

用扫描热显微镜测量亚微米尺度的 局域热参数分布

谢志刚¹ 韩 立¹ 董占民¹ 王秀凤¹ 陈皓明¹ 顾毓沁² 晋宏师²

(1 清华大学物理系固体物理研究所, 北京 100084)

(2 清华大学机械系热物理教研室, 北京 100084)

摘要: 从集总参数模型出发, 分析了热敏电阻型热探针的热传导机制和热物性测量机理, 说明了扫描热探针的信号与样品表面温度, 样品与探针间的热阻以及样品热导率等因素有关。在不同的工作条件下, 可以进行表面的温度分布和局域热导分布等热参数的测量。把扫描热显微镜用于半导体激光器结区温度分布和室温下热桥样品的实际测量, 得到的热象图提供了亚微米尺度的热参数信息。

关键词: 扫描热显微镜; 热参数; 热桥; 半导体激光器

PACC: 6116D; 6820; 4255P; 4260D; 0720; 0720D; 0720; 4450; 7230; 7230R

中图分类号: TN 305. 94 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2000)06-0620-05

Sub-Microscale Temperature Distributions Measured by Scanning Thermal Microscopy^{*}

XIE Zhi-gang¹, HAN Li¹, DONG Zhan-min¹, WANG Xiu-feng¹,
CHEN Hao-ming¹, GU Yu-qin² and JIN Hong-shi²

(1 Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(2 Department of Machinery, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Received 23 March 1999, revised manuscript received 8 November 1999

Abstract: On the basis of thermal resistance network model, the heat conduction mechanism of a resistive-type thermal probe is analyzed. It is demonstrated that not only the temperature distribution, but also the thermal conductivity of the sample surface can be mapped in a passive mode. Thermal bridge and semicon-

* 国家自然科学基金资助(批准号: 59776031)项目[Project Supported by National Natural Science Foundation of China Under Grant No. 59776031].

XIE Zhi-gang(谢志刚), male, born in 1973 in Ningbo, Zhejiang Province, China. He graduated with 2 BS degrees (Physics, Electrical and Computer Engineering) in Department of Applied Physics in July 1996 and graduated with a MS degree in Department of Applied Physics, major in Condensed Matter Physics, Tsinghua University in June 1999. Now He is a Ph. D Candidate in University of Wisconsin, Madison, USA.

1999-03-23 收到, 1999-11-08 定稿

ductor laser are investigated by combining both STM and AFM.

Key words: Scanning Thermal Microscope; thermal parameter; thermal bridge; semiconductor laser

PACC: 6110D; 6820; 4255P; 4260; 0720D; 0720; 4450; 7230; 7230R

Article ID: 0253-4177(2000)06-0620-05

1 引言

自 1982 年 STM 发明以来, 扫描探针显微镜(SPM)形成了一个家族。它们的测量原理相近, 但是探针对样品表面的作用机制各不相同。扫描热显微镜(SThM)是其中的一个新成员。它是在原子力显微镜(AFM)的探针针尖上利用微加工技术制作测温元件, 通过针尖和样品之间的热交换来测量表面的温度和热物性分布。AFM 具有极高的空间分辨率, 因此在此基础上发展起来的 SThM 可望突破传统测温元件的局限, 实现亚微米(submicron)尺度的测温, 从而使其具有很强的应用前景: 测量光电子器件表面(如量子阱激光器结区)温度分布, 测量材料局域热性质等^[1,2]。

热探针是 SThM 的关键器件, 有两种主要类型: 热敏电阻型和热电偶型^[3-7]。作为复合型探针, 其本身工作在 AFM 的恒力模式下, 在对样品表面扫描获得表面形貌图的同时, 也记录下了测温元件上得到的热信息。对利用热电偶测温研究较系统的是美国加州大学 Berkeley 分校的 Majumdar^[8]。热电偶探针有热惯量小、测量稳定的特点, 具有测量原理上的优越性。但是制作上的困难^[8], 给其商业化造成了一定的阻力。热敏电阻探针就是在商用 AFM 针尖上利用微电子技术制作一段电阻温度系数显著的合金膜, 作为热敏电阻。其本身作为惠斯顿电桥的一个桥臂。在测量前, 调节电桥平衡, 这时两端的失衡电压为零。在样品表面扫描时, 由于样品和针尖有一定的温度差, 存在热交换, 使针尖上热电阻值升高或降低, 从而有一或正或负的失衡电压。把这个信号记录下来, 就实现了扫描热成像。

2 热敏电阻探针型 SThM 的测量原理

要实现热测量, 首先要使针尖和样品具有一定的温度差。测得的热信号反映了测温元件(热敏电阻)的温度。一般情况下, 如探针处于热稳定状态, 影响针尖温度的因素既有表面温度分布, 又有针尖和样品之间的热阻(详细的分析参见本文第 4 部分)。这实际上反映了热探针的两种测量用途。在测温方式下, 热源在探测区域附近(诸如半导体激光器结区), 可理想地认为探针与表面接触后与表面温度保持一致且不改变表面温度分布; 在热参数测量方式下, 样品保持在室温, 这时测得的热信号是针尖和样品之间的热阻的反映。而针尖和样品之间的热阻包括两部分: 针尖与表面之间的热阻(与针尖形状、表面形貌有关), 表面与样品内部之间的热阻(与材料热导率有关)。在保持样品表面平整(消除形貌影响)的条件下, 可实现局域热导分布的测量。一般情况下, 表面的形貌将对测量结果产生一定的影响。

现在常见 AFM 均采用光杠杆放大针尖上的微小位移。有一束直径约 $10\mu\text{m}$ 的激光束照在三角形横梁的前端, 这束功率约为 5mW 的激光束造成了针尖上的温度升高, 在针尖和样品表面形成了热测量所需的温度差。按理论计算和现有文献报道^[9], 针尖与环境可能有如下的几种热交换方式: 激光对针尖的加热作用(包括电流的加热作用); 针尖通过横梁向基座传热; 针尖与样品之间通过直接接触热传导及通过水膜间接导热(在大气条件下, 在针尖和样品之间会吸附一层水膜)。这也说明测量结果不仅与针尖、样品有关, 还受空气湿度等因素影响。

3 对半导体激光器和热桥样品的测量结果

我们测量用的仪器是美国 DI 公司的 Dimension 3100 型 SPM, 它配置了热敏电阻型热探针, 工作于被

动方式(*passive mode*). 针尖在室温下热平衡后, 调节 $R_{\text{off}} = R_{\text{tip}}$, 也就是 $V_{\text{tip}} = V_{\text{off}}$, 使电桥维持平衡. 激光束照射下, 针尖升温约 60 度(通过热敏电阻的恒定电流通常为 0.4—0.5mA, 对针尖也有加热作用), $V_{\text{tip}} \neq V_{\text{off}}$, 调节差分放大器的增益, 使每次测量前电路有相同的输出. 当针尖与表面接触后, 针尖温度发生变化, 惠斯通电桥的失衡电压与热敏电阻的温度变化成正比, 经差分放大器放大, 然后图象化.

我们选择热桥桥臂上的一段作为样品, 观察形貌对 SThM 表面测量的影响. 热桥的表面分布着许多非晶态硅的岛状突起. 样品放在室温条件下, 在接触模式(*contact mode*) AFM 获得形貌相的同时, 也得到了热象图, 见图 1. 比较形貌图和热象图可知, 两者有明显的对应关系, 这是因为在形貌突起处, 针尖和样品之间的热阻大(接触面积小, 接触点向样品内部传热相对也较慢), 针尖温度较高; 而在形貌波谷处, 针尖和样品之间的热阻小, 针尖温度相应较低. 对比形貌图和热象图, 可以发现它们又不完全一致: 在形貌图上是岛状突起, 而在热象图上是一个平台. 这与薄膜的生长方式有关, 每个硅岛都是一个晶粒, 其内部传热较快, 而晶粒之间传热相对较慢. 故而在同一个硅岛内部, 热针尖感受到的温度是一致的.

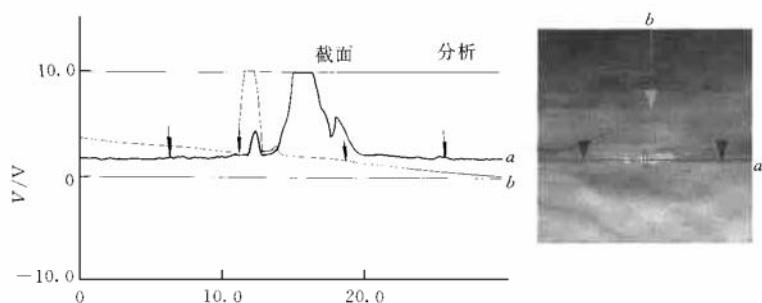


图 1 热桥表面的形貌图(左图)和热象图(右图)

FIG. 1 Topography Image (left) and Thermal Image (right) on Thermal Bridge Surface

图 2 是对半导体激光器结区的测量结果. 这是一种端面发射型半导体激光器. 作热探测时激光器的注入电流为 33mA. 探针的扫描区域为 $30\mu\text{m} \times 7.5\mu\text{m}$. 形貌图上显示了制造工艺中因解理产生的条纹, 而 p-n 结的层状结构垂直于这些条纹. 在激光器的有源区附近出现了两个强度不同的峰值, 空间距离为 $2\mu\text{m}$. 小峰的半高宽为 $0.6\mu\text{m}$, 这说明了 SThM 具有亚微米级的空间分辨率. 从热象图的截面图(图 3)可得大峰热

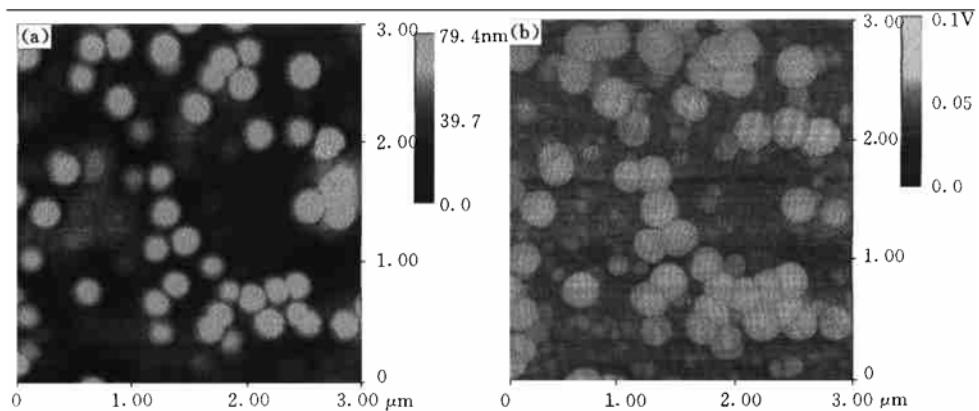


图 2 半导体结区的形貌图(左图)和热象图(右图)

FIG. 2 Topography Image (left) and Thermal Image (right) of P-N Junction of Semiconductor Laser Diode

信号的幅值为 8V, 根据放大器的放大倍数(6V 对应 50—60°C)估算其温度为 100°C. 同一实验条件下通过标定热探针可得出精确的温度数值. 图 3 截面 a 显示了平行于层状结构方向的温度分布. 如前所述, 有源区左方的形貌突起在热象图上显示为热点. 图 3 截面 b 显示了垂直于层状结构方向的温度分布. 靠近衬底区域温度较低, 而靠近有源区区域温度较高. 热峰在形貌图上对应处显示突起, 这不是真实形貌(减小激光器工作电流突变变小, 以至消失), 是由热膨胀和光压力产生的.

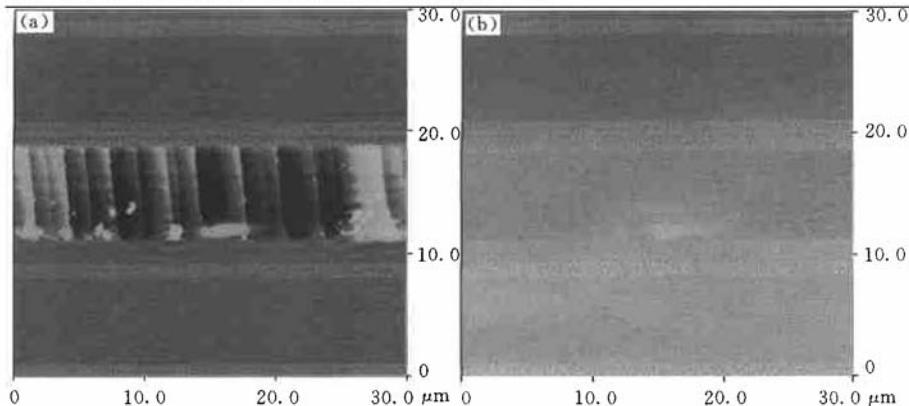


图 3 半导体结区热象图的剖面图截面 a 显示了平行于层状结构方向的温度分布.

截面 b 显示了垂直于层状结构方向的温度分布.

FIG. 3 Section of Thermal Image in Junction Area of Laser Diode.

The profile (a) shows temperature distribution paralleling the layer structures.

The profile (b) shows the temperature distribution along the vertical line of the layer structures.

4 对实验结果的解释

为了可以定量描述扫描热探针显微镜, 下面将利用集总参数对其测温机理作一个简单但有效的说明. 当针尖未与样品接触时, 这时只有激光和电流加热 Q_0 , 有热平衡方程:

$$Q_0 + \frac{1}{R_c}(T_0 - T_i) = 0, \quad T_i - T_0 = Q_0 R_c \quad (1)$$

一旦针尖与样品表面接触时, 针尖和样品表面之间的热交换导致测温元件(处在针尖位置)温度的显著降低, 这时的热平衡方程式:

$$Q_0 + \frac{1}{R_c}(T_0 - T'_i) + \frac{1}{R_t}(T_s - T'_i) = 0, \quad T'_i - T_0 = \frac{R_c}{R_c + R_t}(T_s - T_0) + Q_0 \frac{R_c R_t}{R_c + R_t} \quad (2)$$

在以上的公式中 Q_0 代表激光(AFM 测量用)及电流(惠斯顿电桥桥臂电流)加热热量(其中激光加热效应远大于电流加热效应). T_0, T_s 分别是探针基座和样品表面的温度, T_i, T'_i 是针尖接触样品表面前后的温度. R_c 是热敏元件到探针基座(通过悬梁 cantilever)的热阻. R_t 是热敏元件(在探针 tip 上)到样品的热阻. 在这些量中, R_c, Q_0, T_0 (与室温相同)是确定的量, R_t 和 T_s 才是 SThM 所关心的物理量. R_c 可根据探针悬梁的热导率和几何尺寸计算, 其量级为 105°C/W. R_t 的计算比较复杂, 文献[8]提供了计算的模型和数据, 其数值为 10^3 — 10^4 °C/W. 由此可知: R_c 远大于 R_t , 探针温度基本上和样品温度保持一致, 这一点也在实验中得到了证实. 如前所述, 对 R_t 的贡献有两部分: 针尖到接触表面热阻, 接触表面到样品内部热阻. 在一定的条件下, 可进行表面热导(其对热信号的影响通过 R_t 反映出来)分布的测量. 但由于影响探针和样品之间热传导比较复杂, 目前只能得到热导的相对分布, 还不能实现热导的绝对测量得出具体的数值.

5 结论

SThM 是一项崭新的技术, 国内尚无系统研究。它能以较高的空间分辨率实现二维温度分布和热物性分布的测量, 有较强的应用前景(诸如集成电路失效研究)。

参 考 文 献

- [1] 冯士维, 谢雪松, 吕长志, 等, 半导体学报, 1999, **20**: 358—364[FENG Shiwei, XIE Xuesong, LU Changzhi *et al.*, Chinese Journal of Semiconductor, 1999, **20**: 358—364(in Chinese)].
- [2] 董占民, Konahb B. C., 谢志刚, 半导体学报, 1999, **20**: 823—826[DONG Zha-min, Kopan V. S. and XIE Zhigang, Chinese Journal of Semiconductor, 1999, **20**: 823—826(in Chinese)].
- [3] A. Hammiche, H. M. Pollock, M. Song and D. J. Hourston, Meas. Sci. Technol., 1996, **7**: 142—150.
- [4] A. Hammiche, D. J. Hourston, H. M. Pollock, M. Reading and M. Song, J. Vac. Sci. Technol. B, 1986, **14**(2): 1486.
- [5] M. Stopka, L. Hadjiiski, E. Oesterschulze and R. Kassing, J. Vac. Sci. Technol. B, 1995, **13**(6): 2153.
- [6] E. Oesterschulze, M. Stopka, L. Ackermann, W. Scholz and S. Werner J. Vac. Sci. Technol. B, 1996, **14**(2): 832.
- [7] E. Oesterschulze and M. Stopka, J. Vac. Sci. Technol. A, 1996, **14**(3): 1172.
- [8] K. Luo, Z. Shi, J. Lai and A. Majumdar, Appl. Phys. Lett., 1996, **68**(3): 325.
- [9] K. Luo, Z. Shi, J. Varesi and A. Majumdar, J. Vac. Sci. Technol. B, 1997, **15**(2): 349.