

带尾纤的全光型硅微谐振器*

丁 纯 王跃林 喻 浩 王亚强 徐义刚

(浙江大学信息与电子工程学系 硅材料国家重点实验室 杭州 310027)

摘要 带尾纤的全光型硅微谐振器引入了集成光学技术, 具有独立的拾振光路和简单易行的拾振方式, 可以完全脱离光学平台运作。对带尾纤的全光型硅微谐振器进行了实验测量及较详细的理论分析, 给出了悬臂梁振子的固有谐振频率、谐振频率的总温度系数、悬臂梁对简谐激励的响应等表达式; 归纳出了该谐振器具有光纤与振子间未对准误差容限较大, 输出测量信号与光纤有效光学长度无关及振子谐振频率不受硅片内应力影响等特点。

EEACC: 4140, 5240D, 4130, 4125

1 引言

八十年代以来, 国内外传感器技术研究的一个非常明显的发展趋势是: 根据传统传感器的作用原理或某些新效应, 设计制作微结构传感器。这类传感器在原料上基本选用晶体材料, 在工艺上采用微机械加工技术和微电子技术, 从而使传感器具有体积小、重量轻、功耗小的特点。其中硅微结构谐振式传感器, 又因为重复性好、分辨率高、稳定性强的特点以及自身输出为准数字信号, 可以通过简单的数字电路与微机连接组成数控系统, 而倍受人们的关注。所以近年来作为谐振式传感器的核心部件——各种不同结构的谐振器层出不穷, 而全光型硅微谐振器就是其中之一, 它不仅具有传统谐振器的优点, 而且还具有抗干扰性能好、本质绝缘和防爆等优点, 在某些特殊场合是电学传感器所无法替代的。

全光型谐振器或传感器的应用, 目前受到很大限制的一个重要原因是光的耦合问题^[1,2]。现在, 有不少全光型的谐振器均采用振子表面光激励和表面反射光拾振的工作方式^[3~5], 这就需要在面积极其狭小的振梁表面, 固定两根分别用作激振和拾振的光纤, 其难度是可想而知的; 也有用一根光纤同时传输激振和拾振光信号的, 但又需增设光耦合器来实施, 同样增加了谐振器的复杂程度。本研究则利用集成光学的硅波导技术, 在悬臂梁上引进了脊型波导, 并利用 V 型槽耦合技术, 将输入、输出拾振光纤与之相连, 形成了独立的拾振光路; 激振光纤则由封接在振子上的带孔玻璃固定于悬臂梁表面。这种结构不仅使拾振信号

* 本工作由国家自然科学基金资助(69476029)

丁 纯 1946 年出生, 副教授, 从事半导体光电子与硅微机械研究

王跃林 1959 年出生, 教授, 博士生导师, 主要从事硅微机械及其应用研究

喻 浩 1973 年出生, 硕士生

1997-11-06 收到, 1998-03-18 定稿

由比较复杂的反射光信号变成了完全与梁振动同步且直观的光电信号, 而且使拾振信号的检出分析也变得简单易行.

带尾纤的新结构硅微谐振器的实现, 使全光型谐振器完全摆脱了光学平台的羁绊, 为其走出实验室走向实用化创造了良好的条件.

2 结构与分析

谐振器是谐振传感器的核心部分, 它通常由激振、拾振和振子三部分组成. 带尾纤的全光型硅微谐振器结构如图 1 所示. 激振部分由调制电源、波长为 $0.67\mu\text{m}$ 的 LD 及激振光纤组成; 振子是在 (100) 硅片上用微机械与微电子技术制作的悬臂梁; 拾振部分则由带尾纤的波长为 $1.3\mu\text{m}$ 的 LD、输入拾振光纤、脊型波导、输出拾振光纤及红外探测器组成.

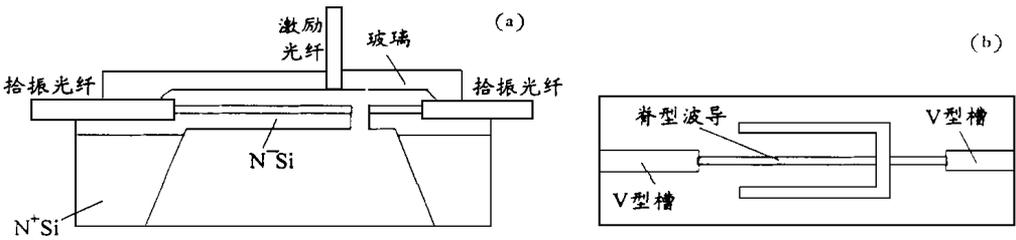


图 1 带尾纤的全光型硅微谐振器结构示意图
(a) 剖面图; (b) 正视图

2.1 振子

谐振器的振子通常有桥式和悬臂梁式两种结构. 本工作中的振子之所以采用悬臂梁结构而不是桥式结构, 首先是因为两者相比, 前者的谐振幅度比后者大^[4], 如果以同样的光功率来激励尺寸相当的悬臂梁和桥, 它们的最大振幅比可表示为:

$$\frac{Y_{\text{max}}}{Y_{\text{max}}} = 30.92 \left(\frac{L_c}{L_b} \right)^2 \tag{1}$$

式中 Y_{max} 、 Y_{max} 分别为悬臂梁和桥的最大谐振幅度; L_c 和 L_b 分别为悬臂梁和桥的长度. 可见, 即使 $L_c = 0.5L_b$ 时, 悬臂梁的谐振幅度仍可达桥的 7.73 倍. 因此可以推断, 悬臂梁振子应该比桥式振子更易激振. 据文献[4]报道: 当激励光纤尾端离振子表面 $30\mu\text{m}$ 时桥式振子不起振, 而悬臂梁振子则在噪声水平以上获得了大约 42dB 的信号峰, 如将激励间隙调大到 $200\mu\text{m}$, 仍可获得接近 40dB 的谐振信号, 这就意味着激励光纤的装配容许有较大的偏差容限.

其次, 悬臂梁振子比桥式振子有更好的谐振频率温度系数^[4]. 悬臂梁的谐振频率可以利用经典力学分析中的虚功原理及能量泛函原理等来建模和计算, 按图 2 所设定的坐标, 根据文献[6]可直接写出悬臂梁的无阻尼振动方程为:

$$EI \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} = 0 \tag{2}$$

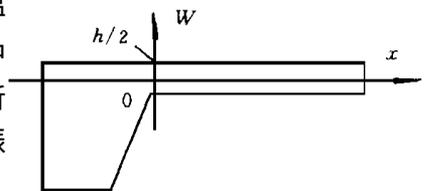


图 2 梁的坐标选取

式中 E 为硅的杨氏模量; I 为梁的截面惯性矩; ρ 为硅的密度; A 为梁的横截面积, $w(x, t)$ 表示振动中梁上某点的位移, 它应有 $w(x, t) = W(x) \sin(\omega t + \alpha)$ 的形式, 此方程的特征方程为:

$$\lambda^4 - \frac{\rho A \omega^2}{EI} = 0 \quad (3)$$

特征方程应有 $\pm \lambda$ 和 $\pm i\lambda$ 四个根, 利用悬臂梁自由振动的边界条件, 由振动方程解中 $W(x)$ 可推出悬臂梁的频率方程:

$$1 + \operatorname{ch}(\lambda L) \cos(\lambda L) = 0 \quad (4)$$

式中 L 为梁长, 用数值计算法可求得该方程解为: $\lambda_1 L = 1.875$; $\lambda_2 L = 4.694$; $\lambda_3 L = 7.855$..., 由此可确定悬臂梁固有谐振频率表达式为:

$$\omega_n = \lambda_n^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (5)$$

式中 n 为主振模的阶数, 最易起振的通常是一阶主模态, 即 $n=1$. 将有关数据代入(5)式后, 可写出一阶振模的谐振频率:

$$f_1 = 0.167 \times \frac{h}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (6)$$

式中 h 为梁的厚度 根据(6)式可以推出悬臂梁谐振频率的总温度系数为:

$$\frac{1}{f} \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right) = \frac{1}{2E} \left(\frac{\partial E}{\partial T} \right) - \frac{1}{L} \left(\frac{\partial L}{\partial T} \right) + \frac{1}{2\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \quad (7)$$

可见悬臂梁振子的总温度系数与线性热膨胀系数有 $1/2$ 的关系, 并且是杨氏模量和材料密度温度系数的一半 这就意味着, 当悬臂梁谐振器被用作测量除温度外的其它物理量时, 温度对谐振频率的影响可以很容易地利用谐振频率和温度之间的线性关系修正, 而在作为温度传感器时, 则可以完全不用作任何修正 此外, 由于悬臂梁结构一端悬空, 可以释放应力, 因此它的谐振频率受硅片内应力的影响比较小

2.2 激振

当经过调制电源调制的激励光束照射到悬臂梁表面时, 硅梁的光吸收引起光斑位置的悬臂梁局部升温, 从而在梁上产生了周期性的热膨胀现象, 引起梁的周期性畸变 这种热膨胀的产生和梁的周期性畸变可以看成是热波在梁上的产生和传播, 以及由此而引发的梁的弹性波的发生和传播^[5], 也就是梁的振动 微机械振子的激振, 基本上就是由这样一个光热过程来完成的

梁对调制光束激励的响应, 可以利用简谐激励时的梁振动方程来推导^[6]:

$$EI \frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} = F(x, t) \quad (8)$$

式中 $F(x, t)$ 为光激励产生的作用力 在调制信号为简谐波, 且激励仅作用于梁上某一点的情况下,

$$F(x, t) = \chi I_0 \delta(x - a) \cos(\omega t) \quad (9)$$

其中 χ 为材料的吸收系数; $I_0 \cos(\omega t)$ 为激励光强; a 为激励点位置 由此可以推出悬臂梁对简谐激励的响应:

$$w_n(x, t) = \frac{\chi I_0 L W_n(x) W_n(a) \sin(\omega t - \alpha_n)}{\lambda^4 EI \sqrt{(n^4 - r^2)^2 + (\mu n^4)^2}} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (10)$$

其中

$$W_n(x) = B_n [\text{ch}(\lambda_n x) - \cos(\lambda_n x) - \eta_n (\text{sh}(\lambda_n x) - \sin(\lambda_n x))] \quad (11)$$

$$\eta_n = \frac{\cos(\lambda L) + \text{ch}(\lambda L)}{\sin(\lambda L) + \text{sh}(\lambda L)} \quad (12)$$

式中 n 为振模的阶数; r 为所取级数中的项次; μ 为迟滞阻尼系数 由上式可以预见处于各阶模共振态时, 梁对不同激励点的响应强弱 根据计算可知, 对于一阶主振模而言, 激励点处于悬臂梁的悬空端, 即 $a=L$ 时梁的响应最强^[7].

2.3 拾振

拾振光信号进出的通道由输入多模光纤、脊型波导、输出多模光纤组成 脊型波导直接制作在悬臂梁振子上, 振子所用材料为 N^-/N^+ (100) 硅外延片, 悬臂梁就做在外延层上, 外延层的掺杂浓度小于 16^6cm^{-3} , 衬底的掺杂浓度大于 10^{18}cm^{-3} , 根据折射率差的计算公式^[8]:

$$\Delta n = - \left(\frac{q^2 \lambda^2}{8\pi^2 c^2 n \epsilon_0} \right) \left(\frac{N_c}{m_{ce}^*} + \frac{N_h}{m_{ch}^*} \right) \quad (13)$$

式中 q 是电子电荷量; λ 是光波长; n 是纯净硅的折射率; ϵ_0 是真空介电常数; N_c, N_h 分别是自由电子和自由空穴浓度; m_{ce}^*, m_{ch}^* 分别为电子和空穴的有效质量 由此可以估算出 Δn 约为 10^{-3} 量级, 所以外延层肯定能形成良好的平板波导

在悬臂梁的表面, 制作了一条脊型凸起, 根据等效折射率原理, 在脊型条的下面会产生一个折射率高于外延层折射率的导波区, 使传输光束能被基本限制在此脊型波导区内, 这条波导就作为对谐振器作检测时振子部分的光通道

固定输入、输出多模光纤的 V 型槽与脊型波导的连接端是 (111) 面, 它与 (100) 面有一个 54.74° 的交角, 它使光纤的端面不可能靠紧波导端面, 大约会留下 $50\mu\text{m}$ 左右的间隙, 这与脊型波导在悬臂梁的间断区尺寸相当, 情况相似 光通过这种间断区的损耗情况, 可利用有关公式估算 根据基模高斯光束的纵向分布规律^[9]:

$$E(z) = E_0 \frac{w_0}{w(z)} \exp\left[-\frac{r^2}{w^2(z)}\right] \quad (14)$$

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2} \quad (15)$$

式中 w_0 为高斯光束腰斑半径; $w(z)$ 为任意位置上的光斑半径; z_0 为高斯光束的共焦参量, z 轴为高斯光束的光轴 利用 (15) 式可估算出经间断区后光斑面积约会扩展 7% 左右 根据 (14) 式, 并利用正态分布函数的相关公式^[10]:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{x_1}^{x_2} \exp\left[-\frac{t^2}{2}\right] dt \quad (16)$$

$$p = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{x_1}^{x_2} \exp\left[-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right] dx \quad \left(\text{令 } t = \frac{x-a}{\sigma}\right)$$

$$= \Phi\left(\frac{x_2-a}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{x_1-a}{\sigma}\right) \quad (17)$$

式中 a 为正态分布曲线的对称点; x_1, x_2 为波导截面的左右半宽; σ 分别取间断区初端与末端的光斑半径, 经计算可知, 激光束经 $50\mu\text{m}$ 左右的间断区后, 因光斑扩展所引起的光功率衰减仅为 2.3% 左右 同样道理, 光纤与脊型波导的端面间隔, 也不会对检测光信号传输造成很大损失

2.4 工作原理

当激励光的调制频率远离共振频率时, 梁的响应 $W(x)$ 极小, 悬臂梁基本处于平衡位置, $1.3\mu\text{m}$ 的探测光经输入光纤、脊型波导、输出光纤到达光探测器, 探测器所接受的几乎是一个直流光信号, 随着调制频率向共振频率靠近, 梁的响应逐渐增大, 悬臂梁开始上下振动, 从而使梁悬空端的脊型波导间断处相互错位, 使光探测器接受的输出光信号变成了明暗相间的交变信号, 且交变频率与调制频率完全相同, 光调制频率越接近共振频率, 悬臂梁振动愈烈, 脊型波导间断处错位越大, 输出光的明暗变化就越悬殊, 因此光探测器接收到的交变光信号幅值更大, 直至光调制频率达到梁的共振频率时, 输出光信号幅值达到最大值

3 实验与讨论

3.1 谐振器制作

谐振器振子的制作工艺与一般的硅微机械传感器相似。首先对 $N^-/N^+(100)$ 硅外延片高温氧化, 然后用双面光刻技术和各向异性腐蚀技术刻出正面的 V 型槽和背面的硅杯, 接着再光刻、腐蚀脊型波导, 最后用干法腐蚀对脊型波导两端面进行修正同时刻出悬臂梁

在振子上装架激振和拾振光纤后, 谐振器样品就基本制作完成了。谐振器的激振光纤由带孔的玻璃固定。玻璃上事先打好了正好能插入光纤的小孔, 玻璃封接面正对悬臂梁区的地方预先划好了沟槽, 以保证拾振光纤的安装及梁的正常振动。用常规的硅-玻璃封接技术将经加工的玻璃固定在振子上, 同时将激振光纤和拾振光纤分别在玻璃和 V 型槽内安装就位, 样品准备就基本就绪了。图 3(见图版 D) 是装架完成的谐振器样品照片。

3.2 实验装置

实验装置如图 4 所示。图中 M 为光调制电源, EL 为激励激光器, FO 为聚焦显微物镜, L 为检测激光器, PD 为红外光探测器, LA 为锁相放大器, R 为谐振器样品

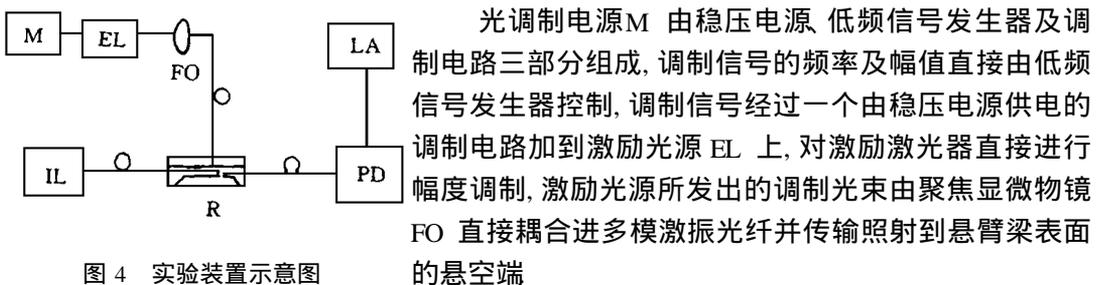


图 4 实验装置示意图

与此同时, $1.3\mu\text{m}$ 的带尾纤检测激光器 L 所发出的激光经输入多模光纤、脊型波导、输出多模光纤到光探测器 PD, 并转化为电信号由锁相放大器 LA 接受

3.3 测试

由零开始向上调节低频信号发生器的信号频率, 在调制频率远低于悬臂梁的共振频率时, 梁不振动或振动很小, 光探测器接收到的是直流信号或振幅极小的交变信号, 锁相放大器读出的数据为零或接近于零的值, 随着频率逐渐趋近梁的共振点, 梁的振动逐渐增大, 直至共振时达到最大, 此时锁相放大器读到的光电信号也逐渐增大到峰值。继续调高信号发生器的频率, 使其逐渐远离悬臂梁的共振频率, 可以看到锁相放大器的读数又很快从峰值下降到零。由此可以测出一条谐振器的幅频特性曲线, 如图 5 所示。如继续调高信号发生器频率, 在共振频率的二倍频处, 还能测到第二个谐振峰, 不过其峰值要比基频峰小得多, 谐振器的

二倍频幅频特性曲线如图 6 所示

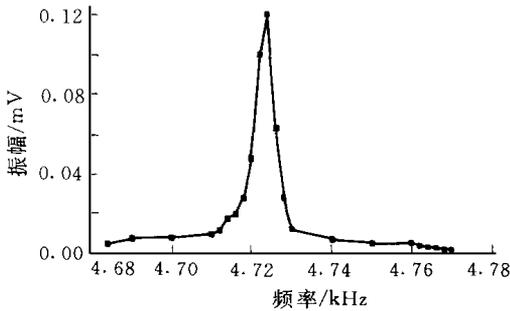


图 5 全光型谐振器的幅频曲线

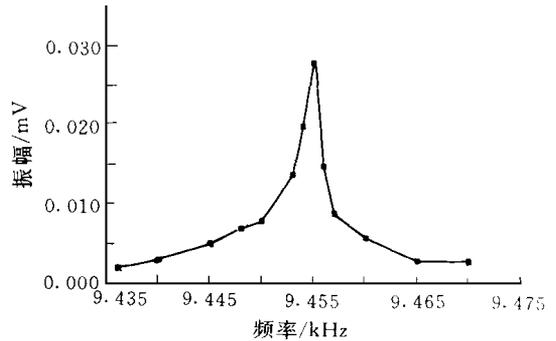


图 6 全光型谐振器的二倍频幅频曲线

3 4 讨论

由实验结果可知: 谐振器共振点的频率约为 4.724kHz, 而利用公式(6)估算的悬臂梁固有共振频率约为 4.36kHz, 与实验结果基本一致, 误差主要由梁的结构参数引起, 因为在计算中所取的梁长、梁厚等尺寸都是按设计值取的, 而经实际的工艺过程以后所获得的悬臂梁, 其梁长和梁厚不可能恰恰与设计值相等, 一般均会有较大误差, 特别是在厚度上, 因没有采用自停止腐蚀技术, 误差恐怕更大些; 此外, 计算中未计及梁上存在的脊型波导的影响, 也是造成误差的原因之一。

从幅频特性曲线, 还可以估算出谐振器的 Q 值, 按 Q 值的定义^[11]:

$$Q = \frac{\omega}{\omega_2 - \omega_1} \quad (18)$$

式中 ω 为 n 阶主振模的共振频率; ω_1 、 ω_2 分别为半功率点处的振动频率。根据实验数据可以求出, 实验所用振子的 Q 值达 940 以上, 如将振子放在真空中, Q 值还将更高。

4 结论

本文通过比较详细的理论分析和实验手段, 探讨了全光型悬臂梁结构的硅微谐振器的光激励谐振过程。结果表明:

(1) 谐振器较理想地实现了微机械技术与光波导制作技术的兼容工艺, 在硅微谐振器中引入了集成光学光波导器件, 从而引进了完全独立的拾振光路, 使谐振器的光耦合及拾振变得简单易行。

(2) 独立的拾振光路也引进了独特的拾振方式, 谐振器的检振信号是来自悬臂梁悬空端两边脊型波导相互错位而产生交变光的频率信号, 与光纤的有效光学长度无关, 因此谐振器不受光纤的温度及其它环境效应影响, 这一点对用于远距离测量的实用传感系统的实现, 具有极大价值。

(3) 梁的谐振频率与温度变化之间的线性关系及其受硅片内应力影响比较小的特点, 使这种谐振器有望制成温度特性很好的各类传感器。

(4) 由于选用了纤芯较大的多模光纤作谐振器的尾纤, 使光纤末端与梁的脊型波导端

面之间有较强的未对准误差容忍; 由于悬臂梁结构极易起振且振幅较大, 又使激励光纤末端与被激励的梁表面之间也有较大的未对准误差容忍 这些对谐振器走向实用是很有意义的 以上这些特点使这种全光型的硅微谐振器更具实用化的前景

参 考 文 献

- [1] H. Guckel *et al* , "Optical drive/sense for high Q resonant microbeams" , Transducers '93, Tokyo, 1993, 686
- [2] R. J. Pitcher *et al* , Sensors and Actuators, 1990, **A21~ 23**: 387.
- [3] 温志渝, 钟先信, 黄友恕, 等, 光电工程, 1995, **22**(4): 24~ 29
- [4] Y. J. Rao and B. Culshaw, Sensors and Actuators, 1992, **A30**: 203~ 208
- [5] Rebwat M. A. Fatah, Sensors and Actuators, 1992, **A33**: 229~ 236
- [6] 王文亮, 杜作润, "结构振动与动态子结构方法", 第1版, 上海: 复旦大学出版社, 1985, 81~ 145
- [7] 喻浩, 丁纯, 王跃林, 等, 光学学报, 1998, **18**(9) (待发表).
- [8] Richard A. Soref and Joseph P. Lorenzo, IEEE J. Quantum Electron, 1986, **QE-22**(6): 873~ 879
- [9] 朱祖华, "信息光电子学基础", 第1版, 杭州: 浙江大学出版社, 1992
- [10] 丁纯, 金仲和, 喻浩, 等, 光学学报, 1998, **18**(3) (待发表).
- [10] 刘广玉, 陈明, 吴志鹤, 等, "新型传感器技术及应用", 第1版, 北京: 北京航空航天大学出版社, 1995

All-Optical Type Silicon Microresonators With Pigtail

Ding Chun, Wang Yuelin, Yu Hao, Wang Yaqiang, Xu Yigang

(Department of Information Science and Electronic Engineering,

State Key Laboratory of Silicon Materials, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Received 6 November 1997, revised manuscript received 18 March 1998

Abstract All-optical type silicon microresonators (AOSMRs) with end-fiber, incorporated with integrated optical technology have an independent optical circuit for vibration pickup, besides simple and easy execution method of the pickup. They can operate without optical platform. As regards AOSMRs with end-fiber, their structure and working principle have been analysed, and their samples have been measured. The paper gives out expressions on vibrator natural frequency, overall temperature coefficient for resonant frequency and response to simple harmonic excitation of the cantilever beam. This paper deduces some characteristics from structure analysis of the resonators, for example, they have greater misalignment error tolerance between fiber and vibrator, output signal does not have a bearing on efficient optical length of fiber, and the vibrator resonant frequency is independent of internal stress in silicon wafer.

EEACC: 4140, 5240D, 4130, 4125