

(Fe_{1-x}Co_x)₈₉Zr₁₁ 비정질 자성막에서의 자기표면탄성과 속도변화 (I)

김 상 원

포항산업과학연구원 재료공정연구센터 금속·코팅재료연구팀

Velocity Change of Magneto Surface Acoustic Wave (MSAW) in (Fe_{1-x}Co_x)₈₉Zr₁₁ Amorphous Films (I)

Sang Won Kim

Electromagnetic Materials Laboratory, Materials & Processes Research Center,
Research Institute of Industrial Science & Technology (RIST), 790-600 Pohang, Korea

(2001년 2월 3일 받음, 2001년 5월 11일 최종수정본 받음)

초 록 췌기형 전극 사이에 열처리된 비정질 (Fe_{1-x}Co_x)₈₉Zr₁₁ (x=0~1.0) 자성막이 증착된 MSAW 소자를 구성하고 외부 인가자기장에 의한 MSAW 속도변화율을 조사하였다. 그 결과 MSAW 속도변화율은 직류 인가자기장, 구동주파수, 자성막의 두께 및 조성에 민감하게 의존하였으며, 특히 구동주파수 및 자성막의 두께가 증가할수록 증가함을 확인하였다. 열처리된 시편에서 나타난 최대 속도변화율은 x=0.8에서 얻어진 0.062%였다.

Abstract The velocity changes of magneto surface acoustic wave (MSAW) have been investigated in the MSAW devices composed of wedge type transducer and as-sputtered (Fe_{1-x}Co_x)₈₉Zr₁₁ (x=0~1.0) amorphous films on glass substrates. The velocity changes of devices depended sensitively on exciting frequency of MSAW, applying the DC bias magnetic field, film thickness and film composition. Particularly, it was conformed that velocity changes increased with the increase of the exciting frequency of MSAW and the thickness of magnetic films. A device deposited x=0.8 film along the MSAW propagation direction among the devices exhibited a large velocity change of 0.062% at 8.7 MHz for the applied field of 70 Oe.

Key words : amorphous magnetic film, magneto surface acoustic wave, wedge type transducer, velocity change

1. 서 론

비정질 자성박막을 표면탄성과 (surface acoustic wave, SAW) 소자의 IDT (Interdigital Transducer) 사이에 증착하여 외부 인가자기장으로 박막과 압전기판과의 계면에서 두 물질간의 기계적 결합을 통한 SAW와 박막의 자화간의 결합 및 박막내에서의 자기탄성결합효과 (ΔE 효과)를 유발 시킴으로써 소자의 SAW 속도를 연속적으로 제어하고자 하는 연구가 수행되고 있다.^{1~6)} 이에 필자는 상기 소자에 적합한 박막재료의 개발을 위하여 일련의 실험을 통하여 (Fe_{1-x}Co_x)₈₉Zr₁₁ 비정질 단층막에 있어 x=0.4, 0.5 조성은 높은 자왜와 높은 투자율 특성을 동시에 만족시키며, (Fe_{0.6}Co_{0.4})₈₉Zr₁₁ (30 Å)/Fe₈₉Zr₁₁ (40 Å) 다층박막시편에서는 미분투자율특성이 단층막보다 2배 이상 증가한다는 사실을 확인하고 실제 SAW 소자에 응용했을 경우 큰 속도변화율을 충족시킬 매우 유망시 되는 재료임을 보고한 바 있다.^{7~9)}

본 연구에서는 상기와 같이 확보한 자기특성에 관한 지식을 바탕으로 하고, 자성막 양단에 단일 모드 (mode) Rayleigh파¹⁰⁾ 구동에 적합한 췌기형 전극 (wedge type transducer)¹¹⁾을 부착시킨 수종의 MSAW 소자를 구성하며, 나타나는 MSAW 특성을 계통적으로 조사함으로써 자기특성

과 MSAW 특성간의 기초적 관계를 실험적으로 도출하고자 하였다. 췌기형 전극을 사용한 이유는, 자기특성과 MSAW 특성간의 상관관계를 면밀히 조사하기 위해서 IDT 사이에 자성막을 증착한 다수 MSAW 소자가 필요하여 소자 제작에 상당한 시간이 소요되며, 사진 식각법 (photo lithograph)으로 제작되는 IDT는 자성막의 열처리 및 평가 등으로 쉽게 파손되어 버리는 취급상의 문제점이 적지 않으나, 췌기형 전극은 Rayleigh파 구동과 기판에의 탈부착이 훨씬 용이하다는 이점이 있어 효율적이며 계통적인 연구가 가능하기 때문이었다.

본 논문에서는 먼저, 췌기형 전극 사이에 열처리된 상태의 (Fe_{1-x}Co_x)₈₉Zr₁₁ 자성막이 증착된 MSAW 소자를 구성하고, 외부 인가자기장으로 나타나는 MSAW 속도변화의 기본적 특성을 중심으로 분석, 검토한 내용을 기술한다.

2. 실험 방법

(Fe_{1-x}Co_x)₈₉Zr₁₁ 조성의 합금 타겟을 이용, 소다석회유리 (76×26×1mm³) 기판상에 면적과 두께를 각각 20×20mm², 1μm~20.5μm로 스퍼터링 (sputtering) 하는 자성막의 제조법 및 자기특성 평가법은 문헌⁹⁾에 상세히 기술되어 있으므로 여기서는 MSAW 특성의 평가법에 대해서만

언급한다. 일반적으로 속도측정은 상대속도 혹은 속도변화의 측정을 의미한다. 그 이유는, 동일한 측정법을 사용하는 경우 상대속도 혹은 속도변화가 절대속도보다 10⁵배 이상 정밀하게 측정되는 것이 가능하기 때문이다. MSAW의 전파속도를 측정하기 위하여 E. P. Papadakis가 고안한 pulse echo overlap 방법¹²⁾을 사용하였다. 이 방법은 상대속도 뿐만 아니라 절대속도 측정에 매우 적합하다. 본 연구에서 구성한 측정계는 고주파 펄스 신호 발진부(R.F pulse oscillator), 임, 출력 펄스 신호를 overlap시키는 지연 펄스 발생부(delay strobe generator), 펄스 신호간 시간차를 측정하는 저주파 신호 발진부(Audio generator), 시편에 직류 바이어스(bias) 자기장을 인가할 코일과 전원부 등이며, 이를 이용한 속도변화 측정법은 다음과 같다. 저주파 발진기의 주파수(펄스 신호의 반복주파수)를 임의로 변화시켜 입력과 출력 펄스를 overlap 시킨다. 직류 자기장에 의하여 전파하는 MSAW 속도가 변화하면 출력 펄스의 위상에 변화가 생기며, overlap된 임, 출력 펄스의 위상간에 속도변화에 상당하는 차이가 발생하여 다음의 관계로부터 저주파 발진기의 주파수 변화를 정확히 계속하면 된다.

$$\tau_1 = l/f_1, \tau_2 = l/f_2$$

$$V_1 = l/\tau_1 = l \times f_1, V_2 = l/\tau_2 = l \times f_2$$

$$|V_2 - V_1| / V_1 = |f_2 - f_1| / f_1$$

여기서, *l*은 소자의 전극간 거리, $\tau_1, \tau_2, f_1, f_2, V_1,$ 및 V_2 는 각각 직류 자기장 인가 전, 후의 지연시간, 저주파 발진기의 주파수 및 전파속도이다.

썰기형 전극의 제작에 있어 썰기에 진동자를 부착시키면 종파가 썰기를 통과하여 기판을 진동시킨다. 이때 썰기를 통과하는 종파의 전파속도를 V_w , 기판의 Rayleigh파 전파속도를 V_R 로 하면, $V_w/V_R = \sin\theta$ 를 만족시키는 각도, 즉 입계각에서 가장 효율 좋게 종파가 Rayleigh파로 변환되며 파동변화에 있어서도 주파수특성은 평탄하게 된다.¹¹⁾ $V_w/V_R \leq 1$ 의 제한이 있으므로 자료집¹³⁾ 등을 참조하여 썰기의 재질을 아크릴, 기판을 유리로 결정하였으며, 실제 속도측정을 실시한 결과 유리의 V_R 는 3236m/s, 아크릴의 V_w 는 2735m/s로 나타났다. 이 속도로부터 입계각 θ 를 구하면 약 58°가 되었다. 사용 주파수가 증가함에 따라 θ 의 가공정도가 높아져야 하므로 특히 주의하여 썰기를 가공하였으며, 썰기에 부착할 진동자는 PZT계 압전 세라믹(Tokin, NPM)을 사용하였다. 본 연구에서는 진동자의 두께를 조절하여 공진 주파수가 서로 다른 4종류(1.1, 3.19, 5.26, 8.7

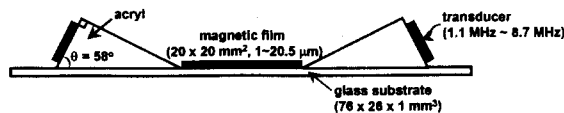


Fig. 1. Schematic diagram of MSAW device composed of wedge type transducer and as-deposited magnetic films on glass substrate

MHz)의 진동자를 제작하였다. 정확한 주파수를 발생시키기 위하여 진동자의 표면연마에 주의를 기울였으며 최종적으로 오실로스코프로 발진주파수를 엄밀히 확인하였다. 직류 인가자기장 발생용으로 코일상수가 50.7 Oe/A 인 헬름홀츠 코일을 사용하였다. 그림 1에 썰기형 전극이 부착된 MSAW 소자의 구성을 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

먼저 자성막이 없는 기판만을 사용하여 썰기형 전극으로 구동되어 기판상을 전파하는 파동이 SAW 인가를 조사하였다. pulse echo overlap법으로 구동전극에서 검출전극까지 탄성파가 통과하는데 걸리는 시간을 측정하고, 양 전극간의 거리를 임의의 일정 길이만큼 이격시킨 후 동일한 방법으로 통과시간을 측정하여 전파속도를 산출한 결과 3236m/s가 얻어졌다. 이 값은 유리기판에 대한 SAW 속도의 문헌치¹⁴⁾와 잘 일치하여 Rayleigh형 SAW임을 확인하였다. 다음은 자성막을 증착한 시편을 사용하여 자성막을 통과한 파동이 MSAW인가를 동일한 방법으로 조사하였다. 이 경우 두 개의 신호가 동시에 나타난 파형이 관측되었으며 이 신호들 중 MSAW를 동정하기 위하여 직류 자기장을 인가한 후 신호의 변화를 관찰하였다. 그 결과 전파속도가 빠르고 약한 신호는 아무런 변화를 보이지 않은 반면, 상대적으로 전파속도가 약간 느린 신호의 진폭은 크게 변화하였다. 이 결과로부터 전파의 신호는 전극과 기판과의 계면에서 완전히 MSAW로 변환되지 않은 종파 성분이며, 후자는 인가자기장에 의하여 진폭이 크게 변화한 것으로 보아 명백한 MSAW임을 확인할 수 있었다.

그림 2는 영(zero)자기장 중에서 측정된 MSAW 절대속도의 조성 의존성을 나타낸다. 그림에서 MSAW의 절대속도는 전조성에 걸쳐 평균속도(3130m/s)의 ±3% 이내에 수렴하여 실험오차범위에서 조성에 따른 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 또한 기판의 SAW 속도보다 100 m/s정도 느린 것으로 나타나 기판의 표면을 따라 전파하는

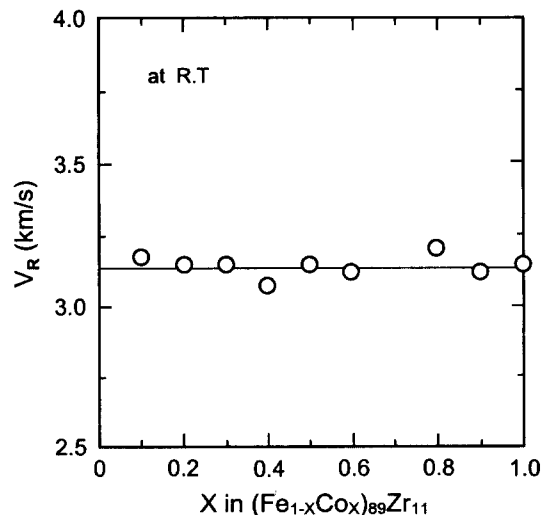


Fig. 2. Dependence of Rayleigh wave velocity of (Fe_{1-x}Co_x)₈₉Zr₁₁ films on Co content x

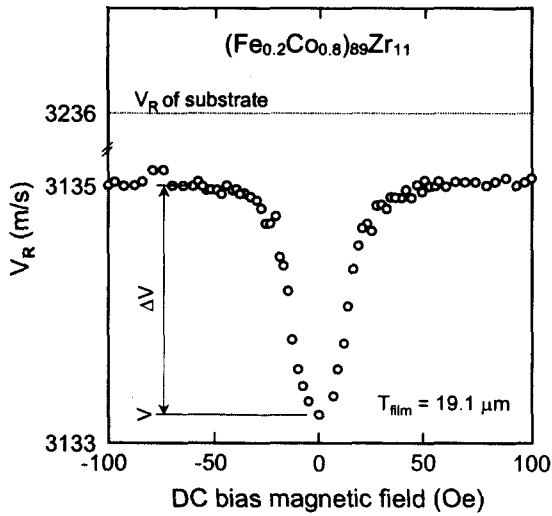


Fig. 3. Typical dependence of velocity change of MSAW device on DC bias magnetic field.

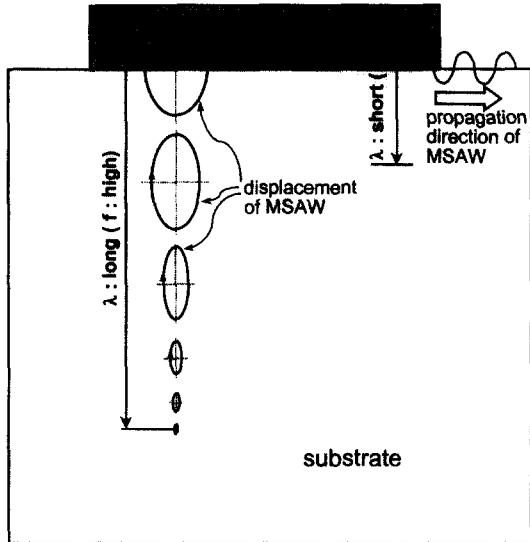


Fig. 4. Propagation characteristics of MSAW

SAW가 자성막에 의해 상당량 흡수됨을 의미한다. 다음 그림에서 언급하는 직류 자기장에 의한 MSAW 속도변화는, 이와 같이 느리게 된 영(zero) 자기장의 MSAW 속도로부터 자기장 인가에 의해 기판의 SAW 속도로 회복하는 변화를 의미한다.

그림 3은 두께 $19.1 \mu\text{m}$ 의 $x=0.8$ 막이 증착된 소자에서 8.7 MHz 구동주파수로 나타난 MSAW 속도의 인가자기장의존성으로 이를 통하여 본 연구에서 언급하는 MSAW 속도변화율을 설명한다. 그림에서와 같이 영자기장 중에서의 속도 V 는 그림 2에서의 3133 m/s이며, 직류 자기장이 인가되면 속도는 증가하여 어느 자기장 이상에서는 일정하게 포화의 경향을 나타내고 있다. 여기서 자기장 인가로 약간 변화한 속도와 영자기장 중에서의 속도와 차를 ΔV 라고 하고 이것을 V 로 나눈 값을 속도변화율 $\Delta V/V$ 로 정의하면, 그림 2에서와 같이 영자기장에서 속도가 시편에 따라 다소 다르게 나타나더라도 영자기장 중에서의 속도변화율

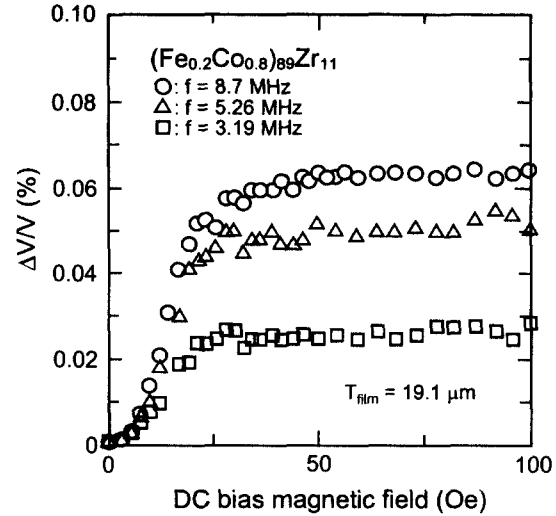


Fig. 5. DC bias magnetic field dependence of the velocity changes of MSAW devices deposited $(\text{Fe}_{0.2}\text{Co}_{0.8})_{89}\text{Zr}_{11}$ films as a function of the exciting frequency of MSAW

은 전체 시편에 있어 영(zero)을 나타내게 되므로 자기장의존성을 한 그림에서 비교하는 것이 가능하게 된다. 현재 $x=0.8$ 경우의 속도변화율은 약 0.06%가 된다.

한편, 인가자기장에 대한 속도변화율 변화는 30 Oe 이내의 약한 자기장에서 큰 변화를 보이며 그 이상의 자기장에서는 포화된다. 이러한 양상은 직류 자기장에서 측정된 자기이력곡선의 형태에 관련 있고, 포화화화보다도 자화의 변화율 즉 미분투자율의 변화가 큰 자기장 영역에서 속도변화도 커짐을 알 수 있으며 그 영역에서의 자기탄성결합이 강함을 의미한다.

그림 4로 SAW의 전파기구에 대해서 설명한다. 그림과 같이 SAW는 전파방향으로부터 수직방향으로 지속적으로 에너지가 감쇄하면서 전파하며, 에너지의 90%는 표면으로부터 SAW의 1 파장의 깊이에 집중함이 잘 알려져 있다.¹⁰⁾ 따라서 이와 같은 SAW의 전파특성을 잘 살려 자성막을 통과하는 SAW의 에너지량을 크게 하는 것이 가능하면 그만큼 자성막의 영향이 커지게 되는 것이므로 큰 속도변화율을 얻는 것이 원리적으로 가능하다. 자성막의 영향을 크게 하는 방법으로서 자성막의 두께가 일정하다면 SAW의 주파수를 증가시키는 것을 생각할 수 있다. 그림에서 주파수가 높을 때와 낮을 때의 파장을 나타내었는데 주파수가 높을 때 자성막을 통과하는 SAW의 에너지 비율이 높아짐을 알 수 있다.

또 다른 방법으로 주파수가 일정하다면 자성막의 두께를 증가시키면 동일한 원리로 자성막을 통과하는 SAW의 에너지 비율을 상대적으로 높일 수 있다. 이를 실험적으로 확인하였으며, 먼저 두께 $19.1 \mu\text{m}$ 의 $x=0.8$ 막이 증착된 소자에서 얻은 MSAW 속도변화율의 주파수의존성을 일 예로 그림 5, 6에 나타낸다.

그림 5는 주파수함수로 나타난 속도변화율의 인가자기장의존성이다. 인가자기장이 영에서 증가함에 따라 속도변화율은 급격히 증가하여 50 Oe이상이 되면 포화의 경향을 나

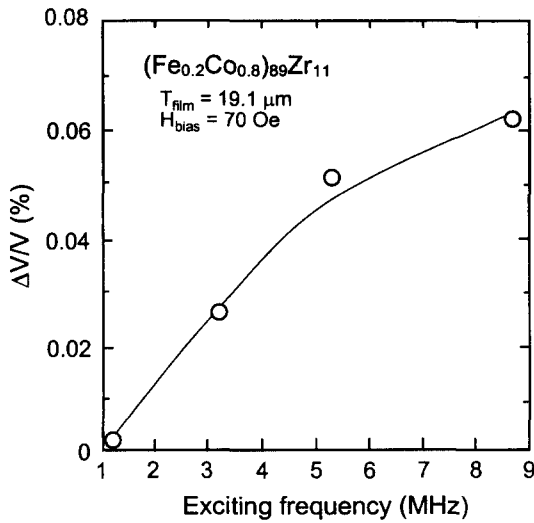


Fig. 6. Exciting frequency dependence of the velocity changes of MSAW devices deposited $(Fe_{0.2}Co_{0.8})_{89}Zr_{11}$ film

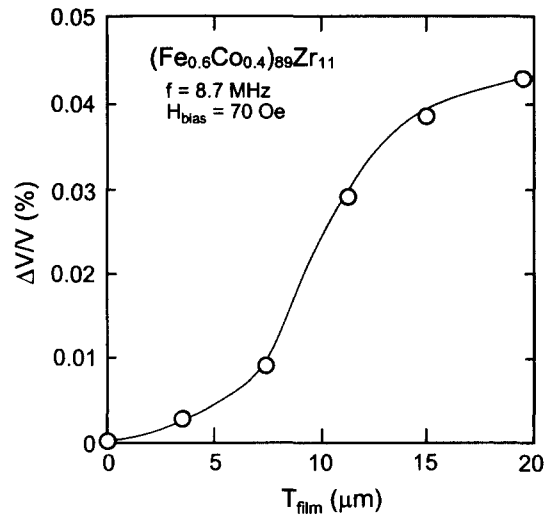


Fig. 8. Magnetic film thickness dependence of the velocity changes of MSAW devices deposited $(Fe_{0.6}Co_{0.4})_{89}Zr_{11}$ film

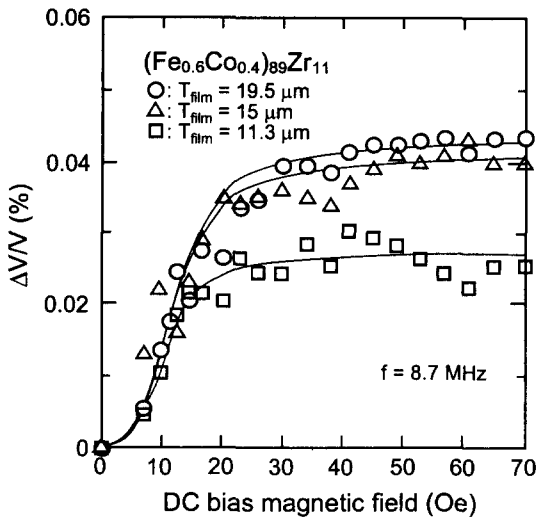


Fig. 7. DC bias magnetic field dependence of the velocity changes of MSAW devices deposited $(Fe_{0.6}Co_{0.4})_{89}Zr_{11}$ films as a function of magnetic film thickness

타내며, 주파수가 증가할수록 속도변화율이 포화하는 직류 자기장은 약간 증가하나 포화값은 매우 커지며 낮은 자기장에서 변화가 현저함을 알 수 있다. 그러나 이는 먼저 수행된 연구결과^{7,8)}에서 미분투자율은 주파수가 높아짐에 따라 작게 된다는 사실에 배치되는 결과이며, 짧은 파장의 MSAW가 속도변화율에 미치는 효과는 자성막의 자기특성이 미치는 효과에 우선하고 있음을 의미한다.

그림 6은 이 결과에서 직류 자기장이 70 Oe일 때 나타난 속도변화율을 정리한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 주파수가 증가함에 따라 속도변화율은 단조롭게 증가하여 포화의 경향을 보이고 있으며 이는 고주파수 영역에서 자기특성이 포화하기 때문에 나타난 결과로 생각된다. 이로써 보다 큰 속도변화율을 얻기 위해서는 주파수를 높게 하는 것이 유효함이 확인되었다.

그림 7, 8은 $x = 0.4$ 막이 증착된 소자에서 얻어진

MSAW 속도변화율의 자성막 두께의존성에 관한 결과이다. 구동주파수를 그림 5에서 최대 속도변화율이 얻어진 8.7 MHz로 하고, 11.3 μm, 15 μm, 19.5 μm 등 자성막의 두께가 다른 3종류 시편에서 측정된 것이다. 그림 7에서도 자성막 두께 증가에 따라 그림 5와 유사한 경향을 나타내고 있다. 그림 8은 직류 자기장이 70 Oe일 때 얻어진 속도변화율이며, 역시 막두께가 증가함에 따라 속도변화율은 증가하며 포화해 가는 경향을 보인다. 이 결과는 SAW의 자성막 통과 비율외에 자성막의 와전류 손실과 관련 있는 것으로 생각된다. 즉, 와전류 손실은 자성막 두께와 자기탄성결합의 정도 등 양쪽에 밀접하게 관계하고 있고 앞서 언급한 MSAW 에너지의 집중도에 의존한다. 8 μm 이하의 자성막에 있어서는 MSAW 에너지의 집중도가 낮고 자기탄성결합이 작게 억제될 것이므로 와전류 손실도 작아 속도변화율은 자기특성에 비례하지만, 15 μm 이상의 막에 대해서는 와전류 손실이 현저하게 되어 자성막의 자화운동을 구속하기 때문에 MSAW의 속도변화는 작게 되기 시작하여 결국 포화의 경향을 나타내는 것이다.

한편, IDT 전극을 이용한 SAW 소자의 경우는 구동주파수가 고정되므로 자성막의 두께 조절로 SAW 속도변화를 조정하는 것이 바람직하다고 생각된다. 이상에서 MSAW 속도변화율은 구동주파수와 막두께에 의존함이 명백해졌으므로 서로 다른 막두께의 시편 및 주파수에서의 속도변화율 측정결과로부터 속도변화율의 막두께의존성을 얻기 위해서는 막두께를 MSAW 파장으로 규격화할 필요가 있다. 즉, 막을 통과하는 MSAW 에너지 비율에 대한 의존성을 논의해야만 하는 것이다. 이러한 이유로 본 연구에서 얻어진 $(Fe_{1-x}Co_x)_{89}Zr_{11}$ 자성막이 증착된 소자의 MSAW 속도변화율을 파장으로 규격화한 막두께에 대하여 그림 9에 나타내었다. 이와 같은 정리는 다른 자성재료를 이용해서 얻은 MSAW 속도변화에 관한 결과와 비교하기에도 유효한 것이다. 그림에서 MSAW 파장에 대한 막두께의 비가 증가할수록 속도변화율이 커짐을 알 수 있다. 그러나 현재의 경우

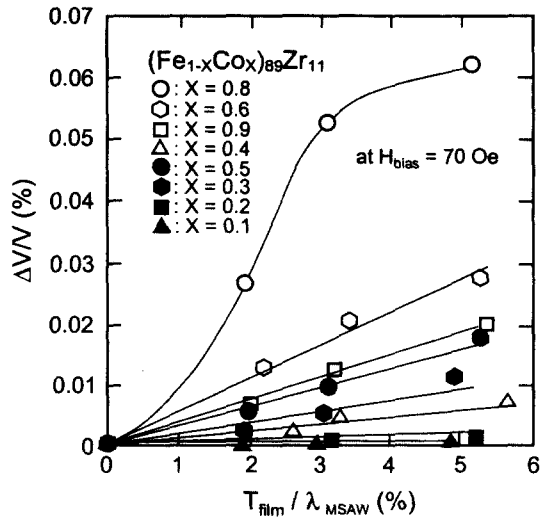


Fig. 9. Film thickness to MSAW wave length ratio dependence of the velocity changes of MSAW devices deposited $(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{89}\text{Zr}_{11}$ films as a function of Co content x

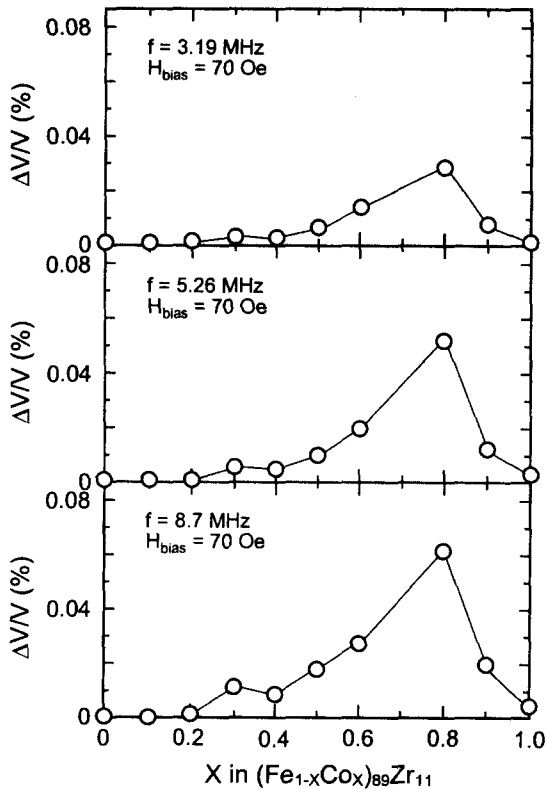


Fig. 10. Co content x dependence of the velocity changes of MSAW devices deposited $(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{89}\text{Zr}_{11}$ films as a function of the exciting frequency of MSAW

막두께비가 6% 이하로 SAW의 대부분은 기판을 통과하는 것으로 생각되나 2%를 넘으면 속도변화율이 크게 변화하기 시작하는 것은, MSAW 속도변화율은 통상의 SAW 특성에 자성막의 자기특성이 미치는 영향을 반영한 형태로 나타나는 것임을 의미하는 것이며, MSAW 속도변화율에 미치는 자성막의 효과가 단순하지 않음을 시사하고 있다.

그림 9에서 $(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{89}\text{Zr}_{11}$ 의 조성의존성이 나타났으므로 2% 전후 이상의 값을 취하여 조성에 대하여 정리한

것을 그림 10에 나타내었고, 3가지 구동주파수로 구분하였다. 그림에서 주파수가 높아짐에 따라 속도변화율은 증가하며 어느 주파수에 있어서도 $x=0.8$ 의 막에서 최대 속도변화율이 나타났고, 8.7 MHz 구동주파수에서 얻어진 0.062%가 열처리된 자성막 시편에서 얻어진 최대 속도변화율이다. 이상 속도변화율의 조성의존성을 설명하기 위하여서는 열처리된 시편의 자왜, 미분루자율의 조성의존성을 이용하여 하나 설명은 간단하지 않다. 예를 들면 $x=0.3$ 및 $x=0.8$ 조성에서 열처리된 자왜와 미분루자율은 각각 거의 동일한 값⁸⁾을 나타낸 반면, 얻어진 속도변화율에는 상당히 큰 차이가 나타났기 때문이다. 그 원인으로서는 열처리된 시편에서 얻어진 자기특성은, 기판과 자성막간의 열팽창률차에 의해서 생긴 작은 응력보다도 자기특성 측정시 인가하는 자기장으로 나타나는 자왜에 의해 지배된다고 생각된다.

따라서 $x=0.5$ 이상의 막에서 시편 제작시 도입되는 인장응력은 측정시 자왜에 의한 변형으로 완화되지만 자왜가 인장응력보다 크게 된 경우는 오히려 자성막내에 압축응력이 작용하여 막면내로부터 일어나는 자화성분이 증가하게 됨으로써 속도변화율이 증가한 것으로 추측된다. 그러나 시편제작 직후 자성막내에는 불균일한 내부응력과 이방성이 존재할 가능성이 크므로 명확한 해석은 곤란한 상태이다.

4. 결 론

유리 기판상에 증착된 열처리된 $(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{89}\text{Zr}_{11}$ 자성막의 양단에 10 MHz 이하 Rayleigh파 구동에 적합한 쉘기형 전극을 부착시킨 수종의 MSAW 소자를 구성하고, 외부 인가자기장에 따른 MSAW의 속도변화율을 조사하였다. 그 결과, MSAW 속도변화율은 직류 인가자기장, 구동주파수, 자성막의 두께 및 조성에 민감하게 의존하였으며, 특히 구동주파수 및 자성막의 두께가 증가함에 따라 현저히 증가함을 확인하였다. 열처리된 시편에서 나타난 최대 속도변화율은 $x=0.8$ 에서 얻어진 0.062%였다.

참 고 문 헌

1. D.C. Webb, D.W. Forester, A.K. Ganguly and C. Vittoria, IEEE. Trans. Mag. **Mag-15**, 1410 (1979).
2. A.K. Ganguly, K.L. Davis, D.C. Webb, C. Vittoria and D.W. Forester, Electron. Lett. **11**, 610 (1975).
3. D.W. Forester, C. Vittoria, D.C. Webb and K.L. Davis, J. Appl. Phys. **49**, 1794 (1978).
4. E.M. Simpson and W.P. Robbins, IEEE. Trans. Mag. **Mag-16**, 919 (1980).
5. M. Yamaguchi, K.Y. Hashimoto, H. Kogo and M. Naoe, IEEE. Trans. Mag. **Mag-16**, 916 (1980).
6. K.Y. Hashimoto, M. Yamaguchi, H. Kogo and M. Naoe, IEEE. Trans. Mag. **Mag-16**, 3181 (1981).
7. S.W. Kim and C.W. Kim, Korean J. Mater. Res., **7** (12), 1083 (1997).
8. S.W. Kim, Korean J. Mater. Res., **9**(8), 831 (1999).

9. S.W. Kim, Korean J. Mater. Res., **10**(10), 709 (2000).
10. I.V. Victrov, Rayleigh and Lamb Waves, pp.7, New York Plennm, (1967).
11. K. Shibayama and H. Uchiyama, Sci. Rep. RITU (Tohoku University), B (Elect. Comm.), **19**, 1 (1967).
12. E.P. Papadakis, J. Appl. Phys. **35**, 1474 (1964).
13. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 70th ed. E-44, CRC Press, Inc., Florida, (1989).
14. 井上光輝, 工學博士論文, pp.261, 豊橋技術科學大學 (1989).