(r, 0) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$,

探测激光的高斯平均常数为 $q_p = 1 / \pi r_p^2$, α_s 、 α_b 分别为样品和基底的热扩散率, g 为样品和基底之间的接触热导。

在另一些具体示例中, 对于悬架设置的样品, 样品在降温阶段的非稳态导热方程组如下所示:

$$\begin{cases}
 \frac{\partial^2 \theta_s(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta_s(r, t)}{\partial r} = \frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial \theta_s(r, t)}{\partial t} \\
 \frac{\partial \theta_s(0)}{\partial r} = 0 \\
 \theta_s(\infty, t) = 0 \\
 \theta_s(r, 0) = \theta_{s0}(r)
 \end{cases}$$

其中, 样品的高斯平均温升为 $\bar{\theta}_s(t) = 2\pi \int_0^\infty \theta_s(r, t) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$,

样品的稳态温升为 $\bar{\theta}_{s0} = 2\pi \int_0^\infty \theta_{s0}(r) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$,

探测激光的高斯平均常数为 $q_p = 1 / \pi r_p^2$, α_s 为样品的热扩散率。需要说明的是, “悬架设置” 具体是指探测脉冲激光照在样品上的区域中样品下表面不与基底直接接触即可, 具体例如, 基底中间设有孔。

S220: 对非稳态导热方程组进行无量纲化处理。

在该步骤中, 对步骤 S210 建立的非稳态导热方程组进行无量纲化处理。

需要说明的是, 无量纲化方法, 是指将样品降温阶段温升随时间的变化曲线与样品稳态温升 $\bar{\theta}_{s0}$ 做比值, 将基底降温阶段温升随时间的变化曲线与基底稳态温升 $\bar{\theta}_{b0}$ 做比值, 由

此消除样品和基底的激光吸收率对测量结果的影响。

在本申请的一些具体实例中，对于设有基底的样品，无量纲化处理后的样品和基底表面高斯平均温升随时间的变化曲线 $\bar{\theta}_s(t)/\bar{\theta}_{s0}$ 和 $\bar{\theta}_b(t)/\bar{\theta}_{b0}$ 仅与无量纲数 $Fo_s = \alpha_s t_h / (\lambda_s \delta / g)$ 、 $Fo_b = \alpha_b t_h / (\lambda_s \delta / g)$ 和 $\kappa = \lambda_b / \sqrt{\lambda_s g \delta}$ 有关，其中， λ_s 、 λ_b 分别为样品和基底的热导率， δ 为样品的厚度。

在本申请的另一些具体实例中，对于悬架设置的样品，无量纲化处理后的样品高斯平均温升随时间的变化曲线 $\bar{\theta}_s(t)/\bar{\theta}_{s0}$ 仅与样品热扩散率 α_s 有关。

S230: 基于温升数据，对无量纲化处理的非稳态导热方程组进行多参数拟合处理。

在该步骤中，基于温升数据，对无量纲化处理的非稳态导热方程组进行多参数拟合处理，以便获得样品的热物性参数。

根据本申请的实施例，具体的多参数拟合处理过程不受特别的限制，本领域技术人员可根据具体的无量纲化处理的非稳态导热方程组和温升数据进行相应地选择，在此不再赘述。

在本申请的一些具体实例中，对于设有基底的样品，温升数据包括样品稳态温升 $\bar{\theta}_{s0}$ 、基底稳态温升 $\bar{\theta}_{b0}$ 、样品和基底表面在降温阶段温升随时间的变化曲线 $\bar{\theta}_s(t)$ 和 $\bar{\theta}_b(t)$ ，其中，可通过调整时间偏差 t_d 可获得样品和基底表面在降温阶段温升随时间的变化曲线 $\bar{\theta}_s(t)$ 和 $\bar{\theta}_b(t)$ 。并且，通过多参数拟合可获得样品和基底的无量纲温升变化曲线，可参考图 9~14，即可获得样品的热扩散率 $\alpha_s = \alpha_b Fo_s / Fo_b$ 、热导率 $\lambda_s = \lambda_b \sqrt{\alpha_b t_h / Fo_b} / \delta \kappa$ 及样品与基底之间的接触热阻 $g = \lambda_b \sqrt{Fo_b / \alpha_b t_h} / \kappa$ 。

在本申请的另一些具体实例中，对于悬架设置的样品，温升数据包括样品稳态温升 $\bar{\theta}_{s0}$ 和样品表面在降温阶段温升随时间的变化曲线 $\bar{\theta}_s(t)$ ，其中，可通过调整时间偏差 t_d 可获得样品在降温阶段温升随时间的变化曲线 $\bar{\theta}_s(t)$ 。并且，通过多参数拟合可获得样品的无量纲温升变化曲线，可参考图 15，即可获得样品的热扩散率 $\alpha_s = \alpha_b Fo_s / Fo_b$ 。

综上所述，根据本申请的实施例，本申请提出了一种确定二维纳米材料热物性的双脉冲闪光拉曼方法，在不同时段分别采用加热脉冲激光加热样品、探测脉冲激光探测样品，如此，该方法无需调焦而避免了测量误差，分别采用加热脉冲激光和探测脉冲激光可避免加热功率对测量精度的影响，从而使该方法确定的样品热物性参数的准确性更好、灵敏度

更高。

与现有技术相比，本方法确定的二维纳米材料的热扩散率不受二维纳米材料本身激光吸收率和基底激光吸收率的影响；避免了传统变光斑方法改变物镜焦点距样品距离导致的非共焦测量；并且，通过调整探测脉冲和加热脉冲的时间间隔，相比原有方法可获得更高的时间精度；加热激光带宽受限较小，可采用较高的能量加热样品；而探测激光本身能量很低，可以避免激光器本身热漂问题，数据精度更高；实现了有基底二维纳米材料原位无损非接触式测量。同时，此方法还可以对比测定有基底和悬架二维纳米材料的热扩散率，可以很好的研究界面效应对二维纳米材料热传导特性的影响。

在本申请的另一个方面，本申请提出了一种用于确定二维纳米材料热物性的双脉冲闪光拉曼系统。参照图 4~15，对本申请的系统进行详细的描述。

根据本申请的实施例，参照图 4，该系统包括：样品室 100、加热装置 200、探测装置 300 和热物性参数表征装置 400；其中，样品室 100 用于放置样品 A；加热装置 200 的第一出光光路 a 连接样品室 100，且加热装置 200 形成的加热脉冲激光用于加热样品 A；探测装置 300 的第二出光光路 b 连接样品室 100，且探测装置 300 形成的探测脉冲激光用于探测样品 A 的温升数据；而热物性参数确定装置 400 基于温升数据，可确定出样品 A 的热物性参数；并且，第一出光光路 a 与第二出光光路 b 部分重合，且加热装置 200 形成的加热脉冲激光和探测装置 300 形成的探测脉冲激光的波长不同、脉冲周期相同。

本申请的发明人分别采用两种波长不同、脉冲周期相同的脉冲激光，其中，先使用加热脉冲激光对样品进行加热，再使用探测脉冲激光对样品进行探测，如此，在不同时段分别采用加热脉冲激光加热样品、探测脉冲激光探测样品，可避免加热功率对测量精度的影响，并且无需调焦而避免了测量误差，从而使该系统测得的样品热物性参数的准确性更好、灵敏度更高。

根据本申请的实施例，加热脉冲激光和探测脉冲激光都可以是连续激光通过电光调制器和信号发生器的调制而形成的。具体的，可参照图 5，加热装置 200 包括第一激光器 210 和第一电光调制器 220，其中，第一激光器 210 用于形成加热激光，而第一电光调制器 220 设置在加热激光的光路上且用于将加热激光转换为加热脉冲激光；探测装置 300 包括第二激光器 310 和第二电光调制器 320，其中，第二激光器 310 用于形成探测激光，而第二电光调制器 320 设置在探测激光的光路上且用于将探测激光转换为探测脉冲激光。如此，通过电光调制器将连续激光转换成脉冲激光，可获得波长不同、脉冲周期相同的加热脉冲激光和探测脉冲激光。

根据本申请的实施例，第一激光器 210 的具体类型不受特别的限制，只要该类型的第

一激光器 210 为单横模、单纵模的离子激光器或者激光功率恒定、复合高斯分布的固体激光器，并且出光功率不小于 500mW 即可，本领域技术人员可根据拉待测样品和基底的具体材料进行相应地选择，在此不再赘述。

5 根据本申请的实施例，第二激光器 310 的具体类型也不受特别的限制，只要该类型的第二激光器 310 为单横模、单纵模的离子激光器或者激光功率恒定、复合高斯分布的固体激光器，并且线宽不大于 1nm 即可，本领域技术人员可根据拉曼光谱测试的具体要求进行相应地选择，在此不再赘述。

10 根据本申请的实施例，参照图 5，该系统还可进一步包括双通道信号发生器 500，该双通道信号发生器 500 分别与第一电光调制器 220、第二电光调制器 230 电相连，用于调控加热脉冲激光和探测脉冲激光的脉冲周期。如此，通过双通道信号发生器 500 可同时调节第一电光调制器 220 和第二电光调制器 230，从而可更好地调整加热脉冲激光的第一脉冲时间 t_h 和第一间隔时间 t_c 、探测脉冲激光的第二脉冲时间 t_p 以及加热脉冲激光与探测脉冲激光之间的时间偏差 t_d 。

15 根据本申请的实施例，参照图 5，该系统还可进一步包拉曼光谱仪 600，该拉曼光谱仪 600 同时设在第一出光光路 a 和第二出光光路 b 上，且与样品室 100 相连，并采集探测脉冲激光下样品 A 的拉曼信号。如此，通过拉曼光谱仪 600 以探测脉冲波长为基准可测定出样品 A 的拉曼光谱。

20 根据本申请的实施例，参照图 5，该系统还可进一步包拉温升确定单元 700，该温升计算单元 700 分别与拉曼光谱仪 600、相连，且基于拉曼信号中二维纳米材料的特征峰偏移值，确定出样品的温升数据。如此，可预先使用探测连续激光扫描一系列不同环境温度下的二维纳米材料样品的拉曼光谱，并从拉曼光谱中二维纳米材料的特征峰随环境温度的偏移值，可标定出样品的拉曼特征峰的峰位置偏移与温升的关系曲线，由此，温升确定单元 700 可基于拉曼光谱中相应的特征峰偏移值直接推导出样品在第二脉冲时间 t_p 内的平均温升，方便快捷。由于脉冲时间 t_p 很短时，可近似视为 t 时刻的温度。

25 根据本申请的实施例，对于下表面设有基底 B 的样品 A，拉曼光谱仪 600 可同时采集探测脉冲激光下样品和基底的拉曼信号，而温升计算单元 700 可基于拉曼信号中二维纳米材料和基底各自的特征峰偏移值，分别确定出样品的第一温升数据和基底的第二温升数据。如此，可一次同时获得样品 A 和基底 B 的温升数据，可用于推算出二维纳米材料样品的热扩散率 α 、热导率 λ 及二维材料与基底之间的接触热阻 g 等热物性参数。

30 根据本申请的实施例，对于样品 A 的具体材料，待测的二维纳米材料可以为非金属二维纳米薄膜材料，如此，非金属材料的二维纳米薄膜样品获得的拉曼特征峰的强度更好，从而有利于更准确地推算出样品的温升数据。在本申请的一些实施例中，待测的二维纳米

材料可以为石墨烯、硅烯或磷烯，如此，采用上述这些具有显著拉曼特征峰的二维纳米薄膜材料，可使用于该方法，且该方法测试出的热物性参数的准确性更高。

根据本申请的实施例，基底 B 的材料为二氧化硅，如此，采用二氧化硅下材料的基底也具有拉曼特征峰，从而可测出基底的温升，进而可更准确地计算出二维纳米材料的热物性参数。

根据本申请的实施例，探测脉冲激光的波长大于加热脉冲激光的波长，如此，以探测脉冲波长为基准测定的拉曼光谱才不会受加热脉冲信号的干扰。根据本申请的实施例，探测脉冲激光照射在样品的上表面的强度小于 3mW，如此，采用上述强度范围的探测脉冲激光才不会引起二维纳米材料样品的温升。

根据本申请的实施例，参照图 5，样品室 100 可与真空泵 110 相连，且样品室 100 的真空度可小于 10^{-3} Pa，如此，利用真空泵和分子真空泵的两级抽真空泵，可有效地消除样品室 100 内自然对流，从而使该系统的测试精度更高。根据本申请的实施例，参照图 5，温控平台 120 可与样品室 100 的样品座相连，且温控平台 120 可将环境温度的温度精度控制在 $\pm 0.1\text{K}$ ，如此，采用上述高精度的温控平台，可使该系统获得的二维纳米材料样品热物性参数的精度更高、准确性更好。

在本申请的一些实施例中，参照图 5，该系统还可进一步包括平面反射镜 810 和半透半反镜 820，其中，平面反射镜 810 可使第一出光光路 a 反射至拉曼光谱仪 600，而半透半反镜 820 设置在第一出光光路 a 被平面反射镜 810 反射后的光路上，还可使第二出光光路 b 反射至拉曼光谱仪 600 且不影响第一出光光路 a，如此，可实现第一出光光路 a 与第二出光光路 b 在半透半反镜 820 与拉曼光谱仪 600 之间重合。

根据本申请的实施例，参照图 6，热物性参数确定装置可包括建模单元 410，建模单元 410 用于建立样品在降温阶段的非稳态导热方程组。

在本申请的一些具体示例中，建模单元 210 可被配置为对于有基底的样品，耦合有基底的样品在降温阶段的非稳态导热方程组具体如下所示：

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{\partial^2 \theta_s(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta_s(r,t)}{\partial r} - \frac{g(\theta_s(r,t) - \theta_s(r,0,t))}{\lambda_s \delta} = \frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial \theta_s(r,t)}{\partial t} \\
 \frac{\partial^2 \theta_b(r,z,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta_b(r,z,t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta_b(r,z,t)}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha_b} \frac{\partial \theta_b(r,z,t)}{\partial t} \\
 \frac{\partial \theta_s(0)}{\partial r} = \frac{\partial \theta_b(0,z)}{\partial r} = 0 \\
 \theta_s(\infty, t) = \theta_b(\infty, z, t) = 0 \\
 \theta_b(r, \infty, t) = 0 \\
 -\lambda_b \frac{\partial \theta_b(r, 0, t)}{\partial z} = g(\theta_s(r, t) - \theta_b(r, 0, t)) \\
 \theta_s(r, 0) = \theta_{s0}(r) \\
 \theta_b(r, z, 0) = \theta_{b0}(r, z)
 \end{array} \right.$$

其中, 样品的高斯平均温升为 $\bar{\theta}_s(t) = 2\pi \int_0^\infty \theta_s(r, t) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$,

基底的表面高斯平均温升为 $\bar{\theta}_b(t) = 2\pi \int_0^\infty \theta_b(r, 0, t) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$,

样品的稳态温升为 $\bar{\theta}_{s0} = 2\pi \int_0^\infty \theta_{s0}(r) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$,

基底的稳态温升为 $\bar{\theta}_{b0} = 2\pi \int_0^\infty \theta_{b0}(r, 0) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$,

探测激光的高斯平均常数为 $q_p = 1 / \pi r_p^2$, α_s 、 α_b 分别为样品和基底的热扩散率, g 为样品和基底之间的接触热导。

在本申请的另一些实施例中, 建模单元 410 被配置为对于悬架设置的样品, 样品在降温阶段的非稳态导热方程组具体如下所示:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{\partial^2 \theta_s(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta_s(r,t)}{\partial r} = \frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial \theta_s(r,t)}{\partial t} \\
 \frac{\partial \theta_s(0)}{\partial r} = 0 \\
 \theta_s(\infty, t) = 0 \\
 \theta_s(r, 0) = \theta_{s0}(r)
 \end{array} \right.$$

其中, 样品的高斯平均温升为 $\bar{\theta}_s(t) = 2\pi \int_0^\infty \theta_s(r, t) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$,

样品的稳态温升为 $\bar{\theta}_{s0} = 2\pi \int_0^\infty \theta_{s0}(r) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$,

探测激光的高斯平均常数为 $q_p = 1 / \pi r_p^2$, α_s 为样品的热扩散率。

根据本申请的实施例, 参照图 6, 热物性参数确定装置还可包括数据处理单元 420, 数据处理单元 420 与建模单元 410 相连, 且用于对非稳态导热方程组进行无量纲化处理。

根据本申请的实施例，参照图 6，热物性参数确定装置还可包括热物性参数确定单元 430；而热物性参数确定单元 430 与数据处理单元 420 相连，且用于对无量纲化处理的非稳态导热方程组在进行多参数拟合处理，并确定样品的热物性参数。

根据本申请的实施例，热物性参数包括热导率、热扩散率和接触热导的至少之一。。在本申请的一些具体示例中，对于下表面设有基底的样品，该系统可获得的热物性参数包括样品的热导率 α_s 、样品的热扩散率 λ_s 和样品与底座之间的接触热导 g 。在本申请的另一些具体示例中，对于悬架设置的样品，该系统可获得的热物性参数只有样品的热导率 α_s 。

综上所述，根据本申请的实施例，本申请提出了一种用于测试二维纳米材料热物性参数的系统，其包括加热装置和探测装置，该加热装置可向样品室提供加热脉冲激光，而探测装置可向样品室提供探测脉冲激光，如此，加热装置形成的较强的加热脉冲激光可加热样品，然后在加热脉冲激光的间隔时间内，探测装置形成另一束不同波长的探测脉冲激光对样品进行探测，而热物性参数表征装置可根据探测获得的样品温升数据确定出样品的热物性参数，并且，该测试系统的准确性更高、测量精度更好且灵敏度更高。

下面参考具体实施例，对本申请进行描述，需要说明的是，这些实施例仅是描述性的，而不以任何方式限制本申请。

实施例 1

在该实施例中，确定出二维纳米材料热物性参数。

有基底二维纳米材料物理模型如图 7 所示。在真空环境下，使用一束符合高斯分布的、光斑半径为 r_h 的连续加热激光加热二维纳米材料样品和基底，由于加热激光符合高斯分布，中心对称，故样品符合一维柱坐标导热方程，基底符合二维柱坐标导热方程。达到稳态时，使用功率小于 3 mW、光斑半径为 r_p 的连续探测激光测量样品和基底的拉曼光谱，通过样品和基底拉曼特征峰的偏移，可分别测定样品和基底表面的稳态高斯平均温升 $\bar{\theta}_{s0}$ 和 $\bar{\theta}_{b0}$ 。

在真空环境下，自然对流换热可忽略。

将连续加热激光调制为加热脉冲，将连续探测激光调制为探测脉冲，其脉冲序列如图 8 所示。通过改变探测脉冲和加热脉冲的时间偏差 t_d ，可以同时测定样品和基底表面在降温阶段温升随时间的变化曲线 $\bar{\theta}_s(t)$ 和 $\bar{\theta}_b(t)$ ，将两条温升变化曲线分别基于样品稳态温升 $\bar{\theta}_{s0}$ ，基底稳态温升 $\bar{\theta}_{b0}$ 做无量纲化，即可消除测量结果中激光吸收率的影响。

根据有基底二维纳米材料物理模型，建立样品和基底在降温阶段的非稳态导热方程组如式 (1—6)。

$$\frac{\partial^2 \theta_s(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta_s(r, t)}{\partial r} - \frac{g(\theta_s(r, t) - \theta_s(r, 0, t))}{\lambda_s \delta} = \frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial \theta_s(r, t)}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \theta_b(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta_b(r, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta_b(r, z, t)}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha_b} \frac{\partial \theta_b(r, z, t)}{\partial t} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta_s(0)}{\partial r} = \frac{\partial \theta_b(0, z)}{\partial r} = 0 \quad (3)$$

$$\theta_s(\infty, t) = \theta_b(\infty, z, t) = 0 \quad (4)$$

$$\theta_b(r, \infty, t) = 0 \quad (5)$$

$$-\lambda_b \frac{\partial \theta_b(r, 0, t)}{\partial z} = g(\theta_s(r, t) - \theta_b(r, 0, t)) \quad (6)$$

$$\theta_s(r, 0) = \theta_{s0}(r) \quad (7)$$

$$\theta_b(r, z, 0) = \theta_{b0}(r, z) \quad (8)$$

其中, α_s 、 α_b 分别为样品和基底的热扩散率, λ_s 、 λ_b 分别为样品和基底的热导率, δ 为样品厚度, g 为样品和基底之间的接触热导。则利用拉曼光谱偏移测定的样品高斯平均温升可表示为 $\bar{\theta}_s(t) = 2\pi \int_0^\infty \theta_s(r, t) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$, 基底表面高斯平均温升可表示为 $\bar{\theta}_b(t) = 2\pi \int_0^\infty \theta_b(r, 0, t) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$ 。 $\theta_{s0}(r)$ 为样品稳态温度分布, $\bar{\theta}_{s0} = 2\pi \int_0^\infty \theta_{s0}(r) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$, $\theta_{b0}(r, z)$ 为基底稳态温度分布, $\bar{\theta}_{b0} = 2\pi \int_0^\infty \theta_{b0}(r, 0) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$, q_p 为对应所述探测激光的高斯平均常数, $q_p = 1 / \pi r_p^2$ 。

对方程进行无量纲化, 经推导可知, 无量纲化样品和基底表面高斯平均温升随时间的变化曲线 $\bar{\theta}_s(t) / \bar{\theta}_{s0}$ 和 $\bar{\theta}_b(t) / \bar{\theta}_{b0}$ 仅与无量纲数 $Fo_s = \alpha_s t_h / (\lambda_s \delta / g)$ 、 $Fo_b = \alpha_b t_h / (\lambda_s \delta / g)$ 和 $\kappa = \lambda_b / \sqrt{\lambda_s g \delta}$ 有关。通过拟合测得的样品和基底无量纲温升变化曲线, 即可获得二维纳米材料样品的热扩散率 $\alpha_s = \alpha_b Fo_s / Fo_b$ 、热导率 $\lambda_s = \lambda_b \sqrt{\alpha_b t_h / Fo_b} / \delta \kappa$ 及二维纳米材料与基底之间的接触热阻 $g = \lambda_b \sqrt{Fo_b / \alpha_b t_h} / \kappa$ 。

在该实施例中, 设二维纳米材料为石墨烯, 基底为二氧化硅, 选取其特征物性模拟无量纲化样品和基底表面高斯平均温升随时间的变化曲线 $\bar{\theta}_s(t) / \bar{\theta}_{s0}$ 和 $\bar{\theta}_b(t) / \bar{\theta}_{b0}$, 可得到

二维纳米材料热扩散率 α_s 、热导率 λ_s 及二维纳米材料与基底之间的接触热阻 g 对两条无量纲温度曲线的影响分别如图 9~14 所示。

实施例 2

在该实施例中，按照与实施例 1 基本相同的方法和步骤，确定出二维纳米材料热物性参数。区别在于，悬架设置的二维纳米材料，样品在降温阶段的非稳态导热方程组为式（9—12）：

$$\frac{\partial^2 \theta_s(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta_s(r, t)}{\partial r} = \frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial \theta_s(r, t)}{\partial t} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \theta_s(0)}{\partial r} = 0 \quad (10)$$

$$\theta_s(\infty, t) = 0 \quad (11)$$

$$\theta_s(r, 0) = \theta_{s0}(r) \quad (12)$$

在该实施例中，对方程进行无量纲化，经推导可知，无量纲化样品高斯平均温升随时间的变化曲线 $\bar{\theta}_s(t)/\bar{\theta}_{s0}$ 仅与样品热扩散率 α_s 有关，热扩散率 α_s 的影响如图 15 所示。

本申请不仅局限于上述具体实施方式，本申请中提出的双激光光束闪光法的测试原理可广泛应用于本领域及与之相关的其它领域，可以采用其它多种具体实施方式实施本申请。例如，基于双激光光束拉曼闪光法系统分离了加热激光和探测激光的思想，在不改变加热激光的情况下，改变探测激光波长，进而改变光斑测量范围，从而实现共焦变光斑测量。因此，凡是采用本申请的设计思想，做一些简单的变化或更改的设计，都落入本申请保护的

范围。

在本申请的描述中，除非另有明确的规定和限定，术语“安装”、“相连”、“连接”、“固定”等术语应做广义理解，例如，可以是固定连接，也可以是可拆卸连接，或成一体；可以是机械连接，也可以是电连接；可以是直接相连，也可以通过中间媒介间接相连，可以是两个元件内部的连通或两个元件的相互作用关系。对于本领域的普通技术人员而言，可以根据具体情况理解上述术语在本申请中的具体含义。

此外，术语“第一”、“第二”仅用于描述目的，而不能理解为指示或暗示相对重要性或者隐含指明所指示的技术特征的数量。由此，限定有“第一”、“第二”的特征可以明示或者

隐含地包括至少一个该特征。在本申请的描述中，“多个”的含义是至少两个，例如两个，三个等，除非另有明确具体的限定。

在本说明书的描述中，参考术语“一个实施例”、“一些实施例”、“示例”、“具体示例”、或“一些示例”等的描述意指结合该实施例或示例描述的具体特征、结构、材料或者特点包含于本申请的至少一个实施例或示例中。在本说明书中，对上述术语的示意性表述不必须针对的是相同的实施例或示例。而且，描述的具体特征、结构、材料或者特点可以在任一个或多个实施例或示例中以合适的方式结合。此外，在不相互矛盾的情况下，本领域的技术人员可以将本说明书中描述的不同实施例或示例以及不同实施例或示例的特征进行结合和组合。

尽管上面已经示出和描述了本申请的实施例，可以理解的是，上述实施例是示例性的，不能理解为对本申请的限制，本领域的普通技术人员在本申请的范围内可以对上述实施例进行变化、修改、替换和变型。

权利要求书

1、一种表征二维纳米材料热物性的双脉冲闪光拉曼方法，包括：

通过波长不同、脉冲周期相同的加热脉冲激光和探测脉冲激光，获得样品的温升数据；

5 基于所述温升数据，确定出所述样品的热物性参数。

2、根据权利要求1所述的方法，所述获得样品的温升数据的步骤进一步包括：

通过加热脉冲激光，在第一脉冲时间 t_h 内使所述样品的温度从环境温度 T_1 升至稳态 T_2 ；

所述样品在第一间隔时间 t_c 内，从所述稳态 T_2 冷却至环境温度 T_1 ，且从所述第一间隔
10 时间 t_c 内的时间偏差 t_d 开始，通过探测脉冲激光在第二脉冲时间 t_p 内对所述样品进行拉曼
信号探测，以便获得所述样品的拉曼光谱；

基于所述拉曼光谱中所述二维纳米材料的特征峰偏移值，确定所述样品在第二脉冲时
间 t_p 内的温升 T_3 。

3、根据权利要求2所述的方法，所述样品的下表面设有基底；

而且，所述获得所述样品的拉曼光谱的步骤进一步包括：

15 通过所述探测脉冲激光在所述第二脉冲时间 t_p 内对所述样品进行拉曼信号探测，以便
获得所述样品和所述基底的拉曼光谱；

并且，所述确定所述样品在第二脉冲时间 t_p 内的温升 T_3 的步骤进一步包括：

基于所述拉曼光谱中所述二维纳米材料和所述基底各自的特征峰偏移值，确定出第二
脉冲时间 t_p 内所述样品的温升 T_3 和所述基底的温升 T_4 。

20 4、根据权利要求3所述的方法，

所述二维纳米材料为非金属二维纳米薄膜材料，所述非金属二维纳米薄膜材料为石墨
烯、硅烯或磷烯，

所述基底的材料为二氧化硅或其他有拉曼特征峰的非金属材料。

25 5、根据权利要求1所述的方法，所述加热脉冲激光和探测脉冲激光都是连续激光通过
电光调制器和信号发生器的调制而形成的。

6、根据权利要求5所述的方法，所述探测脉冲激光的波长大于所述加热脉冲激光的波
长。

7、根据权利要求5所述的方法，所述探测脉冲激光照射在所述样品的上表面的强度小
于 3mW。

30 8、根据权利要求5所述的方法，所述获得样品的温升数据的步骤在真空环境下进行，
并且所述真空环境的真空度小于 10^{-3} Pa。

9、根据权利要求1所述的方法，所述热物性参数包括热导率、热扩散率和接触热导的

至少之一；并且，所述确定出所述样品的热物性参数的步骤进一步包括：

建立降温阶段的非稳态导热方程组；

对所述非稳态导热方程组进行无量纲化处理；

基于所述温升数据，对所述无量纲化处理的非稳态导热方程组进行多参数拟合处理，

5 以便获得所述样品的热物性参数。

10、根据权利要求 9 所述的方法，在所述建立降温阶段的非稳态导热方程组的步骤中，对于设有基底的所述样品，耦合有所述基底的样品在降温阶段的非稳态导热方程组如下所示：

$$\begin{cases}
 \frac{\partial^2 \theta_s(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta_s(r,t)}{\partial r} - \frac{g(\theta_s(r,t) - \theta_s(r,0,t))}{\lambda_s \delta} = \frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial \theta_s(r,t)}{\partial t} \\
 \frac{\partial^2 \theta_b(r,z,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta_b(r,z,t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta_b(r,z,t)}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha_b} \frac{\partial \theta_b(r,z,t)}{\partial t} \\
 \frac{\partial \theta_s(0)}{\partial r} = \frac{\partial \theta_b(0,z)}{\partial r} = 0 \\
 \theta_s(\infty, t) = \theta_b(\infty, z, t) = 0 \\
 \theta_b(r, \infty, t) = 0 \\
 -\lambda_b \frac{\partial \theta_b(r, 0, t)}{\partial z} = g(\theta_s(r, t) - \theta_b(r, 0, t)) \\
 \theta_s(r, 0) = \theta_{s0}(r) \\
 \theta_b(r, z, 0) = \theta_{b0}(r, z)
 \end{cases}$$

其中，所述样品的高斯平均温升为 $\bar{\theta}_s(t) = 2\pi \int_0^\infty \theta_s(r, t) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$ ，

所述基底的表面高斯平均温升为 $\bar{\theta}_b(t) = 2\pi \int_0^\infty \theta_b(r, 0, t) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$ ，

所述样品的稳态温升为 $\bar{\theta}_{s0} = 2\pi \int_0^\infty \theta_{s0}(r) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$ ，

20 所述基底的稳态温升为 $\bar{\theta}_{b0} = 2\pi \int_0^\infty \theta_{b0}(r, 0) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$ ，

所述探测激光的高斯平均常数为 $q_p = 1 / \pi r_p^2$ ， α_s 、 α_b 分别为所述样品和所述基底的热扩散率， g 为所述样品和所述基底之间的接触热导。

11、根据权利要求 9 所述的方法，在所述建立降温阶段的非稳态导热方程组的步骤中，对于悬架设置的所述样品，所述样品在降温阶段的非稳态导热方程组如下所示：

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 \theta_s(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta_s(r, t)}{\partial r} = \frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial \theta_s(r, t)}{\partial t} \\ \frac{\partial \theta_s(0)}{\partial r} = 0 \\ \theta_s(\infty, t) = 0 \\ \theta_s(r, 0) = \theta_{s0}(r) \end{array} \right.$$

5 其中, 所述样品的高斯平均温升为 $\bar{\theta}_s(t) = 2\pi \int_0^\infty \theta_s(r, t) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$,

所述样品的稳态温升为 $\bar{\theta}_{s0} = 2\pi \int_0^\infty \theta_{s0}(r) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$,

所述探测激光的高斯平均常数为 $q_p = 1 / \pi r_p^2$, α_s 为所述样品的热扩散率。

12、一种用于表征二维纳米材料热物性的双脉冲闪光拉曼系统, 包括:

样品室, 所述样品室用于放置样品;

10 加热装置, 所述加热装置的第一出光光路连接所述样品室, 且所述加热装置形成的加热脉冲激光用于加热所述样品;

探测装置, 所述探测装置的第二出光光路连接所述样品室, 且所述探测装置形成的探测脉冲激光用于探测所述样品的温升数据;

15 热物性参数确定装置, 所述热物性参数确定装置基于所述温升数据, 确定所述样品的热物性参数;

其中, 所述第一出光光路与所述第二出光光路部分重合, 且所述加热装置形成的加热脉冲激光和所述探测装置形成的探测脉冲激光的波长不同、脉冲周期相同。

13、根据权利要求 12 所述的系统,

所述加热装置包括:

20 第一激光器, 所述第一激光器用于形成加热激光; 以及

第一电光调制器, 所述第一电光调制器设置在所述加热激光的光路上, 且用于将所述加热激光转换为加热脉冲激光;

所述探测装置包括:

第二激光器, 所述第二激光器用于形成探测激光; 以及

25 第二电光调制器, 所述第二电光调制器设置在所述探测激光的光路上, 且用于将所述探测激光转换为探测脉冲激光;

所述系统进一步包括:

双通道信号发生器, 所述双通道信号发生器分别与所述第一电光调制器、所述第二电光调制器电相连, 用于调控加热脉冲激光和探测脉冲激光的脉冲周期;

拉曼光谱仪，所述拉曼光谱仪同时设在所述第一出光光路和所述第二出光光路上，且与所述样品室相连，并采集所述探测脉冲激光下所述样品的拉曼信号；

温升确定单元，所述温升计算单元与所述拉曼光谱仪相连，且基于所述拉曼信号中所述二维纳米材料的特征峰偏移值，确定出所述样品的温升数据。

- 5 14、根据权利要求 13 所述的系统，对于下表面设有基底的所述样品，所述拉曼光谱仪可采集所述探测脉冲激光下所述样品和所述基底的拉曼信号，所述温升计算单元基于所述拉曼信号中所述二维纳米材料和所述基底各自的特征峰偏移值，分别确定出所述样品的第一温升数据和所述基底的第二温升数据。

- 10 15、根据权利要求 11 所述的系统，所述二维纳米材料为非金属二维纳米薄膜材料，所述非金属二维纳米薄膜材料为石墨烯、硅烯或磷烯，而所述基底的材料为二氧化硅或其他有拉曼特征峰的非金属材料。

16、根据权利要求 15 所述的系统，所述探测脉冲激光的波长大于所述加热脉冲激光的波长。

- 15 17、根据权利要求 15 所述的系统，所述探测脉冲激光照射在所述样品的上表面的强度小于 3mW。

18、根据权利要求 15 所述的系统，所述样品室与真空泵相连，且所述样品室的真空度可小于 10^{-3} Pa。

19、根据权利要求 12 所述的系统，所述热物性参数确定装置包括：

建模单元，所述建模单元用于建立所述样品在降温阶段的非稳态导热方程组；

- 20 数据处理单元，所述数据处理单元与所述建模单元相连，且用于对所述非稳态导热方程组进行无量纲化处理；

热物性参数确定单元，所述热物性参数确定单元与所述数据处理单元相连，且用于对所述无量纲化处理的非稳态导热方程组进行多参数拟合处理，并确定所述样品的热物性参数。

- 25 20、根据权利要求 19 所述的系统，所述热物性参数包括热导率、热扩散率和接触热导的至少之一。

21、根据权利要求 19 所述的系统，所述建模单元被配置为对于有基底的所述样品，耦合有所述基底的样品在降温阶段的非稳态导热方程组如下所示：

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{\partial^2 \theta_s(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta_s(r,t)}{\partial r} - \frac{g(\theta_s(r,t) - \theta_s(r,0,t))}{\lambda_s \delta} = \frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial \theta_s(r,t)}{\partial t} \\
 \frac{\partial^2 \theta_b(r,z,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta_b(r,z,t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta_b(r,z,t)}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha_b} \frac{\partial \theta_b(r,z,t)}{\partial t} \\
 \frac{\partial \theta_s(0)}{\partial r} = \frac{\partial \theta_b(0,z)}{\partial r} = 0 \\
 \theta_s(\infty, t) = \theta_b(\infty, z, t) = 0 \\
 \theta_b(r, \infty, t) = 0 \\
 -\lambda_b \frac{\partial \theta_b(r, 0, t)}{\partial z} = g(\theta_s(r, t) - \theta_b(r, 0, t)) \\
 \theta_s(r, 0) = \theta_{s0}(r) \\
 \theta_b(r, z, 0) = \theta_{b0}(r, z)
 \end{array} \right.$$

其中, 所述样品的高斯平均温升为 $\bar{\theta}_s(t) = 2\pi \int_0^\infty \theta_s(r, t) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$,

所述基底的表面高斯平均温升为 $\bar{\theta}_b(t) = 2\pi \int_0^\infty \theta_b(r, 0, t) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$,

所述样品的稳态温升为 $\bar{\theta}_{s0} = 2\pi \int_0^\infty \theta_{s0}(r) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$,

所述基底的稳态温升为 $\bar{\theta}_{b0} = 2\pi \int_0^\infty \theta_{b0}(r, 0) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$,

所述探测激光的高斯平均常数为 $q_p = 1 / \pi r_p^2$, α_s 、 α_b 分别为所述样品和所述基底的热扩散率, g 为所述样品和所述基底之间的接触热导。

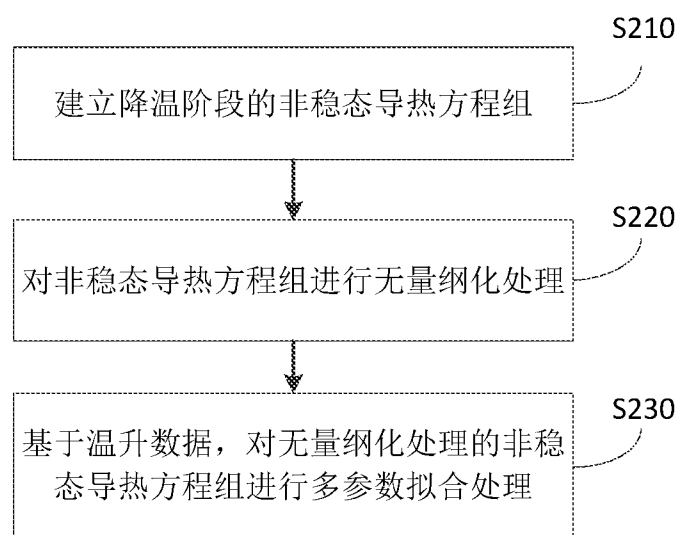
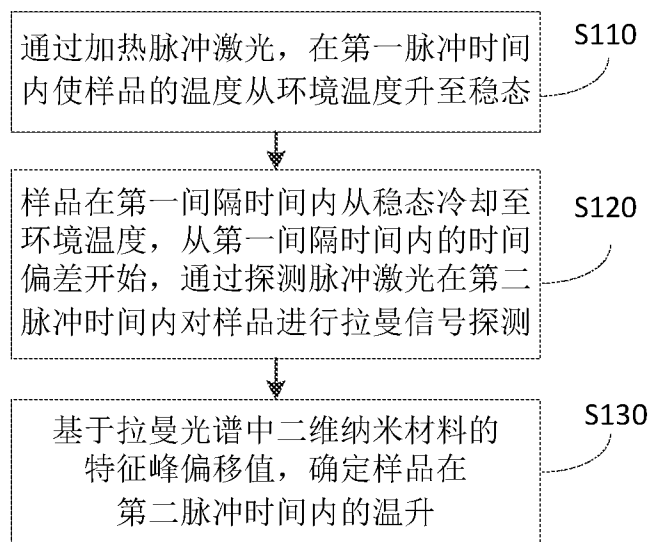
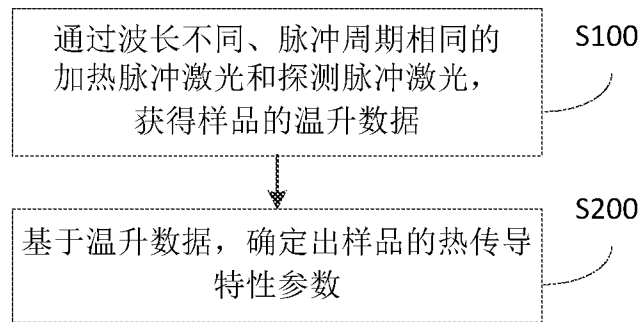
22、根据权利要求 19 所述的系统, 所述建模单元被配置为对于悬架设置的所述样品, 所述样品在降温阶段的非稳态导热方程组如下所示:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{\partial^2 \theta_s(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta_s(r,t)}{\partial r} = \frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial \theta_s(r,t)}{\partial t} \\
 \frac{\partial \theta_s(0)}{\partial r} = 0 \\
 \theta_s(\infty, t) = 0 \\
 \theta_s(r, 0) = \theta_{s0}(r)
 \end{array} \right.$$

其中, 所述样品的高斯平均温升为 $\bar{\theta}_s(t) = 2\pi \int_0^\infty \theta_s(r, t) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$,

所述样品的稳态温升为 $\bar{\theta}_{s0} = 2\pi \int_0^\infty \theta_{s0}(r) q_p \exp(-r^2 / r_p^2) r dr$,

所述探测激光的高斯平均常数为 $q_p = 1 / \pi r_p^2$, α_s 为所述样品的热扩散率。



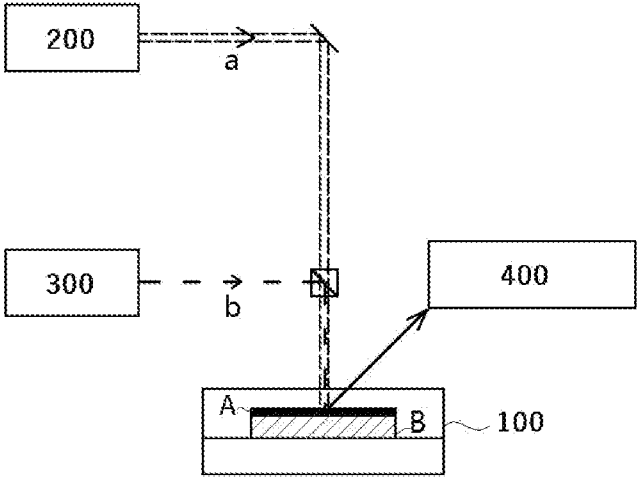


图 4

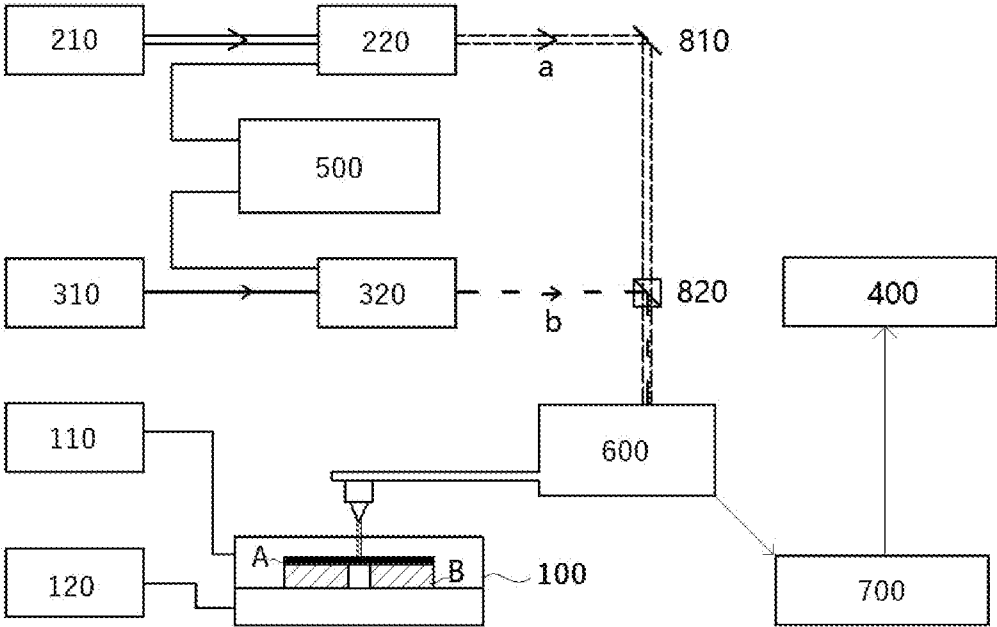


图 5

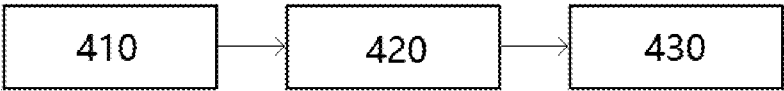


图 6

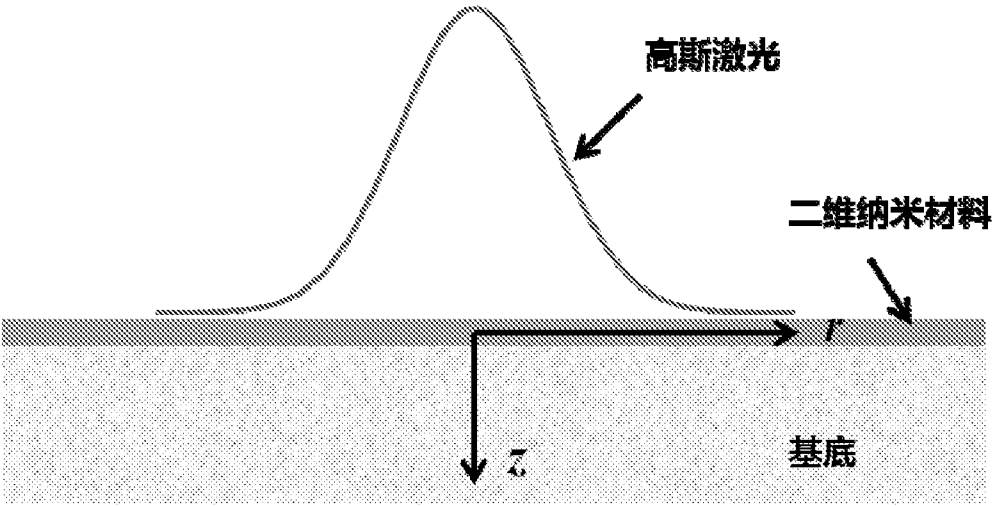


图 7

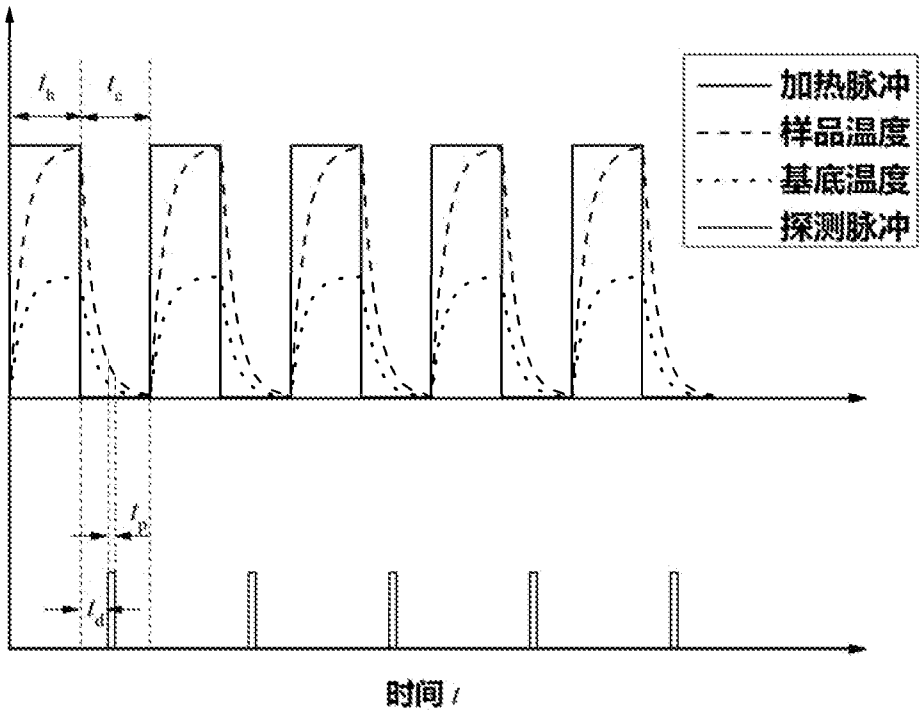


图 8

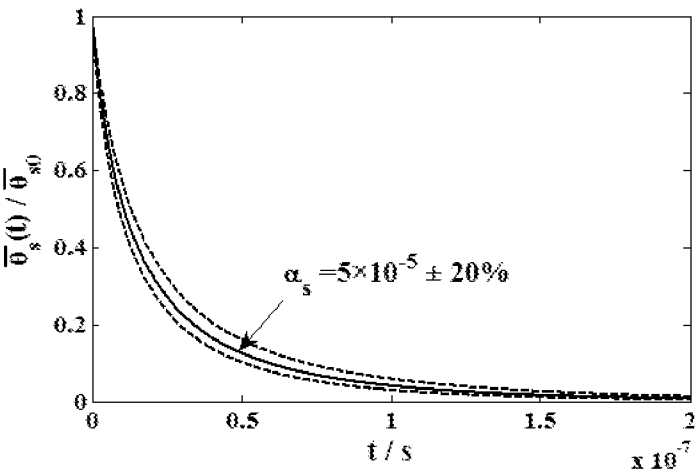


图 9

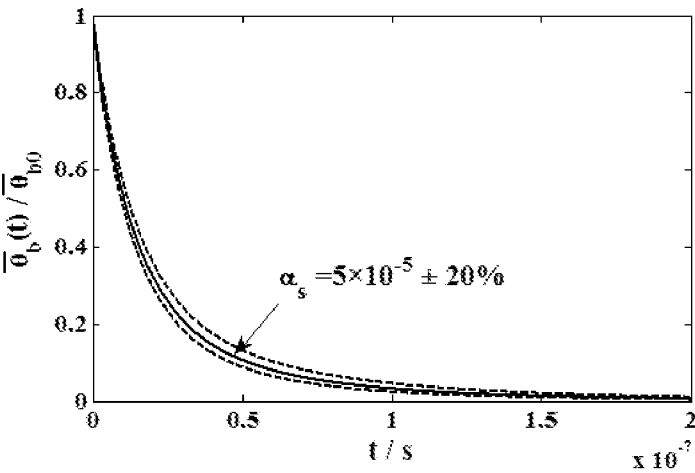


图 10

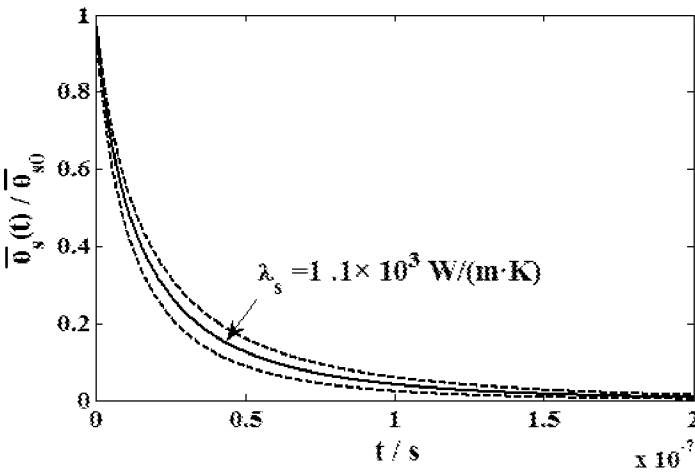


图 11

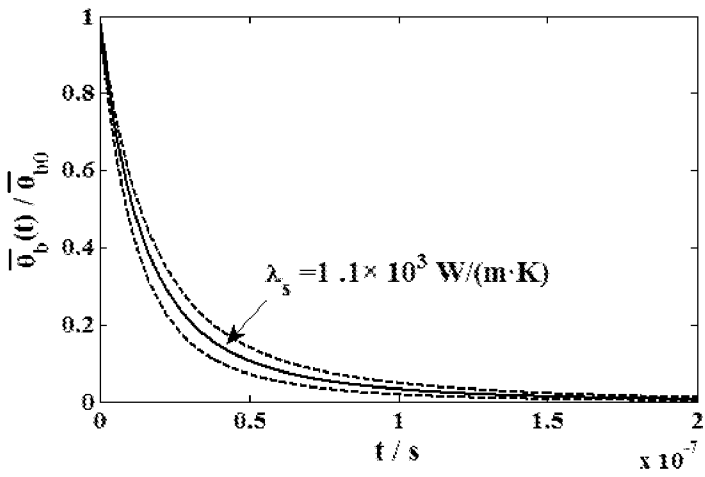


图 12

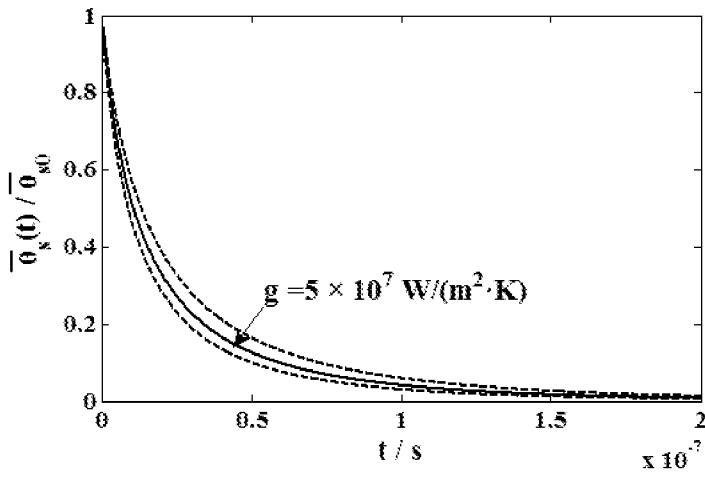


图 13

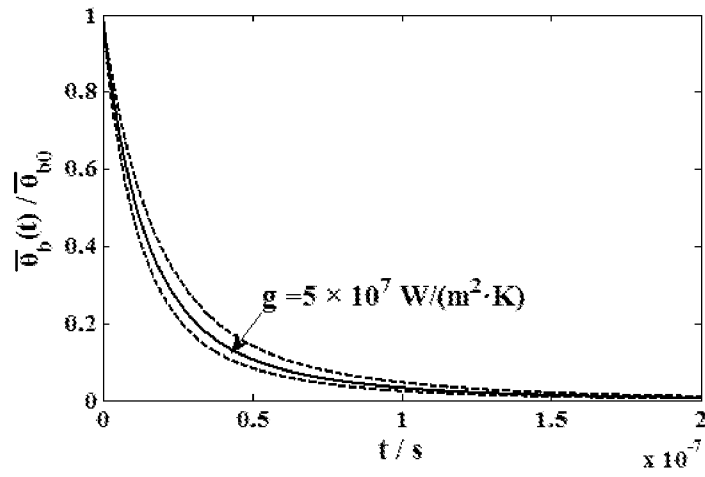


图 14

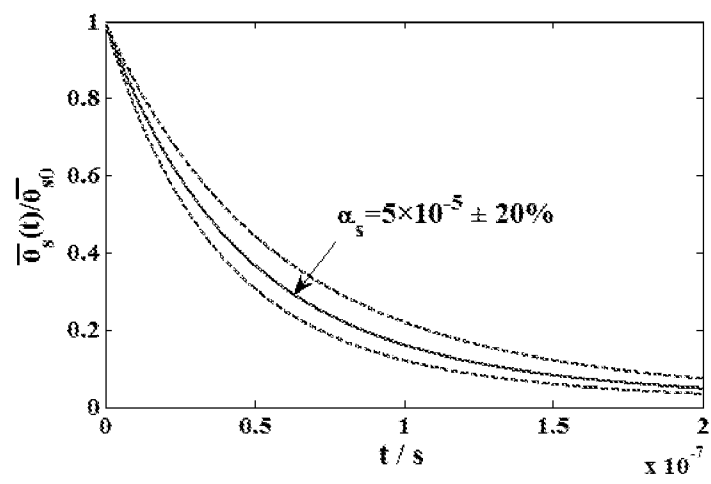


图 15

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2018/113421

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01N 25/20(2006.01)i; G01N 21/65(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/-;G01N21/-

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)

CNPAT; CNKI; EPODOC; WPI: 测, thermal, conductivit??, "2D", 脉冲, pulse?, substrate, 2维, 周期, 热传导, heat??, support??, 双激光, 探, 升温, flash, laser, 检, 热导, nano+, 二维, 温升, 加热, 双脉冲, suspend??, two dimensional, 热物性, 激光, 热扩散, 拉曼, raman, optothermal, 闪光, 张兴, zhang xing, 樊傲然, fan aoran, 胡玉东, hu yudong, 马维刚, ma weigang

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 108107074 A (TSINGHUA UNIVERSITY) 01 June 2018 (2018-06-01) description, paragraphs [0006]-[0056]	1-22
Y	CN 105891255 A (TSINGHUA UNIVERSITY) 24 August 2016 (2016-08-24) description, paragraphs [0007]-[0022], and figure 5	1, 5-9
Y	LI, Q. Y. et al. "Laser Flash Raman Spectroscopy Method for Characterizing Thermal Diffusivity of Suspended and Supported 2D Nanomaterials." <i>ASME 2016 5th Micro/Nanoscales Heat and Mass Transfer International Conference, Conference Paper.</i> , 06 January 2016 (2016-01-06), abstract, page 2, left-hand column, paragraph 3 to page 9, left-hand column, paragraph 2, and figures 1 and 3	1, 5-9
A	CN 106018377 A (TSINGHUA UNIVERSITY) 12 October 2016 (2016-10-12) entire document	1-22
A	CN 106596626 A (WUHAN UNIVERSITY) 26 April 2017 (2017-04-26) entire document	1-22
A	US 2015110150 A1 (TRUSTEES OF BOSTON UNIVERSITY) 23 April 2015 (2015-04-23) entire document	1-22



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

28 December 2018

Date of mailing of the international search report

18 January 2019

Name and mailing address of the ISA/CN

State Intellectual Property Office of the P. R. China
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2018/113421

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 2017125866 A1 (KING ABDULLAH UNIVERSITY OF SCIENCE & TECHNOLOGY) 27 July 2017 (2017-07-27) entire document	1-22

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2018/113421

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	108107074	A	01 June 2018	None			
CN	105891255	A	24 August 2016	CN	105891255	B	11 May 2018
CN	106018377	A	12 October 2016	CN	106018377	B	17 July 2018
CN	106596626	A	26 April 2017	None			
US	2015110150	A1	23 April 2015	US	9927350	B2	27 March 2018
WO	2017125866	A1	27 July 2017	EP	3405789	A1	28 November 2018

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2018/113421

A. 主题的分类 G01N 25/20(2006.01)i; G01N 21/65(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/-;G01N21/- 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)) CNPAT;CNKI;EPODOC;WPI:测, thermal, conductivit???, "2D", 脉冲, pulse?, substrate, 2维, 周期, 热传导, heat???, support??, 双激光, 探, 升温, flash, laser, 检, 热导, nano+, 二维, 温升, 加热, 双脉冲, suspend??, two dimensional, 热物性, 激光, 热扩散, 拉曼, raman, optothermal, 闪光, 张兴, zhang xing, 樊傲然, fan aoran, 胡玉东, hu yudong, 马维刚, ma weigang																				
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PX</td> <td>CN 108107074 A (清华大学) 2018年 6月 1日 (2018 - 06 - 01) 说明书第[0006]-[0056]段</td> <td>1-22</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>CN 105891255 A (清华大学) 2016年 8月 24日 (2016 - 08 - 24) 说明书第[0007]-[0022]段, 图5</td> <td>1, 5-9</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>Qin-Yi Li 等. "Laser Flash Raman Spectroscopy Method for Characterizing Thermal Diffusivity of Suspended and Supported 2D Nanomaterials." ASME 2016 5th Micro/Nanoscales Heat and Mass Transfer International Conference, Conference Paper., 2016年 1月 6日 (2016 - 01 - 06), 摘要, 第2页左栏第3段至第9页左栏第2段, 图1, 3</td> <td>1, 5-9</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 106018377 A (清华大学) 2016年 10月 12日 (2016 - 10 - 12) 全文</td> <td>1-22</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 106596626 A (武汉大学) 2017年 4月 26日 (2017 - 04 - 26) 全文</td> <td>1-22</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	PX	CN 108107074 A (清华大学) 2018年 6月 1日 (2018 - 06 - 01) 说明书第[0006]-[0056]段	1-22	Y	CN 105891255 A (清华大学) 2016年 8月 24日 (2016 - 08 - 24) 说明书第[0007]-[0022]段, 图5	1, 5-9	Y	Qin-Yi Li 等. "Laser Flash Raman Spectroscopy Method for Characterizing Thermal Diffusivity of Suspended and Supported 2D Nanomaterials." ASME 2016 5th Micro/Nanoscales Heat and Mass Transfer International Conference, Conference Paper., 2016年 1月 6日 (2016 - 01 - 06), 摘要, 第2页左栏第3段至第9页左栏第2段, 图1, 3	1, 5-9	A	CN 106018377 A (清华大学) 2016年 10月 12日 (2016 - 10 - 12) 全文	1-22	A	CN 106596626 A (武汉大学) 2017年 4月 26日 (2017 - 04 - 26) 全文	1-22
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																		
PX	CN 108107074 A (清华大学) 2018年 6月 1日 (2018 - 06 - 01) 说明书第[0006]-[0056]段	1-22																		
Y	CN 105891255 A (清华大学) 2016年 8月 24日 (2016 - 08 - 24) 说明书第[0007]-[0022]段, 图5	1, 5-9																		
Y	Qin-Yi Li 等. "Laser Flash Raman Spectroscopy Method for Characterizing Thermal Diffusivity of Suspended and Supported 2D Nanomaterials." ASME 2016 5th Micro/Nanoscales Heat and Mass Transfer International Conference, Conference Paper., 2016年 1月 6日 (2016 - 01 - 06), 摘要, 第2页左栏第3段至第9页左栏第2段, 图1, 3	1, 5-9																		
A	CN 106018377 A (清华大学) 2016年 10月 12日 (2016 - 10 - 12) 全文	1-22																		
A	CN 106596626 A (武汉大学) 2017年 4月 26日 (2017 - 04 - 26) 全文	1-22																		
☒ 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 12月 28日		2019年 1月 18日																		
ISA/CN的名称和邮寄地址		受权官员																		
中国国家知识产权局(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		瓮龙明 电话号码 86-(10)-53962423																		

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	US 2015110150 A1 (TRUSTEES OF BOSTON UNIVERSITY) 2015年 4月 23日 (2015 - 04 - 23) 全文	1-22
A	WO 2017125866 A1 (KING ABDULLAH UNIVERSITY OF SCIENCE & TECHNOLOGY) 2017年 7月 27日 (2017 - 07 - 27) 全文	1-22

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2018/113421

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	108107074	A	2018年 6月 1日	无			
CN	105891255	A	2016年 8月 24日	CN	105891255	B	2018年 5月 11日
CN	106018377	A	2016年 10月 12日	CN	106018377	B	2018年 7月 17日
CN	106596626	A	2017年 4月 26日	无			
US	2015110150	A1	2015年 4月 23日	US	9927350	B2	2018年 3月 27日
WO	2017125866	A1	2017年 7月 27日	EP	3405789	A1	2018年 11月 28日