

Al-Cu 합금 전극막 구조를 갖는 사다리형 SAW filter의 RF-고전력 내구성 특성 고찰

A Study on RF High Power Durability of Al-Cu Alloy Electrodes Used in Ladder-type SAW (surface acoustic wave) Filters

김남철*, 이기선*, 서수정**, 김지수***, 김윤동***

(Nam-Chul Kim*, Kee-Sun Lee*, Soo-Jung Suh**, Ji-Soo Kim***, Yoon-Dong Kim***)

Abstract

As a power durable RF SAW filters, Al-(0~2wt%)Cu alloy multi-layered thin electrodes were deposited on 42° LiTaO₃ piezoelectric substrates by magnetron sputtering process, and then ladder-type RF SAW filters, satisfying the electrical specification of CDMA transmission band, were fabricated through optimizing SAW resonator structures. The temperature of film electrodes in SAW filter was increased with RF power, and reached the maxima to cause a failure of SAW filters at the cut-off frequencies of the RF filter band. As RF power increases, the electrodes of Al-Cu alloy showed higher power durability than that of pure Al. The multi-layer laminated film of Al-1wt.%Cu/Cu/Al-1wt.%Cu resulted in the best power durability up to 4 W of RF power. Every film electrode, however, was destroyed within seconds whenever applying a critical RF power to SAW filters, regardless of the composition and structure of film electrodes. The breakdown of film electrodes under RF power seems to believe due to the fatigue of electrodes caused by repetitive cyclic stress of surface acoustic wave, which is amplified as RF power increases.

Key Words : SAW filter, power-durability, film-electrodes, Al-Cu alloy thin film, multi-layered thin film

1. 서 론

셀룰러 휴대용 단말기의 RF(radio frequency) 회로 내에서 RF 단간 필터나 안테나 듀플렉서 형태로 폭 넓게 사용되고 있는 표면탄성파(surface acoustic wave; SAW) 필터의 소형화 및 특성 향상을 위한

많은 연구가 진행되고 있다[1,2]. SAW 필터 내에서 입력된 RF 전기 신호는 압전 (piezoelectric) 기판 상에서 표면 탄성파(SAW)로 변환되는데, 기판에는 일반적으로 순수한 Al 박막이 전극으로 사용되고 있다. 전기신호에 의하여 필터가 동작되는 동안에 전극은 표면탄성파로 인해서 반복 응력(repetitive stress)을 받게 되며, 전극에 미치는 응력의 강도는 사용 주파수(radio frequency: RF)와 인가되는 전력 밀도(power density)에 근사적으로 증가한다[3]. 더욱이 필터 사용 주파수가 기가 헤르츠(GHz: 10⁹ Hz) 대역으로 증가함에 따라 전극박막의 길이와 폭은 줄어들게 되며, 이 주파수에서 응력의 크기는 대략 10~100 MPa로 보고되고 있다[4]. 표면 탄성파에 의한

* : 공주대학교 신소재공학부, 생산기술연구소
(충남 공주시 신관동 공주대학교
Fax: 041-858-2939
E-mail : nckim@kongju.ac.kr)

** : 성균관대학교 공과대학 금속재료공학부

*** : 삼성전기(주) 적층박막사업부

2000년 10월 21일 접수, 2000년 12월 15일 1차심사완료

2001년 4월 6일 2차심사완료

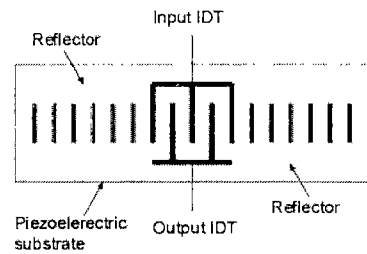
반복 응력은 Al 원자의 이동을 유발하여 공극(void)의 성장이나 Al 전극내 hillock의 주요 요인이 되며, 이는 결국 전극의 저항 증가와 열화로 이어져 결과적으로 SAW 필터의 성능 저하로 이어진다고 보고되고 있다[5]. 따라서, RF 고전력에서 충분한 내전력 특성을 갖는 SAW 필터의 개발을 위해서 다양한 전극 개발이 진행되어 오고있다. 지금까지 보고된 주요한 전극재료로서 단결정 혹은 고배향성 집합조직을 갖는 Al 전극막[6,7], Al-Cu 합금막[3~5], Al-Ti[8], Al-W[9] 합금막 및 Al-Cu/Cu/Al-Cu 합금 다층막[10] 등이 있다. 이중에서 집합조직을 갖는 Al막은 재현성을 얻기 어렵고, Al-Cu 합금막은 순수한 Al에 비하여 저항이 높으며, 기타 합금막은 열처리 할 때 whisker 혹은 침상의 석출물이 출현하여 전극의 단선을 유발하는 문제점을 갖고 있다고 보고되었다. 전극막 개발과 병행하여, SAW 필터 구조의 설계 변화에 의해서도 필터의 RF 내전력 특성을 향상시킨다는 연구 보고가 발표되고 있다[11,12]. 이는 SAW 필터의 사용대역이 RF 고주파 대역으로 증가함에 따라, 종래의 구조가 복잡한 dual mode형 SAW 필터보다 SAW 공진기 구조를 사용한 사다리형(ladder-type) SAW 필터가 비교적 전극막 구조가 간단하여 RF 고전력 에너지 밀도(power density)를 감소하는데 원인이 있다[13].

이 연구에서는 고주파(RF)-고전력(high power) 환경에서 열화되는 SAW 필터의 파손 원인(failure mechanism) 규명을 위한 시도로서, one-port SAW 공진기 구조를 갖는 ladder-type SAW 필터를 설계하였으며, 전극막으로 Al-(0.5~2wt.%)Cu 합금막과 RF 내전력 특성이 우수하다고 보고된 Al-1wt.%Cu/Cu/Al-1wt.%Cu 합금 다층막을 42° LiTaO₃ 압전 기판 위에 증착하여, 800 MHz 대역의 SAW 필터를 제작하였다. 합금막을 사용하여 제작된 필터는 순수한 Al 전극막에 비하여 전기저항이 높음에도 불구하고 CDMA 송신단 필터 규격에 만족하였다. RF 고전력인가에 따른 SAW 필터 내부 온도 변화를 고찰하였고, Al-Cu 합금막 조성 및 구조 변화에 따른 RF 내전력 특성 변화와 시간에 따른 전극막의 온도 변화를 고찰하였다.

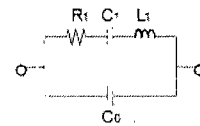
2. 실험

사다리형(ladder-type) 필터는 기본적으로 one port 공진기로 구성된다. One-port 공진기는 그림 1(a)와 같이 압전 기판 상에 전기적 신호를 표면탄성파로 변환시키는 전극변환기(IDT: interdigital transducer)

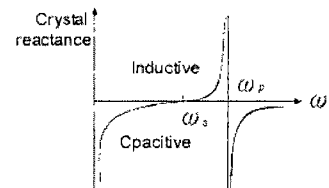
와 표면탄성파를 양쪽으로 집중시키는 한 쌍의 반사기(reflector)로 구성된다. 이 one-port 공진기의 전기 기계적 특성을 등가회로(lumped equivalent circuit) 상으로 표시하면 그림 1(b)와 같고 1(c)는 이 등가회로에 대한 주파수 특성을 나타낸다. 여기서 R_1 , L_1 , C_1 은 공진자의 기계적인 부분이며, C_0 는 전기적인 부분에 해당한다. 각각의 회로정수는 반사기 전극수 및 반사계수, IDT 전극수, 전극길이(aperture length: W), 그리고 압전기판의 압전 및 유전상수 등에 의하여 결정된다[14].



(a) One-port resonator



(b) Equivalent circuit



(c) Frequency characteristics

그림 1. One-port SAW 공진기의 구조, 등가회로 및 주파수 특성.

Fig. 1. The structure, equivalent circuit and frequency response of one-port SAW resonator.

사다리형(ladder-type) SAW 필터는 상기의 one-port 공진기를 그림 2(a)와 같이 사다리형으로 접속하여 구성하며, 그에 따른 직렬 및 병렬 공진자

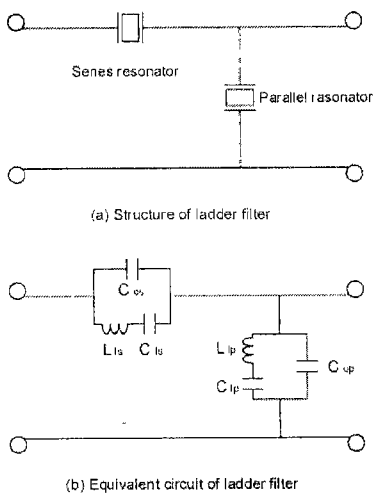
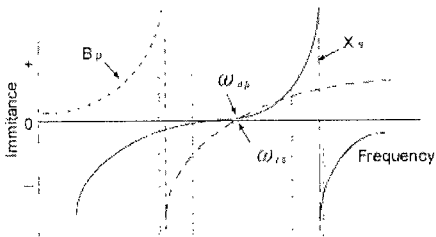


그림 2. SAW 공진기로 구성된 사다리형 SAW 필터의 구조 및 등가회로.

Fig. 2. The structure and equivalent circuit of SAW resonator coupled ladder-type SAW filter.

의 등가회로는 그림 2(b)와 같이 표시된다. 이렇게 연결된 ladder-type SAW 필터의 특성은 도식화 된 그림 3과 같이 직렬 공진기의 공진 주파수(ω_{rs}) 와 병렬 공진기의 반공진 주파수(ω_{ap})를 같게 하여 전체적으로 개별 공진자보다 훨씬 넓은 통과 주파수대역과 큰 저지대역을 구현할 수 있다. SAW 필터의 기본특성인 통과 대역폭은 각각의 공진기에 있어서 공진주파수 f_r 와 반공진주파수 f_a 의 차에 의존하며, 이 차이를 조정하여 대역폭을 광대역 및 협대역으로 구현할 수 있다. 그리고 필터의 저지대역 감쇄량은 구성단위의 공진자의 수 및 직렬과 병렬 공진자의 용량비에 의존한다. 또한, 직렬, 병렬 공진기의 static capacitance를 C_{0s} , C_{0p} 라 할 때 이때의 용량비 C_{0s}/C_{0p} 를 static capacitance ratio라 하는데, 삽입손실과 저지대역은 이 용량비로서 조절이 가능하다 [15,16]. 이 연구에서는 현재 CDMA 방식의 송신 대역인 824 - 849 MHz에서 25 MHz의 대역폭을 가지는 필터를 설계하기 위하여, ladder-type SAW 필터의 직렬, 병렬 공진기 구성단위를 cascade 접속하여, 각각 공진기 등가회로의 회로정수 및 전극주기 등을 최적화하였으며, 이때 사용된 전극설계 parameter를 표 1에 나타내었다.

(a) Frequency response of ladder filter



(b) Frequency characteristics of ladder filter

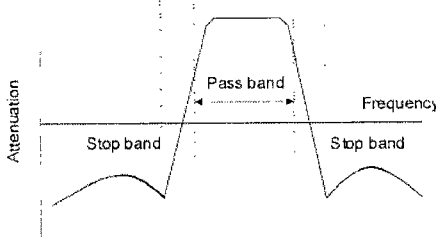


그림 3. 사다리형 SAW 필터의 주파수 배치 및 특성.

Fig. 3. Frequency characteristics of ladder-type SAW filter.

표 1. 사다리형 SAW 필터 설계 재원 및 범위.

Table 1. Design parameters and variation range of ladder-type SAW filters.

Design Parameters	Variation Range
· PR IDT fingers	· 150 ~ 180 (pairs)
· SR IDT fingers	· 200 ~ 250 (pairs)
· PR reflector fingers	· ≥ 100 (pairs)
· SR reflector fingers	· ≥ 100 (pairs)
· PR IDT period	· 4 ~ 6 μm
· SR IDT period	· 4 ~ 6 μm
· PR reflector period	· 4 ~ 6 μm
· SR reflector period	· 4 ~ 6 μm
· PR aperture width	· 100 ~ 150 μm
· SR aperture width	· 30 ~ 60 μm
· electrode thickness	· 3000 ~ 4500 Å
· metallization ratio	· 0.5 ~ 0.6

* PR : parallel resonators, SR : series resonators

고주파 SAW 필터 구현을 위한 전극 박막 증착용 압전 기판으로는 RF 대역에서 SAW 진행파 손실(propagation loss)이 최소값을 보이는 42° Y-X

LiTaO₃(42LT) 단결정을 사용하였다[17]. 타겟(target) 재료로는 순도 99.9%의 순수한 Al 및 Cu 그리고 합금조성의 Al-(0.5wt.%, 1wt.%, 2wt.%)Cu를 사용하였다. 증착 방법은 DC-magnetron sputtering 장비를 사용하여, 초기 진공도는 rotary pump와 turbo pump를 사용하여 2x10⁻⁶ Torr.를 유지하였으며, 박막 제조시 Ar gas 분위기에서 증착 압력은 1 mTorr.에서 4 mTorr. 까지 변화하였다. Sputtering power는 1~1.5 kw 까지 변화하였다. 이와 같이 증착 압력과 power를 조절하여 박막의 균질한 미세조직을 제어하려고 시도하였다. 박막의 열처리에는 Al-Cu 합금의 시효온도가 약 130~200 °C이며, 압전기판의 상전이 온도를 감안하면 저온일수록 유리하다. 따라서 열처리 온도를 180 °C의 저온으로 고정하고 시간을 30분에서 12시간까지 변화하면서 진공 분위기 하에서 실시하였다. 열처리 전과 후의 박막의 전기저항은 4단자법(four point probe method)으로 평가하였다. 합금 전극막 구조에 따라 0.3~0.45 μm 두께로 증착된 전극막은 대략 1 μm의 IDT 전극 선폭을 구현하기 위하여 BCl₃ 와 Cl₂의 혼합 gas를 사용한 RIE(reactive ion etching) 방식과 ion-milling으로 건식각(dry-etching) 하였으며, 제작된 SAW 필터 칩은 3.0x3.0 mm²의 세라믹 패키지에 실장하였다.

SAW 필터의 전극막 내전력 특성 평가는 회로망 분석기(network analyzer)의 RF source를 이용하여 추가적인 power-amp를 통하여 원하는 고전력(RF high power)으로 증폭하여 테스트 필터에 인가후 통과대역 삽입손실이 0.5 dB 이상 열화되었을 때를 필

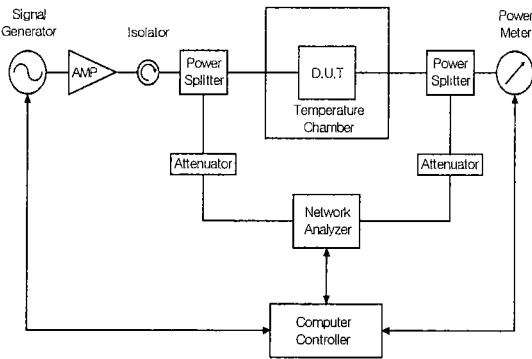


그림 4. SAW 필터 내전력 측정시스템 도식도.
Fig. 4. Block diagram of the system to evaluate the power durability of SAW filters.

터의 파손시간(time-to-failure) 혹은 필터의 수명(lifetime)으로 규정하였고, 열화되었을 때의 출력 전압(output power)과 시간을 측정하였다. 고주파 전력(RF power) 인가에 따른 칩 온도 상승의 영향을 최소화하기 위하여 특성 평가는 80 °C로 유지되는 항온조에서 실시하였으며, 그림 4에 도식화한 방법을 나타내었다.

인가되는 RF power 및 주파수 변화에 따른 SAW 내부 칩의 온도 변화를 측정하기 위하여 전술한 방식으로 일정한 고주파 전력(RF power)을 인가하면서 상온에서 측정용 PCB에 실장된 측정 필터 내부의 전극박막을 적외선 온도 센서에 의하여 온도 변화를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

회로망분석기에 의하여 측정된 ladder-type SAW 필터와 최적화되어 설계된 필터 특성을 그림 5에 나타내었다. CDMA 방식의 송신대역(TX) 824-849 MHz를 갖는 송신필터는 설계치와 잘 일치하였다. 송신 대역내 필터의 삽입손실은 2.0 dB 미만이고 대역폭은 25 MHz이며, 통과 대역 외부의 감쇄 특성은 최소 35 dB이상으로 일반적으로 사용되는 CDMA 송신단 특성을 만족하였다.

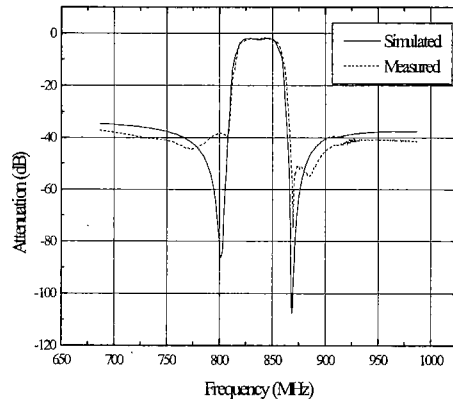


그림 5. 사다리형 SAW 필터의 설계치 및 측정치 주파수 특성.
Fig. 5. Frequency characteristics of simulated and measured ladder-type SAW filter.

서론에서 설명한 바와 같이, 종래의 SAW 필터는 입력단에 인가된 전기신호가 표면탄성파로 전환되어 출력단에서 전기신호로 다시 변환되는 일반적인 IDT(interdigital transducer) 구조로 구성 되어있다. 이러한 구조에서는 표면탄성파의 진행 손실(propagation loss)과 인가된 RF 전력(power)에 의하여 전극박막의 저항이 증가하며 그에 따라 삽입손실이 증가한다. 결과적으로 이러한 구조의 필터는 고전압에 의한 전극막 내전력 특성이 열화가 되기 쉽다. 반면에, SAW 공진기를 사용한 ladder-type SAW 필터는 수정진동자 필터나 전형적인 LC(inductance-capacitance) 회로 필터와 같이, 입력단에 인가된 전기신호는 직렬 및 병렬로 연결되어 있는 SAW 공진기의 임피던스(impedance) 정합회로, 즉 전기적인 연결 회로에 의하여 출력단으로 진행된다. 따라서, 탄성파의 진행손실을 무시할 수 있으며, 또한 입력단에 인가되는 전체 전기신호 에너지가 표면탄성파로 전환되는 것이 아니라 직렬 및 병렬로 연결된 SAW 공진기로 쉽게 분산되므로 전기신호 에너지 밀도(energy density)에 의한 전극막의 저항 증가를 최소화 할 수 있어 통과대역(pass-band)에서 낮은 삽입손실과 내전력 특성을 향상시킨다고 보고되고 있다[11~13]. 따라서, 순수한 Al 보다 저항이 높은 Al-transition metal 합금막을 전극막으로 설계 하여도 RF 대역에서 규격을 만족하는 낮은 삽입손실을 구현할 수 있게 된다. 최근에, SAW 공진기의 천극길이(aperture length)와 전극수(number of finger electrodes)의 조합에 의한 전극저항 조절을 통하여 내전력 특성을 향상시킬 수 있다고 보고되었으나[10], 필터의 삽입손실 증가와 상관관계에 있으며, 또한 RF 고전력(> 1 W)하에서 내전력 특성은 전극막 열화가 주된 원인으로 보고되므로 이 연구에서는 합금 전극막을 사용한 CDMA 송신단 SAW 필터 최적화 설계에 한정하였다.

그림 6은 순수한 Al과 Al-Cu(4200 Å) 합금막의 Cu 함량 변화에 따른 박막의 전기저항과 필터의 최소 삽입손실(minimum insertion loss)의 관계를 나타내었다. Al-Cu 합금의 박막저항이나 필터의 삽입손실 모두 순수한 Al 박막 보다 높았으며, 또한 Cu 함량의 증가에 따라 증가하였다. 합금(Al-Cu)박막의 전기저항 증가는 Cu 원자의 치환에 따른 전기저항의 증가 현상이라 판단되며, 합금박막의 전기저항 증가에 따라 필터의 전기신호 에너지의 손실이 증가하여 최종적으로 삽입손실 증가로 이어진다고 판단된다. 또한, 이 연구에서 증착된 Al-1wt.%Cu(1800 Å)/Cu(300 Å)/Al-1wt.%Cu(1800 Å) 3층막 구조를

갖는 박막의 경우 전기저항은 같은 조성(Al-1wt.%Cu)의 단일막 저항($3.5 \mu\Omega\text{-cm}$) 보다 높은 약 $4.6 \mu\Omega\text{-cm}$ 로 나타났다. 이는 기준에 보고된 결과와 같이[5], Al-Cu합금과 Cu 박막 계면에서의 극부적인 중간상(intermetallic compound) 형성에 의한 영향으로 예상된다. 순수한 Al에 비하여 Al-Cu 합금막 및 다층막의 전기저항 증가에도 불구하고, ladder-type SAW 필터 최적화 설계를 통하여 RF SAW 필터의 통과대역(pass-band) 규격을 만족하는 낮은 삽입손실을 유지할 수 있었다. Cu 함량이 2wt.%인 합금박막(Al-2wt.%Cu)의 경우, 건식각(dry-etching) 과정에서 어려움이 발생하였고, 또한 일부 부식(corrosion) 현상이 관찰되었다. 따라서, 이 합금의 상대적으로 높은 전기저항과 그에 따른 높은 삽입손실은 공정상 어려움에 일부 원인이 있다고 판단된다.

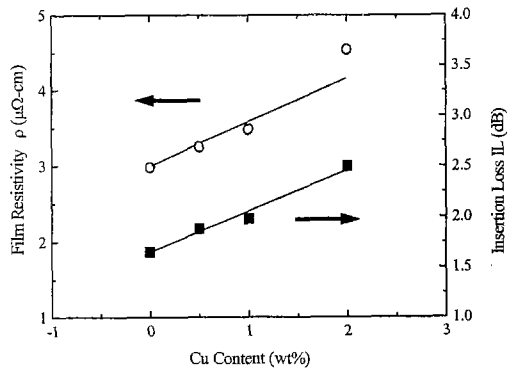


그림 6. Cu 함량에 따른 박막 저항 및 SAW 필터의 삽입손실 특성 변화.

Fig. 6. The film resistivity and the insertion loss of SAW filters as a function of Cu content.

열처리 시간에 따른 pure Al 및 Al-(0.5~2wt.%Cu) 합금 박막(4200 Å)의 전기저항 변화율 초기저항(ρ_x)과 열처리 시간에 따른 저항(ρ_h)의 변화율로 환산하여 그림 7에 나타내었다. 열처리 시간이 증가할수록 저항은 감소하였으며, 약 4시간을 경과하면 거의 일정하였다. 박막의 전기저항은 Cu 함량에 따라 대략 $3.2\sim 4.5 \mu\Omega\text{-cm}$ 로 나타났다. 이러한 현상을 N. Kimura[18] 등이 지적한 바와 같이 용질 원자인 Cu 원자들이 열처리 중에 결정립계로 편석되는, G. P Zone $\rightarrow \theta \rightarrow \theta' \rightarrow \theta''$ 과도 같은 중간

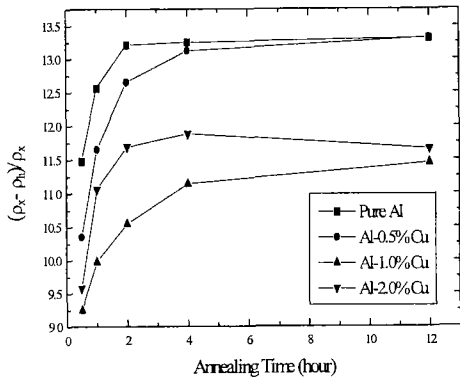


그림 7. 열처리 시간에 따른 순수한 Al 및 Al-Cu 합금 박막의 저항 변화율.

Fig. 7. The resistivity change of pure Al and Al-Cu alloy films as a function of annealing time.

상의 석출현상과 관계가 있을 것으로 생각할 수도 있으나, 본 과제의 선행된 연구 결과로는[19] Al-Cu 합금의 Cu 조성 2wt.% 미만의 경우 짧은 시간(~4 시간)안에 석출의 가능성은 희박하며, 열처리 중에 결정립 성장에 따른 박막내 결함의 감소 및 박막내 잔류응력의 완화가 전기저항의 감소로 나타난 것으로 판단된다.

상온(25 °C)에서 일정한 전력(RF power : 0.8 W)을 인가한 이후 RF 주파수 변화에 따른 실제 SAW 필터 칩(chip) 내부의 전극막 온도 변화를 측정하여 그림 8에 나타내었다. 전극막의 온도는 필터의 대역 주파수에 따라 차별적으로 증가하였으며, 대역 양 끝단 주파수(cut-off frequencies)에서 최대값을 나타내었다. 전체적으로 SAW 칩 내부의 온도가 증가하는 원인은 RF 고전압에 의한 칩 내부의 저항증가와 그에 따른 주울열(Joule heating) 때문이라 판단된다. 일반적으로 SAW 필터에서 고주파 전기신호의 에너지 밀도(energy density)는 필터 통과대역 끝단 주파수(cut-off frequencies)에 집중되는 것으로 보고되고 있다[5]. 따라서, 양 끝단 cut-off 주파수에서 전극박막 내부의 Al migration 현상과 기타 결함들(voids, hillock 등)이 증가하여, 결과적으로 저항증가로 이어지고 그에 따라 전극박막의 온도가 주파수 변화에 따라 차별적으로 상승하는 것으로 추정할 수 있다.

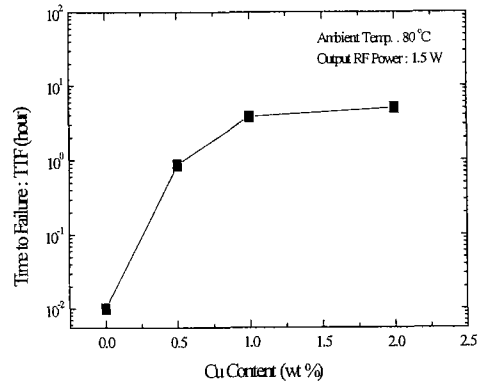


그림 8. 주파수에 변화에 따른 필터 전극박막 온도 변화.

Fig. 8. Frequency dependence of electrode film temperatures.

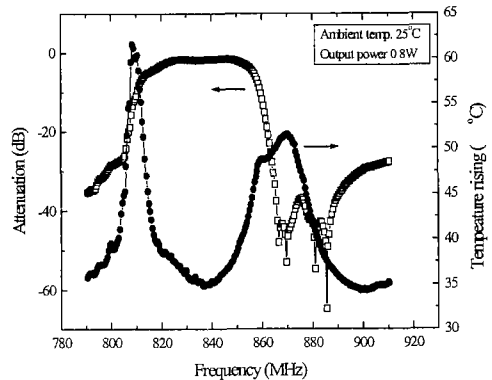


그림 9. 순수한 Al 및 Cu 함량에 따른 Al-Cu 합금 박막의 열화시간 특성

Fig. 9. The time-to-failure of the pure Al and Al-Cu alloy film as a function of Cu content.

실질적으로 SAW 필터의 열화현상은 RF 고전력을 인가함에 따라 cut-off 주파수에서 순간적으로 온도가 증가할 때 관찰되었다.

순수한 Al 박막 및 Al-Cu 합금박막의 파손시간 (TTF: time-to-failure) 특성을 그림 9에 나타내었

다. 전극박막의 파손시간은 필터의 cut-off 주파수 근방의($f_{co} \pm 4$ MHz) 통과대역 주파수에서 입력되는 RF 전력(1.5 W)에 따라 필터의 삽입손실(insertion loss)이 0.5 dB 이상 감소하거나, 필터가 열화되어 파손되는 시간을 의미한다. 순수한 Al 전극막의 경우 1~2 분 이내에 파손되었으며, Al-Cu 합금막의 경우 Cu 함량 증가에 따라 파손시간(TTF)은 증가하였으나, Cu 함량이 1wt.% 이상에서는 큰 차이가 없었다. 전술하였듯이, 순수한 Al 박막에 비하여 상대적으로 높은 전기저항을 갖는 합금막에서 전기저항 증가에 따른 전극막의 RF 내전력 특성변화는 관찰되지 않았다. Cu 함량이 증가하여 Al-Cu 합금의 고용체 범위를 벗어나는 경우에는, 전기저항의 증가로 인하여 삽입손실이 비선형적으로 증가하여 결과적으로 내전력 특성 열화로 이어진다고 보고되고 있으나[10], 이 연구 실험조건에서 증착된 Cu 함량이 2wt.% 이내인 Al-(0.5~2wt.%)Cu 합금막의 경우에는 저항증가로 인한 필터의 삽입손실 저하를 최소화한(0.2~0.3 dB 이내)으로 유지한다면, 즉 SAW 필터에 사용되는 전극박막으로서 최소한의 전기전도도를 유지할 수 있다면, 조성변화에 따른 Al-Cu 합금막의 조성변화에 따른 저항증가는 RF 전력 하에서 전극

박막 열화의 주요 원인이 아니라고 추정된다. 그림 10에 나타낸, 인가 RF 전력(input power)에 따른 3중 다층 전극막의 TTF 특성변화 결과가 더욱 뒷받침 해준다.

그림에서 보듯이, 고주파의 인가 전력이 증가함에 따라, 증착된 전극막의 조성과 구조에 따른 특징적인 TTF 특성 변화를 나타내고 있다. 단일막 구조의 Al-Cu 합금막 역시 2 W 이상의 고전력에서는 수시간 이내에 파손되었으나, 3중막의 경우 단일 합금막에 비하여 전기저항이 높음에도 불구하고, 4 W 이상 높은 RF 전력에서도 매우 강한 RF 내전력 특성을 나타내었다. 그러나, 측정된 모든 전극막에 있어서 임계 RF 전력(limiting RF power)이라고 판단되는 RF전력이 인가되면 수초 이내에 파손되는 것이 관찰되었다. 이러한 현상은 전술한 바와 같이 RF 전력 하에서 전극박막 내부의 결함들(Al-migration, voids, hillock 등)의 증가와, 그에 따른 저항증가 및 온도상승, 결과적으로 필터의 열화로 이어지는 주울열(Joule heating)에 의한 파손으로만 판단하기가 어렵다. 일반적으로 저항증가에 의한 주울열은 충분한 시간을 요구하는 time-dependent process이기 때문이다. 순간적으로 전극막을 단락 시키는 주요 요인은 표면탄성파(SAW)로 인한 반복 응력(cyclic stress)에 의하여 전극막이 파괴되는 피로(fatigue) 현상으로 추정될 수 있다. 실질적으로 인가되는 RF 전력이 증가함에 따라 압전기판의 표면탄성파의 강도(intensity)도 증가하는 비례관계에 있기 때문이다. 따라서, 표면탄성파의 강한 반복 응력(cyclic stress)에 대한 피로 강도와 관련된 전극박막의 기계적 강도 및 탄성 등이 RF 고전력에서 전극막 파손과 밀접한 관련이 있는 것으로 보인다. 이 연구에서는 박막 조성 및 구조에 따른 박막재료의 탄성특성을 제시할 수는 없으나, 일반적으로 Al은 기계적 강도가 낮은 재료이며, Al에 Cu, Ti, 등을 첨가하여 합금이 형성되면 고용강화나 석출강화에 의하여 재료의 강도/탄성이 증가하는 것은 주지의 사실이다. 더욱이, 순수한 Cu 박막을 포함하는 Al-Cu/Cu/Al-Cu 다층 구조의 경우는 Cu의 우수한 탄성 특성에 의하여 전체적인 복합구조의 기계적 강도는 순수한 Al이나 Al-Cu 합금에 비하여 높을 것으로 예측된다.

시간 변화에 따른 칩 내부 전극막의 온도 변화를 그림 11에 나타내었다. RF 에너지 밀도가 최대인 양 끝단 주파수에서는 온도편차가 심하여 측정이 어려웠으며, 특히 SAW칩 내부의 온도가 상승하면 압전기판의 온도계수에 의하여 주파수가 이동하게됨에 따라, cut-off 주파수에서 시간변화에 따른 온도변화

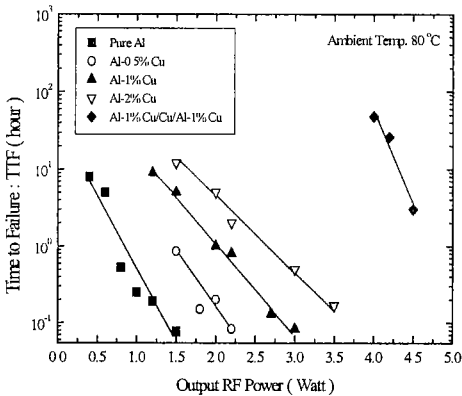


그림 10. RF 전력 증가에 따른 Al, Al-Cu 합금, 및 Al-1%Cu/Cu/Al-1%Cu 3중막의 열화특성 변화.

Fig. 10. The time-to-failure of the pure Al, Al-Cu alloy and Al-1%Cu/Cu/Al-1%Cu laminated film as increasing the RF power.

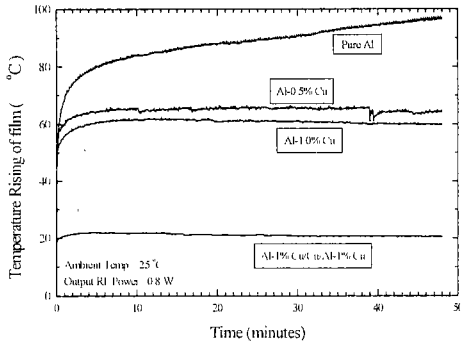


그림 11. 시간 변화에 따른 Al, Al-Cu 합금, 및 Al-1%Cu/Cu/Al-1%Cu 3중 박막의 온도 증가 변화.

Fig. 11. The temperature rising of pure Al, Al-Cu alloy and Al-1%Cu/Cu/Al-1%Cu laminated films as a function of time.

를 측정하기는 불가능하였다. 따라서, 측정된 기판의 온도계수(-40~-43 ppm/°C)를 이용하여 상온(25°C)에서 일정한 RF 전력(0.8 W)에서 측정된 필터의 3 dB 대역폭(band-width) 주파수 변화를 칩 내부 전극막의 온도로 환산하여 결정하였다. 그림에서 보듯이, RF 전력인가 초기에는 박막 조성에 관계없이 온도가 증가하였다. 그러나, 시간 변화에 따른 전극막 온도변화는 조성에 따라 특징적인 현상을 보였다. 다층구조인 3중 다층박막의 경우 초기 온도상승은 다른 박막에 비하여 최소였으며, 급격히 포화(saturation)되어 시간 변화에 따른 온도가 증가하지 않았다. 단일 박막인 Al-Cu 합금박막의 경우에도 초기 온도 상승 이후 시간에 따라 안정적인 특성을 보였으나, 순수한 Al 박막의 경우는 초기 온도 증가 이후에도 시간에 따라 지속적으로 증가하였다. 이러한 결과는 전극막 조성과 구조에 따라 저항이 나르고, 순수한 Al 전극막의 경우 고유저항이 가장 낮다는 점을 고려하면, 초기의 온도 상승은 재료의 순수한 저항에 의한 결과로 판단되기보다는 초기부터 표면탄성파에 의한 반복 응력에 의하여 전극막이 파손되어 온도 상승이 가속되는 것으로 추정하는 것이 타당하여 보인다. 이 현상은 전술한 표면탄성파에 의한 피로(fatigue)로 전극막이 파괴되었음을 뒷받침해준다.

4. 결론

One-port SAW 공진기 구조를 연결하여 필터 설계에 필요한 회로정수 및 전극주기 등을 최적화하여 기본적인 ladder-type RF SAW 필터를 설계하였다. RF 고전력에 대한 내전력 특성 평가를 위하여 순수한 Al 박막 및 Al-(0.5~2wt.%)Cu 합금박막, 그리고 Al-1wt.%Cu/Cu/Al-1wt.%Cu 3중 다층 박막을 magnetron sputtering 법으로 42° LiTaO₃ 압전 기판 위에 증착하였으며, 이를 증착과 관련된 내부응력 및 결함의 제거를 위하여 180°C에서 열처리함으로써 박막의 전기저항이 감소하였다. 열처리 후 박막의 전기저항은 합금조성 및 전극박막 구조에 따라 3.2 ~ 4.6 μΩ-cm 으로 변화하였다. 이들 전극박막과 설계 최적화 과정을 통하여 CDMA 통신방식의 RF 송신단 규격을 만족하는 SAW 필터를 제작하였다. RF 고전력 하에서 SAW 필터 내부 칩 온도는 상승하였으며, 특히 SAW 에너지 밀도가 집중되는 필터 대역의 양 끝단 주파수(cut-off frequency)에서 전극막의 온도는 최대로 증가하여, 결과적으로 필터의 파괴로 이어졌다. RF 고전력을 인가함에 따라 Al-Cu 합금박막은 순수한 Al에 비하여 우수한 내전력 특성을 보였으며, 특히 Al-1%Cu/Cu/Al-1%Cu 3중 박막 구조의 경우 4 W 이상에서도 수시간 이상 열화되지 않는 매우 강한 내전력 특성을 보였다. 그러나, 임계 RF 전력이 인가되면 박막의 조성과 구조에 관계없이 수초 이내에 열화되었다. 이러한 전극막의 순간적인 열화의 주요 요인은 RF 고전력 증가에 따라 증가되는 표면탄성파에 의한 반복된 응력(cyclic stresses)에 의하여 전극막이 단락 되는 현상, 즉 반복 응력에 의한 전극막의 피로(fatigue) 파괴로 판단된다. 실질적으로, Al-Cu 합금 박막과 Al-1%Cu/Cu/Al-1%Cu 3중 다층 전극박막의 기계적 강도 및 탄성특성은 순수한 Al보다 우수하며, 일정한 RF 전력 하에서 시간에 따라 변화하는 칩 내부 전극박막의 온도 변화 결과도 이를 뒷받침한다.

감사의 글

이 연구는 1998년 학술진흥재단의 기초중점연구 연구지원 신소재연구분야 (과제명: RF 고주파 고전력 이동통신용 압전 SAW device 연구개발, 과제 계약번호: 1998-017-E00142) 과제 및 일부분 공주대학교 자체 학술 연구비로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] 정연호, 송준태, "PZT 압전 세라믹을 이용한 SAW 필터 제작", 전기전자재료학회지, Vol.10, No. 1, pp. 1-7, 1997.
- [2] 김지수, 박성일, "SAW 필터 소개 및 개발 동향", 전기전자재료학회지, Vol. 10, No. 2. pp. 179-181, 1997
- [3] J. L. Latham, W. R. Shreve, N. J. Tolar and P. B. Ghate, "Improved metallization for SAW devices", *Thin Solid Film* **64**, pp. 9-15, 1979.
- [4] Y. Ebata and S. Morishita, "Metal-migration of aluminum film on SAW resonator", *IECE Trans. J67-C[3]*, pp. 278-285, 1984. (in Japanese)
- [5] T. Nishihara, H. Uchishiba, O. Ikata and Y. Satoh, "Improved power durability of SAW filters for an antenna duplexers", *Jpn. Appl. Phys.*, **34**, pp. 2688-2692, 1995.
- [6] H. Ieki and A. Sakurai, "SAW resonators using epitaxially Al electrodes", *Trans. IECE Japan Pt. A. J76-A*, pp. 145-152, 1993. (in Japanese)
- [7] N. Matsukura, A. Kamijo, et. al., "Power durability of highly textured Al electrode in SAW devices", *Jpn. Appl. Phys.*, **35**, pp. 2983-2986, 1996.
- [8] Y. Ota and A. Yuhara, "Study on power durability of Ti-containing Al SAW electrodes, using IIT filters", *Jpn. Appl. Phys.*, **34**, pp. 2693-2697, 1995.
- [9] N. Kimura, M. Nakano and K. Sato, "Power durability of Al-W alloy electrodes used in RF-band SAW filters", *Jpn. Appl. Phys.*, **37**, pp. 1017-1020, 1988.
- [10] Y. Satoh, T. Nishihara and O. Ikata, "SAW duplexer metallizations for high power durability", *IEEE Ultrasonic Symp. Proc.*, pp. 17-26, 1998.
- [11] O. Ikata, T. Miyashita, et. al., "Development of low-loss band-pass filters using SAW resonators for portable telephones", *IEEE Ultrasonic Symp. Proc.*, pp. 111-115, 1992.
- [12] M. Hikita, N. Shibagaki, et. al., "Design methodology and experimental results for new ladder-type SAW resonator coupled filters", *IEEE Trans.* **42[4]**, pp. 495-508, 1995.
- [13] V. Plessky, "SAW design bridges technology gap", *RF filters* **98[1]**, pp. 46-54, 1998.
- [14] S. Datta, *Surface Acoustic Wave Devices*, Prentice Hall, pp. 220-228, 1986.
- [15] K. Hashimoto and M. Yamaguchi, "Effects of parasitic circuit elements to ladder-type SAW filters", *Technical Report of IEICE*, pp. US9-101, 1997.
- [16] T. Matsuda, H. Uchishiba, et. al., "L and S band low loss filters using SAW resonators", *IEEE Ultrasonic Symp.*, pp. 163-167, 1994.
- [17] O. Kawachi, G. Endoh, et. al., "Optimum rotated angle for piezoelectric leaky SAWs substrates with mass loading effect", *Jpn. EM Symp. Spring meeting*, pp. 117-123, 1996. (in Japanese)
- [18] N. Kimura, M. Nakano, M. Nakazawa and K. Sato, "The power durability of 900 MHz band double-mode-type SAW filters and improvement in power durability of Al-Cu thin film electrodes by Cu atom segregation", *Jpn. J. Appl. Phys.* **36**, pp. 3101-3106, 1997.
- [19] K. S. Lee, C. H. Jang, S. J. Suh, and N. C. Kim, "Deposition process of Multi-layered Al-1%Cu/Tungsten Nitride Thin Film", *Kor. J. Mat. Res.*, **10[9]**, pp. 624-628, 2000.