

고온초전도 마이크로파 소자의 응용



석중현

삼성종합기술원 전자재료팀

1. 서 론

저온초전도체는 Hg, Pb, Nb 등 순물질로서 Meissner 효과(온도 hysteresis에 무관하게 perfect diamagnetism을 보임)를 보이는 type-I 초전도체이다. 이는 임계온도가 10 K 이내로 액체헬륨 냉각 시스템 및 운영비가 높아 응용에 대한 거부감이 강하다. 그러나 틈새분야(군사용, 천문관찰, 의료용, 핵융합, 디지털 소자 등) 응용은 계속 진행되고 있다. 1986년 Cu-oxide인 고온초전도체가 발견된 이후 고온초전도체에 대한 응용연구는 마이크로웨이브 통신소자 제작을 포함하는 정보통신 분야, 초전도 양자간섭소자(SQUID)를 이용한 의료분야 및 비파괴 검사(NDE)분야, 그리고 선재 및 bulk(magnet)분야 등에서 고온초전도체 응용을 목표로 광범위하게 이루어지고 있다. 값싼 액체질소 냉매를 이용하여 초전도 현상을 얻는 type-II 초전도체로 구분되며 특히 bulk 응용(magnet 및

power application)에서 high pinning, high Jc(임계전류)연구는 type-I과는 다른 특성을 이용한 것이다. 고온초전도체 응용중 박막을 이용한 소자개발은 초전도체가 기존의 소자들보다도 저 전력 소모, high detection sensitivity, fast switching time, low signal distortion 등의 장점이 있기 때문에 전 세계적으로 활발히 연구되고 있으며 이중에서 고온초전도 박막을 이용한 마이크로파 수동소자 연구는 초전도체의 저 손실과 low distortion의 특성을 이용한 것으로 고온초전도 응용 분야 중 에서 가장 먼저 실용화될 것으로 기대되고 있다. 1993년 미국에서는 고온초전도 마이크로파 소자들을 개별적으로 개발하여 우주에서 위성통신용 소자로 사용하고자 실질적으로 HTSSE-I(High Temperature Superconductivity Space Experiment)을 수행하였고 1997년 HTSSE-II를 수행하여 실제 통신 시스템에서 상용화 가능성이 점검되었다.[1] 이와 관련된 고온초전도 수동소자 및 마이크로파 서브 시스템을 제공한 연구기관들을 표 1에서 보여주고 있다. 근래의 상용화 관점 및 앞으로의 연구개발에서 중요시되고 있는 요소를 살펴보면 다음과 같다. 첫째, 특성이 우수한 소자를 보다 소형 및 경량으로 제작이 가능하다. 비록 초전도소자는 냉각기 결합이 필요하지만 초전도소자 뿐만 아니라 전체 시스템의 성능향상에 필수적으로

이 결합이 이루어져 소형, 고성능의 통신시스템을 개발할 수 있다. 이동 통신은 물론 고정 통신 기지국에서도 소형화가 주요 경쟁력으로 대두되고 소자의 성능 향상으로 고정 통신 기지국 수의 감소에 따른 비용절감이 가능할 것으로 생각되고 있다. 1996년 미국의 SCT, Conductus 등의 venture 기업들은 PCS(Personal Communication Service)용의 수신기 전단에 대한 현장에서의 성능시험까지 실시한 바 있고 최근 1997년에 일본의 마쓰시다, 스미토모와 교세라는 공동으로 장래의 이동시스템 통신기지국의 고성능, 소형화 및 에너지 절약화를 실현하는 통신기지국용 초전도 필터 시스템을 개발하였다. 현재 상용화 단계에 와있는 고온초전도 PCS 통신용 필터뿐 만 아니라 주요 수동소자(delay line, 변위기, 안테나, 공진기, 필터, interconnection line 등)의 개발로 마이크로파 통신시스템의 구성도 앞당겨지게 될 것이다. 둘째, 유전체, 자성체 박막 등과 고온초전도 박막과의 다층막으로 신개념, 신기능의 차별화 된 통신소자개발이 가능하다. 예를 들면 고온초전도/강유전체의 다층막 구조를 갖는 가변(tunable) 마이크로파 소자개발은 1998년 미국의 DARPA project의 일환으로 활발하게 연구되고 있다.[2] 유전체 박막에 전기장을 걸어주어 주파수 및 위상을 가변시키는 고주파 소자개발은 차별화된 성능뿐만 아니

표 1. HTSSE-I(a), II(b) 과제와 관련된 고온초전도 마이크로웨이브 소자

| 연구기관 | Microwave devices |
|-------------------------|--|
| AT&T bell lab. | YBCO ring resonator at 4.74 GHz |
| Dupont | Thallium based ring resonator at 4.9 GHz |
| Ford Aerospace | Dielectric resonator with YBCO thin film |
| General Atomi | Coated cavity at 10 GHz |
| General Electronics | Coplanar YBCO resonator at 4.8 GHz |
| High Tc Super | Bulk YBCO cavity at 10 GHz, power limiter |
| Honeywell | 1X12 linear array YBCO IR bolometer |
| Huges Research Lab. | Six-pole YBCO filter at 9.6 GHz |
| HYPRES, Inc | 2 nanosec. YBCO delay line, 4 GHz wide |
| ICI Composites | Thick film coated YBCO cavity at 5 GHz |
| Locked Space & Missiles | Thallium based thermal isolator |
| MIT Lincoln Lab. | Six-pole 300 MHz bandwidth filter at 4.7 GHz |
| David Sarnoff Reseach | 4-pole YBCO 50 MHz B.W. filter at 9.3 GHz |
| Superconducting Tech. | Thallium based ring resonator at 4.9 GHz |
| TRW | YBCO end-coupled resonator at 10.4 GHz |
| Westinghouse | 4-pole YBCO edge-coupled filter at 9.4 GHz |
| Naval Research Lab. | 5-pole edge-coupled YBCO filter at 9.1 GHz |
| JPL | YBCO low pass filter at 9.7 GHz |
| Univ. of Wuppertal | YBCO patch antenna resonator at 5 GHz |

| 연구기관 | 수동소자 | 소자spec 및 특성 |
|-----------------|----------------------------------|--|
| ComDev | Microwave Frequency Channelizers | - Microstrip Channelized 1. Four Channel: 120 MHz wide 2. Four pole design 3. Thin film coupler |
| Westinghouse | Delay lines | - Delay line Characteristics 1. 2-6 GHz bandwidth 2. 40 nsec delay line 3. 1-3 dB insertion loss 4. small size |
| NRL | Channelized Receiver | - Hybrid 9 GHz channelized receiver with MMIC mixer |
| JPL/Lewis RC | Low noise receiver | -Low-noise HTS/GaAs Downconverter 7 → 1 GHz |
| TRW | Digital Multiplexer | - Logic using HTS SQUID |
| MIT/Lincoln lab | Wideband Cueing Receiver | - Receiver incorporates 1. Tapped delay line 2. HTS chirp filters |

라 소형 및 경제적 측면에서 경쟁력이 있는 연구분야이다. 현재 반도체 varactor 다이오드가 가변 소자로서 널리 쓰이고 있으나 빠른 switching time(수 ns)과 저전력 control, 저손실의 tunable microwave device(tunable filter, tunable phase shifter 등)개발은 매력적이라 할 수 있다. 또한 기존의 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuits)반도체 기술을 이용한 능동소자로서 현재 2.4 GHz와 19 GHz 대 향후 최대 155 Mbps급의 디지털 신호를 전송하기 위한 60 GHz 대의 무선 LAN 시스템의 수신기 모듈에 사용되는 p-HEMT based LNA (Low Noise Amplifier)와 송신기 모듈에 사용되는 HBT based PA(Power Amplifier) 등과 hybrid-MIC 기술로 시스템개발에 응용을 기대해 볼 수 있다. 장래의 고주파 응용시장에서 widgap 반도체를 이용한 power device의 기술동향 또한 초전도 기술과의 접목이란 관점에서 중요성을 가진다. 주파수가 30 GHz 이상(파장 1 cm 이하)의 밀리미터파 응용기술은 아직 일반 상용화의 단계에는 이르지 못하였지만 고속 무선 LAN, 자동차 충돌방지 레이더 시스템 및 핵심 군사용 기술로서 이미 사용 중이고 초전도체를 이용한 밀리미터파 소자의 제작은 이러한 소자제작에 필요한 기술의 첨단성과 기존 사용 주파수대역에서의 정보처리량이 포화상태에 이르게 될 미래사회에서의 필요성 등으로 인해 선진각국의 전략적인 연구분야로 지정되어 있는 분야이다.

2. 통신기저국용 고온초전도 필터 시스템 개발

미세선 고온초전도 필터의 경우 PCS, IMT-2000 및 위성통신 주파수 대역에서 기존의 유전체 필터나 SAW 필터에 비해 매우 작은 삽입손실(insertion loss)을 보이고 통과대역이 작고 동시에 우수한 out-band 특성을 지닌 소형의 고온초전도 필터 제작이 가능하다. 이는 그림 1에서 보는 바와 같이 100 GHz 주파수 대역까지 metal에 비해 표면저항이 현저히 작음을 이용한 것이다.[3] 현재 위성통신에서 요구되는 high-Q ($\sim 10^4$), 3% 미만의 bandwidth를 만족하는 dielectric-loaded cavity 필터가 사용되고 있는데 소자의 크기가 고온초전도 필터에 비해 약 100배정도 커 필터뱅크 시스템의 크기와 질량에 있어서 고온초전도 필터를 사용한 필터뱅크 시스템 개발로 대체가 가능하다. 이에 대한 요소기술을 살펴보면 다음과 같다.[4]

2-1. 고온초전도 $YBa_2Cu_3O_y$ 박막 제작

고온초전도체를 전자소자로 응용하기 위해서는 박막제작이 필수적인데 최근들어 Excimer Laser를 에너지원으로 하여 양질의 초전도 박막을 제작하는 것이 가장 보편화되어 있다. Pulsed Laser Deposition(PLD)법은 강한 에너지의 레이저를 사용하기 때문에 증착속도가 빠를 뿐만 아니라 박막의 조성을 용이하게 제어할 수 있다. 더욱이 거의 모든 물질을 박막화할 수 있기 때문에 고온초전도체 뿐만 아니라 금속산화물(유전체, 자성체 등), 반도체 등의 여러 가지 물질을 다층박막으로 제작하는 것이 가능하여 초전도 전자소

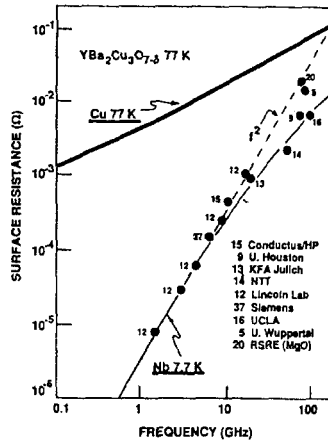


그림 1. 여러 연구기관에서 77K에서 측정된 YBCO박막의 표면저항 값과 77K에서 Cu 박막의 표면저항 값, 그리고 7.7K에서 Nb 박막의 표면저항 값을 서로 비교할 수 있다.[3]

자 제작이 매우 유리하다. 그러나 PLD법의 가장 큰 약점인 박막표면 morphology와 대면적화에 있어서는 아직도 완벽하지는 않다. PLD용 chamber와 전체시스템 구조는 그림 2에서 보여준다. Lambda Physik사의 KrF excimer laser(LPX305iF)의 규격은 파장이 248 nm, 펄스 에너지가 1,200 mJ max. 최대출력은 50 W이고 고순도의 Krypton, 3% F_2/He balance, Neon 개스를 사용한다. PLD법을 이용하여 YBCO 박막을 제작하는 경우 주요 변수들의 변화에 따른 박막 특성변화를 관찰함으로써 최적공정변수를 도출한다. L-band의 필터를 제작 및 향후 hybrid-MIC를 하기 위해서는 적어도 직경 3 inch 이상의 양면 박막이 필요한데 이를 위해서 기판이 놓이는 히터의 구조 및 플룸(plume)과의 상대적 위치가

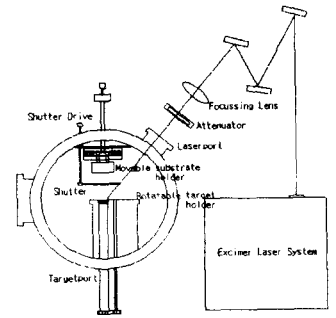


그림 2. Pulsed Laser Deposition 시스템의 개략도

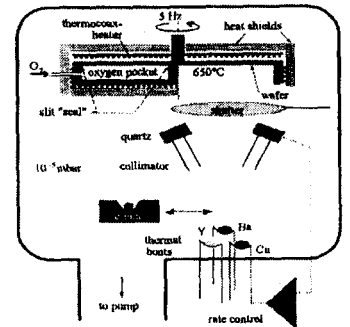


그림 3. Thermal Reactive Coevaporation 시스템의 개략도

매우 중요하다. 1997년 독일의 문헨 그룹에서 직경 8 inch 사파이어기판 양면에 고품질의 YBCO 박막을 성장시킬 수 있는 thermal reactive coevaporation 시스템을 개발하여 시판하기 시작했다. 이 시스템은 그림 3에서 보는 바와 같이 고진공하에서 적당하게 oxidation해 줄 수 있는 oxygen pocket을 갖고 700°C 까지 열적 안정을 갖는 rotating disk substrate heater가 가장 중요한 핵심이라 하겠다. 상기 각각의 방법으로 독일(Coevap.)과 일본(Off-axis PLD)에서 $LaAlO_3$ 기판에 제작한 양면 YBCO 박막의 특

성은 inch당 2% 이내의 두께 균일성을 보이며 임계온도 86 K 이상, 77 K에서 임계전류밀도 2.5×10^6 A/cm² 이상의 균일한 값을 양면에서 보인다.

2-2. 마이크로파 필터 설계

고온초전도 필터개발은 여러 종류의 형태가 있지만 가장 많이 연구되고 있는 것은 사용된 주파수의 $\lambda/4$ 정도의 길이와 50 Ω 임피던스의 특성을 갖고있는 공진기가 평행으로 구성된 평행 결합선 방식의 대역통과 필터이다. 대역통과 필터를 설계하기 위해 먼저 저역통과 필터의 프로토타입 값을 이용하거나 실제 구현할 수 있는 공진기의 L, C 값과 결합 커패시턴스를 이용하여 얻을 수 있고 Supercompact, EEsof과 같은 회로 simulation 소프트웨어를 이용하여 근사적으로 고온초전도 마이크로스트립 구조를 설계할 수 있다. 그리고 HFSS, Momentum 소프트웨어를 이용한 2~3차원 전자기장 해석을 통해 패키징을 포함한 소자설계도 벌크형태의 소자(예, 유전체 필터 듀플렉서)에 더욱 중요한 부분이라 할 수 있다. 그림 4(a)에서 2 GHz의 중심주파수와 0.7%의 통과대역을 지니도록 설계된 5-pole 미세선 interdigital 필터의 layout을 보여주고 있는데 필터 내의 공진기는 10 Ω 의 특성 임피던스를 지니고 tapped input 및 output line은 50 Ω 의 특성 임피던스를 지니고 있다. 그림 4(b)는 60 K에서 주파수 응답도를 보여주고 있는데 중심주파수 2 GHz, 삽입손실은 약 0.2 dB, ripple의 크기는 약 0.3 dB 정도이며 신호의 크기가 36 dBm(~ 4 Watt)까지는 거의 변화가 없음을 보여준다. 필터의 out-band 특성을 개선시키고자 할 경우에는 pole수를 증가하게

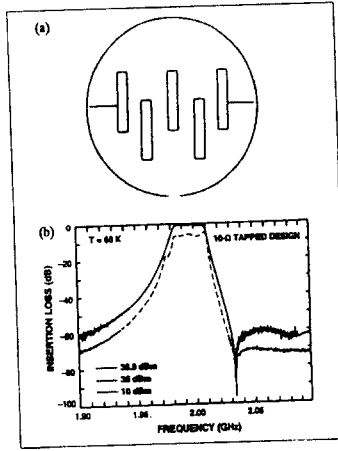


그림 4. PCS 기지국용(~ 2 GHz)의 5-pole 미세선 필터에 대한 개략도(a)와 YBCO 박막을 이용하여 제작된 필터의 60 K에서 주파수 응답도(b)

되는데 이 경우 삽입손실의 크기 도 같이 증가하게 된다. 고온초전도체가 우수한 필터의 제작에 적합하다고 함은 out-band 특성을 개선하고자 pole수를 늘리더라도 삽입손실의 크기가 여전히 작은 값을 지니게 되기 때문이다. 고온초전도재료는 임계 전류밀도 이상의 전류를 흘리면 마이크로파 신호에 저항이 커지기 때문에 손실의 증가, 주파수 변동 및 신호의 비뚤어짐이 생긴다. 고온초전도 필터를 송신시스템용 필터로 사용할 경우 고온초전도 필터는 큰 power를 지닌 고주파 신호에 대한 처리능력을 지녀야 한다. 이러한 목적을 위하여 고온초전도 박막의 특성을 극대화시킬 수 있는 disc 형태의 설계를 이용한 필터 제작기술이 연구되고 있는데 이는 disc 형태를 사용할 경우 단순한 미세선 형태의 설계를 이용할 경우 관측되는 미세선 가장자리에서의 전류밀도의 급격한 증가가 나타나지 않기 때문이다. 현재 이러

한 disc 형태를 이용하여 3.4 GHz ~ 4.2 GHz 대역에서 60 Watt의 처리가 가능한 4-pole 필터를 제작할 수 있는 것으로 알려져 있고 이러한 정도의 특성은 PCS 주파수 대역에서 송신용 필터로 처리해야 하는 power의 최대치인 약 100 Watt 정도 크기를 구현할 수 있는 값이다.[5] 결국 같은 특성을 갖으며 소형이며 큰 power를 전송할 수 있는 소자설계가 계속 이루어질 것이다.

2-3. 냉각기술

송신신호의 큰 power를 도모하면 전기저항의 증대에 의해 Joule 열이 발생하기 때문에 냉동기에 의해 냉각해야 함으로 냉동기의 크기 때문에 필터뱅크의 소형화에 걸림돌이 되었다. 고온초전도 박막을 효율적으로 초전도 임계온도 이하로 냉각하기 위해 열전도성 재료와 열전도 구조의 최적화를 이루어야 한다. 이를 통해 소형냉동기를 사용해 Joule열을 효율적으로 냉각하고 필터 시스템을 소형화하며 초전도박막의 온도상승을 저지한다. 초전도 필터에 사용되는 고주파(~ 2.3 GHz), 대전력 신호(~ 25 W)용 모듈에서 고효율 냉각설계를 하기 위해서 발열분포 해석을 하는데 그 내용을 보면 진공에서 온도분포측정, 극저온에서 발열분포 해석, 외부 열유입에 의한 온도분포 해석, 그리고 고주파, 대전력에서 온도분포 측정 등이다. 일본 통산성 연구 프로젝트로 개발한 통신기지국용 초전도 필터 시스템은 소형의 고성능 냉각기와 냉각열 설계 기술을 통해 그 크기가 $53 \times 60 \times 25$ (cm³)로 소형화하였다. 이 필터 시스템을 기지국에 이용할 경우 필터에 입력되는 송신신호 전력손실이 적어 같은 값의 전력신호를 송신하기 위한 증폭기가 상당히 작고 냉동기의 소

비전력을 포함해도 기지국 시스템이 저소비전력으로 동작할 수 있다. 예컨대 기지국 신호 총출력이 500 W이고 통신지역이 2 km 경우, 종래 방식으로는 송신신호 필터 손실에 의한 전력손실이 40%, 증폭기 효율이 20%이기 때문에 송신부소비전력은 약 4.2 kW가 된다. 초전도 필터를 사용하면 필터에 의한 전력손실이 1% 이하, 증폭기 효율이 40% 이상으로 송신부 소비전력은 약 1.3 kW 이하가 된다. 기지국이 10,000개 있다면 연간 에너지 절약효과는 2억5천만 kWh/yr 로 원유 60,000톤에 해당되는 양이다. 참고로 77 K에서 사용할 경우 냉동기의 소비전력은 약 200 W 정도 되지만 종래 방식의 필터에서의 전력손실이나 또는 여러 증폭기에서 발생한 열을 냉각시키기 위한 공냉 fan 작동 정도의 전력을 소비하는 것으로 견적된다. 통신기지국에서 송신부의 고성능 저손실화에 의해 시스템의 소형화, 에너지 절약화가 가능해져 이동통신 기기의 경량화, 신뢰성의 향상이 가능하게 되었고 최근 통신사업자의 협력을 얻어 신뢰성 검토나 통신시스템에서의 필드 테스트 등을 실시하면서 실용화검토 단계에 와 있다.

3. 맺 음 말

전 세계적으로 여러 연구기관에

서 진행되고 있는 고온초전도 마이크로웨이브 소자들의 연구개발은 물리적 관점에서 볼 때 고온초전도체가 같은 주파수 및 같은 작동온도에서 표면저항이 매우 작고 주파수에 무관한 침투깊이의 특성이 있어 작은 규모로 고효율의 소자를 개발할 수 있다는데서 비롯되었다. 고온초전도체가 현재 사용되고 있는 물질들과 다른 물리적 특성을 가지고 있으므로 먼저 고온초전도체의 물리적 특성을 연구하는 것이 필요하며 새로운 개념의 고온초전도 소자설계기술과 고온초전도 박막의 대면적 및 양면박막 증착이 필요하다. 또한 실질적인 응용 면에서 당면한 문제는 고온초전도 소자들을 작동시키기 위한 저온 시스템개발이다. 초전도 기술의 발전과 실용화를 위해서는 꾸준히 기초기술을 확립하면서 초전도 자체만의 분야(MRI, high-field magnet, wire 등)에서 실적을 쌓고 신뢰성이나 경제성을 확립하는 것이 중요하다. 이와 병행하여 목적을 같이하는 주요 technology와의 결합으로 대형기나 시스템 개발을 추진해야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 삼성종합기술원, 고온초전도 마이크로웨이브소자 개발, 최종 보고서, pp.2-4, April,

1997

2. Jeffrey Pond and Charles Jackson, Technologies for Tunable Microwave Systems, 1998 IEEE MTT-S International Microwave Symposium & Exhibition, June, 1998
3. G. C. Liang, D. Zhang, C. F. Shih, M. E. Johansson, R. S. Withers, A. C. Anderson and D. E. Oates, "High-power high-temperature superconducting microstrip filters for cellular base-station applications", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 5(2), pp.2652-2655 1995
4. N. Newman and W. G. Lyons, High Temperature Superconducting Microwave Devices: Fundamental Issues in Materials, Physics, and Engineering, Journal of Superconductivity, Vol.6, No. 3, pp.119-160, 1993
5. 이상영, 고온초전도 마이크로파소자 제작 및 응용, 요업기술, Vol.12, No.5, pp.340-349, 1997

< 이상렬 위원 >