

Si 微电阻桥温度分布与热传导特性的 显微 Raman 光谱研究^{*}

蔡炜颖[†] 李志锋 陆 卫 李守荣 梁平治

(中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家重点实验室, 上海 200083)

(2003 年 1 月 24 日收到, 2003 年 3 月 5 日收到修改稿)

采用显微 Raman 光谱方法对红外目标模拟器中重掺杂 Si 微电阻桥单元的热传导特性进行研究, 根据 Si 桥的实际特性建立相应的 Raman 散射模型, 通过测量 Raman 峰位的移动得到高功率激光辐照下测量点的温度. 对 Si 桥桥面分别进行了沿某些特殊线段的逐点线扫描和覆盖全部桥面的面扫描, 得到各点的温升及其分布. 用基于有限元分析的软件结合 Si 桥结构参数对各测量点的温升进行了模拟计算, 其结果在热导分布的基本趋势上与实验相一致. 实验细致地揭示了热导分布的局域起伏, 反映出实际器件的不均匀性, 为改进器件设计、优化器件性能提供了实验依据.

关键词: Raman 光谱, Si 桥, 温度分布, 热导

PACC: 7830; 4410

1. 引 言

作为红外目标仿真器, Si 微电阻桥阵列是最有发展前途的一种器件^[1-4]. 在实际应用中, 其温度特性不仅是这类器件的最核心的特性, 而且是了解器件相关物理参数、进行器件优化的重要参量. Si 桥像元的尺度往往在几十微米量级, 并且悬空架构, 用普通的接触式测温方法测量温度显然具有极大的困难. 在非接触式测温方法中, 热像仪等红外探测设备虽可方便直观地探测出相对温度分布, 但难以得到绝对温度和理想的空间分辨率. 这是因为基于热像仪方法所测量的是红外辐射强度, 而探测到的强度会受到 Si 表面发射系数和封装器件的窗口透射特性影响, 在确定这些因素所对应的参数时任何误差必然引起绝对温度测定的系统误差. 并且其空间分辨率受到红外辐射波长的限制, 如当所探测的红外辐射波长在 $10 \mu\text{m}$ 时, 由于衍射极限的限制, 空间分辨率难以达到微米量级, 为此不可能探测到温度在微米尺度上的起伏. 应用显微 Raman 光谱手段有可能克服上述缺点.

文献[6]曾经报道了用显微 Raman 方法测量 Si

微电阻桥像元在加电流的工作状态下桥面上个别点的绝对温度^[6]. 在采用较强功率激光进行显微 Raman 测量时, 被测点因激光的加热效应而升温. 由于桥体具有特定的几何构型, 桥面各点所处的边界条件不同, 同时由于受到其他非设计因素诸如工艺过程的不均匀性等的影响, 使得它们的热传导能力各不相同, 从而导致同一激光功率加热下桥面各点的温升不同, 达到不同的绝对温度. 因此, 测量点的绝对温度反映了该点由于激光加热效应引起的温升, 即反映了该点的热传导特性. 为了全面了解 Si 电阻桥整个桥面上的热传导状况, 以利于 Si 桥的优化设计, 同时掌握实际 Si 桥上的温度分布特性, 本文对单个 Si 桥像元进行了逐点连续步进扫描的显微 Raman 光谱测量, 得到了桥面上各点在同一功率激光辐照时所达到的温度空间分布图. 利用稳态热传导模型, 结合 Si 桥的实际边界条件和实验条件对 Si 桥桥面上各点所达到的绝对温度进行了计算, 得到整个桥面的温升分布模拟结果. 与 Raman 实验得到的温升分布进行比较, 两者表现出的变化趋势一致, 符合良好, 同时实验揭示出实际 Si 桥中局部区域的不均匀性.

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60244002 和 10234040)资助的课题.

[†] E-mail: wycail@mail.sitp.ac.cn

2. 实 验

图 1 为 Si 电阻桥列阵中单个像元示意图,其中白色的反“Z”字形为桥面,长为 $100\ \mu\text{m}$,宽 $20\ \mu\text{m}$,厚为 $0.5\ \mu\text{m}$,悬空架起在深色的正方形腐蚀坑上.桥体为 p 型 B 掺杂 Si,浓度约为 $10^{20}\ \text{cm}^{-3}$.显微 Raman 实验在室温下进行,采用背散射配置,激发光源为 Ar^+ 激光的 $514.5\ \text{nm}$ 线,测试系统为 Jobin Yvon LabRam-INFINITY 显微 Raman 光谱仪,所用光栅为 $1800\ \text{g}/\text{mm}$.测量时选用 100 倍物镜,将激发光聚焦成直径约为 $0.8\ \mu\text{m}$ 的光斑.扫描实验之前,为选择适当的激光功率以判断激光加热效应,用 $0.07, 0.7, 1.75, 3.5$ 和 $7.0\ \text{kW}/\text{cm}^2$ 等不同激发功率的 $514.5\ \text{nm}$ 激光对 Si 桥中心同一点进行辐照,经足够长时间建立热平衡之后,测量其 Raman 光谱.由于激光的加热效应,测得的 Si 桥 Raman 散射的斯托克斯峰位明显移动,如图 2 所示.当激光功率较小时,如图 2 中 $0.07, 0.7$ 和 $1.75\ \text{kW}/\text{cm}^2$, Raman 峰移动很小,说明激光对被测点的加温较小,样品温度接近未受辐照的情况;但当激光功率增至较大值 $7.0\ \text{kW}/\text{cm}^2$ 时, Raman 峰比小功率测量时向低频方向移动了约 $3\ \text{cm}^{-1}$,说明采样点温升显著.这一现象表明 Si 微电阻桥这样的红外图像模拟器件具有热传导差的特点,因此用显微方法对样品加温,同时测量 Raman 光谱以研究 Si 桥上温度的空间分布,进而了解器件的物理特性并寻找优化方向将是一条可行途径.在实际测量中,由于激光强度衰减片级数的限制,为了得到较大的温升,采用的激光辐照功率约为 $42\ \text{kW}/\text{cm}^2$.尽管如此高的激光功率对测量点具有显著的加热效应,但测量后样品表面并未出现明显的烧灼痕迹,并且经变功率循环测量时得到的 Raman 光谱具有良好的重复性,说明样品表面未受到激光的损伤.

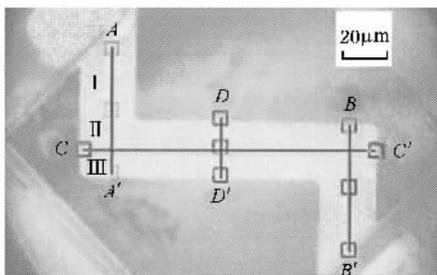


图 1 Si 桥像元平面图 线扫描实验沿 AA', BB', CC' 和 DD' 线段进行

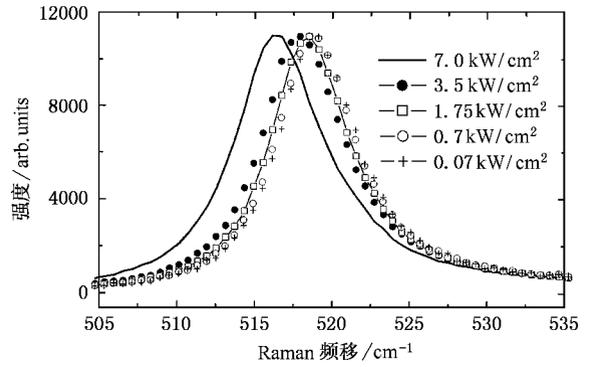


图 2 不同激发功率下对 Si 桥中心点测量得到的 Raman 光谱图
大激发功率下 Raman 峰位向低频方向移动,表明样品测试点的温度上升

为了大致了解 Si 桥上各点的温升情况,选取了具有代表性的 4 条线段分别进行逐点线扫描,如图 1 中的 AA', BB', CC', DD' 所示,以获得两个桥头、横向桥身及纵向桥身的热导分布状况.扫描时通过步进电机精确控制样品台移动的距离,步进精度能够达到 $0.1\ \mu\text{m}$.每次步进之后,利用光谱仪的自动聚焦功能,通过安装在物镜与承镜台之间的压电陶瓷调节物镜的高度,找到物镜的最佳聚焦位置,然后对 CCD 探测器曝光进行光谱采集.线扫描时先设定起始点和终止点的位置,然后设定扫描步进数,进行等间距扫描. AA' 和 BB' 分别设 40 点, CC' 设 72 点, DD' 设 30 点.

在通过线扫描了解 Si 桥热导分布的初步特征和大致趋势之后,又对整个桥面进行了平面扫描,以期了解热导特性的整体变化和局域起伏,使之能够更切实地反映实际器件的全面特性.平面扫描分三个区域进行,划分如图 3 所示,(1)区和(3)区为两个桥头,扫描点数设置为 14×42 ,(2)区为桥身,扫描点数设置为 50×13 .

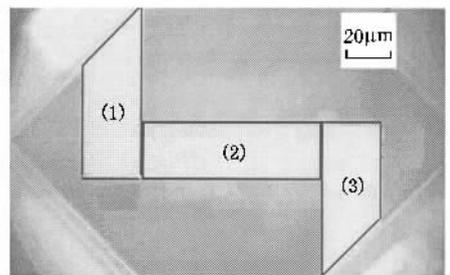


图 3 Si 桥的平面扫描 Raman 光谱测量区域示意图
(1)(2)(3)区分别对应于左桥头、桥身和右桥头

3. 结果与讨论

3.1. Raman 光谱测温与 Si 桥热传导的探测原理

用显微 Raman 光谱研究 Si 桥热导特性的基础是针对 Si 桥的 Raman 测温^[5,6],具体包括 Raman 散射线形模型的建立和 Raman 峰位与样品温度之间相互关系的确定.前者用于提取 Raman 峰参数以进行精确定温,后者将 Raman 测温原理具体化,使之适用于实际测量.

Si 桥由于 p 型重掺杂其 Raman 峰^[5]大大偏离了本征 Si 的 Lorentz 线形,表现出明显的不对称线形,如图 2 所示.根据 LO 声子与空穴连续带^[7]的耦合模型, Si 桥样品的 Raman 线形可用下式^[5]拟合,以精确提取 Raman 峰值频率的移动量:

$$I(\omega) = I_0(\omega - \omega_{LO} + v)^2 / (\Gamma^2 + (\omega - \omega_{LO} - \delta)^2), \quad (1)$$

其中 $I(\omega)$ 为所测 Raman 光谱的强度, ω 为 Raman 移动的波数, $\omega_{LO} = 520 \text{ cm}^{-1}$, I_0 , v , δ 和 Γ 为拟合参数,分别为 Raman 散射的强度系数、不对称性因子、相对于本征 Si LO 声子频率的偏移量,以及 Raman 峰的展宽.

Raman 峰位随温度变化的物理本质来源于晶格振动势中的非谐项^[8],通常对于 1400 K 以下只需考虑三声子和四声子过程的贡献,即可很好地反映 Si 的 Raman 峰位与温度之间关系^[8-11].引入室温下的可测值 $\omega|_{T=300\text{K}}$,单声子 LO 模的 Raman 峰位与温度的关系可表示成

$$\begin{aligned} \omega(T) &= \omega|_{T=300\text{K}} + \Delta\omega(T), \\ \Delta\omega(T) &= C \left[\frac{2}{e^x - 1} - \frac{2}{e^x|_{T=300\text{K}} - 1} \right] \\ &+ D \left[\frac{3}{e^y - 1} + \frac{3}{(e^y - 1)^2} - \frac{3}{e^y|_{T=300\text{K}} - 1} - \frac{3}{(e^y|_{T=300\text{K}} - 1)^2} \right], \\ x &= \hbar\omega_0/2k_B T, \\ y &= \hbar\omega_0/3k_B T, \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $\Delta\omega(T)$ 为 Raman 峰位相对于室温值的偏移, ω_0 为声子模的固有频率, $\omega|_{T=300\text{K}}$ 为可测量, C , D 为与样品材料有关的常数.根据实验 (2) 式中 $\omega|_{T=300\text{K}}$ 取为 517 cm^{-1} , C , D 选为 -2.96 和 -0.714 ^[8].通过对实验 Raman 线形的拟合,得到峰位参数 $\Delta\omega(T)$ 后

即可计算得到测量点的绝对温度.以往的工作已给出相对于室温下 Si 桥 Raman 峰移动量 $\Delta\omega(T)$ 与温度 T 之间的关系^[6],如图 4 所示.例如,对于图 2 中激光功率为 7.0 kW/cm^2 的 Raman 峰,可计算得到此时该测量点的温度为 445 K.本文中 Raman 扫描实验的全部光谱数据均通过线形拟合,提取峰位移动参数之后,经 (2) 式计算,逐一得到测量区域全部测量点的温度值,形成最终反映热导状况的温升分布图.

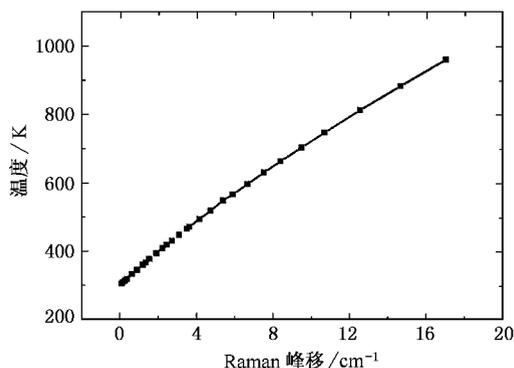


图 4 由 (2) 式计算得到的 Si 桥 Raman 峰值频率的移动量与测量点温度的关系

3.2. Si 桥热传导的模拟计算^[12,13]

为了模拟激光加热后 Si 桥上不同位置的温升特性,必须考虑不同边界条件下热传导的贡献.热传导是由于温度梯度导致的内能的交换,遵循傅里叶定律:

$$q = -\kappa \frac{dT}{dx}, \quad (3)$$

其中 q 为热流密度 (W/m^2), κ 为导热系数 [$\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$].对一个具有一定几何形状,包含许多节点,具有自身的材料特性和处于特定环境中的实体系统进行热分析时,如果系统的净热流率为零,即流入系统的热量加上系统自身产生的热量等于流出系统的热量: $q_{\text{流入}} + q_{\text{生成}} - q_{\text{流出}} = 0$,则系统处于热稳态.在稳态热分析中任一节点的温度不随时间变化.由 (3) 式,稳态热分析的能量平衡方程(以矩阵形式表示)为

$$\{Q\} = [K]\{T\}, \quad (4)$$

其中 $[K]$ 为传导矩阵,包含导热系数、对流系数、辐射率和形状系数, $\{T\}$ 为节点温度向量, $\{Q\}$ 为节点热流率向量.利用模型几何参数、材料热性能参数^[14]以及所施加的边界条件,生成 $[K]$, $\{T\}$ 以及

{Q}即可计算一个系统的温度分布及其他热物理参数.

基于上述稳态热平衡方程,用有限元法计算各节点的温度.具体的计算采用了商业化的 ANSYS 热分析软件,利用软件中建模、设定初始及边界条件,求解三个基本步骤,结合为本文研究所需的循环程序完成模拟计算.对于 p 型重掺杂 Si 的桥体材料,其热导系数取为 $0.007 \text{ W}(\text{m}\cdot\text{C})^{-1}$.由于显微加热和 Raman 测量在室温下进行,Si 桥两端与体 Si 相连,导热性极好,所以取桥头边界处温度 $T = 300\text{K}$.由于实验中激光光斑直径约为 $0.8 \mu\text{m}$,与桥面尺度相比可近似为点热源,对于 $42 \text{ kW}/\text{cm}^2$ 的激光功率,其载荷热流率取为 8α (与实验比较得到).根据结构尺寸建立 Si 桥的几何模型,通过逐点计算不同边界条件下各加热点的温升,得到整个 Si 桥桥面上的温升状况分布的全貌.图 5 示出 Si 桥某随机单点在激光加热下产生的温度分布的模拟计算结果.

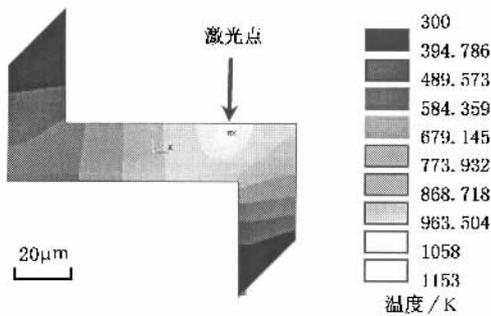


图 5 利用 ANSYS 热分析软件计算得到的 Si 桥上激光加热点及桥面的温度分布

3.3. Si 桥热导特性的实验结果

图 6 至图 8 分别示出了沿图 1 中所示 AA', BB', CC', DD' 线段进行线扫描显微 Raman 测量,通过线形拟合后利用(2)式计算得到的各测量点的温度.同时示出用 ANSYS 热分析软件得到的模拟计算结果.其中横坐标代表测量点的位置,纵坐标代表测得的绝对温度,反映了该点附近的热导状况.图 6 中温升分布大体上可分为三个区域,如图中虚线所示,分别对应于图 1 中 I, II, III 区域,其中 I 区是近桥墩处,因其直接与体 Si 相接,大部分热量由桥墩向体 Si 传递,因此温升随距桥墩的距离快速增加.这是合理的.因为在传导、对流和辐射三种热量传递方式中,传导具有最高的效率,Si 桥上的热量传递主要由接触热传导决定. II 区是中间段,温升表现出平缓

的饱和趋势.该段区域通过向桥墩和向桥体两种方向散热,实验结果显示这两种热导方向效果相当. III 区靠近桥体边界,散热受边界限制,故温升明显增加.理想情况下 AA' 和 BB' 由于结构完全对称,其温升分布也应完全对称.但图 6 中的测量结果显示左右两个桥头并不完全对称,说明这两个桥头在结构特性上并不完全相同.图 6 的实心点为理论计算的温升分布,可以看到,理论曲线与实验结果大体一致,都随距桥墩距离的增加较快增加.但理论曲线表现出单调上升的特性,并未出现如实验结果那样的两个拐点,可能原因在面扫描的结果中有所讨论.

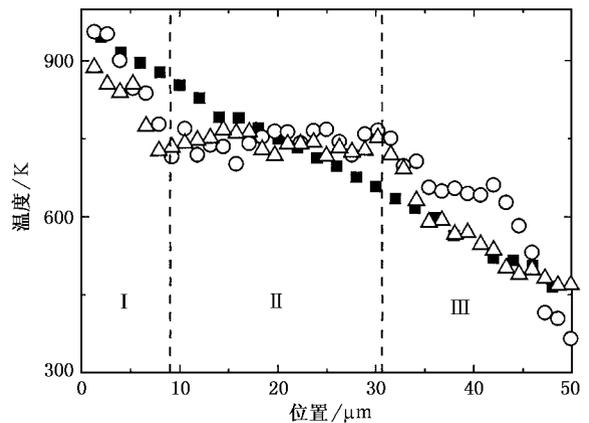


图 6 沿图 1 中 AA' 和 BB' 线段扫描测量得到的由激光加热引起的温升分布,反映这两个线段上的热导分布 ■ 为模拟计算结果,○和△分别为对左右两个桥头的实验测量结果

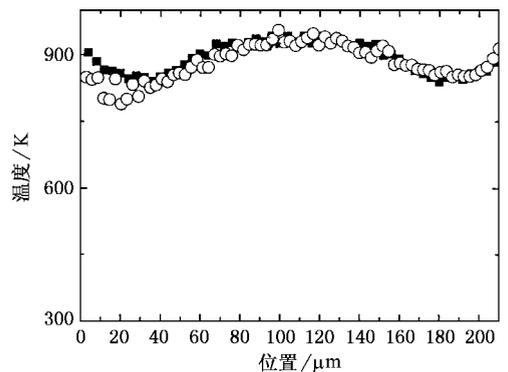


图 7 沿图 1 中 CC' 线段扫描测量得到的由激光加热引起的温升分布,反映 Si 桥桥身横向热导分布 ■ 为模拟计算结果,○为实验测量结果

图 7 中横向桥身 CC' 线段的温升也可分成三段,中间段的温升由桥身长条形状决定,中间高两边低.两端受边界限制温升增加,温升极小值对应于

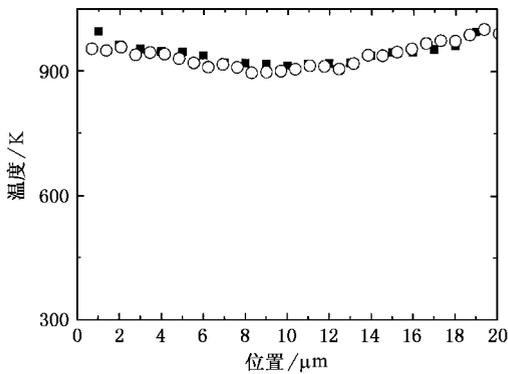


图 8 沿图 1 中 DD' 线段扫描测量得到的由激光加热引起的温升分布,反映 Si 桥桥身纵向热导分布 图注同图 7

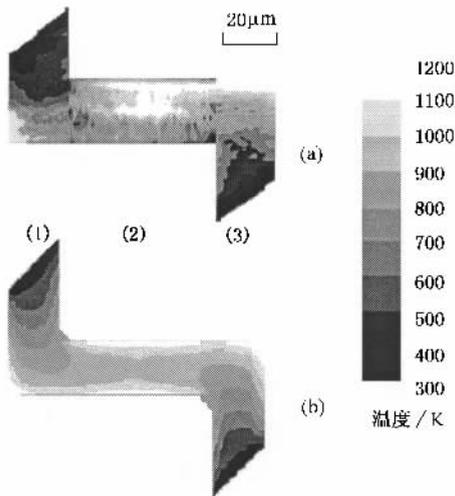


图 9 Si 桥平面热导状况分布图 (a)为对图 3 所示区域的实验测量结果 (b)为模拟计算结果

“Z”形桥体中心线的拐角处,图 8 中桥身沿 DD' 线段纵向温升呈现出中间低、两边高的特点,同样因为两侧的散热受到边界限制,在这两个图中,理论计算结果与实验测量结果表现出较好的一致性,说明在桥身的边界条件下,理论模型能够较好地反映出实际的热导状况。

图 9 示出对整个 Si 桥桥面进行扫描测量的温升分布(a)和理论模拟计算结果(b),两者所反映的大致趋势相符合,但由于理论计算采用了完全对称而均匀的结构模型,而实际 Si 桥的结构由于制备工艺过程或者材料自身特性的不均匀性,在温升分布上也反映出各种不均匀性,用显微 Raman 平面扫描得到的温升分布正是揭示了这些不均匀性。例如,对于桥身中段的区域(2),上半部分温升高于下半部

分,且在中间部分的温升很高,接近边缘处的极大值,说明这部分的热导比设计的要差。对于桥头区域(1)和(3),右桥头的温升总体大于左桥头,随距连接体 Si 边界距离的增加,右桥头的温升上升得越快。这反映了左桥头与体 Si 之间的热传导比右桥头好,说明右桥头与体 Si 在结构上存在不利于导热的特征。此外,桥头的温升由 300K 直至 1200K,但并非如理论预计那样线性变化而是在中间约 1/3 区域的只有 500—700K 变化,相当于图 6 中线扫描结果的平台区域。这一现象的可能原因是桥边界与体 Si 间的热传导并非如设想的那样好,可以将边界处设为 $T = 300\text{K}$ 。当光斑完全落在悬空的桥面上时,温度迅速升高,此时边界处温度 T 的等价值高于 300K,且随加热温度不同该值也不同。

综上所述,对 Si 桥整体平面扫描得到的热分布在反映与理论模拟结果相一致的大致趋势的同时也揭示了实际桥体中局部区域的热导起伏,这种起伏与桥体结构密切相关,其原因可能是桥体制备过程中形成的腐蚀厚度不均匀、形状偏差和注入掺杂不均匀等因素,这种不均匀性正是器件实际状况的客观反映。因此通过显微 Raman 实验对 Si 桥热导状况的测量可以检测器件的制备状况,了解其具体参数,为器件优化设计和改进制备工艺提供相关信息。

4. 结 论

本文用显微 Raman 方法研究了 Si 桥在高功率激光辐照下不同位置的温升分布,即热导特性,线扫描测得的温升分布提供了沿 Si 桥某一特殊方向上热导特性的大致变化,而面扫描的结果则全面地反映出 Si 桥整体上的热导特性分布。对 Si 桥的温升分布用 ANSYS 热分析软件进行了模拟计算,与实验结果相比,两者反映的热导趋势基本相同,都体现出桥头温升低,桥上温升高,远离边缘处温升低,接近边缘处温升高;“Z”形拐角的外边缘处温升尤其高等与桥体结构密切相关的热导特性,说明利用该软件能够较好地描述 Si 桥热导分布的大致趋势。同时实验结果揭示了实际被测 Si 桥热导特性的不对称性和局域处的精细分布状况。这种显微 Raman 平面扫描测量 Si 桥热导特性的方法对于了解实际器件的热参数,揭示其结构的不均匀性提供了有力的手段,对于评价器件特性、优化器件设计和改进制备工艺具有重要意义。

- [1] Daehler M 1987 *Proc. SPIE* **765** 94
- [2] Burriesci L 1987 *Proc. SPIE* **765** 112
- [3] Hester J L 1988 *Proc. SPIE* **940** 150
- [4] Stauffer D R and Cole B E 1991 *Opt. Eng.* **30** 1664
- [5] Cardona M 1983 *Light Scattering in Solids* (Beijing : Science Press) p188 [卡多纳 1983 固体中的光散射 (北京 科学出版社) 第 188 页]
- [6] Cai W Y 2001 *Thesis for Master Degree* Shanghai Institute of Technical Physics , Chinese Academy of Sciences (in Chinese) [蔡伟颖 2001 硕士学位论文 (中国科学院上海技术物理研究所)]
- [7] Cerdeira F , Fjeldly T A and Cardona M 1974 *Phys. Rev.* B **8** 4734
- [8] Balkanski M , Wallis R F and Haro E 1983 *Phys. Rev.* B **28** 1928
- [9] Hart T R , Aggarwal R T and Lax B 1970 *Phys. Rev.* B **1** 638
- [10] Compaan A and Trodahl H J 1984 *Phys. Rev.* B **29** 793
- [11] Temple P A and Hathaway C E 1973 *Phys. Rev.* B **7** 3685
- [12] Liang K M 1978 *Mathematical Physics Method* (Beijing : Higher Education Press) p161 (in Chinese) [梁昆森 1978 数学物理方法 (北京 : 高等教育出版社) 第 161 页]
- [13] ANSYS/Mechanical , ANSYS Inc.
- [14] Madelung O 1991 *Semiconductors : Group IV Elements and III-V Compounds* (Berlin : Springer-Verlag) p11
- [15] Neuberger M and Welles S J 1969 *Silicon* (Culver City : Hughes Aircraft Company)

Heat conduction investigations of the Si bridge in infrared emitter using micro-Raman scattering^{*}

Cai Wei-Ying Li Zhi-Feng Lu Wei Li Shou-Rong Liang Ping-Zhi

(State Key Laboratory for Infrared Physics , Shanghai Institute of Technical Physics ,
Chinese Academy of Sciences , Shanghai 200083 , China)

(Received 24 January 2003 ; revised manuscript received 5 March 2003)

Abstract

Micro-Raman scattering has been used to study the characteristics of heat conduction on heavy boron-doped Si bridge in an infrared emitter. Based on the proper spectral modeling and the temperature dependence of the position of the Raman peak , the bridge temperature rise due to the heating of high power laser is obtained. Using this method and in the way of point by point , the direct imaging of heat conduction as a distribution map of temperature rise has been also obtained. Compared with the simulated temperature distribution obtained by the finite element software , the experimental and theoretical results are in agreement with each other. While experiments have revealed the local fluctuations of heat conduction in detail , reflecting the nonuniformity of the actual device , and providing experimental bases for the micro-device optimization of the structure design and its fabrication.

Keywords : Raman scattering , Si bridge , temperature distribution , heat conduction

PACC : 7830 ; 4410

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60244002 and 10234040).