

## 통신용 고온 초전도 공진기 및 대역통과 필터 개발



**이상렬**  
연세대 전기공학과 조교수



**김성민**  
연세대 전기공학과 연구원  
(대학원)

### 1. 서 론

현대사회에 있어 정보통신화가 급속히 연구 개발되어 각 개인의 정보전달이 point-to-point로 가능하게 발전되고 있다. 이에 따라 한정된 주파수 자원의 효율적 배분이 이루어져야 할 것이며 이를 위해서는 통신부품의 성능향상, 신호처리기술의 개발, 새로운 주파수 자원 활용 등이 신속히 진행되어야 할 것이다. 최근 들어 통신소자의 성능향상을 위해 차세대 물질인 고온초전

도체(High Temperature Superconductor, HTS)를 통신소자에 응용하고자 하는 연구가 결실을 맺고 있으며 실제로 초기 제품을 테스트하는 단계에 접하고 있다. 고온초전도 통신소자는 크게 안테나, 필터, 멀티플렉서 등의 수동소자와 조셉슨효과를 이용한 검출기, 믹서, 오실레이터 등의 능동소자로 구분되며 냉각기술을 포함한 통합된 통신용 서비스시스템 개발 연구가 진행중이다. 이에 따라 고성능 통신소자 제작을 위한 고온초전도체 통신소자 개발 현황을 알아보고 가장 기본적인 고온초전도 통신소자인 초전도 공진기 및 필터의 연구동향을 분석하여 세계적인 개발 동향을 제시하고자 한다.

### 2. HTS 공진기 및 HTS 필터 개발 필요성

일반금속을 이용한 마이크로파 통신소자는 고주파로 올라갈수록 일반 금속에서의 손실이 증가하게 되어 구현된 소자의 성능이 떨어지기 때문에 고주파 시스템을 구현하는 데에는 그리 적합하지 않게 된다. 이에 비해 마이크로파 통신소자 개발을 위한 고온 초전도체(High Temperature Superconductor, HTS)의 도입은 아직은 제작이 어렵고 가격 경쟁력 면에서 뒤떨어지는 단점이 있기는 하지만, 기존의 일반 금속 통신소자에 비해 초전도체가 갖는 무저항 특성에 의한 저 손실

특성 및 매우 낮은 마이크로파 표면 저항, 일반 마이크로스트립 공진기나 필터에 비해 매우 높은 Q값의 이점으로 인하여 통신시스템의 성능을 매우 향상시켜 줄 것으로 예상되며, 특히 위성에 탑재될 때에는 우주 공간의 극저온으로 인해 냉각장치가 필요치 않다는 매우 큰 장점을 지니고 있어 마이크로스트립 소자가 가지는 소형 및 경량화의 특성을 충분히 살려줄 수 있다는 장점이 있다.

**2.1 HTS 장점 :** 고온초전도체(HTS)는 마이크로파 공학분야에서 획기적인 물질로 부각되고 있다. 마이크로파 응용분야, 특히 통신소자계통에서의 초전도체 응용은 초전도체가 임계온도( $T_c$ )에서 가지는 저손실 특성, 저 잡음 효과, 낮은 소비전력, 매우 낮은 마이크로파 표면저항뿐만 아니라 회로를 소형화 할 수 있다는 특성을 가지고 있다. 또한, 무저항 특성에 따른 최대  $1 \times 10^7 \text{ J/cm}^2$ 의 전류를 전송시킬 수 있는 고전류밀도 효과로 고출력이 가능함으로 많은 응용분야에 관심이 집중되고 있다. 그러나 고온초전도체의 응용에서 문제점으로 부각되는 것은 일반적 초전도체인 Y-Ba-Cu-O의 경우 임계온도인 질소온도(77K)에서 초전도의 특성이 나타나기 때문에 모든 응용 소자에 냉각장치가 필수적이라는 것이다. 그러나 최근 고온 초전도체의 특성 개선

등의 연구로 초전도 소자의 임계 온도가 계속 올라가고 있는 실정이며 최근 수은(Hg)계열의 초전도체의 경우 임계온도 135K, 비스무스(Bi)의 경우 임계온도 250K가 보고된 바 있으며 또한, 냉각기도 점차 소형화 및 신뢰성 증가도를 향상시키고 있다.[1-5]

## 2.2 개발 필요성

고온 초전도체의 통신용 소자에는 박막형 소자가 적용되고 있다. 이러한 박막형 수동소자는 초전도체의 특성인 낮은 전력손실, 적은 표면 저항, 낮은 신호왜곡의 특징을 나타내기 때문에 microwave 및 millimeter wave 영역의 고주파 소자에 실용화되기 위한 연구가 진행중이며 특히 위성통신용 소자로써의 적용은 세계적으로 활발히 연구중이고 그 중 미국에서는 HTSSE project를 중심으로 연구 개발중이다. 고온초전도 소자의 위성통신용으로서의 응용은 일반적인 통신위성의 무게 약 1,500 Kg에서 마이크로파 필터, filter bank와 이러한 부품의 기계적 지지대등 관련 부품들의 무게가 약 1/8을 차지하는 것을 고려했을 때 고온 초전도체를 이용한 소자의 경량화와 우주공간에서 나타나는 극저온상태는 초전도 소자의 활용에서 cryo-cooler가 필요 없다는 것은 상당히 매력적이다. 또한 위성통신용 대역통과 필터가 가져야 할 특성 중 14.35GHz에서 1% 미만의 협대역폭, 낮은 삽입손실, 높은 skirt selectivity 등은 고온초전도 물질로 된 소자만이 충족시킬 수 있다.[6-8]

이러한 수동소자용 초전도 박막 제조방법으로 sputtering, laser ablation, molecular-beam epitaxy, metal-organic chemical vapor deposition(MOCVD), co-

evaporation 등 여러 가지 방법이 사용중이며 양질의 박막과 박막의 집적도를 높이기 위해 여러 제조기술이 제시되고 있다. 그리고 최근에는 대면적 박막제조 방법으로서 co-evaporation 방법이 집중적으로 연구되고 있다.

앞서 언급했듯이 고온초전도 소자를 사용하는 데 있어서 필요불가결한 장비로 초전도 물질의 임계온도를 유지시켜 줄 냉각장치가 필요하다. 이미 미국에선 이동 통신 기지국에 초전도 소자로 만들어진 filter bank가 도입된 예가 있으며 이 filter bank에 사용된 cryo-cooler의 경우 약 8개월의 수명을 가지며 이러한 filter bank를 사용할 경우 기존의 일반 금속 filter bank의 약 3배에 달하는 집적도를 보인다. 따라서 초전도 물질을 이용한 소자의 개발과 더불어 주변기기 개발 특히 cryo-cooler 개발이 초전도 응용 공학분야와 병행해야 할 새로운 issue로 부각되고 있다.[9-11]

## 3. Laser Ablation에 의한 HTS 공진기 및 필터 제조 공정

고온초전도 공진기 및 필터 제작은 먼저 우수한 품질의 고온초전도 박막제조와 초전도 특성을 살린 마이크로파 통신소자 설계, 박막특성을 손상시키지 않는 패턴 공정 등이 고온초전도 통신소자용 공진기 및 필터 제작에 중요하다 하겠다.

**3.1 증착 방법 :** 앞서 언급한 바와 같이 고온 초전도 박막 증착에는 여러 가지 방법이 있으나 그중 가장 널리 사용되는 방법으로 Laser deposition과 co-evaporation이 있다. laser deposition은 높은 에너지밀도의

레이저빔을 정확한 조성으로 이루어져 있는 벌크상태의 초전도 물질에 조사하여 그 물질을 플라즈마의 형태로 변환시킨 후 기판 위에 증착시키고 입자화된 초전도 물질을 후열처리로 다시 조성을 맞추는 기법이다. Laser deposition은 높은 에너지밀도의 빔을 직접 물질에 조사하기 때문에 증착율이 상당히 높게 나타나며 일반적으로 약 9000A/h의 증착율을 보인다. 그러나 이 방법은 증착 범위가 최대 2x2cm의 한계를 가지고 있고 boulder라 불리는 입자덩어리가 증착되는 경우가 발생한다. 이로 인하여 박막의 표면이 균일하지 않고 거칠어지며 결과적으로 표면 저항이 높아지게 된다.[12-14]

## 3.2 공진기의 설계

마이크로파 공진기는 초전도체의 낮은 표면저항을 이용하여 높은 Quality값을 낼 수 있는 단순한 소자이다.

그림 1은 듀퐁에 의해 발전된 1차원 c-밴드 반파 마이크로스트립선로 공진기이다. 위 공진기에서 트랜스미션과 입/출력 단자선 사이의 gap에 의해 생기는 커플링 커패시턴스는 공진 길이를 결정하는 요인이 된다. 이러한 gap은 제작된 공진기의 양호도를 결정하는 중요한 요소가 된다. 이 gap은 공진기가 입/출력 단자선과 절연이 될 수 있도록 충분히 커야하며 동시에 적당한 에너지 커플링이 일어날 수 있도록 적절히 작은 값을 유지해야 한다. 필터를 포함한 공진기 라인의 배치에 따라 standard microstrip, inverted microstrip, coplanar, slot, strip, suspended strip line 등으로 세분되는데 이중 microstrip line, strip line, coplanar line으로 된 트랜스미션

이 대표적이다. microstrip line 은 그림 1에서 보여지듯이 구조가 가장 간단하고 만들기 쉬우며 또한 한 기판사이에 conductor line 과 ground plane을 포함하기 때문에 현재 초전도체 소자 제작에 집중적으로 적용되고 있다. 반면, stripline은 두 개의 접지면을 가진다. stripline type은 2개의 평행 접지면에서 비롯한 방출손실이 조절 가능할 경우 microstrip의 경우보다 높은 Q값을 만들 수 있다.

Coplanar type은 단지 한쪽 면 상에만 초전도막이 형성된다는 이점이 있는 반면 transmission 과 접지면상에 edge-effect에 의해 RF 전류가 집중되는 현상이 나타난다. 따라서 Q값이 낮아지고 파워핸들링 능력이 저하되는 현상이 발생한다.[15-19]

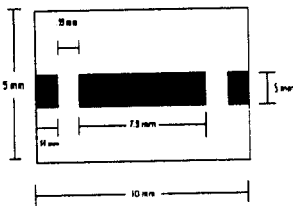


그림 1. 5GHz 공진 주파수를 갖는 1차원 공진기

**3.3 대역통과 필터의 설계 :** 일반적으로 필터는 구조적으로 수동, 능동 필터로 구별되며 필터의 사용 주파수 영역에 따라서 low-pass, high-pass, band-pass로 나뉘어 지며 band-pass의 반대되는 입장에서 band-rejection 필터가 있다. low-pass 필터는 주파수 대역에서 저주파 대역에서만 신호를 통과시키고 그 외의 대역에서는 금지시키는 역할을 하고 그와 상반되는 역할을 하는 것이 high-pass 필터이다. 주파수 대역에서 필요로 하는 일정한

대역만 통과시키는 것이 band-pass 필터이고 역으로 일정 영역에서의 신호만 금지시키는 것은 band-rejection 필터이다. 이중

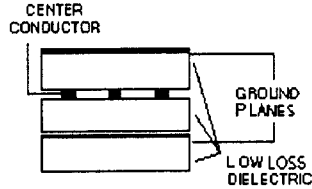


그림 2. 스트립라인 단면도

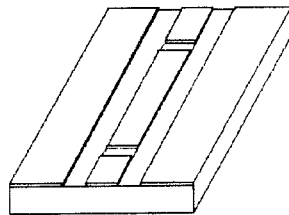


그림 3. 코플레너선로 반파 공진기

에서 현재 고온 초전도체로 많이 연구되고 있는 필터는 low-pass 와 band-pass 필터가 있으며, 특히 band-pass 필터는 고 효율의 협대역 필터로서의 사용이 가능하고 따라서 대부분의 고온 초전도 필터 연구는 이 협대역 필터에 집중되고 있는 상황이다. 고온 초전도 필터 개발은 여러 종류의 형태가 있지만 가장 많이 연구되고 있는 것은 사용된 주파수의  $\lambda/4$  정도의 길이와  $50\Omega$  임피던스의 입/출력 feed line 특성을 가지고 있는 공진기가 평행으로 구성된 평행 결합선 필터이다.[20-21]

그림 4는 5극 평행선 필터의 패턴을 그린 것이다. 그림과 같이 bandpass 필터는 여러 개의 공진기로 구성되어 되어 있으며 또한 공진기의 극수에 따라서 필터의 특성이 결정지어진다. 극수

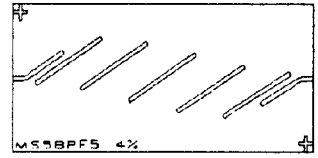
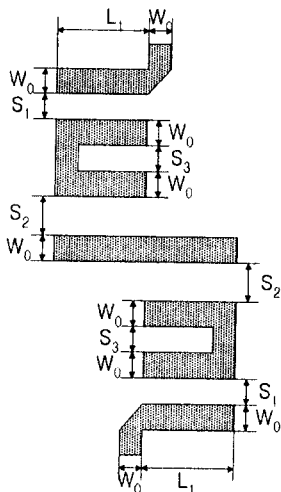


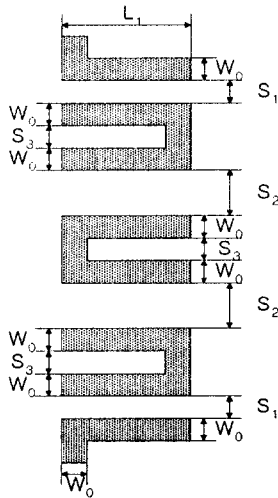
그림 4. 5극 평행 결합 필터

의 증가에 따라 주파수 응답의 skirt특성이 양호해지고 offband rejection이 커진다. 그러나 극수의 증가는 삽입손실의 증가를 초래하게 된다. 이러한 극수에 따른 효과는 협대역 필터에서 중요한 관건으로 간주되어지는데 초전도 필터의 경우 일반 금속 필터에 비해 대단히 낮은 삽입손실과 높은 Q값을 나타내기 때문에 초전도 필터의 극수 조절 범위는 비교적 여유롭다. 그러나 극수의 증가는 필터의 크기 증가를 초래하게 된다. 필터 크기의 제한을 극복하기 위한 방법으로 hairpin-line이 적용이 될 수 있는데 이는 평행결합선 방식의 필터에 비하여 더 소형으로 제작이 가능하다. 같은 극수로 설계될 때 더 성능이 우수한 hairpin line 필터, 그리고 hairpin-line 필터가 가지고 있는 표면파에 의한 spurious mode 발생의 단점을 극복할 수 있는 hybrid hairpin-line/half-wave parallel-coupled-line 필터 등을 설계하여 상대적으로 크기도 작고 우수한 성능을 가지는 필터가 연구, 개발중이다.

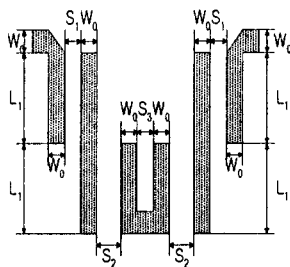
Hairpin line 필터는 일반적인 평행결합선 공진 회로에서 반파장 선로를 구부림으로 해서 얻어질 수 있다. 따라서 그 크기 면에서 평행결합선 방식의 필터보다 소형으로 제작될 수 있다는 장점이 있으나 표면파에 의한 spurious mode가 발생한다는 단점을 가지고 있다. Hairpin-line 필터에서 필터를 구성하는



(a) Hairpin-line 필터



(b) Hybrid hairpin-line/half-wave parallel-coupled-line 필터



(c) Hybrid hairpin-line/half-wave parallel-coupled-line 필터

그림 5. Hairpin-line이 적용된 필터의 예

공진기의 수는 원하는 대역폭 및 skirt 특성에 의해 결정되어 질 수 있으며,  $N$ 을 low-pass prototype 필터의 차수라고 한다면 hairpin line 필터는  $2N+2$ 개의  $\lambda_g/4$  평행결합 선로로 구성되어 진다. Hybrid hairpin-line/half-wave parallel-coupled-line 필터는 hairpin-line과 parallel-coupled line을 같이 연결하여 필터를 형성함으로써 hairpin line 필터에서 발생하는 표면파에 의한 spurious mode를 줄일 수 있다는 장점을 가지고 있다.[22-24]

### 3.4 박막 식각 공정 : 초전도

박막 패터닝에 관해서는 여러 가지 방법이 발전되어왔다. 그 중 YBCO 초전도체에는 wet-etching법이 주류를 이루어 왔는데 회석 인산, EDTA (ethylene-diamine-tetraacetic acid) 용액, nonaqueous bromine in ethanol이 이 wet-etching법에 속한다. 이 방법은 YBCO 초전도체의 손상이 없이 고식각율과 높은 selectivity를 가지기 때문에 YBCO 박막에 적합하지만 wet-etching법의 등방적 특성상 작은 구조의 회로 식각에서 정밀도가 떨어진다. 레이저 어블레이션도 박막 패터닝에 성공적으로 사용되고 있지만 이 방법 역시 작은 회로구조에는 적합하지 않고 또한 YBCO 초전도체를 손상시킬 우려가 있다. 이방적 식각법으로 유망한 이온 밀링법은 박막의 정확한 패터닝이 가능하지만 ion-milling 식각과정에서 발생할 수 있는 YBCO 혼합물의 분해, 또는 산소의 증발등을 방지하기 위해 적당한 냉각 조건과 세심한 주의가 절대적으로 필요하다.

특히 전류나 전기장이 평판 transmission line의 모서리에 집중되는 경향이 있기 때문에 식각 과정에서 패터닝된 line의 모서리 부분이 깎이는 일이 없어야 한다.[1-3]

## 4. HTS 공진기 및 필터 개발 방향

마이크로파를 이용하는 통신이 중요성을 더해감에 따라 일반 금속을 이용하던 여러 부분에 대해서 초전도체로의 대체를 연구하고 있다. 위성통신용 필터는 효율적인 전파를 위해서 매우 작은 손실을 가져야 하고, 제한된 주파수 영역중 협대역에서 필요로 하는 신호들만 효율적으로 선택하기 위해선 고효율의 channel 수를 증가시킨 필터가 요구된다. 따라서, 전대역에서 특정영역만을 개별 선택할 수 있는 협대역 특성과 파워핸들링 능력을 향상시킨 공진기 및 필터의 개발이 요구된다. 이러한 관점에서 마이크로스트립 이중모드 구조와 디스크 구조는 안정된 주파수 응답과 매우 좁은 대역폭을 갖는 필터가 요구하는 조건을 만족한다.

### 4.1 이중모드 필터

그림 6은 이중모드 microstrip 공진기의 예이다. 이중모드 공진기는 보통 단일모드 공진기의 형태로 구성이 되어 있지만 단일모드 공진기와는 차이점은 이중모드에는 변성모드를 분리시키기 위한 작은 교란기가 있다.

그림 6에 나타나 있는 공진기들은 전부 같은 주파수에서 두 개의 기본모드를 가진다. 이 교란기는 하나 또는 두 개의 모드가 가지는 주파수를 이동시켜서 그 주파수 영역에서 두 모드를

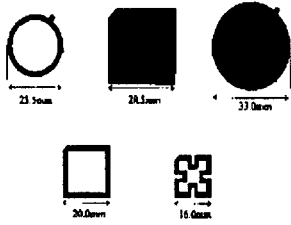


그림 6. 이중모드 공진기

분리시키는 역할을 한다. 두 모드사이의 커플링과 분리 주파수는 교란기의 크기와 형태에 따라서 조절 가능하다. 교란기는 교란기의 중계력, 균형성, 중앙 주파수로의 동조능력 등을 감안하여 선택된다.

원형 patch는 크기가 가장 크며 사각 patch, 원형 루프, 사각 루프, 그리고 마지막으로 meandering 사각 루프다음으로 뒤따르게 된다. meandering 사각 루프는 단순히 사각 루프를 우회시킴으로써 사각 루프의 크기를 줄이며 비록 우회구역 사이의 커플링이 문제시될 지라도 우회경로를 증가시켜서 meander 사각 루프를 줄일 수 있다.

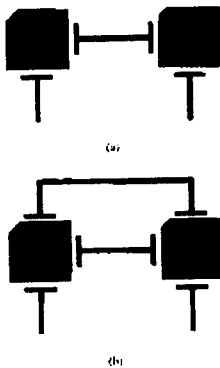


그림 7. 이중모드 필터:  
(a) Chebyshev,  
(b) elliptic

그림 7은 이 공진기가 어떻게

필터를 구성하는지를 보여준다. 동일한 형태로 배열된 공진기 상호간의 커플링된 transmission line으로 에너지의 상호교환이 일어나게 된다. 그림 7의 (b)에서 보는 바와 같이 elliptic 기능을 가지는 필터를 제작하기 위해 모드를 cross-coupling시킬 수도 있고 또한 그림 6에서 보여지는 공진기들도 유사한 방법으로 elliptic 기능의 필터로 구성할 수 있다.[31-33]

이중모드를 사용한 필터의 이점은 그 필터의 크기, 대역폭, 파워핸들링에 대한 사항이 충분히 참작되었을 때 뚜렷이 나타난다.

일반적으로 이중모드 필터는 고전력과 협대역 측면에서 유용하다. 또한 meander 공진기를 사용하는 이상 필터의 크기를 더 줄일 수 있는 여유도 생긴다. 그러나 높은 파워핸들링과 Q값은 필터의 크기가 줄어들수록 같이 떨어지게 된다. 또 다른 관점에서 이중모드 필터의 이점은 제조공정상의 결함이나 박막상의 pin-hole과 같은 결함에 그다지 민감성을 드러내지 않는다는 것이다.

이러한 필터는 최근에 새로이 개발된 것은 아니나 초전도체에 적용을 한 결과 큰 성과를 올리게 되었다. YBCO 초전도 박막을 이용한 2극 single-patch 필터의 특성은 Curtis와 Fiedziuszko에 의해 밝혀졌는데 이들이 제작한 필터는 일반 금속으로 제작된 필터에 비해 3dB 이상의 좋은 특성을 나타내었으며 그림 7. (b)의 elliptic 기능의 공진기를 이용한 4극 여파기는 그림 8.에서 보여지는 주파수 특성과 같이 4GHz의 중심주파수에서 2%의 3dB Bandwidth와 0.12dB 미만의 삽입손실이 측정되었다.[25-30]

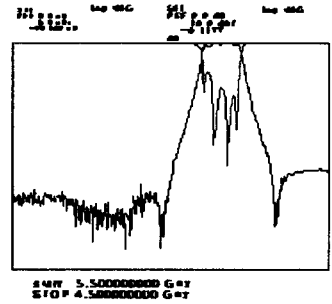


그림 8. elliptic 공진기를 적용한 이중모드 필터의 주파수 응답

## 5. 결론

1990년에 들어서 고온 초전도체를 응용한 소자들이 급진적으로 개발되고 있다. 비단 마이크로파 통신분야만이 아니라 electric power transportation이나 무저항 wire분야에도 실험단계에 들어서고 있는 실정이다. 특히 고온초전도체를 이용한 통신분야에서는 초전도체의 독특한 특성으로 무선통신, 개인휴대통신, 위성통신 등의 소형, 경량화는 물론 가역주파수 대역이 점차적으로 높아가고 있는 실정에서 초전도체의 이용이 입지를 굳히고 있다. 이미 미국에선 개인휴대통신의 기지국에 초전도체를 이용한 필터뱅크가 적용이 되고 있다. 차기 연구개발은 새로운 구조 설계 및 제작을 통해 파워핸들링 능력을 향상시켜 실제 이동통신 및 위성통신 시스템을 대체하기 위한 통신용 초전도 서브시스템의 구성으로 진행되리라 예측된다. 그러나, 이러한 초전도체의 특성 개선과 더불어 연구해야 할 분야는 초전도체의 응용에 없어서는 안될 cryo-cooler의 개발일 것이다. 이러한 초전도체를 사용할 수 있는 여건이 개발되어 저가로 공급이 된다면 머

지 않은 미래에 이동 통신 및 위성통신분야에 매우 큰 파급효과를 미치리라 예측된다.

### References

- [1] Nathan Newman and W.G. Lyons, "High-Temperature Superconducting Microwave Devices: Fundamental Issues in Materials, Physics, and Engineering", *J. Superconductivity*, Vol.6, No.3, pp.119-147, 1993.
- [2] Salvador H. Talisa, et al, "Low-and High-Temperature Superconducting Microwave Filters", *IEEE Trans. Vol. 39, No.9*, 1991.
- [3] Mooshi R. Namordi and A. M. Campero, "Comparison of High-Temperature Superconducting and Metal-Based Resonators", *IEEE Trans. Vol.39, No.9*, 1991
- [4] J.H. Park, Y.S. Jeong, S.Y. Lee, M.K. Choi, I.S. Yang, J.H. Suh, and S.Y. Lee, "Thickness and orientation effect on the surface resistance of YBCO thin films grown by laser ablation", *Proc. of ISEC'97*, Vol.2, pp.43-45, 1997.
- [5] Z.-Y. Shen, C. Wilker, P. Pang, D.W. Face, C.F. Carter III, and C.M. Harrington, "Power handling capability improvement of high-temperature superconducting microwave circuits", *IEEE trans. on Appl. Supercond*, Vol.7, pp.2446-2453
- [6] S.H. Talsia, M.A. Janocko, C. Moskowitz, J. Talvacchio, J.F. Billing, R. Brown, D.C. Buck, C.K. Jones, B.R. McAvoy, G.R. Wagner, and D.H. Watt, "Low-and High-Temperature Superconducting Microwave Filters", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, Vol. 39, pp.1448-1454, 1991.
- [7] C. Wilker, Z-Y Shen, P. Pang, Face, W.L. Holstein, A.L. Matthews, and D.B. Laubacher, "5Ghz High-Temperature-Superconductor Resonators with High Q and Low Power Dependence up to 90K", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, Vol. 39, pp.1462-1466, 1991
- [8] Special issue on satellite communication, *Proc. IEEE*, Vol. 78, pp.1033-1312, 1990.
- [9] J.C. Ritter, M. Nisenoff, G. Price, and S.A. Wilf, *IEEE Trans, Magn. Vol. 27*, 2533, 1991.
- [10] M. Nisenoff, D.U. Gubser, S.A. Wolf, J.C. Ritter, and G. Price, in *Int. Superconducting Electronics Conf. Glasgow, Scotland*, 1991.
- [11] M. Nisenoff, to be published in *Supercond. Sci. Technol.*, Vol. 9, 1996.
- [12] S.Y. Lee, Q.X. Jia, W.A. Anderson and D.T. Shaw, "In situ layer deposition of superconducting  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  thin films on GaAs substrates", *J. Appl. Phys.*, Vol. 70, pp.7170-7172, 1991.
- [13] J.T. Cheung and H. Sankur, "CRC Critical Reviews", *Solid State and Materials Science*, Vol. 15, p.63, 1988.
- [14] L. Wiedeman and H. Helvajian, "Laser photo-deposition of sintered  $YBa_2Cu_3O_{6.8}$ : Ejected species population distributions and initial kinetic energies for the laser ablation wavelengths 351, 238, and 193 nm", *J. Appl. Phys.*, Vol. 70, pp.4513-4523, 1991.
- [15] Walker, C., Z.-Y. Shen, P. Pang, D.W. Face, W.L. Holstein, A.L. Matthews, and D.B. Laubacher, "5GHZ high-temperature-superconductor resonators with high Q and low power dependence up to 90K", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, Vol. MTT-39, 1991, pp. 1462-1467.
- [16] Kuhn, M., M. Klinger, A. Baranyak, and J.H. Hinken, "HTSC inverted and conventional geometry microstrip resonator for UHF frequencies", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. MAG-27, 1991, pp. 2809-2812.
- [17] Hammond, R.B., G.V. Negrete, M.S. Schmidt, M.J. Moskowitz, M.M. Eddy, D.D. Strother, and D.L. Skoglund, "Superconducting Ti-Ca-Ba-Cu-O thin film microstrip resonator and its power handling performance at 77K", *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest*, Vol.2, 1990, pp.867-870.
- [18] Newman, H.S., D.B. Chrisey, J.S. Horwitz, B.D. Weave and M.E. Reeves, "Microwave device using  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  films made by pulsed laser deposition", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. MAG-27, 1991, pp.

- 2540-2543.
- [19] Takemoto, J.H., C.M. Jackson, R. Hu, J.F. Burch, K.P. Daly and R.W. Simon, "Microstrip resonators and filters using high- $T_c$  superconducting thin films on  $LaAlO_3$ ", IEEE Trans. on Magnetics, Vol.MAG-27, 1991, pp.2549-2552
- [20] A. Fathy, D. kalokitis, V. Pendrick, E. Belohoub다, A. Pique and M. Mathur, IEEE, MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., 1277, 1993.
- [21] S.H. Talisa, M.A. Janocko, D.L. Grasssel, J. Talvacchio, P. Lepage, D.C. Buck, R.S. Nye, S.J. Pi and C.R. Wagner, IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.5, No.2, 2079, 1995.
- [22] Zhi-Yuan Shen, "High-temperature superconducting microwave circuits", ISBN 0-89006-656-6, pp. 104-119, 1994.
- [23] S.Y. Lee, K.Y. Kang, and D. Ahn, "Perturbations for dual mode superconducting microstrip resonators fabricated by laser ablation technique". IEEE trans. on Appl. Supercond, Vol.5, pp.2567-2570, 1995.
- [24] S.Y. Lee, K.Y. Kang, J.H. Kim, S.K. Han, "Planar multipole lowpass filters fabricated on laser ablated high  $T_c$  superconducting thin films", Appl. Supercond., Vol.148, pp.1063-1066, 1995.
- [25] Hong J.S. and Lancaster M.J. Bandpass characteristics of new dual-mode microstrip square loop resonators, Electron. Lett., 31(11), 891-2, 1995.
- [26] Hong J.S. and Lancaster J. Microstrip bandpass folter using degenerate modes of a novel meander loop resonator. Accepted for publication in IEEE Microwave and Guided Wave Letters
- [27] Wolff I. Microstrip bandpass filter using degenerate modes of a microstrip ring resonator, Electron. Lett., 8(12), 302-3, 1972
- [28] Curtis A. and Fiedziuszko S.J. Miniature dual mode microstrip filters, IEEE MTT-S Int. Mictowave Symp. Digest, 2, 443-6, 1991
- [29] Curtis A. and Fiedziuszko S. J. Dual mode microstrip filters, Appl. Microwave, pp.83-6, Autumn, 1991
- [30] Karacaoglu U., Robertson I. D. and Guglielmi M. An improved dual-mode microstrip ring resonator filter with simple geometry, European MicroWave Conf., pp. 472-7, 1994
- [31] Mansour R.R., Dokas V., Thomson G., Tang W.-C. and Kudsia C.M.A C-band superconductive input multiplexer for communication satellites, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 42(12), 2472-9, 1994.
- [32] Shen Z.-Y. and Wilker, C. Raising the power handling capacity of HTS circuits, Microwaves and RF, April, 1994
- [33] Kogami Y. et al, Low loss bandpass filter using dielectric rod resonator orientated axially in a high- $T_c$  superconducting cylinder, IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest, pp.1345-8, 1991

< 이상렬 위원 >