

AlN 제적탄성과 소자의 주파수 응답특성에 대한 전극재료의 영향

김보현, 박진석

한양대학교 전자전기제어계측공학부

Effect of electrode material under frequency response characteristics of AlN based FBAR devices

Bo-Hyun Kim, Do-Young Kim, and Jin-Seok Park

Dept. of Electronic, Electrical, Control and Instrumentation Engineering, Hanyang University

Abstract - Film bulk acoustic resonator (FBAR) devices which adopt an air-gap type (metal/AlN/metal/air/substrate) configuration are fabricated by a novel process. The newly fabricated resonator doesn't employ any supporting layer below it. FBAR devices with the air-gap type are also fabricated using the conventional method. The frequency response characteristics of all the devices fabricated are measured and compared, in terms of the kinds of top and bottom electrode materials. The results show that the better device performance of FBAR devices can be achieved by employing the proposed process.

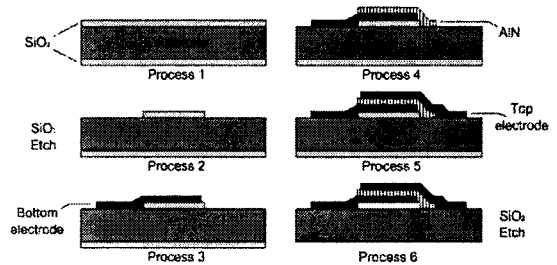


그림 1. Air-gap형 제적탄성과 공진기의 제작순서

1. 서 론

최근 통신용 부품, 소자의 소형화, 집적화 및 고주파화 추세에 따라 삽입손실(insertion loss)이 작고, MMIC화가 가능한 장점을 가지고 있는 박막형 체적탄성과 공진기(film bulk acoustic resonator, FBAR)에 대한 관심이 고조되고 있다.^{[1][2]} 이러한 체적탄성과 공진기를 이용한 필터, 듀플렉서와 같은 수동소자는 압전박막의 물성과 소자의 구조에 따라 소자의 특성이 결정적인 영향을 받게 된다. 이에 따라 에너지 손실을 최소화하고 소자의 특성을 향상시키기 위해 안정적이고 향상된 물성을 가지는 압전박막의 성장 및 소자 구조의 최적화 등과 관련한 다양한 연구가 진행되고 있다.^{[3][4][5]} 일반적으로 체적탄성과 공진기 제작에 사용되는 기판재료에 의해 발생하는 에너지 손실을 줄이기 위해서 membrane형, air-gap형, Bragg-reflector형 등의 구조가 채용되고 있다.^{[6][7][8]} 이는 기판위에 증착되는 하부전극, 압전박막, 상부전극 등의 공진발생 부분을 기판과 분리하여 에너지 손실을 최소화하기 위함이다.

본 연구에서는 air-gap형 구조의 체적탄성과 소자 제작시 기존의 연구에서 공진기를 지지하는 동시에 기판과의 분리를 위해 사용하였던 중간 지지층(supporting layer)이 별도로 존재하지 않는 새로운 공정방법을 제안하였다. 이러한 공정방법에 의해 제작된 소자의 주파수 응답 특성을 기존의 방법에 의해 제작된 소자의 특성과 비교하였다. 또한, 상부전극과 하부전극으로 사용되는 다양한 금속재료(Al, Ti, Ni, Cu, Mo, W 등)가 소자의 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 본 론

2.1 실험방법

그림은 air-gap형 체적탄성과 공진기의 제작을 위해 본 연구에서 사용한 제작공정을 개략적으로 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 최종적인 소자의 구조에서 하부전극의 하부에 지지층이 존재하지 않기 때문에 기존에 지지층을 이용하는 방법에 비해 공정과정이 보다 단순화되고, 지지층에 의한 소자의 에너지 손실을 근본적으로 제거하였다. 희생층으로 사용된 SiO₂막은 사진공정을 이용하여 원하는 패턴을 형성한 후, 나머지 부분을 buffered HF(HF:NH₄F=1:6) 용액을 이용한 습식 식각을 통하여 제거하였다. 여기서, SiO₂막은 별도로 증착하지 않고, SiO₂(600nm)/Si(100) 기판을 사용하여 공정을 줄였으며, air-gap을 형성시 측면 식각이 용이하여 희생층으로 사용하였다. 압전물질로 사용된 AlN 박막은 Al 타겟(99.999%)에 N₂와 Ar을 주입하는 RF 마그네트론 반응성 스퍼터링(reactive sputtering) 방법으로 증착하였다. AlN 박막의 주요 증착조건으로서, RF 전력은 400W, N₂/Ar 유량비는 20/10, 기판온도는 250°C, 증착압력은 15mTorr, 증착시간은 4시간으로 각각 고정하였다.

상부전극과 하부전극으로 사용된 전극재료는 Al, Cu, Mo, W의 경우 DC 마그네트론 스퍼터링을 이용하였고, Ni, Ti의 경우는 RF 마그네트론 스퍼터링을 이용하여 증착하였다. 상부전극과 하부전극의 패턴은 lift-off 공정을 이용하여 형성하였으며, 하부전극은 300nm 두께의 Mo 박막을 사용하였다. 상부전극은 150nm의 두께를 갖는 G-S-G(ground-signal-ground) 구조로 형성하여 network analyzer(HP 8720C)와 probe station을 연결하여 주파수 응답 특성을 측정하였다.

2.2 실험결과 및 고찰

2.2.1 AlN 박막의 물성

AlN 박막의 최적조건을 도출하기 위하여 상기한 스퍼터링시 증착조건을 변화시키면서 Si(111) 기판 위에 AlN을 증착하였다. 그 결과 RF 전력 400W, 기판온도 250°C, 증착압력 15mTorr, 반응가스 비 N₂:Ar=2:1의 조건에서 가장 우수한 배향성을 갖는 AlN 박막을 얻을 수 있었다.

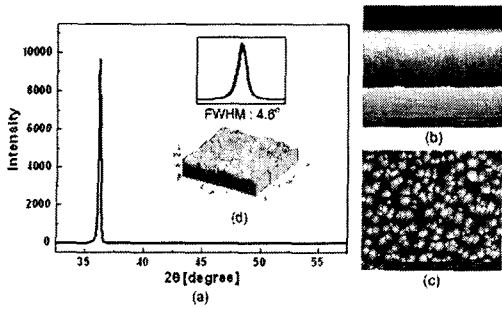


그림 2. 증착된 AlN 박막의 XRD, SEM, AFM 측정 결과 : (a) XRD 및 FWHM, (b) SEM 단면, (c) SEM 표면, (d) AFM

그림2는 XRD, SEM, 및 AFM 등을 이용하여 분석한 AlN 박막의 배향특성, 표면 및 단면 구조, 표면거칠기 등의 측정 결과를 나타낸 것이다. 그림2의 (a)는 XRD 측정 결과로서 $2\theta=36.12^\circ$ 에서 AlN 박막이 c-축으로 성장되었으며, 이 때 AlN 박막의 압전특성이 가장 강하게 나타남을 의미한다. 그림2의 (b)와 (c)는 SEM으로 관찰한 AlN 박막의 단면 및 표면 구조이다. 단면과 표면 분석 결과 박막의 결정들의 경계가 뚜렷하고 박막이 주상구조(columnar structure)로 성장되었음을 알 수 있다. 그림2의 (d)는 AFM 측정결과로서, 전체적으로 박막의 표면거칠기가 매우 균일함을 알 수 있다.

정량적인 측면에서, 본 연구에서 증착한 AlN 박막은 XRD 결과로부터 (002)-방향의 TC(texture coefficient)는 100%, FWHM(full width at half maximum)은 4.6°, 결정크기는 약 80nm 등으로 산출되었으며, AFM 결과로부터 표면거칠기의 RMS값이 약 1.92nm인 것으로 나타난 바, 체적탄성과 공진기의 압전 박막재료로서 매우 우수한 물성을 확보하였다고 판단된다.

2.2.2 체적탄성과 공진기의 주파수응답 특성

그림1의 체적탄성과 소자 제작과정에 나타난 바와 같이, 본 연구에서는 SiO₂ 식각 후 300nm의 두께를 갖는 하부전극(Mo), 2μm 두께의 AlN 박막, 300nm 두께의 상부전극을 순서대로 증착하여 공진기의 기본구조를 형성하였고 희생층으로 사용된 SiO₂를 식각하여 기판과 공진기를 분리하였다. 상부전극과 하부전극 모두 Mo 금속을 사용할 경우, 증착된 Mo막이 다결정질(polycrystalline)임에도 불구하고 AlN와 열팽창계수와 격자상수 등의 물성들이 서로 유사하기 때문에 전극과 AlN의 격자부정합(lattice mismatch)과 열팽창에 따른 손실을 최소화할 수 있는 장점이 있다.^{19)[11]}

그림3은 제작된 공진기의 주파수응답 특성 측정 결과로서, (a)에는 반사손실(return loss, S₁₁), (b)에는 입력 임피던스(input impedance, Z_{in})의 크기 및 위상을 각각 나타내었다. 공진기의 반사손실은 -19.55dB, 전기기계결합계수(k₁₂²)는 2.4%, 직렬 및 병렬양호도(quality factor: Q_s, Q_p)는 각각 65.06, 76.75로서 손실이 적고 양호도가 우수하다. 또한, 공진 중심주파수(resonance frequency)는 1.352 GHz, 직렬 및 병렬 공진주파수(f_s, f_p)는 1.352GHz 및 1.365GHz, 대역폭은 13MHz로서 우수한 주파수 선택도를 가지고 있다는 것을 보여준다. 이와 같이, 본 연구에서 제작한 체적탄성과 공진기의 특성이 우수하게 나타난 것은, 새로운 공정방법에 의해 기판과 공진기의 분리하였으며, 압전재료로 사용된 AlN 박막이 우수한 물성을 가지고 있는데 기인한다. 단, 그림3의 (a) 반사손실 결과에서 기생성분이 관찰되는 것은 희생층인 SiO₂막의 식각 공정이 부분적으로 제대로 이루어지지 않아 기생 정전용량(spiral capacitance)이 발생하였기 때문이라 사료된다.

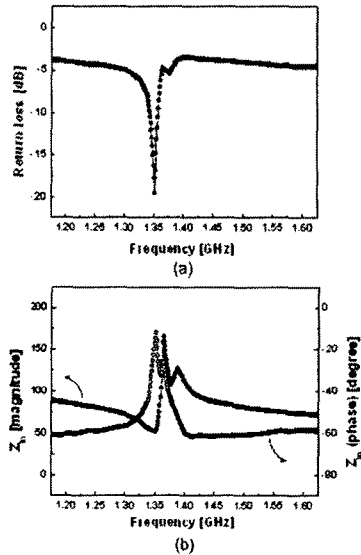


그림3. 제작된 공진기의 주파수응답 특성 : (a) 반사손실, (b) 입력임피던스

2.2.3 상부전극의 영향

그림4는 상부전극으로 사용된 다양한 금속재료에 따른 주파수응답(S₁₁) 특성을 나타낸 것으로 모든 소자에 대하여 상부전극은 150nm, AlN 박막은 2μm로 두께를 고정하여 압전 박막에 의한 공진 중심주파수의 변화를 제거하였다. 상부전극으로 사용된 전극재료들이, Al, Ti, Ni, Cu, Mo, W의 순으로 공진 중심주파수가 낮아지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 Al쪽에서 W쪽으로 갈수록 공진영역에서 단위체적당 질량이 증가하여 상부전극이 AlN 박막에 부하를 주는 효과(mass loading effect)가 커지기 때문이다.¹⁰⁾ 같은 재료에서도 두께가 증가하여 질량이 커져도 같은 현상이 발생하게 된다. 또한, 각각의 반사손실이 다르게 나타나는 것은 표1에 나타난 바와 같이 각 전극재료의 비저항 크기가 달라 저항이 클수록 음향파가 공진기를 수직으로 통과하면서 손실이 커지기 때문이다.

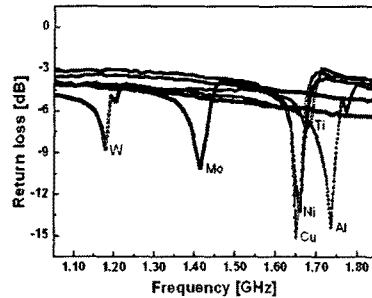


그림4. 상부전극(Al, Ti, Ni, Cu, Mo, W)에 따른 주파수응답 특성

표1. 사용된 금속 전극재료의 특성

구분	Atomic weight	Sound velocity [m/s]	Resistivity [μΩcm] (deposited film/bulk)
Al	26.98	5100	9.52 / 2.65
Ti	47.87	4140	617.9 / 40
Ni	58.71	4970	163.7 / 7
Cu	63.55	3570	8.03 / 1.7
Mo	95.94	6190	274.7 / 5
W	183.85	5174	317.2 / 5

2.2.4 하부전극의 영향

그림5는 하부전극으로 사용된 금속재료에 따른 주파수 응답(S_{11}) 특성을 나타낸 것으로 상부전극 Mo막은 150nm 두께로 고정, 증착하여 하부전극으로 쓰인 금속 전극재료에 따른 체적탄성과 공진기의 특성 변화를 확인하였다. 여기서 Ti와 Ni은 Cu와 Al의 중간값과 거의 차이가 없는 특성을 보여 나타나지 않았다. 또한, 이 경우에도 AlN 박막의 두께는 2 μ m로 고정하여 압전박막에 의한 공진 중심주파수의 변화는 제거했다. 그림5에서 나타난 것과 같이 상부전극의 경우와 마찬가지로, AlN 압전층에 대한 하부전극의 부하효과에 기인하여 Al, Cu, Mo, W 순으로 공진 중심주파수가 낮아지고, 각 전극의 비저항의 크기가 달라 반사손실이 다르게 나타나고 있다.

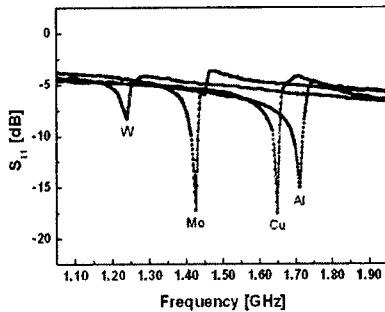


그림5. 하부전극(Al, Cu, Mo, W)에 따른 주파수응답 특성

표1은 그림5 및 그림6에 나타낸 상부전극과 하부전극의 금속재료에 따른 체적탄성과 공진기의 주파수응답 특성의 변화로부터 반사손실(RL), 직렬/병렬 공진주파수(f_s , f_p), 전기기계결합계수(k_r^2), 직렬/병렬양호도(Q_s , Q_p), 공진 대역폭(BW), 공진 중심주파수(f_c) 등의 공진기 특성의 소자 파라미터들의 정량적인 변화를 산출하여 정리하였다. 특히, Mo 전극을 사용한 경우, 비저항은 상대적으로 크지만 반사손실의 감소가 적은 것은 AlN 박막과 Mo막 사이의 격자 부정합도가 적고 열팽창계수의 차이가 작아 전기기계결합계수가 크게 나타나고 이에 따라 음향파의 속도가 크기 때문이라 사료된다.^[11]

표2. 상부전극 및 하부전극의 재료에 따른 체적탄성과 공진기의 주파수응답 특성 비교

구분	상부전극						하부전극			
	Al	Ti	Ni	Cu	Mo	W	Al	Cu	Mo	W
RL [dB]	-14.434	-7.329	-13.246	-15.136	-10.142	-8.768	-15.038	-17.582	-17.227	-8.340
f_s/f_p	1.724	1.674	1.649	1.649	1.401	1.166	1.699	1.637	1.414	1.228
[GHz]	1.760	1.712	1.686	1.676	1.448	1.191	1.737	1.668	1.439	1.253
k_r^2 [%]	5.1	5.5	5.4	4.0	8.0	5.2	5.4	4.6	4.3	5.0
Q_s/Q_p	13.08	14.86	30.86	25.59	10.15	12.32	20.50	57.52	31.16	10.43
	36.42	23.48	22.27	34.81	15.72	49.94	35.47	31.78	47.30	13.00
BW [MHz]	36	38	37	27	47	25	38	31	25	25
f_c [GHz]	1.736	1.675	1.662	1.650	1.414	1.178	1.711	1.649	1.426	1.240

3. 결 론

본 연구에서는 air-gap형 체적탄성과 공진기의 제작시 중간 지지층의 설치하지 않는 새로운 공정방법을 제안하였다. 제작된 소자의 주파수응답 특성 측정 및 주요 소자 파라미터의 정량적인 산출을 통하여 제안된 공정이 기판에 의해 공진기에 발생하는 에너지의 손실을 줄일 수 있음을 확인하였다. 또한, 다양한 상부 및 하부 전극 재료(Al, Ti, Ni, Cu, Mo, W)에 따라 제작된 공진기의 특성을 비교한 결과, 금속박막에 의한 부하효과 및 비저항과 반사손실 사이의 상관관계를 분석하였다. 특히, Mo 전극을 사용할 경우, AlN 박막과 격자상수 및 열팽창계수가 가장 유사하여 높은 비저항값과 소자의 공진시 큰 질량으로 인한 부하효과에도 불구하고 우수한 공진 특성을 얻을 수 있었다. 본 연구의 결과로부터, 제안된 공정방법을 채택하여 에너지 손실을 감소시키고, 상하부 금속 전극재료의 적절한 선택과 양호한 압전박막의 물성 확보를 통하여 특성이 우수한 체적탄성과 공진기의 제작이 가능하다고 사료된다.

본 연구는 2004년도 한국학술진흥재단 지역대학우수과학자 지원연구(R05-2004-00-12142-0)의 지원에 의해 수행되었음.

[참고문헌]

- [1] K.M. Lakin, G.R. Kline, and K.T. McCarron, "Thin film bulk acoustic wave filters for GPS", IEEE Ultrason. Symp. Proc.(1992) p p 471-476
- [2] K.M. Lakin, "Thin film resonator and filters", IEEE Ultrason. Symp. Proc. (1999) p p 895-906
- [3] C.Caliendo, P. Imperatori, E. Cianci, "Structural, morphological and acoustic properties of AlN thick films sputtered on Si(100) and Si(111) substrates at low temperature", Thin Solid Films 441 (2003) p.p32-37
- [4] Yu-Ri Kang, "Air-gap type film bulk acoustic resonator using flexible thin substrate". Sensors and Actuators A 117 (2005) p.p 62-70
- [5] Peng Cong, "A novel piezoelectric-based RF BAW filter", Microelectronic Engineering 66 (2003) p.p 779-784
- [6] Motoaki Hara, "Surface micromachined AlN thin film 2 GHz resonator for CMOS integration", Sensors and Actuators A 117 (2005) p p 211-216
- [7] C.-L. Huang, "Aluminum nitride films deposited under various sputtering parameters on molybdenum electrodes", Solid-State Electronics Vol. 49, Issue 2 (2005) p.p 219-225
- [8] S.H. Lee, J.H. Kim, G.D. Mansfeld, K.H. Yoon, and J.K. Lee, "Influence of electrodes and bragg reflector on the quality of thin film bulk acoustic wave resonators", IEEE I. F. C. Symp. and PDA Exhibition (2002) p.p 45-49
- [9] J.B. Lee, J.P. Jung, M.H. Lee, J.S. Park, "Effects of bottom electrodes on the orientation of AlN films and the frequency response of resonators in AlN-based BARs", Thin Solid Films 447-448 (2004) p.p 610-614
- [10] H. Zhang and E.S. Kim, "Air-backed Al/ZnO/Al film bulk acoustic resonator without any support layer", IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition (2002) p.p 20-26
- [11] S.H. Lim, D. Shindo, H.B. Kang, K. Nakamura, "Study of defects and interfaces in epitaxial ZnO films on (1120) Al3O3 grown by electron cyclotron resonance-assisted molecular beam epitaxy", J. of Crystal Growth 225 (2001) p.p 202-207