

비접촉 방법에 의한 표면탄성파의 검출

유 일 현* · 윤 정 심* · 김 동 일**

A Study on the Detection of Surface Acoustic Waves by Noncontact Method

I. H. You, J. S. Yoon and D. I. Kim

Abstract Surface Acoustic Waves(SAW) are generated on silicon wafer and YZ-LiTaO₃ substrate and are detected by noncontact method. As wave sources two kinds of transducers are used : the wedge-type of 20.0 MHz and fabricated Interdigital Transducer(IDT) of 20.8 MHz. SAW are modulated by the optical chopper frequency and are synchronized with a laser beam. In signal processing, intensity variations of light due to the intensity of SAW are analyzed using lock-in amplifier. From the results, corresponding to the applied input power, the intensity variations of a deflected light by corrugations on the substrates are increased and saturation phenomenon is observed.

I. 서 론

표면탄성파(Surface Acoustic Wave : SAW)와 빛의 상호작용에 관한 연구¹⁻³⁾는 Laser Beam을 이용하여 표면탄성파의 미소한 신호까지 검출해냄으로써 물질의 특성을 조사하는 비접촉 방법의 하나로 각광을 받고 있다.

특히 표면탄성파는 매질이 압전물질인 경우에는 표면탄성파가 지나가는 임의의 위치에서 압전효과⁴⁾에 의한 전기적인 신호를 검출할 수 있어 표면탄성파의 연구에 편리하며, 압전매질에 사진건판법⁵⁾으로 Inte-

rdigital Transducer(IDT)⁶⁻⁸⁾를 제작하면 매우 높은 주파수를 갖는 표면탄성파를 발생시킬 수 있다. 최근에는 압전물질인 Quartz와 LiNbO₃의 표면에 IDT를 증착하여 표면탄성파의 발생 및 진행에 관하여 많은 연구결과가 보고된 바 있다.⁹⁻¹¹⁾

본 연구에서는 Silicon Wafer와 YZ-LiTaO₃를 기판으로 하여 Silicon Wafer에는 직진성이 우수한 90° wedge형 진동자로 20.0 MHz의 표면탄성파를 발생시켰으며, YZ-LiTaO₃에는 사진건판법으로 얻은 10쌍의 빗살모양인 IDT를 써서 표면탄성파를 발생시켰다. 또한 IDT의 공명주파수는 Ultrasonic Transducer

* 인하대학교 응용물리학과

** 인하대학교 응용물리학과 교수

접수 : 1990년 9월 15일

Analyzer(UTA-4)로 Pulse를 가해 구한 결과 20.8 MHz이었으며, 이와 상응하는 주파수를 갖는 정현파를 신호발생기로부터 발생시켜 진동자에 보내진다. Wedge형 진동자와 IDT에서 발생되는 표면탄성파를 Knife Edge를 사용하여 비접촉 방법인 광편향 방법¹²⁻¹⁴⁾으로 검출하였으며, 표면탄성파에 의해 편향된 빛의 세기차이는 Photo-Multiplier Tube로 검출하였다. 일반적으로 이 신호는 아주 미약하기 때문에 신호 대 잡음 비(S/N ratio)를 크게하여 검출하여야 한다. 특히 Wedge형 진동자의 경우 Wedge가 표면탄성파의 출력을 감소시키는 역할을 하게 되므로 표면탄성파를 발생시킴에 있어 IDT에서와 같은 입력 Power를 가해 줄 경우, 이때 발생하는 표면굴곡의 크기가 IDT에 비해 상대적으로 작아서 검출이 용이하지 않기 때문에 Lock-In Amplifier로 신호 대 잡음 비가 크게 되도록 하여 검출하였다. 또한 시료표면에 입사되는 Laser Beam은 Optical Chopper에 의해 사각파로 변조되며, Chopper Controller에서 나오는 주파수로 신호발생기의 정현파를 주파수변조 및 진폭변조를 시킴으로써 표면탄성파와 Laser Beam의 동기효과 및 고주파 증폭으로 인한 주변장치에 미치는 영향을 최소화할 수 있었다. 그리고 신호발생기에서 나오는 변조된 파형 및 그 파형의 위상과 주파수가 일치하는 사각파를 Lock-In Amp.의 Reference Signal로 택하므로써 신호검출 및 분석에 대한 확실화를 꾀하였으며, 송신 진동자로부터 Laser Beam의 입사지점을 변화시키면서 진동자에 가해진 입력 Power의 증가에 대한 포화현상^{15), 16)}을 관찰하였다.

II. 이론적 배경

표면탄성파는 Laser Beam에 대하여 움직이는 위상격자의 역할을 하게되며 입사되는 Laser Beam은 표면탄성파에 의해 주기적으로 편향된다. 이와같은 정현파 형태의 위상격자에 대하여, Zero-Order의 편향되지 않은 빛의 세기 I₀에 대한 mth-order의 편향된 빛의 세기 I_m의 비는 mth-order Bessel Function(J_m)^{17), 18)}의 자승으로,

$$\frac{I_m}{I_0} = J_m^2(\nu) \dots\dots\dots (1)$$

$$m = 1, 2, 3$$

과 같이 규격화된 식으로 표현된다.¹⁶⁾ 여기서 ν는

$$\nu = \frac{4\pi}{\lambda} \delta_0 \cos\theta_0 \dots\dots\dots (2)$$

이며 λ, θ₀는 입사되는 Laser Beam의 파장과 입사각도이며 δ₀는 표면탄성파의 진폭이다. 만약 ν ≪ 1일 경우, (1)식의 첫째항만을 써서 표면탄성파의 입력 Power 밀도(Pd)의 항으로 표현하면

$$\frac{I_m}{I_0} = \frac{1}{(m!)^2} \left[\left(\frac{\nu}{2} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (3)$$

$$= \frac{1}{(m!)^2} \left[\frac{A}{\omega^2} Pd \right] \dots\dots\dots (4)$$

m = 1, 2, 3

가 된다. 여기서

$$A = \frac{4\pi w v}{\lambda^2 Y} \cos^2 \theta_0 \dots\dots\dots (5)$$

$$Pd = \frac{P_{ac}}{w \wedge} \dots\dots\dots (6)$$

(watt/m²)

이며 (6)식에서 표면탄성파의 평균 입력 Power P_{ac}는

$$P_{ac} = Y\omega(\delta_0)^2 \dots\dots\dots (7)$$

이고 w, ∧와 ν는 각각 표면탄성파의 Beam폭 파장 및 속도이며 Y는 표면 탄성파의 주파수 ω와 무관한 시료의 특성에 관한 상수이다. 일반적으로 음파와 빛의 상호작용에 대하여 1st-order까지를 고려하게 되므로,¹⁹⁾ (4)식에서 m = ±1로 놓으면 보다 간단한 규격화의 식으로 표현이 된다. 또한 (4)식은 규격화된 빛의 세기가 표면탄성파의 진동수의 자승에 반비례하고 표면탄성파의 입력 Power 밀도에 비례하여 직선형으로 증가함을 의미하지만, 높은 입력 Power를 가해주는 경우에 포화현상이 나타나게 된다. 이 현상을 E. G. H. Lean 등은 비선형효과라고 불렀다.^{15), 16)}

III. 실험장치 및 방법

실험장치는 시료의 표면에 표면탄성파를 발생시켜

주는 부분과 광학적인 검출 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 표면탄성파를 시료표면에 발생시켰고, YZ-LiTaO₃에는 기관의 표면에 사진건판법으로 IDT를 제작하여 20.8 MHz의 표면탄성파를 시료표면에 발생시켰다. 제작한 IDT의 공명주파수는 UTA-4(KB-Aerotech)를 이용하여 확인하였으며, 그림 1은 IDT에서 발생하는 탄성파의 파형을 Oscilloscope로 관찰한 것이다. 여기서 (b)는 (a)의 발전파형을 시간축에 대하여 10배 이상 확대하여 보인 것이다.

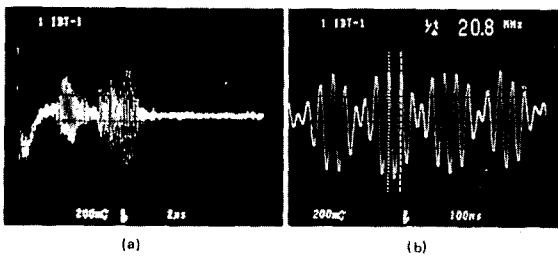


Fig. 1 Oscillograms of wavetrain(a) and resonant frequency(b) of IDT on LiTaO₃ using UTA-4.

표면탄성파의 발생은 신호발생기(Wavetek 148A)로 상기 주파수를 갖는 정현파를 발생시켰으며, 주파수를 변조시킨 후 변조된 신호를 증폭하여 이 증폭된 신호를 Acoustic 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 정밀이송장

치에 고정시키고 입사각이 0인 방향으로 Laser Beam(5mW He-Ne, dia. 1 mm)을 입사시킨다. 이때 반사빛의 편향정도를 가급적 크게하기 위하여 입사각 θ 가 가능한 범위에서 작은각이 되도록 광학적인 장치들을 배열하였다. 시료표면에 입사되는 Laser Beam은 Optical Chopper(SR 540)에 의해 사각파로 변조시킨 후 Beam Expander로 그폭을 확장시켰으며 Expander 내부의 현미경 대물렌즈(초점거리 = 1.6 cm)의 초점면에 Pin Hole을 위치시켜 통과한 Laser Beam을 Filtering하였다. 이 Spatial Filter를 통과한 확장된 Laser Beam을 초점거리가 $f_1(=18\text{cm})$ 인 렌즈 L_1 를 사용하여 평행광으로 만들었고 한번이 5mm인 사각형 Aperture를 렌즈 L_1 의 초점면에 위치시켜, 통과된 평행광을 초점거리 $f_2(=20\text{cm})$ 인 렌즈 L_2 를 이용하여 시료표면에 집속시켰다. 시료의 표면에서 반사된 빛은 시료표면을 진행하는 표면탄성파의 영향으로 주기적으로 편향되며, 반사 및 편향된 사각광을 렌즈 L_2 와 동일한 렌즈 L_3 로 평행광으로 만들고 렌즈 L_3 의 초점면에 Knife Edge를 위치시켜 평행광을 절반만 통과하게 한다. 이로써 광편향에 의한 효과를 최대로 하였다. Knife Edge를 지난 평행광은 Photo-Multiplier Tube(RCA 5819 head on type)로 입사한다. 그림 2는 표면탄성파를 검출하기 위한 광편향 방법의 개략도이다.

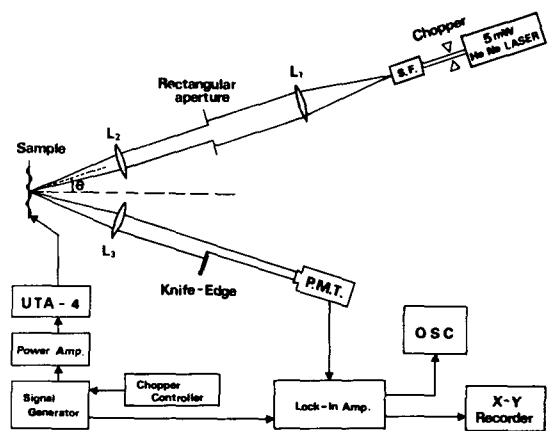


Fig. 2 Experimental setup of light deflection method.

그림 2에서 P. M. Tube에 입사된 빛은 식

$$I_{sig} = \alpha P$$

$$= \alpha P_0 4\pi (d/\lambda_0) (\delta_0/\lambda_L) \cos(\omega t + \phi) \dots\dots\dots (8)$$

에 의해 표면탄성파의 진폭에 비례하는 전기적신호로 바뀌어진다.¹³⁾ 여기서 α 는 P. M. Tube의 감도, P_0 는 사각 Aperture를 통과하는 빛의 Power, d 는 회절상의 중앙으로부터 첫번째 최소점 사이의 거리, λ_0 는 표면탄성파의 파장, λ_L 은 Laser Beam의 파장, δ_0 는 표면탄성파의 진폭이며, ϕ 는 초기위상이다.

P. M. Tube의 출력은 Lock-In Amplifier(NF LI-573A)의 Signal단자로 입력되며 이 신호는 극히 작기 때문에 신호 대 잡음 비를 크게하기 위해 Lock-In Amp. 내부의 Pre-Amp.로 충분히 증폭한 후 Low Frequency Noise를 제거하기 위해 Band Pass Filter를 거치게 되고 PSD(Phase Sensitive Detector)를 통과하게 될 때, 변조된 표면탄성파의 주파수와 동일한 참조신호(Reference Signal)와 비교하여 참조신호와 동일한 주파수 및 일정한 위상관계를 갖는 신호 성분을 검출하게 되고 Low Pass Filter를 지나면서 표면탄성파의 세기에 비례하는 직류신호로 바뀌어진 후 X-Y Recorder의 Y축 단자에 입력된다. 그림 3은 신호진행 과정의 Block Diagram이다.

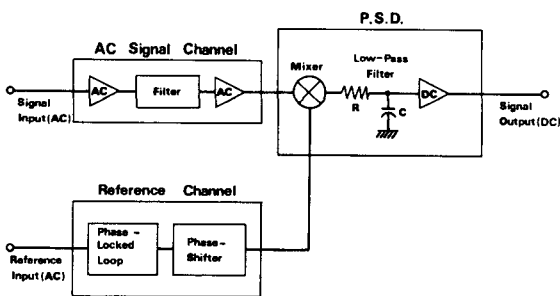


Fig. 3 Block diagram of signal processing.

IV. 결과 및 고찰

본 연구에 사용된 90° Wedge형 진동자 및 IDT에 대한 특성을 표 1에 나타냈다.

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

	Frequency	Aperture	Wavelength	SAW Vel. [20]
Wedge (Silicon)	20.0 MHz	6.4 mm	0.246 mm	4921.2 m/s
IDT 1 (LiTaO ₃)	20.8 MHz	3.1 mm	0.155 mm	3229.9 m/s

그림 4는 90° Wedge형 진동자와 IDT에 입력되는 Power를 변화시켜 이때 발생된 표면탄성파가 진행되는 시료표면에 Laser Beam을 입사시켜 표면탄성파가 진행되는 경우와 진행하지 않는 경우에 대한 반사 및 편향된 빛의 세기 변화의 차이를 P. M. Tube로 받아들이고 그 차이가 Lock-In Amp.를 지나면서 직류전압으로 바뀌어진 값을 X-Y Recorder의 Y축에 입력시켜 얻은 것이다. Wedge형 진동자와 IDT의 경우에 있어서 그림 4와 같은 양상의 그래프를 얻을 수 있었으며, 이것은 IDT에서의 실험 예이다. 이로부터 표면탄성파의 출력이 증가함에 따라 표면탄성파에 의해 편향되는 빛의 세기 변화가 커짐을 알 수 있다.

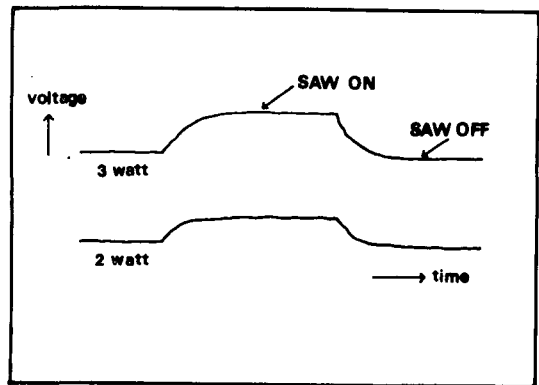


Fig. 4 DC level difference obtained by X-Y recorder.

그림 4에서 표면탄성파가 ON, OFF 될때 그래프의 완만한 증가와 감소는 Lock-In Amp.의 시정수와 관계됨을 확인하였다. 아울러 X축은 X-Y Recorder의 시간축이며, X축 방향의 Scanning 속도는 (0.5mm

/sec)이다. Y축은 전압축이며 (2mv/cm)로 하여 측정하였다.

그림 5는 신호발생기에서 나오는 20.0 MHz의 정현파를 460Hz로 주파수 변조한 후 증폭하여 Silicon Wafer에 부착시킨 90° Wedge형 진동자에 보내어진 후 시료표면에 발생된 표면탄성파의 출력 및 시료표면에 입사시킨 Laser Beam의 위치를 변화시켜 송신 진동자로부터 5mm와 7mm 떨어진 거리에서 표면탄성파가 진행할 때와 진행하지 않을 때에 대한 빛의 세기 변화를 얻은 것이다. 이는 시료의 표면에서 반사 및 편향된 빛의 세기를 P. M. Tube에 입사시켜 Lock-In Amp.를 지나면서 P. M. Tube에 입사된 빛의 세기에 비례하는 직류전압의 차이로 바뀌어진 값을 X-Y Recorder에 입력시켜 그림 4와 같이 얻은 다음 Laser Beam의 출력변화와 측정계기의 불안정성을 고려하여 표면탄성파가 진행하는 경우와 진행하지 않는 경우에 따른 Recorder 출력의 평균치를 취한 결과이다. 여기서 X축의 좌표는 이론식 (6)에 진동자에 입력되는 Power의 크기와 표 1의 값을 대입하여 얻은 것이며, 입력되는 Power의 크기는 SWR & Power Meter(WELZ SP-225)로 측정하였다.

또한 Y축의 좌표는 $dB = 20 \log \left(\frac{I_1}{I_0} \right)$ 에 의해 구한 값이며, 여기서 표면탄성파가 진행하지 않을 경우

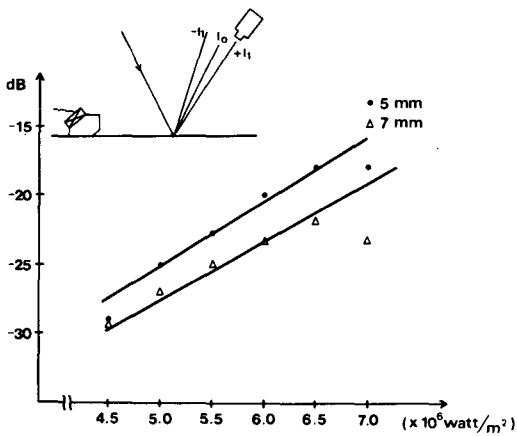


Fig. 5 Normalized first-order deflected light I_1/I_0 versus input surface acoustic power on wedge type transducer.

에 대한 값 I_0 는 모든 실험에 있어서 18 mv를 유지하도록 Laser장치 다음에 편광 Filter를 두었으며, 표면탄성파가 진행하는 경우의 값 I_1 은 그림 4에서 나타난 차이의 평균치를 구한 것이다.

그림 5는 진동자에 입력되는 Power가 증가함에 따라 표면탄성파로 인한 시료표면의 굴곡에 의한 빛의 세기 변화가 증가함을 보였으며, 낮은 입력 Power에 있어서 두점 사이의 간격이 미소하게 나타난 이유는 Wedge에서의 감쇠가 가장 큰 원인으로 작용했을 것으로 생각되며, 그 이하의 입력 Power에 대해서는 미소한 신호이기 때문에 발생하는 오차를 고려하여 결과에서 제외시켰다. 또한 낮은 입력 Power에서는 선형적으로 변하는 경향을 나타냄으로써 (4)식과 부합됨을 알 수 있으며, 표면탄성파의 출력이 증가함에 따라 시료표면에 응집되는 표면탄성파의 에너지 밀도가 증가해야 하지만 상대적으로 높은 입력 Power에 대하여 (4)식과 부합되지 않는 포화현상이 나타남을 보여준다. 이는 이론에서 언급하였듯이 I_0 에 규격화된 I_1 이 입력 Power의 함수로 표현되어질 때 선형부분과 비선형부분을 갖게 된다는 이론과 좋은 일치를 보인다고 하겠다. 그림에서 5mm에서 보다 7mm에서의 포화정도가 크게 나타나는 것으로 보아, 송신진동자로부터의 거리가 멀어질수록 포화현상이 잘 관찰되어질 것이 예상된다.

그림 6은 신호발생기에서 발생되는 20.0 MHz를

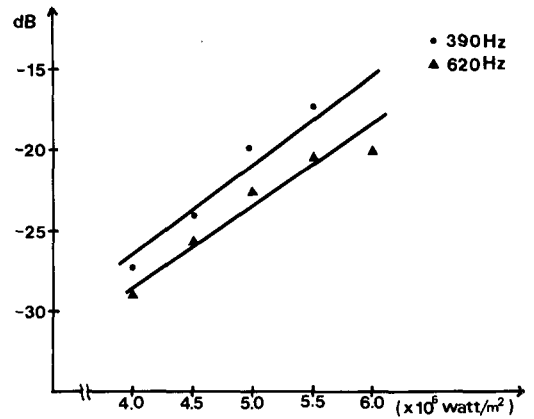


Fig. 6 Normalized first-order deflected light I_1/I_0 versus input surface acoustic power.

390Hz와 620Hz로 진폭 변조하여 증폭한 후 90° Wedge형 진동자가 부착된 Silicon Wafer의 표면에 표면탄성파를 발생시킨 다음 진동자로부터 5mm 떨어진 지점에 Laser Beam을 입사시켜 상기 방법으로 실험한 결과이다.

그림 6에서 알 수 있듯이 620Hz인 경우가 390Hz인 경우 보다 표면탄성파에 의한 빛의 세기 변화가 조금 크게 나타난 것으로부터 전자가 후자보다 표면탄성파의 파장이 짧았고 이에따른 표면탄성파에 의한 표면굴곡의 기울기가 차이가 생겼음을 알 수 있다. 또한 그림 6은 그림 5와 비교하면 진동자로부터 동일한 지점에서의 그래프는 포화현상에 대하여 비슷한 양상을 보여준다고 하였다.

그림 7은 20.8 MHz의 공명주파수를 갖는 표면탄성파를 460 Hz로 주파수 변조시킨 후 증폭하여 YZ-LiTaO₃ Plate에 형성된 IDT 전극으로 보낸 후 표면탄성파의 출력변화에 의한 반사 및 편향된 빛의 세기 변화를 Wedge형 진동자에서의 실험방법과 동일한 방법으로 얻은 결과이다.

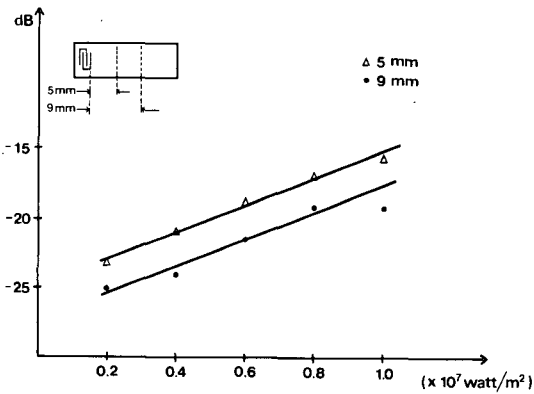


Fig. 7 Normalized first-order deflected light I_1/I_0 versus input surface acoustic power on IDT 1.

그림 7에서 표면탄성파의 출력이 증가함에 따라 빛의 세기 변화가 커지고 송신 IDT로부터 9mm 떨어진 지점에서 포화현상이 나타나는 것을 볼 수 있다.

이상의 결과로 알 수 있는것은 표면탄성파의 출력이 증가함에 따라 야기되는 표면굴곡의 크기는, 낮은 입력 Power에서는 비례하여 커지고 Wedge형 진동자

와 IDT의 두 경우 모두 포화현상이 나타남을 관찰하였으며 Wedge형 진동자 보다는 IDT에서 상대적으로 낮은 입력 Power에 대하여 표면탄성파에 의한 신호의 검출이 가능했으며, Wedge형 진동자는 진동자에서 출력되는 Power의 일부를 Wedge가 흡수하는 역할을 하였음을 알 수 있다.

본 연구의 의의는 Wedge형 진동자에 의하여 발생하는 표면탄성파에 의해 야기되는 표면굴곡의 정도를 IDT와 비교할 때 동일한 입력 Power에 대하여 그 상대적인 표면굴곡의 크기가 작았음에도 표면탄성파의 검지가 가능하였던 것으로 보아 신호의 동기 효과를 고려하는것이 미소한 신호를 검출하는데 있어서 하나의 방법임을 입증하였다. 따라서 빛을 이용한 비접촉 방법을 표면의 결합검출에 응용할 경우 결합의 크기에 비해 초점의 크기를 아주 작게 할수 있는 이점이 있기 때문에 결합으로부터의 정보에 대한 분해능이 좋아질 것이 예상되며 효율적인 결합검출이 가능하리라 기대된다. 아울러 표면의 결합에 대하여 빛을 이용한 비접촉 방법으로 검출해 내는 방법을 모색하기 위하여 인위적인 표면결합에 대한 연구는 수행 중이다.

V. 결 론

본 연구에서는 90° Wedge형 진동자와 IDT를 이용하여 표면탄성파를 발생시켜 비접촉 방법의 하나인 광편향 방법으로 이를 검출했으며 표면탄성파가 진행할 때 발생하는 표면굴곡에 의한 빛의 세기 변화를 효과적으로 검출해 낼 수 있도록 Knife Edge 방법을 이용하였고, 검출한 신호의 분석에는 Lock-In Amp.를 사용하였다. 아울러 본 연구를 수행함에 있어서 얻은 결론은 다음과 같다.

표면탄성파의 주파수와 Laser Beam을 동시에 Chopping Frequency로 변조시킴으로써 두 신호 사이의 동기 효과를 얻었고, Wedge형 진동자 및 IDT에 가해진 입력 Power에 대하여 반사 및 편향된 빛에 의한 신호가 비례하여 커짐을 관찰하였으며, 입력 Power의 증가에 따라 포화현상이 나타났다. Wedge형 진동자는 Wedge가 표면탄성파의 출력에 대한 감쇠요인으로 나타났으며 이로인해 동일한 입력 Power

에 대한 표면굴곡의 상대적 크기는 IDT에 비해 작게 나타났다. 제작한 IDT의 특성은 UTA-4로 Pulse를 가해 발진파형 및 공명 주파수를 얻었다.

본 연구는 1988년도 문교부 학술 연구 조성비의 지원으로 수행된 것임.

References

1. A. J. Slobodnik, Jr. P. H. Carr, & A. J. Budreau, J. Appl. Phys. Vol. 41, (1970), pp. 4380.
2. W. S. Goruk, P. J. Vella, & G. I. Stegeman, IEEE Vol. SU-27, (1980), pp. 341.
3. H. Sontag & A. C. Tam., IEEE Trans. UFFC. Vol. 33, (1986), pp. 500.
4. J. Zelenka, Piezoelectric Resonators & their Applications, studies in Electrical & Electronic Engineering Vol. 24, (Elsevier, 1986).
5. Shipley Manual(Photoresist, Developer, Remover, etc).
6. Paul H. Carr, IEEE Trans. Vol. MTT-17, (1969), pp. 845.
7. Supriyo Datta, Surface Acoustic Wave Devices, (Prentice-Hall 1986).
8. Colin K. Campell, Proc. IEEE, Vol. 77, (1989), pp. 1453.
9. T. L. Szabo & A. J. Slobodnik, Jr., IEEE Vol. SU-20, No. 3, (1973), pp. 240.
10. G. Cambon, M. Rouzeyre & G. Simon, Appl. Lett. Vol. 18, No. 7, (1971), pp. 295.
11. G. I. Stegeman, IEEE Trans. Vol. SU-23, No. 1, (1976), pp. 33.
12. A. A. Oliner et al, Acoustic Surface Waves, Topics in Appl. Phys. Vol. 24, (Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1978).
13. R. L. Whitman A. Korpel, Applied Optics, Vol. 8, (1969), pp. 1567.
14. Jean-Pierre Monchalin, IEEE Trans. Vol. UFFC -33, (1986), pp. 485.
15. E. G. Lean & C. C. Tseng, J. Appl. Phys. Vol. 41, (1970), pp. 3912.
16. Eric G. H. Lean & Carl G. Powell, Proc. IEEE, Vol. 58, (1970), pp. 1939.
17. L. E. Kinsler et al, Fundamentals of Acoustics, pp. 451, (John Wiley & Sons 1980).
18. F. B. Hildebrand, Advanced Calculus for Applications, pp. 141, (Prentice-Hall, Inc. 1976).
19. J. Wilson & J. F. B. Hawkes, Optoelectronics an Intro., pp. 115, (Prentice-Hall, Inc. 1983).
20. P. D. Edmonds, Ultrasonics, Vol. 19, pp. 504 (Academic Press 1981).