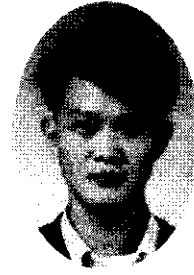


초고주파용 박막형 공진기의 개요



김종현
(광운대학교 전자공학과 부교수)



김상희
(광운대학교 전자공학과)

1. 서론

통신산업의 급속한 발전과 정보화 시대에 부응하여 세계적으로 이동 통신 서비스의 수요가 비약적으로 확대되었고 이 때문에 이동 통신용 시스템 및 휴대용 단말기의 RF 핵심 부품들에 대한 개발이 활발하게 이루어지고 있을 뿐만 아니라 30GHz 이상의 높은 주파수 대역의 이용 가능성과 상품화 요구가 가시화되고 있다. 그 예로서 과거 군사용으로 주파수가 할당되어 레이더 시스템, 전자전, 미사일 추적장치 등으로 연구되어져 왔던 밀리미터파 대역의 이용성이 크게 현실화되고 있으며, 일부 대역은 상업적 필요성에 의해 민수 사용이 기대되고 있다. 무엇보다도 지난 수십년 동안 Si이나 GaAs 회로 기술의 개발은 회로 크기의 소형화 측면에서 크게 진보 되어왔다.

그러나 안테나, 전력증폭기, 믹서 등과 같은 RF 핵심 부품과는 달리 몇몇 수동 소자의 경우에는 휴대용 단말기에 내장되는 부품 중에서 아직까지도 다른 RF 부품들과 집적화 되지 못하고 외장 소자로 구현되고 있어서 휴대용 단말기의 소형, 경량화를 추구하는데 장애가 되고 있는 실정이며 보다 높은 주파수 대역(GHz 대역)에서 동작을 하고 주파수 안정도가 우수한 소자의 개발이 절실히 요구되고 있다. 이러한 초고주파용 소자 중 그 수요와 필요성은 높으나 집적화가 어려워 소형화, 저가격화, 고품질화에의 문제점을 안고 있는 소자로 초고주파용 공진기와 필터를 들 수 있다. 특히 1GHz 이상에서 동작

하는 공진기나 필터를 기존의 집중소자(lumped element)를 이용해서 집적화하기에는 소자 자체의 크기 때문에 많은 어려움을 안고 있다.

현재 상업용으로 많이 쓰이는 RF 필터로는 유전체 필터와 표면탄성파(SAW : Surface Acoustic Wave) 필터가 있다. 유전체 필터는 높은 유전율, 저삽입손실, 높은 온도에서의 안정성, 내진동, 내충격에 강한 장점을 가지고 있는 반면 기술적인 발전 동향인 소형화 및 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)화에는 한계를 보이고 있다. 물론 이러한 기술적인 한계를 극복하기 위해서 모노블록(Monoblock)화 및 적층 SMD(Surface Mounted Device)필터가 개발되어 부피의 한계성이 어느 정도 극복되고 있지만 궁극적인 목표에는 도달하지 못하고 있는 상태이다.

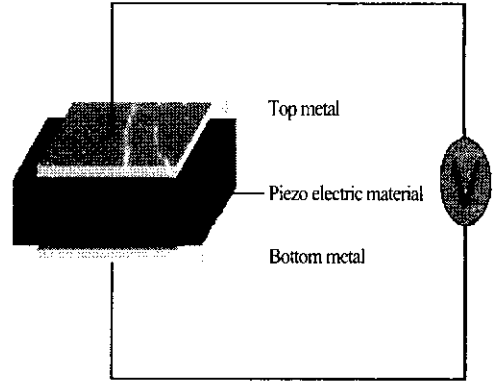
SAW 필터의 경우 유전체 필터에 비해 소형이면서도 신호 처리가 용이하고 회로의 간략화, 무조정화 및 반도체 공정을 이용함으로써 대량 생산이 가능한 이점을 가지고 있다. 또한 유전체 필터에 비해 통과 대역 내의 감쇄특성이 우수하여 고품위의 정보를 주고받을 수 있다는 장점을 가지고 있다. 물론 삽입손실(<3dB)이 비교적 크고 단결정 압전 기관인 LiNbO₃(LN), LiTaO₃(LT)를 사용함으로써 가격이 약간 비싸다는 단점도 있다. SAW 필터 공정에서는 노광장치로 자외선(UV)을 사용하고 있으며 이에 따라 IDT(Inter-Digital Transducer) 선폭은 0.5μm 정도가 한계이므로 초고주파(>5GHz) 대

역이 불가능하다. 이를 극복하기 위해서는 두 가지 접근 방법이 있다. 첫째는 노광 파장을 짧게 발생시킬 수 있는 X-Ray나 전자빔 노광기를 사용하는 것이다. 그러나 고가의 장비를 이용하는 것은 쉬운 일이 아니다. 둘째는 표면파 속도를 높일 수 있는 압전기판을 사용해야 하는 것이다. 하지만 이러한 압전기판은 아직 개발되지 못한 실정이며 압전박막을 코팅하여 표면파 속도를 높이기 위한 연구가 진행되고 있는 상태다. 만약 SAW 필터가 이런 난제들을 모두 극복한다고 해도 근본적으로 반도체 기판에서 이루어지는 MMIC구조와 단일칩상으로 구성되기는 불가능하다. 이러한 모든 요구조건들을 만족시키는 것이 압전박막의 두께진동을 이용한 FBAR(Film Bulk Acoustic wave Resonator)이라 할 수 있다.

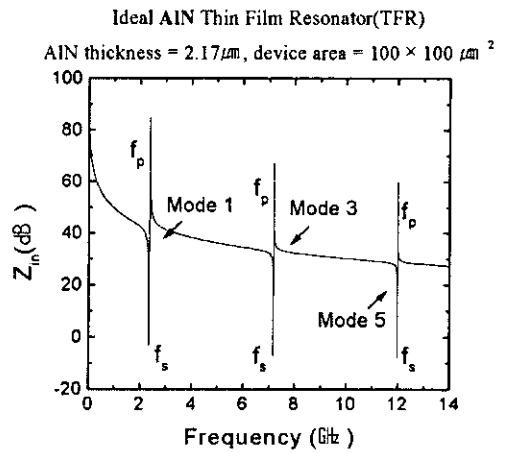
FBAR은 Si이나 GaAs를 기판으로 사용하기 때문에 집적화가 가능하며, 우수한 주파수 특성을 나타낸다. 또한 같은 압전 현상을 이용한 표면탄성파 공진기에 비해서도 훨씬 소형이며, 동작주파수의 제한이 적을 뿐만 아니라 보다 낮은 삽입손실값을 갖는다. FBAR의 물리적인 크기는 유전체 공진기와 같이 사용 주파수의 $\lambda/2$ 에 의해 결정되며 이 파장은 전자기파가 아닌 압전박막의 탄성파에 의존하므로 약 10000배의 속도차에 의해 공진기의 두께는 수 마이크로로 줄어들 수 있다. 이러한 FBAR은 전극-압전박막-전극으로 이루어진 실제 소자에서 압전특성에 의한 전기기계적결합(electromechanical coupling)에 의해 형성된 정재파를 이용한다. 이러한 정재파의 형성에는 소자의 경계조건이 공기 또는 진공 상태를 만족해야 하며 이런 경계 조건을 만족시키기 위해 지금까지 많은 FBAR에 대한 연구는 MEMS(Microelectro Mechanical System) 공정의 발전에 따라 membrane을 이용한 공진기 제조에 초점을 맞추어 왔다. 그러나 최근에는 소자의 기계적 강도, 동일 면적에 따른 생산성 차이, 공정의 간략화 등의 이유로 인해 $\lambda/4$ 두께의 임피던스 차가 큰 재료들의 적층에 의한 Bragg reflector를 이용한 FBAR의 연구가 많은 관심을 끌고 있으며 이와 같은 형태의 박막형 공진기를 이용한 차세대 초고주파용 부품 제작에 힘을 기울이고 있다.

2. 박막형 공진기의 구조

2.1 이상적인 박막형 공진기(Thin Film Resonator : TFR)
 이상적인 TFR의 개념적인 단면도를 그림 1(a)에 나타내었다. 공진기는 압전 박막과 양단의 극소로 얇으며 저항이 없는 전극들과 탄성적 반사 표면들로 이루어져 있다. 600 MHz 이상에서 좋은 반사 표면으로는 공기와의 경계이다. 이러한 이상적인 TFR은 전기적 그리고 탄성적인 손실이 없다고 가정하며 교류 전원이 양단의 전극에 인가되었을 때 시간에 따라 변화하는 전기장이 압전층에 형성된다. 이러한 전기장은 압전 박막이 전기장에 대해 동일한 방향으로 정렬되어있다면, z 방향으로 탄성



(a)



(b)

그림 1. (a) 이상적인 TFR 구조, (b) 2.17 μm AIN 압전박막을 이용한 이상적인 TFR의 광대역 임피던스 특성

파를 발생시킨다. 이 탄성파는 양쪽 반사표면에 의해 반사되어 압전층 내부에 모여 하나의 정재파를 이루게 된다. 이 정재파의 크기는 주파수, 압전박막의 두께, 밀도, 유전율, 압전상수, stiffness에 의존하게 된다. 또한 중심 주파수를 결정하는 가장 큰 요인은 압전박막의 두께와 상부 전극층의 면적이라 할 수 있다. 만약 압전박막의 두께가 두 배로 된다면 모드 주파수는 반으로 줄어들 것이며 각 모드에서 공진기의 두께는 $\lambda/2$ 에 mode수를 곱한 것과 같다. 모드 주파수 부근에서 정재파의 크기는 커지게 되며 모드는 기본 공진 주파수의 홀수배 간격을 갖고 무한히 발생하게된다. 각 모드는 국부적인 최소 임피던스와 최대 임피던스를 갖는다. 그림 1(b)는 이상적인 TFR의 odd mode 임피던스 특성을 나타내고 있다. 최소 임피던스를 갖는 주파수를 직렬 공진(f_s), 최대 임피던스를 갖는 주파수를 병렬 공진(f_p)이라고 정의하며 두 공진 간의 차이(f_p-f_s)는 공

진기를 구성하는 물질의 압전, 전기적, 기계적인 특성인 전기 기계적 결합계수(electromechanical coupling coefficient : K_{eff}^2)와 관련되어진다. 대부분의 압전 박막에 있어서의 주파수 차이는 공진 주파수의 수 %정도이다.

공진기의 응용을 위해 측정되어야 하는 특성에는 다음과 같은 두 가지의 성능지수(Figure of Merits : FOMs)가 있다. 하나는 유효 전기기계결합계수, K_{eff}^2 이고, 다른 하나는 공진에서의 quality factor, Q_s/Q_p 이다. 이 변수들은 소자의 filtering 특성을 나타내는 척도이다. 아래에 이 두 가지 FOMs의 정의에 대해 수식으로 나타내었다.

$$K_{eff}^2 = \frac{\frac{\pi f_s}{2 f_p}}{\tan\left(\frac{\pi f_s}{2 f_p}\right)} \approx \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \frac{f_p - f_s}{f_p} \quad (1.1)$$

$$Q_{s/p} = \frac{f_x}{2} \frac{dZ_{in}}{df} \Big|_{f_x=f_{1/2}} \quad (1.2)$$

K_{eff}^2 은 각 모드에서 직렬과 병렬 공진 사이의 절대 간격을 의미하며 이 상수는 압전 박막의 압전, 유전, 기계적 변수의 조합으로서 얼마나 잘 전기적 에너지가 기계적 에너지로 변환되는지를 나타내기도 한다. 또한 소자의 Q값은 소자내의 손실을 나타내는 척도이다. 이런 손실은 전극에서의 ohmic resistance, 공진기 층 내에서의 acoustic loss, grain boundary 나 rough한 표면에서의 탄성파의 산란, 그리고 소자 주위의 acoustic radiation들로부터 발생한다. 때문에 Q값은 궁극적으로 filter 특성에서의 삽입손실과 감쇄 특성에 직접적으로 영향을 미치는 변수이기도 하다.

2.2 다양한 구조의 박막형 공진기

박막형 공진기는 다음과 같은 여러 가지 반도체 공정 기술에 따라 다양한 구조와 장·단점들을 갖게 된다.

2.2.1 Bulk micromachining process

Bulk micromachining 공정은 TFR 제작에 있어 최초로 도입된 공정이며 가장 선호하는 공정이다. 이 기술은 silicon etch stop (p-type silicon, SiNx film) 위에 TFR을 제작한 후 소자의 후면으로부터 비등방 silicon etching(EDPW, KOH, NaOH, TMAH)을 통해 나머지 기판영역을 제거한다. 그림 2에 두 가지 예를 나타내었다. 그림 2(a)는 공진 부분에 etch stop (SiNx for Si, AlN for GaAs)이 포함되어 있는 구조이며 반면에 그림 2(b)는 etch stop이 완전히 제거되어 있는 구조를 나타내고 있다.

Edge-supported 구조의 공진기는 non-piezoelectric 층의 최소화와 하부전극의 평탄화가 가능함으로 상대적으로 얇은

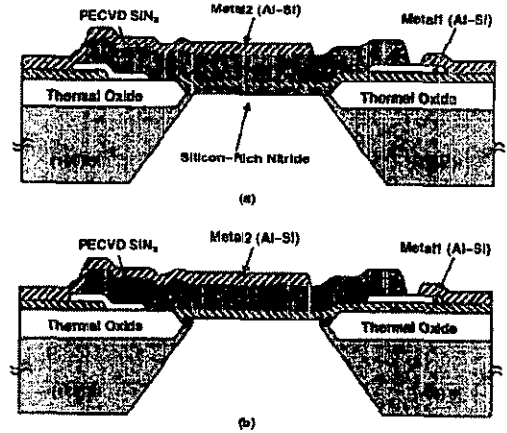


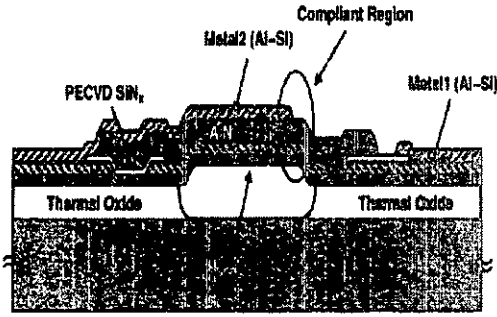
그림 2. (a) 실리콘 etchstop을 갖는 bulk micromachined TFR, (b) 실리콘 etchstop이 제거된 edge supported 구조의 bulk micromachined TFR

전극을 사용할 수 있으므로 기본 공진 모드에서 큰 K_{eff}^2 값을 얻을 수 있는 장점이 있다. 그리고, free-standing 층인 공진기 부분이 어떤 표면과 닿지 않으므로 stress에 의해 유기되는 bow 현상을 고려하지 않아도 된다. 단지, stress에 의한 membrane층의 파괴와 심한 buckling만을 고려하면 된다.

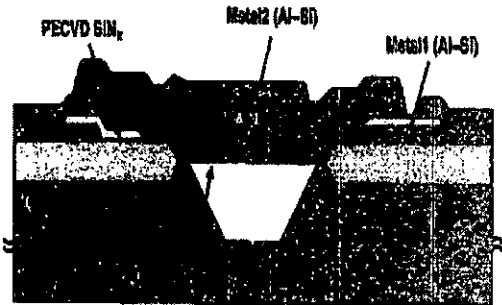
이 공정의 단점들을 정리해 보면 다음과 같다. 먼저, 비등방성 기판 etching을 위한 뒷면에 큰 hole을 필요로 하게 되고, 이런 큰 cavity는 소자의 수에 제한을 갖게 된다. 또 다른 한 가지는 긴 시간의 기판 etching 동안 전면의 소자(전극, 압전 박막)에 대한 보호층이 필요하다. 그리고 free-standing 특징 자체로서도 웨이퍼 취급이나 공정 환경으로부터의 파손에 민감한 단점을 갖고 있다.

2.2.2 Surface Micromachining Process

현재 그림 3과 같은 두 가지 종류의 surface micromachining process가 가장 많이 제안되고, 연구되어지고 있다. 그림 3(a)의 방법은 sacrificial layer (low temperature oxide, LTO) 위에 TFR을 제조하고 wet etchant를 이용하여 희생층을 제거하는 방식을 이용하는 것이고, 그림 3(b)는 먼저 TFR을 wafer위에 제조한 후 undercutting wet substrate etch를 이용하여 기판과 TFR을 분리시키는 방법이다. 두 방법 모두 큰 후면의 hole은 필요하지 않아 소자 수의 제약은 없지만 TFR 자체가 남아 있는 기판과의 접촉이 야기될 수 있다. 이런 구조에 있어서는 membrane층의 bow 현상과 기판 접촉의 기회를 최소화하기 위해서 공진 부분에서의 압축응력의 감소에 상당한 주의를 요한다. 희생층을 이용하는 경우 상대적으로 compliant한 구조를 가지므로 접촉에 더욱 민감



(a)



(b)

그림 3. (a) 희생층 위에 Surface micromachined process 를 이용한 TFR (b) undercutting wet substrate etch를 이용한 TFR

한 구조라 할 수 있다. 그리고, surface micromachined TFR 역시 비 압전층인 SiNx를 포함하고 있으므로 K_{eff}^2 의 감소를 유발하게 된다.

2.2.3 Sealed Cavity TFR process

본 공정은 bulk-micromachining 공정의 free-standing TFR의 기계적 강도가 약하다는 단점과 Si-deep etch에 따른 active 소자 전면의 보호와 큰 dc electric field나 electro-mechanical stress에 강한 소자를 목적으로 한 공정으로서 silicon-rich nitride를 이용하여 membrane을 형성, Si-to-Si bonding과 electrochemical KOH etchback 공정을 이용한다. 그림 4에 sealed cavity TFR의 단면을 나타내었다. 본 공정 역시 free-standing TFR의 구현으로 높은 K_{eff}^2 의 소자를 얻을 수 있으나 공정의 복잡성과 Si bonding의 기술이 요구된다.

2.2.4 Bragg Reflector Process

Bragg Reflector형 TFR의 단면을 그림 5에 나타내었다. 앞에서 다룬 micromachined TFR에 비해 가장 적은 mask

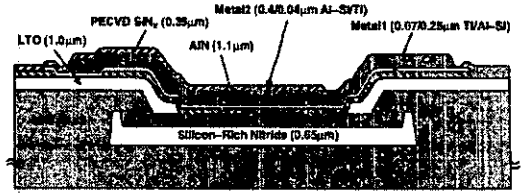


그림 4. sealed-cavity TFR의 구조

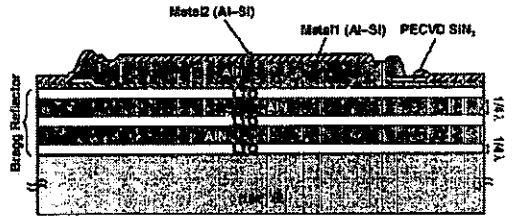


그림 5. Bragg Reflector를 이용한 TFR

공정을 필요로 하며 기판 위에 reflector층이 형성된 후 TFR을 형성한다. 이 구조의 가장 큰 장점은 free-standing 구조에 비해 강한 기계적 강도이며, 역시 평평한 하부전극의 이용이 가능하여 얇은 전극을 사용할 수 있다는 점이며 단점은 반사층을 이루는 impedance 차가 큰 $\lambda/4$ 층들의 수가 이론적인 최대의 반사 특성을 위해서는 5-7층이 요구된다는 것이다. 이런 많은 수의 적층에서는 cracking을 방지하기 위하여 각 층의 응력 조절이 절실히 요구된다. 그리고 반사층의 두께에 의해 능동소자와의 상호 연결을 위한 급속의 step coverage와 focusing depth 문제 및 각 반사층의 두께변화에 따른 소자 특성에 대해 충분한 연구가 되어 있지 않은 실정이다.

Lakin 등은 TFR과 가장 근접해 있는 반사층이 소자의 성능 지수에 가장 큰 영향을 미친다고 보고하였다. 그리고 생성된 정재파의 대부분이 반사층의 맨 윗층에 집중되기 때문에 Bragg Reflector형 TFR 역시 비 압전층이 하부 전극 아래에 위치하는 결과가 된다. 그러므로, 기본 모드에서 역시 K_{eff}^2 의 감소가 예상되며 Lakin의 simulation 결과에 의하면 free-standing 구조에 비해 약 30%의 K_{eff}^2 의 감소가 발생하였다.

3. 결론

FBAR에 대한 개념은 1967년에 발표된 Sliker와 Roberts의 Cds 박막 공진기로부터 발전해 왔다고 볼 수 있다. 초기에는 공진 주파수가 100 MHz 이하로 낮고 Q값도 작았으나 1980년 Lakin과 Wang이 Si 기판을 diaphragm 형태로 깎는 기술을 이용하여 기본모드 공진 주파수 435 MHz의 공진기를 만든

표 1. TFR의 성능지수 요약 (1983 - 1999)

Authors	Piezoelectric	K_{eff}^2	Q	Mode Frequency
Ruby et al.	AlN	2.4-5.0	500-1300	2 - 4 GHz
Yamanouchi et al.	ZnO	2.2	1000	300 MHz
Lakin et al.	AlN	0.6	5000	1.0 GHz
Driscoll et al.	ZnO	2.4-3.6	740-2100	700 MHz
Sato et al.	ZnO	2.3	1100	400 MHz
Shiosaki et al.	ZnO	0.6-2.6	750-2500	100 MHz
Driscoll et al.	AlN	0.016-0.16	2550-9000	330 - 500 MHz
Lakin et al.	AlN	1.3-5.7	370-800	1.0 - 1.1 GHz
Makishima et al.	ZnO	4.0	970	298.7 MHz
Lutsky et al.	AlN	0.4	210	1.36 GHz
Seabury et al.	ZnO	4.8	300	1.45-1.55 GHz
Dubois et al.	AlN	5.3	300	3.6 GHz

는데 성공하였다. 표 1에서 보이는 것과 같이 그 후 최근까지 다방면의 시도에 의해 FBAR에 의한 α 대역 부품의 소형화 및 실용화를 위한 노력이 계속되고 있다.

기존의 MEMS 또는 micromachining 기술을 이용한 초고주파 및 밀리미터파 대역에서의 반도체 소자 기술이 활발히 진행되면서, 그 응용 분야가 점차 확대되어가고 있다. 본 고에서 소개한 기술들은 박막형 공진기나 필터뿐만 아니라, 스위치, coupler, VCO(Voltage Controlled Oscillator), 센서 등에도 응용되고 있으며 인덕터나 커패시터 등에도 이미 이러한 기술이 적용되고 있는 실정이다. 앞으로 RF(Radio Frequency) 분야와 반도체 재료 및 공정 분야의 접목에 필요한 요소기술이 보강된다면 차세대 이동통신용 시장에서 MEMS 또는 micromachining 기술을 통하여 얻을 수 있는 부품의 크기는 더욱 소형화되어지고 적용 주파수 대역도 그 회로의 우수한 성능을 유지하며 더욱 확장되리라 예상된다.

성명 : 김 상 희

성명 : 김 종 헌

1984년 2월 : 광운대학교 전자통신공학과 졸업
 1990년 6월 : 독일 Ruhr Univ. Bochum 전자공학과 공학석사
 1994년 8월 : 독일 Dortmund Univ. 전자공학과 공학박사
 1995년 4월 - 현재 : 광운대학교 전파공학과 부교수

<주관심 분야>
 초고주파 측정 및 센서, EMI/EMC, 초고주파 및 광집적회로

성명 : 김 상 희

1999년 2월 : 관동대학교 전자통신공학과 졸업
 1999년 3월 - 현재 : 광운대학교 전파공학과 석사과정

<주관심 분야>
 초고주파 필터, 박막형 공진기