

微梁传感器弹性模量的测试*

张天林¹, 郭哲颖¹, 张青川¹, 张泰华², 何世平¹

(1. 中国科学技术大学力学和机械工程系, 安徽合肥 230027; 2. 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100080)

摘要:利用一种静态和两种动态的检测技术,对红外辐射探测微悬臂梁式传感器材料的弹性模量进行了测试研究.在静态检测实验中,利用纳米硬度计直接测出传感器材料的弹性模量;在动态实验中,分别利用谱平面光学滤波法和多普勒测振仪得到微悬臂梁传感器结构的固有频率,再结合数值模拟计算出传感器的等效弹性模量.通过几种检测结果的分析比较,获得了更加精确的微梁传感器单元的弹性模量值,为微梁的优化设计和评估提供了可靠的参数.

关键词:微悬臂梁式传感器;红外探测器;弹性模量;谱面滤波;多普勒测振仪;纳米硬度计

中图分类号:O346.4 **文献标识码:**A

Measuring the mechanical properties of micro-cantilever sensors

ZHANG Tian-lin¹, GUO Zhe-ying¹, ZHANG Qing-chuan¹, ZHANG Tai-hua², HE Shi-ping¹

(1. Department of the Modern Mechanics, USTC, Hefei 230027, China;

2. State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080, China)

Abstract: The elastic modulus of infrared detective micro-cantilever sensors was measured by three different methods—one static and two dynamic measurements. The modulus of the sensor was measured directly by nano-indenter in the static measurement. In the dynamic measurement, the nature frequency of the sensor was measured firstly by optical filtering in the plane of wave spectrum and Doppler scanning vibrometer. In combination with the numerical simulation method, the equivalent elastic modulus of the sensor was calculated. More precise value was obtained in comparison with the other measurement methods tested, thus providing reliable data for the optimal design and evaluation of micro-cantilever sensors.

Key words: micro-cantilever sensor; infrared detector; elastic modulus; wave filtering in spectrum plane; Doppler vibrometer; nanoindenter

0 引言

美国加州大学伯克利分校研究了一种新型的非制冷式红外辐射探测传感装置,其敏感元件是双材料微悬臂梁阵列,利用双材料梁的热变形效应工作,采用了干涉方法来测量梁的形变,其灵敏度很高^[1].

中国科学技术大学光测力学实验室也在研究类似的探测传感装置^[2],目前已成功地实现了对室温下的物体成像.

在微悬臂梁阵列传感器敏感单元的设计中,材料的弹性模量或微结构的等效弹性模量是一个极其关键的材料参数.由于MEMS加工制作过程的特殊

* 收稿日期:2004-12-07;修回日期:2005-01-07

基金项目:国家自然科学基金(10232030)资助.

作者简介:张天林,男,1977年生,硕士生.研究方向:弹性力学. E-mail:zhangtl@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:何世平,教授. E-mail:sphe@ustc.edu.cn

性,如成膜工艺、热处理、干湿法刻蚀与微结构的释放过程等因素,使得在材料手册中给出的参数只能是一个平均值和一个范围分布.对于设计制作微梁传感器,对材料实际参数的确定有着极其重要的意义,因此,我们需要使用各种检测手段尽可能得到这些参数更精确的值.

由于这种微悬臂梁阵列传感器敏感单元的体型微小,给弹性模量的测试带来一定的难度.我们通过对三种不同检测结果的比较分析,针对具体工艺得到的微梁给出了其弹性模量更精确的参考值.

1 静态检测法

1.1 实验装置及工作原理^[3,4]

中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室所提供的纳米压痕仪由两部分组成:纳米硬度计(NHT)和原子力显微镜(AFM),另外还附有光学显微镜.纳米硬度计由一个压头和对样品进行选位以及压后观察压痕的光学显微镜组成.整个系统的载荷和压深的分辨率分别在 μN 和 nm 量级.其工作原理如图 1 所示,采用的是深度敏感压痕法(depth-sensing indentation).这种压痕法假设试样为各向同性材料;几何尺寸远大于压痕深度,表面为无摩擦的平面;不存在与时间相关的变形,即无蠕变和粘弹性;接触深度总是小于压入深度;并定义接触刚度为

$$S = \left(\frac{dP}{dh} \right)_{h=h_{\max}} \quad (1)$$

其中, $P = \alpha h^m$, $h_c = h - \epsilon \frac{P_{\max}}{S}$, 这里 α, m 与 ϵ 均为常数,其大小与压头形状有关; h 与 h_c 分别为压头压入薄膜的整体高度与压头和薄膜的有效接触高度.

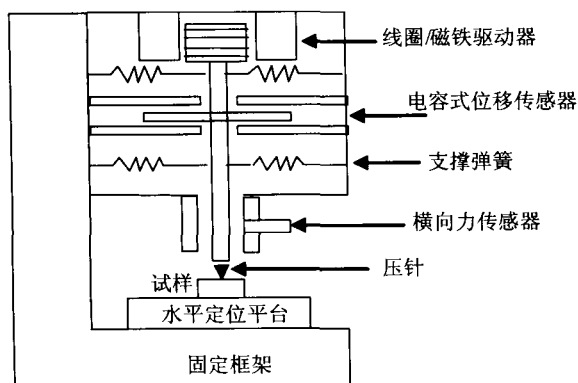


图 1 纳米硬度计工作原理示意图

Fig. 1 Sketch map of the principle of the NHT

接触面积为

$$A = 24.56h_c^2 + \sum_{i=0}^7 C_i h_c^{1.2^i} \quad (2)$$

折合模量为

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i} \quad (3)$$

其中,模量 $E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2\beta} \frac{S}{\sqrt{A}}$, E_i 为压头的模量.

1.2 实验样品

样品委托北京微电子研究所制作,如图 2 所示,该样品是用 LPCVD 方法在约 $300 \mu\text{m}$ 的硅基底上再外延生长约 $2 \mu\text{m}$ 厚的氮化硅层.

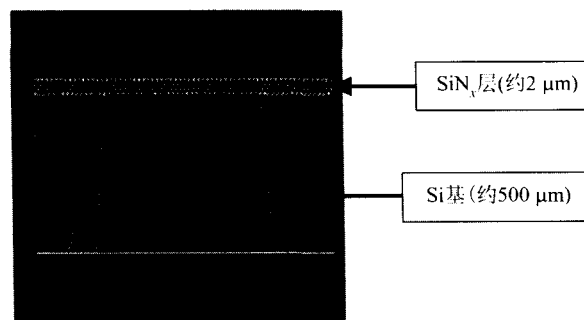


图 2 压痕实验样品的剖面图

Fig. 2 Cutaway view of the sample in indentation

1.3 测试及结果

将样品定位于纳米硬度计的压头下,通过纳米硬度计对样品加载,自动记录压痕变形数据.载荷 P 和压入深度 h 的关系如图 3 所示.从图中可以直接得到 P_{\max} ,由式(1)、(2)又可得到 S, h_c, A ,最后从式(3)中可以得到我们需要的 E_r 和 E .在本次实验中共计录了五组数据(见表 1),取其平均值以得到样品(SiN_x)的弹性模量值.

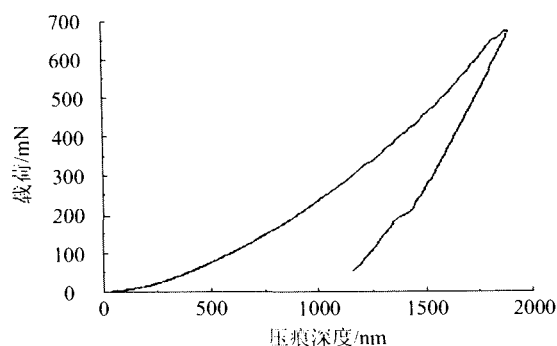


图 3 硅基体上氮化硅薄膜的加卸载曲线

Fig. 3 The load and unload curve of SiN_x

表 1 纳米压痕得到的弹性模量值

Tab. 1 The elastic modulus of silicon nitride by nano-indentation

测量点	$E_{Si_3N_4}$ /GPa	平均值 /GPa
1	206.423 2	
2	206.785 6	
3	207.921 6	208.567 22
4	208.420 8	
5	213.286 4	

2 动态检测法

2.1 动态检测原理

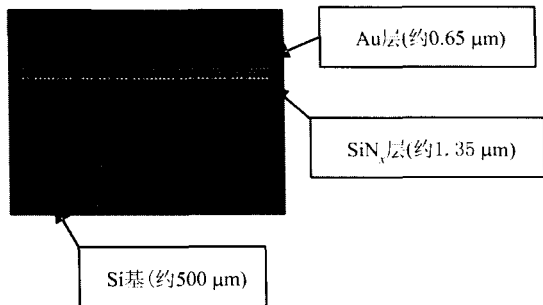
动态检测弹性模量法是一种结合实验与数值计算的混合法,操作时分两步:第一步用实验检测方法测量出梁的离面弯曲固有频率;第二步利用数值计算方法计算出相应于不同弹性模量 E_i 的系列离面弯曲固有频率 f_i . 与实验检测结果最吻合的计算值所对应的弹性模量就是所求的弹性模量.

2.2 实验样品

样品委托北京微电子研究所制作,为多种不同结构的微悬臂梁阵列传感器,这里只给出了一种作为实验检测的传感器单元的结构示意图,如图 4 (a)、(b)所示.



(a)微悬臂梁阵列单元的平面俯视图



(b)微悬臂梁阵列单元的剖视图

图 4 动态实验样品图

Fig. 4 Sample for dynamic measurement

2.3 光学滤波法

2.3.1 光学滤波法实验装置^[5]

如图 5 所示,光学读出法的实验装置类似于纹影仪.用准直光照明试件,以傅里叶变换透镜对经试件反射的光波进行傅里叶变换,在透镜的谱面内用刀口对频谱进行空间滤波(通常对零级谱).滤波时,通常将边框、支撑臂等无效部位的频谱挡去,仅对吸收板的零级谱进行滤波.再利用成像透镜将悬臂梁成像到像平面内,并使光电探测器通过带孔光屏对某一个吸收板的像强度进行实时探测.当微悬臂梁发生微小转动时,吸收板在谱面上的频谱位置将发生微小偏移,透过滤波孔的光强发生相应的变化,进而影响悬臂梁像的亮度,而被光电探测器所探测.光电探测器测得的亮度变化,直接反映了吸收板的转角变化,从而测量了悬臂梁的离面转动.当悬臂梁处于振动状态时,利用该装置将这种振动状态用电信号描述,进而就能获得梁的固有频率.

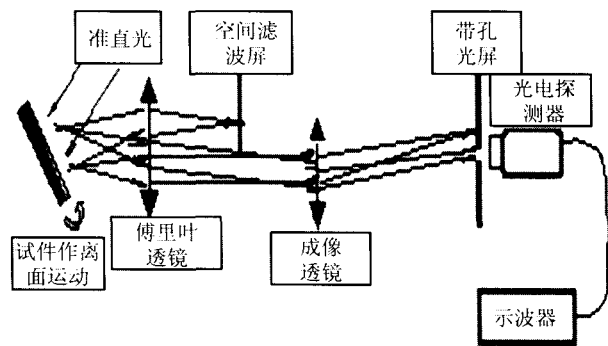


图 5 光学滤波读出装置示意图

Fig. 5 The sketch map of optical filtering method

因为微悬臂梁尺寸很小,为了测量单个微梁的动态响应,在光路调整时尽量放大反光板的像,并仅让某一个像(大小为 $1 \sim 2 \text{ mm}^2$)通过带孔光屏,落到光电探测器的光敏感区上.在实验中,采用波长为 532 nm 的氩激光光源准直照明,并用自制的光电探测电路作光电转换和前级放大.

试件的激振是通过对紧贴在试件上的压电陶瓷片施加相应的电压信号实现的,光电探测器可以实时检测到对应激励的响应信号并转化为电信号,将输出的电信号经滤波和放大后,可以送入示波器进行实时显示.

2.3.2 光学滤波法实验及结果

启动装置,这里首先采用 $0 \sim 20 \text{ kHz}$ 正弦信号进行扫频激励以找到共振频率,然后将激励信号定

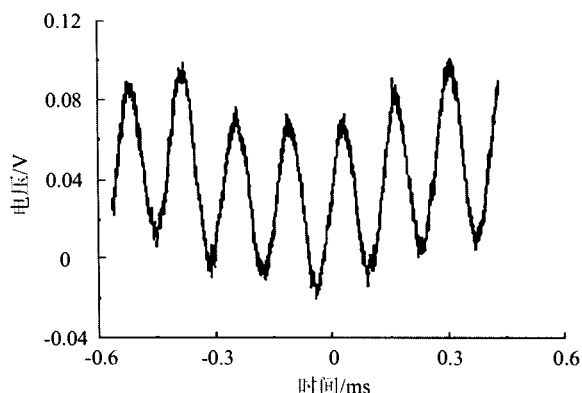


图 6 微悬臂梁传感器单元的响应波形图

Fig. 6 The response wavelshape of the micro-cantilever

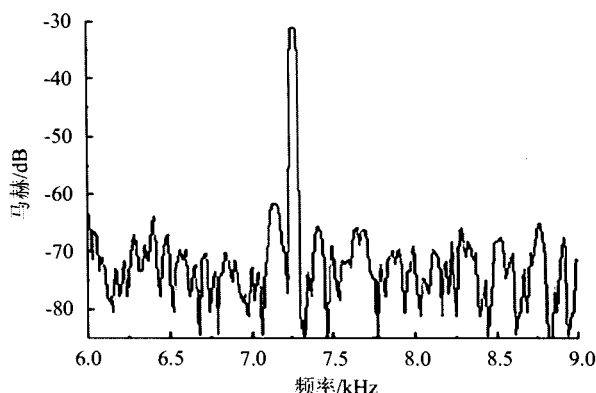


图 7 微悬臂梁传感器单元的响应频谱图

Fig. 7 The response spectrum of the micro-cantilever

频在共振频率上,得到的典型响应如图 6、图 7 所示.不难看出该共振频率即为我们要找的微悬臂梁离面弯曲的一阶固有频率.我们共测量了 8 个不同的单元的峰值频率,如表 2 所示.

表 2 8 个单元的响应峰值频率

Tab. 2 The response frequencies of 8 different cantilevers

测量单元	固有频率/kHz	平均值/kHz
1	7.250	
2	7.203	
3	7.079	
4	7.200	7.045
5	6.830	
6	6.550	
7	6.820	
8	6.800	

2.4 多普勒测量

2.4.1 实验装置及测量原理^[6]

激光多普勒测振仪(PSV400 scanning vibrometer)的工作原理如图 8 所示.氦氖激光器输出的激光经分光镜 BS1 分为两束光,其透射光通过 BS2,并由光学镜头聚焦在试件表面上.当试件振动时,试件的散射光将产生相应的多普勒频移,试件的后向散射光再经过光学镜头汇聚,并经过 BS2 分光到达 BS3,与另一束由 BS1 分出来的光束相互干涉.探测系统根据检测到的外差信号,给出振动频率,并由峰值响应频率确定出试件的固有频率.

2.4.2 实验及结果

调节激光多普勒测振仪的激光头,使激光聚焦光斑直径最小的部位(约几十微米)投射到待测的微悬臂梁传感器上.

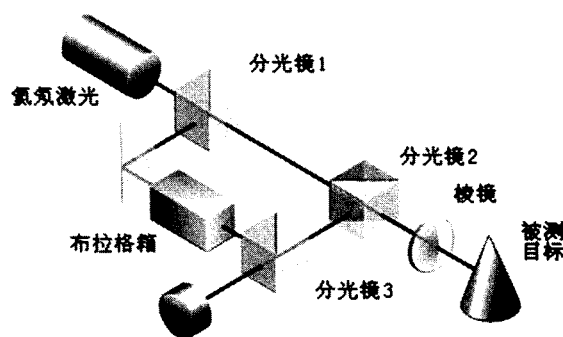


图 8 标准光学测振仪的光学原理图

Fig. 8 Optical layout of the standard optic vibrometer

试件的激振是通过多普勒测振仪的功能箱输出的扫频激励信号并结合多媒体有源音箱输出音频信号来实现的.

启动装置,并自动记录实验数据,如表 3 所示.

表 3 6 个单元的响应峰值频率

Tab. 3 The response frequencies of 6 different cantilevers

测量单元	固有频率/kHz	平均值/kHz
1	6.58	
2	7.22	
3	7.05	6.973
4	6.68	
5	6.45	
6	7.86	

图 9 是由多普勒测振仪测得的一组典型的频谱图.

2.5 弹性模量计算

双材料微悬臂梁传感器阵列中一个单元的外框

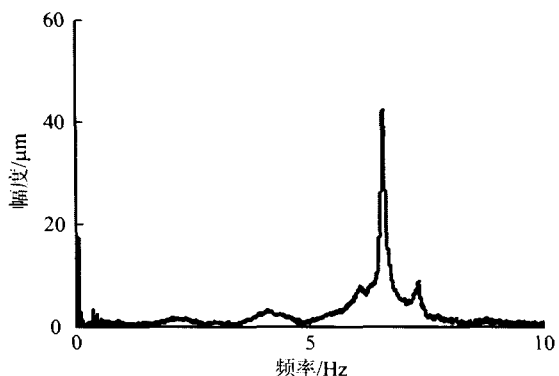


图 9 多普勒测振仪得到的频谱响应图
Fig. 9 The response spectrum measured by Doppler vibrometer

近似为矩形,其尺寸为 $95\ \mu\text{m} \times 130\ \mu\text{m}$;吸收板尺寸为 $95\ \mu\text{m} \times 56\ \mu\text{m}$;支撑臂宽为 $3\ \mu\text{m}$;单元板厚为 $2\ \mu\text{m}$.双材料梁的上层为金,厚为 $0.65\ \mu\text{m}$,金的弹性模量为 $73\ \text{GPa}$,密度为 $19.3 \times 10^3\ \text{kg/m}^3$,泊松比为 0.42 .双材料梁的下层为氮化硅,厚为 $1.35\ \mu\text{m}$,其密度为 $2\ 400\ \text{kg/m}^3$,泊松比为 0.25 .

有限元网格划分采用 20 节点六面体单元(solid 95),网格划分情况见图 10.运用 ANSYS 模态分析软件对该敏感单元进行模态分析,给出与不同氮化硅弹性模量对应的几个低阶固有振型及其固有频率.计算结果表明,一阶离面弯曲固有频率是最低频率.建模时未考虑微尺度效应以及空气阻尼等.

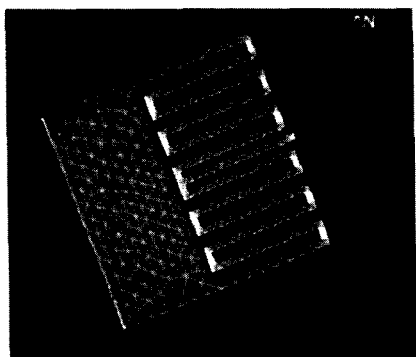


图 10 双材料微梁的计算模型
Fig. 10 Calculation model of the cantilever

计算中,氮化硅弹性模量 E_l 的提供是根据文献调研的结果,以 $180\ \text{GPa}$ 为参考值进行改变的.有限元数值计算出的一阶离面弯曲固有频率及与实验结果的比较见表 4.图 11 是弹性模量为 $210\ \text{GPa}$ 时,计算得到的一阶离面弯曲固有振型.

表 4 计算与实验结果

Tab. 4 The results of the experiments and analogy calculation

弹性模量/GPa	数值计算值/kHz	光学滤波法/kHz	多普勒法/kHz
180	6.710		
200	6.915		
205	6.965		
210	7.014	7.045	6.973
215	7.062		
220	7.110		

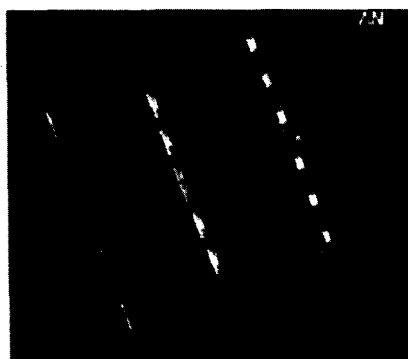


图 11 双材料微梁的一阶固有振型
Fig. 11 The first model shape of the cantilever

根据表 4 的数据,用多项式对数值计算结果进行曲线拟合,得到如图 12 所示的弹性模量 E 与一阶离面弯曲固有频率 f 的关系曲线图,并得到二者的关系式

$$f = 0.01E + 4.9109 \quad (4)$$

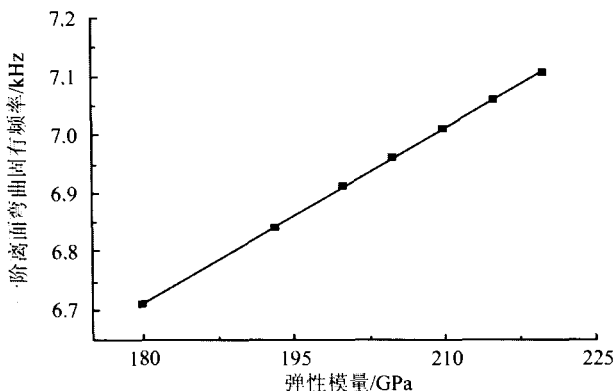


图 12 弹性模量 E 与一阶离面弯曲固有频率 f 的关系曲线

Fig. 12 The relationship between modulus and nature frequency

由式(4),光学滤波法检测得到的氮化硅的弹性模量值为 213.41 GPa 和多普勒测振法检测得到的氮化硅的弹性模量值为 206.24 GPa.

3 结论

三种不同检测方法的测量结果吻合得非常好,可见这几种实验检测技术可以用于微悬臂梁结构弹性模量的检测.这些检测结果对这种微悬臂梁式敏感单元的结构设计和性能评估有重要的参考意义.

由于微悬臂梁传感器单元非常微小,给实验检测带来很大难度,其检测结果也必然存在着各种实验误差.静态测量能直接获得材料的弹性模量,但属于接触式的检测技术,不适于特别硬脆性材料,检测结果也分散.动态检测技术属于无接触式测量方法,适用范围广,但该方法不能直接给出材料的力学性能参数,还需要与数值计算方法相结合,这不仅增加了工作量,而且增加了比较多的误差源.同时,从实验数据来看,数据的分散性较大,这说明由于工艺影响导致梁的结构尺寸弥散,因此尺寸的影响不能不考虑.因此,我们的工作还有待进一步的改进和完善.

致谢:感谢中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室所提供的帮助.

参考文献 (References)

- [1] ZHAO Yang, MAO Min-yao, Roberto Horowitz, et al. Optomechanical uncooled infrared imaging system: design, microfabrication, and performance[J]. J. of Microelectromechanical Systems, 2002, 11(2): 136-146.
- [2] DUAN Zhi-hui, ZHANG Qing-chuan, WU Xiao-ping, et al. Uncooled optically readable bimaterial microcantilever infrared imaging device[J]. Chinese Physics Letter, 2003, 20(12): 2 130-2 132.
- [3] DING Jian-ning, MENG Yong-gang, WEN Shi-zhu. Young's modulus of polysilicon microcantilever beams by deflection using nanoindentation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2001, 22(2): 186-189.
丁建宁,孟永钢,温诗铸.纳米硬度计研究多晶硅微悬臂梁的弹性模量[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(2): 186-189.
- [4] ZHANG Tai-hua, YANG Ye-min, ZHAO Ya-fu, et al. The methods of measurement of mechanical properties for MEMS materials [J]. Journal of Mechanical Evolvement, 2002, 32(4): 545-562.
张泰华,杨业敏,赵亚溥,等. MEMS 材料力学性能的测试技术[J]. 力学进展, 2002, 32(4): 545-562.
- [5] PENG Chong, ZHANG Pei-qiang, ZHANG Qin-chuan. Measurement of dynamic properties of sensitive elements in uncooled IR imaging systems[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2006, 36(4): 391-397.
彭冲,张培强,张青川.非制冷式红外热像仪敏感单元动态特性的测试[J]. 中国科学技术大学学报, 2006, 36(4): 391-397.
- [6] SUN Yu-sheng. The Technology and Applying of Laser Doppler Measurement[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technologic Document Publication, 1995: 206-213.
孙渝生.激光多普勒测量技术及其应用[M].上海:上海科学技术文献出版社, 1995: 206-213.