

# 表征 ULSI 低介电常数互连材料机械特性的表面波频散特性\*

李志国 肖 夏 张鑫慧 姚素英

(天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

摘要: 研究了在 Si(100) 衬底上淀积低  $k$  薄膜的分层结构中表面波沿 Si[100]和[110]晶向传播的速度-频率色散特性,给出了表面波色散特性的理论推导,得到了低  $k$  薄膜的杨氏模量、密度、厚度和泊松常数对色散关系的影响。

关键词: 低介电常数介质; 表面波; 频散特性; 杨氏模量

EEACC: 2570; 2800; 7320 G

中图分类号: TN405. 97 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2005)10-2032-06

## 1 引言

随着超大规模集成电路(ULSI)特征尺寸的不断减小以及互连导线层数的急剧增加,互连系统电阻、电容带来的 RC 耦合寄生效应,如延迟、串扰等严重阻碍了 ULSI 的快速发展. 为降低这些寄生效应,需要采用低介电常数( $k < 3$ )介质与铜金属集成的互连系统取代传统二氧化硅/铝互连系统. 按照国际半导体工业协会(ITRS)2004 年修订的国际半导体技术发展蓝图预测,到 2010 年 45nm 特征尺寸的 ULSI 要求互连介质的介电常数值应小于 2.1<sup>[1]</sup>.

低介电常数(低  $k$ )介质材料要在 ULSI 互连系统中获得实际应用,除了要求具有很低的介电常数以降低互连寄生效应外,还应具有良好的力学性能以支撑多层互连结构和承受化学机械抛光平面化工艺<sup>[2]</sup>. 在介质材料中引入大量纳米气孔可以有效降低材料的介电常数,但同时也将大大降低介质的硬度特性<sup>[3]</sup>. 因此准确测定低  $k$  介质的机械特性对实现 ULSI 低  $k$  介质/铜互连技术具有重要意义.

目前有多种技术可用于测量材料的机械特性. 压痕法(nanoindentation)是目前国际上较普遍采用

的检测材料硬度的方法. 但压痕法更适用于硬膜的测试<sup>[4]</sup>,对于具有硬度低(只有几个 GPa)、超薄(几十~几百 nm)、易碎(纳米多孔结构)等特点的低  $k$  介质,其测量结果可信度低. 这是因为压痕法设备中的金刚石压头在探测薄膜过程中容易受到薄膜下高硬度衬底材料的影响,使测出值偏高. 而且此技术应用于厚度小于 1 $\mu$ m 的超薄薄膜时,数据分析过程具有不确定性. 此外,薄膜粘弹性对压头的影响以及薄膜与压头的相互作用机理都还未研究清楚<sup>[5]</sup>.

利用激光产生表面波法(LSAW)的频散特性测定材料的硬度,具有检测速度快、测量准确、不损伤材料等突出优点<sup>[5]</sup>,有潜力服务于集成电路制造工艺的在线检测. 国际上利用此方法研究材料机械特性的报道多集中在金刚石薄膜、钼膜、TiN、TiC、金刚石形态的碳膜等硬度很高的薄膜材料<sup>[6,7]</sup>.

LSAW 法测量薄膜机械特性的原理是:表面波在分层结构上传播时相速度与频率有关,即色散的. 将理论计算的色散曲线与实验测得的色散曲线进行拟合,可以确定出所测薄膜样品的杨氏模量<sup>[8]</sup>. 本文推导了表面波在薄膜/Si(100)衬底分层结构上沿 Si[100]和[110]晶向传播的理论方程,并详细讨论了低  $k$  薄膜的杨氏模量、密度、厚度和泊松常数对色散

\*国家自然科学基金(批准号:60406003),教育部留学回国人员科研启动基金资助项目

李志国 男,1977 年出生,博士研究生,主要从事 ULSI 互连方面的研究.

肖 夏 女,1971 年出生,副教授,博士,主要研究方向为 ULSI 互连系统和纳米硅器件.

姚素英 女,1947 年出生,教授,博士生导师,主要研究方向为半导体器件、MEMS 系统与技术、专用集成电路设计等.

2005-02-02 收到,2005-05-09 定稿

关系的影响.

## 2 表面波在低 k 薄膜/ Si(100) 衬底分层结构中传播的频散特性

### 2.1 理论推导

当表面波在半无限大固体中传播时,大部分能量集中在自由表面附近,并且表面波能量密度随频率的增大呈指数衰减.表面波产生的弹性位移和应力位于表面下大约 1~2 个波长深度范围内<sup>[9]</sup>.

图 1 所示为表面波在低 k 薄膜/ Si(100) 衬底的分层结构中传播示意图.坐标原点位于薄膜与衬底的分界面上.表面波在分层结构中传播时是色散的,

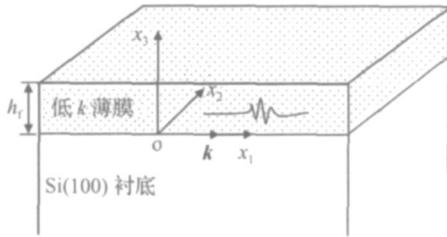


图 1 表面波在低 k 薄膜/ Si(100) 衬底分层结构中传播的示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of surface acoustic wave propagating on the layered structure of low-k film/ Si(100) substrate

波速不仅与频率相关,还分别与低 k 薄膜的杨氏模量  $E_f$ 、厚度  $h_f$ 、密度  $\rho_f$ 、泊松常数  $\nu_f$  以及衬底的密度  $\rho_s$ 、弹性刚度常数  $c_{ijkl}$  和晶体结构等参数有关<sup>[10]</sup>.因此表面波在低 k 薄膜/ Si(100) 衬底分层结构中传播的波速可表示为:

$$v(f) = v(E_f, h_f, \rho_f, \nu_f, \rho_s, c_{ijkl}, f) \quad (1)$$

在非压电媒质中的波动方程为:

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = c_{ijkl} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_j \partial x_l}, \quad i, j, k, l = 1, 2, 3 \quad (2)$$

其中  $u_i$  表示媒质中弹性粒子沿  $x_i$  方向的位移; $\rho$  表示媒质的密度; $c_{ijkl}$  表示媒质的弹性刚度常数.

根据波动方程的性质,(2)式的通解具有如下形式:

$$u_j = A_j \exp(ikb x_3) \exp[ik(l_1 x_1 + l_2 x_2 + l_3 x_3 - vt)] \quad (3)$$

其中  $v$  是表面波沿向量  $k$  方向传播的相速度.波传播的方向余弦为  $(l_1, l_2, l_3)$ ,且对于表面波, $l_3 = 0$ . $A_j$  是表面波各波分量的相对振幅. $b$  表示在与传播

方向垂直的平面上测得的波振幅随深度的变化.

将(3)式代入(2)式中,便得到表面波在媒质中传播的 christoffel 方程:

$$[ \rho_{ij} - v^2 \rho_{ij} ]_k = 0 \quad (4)$$

其中  $\rho_{ij} = c_{ijkl} l_k l_l (i, j, k, l = 1, 2, 3)$ ,  $\rho_{ij} = \begin{cases} 1, & i=j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$ .从此方程出发,只要已知传播媒质的弹性常数  $c_{ijkl}$ ,就可以算出沿任意方向  $(l_1, l_2, l_3)$  传播的平面波的波速和质点位移.

当传播媒质为低 k 薄膜时,为简化计算视其为各向同性,则只有两个独立的弹性常数  $c_{11}$  和  $c_{44}$ .它们与低 k 薄膜的杨氏模量  $E_f$  以及泊松常数  $\nu_f$  的关系为:

$$c_{11} = \frac{(1 - \nu_f) E_f}{(1 + \nu_f)(1 - 2\nu_f)},$$

$$c_{44} = \frac{E_f}{2(1 + \nu_f)},$$

$$c_{12} = c_{11} - 2c_{44}$$

(4)式存在非零解的条件是其矩阵的系数行列式必须为零.通过求解得到表面波在各向同性薄膜中传播时波函数的特征值  $b$  及其对应的特征向量为:

$$\begin{aligned} b^{(1)} &= +i[1 - (v/\hat{v}_t)^2]^{1/2} & (1) &= (-b^{(1)}, 0, 1) \\ b^{(2)} &= +i[1 - (v/\hat{v}_l)^2]^{1/2} & (2) &= (1, 0, -b^{(2)}) \\ b^{(3)} &= -i[1 - (v/\hat{v}_t)^2]^{1/2} & (3) &= (-b^{(3)}, 0, 1) \\ b^{(4)} &= -i[1 - (v/\hat{v}_l)^2]^{1/2} & (4) &= (1, 0, -b^{(4)}) \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $\hat{v}_t = (\hat{c}_{44}/\rho_f)^{1/2}$  和  $\hat{v}_l = (\hat{c}_{11}/\rho_f)^{1/2}$  分别是各向同性薄膜中体切变波和体纵波的速度.

当传播媒质为 Si(100) 衬底时,因为 Si 是立方晶系结构,有三个独立的弹性常数  $c_{11}$ ,  $c_{12}$  和  $c_{44}$ .由于对各向异性介质求解(4)式非常困难,一般不可能得到解析表达式,因此必须用计算机编程求出数值解.假设通过程序计算得到的特征值  $b$  及其对应的特征向量表示为:

$$\begin{aligned} b^{(c)} &= (b_1^{(c)}, b_2^{(c)}, b_3^{(c)}) \\ b^{(d)} &= (b_1^{(d)}, b_2^{(d)}, b_3^{(d)}) \end{aligned} \quad (6)$$

为了让形如(3)式的通解能够同时满足波动方程和边界条件的要求,将其写成线性叠加形式,在薄膜和衬底中的加权系数分别为  $C_n$  和  $C_m$ :

在薄膜中:

$$u_j = \sum_n C_n \sum_j^{(n)} \exp(ikb^{(n)} x_3) \exp[ik(l_1 x_1 + l_2 x_2 - vt)] \quad (7)$$

在衬底中:

$$u_j = \sum_m C_m^{(j)} \exp(ikb^{(m)} x_3) \exp[ik(l_1 x_1 + l_2 x_2 - vt)] \quad (8)$$

表面波在低  $k$  薄膜/ Si(100) 衬底分层结构中传播时应满足的矢量边界条件包括在薄膜与衬底的分界面 ( $x_3 = 0$  平面) 上位移连续 ( $\hat{u}_1 = u_1, \hat{u}_3 = u_3$ ) 和应力连续 ( $\hat{T}_{31} = T_{31}, \hat{T}_{33} = T_{33}$ ), 以及在自由表面 ( $x_3$

$= h$  平面) 上应力为零 ( $\hat{T}_{31} = 0, \hat{T}_{33} = 0$ ), 共计六个边界条件. 其中位移的表达式为 (7) 和 (8) 式, 而应力为  $T_{3j} = c_{3jl} \frac{\partial u_l}{\partial x_l}$ .

当表面波沿 Si 的 [100] 晶向传播时, 波传播的方向余弦为:  $l_1 = 1, l_2 = 0, l_3 = 0$ , 由六个边界条件确定的波函数的系数矩阵为:

$$\begin{bmatrix} b^{(1)} & -1 & b^{(3)} \\ -1 & -b^{(2)} & -1 \\ -\hat{c}_{44}(1-b^{(1)2}) & -2\hat{c}_{44}b^{(2)} & -\hat{c}_{44}(1-b^{(3)}) \\ (\hat{c}_{12}-\hat{c}_{11})b^{(1)} & -(\hat{c}_{12}+\hat{c}_{11}b^{(2)2}) & (\hat{c}_{12}-\hat{c}_{11})b^{(3)} \\ (1-b^{(1)2})\exp(ikb^{(1)}h) & 2b^{(2)}\exp(ikb^{(2)}h) & (1-b^{(3)2})\exp(ikb^{(3)}h) \\ (\hat{c}_{12}-\hat{c}_{11})b^{(1)}\exp(ikb^{(1)}h) & -(\hat{c}_{12}+\hat{c}_{11}b^{(2)2})\exp(ikb^{(2)}h) & (\hat{c}_{12}-\hat{c}_{11})b^{(3)}\exp(ikb^{(3)}h) \\ -1 & \begin{matrix} c_{44}(\frac{c^{(e)}}{3}+b^{(e)}\frac{c^{(d)}}{1}) \\ c_{12}\frac{c^{(e)}}{1}+c_{11}b^{(e)}\frac{c^{(d)}}{3} \end{matrix} & \begin{matrix} \frac{c^{(d)}}{1} \\ \frac{c^{(d)}}{3} \end{matrix} \\ -b^{(4)} & c_{44}(\frac{c^{(e)}}{3}+b^{(e)}\frac{c^{(d)}}{1}) & c_{44}(\frac{c^{(d)}}{3}+b^{(d)}\frac{c^{(d)}}{1}) \\ -2\hat{c}_{44}b^{(4)} & c_{12}\frac{c^{(e)}}{1}+c_{11}b^{(e)}\frac{c^{(d)}}{3} & c_{12}\frac{c^{(d)}}{1}+c_{11}b^{(d)}\frac{c^{(d)}}{3} \\ -(\hat{c}_{12}+\hat{c}_{11}b^{(4)2}) & 0 & 0 \\ 2b^{(4)}\exp(ikb^{(4)}h) & 0 & 0 \\ -(\hat{c}_{12}+\hat{c}_{11}b^{(4)2})\exp(ikb^{(4)}h) & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_c \\ C_d \end{bmatrix} = 0 \quad (9)$$

令 (9) 式矩阵的行列式为 0, 将 Si (100) 衬底材料的密度、弹性常数和待测薄膜的厚度、密度作为已知参数代入, 假定待测低  $k$  薄膜的一系列杨氏模量值, 求解出  $k$ . 再由  $f = \frac{kV}{2}$ , 就可以得到一系列杨氏模量值分别对应的频散曲线.

当表面波沿 Si 的 [110] 晶向传播时, 方向余弦为:  $l_1 = \frac{\sqrt{2}}{2}, l_2 = \frac{\sqrt{2}}{2}, l_3 = 0$ , 用以上类似的方法就可以得到一系列杨氏模量值分别对应的频散曲线.

### 2.2 数值算例

利用上述公式对表面波在 Si (100) 衬底上淀积低  $k$  薄膜的分层结构中传播的色散特性进行理论计算. 计算中低  $k$  薄膜厚度为 500nm, 密度为 1.0g/cm<sup>3</sup>, 泊松常数为 0.26. 当表面波沿 Si 的 [100] 晶向传播时, 得到的色散曲线及其在频率-速度平面的投影曲线如图 2 所示. 结果显示: 当表面波沿 Si [100] 晶向传播时, 频率较低的波能够穿透更深的距离而进入衬底材料, 传播速度接近于在体硅衬底材料中沿 Si [100] 晶向的传播速度 4.917km/s. 随着频率的增加表面波传播速度迅速衰减.

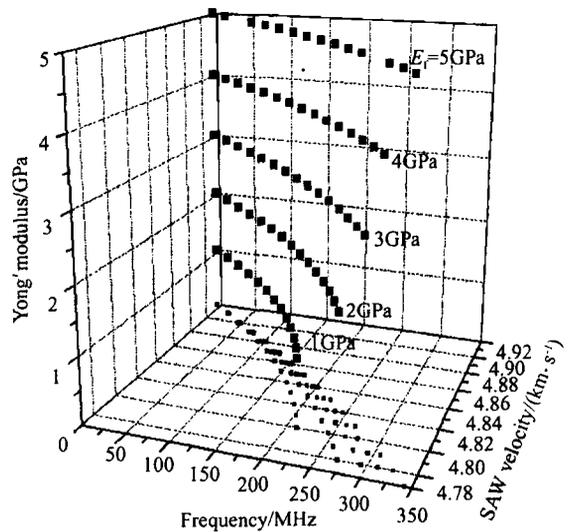


图 2 表面波沿低  $k$  薄膜/ Si(100) 衬底分层结构 Si [100] 晶向传播的色散曲线及其在频率-速度平面的投影曲线  
Fig. 2 Dispersive curves and their projections in the frequency-velocity plane when SAWs propagating along the Si [100] direction of the low- $k$  film/ Si (100) substrate layered structure

当表面波沿 Si 的 [110] 晶向传播时, 情况与此类似, 如图 3 所示. 不同的是当频率较低时, 传播速

度接近于在体硅衬底材料中 Si [110] 晶向的传播速度 5.082km/ s. 在实际测试中, 由于使表面波沿 Si [110] 晶向传播在操作过程中最容易得到对准, 因此本文的算例给出的是表面波沿 Si 的 [110] 晶向传播时, 薄膜的杨氏模量、密度、厚度和泊松常数对表面波色散的影响。

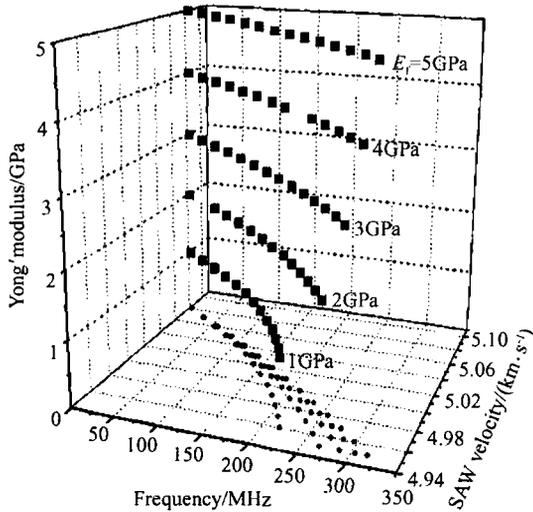


图 3 表面波沿低  $k$  薄膜/ Si(100) 衬底分层结构 Si [110] 晶向传播的色散曲线及其在频率-速度平面的投影曲线

Fig.3 Dispersive curves and their projections in the frequency-velocity plane when SAW propagating along the Si [110] direction of the low- $k$  film/ Si (100) substrate layered structure

图 4 所示为表面波沿 Si [110] 晶向传播时, 低  $k$  薄膜杨氏模量对色散关系的影响. 计算时薄膜厚度为 500nm, 密度为 1.0g/cm<sup>3</sup>, 泊松常数为 0.26, 杨氏模量分别取 1, 2, 3, 4 和 5 GPa. 随着频率的增加, 杨氏模量越低的低  $k$  薄膜中传播的表面波速度衰减越快。

图 5 所示为表面波沿 Si [110] 晶向传播时, 低  $k$  薄膜密度对色散关系的影响. 计算时薄膜厚度为 500nm, 泊松常数为 0.26, 杨氏模量为 4 GPa, 密度分别取 0.5, 1.0, 1.5 和 2.0g/cm<sup>3</sup>. 在相同的频率下, 密度越大的低  $k$  薄膜中传播的表面波速度越小。

图 6 所示为表面波沿 Si [110] 晶向传播时, 低  $k$  薄膜厚度对色散关系的影响. 计算时薄膜泊松常数为 0.26, 杨氏模量为 4 GPa, 密度为 1.0g/cm<sup>3</sup>, 厚度分别取 50, 100, 250, 500, 750, 1000 和 1250nm. 在相同的频率下, 越厚的低  $k$  薄膜中传播的表面波速度衰减越快。

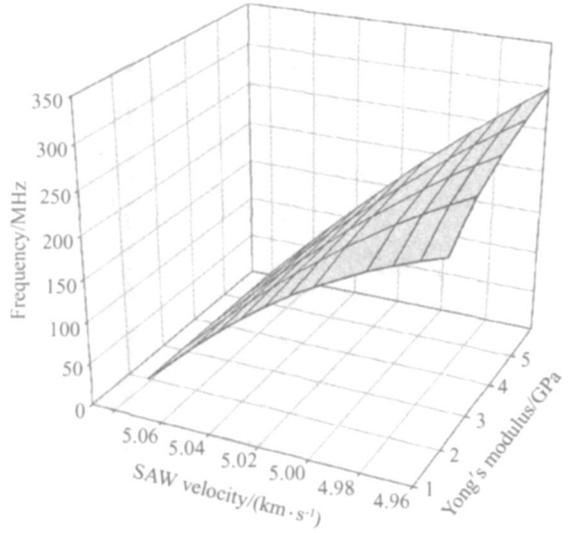


图 4 表面波沿 Si [110] 晶向传播时低  $k$  薄膜杨氏模量对色散关系的影响  $h_f = 500\text{nm}$ ,  $\rho = 1.0\text{g/cm}^3$ ,  $\nu = 0.26$

Fig.4 Effects of the Yong ' modulus of low- $k$  film on the dispersive curves when SAWs propagating along the Si [110] direction  $h_f = 500\text{nm}$ ,  $\rho = 1.0\text{g/cm}^3$ ,  $\nu = 0.26$

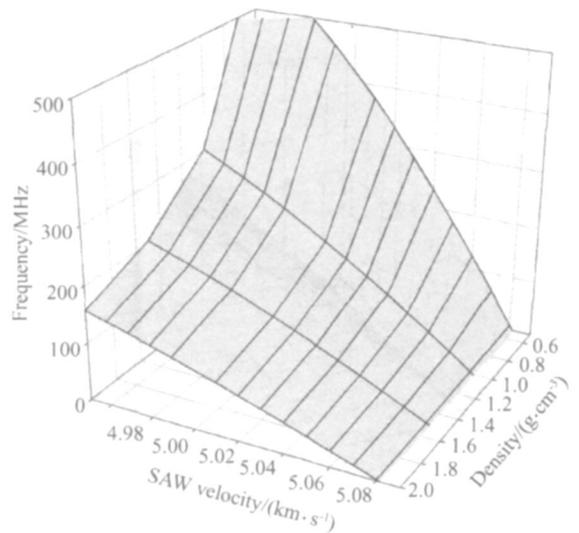


图 5 表面波沿 Si [110] 晶向传播时低  $k$  薄膜密度对色散关系的影响  $h_f = 500\text{nm}$ ,  $E_f = 4\text{GPa}$ ,  $\nu = 0.26$

Fig.5 Effects of the density of low- $k$  film on the dispersive curves when SAWs propagating along the Si [110] direction  $h_f = 500\text{nm}$ ,  $E_f = 4\text{GPa}$ ,  $\nu = 0.26$

图 7 所示为表面波沿 Si [110] 晶向传播时, 低  $k$  薄膜泊松常数对色散关系的影响. 计算时薄膜杨氏模量为 4 GPa, 密度为 1.0g/cm<sup>3</sup>, 厚度为 500nm, 泊松常数分别取 0.15, 0.18, 0.22, 0.25, 0.27, 0.29, 0.31 和 0.33. 计算结果表明, 不同泊松常数的低  $k$

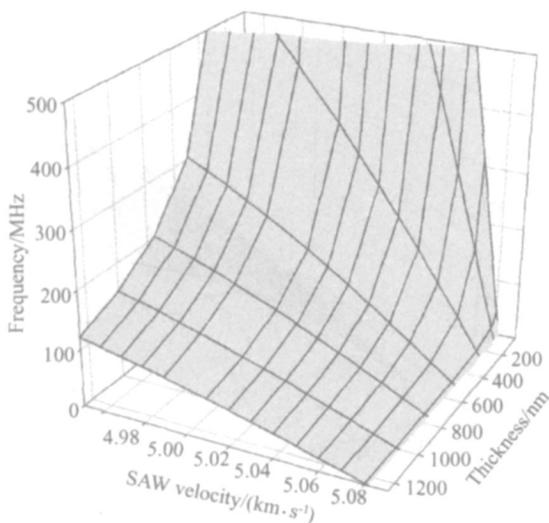


图 6 表面波沿 Si[110]晶向传播时低  $k$  薄膜厚度对色散曲线的影响  $E_f = 4 \text{ GPa}$ ,  $\rho_f = 1.0 \text{ g/cm}^3$ ,  $\nu_f = 0.26$

Fig. 6 Effects of the thickness of low- $k$  film on the dispersive curves when SAWs propagating along the Si [110] direction  $E_f = 4 \text{ GPa}$ ,  $\rho_f = 1.0 \text{ g/cm}^3$ ,  $\nu_f = 0.26$

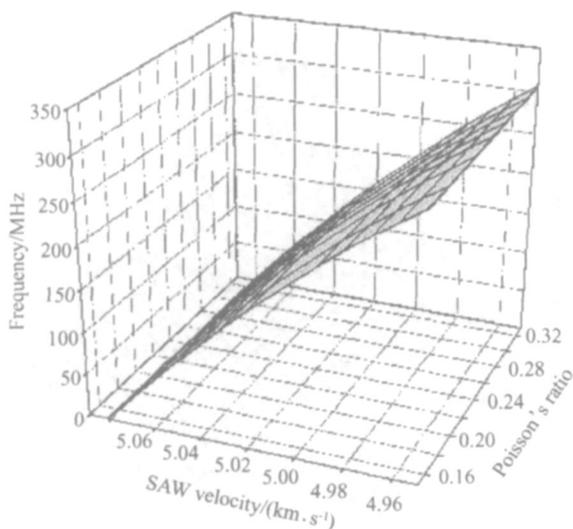


图 7 表面波沿 Si[110]晶向传播时低  $k$  薄膜泊松常数对色散曲线的影响  $E_f = 4 \text{ GPa}$ ,  $\rho_f = 1.0 \text{ g/cm}^3$ ,  $h_f = 500 \text{ nm}$

Fig. 7 Effects of the Poisson's ratio of low- $k$  film on the dispersive curves when SAWs propagating along the Si [110] direction  $E_f = 4 \text{ GPa}$ ,  $\rho_f = 1.0 \text{ g/cm}^3$ ,  $h_f = 500 \text{ nm}$

薄膜中,相同表面波传播速度所对应的频率差别很小.例如,泊松常数分别为 0.25 和 0.33 的薄膜中,传播速度均为  $4.95 \text{ km/s}$  时,频率相差仅有 1.06%.由于泊松常数对色散关系影响很小,实际计算中低

$k$  薄膜泊松常数取为 0.26.

以上给出了理论色散曲线的一些算例,主要参数有低  $k$  薄膜的杨氏模量  $E_f$ 、厚度  $h_f$ 、密度  $\rho_f$  和泊松常数  $\nu_f$  等.其中薄膜材料的泊松常数对频散特性影响非常小,可参考相关文献取适当值;厚度  $h_f$  和密度  $\rho_f$  可分别由分光椭偏仪和 X 射线反射等方法精确测出,作为已知条件代入.假设不同的薄膜杨氏模量值就可以得到对应的一系列理论色散曲线.通过实验测量同样可以得到包含了薄膜的杨氏模量等机械性能信息的色散曲线.将实验测量曲线与理论色散曲线拟合,就可以确定出所测样品的杨氏模量.

### 3 结论

本文给出了表面波在 Si(100)衬底上淀积低  $k$  薄膜的分层结构中分别沿 Si[100]和[110]晶向传播时色散关系的理论推导.得到了低  $k$  薄膜的杨氏模量、密度、厚度和泊松常数对色散关系的影响结果.低频表面波能够穿透更深的距离而进入衬底材料,其波速接近于在体硅衬底材料中的速度传播.随着频率的增加,低  $k$  薄膜的杨氏模量越低、密度越大、厚度越大表面波的速度衰减就越快.薄膜的泊松常数对色散关系影响不大.本文讨论的表面波方法全面计入了薄膜材料和衬底材料的相关参数,消除了硬质衬底材料对薄膜的不确定影响.因此,利用表面波的频散特性来测定未来 ULSI 互连系统中低  $k$  薄膜机械特性是准确的,且对材料无损伤.

### 参考文献

- [1] The 2004 edition of the International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS 2004), [http://public.itrs.net/common/2004update/2004\\_08\\_interconnect.pdf](http://public.itrs.net/common/2004update/2004_08_interconnect.pdf)
- [2] Wang Yangyuan, Kang Jinfeng. Development of ULSI interconnect integration technology—copper interconnect with low  $k$  dielectrics. Chinese Journal of Semiconductors, 2002, 23(11):1121 (in Chinese) [王阳元,康晋锋.超深亚微米集成电路中的互连问题——低  $k$  介质与 Cu 的互连集成技术.半导体学报, 2002, 23(11):1121]
- [3] Flannery C M, Murray C, Streiter I, et al. Characterization of thin-film aerogel porosity and stiffness with laser-generated surface acoustic waves. Thin Solid Films, 2001, 388(1/2):1
- [4] Hay J L, Pharr G M. ASM handbook, mechanical testing and evaluation. ASM International, 2000, 8:232
- [5] Flannery C M, Whitfield M D, Jack R B. Surface acoustic

- wave properties of freestanding diamond. IEEE Trans Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2004, 51(3): 368
- [ 6 ] Flannery C M, Whitfield M D, Jackman R B. Surface acoustic wave properties of freestanding diamond films. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2004, 51(3): 368
- [ 7 ] Xiao X, Hata N, Yamada K, et al. Determination of the mechanical properties of thin periodic porous silica films by laser-generated surface acoustic wave technique. 2003 Int 'l Conf Solid State Devices and Materials (SSDM), 2003: 84
- [ 8 ] Xiao X, Hata N, Yamada K, et al. Mechanical properties of periodic porous silica low- $k$  films determined by the twin-transducer surface acoustic wave technique. Review of Scientific Instruments, 2003, 74(10): 4539
- [ 9 ] Farnell G W, Adler E L. Physical acoustics. New York and London: Academic Press, 1972, 9: 35
- [ 10 ] Schneider D, Schwarz T, Scheibe H J, et al. Non-destructive evaluation of diamond-like carbon films by laser induced surface acoustic waves. Thin Solid Films, 1997, 295: 107

## Dispersive Characteristics of Surface Acoustic Waves for Measuring Mechanical Properties of Low- $k$ Dielectrics Used in ULSI\*

Li Zhiguo, Xiao Xia, Zhang Xinhui, and Yao Suying

(School of Electronic and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The dispersive characteristics of SAW propagating along both the Si[100] and [110] directions on the layered structure, with the low- $k$  thin film deposited on the silicon (100) substrate, were studied in detail. The theoretical equations to obtain dispersion curves of SAW were derived. The effects of the Young's modulus, density, thickness, and Poisson's ratio of the low- $k$  films on the dispersive characteristics were found.

**Key words:** low- $k$  dielectrics; SAW; dispersive characteristics; Young's modulus

**EEACC:** 2570; 2800; 7320G

**Article ID:** 0253-4177(2005)10-2032-06

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60406003), the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars, and the State Education Ministry of China

Li Zhiguo male, was born in 1977, PhD candidate. His research interest is ULSI interconnect system.

Xiao Xia female, was born in 1971, associate professor, PhD. Her main research interests include ULSI interconnection and nanocrystalline silicon device.

Yao Suying female, was born in 1947, professor, advisor for PhD candidates. Her research interests are semiconductor devices, MEMS system and technology, and ASIC design.

Received 2 February 2005, revised manuscript received 9 May 2005

© 2005 Chinese Institute of Electronics