

반응성 RF 마그네트론 스퍼터로 증착한 AlN 박막의 물성 및 SAW소자 특성에 관한 연구

論 文
53C-2-4

A Study on the SAW Characteristics of the AlN Thin Film Prepared by Reactive RF Magnetron Sputtering System

高鳳哲* · 田淳培* · 黃永漢*** · 金材煜§ · 南昌祐§§ · 李圭喆§§§
(Bong-Chul Ko · Soon-Bae Jun · Young-Han Hwang · Jae-Wook Kim ·
Chang-Woo Nam · Kyu-Chul Lee)

Abstract - AlN thin film has been deposited on the Al₂O₃ substrate with reactive radio frequency(RF) magnetron sputtering method. In this work, electromechanical coupling coefficient of AlN thin film was increased with an increase of AlN thin film thickness, and the maximum value was 0.11%. Insertion loss of SAW device was decreased with an increase of AlN thin film thickness and the minimum value was 33[dB]. SAW velocity of IDTs/AlN/Al₂O₃ structure and IDT√AlN/Al₂O₃/Si structure were about 5480[m/s] and 5040[m/s] respectively.

Key Words : reactive RF magnetron sputter, AlN thin film, SAW device

1. 서 론

최근 들어 고주파수대의 통신장비들의 개발로 인해 SAW 소자의 동작 주파수 역시 높아져가고 있으며 이를 해결하기 위해서는 고분해능의 사진공정 및 식각 기술을 확보하거나 빠른 음파 속도의 특성을 가지는 새로운 기판 재료를 개발해야 한다. 그중 고분해능의 사진공정 및 식각 기술을 확보하기 위해서는 고가의 장비를 사용해야 하므로 제작 단가를 높일 뿐만 아니라 높은 정밀도가 요구된다. 반면에 박막 증착기술을 이용하여 빠른 음파 속도를 가지는 고품질의 재료를 증착하면 SAW 소자의 동작 주파수를 효과적으로 높일 수 있다.^[1] 이러한 관점에서 저온에서 스퍼터링을 이용하여 제작한 AlN 박막은 빠른 SAW 속도 특성과 압전 특성을 가지므로 실리콘, 유리 및 사파이어와 같은 압전성이 없는 기판 위에서 고주파 탄성 소자의 구현을 가능하게 한다. 사파이어 기판 위에 증착한 AlN 박막은 5500-5800 [m/s]의 SAW 속도를 얻을 수 있다.^[2,3] SAW 속도가 3480 [m/s]인 quartz기판을 사용하여 1[GHz]급의 SAW소자를 제작하기 위해서는 약 0.85[μm]의 패턴 크기가 필요한데 비해 사파이어 기판 위에 제작된 AlN 박막을 이용하면 1.4[μm]의 패턴 크기가 필요하므로 향후 수[GHz]급의 SAW 소자의 응용에서도 기존의 lithography 장비를 이용할 수 있다는 장점을

제공한다. 또한 실리콘 기판 위에 AlN을 증착하여 SAW 기판으로 사용할 경우에는 AlN과 실리콘의 전달지연 특성이 서로 반대의 온도계수를 가지기 때문에 낮은 열전도, 높은 민감도 및 높은 신호 대 잡음비를 요구하는 센서와 액츄에이터에 사용 가능한 온도계수가 0인 SAW 소자의 실현도 가능하다.^[4]

AlN은 약 10¹¹-10¹⁴[Ω]의 높은 전기 저항, 약 6.2[eV]의 넓은 에너지 밴드 갭, 빠른 음파속도(transversal wave의 경우 약 5620[m/s], longitudinal bulk wave의 경우 10500[m/s]), 높은 압전성, 높은 열전도율 (상온에서 2.85W cm⁻¹K⁻¹), 높은 화학적 안정성, 좋은 가시광선 영역 및 적외선 영역에서의 투과성 및 낮은 열팽창 계수(c축과 평행한 방향으로 4.2 × 10⁻⁶K⁻¹, c축과 직각인 방향으로 5.3 × 10⁻⁶K⁻¹) 등의 유용한 특성을 가진다.^[5-14] 이러한 특성으로 인해 AlN은 휴대전화, 코드리스 헤드폰, 보안 경고장치, 군사용 장비 및 센서 등에 사용되는 고주파용 표면 탄성과 및 체적탄성과 소자용 재료로서 큰 응용 가능성을 가진다.

본 연구에서는 앞서 실행한 연구결과를 토대로 사파이어 기판 위에 반응성 RF 스퍼터링법을 이용하여 사파이어 기판 위에 AlN 박막을 증착하고 그 위에 2-단자 SAW 필터를 제조하여 SAW 소자 특성에 대하여 고찰하였다.^[15]

2. 실험방법

본 연구에서는 RF 마그네트론 스퍼터링 시스템(한국진공, 대한민국)을 사용하여 직경 2인치의 단결정 사파이어 기판 위에 AlN 박막을 증착하였다. 진공조를 로타리 펌프와 cryo 펌프를 이용하여 3.0 × 10⁻⁶[torr]까지 압력을 낮춘 다음, 기판과 타겟의 거리를 8[cm], RF 전원을 150[W], 기판온도를 상온, 질소분압비는 0.5, 증착압력은 2[mTorr]로 고정하고 증착시간을 9시간, 18시간, 72시간으로 변화시키면서 AlN 박

* 正 會 員 : 蔚山大 工大 電氣工學科 博士課程
** 準 會 員 : 蔚山大 工大 電氣工學科 碩士課程
*** 非 會 員 : 慶北專門大學 教授 · 工博
§ 非 會 員 : SD 원테크 先任研究員 ·
§§ 正 會 員 : 蔚山大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博
§§§ 正 會 員 : 蔚山大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
接受日字 : 2003年 10月 8日
最終完了 : 2003年 11月 19日

막을 증착하였다. AFM(Atomic Force Microscopy), SEM (Scanning Electron Microscope), XRD(X-ray diffractometer) 등을 이용하여 AlN 박막의 우선배향특성, 표면 거칠기 및 두께 등의 물성 변화를 분석하였으며 이러한 AlN 박막들을 이용하여 제작한 SAW 소자의 특성변화를 측정하였다. 박막을 증착하기 전에 알루미늄 타겟 표면의 불순물과 산화막을 제거하기 위해 150[W]의 RF 전원을 가하여 타겟을 약 10분간 예비 스퍼터링을 시켰다.

사파이어 기판 위에 증착한 AlN 박막을 이용하여 SAW 소자를 제작하기 위해 진공 증발 증착장치(한국진공, 대한민국)를 이용하여 두께 2000[Å]의 Al을 증착하고 사진식각 공정을 이용하여 10[μm]의 배선폭과 40[μm]의 SAW 파장을 가지는 IDT를 제작하였다. 제작된 SAW 소자는 회로망 분석기 E8802A(Agilent, USA)를 이용하여 특성을 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 AlN 박막의 물성

RF 마그네트론 스퍼터로 증착한 AlN의 압전성을 평가할 수 있는 c-축 우선배향성은 SAW 소자가 구현되기 위한 매우 중요한 변수가 되며 표면 거칠기는 SAW의 전파손실에 큰 영향을 미치므로 가장 좋은 c-축 우선 배향성과 가장 낮은 표면 거칠기를 얻기 위한 조건을 찾아야 한다. 하지만 일반적으로 우선배향성은 입계의 크기가 클수록 좋아지는 경향을 보이지만 표면 거칠기는 오히려 나빠지는 특성을 보이므로 적절한 조절이 요구된다. 이전에 발표된 연구 결과에서 이러한 분석을 수행하였으며^[15] 기판과 타겟의 거리를 8[cm], RF 전원을 150[W], 기판온도를 상온, 질소분압비는 0.5, 증착압력은 2[mTorr]에서 증착한 AlN 박막의 특성이 가장 우수하였다.

본 연구를 위하여 앞에서 나타낸 증착 조건에서 증착 시간을 9시간으로 하여 AlN 박막을 증착하였으며 제작된 AlN 박막의 특성을 그림 1과 그림 2에 나타내었다. 그림 1에서 보이는 바와 같이 본 연구에서 제작된 AlN 박막은 (002) 방향의 c-축 우선배향 특성이 우수하였으며 표면 거칠기는 5 [μm]×5μm의 영역에서 3.68[nm]였다. AlN 박막의 두께는 약 2.1[μm]로 측정되었다.

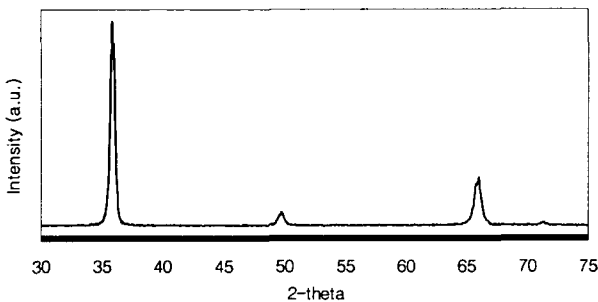


그림 1 AlN/Sapphire 구조의 XRD 피크
Fig. 1 XRD results of AlN thin film on the sapphire substrate.

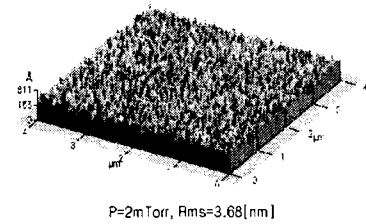


그림 2 AlN/Sapphire 구조의 표면거칠기
Fig. 2 AFM surface images of AlN thin film deposited on the sapphire substrate.

3.2 SAW 특성

2-port SAW filter를 AlN 박막 위에 구현하기 위하여 표 1과 같은 규격을 가지는 포토 마스크를 제작하여 2단자 SAW filter를 제작하였다. 사파이어 기판 위에 증착한 AlN 박막 위에 제작한 SAW 소자 결과를 예측하기 위해서 COM(Coupling of Mode) 이론을 분석한 시뮬레이션을 수행하였다.^[16] 시뮬레이션 결과 삽입손실은 35[dB], 3-dB 밴드폭은 2[MHz], 밴드 저지율은 25[dB]였다.

표 1 2단자 SAW 필터의 포토 마스크 규격.

Table 1 Photo Mask for 2 port SAW filter.

IDT 쌍의 개수	50쌍
전극 폭	10[μm]
SAW 파장	40[μm]
전극이 겹치는 길이	2.4[mm]
전극과 자유 표면의 비	1:1
전파 경로 길이	120[μm]

그림 3은 앞에서 나타낸 증착 조건으로 증착한 약 2.1 [μm] 두께의 AlN/Sapphire기판 위에 제작한 2-단자 SAW 필터의 측정결과이다. 측정 결과 삽입손실은 약 53[dB], 3-dB 밴드폭은 약 1.7[MHz], 밴드 저지율은 약 18[dB]의 값을 보인다.

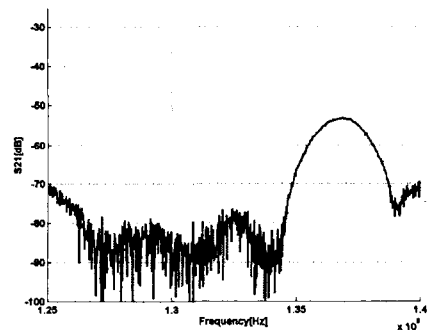


그림 3 2.1[μm]의 AlN 박막에 제조한 2-단자 SAW필터의 삽입손실 특성
Fig. 3 Insertion loss of 2-port SAW filter fabricated on 2.1 [μm] thick AlN thin film.

설계 시뮬레이션 값과 실제 측정값을 비교한 결과 3-dB 밴드폭과 밴드 저지율 특성은 설계값과 크게 다르지 않았지만 삽입손실은 설계값과 약 18[dB]의 차이를 보였다. 이렇게 큰 차이를 보이는 이유는 전기기계 결합계수 값의 차이 때문인 것으로 생각된다. 설계 변수 중 전기기계 결합계수가 두께에 따라 변하는 특성을^[17] 고려하여 약 2[μm]의 AlN 박막 두께에 상응하는 0.04[%]의 이론값^[17]을 상정하였으나 실제 제작한 소자의 측정 결과값을 식 (1)에 대입하여 전기기계 결합계수를 계산한 결과^[18,19] 약 0.01[%]의 결과를 얻을 수 있었다. C. Caliendo 등은 사파이어 기판 위에 RF 마그네트론 스퍼터를 이용하여 AlN 박막을 증착하였으며 SAW 파장의 5[%]정도의 두께에서 전기기계 결합계수가 약 0.03 [%]라고 보고하였다.^[20] 실험적으로 얻은 전기기계 결합계수를 이용하여 다시 시뮬레이션을 수행하면 그림 4와 같은 설계 결과를 얻을 수 있었다. 수정한 시뮬레이션 결과 삽입손실은 44.5dB, 3-dB 밴드폭은 2[MHz], 밴드 저지율은 26[cB]였다.

$$K^2 = \frac{G(f_0)}{8f_0 C_t N} \quad (1)$$

$$C_t = \zeta NWC_s$$

$G(f_0)$ 는 중심주파수에서의 트랜스듀서 컨덕턴스, C_s 는 기판의 등가 유전율, N 은 IDT쌍의 개수, ζ 는 트랜스듀서의 구조에 따른 상수, f_0 는 중심주파수이다.

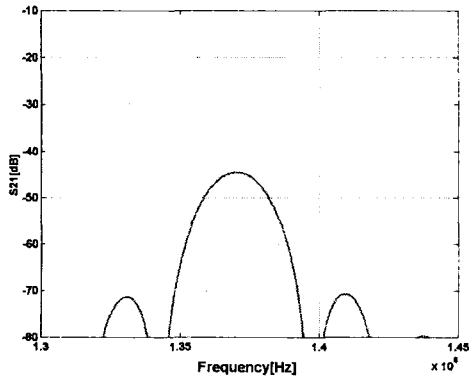
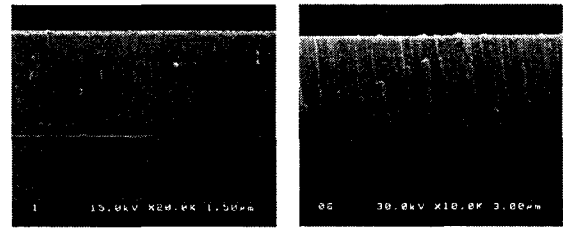


그림 4 2.1[μm] 두께의 AlN 박막의 K^2 값을 이용하여 시뮬레이션을 수행한 2-단자 SAW 필터의 삽입손실 특성
Fig. 4 Simulation results of Two-port SAW filter insertion loss using K^2 of 2.1[μm] thick AlN thin film.

전기기계 결합계수를 보정해 주었음에도 불구하고 설계값과 측정값 사이에는 여전히 약 7.5[dB]정도의 삽입손실의 차이가 존재하는데 이는 박막으로 AlN을 증착할 때 생기는 표면 거칠기, 결정내의 결함, 소자의 제작 및 패키지 제작 때 발생하는 기생 성분 등에 의해 삽입손실 특성이 나빠지기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 보다 정확한 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 이러한 기생성분들을 고려해 주어야 한다. 그림 3에서 측정된 SAW 소자 특성을 살펴보면 AlN 박막의 공진 특성은 확인할 수 있으나 삽입 손실이 너무 크기 때문에 실제 소자로 사용하기에는 곤란하다. 이러한 삽입 손실 특성을 개선하기 위해서는 전기기계 결합계수

를 크게 해주어야 하며 AlN 박막의 두께를 증가시키면 전기기계 결합계수를 증가시킬 수 있고 삽입 손실을 감소시킬 수 있다.^[17] 이를 확인하기 위해 박막의 두께를 증가시키면서 2-단자 SAW 필터를 제작하여 결과를 측정 분석하였다. 그림 5는 증착시간을 9시간 및 18시간 한 경우에 있어서의 AlN 박막의 단면 형상을 보여주고 있다. 9시간 증착한 AlN 박막의 두께는 약 2.1[μm]이었으며 18시간 증착한 AlN 박막의 두께는 약 4.2[μm]였으며 h/λ (박막의 두께와 SAW 파장의 비)의 값은 약 0.05와 0.1 이었다.



(a) 2.1[μm] (b) 4.2[μm]
그림 5 증착 시간에 따른 다른 SEM 단면 형상
Fig. 5 SEM images of AlN thin film.

그림 6은 18시간 증착한 AlN 박막을 이용하여 제작한 2-단자 SAW 필터의 특성이다. 앞에서 설명한 바와 같이 두께가 증가함에 따라 전기기계 결합계수가 0.014[%]로 증가하였고 실제 소자의 삽입 손실 특성도 47[dB]로 3-dB 밴드폭은 약 1.9[MHz]로 개선되었으며 밴드 저지율 특성은 크게 변화하지 않았다. 그러나 박막의 두께가 증가하면 전기기계 결합계수는 증가하지만 표면 거칠기는 증가하므로 이로 인한 삽입 손실은 감소할 수밖에 없으며 이를 개선하기 위해서는 박막 증착 후 박막의 표면 거칠기를 감소시킬 수 있는 공정이나 표면거칠기 특성을 개선할 수 있는 증착조건에 대한 깊은 연구가 있어야 한다.

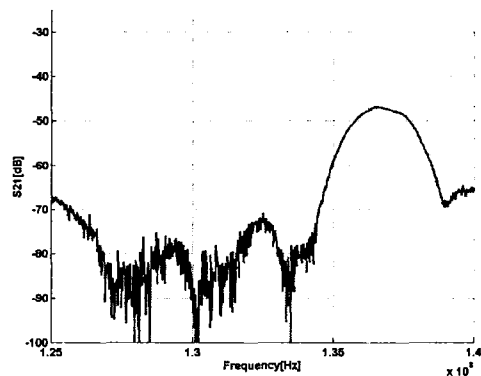


그림 6 4.2[μm] 두께의 AlN 박막에 제조한 2-단자 SAW 필터의 삽입손실 특성
Fig. 6 Insertion loss of two-port SAW filter fabricated on the 4.2[μm] thick AlN thin film.

사파이어 기판 위에 증착한 AlN 박막의 SAW 속도와 실리콘 기판 위에 증착한 AlN 박막의 SAW 속도를 비교하기 위해서 실리콘 기판 위에 9시간 동안 약 2[μm] 두께의 AlN

을 증착한 후 SAW 소자를 제작하고 특성을 분석하였으며 그 결과를 그림 7에 나타내었다. 실리콘 기판과 AlN 박막 사이에는 약 80[nm]의 Al₂O₃ 박막을 중간층으로 증착하였다. 본 연구에서 제작된 사파이어 기판 위에 증착한 AlN 박막의 SAW 속도는 약 5480[%]였으며 실리콘 기판 위에 증착한 AlN 박막의 SAW 속도는 약 5040[%]였다. 이러한 AlN 박막의 SAW 속도는 기존의 SAW 기판으로 사용되는 quartz 기판의 SAW 속도 3480[%], LiNbO₃ 기판의 SAW 속도 3994[%]보다 우수하였다. 실리콘과 사파이어 기판 위에 증착한 AlN 박막을 이용하여 제작한 40[μ m]의 파장을 가지는 SAW 소자의 특성을 측정한 결과 사파이어 기판을 이용한 경우 137[MHz]의 중심주파수 특성을 보였고 실리콘 기판을 이용한 경우 125[MHz]의 중심주파수 특성을 보였다.

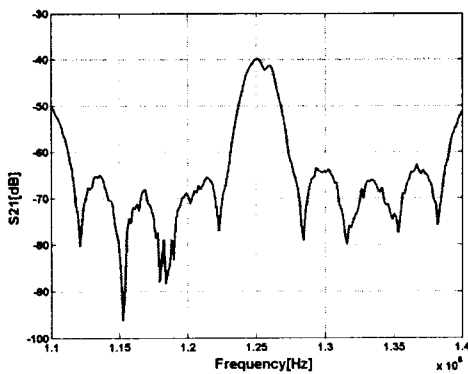


그림 7 AlN/Al₂O₃/Si 기판 위에 제조한 2-단자 SAW필터의 삽입손실 특성
 Fig. 7 Insertion loss of Two-port SAW filter with the AlN/Al₂O₃/Si structure.

박막의 두께에 의하여 표면 거칠기 특성이 나빠지는 것을 확인하기 위하여 사파이어 기판 위에 AlN 박막을 72시간 증착하여 18[μ m]의 두께를 형성한 후 AFM 측정을 수행하였다. 그림 8에 72시간 증착한 AlN 박막의 AFM 형상을 보여주고 있으며 구해진 표면 거칠기의 RMS 값은 약 45[nm]였다.

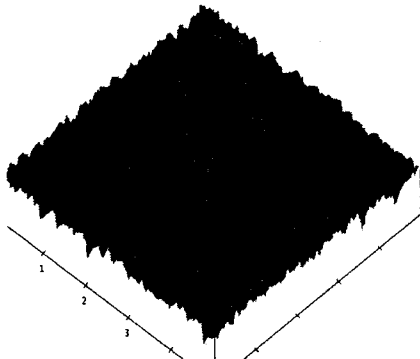


그림 8 72시간 증착한 AlN/Sapphire 박막의 표면거칠기 (R_{rms}=45nm)
 Fig. 8 AFM surface image of AlN thin film deposited for 72 hours.

그림 9는 18[μ m] 두께의 AlN 박막을 이용하여 제조한 2-단자 SAW 필터의 측정 결과이다. AlN 박막의 표면 거칠기가 많이 나빠졌음에도 불구하고 전기기계 결합계수는 0.11 [%], 삽입손실은 약 33[dB]로 밴드저지율은 약 25[dB]로 상당히 개선되었다. 이는 SAW 소자의 삽입손실 특성이 표면 거칠기에 의해서 영향을 받기도 하지만 실제 AlN 박막의 두께에 따른 전기기계 결합계수 값에 많은 영향을 받는다는 반증이기도 하다. 또한 이러한 삽입손실의 감소로 인해 밴드저지율 특성도 향상된 것으로 판단된다. 표 2에 AlN 박막의 증착 시간에 따른 삽입손실의 변화 및 전기기계 결합계수 값의 변화를 나타내었다. 72시간 증착한 AlN 박막을 이용하여 제작한 SAW 소자의 설계 값과 측정값이 24[dB]와 33[dB]로 큰 차이를 보이고 있는데 이는 72시간을 증착한 AlN 박막의 나쁜 표면 거칠기로 인하여 전파손실이 증가했기 때문인 것으로 판단된다.

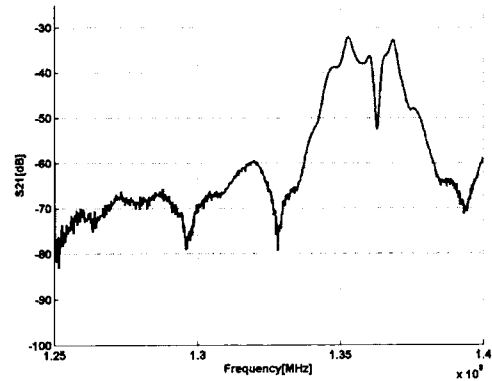


그림 9 18[μ m] 두께의 AlN 박막에 제조한 2-단자 SAW필터의 삽입손실 특성
 Fig. 9 Insertion loss of 2-port SAW filter fabricated on the 18[μ m] thick AlN thin film.

표 2 AlN 박막의 두께에 따른 SAW 소자의 특성 변화
 Table 2 Variation of SAW characteristics of AlN thin film of various thickness.

중심주파수	137.5[MHz]	137[MHz]	136.5[MHz]
3dB-밴드폭	1.7[MHz]	1.9[MHz]	1.9[MHz]
밴드저지율	18[dB]	18[dB]	25[dB]
K2	0.01%	0.014%	0.11%
삽입손실(설계값)	44.5[dB]	40[dB]	24[dB]
삽입손실(측정값)	52[dB]	46[dB]	33[dB]

감사의 글

본 연구는 2001년도 울산대학교 연구비에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

4. 결 론

시파이어 기판 위에 증착한 AlN 박막을 이용하여 SAW 소자를 제작한 결과 5480[%]의 우수한 SAW 속도를 얻을 수 있었다. AlN 박막의 두께가 2.1[μm]에서 18[μm]로 증가하면 AlN 박막의 전기기계 결합계수는 0.01[%]에서 0.11[%]로 증가하는 경향을 보였으며 표면 거칠기의 rms값은 3.68[nm]에서 45[nm]로 크게 나빠지는 경향을 보였다. 전기기계 결합계수의 증가로 인해 SAW 소자의 삽입 손실 특성이 52[dB]에서 33[dB]로 개선되었고 이로 인해 밴드 저지율 특성도 약 18[dB]에서 약 25[dB]로 개선되는 결과를 나타내었으나 3-dB 밴드폭은 거의 변화가 없었다.

참 고 문 헌

- [1] G.F. Iriate, F. Engelmann, I.V. Katerdjiev, "Reactive sputter deposition of highly oriented AlN films at room temperature" J. Mater. Res. 17 (2002), pp. 1469
- [2] H. Okano, N. Tanaka, Y. takahashi, T. Tanaka, K. Shibata, "Preparation of aluminum nitride thin films by reactive sputtering and their applications to GHz - band surface acoustic wave devices" Appl. Phys. Lett 64(2) (1994), pp.166-168
- [3] T. Shiosaki, T. Yamamoto, T. Oda, A. Kawabata, "Low-temperature growth of piezoelectric AlN film by rf reactive planar magnetron sputtering" Appl. Phys. Lett. 36 (1980), pp643
- [4] S. Middelhoek, S.A. audet. "Silicon Sensors" Academic Press (1989), London.
- [5] J. Edwards, K. Kawabe, S.Stevens, R.H.Tredgold, "Space charge conduction and electrical behaviour of aluminium nitride single crystal" Solid State Communications Vol. 3 (1965), pp. 99-100
- [6] V.W. L. Chin, T.L. Tansley, T. Osotchan, "Electron mobilities in gallium, indium, and aluminum nitrides" J. Appl. Phys. 75(11) (1994), pp. 7365-7372
- [7] H. Yamashita, K. Fukui, S. Misawa, S. Yoshida, "Optical properties of AlN epitaxial thin films in the vacuum ultraviolet region" J. Appl. Phys. 50 (1979), pp.896
- [8] G. Carlotti, F.S. Hickernell, H.M. Liaw, L. Palmieri, G. Socino, and E. Verona, "The elastic constants of sputtered aluminum nitride films." Proc. 1995 IEEE Ultrason. symp. (1995), pp 353-356
- [9] Xinjiao, Li, Xu Zechuan, He Ziyou, Cao Huazhe, Su Wuda, Chen Zhongcai, Zhou Feng, Wang Enguang, "On the properties of AlN thin films grown by low temperature reactive r.f. sputtering" Thin Solid Films 139, 3 (1986), pp. 261-274
- [10] Glen A. Slack, R.A. Tanzilli, R.O. Pohl, and J. W. Vandersande, "The intrinsic thermal conductivity of AlN" J. App. Phys. 76, 3 (1994), pp. 1363-1398
- [11] Tilo P. Drusedau, Jurgen Blasing, Thin Solid Films 377-378 (2000), pp27-31
- [12] A. Mahmood, R. Machorro, S. Muhl, J. Heiras, F.F. Castillon, M.H. Farias, E. Andrade, Diamond and Related Materials 12 (2003), pp. 1315- 1321
- [13] W.M. Yim and R.J. Paff, "Thermal expansion of AlN, sapphire and silicon" J. Appl. Phys. 45(3) (1974), 1456-1457
- [14] H. Morkoc, S. Strite, G.B. Gao, M.E. Lin, b. Sverdlov, and M. Burns, "Large-band-gap SiC, III-V nitride, and II-VI AnSe-based semiconductor device technologies", J. Appl. Phys. 76(3) (1994), pp.1363-1398
- [15] B.C. Ko, J.W. Son, K.S. Kim, M. S. Eum, C. W. Nam, K. C. Lee, The Korean Institute Of Electrical Engineers, 52C-7-3 (2003), pp. 288-292
- [16] Victor Plessky, "Coupling-Of-Modes analysis of SAW devices" International Journal of High Speed Electronics and Systems, Vol. 10, No. 4(2000), pp. 867-947
- [17] D. G. Kipshidze, H. P. Schenk, A. Fissel, U. Kaiser, J. Schulze, Wo. Richter, M. Weihnacht, R. Kunze, J. Krausslich, "Molecular-beam epitaxy of a strongly lattice-mismatched heterosystem AlN/Si(111) for application in SAW devices" American Institute of Physics, 33(11) (1999), pp. 1241-1246
- [18] O. Elmazria, V. Mortet, M.E. Hakiki, M. Nesladek, P. Alnot, "High Velocity SAW Using Aluminum Nitride Film on Unpolished Nucleation Side of Free-Standing CVD Diamond" IEEE. Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., vol. 50, no. 6 (2003), pp. 710-716
- [19] J. H. Hines, D. C. Malocha, "A simple transducer equivalent circuit parameter extraction technique" in Proc. IEEE Ultrason. Symp. (1993), pp 173-177
- [20] C. Caliendo, g. Saggio, P. Verardi, E. Verona, "Piezoelectric AlN film for SAW devices applications" IEEE Ultrason. Symp. (1993), pp 249-252

저 자 소 개



고 봉 철 (高 鳳 哲)

1971년 7월 22일생. 1998년 울산대학교 전기공학과 졸업. 2000년 동대학원 전기공학과 졸업(석사), 2000년~현재 동대학원 전기공학과 박사과정



김 재 욱 (金 材 煜)

1973년 6월 30일생. 1999년 2월 울산대학교 전기공학과 졸업, 2001년 2월 울산대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 현재 (주) SD 원테크 선임연구원



전 순 배 (田 淳 培)

1975년 8월 28일생. 2002년 2월 울산대학교 전기공학과 졸업, 현재 울산대학교 대학원 전기공학과 석사과정



남 창 우 (南 昌 祐)

1958년 2월 19일생. 1984년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1989년 Univ. of Florida 전기공학과 졸업(석사). 1994년 Penn. State Univ. 전기공학과 졸업(박사). 현재 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 부교수



황 영 한 (黃 永 漢)

1965년 4월 29일생. 1990년 울산대학교 전기 공학과 졸업, 1992년 2월 울산대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1996년 2월 동대학원 전기공학과 졸업(박사), 현재 경북전문대학 철도 전기과 교수



이 규 철 (李 圭 喆)

1947년 11월 21일생. 1973년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1975년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1981년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 울산대학교 전기전자정보시스템 공학부 교수, 대한전기학회 울산지부 회장