激光刀口法声表面波分布图像化系统

文继国[1,2]，张玉兴[1]

(1. 电子科技大学电子工程学院 成都 610054; 2. 千叶大学工学部 日本 千叶 2638522)

【摘要】介绍了激光刀口法声表面波(SAW)分布图像化高速测量系统的原理和系统构成，并进行了测试验证。通过将声表面波传播时引起的被测件表面微变转换为入射到光电二极管的光量变化，转换出的电信号下变频到中频进行检波和鉴相后输入到高速数据采集器，实现了约20 min测试2 620(*x*)×410(*y*)点阵，获取的声表面波振幅和相位数据重构声表面波分布的图像。

关 键 词 正交检波; 激光刀口法; 声表面波; 波数域分析

中图分类号 TP271.4 **文献标识码** A

Visualization System for SAW Distribution Based on Knife-Edge Laser Probe

WEN Ji-guo[1,2] and ZHANG Yu-xing[1]

(1. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

2. Department of Electronics and Mechanical Engineering, Chiba University Chiba Japan 638522)

Abstract This paper focuses on the theory, setup, and experiment of a visualization system for surface acoustic wave (SAW) distribution based on knife-edge laser probe. The surface micro-bend caused by the SAW leads to variations of incident light to an optical detector. The converted electrical signal is down-converted to intermediate frequency for detection, and the output signals including both the amplitude and phase are fed to the high-speed data-logger. Data acquisition of 2 620(*x*)×410(*y*) points in 20 min is realized, then image can be formed from the data.

Key words I/Q detector; knife-edge laser probe; SAW; wave number domain

声表面波器件体积小、重量轻、成本低、一致性好、性能优良以及可大规模生产，在快速发展的移动通信设备中获得了广泛的应用。在不断提高器件性能的过程中，使用电子显微镜、原子力显微镜、激光等方法的探测技术得到了发展并广泛应用于日益复杂的声表面波器件的特性提取、故障诊断和声表面波分布的图像化[1-8]。

在各种激光测试方法中，刀口法具有测量声表面波的幅度和相位且不易受外部低频振动影响的优点，但长时间的测量过程成了该方法的不足。

激光刀口法高速声表面波分布图像化系统通过将包含声表面波振幅和相位信息的电信号下变频到中频进行正交检波和鉴相，平台在水平方向上连续移动，输出的数据由高速数据采集器进行提取，实现了在20 min内获取的2 620(*x*)×410(*y*)点阵的声表面波幅度数据，通过计算机将该数据转化为图像。由于两个临近测量点的距离相同，测量出的实二维空间声表面波分布通过二维快速傅里叶变换(FFT)转换到波数域进行分析[9-10]，能够获得更多声表面波的传播特征，并在去除电磁直通的干扰和光反射率的影响后可重构声表面波场分布图像。

1 激光刀口法原理

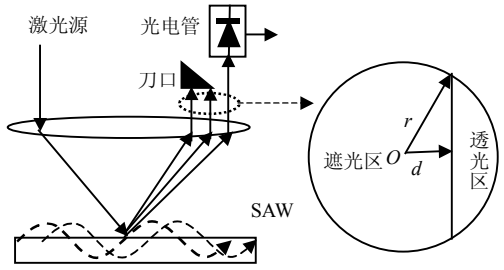

图1 刀口法原理

刀口法原理如图1所示。激光经过光学组件后由大光圈的物镜汇聚成远小于被测声表面波波长的光点入射到被测声表面波器件的表面，反射光经过起

收稿日期：2007 – 11 – 22; 修回日期：2008 – 03 – 19

作者简介：文继国(1965 –)男，博士生，主要从事射频电路与系统方面的研究.

刀口作用的棱镜后入射到光电二极管，声表面波传播时器件表面的微变引起光反射角度改变，入射到光电二极管的光量发生改变。为便于分析，将图1中的刀口视为一个遮挡光束的物体。

没有刀口遮挡前光束横截面是一个圆。设光轴中心为O，半径为r，遮光区与透光区的分界线到O点的距离为d，光强为P_0，则入射到光检测器的光量为：

$$P = P_0\left\{r^2\arccos(\frac{d}{r}) - d\sqrt{r^2-d^2}\right\} \tag{1}$$

当有声表面波传播时，器件表面发生微变使反射光的光轴发生移动，移动量正比于器件表面发生的微变，距离d为：

$$d = d_0 + A\cos(\omega_s t - \beta x) \tag{2}$$

式中　d_0为常数；A为声表面波振幅；ω_s为角频率；x为传播方向；β为波数。

将式(2)代入式(1)后作麦克劳林展开，并考虑到$r > d_0 >> A$，有：

$$\arccos(\frac{d}{r}) = \arccos[\frac{d_0 + A\cos(\omega_s t-\beta x)}{r}] \approx \arccos(\frac{d_0}{r}) - \frac{1}{\sqrt{r^2-d_0^2}}A\cos(\omega_s t-\beta x) \tag{3}$$

$$\sqrt{r^2-d^2} = \sqrt{r^2-d_0^2-2Ad_0\cos(\omega_s t-\beta x)-A^2\cos^2(\omega_s t-\beta x)} \approx \sqrt{r^2-d_0^2} - \frac{d_0}{\sqrt{r^2-d_0^2}}A\cos(\omega_s t-\beta x) \tag{4}$$

将式(3)、式(4)代入式(1)中得到入射到光电二极管的光量为：

$$\begin{aligned}P(t,x) = {} & p_0[r^2\arccos(\frac{d_0}{r}) - \frac{r^2}{\sqrt{r^2-d_0^2}}A\cos(\omega_s t-\beta x)] - \\ & p_0[d_0 + A\cos(\omega_s t-\beta x)][\sqrt{r^2-d_0^2} - \\ & \frac{d_0}{\sqrt{r^2-d_0^2}}A\cos(\omega_s t-\beta x)] \approx \\ & p_0[r^2\arccos(\frac{d_0}{r}) - d_0\sqrt{r^2-d_0^2} - \\ & 2\sqrt{r^2-d_0^2}A\cos(\omega_s t-\beta x)] = \\ & p_0[a + bA\cos(\omega_s t-\beta x)]\end{aligned} \tag{5}$$

式中　$a = r^2\arccos(\frac{d_0}{r}) - d_0\sqrt{r^2-d_0^2}$；　$b = -2\sqrt{r^2-d_0^2}$。

光电二极管将光量的变化转化为电信号输出，通过对电信号中含有声表面波振幅和相位信息的分量$CbA\cos(\omega_s t-\beta x)$进行同步检波，提取声表面波的振幅和相位数据，由数据转化为图像，其中C为由光电二极管的光电转换效率、光的强度以及光束的几何特征等决定的常数。

2　系统构成

从含有声表面波振幅和相位信息的电信号中提取出声表面波的振幅和相位数据的方法之一是使用矢量网络分析仪，即矢量网络分析仪作为被测声表面波器件的激励信号源，光电二极管输出的电信号输入到该矢量网络分析仪，测量出的振幅和相位信息数据通过矢量网络分析仪的LAN接口传输到计算机。实际测量表明，由于传输需要时间，测量过程只能以步进移动的方式进行，每测量两个点耗时1 s左右，测量1 000(x)×100(y)点阵需要24 h以上。

本文构建的系统原理图如图2所示。两台网络分析仪分别作为射频信号源和本振，射频信号经功率分配器(ZFRSC-42)分成两路，一路输入到被测声表面波器件作为激励信号，光电二极管转换出的电信号经射频低噪声放大器(8447D, A18)放大后输入到混频器(ZFM-4)与本振信号混频得到中频信号，经过滤波器后到正交检波器(As-902)进行检波，输出的数据由高速数据采集器(Hioki 8841)进行数据采集；另一路射频信号经过类似的过程以及相位补偿后，作为正交检波器的参考信号，系统的实物图如图3所示。

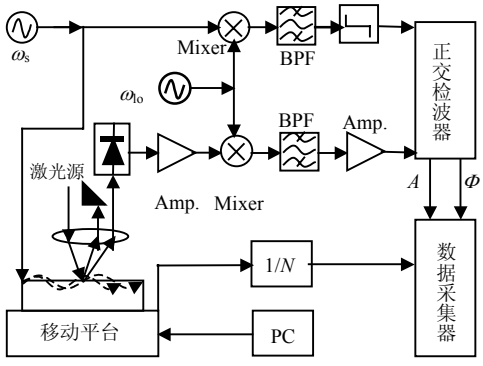

图2　系统构成原理图

计算机配合控制器对移动平台的移动状态进行控制。测量过程中平台沿水平方向从设置的起点移动到终点一次完成，然后反向移动回到本次的起点，再沿水平面内的垂直方向移动设置的步长后，沿水平方向进行同样的移动过程，直到被测区域的二维扫描完成。

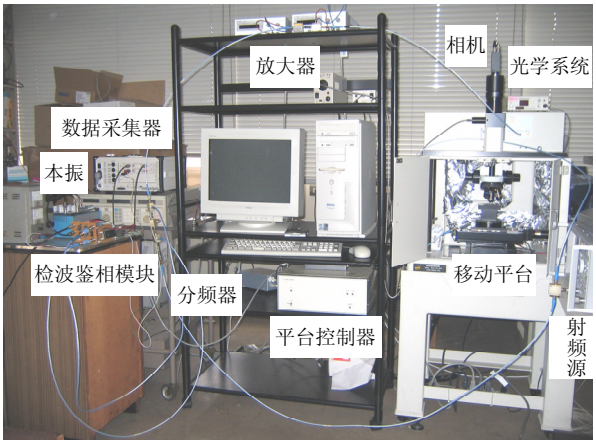

图3 系统构成实物图

移动平台上装有20 nm分辨率的刻线尺，水平方向上每移动40 nm输出一个脉冲，经N次分频器(ATiny13)输入到数据采集器作为触发信号。N值决定两次数据采集点在水平方向上的位置间隔，例如，当N=25时，两次数据采集点沿x方向间隔为1 μm。

光学系统中的显微镜筒上部安装的CCD相机将激光光点照射到的器件表面的实物图像传送到计算机上显示，用于观察测量过程。

3 实验验证

根据上述原理构建的系统用于测量Al电极ST切石英基片单端对声表面波谐振器中声表面波的分布。图4为该谐振器的输入阻抗随频率变化的特性，除了b点为433.000 MHz的主谐振频率外，还有寄生谐振点a、c、d，对应的频率分别为431.625、433.510、434.635 MHz。被测谐振器实物图的显微图片如图5所示，图中两端是反射器，中间部分是叉指换能器(IDT)。

测量前根据实物图中被测区域大小和测量精度，设置x方向的起点、终点、分频数N值以及y方向的步长，并进行位置校准。射频输入信号的频率分别设定为各个谐振点的频率，相应地选择本振源的频率使下变频后的中频频率为0.455 MHz，分别测量以上各频率点。测量系统中的使用可调制激光源的激光波长为635 nm，取样点间距1 μm，每一频率点测量过程大约需要20 min，扫描2 620(x)×410(y)点阵。

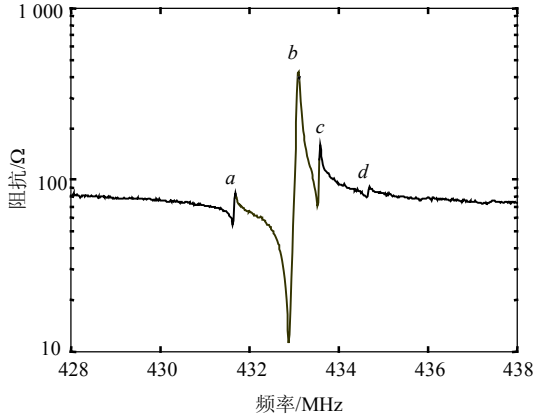

图4 被测谐振器的阻抗频率特性

图5 被测谐振器实物的显微图片

根据测量数据获得的声表面波的分布图像如图6所示，明暗程度对应于声表面波的强弱。由图可见，在主谐振点b，声表面波限定在IDT区域，幅度沿y方向平缓变化，Al电极与石英基片的光反射系数不同形成了平行于y方向的细条；在寄生谐振点a，叉指换能器区域水平方向是3个亮团，这表明存在高次纵向模式谐振；而在寄生谐振点c和d，IDT区域沿着水平方向排列的3个亮带和5个亮带表明存在高次横向模式谐振。

由于两个测量点之间的距离相同，测量出的实二维空间声表面波的分布数据通过二维快速傅里叶变换(FFT)转换到波数域进一步分析，从而计算波的传播方向、传播速度、包络提取等。在波数空间上还能够去除电磁直通形成的干扰以及叉指换能器与基片由于光反射率不同的而产生的影响后，通过快速傅里叶逆变换(IFFT)重构声表面波的分布图像，在433.000 MHz频段时重构的声表面波场分布图像如图7所示。

该方法可测量的频率上限主要由高速光电二极管的截止频率决定，同时信号的信噪比对测量也有很大的影响。在对1 GHz以上声表面波分布的测量中，采用如图8所示的测量系统，即对激光源进行光强调制，然后用双相位锁相放大器(SR844)检测差频频率的信号，从而提取振幅和相位数据。

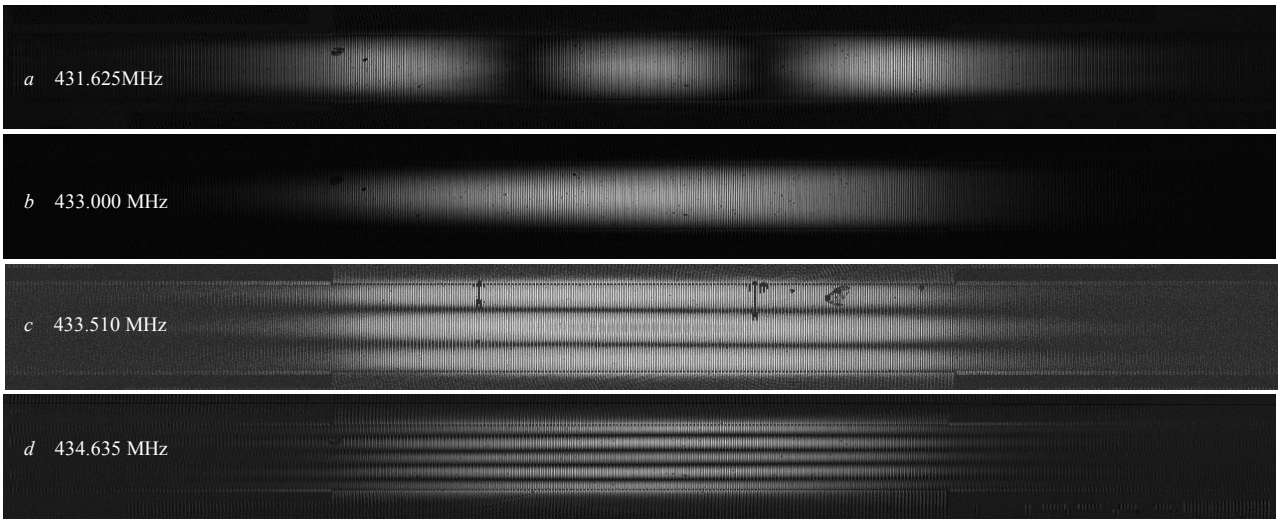

图6　被测谐振器在各频率点声表面的波场分布(幅度)

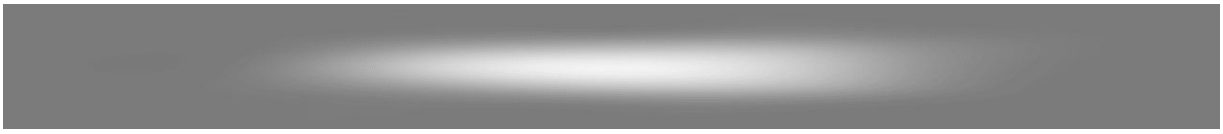

图7　去除电磁直通干扰和光反射率影响后的波场分布(433.000 MHz)

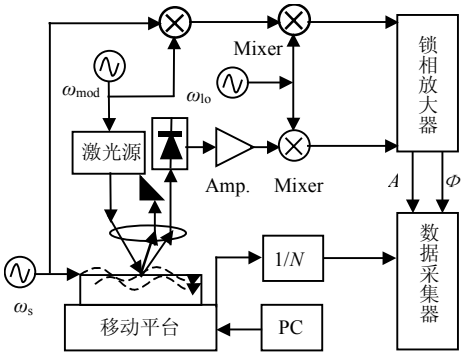

图8　改进的测量系统

4　结 束 语

激光刀口法声表面波分布图像化系统，将含有声表面波信息的电信号下变频到中频进行检波和鉴相，移动平台在水平方向上连续移动，测量过程需要的时间显著缩短，通过测量单端对声表面波谐振器中声表面波的分布，证实了系统的有效性。

参 考 文 献

[1] ADLER R, KORPEL A, DESMARES P. An instrument for making surface waves visible[J]. IEEE Trans Sonics and Ultrason, 1968, 15(3): 157-160.

[2] STEGEMAN G I. Optical probing of surface waves and surface wave devices[J]. IEEE Trans Sonics and Ultrason, 1976, 23(1): 33-36.

[3] ENGAN H. Phase sensitive laser probe for high-frequency surface acoustic wave measurements[J]. IEEE Trans Sonics and Ultrason, 1978, 25(6): 372-377.

[4] JEN S, HARTMANN C S. Recent advances in SAW laser probe[C]//Proc IEEE Ultrason Symp. Vancouver, Canada: IEEE, 1996.

[5] HOLM A, WEIGEL R, RUSSERL P, et al. A laser probing system for characterization of SAW propagation on $LiNbO_3$, $LiTaO_3$ and quartz[J]. IEEE MTT-S Digest, 1996: (3): 1541-1544.

[6] WAKANA S, MIYAMOTO A, ITO A. Backside observation technique for SAW distribution under electrodes[C]//Proc IEEE Ultrason Symp. Hawaii, USA: IEEE, 2003.

[7] CHIBA T. Optical measurement and numerical analysis of SAW propagation[C]//Proc IEEE Ultrason Symp. Hawaii, USA: IEEE, 2003.

[8] KOKKONENL K, KNUUTTILAL J V, PLESSKY V P, et al. Phase-sensitive absolute-amplitude measurements of surface waves using heterodyne interferometry[C]//Proc IEEE Ultrason Symp. Hawaii, USA: IEEE, 2003.

[9] HASHIMOTO K, KAMIZUMA H, OMORI T, et al. High-speed and phase-sensitive laser probe for SAW device characterization[C]//Proc Third International Acoustic Wave Device for Furture Mobile Communication Systems Symp. Chiba, Japan: [s.n.], 2007.

[10] HASHIMOTO K, KAMIZUMA H, OMORI T, et al. Wavenumber domain analysis of two-dimensional SAW images captured by phase-sensitive laser probe system[J]. IEEE Trans Ultrason, Ferroelec, and Freq Contr, 2007, 54(5): 1072-1075.

编　辑　税　红