

## I. 서 론

무선 이동통신 시스템을 활용하여, 많은 정보를 신속하게 전달하기 위해서, 사용 주파수가 1~2 GHz에서 10 GHz 대역 이상으로 높아지고 있다. 휴대 정보 단말기의 크기도 작아지고, 사용 배터리의 사용 시간을 늘리기 위하여, 고주파 부품의 박막화, 저소모 전력화, 모듈의 3차원화, 모듈의 monolithic 화 등에 관한 연구가 활발하다. 이러한 요구를 충족시키기 위한 고주파 부품의 박막화 관련 연구 동향에 관해 서술한다.

## II. 박막형 고주파 부품

현재 활발한 연구를 추진하고 있는 분야는 압전 박막을 활용한 박막형 체적탄성과 공진기, 상온 초전도체와 강유전체 박막을 활용한 phase array, 고주파 유전체 박막을 이용한 초소형 필터 등이다. 예를 들어, 박막형 필름 체적 탄성과 공진기 (Film Bulk Acoustic Wave Resonator, FBAR)필터와 현재 사용하고 있는 세라믹스 벌크 필터와 표면탄성과 (Surface Acoustic Wave, SAW) 필터와의 특성 비교를 <표 1>에 나타내었다. 크기 면에서, 박막형 필터의 경우, 세라믹스 벌크 부품에 비하여 1/6 이하로 줄일 수가 있다. 능동 부품의 모노리틱 집적화 (Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMIC) 공정과 합치성을 고려한 수동 부품의 모노리틱화를 위해 박막형 고주파 부품의 개발이 필요하다. 또한,

사용 주파수 대역이 현행 1~2 GHz 대역에서 10 GHz 대역까지 확장되고, 부품의 소형화를 고려한 경우에도 좋은 해결책이 될 것으로 사료된다.

그 외에도, 반도체 공정 기술을 활용한 마이크로 머시닝(Micromachining, Micro Electro Mechanical System, MEMS) 기술을 활용한 기계적 공진을 이용한 박막형 고주파 부품 및 초전도체/강유전체, 고주파 유전체 박막을 활용한 고주파 부품에 관해 기술한다.

### 2-1 박막형 체적 탄성과 공진기 (Thin Film Bulk Acoustic Wave Resonator: FBAR) 필터

FBAR 밴드패스 필터는 기존의 유전체 공진기 필터에 비해서 초소형화가 가능한 새로운 소자로 주목되고 있다. 크기가 작고, 소모전력이 적고, 다기능성, 수동 부품과 동일칩에 집적화가 가능한 특징을 가지고 있다. FBAR 관련 연구는 90년대 초에는 군수용으로 미국 웨스팅하우스, 모토롤라, MIT 등에서 활발하게 연구 생산하였으나, 최근 들어서, 민수용 상품화를 고려하여 미국 모토롤라, 에질런트, 스웨덴 에릭슨, 핀란드 노키아, 일본 무라타 등에서 큰 관심을 보이고 있다. 현재의 기술로 미국 Agilent사에서 발표한 PCS 사양인 1.8 GHz 밴드 패스 필터, 듀플렉서 상품이 출현하는 단계이다. 2002년 2월 Agilent Report 에 의하면, 월 수십만 개 생산을 발표하였다. 향후, 멀티미디어 통신 분야의 핵심 부품으로 활용하기 위하여, 한국에서 차세대 신기술

〈표 1〉 박막형 고주파 필터의 특성치 비교

	세라믹스 벌크 필터	SAW 필터	FBAR 필터 (Film Bulk Acoustic Wave Resonator)
크기, mm <sup>3</sup> (PCS 듀플렉서)	675	140	98 ~ 46
삽입손실	excellent	good	excellent
Power handling	best	fair	good
주파수 대역 - 필터 - 듀플렉서	셀룰러/PCS 셀룰러/PCS	IF-셀룰러/PCS 셀룰러/PCS ?	셀룰러/PCS/mw 셀룰러/PCS/mw
모노리틱 집적화	불가능	동시소성 다층칩	다층박막 모노리틱화

사업으로 5 GHz 대역의 FBAR 필터 개발 연구가 진행 중에 있다.

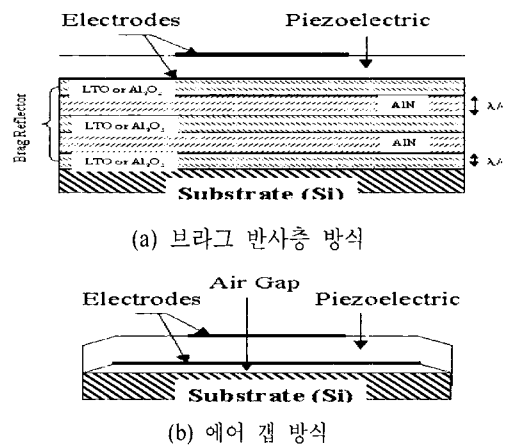
FBAR는 [그림 1]과 같은 구조를 가지고 있다. 압전 박막에서 생성된 체적 탄성파가 하부로 전달되고, [그림 1](a)의 브라그 반사층이나, [그림 1](b)의 공기와의 계면에서 반사되어 나오는 파와 상호 공진되는 현상을 이용한 소자이다.

[그림 1](a)와 같은 브라그 반사층은 탄성파 파장의 1/4 두께로 구성되고, 임피던스 차이가 큰 다층 박막으로 구성된다. 주로, SiO<sub>2</sub>/AlN/SiO<sub>2</sub>/AlN..... 혹은 W/SiO<sub>2</sub>/W/SiO<sub>2</sub>..... 등을 사용한다. 층의 수는 6층에서 8층 정도가 적당하며, 각 층의 두께와 계면 평활도에 따라 고주파 특성인 품질계수, 전기기계결합계수, 손실이 결정된다. 정확한 두께 제어, 다층 박막의 응력 제어, 박막의 결정구조 제어, 상부 전극의 표면 거칠기 제어 등으로 공진기의 품질 계수를 향상시킬 수 있다.

탄성파를 발생시키는 부분의 압전 박막의 두께는 탄성파 파장의 1/2 크기일 때에 가장 좋은 효율을 나타내게 된다. 이 때 사용되는 전극으로는 Mo, Al, W, Au 등이 사용되지만, 최종 고주파 특성을 고려하여, 주로 Mo를 사용한다. 이러한 형태의 공진기는 다층 박막을 사용하므로, 공진기의 크기를 줄일 수 있고, 단일 웨이퍼에 많은 공진기를 만들 수 있

고, 공진기를 조합하여 필터를 구성하기 용이하고, 대량 생산의 잇점이 있다. 그러나, 브라그 층을 6층 이상 쌓아야 하고, 중심 주파수가 정해지면, 그에 따른 브라그 반사층의 두께도 정해지므로, 공진기 결합 필터 구현 시에 손실을 배제할 수 없다. 또한, 공진기 층 두께가 12 μm 정도가 되면, 다층 박막의 응력 차이에 의한 탄성파 전달 왜곡 및 박막 사이의 부착력 감소에 따른 소자의 파괴를 초래하는 등의 문제점이 발생할 수 있다.

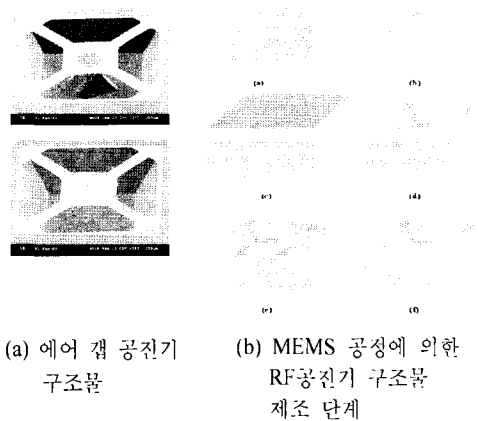
[그림 1](b)와 같은 에어 갭 형태의 경우, 탄성파의 반사 층으로 공기와의 계면을 이용하는 방법으



[그림 1] 필름 벌크 탄성파 공진기

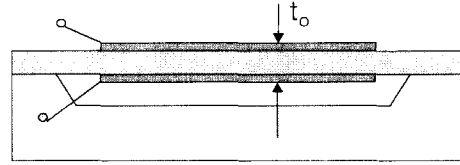
로서, 표면 혹은 벌크 마이크로 머시닝 기술을 활용한다. 이러한 공진기는 공정 수가 간단하지만, 실제 에어 갭을 구성하면, 공진기 소자의 변형 및 응력 발생으로 특성 저하의 단점이 있다. 실제로 공진기를 구성하려면, 압전 박막/하부전극 아래에 지지대용 멤브레인이 필요하다. 주로, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>나 Si을 사용하는데, 수 μm의 두께를 사용하므로, 이 곳에서의 탄성과 전달 손실, 다중 공진에 의한 문제점이 있다. 따라서, 하부 멤브레인이 없는 공진기 개발 연구를 수행 중에 있다. 그외에, 공진기의 품질계수를 결정하는 멤브레인 하부의 표면 거칠기 및 평활도를 유지하는 기술 개발이 필요하다.

여러 개의 공진기를 조합하여 필터를 구성할 경우, 하부의 에어 갭을 유지하기 위해 복잡한 구조를 구성해야 하고, 멤브레인 층의 취약점이 문제이다. 실험실적으로 제작한 에어갭 형태의 공진기는 [그림 2](a)와 같이 윈도우를 통해서 하부 실리콘을 식각하는 방법을 사용한다. 이러한 구조를 만드는 공정은 [그림 2](b)처럼, 압전 박막을 형성하고, 윈도우를 통한 하부 실리콘의 식각 공정을 사용하지만, 이 공정 중에 상부의 AlN 박막의 측면도 동시에 시



(a) 에어 갭 공진기 구조물 (b) MEMS 공정에 의한 RF공진기 구조물 제조 단계

[그림 2] MEMS 공정을 이용한 고주파 공진기



[그림 3] FBAR의 보식도

각되는 문제점이 있다. 이러한 구조를 유지하기 위해, Silicon on insulator (SOI) 웨이퍼를 사용하여, 하부의 산화규소를 식각해 내는 방법도 사용한다. 그 외에 벌크 머시닝이나, 상부 등방성 에칭 등의 방법을 사용하기도 한다.

FBAR의 개략도인 [그림 3]에서, 공진기의 중심 주파수,  $f_r$ 은 두께에 반비례하며,

$$f_r = c/2t_0$$

식으로 표현할 수 있다. 이 식에서,  $c$ 는 탄성파의 속도,  $t_0$ 는 압전체의 두께이다. 따라서, GHz 대역 고주파 필터용 공진기를 제조하기 위해서는, 얇은 박막을 형성하여야 하며, 초고주파 대역으로 갈수록 두께가 얇아지고, 계면 및 표면 효과가 증대되어서, 공정이 점점 복잡해진다.

FBAR 구성 다층 박막 중 가장 중요한 압전 박막 재료로는 <표 2>와 같이 다양하다. 공진기의 공진 주파수는 탄성파 전송 속도에 비례하므로, 높은 주파수를 구현하기 위해 ZnO, AlN 박막 재료를 사용한다. 공진기 소자를 실리콘 기판 위에 집적화 해야 하기 때문에, 구성 성분의 수가 적은 재료의 선택이 좋다. 그 외에도, 다성분 압전 박막을 사용할 수가 있다. 공정의 용이성, 공진 특성, 상하부 전극 선정, 박막 형성의 안정성 등을 고려해서, 압전 박막재료를 선택한다. AlN, ZnO 계통의 압전 박막을 사용할 경우에는, Al 상하부 전극을 사용할 수 있고, Al 박막재료에 대한 연구 결과가 풍부하여, 사용하기 용이하다.

〈표 2〉 압전 박막 재료의 특성

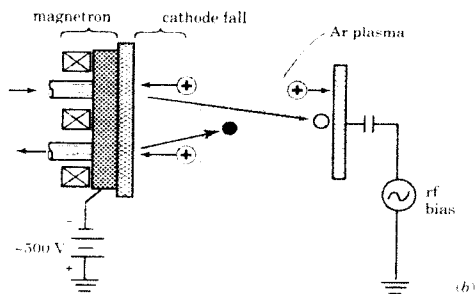
Material	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Dielectric constant	Acoustic velocity(m/s)	Acoustic impedance(10 <sup>6</sup> kg/m <sup>2</sup> s)	Electro mechanical coupling factor, k <sup>2</sup>	$\Delta f/fr$
AlN	3,270	8.5	10,400	34	0.03	1
ZnO	5,680	8.8	6,330	36	0.03 ~ 0.08	1 ~ 5
PZT		1,300	4,600		0.70	22
PbNb <sub>2</sub> O <sub>6</sub>		300	3,300		0.40	
PbTiO <sub>3</sub>	7,700	179	3,980		0.40	
LiNbO <sub>3</sub>	4,640	29	7,320	30	0.49	
Pt	21,300					
Al	2,700					

압전 박막 및 전극, 브라그 반사층 등의 다층 박막은 [그림 4]와 같은 고주파 마그네트론 스퍼터링 (Radio Frequency Magnetron Sputtering)법을 사용한다. AlN 박막의 경우, Al 타겟을 사용하여, 양극과 기판 사이에 13.56 MHz 교류 고전압을 걸어주면, 전극 사이에 플라즈마가 형성된다. 플라즈마 속에서 이온화된 알곤 양이온이 음으로 self bias된 타겟으로 가속되어 충돌한다. 알곤 이온의 충돌에너지가 타겟 입자의 스퍼터링 에너지로 전환되면서, Al 입자가 스퍼터되어 기판에 이동하여 Al 박막을 형성한다. 반응 중에 질소 가스를 넣어주면, AlN 박막을 형성시킬 수 있다. 공정 변수로는 질소의 분압, 고주파 파워 등이며, 양질의 탄성과 공진기를 구현하기

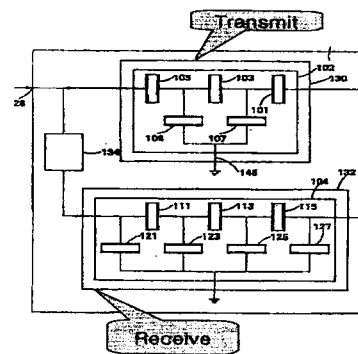
위해서는 단결정 에피성장이나, 두께 방향 기동 모양 결정 구조가 좋다.

결론적으로, 체적 탄성과 공진기의 품질 계수를 결정하는 주요 요인으로는 다층 박막의 결정구조, 미세구조, 계면 및 표면 평활도, 매질 통과 탄성과 파장의 1/4의 정수배를 유지하는 두께 정밀도에 좌우된다.

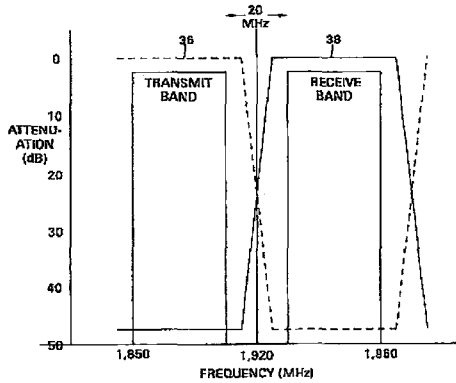
공진기를 결합하여 필터를 구성하며, 결합하는 공진기의 수, 결합 방법 등에 의해서, 필터의 삽입손실, skirt 특성 등이 결정된다. 미국 Agilent 사에서출원된 특허를 참조하면, 공진기를 결합하여, [그림 5]와 같은 USPCS 듀플렉서를 제안하였다<sup>11)</sup>.공진



[그림 4] 고주파 마그네트론 스퍼터링 개념도

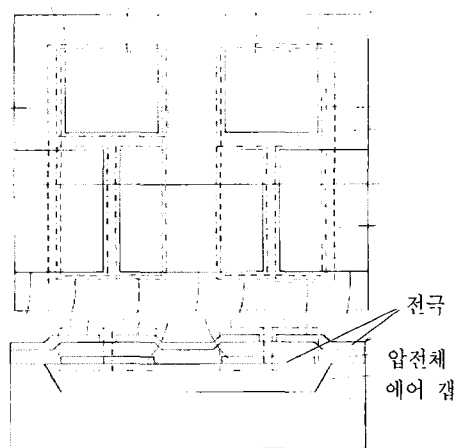


[그림 5] FBAR 듀플렉서의 Block diagram



[그림 6] FBAR 듀플렉서의 주파수 특성

기를 직병렬로 결합하여, 송신, 수신용 밴드 패스 필터를 구현하였다. 이를 이용한 소자의 주파수 특성을 [그림 6]에 나타내었다. 공진기의 중심주파수를 제어하여, 원하는 skirt 특성을 구현하였다. 이 구조에서, 동일 웨이퍼 위에 여러 종류 중심주파수를 나타내는 공진기 구현의 어려움이 있다. 가장 쉬운 방법은 상부 전극의 두께를 조절하여, 압전체 전체 두께를 제어하여, 공진 주파수를 튜닝하지만, 이 경우, 필터 손실 증가의 문제점이 있다.



[그림 7] 공진기 필터 구성 예

소자 형성의 한 예로 [그림 7]과 같은 방법이 있다. 하부 전극을 공유하여, 6개의 FBAR를 결합하여, 필터를 구현하였다. 압전 층을 동시에 공유하기 때문에, 탄성파의 상호 간섭의 문제점은 있지만, 공정이 단순하여 많이 사용하는 방법이다. 실제 소자 구현에서 손실을 줄이기 위해, 상부 전극의 형태를 서로 어긋나는 다각형 형태를 구성하여 필터 특성을 개선하기도 한다.

FBAR 필터 구현에 있어서, 가장 큰 문제는 동일 웨이퍼 위에 두께 함수인 공진기의 중심 주파수를 다양하게 제작하는 어려움이 있고, 여러 개의 공진기를 결합할 때 발생하는 기생 인덕터 성분의 제거 등이 문제이다.

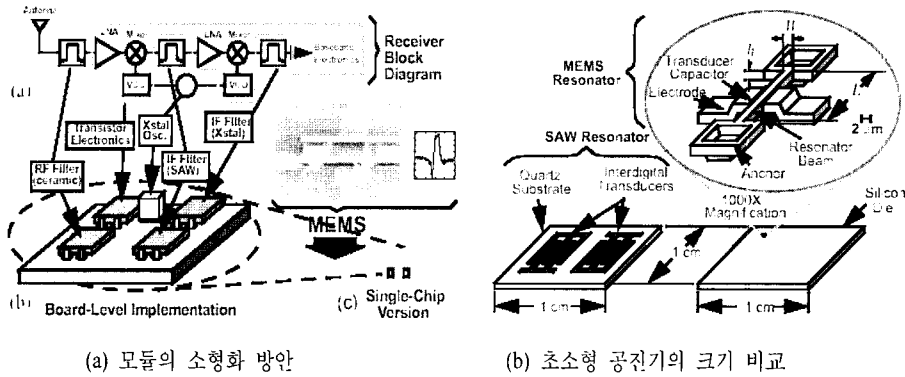
## 2-2 고주파 유전체 박막 통신 부품

고주파 유전체 박막 통신 부품 관련 연구는 미국 알곤 국립연구소, 로스알라모스 국립연구소, NASA Lewis, Naval Research Lab., 스위스 로잔 공대 등에서 활발한 연구를 수행하고 있다.

고주파 유전체 박막을 활용한 부품은 사용 전압이 낮고, 응답 속도가 빠르고, 단결정 예외 성장이 가능하고, 유전 특성의 비선형성 등의 특징을 활용한 튜닝 가능성의 잇점이 있어서, 최근 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[2]</sup>. 이러한 박막은 평면 캐패시터, coplanar wave guide와 튜닝 가능 phase shifter, 믹서, 필터 등으로 활용 가능하다. 특히  $\text{Bi}_2(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_2\text{O}_7$  박막은 유전상수가 크고, 유전 손실이 작고, 주파수의 온도 의존성이 작은 특성이 있다.

$(\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x})\text{Ti}_{1-y}\text{O}_{3-z}/\text{MgO}$  다층 박막은 전계 튜닝이 가능한 고주파 소자로 활용될 수 있다. 고주파에서의 유전상수가 크고, 유전 손실이 작아서 varactor, 주파수 tripler, 튜닝 가능한 microstrip line phase shifter, filter, high Q resonator 등으로 활용 가능하다<sup>[3]</sup>.

$\text{SrTiO}_3$  박막은 전계에 따른 유전상수의 변화가



(a) 모듈의 소형화 방안

(b) 초소형 공진기의 크기 비교

[그림 8] MEMS 공정을 활용한 박막형 고주파 부품의 소형화

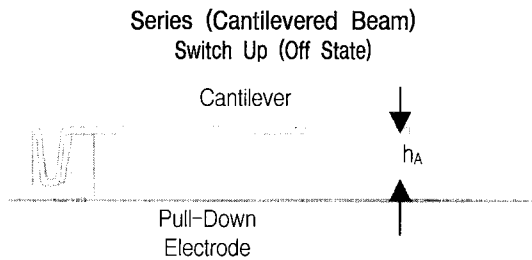
관찰되어서, 튜닝 가능한 고주파 회로에 많이 활용된다.  $\text{LaAlO}_3$  기판을 사용하여, 고온 초전도체를 사용한  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}/\text{SrTiO}_3$  다중 박막은 40 GHz까지 주파수 영역에서, 20°K, 19 kV/cm에서 25%의 유효 유전상수 튜닝 효과를 관찰할 수 있다<sup>[4]</sup>.

고온 초전도체인  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}/\text{MgO}$  microstrip 안테나 등의 고주파 통신 부품을 구현하고 있다<sup>[5]</sup>.

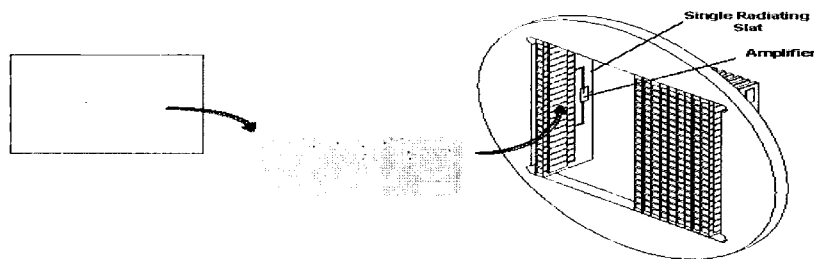
### 2-3 고주파 MEMS 부품

MEMS 공정을 활용한 고주파 부품으로는 [그림 8]처럼 초소형 빔 공진기, 초소형 스위치 등이 있다. 이 방법은 미국 미시간 대학에서 많이 연구하고 있으며, [그림 8](a)처럼, 휴대용 이동통신기기의 고주파 송수신 부분의 일부분을 그림과 같이 MEMS 공

정을 이용하여 초소형화하는 연구이다. 이러한 방법으로 제조된 초소형 공진기는 [그림 8](b)에 기존 SAW 필터와 비교한 것처럼, 초소형화 및 기존 MMIC 능동 소자와 함께 집적화할 수 있는 장점이 있다. 공진 빔 형태로 구성하여 기계적인 진동의 공진을 고주파 필터로 활용하는 방법으로서, 작은 기



[그림 9] MEMS 공정을 활용한 박막형 초소형 스위치



[그림 10] 초소형 안테나 어레이

계 구조물을 MEMS공정으로 제작한다.

고주파 신호의 전달에 필요한 스위칭 회로를 소형화하기 위해 [그림 9]와 같은 MEMS 스위치가 있다. 초소형 박막 공정을 이용하여, 캔티 레버를 제작하여, ON/OFF 스위칭 동작을 구현한다. 이러한 작은 고주파 부품을 구현하기에는 박막 공정과 MEMS 공정을 사용하는 것이 유리하다. 그외에도, [그림 10]과 같이 산화물 박막 phase shifter를 이용한 전기적으로 스캐닝 가능한 스마트 안테나 등에도 활용된다.

### Ⅲ. 종합적인 결론

박막형 고주파 통신 부품은 현재 상품화된 것은 적지만, 향후 도래할 초고속, 대용량 멀티미디어 시대에, 더욱 작고, 저소비전력의 휴대용 통신 기기 개발에 필수적인 부품으로 활용될 전망이다. 박막형

통신 부품 관련 연구에서, 가장 중요한 점은, GHz 대역에의 고주파 특성 평가 기술의 확립과, 벌크 상태에 비해 다층 박막 통신 부품은 기판이라는 지지대 위에서의 특성이므로, 소자 상호 간의 연결에 다른 기생 효과를 잘 해석할 필요가 있다.

### 참고문헌

- [1] *US Patent*, 6, 262, 637, July 2001.
- [2] H-F Cheng and Y-C. Chen, *J. Appl. Phys.* 87(1) p. 479, 2000.
- [3] J. Im, O. Auciello, et al., *Appl. Phys. Lett.* 76(5) p. 625, 2000.
- [4] P. K. Petrov, E. F. Carlsson, *J. Appl. Phys.* 84(6) p. 3134, 1988.
- [5] D.-C Chung, B-S. Han, *J. Appl. Phys.* 86(12) p. 7192, 1999.

### 필자소개

이 전 국



1981년: 한양대 금속공학과 (공학사)  
1983년: KAIST 재료공학과 (공학석사)  
1991년: KAIST 재료공학과 (공학박사)  
1991년 ~ 1997년: KIST 세라믹스부 선임 연구원  
1983년 ~ 1991년: KIST 무기재료연구실 연구원

1997년 ~ 현재: KIST 박막기술연구센터 책임연구원