

声表面波标签中金属栅阵的耦合模理论

肖 夏,常志刚

(天津大学 电子信息工程学院,天津 300072)

摘 要:耦合模理论广泛应用于声表面波器件模拟和设计中。该文利用有限元分析软件与耦合模(COM)理论分析了金属栅阵中声表面波的传播特性,得到栅极厚度为不同值时声表面波在短路栅或开路栅中传播时的频散特性与耦合系数、相对波数以及衰减常数等耦合参数,说明随着栅极厚度的增大,短路栅特性下声表面波的衰减系数与阻带宽度会随之减小,而开路栅则相反。

关键词:耦合模理论;声表面波标签;金属栅;频散特性;耦合参数

中图分类号:TN65 **文献标识码:**A

Coupling-of-Modes Theory of Metallic Gratings for SAW Tags

XIAO Xia, CHANG Zhigang

(Electronics and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The coupling-of-modes (COM) theory is widely used in the design and simulation of surface acoustic wave devices. The propagation characteristics of SAW in the periodic metallic grating structures have been analyzed by using the finite element analysis software and COM theory. The coupling parameters of the dispersion characteristics, coupling coefficient, relative wave number and attenuation coefficient are obtained for different gate thickness in a short-circuit or open circuit gate. With an increase in the gate thickness, the attenuation coefficient and stop-band-width will reduce in a short-circuit gate, but the open circuit gate is the opposite.

Key words: coupling-of-modes theory; SAW tag; metallic grating; dispersion characteristics; COM parameter

0 引言

声表面波(SAW)是一种传播于晶体表面的机械波,其声速仅为电磁波速的十万分之一,广泛应用于雷达、通信、导航、传感器、遥测以及识别定位等领域。目前已用的 SAW 器件主要包括滤波器、延迟线、谐振器、混频器、放大器、卷积器、相关器、编码器、识别标签和传感器等^[1-4]。

SAW 标签一般均位于读写器的远场作用范围内,其工作原理与雷达系统相似:读写器发射的电磁波由标签上连接叉指换能器(IDT)的天线接收,通过逆压电效应产生 SAW,SAW 由反射栅序列反射至 IDT,并由 IDT 通过压电效应转化为电磁波向空间发射,读写器接收信号并解码^[5]。

SAW 标签不涉及载流子运动,它具有以下特点^[6]:

- 1) 真正无源,不需维护,使用寿命长。
- 2) 读取范围大,可达数米,可用于金属和液体产品。
- 3) 标签芯片与天线匹配简单,制作工艺成本低。
- 4) 能识别静止物体和速度达 300 m/h 的高速运动物体。
- 5) 可在高温差(-200~+300 °C)、强电磁干扰等恶劣环境下使用。
- 6) 可同时确定标签附着物体的位置和运动状态。

自 1976 年 Suzuki, Haus 等将耦合模(COM)理论从光纤和微波应用中引入到 SAW 领域后,该理论一直是国际核心期刊或会议中研究讨论的重要内容^[7-8]。本文利用 COM 理论分析了 SAW 在金属栅阵中的传播特性,给出了详细的理论分析过程和

收稿日期:2011-06-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(NSFC 60876072);天津科委重点基金资助项目(10JCZDJC15500)

作者简介:肖夏(1971-),女,天津人,教授,博士生导师,主要从事超大规模集成电路互连布线系统、超宽带微波探测目标成像、MEMS 设计与模拟的研究。E-mail: xiaxiao@tju.edu.cn

COM 参数的计算方法,并讨论了栅极厚度对 COM 参数的影响。

1 COM 理论

COM 理论最早应用于分析光纤波导的特性,现用于分析声波在周期为 p 的周期性栅阵中的传播特性。假设周期性栅阵无限长,且每一周期栅都与其他周期栅等效,那么声波在任一个周期内的场分布 $u(x)$ 与其他周期内的场分布就必须相同。即

$$u(x_1 + p) = u(x_1) \exp(-j\beta p) \quad (1)$$

式中: β 为栅中传播的声波波数; p 为栅的周期。

图 1 为周期耦合栅阵,当两栅极距离小时, u_1 和 u_2 就会发生耦合,如果耦合很小,可表示为

$$\frac{\partial u_1(x)}{\partial x} = -j\beta u_1(x) - jku_2(x) \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_2(x)}{\partial x} = -j\beta u_2(x) - jk'u_1(x) \quad (3)$$

式中: $u_1(x)$ 和 $u_2(x)$ 为声波在周期栅内的场分布; k 和 k' 为两个栅极耦合作用的参数,称为互耦系数,若两个栅极相同,则 $k = k'$ 。

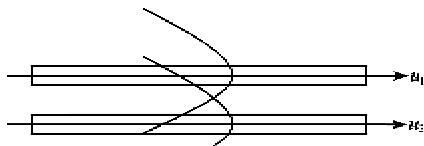


图 1 耦合栅阵

由布喇格反射条件^[10]知,当 $|\beta - 2\pi M/p| \approx |\beta|$ 时产生第 M 级布喇格反射,这说明最明显的耦合发生在波数为 β 的分量和波数为 $\beta - 2\pi M/p$ 的分量之间,其他分量的耦合相对较小。假设 $u_{\pm}(x) = U_{\pm}(x) \exp(\mp j \frac{\pi M}{p} x)$,代入式(2)、(3)可得

$$\frac{\partial U_+(x)}{\partial x} = -j\left(\beta - \frac{\pi M}{p}\right)U_+(x) - jkU_-(x) \exp(+2\pi j Mx/p) \quad (4)$$

$$\frac{\partial U_-(x)}{\partial x} = +j\left(\beta - \frac{\pi M}{p}\right)U_-(x) + jk'U_+(x) \exp(-2\pi j Mx/p) \quad (5)$$

短路栅与开路栅是两个典型的金属栅。由于反射栅采用的是压电晶体基片,因此金属栅除激励机械波反射外,还会激励电反射,即与声表面波一起传播的电场被导电膜短路,这会干扰 SAW 的传播,栅阵的反射特性在很大程度上与栅极间电气连接有关^[9]。

短路栅在实际的几何结构上是有电极金属棒连

接的,栅极之间并联连接。考虑短路栅的几何结构特性,其耦合方程式可表示为

$$\frac{\partial U_+(x)}{\partial x} = -j\theta_u U_+(x) - jk_{12} U_-(x) \quad (6)$$

$$\frac{\partial U_-(x)}{\partial x} = +j\theta_u U_-(x) + jk'_{12} U_+(x) \quad (7)$$

式中: $\theta_u = \beta - \pi M/p$ 为由布喇格反射得到的波数 β 的偏移,称为失谐系数; $k_{12} = k \exp(+2\pi j Mx/p)$ 和 $k'_{12} = k \exp(-2\pi j Mx/p)$ 为互耦系数; $U_+(x)$ 和 $U_-(x)$ 分别为沿 $+x$ 方向和 $-x$ 方向传播的声波的模值。

现在求解并列线性微分方程(6)、(7),定义一个微分算符 $\partial/\partial x \equiv \Delta$,则用矩阵形式表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta + j\theta_u & jk_{12} \\ -jk'_{12} & \Delta - j\theta_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_+(x) \\ U_-(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

为使方程存在非零解,左边的矩阵系数行列式必须为 0,所以它的解为

$$\Delta = -j\sqrt{\theta_u^2 - |k|^2} = -j\theta_v \quad (9)$$

式中: $k = k'$; θ_v 为金属栅的频散特性。

因此,短路栅的频散特性

$$\theta_v = \sqrt{\theta_u^2 - |k|^2} \quad (10)$$

开路栅的每条栅都是电气独立的,其频散特性还会受到激励电源的影响。在考虑激励电源的影响后,开路栅的耦合方程可表示为

$$\frac{\partial U_+(x)}{\partial x} = -j\left(\theta_u - \frac{4|\xi|^2}{\omega C}\right)U_+(x) - j\left(k_{12} - \frac{4\xi^2}{\omega C}\right)U_-(x) \quad (11)$$

$$\frac{\partial U_-(x)}{\partial x} = +j\left(\theta_u - \frac{4|\xi|^2}{\omega C}\right)U_-(x) + j\left(k'_{12} - \frac{4\xi^2}{\omega C}\right)U_+(x) \quad (12)$$

式中: ξ 为激励效率的一个系数,称为转换系数; C 为单位长度电极的静电电容。

其频散特性为

$$\theta_v = \sqrt{\left(\theta_u - \frac{4|\xi|^2}{\omega C}\right)^2 - \left|k - \frac{4\xi^2}{\omega C}\right|^2} \quad (13)$$

假设耦合参数不随频率变化, ω_s^{\pm} 和 ω_o^{\pm} 分别为短路栅和开路栅的阻带边界频率,由式(10)、(13)得

$$\omega_s^{\pm}/v_{ref} - M\pi/p + k_{11} = \pm |k_{12}| \quad (14)$$

$$\omega_o^{\pm}/v_{ref} - M\pi/p + k_{11} = |4\xi^2/\omega C| \pm |k_{12} - 4\xi^2/\omega C| \quad (15)$$

式中: v_{ref} 为 SAW 的参考波速,它常选用自由表面上

的 SAW 波速； k_{11} 为自耦系数。

故有

$$k_{11} = M\pi/p - (\omega_s^+ + \omega_s^-)/2v_{ref} \quad (16)$$

$$k_{12} = s(\omega_s^+ - \omega_s^-)/2v_{ref} \quad (17)$$

$$|4\xi^2/k_{12}\omega C| = (\omega_o^+ + \omega_o^- - \omega_s^+ - \omega_s^-)/(\omega_s^+ - \omega_s^-) \quad (18)$$

$$|1 - 4\xi^2/k_{12}\omega C| = (\omega_o^+ - \omega_o^-)/(\omega_s^+ - \omega_s^-) \quad (19)$$

其中

$$s = \begin{cases} 1 & \omega_s^+ = \omega_o^+ \text{ 或 } \omega_s^+ = \omega_o^- \\ -1 & \omega_s^- = \omega_o^- \end{cases} \quad (20)$$

相对波数

$$\beta_s(k_{11}, k_{12}, v_{ref}) = M\pi/p + \sqrt{(\omega/v_{ref} - M\pi/p + k_{11})^2 - k_{12}^2} \quad (21)$$

衰减常数

$$\alpha = 40\pi lge \cdot \frac{\text{Im}(\beta)}{\text{Re}(\beta)} \quad (22)$$

2 模拟与仿真

本节使用 ANSYS 软件对开路与短路金属栅的 COM 参数进行分析。图 2 为一个周期的金属栅，而所要研究的开路栅与短路栅模型的具体结构尺寸如表 1 所示。

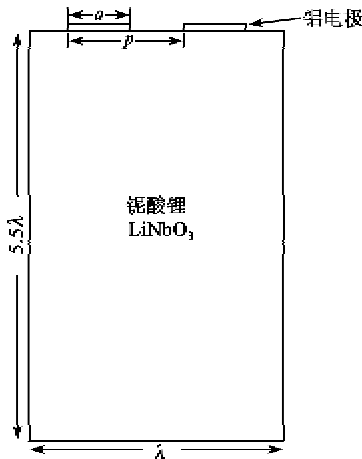


图 2 金属栅的模型结构

表 1 金属栅模型尺寸

名称	尺寸
波长 $\lambda/\mu\text{m}$	4
金属栅周期 $p/\mu\text{m}$	2
栅极宽度 $a/\mu\text{m}$	1
基底厚度 $H/\mu\text{m}$	22
栅极厚度 $h/\mu\text{m}$	0.04、0.06、0.08、0.10、0.12
$(h/p)/\%$	2、3、4、5、6

由于 SAW 的主要能量均集中于基底的一个波

长内，因此基底的厚度设为 5.5 倍波长。为了反映金属栅的栅极厚度对 COM 参数的影响，将 h 分别设置为 0.04 μm 、0.06 μm 、0.08 μm 、0.10 μm 、0.12 μm ，即 h/p 分别设为 2%~6%。

针对短路与开路特性的不同，在不同金属栅极厚度下做模态响应分析。短路特性的边界条件为电位能 $V=0$ ，开路特性的边界条件为表面电荷密度 $\rho_s=0$ 。表 2 为利用 ANSYS 软件对不同金属栅极厚度的开路栅与短路栅的仿真结果。为了研究不同栅极厚度 h (或 h/p) 条件下谐振频率 f 对耦合参数的影响，现对谐振频率进行了归一化处理，得到相对频率 f_p/v_{ref} (其中取 $v_{ref}=3\ 813\ \text{m/s}$)。

表 2 ANSYS 仿真结果

类型	$(h/p)/\%$	谐振频率/ MHz	相速度/ (m/s)	f_p/v_{ref}
短路	2	930.00	3 720	0.487 8
	3	928.32	3 713	0.486 9
	4	926.52	3 706	0.486 0
	5	922.30	3 689	0.483 7
	6	917.19	3 669	0.481 1
	开路	2	954.50	3 813
3		951.53	3 806	0.499 0
4		949.68	3 799	0.498 0
5		945.38	3 781	0.495 8
6		940.12	3 760	0.493 0

3 COM 参数的计算与分析

一旦决定频散关系的阻带边界频率 ω_o^+ 、 ω_o^- 、 ω_s^+ 和 ω_s^- 后，利用式(16)、(17)可求得耦合理论参数 k_{11} 、 k_{12} ；将所求得的 k_{11} 、 k_{12} 代入 $\theta_n = \beta - \pi M/p = \omega/v_{ref} - \pi M/p + k_{11}$ 以及式(10)、(13)，可求得短路栅与开路栅的频散关系曲线；同时由式(21)、(22)也可得到相对波数和衰减常数。

图 3、4 为相对自耦系数 k_{11} 和相对互耦系数 k_{12} 与 h/p 的关系曲线。由图可见，随着 h/p 值的变大，铌酸锂 (LiNbO_3) 的 k_{11} 会变大， k_{12} 则变小。

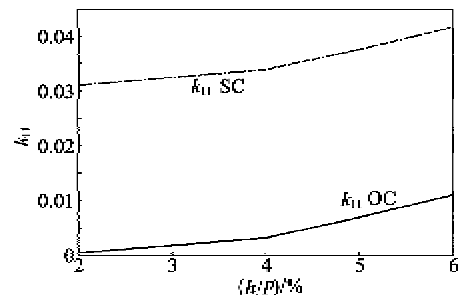


图 3 不同栅极厚度下的 k_{11}

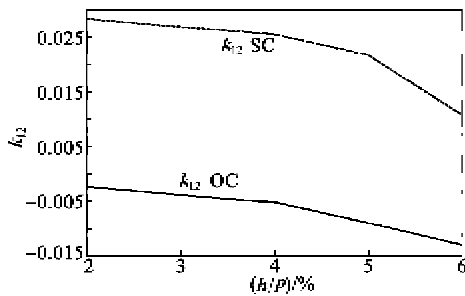


图4 不同栅极厚度下的 k_{12}

图5为栅极厚度 $h=0.12 \mu\text{m}$ (即 $h/p=6\%$) 时开路栅与短路栅的相对波数 $(\beta_2 p/\pi - 1)$, 横轴为相对频率 $(2fp/v_{\text{rad}} - 1)$ 。图中圆弧形曲线部分表示相对波数的虚部, 直线部分为相对波数的实部。假如金属栅的阻带边界频率够准确, 可以发现不论是在短路栅或开路栅特性下, 所计算的相对波数的实部值与虚部值的位置重合。

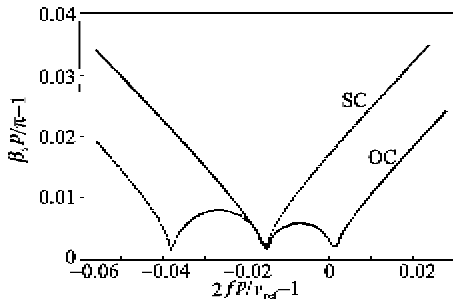


图5 $h=0.12 \mu\text{m}$ 下的 $\beta_2 p/\pi - 1$

图6、7为不同栅极厚度下的短、开路栅的相对波数。

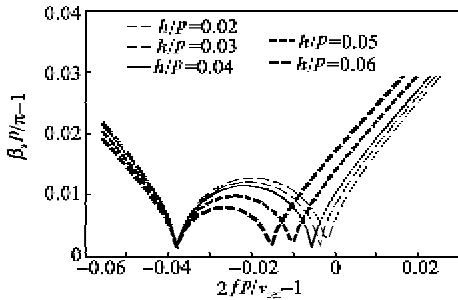


图6 不同栅极厚度下短路栅的相对波数

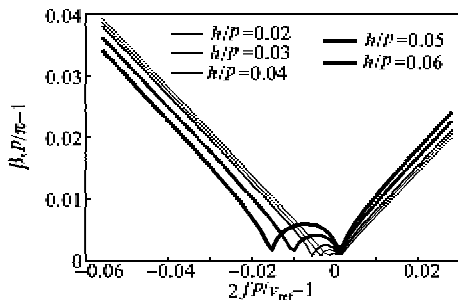


图7 不同栅极厚度下开路栅的相对波数

由图6、7可见, 随着 h/p 的增大, 短路栅的相

对波数的虚部相对应变小, 相反地, 开路栅的相对波数的虚部值逐渐增大。

图8为不同栅极厚度下的衰减常数 α 。由图可见, 当 h/p 越来越大时, 短路栅特性下的 α 会随之减小, 而开路栅特性下的 α 会随之变大。

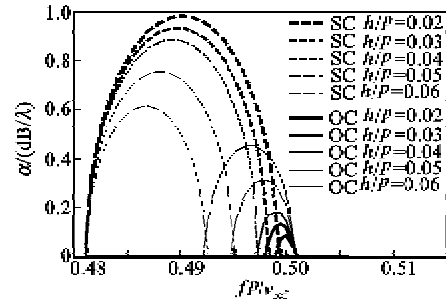


图8 不同 h/p 的 α

图9为不同栅极厚度下金属栅的频散特性。由图可见, 随着 h/p 的增大, 短路栅的虚部逐渐减小, 而开路栅的虚部逐渐增大, 与相对波数的变化一致, 即短路栅的阻带宽度随着 h/p 的增大而减小, 而开路栅则相反。

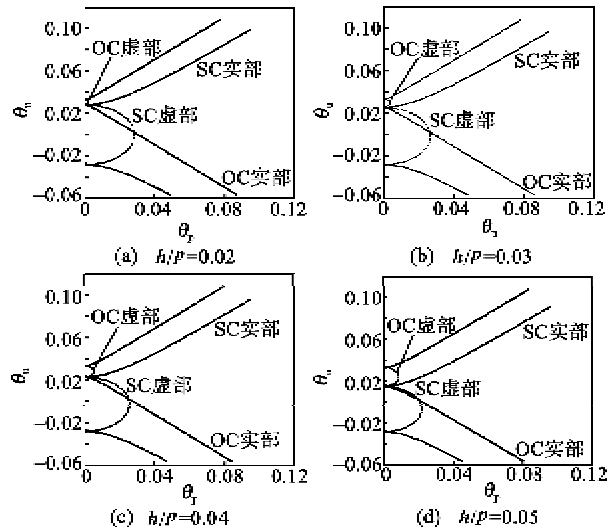


图9 不同栅极厚度下金属栅的频散特性

4 结束语

本文利用耦合理论对声表面波在金属阵栅中的传播特性进行了分析, 以钽酸锂压电基片上的开路栅与短路栅为例, 利用 ANSYS 软件对反射栅模型进行仿真, 得到了不同栅极厚度条件下声表面波在金属短路栅或开路栅中传播时的频散特性与耦合系数, 相对波数以及衰减常数等耦合参数。通过对比不同栅极厚度与耦合参数的关系曲线, 表明短路栅特性下声表面波的衰减系数与阻带宽度会随之减小, 而开路栅则恰恰相反。

(下转第 493 页)