

체적 탄성과 공진기의 하부 전극이 압전 박막의 배향성 및 공진기의 압전 특성에 미치는 영향

이명호, 정준필, 이진복, 박진석
한양대학교 전자전기 제어계측공학과

Effects of bottom electrodes on the orientation of piezoelectric thin films and the frequency response of resonators in FBARs

Myung-Ho LEE, Jun-Phil JUNG, Jin-Bock LEE, Jin-Seok PARK
Dept. of Electronic Electrical Control and Instrumentation Engineering, Hanyang University

Abstract - Effects of bottom electrode materials (Al, Cu, Ti, and Mo), included in film bulk acoustic resonators (FBARs), on the orientation of piezoelectric AlN thin films and the frequency response characteristic of resonators were investigated. The texture coefficient (TC) for (002) orientation, crystallite size, full width half maximum (FWHM), and surface roughness of deposited AlN films were measured for the various bottom electrodes. The return losses estimated from the frequency responses of fabricated resonators were also compared. Experimental results showed that the difference of lattice constant and thermal expansion coefficient between the bottom electrode and the AlN film were the most important factors for achieving a high performance resonator.

1. 서 론

최근 소자의 집적화, 소형화 및 고주파화 추세에 따라 표면 탄성과(surface acoustic wave, SAW) 필터에 비하여 많은 장점을 가지고 있는 체적 탄성과 공진기(film bulk acoustic resonator, FBAR) 필터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^[1-2] 체적 탄성과 공진기의 제작시, 압전 박막의 물성 확보가 소자 성능에 있어 결정적인 역할을 하게 되는데, 압전 박막의 중요한 물성은 배향 특성과 표면 거칠기이다. 즉, ZnO, AlN 같은 압전 박막은 그 배향이 (002) 수직 배향으로 성장시 가장 우수한 압전 특성을 나타내며, 박막의 거친 표면이 탄성파를 산란시키기 때문에 탄성파의 손실을 발생시켜 품질계수를 감소시키는 영향을 미친다.^[3] 따라서, 사파이어와 같은 단결정 기판 위에 AlN를 성장시켰을 경우, 우수한 (002) 배향과 부드러운 표면 거칠기를 얻을 수 있으나, 체적 탄성과 필터의 응용시, 구조적 특성상 압전 박막 하부에 금속 전극이 위치해야 한다. 이 때, 하부전극으로 사용된 금속박막의 고유한 물성 때문에 AlN 박막의 성장시 배향에 크게 영향을 미친다. 그러나, 이들 금속의 물성들이 압전 박막의 물성 및 체적 탄성과 공진기의 특성에 미치는 영향에 대한 체계적인 연구가 부족한 실정이다.

본 연구에서는 체적 탄성과 공진기 제작을 위한 AlN 박막의 하부 전극으로 Al, Cu, Ti, Mo를 사용하였고, 이들 하부 전극 위에 AlN 박막을 증착하여 하부 전극에 따른 AlN 박막의 구조적 물성을 분석하였으며, Al/AlN/하부전극(Al, Cu, Ti, Mo) 구조의 공진기를 제작하여, 하부전극에 따른 AlN 박막의 구조적 물성변화가 FBAR 공진기 소자에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다.

2. 본 론

2.1 실험방법

DC 마그네트론 스퍼터링을 이용하여 Al, Cu, Ti, Mo

을 SiO₂/Si(100) 기판에 각각 200nm의 두께로 증착하였다. 또한, AlN 박막은 고주파 마그네트론 반응성 스퍼터링을 이용하여 증착하였으며, 99.999%의 순수한 Al 타겟을 사용하였다. AlN 박막의 주요 증착 조건으로서 Ar/N₂ 반응 가스의 유량 비율은 1/5(sccm/sccm), 증착 압력은 5mTorr, RF 전력은 350W, 기판 온도는 250°C, 증착 시간은 3시간으로 고정하였다.

증착된 AlN 박막은 SEM(scanning electron microscopy), XRD(x-ray diffraction), AFM(atomic force microscopy) 분석 등을 이용하여 하부 전극의 종류에 따라 각각의 표면 및 단면 형상, 배향 특성, 표면 거칠기 등을 측정하였다. XRD 결과로부터 TC(texture coefficient, $I_{(002)}/\sum I_{(hkl)}$)값과 결정립 크기(crystallite size, $0.9\lambda/[FWHM_{rad} \times \cos\theta]$)를 산출하여 구조적 물성의 차이를 정량적으로 비교, 분석하였다.^[4-5] 또한, 다양한 하부 전극에 따라 증착된 AlN 박막 위에 DC 마그네트론 스퍼터링을 이용하여 Al 상부 전극을 형성하여 체적 탄성과 공진기를 제작하였다. 제작된 공진기의 주파수 응답 특성은 network analyzer(HP8720C)를 이용하여 측정하였으며, 이로부터 반사손실을 산출하여 각각의 하부 전극에 따른 소자의 특성 변화를 비교 분석하였다.

2.2 결과 및 고찰

2.2.1 하부전극에 따른 AlN 박막의 물성 분석

증착한 AlN 박막의 XRD 배향 특성, AFM 표면 형상, SEM 표면 및 단면 형상 등을 그림1에 각각 나타내었다. 일반적으로 AlN 박막이 c-축 성장시 압전 특성이 가장 강하게 나타나는 것으로 보고되고 있는 바^[12], 본 연구에서도 그림1(a)에 나타낸 바와 같이 증착된 AlN 박막이 AlN(002) 배향 외에 다른 배향이 없이 c-축 수직 방향으로 성장되었다는 것을 알 수 있었다. 그림1(b)의 AFM 표면 형상으로부터, 표면 거칠기가 약 6.6nm인 비교적 매끄러운 박막이 증착되었음을 확인하였다. 또한, 그림1(c), (d)의 표면 및 단면 형상으로부터, 증착된 AlN 박막이 일정한 크기의 grain를 갖고 주상구조로 성장하였음을 관찰할 수 있었다. 한편, AlN 박막의 비저항 측정 결과에서도 $5.42 \times 10^{10} \Omega \text{cm}$ 로서 AlN 박막이 압전 소자에 사용되는데 충분한 비저항을 갖고 있음을 확인할 수 있었다.

서론에서 언급한 바와 같이, AlN 박막이 FBAR 소자에 사용되기 위해서는 하부 전극의 증착이 선행되어야 한다. 그러나 하부 전극 위에 증착된 AlN 박막은 단결정 실리콘 기판 위에 증착된 AlN 박막과 같은 우수한 배향과 표면 거칠기를 얻기 힘들기 때문에 이와 유사한 특성을 얻을 수 있는 하부 전극의 선택이 중요하다. 본 연구에서는 하부 전극으로서 Al, Cu, Ti, Mo 등을 사용하였으며 기판과의 전기적인 절연성을 위하여 SiO₂/Si(100) 기판 위에 상기한 하부 전극 금속막을 증착하였다.

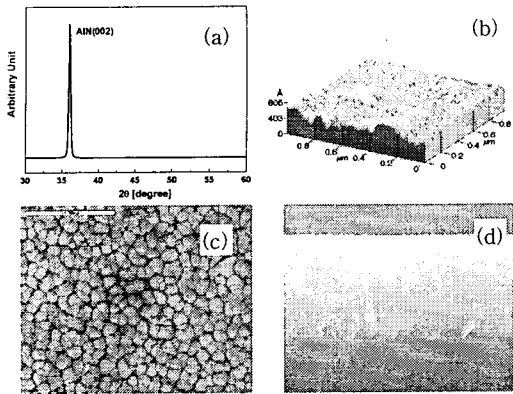


그림1 Si(111) 위에 증착된 AlN 박막의 (a) XRD 패턴 (b) AFM 표면 형상 (c) SEM 표면 및 (d) SEM 단면 형상

그림2는 하부 전극 금속막 위에 증착된 AlN 박막의 배향특성을 나타낸 것이다. Si(111) 기판 위에 증착된 경우와 비교하여, 하부 전극 금속막 위에 증착된 AlN 박막의 경우에는 AlN(002) 외에 AlN(100) 배향도 관찰되었으며, Mo를 하부전극으로 사용한 경우, 다른 하부 전극 금속막을 사용한 경우들에 비하여 상대적으로 AlN(002) 배향 특성이 가장 우수한 것으로 나타났다.

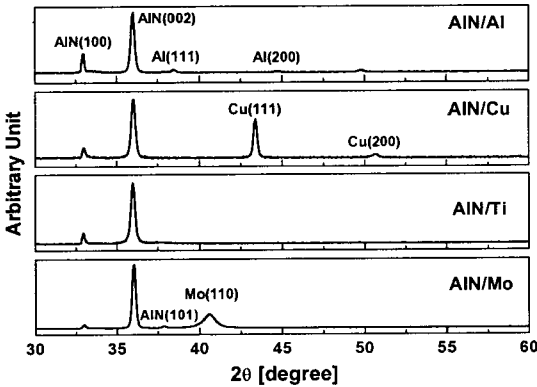


그림2 하부 전극(Al, Cu, Ti, Mo) 위에 증착된 AlN 박막의 XRD 패턴

그림3은 하부 전극에 따른 SEM 표면형상을 비교하여 나타낸 것이다. 기존의 연구에서 Si 위에 증착된 AlN 박막의 배향 특성이 표면 형상에 미치는 영향을 관찰한 바, (002) 면이 기판에 수직으로 우선 배향을 하여 증착된 경우에는 육각기둥 형태로의 성장이 이루어지고, 다른 면으로의 성장이 혼재된 경우에는 (100)과 (010)면이 한변을 공유하고 있는 삼각지붕 모양을 하는 것으로 보고된 바 있다.^[6] 본 연구에서 Mo 하부전극 위에 증착된 AlN 박막의 경우에는 비교적 일정한 크기의 grain으로 성장한 반면에, 그 외의 경우에는 삼각지붕의 표면 형상이 나타남을 관찰할 수 있었다.

그림4는 하부전극에 따른 AlN 박막의 AFM 표면 형상을 나타낸 것이다. 그림4(d)에 나타난 AlN/Mo의 경우가 다른 하부 전극의 경우에 나타난 표면형상에 비해서 굴곡이 적은 것을 관찰할 수 있었는데, 이는 하부 전극에 따른 배향 특성의 차이가 AlN 박막의 표면 거칠기에 영향을 미친 것으로 판단된다. 하부 전극에 따른 AlN 박막의 표면 형상과 배향 특성과의 상관 관계를 규명하기 위하여 그림5에 AFM으로부터 산출된 평균 표면 거

칠기와 XRD로부터 산출된 AlN(002) TC 값을 함께 나타내었다. 증착된 AlN 박막의 표면 거칠기가 작을수록 박막의 (002) 배향 특성은 상대적으로 우수하게 나타나는 경향이 있는 바, AlN/Mo의 경우가 평균 표면 거칠기가 가장 작고 (002) TC 값은 가장 큰 것으로 나타났다.

또한, AlN 박막의 결정립의 크기를 Sherrer의 식^[5]으로부터 산출한 결과, Al, Cu, Ti를 사용한 경우는 약 340nm인 반면, Mo를 기판으로 사용한 경우는 약 400nm 이상되는 것을 관찰할 수 있었다. 결정립의 크기는 다결정 박막의 결정성을 나타내는 수치이며 결정립이 클수록 박막의 결정성이 향상됨을 의미하는 바, Mo를 하부 전극으로 사용한 경우 AlN 박막의 결정성이 상대적으로 가장 우수하게 나타났음을 확인할 수 있었다.

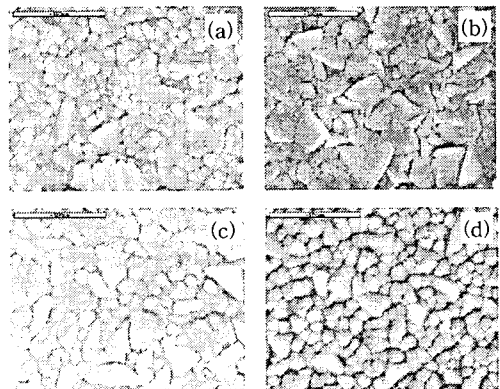


그림3 다양한 하부 전극 금속막 위에 증착된 AlN의 표면 형상: (a)AlN/Al (b)AlN/Cu (c)AlN/Ti (d)AlN/Mo

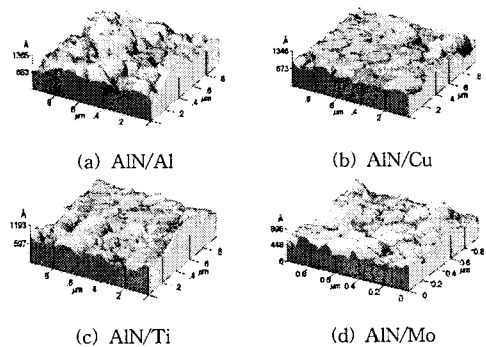


그림4 하부 전극의 변화에 따른 AFM 표면 형상

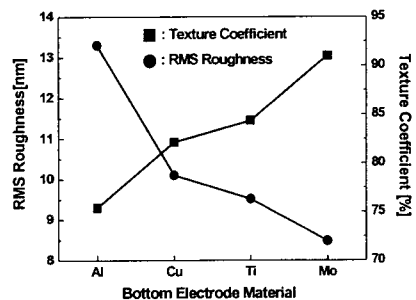


그림5 하부 전극에 따른 표면 거칠기와 TC 값

이와 같이 하부 전극의 변화에 따른 AlN 박막의 구조적 물성의 변화는, 기판과 박막사이에 존재하는 격자부정합과 열팽창계수의 차이가 주요 원인이라 판단되며, 기존의 연구에서도 격자부정합의 감소가 AlN 박막의 c-축 수직 성장을 향상시킨다고 보고된 바 있다.^[7] 표1은 본 연구에서 사용된 하부 전극에 대한, AlN와의 격자 부정합 및 각각의 열팽창계수를 나타낸 것이다. 표1에 제시한 바와 같이 Al과 Cu와 같이 격자부정합과 열팽창계수의 차이가 큰 경우는 AlN 박막의 배향특성이 저하될 뿐 아니라, 이로 인하여 표면 거칠기도 저하되는 것을 알 수 있었다. 그러나, Ti와 Mo의 경우와 같이 격자부정합과 열팽창계수의 차이가 상대적으로 적은 경우에는 AlN 박막의 배향특성과 표면 거칠기가 우수하였으며, 특히 Mo의 경우에 증착된 AlN 박막의 물성이 상대적으로 가장 우수한 이유는, AlN와의 격자부정합이 0.87%로서 가장 미소하였으며, 열팽창계수도 약 $4.8 \times 10^{-6}/K$ 로서 $4.2 \times 10^{-6}/K$ 인 AlN와 거의 유사하였기 때문이라 판단된다.

표1 AlN와 하부전극과의 격자부정합 및 열팽창계수 (AlN의 격자상수=3.112Å, 열팽창계수= $4.2 \times 10^{-6}/K$)

하부전극	격자부정합(%)	열팽창계수($10^{-6}/K$)
Al	23.15	23.1
Cu	13.8	16.5
Ti	-5.2	8.6
Mo	0.87	4.8

2.2.2 체적 탄성과 공진기의 주파수 응답 특성

각각의 하부전극에 따라 증착된 AlN 박막 위에 상부 전극으로 Al을 증착하여 Al/AlN/하부전극 구조의 체적 탄성과 공진기를 제작하였다. 상부 전극과 하부 전극을 각각 network analyzer의 signal과 ground 단자에 연결하여 주파수 응답 특성(S_{11})을 측정하였다. 그림6은 이 중에서 Al/AlN/Al과 Al/AlN/Mo 구조로 제작된 공진기의 주파수 응답특성을 나타낸 것이다. 각각에 대하여 중심 주파수는 약 3.7GHz와 3.05GHz이었으며 이러한 중심 주파수의 차이는 AlN 압전 박막의 두께에 따른 실험적 오차로 판단되며, 이 때 각각의 경우에 산출된 AlN 박막의 체적 탄성과 속도는 약 10,000m/s으로 거의 동일하였다.

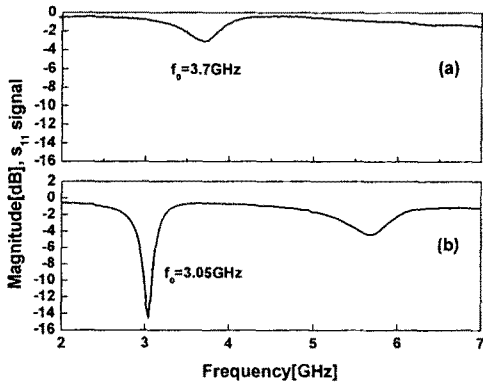


그림6 하부 전극에 따른 주파수 응답 (a)Al/AlN/Al (b)Al/AlN/Mo

그림7은 체적탄성과 공진기의 주파수 응답 특성으로부터 산출된 반사 손실의 변화를 나타낸 것이다. 하부 전극의 종류에 따른 AlN 박막의 물성 비교로부터 예측한

바와 같이, Mo 금속막을 하부 전극으로 사용한 체적 탄성과 공진기의 경우에 상대적으로 가장 우수한 반사손실 (약 -15dB)을 가지는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 Bragg 반사층을 적용하지 않았기 때문에, 기존의 반사층을 적용한 연구결과와 비교하여 반사 손실이 크지 않았으나,^[2,18-10] Mo를 전극으로 사용한 경우에는 몇몇 반사층을 적용한 기존의 연구 결과와 유사하거나 보다 우수한 결과라 사료된다.^[9]

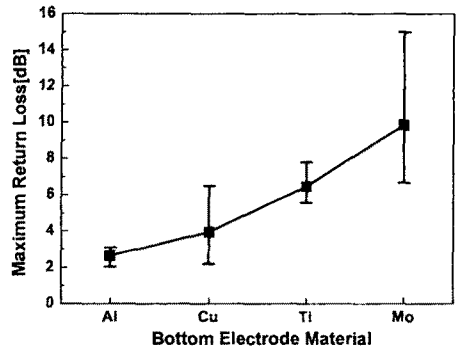


그림7 하부 전극에 따른 return loss

3. 결 론

본 연구에서는 AlN 박막을 Al, Cu, Ti, Mo 등의 하부 전극 위에 증착하여, 하부 전극에 따른 AlN 박막의 압전 특성(배향특성, 표면 거칠기, 결정성)을 확인하였다. 이러한 하부 전극에 따른 AlN 박막의 물성 변화는 근본적으로, 하부 전극과 AlN 박막사이의 격자부정합 및 열팽창계수의 차이에 기인한 것으로 판단되는 바, Mo를 하부 전극으로 사용한 경우, AlN 박막과의 격자 부정합이 상대적으로 가장 작고, 열팽창계수의 유사성으로 인하여 다른 전극을 적용한 경우에 비하여 가장 우수한 (002) 배향특성, 표면 거칠기 및 결정성을 갖는 AlN 박막을 얻을 수 있었다. 또한, 이와 같이 하부 전극에 따라 고찰한 AlN 박막의 물성 비교 결과는 Mo 금속막을 하부 전극으로 사용한 체적 탄성과 공진기의 주파수 응답 특성이 다른 경우에 비하여 가장 우수하게 나타난 것에 대한 물성적 근거가 된다고 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Eva S. Ferre-Pikal et al., IEEE Transactions on UFFC, Vol. 48, No. 2, (2001) pp. 506-510.
- [2] Sang-Hyun PARK et al., J. Vac. Sci. Technol., A 18(5), (2000) pp. 2432-2436.
- [3] 이시형 등, Journal of the Korean Ceramic Society, Vol. 37 No. 12, (2000) pp. 1198-1203.
- [4] B.D.Cullity, Addison-Wesley, Reading, MA, (1956).
- [5] R.G.Kinsman, John Wiley & Sons, New York, (1987).
- [6] R.Rodriguez-clemente et al., J. Cry. Growth 133 (1993) pp.59-70.
- [7] W. T. LIM et al., Thin solid films, 382, (2001) pp. 56-60.
- [8] Sang-Hyun PARK et al., Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 39, (2000) pp. 4115-4119.
- [9] Sang-Ho KIM et al., IEEE Electron Device Letters, Vol. 20 No.3, (1999) pp. 113-115.
- [10] Qing-Xin Su et al., IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 49 No. 4, (2001) pp. 769-778.