

광학적 측정방법에 의한 표면 탄성파의 감쇠에 관한 연구

유 일 현*, 김 동 일**
*세명대학교 물리학과
**인하대학교 전자재료공학과

요 약 고체 시료를 대상으로 하여 silicon wafer에는 90° wedge형 진동자를 사용하고 압전재료인 LiTaO₃에는 interdigital transducer(IDT)를 사용하였으며, knife edge를 이용한 광학적 검지(optical probing)법을 써서 표면탄성파의 발생 및 측정하는 기법으로써 재료에서의 표면탄성파의 감쇠를 검출하는 방법을 연구하였다. IDT1 및 IDT2로는 20.8 MHz와 14.5 MHz를, 90° wedge형 진동자로부터는 20.0 MHz의 표면탄성파를 발생시켰으며 표면탄성파로 생기는 표면의 굴곡을 검출하는데 He-Ne laser beam을 이용하였다. Optical chopper로 변조시킨 laser beam을 같은 주파수로 변조시킨 표면탄성파에 입사시켜 산란되는 광을 같은 주파수로 동조된 lock-in amplifier로 검출하였다. 이와 같이 함으로써 검출할 표면탄성파와 검출에 사용된 laser beam 및 측정기기인 위상감지기(Phase Sensitive Detector : PSD)를 같은 주파수로 변조하여 동기시킬 수 있었으며, 측정계를 단순화하였다. IDT1, IDT2에서 발생된 표면탄성파의 감쇠계수는 각각 0.62~0.75 dB/mm, 0.60~0.72dB/mm였으며 wedge형 진동자에서는 0.83~1.28 dB/mm인 값을 얻었다.

1. 서 론

탄성파의 효과적인 검출을 위해 laser beam을 이용한 비접촉 방법은 직접 접촉방법¹⁾²⁾에 의한 검출에서 일어날 수 있는 loading effects(하중효과), aperture effects 등을 없앨 수 있고, 광대역 특성을 지니는 장점이 있다.

따라서 표면탄성파(Surface Acoustic Wave : SAW)와 빛의 상호작용^{3~5)}에 대한 연구는 laser beam을 검지광으로하여 표면탄성파를 검출하므로써, 물질의 특성을 조사하는 비접촉 방법의 하나로 각광을 받고 있다. 더욱이 표면탄성파는 매질이 압전물질인 경우에 표면탄성파가 지나는 임의의 위치에서 압전효과에 의한 전기적인 신호를 검출할 수 있어 표면탄성파의 연구에 편리하며, photolithography방법에 의한

Interdigital Transducer(IDT)를 압전 매질에 증착하면 매우 높은 주파수를 갖는 표면탄성파를 발생시킬 수 있다. 최근에는 압전물질인 Quartz와 LiNbO₃의 표면에 IDT를 증착하여 표면탄성파의 발생 및 진행에 관한 많은 연구결과가 보고되고 있고 이의 응용 연구도 매우 활발하다.^{6~8)}

본 연구는 silicon wafer와 압전물질인 YZ-LiTaO₃(Y-cut Z-propagation Lithium Tantalate)를 대상으로 하여 표면탄성파를 발생시키고, 이 파의 검출은 knife edge를 써서 광학적으로 검출하는 방법을 시도하였다. Silicon wafer와 YZ-LiTaO₃를 기판으로 하여 silicon wafer에는 직진성이 우수한 90° wedge형 진동자로 20.0 MHz의 표면탄성파를 발생시켰으며 YZ-LiTaO₃에는 photolithography방법으로 얻은 10쌍의 빗살모양인 IDT를 설계 및 제작하여 표면탄성파를 발

생시켰다. 발생시킨 표면탄성파를 knife edge를 사용한 광학적 검지 방법^{9~11)}으로 검출 및 분석하였으며, 표면탄성파에 의해 편향되는 광의 신호는 photomultiplier tube(P.M. tube)로 측정하였다. 일반적으로 이 신호는 상당히 미약하기 때문에 신호 대 잡음비(S/N ratio)를 크게하는 것이 유리하다.

본 실험에서는 wedge형 진동자의 경우 wedge가 표면탄성파의 출력을 감소시키는 역할을 하게되므로 표면탄성파를 발생 및 검출에 있어 IDT에서와 같은 입력 신호를 가해 줄 경우 검출이 용이하지 않았으며, 상기 두 경우에 있어서 lock-in amplifier로 신호 대 잡음 비가 크게 되도록 하여 표면탄성파에 의한 신호를 검출하였다. 또한, 시료표면에 입사되는 laser beam은 optical chopper의 chopping 주파수에 의해 사각파로 chopping되며, chopper controller의 주파수로 시료에 전송시킬 신호 발생기의 정현파를 주파수 변조시켰다. 그리고 신호발생기에서 나오는 변조된 파형 및 그 파형의 위상과 주파수가 동일한 사각파를 lock-in amplifier의 reference signal로 택하므로써 신호검출 및 분석의 일원화를 꾀하였다. 이와같은 과정을 통해 laser beam의 chopping 주파수와 표면탄성파의 변조 주파수 그리고 lock-in amplifier의 reference signal 주파수를 같게 하였으며 그 결과 표면탄성파와 laser beam의 동기효과를 얻었고 고주파 발생으로 인한 주변장치에 미치는 영향을 최소화 할 수 있었다. 아울러 표면탄성파에 의한 광신호의 검출을 위해 송신 진동자로부터 수신 진동자에 이르는 표면탄성파의 진행경로와 평행하게 laser beam의 입사점을 이동시킬 수 있도록 광학 장치를 배열하였다. 그리고 입사점 변화에 의한 광신호를 측정하여 진행경로에 대한 표면탄성파의 감쇠계수를 구하였다.

2. 실험장치 및 방법

실험장치는 시료의 표면에 표면탄성파를 발생시켜 주는 부분과 광학적인 측정 및 처리하는 부분으로 구성된다.

시료로는 두께 0.6mm 직경 5" silicon wafer와 두께 0.5mm 직경 3" YZ-LiTaO₃(lithium tantalate)를 준비하였으며, silicon wafer에는 90° wedge형 진동자(KB-A 87635 0.25")를 이용하여 20.0 MHz의 표면

탄성파를 시료표면에 발생시켰고, YZ-LiTaO₃에는 기관의 표면에 사진건판법으로 IDT를 제작하여 20.8 MHz¹²⁾와 14.5MHz의 표면탄성파를 시료표면에 발생시켰다. 제작한 IDT의 공명주파수는 UTA-4(KB-Aerotech)로 송신용IDT에 pulse를 가한 후 oscilloscope가 연결된 수신용 IDT에 도달하는 파형을 관측하여 결정하였다. Fig. 1은 14.5 MHz의 주파수를 갖는 IDT에서 발생하는 탄성파의 파형을 oscilloscope로 관찰한 것이다. 여기서 (b)는 (a)의 발진파형을 시간축에 대하여 10배 이상 확대하여 보인 것이다.

표면탄성파의 발생은 신호발생기(Wavetek 148A)로 상기 주파수를 갖는 정현파를 발생시켰으며, 주파수를 변조시킨 후 변조된 신호를 증폭하였다. 이 주파수 변조된 정현파의 형태의 증폭된 신호를 elec-

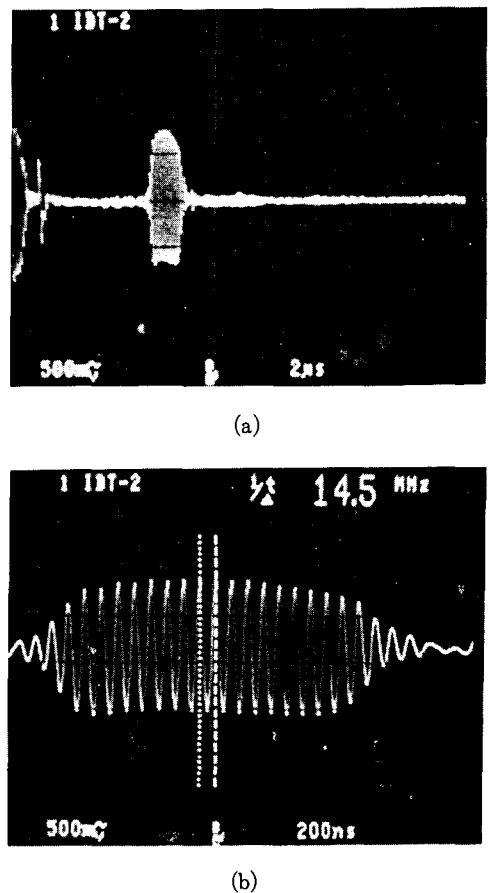


Fig.1. Oscillograms wavetrain(a) and resonant frequency(b) of IDT2 on LiTaO₃ using UTA-4.

trical impedance matching을 위해 UTA-4의 external 단자로 입력시켰으며 pulse 단자에 진동자들을 연결하였다. 그 결과 신호발생기와 각각의 진동자들 사이의 신호 전달에 대한 어려움을 제거할 수 있었다.

UTA-4의 pulse 단자로 출력되는 증폭 및 변조된 사각파는 시료표면에 부착시킨 90° wedge형 진동자 및 IDT로 보내지며, wedge형 진동자와 IDT를 통해 발생된 표면탄성파는 일정한 진폭을 갖는 정현파의 형태로 시료표면을 진행하게 된다. 시료의 끝부분에는 접착용 특수 epoxy를 얇게(≈1mm) 발라서 시료의 끝부분에서 반사되는 반사파를 제거하였다. 이 시료를 회전원판 위에 설치한 정밀이송장치에 고정시킨 후, 표면탄성파를 시료의 표면에 진행시킨다. 이렇게 하면 시료의 표면에는 정현파 형태의 표면굴곡이 생기게 되며, 이때 laser beam(5mW He-Ne, dia.1 mm)을 시료표면에 입사시킨다. 아울러 시료표면에 입사시키는 laser beam은 optical chopper에 의해 사각파 형태로 chopping하였으며, 진동에 의한 영향을 고려하여 390Hz인 chopping 주파수를 선택하였다. 이와같이 하면 표면굴곡에 의해 반사되는 반사빛의 정현적인 형태의 신호를 얻게된다. 그리고 이 반사빛의 반사각도를 가급적 크게하기 위하여 시료표면의 법선방향에 대한 laser beam의 입사각을 가능한 범위에서 작은 각이 되도록 광학적인 장치들을 배열하였다.

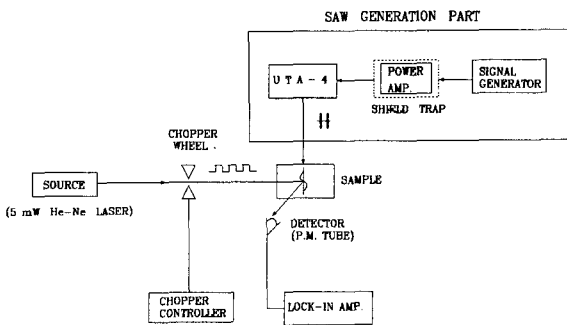


Fig. 2. Synchronization part of surface acoustic waves and light.

Fig. 2는 표면탄성파를 검출하기 위한 광학적 측정방법의 block diagram이다.

Fig. 2에서 detector(P. M. tube)에 입사된 빛은 식

$$I_{\text{signal}} = \alpha P = \alpha P_0 4\pi(d/\lambda_s) (\delta_0/\lambda_L) \cos(\omega t + \phi)$$

에 의해 표면탄성파의 진폭에 비례하는 전기적 신호로 바뀌어진다.⁹⁾ 여기서 α 는 P. M. tube의 감도, P_0 는 사각 aperture를 통과하는 빛의 power, d 는 회절상의 중앙으로부터 첫번째 최소점 사이의 거리, λ_s 는 표면탄성파의 파장, λ_L 은 laser beam의 파장, δ_0 는 표면탄성파의 진폭, ω 는 표면탄성파의 주파수이며, ϕ 는 초기위상이다. P. M. tube의 출력은 lock-in amplifier (NF LI-573A : 이하 lock-in amp.)의 signal 단자로 입력되며 이 신호는 극히 작기 때문에 신호 대 잡음 비를 크게하기 위해 lock-in amp. 내부의 pre-amp.로 충분히 증폭하여 low frequency noise를 제거한 후 PSD(phase sensitive detector)를 통과하게 된다. 이때 변조된 표면탄성파의 주파수와 동일하게 설정된 참조신호(reference signal)의 주파수와 비교하여 참조신호와 동일한 주파수 및 일정한 위상 관계를 갖는 신호 성분만을 검출하게 되고 lock-in amp. 내부의 low pass filter를 지나면서 표면 탄성파의 진폭에 비례하는 직류신호로 바뀌어진 후 X-Y recorder의 Y축 단자에 입력된다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에 사용된 90° wedge형 진동자 및 IDT의 특성은 Table 1과 같다.

Table 1. Parameters of wedge type transducer and interdigital transducer.

	Frequency	Aperture size	Wavelength	SAW velocity ¹³⁾
Wedge (Silicon)	20.0 MHz	6.4mm	0.246mm	4921.2m/s
IDT1	20.8 MHz	3.1mm	0.155mm	3229.9m/s
IDT2	14.5 MHz	3.1mm	0.223mm	3229.9m/s

3.1. 표면탄성파의 검출

신호발생기에서 나오는 정현파의 power를 증폭 및 변화시켜 90° wedge형 진동자와 IDT에 입력시키면 각각의 진동자로부터 표면탄성파가 발생되어 시료의 표면을 진행하게 된다. 표면탄성파가 진행하면 매질

에는 정현파 형태의 변위가 일어나게되고 이때 시료 표면에 laser beam을 집속시키면, 표면탄성파가 진행하는 경우와 진행하지 않는 경우에 대한 반사 및 정현파적으로 편향되는 산란광의 신호변화를 얻을 수 있다.

이 산란광의 신호변화를 P.M. tube로 입력시켜 lock-in amp.를 지나면서 광신호의 세기에 비례하는 직류전압으로 바뀌어진 값은 X-Y recorder에 입력시켜 분류하였다. Wedge형 진동자와 IDT의 경우에 있어서 비슷한 양상의 직류전압으로 표현된 실험치를 얻을 수 있었으며, 또한 표면탄성파의 출력이 증가함에 따라 표면탄성파에 의해 편향되는 광신호의 변화가 커짐을 알 수 있었다. 그리고 신호발생기로부터 나오는 정현파의 에너지가 진동자에게 발생되는 표면탄성파의 에너지를 결정하게 되며, 이 에너지가 시료의 표면으로 전달될 때 에너지의 흐름에 따라 야기되는 표면탄성파의 진폭은 입력 power의 제곱근에 비례한다. 이 때 입력되는 power가 증가하면 이로 인해 표면굴곡의 크기가 커지고 표면굴곡의 기울기가 증가하게 되므로써, 정현파적인 광신호가 커지게 된다.

3. 2. 표면탄성파의 감쇠계수

두 종류의 IDT와 wedge형 진동자로부터 발생된 표면탄성파의 감쇠를 측정하기 위하여 표면탄성파가 진행하는 방향과 평행하게 laser beam의 입사점을 변화시킬 수 있도록 광학적 장치들을 배열하였다. 아울러 silicon에서는 표면탄성파를 (110)방향으로, LiTaO₃에서는 (101)방향으로 진행시켰다. Fig. 3은 IDT1에 가해진 입력 power에 대해 표면탄성파에 의해 반사 및 편향되는 광신호의 변화를 보인 것이며, IDT2와 wedge형 진동자의 경우에서도 같은 양상의 결과를 얻었다.

그림에서 Y축은 감쇠의 정의식 $dB=20\log[B/A]$ 으로부터 구하였으며, 여기서 표면탄성파가 진행하지 않을 경우에 대한 값 A는 모든 실험에 있어서 18mV를 유지하도록 laser 장치앞에 편광 filter를 두었으며, 표면탄성파가 진행하는 경우의 값 B는 lock-in amp.에서 출력되는 직류전압의 차이를 평균하여 구한 값이다.

이 그림으로부터 거리에 따른 표면탄성파의 감쇠

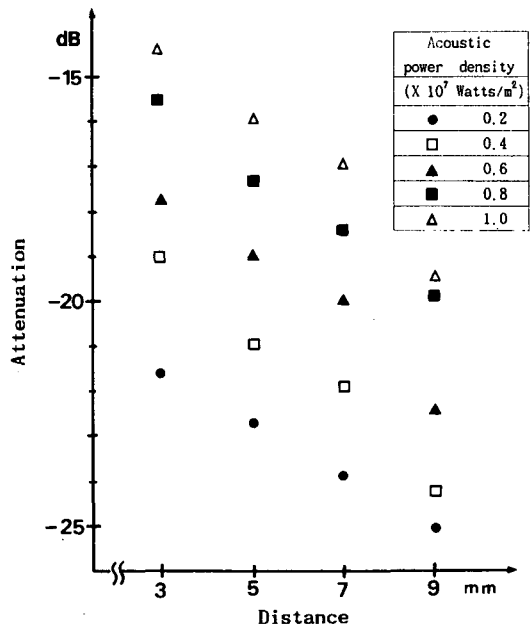


Fig. 3. Attenuation as a function of distance (IDT1).

계수를 구할 수 있다. 감쇠계수 α 는

$$\alpha = - \frac{1}{r_2 - r_1} \log\left(\frac{I_2}{I_1}\right)$$

에 의해 구하였으며, 여기서 I_1 과 I_2 는 진동자로부터 각각 r_1, r_2 떨어진 점에서의 광신호의 크기이다. Fig. 3에서 얻은 감쇠계수의 입력 power에 대한 변화는 Fig. 4와 같으며, Fig. 4는 두개의 IDT에 대한 결과를 보인 것이다.

그림에서 X축은 입력 power 밀도(Pd)를 나타내는 식 $Pd=(P_{AC}/w\lambda)^{14}$ 을 써서 각각의 진동자에 입

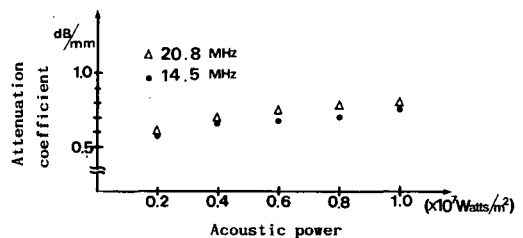


Fig. 4. Acoustic power density versus attenuation coefficient(IDT).

력되는 power의 크기와 Table 1의 값을 대입하여 얻은 것이다. 여기서 P_{Ac} 는 평균입력 power이며, w , λ 는 각각 표면탄성파의 beam 폭과 파장이며, 입력되는 신호의 크기 P_{Ac} 는 SWR & POWER METER (WELZ SP-225)로 구하였다.

그림에서 보듯이 감쇠계수는 20.8 MHz인 경우가 14.5 MHz인 경우보다 전반적으로 큰 값을 얻었는데, 이는 표면탄성파가 시료표면을 지날 때 시료표면에는 정현파적인 표면굴곡이 생기며 이 표면굴곡의 기울기는 주파수가 클수록 그 경사도는 증가하게 됨을 의미한다. 따라서 이 표면굴곡에 빛이 쏘여지면 주파수가 상대적으로 큰 표면탄성파에서 반사된 빛의 신호의 폭이 작은 주파수의 그것에 비해 커지게 되며 표면굴곡이 크게 되면 감쇠계수도 크게 나타나게 된다. 따라서 전자가 후자보다 표면탄성파가 진행함에 따라 야기되는 표면굴곡의 기울기의 변화가 컸기 때문임을 알 수 있으며, 감쇠계수는 0.7 dB/mm 정도로 거의 비슷한 값을 얻었다.

Fig. 5는 wedge형 진동자에 대한 결과이다. 아울러 낮은 입력 power를 가해줄 경우 미소한 변위로 인해 야기되는 불확실성은 이론과 다소 상이한 결과를 보이므로 감쇠계수를 구하는 과정에서 생략하였다.

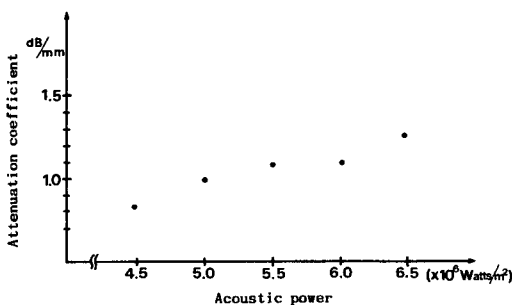


Fig. 5. Acoustic power density versus attenuation coefficient(wedge type transducer).

Fig. 5에서 보면 wedge형 진동자에 가해준 입력 power가 증가할수록 표면탄성파의 감쇠계수가 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 감쇠를 측정하는 과정에서, 표면탄성파를 진행시킨 방향과 결정축 방향이 다소 차이가 생겼기 때문으로 사료된다. 그 결

과로 laser beam의 입사점이 다소 어긋나는 결과를 초래했거나, 또는 시료가 비등방성 매질이었고 이 시료에 진동자를 부착하기 위해 사용된 couplant의 두께와 진동자를 시료표면에 부착시킨 압력이 부분적으로 균일하지 않았기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 5에서, 입력 power를 증가시켜 6.5×10^6 Watts/m²에 이르러서는 감쇠계수가 특히 증가함을 볼 수 있는데, 이는 Fig. 3에서도 알 수 있듯이, 입력 power를 변화시켜 어느 한계에 도달하면 포화의 영향으로 말미암아 선형관계에서 벗어나는 영역이 관찰된다. 이는 문헌(12)에서 언급한 바 있지만 표면탄성파의 입력 power를 증가시키면 입력 power의 증가에 대해 시료표면에 야기되는 표면굴곡의 상대적인 크기가 계속 증가해야 하나 더이상 증가하지 않는 영역을 의미하며, 반사빛의 신호의 크기도 입력 power의 증가에 따라 증가하지 않는 영역이 존재하는데 이를 포화 영역이라고 한다. 이 포화 영역의 영향으로 감쇠 기울기를 구함에 있어 차이를 보였다고 해석된다. 이를 제외한 감쇠계수의 크기는 1.0 dB/mm 정도로 거의 비슷한 결과를 보였다. 따라서 선형관계의 영역에서 IDT로 SAW device를 제작하면 device의 효율이 좋고 신뢰도도 크다고 유추할 수 있다.

여기서 wedge형 진동자와 IDT에 의한 결과를 비교하면, 상대적인 크기로 보아 wedge형 진동자의 경우가 크게 측정되었으나 상기 두 경우는 시료가 다르기 때문에 수치의 비교는 사실상 어렵다. 그러나 Fig. 4와 Fig. 5의 결과는 SAW device의 설계 및 제작이 가급적 감쇠의 영향이 적은 영역 즉, 감쇠계수와 입력 power의 관계가 비교적 균일한 범위내에서 행해져야 함을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 표면탄성파를 90° wedge형 진동자와 IDT를 써서 silicon wafer와 LiTaO₃기판표면에 발생시켜 knife edge를 이용한 광학적 방법으로 검출하여, 표면탄성파의 감쇠에 대해 조사하였다. 표면탄성파의 주파수는 UTA-4로 pulse를 인가할 때의 공명주파수를 구하여 알 수 있었다. 표면탄성파의 검출을 효율적으로 하기 위해 표면탄성파의 주파수

와 laser beam의 chopping frequency를 같은 주파수로 변조시킴으로써 두 신호 사이의 동기효과를 얻었으며, 그결과 표면탄성파에 의한 신호의 분석 과정을 일원화 하였다. 이 측정계를 이용하여 얻은 결과는 다음과 같다. Silicon에서의 감쇠는 LiTaO_3 에서의 감쇠보다 크게 측정되었으며, 표면탄성파의 감쇠계수는 IDT1(20.8 MHz)과 IDT2(14.5 MHz)에서는 각각 0.62~0.75dB/mm와 0.60~0.72dB/mm인 값을 얻었으며, wedge형 진동자의 경우 0.83~1.28dB/mm였다.

Wedge형 진동자는 진동자에서 출력되는 power의 일부를 wedge가 흡수하는 역할을 하였기에, wedge형 진동자 보다는 IDT에서 상대적으로 낮은 입력 power에 대하여 표면탄성파에 의한 신호의 검출이 가능하였다. 아울러 두 종류의 진동자에 의해서 발생시킨 표면탄성파의 검출이 가능하였던 것으로 보아 신호의 동기효과를 고려하는 것이 표면탄성파의 신호를 검출하는 하나의 방법임을 알 수 있다.

따라서 빛을 이용한 비접촉 방법을 표면의 결함 검출에 응용할 경우 결함의 크기에 비해 초점의 크기를 아주 작게할 수 있는 이점이 있기 때문에 결함으로부터의 정보에 대한 분해능이 좋아질 것이 예상되며 효율적인 결함검출이 가능하리라 기대된다. 그리고, 보다 낮은 입력 power를 가해주는 경우에 있어서 발생하는 표면굴곡의 진폭은 더욱 작아지고 광산란의 신호 역시 작아서 검출이 어렵게 된다. 따라서 광신호의 보다 효과적인 검출방법이 요구된다.

참 고 문 헌

- 1) NDT Handbook, section 43~50 (Krautkrämer GMBH)
- 2) 이 의종, 결함 및 초음파 탐상검사, 비파괴 검사 이론 및 응용I(골드기술사, 1989)
- 3) A. J. Slobodnik, Jr. P. H. Carr, and A. J. Budreau, J. Appl. Phys. Vol. 41, (1970), pp. 4380
- 4) W. S. Goruk, P. J. Vella, and G. I. Stegeman, IEEE Vol. SU-27 (1980), pp. 341
- 5) H. Sontag and A. C. Tam., IEEE Trans. UFFC., Vol. 33 (1986), pp. 500
- 6) T. L. Szabo & A. J. Slobodnik, Jr., IEEE Vol. SU-20(3) (1973), pp. 240
- 7) G. Cambon, M. Rouzeyre, and G. Simon, Appl. phys. Lett, Vol. 18(7) (1971), pp. 295
- 8) G. I. Stegeman, IEEE Trans, Vol. SU-23(1) (1976), pp. 33
- 9) R. L. Whitman A. Korpel, Appl. Opt, Vol. 8 (1969), pp. 1567
- 10) Jean-Pierre Monchalin, IEEE Trans. Vol. UFFC-33 (1986), pp. 485
- 11) M. J. Hoskin and B. J. Hunsinger, IEEE Trans. Vol. SU-27(3) (1980), pp. 103
- 12) 유일현, 윤정심, 김동일, 한국비파괴검사학회지 (1990), pp. 56-62
- 13) P. D. Edmonds, Ultrasonics, Vol. 19, pp. 504 (Academic press 1981)
- 14) J. Wilson and J. F. B. Hawkes, Optoelectronics an Introduction (Prentice-Hall, Inc. 1983), pp. 115

A Study on the Attenuation of Surface Acoustic Waves by Optical Measurement Method

I. H. You* and D. I. Kim**

*Semyung University

**Inha University

Abstract We have studied methods of detecting attenuation of solid materials such as silicon wafer and piezoelectric LiTaO_3 by means of optical probing techniques. We have performed measurements of surface acoustic waves(SAW) generated from 90 degree wedge type transducer and also from inter-digital transducers(IDT). SAW of 20.0 MHz was generated on a silicon wafer from the 90 degree wedge type transducer and those of 20.8 and 14.5 MHz are generated on a LiTaO_3 from the IDT. Then any surface-corrugation resulted from the above SAW was investigated by He-Ne laser beams. We projected laser beams, which were modulated by an optical chopper, on the SAW of the same frequency and then measured the scattered beam by the lock-in amplifier. We modulated and synchronized both SAW and the incident laser beam as well as the phase sensitive detector(PSD) to the same frequency in order to simplify our measurement system. We obtained the attenuation coefficients of SAW to be 0.62~0.75 dB/mm(from IDT1, 20.8 MHz), and 0.60~0.72 dB/mm(from IDT2, 14.5 MHz), 0.83~1.28 dB/mm(from the wedge type), respectively.

(Received : July 15, 1994)