

文章编号: 1001-3806(2016)04-0506-06

飞秒激光测量微纳材料热物性参量研究进展

夏胜全, 吕学超, 王晓波, 何建军, 王巍, 窦政平

(中国工程物理研究院 材料研究所, 绵阳 621900)

摘要: 随着微纳加工技术的发展, 微纳尺度下材料的热物性参量测量变得尤为重要。首先介绍了飞秒激光测量微纳尺度下材料热物性参量的基本原理、测量系统的实现方法, 对比了所采用的双温模型、双曲两步辐射模型、双曲一步模型、抛物一步模型、双相滞模型和抛物两步模型等主要的传热模型。其次, 介绍了飞秒激光测量物性参量的基本特点。然后, 介绍了单波长正面抽运与探测系统、双波长正面抽运及探测和加热探测不同侧 3 种常见结构的飞秒激光物性测量系统。最后, 展望了飞秒激光物性测量的研究方向。

关键词: 超快光学; 飞秒激光; 微纳尺度; 物性测量

中图分类号: TG113.22

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.04.011

Research advance of measurement of thermo-physical property of micro-nano material with femtosecond laser

XIA Shengquan, LÜ Xuechao, WANG Xiaobo, HE Jianjun, WANG Wei, DOU Zhengping

(Research Institute of Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: With the development of micro-nano fabrication, the measurement of thermo-physical property of micro-nano material becomes more significant. At first, the basic principle of measurement of the thermo-physical property of micro-nano material with femtosecond laser and the means of realization were introduced. And then, two-temperature model, hyperbolic two-step model, hyperbolic one-step model, parabolic one-step model, dual-phase-lag model and parabolic two-step model were compared. Secondly, the characteristics of the measurement of the thermo-physical property of micro-nano material with femtosecond laser were introduced. Thirdly, three common system such as single-color femtosecond laser pump in front and probe system, two-color femtosecond laser pump in front and probe system, and single-color femtosecond laser pump and probe system in different side were introduced. Finally, the direction of future research in measurement of the thermo-physical property of materials was pointed out.

Key words: ultrafast optics; femtosecond laser; micro-nano structure; measurement of physical property

引言

随着微电子和微纳加工技术的飞速发展, 微纳尺度半导体、金属器件的热学性质也受到了越来越多的关注, 对其表面和表面下微纳结构进行准确的定量分析和预测将直接影响到微纳器件的热设计以及热管理^[1]。微纳尺度下材料的物性和体材料有着较大差别^[2], 因此需要对微纳尺度下的材料热物性参量进行单独测量。相对体材料宏观尺度下的热物性参量的测量方法, 如保护热板法、热流计法、热线法、电加热法、差示扫描量热法和激光闪射法等。微纳尺度下材料热物性参量的测量主要有电信号(如热电偶和热电阻)

和光信号两种, 涉及到的关键方法有: 谐波探测法^[3-4]、准稳态的连续光调制热反射法^[5]、悬空岛热导法^[6]、时域热反射法(time-domain thermoreflectance, TDTR)^[7]、激光闪光法^[8]、激光光声法^[9]、激光偏转法^[10-11]和飞秒激光抽运-探测热反射法等。其中, 谐波探测法(主要为 3ω 探测法)在测量导电材料时, 通常会在被测材料和金属探测线之间添加一层绝缘薄膜, 会使得测量的准确性和敏感性在某种程度上有所降低; 连续光调制热反射法的不足之处为信号强度较弱、抽运功率较低; 悬空岛热导法虽然较为直观, 可是一般用来获得纳米线、纳米管等准 1 维材料的热导率; 激光闪光法要求激光脉冲时间远小于样品热传播时间, 且要求样品几何形状准确; 激光光声法后处理时需要修正声波传播造成的相位延迟; 谐波探测法和准稳态的连续光调制热反射法均不能完成对纳米尺度材料内及界面上热输运形状和瞬时非平衡热过程的测量。而飞

作者简介: 夏胜全(1982-), 男, 博士, 工程师, 目前主要从事高能束焊接及应用、数值模拟等研究。

E-mail: xiashengquan2001@163.com

收稿日期: 2015-05-05; 收到修改稿日期: 2015-10-08

秒激光抽运-探测热反射法的反射信号相对较强,较高的抽运光调制频率使得热信号向被测材料内部渗透深度较浅(微纳量级),是目前最适合对微纳尺度结构材料和界面输运性质测量的方法^[1]。采用飞秒激光研究微纳尺度的热传递现象可以追溯到 20 世纪 80 年代:1987 年,SCHOENLEIN 等人用飞秒激光测量了金膜的超快热过程^[12];同年,ALLEN^[13]和 BRORSON^[14]等人分别建立了飞秒抽运-探测热反射系统,并获得了比较好的结果。此外,随着超短脉冲激光技术的快速发展,飞秒激光的应用也越来越多^[15-20]。激光脉冲宽度目前已经可以达到阿秒量级,飞秒激光器也已经发展成熟^[21],为飞秒激光测量材料物性提供了较好的硬件条件。

1 飞秒激光测量物性的基本原理

通常金属表面反射率与其内电子分布有着密切联系,电子分布直接影响着温度的变化,于是金属表面反射率与温度之间存在一定对应关系,据光电理论分析,在一定温度区间内($\Delta T < 150\text{K}$),金属材料的表面反射率和温度呈比例关系^[22]:

$$\frac{\Delta R}{R} = a\Delta T_e + b\Delta T_l \quad (1)$$

式中, a, b 分别为电子温度和声子(描述晶格振动规律的一种能量量子)温度的线性系数; R 和 ΔR 分别为金属表面反射率及其变化; ΔT_e 和 ΔT_l 分别为电子温度和声子温度的变化。飞秒激光的脉冲宽度极短,使得金属内部的电子和声子在脉冲加热瞬间存在严重非平衡现象。首先在极短的时间内,光子将能量传递给电子使得电子温度迅速升高,电子-电子相互作用获得较为恒定的电子温度,由于声子比热容一般远大于电子比热容,故声子温度相对电子认为不变,之后低温声子通过电子-声子耦合方式获得高温电子的部分能量,达到电子和声子之间的热平衡^[20]。可见在非平衡传热过程中,电子温度快速升高。忽略声子温度变化,通过实验曲线与理论计算的电子温度变化曲线峰值对比,可以求出(1)式中的 a ,将理论计算的电子、声子恢复平衡后温度曲线和实验曲线进行对比可得到声子温度的线性系数 b 。在具体实验条件下,较短的时间内基本上可以忽略晶格的温升,可认为电子的温度变化与反射率相对变化量成正比关系。

通过测量物体表面反射率随时间变化获取温度变化曲线后,由于在一定外部条件下,材料温度变化曲线和材料物性参量直接相关,再结合不同的传热模型(模型中包含表征材料属性的特征参量)对实验数据进行拟合和归一化处理,即可得到该材料相关的物性

参量^[21]。

1.1 传热理论模型

由上面分析可看出,要获得材料的物性参量,需要结合不同传热模型。除了经典的傅里叶传热模型外,结合分子动力学理论,目前主要有以下几种传热模型。

1.1.1 双温模型(two-temperature model, TTM) 1974 年,ANISIMOV^[23]等人认为,激光辐射能量向晶格内能的转化不是瞬时完成,主要涉及到两个过程:一是激光激发金属中的自由电子;二是自由电子和晶格相互作用,在此过程中能量在自由电子和晶格之间重新分配。基于这两点假设,提出了双温模型:采用两个不同温度分别表征金属中电子和晶格的能量状态,并且 ANISIMOV 指出,当激光加热时间小于一定值时,同一区域自由电子温度和晶格温度在同一时间段可能不相同。QIU 等人测量了 Au 和 Cr 单层、多层薄膜飞秒激光热反射信号,验证了双温模型的正确性^[24]。HAN 等人研究脉冲间隔对激光烧蚀金属加工精度的影响时,便采用了这种双温模型^[25]。另外一些学者的研究也验证了双温模型的适应性^[26-30],从而说明双温模型在一定程度上是适用的。

1.1.2 双曲两步模型(hyperbolic two-step model, HTS) 当晶格、电子的加热时间远大于脉冲宽度,QIU 等人^[31]提出了双曲两步辐射模型,数学描述如下:

$$\begin{cases} C_e(T_e) \frac{\partial T_e}{\partial t} = -\frac{\partial Q}{\partial x} - G(T_e - T_l) + S \\ C_l(T_l) \frac{\partial T_l}{\partial t} = G(T_e - T_l) \\ \tau_F \frac{\partial Q}{\partial t} + k \frac{\partial T_e}{\partial x} + Q = 0 \\ C_e(T_e) \frac{\partial T_e}{\partial t} = \gamma T_e \end{cases} \quad (2)$$

式中, C_e, T_e 和 C_l, T_l 分别为电子和声子的比热容及温度; $Q, S, k, G, \tau_F, \gamma$ 分别为热流、激光热源、玻尔兹曼常数、电子声子耦合因子、费米表面弛豫时间和电子比热容系数。(2)式中的第 3 个方程揭示了金属中通过的电子气进行能量传输的双曲特性。XIONG 等人^[32]利用该模型研究无限大金属薄膜在短暂激光冲击下诱导的位移、应力、应变和温度等物理量的演化特点。HTS 模型适合于具有高耦合因子的薄膜材料,且这个模型描述的波动导热行为仅适用于极低的温度条件^[33]。

1.1.3 双曲一步模型(hyperbolic one-step model, HOS) 当脉冲宽度大于晶格热化时间时,电子和晶格之间能量交换重要性下降,此时可以用 HOS 描述,由 MAURER 提出^[34],描述如下:

$$\begin{cases} \tau_F \frac{\partial Q}{\partial t} + k \frac{\partial T_1}{\partial x} + Q = 0 \\ C_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - S = 0 \end{cases} \quad (3)$$

可以看出,其忽略了电子和晶格之间能量交换过程。

1.1.4 抛物一步模型 (parabolic one-step model, POS)

QIU 等人通过一系列理论和实验研究后得出结论:当超短脉冲激光加热金属时,主要表现为4种不同的导热方式,按照不同导热方式求解玻尔兹曼方程给出的包含扩散、热波和非平衡导热行为在内的导热模型,当激光加热时间较长时,该问题退化为传统的扩散问题,将激光加热热源项扩散模型称之为抛物一步模型^[35]。

$$C_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T_1}{\partial x} \right) + S \quad (4)$$

任意时刻电子和晶格的温度都是相等的,因此可以只描述晶格的温度分布。HAN 等人给出了纳米级金膜在蓝宝石上传热过程抛物一步模型的预测和实验结果的对比情况^[36],其归一化温度(瞬时温度变化量与最高温度变化量的比值,无量纲)随时间的变化如图1所示。

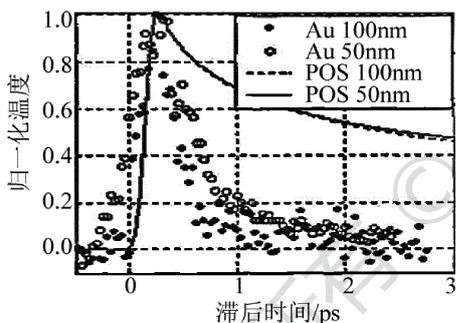


图1 POS 预测结果和实验结果对比

由图1可以看出,采用POS误差较大。POS往往只适用于弛豫时间以及热化时间远小于加热时间的实验条件。

1.1.5 双相滞模型 (dual-phase-lag model, DPL)

TZOU 在 Fourier 热流方程中引入了两个时间常数:热流滞后时间和温度梯度滞后时间,从而提出了双相滞模型。

根据两个滞后时间相对大小,将导热分为热波、类热波、扩散和过扩散4种方式^[37],其表达式如下:

$$\begin{aligned} \nabla^2 T + \tau_r \frac{\partial}{\partial t} (\nabla^2 T) + \frac{1}{k} (S + \tau_r \frac{\partial S}{\partial t}) = \\ \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\tau_q}{\alpha} \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, τ_r 和 τ_q 分别为温度梯度弛豫时间和热流弛豫时间, $\alpha = k / (C_e + C_1)$ 。TZOU 利用 DPL 预测了

BRORSON 的实验结果,然而,DPL 描述的温度在超短激光脉冲加热金属时并不存在^[38]。

1.1.6 抛物两步模型 (parabolic two-step model, PTS)

依据双温模型假设和双温度理论,QIU^[39]等人从玻尔兹曼方程出发,针对超短脉冲加热金属问题,于1994年提出了更为严格的抛物两步模型。其实严格来说,PTS 是一种双温模型。

$$\begin{cases} C_e(T_e) \frac{\partial T_e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T_e}{\partial x} \right) - G(T_e - T_1) + S \\ C_1(T_1) \frac{\partial T_1}{\partial t} = G(T_e - T_1) \end{cases} \quad (6)$$

大量的研究表明,两步模型预测了较高的电子温度、较低的晶格温度以及比较大的热化区域,无论是双曲一步模型还是双曲两步模型,它们对整个加热过程的影响都比较小,一步模型预测的峰值温度偏小,而两步模型高估了电子的峰值温度,忽略了晶格温度响应^[40]。

综合来说,由于PTS 能够很好地预测金属加热过程的实验结果^[41-43],故到目前为止,超短激光脉冲加热金属热输运过程一般采用PTS 进行描述。

1.2 飞秒激光测量物性的实现方式

可采用一种瞬态热发射技术^[44] (transient thermoreflectance, TTR) 来实现系统搭建,其基本实现方法是用一束能量较强的短脉冲激光加热金属薄膜,用另一束能量较弱的短脉冲激光探测加热样品表面反射率的瞬态变化,选择适当的传热数学模型描述该过程,依据传热模型进行推导和数据处理,结合实验数据和计算数据,得到表征材料物性参数的物理量大小。TTR 是一种非接触式测量微尺度金属薄膜物性的有效手段,如:KOMAROV^[45]等人于2003年采用TTR 测量了自然硅和同位素硅-28 薄膜的导热率;2005年,STEVENSON^[46]等人利用TTR 测量了一系列金属-绝缘体之间的电导率。本文中提到的飞秒瞬态热反射 (femtosecond transient thermoreflectance, FTTR) 技术其实是采用飞秒激光作为光束源的TTR,其实现结构图如图2所示。

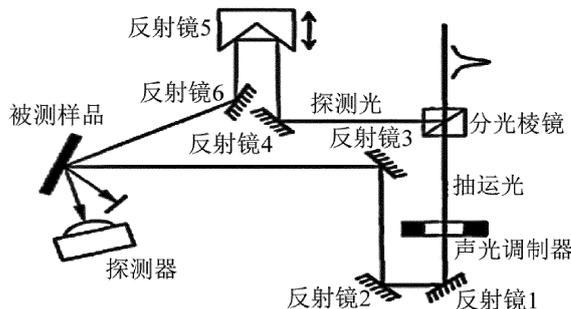


图2 FTTR 技术原理图

图 2 中,一束飞秒脉冲激光经过分光棱镜后变成两束,能量较强一束的飞秒脉冲激光被称之为抽运光,主要作用是加热被测样品,能量较弱一束飞秒脉冲激光称之为探测光,主要作用是探测加热样品表面反射率的瞬态变化。为了减小探测光对样品的热影响从而获得较为准确的测量结果,抽运光的能量必须远远大于探测光。一般情况下,FTTR 技术所能设定的时间步长远大于光电探测器的响应时间(纳秒数量级),需要通过调制技术突破光电探测器响应速度的限制,故图 2 中将分光棱镜分离出来的抽运光需要经过调制后再加热样品。2013 年,ALWI 等人就采用 FTTR 测定了氢化非晶碳薄膜的热扩散率、热导率和比热等热物性参量^[47]。

2 飞秒激光测量物性的基本特点

通过对飞秒激光测物性的描述,其基本特点为:

- (1) 系统灵敏度相对较高。由于飞秒激光单脉冲时间较小(10^{-15} s),功率相对较高,且测量光斑为微米量级,因此具有极高瞬时热流密度,热反射信号相对较强,在一定程度上提高了系统的相对灵敏度;
- (2) 适合微纳尺度薄膜物性的测量。由于抽运光调制频率较高(10^5 Hz ~ 10^7 Hz),热信号向被测材料内部渗透的深度一般在几十纳米至几微米量级,因此,最适合对微纳尺度结构材料和界面能量输运性质进行测量,尤其是界面热阻等参量的测量,飞秒激光有着非常广泛的应用;
- (3) 适合温度敏感且多相变材料的物性测量。有些材料对温度较为敏感,温度变化较大时会发生相变,测量材料热物性参量时,希望引起的温差较小,而飞秒激光作用过程极短,引起的温升较小,因此非常适合这类材料的热物性参量的测量。

3 飞秒激光测量物性的不同结构及应用

3.1 单波长正面抽运和探测系统

单波长正面抽运-探测系统是常规的 FTTR 测量方式,偏振分束棱镜将飞秒激光器发出的脉冲激光分离为加热光和探测光,二者均为偏振光且偏振方向相互垂直,加热光和探测光的光强比例可以通过旋转半波片任意调节。声光调制器将加热光调制到预设频率后,物镜将其聚焦到被测试样表面,而探测光先需要进行延迟(飞秒~皮秒级时间延迟),然后再在被测试样表面进行聚焦。为了消除加热光对检测数据的影响,被反射的探测光需要经过格兰棱镜进行滤波,过滤掉进入光电探测器的加热光,最后还需采用锁相放大器将在调制频率上的信号进行放大和输出,最终传递到计算机进行数据处理和在线监测。ZHU^[48]等人于

2008 年建立了该系统,得到了在 140fs 超短脉冲激光加热下 50nm 金膜的非平衡电子温升引起的反射信号随时间的变化曲线,其建立的系统如图 3 所示。

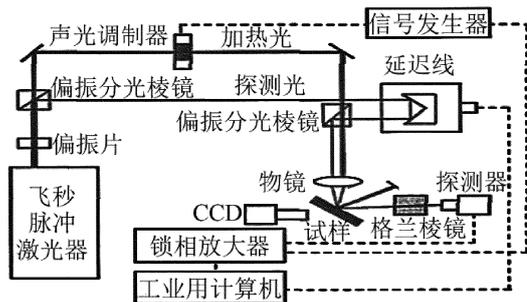


图 3 飞秒激光抽运-探测热反射系统

由于探测光的光强远小于加热光光强,通常不会影响加热光对样品的加热和作用过程。使用单波长正面抽运和探测的系统时,探测光调制信号往往很微弱,即使少量加热光也会影响到测量结果的准确性,增大测量信号的基值,又使得系统随机性较大,通常必须仔细调节格兰棱镜,减小加热光的影响。此外,声光调制器的调节位置、数据采集时间、电控位移平台平整性等因素也会干扰测试结果。

3.2 双波长正面抽运和探测系统

早在 2008 年,在 TDTR 中,SEHMIDT 等人^[49]采用单波长改双波长的设计,大大提高了测量的信噪比,并将该方法成功运用到液体热导率的测量。针对 FTTR,为避免单波长测试系统信噪比低的缺陷,ZHU^[50]等人采用双波长设计的抽运-探测系统实现了 304nm 厚的 SiO₂ 纳米薄膜热导率的测量,同时得到了 SiO₂/Si 及 Al/SiO₂ 之间的界面热导,与文献值吻合较好。所建立的双波长飞秒激光抽运-探测热反射实验系统示意图如图 4 所示。

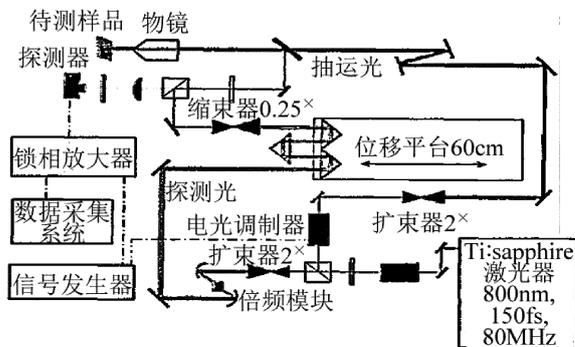


图 4 双波长飞秒激光抽运-探测热反射实验系统示意图

图 4 中,倍频(second harmonic generation, SHG)模块首先对探测光进行倍频处理获得二次谐波,从而获得频率和入射光相同、脉冲时间和入射光相近的激光,该处理是双波长与单波长系统最为明显的区别。由于二者波长不同,在该系统中可以根据二者波长的差别

- [16] AHMMED K M T, LING E J Y, SERVIR P, *et al.* Introducing a new optimization tool for femtosecond laser-induced surface texturing on titanium, stainless steel, aluminum and copper[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 66(3): 258-268.
- [17] SEE T L, LIU Z, LIU H, *et al.* Effect of geometry measurements on characteristics of femtosecond laser ablation of HR4 nickel alloy[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 64(1): 71-78.
- [18] OKHRIMCHUK A G, MEZENTSEV V K, LICHKOVA N V, *et al.* Femtosecond laser writing in the monoclinic $\text{RbPb}_2\text{Cl}_5:\text{Dy}^{3+}$ crystal[J]. *Optical Materials*, 2015, 43(5): 1-5.
- [19] LEHR J, KIETZIG A M. Production of homogenous micro-structures by femtosecond laser micro-machining[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 57(6): 121-129.
- [20] GAO Sh M, YAN K Zh, HAN P G, *et al.* Study on periodic structures on Si surface induced by femtosecond laser [J]. *Laser Technology*, 2015, 39(3): 395-398 (in Chinese).
- [21] MA W G, WANG H D, ZHANG X, *et al.* Theoretical and experimental study of femtosecond pulse laser heating on thin metal film [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(6): 064401 (in Chinese).
- [22] ZHU J, TANG D W, WANG W, *et al.* Ultrafast thermoreflectance techniques for measuring thermal conductivity and interface thermal conductance of thin films[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108(9): 094315.
- [23] ANISIMOV S I, KAPELIOVICH B L, PERELMAN T L. Electron emission from metal surface exposed to ultrashort laser pulses[J]. *Zhurnal Eksperimental'noi Teoreticheskoi Fiziki*, 1974, 66(2): 776-781.
- [24] QIU T Q, JUHASZ T, SUAREZ C, *et al.* Femtosecond laser heating of multi-layer metals—II. Experiments[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1994, 37(17): 2799-2808.
- [25] HAN F, YAN H, ZHOU H B, *et al.* Study on ablation of Ni film by ultrashort laser pulse-train [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(4): 478-482 (in Chinese).
- [26] OU Y, YANG Q, DU G Q, *et al.* Ultrafast thermalisation dynamics in an Au film excited by a polarization-shaped femtosecond laser double-pulse[J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 70(7): 71-75.
- [27] DU G Q, CHEN F, YANG Q, *et al.* Ultrafast dynamics of high-contrast nano-grating formation on gold film induced by temporally shaped femtosecond laser[J]. *Chemical Physics Letters*, 2014, 597(3): 153-157.
- [28] CHENA Ch Y, CHANG T L. Multilayered structuring of thin-film PV modules by ultrafast laser ablation[J]. *Microelectronic Engineering*, 2015, 143(3): 41-47.
- [29] REN N F, GU J F, XU M L, *et al.* Research of thermodynamics in thin film irradiated by femtosecond laser[J]. *Laser Technology*, 2010, 34(5): 708-711 (in Chinese).
- [30] DENG S H, TAO X Y, LIU M P, *et al.* Thermal analysis of metal ablation by means of femtosecond-to-nanosecond laser pulses[J]. *Laser Technology*, 2007, 31(1): 4-7 (in Chinese).
- [31] QIU T Q, TIEN C L. Heat transfer mechanisms during short-pulse laser heating of metals[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1993, 115(4): 835-841.
- [32] XIONG Q L, TIAN X G. Study of thermoelasticity of a metal film during laser heating [J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2011, 32(6): 588-593 (in Chinese).
- [33] ZHU J. Study on thermal transportation mechanism of nano-scale materials and interfaces by femtosecond laser pump and probe method[D]. Beijing: School of Graduates, Chinese Academy of Sciences, 2011: 10-11 (in Chinese).
- [34] MAURER M J. Relaxation model for heat conduction in metals[J]. *Journal of Applied Physics*, 1969, 40(13): 5123-5130.
- [35] QIU T Q, TIEN C L. Femtosecond laser heating of multilayer metals 1. Analysis[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1994, 37(17): 2789-2797.
- [36] HAN P, TANG D W, CHENG G H, *et al.* An experimental investigation of energy transport of metal film[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2008, 29(2): 297-300 (in Chinese).
- [37] ZOU D Y. A unified field approach for heat conduction from macro- to micro-scales[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1995, 117(1): 8-16.
- [38] HAN P. Establishment of Femtosecond laser pump-probe thermoreflectance system and study on heat transport in metal films [D]. Beijing: School of Graduates, Chinese Academy of Sciences, 2008: 60-61 (in Chinese).
- [39] BRORSON S D, FUJIMOTO J G, LPPEN E P. Femtosecond electronic heat-transport dynamics in thin gold films[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 59: 1962-1965.
- [40] PENG Y J. Process of optical and thermal reaction of nanometallic Al composite nanoenergetic materials [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008: 73 (in Chinese).
- [41] HU J J. Study on the ultrafast dynamics of the copper film by energetic particles heat transport [D]. Harbin: Heilongjiang University, 2013: 46-57 (in Chinese).
- [42] JIA L, MA W G, ZHANG X. Experimental study of thermal conductivity of aluminum nanofilms[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2014, 35(6): 1136-1139 (in Chinese).
- [43] TSUNG W T, YUNG M L. Analysis of microscale heat transfer and ultrafast thermoelasticity in a multi-layered metal film with nonlinear thermal boundary resistance [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 62(4): 87-98.
- [44] EESLEY G L. Observation of nonequilibrium electron heating in copper [J]. *Physical Review Letters*, 1983, 51(23): 2140-2143.
- [45] KOMAROV P L, BURZO M G, KAYTAZ G, *et al.* Transient thermoreflectance measurements of the thermal conductivity and interface resistance of metallized natural and isotopically-pure silicon[J]. *Microelectronics Journal*, 2003, 34(12): 1115-1118.
- [46] STEVENS R J, SMITH A N, NORRIS P M. Measurement of thermal boundary conductance of a series of metal-dielectric interfaces by the transient thermoreflectance technique[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2005, 127(3): 315-322.
- [47] ALWI H A, KIM Y Y, AWANG R, *et al.* Measurement of thermophysical properties of hydrogenated amorphous carbon thin films using picosecond thermoreflectance technique[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 63(15): 199-203.
- [48] ZHU J, TANG D W, CHENG G H, *et al.* Foundation of femtosecond laser pump-probe thermoreflectance system[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2008, 29(7): 1227-1230 (in Chinese).
- [49] SCHMIDT A J, CHIESA M, CHEN X, *et al.* An optical pump-probe technique for measuring the thermal conductivity of liquids[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, 79(6): 064902.
- [50] ZHU J, TANG D W. Two-color femto-second laser pump and probe thermoreflectance method measuring nano-film thermal conductivity and interface thermal conductance[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2012, 33(7): 1185-1189 (in Chinese).
- [51] WANG H D, MA W G, GUO Z Y, *et al.* Experimental study of ultrafast heat conduction process in metals using femtosecond laser thermal reflection method[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2011, 32(3): 465-468 (in Chinese).