

# 光激励微硅梁谐振机理研究\*

顾利忠

(清华大学自动化系 北京 100084)

**提要** 用实验的方法研究了微硅梁在光激励下产生谐振的机理,解释了微硅梁在光激励下的谐振是由于光-热-机能量转化的结果。

**关键词** 光激励,微硅梁,谐振器

## 1 引 言

本世纪 80 年代,科学家把微电子器件生产中的蚀刻硅技术用来制造微机械元件。微硅梁(悬臂梁和固支梁)为最早出现的微机械元件之一<sup>[1]</sup>。微硅梁在调制激光的激励下能产生谐振,其谐振频率与梁的尺寸有关。利用某些环境参数(如温度、压力等)对梁的尺寸或应力产生敏感,可以做成光激励微硅梁谐振传感器<sup>[2]</sup>。这种传感器具有极高的灵敏度和本质上安全防爆的特点。本文通过微硅梁在单向光激励、双向差步光激励和双向同步光激励下不同振荡特性的实验结果,用光压、光热、热穿透、热应变等理论分析了微硅梁在光激励时由光能至机械能的转化过程,从而解释了微硅梁在光激励下产生谐振的机理。

## 2 光激励微硅梁谐振器实验系统

光激励微硅梁谐振器实验系统如图 1 所示。

实验中的微硅梁为蚀刻而成的二氧化硅悬臂梁,长、宽、厚为  $1800\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m} \times 1.5\ \mu\text{m}$ ,其固有频率为  $1.41\ \text{kHz}$ (理论计算)。一侧长宽面镀  $0.1\ \mu\text{m}$  厚的金,称之为正面侧;另一侧无镀层,称之为反面侧。

He-Ne 激光器(功率为  $5\ \text{mW}$ )用作微硅梁振动的激励光源,该光源发出的光经半透半反镜  $B_1$  后被分成两束,一束(透射光)经光调制盘调制并由透镜  $T_2$  聚焦后垂直入射到微硅梁正面侧靠底部处;另一束(反射光)经反光镜  $F_1$  反射后经同一个光调制盘调制,再经反光镜  $F_2$  和  $F_3$  反射,并由透镜  $T_1$  聚焦后垂直入射到微

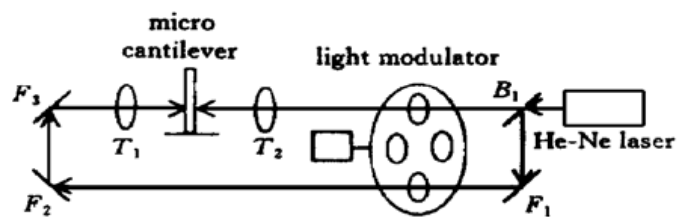


图 1 光激励微硅梁谐振器的实验系统

Fig. 1 The experiment system of optically excited micro silicon beam resonator

\* 国家自然科学基金(6887008)资助项目。

收稿日期: 1998-11-02; 收到修改稿日期: 1998-12-01

硅梁反面侧靠底部处。正、反面两束光入射点的连线与正、反面两束光在一直线上。

光调制盘可同时将正、反面两束光调制成分占空比均为 50% 的调制光, 并通过调整反光镜  $F_1$  和  $F_2$  的位置, 使正、反面两束光的相位差分别为  $0^\circ$  和  $180^\circ$ , 以便实现双向同步和双向差步光激励实验。光调制盘为机械式, 由调速直流电机驱动。改变直流电机的转速则可以改变调制光的频率以便使微硅梁产生谐振。

由于微硅梁在光激励下的振幅很小, 只有几十到几百纳米, 实验中采用了测量微振动的激光光纤测振仪来检测微硅梁的振动。激光光纤测振仪的基本光路是改进型的 Mach-Zehnder 干涉仪。测得的信号由计算机处理并显示。

### 3 实验结果与分析

为了研究微硅梁在调制激光激励下产生振荡的机理, 探讨微硅梁在光能作用下转换成振荡机械能的过程, 分别设计了微硅梁的单向光激励、双向差步光激励和双向同步光激励三个实验。这三个实验中调制光的光波波形、等效光压作用和等效光热作用如图 2 所示。

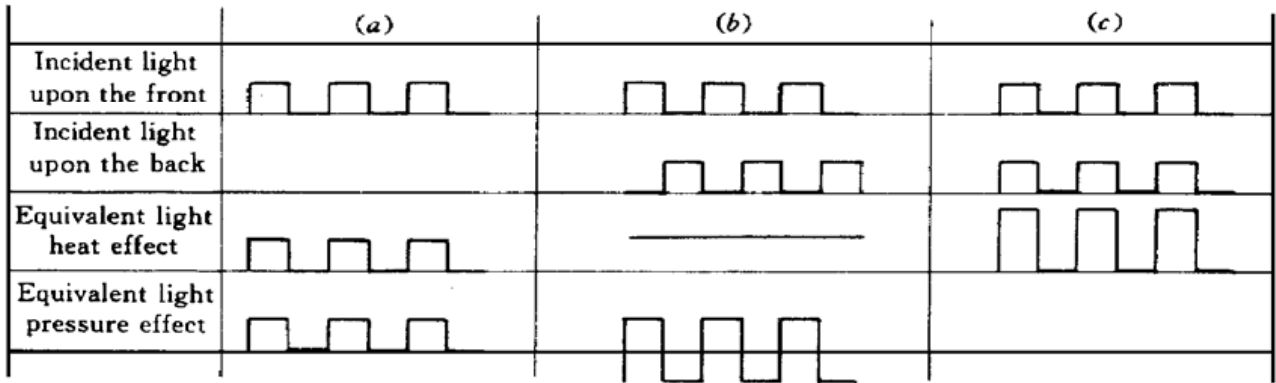


图 2 微硅梁三种光激励的光波波形及等效光压作用、等效光热作用  
(a) 单向激励时; (b) 双向差步激励时; (c) 双向同步激励时

Fig. 2 The light waveform, equivalent light pressure effect, and equivalent light heat effect of three form optical excitation for micro silicon beam

(a) excited in one direction; (b) alternatively excited in two directions; (c) synchronistically excited in two directions

#### 3.1 微硅梁单向光激励实验

单向光激励时只有一束调制激光(正面光或反面光)激励微硅梁。当调制光的频率与微硅梁的固有谐振频率一致时, 微硅梁产生谐振, 图 3 (a) 所示为正面光激励时的振荡波形。实测频率为 1.55 kHz, 与理论计算值(1.41 kHz)接近。

当调制激光入射到微硅梁表面时, 在入射点处同时产生光压效应和光热效应, 如图 2 (a) 所示。调制光的光压作用会直接产生周期性的横向策动力。虽然由光压作用产生的力很小, 然而一旦微硅梁起振后, 维持振荡的能量也是很小的; 调制光的光热作用在微硅梁入射点处因热穿透(其厚度极小)而形成周期性的热应变, 由于微硅梁和镀层之间形成的“双金属片”效应, 周期性的热应变将转化成微硅梁横向运动的策动力, 从而引起振荡。可见, 单向光激励时微硅梁的振荡是光压作用和光热作用共同引起的。但是哪一种作用为主呢?

为了单独研究微硅梁在调制激光激励下的光压效应和光热效应所产生的效果, 分别设计了微硅梁的双向差步光激励和双向同步光激励实验。双向差步光激励和双向同步光激励的光

波波形、等效光压作用和光热作用分别如图 2(b) 和图 2(c) 所示。

### 3.2 微硅梁双向差步光激励实验

双向差步激励时, 微硅梁正、反面两束光的相位差为  $180^\circ$ , 两侧交替的光压作用则产生交替垂直作用于梁厚度方向上的推力; 而两侧交替的光热作用则由于热穿透而等效成一个恒定的光热作用, 结果导致在入射点处产生一个固定温升, 这一固定温升不会产生交替的横向策动力。从显示屏幕上也看不到微硅梁振荡的波形。这说明仅靠光压作用不足以使微硅梁振荡。经理论计算, 由光压效应产生的作用力是极其微小的。

### 3.3 微硅梁双向同步光激励实验

双向同步激励时, 微硅梁正、反面两束光的相位差为  $0^\circ$ , 它们所产生的光压作用互相抵消; 而两束光同步的光热作用因热穿透而等效于两倍单向激励时产生的光热作用, 使微硅梁产生一个两倍于单向激励时的横向策动力。此时微硅梁振荡, 其幅值大约是单向光激励时的两倍, 如图 3(b) 所示。实测频率也为 1.55 kHz。

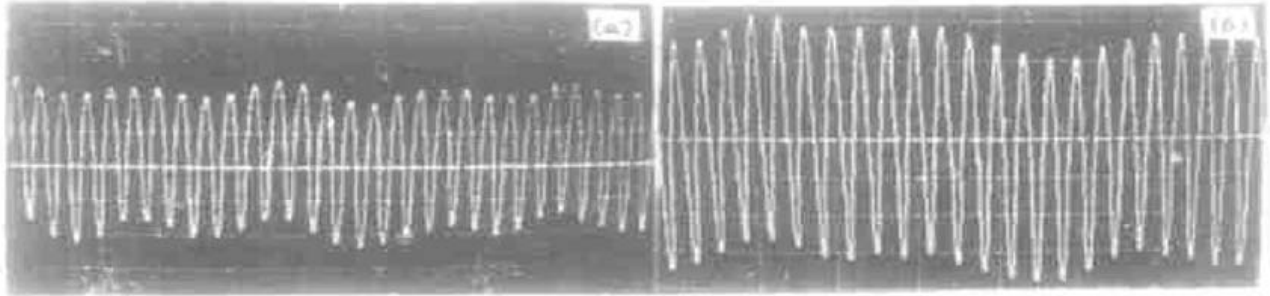


图 3 微硅梁光激励下的振荡波形

(a) 单向激励时; (b) 双向同步光激励时

Fig. 3 The resonating waveforms of optically excited micro silicon beam

(a) excited in one direction; (b) synchronistically excited in two directions

## 4 结 论

微硅梁在调制激光激励下产生振荡的微动力来自于光热效应所产生的周期性热应变, 再通过镀层的“双金属片”效应, 将此热应变转化成为微硅梁振荡的横向策动力。实际应用中的光激励微硅梁谐振器采用单向激励的方式。为了提高它的光-热-机转化效率, 镀层材料应具有较大的光吸收系数, 以便得到较高的光-热转化效率; 其线膨胀系数及杨氏模量应与微硅梁材料(二氧化硅)的线膨胀系数及杨氏模量有较大的差异, 以便获得较大的热-机转化效率, 从而产生较大的横向策动力。此外, 镀层材料还应具有一定的反射率, 以便于振荡的检测。一般铝和铬为常用的镀层材料。此外, 微硅梁的尺寸、调制激光入射点的位置等也应通过实验来进行优化选择。

## 参 考 文 献

- 1 S. Venkatesh, B. Culshaw. Optically activated vibrations in a micromachined silica structure. *Electron. Lett.*, 1985, **21**(8): 315~ 317
- 2 D. Uttamchandani, K. E. B. Thornton, B. Culshaw. Optically excited resonant beam pressure sensor. *Electron. Lett.*, 1987, **23**(25): 1333~ 1334

## Study on the Mechanism of Optically Excited Micro Silicon Beam Vibration

Gu Lizhong

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** The optically excited vibrating mechanism of the micro silicon beam is experimentally studied. It is shown that the energy transforms from optical energy to heat and to mechanical energy is responsible for the vibration.

**Key words** optically excited, micro silicon beam, resonator

## 钛宝石激光器抽运 Cr, Nd: YAG 晶体获得高效 自调 Q 激光输出\*

纳秒和亚纳秒范围内具有高功率和高重复率的脉冲在微机械、测距、遥视、微型手术等方面有着极其广泛的应用前景。激光二极管(LD)抽运的被动调 Q 激光器能提供这种脉冲,并且具有简单化、结构紧凑、价格便宜和高效的优点。因此近年来 LD 抽运的被动调 Q 激光器引起了人们极大的兴趣,特别是用掺 Cr<sup>4+</sup> 离子的 YAG 晶体作为可饱和吸收体的被动调 Q 激光器。掺 Cr<sup>4+</sup> 离子的石榴石晶体具有优良的光化学和热稳定性、大的吸收截面积、低的饱和强度和高的损伤阈值,此外通过共掺 Cr<sup>4+</sup> 离子和激光增益介质在一起而形成自调 Q 激光,因此可以进一步实现被动调 Q 激光器的小型化、集成化。

本课题组用提拉法(CZ)沿〈111〉方向生长了双掺 Cr<sup>4+</sup> 和 Nd<sup>3+</sup> 的 Cr, Nd: YAG 晶体,经 1400 °C 退火,获得了低位错密度的高质量单晶。最近进行了用钛宝石激光器抽运 Cr, Nd: YAG 晶体的自调 Q 激光实验。实验所用的 Cr, Nd: YAG 晶体的尺寸为 7 mm × 7 mm × 5 mm, Cr<sup>4+</sup> 在 1.064 μm 的吸收系数为 0.144 cm<sup>-1</sup>, Nd<sup>3+</sup> 在 808 nm 处的吸收系数为 2.6 cm<sup>-1</sup>。用氩离子抽运的钛宝石激光器作为抽运源,抽运光波长为 808 nm,功率为 0.5 W 左右,采用端面抽运方式,抽运光经过焦距为 75 mm 透镜后聚焦在晶体上。晶体作为激光谐振腔,设计为平凹腔,晶体的输入面是曲率半径为 80 mm 的凸面,镀 808 nm 增透膜和 1064 nm 高反膜,另一面是平面,镀 808 nm 高反膜和 1064 nm 反射率为 95% 的反射膜作为输出耦合镜。在室温下,当输入功率为 540 mW 时,晶体实际吸收的抽运功率为 497 mW,得到 94 mW, 1.064 μm,脉宽为 8 ns,重复率为 50kHz 的自调 Q 激光输出,晶体的阈值功率为 63 mW,斜率效率为 24%。

中国科学院上海光机所

邓佩珍 董俊 张影华 刘玉璞 徐军 陈伟

收稿日期: 2000-01-14

\* 上海科技启明星项目(编号: 97QE14027)资助。