

MONO 19801725

제 3 차 년 도
최 종 보 고 서

고온초전도체 기술 개발

Development of High Temperature
Superconductivity Technology

고온초전도 마이크로파 필터를 이용한 통신용 멀티플렉서의 개발

Development of Multiplexer Using High - Tc Superconducting
Microwave Filters for Communications

연 구 기 관

한국전자통신연구원

과 학 기 술 처

제 출 문

과 학 기 술 처 장 관 귀 하

본 보고서를 세부과제 "고온조건도 마이크로파 필터를 이용한
통신용 멀티플렉서의 개발"의 1996/1997년도 최종보고서로서
제출합니다.

1997년 12월 15일

주관연구기관명 : 한국표준과학연구원
협동연구기관명 : 한국전자통신연구원
협동연구책임자 : 강 광 용(책임연구원)
참 여 연 구 원 : 김 제 하(선임연구원)
한 석 길(선임연구원)
이 수 재(선임연구원)
하 연 수(위촉연구원)

요 약 문

I. 제 목

"고온초전도 마이크로파 필터를 이용한 통신용 멀티플렉서의 개발"

II. 연구개발의 목적 및 중요성

본 연구의 목적은 양질의 고온초전도 $YBa_2Cu_3O_{7-x}/MgO$ 에피택셜 박막을 성장하고, 이를 이용하여 마이크로파 통신용 핵심소자와 서브시스템인 대역통과 필터와 멀티플렉서를 구현하고(부품화까지) 특성을 평가하는 것이다. 따라서 이러한 목적을 성취하기 위한 본 연구의 주안점 및 중요성은 아래와 같다.

- (1) 펄스-레이저 증착법과 할로우 캐소드 스퍼터링법으로 고온초전도 $YBa_2Cu_3O_{7-x}/MgO$ 에피택셜 박막을 성장하고 및 그 특성을 분석함.
- (2) 마이크로파 필터 설계 이론과 고주파 부품 설계시스템(S/W)을 이용하여, 임의 길이 평행결합선 방식의(APCT) 다극 대역통과 필터와 평면형 멀티플렉서를 최적 설계하고 응답특성을 살핌.
- (3) 마이크로파용 고온초전도 대역통과 필터, 마이크로스트립 선로형(분지형) 3-dB 하이브리드 결합기, 듀플렉서 및 멀티플렉서를 포토리소그래피 공정으로 구현하고 저온 마이크로파 특성을 평가함.
- (4) 마이크로파 고온초전도 소자 및 서브시스템의 저온 마이크로파 특성 측정용 시험치구(jig)의 설계·제작함.

이와같이 양질의 고온초전도 에피택셜 박막을 이용한, 마이크로파 핵심소자 및 서브시스템의 설계 및 제조기술의 확보는 더욱 고조되는 선진 초전도 연구그룹의 고온초전도 마이크로파 소자 관련 기술장벽에 대처하고, 독자적인 마이크로파 통신시스템의 제작기술을 확보하기 위해서 절실함.

III. 연구개발내용 및 범위

<개발내용>

본 연구의 핵심은 고온초전도체의 마이크로파 원천소자 및 고성능·경박단소형 마이크로파 서브시스템의 개발이다. 이러한 목적을 달성하기 위해서는 마이크로파 소자응용에 적합한 고온초전도 에피택셜 박막의 성장, 독자적인 마이크로파 소자의 설계 및 최적화 기술, 그리고 마이크로파 소자구현을 위한 제조공정(리소그래피 공정 및 식각공정) 기술의 확보가 절실하게 요구된다. 그리고 마이크로파 통신부품으로서의 성능을 확인할 수 있는 우수한 시험치구의 제작과 이를 이용한 저온 마이크로파 특성 측정기술의 확보도 극히 중요하다.

<개발범위>

- (1) 마이크로파 표면저항이 매우 작고, 표면특성이 우수한 고온초전도 YBCO/MgO 에피택셜 박막 및 대면적 박막의 제조(펄스-레이저 증착법과 스퍼터링법으로).
- (2) 마이크로파용 고온초전도 다극 대역통과 필터, 3-dB 하이브리드 결합기, 평면형 듀플렉서 및 멀티플렉서의 최적 설계와 구현.
- (3) K-컨벡터(~40 GHz)를 부착한 3-성분 시험치구의 설계/제작.
- (4) 고온초전도 마이크로파 소자/서브시스템의 저온 마이크로파 특성평가/성능향상.

IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

(1) 고온초전도 YBCO/MgO 에피택셜 박막/대면적 박막의 제조

고성능·소형·경량의 고온초전도 마이크로파 소자/서브시스템을 구현하기 위해서는 에피택셜로 성장된 양질의 박막이 필수적이다. 본 연구에서는 마이크로파 특성이 뛰어난 유전체 단결정 기판(MgO) 상에 레이저 증착법/스퍼터링법으로 전자기 특성뿐 만 아니라, 표면형상이 양호한 고온초전도 에피박막을 제조하였다. 이는 고온초전도 집적소자의 구현 및 응용연구에 적극 활용될 수 있고, 특히 HTS-MMICs 창출에 적극 활용될 것이다.

한편 고온초전도 에피박막은 강유전체 및 강자성체 이중구조 다층박막이나 양자 이중구조 다층박막용 에피기판으로도 활용도가 크다.

* HTS-MMICs = High Temperature Superconductive-Monolithic Microwave Integrated Circuits

(2) 마이크로파용 고온초전도 소자/서브시스템의 설계 및 구현

고온초전도 에피택셜 박막을 이용한 초전도 능동소자의 실용화에는 상당한 시

일이 걸릴 될 것으로 전망되지만, 마이크로파 수동소자/서브시스템은 상품화의 단계에 접어들고 있다(초소형 cryocooler와 함께). 최근에, 고성능 마이크로파 통신시스템을 구축하기 위해서는 기존의 마이크로파 소자보다는 구조나 기능이 우수한 고온 초전도 마이크로파 소자/서브시스템이 필요하다는 인식이 모아지고 있다.

본 연구에서도 마이크로파 통신용 핵심소자/서브시스템인 여파기, 3-dB 하이브리드 결합기, 평면형 듀플렉서 및 멀티플렉서를 독자적으로 설계·구현하였다. 따라서 자연히 마이크로파 회로이론에 기초한 소자설계 기술과 전산모사를 통한 최적화 및 이론적인 응답특성 발현기술, 소자개발과 맞물린 포토리소그래피 및 식각기술, 저온 마이크로파 시험치구의 설계·제작기술과 특성평가 기술이 확보되었다. 이상의 연구결과로부터 고온초전도 능동 및 수동소자와 집적소자, 마이크로파 하이브리드 서브시스템, 정보·통신 시스템용 고성능 밀리미터파 부품 개발에 적극적으로 활용할 수 있다. 한편 박막제조 기술확보나 장비개발을 통해, 국내 진공산업에 큰 기술지원도 가능하다.

SUMMARY

I. Title

"The Development of Multiplexer for Communications Using High- T_c Superconductive(HTS) Microwave Filters"

II. Purpose and Importance

Our main research is to grow the high quality HTS YBCO epitaxial thin films and to implement the bandpass filters and the planar multiplexer which are the key components and subsystems in the field of microwave communications. Finally, we characterize the developed them using the low-temperature measurement system.

Especially, we concentrated our research on the following:

- (1) The production of HTS $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}/\text{MgO}$ epitaxial thin films using pulsed-laser deposition and hallow cathode sputtering methods and characterizations of the HTS thin films.
- (2) Using microwave filter theory and MDS(Microwave Design System), The optimal design of the arbitrary parallel coupled-line type(APCT) multipole bandpass filters and planar duplexers/multiplexers were carried out. Observation of microwave responses were achieved also.
- (3) Fabrication of the microwave HTS bandpass filters, branch-type 3-dB hybrid couplers, planar duplexers and multiplexers are carried out using the photolithographic processes. Then characterizations of the HTS devices and subsystems were done.
- (4) The Design and fabrication of test-jig for the low-temperature microwave measurements of HTS microwave devices/subsystems were done.

As a result, we can pass through advanced technological barriers with HTS-devices/subsystems and can establish the individual technologies in the field of microwave device applications.

III. Contents and Scopes

<Development Contents>

The main research is to design and fabricate the small and light HTS microwave element devices and system for telecommunications. In order to achieve these purposes, primarily, we should produce a high quality HTS epitaxial thin films apt to the microwave device applications, to secure the original microwave-device design techniques, and to establish the processing techniques such as photolithography and dry-etching using Cr-mask. we could fabricate the HTS microwave filters and multiplexers for microwave communications and measure the low-temperature microwave properties of them using the home-made test-jig and auto-measuring system.

<Range of Development>

- (1) The production of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}/\text{MgO}$ epitaxial thin films using PLD system and HCS system, Establishment of processing methods and Characterization of these film, such as microstructures, surface morphology and physical properties.
- (2) The optimal design and implementation of the microwave HTS devices/subsystems, such as multipole bandpass filters, 3-dB hybrid couplers and planar duplexers/multiplexers.
- (3) The fabrication and design of 3-components test-jig inserted K-connectors.
- (4) The measurement of the low-temperature microwave properties of HTS devices/systems and performance betterment of them.

IV. The results and Applications

(1) Fabrication of HTS epitaxial films

In order to apply the HTS films to microwave system, it is essential to produce the epitaxial thin film, especially, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) thin films on good crystal substrates with the c-axis orientation by excellent thin film process-methods such as PLD and HCS. HTS-MMICs are now being considered for insertion into many high-performance microwave communication systems where a need exists for components with higher performance, smaller size, or lower weight than devices based on conventional technology.

(2) Design and Implementation of M/W HTS Devices/Subsystems

It will take long time in order to practically apply the high-quality HTSC thin films to the Josephson junction devices and three-terminal transistors, however, it is expected soon or later to come true that the microwave devices(with small cryocooler) are practically used in the field of microwave communication system. Since production of HTS epitaxial thin films are possible, we concentrated our effort to realize the HTS microwave subsystems, such as filter-banks and mixers. The optimized circuit-patterns based on the simulation results for production of microwave devices/subsystems were transfed on HTS thin film using photolithographic and etching process. The measurements of microwave characteristics under low temperature were accomplished using 3-components test-jig. Thus, our research is already approached to some steps of multi-know how planar HTS microwave subsystem. Clearly, Producing a smaller number of higher performance satellites inserted HTS microwave devices/subsystems could be a very effective strategy for future space-based global communication systems. Now, we were going shares with the vacuum industry to establish the HTS microwave technology for production of film fabrication components, processing components and new type fab.-system etc.

CONTENTS

Chap. 1 Introduction.....	1
Sec. 1 opening	2
Chap. 2 Main Subject	6
Sec. 1 Introduction	7
Sec. 2 Summary of research results	9
Sec. 3 Epitaxial growth of HTSC thin films.....	11
Sub. Sec. 1 Growth of ablated-YBCO films and characterization	11
Sub. Sec. 2 Growth of sputtered-YBCO films and characterization ..	22
Sec. 4 Design and fabrication of microwave HTS multiplexer	29
Sub. Sec. 1 Design and fabrication of HTS bandpass filters	29
Sub. Sec. 2 Frequency responses of multipole HTS bandpass filters for microwave communications	30
Sub. Sec. 3 Design and fabrication of planar multiplexer for microwave communications	32
Chap. 3 Conclusions	39
Appendix	41

목 차

제 1 장 서 론	1
제 1 절 시작하면서	2
제 2 장 본 론	6
제 1 절 머리말	7
제 2 절 연구결과의 요약	9
제 3 절 고온초전도 에피택셜 박막의 성장	11
가. 고온초전도 ablated-YBCO 박막의 성장 및 특성분석	11
나. 고온초전도 sputtered-YBCO 박막의 성장 및 특성분석	22
제 4 절 마이크로파용 고온초전도 멀티플렉서의 설계·구현.....	29
가. 마이크로파용 고온초전도 대역통과 필터의 설계·구현	29
나. 마이크로파용 고온초전도 다극 대역통과 필터의 주파수 응답특성	30
다. 마이크로파용 평면형 멀티플렉서의 설계·구현	32
제 3 장 결 론	39
부 록	41

제 1 장

서 론

제 1 장 서 론

제 1 절 시작하면서

재현성과 초전도 특성이 뛰어난, 양질의 고온초전도 단층박막(기판은 유전체 단결정기판 ; MgO , $LaAlO_3$) 및 다층박막(기판은 사파이어, Si , $GaAs$ 등)을 성장하고, 소자패턴의 銳利度(sharpness)를 향상시키기 위하여 전자선-마스크를 이용한 미세형상화(micro-patterning) 공정과 收率이 우수한 혼합형 식각공정(ECR-이온 밀링등 건식식각 및 EDTA-습식식각)을 통해, 먼저 마이크로파용 多極 대역통과 필터(bandpass filters)와 3-dB 하이브리드 결합기(hybrid coupler)를 구현 및 평가한 후, 다시 이들을 동일 기판 상에 집적시켜(one wafer integration) 마이크로파 통신용 고온초전도 평면형 멀티플렉서(multiplexer, 多重傳送路)를 개발하였다.

이러한 연구개발의 필요성을 몇가지 측면에서 고려해보고자 한다.

가. 技術的 側面

마이크로파 통신소자나 서브시스템의 개발을 위한 고온초전도체의 응용은 통상의 금속류에 비해 두드러진 두가지의 특징(물성) 때문에 연구개발의 필요성이 크게 제기되고 있다.

첫째, 고온초전도 에피택셜 박막은 마이크로파 표면저항(R_s)이 매우 작다는 점이다. 즉, 액체질소 온도(@ 77K)이하에서 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (이후는 YBCO로 약칭함) 에피택셜 박막의 표면저항(surface resistance : R_s)은 구리, 금 등의 금속 박막에 비해 1/10 정도로 작다. 따라서 신호 전송시에 매우 낮은 손실(low loss)과 매우 높은 품질계수(Quality factor)를 기대할 수 있고, 회로패턴의 선폭 감소에 따른 상호간섭(interference)도 현저히 줄일 수 있기 때문에 고온초전도 마이크로파 집적소자(HTS-MMICs)의 개발에서 高集積度를 얻을 수가 있다.

둘째는 초전도체 내부로 전자장이 침투할 때, 침투깊이가 사용주파수에 거의 무관하다는 점이다. 특히, 고온초전도체의 경우에는 거의 수 THz 정도까지도 上記한 특성이 유지되는 것으로 알려져 있다. 실제로 밀리미터파 대역 이상에서도 고온초전도 마이크로파 소자는 에너지의 分散없이 신호를 傳播(propagation)시킬 수 있다. 이러한 우수한 특성 때문에 양질의 고온초전도 박막을 이용한 평면형 마이크로

파 부품의 개발은 마이크로파 통신시스템에 큰 효과를 줄 수 있다.

기존의 마이크로파 부품(유전체 필터, 도파관 필터 등)에서는 경박단소하고 고성능이며, 삽입손실 특성까지가 우수한 제품을 구현하기가 어려웠다. 따라서 전술한 문제점을 해결하고, 독자적 설계 및 전산모사를 통해 도파관 구조의 마이크로파 부품처럼 고주파 특성이 우수한 평면형 고온초전도 마이크로파 소자를 개발하기 위하여 고온초전도 에피택셜 박막을 사용하면, 신호전송에 따른 減衰와 雜音을 현저히 줄일 수 있고(無損失性), 기존의 마이크로파 부품에 비해 훨씬 높은 주파수 영역에서도 고성능(無分散性)으로 신호처리(에너지 전송)가 가능하다. 그리고 양질의 에피택셜 박막을 사용하기 때문에, 低價이면서 소형인 마이크로파 통신용 부품(서브시스템)의 제조도 가능하다.

한편, 마이크로파 이상의 대역에서(3 GHz~30 GHz) 고속으로 대용량, 고품위 정보를 전송하여, 정보수요자에게 양질의 정보서비스를 제공하기 위해서는 광대역(wide band)에 걸쳐 고속으로 신호를 처리함과 동시에 각종 정보통신 시스템의 소형화, 고성능화, 고감도화가 성취되어야 한다. 이러한 기술적/현상론적/수요적 現況에 대응할 수 있는 소자(회로 또는 부품)는 비선형 특성이 뛰어난 초전도 능동소자(예, 조셉슨 접합소자, 믹서 등)와 대역폭의 크기도 쉽게 制御할 수 있는 고온초전도 마이크로파 수동소자(예, 대역통과 필터, 멀티플렉서 등)이다. 따라서 위성(이동)통신 및 위성방송용 저궤도 위성에 탑재되는 버스의 송수신기(transceiver) 개발까지를 고려하면, 고성능이고 경량의 고온초전도 전자소자의 독자적인 개발과 이들을 적절히 集積한 고온초전도 마이크로파 서브시스템(예, 멀티플렉서, 믹서 등)의 개발은 매우 절실하고 중요하다.

나. 經濟.産業的 側面

금세기는 실리콘(Si) 기판을 이용한 대규모 집적회로 기술에 힘입어 거대한 가전시장이 형성되고 있고, GaAs와 InP 기판을 이용한 MMICs 기술도 상당한 수준에 와 있기 때문에, 이들을 이용한 정보·통신산업도 급팽창하고 있다. 이러한 반도체 전자공학도 금세기 중에 成熟期를 지나 飽和期에 이를 것으로 전망되고 있다. 반도체 소자(회로)가 경제, 사회에 전반에 미치고 있는 영향을 고려해 볼 때, 포화기 뒤를 이을 차세대 핵심 전자공학 기술을 구축하기 위한 기술경쟁과 시장선점 경쟁은 자연히 치열할 수 밖에 없다. 현단계의 대규모 집적회로 기술에 의한 칩생산

에서, 반도체 트랜지스터의 크기축소(scale down)에 수반되는 부정적인(negative) 양자현상, 서브-마이크론 이하의 미세배선에서 생기는 배선저항의 급격한 증가, 다중칩 모듈에서의 칩-집적도에 따른 발열문제 등은 집적소자에 치명적인 것으로 알려져 있다. 최근 이러한 기술적 걸림돌(재료 및 소자분야) 극복을 위한 해결책으로 제시되고 있는 전자공학 분야가 바로 고온초전도 전자공학(HTS electronics) 분야로 인식을 같이 하고 있다. 따라서 고온초전도 전자공학은 환경문제를 포함하여 미래산업을 주도할 수 있는 차세대 첨단산업이고, 마이크로파를 이용한 정보·통신 분야의 龍兒로서 기대를 모으고 있다. 특히, 예상되는 실용화 시기와 연계해서 고려해 볼 때, 엄청난 경제 및 산업적 효과 때문에 선진국에서는 새로운 고온초전도체의 개발(창출) 및 응용연구를 국가 및 대기업 차원에서 추진하고 있고, 개발된 노하우는 철저히 전략화하고 있다.

우리나라도 반도체 산업에 대한 꾸준한 투자와 각고의 노력에 의해 반도체 분야의 선진국으로 부상했던 경험을 기초로하여, 차세대를 겨냥한 선진국의 초전도 기술 장벽과 경제 및 산업(기술)의 隸屬化를 철저히 예방하기 위해서도 독자적인 고온초전도 전자공학 기술을 확보할 필요가 증대하고 있다.

다. 社會·文化的 側面

고온초전도체를 이용한 전자소자는 가까운 장래에 고집적·고감도 소자 및 센서, 고속·고성능 정보·통신부품, 가정용 오디오·영상기기용 복합소자 등에 이르기까지 미래 전자산업의 청사진을 제시하고 있으며 특히, 자연과학, 인문과학, 사회과학 전반에 걸친 광범위한 과학지식의 확대를 유도할 것이 예상된다.

금세기 최대의 성과로 꼽히고 있는 반도체 기술이 이룩한 문명은 사회전반에 걸쳐 편리함과 안락함을 누리게끔 하고 있으며, 정보·통신분야에서의 급속한 발전은 문화환경을 수요자로 하여금 단순한 정보수용자에서 적극적이고 능동적인 정보의 創造者 및 供給者로 탈바꿈시키고 있으며, 대량의 그리고 양질의 정보를 마음대로 가져다 쓰게끔하는 생활풍속도를 전개시킬 것이다. 따라서 새로운 규모의 산업혁명도 가능할 것으로 예상된다.

성숙기에 접어든 반도체 집적소자 기술을 바탕으로 한 인공지능 및 카오스 그리고 정보·통신산업 등이 전체 산업을 주도하겠지만, 고온초전도 전자공학 기술과의 접목을 통해 상기의 산업들은 보다 고도 기술화가 가능할 것이며, 꿈의 컴퓨터

라고 지칭되는 웨이퍼 스케일의 원 칩(one-chip) 컴퓨터도 고온초전도 응용기술이 확보되면(예; 2차원 배선과 발열문제 등), 밑면의 크기가 10 cm² 정도의 초고속·초소형 슈퍼 컴퓨터(superconductive supercomputer)의 개발도 충분히 그려볼 수 있다. 따라서 고온초전도체의 실용화는 인류에게 더욱 풍요한 문명과 인간적인 문화를 안겨줄 것이 예상되므로, 차세대 멀티미디어 정보문명을 고려하여 고온초전도 기술 개발에 고삐를 늦추지 말아야 할 것으로 판단하고 있다.

제 2 장

본 론

제 2 장 본 론

제 1 절 머릿말

마이크로파 표면저항이 매우 작고, 結晶粒이 잘 배향된 고온초전도 에피택셜 박막은 신구조·신기능 마이크로파 통신용 집적소자 개발의 선결요건이며, 아울러 雙晶(twin boundary)이나 缺陷(핀홀, 보울더 등)이 없고 균질한 대면적 박막의 성장은 매우 절실하다. 따라서 고온초전도 연구팀들은 양질의 박막을 성장하기 위해 펄스-레이저 증착법(PLD), 스퍼터링법, MOCVD법, MBE법, Cothermal 증착법 등을 이용하고 있다. 한편, 마이크로파 통신소자(회로)를 개발하기 위해서는 증착용 유전체 기판의 선택도 매우 중요한데, 유전손실($\tan\delta$)과 유전상수가 되도록이면 적은 편이 유리하다. 이러한 조건에 맞는 유망한 단결정 기판으로서는 MgO , $LaAlO_3$, $NdGaO_3$ 등이 있으며, 3세대 유망기판이라고까지 일컬어지는 $LaSrGaO_4$, Sr_2AlNbO_6 등도 있다. 최근에는 새로운 perovskite형 $DyBa_2ZrO_{5.5}$ 기판도 개발되었다. 한편, Si, GaAs 및 Al_2O_3 (sapphire) 기판 위에 MgO , SiC, CeO_2 등의 완충층(buffer layer)을 성장하고, 그 위에 마이크로파 특성이 우수한 고온초전도 에피택셜 박막을 성장시키한 연구결과도 많다.

본 연구팀에서도 펄스-레이저 증착법과 스퍼터링법(Hallow Cathode Sputtering)을 이용하여 고온초전도 단층 및 다층박막과 대면적 박막(ETRI는 2-inch정도 수준인데, 독일 등은 4-인치 이상 수준임)을 성장하고 있다. 박막의 마이크로파 물성평가(表面抵抗)를 위하여 계측시스템의 구축과 고온초전도 에피택셜 박막의 특성향상(예, Ag-doped YBCO 박막 개발 등)에도 주력하고 있다.

저손실 마이크로스트립 전송선을 기본 구조로 하는 마이크로파 수동소자 및 서브시스템은 마이크로스트립 공진기를 기저로(based) 하는 통신소자(예를들면 : 발진기, 저역 및 대역통과 필터)와 저손실 지연선(delay-line)을 기저로 하는 통신소자(예를들면 : 콤팩트형 지연선, 배열안테나 및 공급망(feed network), 신호처리용 chirp 필터 등)로 대별할 수 있는데, 마이크로파 기술에 대한 오랜 경험과 노-하우가 축적된 선진국 전파공학 팀들은 간단한 고온초전도 마이크로파 서브시스템과 소형 냉각기(cryocooler)의 시제품을 개발하기도 하고, 통신시스템이나 전자무기 시스템 등의 일부에 삽입시켜 성능향상을 꾀하는 등 다양한 연구결과를 보여주고 있다

(미국 해군성(NRL) 주도의 HTSSE-프로젝트, 일본 ISTECS-SRL의 조셉슨-믹서 개발계획(Pegasus Project) 등).

본 연구팀에서도 고온초전도 마이크로파 공진기나 공진기를 기저로한 대역통과 필터, 필터와 결합기를 집적한 멀티플렉서 등을 개발하였고, 이들의 저온 마이크로파 특성을 알아보기 위하여 마이크로파용 시험치구(test-jig)도 자체적으로 설계·제작하였으며, 연구수행에서 얻어진 우수한 결과에 대해서는 국내·외 학회(초전도 학회 및 마이크로파 학회)에서 발표하고, 기술보호를 위해 지적재산권 보호에 임하고 있다.

제 2 절 연구결과의 요약

<3자년도 : 1996. 5. 1- 1997. 4. 30>

고온초전도 마이크로파 소자/서브시스템을 창출하기 위한 연구수행에는 양질의 에피택셜 박막성장용 증착장비, 마이크로파 회로해석 이론에 근거한 독자적인 통신소자의 설계와 최적화를 위한 설계시스템(S/W), 고온초전도 마이크로파 통신소자를 구현할 수 있는 미세형상화(micropatterning) 공정장비, 그리고 구현된 초전도 소자의 저온 마이크로파 특성평가를 위한 자동화된 측정시스템의 완비가 기본적으로 필수적이다. 이러한 기본 실험 구도에서 본 연구팀이 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

■ 고온초전도 통신소자를 개발하기 위한 선결 조건인 양질의 에피택셜 박막은 펄스 레이저 증착법(PLD 法)으로, 대면적 박막은 DC-Sputtering법(hallow cathode sputtering)으로 성장하고, 박막의 표면형상과 물성(표면저항) 분석을 통해 박막의 성능향상을 꾀함.

- ▶ 고온초전도 Ag-doped YBCO/MgO, YBCO/PrBCO/MgO 에피박막 성장.
- ▶ 고온초전도 대면적 박막의 성장(2-인치 급, YBCO/MgO)
- ▶ 완충층(buffer layer) 및 고온초전도 에피박막의 표면 및 물성분석.
 - XRD, TEM, SEM, AFM, RBS 등 이용.
 - 고온초전도 박막의 마이크로파 표면저항(R_s)의 측정.

■ 마이크로파 회로해석 이론에 근거하여, 독자적인 고온초전도 마이크로파 소자(대역통과 필터, 3-dB 하이브리드 결합기 등)를 설계하고, 상용의 고주파 설계시스템(SupercompactTM)을 이용하여 최적화하고 아울러 이론적인 마이크로파 주파수 응답특성도 살펴보았음.

■ 미세형상화 공정(포토리소그래픽 공정과 식각공정)을 통해 대역통과 필터, 하이브리드 결합기, 듀플렉서 및 멀티플렉서 등 소자 및 서브시스템(부품)을 구현함.

■ 마이크로파 소자 및 서브시스템의 특성평가는 독자적으로 설계·제작한 시험치구(2-포트 형 및 4-포트 형)와 본 연구팀에서 구축한 저온 마이크로파 측정시스템(HP8510C + LTS-II)으로 수행하였음.

- ▶ 마이크로파용 고온초전도 통신소자의 설계·제작·특성 평가.
 - 임의길이의 평행결합선 방식의 고온초전도 다극 대역통과 필터의 구현 및 특성 평가.

- 변형된 3-dB 하이브리드 결합기(coupler)의 구현 및 특성 평가.
- ▶ 2-채널용 고온초전도 멀티플렉서의 구현 및 특성평가.
 - 2개의 듀플렉서 결합 --> 평면형 마이크로파용 멀티플렉서의 구현.
- ▶ 마이크로파용 고온초전도 평면형 서브시스템의 특성평가용 시험치구(test-jig)의 제작.
 - 고온초전도 듀플렉서(duplexer)용 시험치구.
 - 고온초전도 멀티플렉서(multiplexer)용 시험치구.
- 박막성장이나 마이크로파 소자 제조용 각종 필수장비의 지속적인 개량과 개선을 통하여, 고온초전도 소자의 설계·제작·평가의 정밀도를 향상시킴.
 - PLD용 구동체(carousel)의 개발 및 특허화.

제 3 절 고온초전도 에피박막의 성장

가. 고온초전도 ablated-YBCO 박막의 성장 및 특성분석

1986년 Bednorz 와 Muller 가 산화물 LaBaCuO ($T_c = 30 \text{ K}$)에서 초전도 현상이 나타나는 것을 발견한 이후, 고온초전도 물질개발 연구와 응용연구는 비약적인 발전을 거듭하고 있다. 10년이 지난 최근에도 고온초전도체의 물성에 관한 연구는 지속적으로 많이 수행되고 있으며, 이러한 연구결과로 밝혀진 특성을 이용한 소규모 및 대규모 응용에도 많은 관심이 모아지고 있다. 이러한 연구열기는 임계온도(T_c)가 90 K 이상인 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.8}$ (YBCO)가 발견되면서 더욱더 가열되었다. YBCO는 성장이 비교적 용이하며, 단일상의 박막성장이 가능하여 전자소자 등으로의 응용가능성도 매우 큰 산화물(oxide) 초전도체이다.

본 연구에서는 pulsed-laser deposition(PLD) 법을 이용하여, 양질의 YBCO 박막을 성장하기 위하여 수행한 실험으로서, 박막성장에 가장 중요하다고 생각되는 공정변수(processing parameter)인 성장온도, 타겟(target)과 기판(substrate) 사이의 거리, 산소압(oxygen pressure) 등을 변화시키면서 임계온도(critical temperature : T_c)와 임계전류밀도(critical current density : J_c)를 측정하고, 결정성(XRD 분석) 및 표면형태의 거시적인 구조(SEM 관찰) 등을 살펴보았다. 본 연구에 사용된 장치의 개략도를 그림 3-1에 나타내었다.

한편, 박막성장에 사용된 YBCO 타겟의 크기는 $20 \text{ mm}\phi \times 0.6 \text{ mm}$ t 였으며, 분석을 위해 사용한 단결정 기판의 크기는 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ t 였다. 또한 사용된 히터(heater)는 THIN FILM PRODUCTS 사의 SiC 저항히터(resistance heater)였다. 온도는 실온에서 850°C 까지 조절이 가능하며, 히터의 위치는 X-Y-Z 방향으로의 이동에 의해 제어가 가능하다. 타겟에 빔을 조사하기 위하여 사용된 레이저는 펄스 폭이 14 ns 인 excimer laser 였으며, XeCl 가스의 방전에 의해 발진한다. 통상적으로 사용된 에너지는 4.02 eV 였으며, 타겟으로 향하는 laser beam 의 조사각도는 45° , 조사강도는 약 1 J/cm^2 였다.

박막성장은 성장할 재료의 물성에 크게 영향을 미치는 파라메타라고 생각되는 성장온도, 타겟과 기판 간의 거리 및 산소압 중 한가지 변수를 변화(2 가지 변수는 고정함) 시켜가면서 실험을 행하였다. YBCO 박막 성장 후, 박막시료의 온도는 약 6°C/min 의 속도로 하강시켰으며, *in situ* 열처리는 500°C 에서 1 시간 행하였다. 먼저, 성장온도를 780°C , 산소압을 200 mTorr 에 고정시키고, 타겟과 기판 간의 거리를 40

cm 에서 55 cm 까지 변화시키면서 박막을 성장시켰으며, T_c 와 J_c 를 측정하고 XRD 스펙트럼을 분석하며 아울러 SEM 상도 관측하였다.

그림 3-2(a)에는 타깃과 기판 간의 거리(T-S 거리) 변화에 따른 T_c 의 변화추이를 나타내었다. 타깃과 기판의 거리가 45 cm 이하가 되면, T_c 가 급격하게 떨어지는 것을 알 수 있었다. 그리고 타깃과 기판 간의 거리가 50 cm 이상일 경우에도 T_c 의 값이 하락함을 알 수 있었다. 이러한 실험의 결과로 알 수 있듯이 기판과의 거리가 약 45 - 50 cm 의 범위에 위치했을 경우, 성장된 박막의 T_c 가 높은 값에서 안정됨을 알 수 있었다.

성장시, T-S 간의 거리 변화에 따른 표면구조의 변화를 그림 3-2(b), 2(c), 2(d), 및 2(e)에 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와같이 타깃과 기판의 거리가 멀어짐에 따라 성장물질(YBCO 박막)의 결정화가 뚜렷해짐을 알 수 있다. 그리고 성장한 박막들의 T_c 측정으로 알 수 있는 바와같이 타깃과 기판사이의 거리가 50 cm 이상이 되면 다시 임계온도 값이 떨어짐을 알 수 있다. 그리고 그림 3-2(e)의 표면상에 나타난 두개의 덩어리는 성장시 발생하기 쉬운 보oulder(boulder)인데, EDX 를 이용하여 그 성분을 분석한 결과, YBCO 임을 알 수 있었다. 그리고 비슷한 조건에서 성장시킨 비교적 깨끗한 박막을 사용하여 물성을 측정한 결과, T_c 및 J_c 에는 거의 변화가 없음을 확인했다. 여기서 생각할 수 있는 점은 표면의 ad-cluster(또는 adatom)는 여분의 현수결합(dangling-bond)를 많이 가지고 있기 때문에 표면 열화현상을 일으키는 원하지 않는 결합 또는 다른 원소와의 결합원으로 작용할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 까닭에 고온초전도 박막에서의 ad-cluster(또는 adatom)의 생성원인을 규명해 나가는 연구도 의미가 있으며 전자소자의 성능향상 연구에도 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

위의 실험결과를 토대로 T_c 의 값이 가장 높은 점 즉, 타깃과 기판 간의 거리를 50cm 로 고정시킨 다음, 다음 실험을 계속 추진하였다. 그림 3-3(a)에는 타깃과 기판의 거리를 50 cm, 산소압을 200 mTorr 로 고정하고, 성장온도를 710°C 에서 780°C 까지 변화시키면서 YBCO 박막을 성장 했을 때의 임계온도의 결과를 나타내었다. 이 결과에 의하면 성장온도가 720°C 이하에서는 T_c 의 값이 급격하게 떨어짐을 알 수 있다. 또한 성장온도 720°C($T_c = 88.9$ K)를 기점으로 780°C($T_c = 87.5$ K)로 변화시킴에 따라, T_c 가 조금씩 하락해지는 것도 관찰하였다. 그림 3-3(b), 3(c), 3(d) 및 3(e)에는 성장온도의 변화에 따른 박막의 표면상태(morphology)의 변화를 나타내었다. 그림에

서 알 수 있는 바와같이 성장온도가 증가함에 의해, 최외층까지 표면의 단결정화가 진행되는 것을 알 수 있다.

한편, 상기의 측정된 결과를 토대로, 타깃과 기판간의 거리(T-S 거리)와 성장온도를 고정시키고, 산소압만 변화시키면서 실험을 계속하였다. 그림 3-4(a)에는 타깃과 시료의 거리가 50 cm, 성장온도가 760°C 일때 산소압의 변화에 따른 T_c 변화를 나타내었다. 이 결과에 의하면, 주입하는 산소량이 일정값 이상에서는 T_c 값이 포화되는 것을 알 수 있다. 그리고 그림 3-4(b), 4(c), 및 4(d)에는 성장시 산소량의 변화에 따른 표면의 구조 변화를 나타내었다. 산소량의 변화에 의해 최외층 표면형태(morphology)가 바뀌는 것을 알 수 있다. 즉 산소 공급량을 100 mTorr 로 했을 때 최외층 표면에서 발견할 수 있는 핀홀(pin hole)은 그다지 많지 않지만, 산소 공급량을 200mTorr, 350 mTorr 로 증가시키면 표면의 핀홀의 개수가 증가하는 것을 알 수 있다 그리고 산소량의 과다한 공급은 T_c 를 저하시키다는 것도 알 수 있었지만 이러한 결과는 YBCO의 물성을 연구할 때 충분한 재검토가 요망된다고 생각된다.

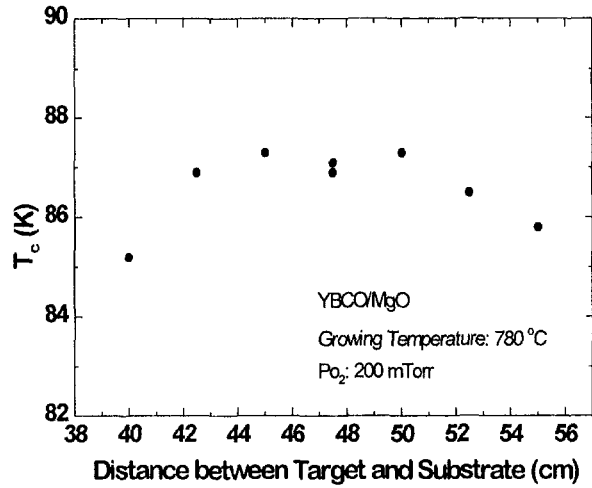


그림 3-2(a): 타겟과 기판 간의 거리를 40 cm 에서 55 cm 까지 변화 시켰을 때의 (성장온도 780 °C, 산소압 200 mTorr 로 고정) 임계온도(T_c)의 변화.

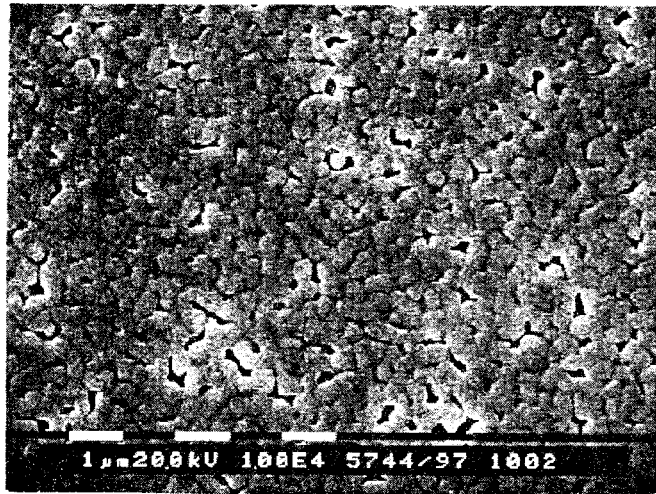


그림 3-2(a): 타겟과 기판 간의 거리를 40 cm 으로 했을 때의 (성장온도 780 °C, 산소압 200 mTorr 로 고정) YBCO 박막의 표면형태(morphology).

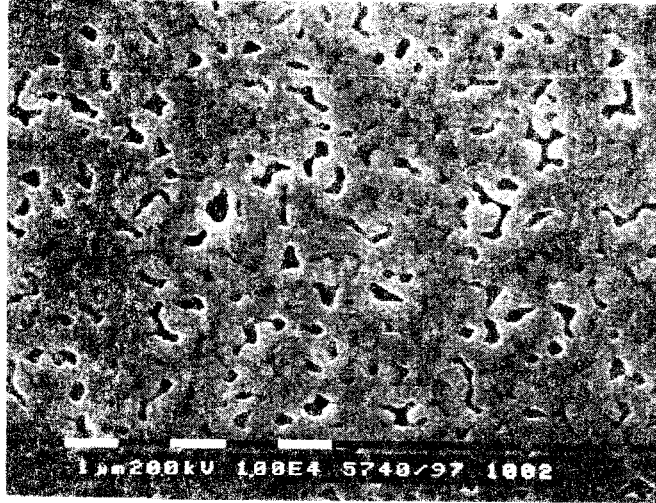


그림 3-2(c): 타깃과 기판 간의 거리를 45 cm 으로 했을 때의 (성장온도 780 °C, 산소압 200 mTorr 로 고정) YBCO 박막의 표면형태(morphology).

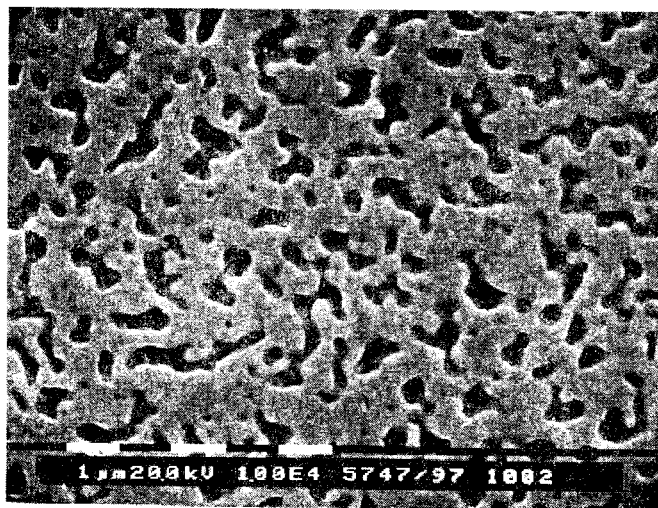


그림 3-2(d): 타깃과 기판 간의 거리를 50 cm 으로 했을 때의 (성장온도 780 °C, 산소압 200 mTorr 로 고정) YBCO 박막의 표면형태(morphology).

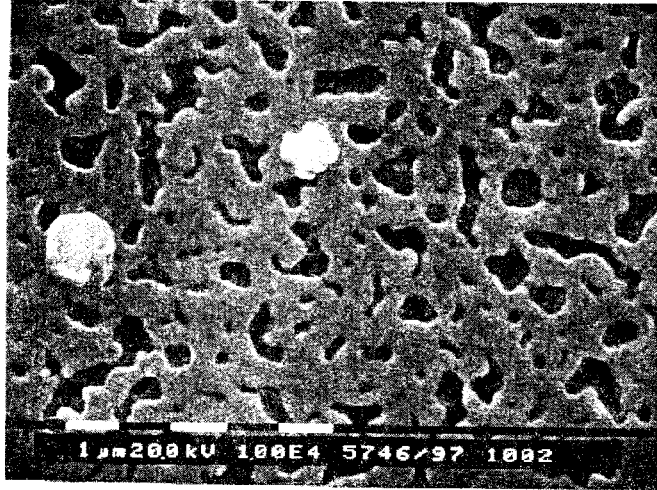


그림 3-2(e): 타겟과 기판 간의 거리를 55 cm 으로 했을 때의 (성장온도 780 °C 산소압 200 mTorr 로 고정) YBCO 박막의 표면형태(morphology).

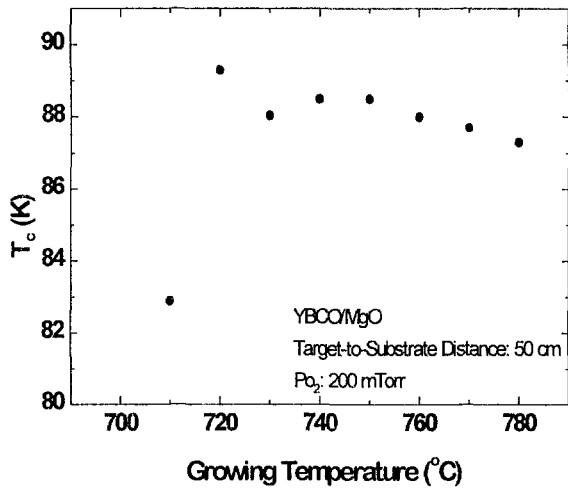


그림 3-3(a): 산소압 200 mTorr, 타겟과 기판간의 거리를 50 cm 로 고정하고 성장온도를 710 °C 에서 780 °C 까지 변화시켰을 때의 T_c 변화.

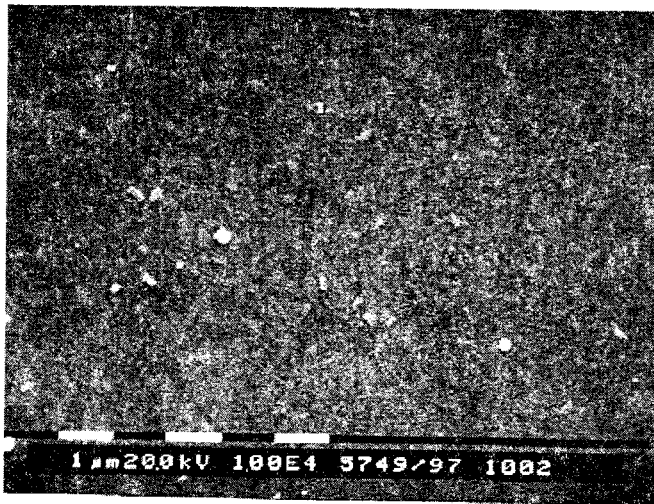


그림 3-3(b): 성장온도 710 °C(산소압 200 mTorr, 타겟과 기판간 거리 50 cm : 고정) 에서 성장시킨 YBCO 박막의 표면형태(morphology).

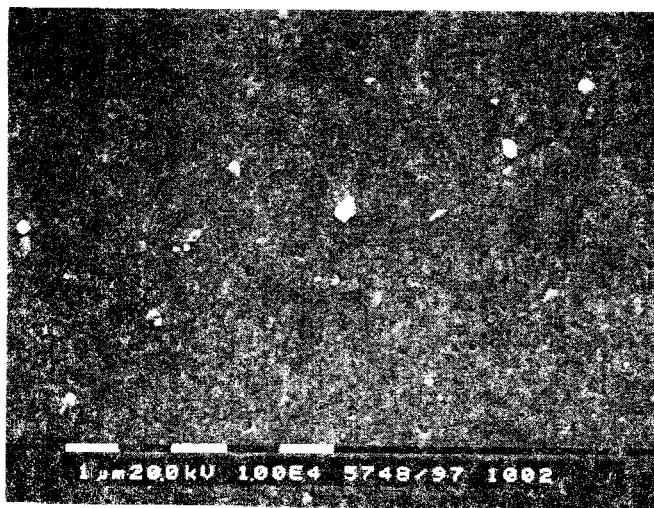


그림 3-3(c): 성장온도 720 °C(산소압 200 mTorr, 타깃과 기판간 거리 50 cm : 고정)에서 성장시킨 YBCO 박막의 표면형태(morphology).

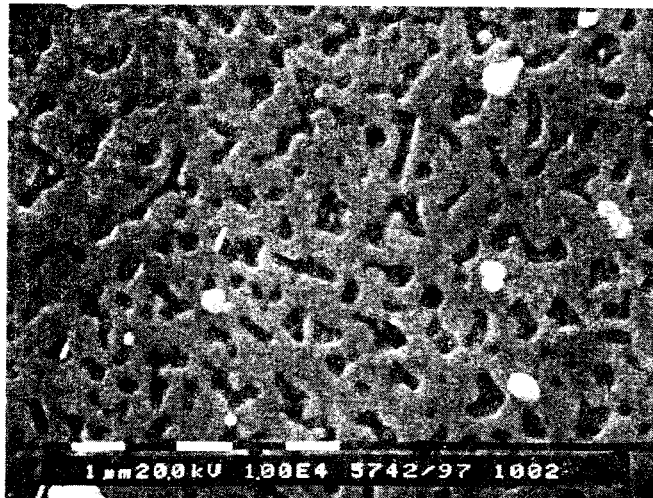


그림 3-3(d): 성장온도 760 °C(산소압 200 mTorr, 타깃과 기판간 거리 50 cm : 고정)에서 성장시킨 YBCO 박막의 표면형태(morphology).

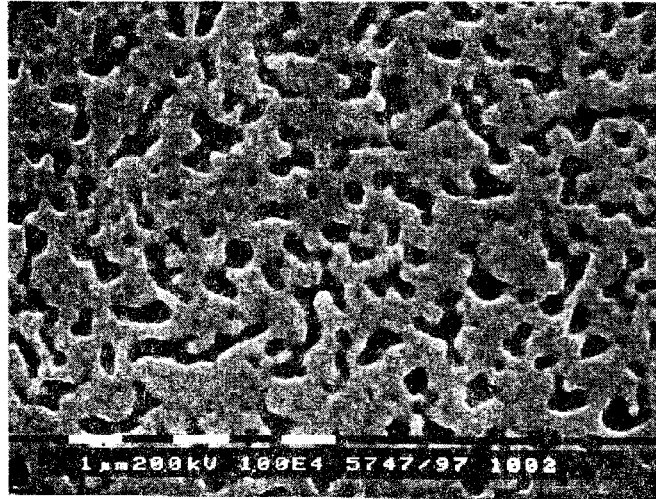


그림 3-3(e): 성장온도 780 °C(산소압 200 mTorr, 타겟과 기판간 거리 50 cm : 고정)에서 성장시킨 YBCO 박막의 표면형태(morphology).

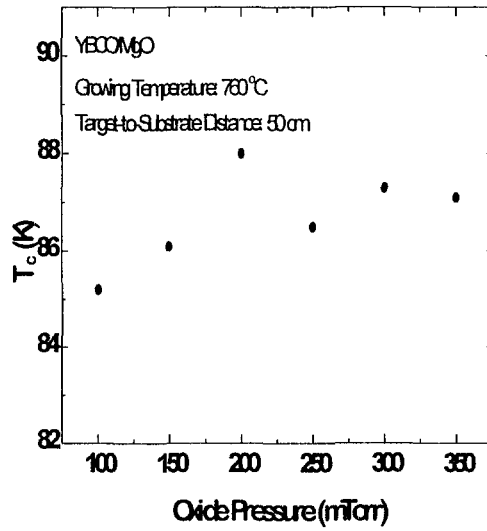


그림 3-4(a): 박막 성장온도를 760°C, 타겟과 기판간의 거리를 50 cm 로 고정하고 산소압을 100 mTorr 에서 350 mTorr 까지 변화시켰을 때의 T_c 의 변화.

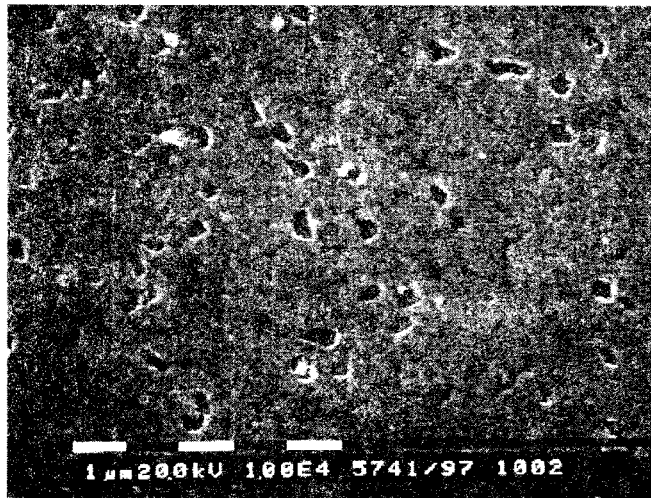


그림 3-4(b): 산소압 100 mTorr 로 유지하고 성장시킨 YBCO 박막의 표면형태 (morphology). 단, 성장온도 760 °C 타겟과 기판간의 거리를 50 cm 로 고정

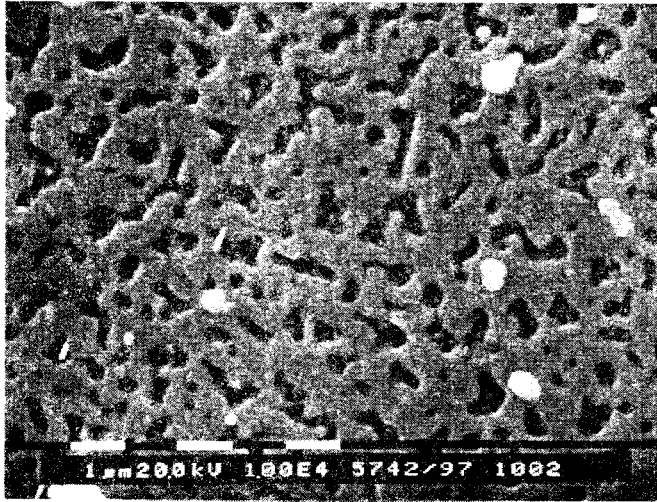


그림 3-4(c): 산소압 200 mTorr 로 유지하고 성장시킨 YBCO 박막의 표면형태 (morphology). 단, 성장온도 760 °C 타깃과 기판간의 거리를 50 cm 로 고정

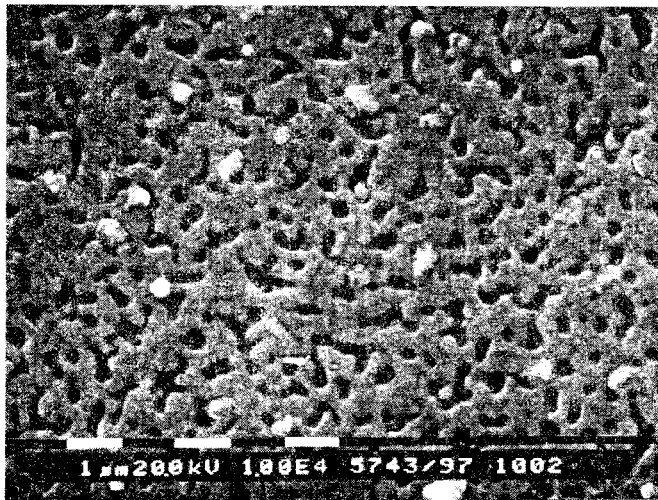


그림 3-4(d): 산소압 350 mTorr 로 유지하고 성장시킨 YBCO 박막의 표면형태 (morphology). 단, 성장온도 760 °C 타깃과 기판간의 거리를 50 cm 로 고정

나. 고온초전도 sputtered YBCO 박막성장 및 특성분석

Sputtered YBCO 에피박막은 3 inch 직경으로 소결된 고온초전도 원통형 타깃을 이용하는 hallow cathode sputtering 방법(그림 3-5)으로 대면적 박막을 제작하였다. 실험방법은 상온에서 4인치 실리콘(Si) 웨이퍼 위에 약 5000 Å 두께의 YBCO를 증착한 후(사용기판은 단결정 MgO-plate), 나타난 간섭무늬와 AFM 측정을 통하여 두께의 균일성을 조사하여 본 결과, 직경 40cm 정도까지 거의 균일하게 증착됨을 확인하였고 이 결과를 그림 3-6의 (a)와 (b)에 나타내었다.

한편, EDAX, XPS로 영역별 성분비의 분포를 조사하여 증착된 박막의 성분비(Y-123)를 조사하였으며 이에 대한 결과는 그림 3-7의 (a)와 (b)에 나타내었다. 대체로 원하는 조성비를 갖추었으며 기판거리(T-S거리)의 변화에 대해서는 거의 일정함을 알 수 있었다. 그리고 1-인치 직경과 0.5 mm두께를 갖는 MgO(100) 단결정 기판 위에 증착 온도를 720°C로 유지한 채 300 mTorr의 Ar + O₂ 분위기에서 YBCO 박막을 3시간 증착한 후(약 4000 Å 두께), XRD 관찰로써 결정성을 조사하였다. 그림 3-8의 (a)와 (b)에서 보는 바와 같이 X-선 회절실험에서는 회절의 피크가 (006), (005), (003) 순으로 나타나는 c축으로 성장한 에피택셜 박막의 결정성을 확인하였다. XRD 파이분석에서 관찰된 YBCO(103)면 세기의 피크가 90° 간격으로 나타났으며, 45° 간격의 피크는 나타나지 않아 성장한 1-인치급 YBCO 박막은 ab-평면상으로 에피택셜하게 성장한 양질의 박막임을 확인하였다.

성장시킨 YBCO/MgO 에피박막의 표면상태를 살펴보기 위하여 AFM을 이용하여 이미지를 얻었는데, 전형적인 표면형태를 볼 수 있었으며, 이 결과를 그림 3-9에 나타내었다. 그리고 스퍼터한 YBCO/MgO 에피박막의 임계온도는 86 K이었으며 T-S 거리에 따른 T_c값의 변화를 살펴보았는데(그림 3-10) 급격한 +/-20mm 범위에서는 거의 일정하였다.

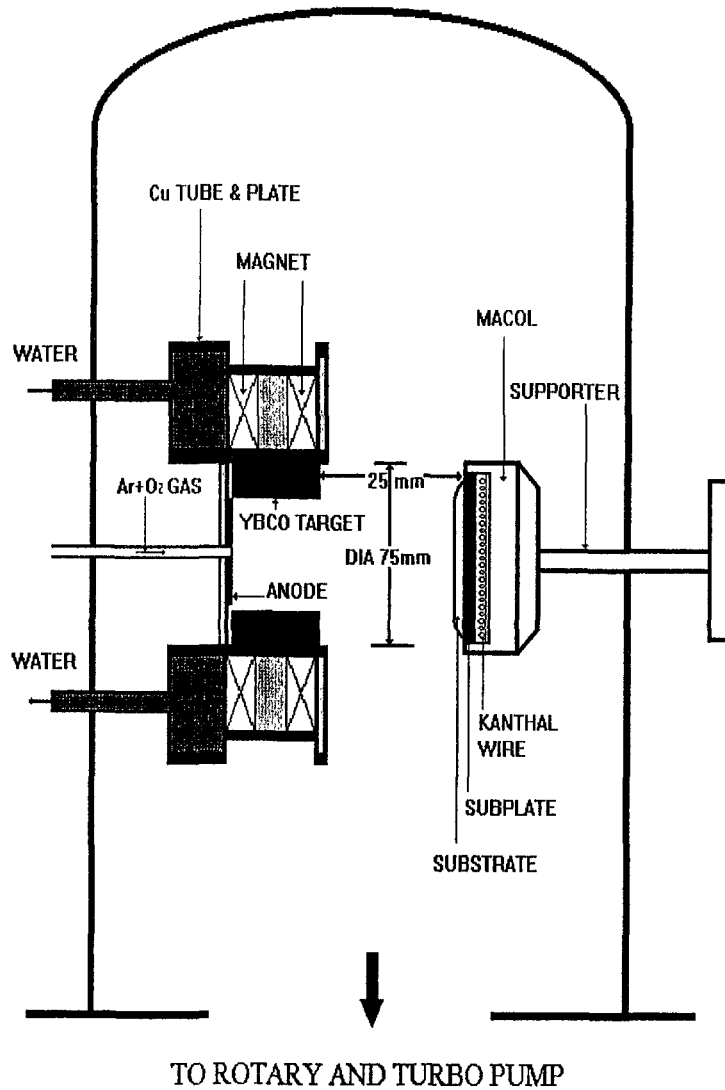


그림 3-5 : 대면적 YBCO 박막을 성장하기 위한 Hallow Cathode Sputtering 시스템의 개략도

(a)

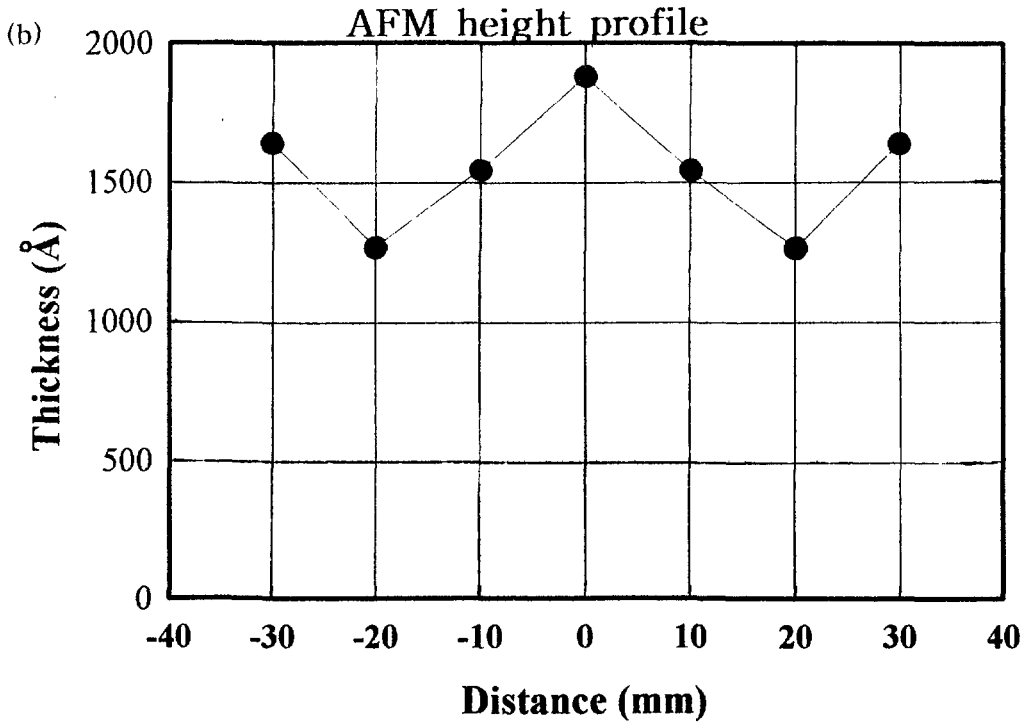
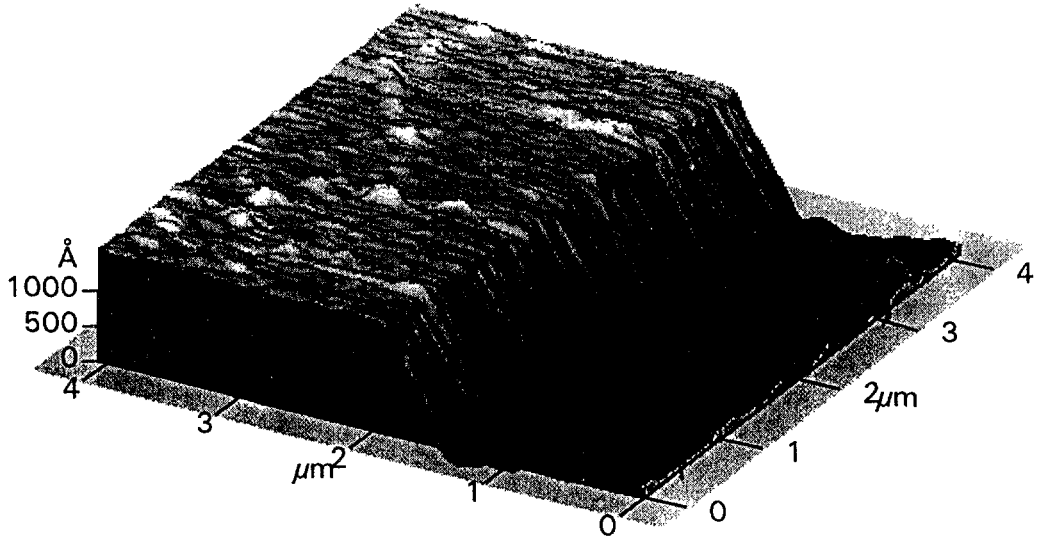
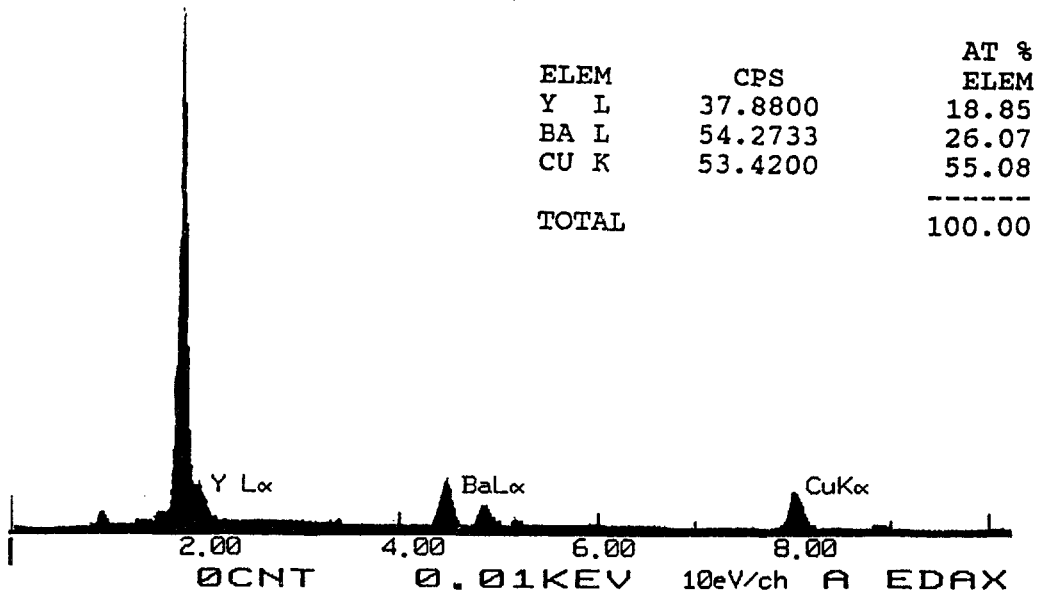


그림 3-6 : (a) 습식식각한 YBCO/Si 박막의 3차원 AFM 이미지.

(b) AFM height-profile로 측정된 YBCO 박막의 T-S거리에 따른 두께변화

(a)



(b)

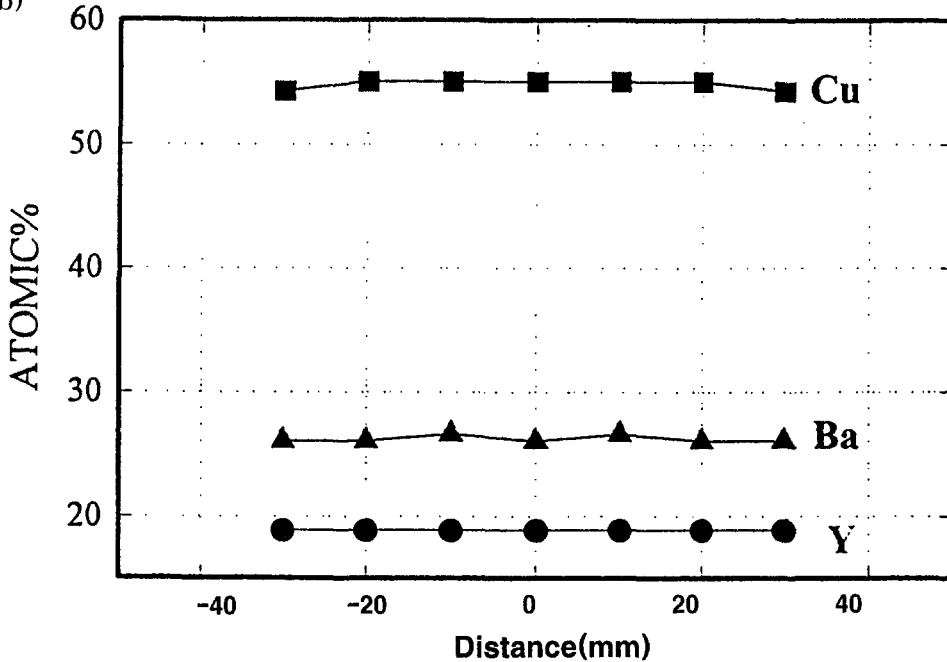
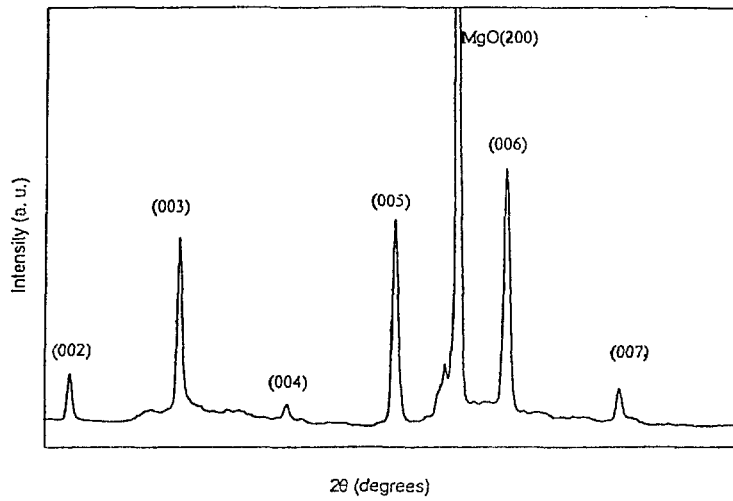


그림 3-7 : (a) YBCO/Si 박막의 성분비 분석을 위한 EDAX의 X-선 스펙트럼.
(b) EDAX로 조사된 YBCO/Si 박막의 T-S 거리에 대한 성분비.

(a)



(b)

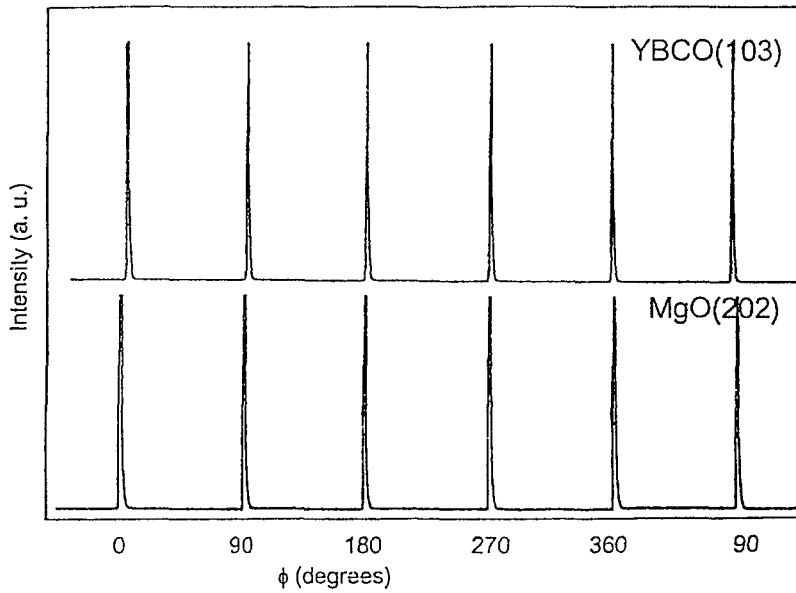


그림 3-8 : (a) YBCO/MgO 박막의 XRD 분석결과(2θ -scan).
(b) YBCO/MgO 박막의 XRD 분석결과(ϕ -scan).

Multi Image Presentation

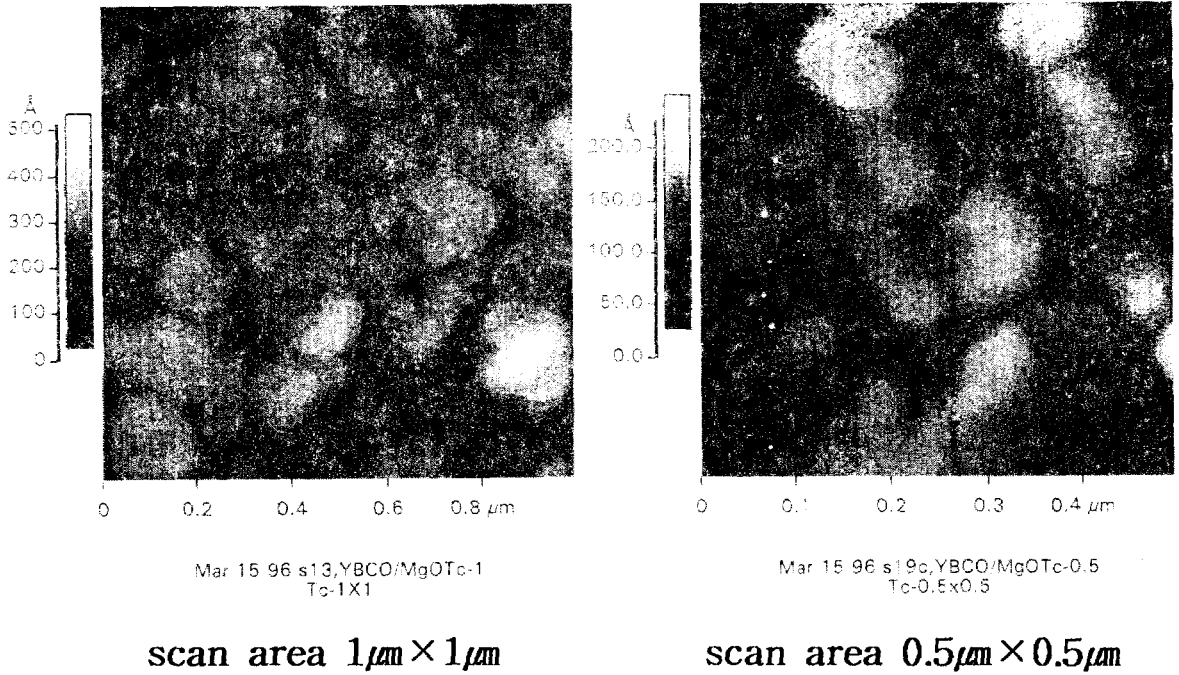


그림 3-9 : YBCO/MgO 박막의 AFM 표면 Morphology.

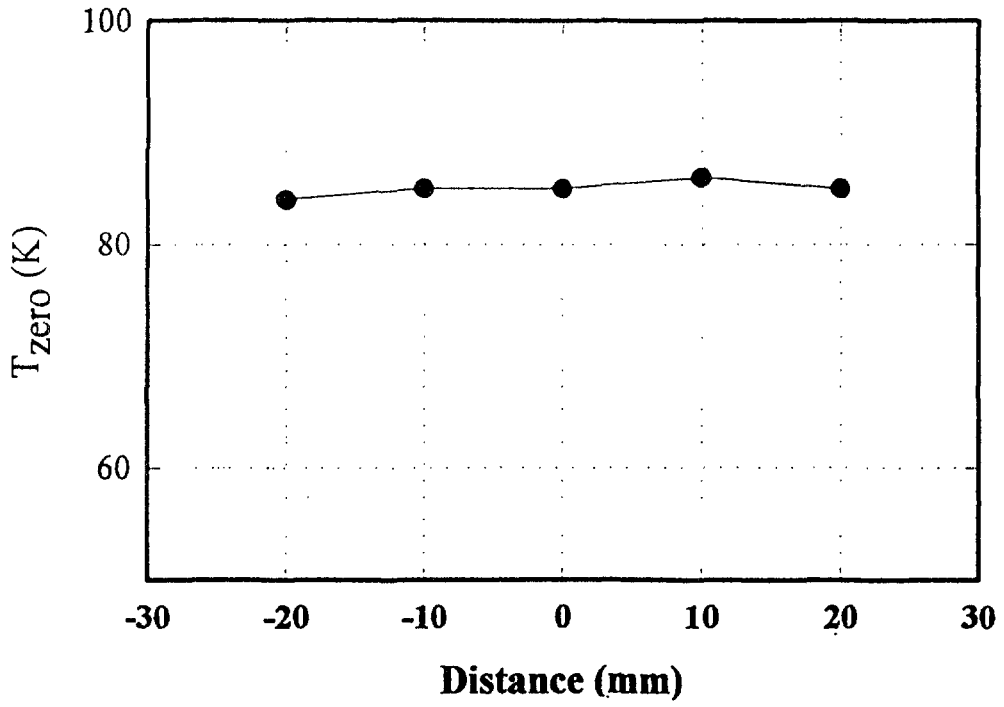


그림 3-10 : YBCO/MgO 박막의 T-S 거리에 따른 $T_c(\text{zero})$ 의 변화(R-T 곡선)

제 4 절 마이크로파용 고온초전도 멀티플렉서의 설계·구현

가. 마이크로파용 고온초전도 대역통과 필터의 설계·구현

일반적으로 대역통과 필터는 복소수 평면 상에서 극(pole)으로 표현되며, 마이크로파 共鳴結合(resonant coupling)을 일으키는 N-개의 공진기 구조로서 구성된다. 본 연구에서 새롭게 제안한 대역통과 필터는 고정된 $\lambda/4$ 길이(λ : 파장)의 선분을 갖는 공진기로서 구성된 종래의 구조와는 달리, 임의의 길이를 갖는 평행결합선 線分으로 구성하였다. 그림 4-1에는 임의길이 평행결합선 방식으로 설계한 (a) 2-극, (b) 4-極, 및 (c) 6-극 대역통과 필터의 회로패턴을 실었다. 사용된 MgO 기판의 크기는 10 mm x 10 mm x 0.5 mm (2-극 필터), 15 mm x 15 mm x 0.5 mm (4-극 및 6-극 필터)이다.

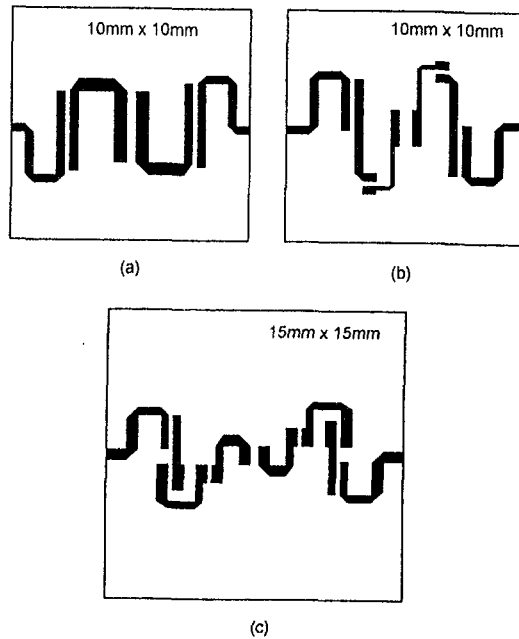


그림 4-1 : 임의길이 평행결합선 방식의 다극 대역통과 필터의 회로패턴들 : (a) 2-극, (b) 4-극 및 (c) 6-극 대역통과 필터(bandpass filter).

본 연구팀에서 새로이 설계하였던 필터구조와 기존의 平行結合線 方式(parallel coupled-line type : PCT)의 필터구조와 구별되는 큰 차이점은 마이크로파 결합

(coupling)에 직접적으로 영향을 주는 평행결합선의 길이와 결합폭(coupling gap)을 기존의 구조에 비하여 더 可變的으로 결정할 수가 있다는 것이다. 따라서 기판의 사용 면적(회로패턴을 담을 수 있는 실제면적)을 극대화 할 수 있기 때문에, 대역통과 필터용 기판의 크기를 줄일 수 있고 集積度를 높이는 것도 가능하다. 결국 대역통과 필터의 마이크로스트립 선로형 공진기 길이를 임의로 조절하고, 평행결합선(공진기) 간의 간격을 임의로 함으로써 주어진 기판 위에 극수(pole number)가 증가된 대역 통과 필터를 구현할 수도 있으며, 성장한 에피박막 위에 집적할 고온초전도 마이크로파 소자의 수효를 증가시킬 수 있으므로, 이러한 설계·구현 연구는 매우 중요하다. 그림 4-1에 보였듯이 평행결합선의 간격을 줄이면 마이크로파 신호 전송시 放射損失도 줄일 수 있고, 소자의 주파수 응답특성을 측정할 때는 소자의 주변환경(패키지: test jig)에 거의 의존하지 않아도 된다. 그리고 분포소자(distributed device)이므로 간격 ν 축소에 따른 상호간섭도 무시할 수 있다. 이러한 임의길이 평행결합선 방식의(arbitrary parallel coupled-line type : APCT) 고온초전도 대역통과 필터는 중심주파수가 12 GHz 이고(위성 및 이동통신 기지국용 부품으로 개발) 통과대역(pass band)에서는 맥류(ripple)가 거의 없도록 설계하였다.

나. 마이크로파용 고온초전도 다극 대역통과 필터의 주파수 응답특성

설계된 필터패턴은 고주파 설계시스템(SupercompactTM)을 이용하여 최적화 한 후, 이론적인 마이크로파 응답특성(산란계수 : S_{11} , S_{21} 등)도 살펴보았다. 최적설계한 2-극과 4-극 대역통과 필터(bandpass filter : BPF)의 경우, 중심주파수(f_0)에서 삽입손실은 0.1 dB 이하였으며, 반사손실은 각각 15 dB 와 18 dB 이상으로 좋았다. 통과대역의 대역폭은 2-극 과 4-극 필터에 대하여 각각 2.5 GHz(18%) 와 1.2 GHz(10%) 였다. 2-극과 4-극 대역통과 필터는 통과대역에서 삽입손실과 반사손실 곡선에서 맥류가 거의 예측되지 않았으나, 6-극 필터에서는 큰 맥류가 예상되었다. 그러나, 종전의 평행결합선 방식의 대역통과 필터와 마찬가지로 6-극 대역통과 필터는 극수가 적은 2-극과 4-극에 비하여 훨씬 향상된 스커트(skirt) 특성을 보여주었다. 그러나, 6-극 대역통과 필터는 향상된 스커트 특성 이외에 대역통과 필터로서의 고유특성이 우수한지 못하므로 재설계 및 전산시뮬을 계속하고 있다. 전산시뮬과 실제의 특성측정 결과에 의하면, 본 연구팀이 새롭게 설계한 임의길이를 갖는 평행결합선 방식의 다극 대역통과 필터는 4-극 BPF에서 가장 우수한 특성을 갖는다는 것을 알 수 있었다. 그림 4-2에는 Ag-doped YBCO/MgO 에피택셜 박막과 표준미세

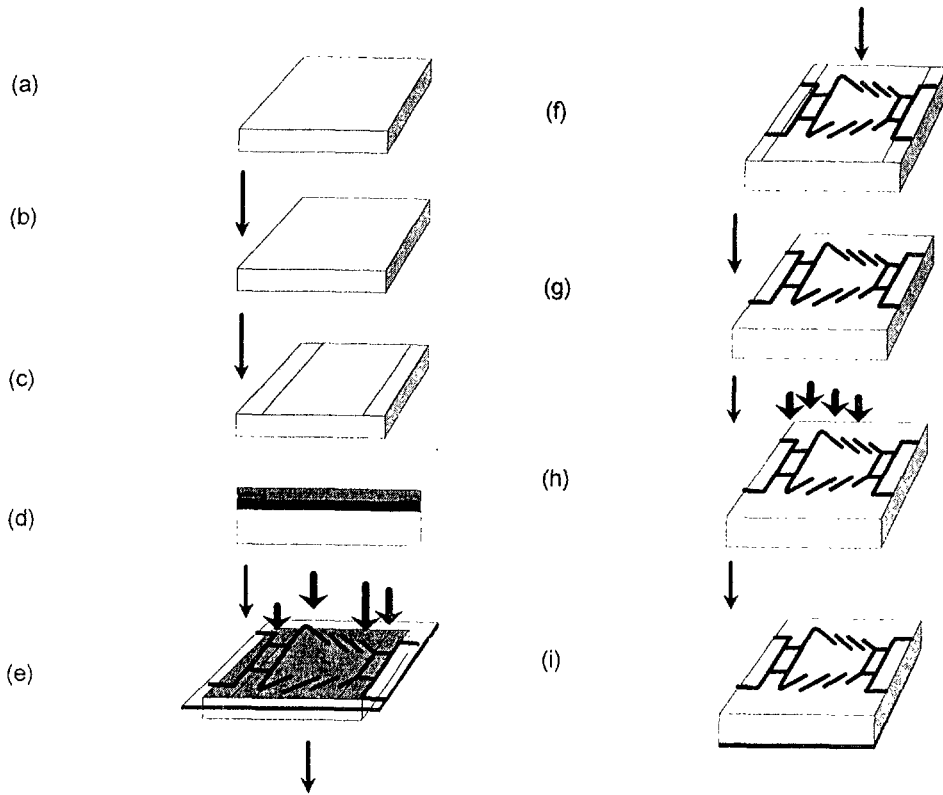


그림 4-2 : 고온초전도 마이크로파 소자들을 구현하는 공정흐름도(포토리소그래피).

형상화 공정(포토리소그래픽 공정 및 혼합 식각 공정)을 사용하여 최적설계한 필터를 구현하는 공정을 그리고 그림 4-3에는 $T=36\text{ K}$ 에서 측정된 임의길이의 평행결합선 방식의 4-극 대역통과 필터의 주파수 응답특성(삽입손실 S_{21} 과 반사 손실 S_{11})을 나타내었다. 측정된 중심주파수(f_0)는 11.5 GHz 였으며, 중심주파수에서의 삽입손실은 0.8 dB 이었다. 다만 이전의 4-극 대역통과 필터(PCT-BPF)에서와는 달리 신규구조 APCT-BPF의 반사손실 곡선에서는 4-극에 해당하는 공명현상(deep dip)이 관측되지 않았다. 이것은 극수에 대응하여 공명현상을 보이는 고정된 $\lambda/4$ 공진기(평행결합선)를 가지는 평행결합선 방식의(PCT) BPF의 주파수 응답특성과는 다른

현상들이다. 이와같이 임의길이 평행결합선 방식의(APCT) 다극 대역통과 필터에서 측정된 독특한 현상들은 평행결합선 자체와 평행결합선의 간격을 임의로 줄임에 따라, 공명(resonance)에 변화가 생겨 發現하였다고 판단된다. 그러나 고온초전도 4-극 APCT-BPF에서 측정된 스킨트(skirt) 특성은 전산시뮬 결과보다 훨씬 우수함을 알 수 있었다.

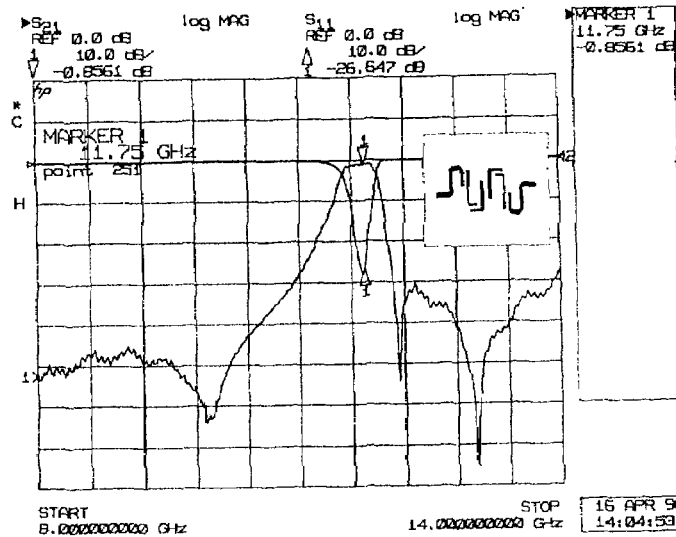


그림 4-3 : T= 77 K 이하에서 측정한, 임의길이 평행결합선 방식의 4-극 대역통과 필터의 마이크로파 응답특성(S_{11} , S_{21}).

다. 마이크로파용 평면형 멀티플렉서의 설계 · 구현 · 평가

차세대 마이크로파 통신을 겨냥한 분야로서 각광받는 분야가 바로 HTS-MMIC (고온초전도 모노리식 마이크로파 집적회로) 개발 분야인데, 고온초전도 에피택셜 박막으로 MMICs를 개발하기 위해서는 크기, 무게, 성능 등이 기존의 마이크로파 부품에 비해 우수하여야 하며, 전파고도 이용기술에 직접 활용되어야 한다. 이처럼, 통신용 서브시스템중 가장 중요한 것 중의 하나가 대용량, 고출력의 주파수 신호를 분할하거나 결합시킬 수 있는 역할을 하는 멀티플렉서(multiplexer)이다. 다수의 주파수를 포함하는 단일채널에서 원하는 특정 주파수를 선택하게 해주는 서브시스템이 듀플렉서(또는 단일채널 멀티플렉서임)이며, 이를 여러개 결합(집적)시키면 다채널 멀티플렉서가 만들어진다.

* **다중전송로(multiplexer)** : 여러 개의 회로가 단일 회선을 공동으로 이용하여 신호를 전하는데 필요한 중규모 집적회로. 즉 여러개의 입력선 중에서 어느 하나를 선택하여 출력선에 실어주는 기능을 수행하는 회로로서 일반적으로 $2n$ 개의 입력선과 n 개의 선택선 그리고 1개의 출력선으로 구성된다(한국통신기술협회 刊 : 정보통신용어사전, p224. 참조)<전송분야의 경우>.

* **다중전송로(multiplexer : MUX)** : 데이터 통신에서 여러 개의 데이터 전송 회선을 다중화하여 보다 고속의 데이터 회선을 구성하기 위한 장치이며 보통 멀티플렉싱 및 디멀티플렉싱의 두 기능이 있다. 구성으로는 동기화 기능, 다중화기능, 제어정보 전송기능 등이 있다.(한국통신기술협회 刊 : 정보통신용어사전, p225. 참조)<데이터통신 분야의 경우>.

멀티플렉서에 집적하는 방향성 대역통과 필터(directional BPFs)의 응용원리는 개념적으로는 간단하다. 특히, 동작시 발생하는 오류를 쉽게 해결할 수 있는 양호한 필터이지만, 이러한 대역통과 필터를 구성하는 공진기의 개수가 많아져 濾波機能을 제어하기 어렵다는 단점을 가진다. 따라서 방향성 대역통과 필터보다는 신호조정이 훨씬 용이하고, 마이크로파 응답특성을 향상시킬 수 있도록 마이크로스트립 선로 방식의 3-dB 하이브리드 결합기와 평행결합선 방식의 대역통과 필터를 집적하여 평면형 듀플렉서를 구현하고, 다시 이러한 듀플렉서들을 적절히 결합시켜(저손실형 rigid microwave cable을 이용함.) 다채널(multi-channel) 멀티플렉서를 개발하였다.

그림 4-4의 (a), (b)에는 마이크로파용 평면형 듀플렉서(duplexer)를 구성하는 분지형(branch-type) 3-dB 하이브리드 결합기와 평행결합선 방식의 2-극 대역통과 필터를 집적한 평면형 듀플렉서(planar duplexer)의 회로패턴을 실었다.

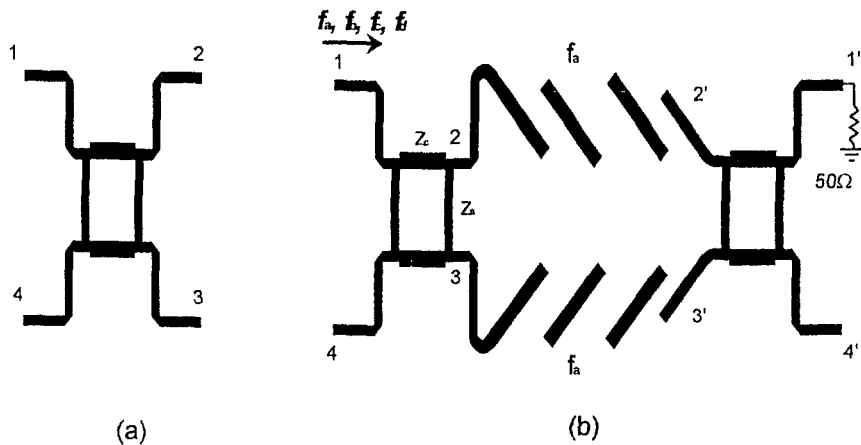


그림 4-4 : (a) 최적화된 분지형 3-dB 결합기와 (b) 평면형 듀플렉서의 회로도.

그림 4-5에는 上記한 회로패턴을 가진 단일채널 고온초전도 멀티플렉서(듀플렉서)의 전산모사 결과와 미세형상화 공정으로 구현한 멀티플렉서를 시험치구에 내장한 후, 측정된 저온 마이크로파 응답특성을 나타내었다. 측정결과는 전산모사를 행하여 얻은 결과와 1% 이내의 오차범위에서 잘 일치하였고, 특히 대역통과 필터에 의한 여파특성과 스퀘트 특성이 우수함을 알 수 있었다. 그리고 통과대역(passband)에서의 삽입손실이 1 dB 이하였는데, 이것은 기존의 금속(Au) 박막형 듀플렉서보다 훨씬 우수한 결과이며, 고온초전도 에피택셜 박막의 고유특성인 표면저항(R_s)과 자장 침투깊이(ξ)가 매우 작기 때문에 생겨난 당연한 결과로 판단하고 있다.

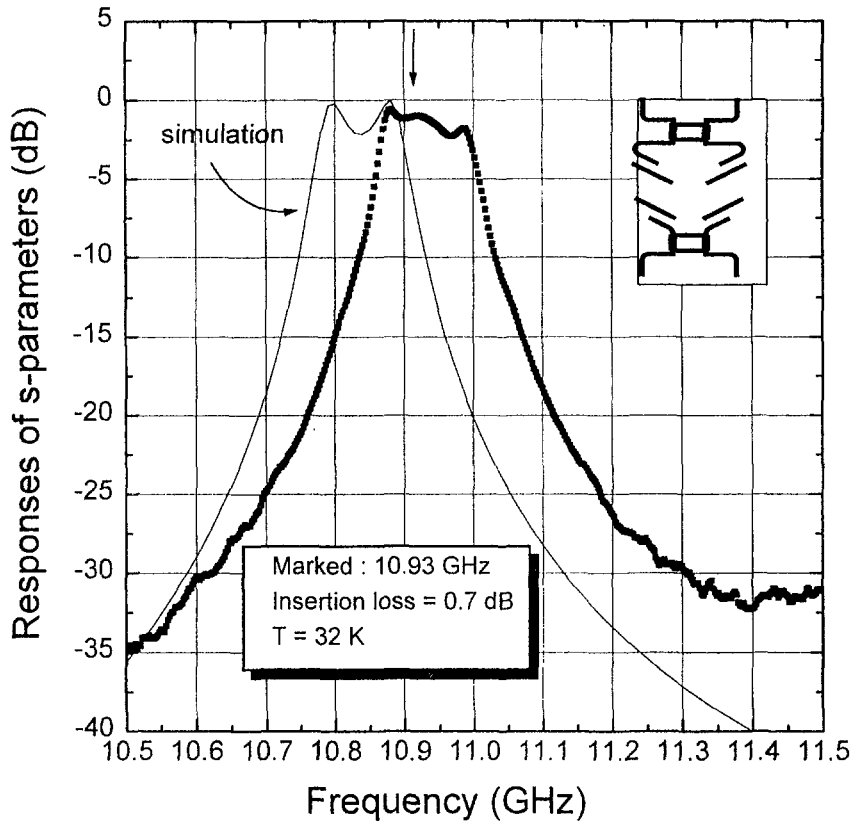


그림 4-5 : 평면형 고온초전도 듀플렉서의 마이크로파 응답특성(삽입한 그림은 최적 설계된 평면형 듀플렉서의 회로패턴임)

한편, 고온초전도 에피박막으로 제조한 마이크로파 소자는 매우 낮은 손실(loss)과 분산(dispersion) 때문에 손실없이 전력을 나누거나(電力分配器), 결합시킬 수 있

다(結合器). 이 중에서 4-포트 회로는 방향성 결합기(directional coupler)나 하이브리드(hybrid) 결합기에 주로 사용된다. 하이브리드 결합기는 보통 半電力(3-dB) 분배기를 기초로 설계되며, 出力端간에 90° (또는 180°)의 위상차(phase difference)를 갖는다. 따라서 위상차를 이용하여 신호를 결합하거나 상쇄시키는 기능을 발휘한다. 그림 4-6에 나타낸 연구결과물(실물사진 : 부품)은 마이크로파용 고온초전도 90° 하이브리드 결합기이며, 分岐線(branch-line, $\lambda/4$ 를 기본으로 함) 방식을 채택하고 출력단에서 90° 의 위상차를 갖도록 설계하였다. 그리고 본 결합기는 마이크로스트립 선로와 K-커백터를 사용하여 구현하였기 때문에 시스템에 바로 연결할 수 있다. RF 및 마이크로파 통신시스템에서 신호를 받고(受信) 또한 보내는(送信) 부분 중에서 안테나를 제외한 前端部(front-end)에는 성능이 우수한 각종 수동소자들(공진기, 결합기, 대역통과 필터 및 저역통과 필터 등 원천소자) 뿐만 아니라 서브시스템도 필요하다. 즉, 여러 가지의 주파수가 입력된(隣接周波數) 단일채널에서 원하는 주파수의 신호만을 선택할 수 있도록 해주는 集積形 핵심 서브시스템(통신부품)도 필요하다. 이러한 경우 자주 활용되는 마이크로파 핵심부품의 하나가 바로 듀플렉서이다.

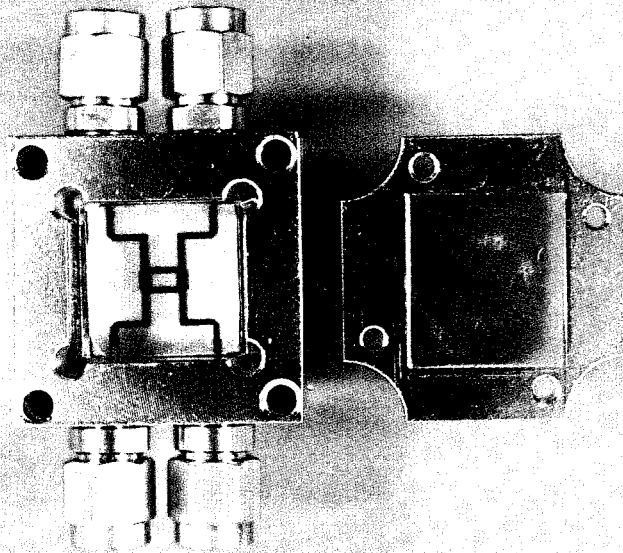


그림 4-6 : 마이크로파용 분지선 방식의 고온초전도 3-dB 하이브리드 결합기의 실물사진(3-성분 시험치구에 내장되어 있음).

그림 4-7에 나타낸 연구결과물(실물사진 : 부품)은 2개의 3-dB 하이브리드 결합기(coupler)와 2개의 2-극 대역통과 필터(bandpass filter)로 구성된 평면형 고온초전도 듀플렉서이다. 본 제품은 여러가지 신호중 중심주파수(f_0)가 10.9 GHz이고, 대역폭이 100 MHz인 주파수의 신호 만을 선택할 수 있게 고안되었으며, 위성통신이나 이동통신 基地局(base station)용 핵심부품으로 사용된다.

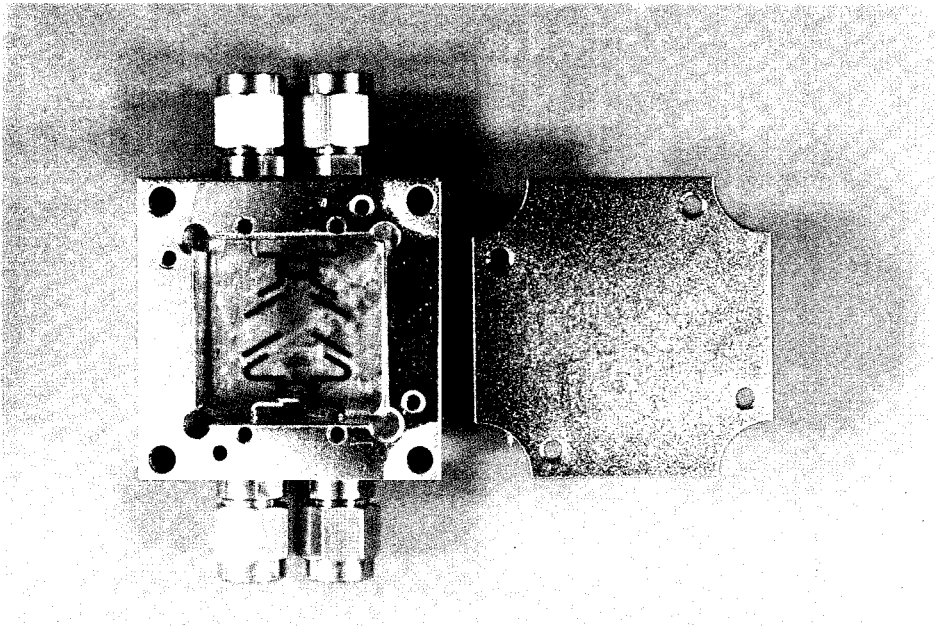


그림 4-7 : 평면형 고온초전도 듀플렉서의 실물사진(2개의 3-dB 하이브리드 결합기와 2개의 2-극 대역통과 필터로 구성됨).

고온초전도 에피박막으로 구현한 마이크로파 소자는 매우 낮은 손실과 낮은 열잡음(low thermal noise) 때문에 감도(sensitivity), 스펙트럼 순도(spectrum purity), 사용하는 통신시스템의 동역학적 활용 범위(range) 등을 향상시킬 수 있다. 따라서 ESM(electronic support measures) 및 레이더 시스템에 고온초전도 부품(서브시스템)을 사용할 경우, 성능, 크기 및 가격 등에서 큰 이점을 가질 수 있다. 특히, ESM 시스템을 구성하는 핵심부분을 고온초전도 부품으로 대체할 경우 가능한 부품으로는 遅延線(delay line) 소자, 필터뱅크(filter bank 또는 multiplexers), 轉換用 連動器(switched preselector) 등이다. 이들 중에서 단일채널에 여러 가지 인접주파수의

신호를 받아 들인 후, 협대역의 주파수를 가진 신호를 여러개의 채널로 분리할 수 있는 기능을 하는 통신부품이 바로 필터뱅크(멀티플렉서) 또는 다중 채널라이저이다. 이러한 고온초전도 멀티플렉서는 위성통신 및 이동통신 기지국의 핵심부품으로 사용할 수 있으며 특히, 인접주파수 사용이 많아 간섭이 문제가 되는 도심 기지국의 해결책으로 부상하고 있다. 그림 4-8의 (a)와 (b)는 본 연구팀의 결과물(실물사진 : 부품)인데, 그림에서와 같이 2개의 평면형 듀플렉서를 강체 케이블(rigid cable)로 연결시켜 구현한 2-채널용 멀티플렉서인데, (b)의 멀티플렉서는 성능향상을 도모하기 위하여 low-loss rigid cable을 사용한 경우이다.

현재까지 사용된 듀플렉서나 멀티플렉서의 기본이 되는 고온초전도 YBCO 에피박막의 크기는 20mm x 20mm x 0.5mm이다. 이러한 경우 생기는 문제점은 소형, 경량, 고성능을 기대하기가 어렵다. 결국 대면적의 박막을 사용할 경우 다중채널의 멀티플렉서가 가능하다. 그림 4-9는 이러한 요구사항을 만족시킬 수 있는 원칩형 다중채널 멀티플렉서의 개념도이다. 이 경우 필요한 고온초전도 박막의 크기는 30mm x 30mm x 0.5mm이며, 대면적 박막 성장시스템과 대면적 건식 식각시스템을 구축할 경우 충분히 가능하며, 많은 손실을 줄일 수 있어 고성능이 가능하다.

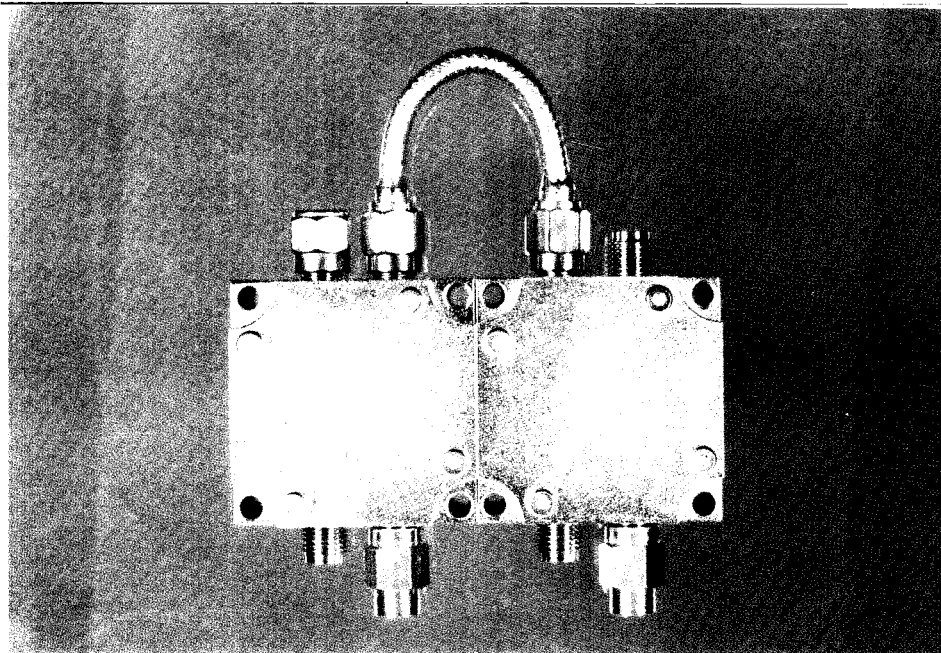


그림 4-8 : (a) 평면형 고온초전도 멀티플렉서의 실물사진(2개의 듀플렉서를 강체 케이블로 연결하여 구현함 : 첫번째 모형이며 내장된 회로는 (b)와 동일함).

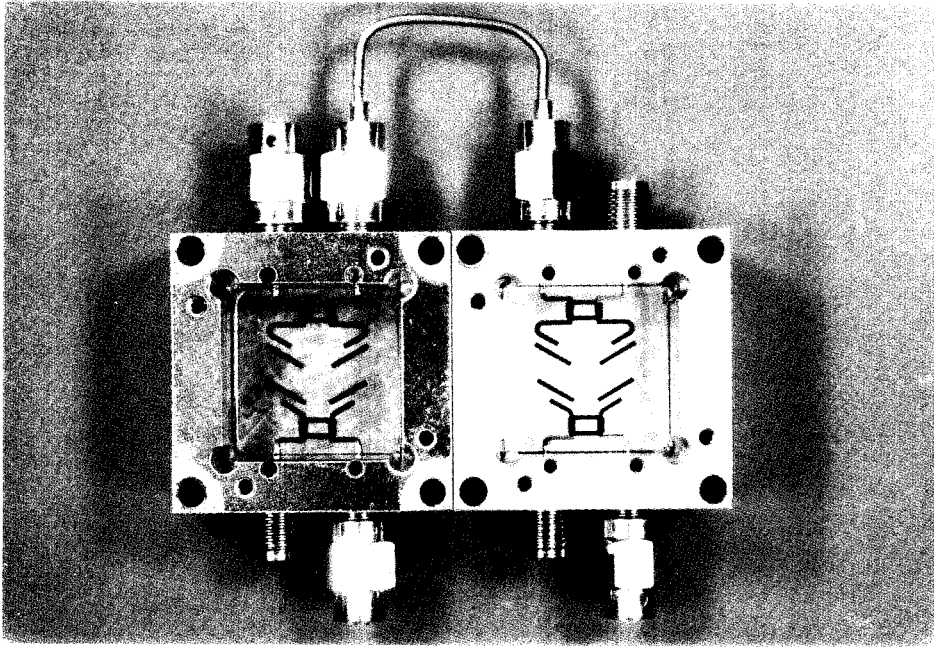


그림 4-8 : (b) 평면형 고온초전도 멀티플렉서의 실물사진(2개의 듀플렉서를 강체 케이블로 연결하여 구현함 : 성능을 향상시킨 모형).

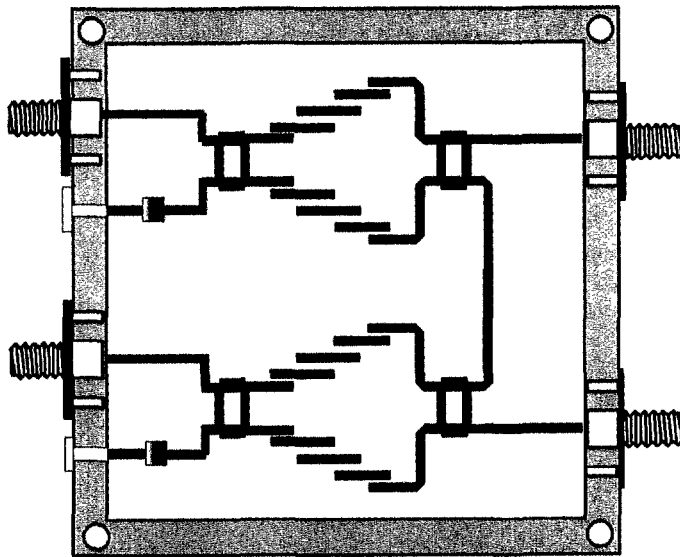


그림 4-9 : 원칩형 고온초전도 멀티플렉서의 개념도.

제 3 장

결 론

제 3 장 결 론

1. 고온초전도 박막(에피택셜, 대면적)의 성장 및 물성분석.

- 1) PLD법에 의한 YBCO/MgO(4cm², 89 K급) 에피택셜 박막성장하고 물성평가를 통해 양질임을 확인함.
- 2) DC-Hallow Cathode Sputtering 법에 의해 대면적(2-인치급) YBCO/MgO 에피택셜 박막을 성장하고 제반 물성을 측정 --> 특성향상 중.

2. 고온초전도 마이크로파 소자(서브시스템)의 설계 · 구현 · 평가.

- 1) 마이크로스트립 선로形(50Ω線) 3-dB 혼성결합기(coupler)의 설계하고 구현하였으며 평가함.
- 2) 임의길이 평행결합선 방식의 다극(2-극, 4-극, 6-극) 대역통과 필터를 세계최초로 설계하고 포토리소그래피 공정으로 구현함. 4-극에서 가장 우수한 특성을 얻었음(삽입손실이 0.2 dB 이하임).
- 3) 이동 및 위성통신 지구국용 고온초전도 평면형 서브시스템인 듀플렉서와 2-채널 멀티플렉서(다중전송로)를 설계하고 구현함(20mm x 20mm x 0.5mm). 그리고 특성을 평가를 통해 1 dB이하의 손실을 얻었음.

3. 저온 마이크로파 특성 평가용 시험지구(test-jig)의 설계 및 제작.

- 1) 마이크로파 대역통과 필터용 패키지(2-포트형 3-성분 시험지구(test-jig)를 자체적으로 개발함. --> 특성도 우수함을 확인함.
- 2) 마이크로파용 3-dB 결합기, 듀플렉서, 멀티플렉서용 패키지(4-포트형 3-성분 시험지구)를 자체적으로 개발함. --> 특성도 우수함을 확인함.

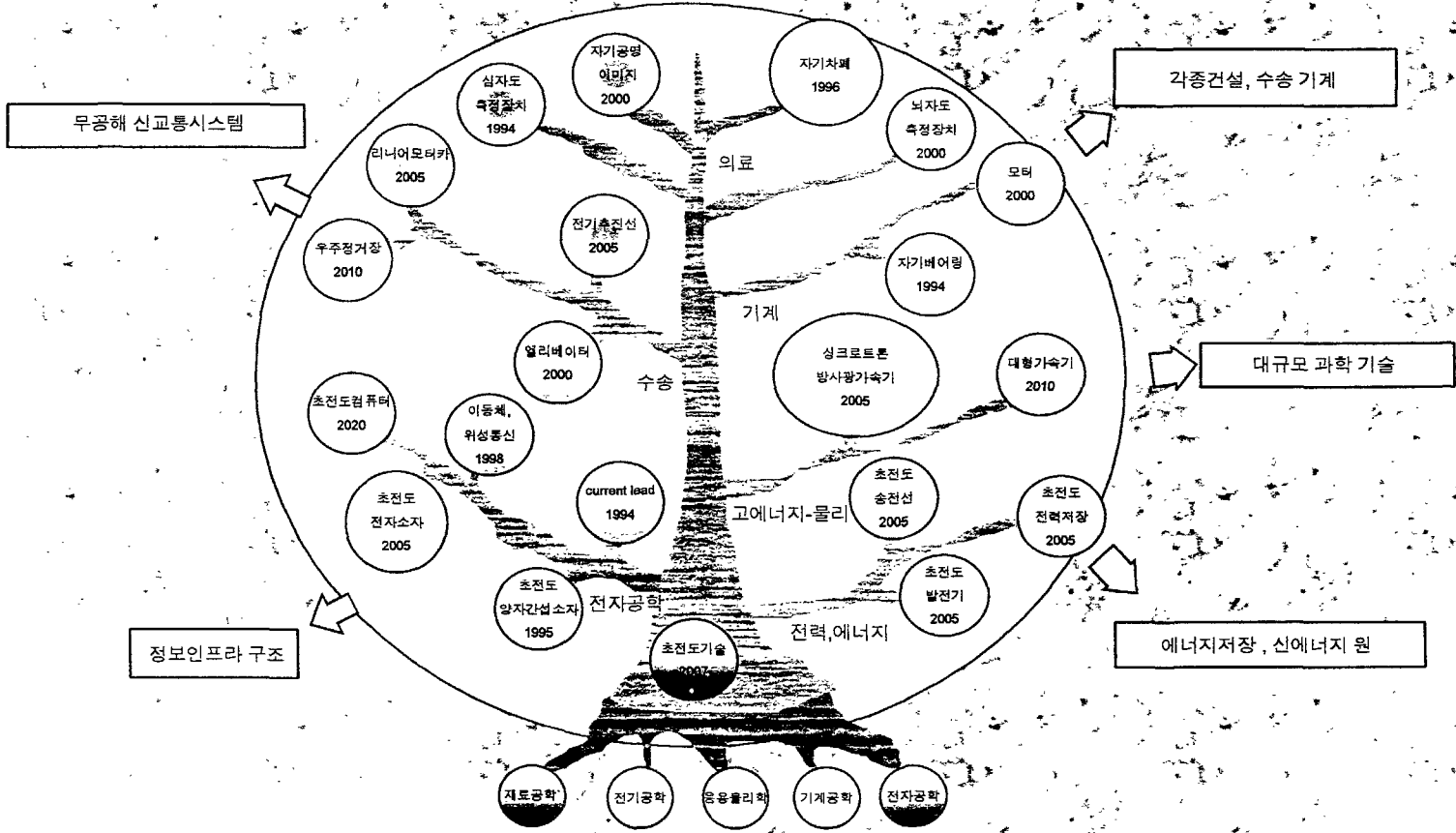
4. 고온초전도 마이크로파 소자제조 및 측정시스템의 보완.

- 1) 고온초전도 박막 성장용 멀티 타겟 구동체와 기관 가열용 블록을 설계/제작함.
- 2) ECR ion-milling(건식식각용) 장비의 캐비티에 부착하는 그리드를 개량함. --> 이전보다 식각장비의 성능도 좋아지고 안정됨을 확인함.

부 록

1. 연구개발 결과의 활용
2. 연구목표의 달성도
3. 국외저널 및 국내저널 논문(Proceedings 포함)

고도복지사회



고온초전도 응용기술과 산업계에서의 적용 가능 시기

연구개발결과의 활용

가. 추가연구의 필요성

고온초전도 에피박막으로 구현한 마이크로파 통신부품을 복합적인 신호처리 및 신호전송 시스템에 활용하고, 계측장비·설계장비의 활용도를 극대화시켜 성능이 보다 향상된 제품을 개발하기 위해서는 다음의 추가연구가 요구된다.

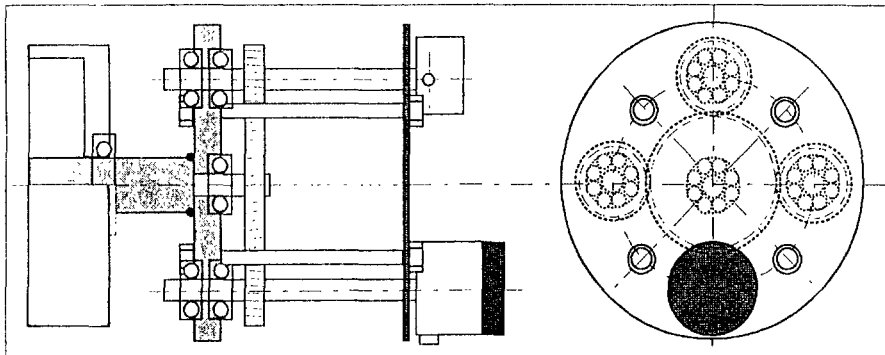
- 새로운 구조의 고온초전도 다중채널 멀티플렉서의 개발.
- 초소형 cryocooler의 독자적인 개발.
- 새로운 형태의 고온초전도-반도체 하이브리드 집적소자의 개발.

나. 타연구에의 응용

- 하이브리드 집적소자 및 이종접합구조의 마이크로파 소자 개발

다. 기업화 추진방향

- 대면적 에피박막의 성장과 그 제품군(에피기판).
- 고성능·고감도의 고온초전도 초고주파 통신부품.
- 제조장비(부품)의 국산화(예 : 멀티타깃 구동체(그림 1) 등).



(그림 1) : 본 연구팀에서 개발한 다수의 단일타깃 원판으로 구성된 멀티타깃 구동체(CAROSEL)의 헤드부분.

라. 기술이전내용

- 대면적 산화물 에피박막의 성장기술과 박막처리 기술.
- 초고주파 통신부품의 설계 및 제조기술.
- 제조장비(부품)의 국산화 기술(타중타깃 구동체, 기판 가열장치, 식각 장비의 핵심부품 등).

연구목표의 달성도

연구개발목표	연구개발실적
<p>1. 고온초전도 박막(에피택셜, 대면적, 다중 구조)의 성장 및 물성분석.</p> <p>★ 펄스 레이저 증착법에 의한 고온초전도 YBCO/MgO 에피택셜 박막의 성장.</p> <p>★ Hallow Cathod 스퍼터링법에 의한 고온 초전도 YBCO/MgO 대면적 박막 성장.</p> <p>★ 고온초전도 에피박막의 특성평가.</p>	<p>1. 고온초전도 박막(에피택셜, 대면적, 다중 구조)의 성장 및 물성분석.</p> <p>★ PLD법에 의한 YBCO/MgO(4cm², 89 K 급) 에피택셜 박막성장 및 물성평가.</p> <p>★ DC(Hallow Cathod) Sputtering방법에 의한 대면적(2-인치급) YBCO/MgO 에피택셜 박막성장 및 물성측정.</p>
<p>2. 고온초전도 마이크로파 소자/서브시스템의 설계, 구현, 평가.</p> <p>◆ 마이크로파 3-dB hybrid coupler(혼성 결합기)의 설계 및 구현.</p> <p>◆ 평행결합선 방식의 다극 대역통과 필터의 설계, 구현 및 평가.</p> <p>◆ 3-dB 하이브리드 결합기와 대역통과 필터를 결합시킨 듀플렉서와 2-채널 멀티플렉서의 설계/구현/평가.</p> <p>◆ 마이크로파용 저잡음 증폭기(LNA)의 설계 및 마스크(회로원판)의 제작.</p>	<p>2. 고온초전도 마이크로파 소자/서브시스템의 설계, 구현, 평가.</p> <p>◆ 마이크로스트립선로形(50Ω線) 3-dB 혼성 결합기(coupler)의 설계/구현/평가.</p> <p>◆ 임의길이의 평행결합선 방식의 다극(2-, 4-, 6-극) 대역통과 필터의 구현/평가.</p> <p>◆ 마이크로파용 고온초전도 서브시스템의 설계/구현/평가 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 평면형 마이크로파 듀플렉서의 평가. - 2-채널 멀티플렉서의 설계/구현/평가. <p>◆ 마이크로파 저잡음 증폭기(LNA) 구현용 마스크(회로원판)의 제작.</p>
<p>3. 저온 마이크로파 특성평 가용 시험치구의 설계 및 제작.</p> <p>■ 마이크로파 대역통과 필터용 패키지 : 2-포트형(port type) 시험치구(test-jig).</p> <p>■ 마이크로파용 3-dB 하이브리드 결합기, 듀플렉서, 멀티플렉서용 패키지 : 4-포트 시험치구.</p>	<p>3. 저온 마이크로파 특성 평가용 시험치구 (test-jig)의 설계 및 제작.</p> <p>■ 마이크로파 대역통과 필터용 패키지 : 2-포트형 시험치구(test-jig).</p> <p>■ 마이크로파용 3-dB 결합기, 듀플렉서 멀티플렉서용 패키지 : 4-포트 시험치구.</p> <p>■ 3-성분 형태 및 K-커넥터 부착.</p>
	<p>4. 고온초전도 마이크로파 소자제조 및 측정시스템의 보완.</p> <p>▲ 고온초전도 박막성장용 멀티타겟 구동체와 기판 가열용 블록의 설계/제작.</p> <p>▲ ECR ion-milling(건식식각용) 장비의 캐비티에 부착하는 그리드의 개량.</p>

Microwave Bandpass Filters with Closed Loop Resonators and Coupled Lines Using YBCO Thin Films

Y. S. Ha^a, S. K. Han^b, K. Y. Kang^b, S. S. Lee^c, D. Ahn^d, Y. W. Park^a

^a Dept. of Physics and Condensed Matter Research Institute, Seoul National Univ. Seoul 151-742, Korea

^b Reserch Dept, ETRI, Taejon 305-600, Korea

^c Dept. of Physics, Sangji Univ. Wonjoo 220-130, Korea

^d Dept. of Electronics, Soon Chun-Hyang Univ. Onyang 336-600, Korea

We report the characteristics of a high- T_c superconducting (HTS) 4-pole bandpass filter (BPF) with center frequency of 3.9 GHz. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ films were grown on MgO substrate ($20 \times 20 \times 5 \text{ mm}^3$) by using a hollow cathode sputtering method. To improve the stopband characteristics and to reduce the physical size of a device pattern, we designed a new type microwave bandpass filter consisting of closed-loop resonators and parallel coupled-lines. In resonator structure and in connections between input/output ports and resonators, the stepped impedance lines and the microstrip coupled-lines are used, respectively. The measured microwave responses of HTS 4-pole bandpass filters were in a good agreement with the simulation result except a small shift of center frequency.

1. Introduction

Applications of HTS to microwave passive devices have advanced to commercialization over research stage^[1]. Especially, HTS microwave subsystem that can be used at the base-station of personal cellular communication network is promising. The subsystem consists of many element devices, but the size of the available HTS film is actually limited. It is desirable to reduce the physical size of a device to the extent of which the optimum performance is allowed. We designed a band pass filter consisting of the closed loop resonators which show considerably high Q-value and low radiation loss. The designed center frequency and bandwidth were 3.9 GHz and 140 MHz, respectively.

2. Experiment

YBCO films are grown on MgO substrate ($20 \times 20 \times 0.5 \text{ mm}^3$) by using the hollow cathode sputtering method. Film thickness was about 3000 \AA as measured by an α -step profilometer. We deposited Au/Ti films on the top of YBCO/MgO to reduce the contact resistance between electrodes and K-connectors. To fabricate HTS filter, we carried out a standard photolithographic and wet etching process using

saturated EDTA aqueous solution followed by Ar⁺ ECR-ion milling. Finally, we deposited Ag/Ti films on the back side of substrate for constructing a ground plane.

To measure the microwave responses of HTS filter, we placed the filter into a test-fixture and positioned on the head finger of measurement system consisting of a vector network analyzer (HP8510C) and a cryogenic system (RMC-LTS II).

3. Results and discussion

Figure 1 shows the pattern of bandpass filter using two closed loop resonators and coupled lines. We calculated the values of components in lumped element form and reconstructed this circuit using J-inverter.

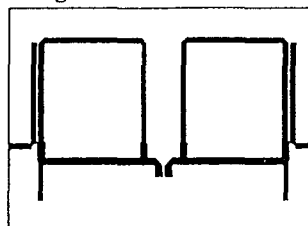


Fig.1 A pattern of bandpass filter with closed loop resonators and coupled lines (MgO substrate of $20 \times 20 \times 0.5 \text{ mm}^3$)

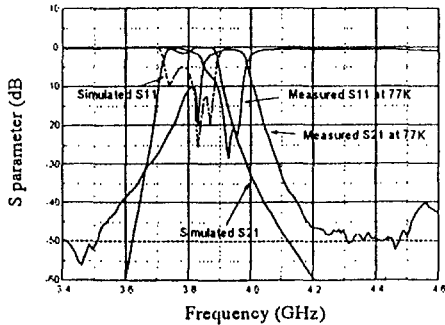


Fig.2 The simulation data and measured data at 77K.

Using Norton equivalent circuit and Π -type equivalent circuit, we transformed this circuits into a distributed circuit with loop resonator and coupled lines^[3]. In analysis of closed loop resonator, we used the network analytical method on the basis of TEM mode. Simulated responses were obtained using SupercompactTM.

Figure 2 shows the simulation results and measured responses of the device at $T=77\text{K}$. We obtained center frequency (f_0) was 3.92 GHz, and the pass band loss was 0.42 dB, the band width of 140 MHz, and skirt selectivity of about 200 dB/GHz. The measured result were in good agreement with the simulation. There was a slight shift of the center frequency toward up band by 100 MHz.

From the measured S_{21} data, we could find a dip around 3.82 GHz in Figure 2. To check the origin of dip, we simulated our pattern by sweeping the values of components in our filter to the extent more than fabrication error involved, but no dip was resulted. Package resonance was excluded because its high value of 40GHz. In simulation, it must be considered that relatively near component coupling not included in the current calculation could contribute. Also, the dip could be resulted from incomplete coupling between adjacent resonances. The origin of the dip is under study.

Figure 3 shows the change of S-parameters at various temperature. In this graph we can observe the typical character of bandpass filter as the temperature decrease below the superconducting transition point ($T_c = 90\text{K}$).

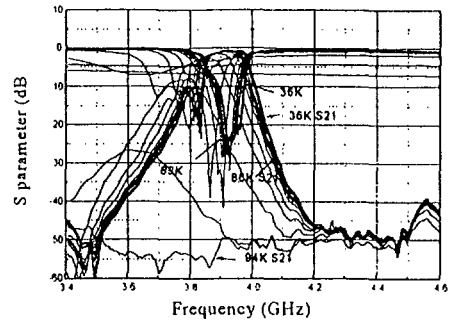


Fig.3 Measured S-parameters at various temperature.

We can observe a very rapid change of S-parameter around T_c , but find little change from the temperature of a few Kelvin lower than T_c . This phenomena is believed to correspond to a change in penetration depth of the superconductor which shows a rapid variation at the transition temperature and a little change below the transition temperature. Since the kinetic inductance decreases as temperature decreases, we believe that the reduced inductance of the loop makes resonance frequency (f_0) increase.

In summary, for the first time, we developed a HTS BPF consisting of closed loops and coupled lines based on microwave circuit design. We observed that our filter has 3.9 GHz center frequency and low insertion loss ($\sim 0.42\text{ dB}$) and 200 dB/GHz skirt selectivity. From T_c down to 36 K, we found that the microwave characteristics of HTS filter underwent little change.

Acknowledgement

This work was partially supported by the Ministry of Science and Technology through KRIS, Korea.

References

- [1] Zhi-Yuan Shen, "High-Temperature Superconducting Microwave Circuits", Artech House (1995).
- [2] Dah Ahn, Jong-Sik Lim, Kwang-Yong Kang, IEEE MTT-S'96 digest, pp1643-1646. (1996)

Characteristics of High Power Capability for High Temperature Superconducting Microwave Multiplexer

Seok Kil Han, Yeon-Su Ha, Jeha Kim, and Kwang-Yong Kang

Research Laboratory, ETRI, P.O. BOX 106, Taejon, 305-600, South Korea

ABSTRACT

A high temperature superconducting (HTS) multiplexer consisting of two branch line hybrids and two identical parallels coupled line type bandpass filters was fabricated with a center frequency of 10.9 GHz and a bandwidth of 100 MHz. We used single sided $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.6}$ (YBCO) epitaxial thin film on MgO substrates prepared by using *in situ* pulsed laser deposition. Electric connection between adjacent multiplexers was easily done with a microstrip transmission line at the terminations so that the size and weight of the multiplexer could be significantly reduced. The multiplexer showed approximately 0.8 dB insertion loss and 100 MHz bandwidth in a range of -10 dBm to 30 dBm. We observed the third order intercept at 94 dBm and the fifth order intercept point at 86 dBm by using intermodulation distortion (IMD) measurements at $T = 80$ K. Our results demonstrate the possibility of realizing a narrow band HTS multiplexer for high performance.

1. INTRODUCTION

High temperature superconducting (HTS) passive microwave devices have drawn much attention because of significantly lower microwave surface resistance in HTS thin films than those of normal metals that have been used long as essential materials for conventional microwave components [1-2]. In particular, the insertion losses (IL) of HTS microstrip type filter, antenna, and multiplexer were found to be much lower than those of conventional copper devices.

The passive microwave device is a very important

component for microwave communication system as well as a radar and an electronic warfare system. Among them, a microstrip type multiplexer plays a key role as a signal channelizer in a frequency domain. It consists of a set of bandpass filters with different but nearby frequency passing bands. A function of multiplexer is to sort out different frequency components from the input signals. In order to put more channels into a given frequency band, the bandpass filters are required to have a narrow bandwidth, a low inband insertion loss, a high offband rejection and a very sharp skirt property. A multiplexer made of HTS thin films can satisfy sufficiently the above requirements and can be an attractive alternate to much bulkier conventional one [3].

In this paper, we report the fabrication of the HTS multiplexer, which has a very high microwave power handling capability in the microwave range.

2. EXPERIMENTAL

We prepared $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.6}$ (YBCO) thin films by using *in situ* pulsed laser deposition (PLD) [4]. The films were grown under oxygen atmosphere of 200 mTorr at the growth temperature of 790 °C were annealed at the temperature of 550 °C for 30 min. A HTS multiplexer

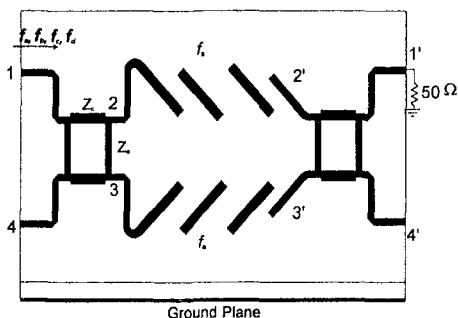


Fig. 1. The layout of optimally designed pattern for the HTS multiplexer.

was patterned by using a standard photolithographic process [4]. Prior to etching, we deposited Au(300 nm)/Ti(10 nm) bilayer on the edges of YBCO/MgO film to form contact pads with K-connectors for microwave measurements. Top of the Au/Ti/YBCO trilayer was coated with a photoresist (AZ5214E) of 1.4 μm thick. The contact pads of a Au/Ti bilayer were formed by a single etching process using an iodine mixture gold etchant. YBCO etching was carried out by using both ethylene diamine tetric acid(EDTA) and ECR Ar-ion milling. Finally, we deposited a layer of Ti(10 nm)/Ag(2 μm) film to form a ground plane on the back side of MgO substrate.[4]

3. DESIGN AND FABRICATION

Fig. 1 shows the designed pattern of a HTS multiplexer composed of two bandpass filters and two hybrid couplers [5]. For designing filters effectively, we used the insertion loss method, in which the amplitude and phase of an electromagnetic signal were manipulated easily both in the passband and in the stopband because of a high quality factor of HTS film. We introduced the 2-pole bandpass filters in the multiplexer design which were composed of parallel coupled-line resonators with a $\lambda/4$ line length.

The HTS bandpass filters were designed to have a strong coupling between the first and the second resonators so that provided a sharp offband rejection to improve the isolations. The 2 pole bandpass filters had a center frequency of 10.8 GHz and a bandwidth of 100 MHz.

The hybrid coupler is one of the fundamental components used in the microwave circuits such as balanced amplifiers, mixers, power divider and combiners. In general, a coupler is a 4-port device with two ports being mutually decoupled against the other two ports. We designed a branch line type coupler whose coupling value is 3 dB. The hybrid coupler is good for the DC continuity between all the ports as well as the high power handling capability. The length of shunting branch arm was represented in terms of admittance $\lambda/4$ line length for the physical and electrical construction. As shown in Fig. 1, the hybrid coupler had two sets of arms with different line widths and different impedances. For a 50 Ω coupler, the characteristic impedances of the microstrip coupler are $Z_c = 35.35 \Omega$ and $Z_a = 50 \Omega$, where Z_c is shunt branch impedance and Z_a is a transmission branch impedance.

When microwave power(P_1) is supplied to port 1, a standing wave is generated through the branch ring with total circumference of λ . This standing wave makes the mismatch between Z_a and Z_c . Therefore, the $\lambda/4$ section between the ports 1 and port 2 with impedance Z_a acts as an impedance inverter. The phase difference between the port 1 and the port 2 is 90° .

The output power between the port 2 and the port 3 becomes to $P_1/2$. The output power of the port 4 is zero for out of phase. If the bandpass filters and 3 dB hybrid couplers are optimized, the next step is link them together to form a multiplexer. Our microwave HTS multiplexer was fit into MgO substrates of 20 mm x 20 mm x 0.5 mm.

The HTS multiplexer is optimally designed to have twin bandpass filters called as a contiguous design. In the simulation of using the SupercompactTM software, we assumed that the microstrip lines had infinite conductivity (a perfect conductor) and the system impedance was 50 Ω using a dielectric constant ($\epsilon_r = 9.88$) of MgO substrate [6]. The simulation results were a center frequency of 10.8 GHz, a bandwidth of 100 MHz, and an inband insertion loss of 0.5 dB.

4. RESULTS AND DISCUSSION

Fig. 2 shows the measured and simulated responses of $S_{4,1}$ parameter of the HTS multiplexer. The measured results from the port 1 to the port 4' exhibited a center frequency of 10.9 GHz, a bandwidth of 100 MHz, and a minimum insertion loss of 0.8 dB, respectively. Fig. 3 is the microwave transmission properties from the port 1 to the port 4 of the multiplexer.

Fig. 3(a) and Fig. 3 (b) are the measured and simulation data, respectively. These measured frequency responses

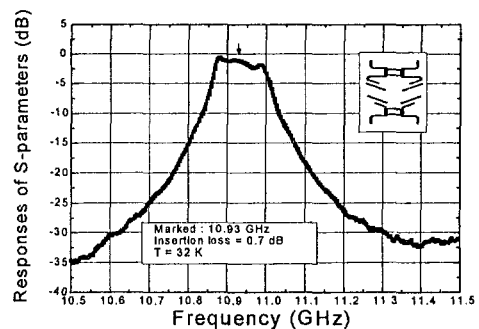


Fig. 2. The measured and simulated responses of $S_{4,1}$ parameter of the HTS microstrip multiplexer.

agreed well with the simulation within the error ratio($\Delta f/f_c$) of less than 1 %. As shown in Fig. 3 (a) and (b), the multiplexer revealed a dip at 10.9 GHz in a broad passband due to the phase difference of a hybrid coupler and two identical bandpass filters. For example, if four frequencies $f_a, f_b, f_c,$ and f_d are applied at the port 1, the energy at frequency f_a is divided equally between the two side arms of the hybrid coupler on the left, they pass through the two bandpass filters with the center frequency of f_a and a phase relation of the two couplers, the signals are canceled to zero at port 3' because of out of phase, and all of the energy at frequency f_a , emerges from the port 4'. Meanwhile, the other frequencies $f_b, f_c,$ and f_d are reflected by the bandpass filters.

For practical microwave application, it is very important to know the power handling capability of HTS materials. Unlike normal metals, HTS materials show

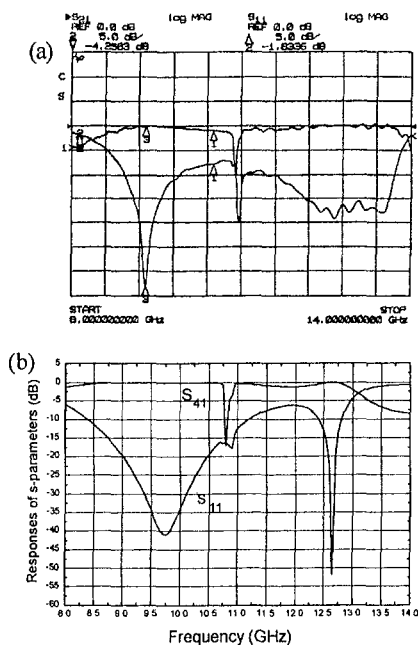


Fig. 3. The microwave transmission properties from the port 1 to port 4 of the HTS multiplexer: (a) measured data and (b) simulation data

nonlinear effects even at moderate power. Because the conductor of HTS microstrip resonator has a very narrow penetration depth and a high value of quality factor, even if the incident power is very low (of the order of 1mW), it would generate a very high current

density as high as approximately 10^5 A/cm². Figure 4 shows the microwave power dependence of the insertion loss of the HTS multiplexer. The results were used to investigate its microwave power handling capability from the S-parameter measurements.

We observed that the insertion loss of the multiplexer varied as little as 0.2 dB at 32 K while the incident power changed from -8 dBm to 25 dBm. It means that the HTS multiplexer could be used for a large microwave power dividing, combining and matching network with the compact monolithic microwave circuits. The nonlinear effects caused by a high input power are a major concern for certain applications such as telecommunications.

They include R_s or Q value dependence on the input power, harmonic generation, and intermodulation

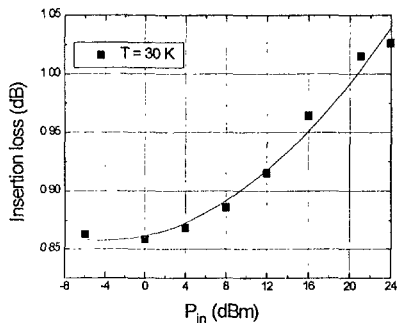


Fig. 4. The insertion loss of the HTS multiplexer as a function of the input power.

distortion.

We measured and plotted in a log-log scale the fundamental output power P_1 , the second harmonic output power P_2 , the third harmonic output power P_3 as a function of the input power P_{in} as shown in Fig. 5. In the low and intermediate power regions, we plotted graphs of both the P_1 versus P_{in} and the P_2 versus P_{in} from two straight lines in a log-log scale. The two extended straight lines intersected at a point called as the third intercept, which provided a single number to represent the harmonic generation due to the nonlinearity of the device. As shown in Fig. 5, we obtained the third order intercept at 94 dBm and the fifth order intercept point at 86 dBm at 80 K. The values were similar to those of either a dual mode type filter or a dielectric resonator filter [7].

5. SUMMARY

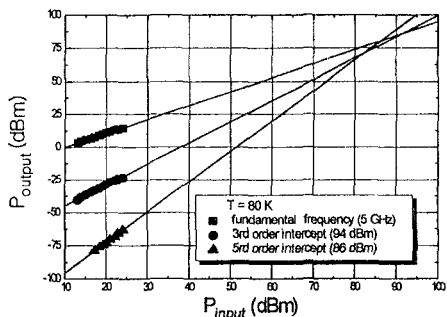


Fig. 5. The third and fifth order intercept as a function of the input power at 80 K.

A high temperature superconducting (HTS) multiplexer consisting of two branch line type hybrid couplers and two identical parallels coupled line type bandpass filters was fabricated with the 10.9 GHz center frequency and 100 MHz bandwidth. The microstrip type multiplexer was designed to be connected with a microstrip line between the termination channels. From the high third order intercept of 94 dBm at 80 K obtained in the intermodulation distortion measurements, we expect that the HTS multiplexer could be used for a large microwave power dividing, combining and matching network with the compact monolithic microwave circuits.

REFERENCES

- [1] K. K. , V. K. Semenov, and A. B. Zorin, *New Possibilities for Superconductor Devices, in Superconductor Devices*, eds. by S. T. Ruggiero and D. A. Rudman, p.6, Academic Press, NY (1990).
- [2] H. J. Chaloupka, M. A. Hein and G. Muller, SPIE Proceedings, vol. 2156, pp 36 (1994).
- [3] Raafat R. Mansour, Bill Jolly, Shen Ye, Fraster S. Thomson, Van Dokas, Glenn Thomson, Wai-Cheong Tang, IEEE Trans. on Microwave theory and Techniques, 44, 1213, (1996).
- [4] J. Kim, S. K. Han, K. Y. Kang, and D. Ahn, "Temperature Dependence of Microwave Properties of HTS Multipole Lowpass Filters Consisted of the Microstrip Open-Stub Lines", ETRI, J. (to be pressed).
- [5] G. L. Matthaei, L. Young, and E. M. T. Jones, *Microwave Filters, Impedance Matching Networks, and Coupling Structures*, Chapter 4, Artech House Inc., Dedham, (1980).
- [6] S. K. Han, J. Kim, and K. Y. Kang, *New Physics*, vol.36, pp.157-162 (1996).
- [7] Raafat R. Mansour, Bill Jolly, Shen Ye, Fraster S. Thomson and Van Dokas, IEEE Trans. on Microwave theory and Techniques, 44, 1322, (1996).