

초전도 마이크로웨이브 전자소자 기술



홍진표
한양대학교 물리학과 조교수



김재욱
자연과학대학 물리학과 교수

1. 서론

초전도체 박막을 이용한 전자 소자는 초전도체 박막의 저 전력, 저 왜곡, 저 손실 등의 장점을 이용하는 것으로서, 크게 마이크로웨이브 영역에서 사용 가능한 위성통신용 소자, high detection sensitivity, fast switching 속도, 감지, 고중폭의 장점을 이용한 초고주파용 소자 (10~200 GHz 영역), 작은 전력

을 소모하며 작동속도는 수백 GHz까지 가능한 디지털 소자들로 구분할 수 있다. 이 중에서 특히 마이크로웨이브 영역에서 박막을 이용한 수동소자(passive device) 연구는 초전도체의 저손실, 저 왜곡의 특성을 응용하는 것으로 전자소자 응용 분야 중에서 가장 먼저 실용화될 것으로 기대되고 있다. 이는 현재 광학 분야에서 활발히 연구되고 있는 optical fiber network 시스템이 근본적으로 고정된 base-station이나 터미널들 간의 통신용 시스템이라면 마이크로 웨이브 통신 시스템은 cellular 시스템과 같은 mobile 통신시스템에서 많이 사용될 수 있는 분야이기 때문이다.

현재 통신 분야의 응용으로 초전도체는 필터 및 필터뱅크, 결합기(coupler), multiplexer, duplexer, circulator, 공진기, 믹서, 증폭기, 안테나 등이 개발되고 있으며, 최근에는 고온초전도체와 다른 물체를 이용한 가변소자들이 각광을 받고 있고 궁극적으로는 이러한 소자들을 초전도체 박막의 한 chip에 제작하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 그림 1은 한 칩에 여러 종류의 초전도를 제작한 front-receiver를 보여주고 있으며, 그림 2는 마이크로웨이브 소자 및 패키지를 보여주고 있다. 특히 필터 분야는 전 세계적으로 가장 많이 연구되고

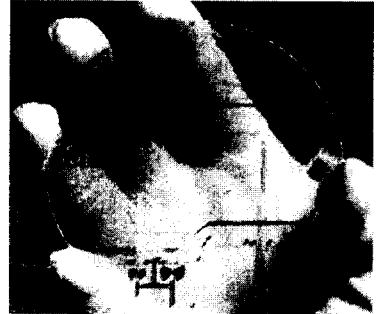


그림 1. 한 칩에 여러 종류의 초전도를 제작한 front-receiver.

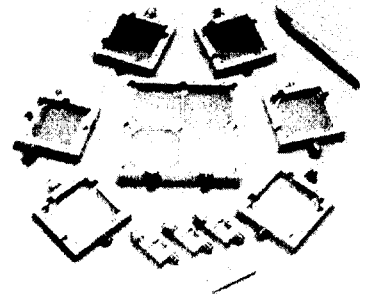


그림 2. 초전도 고주파용 마이크로웨이브 소자 및 패키지

있는데 이는 차후 대용량 통신 주파수 분할에 따른 협대역 필터, 적절한 주파수 사용을 위한 가변 밴드 패스 필터, 저 가격 저 손실 저 전압 필터, 유전체 및 자성체와 같은 화합물과의 복합 특성화된 필터가 요구되고 있기 때문이다. 그러므로 앞으로 이들 연구들의 성과들은 차세대

정보통신 사회의 전개시 대용량의 데이터를 초고속으로 전송 및 처리하는 기술에 중요한 부분을 차지할 것으로 예상된다. 따라서 본 고에선 현재 가장 활발히 연구되고 있는 초전도 마이크로웨이브 소자들을 중심 서술하고자 한다.

2. 마이크로웨이브 소자

2-1: 초전도체 응용의 기반 기술: 초전도 박막, 기판 및 설계

초전도 박막을 이용하여 마이크로웨이브 소자 개발시 고려해야 할 사항은 우수한 박막 제작 기술, 적절한 기판선택, 설계기술의 확보 등이다. 현재 박막증착은 3-inch 크기의 양면증착이 가능한 off-axis laser ablation법, co-sputtering법, 그리고 최근에는 독일의 Kinder 그룹이 양면 8-inch 박막을 제작한 동시증착법이 각광을 받고 있다. 이 중에서 laser ablation법은 크기에 제한이 있지만 쉽게 증착할 수 있는 장점이 있고, 동시증착법은 현재 개발된 박막증착 기술중에서 대면적 박막을 제작할 수 있

는 우수한 기술로 판단되고 있다¹¹⁾.

기판의 선택에서는 기판의 격자상수, thermal stress나 cracking의 영향, 박막과 기판의 열팽창 계수(thermal expansion), 초전도 박막과 화학적 기계적, 물리적등을 고려하여 유전율이 10정도인 MgO와 25정도인 LaAlO₃ 기판이 많이 사용되고 있으나. 최근에는 열전도성이 우수하고, 가격이 뛰어난 사파이어 기판이 많이 사용되고 있다. 이 기판을 사용시에는 격자 상수를 고려하여 CeO₂ 박막을 buffer 층으로 사용함에도 불구하고 loss tangent가 작으므로 매우 우수한 마이크로웨이브 소자들이 개발되고 있다. 표 1은 현재 초전도체를 마이크로웨이브 소자 제작시 많이 사용되고 있는 기판의 종류 및 특성을 보여주고 있다.

마이크로웨이브 소자 개발시 중요한 부분 중의 하나는 소자 설계 기술인데, 지금까지는 기존의 금속 특성을 이용한 상업용 마이크로 웨이브 소자 프로그램 등이 이용되었다. 대표적인 시뮬레이션 기구로서는 EESOF, Touchstone, Supercompact,

Momentum method법 등이 있지만 궁극적으로는 정확한 설계 및 시뮬레이션을 위해서 초전도체의 특성을 첨가한 새로운 설계기술이 개발되어 한다.

2-1. 초전도 필터

일반적으로 대 영역 통신 시스템등에서 사용되는 필터들은 전 밴드 폭을 한번에 사용하지 않고 협대역 폭으로 분리하여 필요로 하는 신호들만 선택하고 다른 주파수 영역의 신호들은 조절하는 필터뱅크를 형성하여 사용한다. 그러나 현재 위성통신등에서 사용하고 있는 cavity-형태의 필터들은 규모가 매우 크며, 삽입손실이 매우 크기 때문에 정확하고 명확한 신호의 전달에 문제가 크다. 따라서 위성통신 시스템에서 초전도체 필터 응용은 주파수 영역에서 고 효율의 채널 수를 크게 증가시킬 수 있으며, 특히 현재 이용되고 있는 위성통신 시스템 중량의 70%정도를 줄일 수 있을 것으로 예측되고 있다. 또한 고주파 영역에서 기존의 필터들보다 매우 많은 장점을 가지고 있다. 초전도 필터 개발의 성과는 궁극적으로는 각 초전도 개별

표 1. 초전도 기판들 비교:

재질	구조	격자상수	열팽창계수 (X10 ⁻⁶ /K)	유전율	기판크기(mm)
CeO ₂ -buffered r-cut sapphire	?	a=4.25Å	?	21.2	∅=100
LaAlO ₃	Rhombohedral/ Perovskite	a=3.29Å	10	25/16	∅=100
MgO	Rock Salt	a=4.21Å	13.8	9.9-10	∅=50
α-Al ₂ O ₃	Hexagonal	a=4.76Å		9	∅=100
LaGaO ₃	Orthogonal P	a=5.52Å	10.6	25	∅=50
NdGaO ₃		a=5.52Å	?	23	?

소자들과 이들 소자 들로 구성된 고온초전도 서브시스템을 통신용 기지국에 직접적으로 사용할 수 있을 것이다. 이는 차후 마이크로 웨이브 영역에서 작동하는 전자소자의 수요의 증가, 소형화에 따른 큰 에너지 손실을 해결할 수 있을 것으로 기대된다. 현재 초전도체를 이용한 필터 개발은 전 세계적으로 활발히 연구되고 있으나 그 중에서도 가장 대표적인 국가는 미국이다. 미국의 conductus사와 STI회사는 고출력의 890MHz 급과 2-3GHz급의 필터 및 필터뱅크를 개발하여 저온 시스템과 함께 필드시험을 하고 있으며, Ameritech 통신회사에서는 그 동안 제작된 초전도 필터들을 상용화하기 위하여 4곳의 기지국에 설치하기로 결정하였다. 또한 캐나다 ISTC (Industry Science and Technology Canada)에서는 Chebyshev와 quasi-elliptic 기능을 가지고 있는 dual mode 형태의 필터를 개발하였고, 특히 STI에서는 광학적으로 조절이 가능한 기본의 밴드제거 필터를 선보였다. Westing house에서 개발한 4-채널 필터뱅크를 개발하였으며, 또한 최근에는 이러한 필터 뱅크를 이용한 multiplexer와 duplexer가 연구되고 있다. 이러한 연구결과를 바탕으로 최근에는 초전도 필터 및 필터뱅크의 상용화를 목표로 대면적 박막(3 inch)에 복합 integration하는 추세로 응용 영역을 넓히고 있으며, DARPA 프로젝트 일환으로 초전도와 더불어 유전체 박막의 저손실, 고 가변성, 빠른 스위칭 시간으로 특성화된 통신 소자들을 개발하고 있다. 이의 프로젝

트의 대표적인 목표는 가변 필터 및 electronic scanning antennas (ESA)시스템 개발이다.

현재 가변 필터 개발은 중심 주파수를 변화시켜는 방향으로 연구되고 있는데 크게 두 가지 방법으로 구분되어 연구되고 있다. 첫 번째는 필터의 캐퍼시턴스를 변화시킴으로써 가변시키는 것으로, 이 방법은 주로 강유전체 박막을 이용한다. 이는 일반적으로 강유전체의 유전율이 바이어스 전압의 증감에 따라 변화하기 때문이다. 강유전체를 가변재료로 사용하기 위해서는 물질이 초전도체와 격자상수 매칭이 잘 이루어져 다층 막 증착하기 쉽고, 작은 바이어스 전압에서도 유전율의 변화가 크게 일어나 넓은 영역의 가변이 가능하며, 응답시간이 빠르고, 마이크로웨이브 영역에서 loss tangent 값이 매우 작아 손실이 작아야한다. 그림 3은 CPW(Coplanar Wave Guide)구조로 제작된 전형적인 초전도 가변 필터.

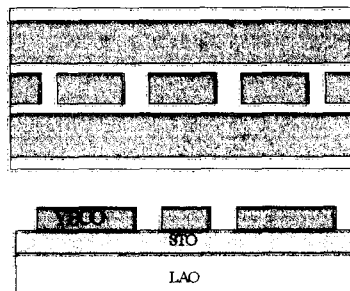


그림 3. Coplanar Wave Guide 구조로 제작된 전형적인 초전도 가변 필터.

이 구조는 강유전체 재료로서 STO를 사용하였으며, LAO기판 위에 STO증착하고 in-situro

YBCO를 증착하여 3-pole을 갖는 필터를 제작하였다. 필터의 특성으로는 77K에서 바이어스 전압 (0V ~ 125V) 변화시켰을 때 밴드 폭이 2 %이었고, adaptive 영역은 15 %정도였다 (중심주파수 : 2.5GHz, 삽입손실: 3dB).

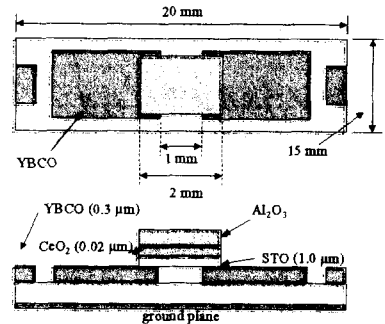


그림 4. 다른 형태의 2-pole 초전도 가변 필터.

그림 4는 다른 형태의 2-pole 필터로서 LAO 기판에 증착된 초전도체 표면 위에 새도우 마스크를 사용하여 STO 박막을 증착한 것으로서 공진기 갭 양단에 바이어스 전압을 가함으로써 가변하는 방법이다. 이 구조에서는 필터의 가변특성을 알아보기 위해서 결합갭의 온도와 바이어스 전압 변화에 따른 캐퍼시턴스 변화를 측정하였다.

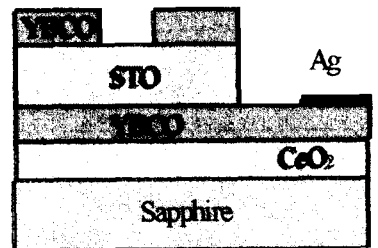


그림 5. YBCO/STO/YBCO 구조제작된 초전도 가변 필터.

그림 5 YBCO/STO의 다층구조를 이루고 있는 것으로 위면과 아래면 전극을 모두 초전도체인 YBCO로 제작하였고 YBCO/STO/YBCO 구조나 YBCO/KTO/YBCO의 3층막으로 구성되어 있다. 이 구조는 그림 3에서 언급한 것과 같이 기판으로 사파이어를 사용하고 완충층으로 CeO₂를 사용하였다. 가변을 위한 두 번째 방법으로 그림 6과 같이 조절선을 이용하여 초전도체의 운동 인덕턴스(kinetic inductance)를 변화시키는 것이다. 이 방법은 앞의 방법과 마찬가지로 전기적 가변이기 때문에 가변이 간편한 것 같지만 조절선을 가열하여 운동 인덕턴스를 변화시키는 것이기 때문에 전극 전체에 대한 균일한 열적가열이 어렵다는 점과 일정한 온도까지 가열되고 냉각되는 시간이 필요하기 때문에 응답시간이 느리다는 단점이 있다³⁻⁷⁾.

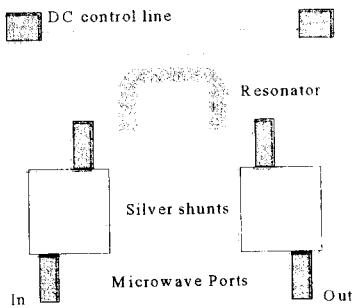


그림 6. 초전도체의 kinetic inductance를 변화시키는 가변필터.

지금까지 언급한 초전도체 필터 개발은 양질의 대면적 증착기술, 고주파 소자 설계 및 시뮬레이션 기술, 소자 제작 공정 기술,

저온 패키지 설계 및 제작 기술, 고주파 특성 측정 평가 및 passivation 기술등의 관련 기술의 저변 확대에 큰 역할을 할 수 있을 것이다. 특히 정보통신 산업의 비약적 발전이 예상되는 시점에 특성화된 마이크로파 소자 개발은 차후 복합응용이 부각되어 고성능, 저 전력 소모, 통신기 지국에서의 송수신부 고성능, 저 손실화에 의한 송수신 system의 소형화, 에너지 절약화에 기여할 것으로 기대된다¹²⁻¹⁰⁾.

2-3. 초전도 multiplexer 와 duplexer:

무선을 이용한 위성 통신시스템들의 급격한 개발은 가용 주파수 대역을 높이고 기존의 주파수를 신호외곽 없이 보낼 수 있는 많은 수의 채널링과 소형화 및 경량화 등을 요구하고 있다. 이러한 필요성에 비례해서 초전도 마이크로웨이브 소자 및 이를 이용한 초전도 서브시스템들이 연구되고 있는데 그 중에서 가장 대표적인 것이 현재 안테나를 통하여 입력된 신호들을 원하는 주파수 별로 구분하거나 결합시켜 출력시키는 duplexer 및 multiplexer 등이 있다. duplexer 및 multiplexer는 여러 개의 하이브리드 결합기와 원하는 채널 수만큼의 밴드패스 필터들로 구성되어 있다. 이 소자는 일반적으로 두개의 하이브리드 결합기와 3개의 밴드패스 필터로 구성되어 있는 구조를 많이 연구하고 있다¹¹⁻¹⁶⁾.

2-4 초전도 공진기 및 발전기

초전도 공진기의 개발 및 발전기 응용기술은 초전도체 마이크로

로웨이브 응용분야 중에서 가장 먼저 연구되어 온 분야인데, 이는 공진기 구조를 이용하여 고주파영역에서 초전도체의 표면저항과 침투깊이의 측정이 가능했기 때문이다. 현재까지 초전도체 공진기는 구조적으로 라인, meander line, 링, dual-mode 형태가 연구되어 왔으며, 부분적으로 이를 이용한 발전기가 응용되었다. 발전기의 응용은 위상잡음으로 나타나는 안정성을 매우 향상시킬 수 있을 것으로 예상하고 있기 때문이며, 현재 미국의 Jet Propulsion Laboratory에서는 고온초전도 공진기와 반도체 MESFET로 구성된 발전기를 연구하고 있다. 그림 7은 전형적인 발전기의 모습을 보여주고 있다¹⁷⁾.

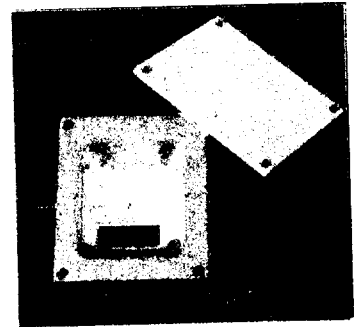


그림 7. 전형적인 초전도 발전기

2-5: 초전도 phase antenna 와 phase shifter

차세대 고주파 영역에서 요구되는 레이다 시스템은 위상 어레이 안테나 시스템과 고주파, 고효율의 위상 shifter의 개발을 요구하고 있다. 기존의 금속으로 제작된 안테나 시스템에서는 안테나들의 손실저항이 안테나의 방사저항보다 크기 때문에 비효율적인 결합이 되며 특히 고주파

영역에서 전기적 손실에 기인한 손실저항이 매우 크므로 고주파용 안테나의 제작이 용이치 않은 것으로 알려져 있다. 따라서 초전도체를 안테나 시스템에 응용하면 고 방사효율을 갖는 작은 규모의 안테나 제작이 가능할 것으로 예측되고 있으므로, 현재는 patch안테나의 일종으로서 slot loaded patch, slot-fed patch antenna 및 부분적인 안테나 어레이가 60 GHz 영역에서 사용하고자 연구되고 있다. 기존의 위상 shifter에서는 지연 (delay) 라인의 위상, pin-diode, MESFET, MISFET 등의 반도체 switching 소자들이 이용되고 있으나, 고주파영역에서의 고효율 및 fast switching 를 위해서는 삽입손실을 줄일 수 있는 새로운 shifter 를 요구되고 있는데 대표적인 것이 초전도체를 이용한 shifter가 부분적으로 연구되고 있다. 그림 8은 전형적인 초전도 위상 shifter 이다¹⁸⁻²⁴⁾.

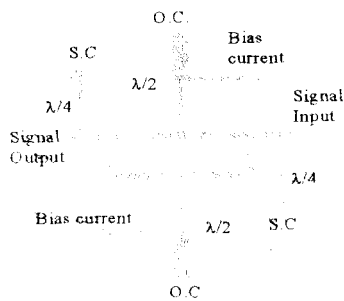


그림 8. 전형적인 초전도 위상 shifter.

3. 결 론

전 세계적으로 무선을 이용한 통신시스템 개발되고 발전됨에 따라 가역주파수 대역이 점차 높

아가고 있기 때문에 고성능 소자의 개발은 필수적이며, 이에 따라서 초고주파 영역에서의 무선 통신 핵심 기술과 차세대 개인휴대 통신 시스템이나 위성통신 시스템에서 초전도체를 이용한 소형, 경량화한 수동소자들은 초전도 응용분야 중 가장 먼저 실용화될 것으로 기대되고 있다. 또한 초전도체의 독특한 특성과 다른 재료들과의 복합시스템의 출현은 새로운 개념의 소자출현과 함께 고주파 영역에서 매우 유용할 것이다. 특히 초전도체를 이용한 고 효율의 필터 및 필터뱅크, multiplexer, duplexe, front-end receiver등이 가까운 시간 내에 실현될 것으로 기대됨으로 이에 대한 대응책이 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. B. Utz, et al., IEEE Trans. on Appl. Sup. 7, 1272 (1997).
2. P. Pramanick, International J. Microwave Millimeter-Wave Computer-Aided Engin., Vol. 4, pp. 272-281 (1994).
3. Yu. A. Boikov, T. Claeson, D. Erts, F. Bridges, and Z. Kvitky, Phys.rev. B. 56, 11312 91997).
4. A.G. Zaitsev, G.Ockenfuss, D. Guggi, R. Wordenwedber, and U. Kruger, J. Appl. Sup. 8, 3069 (1997).
5. A. galt, J.C. price, J.A. Beall, and R.H. Ono, Appl. Phys. Lett., 63, 3078 (1993)
6. M.R. Rao, Appl. Phys. Lett., 70, 3032 (1997).

7. A.T. Findikoglu, Q.X. Jia, and X.D. Wu, Appl. Phys. Lett., 68, 1651 (1996).
8. B.A. Williemsen, T. Dahm and D.J. Scalapino, Appl. Phys. Lett., 71, 3898 (1997)
9. A. Fathy, D. kalokitis, V. Pendrick, E. Belohoubek, A. Pique, and M. Mathur, IEEE, MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., 1277 (1993).
10. S.H. Talisa, M.A. Janocko, D.L. Meier, C. Moskowitz, R.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).
11. J. Rhodes and R. Levy, IEEE, MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., 211 (1979).
12. R.J. Cameron, W.C. Tang, and C.M. Kudsia, in Proc. AIAA 14th Int. Communicat. Satellite Systems Conf., (1990)
13. R.R. Mansour, V. Dokas, G. Thomson, W.C. Tang, and C.M. Kudsia, IEEE Trans. Microwave Theory Tech. vol. 42, 2472 (1994)
14. A. Fathy etat, IEEE, MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., 1227 (1993)
15. R.R. Mansour, IEEE Trans. Microwave Theory Tech. vol. 42, 1411 (1994)
16. R.R. Mansour, F. Rammo, and V. Dokas, IEEE, MTT-S Int. Microwave

- Symp. Dig., 1281(1993)
17. F.A. Miranda, C.M. Chorey, R.R. Romanofsky, and K.B. Bhasin, Symp. 187th Meet, Electrochemical Soc., Reno, NV, 93 (1993).
 18. G.L. Matthaei, S.M. Rohlfing, R.J. Forse, IEEE trans, Microwave Theory Tech., 44, 1313 (1996).
 19. W.C. Chew, IEEE Trans. Antennas and Prop., 30, 918 (1982).
 20. S. Ohshima, T. Ogasawara, K. Ehata, IEEE Trans. Appl. Supercond. 7, 3060 (1997).
 21. N. M. Alford, S.J. Penn, T.W. Button, Supercond. Sci. Tech., 10, 169 (1997).
 22. G.K.G. Hohenwarter, J.S. Martens, J.B. Mayer, J.E. Nordman, and D.P. McGinnis, IEEE Trans. Magn., Vol 25, no 2, 1100, (1989).
 23. G. Liang, X. Dai, D.F. Hebert, T. VanDuzer, IEEE Trans. Appl. Supercond. 58 (1991).
 24. W.J. Ince and D.H. Temme, Adv, Microwave Vol. 4, 1 (1969).

< 이상렬 위원 >