

主題

# Bragg 반사층을 이용한 체적탄성과 공진기의 특성 평가

광운대학교 김상희, 김종현

차 례

- I. 서 론
- II. Bragg reflector형 FBAR
- III. 결 론

## I. 서 론

통신산업의 급속한 발전과 정보화 시대에 부응하여 세계적으로 이동 통신 서비스의 수요가 폭증하게 되었고 이 때문에 이동 통신용 시스템 및 휴대용 단말기의 RF 핵심 부품들에 대한 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 무엇보다도 지난 수 십년 동안 Si이나 GaAs 회로 기술의 개발은 회로 크기의 소형화 측면에서 크게 진보 되어왔다. 그러나 안테나, 전력 증폭기, 믹서 등과 같은 RF 핵심 부품과는 달리 필터의 경우에는 휴대용 단말기에 내장되는 부품 중에서 아직까지도 다른 RF 부품들과 집적화 되지 못하고 외장 소자로 구현되고 있어서 휴대용 단말기의 소형, 경량화를 추구하는데 장애가 되고 있다. 현재 휴대용 단말기용 필터로 사용되고 있는 유전체 공진기 필터와 SAW(Surface Acoustic Wave) 필터는 우수한 삽입손실과 감쇄특성을 갖고는 있으나 다른 주요 RF 부품과의 집적화가 불가능하므로 차세

대 필터 소자로서 한계를 갖고 있다. 때문에 유전체 공진기 필터의 삽입손실 보다 우수하고, SAW 필터의 감쇄특성 보다 뛰어나면서 RF 능동 소자들과의 집적화가 가능하고 초경량 및 초소형으로 대량생산이 가능한 필터의 개발이 요구되어지고 이러한 요구에 부합되는 것이 체적 탄성과 공진기(Film Bulk Acoustic Resonator:FBAR)라 할 수 있다. FBAR 필터는 기존의 반도체 기판을 사용하므로 다른 RF 능동소자들과 통합이 가능하여 RF 시스템의 전단부를 단일 칩으로 구현 할 수 있으며 특히 기존의 필터에 비하여 크기나 제조 단가가 1/10 밖에는 되지 않아 차세대 이동 통신용 필터로 활용될 전망이 밝다.

본고에서는 상온에서 증착한 질화알루미늄(AIN)을 압전 박막으로 사용하고 텅스텐(W)과 이산화규소(SiO<sub>2</sub>)를 격층으로 위치시킨 Bragg 반사층을 이용한 FBAR 제작에 필요한 재료들의 최적 증착 조건을 설정하고 이를 바탕으로 제작한 2-port

FBAR의 초고주파 특성을 조사하여 그 응용 가능성을 평가해 보고자 한다.

## II. Bragg reflector형 FBAR

### 1. Bragg reflector형 FBAR의 동작원리

이상적인 FBAR은 그림 1과 같이 압전 박막과 양단의 극소로 얇으며 저항이 없는 전극들과 탄성적 반사 표면들로 이루어져 있다. 전극에 전기적 에너지를 인가하면 압전층 내에 시간적으로 변화하는 전계가 유기되고 이 전계는 압전 결합이 잘 이루어지도록 c축으로 우선배향된 압전 박막 내에서 두께 진동 방향과 동일한 방향으로 체적 탄성과(bulk acoustic wave)를 발생시키는 원리를 이용한 것이다. 그러나 실제 FBAR은 기판 위에 제작되어야 하므로 상·하부 전극층과 실질적인 공진 현상이 발생하는 압전층 및 체적 탄성파가 기판 쪽으로 전달되지 못하도록 막의 표면에서 반사시켜 에너지를 압전층에 모으는 반사층 부분으로 구성되어 있다. Bragg 반사층은 높은 acoustic 임피던스와 낮은 acoustic 임피던스를 갖는 서로 다른 물질을 격층으로 위치시키며 원하는 공진 주파수의  $\lambda/4$  두께를 이용하여 반사율을 높이고 기판 쪽의 임피던스를 감소시키는 역할을 한다. FBAR을 구성하는 각 층들은 전기적 전송 선로의 해석과 비슷하게 탄성파(acoustic wave)에 대한 특성 임피던스와 위상 속도를 갖기 때문에 acoustic 전송 선로로 해석할 수 있다. 전기적 전송 선로 방정식에 의한 매질내의 임피던스를 나타내는 식은 다음과 같다.

$$Z_i = Z_a \left[ \frac{Z_s \cos \theta + j Z_a \sin \theta}{Z_a \cos \theta + j Z_s \sin \theta} \right] \quad (1)$$

$Z_i$ ,  $Z_a$ ,  $Z_s$ 는 입력 임피던스와 특성 임피던스, 부하 임피던스를 각각 나타내며  $\theta$ 는 acoustic 위상

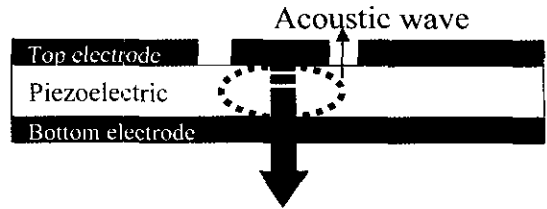


그림 1. 이상적인 FBAR의 구조

을 나타낸다. 만약 반사층의 두께를  $\lambda/4$ 로 할 경우,  $\theta = \pi/4$ 이고 전기적 입력 임피던스는

$$Z_i = \frac{Z_a^2}{Z_s} \quad (2)$$

가 된다. 식 (2)로부터 압전층에서 기판을 바라본 입력 임피던스( $Z_{i(4)}$ )와 압전층을 포함한 Bragg 반사층의 정규화된 입력 임피던스( $z$ )는 식 (3), (4)와 같이 구할 수 있다.

$$Z_{i(4)} = \left( \frac{Z_p}{Z_1} \right)^2 \left( \frac{Z_2}{Z_3} \right)^2 Z_s = Z_{ip}$$

$$z = \frac{Z_p}{Z_{ip}} = \left( \frac{Z_1}{Z_p} \right) \left( \frac{Z_1}{Z_2} \right) \left( \frac{Z_3}{Z_2} \right) \left( \frac{Z_3}{Z_s} \right)$$

$$\Gamma = \frac{z-1}{z+1} \quad (5)$$

여기서  $Z_p$ 는 압전층의 특성 임피던스,  $Z_{ip}$ 는 압전층에서의 입력 임피던스를 나타내며  $Z_1, Z_2, Z_3$ 는 각 층의 acoustic 특성 임피던스이고  $\Gamma$ 는 반사 계수를 각각 나타낸다.

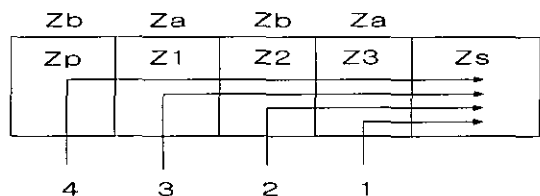


그림 2. Bragg 반사층을 이용한 FBAR의 임피던스 개략도

상대적으로 임피던스 차가 큰 물질을 격층으로 증착 할 경우 위 식은 층수가 증가할수록 입력 임피던스가 0에 접근하게되며 이때 반사계수는 -1에 가까워진다. 즉, 압전층을 통과한 탄성파에너지가 기판 방향으로 전달되지 못하고 반사층에서 모두 반사되어 압전층에 모이게됨으로서 효율적인 공진을 발생시킬 수 있다. 표 1은 식 (4)와 (5)를 이용하여 acoustic 임피던스 차가 큰 서로 다른 물질에 대하여 층수에 따른 반사계수를 이론적으로 계산한 것이다.

표 1. 다양한 반사층 구성 물질에 대한 층수에 따른 전체 반사계수

	SiO <sub>2</sub> /W	SiO <sub>2</sub> /AlN	Al/W	Al/AlN
1-layer	-0.511	-0.511	-0.423	-0.423
2-layer	-0.972	-0.781	-0.966	-0.733
3-layer	-0.985	-0.878	-0.977	-0.816
4-layer	-0.999	-0.952	-0.999	-0.9257
5-layer	-0.9997	-0.9745	-0.9993	-0.9506
6-layer	-0.99998	-0.9902	-0.99997	-0.9809

## 2. BVD(Butterworth Van-Dyke) 등가 설계

단일 공진기를 설계함에 있어서 박막의 물질 상수를 이용한 입력 임피던스 수식은 모드의 공진 주파수와 전극에 의한 부하효과(loading effect) 및 전기기계적결합계수(electromechanical coupling coefficient), 반사층의 두께 변화에 따른 공진 특성 등과 같은 전기적 특성을 예상하는데 매우 효과적이다. 그러나 여러 공진기가 함께 연결되는 필터 설계에서는 그림 3 (a)와 같은 간단한 lumped 소자를 이용한 BVD(Butterworth Van-Dyke) 모델을 사용하는 것이 용이하다. 여기서 C2는 AlN 박막의 dielectric constant와 geometry로부터

결정되는 용량이며 C1은 압전효과로부터 발생하는 dielectric displacement를 나타내는 값이다. L1은 전기적 에너지가 기계적 에너지로 변환된 양을 나타낸다. 저항 R1은 friction loss로부터 생기는 damping양과 누설전류(leakage current)의 양, 즉 발생하는 acoustic loss를 나타내는 값이다. BVD 모델은 협대역 공진 주파수에 대해 소자의 전기적 특성을 잘 나타낼 수 있으며 모델이 간단하기 때문에 필터 및 발진기를 simulation하는데 많이 이용될 뿐만 아니라 특정한 모드의 직렬 및 병렬 공진을 정의하여 소자의 성능지수(figure of merits)를 예상하기에 용이하다.

입력반사계수(S<sub>11</sub>)와 전송계수(S<sub>21</sub>), 임피던스(Zin)를 simulation 한 결과, 그림 3 (b)와 같이 중심주파수 2 GHz에서 반사손실은 17.1 dB, 삽입손실은 0.5 dB이며 직렬 공진과 병렬 공진 주파수는 각각 2 GHz와 2.07 GHz로 나타났다. 이때 3dB-대역폭은 약 40 MHz였다.

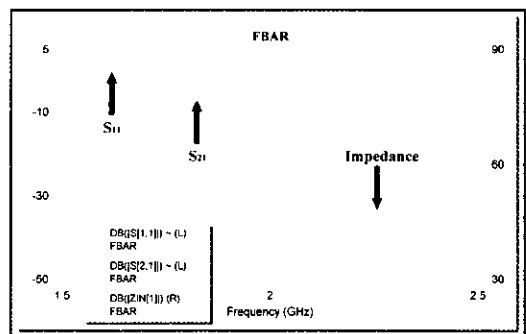
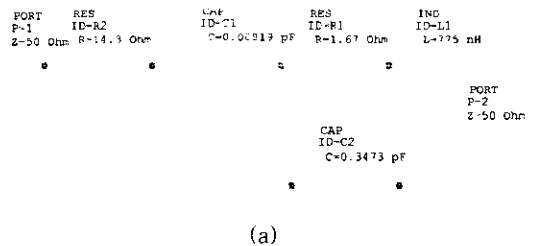
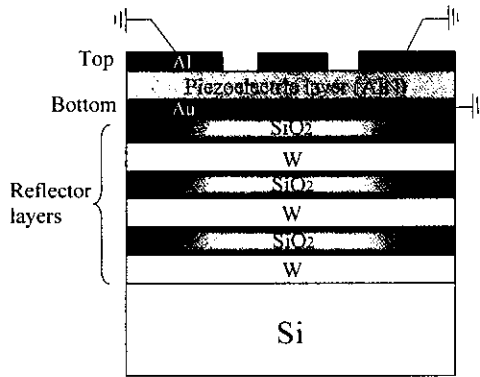


그림 3. (a) BVD 모델과 (b) simulation 결과

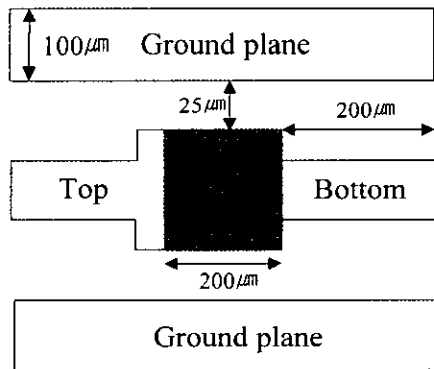
### 3. Bragg type FBAR의 제작

Bragg type FBAR의 기본 구조는 그림 4와 같다. 상부 전극은 Al, 하부 전극은 Au, 압전 박막은 AlN, 반사층으로 SiO<sub>2</sub>와 W, 기판으로 Si(100)을 사용하였으며 실험을 통한 최적의 증착조건을 표 2에 정리하였다. AlN 박막은 높은 경도와 열전도도, 열적·화학적 안정성과 함께 실리콘과 GaAs와 거의 유사한 열팽창율을 가지기 때문에 반도체 소자 분야에서 유망한 재료이며, 넓은 에너지 밴드갭을 갖고 있으므로 GaAs, InP 등의 반도체 기판을 사용한 전자부품의 절연재료로서 매우 적합하다.

먼저 세정된 기판 위에 공진 주파수의  $\lambda/4$  두께



(a)



(b)

그림 4. Bragg 반사층을 이용한 FBAR의 (a) 단면과 (b) 평면 구조

를 갖는 W와 SiO<sub>2</sub> 박막을 교대로 6층을 증착하여 반사층을 제작한다. 기판 쪽의 임피던스를 감소시켜 공기의 acoustic 임피던스처럼 만들어 주기 위해서 홀수층에는 SiO<sub>2</sub>를, 짝수층에는 W를 위치시키며 증착 시 같은 챔버의 타겟 홀더에 W와 SiO<sub>2</sub>를 각각 장착하여 진공이 유지된 상태에서 연속적으로 공정을 진행한다. 이렇게 제작된 반사층 위에 Au 전극을 증착한 후, HMDS 처리를 하여 표면의 습기를 제거하며, PR을 도포하고 85 °C에서 1분 30초간, 120 °C에서 2분 30초간 각각 베이킹을 한다. 패턴 노광과 습식 에칭 및 PR 제거과정 등을 통하여 하부 전극을 만들며 그 위에 AlN 박막을 원하는 공진 주파수의  $\lambda/2$  두께로 증착하고 다시 Al 상부전극을 하부전극과 동일한 방법으로 제작하게 된다. 금속 전극의 두께에 따른 부하효과로 인하여 공진 특성이 변할 수 있으므로 각 전극의 두께는 1200 Å 이하의 두께로 증착한다. 다른 모든 조건들을 고정시키고 다양한 증착 압력의 변화에 따른 AlN 박막의 표면과 단면 형상을 X-선 회절분석기(X-ray diffractometer)와 주사 전자 현미경(scanning electron microscopy)을 이용하여 관찰하였다. 그림 5와 같이 증착 압력 5 mTorr에서 가장 결정성이 우수한 AlN 박막을 얻을 수 있었으며 낮은 증착 압력에서는 미세한 입자와 평탄한 표면 결정이 형성되었으나 높은 증착 압력에서는 빠른 증착 속도로 인해 입자크기가 크고 거칠기가 나쁜 표면결정이 형성됨을 관찰하였다. AlN 박막은 상온에서 5

표 2. AlN, W, SiO<sub>2</sub>, Al, Au 박막들의 증착 조건

Film	AlN	W	SiO <sub>2</sub>	Au, Al
Dep. System	RF magnetron sputter			e-beam
Pressure(mTorr)	5	7.1		
Power(W)	200	150	300	3000
Gas flow rate	Ar+N <sub>2</sub>		Ar	
Distance(cm)	6	7.6		40
Dep. Time (min)	260	100	30	30

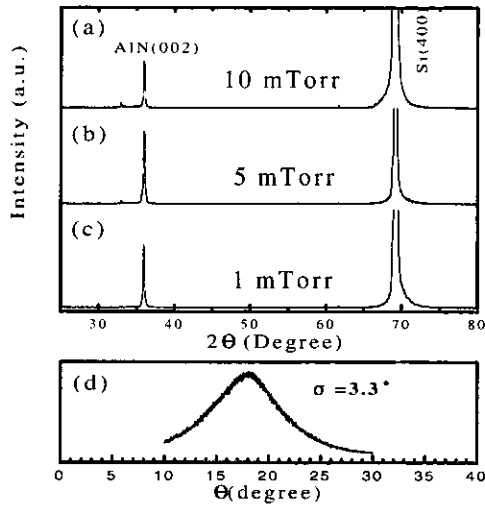


그림 5. 증착 압력 변화에 따른 AlN 박막의 X-선 회절 분석과 rocking curve : (a) 1 mTorr, (b) 5 mTorr (c) 10 mTorr (d) 5 mTorr에서의 rocking curve

mTorr의 압력, 200 W 전력, Ar과 N<sub>2</sub> 조성비 16:4, 기판과 타겟의 간격을 6 cm로 이격 시킨 후 260분간 증착하였다. SiO<sub>2</sub>와 W 박막은 동일한 Ar 분위기에서 7.1 mTorr 증착 압력으로 150 W 과 300 W의 전력, 100분과 30분간 각각 증착하였다. Al과 Au 박막은 6 kV와 0.5 A로 기판을 15 rpm으로 회전시키면서 30분간 증착하였다. 이렇게

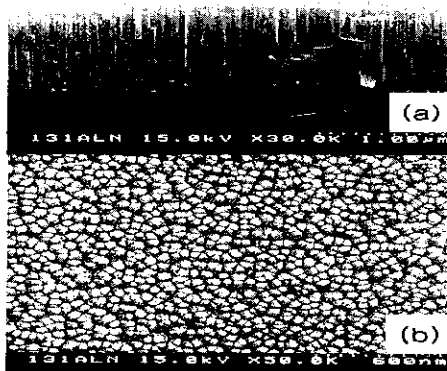


그림 6. AlN 박막의 단면 (a)과 표면 (b) SEM사진

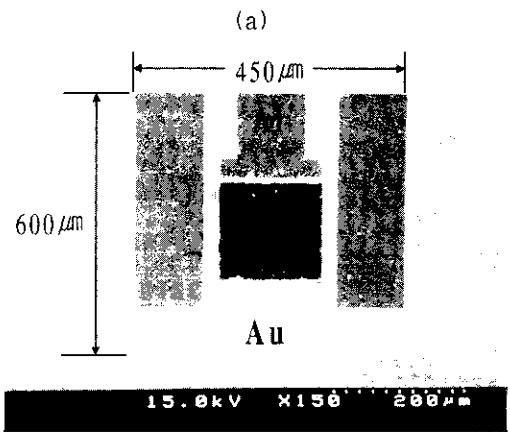


그림 7. Bragg reflector형 FBAR의 단면 (a)과 평면 (b)

증착된 AlN 박막의 단면과 표면, 제작된 FBAR의 전체 단면 형상을 그림 6과 그림 7에서 보여주고 있다.

#### 4. Bragg reflector형 FBAR의 초고주파 특성

실험에 의한 최적의 증착 조건을 이용하여 200  $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ 의 공진 면적을 갖는 2-port FBAR을 제작하였다. 초고주파 특성은 HP 8753E 네트워크 분석기와 접지-신호-접지 구조의 CASCADE wafer probe station을 사용하여 그림 8과 같이 제작된 소자의  $S_{11}$ (input reflection coefficient) 특성과  $S_{21}$ (forward transmission coefficient) 특성을 측정하였다. 측정결과 중심 주파수 1.983

GHz에서 반사 손실은 37.19 dB이며 직렬 공진 주파수( $f_s$ )는 1.976 GHz이고 병렬 공진 주파수( $f_p$ )는 2.005 GHz에서 관찰되었다. 전기기계적 결합 계수( $k_{eff}^2$ )는 3.529 %이다. 전기기계적 결합 계수는 직렬·병렬 공진 주파수의 상대적 주파수 차이를 결정함과 동시에 궁극적으로 필터 제작 시 통과대역 폭을 결정짓는 요소이기도 하다. 제작된 소자의 전극층과 압전층 표면에서 발생한 난반사와 전극에 의한 부하 효과, 에칭 후 남겨진 기생성분들로 인해 삽입손실은 6.13 dB로 약간 크게 측정되었으며 중심 주파수가 2 GHz에서 24 MHz 정도 벗어난 것은 정확하고 균일한 두께로 압전 박막을 증착하지 못했기 때문으로 사료된다.  $S_{11}$ 에서의 품질계수(Q-factor) Q값은 4261로 측정되어 단일 공진기로서는 우수한 특성을 나타내었으며 또한 스미스 도표를 이용하여 제작된 소자가 충분한 정합이 이루어졌음을 확인하였다.

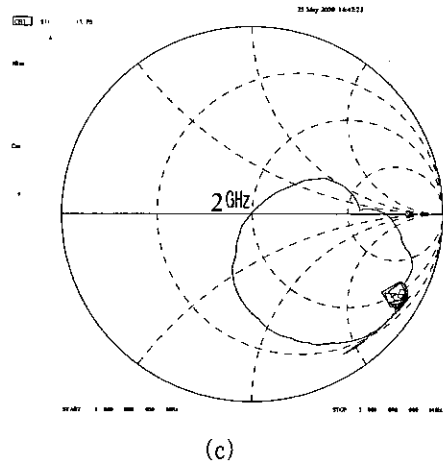
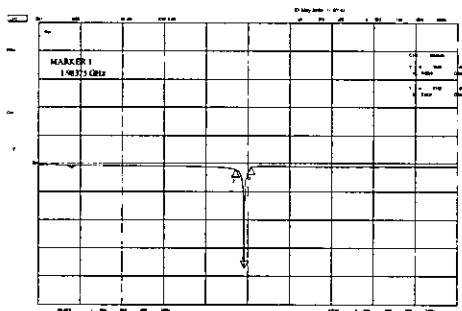


그림 8. 제작된 2-port Bragg reflector형 FBAR의 (a)  $S_{11}$  (b)  $S_{21}$  (c) Smith chart

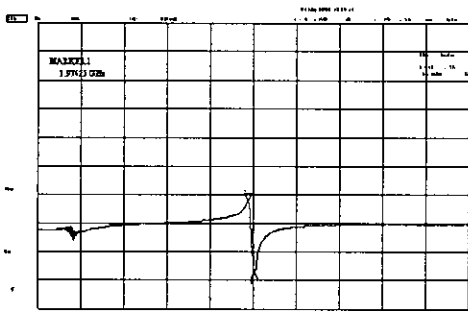
### III. 결 론

향후 10년 간은 초고속 정보통신망과 광대역 중이동통신을 근간으로 하는 정보혁명의 시대라 할 수 있다. 그러므로 음성, 영상과 같은 대용량의 정보를 보다 빠르고 정확하게 전달하기 위해서는 자체 노이즈가 적고 마이크로파 특성이 우수하며 유효 면적을 적게 차지하는 전자부품을 필요로 한다. 그러므로 현재 초고주파 및 밀리미터 대역에서의 세라믹스 다층기능 패키지 제조기술과 적층기술을 활용한 다양한 전자부품들에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 일부 전자부품들은 상용화 단계에 들어서 있거나 이미 위성통신과 이동통신 기지국 등에 사용되고 있다.

본고에서 제작 및 평가한 박막형 공진기는 초고주파용 소자 중 그 수요와 필요성은 높으나 집적화가 어려워 소형화, 저가격화, 고품질화에의 문제점을 안고 있는 소자를 대상으로 충분히 활용가능 하리라 평가되며 차세대 이동통신 IMT-2000 부품 중 특히 대역통과필터와 VCO용 공진기로 충분히 사용가능 하리라 예상된다. 또한 박막의 정확한 두께 조절



(a)



(b)

과 표면의 평탄도, 압전 박막의 우선배양성 및 신뢰성있는 박막의 재현 등과 같은 미흡한 면들의 개선을 위하여 초고주파 기술분야와 반도체 기술분야의 총체적인 접근과 노력이 결집되어야 한다고 사료된다.

#### ※참고문헌

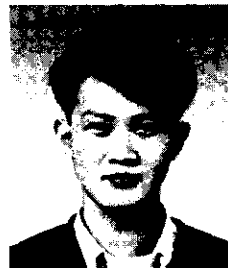
- [1] 김상희, 김종현, 박희대, 이시형, 이진국, "Film Bulk Acoustic Resonator using Bragg Reflector for IMT-2000 Bandpass Filter," 한국전기전자재료학회, vol.1, no.2, 13 July 2000
- [2] S. H. Kim, J. H. Kim, J. K. Lee, S. H. Lee and K. H. Yoon, "Bragg Reflector Thin Film Resonator Using Aluminium Nitride Deposited By RF sputtering," Asia-Pacific Microwave Conference, Dec. 2000
- [3] J. J. Lutsky, A sealed cavity thin-film acoustic resonator process for RF bandpass filters. Ph. D Thesis, Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA, 1997.
- [4] K. M. Lakin, "Modeling of thin film resonators and filters," In IEEE MTT-S Dig., pp. 149-152, 1992.
- [5] R. Ruby and P. Merchant, "Micromachined thin film bulk acoustic resonators," In Proc. Intl. Freq. Control Symposium, pp. 135-138, 1994.
- [6] G. D. Mansfeld, S. G. Alekseev, and

I. M. Kotelyanskii, "Bulk Acoustic Wave Microwave Composite Resonators and filters with Acoustic Isolation of Resonating Layers," IEEE Ultrasonic Symposium Proceeding, Oct 1998



김종현

1984년 광운대학교 전자통신공학과 졸업  
 1990년 독일 Ruhr Univ. Bochum 전자공학과 공학 석사  
 1994년 독일 Dortmund Univ. 전자공학과 공학박사  
 1995년~현재 광운대학교 전파공학과 부교수  
 관심분야: 초고주파 측정 및 센서, EMI/EMC, 초고주파 및 광집적회로, 선형화기



김상희

1999년 관동대학교 전자통신공학과 졸업  
 1999년~2000년 한국과학기술연구원 위촉연구원  
 1999년~현재 광운대학교 전파공학과 석사과정  
 관심분야: 초고주파 필터, 박막형 공진기, 선형화기