

최종 보고서

고온 초전도 기술 개발

Development of High T_c Superconductivity Technology

고온 초전도 마이크로 웨이브 디바이스 개발

Development of High T_c Superconducting
Microwave Devices

연구 기관
삼성전자(삼성종합기술원)

과 학 기 술 처

제 출 문

과학기술처 장관 귀하

본 보고서를 “고온 초전도 마이크로 웨이브 디바이스 개발” 의 1997년도 최종 보고서로 제출합니다.

1997년 4월 30일

주관연구기관명 : 한국표준연구원

협동연구기관명 : 삼성 전자
(삼성종합기술원)

협동연구책임자 : 유 인 경

연구 원 : 이 조 원

홍 진 표

석 중 현

이 은 흥

송 이 현

공 준 호

이 정 순

박 상 진

요 약 문

고온 초전도 마이크로웨이브 소자 개발

차 례

1. 서론 -----	2
2. 연구 개발의 내용 및 범위 -----	5
3. 연구 개발결과 -----	6
4. 연구개발결과의 활용계획 -----	7
5. 연구개발실적목록 -----	8

1. 서론

고온초전도체 응용중 박막을 이용한 소자 개발은 초전도체가 기존의 소자들보다도 low power dissipation, high detection sensitivity, fast switching speed, low signal distortion 등의 장점이 있기 때문에 전 세계적으로 활발히 연구되고 있으며, 이중에서 고온초전도 박막을 이용한 수동소자(passive device)연구는 초전도체의 low loss, low distortion의 특성을 응용하는 것으로 고온초전도 응용 분야 중에서 가장 먼저 실용화될 것으로 기대되고 있다.

현재 미국에서는 고온초전도 마이크로파 소자들을 개별적으로 개발하여 위성통신용 소자로 사용하고자 우주에서 실질적으로 HTSSE-I(High Temperature Superconductivity Space Program)과 HTSSE-II과제를 진행하고 있다.

Table I. HTSSE-I 과제 관련 고온초전도 microwave devices

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

Table I과 II는 미국에서 1993년 12월 성공적으로 수행하였던 HTSSE-I과제와

현재 진행중인 HTSSE-II과제, 이와 관련된 고온초전도 수동소자 및 마이크로 subsystem을 제공한 여러 연구기관들을 보여주고 있다.

일본의 경우 그 동안 고온초전도 연구개발이 bulk를 이용한 자기부상열차 및 에너지 저장장치(SMES)와 같은 대규모 응용 개발이 주종이 되었으나 최근에는 미국과 같이 고온초전도 마이크로파 소자의 개발에 집중적으로 연구 및 계획 중에 있다.

통신 분야에서 고온초전도체 응용은 초전도체의 저 표면저항에 기인한 고 Q-factor와 매우 작은 insertion loss의 특성을 이용하여 고온초전도 공진기, 필터, 믹서, 안테나 등을 개발함으로써 현재 사용되고 있는 위성통신에서 고효율의 채널수를 크게 증가시킬 수 있으며, 특히 통신용 필터 및 필터 बैं크 등은 초전도체로 제작하는 것이 현재 위성통신 시스템 증량의 70 % 정도를 줄일 수 있을 것으로 예측되고 있다.

Table II. HTSSE-II 과제 관련 고온초전도 microwave devices

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

따라서 당원 초전도팀 과제는 고온초전도 YBCO 박막을 이용한 필터 및 필터
뱅크를 포함한 주요 수동소자 개발을 목표로 진행되었으며 궁극적으로는 각 고
온초전도 개별 소자들의 개발과 이들 소자들로 구성된 고온초전도 subsystem
및 system 등을 통신용 base station에서 사용하고자 하고 있다.

2. 연구개발의 내용 및 범위

가. 연구개발의 최종 목표

- a. 초전도 전자공학 응용을 위한 양질의 고온 초전도 박막 제작기술 확립
- b. 위성 통신 및 이동 통신에 사용될 고온 초전도 마이크로웨이브 소자 개발

나. 연차별 연구개발 목표, 내용, 수행 방법

구분	연구개발 목표	연구 개발 내용 및 범위	수행 방법
1차년도	-양질의 박막 제조 -마이크로파 소자 패턴설계	-Sputtering 및 Laser ablation 을 이용한 양질의 박막 제조 -미세 패턴 기술 확보 -마이크로파소자의 전산모사 및 전자계 해석 -Microstrip 및 coplanar type 공진기 설계 및 패턴	-laserablation 과 sputter-ing 법을 이용한 박막 제조 완료 -고주파 필터 설계를 위한 Libra program 구매 완료
2차년도	-대면적, 양면 박막제조 기술 개발 -77K에서 작동하는 공진기, 필터 설계	-직경 1" 이상의 박막 제작 기술 확보 -건식 및 습식 식각법을 이용한 고온 초전도 박막의 미세 형상화 -고온 초전도 박막을 이용한 대역 통과 필터, 공진기의 설계 및 고주파 특성 연구	-마스크 제작을 위한 Cad program 구매 완료 -고주파 소자의 전자기적인 해석을 위한 고주파 시뮬레이터 HFSS 구입 -필터 특성 측정을 위한 85180C network-analyzer 구매 완료 -저온 측정 시스템 구비 완료 -고주파 소자의 저온 특성 측정용 package 설계 및 제작 완료
3차년도	-마이크로파 공진기, 필터 제작 -마이크로파 소자의 특성연구	-필터의 효율 및 손실 개선 연구 -양질의 고온초전도 박막을 이용한 마이크로파 공진기 및 필터 특성 측정 -커플러, 듀플렉서 특성 측정중	-대면적 박막 제작 완료 -BP filter IMD 측정 (IP3 = 58 dBm @ 77 K) -Coupler, Duplexer 소자의 설계 및 simulation(Mask 제작)

3. 연구 개발 결과

삼성종합기술원에서는 고온초전도체를 이용한 마이크로파 소자들을 1992년 말부터 집중적으로 연구하여 부분적으로 성공하였다. RF-스퍼터링법과 PLD 방법으로 양질의 박막을 제작하여 위성, 무선 통신분야 등에서 차세대 핵심 분야로서 가능한 line, ring, meander line 형태의 고온초전도 공진기, 3극 bandpass filter를 개발하였다. 그리고 현재 coupler, duplexer소자를 이용한 filter channelizer 개발을 진행 중에 있다. 당 원에서 개발한 공진기는 RF-스퍼터링법으로 증착한 고온초전도 박막을 이용한 것으로서 신호의 선면도를 나타내는 Q-factor가 기존의 공진기 보다도 15배 이상 뛰어났으며 microstrip line 구조로 parallel coupling을 갖는 bandpass filter는 삽입손실(0.3 dBm)이 매우 작고 skirt특성이 우수하며 3차 intercept point가 58 dBm을 보였다. 고온초전도체의 장점인 저전력 손실 및 저 신호왜곡 등의 특성을 가지고 있으므로 필터를 포함한 주요 마이크로 웨이브 수동소자 개발에 응용할 수 있을 것으로 기대되고 있다.

가. 연구개발결과

- a. 초전도 전자공학 응용을 위한 양질의 대면적, 양면박막 제조기술 개발
 - 직경 1" 박막 제작
 - 직경 3", 양면박막 제작중
 - 건식 및 습식 식각법을 이용한 고온 초전도 박막의 미세형상화
- b. 저온 및 고주파 Package 설계 및 제작
- c. 위성통신, 이동통신용 고온초전도 마이크로웨이브 디바이스 개발
 - 고온초전도 박막을 이용한 대역통과 필터 (parallel-coupled filters), coplanar-waveguide type 공진기의 설계 및 고주파 특성 연구
 - 커플러, 듀플렉서소자를 이용한 필터 बैं크 개발중

나. 목표의 달성도

- a. 양질의 박막제조 기술 개발
 - off-axis RF sputtering 및 PLD system을 이용한 양질의 박막제조

기술

- 직경 3", 양면박막 제작중
- b. 마이크로 웨이브 소자 설계기술 확보
 - Simulation을 통한 고온초전도 공진기, 필터, 커플러 및 듀플렉서 설계 기술
- c. 고온초전도 test fixture (Package) 설계 및 제작 기술

다. 기술발전의 기여도

- a. 고온초전도 마이크로웨이브 응용화 기반기술 확보
- b. 공진기를 이용하여 넓은 주파수 영역에서의 고온초전도 박막의 물리적 특성 연구 가능
- c. 저온측정 시스템 및 평가기술 정착
- d. 고온초전도 응용을 위한 대면적 박막제조
- e. 고온초전도 회로설계 및 응용기술 확보
- f. 마이크로파 및 광대역 위성통신 시스템의 핵심부품으로 사용 가능
- g. Signal processing을 위한 시스템의 핵심부품개발에 응용
- h. 다층박막의 제조 설계 응용기술 향상

4. 연구 개발 결과의 활용계획

전 세계적으로 여러 연구기관에서 진행되고 있는 고온초전도 microwave 소자들의 연구개발은 물리적 관점에서 볼 때 고온초전도체가 같은 주파수 및 같은 작동 온도에서 표면저항이 매우 작고 주파수에 무관한 penetration depth의 특성이 있어 작은 규모로 고효율의 소자를 개발할 수 있다는데서 비롯되었다. 하지만 고온초전도 마이크로파 소자 개발에 있어서 가장 핵심 부분들 중의 하나는 먼저 고온초전도체가 현재 사용되고 있는 물질들과 다른 물리적 특성을 가지고 있으므로 먼저 고온초전도체의 물리적 특성을 연구하는 것이 필요하며, 두 번째로는 새로운 개념의 고온초전도 소자 설계 기술과 고온초전도 박막의 대면적(3 inch 이상) 및 양면 박막 증착이 필요하다. 또한 실질적인 응용 면에 있어서 당면한 문제는 고온초전도 소자들을 작동시키기 위한 저온시스템 개발이다. 하지만 국내에서는 설계 기술자가 부족하고 대면적 박막 증착기술이 아

직 미비하며 연구비 또한 매우 부족한 현실이다. 따라서 당 원에서는 다음과 같은 연구 방향을 계획하고 있다.

- (1) 양질의 고온초전도 대면적 및 양면 증착 기술 확보
- (2) 새로운 개념의 단일 소자 및 subsystem 설계 기술 확보
- (3) high-power를 다루는 고온초전도 소자 개발
- (4) 단일 칩에 반도체 소자들과 접합 할 수 있는 고온초전도 소자 개발 기술
- (5) laser-ablation 법을 이용한 다층막 제조 및 최적화 기술 확보

특히 절연층, 상전도층, 강유전체, 강자성체 등과의 다층막 제조 기술 확립으로 타 분야의 응용 가능성이 제고되고 있다.

5. 연구실적물 목록

가. 국내 학술지 목록

- (1) J. P. Hong, and J. S. Lee, "Design and Characterization of High- T_c Superconducting 3-Pole Parallel-Coupled Bandpass Filters Utilizing $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ Thin Films", J. Kor. Phys. Soc., Vol. 29, No. 3, pp. 360-364, June 1996.
- (2) J. P. Hong, "Surface Resistance Measurements of High Temperature Superconducting $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ Thin Film using 7- λ Line Resonators", J. Kor. Phys. Soc., Vol. 29, No. 2, pp. 205-208, April 1996.
- (3) Jin Pyo Hong, and Jeong Soon Lee, "Microwave Properties of High Temperature Superconducting Microwave Bandpass Filters Fabricated by Laser Ablated $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ Thin Films", submitted to J. Kor. Phys. Soc.
- (4) Jeong Soon Lee, and Jin Pyo Hong, "Characterization of High Temperature Superconducting Microstrip Bandpass Filters Using a Planar Moment Method", submitted to J. Kor. Phys. Soc.

나. 국제 학술지 목록

- (1) I-Hun Song, Chan Hoon Park, Eun-hong Lee, JunHo Gohng, Chang Wook Moon, Jin Pyo Hong, and Jo-Won Lee, "GROWTH OF YBCO THIN FILMS ON Si(100) WITH DOUBLE BUFFER LAYERS", Advances in Superconductivity VII, Proceedings of the 7th International Symposium on Superconductivity(ISS '94). Nov., 1994, Kitakyushu.
- (2) C. H. Park, J. P. Hong, I. H. Song, E.-H. Lee, C. W. Moon, S. A. Song, J.-W. Lee, "Characteristics of YBCO step-edge junctions fabricated by chemical etching process", Physica C, 234, 85-90, 1994.
- (3) J. P. Hong, "High Temperature Superconducting Microstrip Line Resonators for Measuring Surface Resistance", Appl. Superconductivity, Vol. 3, No. 11/12, pp. 559-565, 1995.
- (4) J. P. Hong, "High Frequency properties of High Temperature Superconducting $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ Thin Films on $LaAlO_3$ substrates utilizing Line and Ring Resonators", Jan. J. Appl. Phys.,

1996

- (5) J. P. Hong, and J. S. Lee, "Performance of microstrip bandpass filter using high-Tc Superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ Thin Films on LaAlO_3 ", Appl. Phys. Lett., 68(21), May, 1996.
- (6) Jin Pyo Hong, and Jeong Soon Lee, "High Tc Superconducting Three-Pole Parallel-Coupled Bandpass Filters made from Laser Ablated $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ Thin Films", Appl. Superconductivity, Vol. 2, No. 7/8, pp. 1-7, 1996.

다. 특허

- (1) 홍진표, "바이크리스탈접합을 이용한 고온 초전도 고주파용 믹서 제작", 출원번호 93007505.
- (2) 송이현, "기판 온도 변화를 이용한 고온 초전도 S-I-S Josephson 접합 제작", 출원번호 93007504.
- (3) 문창욱, "특인 디렉션 방식을 이용한 조셉슨 접합의 전류-전압 측정 장치", 출원번호 93014704.
- (4) 박찬훈, 홍진표, "고온 초전도 조셉슨 소자 제조 방법", 출원번호 93025721.
- (5) 박상철, "구리 전기 도금한 고온 초전도 테이프", 출원번호 89002250, 등록번호 68385.
- (6) 정주영, 송이현, 윤석열, 박상천, "Y-Ba-Cu-O 산화물 초전도체의 평면 집적회로 가공 기술", 출원번호 90005997, 등록번호 64327.
- (7) 송이현 "고온 초전도 조셉슨 접합 제작 방법", 출원번호 94003529
- (8) 송이현 "실리콘 기판에 이중 버퍼막을 이용한 고온 초전도 박막제조방법", 출원번호 94014601
- (9) 이은홍 "급속 냉각 장치를 이용한 초전도체 FILM의 제조방법", 출원번호 89012578, 등록번호 74410
- (10) 송이현, "초전도 솔레노이드 제작 방법", 출원번호 89019405, 등록번호 69073
- (11) 문창욱, "초전도 특성 평가를 위한 회로 결선 방법", 출원번호 94021641
- (12) 송이현, "초전도 박막의 산소회복 방법", 출원번호 95011978
- (13) 이은홍, 윤석열, " $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} + \text{NaNO}_3$ 혼합물을 이용한 초전도체 선재의 제조", 출원번호 90009364, 등록번호 79767
- (14) 이은홍, "OFF-AXIS RF MAGNETRON SPUTTERING 법을 이용한 고온 초전도 박막 제조 방법", 출원번호 95023504
- (15) 정주영, " $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 기판을 기 이용한 조셉슨 TUNNEL 접합 제조 기술", 출원번호 90017562, 등록번호:88278
- (16) 공준호, "강자기장의 정렬효과를 이용한 LASER ABLATION에 의한 고정렬~", 출원번호 95036852
- (17) 홍진표, "고온 초전도 band-pass 필터 설계 방법", 출원번호 96002920
- (18) 홍진표, "고온 초전도 parallel-coupled band-pass 필터 측정시 microwave~", 출원번호 96005932
- (19) 이은홍, "펄스파 레이저를 이용한 고온 초전도 박막의 제조", 출원번호 96006824
- (20) 이은홍, "Pulsed Laser Deposition법을 이용한 고온 초전도 박막 제조방법", 출원번호 96018743
- (17) 공준호, "선형 modulation line을 이용한 directly-coupled dc-SQUID의 ~", 출원번호 96018742
- (18) 송이현, "고온 초전도 박막을 이용한 이중결정접합의 제작 방법", 출원번호 96035877

- (19) 이은홍, 박상진, “펄스파 레이저를 이용한 고온 초전도 박막 제작방법”, 출원번호 96051861
- (20) 공준호, “혼합산에 의한 화학적 에칭을 이용한 MgO bicrystal SQUID의~”, 출원번호 96046306
- (21) 송인상, 박광서, 송이현, 이은홍, “고온 초전도 접합배열에서의 외부회로와 인덕턴스 결맞음해결 방법”, 출원번호 96046305

목 차

1. 서론	1
2. 고온초전도 YBCO 박막 제작	
2.1 서론	3
2.2 Pulsed laser deposition법을 이용한 YBCO 박막의 제작과 특성연구	3
2.3 결론	25
3. 고온초전도 Parallel-Coupled 필터 개발	
3.1 서론	28
3.2 필터 설계의 기본	29
3.3 고온초전도 Parallel-Coupled 필터 설계	33
3.4 고온초전도 test-fixture	45
3.5 실험 및 분석	45
3.6 결론	56
4. 고온초전도 3dB/90° 결합기 및 듀플렉서 설계 및 simulations	
4.1 서론	58
4.2 마이크로파용 3dB/90° 결합기 설계	58
4.3 마이크로파용 듀플렉서 설계	63
4.4 측정 패키지 및 측정 시스템	63
4.5 결론	69
5. 결론	70

* 별첨 : 발표 논문

제 1 장 서 론

고온초전도체 발견 이후 초전도체 실용화를 위한 연구가 다방면에 걸쳐 활발히 진행되어 왔다. 무 손실 송전선, 초 강력 자석 제작 등을 위한 선재 가공 연구, 고 성능 전자 소자 제작을 위한 박막 제작 연구 및 궁극적으로 상온에서 작동하는 초전도 물질을 개발하기 위한 신 물질 연구들이 주요 연구 분야이다.

이중에서 선재 연구는 핵융합을 포함한 여러 분야에 폭 넓게 응용할 수 있어, 여러 나라에서 국가적인 지원 하에 연구를 수행하고 있다. 삼성도 Tokamak 제작에 참여해서 초전도 선재 분야 연구를 수행하고 있다. 한편, 박막 분야의 연구는 기존의 반도체 소자를 능가하는 월등한 성능을 갖는 초전도 소자를 제작할 수 있어, 많은 연구 기관들이 앞 다투어 개발에 열을 올리고 있다.

고온초전도 박막 응용은 액체 질소 온도 이상에서 임계전류가 높은 양질의 박막 제작, 미세 패턴, 접합 제작, 설계, 특성 평가 및 실용화 기술이 체계적으로 이루어져야 하며, 현재는 응용을 위한 특성 개선이 능동 소자, 수동 소자로 나뉘어 각각 진행되고 있다. 고온초전도 능동 소자의 핵심 기술은 초셉슨 접합 제작으로서, 우수한 특성을 갖는 접합을 재현성 있게 제작하는 것이 관건이다. 접합 제작 법으로는 현재 step-edge, bicrystal, edge 접합 등이 개발 되어 있는데, 이들 모두 각각 장, 단점을 가지고 있다. 고온초전도 수동 소자는 고온 초전도체의 전기적인 표면 저항이 77K에서 구리보다 수십 배 정도 작은 epitaxial 박막의 low loss, low distortion을 이용한 전자 소자로서, 기존 소자들보다 넓은 영역의 주파수에서 고주파로 사용할 수 있는 장점이 있다. 현재는 공진기, 필터, mixer, phase shifter, antenna 등의 핵심 통신 소자 개발이 활발히 진행되고 있다.

초전도 박막을 반도체와 조합하여 제작한 hybrid-MIC는 광범위한 응용이 이루어지고 있다. 이미 타 기관에서는 초전도 박막 수동 소자와 반도체 능동 소자를 이용한 수신기를 제작하여 발표하였는데 이는 기존의 장치에 비하여 반도체의 장점과 초전도체의 장점이 부가되어 나타났다. 이러한 시도는 HTS-MMIC 응용을 구축하는 한 분야로서 많은 연구가 진행될 것이며, 많은 연구 성과를 기대할 수 있다.

올해는 고온초전도가 발견된 지 만 10년 되는 뜻 깊은 한 해이다. 지난 10년 동안 신 물질 개발과 공정 개발 연구가 활발히 진행되었으며, 최근에는 microwave용 초전도 통신 소자의 상품화가 활발히 추진되고 있다. 앞으로는 초전도 소자를 이용한 응용 시스템 개발이 가속화 될 전망이다.

초전도 시장 전망에 관한 최신 자료에 의하면 2020년 초전도 전세계 시장 규모는 1,500-2,000억불의 거대 시장을 형성할 것으로 기대되는데, 이중에서 약 50%가 electronics 관련 응용 분야이다. 당 과제에서는 87년 이후 지금까지 진행해온 과제를 통하여 상품화 시기, 시장 규모 그리고 삼성 내에서의 mission 등을 고려해 고온초전도 전자 소자 개발에 초점을 맞추어 왔다. 이번 과제에는 이 분야 연구를 더욱 구체화하여 생체 자기 측정용 SQUID와 Microwave용 공진기, 필터를 개발 하였다. 우선 양질의 전자 소자를 제작하기 위한 첫 단계로서 RF magnetron sputtering과 PLD법을 이용한 YBCO 박막의 제작 공정을 확립하였다. 또한 습식, 건식 방법을 이용한 초전도 박막의 미세 형상화 기술 확보와 step-edge, bicrystal 접합을 이용한 심자계 측정용 DC-SQUID를 개발하였다. 미세 자기 측정 환경을 구축하여 심자계를 비롯한 생체 자기를 측정할 수 있도록 자기 차폐룸(magnetically shielded room)을 설계, 제작하였다. 또한 고온초전도 공진기의 설계, 미세 형상화, packaging 기술 등을 확보하여 기존 통신 소자들의 대한 성능을 확인하였다.

제 2장. 고온초전도 YBCO 박막 제작

2.1 서론

고온초전도체를 전자 디바이스로 응용하기 위해서는 박막 제작이 필수적인데, 최근 들어 Excimer Laser를 에너지원으로 하여 양질의 초전도 박막을 제작하는 연구가 활발히 진행되고 있다[1]. Pulsed Laser Deposition(이하 PLD)법은 강한 에너지의 laser를 사용하기 때문에 deposition rate가 빠를 뿐만 아니라, 박막의 조성을 용이하게 제어할 수 있다. 더욱이 거의 모든 물질을 박막 화할 수 있기 때문에 초전도체 뿐만 아니라 절연체, 반도체 등의 여러 가지 물질을 다층 박막으로 제작하는 것이 가능하여 초전도 디바이스 제작이 매우 유리하다. 본 절에서는 Sputtering법과 더불어 SQUID와 Microwave용 초전도 필터 제작에 적합한 양질의 박막을 제작하는데 이용한 PLD법에 관한 실험 결과를 보고하였다. PLD법을 이용하여 YBCO 박막을 제작하는 경우, 주요 변수들의 변화에 따른 특성 변화를 관찰함으로써, 최종 응용에 적합한 공정 변수를 도출하였다.

2.2 PLD법을 이용한 YBCO 박막의 제작과 특성 연구

2.2.1 실험

KrF excimer laser를 사용하여 pulse 당 800~1,000 mJ의 energy를 갖는 beam을 발생시켰다. 소결한 YBCO 타겟 위에 laser beam을 5 Hz 주기로 조사하여 10~20분 동안 단결정 기판 위에 deposition 하였다. 기판은 결정면이 (100)인 MgO 또는 LaAlO₃ 단결정을 사용하였으며, 기판 온도, 기판-타겟 사이 거리를 각각 700~820℃, 50~80 mm로 변화시켰다. Chamber내의 분위기는 산소로서 100~500 mTorr의 압력을 유지하였다.

Deposition 후 chamber의 산소 분위기를 500 torr로 올려 550℃에서 45분 유지한 후 상온으로 냉각하였다. 한편, 생체 자기 측정용 DC-SQUID를 제작하기 위해 SrTiO₃ bicrystal을 기판으로 사용하거나 또는 chemical solution을 사용하여 step을 제작한 MgO를 사용하였다.

2.2.1.1 실험 장치

1. Laser source : PLD법을 이용한 박막 제작 시 사용한 laser는 Lambda Physik사 KrF excimer laser(LPX305iF)이었으며, 좀 더 자세한 규격을 아래 Table 2.1에 나타내었다.

Table. 2.1 Excimer laser 규격

Item	Specifications
-Wavelength	248 nm
-Pulse energy	1,200 mJ max.
-Max power	50 W
-Repetition rate	50 Hz

2. Laser beam alignment : Excimer laser를 타겟 위에 정확히 조사하기 위해 파장이 670 nm인 laser diode를 optics alignment용으로 사용하였다. Dielectrically coated mirror를 beam 반사(reflection)용으로 사용하였다. Laser diode의 beam spot 위치는 반사 mirror를 조정하여 타겟의 중앙에서 오른쪽으로 $2/r$ 되는 지점에 오도록 하였다(Fig. 2.1)

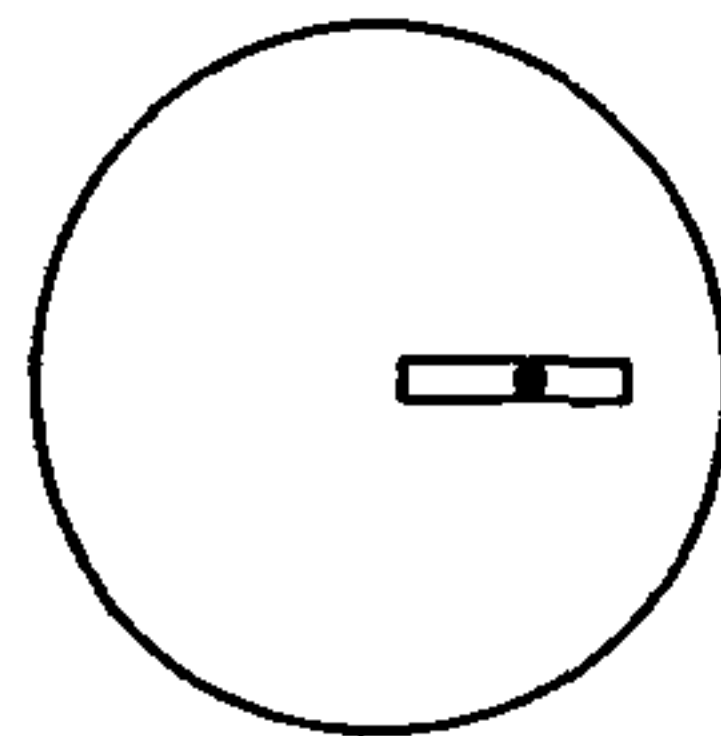


Fig. 2.1 타겟 위 excimer 레이저 빔의 위치(rectangle)와 레이저 다이오드 위치(dot)

3. Beam delivery system : 사용한 mirror는 Lambda Physik사와 Newport사의 dielectrics coated mirror를 총 3개 사용하였다. 타겟에 적당한 세기의 laser를 조사하기 위해 국내에서 제작한 attenuator를 사용하였다. Focussing lens로는 focal length가 38cm인 제품을 사용하였다.

4. Energy monitor : Pyroelectric detector로 excimer와 pulsed DYE laser의 에너지를 1mJ에서 10J 사이에서 측정 가능한 Coherent사 제품 model LM Ultima를 사용하였다. 사용한 laser의 beam density가 높아 energy monitor attenuator를 사용하였다. 측정 가능한 detector response 범위는 repetition rate, 25 Hz 이하이며 aperture 지름은 48mm이다.

5. Excimer laser 용 gas : SPECTRA GAS INC. 제품을 사용하였으며 기타 규격은 아래 표 2.2와 같다.

Table. 2.2 Excimer laser gas 규격

Gas	Purity	Quantity	Price(96, 3)
Krypton	99.997%	200 liters	₩950,000
3% F ₂ /He balance		53 cu. ft	₩990,000
Neon	99.999%	7500 liters	₩2,450,000
Helium	99.999%	291 cu. ft	₩720,000

6. Gas cabinet 및 배관 설치 : 4 Cylinders gas cabinet를 Gas leak detector (F₂ gas 용)와 함께 설치하였다.

7. Chamber : 진공 chamber와 부속 control unit은 국내 진공 업체에서 제작하였다. Fig. 2.2는 본 실험에서 사용한 laser system의 개요도이다.

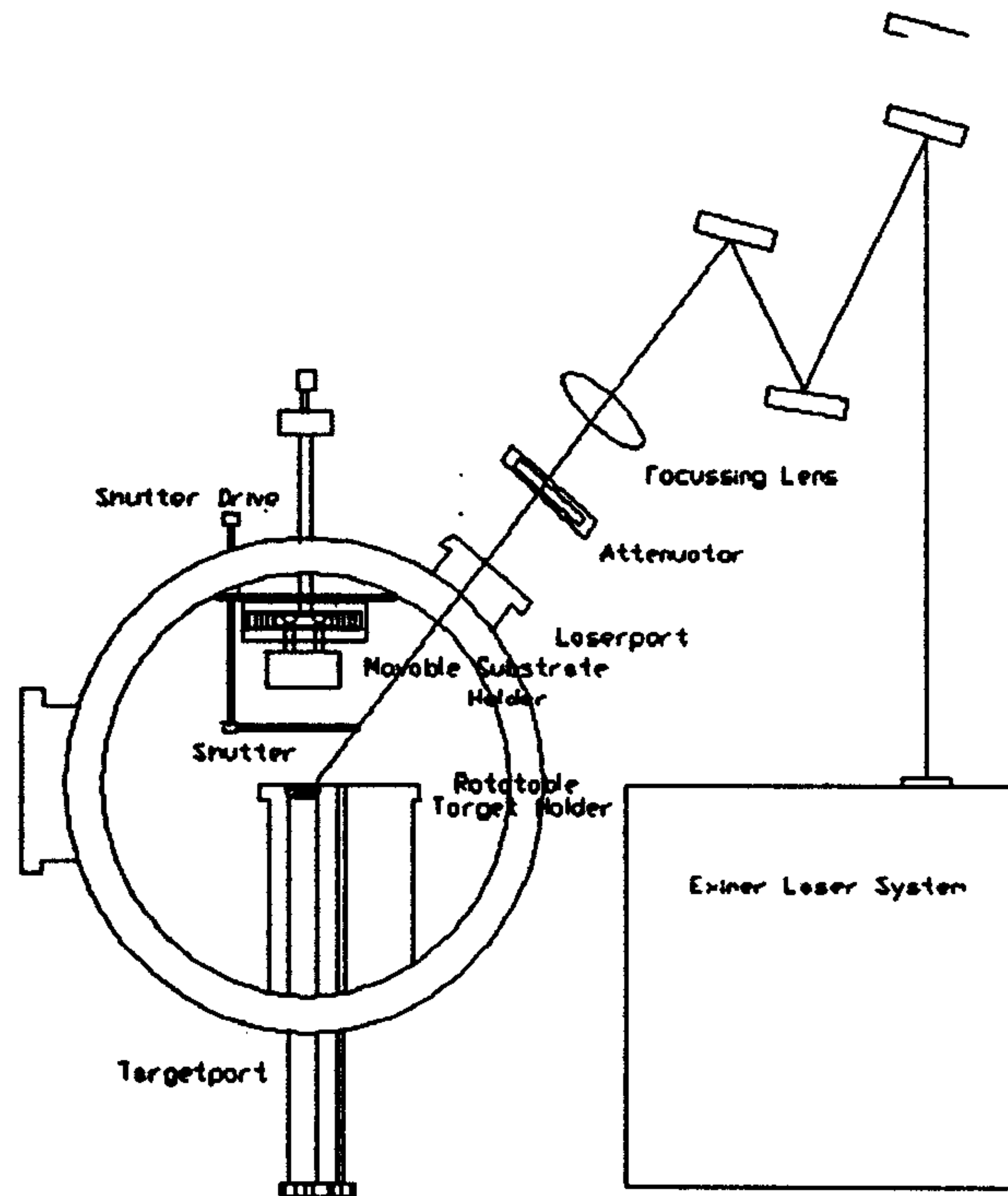


Fig. 2.2 PLD용 Chamber와 전체 시스템 구조

8. 기판 가열용 히터 : High temperature resistive substrate Heater (2")

Maximum temperature : 950°C

Temperature stability : ±2%

Temperature uniformity (center circle diameter) : ±4°C(1.25")

Maximum voltage 60 volts

Maximum current: 10 A

Heater resistance :5 ohms

Power supply: AC/DC

Ramp time to 750°C (in atmosphere) ~4min.

Ramp time to 950°C (in atmosphere) ~4min.

Cool down time (950°C to room temp., 1 atm pressure) : 3min.

9. Silver paste: 단결정 기판을 히터에 부착하기 위하여 상온에서 경화되는 Ag paste를 사용하였으며 규격은 다음과 같다.

Type D-500, Lot No.:MLK8805 등창화성 주식회사(Japan)

10. Target : 상용 제품을 구매해서 사용했으며, 상세 규격은 아래 Table 2.3과 같다.

Table 2.3 PLD용 타겟 물질 규격

종 류	Lot No.	purity (%)	dia. (in.)	thick. (in.)	weight (g)	density (g/cc)	color
YBa ₂ Cu ₃ O _x	SCI-2531 SCP3	99.965	1.001	0.250			black
NdBa ₂ Cu ₃ O _x	SCI-2819 SSM	99.9	1.001	0.250			black
SrTiO ₃	SCI-940182	99.9	1.001	0.250	15.300	4.746	light brown
PbZr _x Ti _{1-x} O ₃	SCI-2137	99.9	1.001	0.249	15.100	4.693	light brown
MgO	SCI-930338	99.9	0.999	0.249	10.000	3.127	white

11. Single crystal substrate : PLD법을 사용해서 MgO, SrTiO₃와 LaAlO₃ 기판의 최적 조건을 확보하였으며, DC-SQUID와 Microwave용 고주파 필터는 각각 SrTiO₃ bi-crystal과 LaAlO₃ 사용하였다. 상세 규격은 다음과 같다.

Table 2.4 단결정 기판 규격

종 류	크 기/ 두 께	Type/연마	제작 소자
MgO	2 in dia /1mm	Bare / 단면	YBCO
	1x1 cm ² / 0.5 mm	Bi-x'al / 단면	SQUID
LaAlO ₃	3 in dia	양면	Filter / NBCO박막
SrTiO ₃	1 x 1 cm ²	Bi-x'al / 단면	SQUID
	2 x 2 cm ²	Bare / 단면	YBCO 박막

12. Excimer laser의 KrF gas는 가동 shot 수가 일정한 값을 넘어가면 output 출력이 급격히 저하되므로 새 gas로 교환해야 한다. Excimer laser를 박막 제작 용으로 사용하는 당 팀의 경우에 있어서는 가동 Shot 수 (Cumulative shot no)가 많아 저서 생기는 출력 저하보다 laser tube내에서의 장시간 경과에 따른 gas degradation 효과가 더 크게 작용한다. 따라서 당 팀에서 사용하고 있는 laser의 경우 약 20-25일 정도의 간격으로 laser gas를 교환하였다.

2.2.1.2 상세 실험 공정

1. 단결정 기판 부착

MgO 기판의 경우 대기중의 H₂O 또는 CO₂와 반응하여 기판 표면에 Mg(OH)₂, MgCO₃ 등의 반응물이 곧 잘 형성된다. 따라서 박막 deposition시 MgO 기판은 고온, 산소 분위기에서 열처리하여 표면을 안정 화시켜야 한다. 1000℃, 2시간 산소분위기에서 열처리한 후, 기판

뒷면에 Ag 페이스트를 목재 핀으로 얇게 도포하여 기판 가열 용 히터 블록에 부착한다. 이때 Ag 페이스트는 n-butylacetate로 희석하여 사용하되, 너무 묽으면 부착력이 떨어지고, 너무 진한 경우에는 빨리 말라버리므로 늘 적당한 농도를 유지토록 한다. 상온의 제습기 안에서 10여분 간 놓아둔 후 기판 모서리에 붙은 은페이스트를 blade로 조심스럽게 제거한다. 이는 가장자리에 붙은 Ag 페이스트가 히터를 가열하는 도중 기판 표면을 오염시키지 않도록 하기 위함이다.

2. 진공 chamber안에 히터 장착

진공 chamber안을 대기압 상태로 만든 후 chamber를 열고, 기판을 부착한 히터 블록을 챔버 안의 히터 홀더에 끼우고 전열선을 히터 블록과 연결한다. 히터 블록과 연결되어 있는 thermocouple의 두 단자도 각각 alumel(-), chromel(+)에 고정시키고, ground 라인을 히터 블록 한쪽 단자에 연결한다.

3. beam alignment

타겟에 레이저 빔을 align하기 위하여 레이저 다이오드를 사용한다. 먼저 파장 670nm의 다이오드의 스위치를 on 후, 레이저 앞뒤의 door를 열어 레이저 다이오드의 빔이 통과할 수 있도록 한다. 빨간색의 레이저 빔 spot이 타겟에 나타난 위치를 확인하고, 타겟 이동 controller를 조정하여 정확한 위치인 타겟의 중앙에서 오른쪽으로 2/r되는 지점에 맞춘다.

(Fig. 2.1 참조)

4. 진공

증착 준비 완료되면 mechanical 펌프를 가동하여 진공도를 1×10^{-5} Torr까지 떨어뜨린 후, 터보펌프를 사용하여 성장 챔버 안의 진공도(base pressure)를 10^{-6} Torr 이하로 유지한다.

5. 온도 조절

진공 상태를 만드는 과정과 병행하여, 온도제어기로 기판의 온도를 천천히 박막 성장 온도($\sim 800^\circ\text{C}$)까지 가열한다. 온도 제어기에 프로그램을 입력하여 기판과 타겟의 종류에 따라 기판을 가열하는 과정을 조정한다. 기판 온도가 박막 성장 온도에서 안정되면 고 순도 산

소를 챔버 내부에 공급하여 산소압을 유지시킨다. 이때 exhaust valve controller의 게이지를 조정하여 산소압을 맞춘다.

6. 박막 제작 공정

먼저 레이저의 냉각수와 ventilation system을 가동하고, 레이저의 스위치를 켜 후, 제어 프로그램을 실행시킨다. 실질적인 레이저의 파워를 얻기 위해서는 수 분간의 워밍업이 필요하다. 타겟은 게이지의 속도를 일정하게 유지시키면서, 상하로 진동시킨다(Fig. 2.8). 기판을 셔터로 가린 상태에서 레이저 빔을 렌즈를 통과시켜 집광하고, 파워를 낮추기 위해 attenuator를 통과시켜, 타겟 표면의 불순물을 제거하기 위한 표면 처리 용으로 200회 정도의 레이저 샷으로 선 처리한다.

이어서 기판을 가렸던 셔터를 제거하고 온도가 다시 안정되기를 기다린 후, laser 빔을 타겟 표면에 조사하면 타겟 표면으로부터 Y-Ba-Cu-O를 구성하는 물질들이 중성입자, 이온 및 분자 형태(cluster)로 방출되어 플룸(plume)을 형성한다. 기판 위에 고온초전도 박막의 성장이 완료된 후에는, 진공 챔버의 벨브를 잠그고 내부에 산소를 100 sccm으로 넣으면서 기판 온도를 550℃로 낮추고 1시간 유지시키는 in-situ 열처리 공정을 시행하였다. 이러한 열처리 공정을 거친 후 기판의 온도를 상온까지 서서히 낮추면, 고온초전도 에피택셜 박막 제조 공정을 마치게 된다.

2.2.1.3 예비 실험

1) 박막 uniformity 측정 실험

SQUID 소자 제작에 있어서 확보해야 할 균일한 박막 성장 범위는 $1 \times 1 \text{cm}^2$ 이다. 그러나 마이크로웨이브 소자의 제작에 있어서는 필터의 통과 대역에 따라 설계 패턴이 제한을 받는다. 현재 $1.2 \times 1.4 \text{cm}^2$ 의 LAO 기판에 YBCO를 성장시켜 10GHz 대역의 필터를 제작하고 있으나, 필터 제작 시에는 $\lambda/4$ 크기의 strip line을 씌우므로 낮은 대역의 필터를 제작하려면 더 넓은 범위의 균일성이 확보되어야 한다. 마이크로웨이브 소자의 제작에 있어서는 LAO 기판에 YBCO를 성장시키거나, STO와 같은 유전 물질을 기판에 입힌 후 YBCO 물질을 in-situ로 제작하는 방법을 사용하고 있다. 필터의 특성은 박막의 질과 균일성에 크게 영향을 받으므로, 현재 가동 중인 PLD system이 제작 할 수 있는 균일 박막 성장 범위를 측정하여 소자 제작에 적용하여야 한다.

이 실험은 T_c 가 균일하게 유지될 수 있는 최대 범위를 알아봄으로써, 특성 재현성과 균일성이 우수한 초전도 소자를 제작할 수 있는 박막 크기를 확보코자 하는 것이다. 이를 위해 박막 성장 면의 위, 아래, 양 옆 방향으로 일정한 거리를 두고 T_c 를 측정하였다. 주목할 만한 것은 Fig. 2.3 (1)에서 볼 수 있듯이 플룸이 형성된 모양은 상, 하로 긴 타원형이지만, 실제로 중심으로부터 일정한 거리를 두고 T_c 를 측정한 Fig. 2.5 (a) 실험 (Method III, LA-231)결과에서는 상하보다는 좌우 방향으로 T_c 가 유지되는 면적이 더 넓다는 것이다. 이 결과에 의하면 중심에서부터 좌우 방향으로 15mm까지 T_c 의 큰 차가 없으나, 상하 방향으로는 거리에 따라 T_c 가 급격히 감소하여 10mm의 범위에서만 T_c 가 유지되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 T_c 가 균일한 최대 크기는 Fig. 2.4의 (b) 실험 (Method II, LA-224) 직경 1 inch 이내로 제한된다.

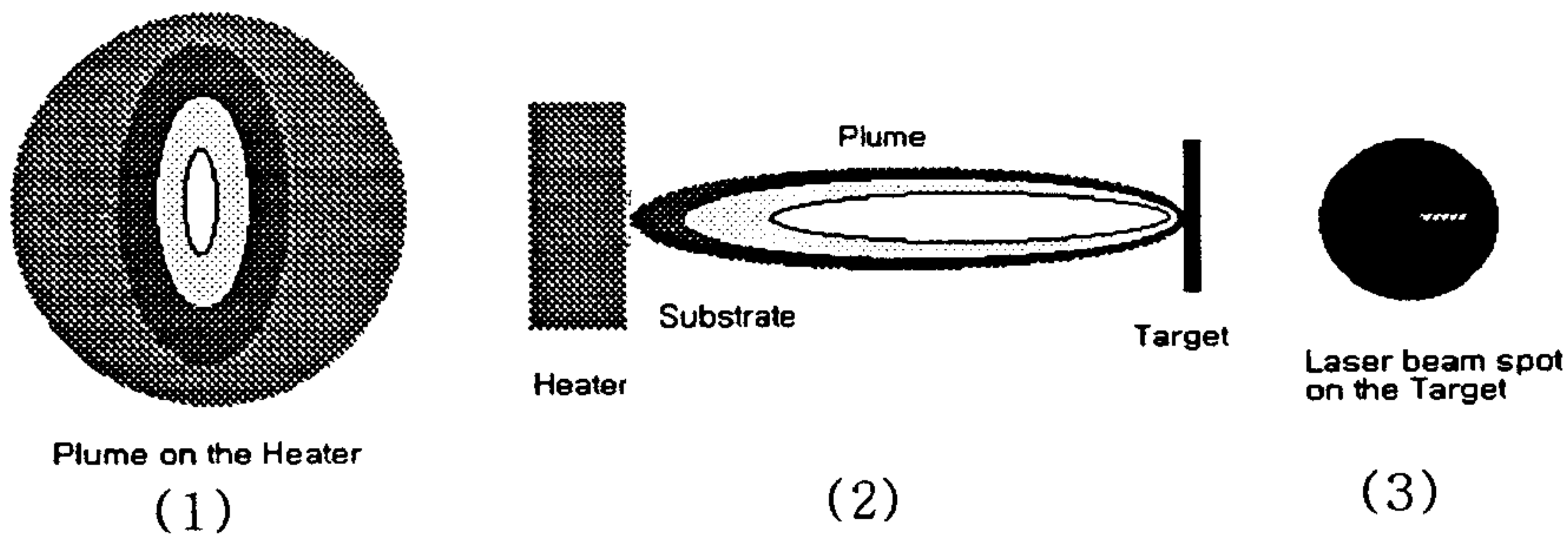
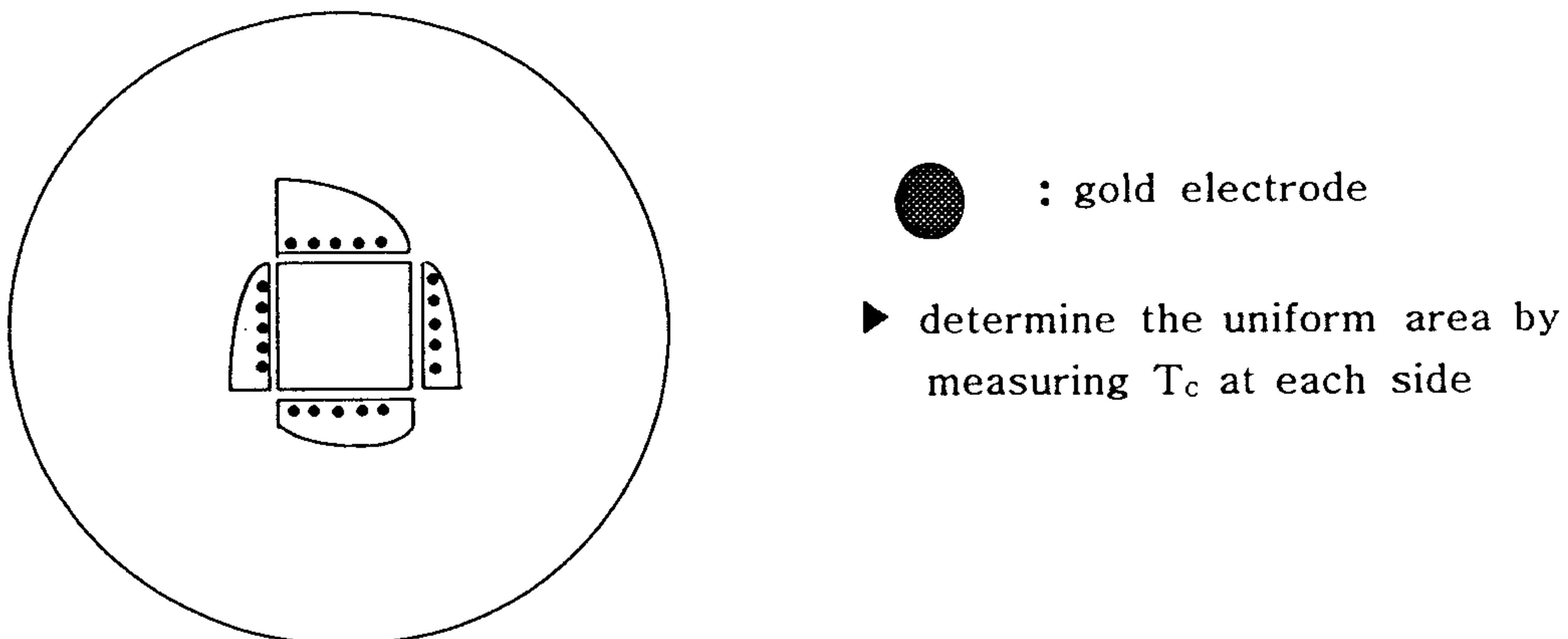


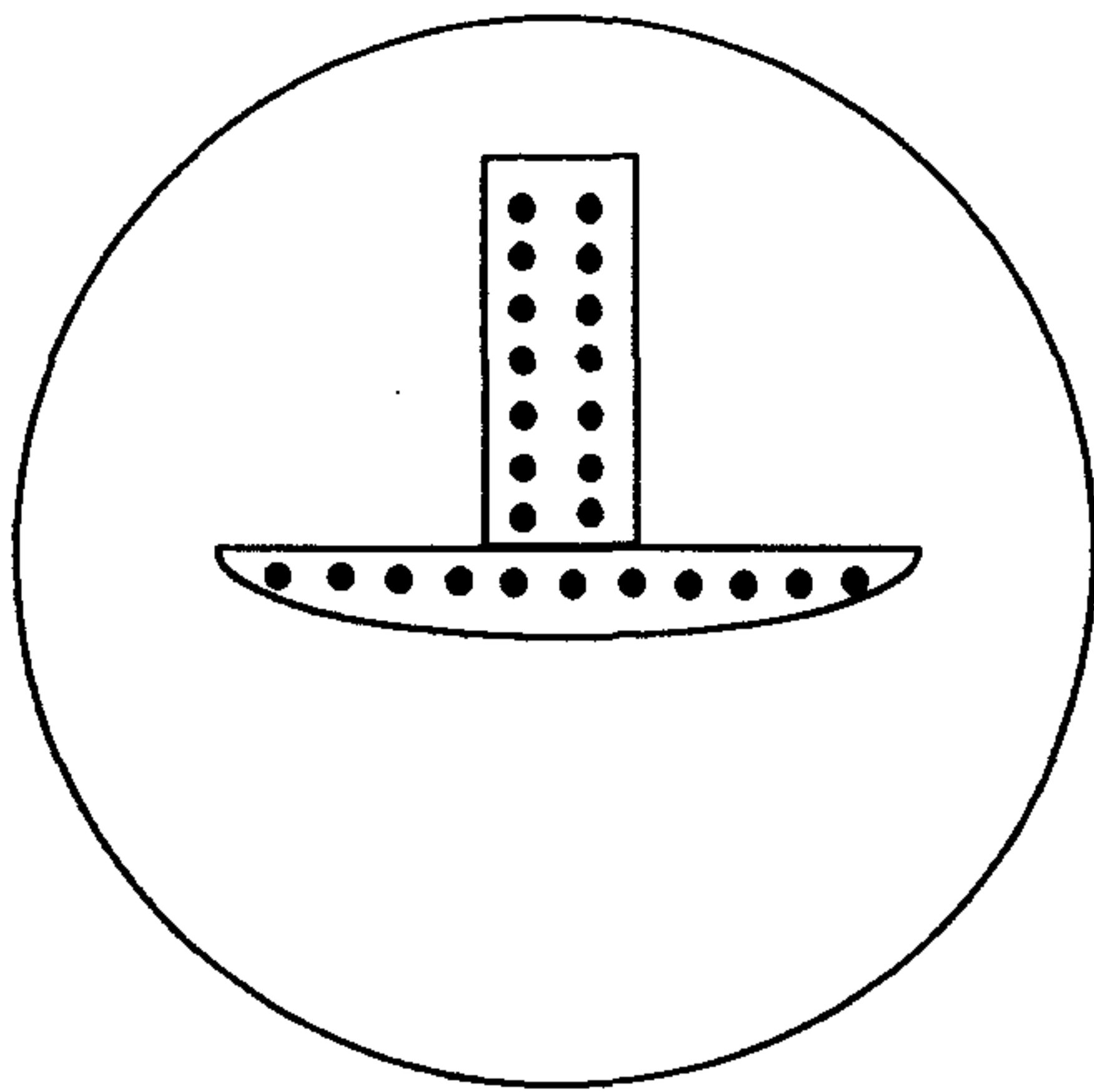
Fig. 2.3 히터에 생기는 플룸의 모양(1)과 viewport에서 본 플룸의 모양(2) 타겟 위에 나타나는 레이저 빔의 위치와 모양(3)

(a) Method I. (LA-221)



side	distance (from the center) (mm)	T _c (K)
left	6-7	84.5
right	7-8	86.8
up	6-7	84.3
down	7-8	84.6

(b) Method II. (LA-224)

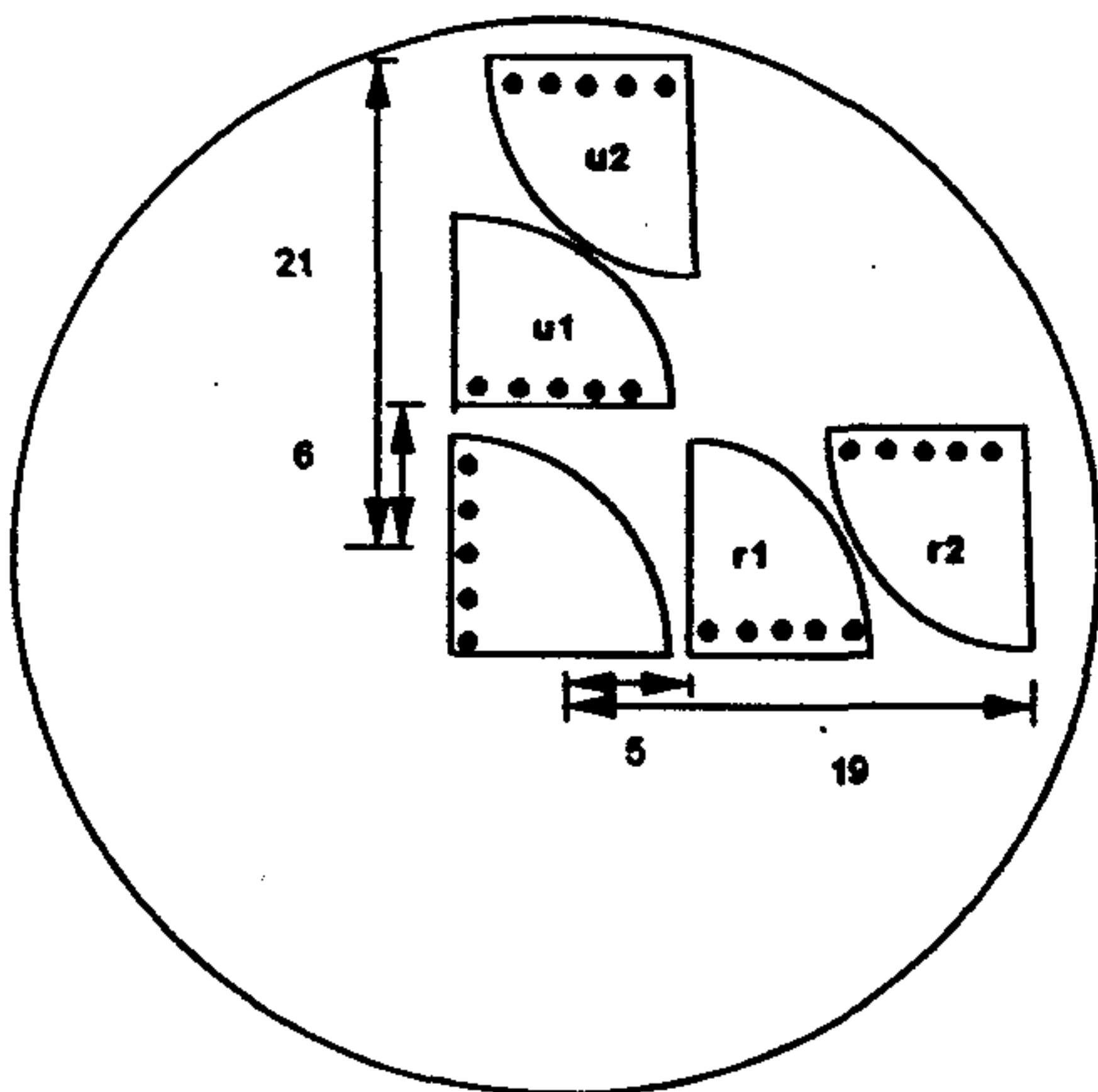


● : gold electrode

▶ determine the uniform area by measuring T_c at each point

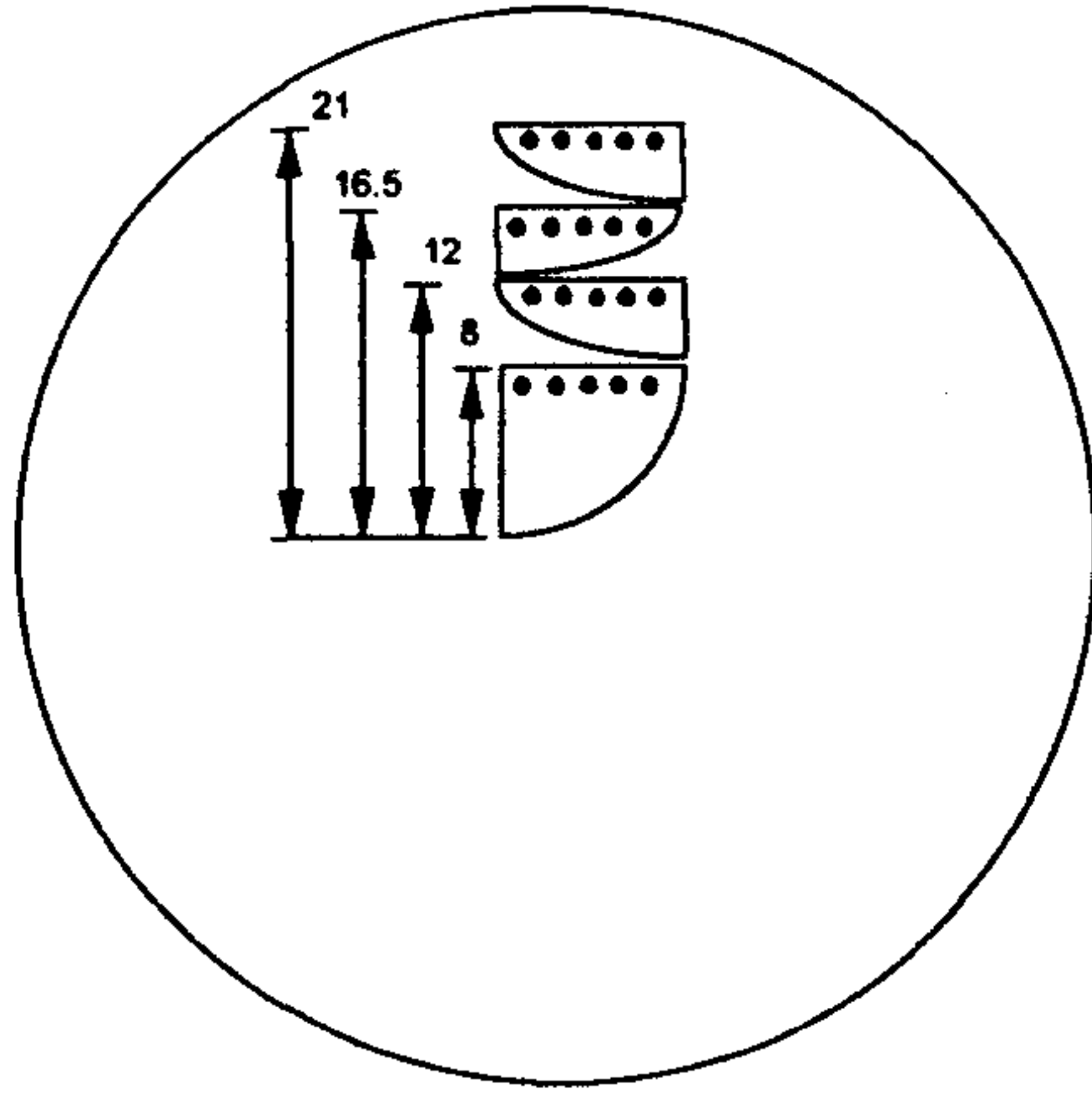
Fig. 2.4 균일한 박막성장의 범위를 측정하기 위한 실험 (I, II)

(a) Method III. (LA-231)



side	distance (mm) (from the center)	T _c (K)
right 1	9 - 11	84.73
right 2	13 - 15	84.62
up 1	6	84.31
up 2	19 - 20	78.15
center	4 - 5	86.07

(b) Method IV. (LA-234)



	distance (mm) (from the center)	Tc (K)
up 1	20 - 21	81.17
up 2	15.5 - 16.5	81.5
up 3	11 - 12	82.07
center	7 - 8	85.25

▶ Maximum uniform area (with the naked eye): 1 inch²

Fig. 2.5 균일한 박막 성장의 범위를 측정하기 위한 실험 (III, IV)

2) 박막 Morphology 개선 실험

PLD법은 고온초전도체나 유전체 박막 제작에 널리 사용되고 있다[1-3]. 그러나, PLD법으로 제조한 YBCO 박막의 경우, 증착 박막의 두께 및 조성 차가 박막의 마이크로파 표면저항(microwave surface resistance)에 크게 영향을 미친다. 또한 SQUID 및 접합소자(junction device)등의 전자 소자 제작시, 박막에 형성된 입자(particulates)들은 적층 성장시킨 초격자 (epitaxial-superlattice)와 터널 접합 (tunnel junction)에 유해하게 작용한다[5-6]. 또, 타겟 표면에 조사되는 펄스 레이저의 입사수가 증가함에 따라 타겟 표면에 원추형 돌기(cone)가 형성되어 표면이 거칠어지는 문제점도 있다.

박막의 표면 입자 밀도를 최소화하기 위하여 여러 증착 변수들의 영향이 고려되었다. 기판 온도, 타겟-기판 사이 거리, chamber 압력, 레이저 빔의 밀도 등과 함께 타겟 표면에 형성된 돌기 형태와 방향성도 박막의 조성과 성질에 영향을 미친다. 레이저 beam 조사 횟수와 방향에 따른 라만 스펙트럼 결과에 따르면, 타겟 표면에 형성된 돌기의 방향은 레이저의 조사 방향과 일치하고, 빔의 조사 방향을 바꾸면 돌기 크기가 줄어든다. 또한 여러 방향에서 조사된 레이저 빔에 의해 표면의 돌기가 타겟 표면에 수직하게 성장한 경우, 타겟 표면의 라만 스펙트럼이 YBa₂Cu₃O_{7-x} 상을 유지하므로[7], 이 같은 효과를 얻기 위하여

target oscillation 방법을 사용하여 타겟 표면에 맞는 빔의 방향이 거의 random하게 되도록 조정하였다. 그리고, 레이저의 초점 거리를 유지하면서 레이저 beam의 에너지를 낮추기 위해 4:1 attenuator를 사용하였다.

3) Target oscillation

타겟 위에 조사하는 laser beam의 spot 위치를 변화시키기 위해, 타겟 자체를 회전시키는 방법이 널리 사용되고 있다[8]. 그림 2.6은 타겟을 회전시키면서 빔을 조사했을 때 나타나는 빔의 궤적을 simulation 한 것으로, 각각 40회와 60회 조사한 후 타겟 표면 상태를 나타낸 것이다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 타겟에 조사한 beam spot들이 만드는

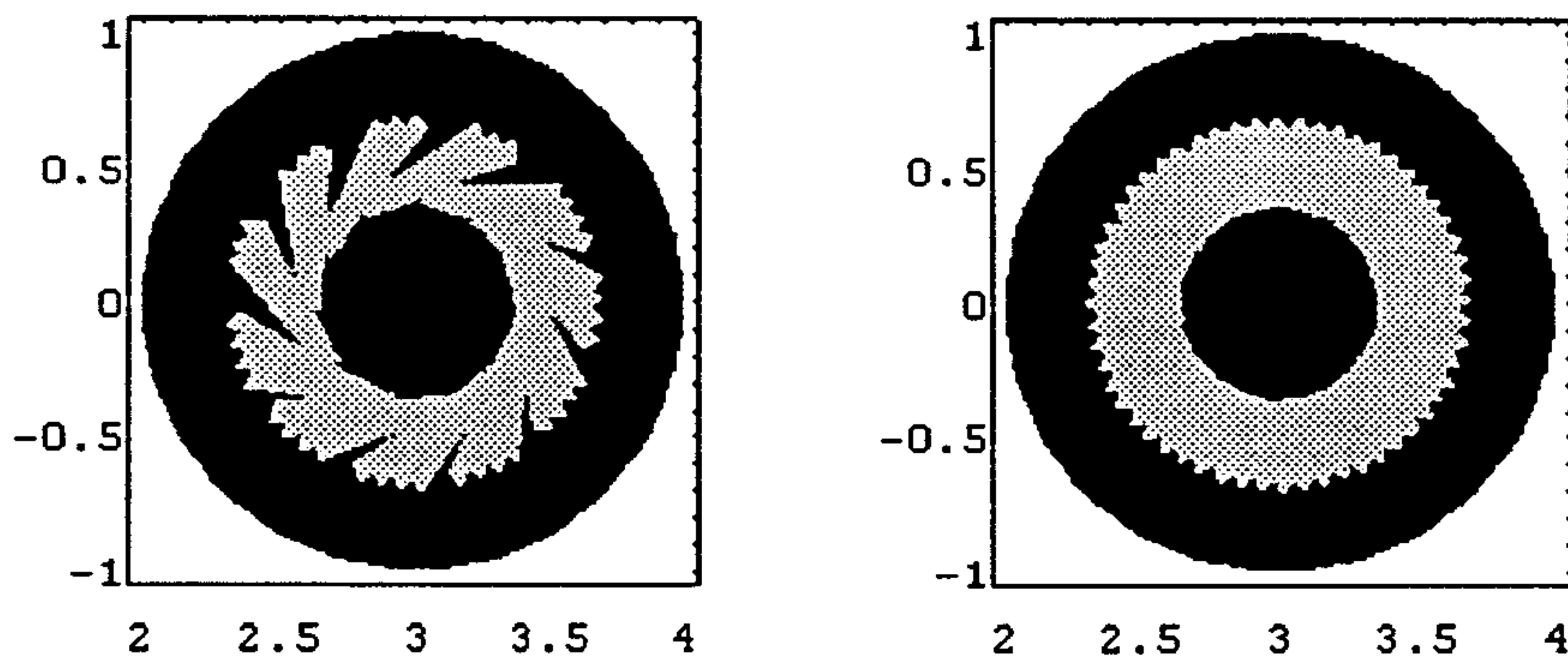


Fig. 2.6 타겟을 회전시키면서 laser beam을 각각 40회와 60회 조사하였을 경우의 타겟 표면에 생기는 laser beam spot 궤적

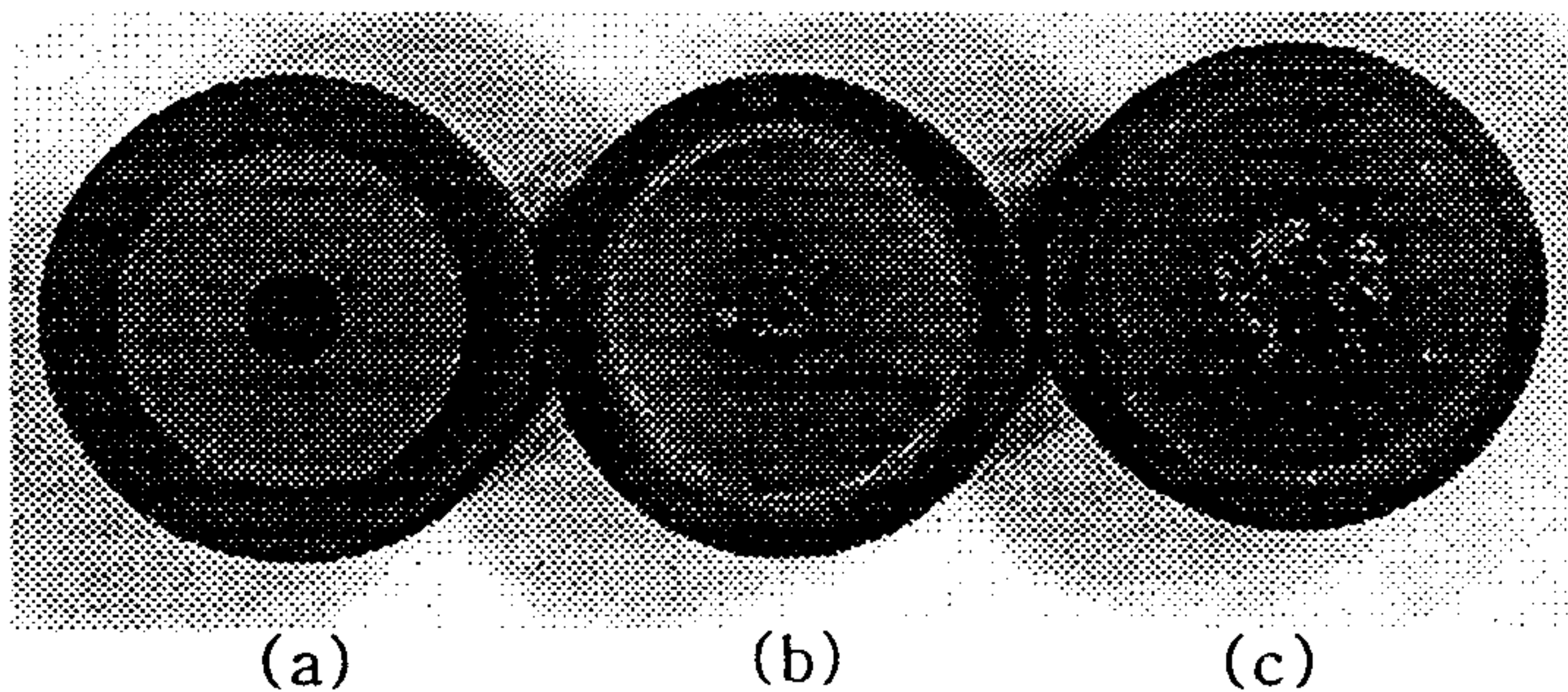


Fig. 2.7 타겟을 회전시키면서 laser beam을 조사하는 경우, 여러 가지 조건에서 타겟 표면 변화를 광학 현미경으로 관찰한 사진 (a) 1.5 J, 100 mTorr, (b) 1 J, 10 mTorr, (c) 3.2 J

궤적을 관찰해 보면 궤적의 안쪽 부분이 바깥 부분에 비해 beam 조사 밀도가 높은 것을 확인할 수 있다. 따라서 궤적 안쪽 부분이 더 빨리 ablation되어 없어진다. 한편, beam 조사 횟수가 많아지면서 plume의 방향이 타겟에 수직인 방향으로부터 벗어나게 되는데, 이같이 plume의 방향이 변하면 기판 위에 성장하는 박막 성질이 불균일해 진다[7].

Fig. 2.7은 타겟을 회전시키면서 laser beam을 조사한 경우, 산소압과 laser energy density에 따른 타겟 표면 변화를 보여주고 있다. (a) 경우, ablation 후 타겟 표면이 매우 균일한 반면, (b), (c) 경우는 액상이 형성되었음을 확인할 수 있다. 타겟 표면의 액상 형성은 산소압과 laser beam의 energy density에 따라 좌우된다. (a)는 1.5 J/cm², 100 mTorr의 조건으로, (b)는 1.5 J/cm², 10 mTorr로 제작한 것으로서, (b)에서 액상이 형성된 이유는 산소압이 낮아짐에 따라 YBCO의 melting temp가 낮아졌기 때문이다. 한편, (c) 경우는 density가 1.5 J/cm²로부터 3.2 J/cm²로 증가함에 따라 density가 과도하게 커졌기 때문이다.

Laser beam 조사 방향을 random하게 하면 타겟 표면이 균일하게 ablation 되어 표면 돌기가 타겟에 거의 수직하게 형성되며, 따라서 증착 도중 plume이 타겟 중심 쪽으로 기울어지는 현상도 일어나지 않는다[8]. 회전 및 진동 속도에 따라 simulation해 본 결과, 타겟 회전과 진동을 병행하면 Fig. 2.9의 궤적을 따르게 되는데, 이것으로부터 타겟 표면에 관하여 입사 방향이 다른 빔들을 조사할 수 있음을 확인하였다.

Fig. 2.8은 레이저 빔의 크기와 위치를 고려하여, 본 실험 장치에 맞도록 타겟 상하 진동 범위를 계산하여 도식화한 것이다. 굵은 회색 라인으로 표기한 위, 아래의 작은 원들이, 타겟이 진동할 수 있는 최대 범위를 나타내고 있다. 큰 원은 타겟 6개가 들어가는 전체 타겟 carousel을 나타내고, 이 원의 중심이 타겟 상, 하 진동의 중심이 된다. 따라서 이 원주를 따라 타겟이 진동하므로, 레이저 빔의 위치가 고정되어 있을 때 타겟이 상, 하로 진동할 수 있는 최대 범위를 계산할 수 있다.

타겟이 진동하여 빔의 가장자리가 타겟의 가장자리에 왔을 때, 중심에서 빔의 가장 먼 코너까지의 각도를 ϕ 라 하면,

$$\text{maximum revolution angle } (\phi) := \sin^{-1}(W / r)$$

이를 이용하여 최대 진동각도를 계산하면,

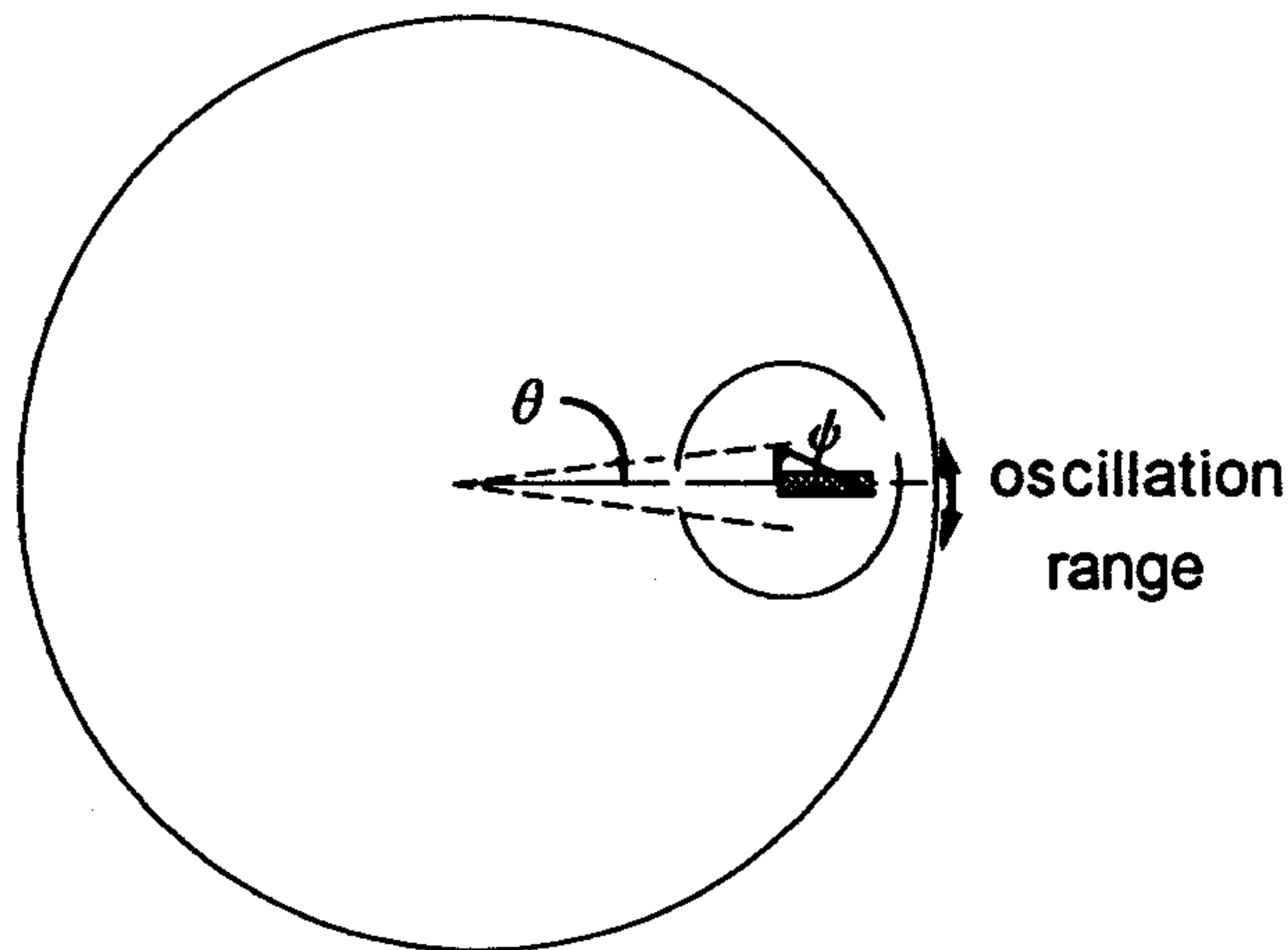
$$\text{maximum oscillation angle } (\theta) := \sin^{-1}((r \cos \phi - (H/2)) / R)$$

이다. 여기서 W는 빔의 폭, H는 빔의 높이를 나타내며, R은 진동 반경, 그리고, r은 타겟의

반지름이다.

Fig. 2.9는 타겟 회전 속도에 따른 laser beam spot의 궤적 변화를 simulation한 것이다. 첫째 열 세 개의 그림은 타겟 회전 게이지 속도를 8(rpm : 53.6)로부터 조금씩 줄이면서 laser beam을 50회 조사한 것이고, 두 번째 열의 그림은 각각 좌측의 그림과 같은 속도로 100회씩 빔을 조사한 후의 laser beam spot의 궤적이다.

세 번째 행의 두 그림은 회전 속도와 진동 속도 비가 정수 비 일때 simulation한 것으로, beam spot 궤적이 beam을 50회 조사했을 때와 100회 조사했을 때 모두 일정한 패턴을 유지하는 것을 볼 수 있다. 이러한 경우, 레이저 빔의 조사 방향이 계속 같으므로, 타겟 표면이 부분 melting되어 형성되는 돌기의 방향이 한쪽 방향으로 치우치게 되어, 앞서 설명한 것과 같이 plume 방향이 변하게 된다. 따라서 이러한 조건 하에서 제작하면 박막 위치에 따라 조성이 달라진다. 더욱이 laser beam에 조사되어 일단 표면이 부분



- revolution radius (R) : 38 mm
- target radius (r) : 10.95 mm
- beam spot size (energy density : 1.34 J/cm²)
 - (H) : 1.0 mm
 - (W) : 5.15 mm
- maximum revolution angle (φ) := $\sin^{-1}(5.15 / r)$
= 28.06
- maximum oscillation angle (θ) := $\sin^{-1}((r \cos \phi - 0.5) / R)$
= 13.95

Fig. 2.8 Calculation of the Oscillation Range (θ)

melting 된 상태에서 같은 위치에 다시 beam이 조사될 확률이 높아지므로, 타겟 자체에 과량의 액상이 형성된다. 타겟 표면에 과량의 액상이 형성되면, 자체 회전에 의한 원심력으로 바깥쪽으로 액상이 퍼지게 되고, 또한 레이저 빔에 의해 ablation될 때 박막 표면에 particle로 형성되므로 박막 특성을 저하시키게 된다. 따라서, 타겟 자체 회전과 상, 하 진동 속도의 상관 관계를 고려하여, 최대한 beam이 고르게 분포되도록 조건을 결정해야 한다.

Fig. 2.10은 타겟의 회전 속도와 박막의 morphology와의 관계를 나타낸 것이다. 타겟을 일정한 속도로 진동시키면서 (진동 주기 = 1.6 sec), 타겟 회전 속도를 변화시키면서 표면 morphology를 관찰하였다. Fig. 2.10에 나타낸 바와 같이 타겟 회전 속도가 빨리짐에 따라 표면에 형성된 입자들의 수가 현저히 줄어드는 것을 알 수 있다. 이는 타겟을 상, 하로 진동시키면서 동시에 회전시키는 경우, 타겟 표면에 입사된 laser beam이 균일하게 분포되지 못하고 국부적으로 가열되어 타겟 표면에 액상이 형성되었기 때문이다. 따라서 타겟의 상, 하 진동과 회전을 동시에 수행하는 경우, 최적 조합비를 확보하는 것이 매우 중요하다는 것을 알 수 있다. 현재 사용하는 조건은 회전속도 rpm :53.6 (gauge :8)에 진동 주기는 1.6 sec이다. 이 조건으로 simulation한 결과가 Fig. 2.9의 첫 번째 행이며, 이 경우에도 빔의 밀도는 중앙부분이 더 높으나, Fig. 2.6에서 보다 넓은 면적의 타겟에 빔을 조사시킬 수 있었고, 전체적으로 빔의 방향이 고른 분포를 보이는 것을 확인할 수 있다.

4) 박막 thickness 측정 실험

PLD법으로 박막을 제작하는 경우, 레이저의 power는 거의 일정하게 유지할 수 있으며, 기판 온도, 산소압, 타겟과 히터 사이의 거리 조건도 안정하게 유지할 수 있다. 따라서 일정하게 plume을 발생시킬 수 있기 때문에 일정한 조건 하에서 제작한 박막 두께를 측정하면, 각 물질에 관한 펄스 당 형성 두께를 계산할 수 있다. 실제로 이를 소자 제작에 응용하여, 기판 위에 원하는 두께의 박막을 성장시킬 수 있다.

박막의 두께를 측정하기 위하여 두 가지 방법을 사용하였는데, 첫째 방법은 기판을 마스크를 사용하여 가린 후 deposition하여, 기판과 마스크 사이에 형성된 step 높이를 측정하는 것이고, 다른 한가지는 일정한 두께로 제작한 박막에 patterning을 하여 step을 만들고 그 높이를 측정하는 것이다.

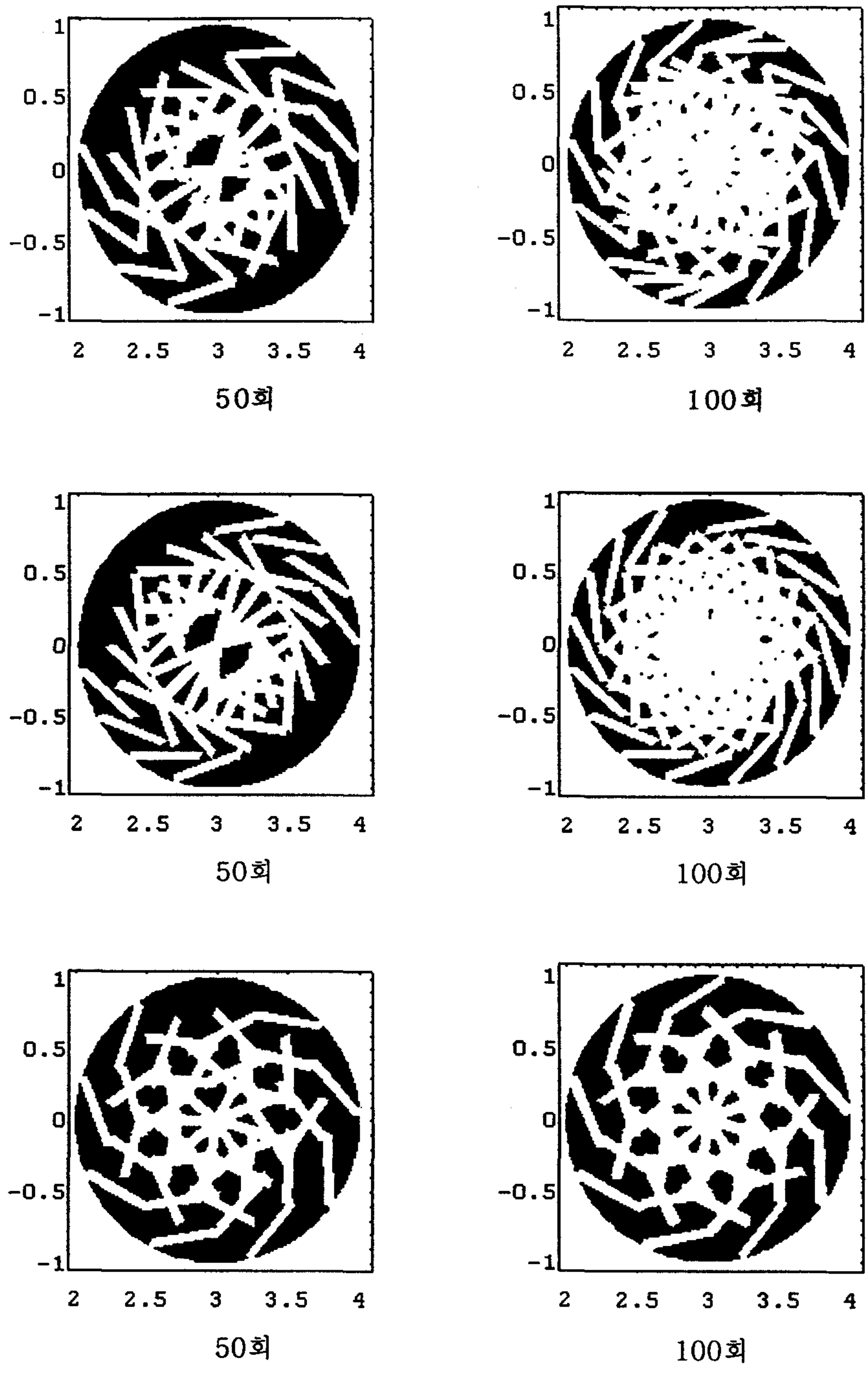


Fig. 2.9 진동, 회전 속도 비에 따른 laser beam spot 궤적

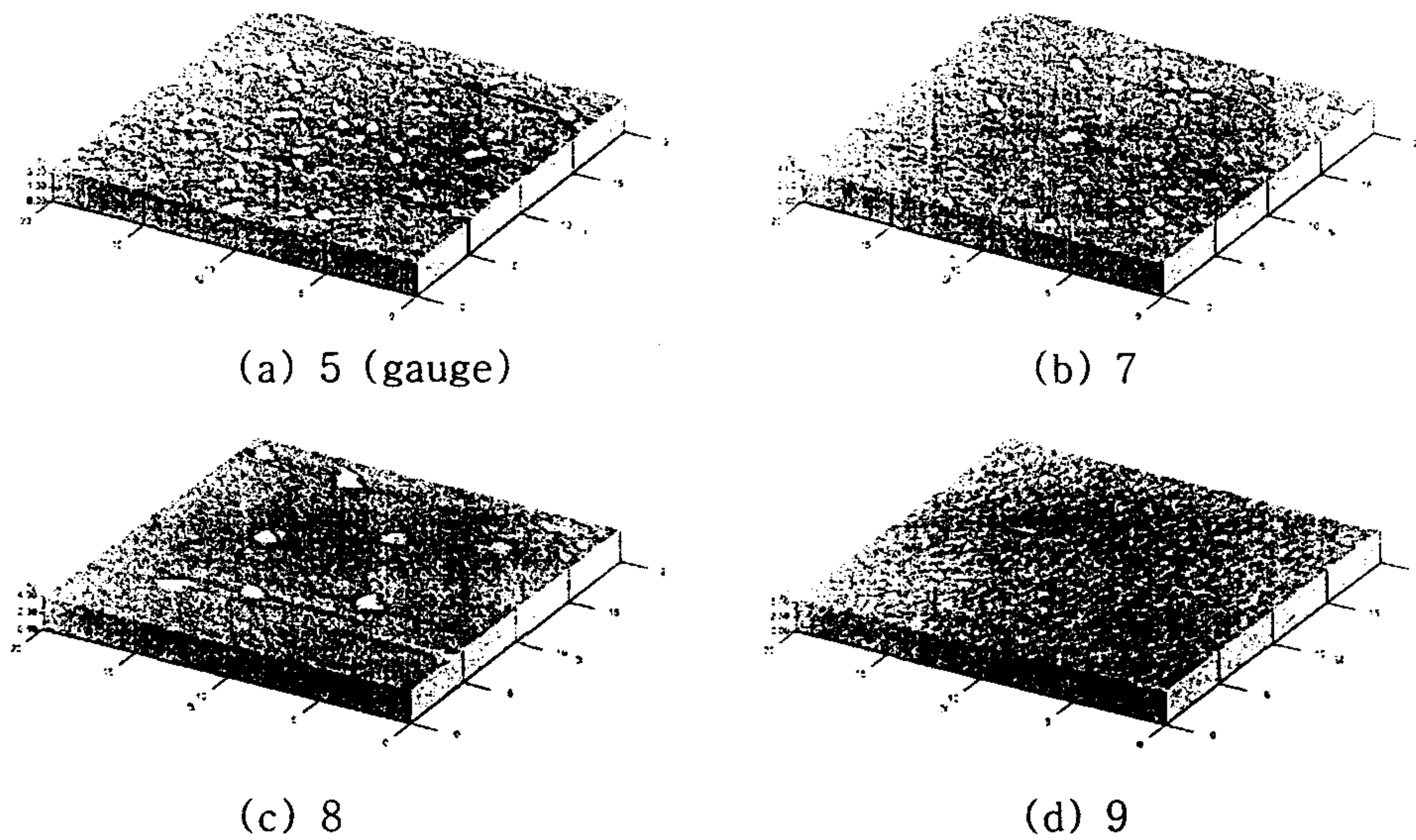


Fig. 2.10 타겟 회전 속도와 박막 morphology와의 관계

2.2.2 결과 및 토론

PLD법을 이용하여 양질의 YBCO 박막을 제작하기 위해 주요 변수들의 최적화를 시도하였다. 우선 박막 특성에 크게 영향을 주는 주 변수와 그렇지 않은 보조 변수들을 분리한 후, 주 변수들의 최적화를 위해 실험을 진행하였다.

YBCO 박막을 PLD법으로 제작하기 위해 필요한 기판 온도 범위를 확보코자 일반적으로 알려진 기판 온도 범위인 700~840℃를 사용하였다. Fig 2.11은 기판으로서 MgO와 LaAlO₃를 기판으로 사용한 경우, 기판 온도에 따른 T_c 변화를 나타낸 것이다. 이 경우 산소 압력은 500 mTorr, 타겟-기판 사이 거리는 60 mm로 유지하였다. MgO 기판을 사용한 경우, 720℃ 이상으로 온도가 증가함에 따라 T_c가 점진적으로 증가하여 800℃에서 가장 높은 T_c인 91.5 K를 나타내었다. 그러나 기판 온도가 800℃ 이상이 되면 T_c는 급격히 감소하였다. 한편, LaAlO₃ 기판의 경우도 이와 유사한 경향을 나타내었으나, 90 K 이상의 T_c를 나타내는 기판 온도 범위가 MgO 경우보다 훨씬 넓어 약 100℃ (740~840℃) 범위에서 89 K 이상의 T_c를 나타내었다. 기판 온도가 840℃ 정도로 높은 경우에도 90.6 K의 매우

높은 T_c 를 관찰할 수 있었는데, 그 보다 더 높은 기판 온도는 사용한 heater 특성상 실험 수행이 불가능하였다. 한편, Roshko 등은 기판 온도에 따른 T_c 변화를 관찰하였는데, LaAlO_3 기판의 경우, 본 실험 결과와 유사한 경향을 보고하였다[9]. 또한 상기 보고에 의하면, LaAlO_3 기판은 SrTiO_3 , MgO , YSZ (yttria stabilized zirconia) 기판에 비해 기판온도 변화에 따른 T_c 변화 폭이 훨씬 적었으며, 동일한 온도(790°C)를 유지하는 경우 SrTiO_3 , MgO , YSZ 순으로 특성 재현성이 저하되었다. 이는 SrTiO_3 를 비롯한 다른 기판 들은 LaAlO_3 기판에 비해 온도 변화에 더욱 민감하기 때문이며, 이 같은 효과는 기판 물질의 emissivity 차이에 의해 더욱 현저해 질 수 있다. Fig 2.12는 Roshko가 보고한 결과를 나타낸 것이다.

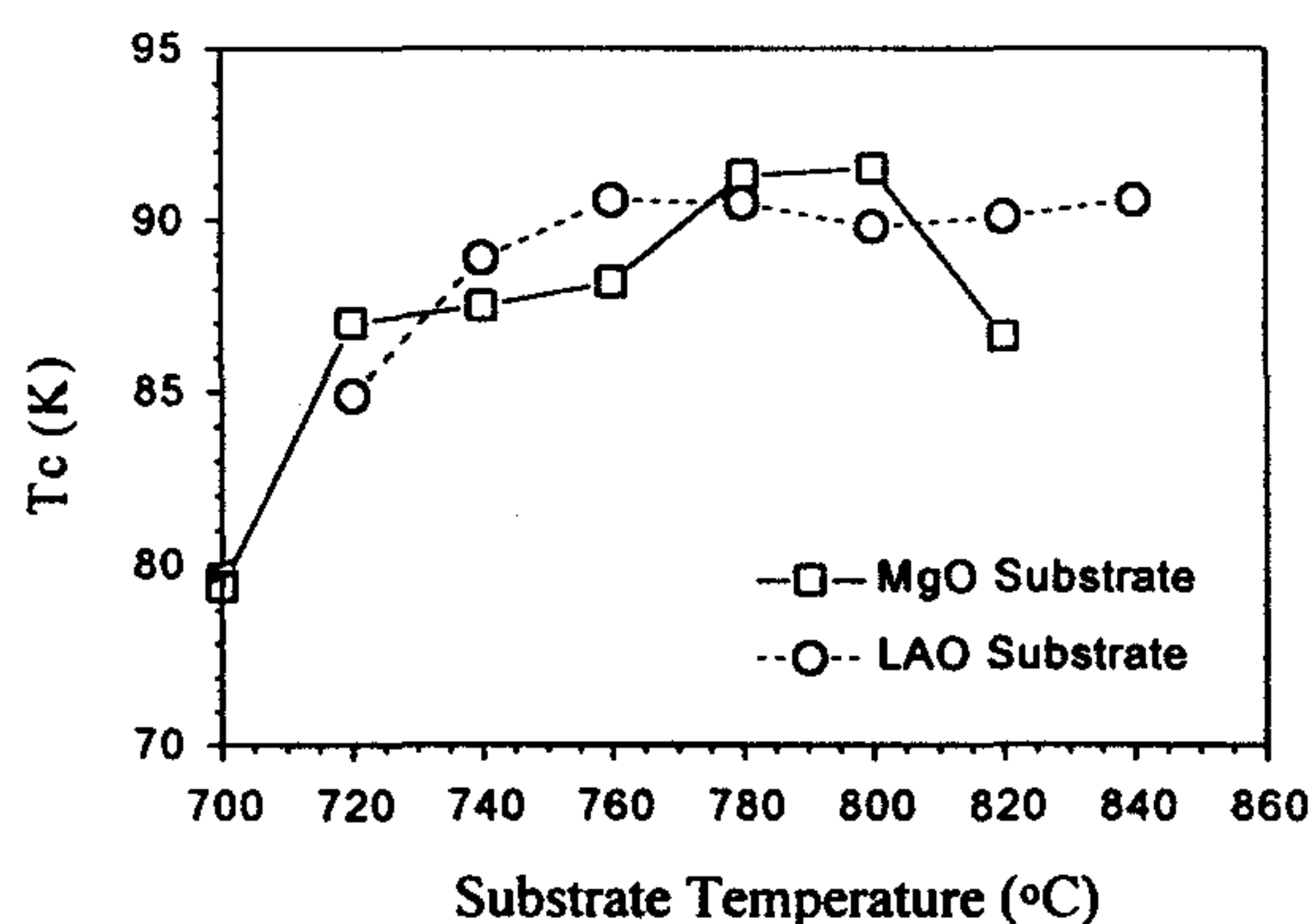


Fig. 2.11 기판 온도에 따른 T_c 변화 (MgO 와 LaAlO_3 를 기판으로 사용한 경우)

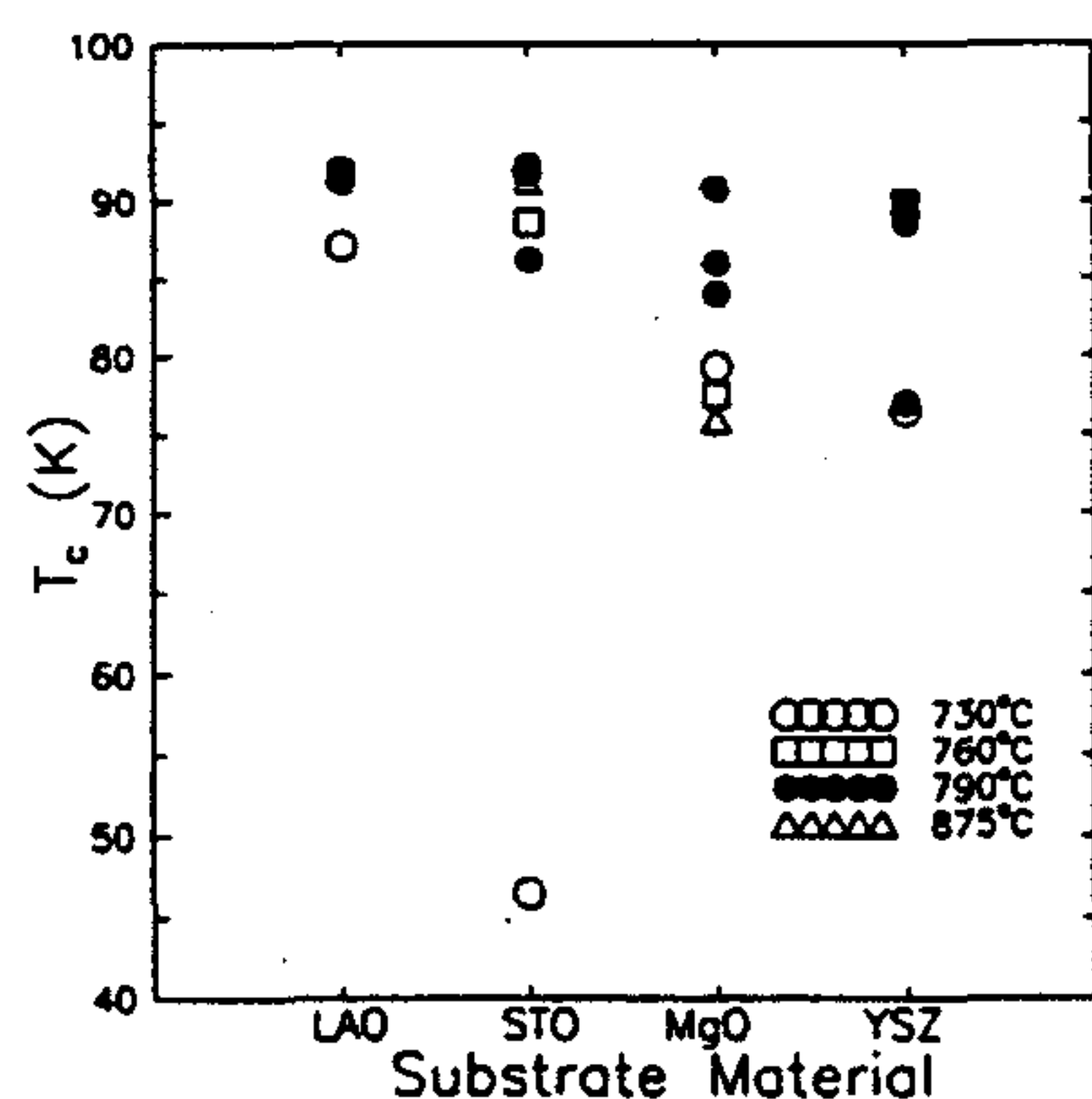


Fig 2.12 기판 종류, 기판 온도에 따른 T_c 변화 (Roshko et al.)

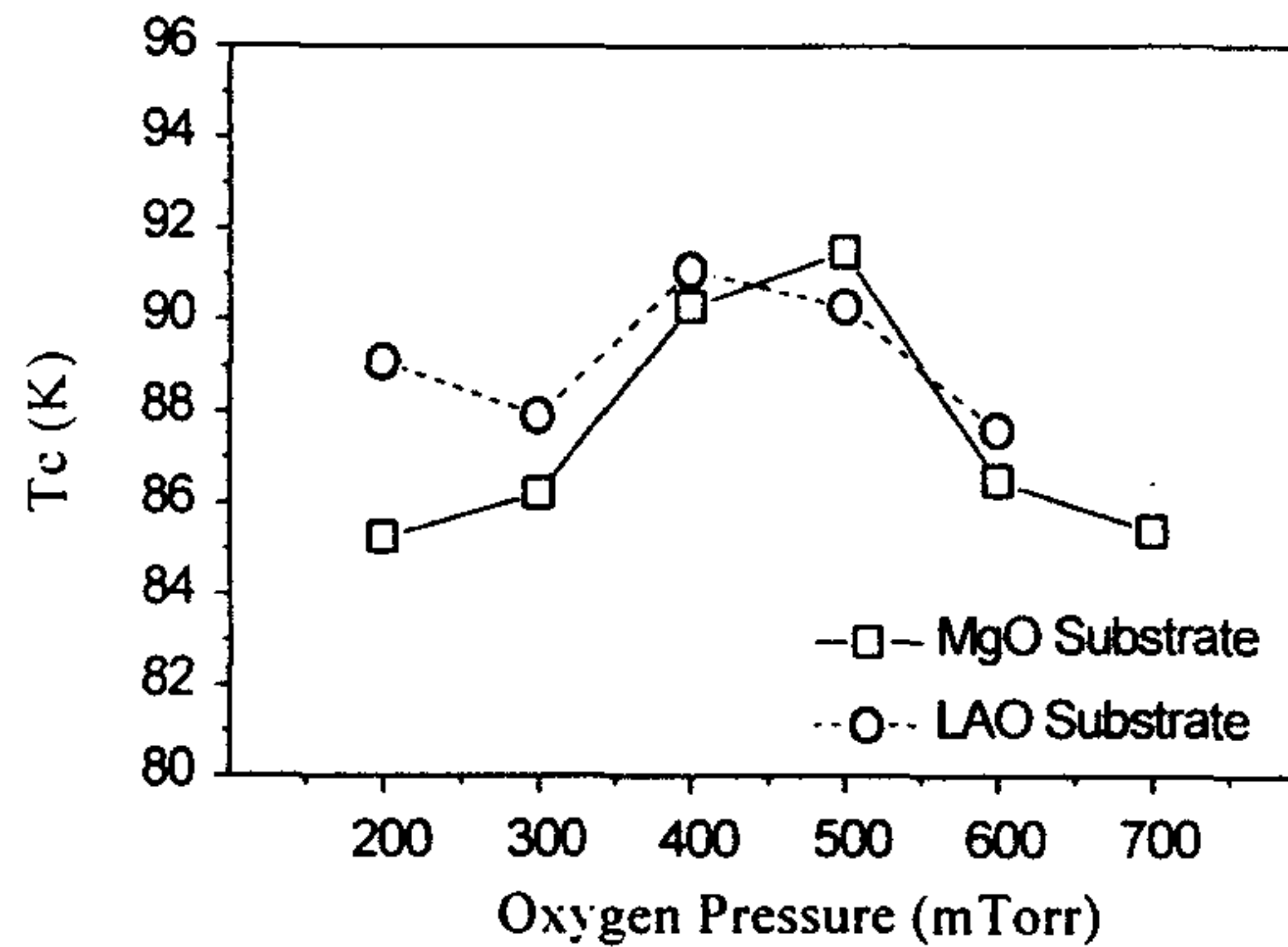


Fig 2.13 산소 분압에 따른 T_c 의 변화 (MgO, LaAlO_3 기판 경우)

한편, 당 팀의 실험 결과에 의하면 기판 온도가 760°C 이상인 경우는 사용한 기판 종류 (MgO와 LaAlO_3)에 무관하게 기판 표면에 수직인 방향으로 YBCO 격자의 c -축이 배열하였음을 XRD $\theta-2\theta$ scan을 통해 확인할 수 있었다.

Fig. 2.13은 산소 분압에 따른 T_c 변화를 나타낸 것으로서 사용한 기판 MgO와 LaAlO_3 의 차이를 비교하였다. 그림에서와 같이 deposition 시 산소 분압에 따라 T_c 가 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다. 이 경우 MgO와 LaAlO_3 의 기판 온도는 각각 $800, 780^\circ\text{C}$ 로 하였으며 기타 제조 변수는 Fig 2.11과 동일하게 유지하였다. 산소압을 $400\sim 500\text{mTorr}$ 로 하여 제작한 박막은 사용 기판에 무관하게 90 K 이상의 T_c 를 나타내었다. 반면에 그 이상이나 또는 이하의 압력에서는 T_c 가 저하되었다.

YBCO 박막을 PLD법으로 제작하는 경우, 산소압을 비교적 높게 ($\geq 100\text{ mTorr}$) 유지하는 것이 중요한데, 이는 deposition 중에 격자로부터 빠져나간 산소를 다시 넣어 주기 위함이다. 산소의 또 다른 효과는 박막 제작 온도에서 원하는 상이 형성될 수 있도록 산화 분위기를 만들어 주는 것이다[21]. 일반적으로 YBCO 박막을 in-situ로 제작하는 경우, chamber 내 산소 압력을 $100\sim 300\text{ mTorr}$ 로 유지하는데, 본 실험 결과에서 확보한 $400\sim 500\text{ mTorr}$ 의 산소 압력은 이에 비하여 상당히 높은 압력이다. 이 결과는 YBCO상 형성에 필요한 최적 산소 압력-온도의 상관 관계로부터 해석할 수 있다[10]. 즉, 박막 제작 온도가 증가하면 이에 따라 최적 산소압이 증가하는 비례 관계 때문에, 본 실험에서의 제작 조건과 다른 그룹의 조건을 비교할 수 있다. 당 팀의 연구 결과에 의하면 산소 분압이 높은 조건으로 박막을 제작하면 최적 기판 온도가 높아지는 불리한 점이 있는 반면 동시에 T_c 증진이

용이한 장점이 있다.

Fig 2.14와 15는 각각 산소압이 500 mTorr, 600 mTorr에서 제작한 박막의 표면 morphology를 AFM (Atomic Force Microscope)으로 관찰한 것이다. 사용한 기판은 MgO, 기판 온도 800°C, 타겟-기판 사이 거리 60 mm, 에너지 density 1.0 J/cm²의 조건을 사용하였다. 산소압이 500에서 600 mTorr로 되면 표면에 형성된 입자의 크기와 수가 현저히 늘어나는 것을 확인할 수 있었으며, 이러한 경향은 700 mTorr에서 두드러졌다.

Fig. 2.16은 타겟-기판 사이 거리에 따른 T_c 변화를 나타낸 것이다. 사용 기판은 MgO, 산소압은 400 mTorr인 것만을 제외하고 앞서 Fig. 2.16과 동일한 변수를 사용하였다. 89K 이상의 T_c를 보이는 타겟-기판 사이 거리는 50~60 mm임을 알 수 있다. 여러 연구 그룹들의 보고에 의하면, laser plume 안에 있는 여러 입자들은 타겟 부근에서 10⁶ cm/sec 이상의 속도를 갖으며, 타겟으로부터 멀어짐에 따라 chamber 내부의 산소 입자와 부딪혀 속도가 감소된다[11]. 이와 같이 plume 내부의 입자들은 운동 에너지가 매우 크기 때문에, 타겟-기판 사이 거리가 짧을 때는 박막의 표면을 손상시킬 수 있다.

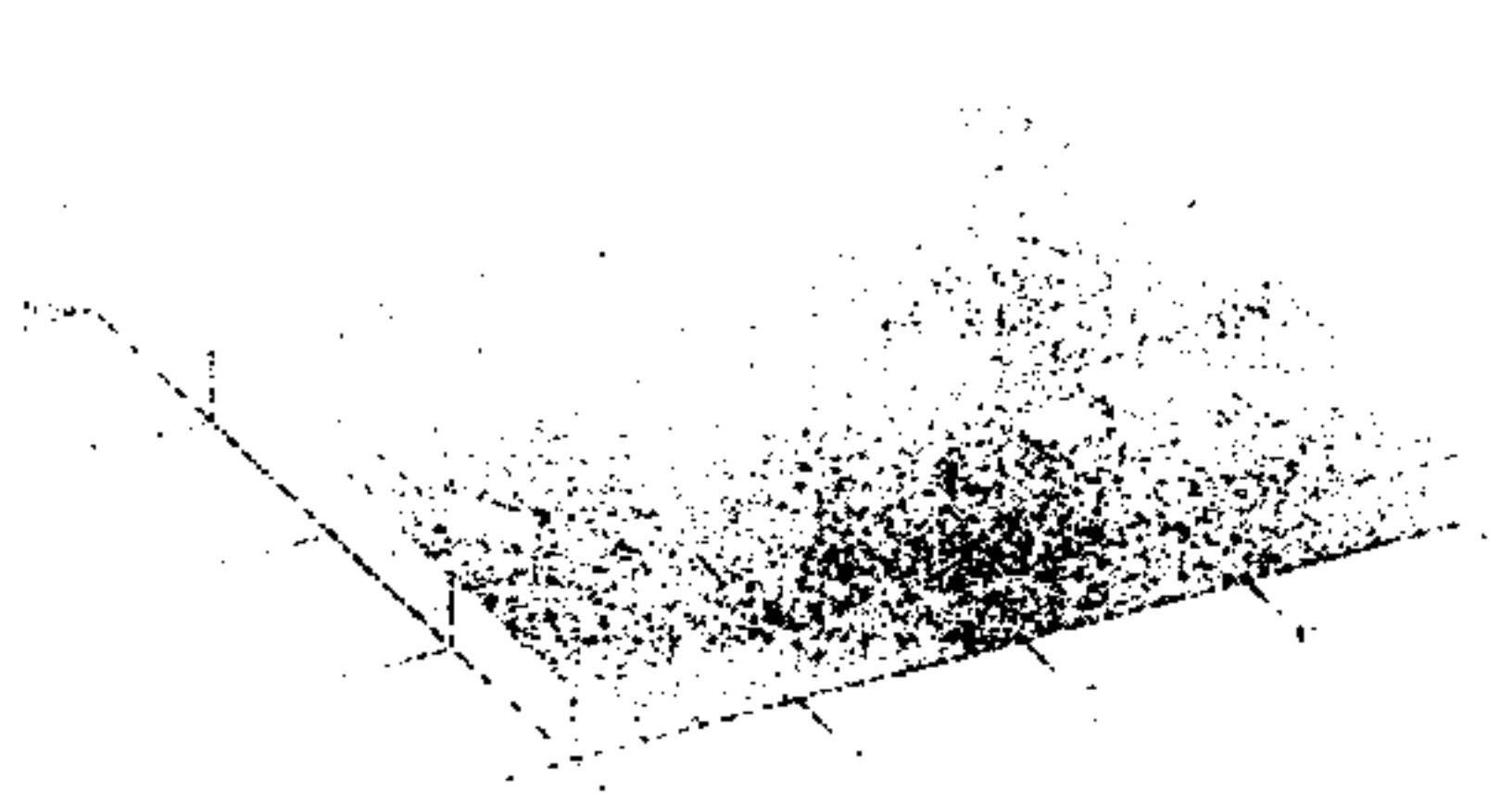


Fig 2.2.14 산소압 500 mTorr에서 제작한 박막 표면 AFM 사진

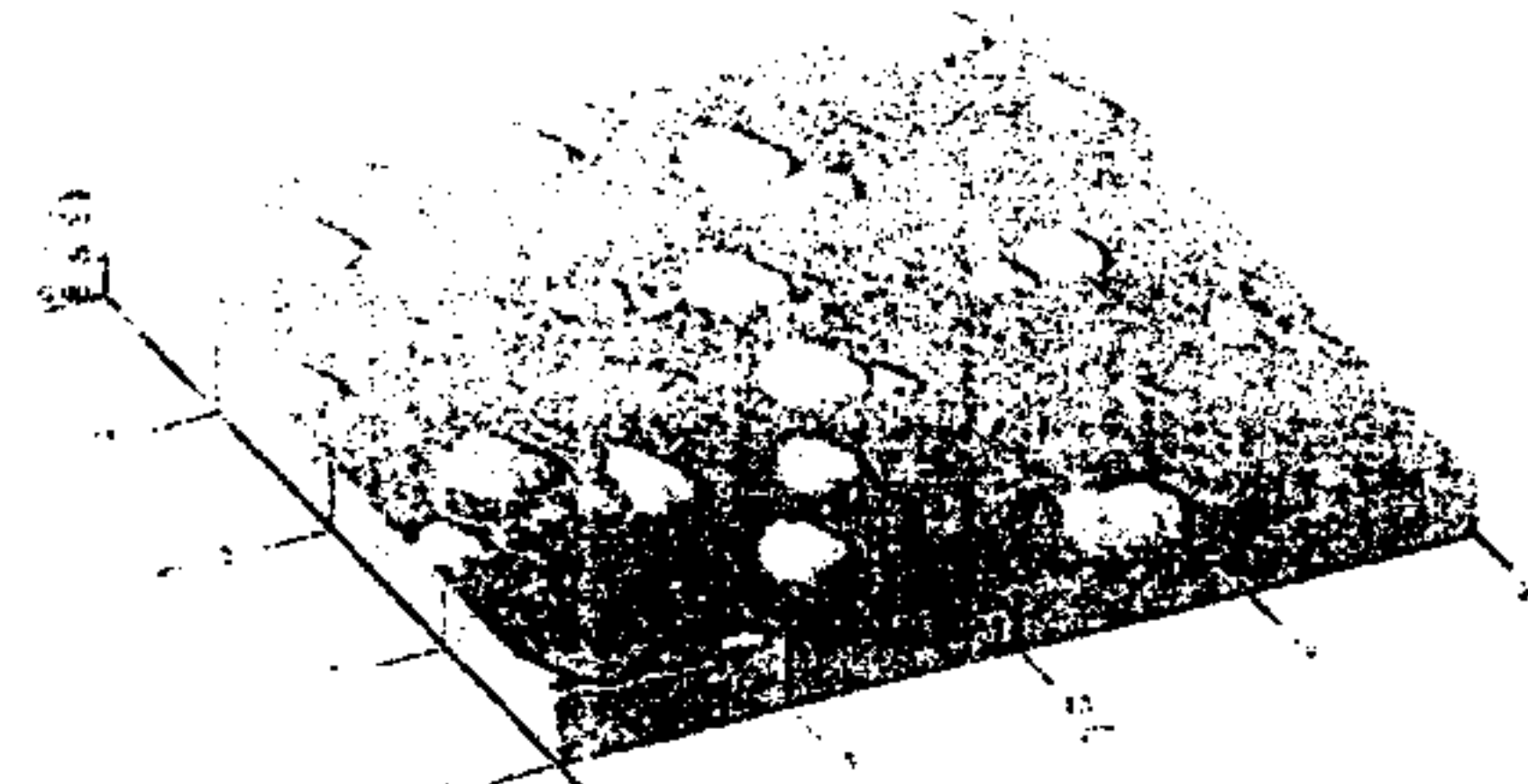


Fig 2.2.15 산소압 600 mTorr에서 제작한 박막 표면 AFM 사진

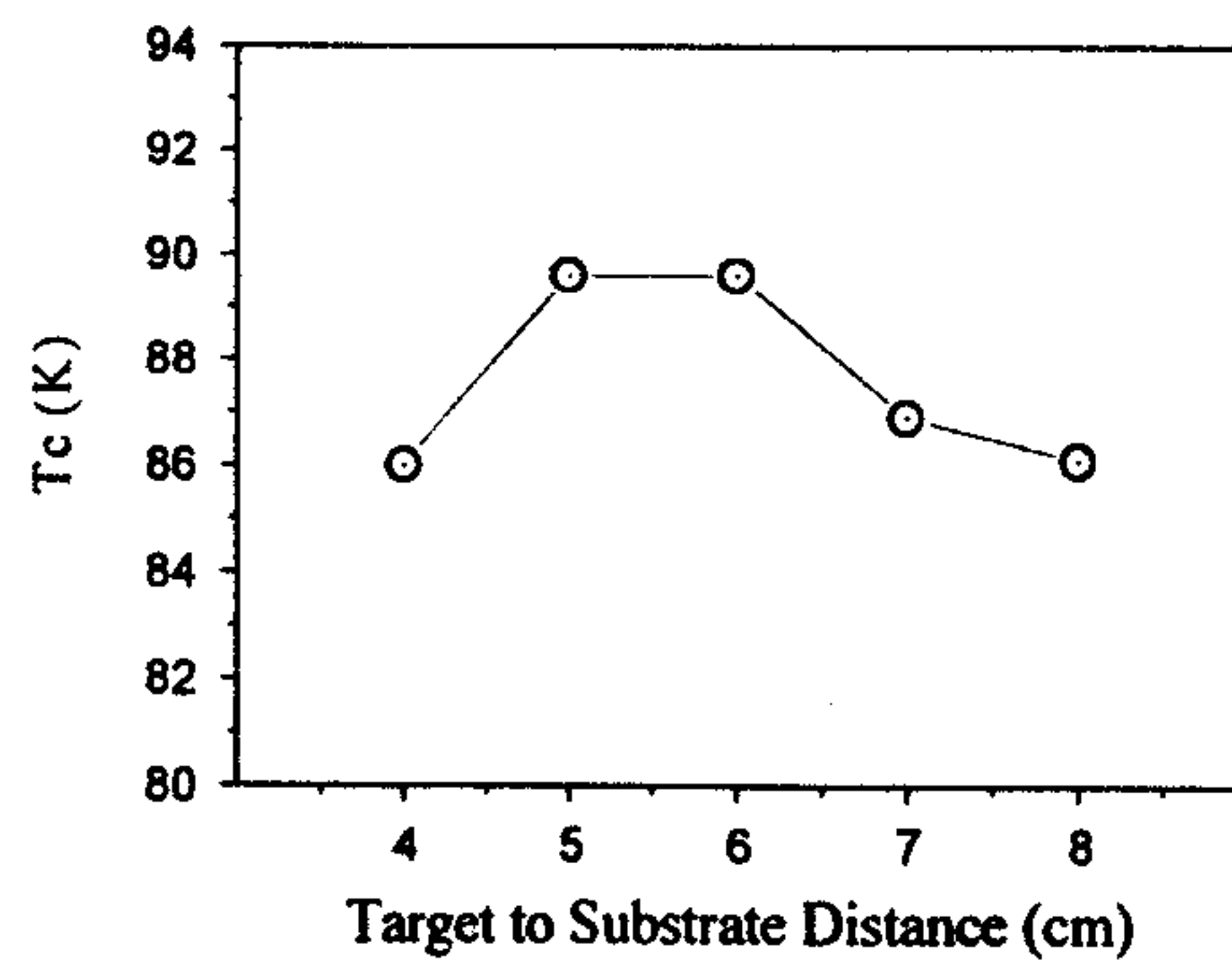


Fig 2.16 타겟-기판 사이 거리에 따른 T_c 변화.

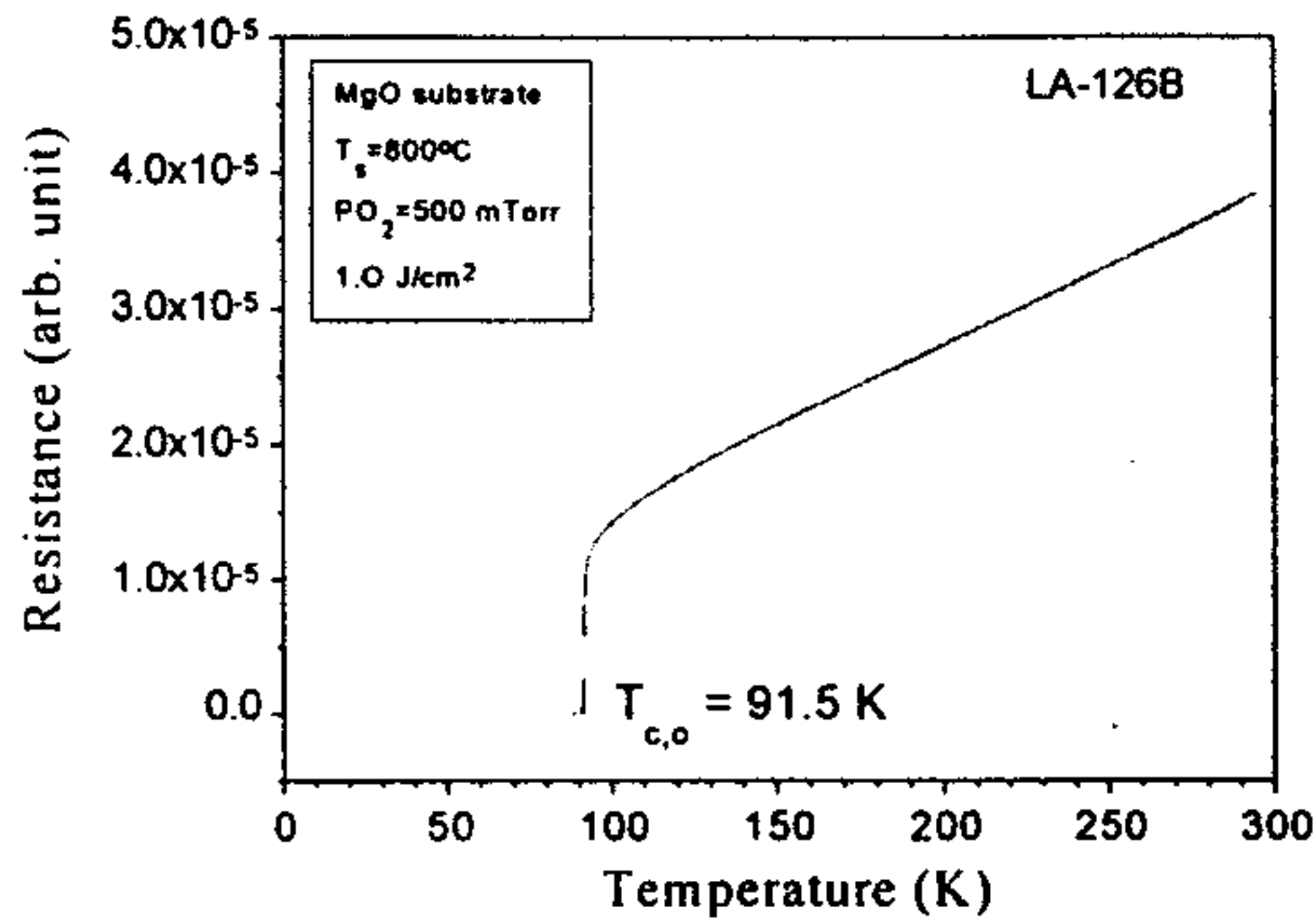


Fig. 2.17 온도-저항 특성 (MgO 기판 경우)

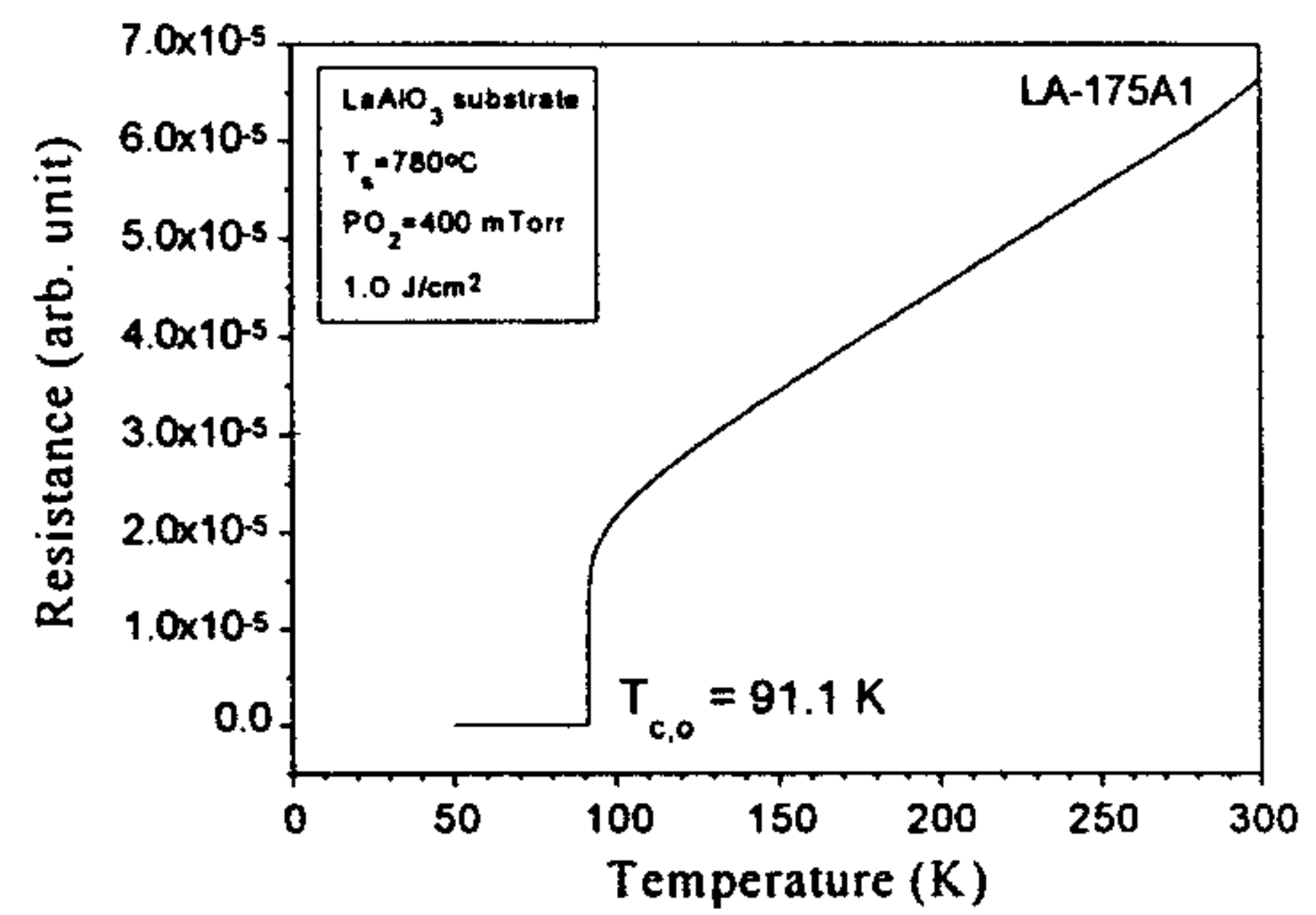


Fig. 2.18 온도-저항 특성 (LaAlO₃ 기판 경우)

반면 타겟-기판 사이 거리가 늘어나면 deposition rate가 눈에 띄게 줄고, plume내 입자들의 에너지가 산소 가스 입자와의 충돌에 따라 급격히 감소된다. 입자의 운동 에너지 감소는 증착 물질(deposited species)들의 확산(diffusion)을 현저히 저하시켜, 결국 박막의 질을 저하시킨다. 그러므로 기판은 타겟으로부터 적당한 거리에 위치하여야만 양질의 박막을 제작할 수 있다. 한편, 최적 타겟-기판 사이 거리는, 어떠한 제조 조건 하에서 형성된 plume 크기와 비슷하다는 것도 기억해 둘 만한 know-how이다. Fig. 2.2.19의 50~60 mm의 거리는 이 조건에서 형성된 plume 크기와 정확히 일치하였다.

Fig. 2.17은 MgO 기판을 사용하는 경우, 최적 조건을 사용하여 제작한 박막의 온도-저항 특성을 나타낸 것이다. 800°C, 500 mTorr의 조건에서 가장 우수한 T_c 인 91.5 K를 얻을 수 있었다. 또한 Fig. 2.18은 LaAlO₃ 기판 경우의 온도-저항 특성을 나타낸 것으로서 $T > T_c$ 범위에서 저항 변화는 급속의 전형적인 거동을 나타내며, normal 저항 기울기가 원점을 통과하는 것을 확인할 수 있다. 위와 같은 제조 조건을 사용한 경우, 90~92 K의 매우 높은 T_c 를 재현성 있게 제작할 수 있었다.

제작한 박막의 결정성을 관찰하기 위해서 x-ray를 사용하여 결정구조를 관찰하였다. Fig. 2.19는 MgO 기판을 사용하여 800, 500 mTorr 조건으로 제작한 YBCO 박막의 $\theta - 2\theta$ x-ray diffraction (XRD) 결과를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 (00 l) peak만이 관찰되는 것을 알 수 있는데, 이는 기판 면에 수직인 방향으로 YBCO c-축이 완벽하게 배향되었음을 나타내는 것이다. Fig. 2.20은 Fig. 2.19 시편의 in-plane alignment를

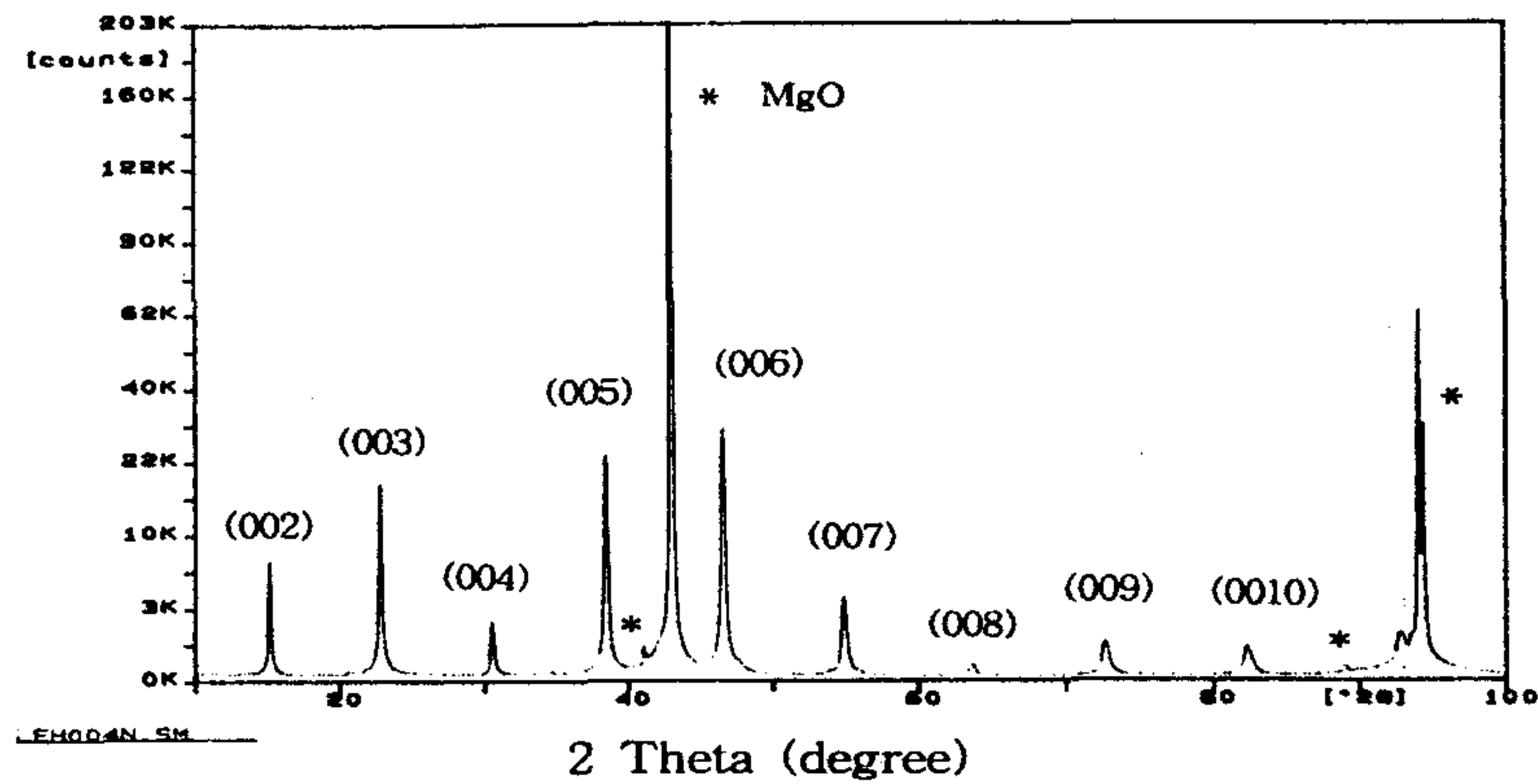


Fig. 2.19 MgO 기판 위에 제작한 YBCO 박막의 $\theta-2\theta$ x-ray diffraction (XRD) 측정 결과 (800 °C, 500 mTorr)

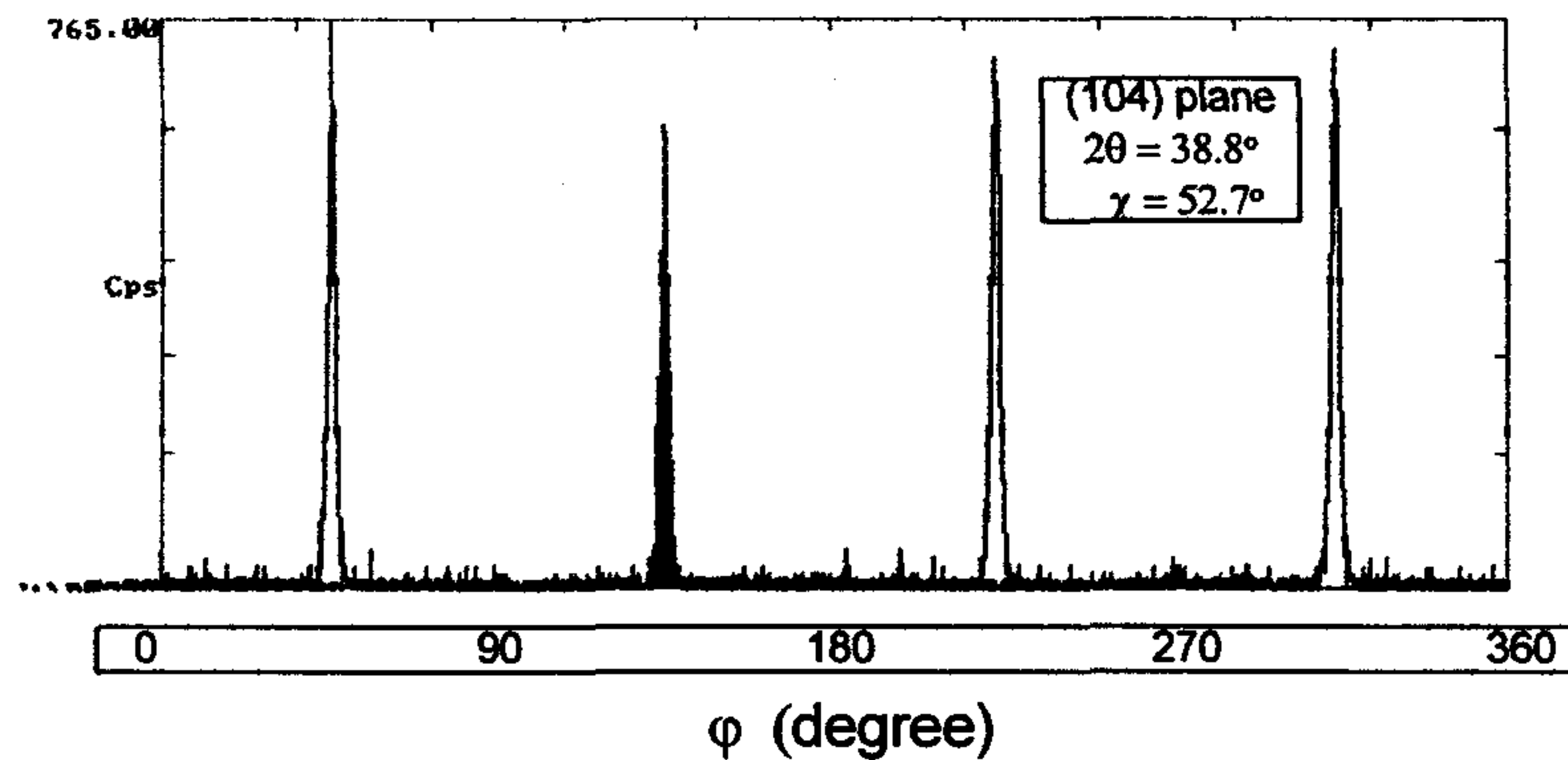


Fig. 2.20 MgO 기판 위에 제작한 YBCO 박막의 x-ray ϕ scan (800 °C, 500 mTorr)

확인하기 위해서 YBCO (104)면의 ϕ -scan을 측정한 data이다. 그림에서 관찰할 수 있는 바와 같이 $0^\circ\sim 360^\circ$ scan시 단지 4개의 peak 만이 나타나는데, 이는 위의 조건으로 제작한 박막의 in-plane epitaxy가 매우 양호함을 나타내는 것이다. 또한 in-plane epitaxy는 micro-Raman을 이용하여 polar plot을 관찰함으로써 재 확인할 수 있었다. Fig. 2.21은 Micro-Raman의 polar plot을 관찰한 것으로서, 박막의 일정 부위를 360° 회전시키면서 Raman scattering 강도를 측정한 것이다. Raman scattering의 진동 mode는 결정 축 방향과 밀접한 관계가 있으며, 그림에서 보는 바와 같이 4 잎 clover 모양이 정확히 90° 각도로 나타난 것은 in-plane epitaxy를 나타내고 있다.

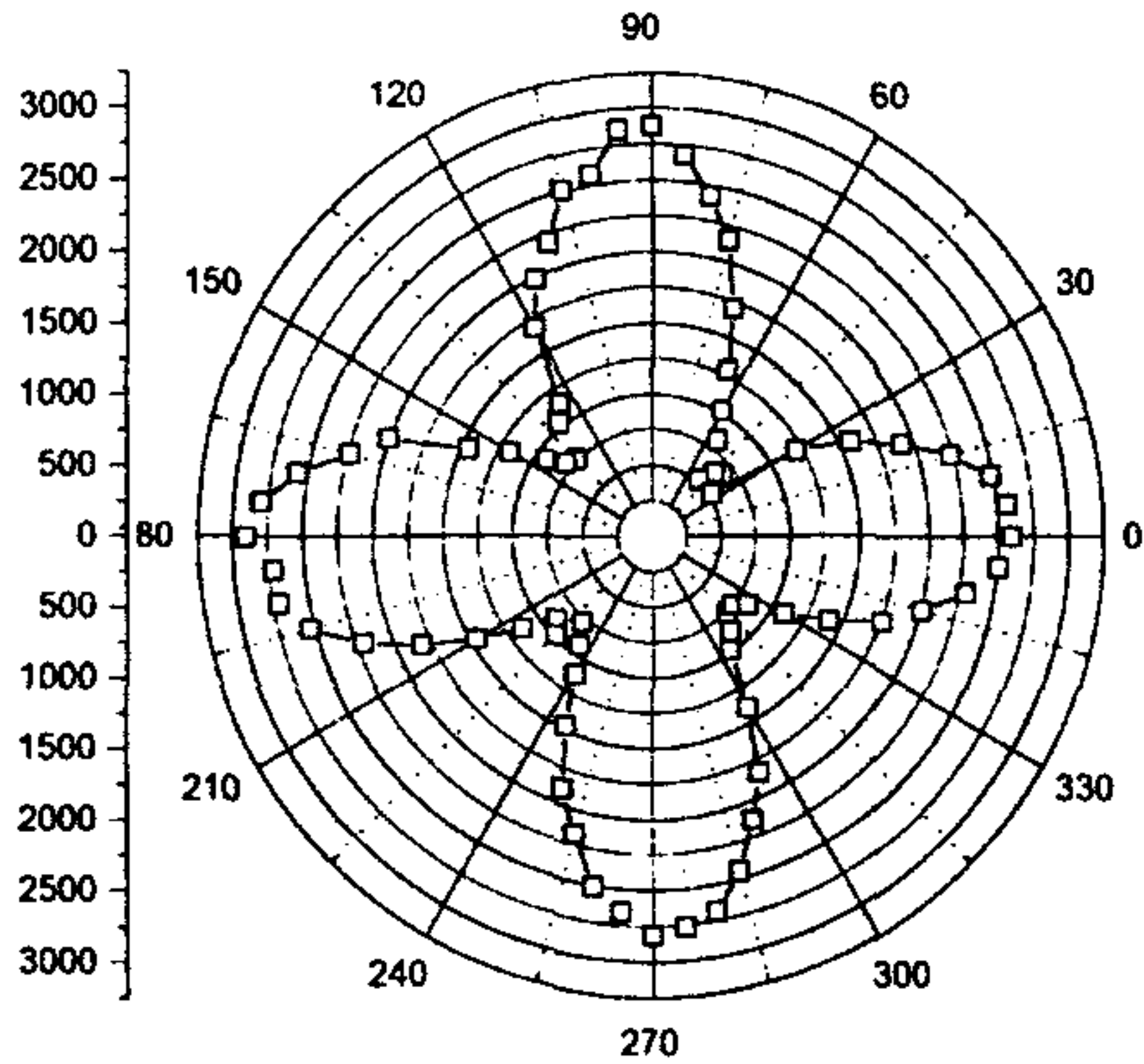


Fig. 2.21 MgO 기판 위에 제작한 YBCO 박막의 Micro-Raman polar plot (800 °C, 500 mTorr)

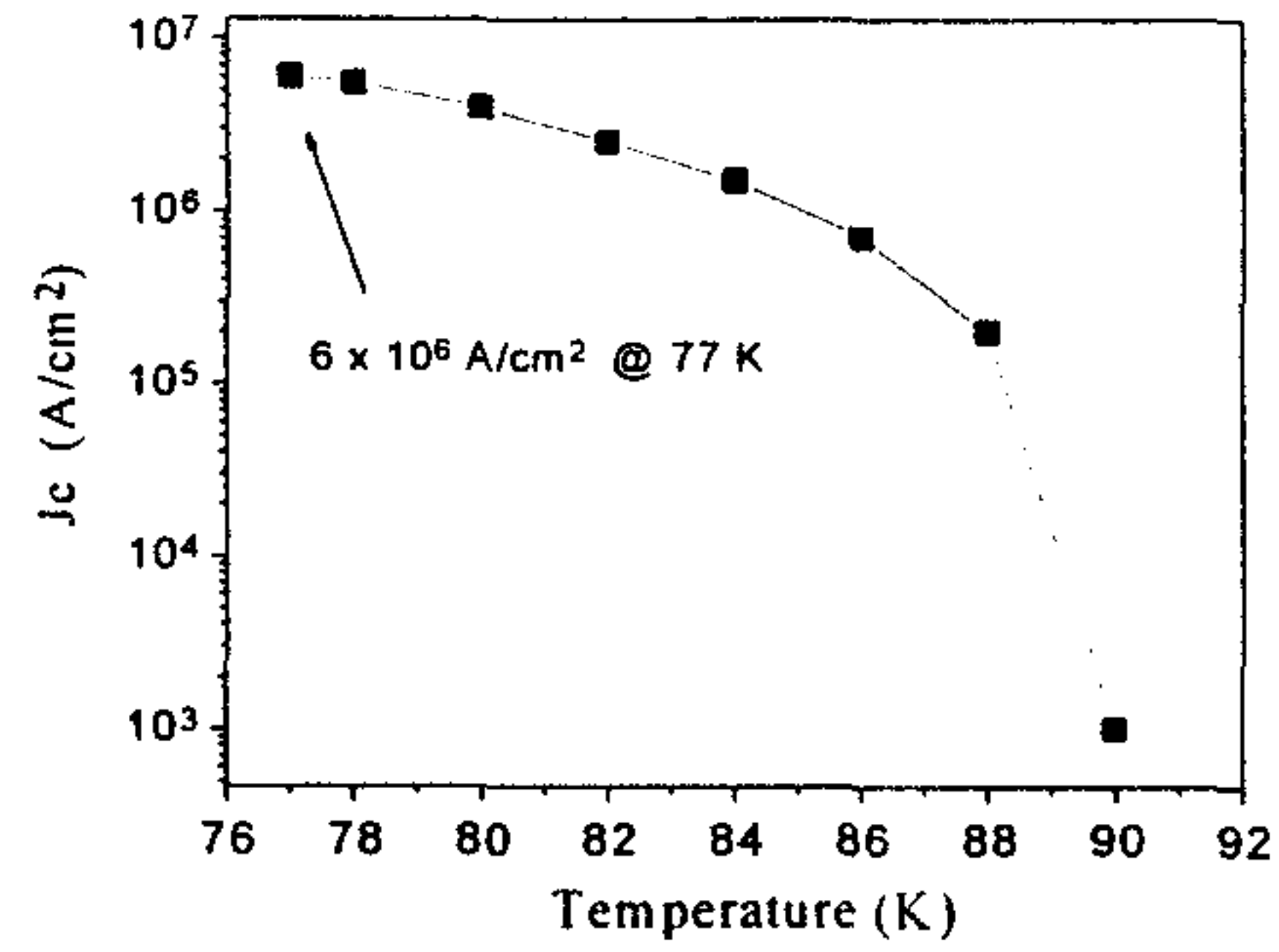


Fig. 2.22 YBCO 박막의 온도에 따른 J_c 특성 변화 (MgO, 800 °C, 500 mTorr)

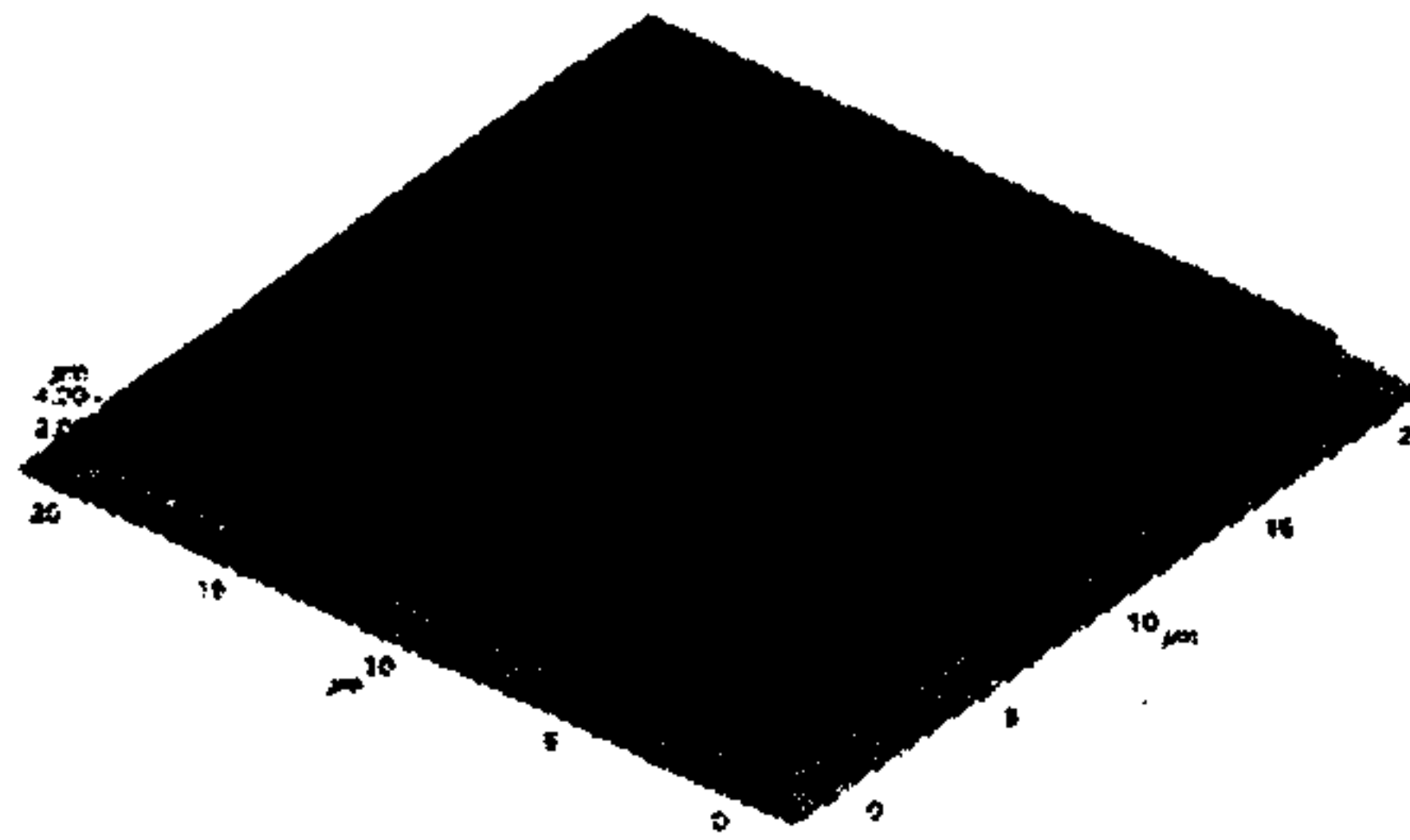


Fig. 2.23 YBCO 박막의 표면 AFM 사진 (MgO 기판, 800 °C, 500 mTorr)

Fig. 2.22는 800 °C, 500 mTorr의 조건으로 MgO 기판 위에 제작한 박막의 온도에 따른 임계전류밀도 (Critical current density, J_c) 변화를 보여주고 있다. 박막의 J_c 특성은 초전도 상태를 유지하면서 얼마나 많은 전류를 흘릴 수 있는가를 나타내는 주요 초전도 특성중의 하나로서, 박막의 결정 구조 상태에 따라 큰 차이를 보인다. 여러 가지 다양한 제조 변수 하에서 제작한 박막 중에서, T_c ≥ 85 K 인 박막은 대부분 액체 질소 온도(77 K)에서 ≥ 10⁶ A/cm²의 J_c 값을 나타냈다. Fig. 2.22는 대표적인 J_c 특성 변화 결과로서 device 작동 온도인 77 K에서 6 × 10⁶ A/cm²의 매우 높은 값을 보이며, T_c 부근인 90 K에서도 ≥ 1,000 A/cm² 값을 나타내고 있다. 이상과 같은 결과로부터, 앞서 φ-scan data에서 관찰한 YBCO 박막의 우수한 in-plane epitaxy 정도를 재 확인 할 수 있다.

Fig. 2.23은 800 °C, 500 mTorr의 조건으로 MgO 기판 위에 제작한 박막의 표면 미세 구조를 AFM으로 관찰한 사진이다. 20x20 μm^2 면적에 0.2~1.0 μm 크기의 입자들이 수 개 형성된 것을 관찰할 수 있다. 박막 표면에 형성된 입자를 제외한 matrix를 line profile로 측정된 결과, rms roughness는 23 Å, average roughness는 34 Å의 양호한 값을 측정할 수 있었다.

PLD법으로 제작한 박막의 경우, 표면 입자의 형성 mechanism은 현재까지 정확하게 규명되지는 않았지만, 일반적으로 불규칙한 형태(irregular shape)의 표면 입자들은 타겟으로부터 기판으로 직접 이동해서 형성된 것이라고 생각되고 있다. 반면에 기체 상태(vapour phase)로부터 형성된 입자들은 nanometer 정도의 크기를 갖는다고 알려져 있다 [6].

2.3 결 론

생체 자기 계측용 SQUID와 Microwave용 공진기, 필터를 제작하기 위한 양질의 박막 제작 조건을 PLD법을 이용하여 확보하였다[12]. 박막의 기본 특성인 T_c 는 MgO, LaAlO_3 그리고 SrTiO_3 기판을 사용하여 90 K 이상 확보하였으며, 10^6 A/cm^2 (77 K, 0 T) 이상의 J_c 를 관찰하였다. 결정 구조 면에서는 MgO, LaAlO_3 기판 모두 기판에 수직한 방향으로 YBCO 격자의 c-축이 배향된 것을 확인하였고, 특히 LaAlO_3 기판을 사용한 경우는 phi-scan을 통하여 in-plane alignment를 관찰하였다. 한편, PLD법의 가장 큰 약점인 박막 표면 morphology와 대면적화에 있어서는 아직도 완벽하지는 않지만, SQUID를 제작하는데 충분한 특성을 확보하였다. 그러나 Microwave 소자 응용에서는 표면 morphology와 대면적화가 매우 중요한 issue이기 때문에, 앞으로 박막 제작 실험은 이러한 특성 증진에 초점을 맞출 계획이다.

References

- [1] Chrisey and Hubler "Pulsed Laser Deposition of Thin Films" (John Wiley & Sons Inc., New York, 1994),
- [2] A. Walkenhorst, C. Doughty, X. X. Xi, N. S. Mao, Q. Li, T. Vekatesan, and R. Romesh, "Dielectric properties of STO thin films used in high T_c superconducting field effect devices", Appl. Phys. Lett., vol.60, p.1744, (1992).
- [3] T. Hirano, T. Fujii, K. Fujino, K. Sakuta, and T. Kobayashi "Epitaxial STO thin film grown by excimer laser deposition", Jpn. J. Appl. Phys. vol.31, L 511, (1992).
- [4] J. Gong, M. Kawasaki, K. Fujito, U. Tanaka, N. Ishizawa, M. Yoshimoto, H. Koinuma and M. Kumagai, "Heteroepitaxial growth of C-axis-oriented BaTiO₃ thin films with an automatically smooth surface," Jpn. J. Appl. Phys., vol.32, L 687, (1993).
- [5] C. S. Hung, I. N. Lin, Y. J. Lee, and T. Y. Tseng, "Growth behavior of YBCO superconducting thin films using laser ablation technique," Jpn. J. Appl. Phys., vol.32, P 4038 (1994).
- [6] S. Proyer, E. Stangl, M. Borz, B. Hellebrand, D. Bauerle, "Particles on pulsed laser deposited Y-Ba-Cu-O films," Physica C, 257, 1-15, (1996).
- [7] H. K. Jang, B. D. Chung, I. S. Yang, B. D. Oh, S. H. Moon, S. Y. Lee, and Y. S. Jeong, "Raman study on the changes of target surface due to laser ablation." Proceedings of the conference on HTS Yongpyung '96, vol.IV, P.140, (1996).
- [8] C. Doughty, A. T. Findikoglu, and T. Venkatesan, Appl. Phys. Lett., 66 (10), P 1276-1278 (1995).
- [9] A. Roshko, D. A. Rudman, L. R. Vale, L. F. Goodrich, J. Moreland, and H. L. Beck, ASC proceeding, Aug. 23-28, (1992).
- [10] R. H. Hammond and R. Bormann, Physica C 162-164, 703 (1989).
- [11] H. S. Kim et al., Appl. Phys. Lett., 61(18), 2 Nov. P 2234-2236 (1992). / J. P. Zheng et al., Appl. Phys. Lett., 54, P 954 (1989).

- [12] E.-H. Lee et al, Submitted to IEEE Transactions on Applied Superconductivity (Proceeding of the 1996 ASC, Pittsburgh, USA)

제 3 장 고온초전도 Parallel-Coupled Filter 개발

3 - 1. 서 론

고온초전도체 응용 중 박막을 이용한 전자소자 개발은 초전도체가 기존의 소자들보다도 low power dissipation, high detection sensitivity, fast switching speed, low signal distortion 등의 장점이 있기 때문에 전 세계적으로 활발히 연구되고 있으며, 이 중에서 고온초전도 박막을 이용한 수동소자(passive device) 연구는 초전도체의 low loss, low distortion의 특성을 응용하는 것으로 고온 초전도 응용 분야 중에서 가장 먼저 수년 내에 실용화될 것으로 기대되고 있다. 특히 현재 활발히 연구되고 있는 optical fiber network 시스템이 근본적으로 고정된 base-station 이나 터미널들 간의 통신용 시스템이라면 마이크로 웨이브 시스템은 cellular 시스템과 같은 mobile 통신시스템에서 사용될 수 있는 분야이다. 그러므로 통신 분야에 고온초전도체 응용은 초전도체의 저 표면저항에 기인한 높은 Q-factor와 매우 작은 insertion loss의 특성을 이용하여 고온초전도 공진기 및 필터를 개발하였다. 특히 고온초전도 필터 응용연구는 현재 사용되고 있는 위성통신에서 고 효율의 channel수를 크게 증가시킬 수 있으며, 주파수의 영역 면에서 고주파 영역인 terahertz의 범위까지 가능할 것으로 예측되고 있다. 일반적으로 대 영역 통신 시스템 등에서 여파기를 사용할 때는 전 bandwidth를 한번에 사용하지 않고 narrow bandwidth에서 필요로 하는 신호들만 선택하고 다른 주파수 영역의 신호들을 조절 가능한 필터 뱅크를 형성하여 사용한다. 그러나 현재 위성통신 등에서 사용하고 있는 cavity-type 필터들은 규모가 매우 크며, 삽입손실이 매우 크기 때문에 정확하고 명확한 신호의 전달에 문제가 크므로 차세대 통신용 필터 및 필터 뱅크 등은 초전도체로 제작하는 것이 매우 유리하다. 또한 고온초전도 필터를 개발하면 현재 이용되고 있는 위성통신 시스템 중량의 70%정도를 줄일 수 있을 것으로 예측되고 있다. 따라서 본 연구소에서는 통신 시스템의 base-station용으로서 PCS (Personal Communication Services)를 목표로 고온초전도 마이크로파 소자중의 하나인 고온초전도 필터를 개발하고 있다.

고온초전도 필터 개발시 가장 핵심부분은 일반적으로 많이 사용되는 기판대신 초전도 박막 증착시 이용되는 MgO나 LaAlO₃ 기판을 사용하기 때문에 고주파 영역에서의 설계기술 확보가 매우 중요하다. 따라서 본 연구실에서는 1차 년도 연구목표를 고온초전도 필터 설계기술 확보와 고온초전도 마이크로웨이브 소자 응용 시 가장 중요한 부분 중의 하나인 저온

측정 package의 설계 기술에 주력하였다. 현재 고온초전도 필터는 여러 형태가 연구되고 있지만 본 고에서는 가장 기본적인 면에서도 필터의 많은 특성을 연구할 수 있는 parallel-coupled 형태의 band-pass filter의 설계 기술 확보에 주력하였으며, 따라서 본 고에서는 주파수 및 기판에 따른 필터 설계 기술을 중심으로 제작된 필터의 특성 측정 기술을 중심으로 기술하였다. [1-6]

3 - 2. 필터 설계의 기본

일반적으로 필터의 종류는 구조적인 관점에서 passive와 active 필터로 구별되며, passive 필터에는 lumped and distributed 필터로 구별된다. 주파수 관점에서 필터는 저주파 영역에서만 신호를 통과시키고 나머지는 금지시키는 low-pass 필터, 이와 반대되는 high-pass 필터, 일정한 주파수 영역만 신호를 통과시키는 band-pass 필터, 이와 반대되는 band-rejection 필터 등이 있다. 이 중에서 현재 고온초전도체로 많이 연구되고 있는 필터는 low-pass, band-pass 필터가 있으며, 특히 band-pass 필터는 고 효율의 협대역 필터로서 사용 가능함으로 대부분의 고온초전도 필터연구는 이 분야에 많이 연구되고 있다. 그러므로 본 당 팀의 필터연구는 band-pass 필터의 연구가 주종을 이루고 있다.

필터의 설계는 일반적으로 먼저 low-pass filter를 제작한 후 주파수 변환과정 (frequency transformation)을 걸쳐서 원하는 필터의 형태를 설계하게 되는데 loss-pass 필터의 설계방법으로서는 크게 image-parameter 방법과 insertion-loss 방법이 있다. 전자의 경우는 초기의 필터 설계 시 사용하였던 방법으로 two-network 시스템에서 선로(transmission line)를 임피던스인 Z 와 propagation 상수인 r 로 표현하는 것이며 처음에 많이 사용하였던 방법이다. 하지만 이 방법은 필터 설계 후 실험과정에서 나타나는 특히 통과영역에서의 ripple현상을 설명할 수 없었다. 따라서 최근에 가장 많이 사용하는 필터의 설계 방법은 후자인 insertion-loss방법이 사용되고 있다. Insertion-loss 방법은 통과영역에서는 ripple현상이 존재여부에 따라 maximally flat 필터와 Tchebyscheff 필터 두 가지 구별되는데 통과 영역에서 허용치의 ripple현상이 있는 Tchebyscheff 필터가 필터 특성에서 중요한 부분중의 하나인 Skirt현상이 좋으므로 대부분 많이 사용되고 있다. Maximally flat 인 경우 주파수에 따른 삽입손실은 수학적으로 다음과 같다:

$$L_A(w') = 10 \log_{10} \{1 + \epsilon (w'/w)^{2n}\} \text{ dB}$$

$$\epsilon = [\text{antilog}_{10}(L_{ir}/10)] - 1$$

여기서 n 은 사용한 공진기 개수를 나타내며, w'은 normalized 된 cutoff 주파수를 나타낸다
필터 설계시 이 값은 일반적으로 1로 쓰여진다. Tchebycheff 인 경우 삽입손실은

$$L_A(w') = 10 \log_{10} \{1 + \epsilon \cos^2 [n \cos^{-1} (w'/w)]\} \}_{w' < w_c}$$

$$L_A(w') = 10 \log_{10} \{1 + \epsilon \cosh^2 [n \cosh^{-1} (w'/w)]\} \}_{w' > w_c}$$

$$\epsilon = [\text{antilog}_{10}(L_{ir}/10)] - 1$$

같이 나타난다. Fig. 3.1은 두 필터의 특성차이를 보여주고 있다. 본 연구에서는 고 효율의
협대역의 고온초전도 필터를 개발하고자 Tchebyscheff 방법으로 설계하였다. 일반적으로 필
터 구입 및 설계시 고려해야할 사항으로서는 다음과 같은 것이 있는데 본 연구에서는 고온초
전도 박막의 증착시 균일한 박막의 크기와 사용하는 기판을 고려하여 10GHz band-pass 필
터를 주파수영역, 기판, bandwidth 등의 변수로 사용하여 설계하였다.

- (1) 주파수 영역
- (2) 중심주파수에서의 삽입손실(insertion loss)
- (3) 규정된 주파수에서 attenuation values
- (4) 허용치의 ripple values
- (5) 통과 영역에서의 return 손실
- (6) 필터의 group-delay

또한 주파수의 변환은 low-pass 필터 element값으로부터 다음과 같은 과정을 사용한다.

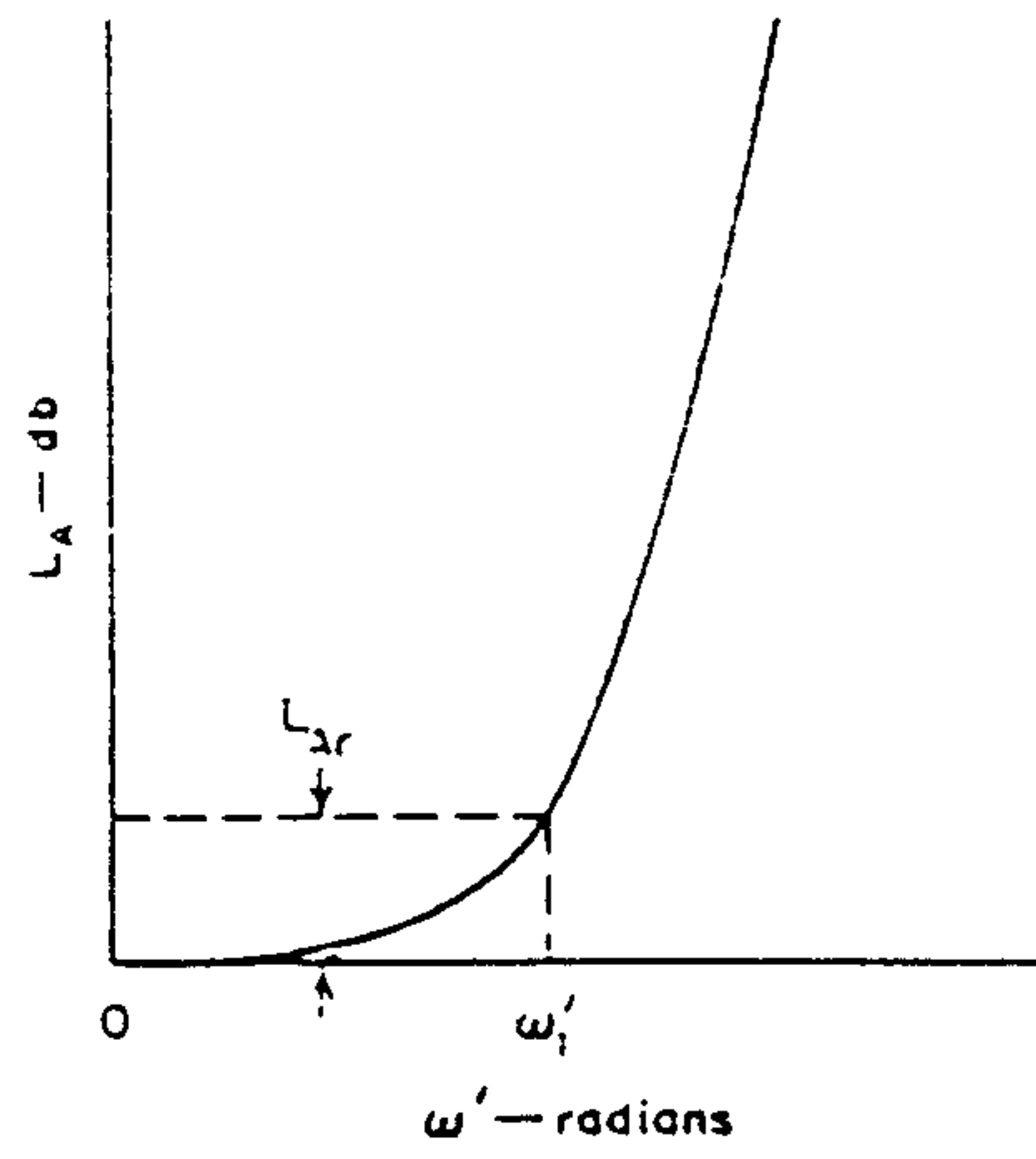
- (1) 주파수의 영역 규정
- (2) 필터의 종류, table로부터 사용되는 공진기 수와 각각의 inductance 및

capacitance 값의 결정

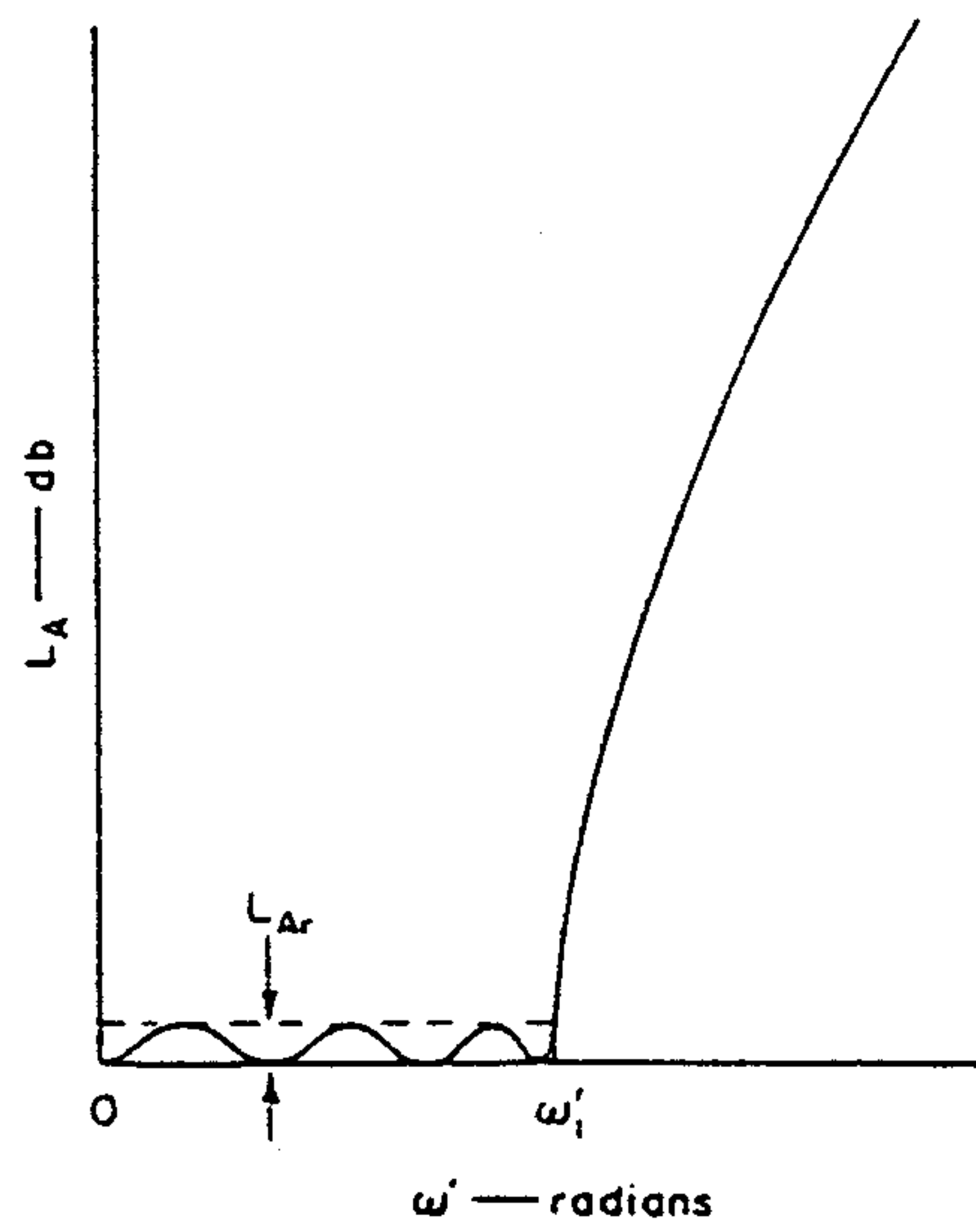
(3) low-pass 필터로부터 band-pass 필터로의 주파수 변환

$$L_k = g_k [Z_0 / W_{LP}], \quad C_k = g_k [(1/Z_0)(1/W_{LP})]$$

여기서 Z_0 는 선로의 특성 임피던스, W_{LP} 는 주파수 변환 식이다. 그러나 이와 같은 방법에서의 주파수 변환을 통한 low-pass 필터로부터 band-pass 필터의 설계는 저주파 영역에서 가능하지만 고주파 영역에서는 필터를 구성하고 있는 element들이 lumped 대신 distributed로 고려해야 하기 때문에 고주파 영역에서는 임피던스 및 어드미턴스 인버터(Inverter)들을 고려하여 설계하게 된다. 이 곳에서 inverter는 고주파 영역에서 series 공진기와 parallel 공진기와 동일하게 사용된 band-pass 필터의 구현이 어려우므로 inverter라는 term을 사용하여 필터들이 한 개의 공진기들로 구성하고 있다고 가정하고 inverter를 구함으로서 band-pass filter를 설계하는 것이다.[1-4]



(a)



(b)

Fig. 3.1 (a) Maximally flat, (b) Tchebyscheff filter's characteristics

3 - 3. 고온초전도 parallel-coupled 필터 설계

고온초전도 필터 개발은 여러 종류의 형태가 있지만 가장 많이 연구되고 있는 것은 사용된 주파수의 $\lambda/4$ 정도의 길이와 50Ω 임피던스의 특성을 갖고 있는 공진기가 평행으로 구성된 parallel-coupled 필터이다. Fig. 3.2는 parallel-coupled 필터 및 전자기력을 보여주고 있다.

parallel-coupled 필터의 설계는 위에서 언급한 inverter를 사용하여 다음과 같은 과정으로 설계하는데 먼저 Fig 4.3은 parallel coupled transmission line 의 two port network 과 circuit을 보여주고 있다. Two port network의 circuit는 임피던스의 Z-matrix로 다음과 같이 나타내며,

$$Z_{11} = Z_{22} = -j\left(\frac{Z_{oe} + Z_{oo}}{2}\right)\cot\theta = -\frac{j}{2}(Z_{oe}\cot\theta_{oe} + Z_{oo}\cot\theta_{oo})$$

$$Z_{12} = Z_{21} = -j\left(\frac{Z_{oe} + Z_{oo}}{2}\right)\csc\theta = -\frac{j}{2}(Z_{oe}\csc\theta_{oe} + Z_{oo}\csc\theta_{oo})$$

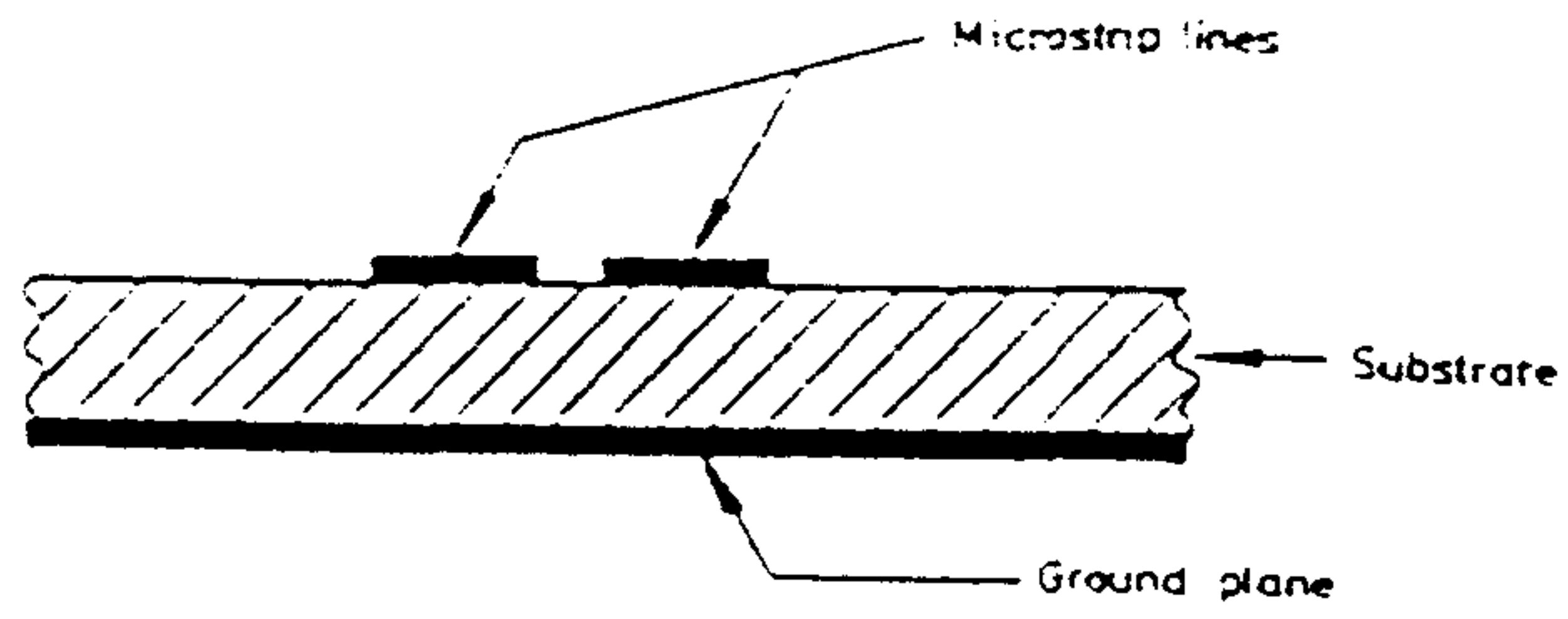
이 open-circuit 임피던스 matrix(Z)는 parallel-coupled line의 각각의 node에서의 shunt 형태를 고려하여 어드미턴스 matrix(Y)로 다음과 같이 변환하였다.

$$Y_{11} = Y_{22} = \frac{1}{Z_{11}} = \frac{-2j\{Z_{oe}\cot\theta_{oe} + Z_{oo}\cot\theta_{oo}\}}{Z_{oe}^2 + Z_{oo}^2 - 2Z_{oe}\{\cot\theta_{oe}\cot\theta_{oo} + \csc\theta_{oe}\csc\theta_{oo}\}}$$

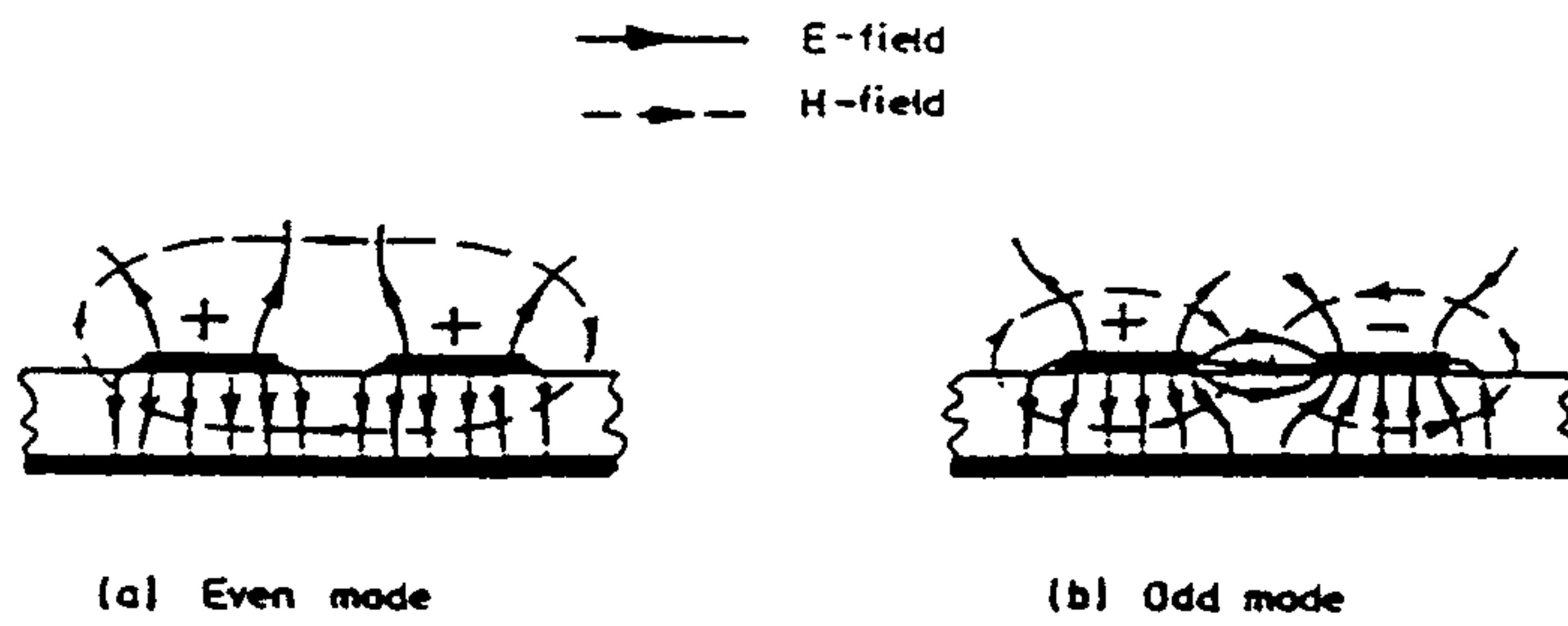
$$= \frac{-j\{Z_{oe} + Z_{oo}\}\sin 2\theta}{(Z_{oe} + Z_{oo})^2 \sin^2 \theta - 4Z_{oe}Z_{oo}}$$

$$Y_{12} = Y_{21} = \frac{1}{Z_{12}} = \frac{2j\{Z_{oe}\csc\theta_{oe} + Z_{oo}\csc\theta_{oo}\}}{Z_{oe}^2 + Z_{oo}^2 - 2Z_{oe}\{\cot\theta_{oe}\cot\theta_{oo} + \csc\theta_{oe}\csc\theta_{oo}\}}$$

$$= \frac{j\{Z_{oe} - Z_{oo}\}\sin 2\theta}{(Z_{oe} + Z_{oo})^2 \sin^2 \theta - 4Z_{oe}Z_{oo}}$$



(a)



(b)

Fig. 3.2 (a) Parallel-coupled line,
 (b) electromagnetic field on parallel coupled transmission lines

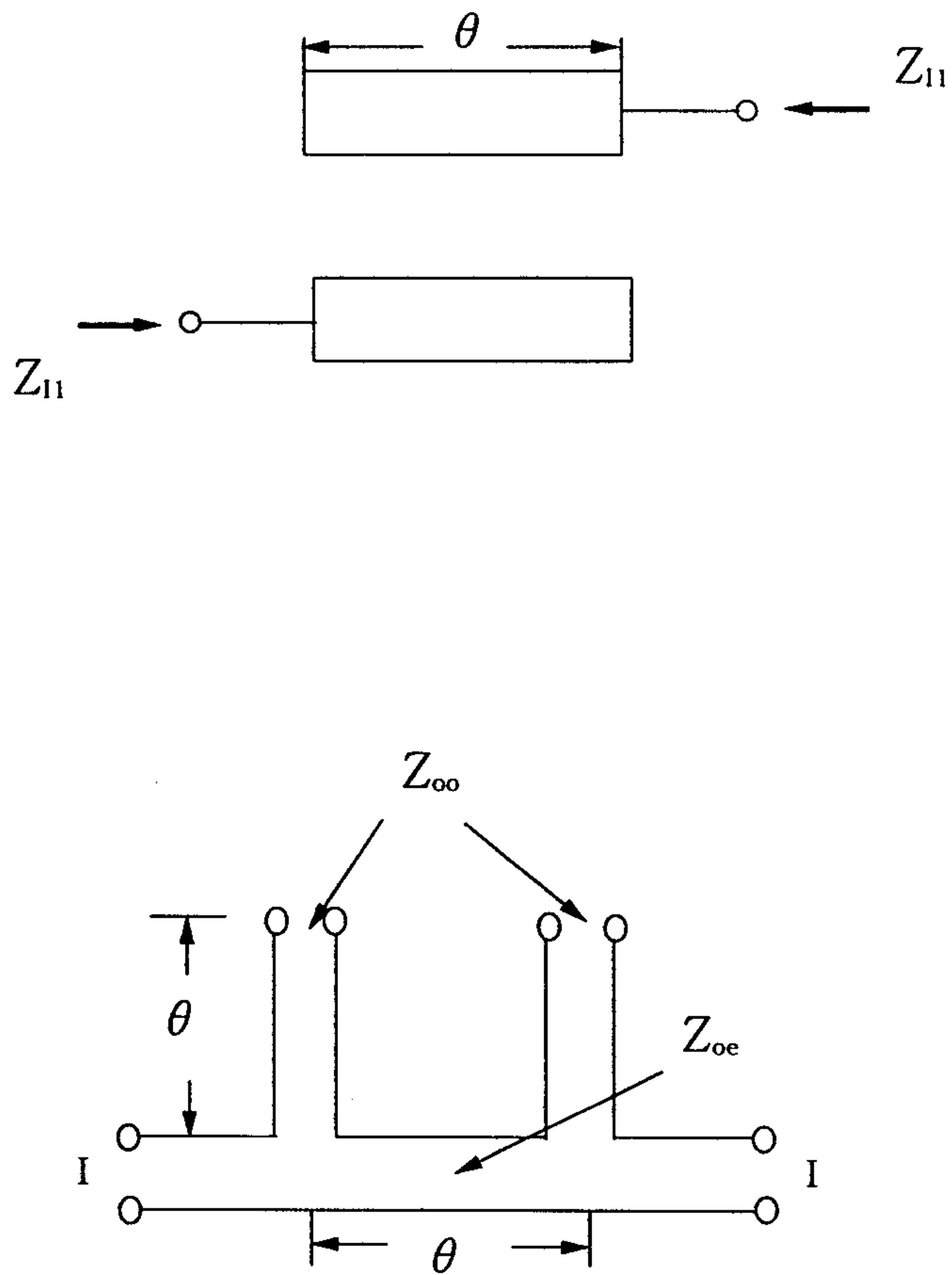
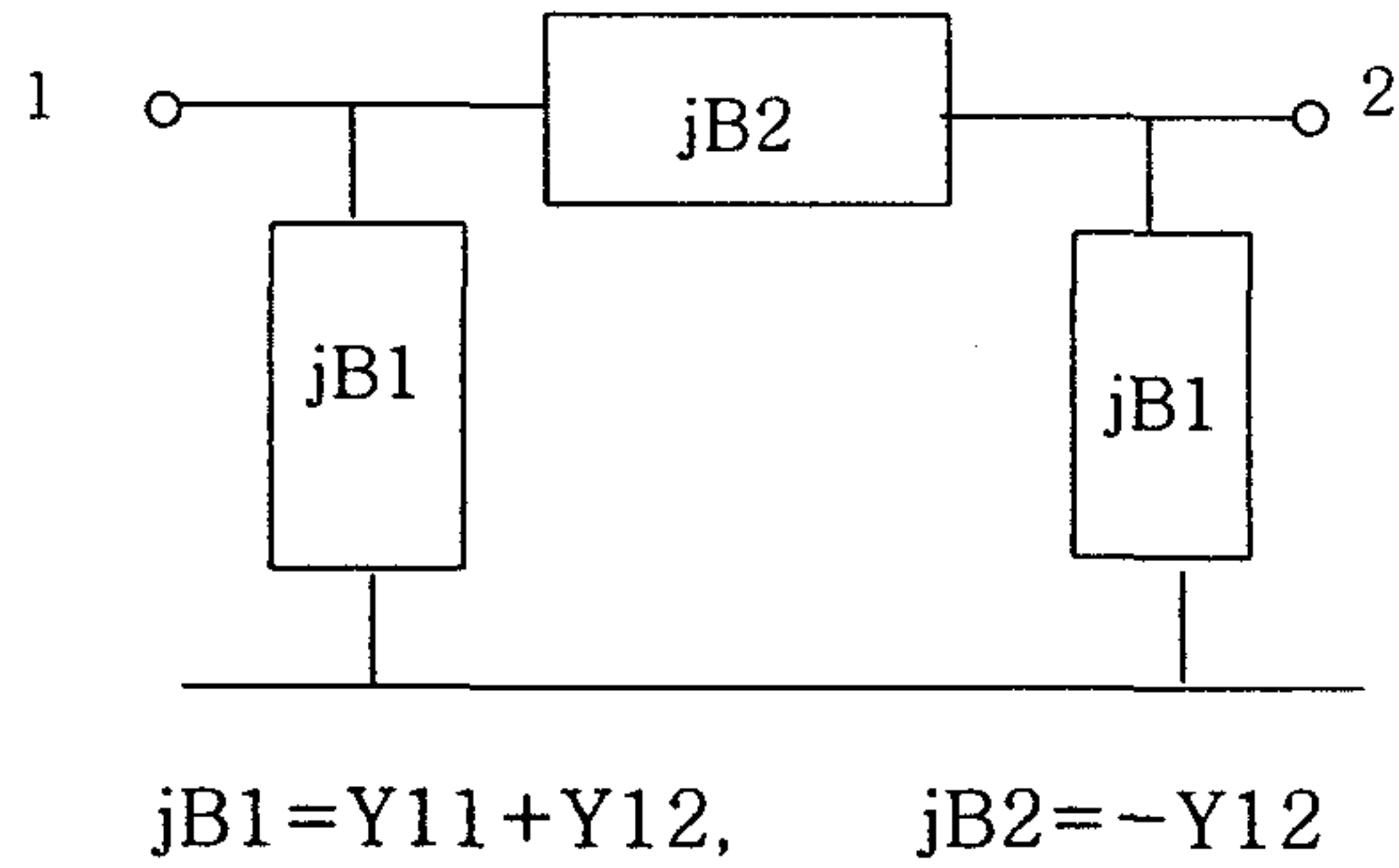
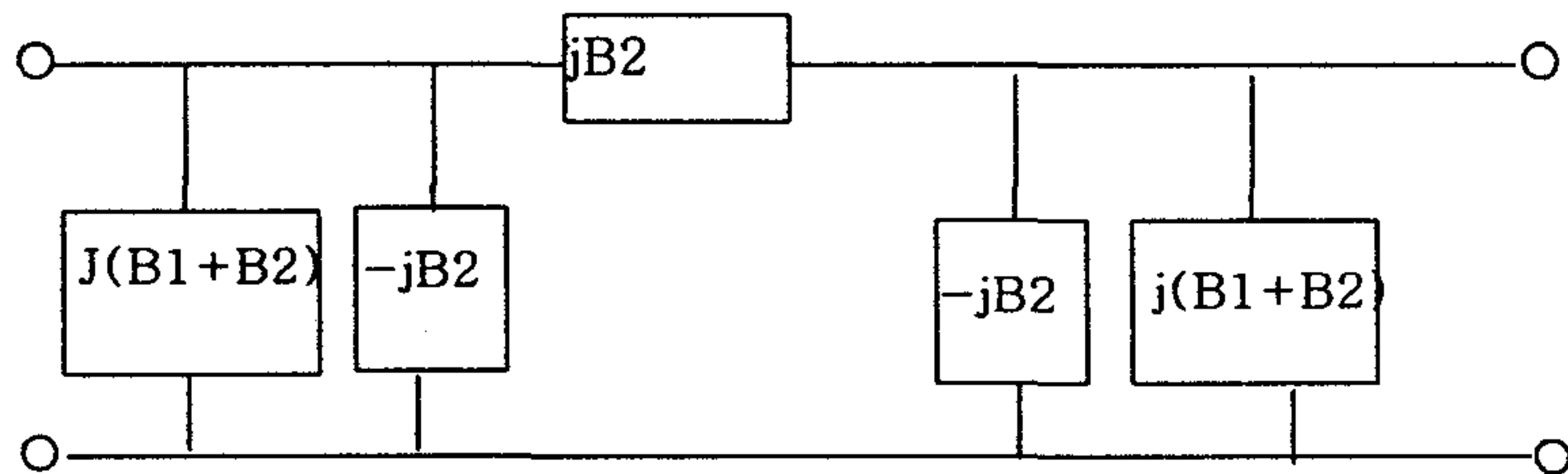


Fig. 3.3 Two port network and equivalent circuit

이때 어드미턴스(Y) 와 공진기의 susceptance(B)의 관계는 아래 그림에서 와 같이 pi-circuit로 나타낼 수 있으며, 이 pi-circuit는 양수와 음수의 susceptance 값을 첨가함으로 inverter를 구성하고 있는 동일한 circuit로 변형시킬 수 있다.



Pi equivalent circuit



Admittance inverter (Jii)

위의 동일한 admittance 그림으로부터 inverter와 공진기의 총 susceptance 공식을 다음과 같이 구할 수 있다.

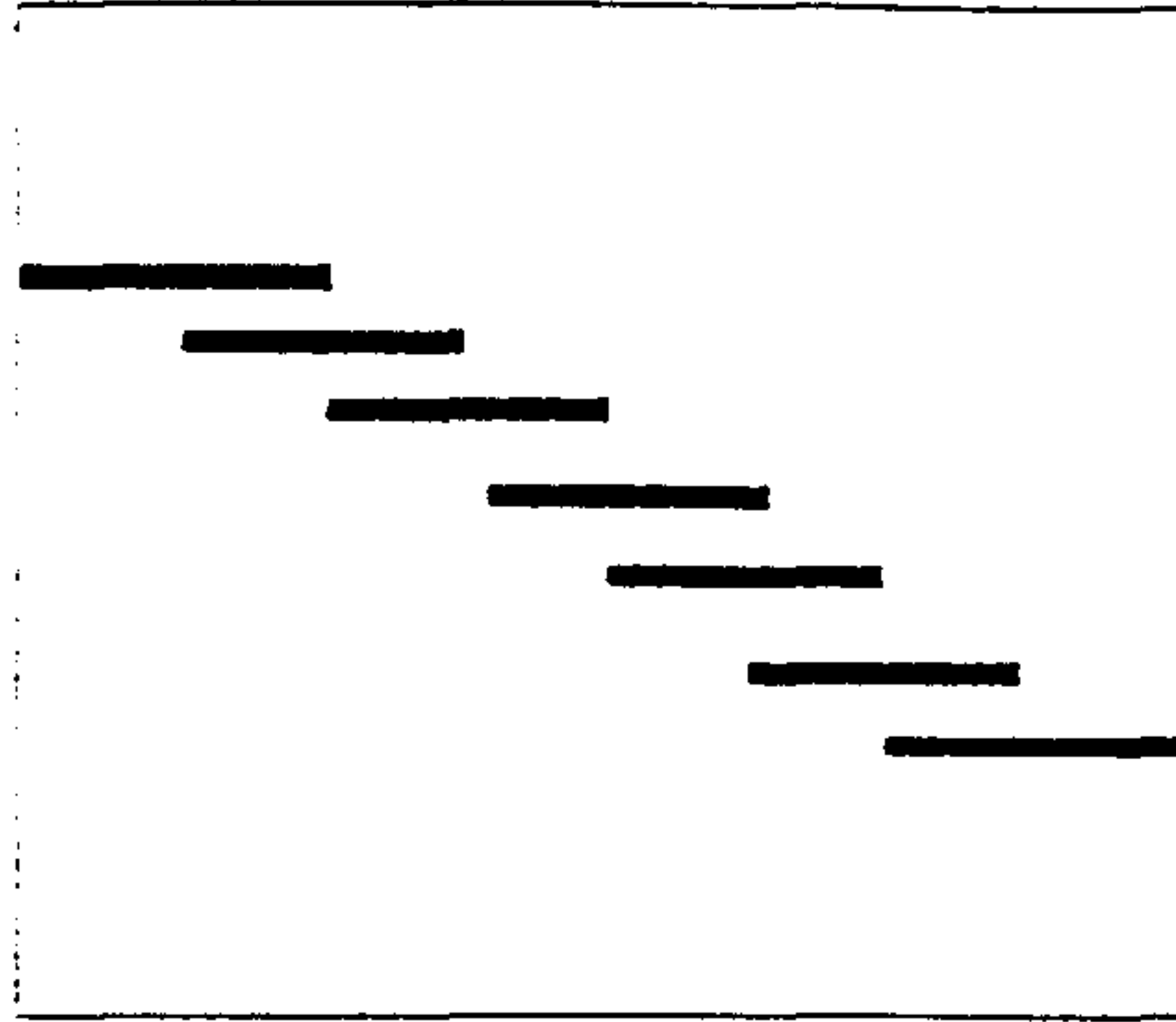
$$J_{12} = J_{k,k+1} = |B_2| = \frac{2\{Z_{oe} \csc \theta_{oe} - Z_{oo} \csc \theta_{oo}\}}{Z_{oe}^2 + Z_{oo}^2 - 2Z_{oe}\{\cot \theta_{oe} \cot \theta_{oo} + \csc \theta_{oe} \csc \theta_{oo}\}}$$

$$= \frac{2j\{Z_{oe} - Z_{oo}\}\sin\theta}{(Z_{oe} + Z_{oo})^2 \sin^2\theta - 4Z_{oe}Z_{oo}}$$

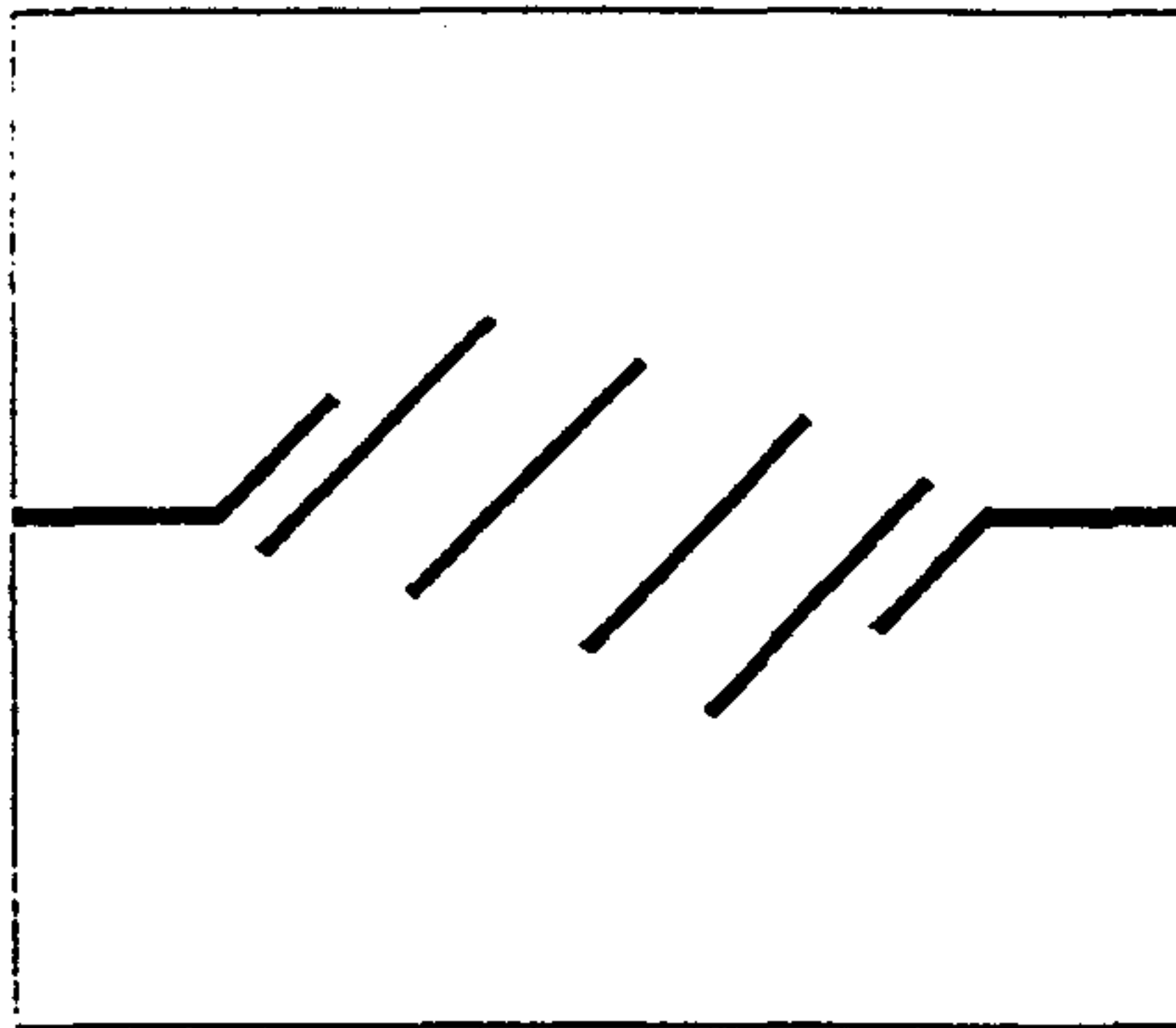
여기서 이웃하고 있는 공진기들 사이의 coupling coefficient b_k 는 다음과 같다.

$$B_k = B_{k+1} = B_1 + B_2 = \frac{-2\{Z_{oe}\cot\theta_{oe} + Z_{oo}\cot\theta_{oo}\}}{Z_{oe}^2 + Z_{oo}^2 - 2Z_{oe}\{\cot\theta_{oe}\cot\theta_{oo} + \csc\theta_{oe}\csc\theta_{oo}\}}$$

그러므로 위에서 언급한 식들로부터 공진기들 사이의 거리 (spacing)와 길이를 구하여 고온 초전도 parallel-coupled 필터들을 시뮬레이션 하였다. 필터 시뮬레이션은 상업용 Touchstn 프로그램을 사용하였다. Fig 3.4는 대표적인 parallel coupled 필터의 그림이며, Fig. 3.5는 MgO 기판과 10GHz의 중심주파수를 가진 필터의 simulation 결과이다. 필터들의 시뮬레이션은 차후 필터-bank로 사용할 수 있도록 공진기의 길이를 변화하면서 필터의 center 주파수를 변화시키었으며, 또한 고온초전도 박막증착시 대표적으로 이용되는 MgO와 LaAlO₃ 기판의 유전율이 다른 특성을 이용하여 기판에 따른 필터들을 설계하였다. Fig. 4.6 부터 Fig. 3. 7은 MgO 기판과 center 주파수가 10GHz를 기본으로 공진기의 길이(L)를 95 mil(unit=milli inch)부터 82mil까지 변화시킨 결과이다. Fig. 3. 8는 LaAlO₃ 기판을 사용한 대표적인 parallel-coupled 필터를 보여주고 있다. Fig. 3. 9부터 Fig. 3. 10은 MgO 기판의 유전율 보다 훨씬 큰 값을 가지고 있는 LaAlO₃ 기판을 사용하여 공진기들 사이의 거리(spacing)변화에 따른 결과를 보여주고 있다. 위의 그림에서 알 수 있듯이 dielectric constant가 다른 기판을 사용할 때 각각의 공진기의 임피던스의 선폴이 달라짐을 볼 수 있다. 일반적으로 공진기의 선폴은 유전율이 클수록 작아지며, 특성 임피던스가 클수록 작아진다.



(a)



(b)

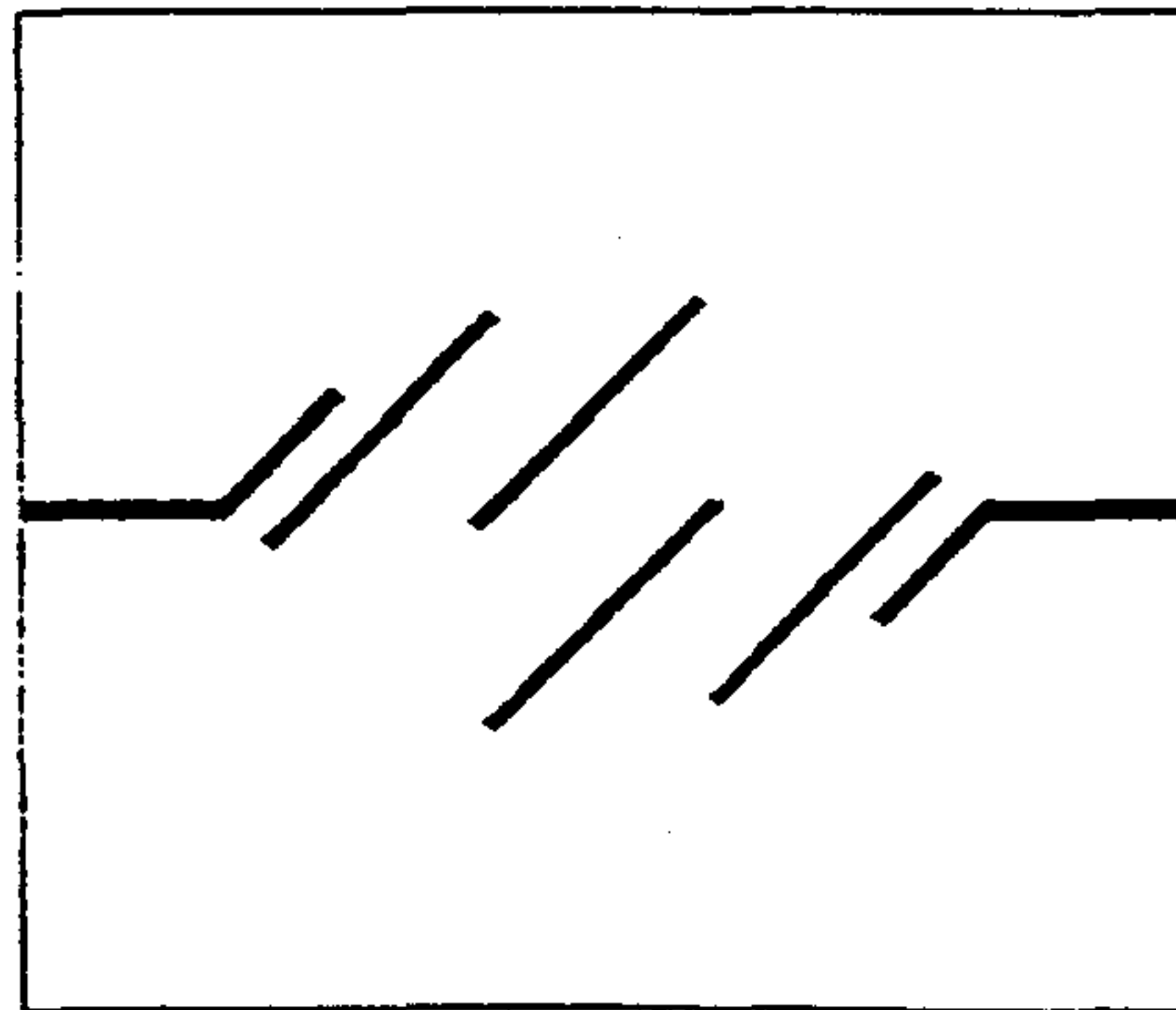


Fig. 3.4. Figure of typical parallel-coupled filter

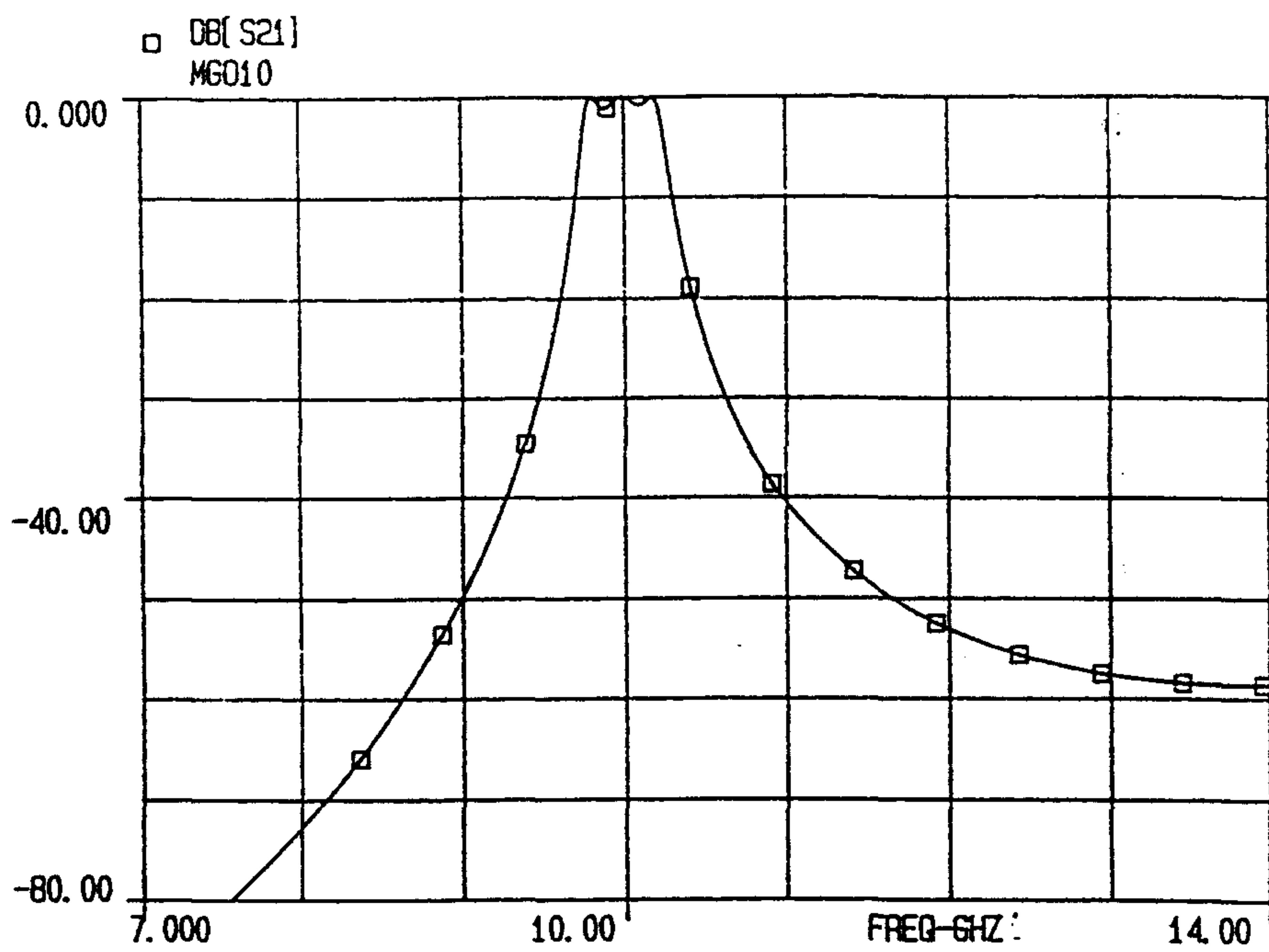


Fig. 3.5. Typical results of of parallel-coupled filters

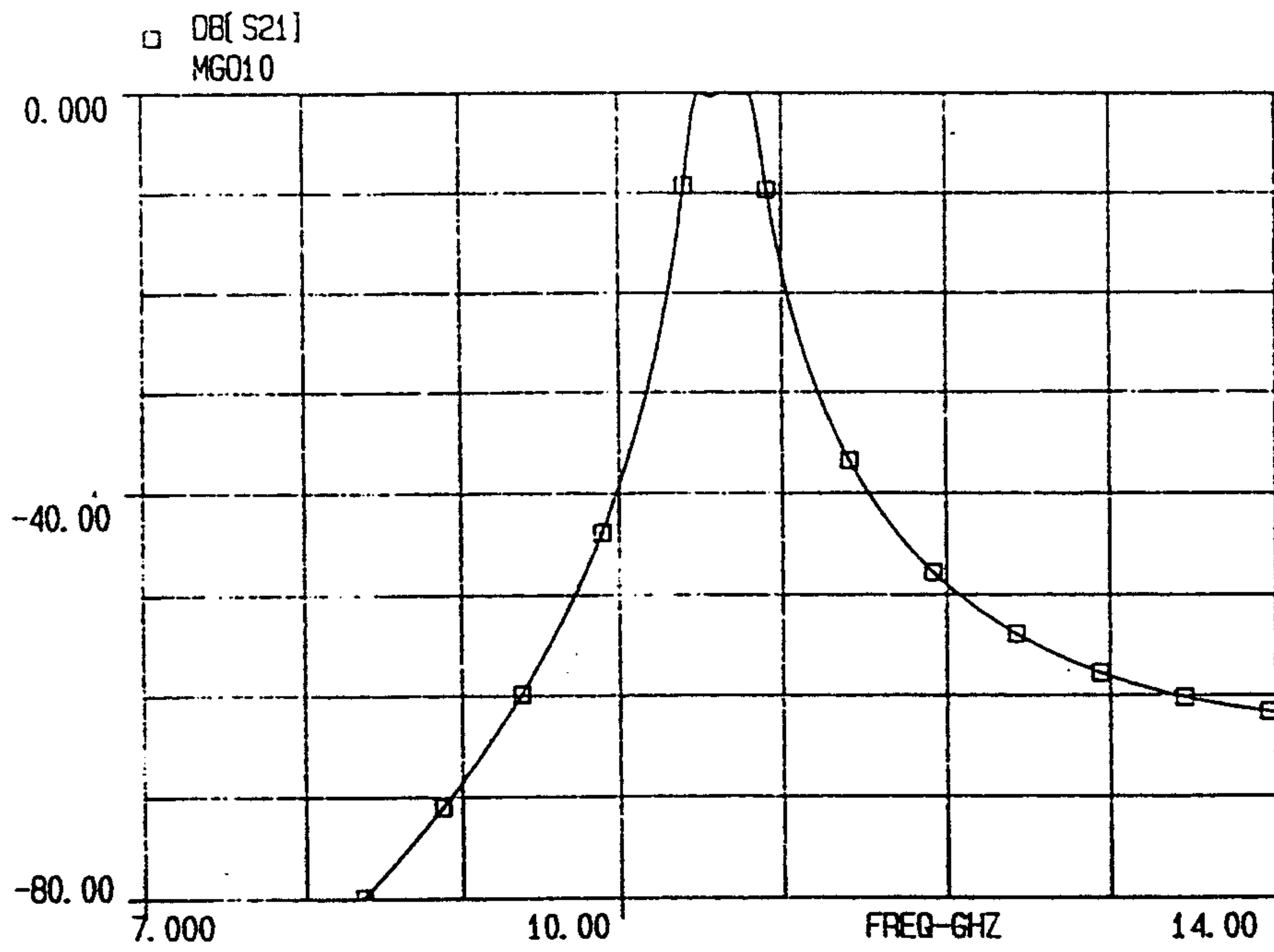


Fig. 3.6. Simulation of parallel-coupled filter with L=95 mil

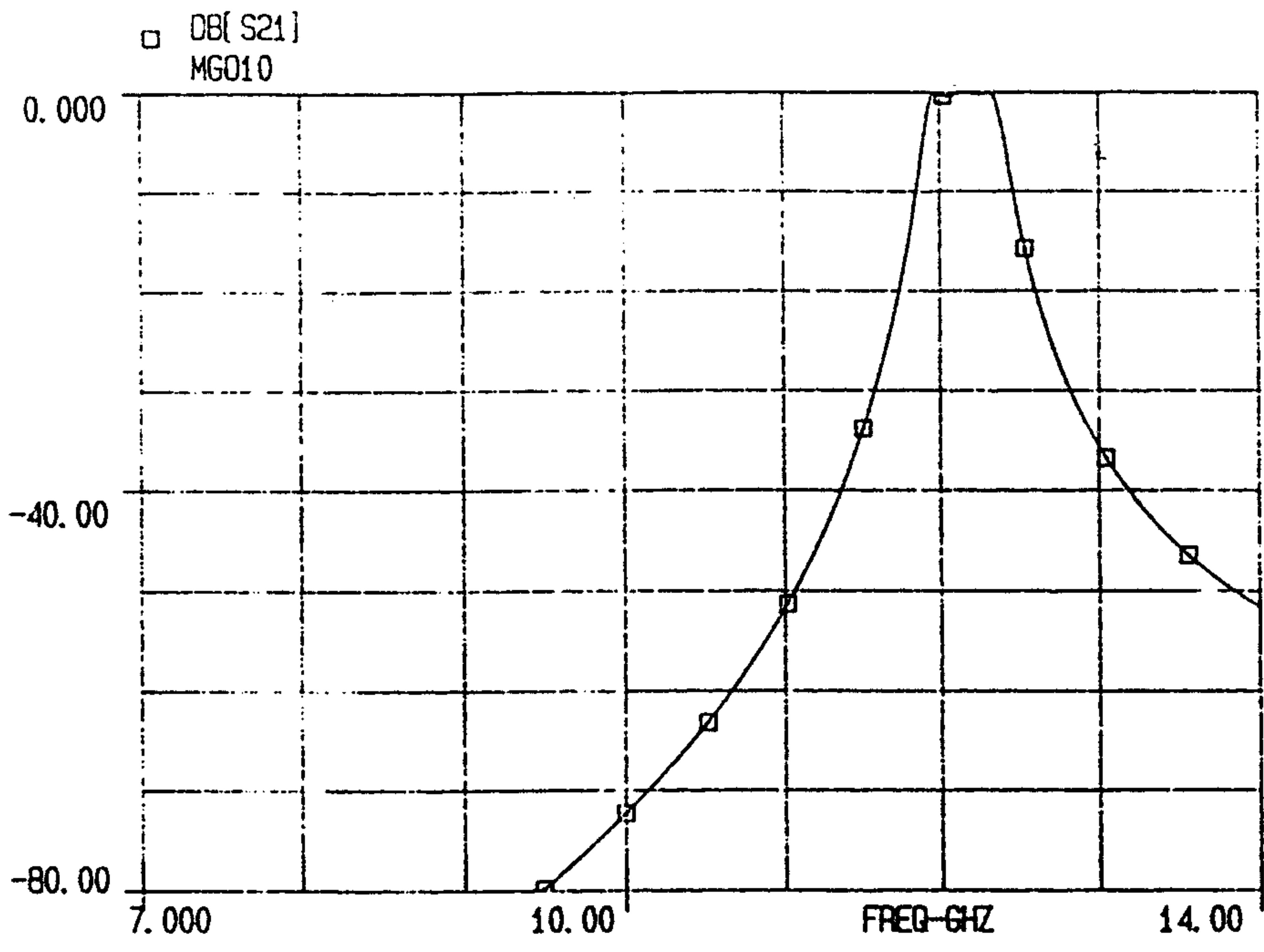


Fig. 3.7. Simulation of parallel-coupled filter with L=82 mil

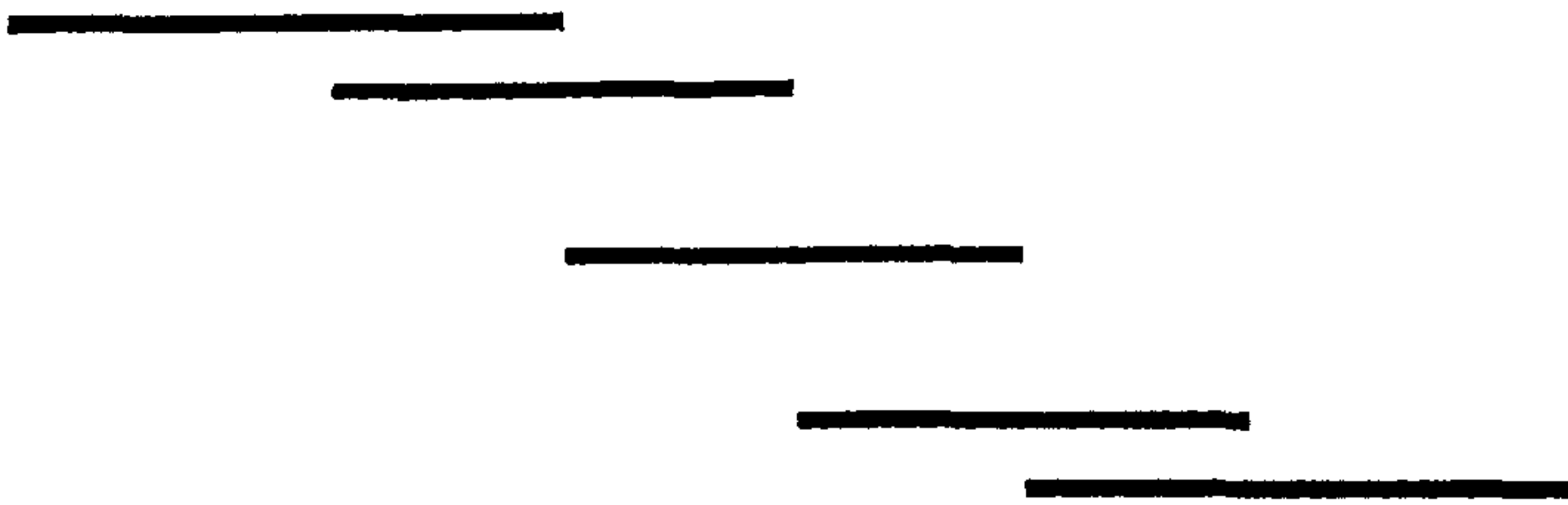


Fig. 3. 8. Typical figure of parallel-coupled filter with LaAlO_3 substrate

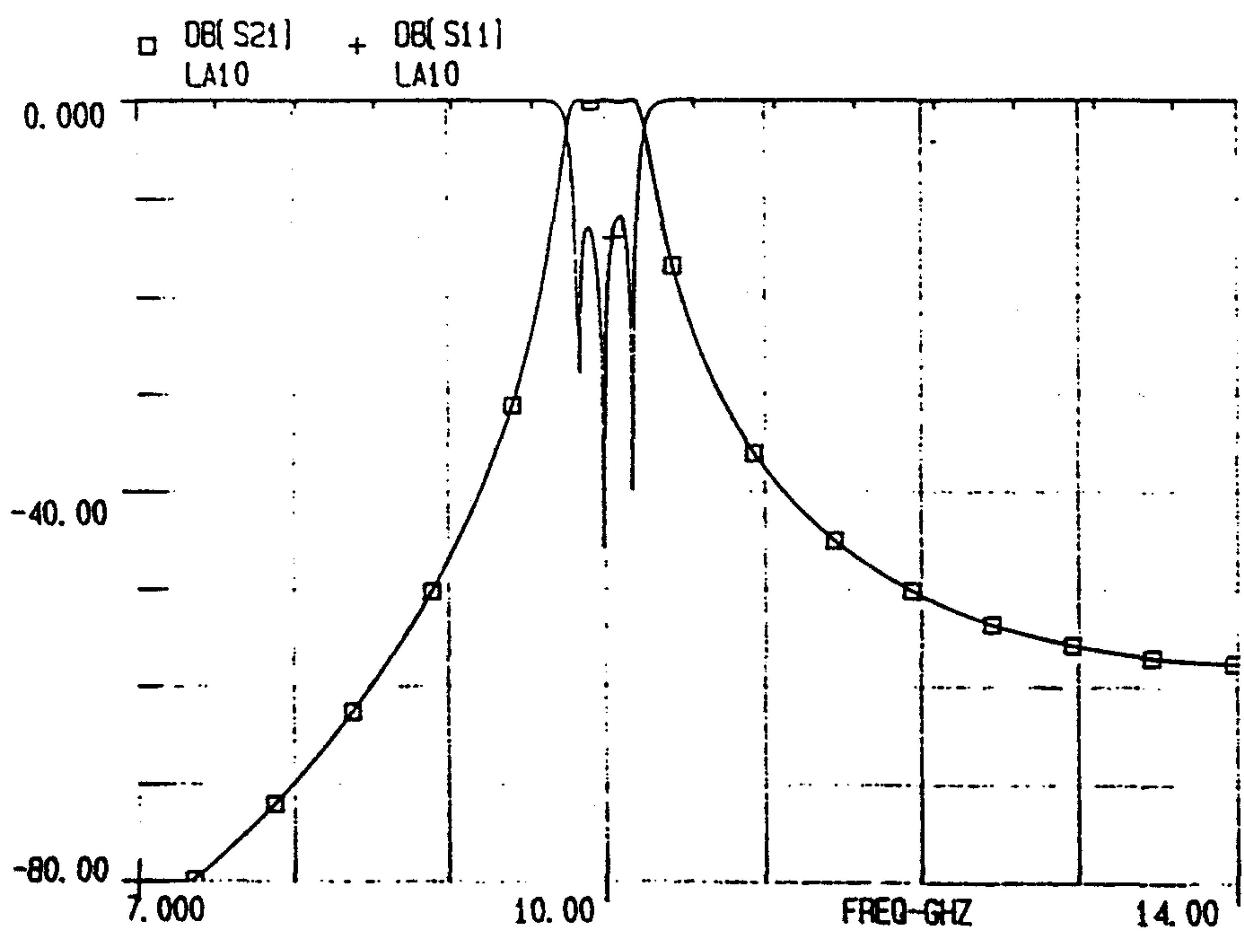


Fig. 3. 9. Simulation of parallel-coupled filter with S=50 mil

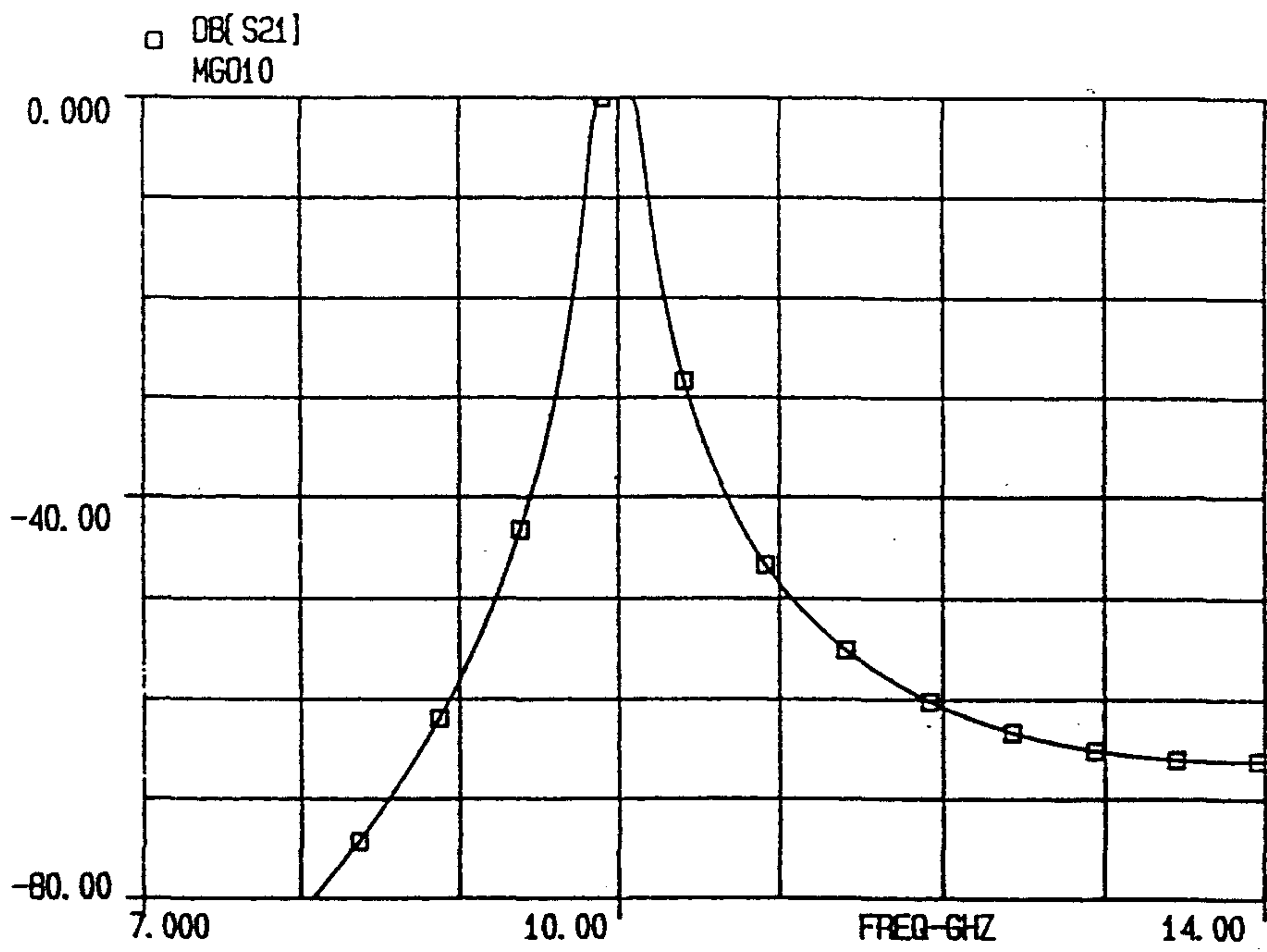


Fig. 3. 10. Simulation of parallel-coupled filter with S=70 mil

3 - 4. 고온초전도 test-fixture (package)

고온초전도 마이크로웨이브 소자 응용시 가장 중요한 부분 중의 하나는 저온에서 측정할 수 있는 고주파용 마이크로웨이브 package 개발하는 것이다. 따라서 본 연구에서는 필터의 설계 기술뿐만 아니라 package 설계 기술 확보에 주력하였다. Fig. 3. 11는 대표적인 필터 측정용 설계도면이며, 재질로서는 저온에서도 열전도율뿐만 아니라 전기적 특성이 좋은 OFHC를 사용하였다. Fig. 3. 12는 실질로 제작된 package를 보여주고 있으며, 상온에서 접촉시 부패되는 현상을 제거하기 위하여 package에 Ni, 과 Gold로 도금하였다. 또한 이 package에는 공진기 개발시 사용하였던 DC-18GHz 까지 사용 가능한 SMA connector대신 DC-40GHz 이용할 수 있으며 손실이 적은 K-connector를 연결하였다.

3 - 5. 실험 및 분석

마이크로파 대역에서 통과대역의 평탄화와 삽입손실 줄이기, 스킨트 특성향상을 고려하여 중심 주파수가 10.5 GHz 이고, 5% bandwidth를 갖는 고온초전도 3-극 bandpass 필터를 제작, 특성조사를 하였다. 고온초전도 에피택셜 박막을 이용한 마이크로파 통신용 핵심소자인 마이크로스트립 필터 개발을 위해서는 양질의 박막제조기술, 부품 및 패키지 제작기술, 저온 마이크로파 특성평가 기술이 필요하고, 당 팀이 자체적으로 이 기술을 이룩하였다.

실험에 사용된 필터는 microstrip line 구조로 $\lambda/4$ parallel-coupled 구조를 갖는 bandpass 필터로서 S=45mil, 50mil, 60mil, 70mil 에 대하여 각각의 우수한 결과를 얻었다. 측정은 공진기 특성 실험과 같이 1-26 GHz 주파수 범위에서 S-parameter를 측정하는 HP8510 network analyzer를 사용하였다. reflection과 transmission data를 측정하기 위해 2-port calibration을 하였고 그 외 실험장치는 공진기 실험과 동일하게 설치되었다. Fig. 3. 13.은 20 K에서 전형적인 transmission response(S_{21}) data를 보여주며 이때 input power는 10dBm을 사용하였다. 통과대역에서 삽입손실은 약 0.077 dB이고 통과대역 폭은 5 %를 나타내고 있다. 이 data에서 통과대역 삽입손실이 매우 작고 skirt특성이 양호하며 spurious response가 나타나지 않음을 알 수 있다. Fig. 3. 14.의 return-loss(S_{11} 와 S_{22}) response에서 3-극용임을 알 수 있고 port1과 port2가 잘 정렬되어 대칭성을 보여 주고

있다. Fig. 3. 15.는 transmission response가 온도에 따라 변화하는 것을 보여주고 있으며. 특히 통과대역의 중심 주파수가 이동하는 것을 알 수 있다. 그 주된 이유는 초전도체의 penetration depth가 온도에 따라 변화하기 때문에 초전도체의 kinetic inductance가 변화하기 때문이다. Fig. 3. 16.는 주어진 대역폭에 따라 Gold와 YBCO 필터들 간의 온도에 따른 삽입손실의 변화를 보이는 그림이다. 임계온도 부근에서 급격한 증가를 보이며, 80 K 아래온도에서는 삽입손실 변화가 거의 미미하여 0.4dB 미만의 증가를 보이는데, 이는 표면 저항이 온도에 무관하기 때문이다.

고온 초전도체 필터의 power handling capability는 실용적 응용에 있어서 중요하며, 영향을 미치는 변수로는 통과대역폭, 극수, unloaded Q, 그리고 동작온도 등이다. Fig. 3.17.에서 보듯이 3-극, $\lambda/4$ coupling bandpass design에서 input power 및 온도에 따른 passive intermodulation product를 측정하였다. 그림을 살펴보면 output power가 input power에 선형적 비례관계를 보임을 알 수 있다. 3-차 intercept point가 77K에서 58 dBm, 20K에서 68dBm을 얻었다. 실험측정을 위하여 Fig.xxx에서와 같이 두 개의 마이크로파 source(HP 83620A)와 두 개의 마이크로웨이브 증폭기(HP 8349B)를 사용했으며 두 개의 마이크로웨이브 주파수는 group delay 측정으로 선택하였다.

Fig. 3. 18.는 77K에서 각각의 대역폭에 따른 각각의 필터의 group delay의 결과이다. group delay란 주파수의 변화에 따른 위상차의 변화량으로 정의 되는데, 에너지의 pass band에 저장되는 변화량을 알 수 있게 한다. Fig. 3. 18.의 group delay 특성으로 필터의 중심 주파수 부근보다 pass band edge에 저장되는 에너지가 많이 증가하고 있음을 알 수 있다. 온도가 증가함에 따라서 peak 주파수가 낮은 주파수쪽으로 이동함을 볼 수 있는데 이는 중심 주파수의 온도 의존성과 그 맥락을 같이한다.

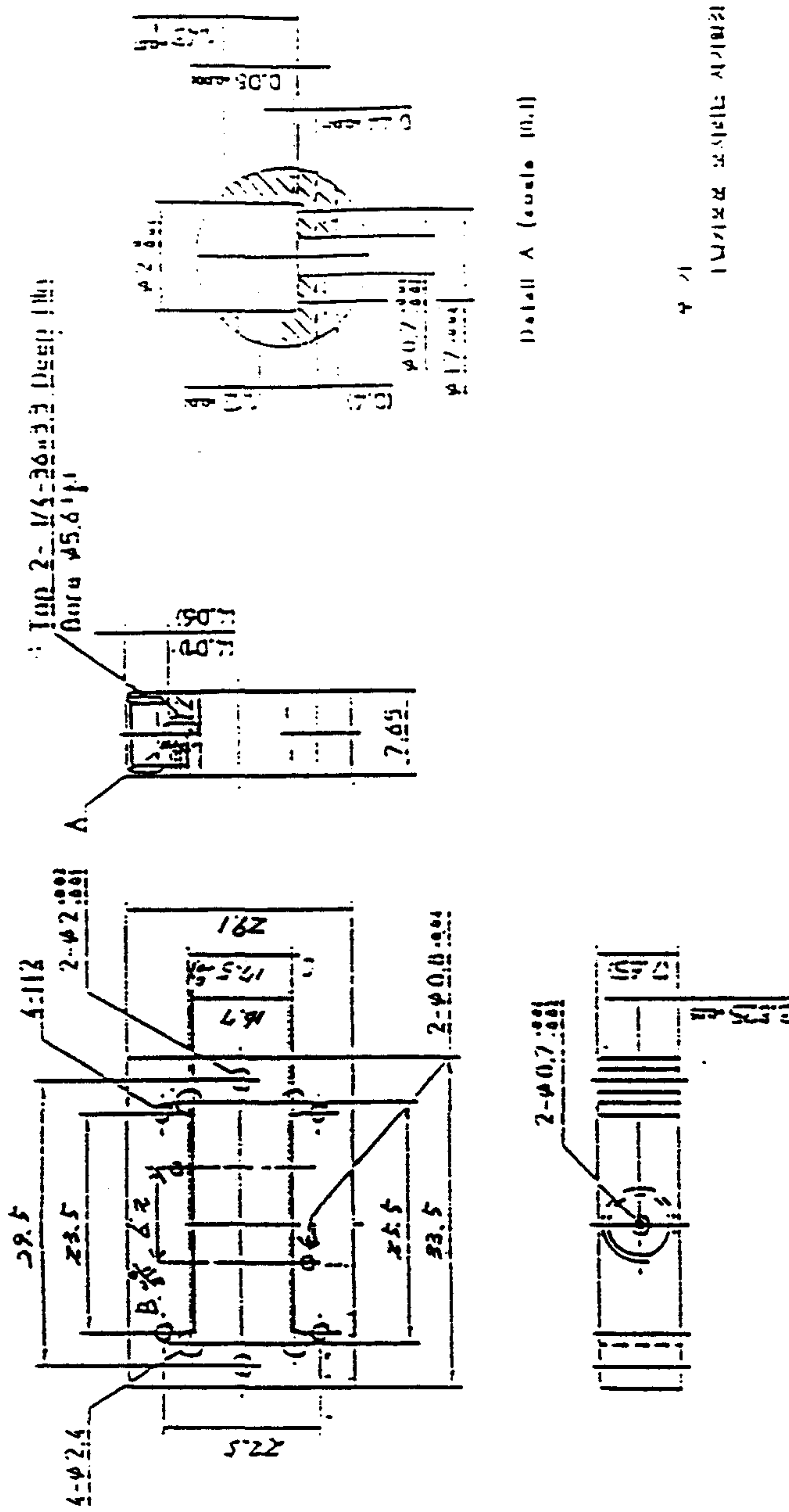


Fig. 3. 11. Test-fixture design (package)

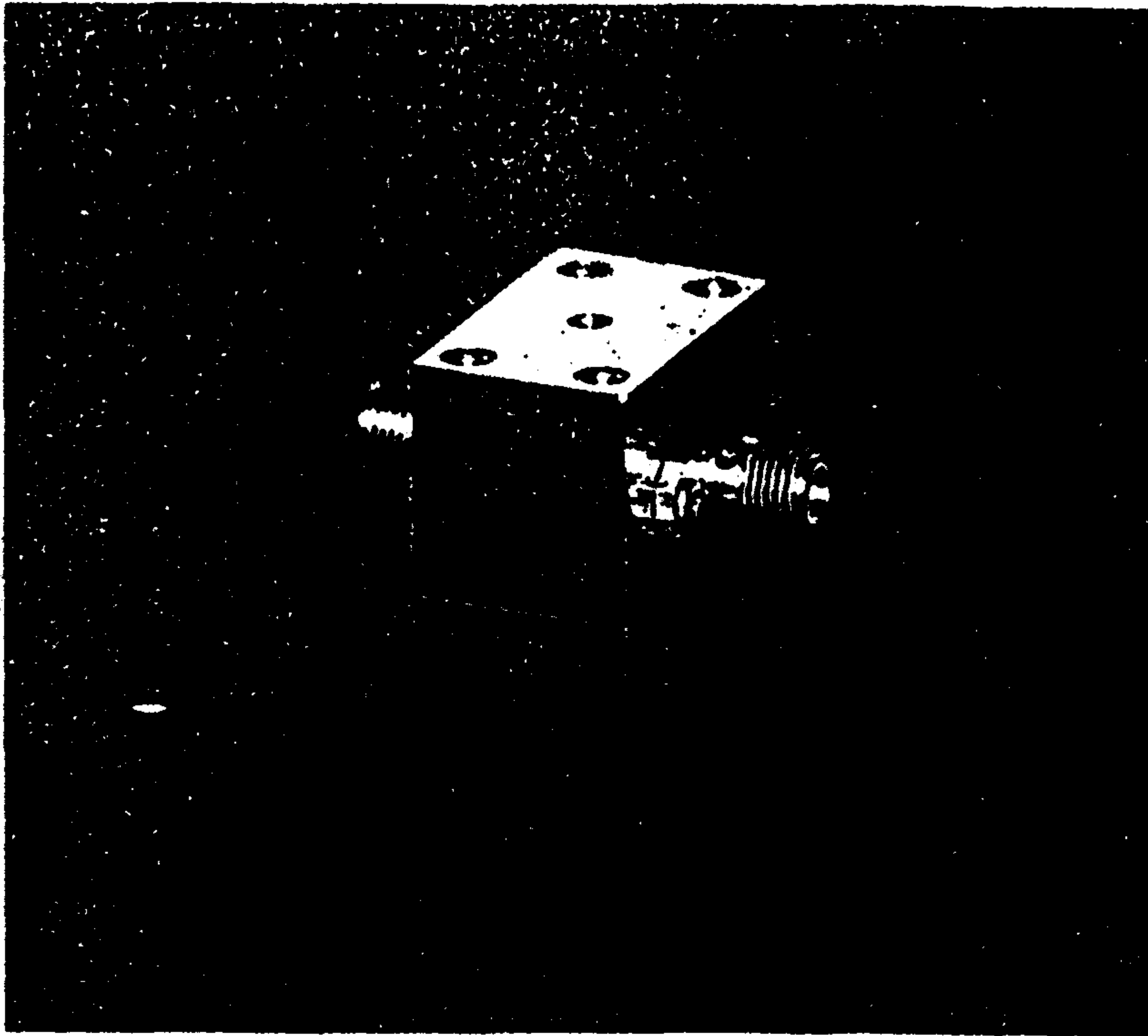


Fig. 3. 12. several test fixture

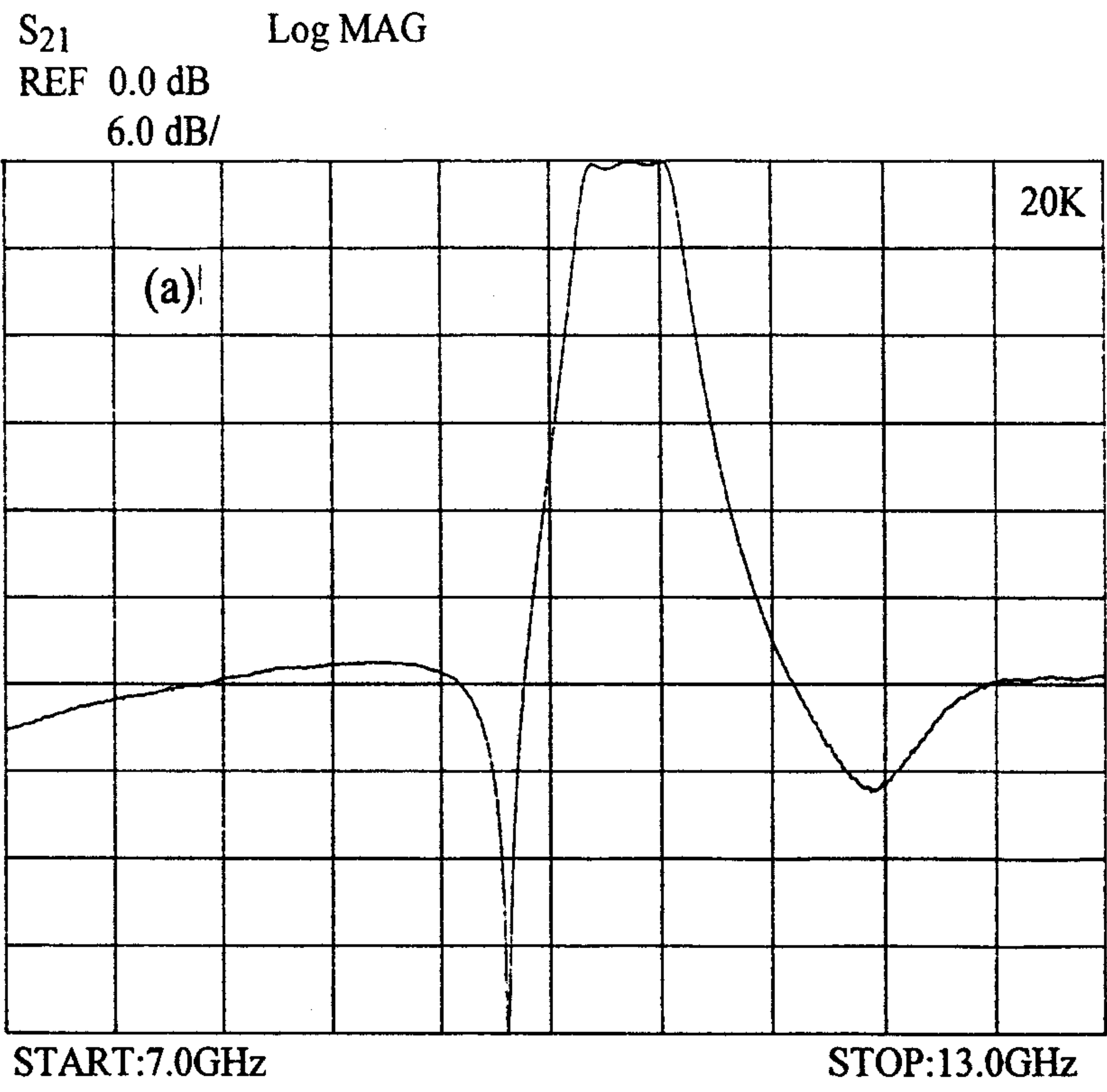


Fig. 3. 13. 20 K에서 transmission response(S_{21}) data

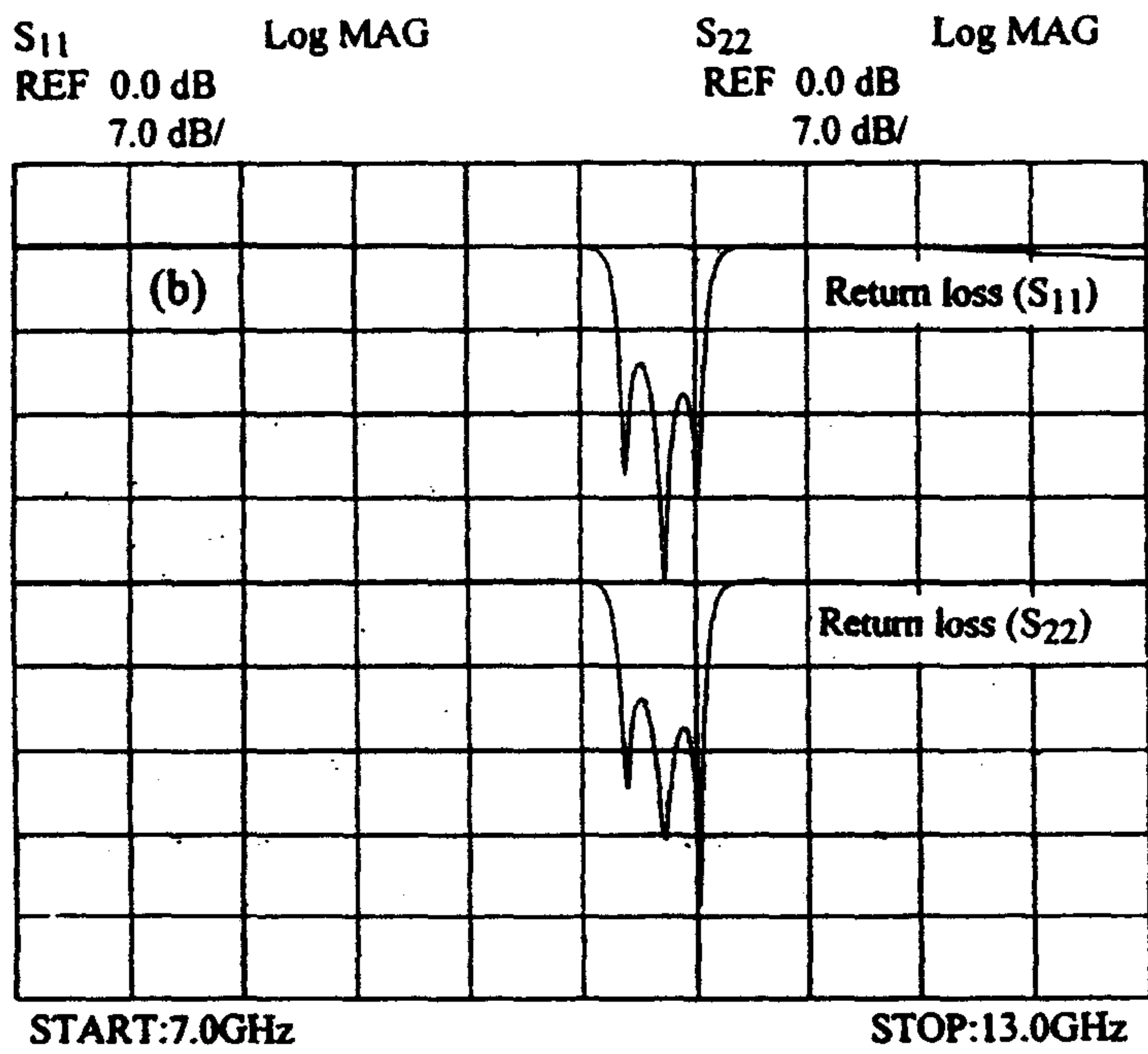


Fig. 3. 14. return loss(S_{11} 와 S_{22}) response.

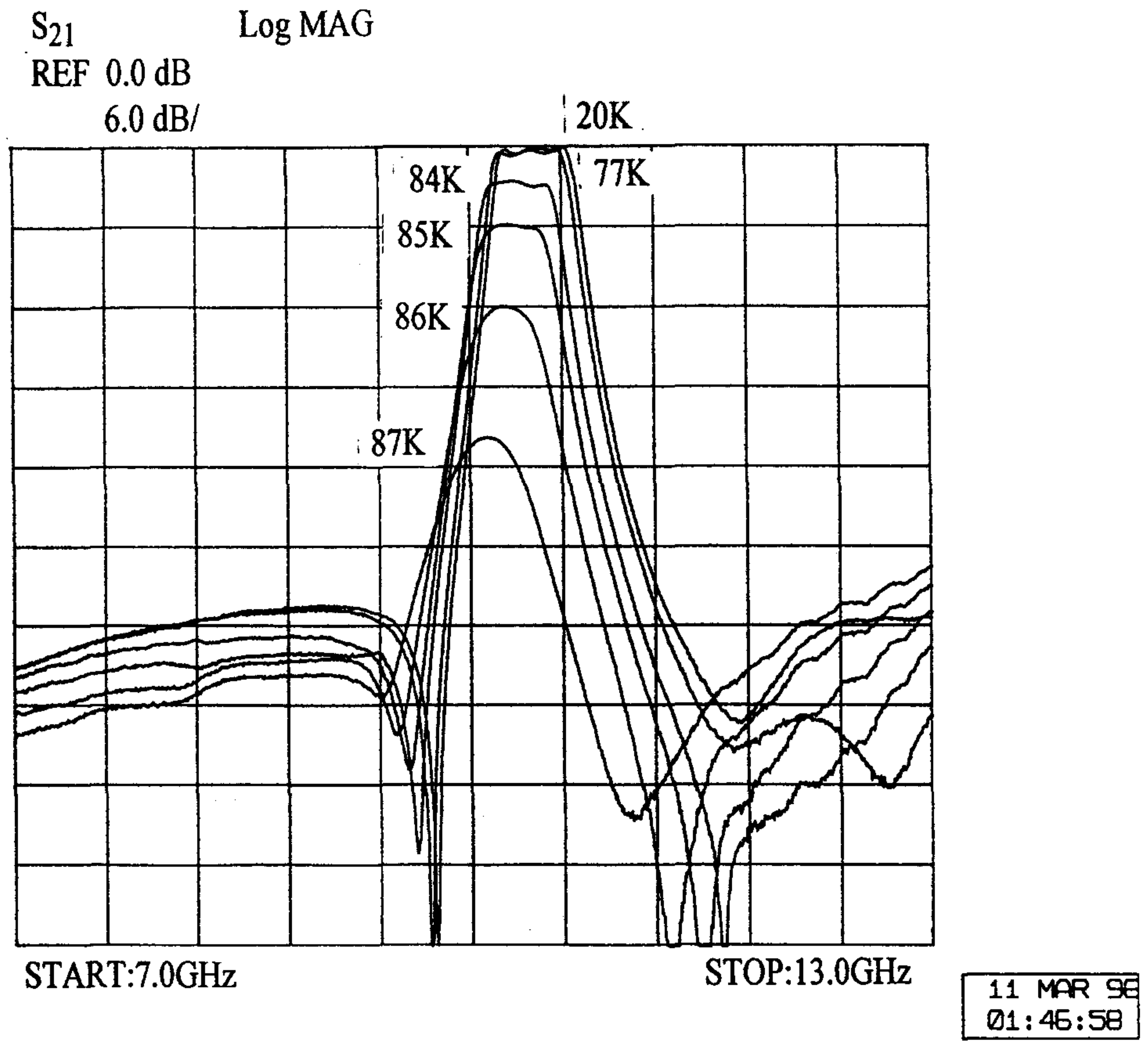


Fig. 3. 15. transmission response의 온도 의존성

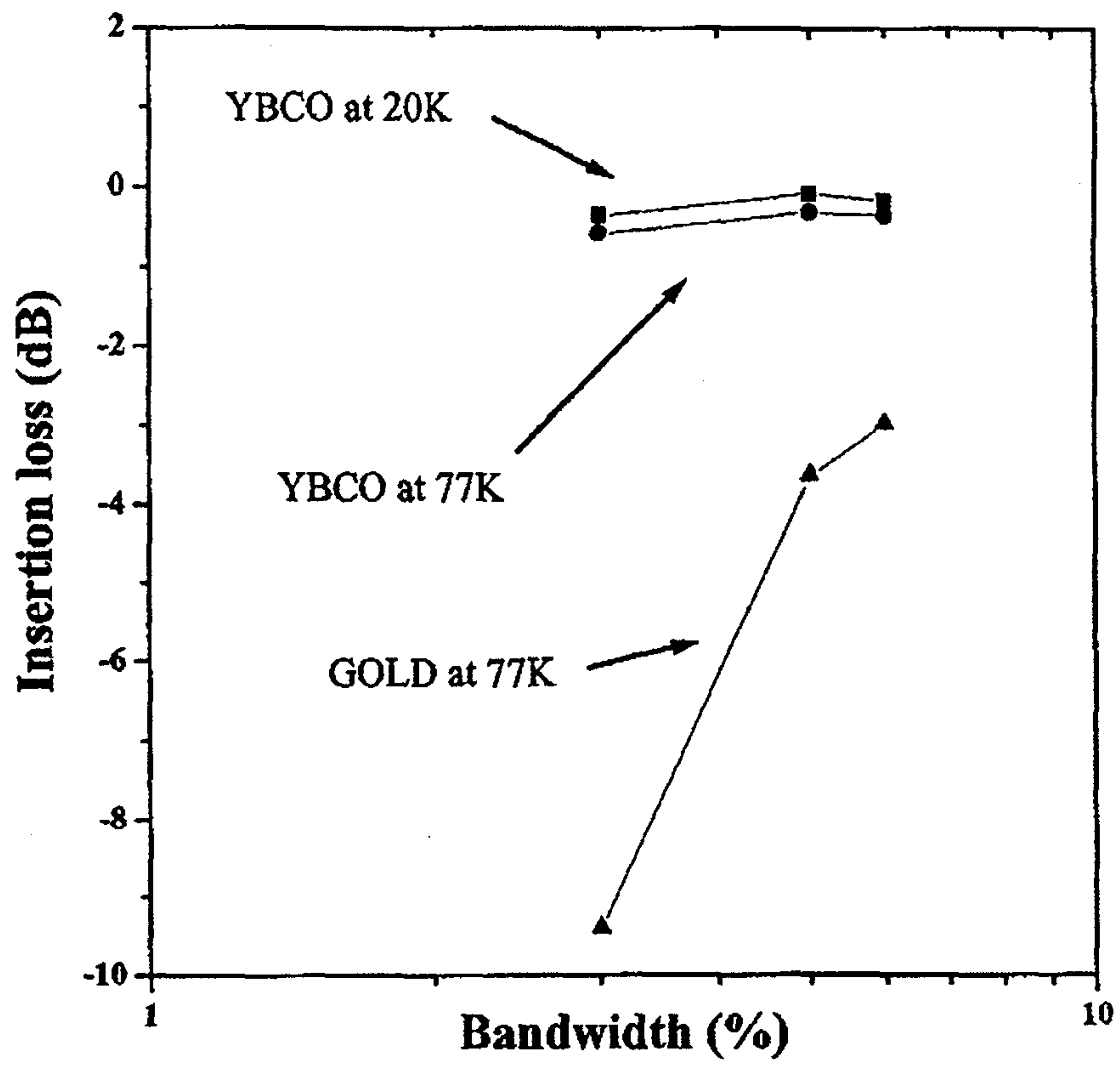


Fig. 3. 16. Gold와 YBCO의 온도에 따른 삽입손실의 변화(BW:3%, 5%, 6%)

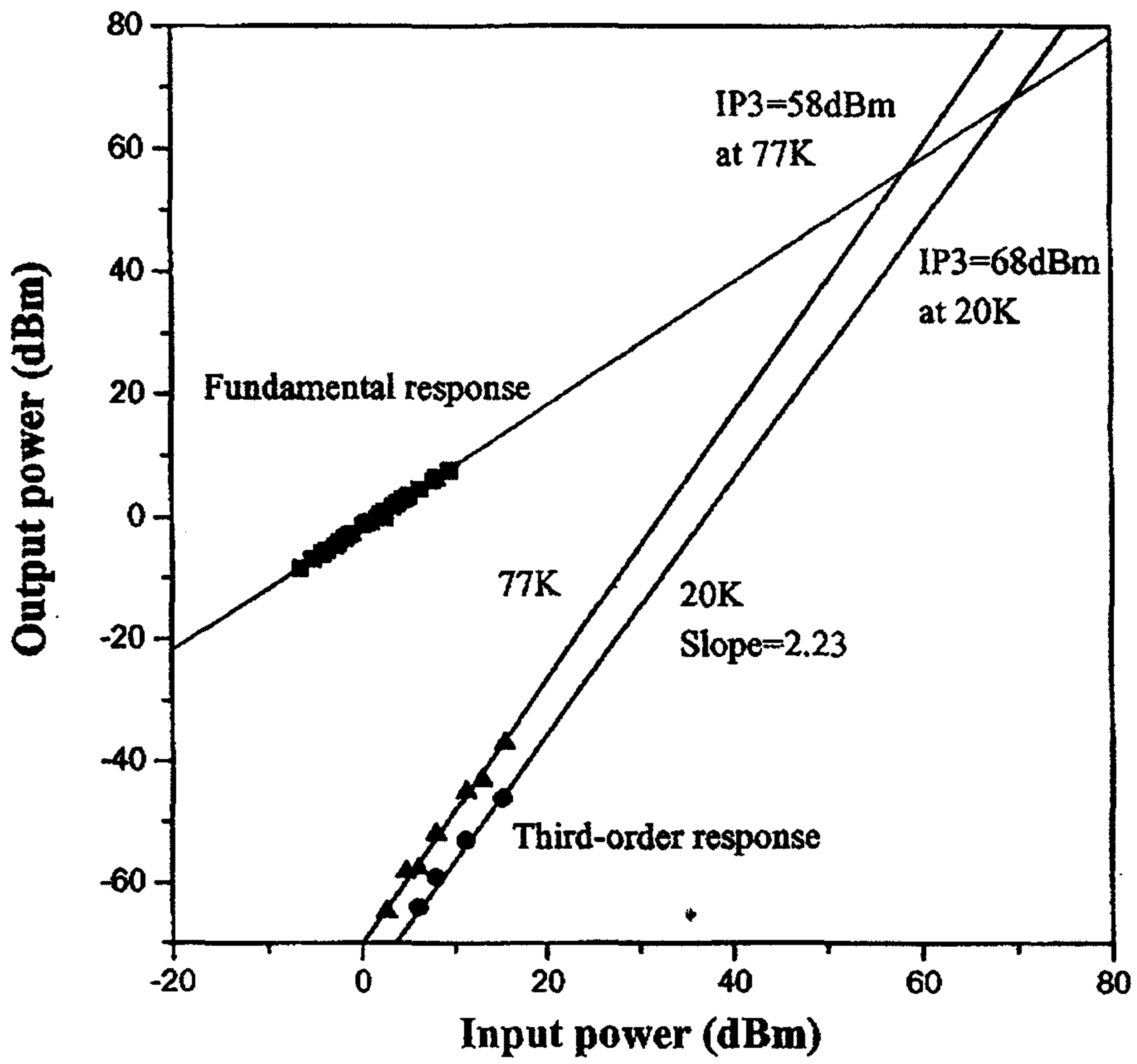


Fig. 3. 17. input power 및 온도에 따른 IMD 측정

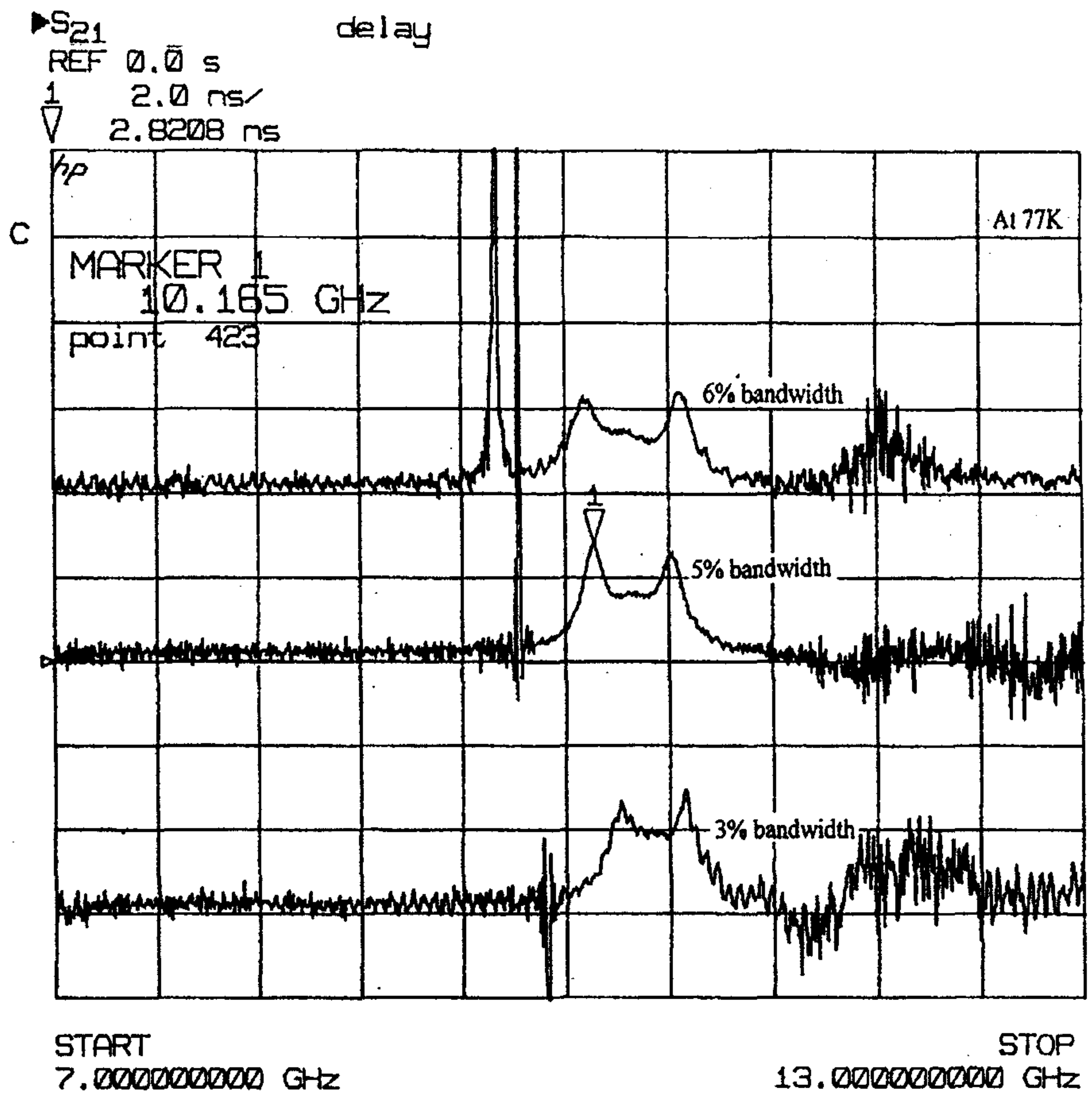


Fig. 3. 18, 각의 대역폭에서의 group delay 결과.(77K)

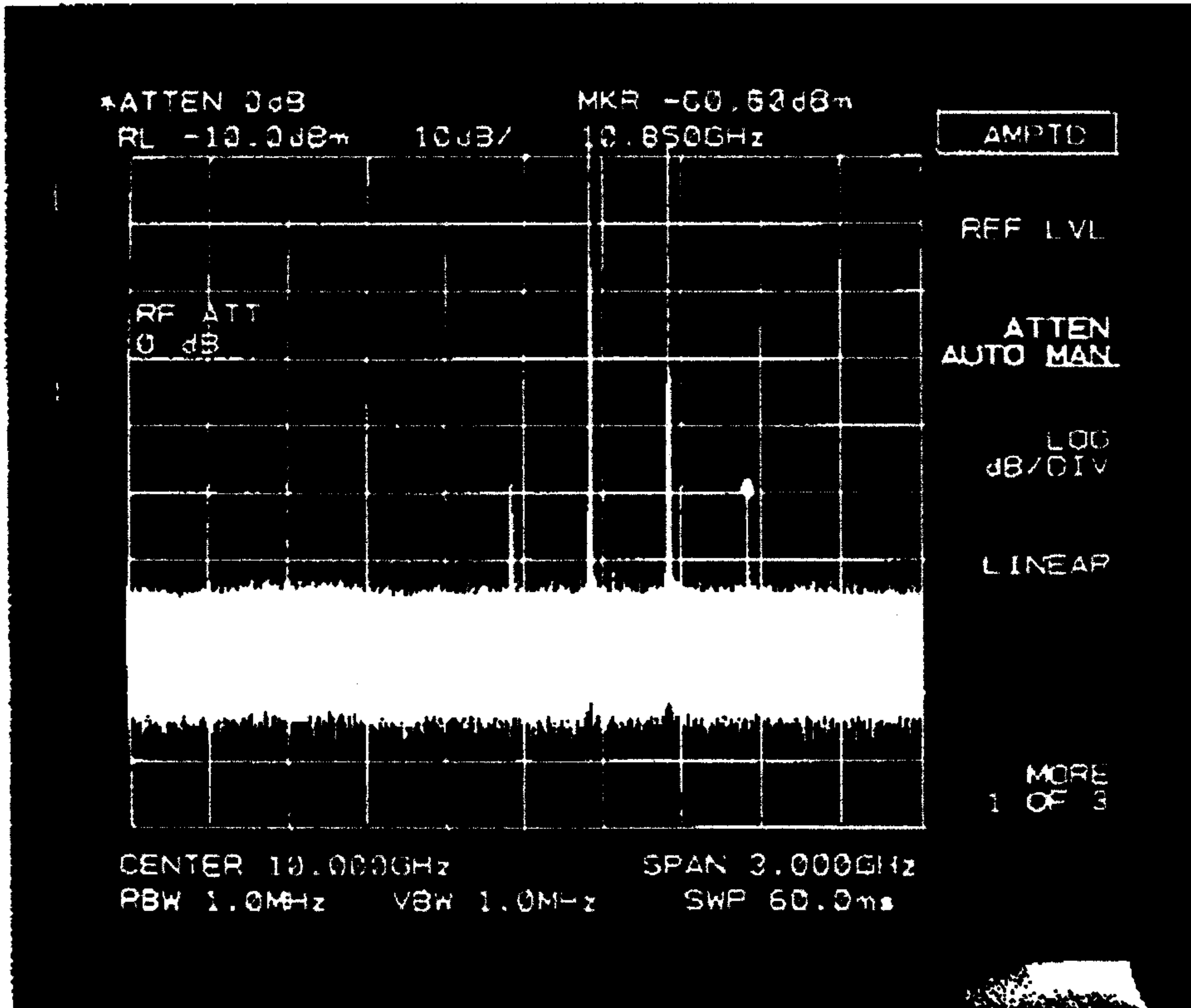


Fig. 3.19. 필터의 신호 왜곡성

3 -6. 결론

고온초전도체는 마이크로웨이브 소자 개발은 근본적으로 지금까지 사용되어 왔던 일반 금속 및 세라믹으로 제작된 마이크로웨이브 소자들과는 다른 설계 기술확보가 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서 고온초전도 소자중 가장 중요한 필터 설계기술 확보에 주력하였으며 그중에서 가장 많이 연구되고 있는 parallel-coupled 필터를 연구하였다. 필터 설계시에는 임피던스 inverter를 통한 분석과 상업용 Libra 프로그램과 HFSS(High Frequency Structure Simulator)프로그램을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 기판은 두께 0.5mm인 LaAlO₃ 단결정 기판을 이용하였다. 각각의 필터의 특성은 공진기들 간의 거리(L) 및 spacing 변화에 따라 결정 되었으며, 주파수 반응 특성들은 마이크로웨이브 주파수 범위에서 연구하였다. 필터 제작 결과, 초전도 박막 고유의 높은 Q값으로 인하여 정교한 skirt특성을 얻었으며, 삽입 손실 또한 0.1dB이하의 저손실용 필터를 얻었다. 또한 고온초전도 소자의 특성 측정시 가장 중요한 저온 측정용 package를 설계 및 제작하였다. IMD(Inter Modulation Distortion) 측정으로 필터의 power handling을 알아 보았다. 1차와 3차가 만나는 Interception Point(IP3)는 77K에서 54dBm이었다. 비교적 좋은 결과이나 앞으로 power handling을 올리기 위한 연구가 필요하다.

앞으로는 확보 설계 기술과 실질로 제작된 고온초전도 필터를 바탕으로, 필터 설계시 더욱 정확한 분석 방법으로 사용되고 있는 static-capacitance 방법과 HFSS(high frequency structure simulator) CAD 프로그램을 이용하여 더욱 고효율의 고온초전도 필터를 개발할 예정이다. 그리고 마이크로웨이브 소자설계에 중점을 두어 많은 소자의 설계기술을 확보하여, 대박막 제작을 통한 필터 기지국용 filter bank나, 궁극적으로 초전도박막을 응용한 MIC를 이루고자 한다.

References

- 1) G. Matthaei, L. Young and E.M.T. Jones, " Microwave filters, impedance-matching networks, and coupling structures", Artech.
- 2) Ramesh Gafg and I.J. Bahl, " Characteristics of coupled Microstriplines ", IEEE trans. MTT-27, July, (1979).
- 3) L.C. Bourne, R.B. Hammond, M. Robinson, M.M. Eddy, W.L. Olson and T.W. James, Appl. Phys. Lett. 56, 2333(1990).
- 4) G.C. Liang, D. Zhang, C.F. Shih etc, " High power HTS microstrip filters for wireless communication", IEEE MTT-S (1994).
- 5) S.H. Talisa, M.A. Janocko, C. Moskowitz, J. Talvacchio, J. F. Billing etc, " Low and high superconducting microwave filters", IEEE Trans. MTT-39Sept. (1991)
- 6) R.R. Mansour, F. Rammo, and V. Dokas, " Design of hybrid-coupled multiplexers and diplexers using asymmetrical superconducting filters", IEEE Symp. Atlanta, Georgia, (1993).
- 7) J.P. Hong and J.S. Lee, " Performance of microstrip bandpass filters using high- T_c Superconducting $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ thin films on $LaAlO_3$ ", Appl. Phys. Lett., Vol. 68, No. 21, 1996
- 8) T. Yoshitake and S. Tahara, "Intermodulation distortion measurements of a microstrip bandpass filter made from double-sided $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ films", Appl. Phys. Lett., Vol. 67, No. 26, 1995

제 4 장. 고온 초전도 3dB/90° 결합기, 듀플렉서 설계 및 simulations

4-1 서론

고온 초전도 박막 응용은 액체 질소 온도 이상에서 임계 전류가 높은 양질의 박막 제작, 미세 패턴, 접합 제작, 설계, 특성 평가 및 실용화 기술이 체계적으로 이루어져 능동 소자, 수동 소자의 응용을 위한 특성 개선이 진행되고 있다. 특히 고온 초전도 에피택셜 박막은 매우 낮은 표면 저항을 가지기 때문에 마이크로파 개별 소자(공진기, 필터, 안테나 등) 뿐만 아니라, 이를 조합한 서브 시스템, 마이크로파/밀리미터파 통신과 관련된 hybrid MIC(Microwave Integrated Circuits) 개발이 활발히 진행되고 있다. 고온 초전도 필터 응용 연구는 현재 사용되고 있는 위성 통신에서 고 효율의 채널 수를 크게 증가 시킬수 있으며, 주파수의 영역 면에서도 고주파 영역인 밀리 미터파 응용까지 가능한 것으로 예측되고 있다.

일반적으로 대역역 통신 시스템 등에서 여과기를 사용할 때는 전 bandwidth를 한번에 사용하지 않고 narrow bandwidth에서 필요로 하는 신호들만 선택하고 다른 주파수 영역의 신호들을 사용 가능한 필터 뱅크를 형성하여 사용한다. 현재 위성 통신에서 사용하고 있는 cavity-type 필터들은 규모가 매우 크며, 삽입 손실이 매우 크기 때문에 정확하고 명확한 신호의 전달에 문제가 있으므로 차세대 통신용 필터 및 필터 뱅크 등은 초전도체로 제작하는 것이 매우 유리하다.

본 장에서는 이동 통신 및 위성 통신 기지국용 다채널 필터 뱅크(멀티 플렉서)를 구성하는 3dB/90° 결합기 및 듀플렉서의 EM/circuit simulation 을 통한 설계와 결과를 서술하고자 한다.

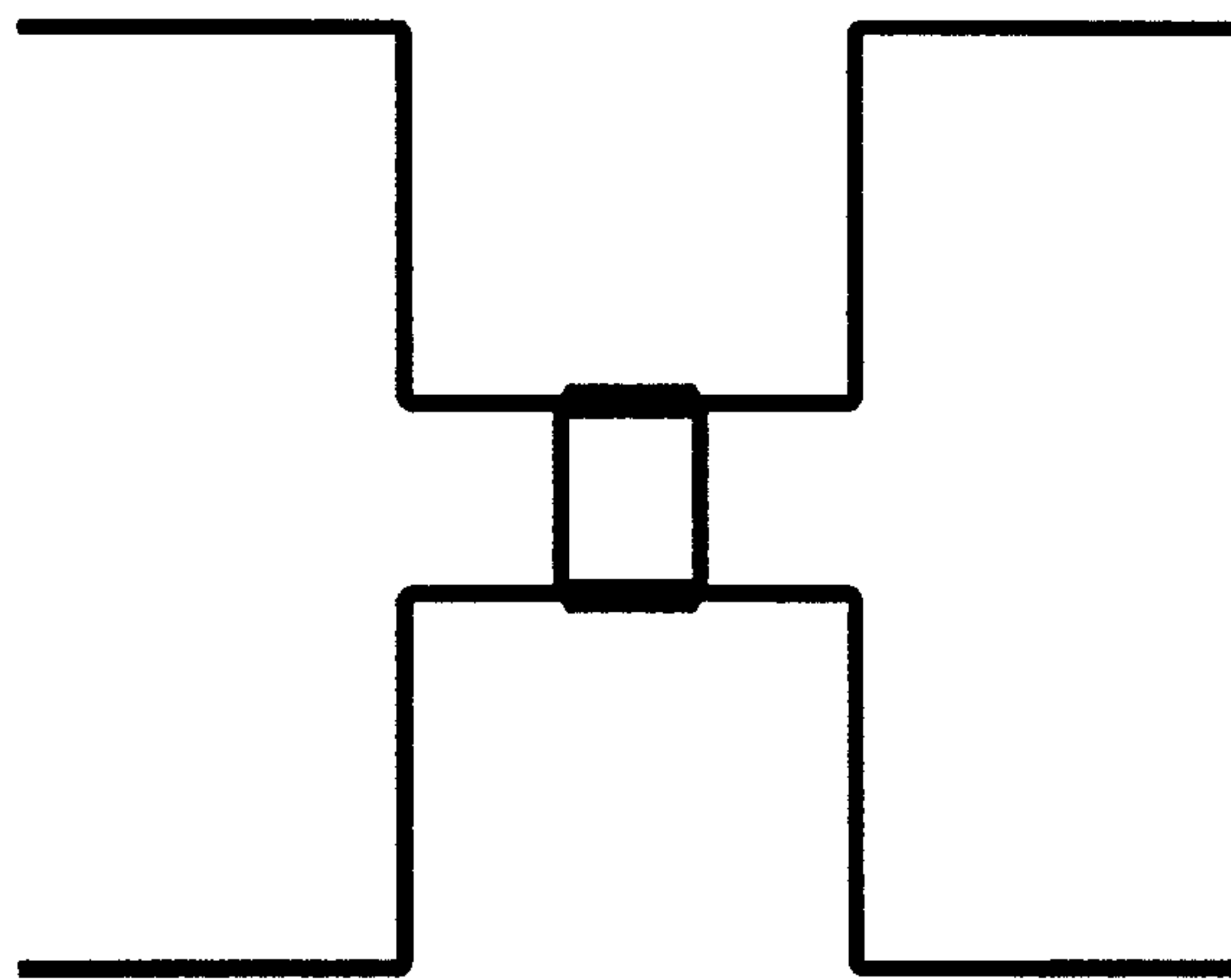
4-2 마이크로파용 3dB/90° 결합기 설계

고온 초전도 박막의 low-loss, non-dispersive 특성을 이용하여 power를 나누거나 결합시킬 수 있다. RF 및 마이크로파 통신 시스템에서 신호를 송수신할 때 안테나를 포함하지 않는 전단부에는 다수의 주파수를 포함하고 있는데, 이 부분에는 단일 채널에서 원하는 주파수의 신호만을 선택하도록 해주는 집적형 서브 시스템이 필요하다. 이때 활용되는 마이크로파 핵심 부품중의 하나가 필터와 커플러로 구성된 듀플렉서이다. 마이크로 스트립선을 사용할

경우에 적합한 4-포트 소자인 hybrid 커플러는 보통 통과된 신호의 power를 3-dB 분배하며, 두개의 출력단 간의 위상차가 90° (또는 180°)가 되도록 설계한다. 따라서 위상차에 의하여 신호를 결합하거나 상쇄하는 기능을 가진다. Fig 4.1에서 포트 사이의 간격은 결합기에 사용하는 신호 파장(λ)의 $\lambda/4$ 가 되게 하며 4-포트 소자에서 포트-3와 포트-4의 신호는 서로 90° 의 위상차를 가지도록 설계한다. Fig 4.2는 simulation 결과를 보여 준다. Fig 4.3에서 package된 결합기를 보여준다.

Input port 1

Output port 4



Port 2

Output port 3

Fig 4.1 Geometry of a branch line type HTS 3dB coupler designed optimal pattern

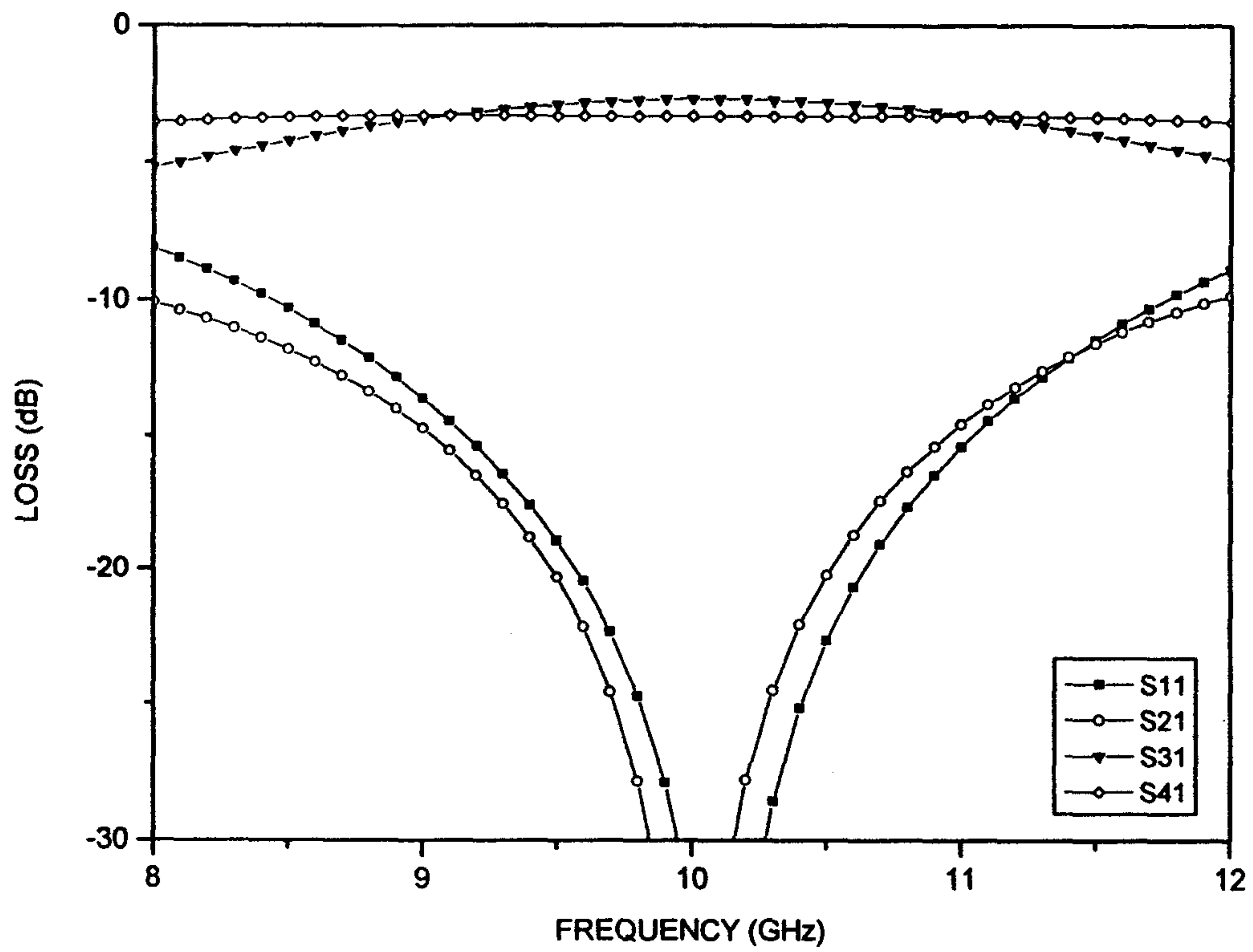


Fig 4.2 The simulated response of a branch line type HTS hybrid 3dB coupler

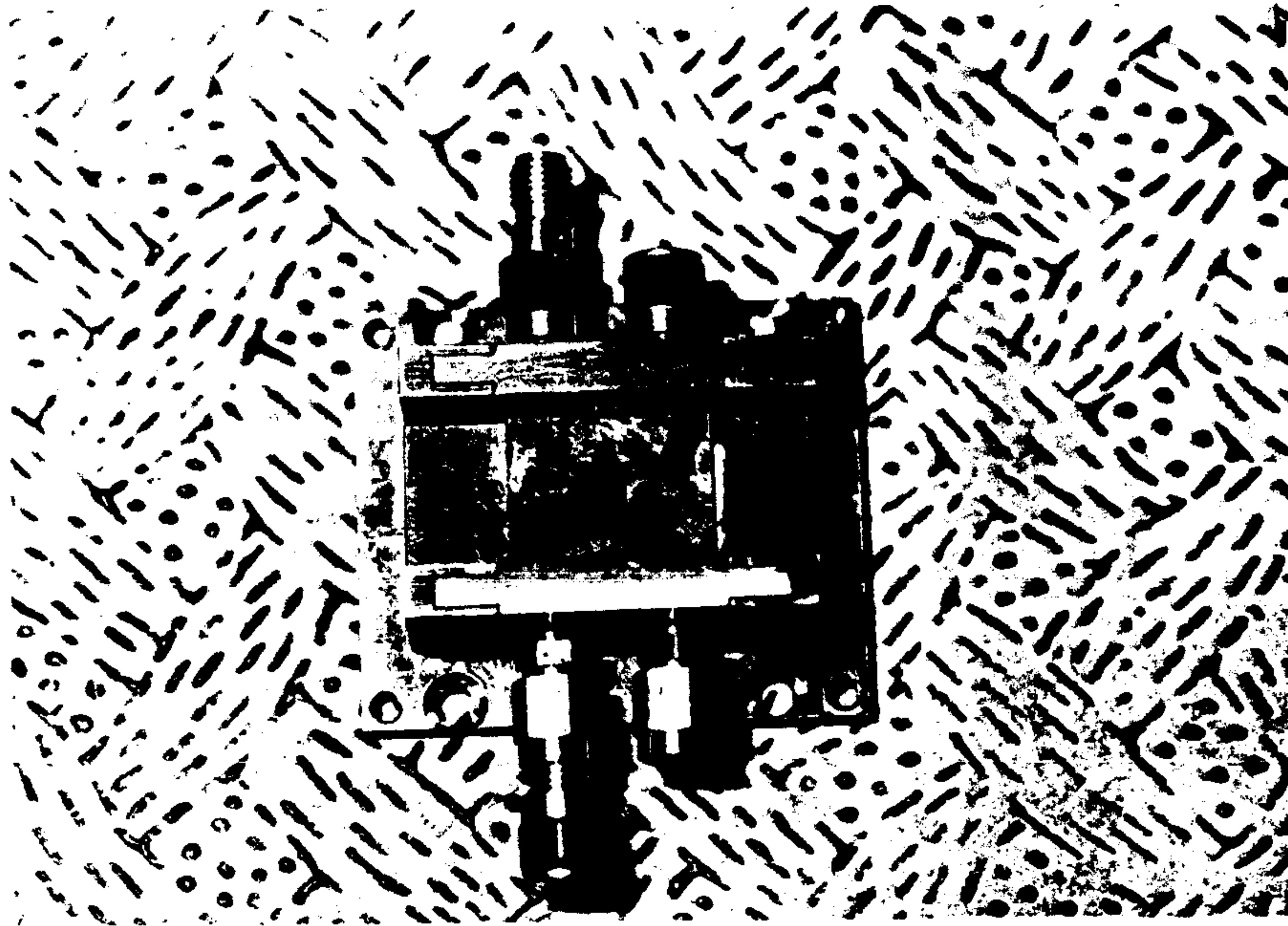


Fig 4.3 Packaged coupler device

4-3 마이크로파용 듀플렉서 설계

위성통신을 겨냥한 셀룰러 기지국의 핵심부품으로 사용될 수 있는 필터뱅크 또는 멀티플렉서는 채널수 만큼 듀플렉서를 결합시켜 구현한 것이다. 듀플렉서는 특정 주파수 f_s 만 통과시키는 두 개의 3-극 대역통과 필터와 두 개의 3-dB/90° 결합기로 구성되고 단일채널의 여러 주파수(input)에서 듀플렉서에 있는 대역통과 필터에 맞는 f_s 주파수(output)를 얻어내는 것이다. 즉 f_a, f_b, f_c, f_d 가 포트 1(입력단)에 입사하면, 좌측 하이브리드 결합기의 두 브랜치에서 주파수 f_s 에 해당하는 에너지가 등분된다. 등분된 에너지는 동일한 두개의 대역통과 필터를 통과하게 되고 오른쪽 3-dB 결합기의 두 가지로 들어가게 된다. 이때 하이브리드 결합기와 대역통과 필터의 위상관계 때문에 포트 4에서는 신호가 서로 상쇄되어 영이되고 주파수 f_s 에 해당하는 에너지는 모두 포트 3에 모인다. 반면, 남은 주파수 f_b, f_c, f_d 는 대역통과 필터를 통하여 반사되고 다른 듀플렉서의 3-dB/90° 결합기의 두 가지로 다시 들어가게 된다. Fig 4.4는 듀플렉서의 design이고 Fig 4.5은 simulation된 마이크로파용 고온초전도 듀플렉서의 응답특성을 보여 준다. 포트 3에서 bandwidth가 500MHz이고 중심 주파수가 약 10GHz인 대역통과 필터 특성을 갖는 신호만을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그리고 Fig 4.6에는 package된 듀플렉서를 보여준다.

4-4 측정 패키지 및 측정 시스템

마이크로파 소자의 고주파 특성 측정을 위하여 계측장비의 입출력단과 우수한 정합을 이루어야하고 온도조절기, 냉각장치에 의한 열전달 특성이 우수한 package가 필요하다. 동축 케이블에서 마이크로스트립 소자로의 고주파 전송특성이 우수하고 입출력단에서의 전기적 정합특성이 잘 발휘되고 손실이 적은 DC~40 GHz 까지 사용 가능한 윌트론사의 K-코넥터를 부착하였다. Fig 4.7는 소자(결합기, 듀플렉서)측정용 4-포트 package의 도면이며 재질로는 저온에서도 열전도율 뿐만 아니라 전기적 특성이 좋은 무산소동을 사용하였다. K-코넥터가 연결되어 있는 부분이 위 아래로 움직이며(코넥터 간격이 다르면 이 부분만 새로 제작하면 됨) 또한 그 자체가 가로 방향으로 조절되므로 다양한 소자의 package로 사용될 수 있게끔 설계 제작하였다.

저온측정 장치를 이용한 고주파 특성 측정은 컴프레서, 냉각기 및 진공챔버로 구성된 냉각용 폐순환 시스템(Closed Cycle System)과 마이크로파 계측장비인 Vector Network Analyzer로 구성되어 있다. 저온 마이크로파 측정을 위한 폐순환 시스템은 냉각 컴프레서로서 성능이 우수한 수냉식 헬륨 컴프레서를 사용하였고 sample의 온도조절을 위해서 330-1 1 Silicon diode sensor와 LakeShore 330 Autotuning 온도조절기를 갖추었다. 효율적인 냉각 기능과 함께 고주파 측정

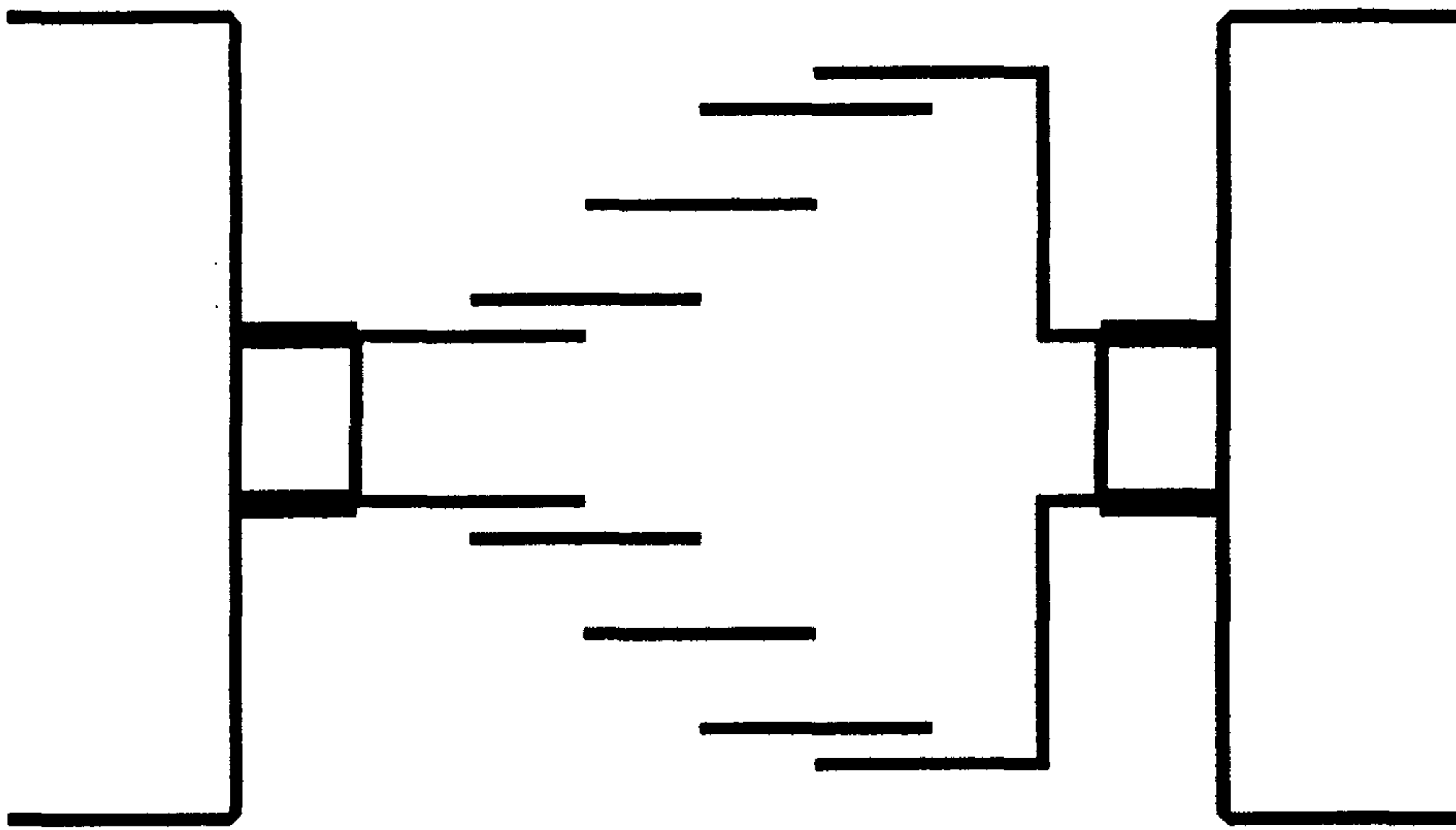


Fig 4.4 Designed optimal pattern of HTS microwave duplexer

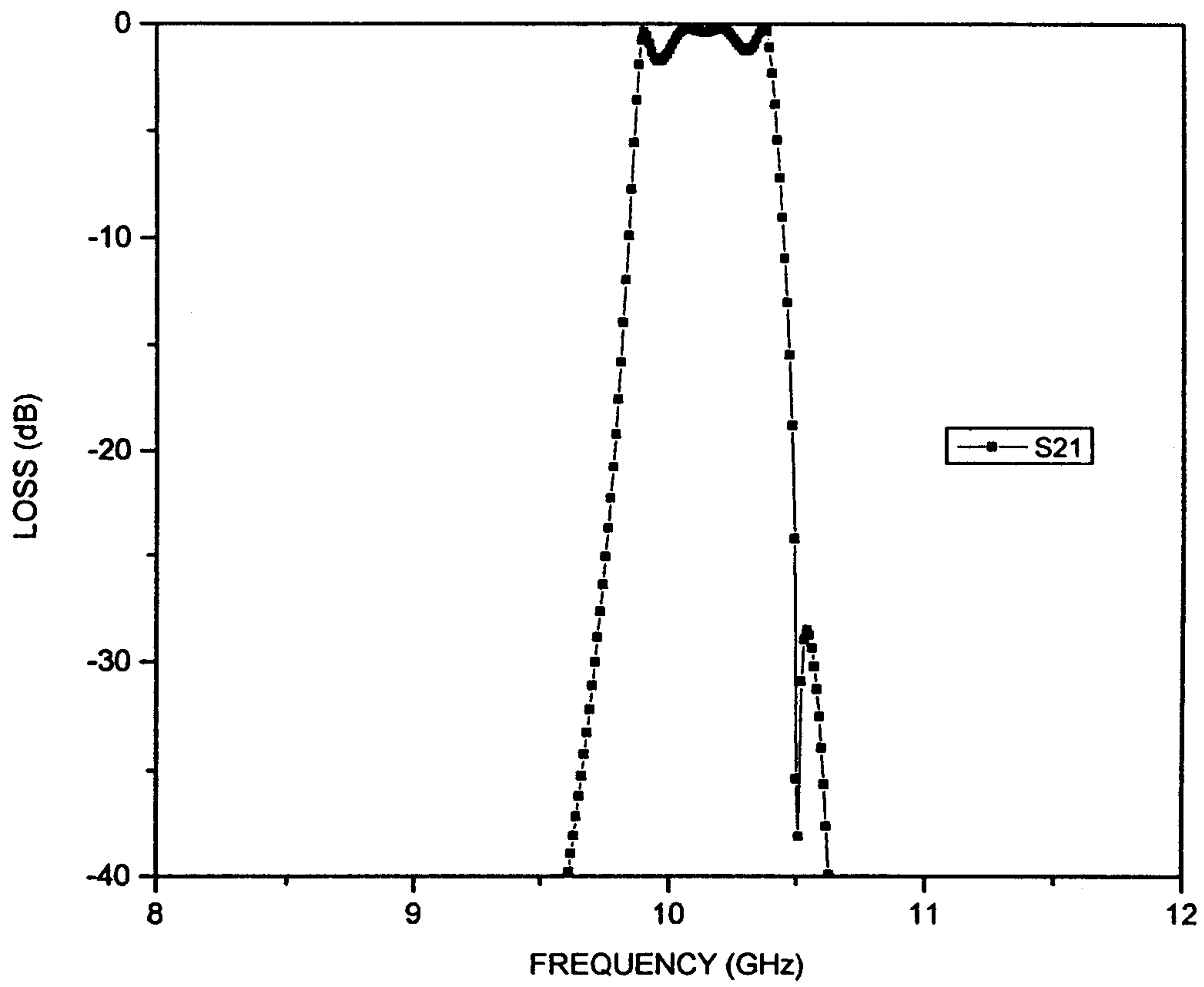


Fig 4.5 The simulate S-parameter response of HTS microwave duplexer

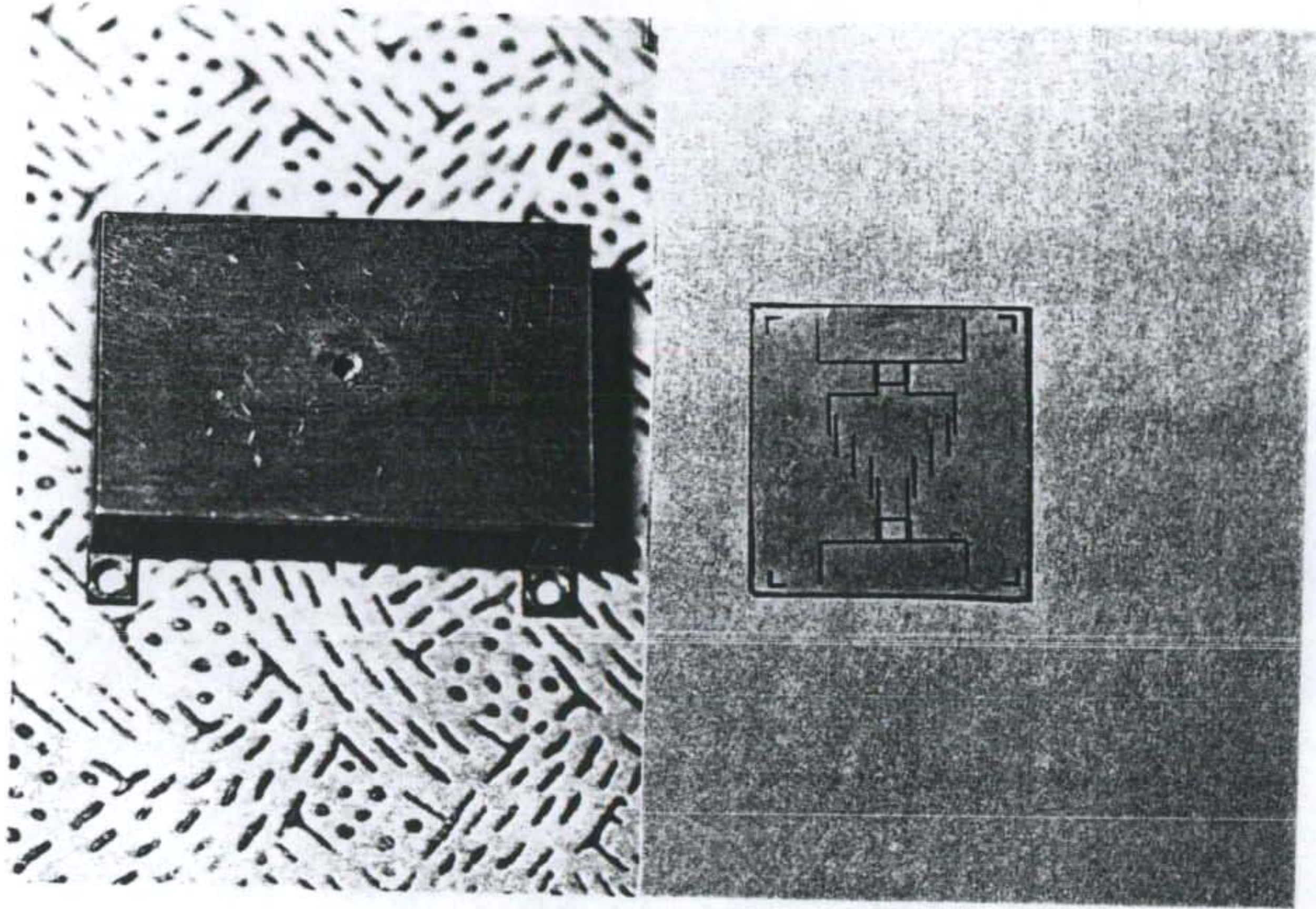


Fig 4.6 Packaged HTS duplexer

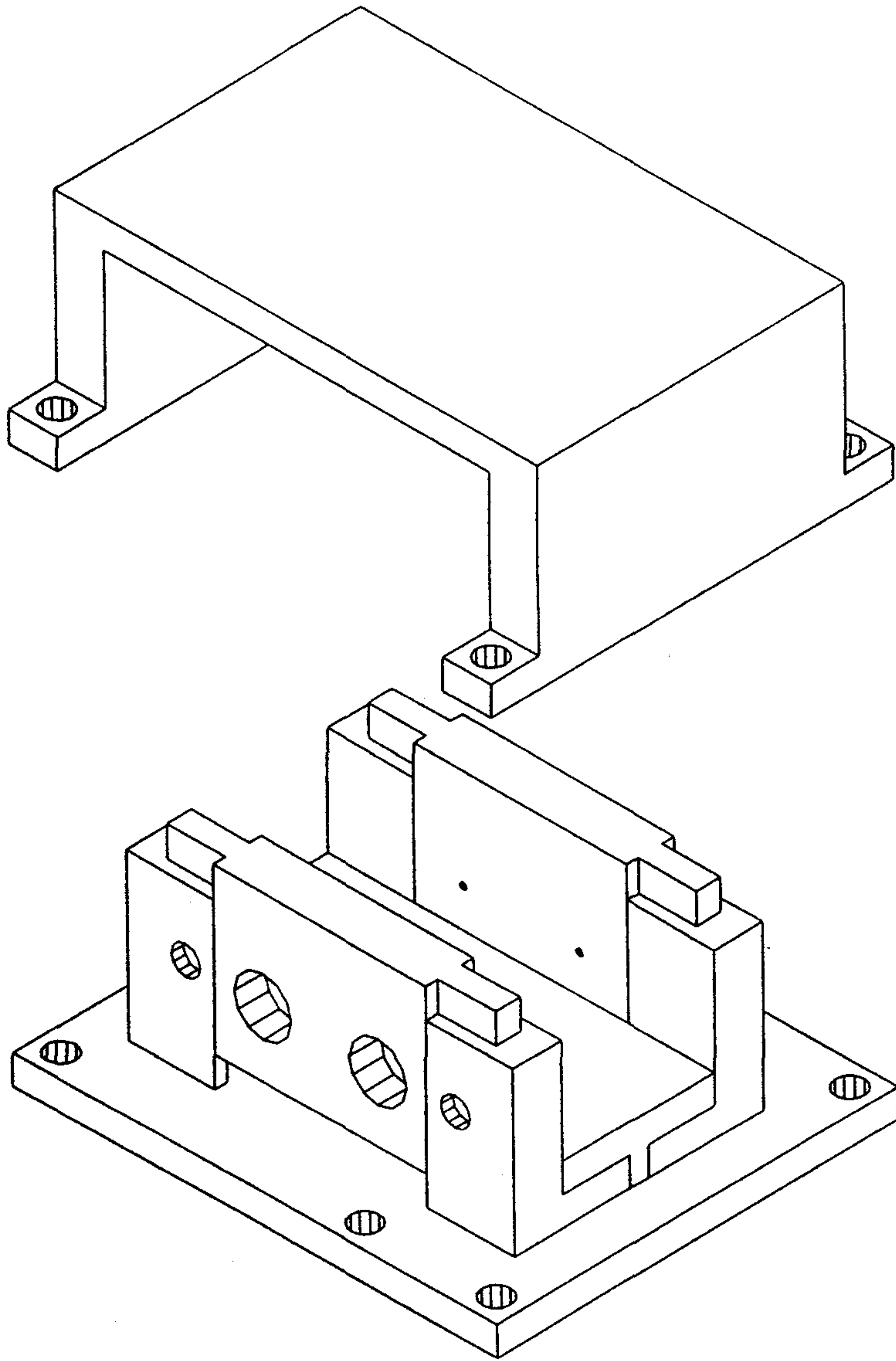


Fig 4.7 Figure of test-fixture

을 위한 각종 케이블과 어댑터간의 정합, 그리고 진공 등을 동시에 고려하여 설계하여야 한다.

4-5 결론

이동통신, 위성통신용 frequency channelizer인 필터뱅크 개발을 목표로 고온초전도 마이크로웨이브 응용화 기반기술 확보에 연구가 진행되고 있다. 이는 2인치 이상의 대박막 제작, 4-포트 소자인 결합기, 듀플렉서 simulation, 설계 및 제작, universal한 저온/고주파 4-포트 package 설계 및 제작 등의 연구로 구성되어 있다. 고온초전도 microstrip branch type 3 dB/90° 결합기와 이미 연구된 3-pole parallel coupled type의 대역 통과 필터를 구현하여 양호한 응답특성을 갖는 듀플렉서를 개발하였고 이들 조합인 멀티플렉서 개발이 진행중에 있다.

References

- 1) N. Newman and W. Gregory Lyons, " High Temperature Superconducting Microwave Devices: Fundamental Issues in Materials, Physics, and Engineering," Journal of Superconductivity, Vol.6, No.3, 1993, pp 119-160
- 2) R.R. Mansour, F. Rammo and V. Dokas, " Design of Hybrid-coupled Multiplexers and duplexers Using Asymmetrical Superconducting Filters," IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 1993, pp 1281-1284
- 3) R.R. Mansour, " Design of Superconductive Multiplexers Using Single-Mode and Dual-mode Filters," IEEE Transactions MTT, Vol.42, July 1994, pp 1411-1418
- 4) S.H.Talisa, M.A.Janocko, D.L. Meier, C. Moskowitz, R.L. Grassel, J. Talvacchio etc,
Wireless Report, Microwave Journal, July 1996, pp 106-112
- 5) D. Zhang, G.C. Liang etc., " Microstrip Filters for Wireless Communications Using High-Temperature Superconducting Thin Films," Applied Superconductivity Vol.3. No. 7-10, 1995, pp 483-496

제 5 장. 결론

고온초전도 마이크로파 소자의 연구 개발은 미국의 HTSSE-I,II를 비롯하여 전 세계적으로 진행되고 있으며 당 원에서도 고온초전도 소자들의 실용화를 위해서 핵심기술을 자체적으로 확보하고자 고온초전도 박막 제조, 박막의 미세 가공, 박막의 특성 측정, 고온초전도 소자들의 설계 및 특성 평가등의 분야를 나누어 수행해 왔다. RF-스퍼터링법과 PLD방법으로 양질의 박막을 제작하여 위성, 무선통신 분야 등에서 차세대 핵심 소자로서 가능한 microstrip line, ring, meander line 형태의 고온초전도 공진기, 3-극 bandpass filter, coupler 및 duplexer를 이용한 filter bank를 개발하였다. 현재 진행중인 양질의 고온초전도 대면적 및 양면증착 기술 확보로 신구조, 신개념의 마이크로파 소자 및 hybrid MIC 연구로 통신의 subsystem구축과 더불어 laser-abration 법을 이용한 다층막제조의 최적화 기술 확보로 실용화할 수 있는 소자 개발에 연구를 계속 진행해 나갈 것이다.

별

침

여 백

Performance of microstrip bandpass filters using high- T_c superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ thin films on LaAlO_3

J. P. Hong and J. S. Lee

New Materials Laboratory, Materials and Devices Research Center, Samsung Advanced Institute of Technology, P.O. Box 111, Suwon, Korea

(Received 2 February 1996; accepted for publication 19 March 1996)

We have fabricated a microstrip three-pole bandpass filter with a fractional bandwidth of 5% at a center frequency of 10.5 GHz utilizing laser ablated high- T_c superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ thin films on LaAlO_3 substrates. Microwave performance of the filter was carried out as a function of temperature. The filter exhibited low insertion losses of about 0.077 and 0.304 dB at 20 and 77 K, respectively. More than 15 dB in return losses was obtained at the same temperatures. Intermodulation distortion measurements were performed to evaluate power-handling capacity of the filter, which results from the nonlinear effects of surface resistance. Third-order intercept points were 68 dBm at 20 K and 58 dBm at 77 K. The nonlinear performance in the passband was also measured using a group delay method. The superconducting filter was compared with an equivalent gold filter which showed the insertion loss of more than 3.5 dB at 77 K. © 1996 American Institute of Physics. [S0003-6951(96)03821-1]

Acceptable microwave properties of high- T_c superconducting (HTS) thin films stimulate significant challenges and tremendous prospects for microwave applications. Presently, high- T_c superconducting microwave passive components that include resonators, filters, delay lines, and oscillators have shown impressive results in device performance over normal-metal counterparts.¹⁻⁴ The use of the HTS thin films are promising to realize narrow bandwidth filters with superior performance in a compact size because of their low surface resistance in microwave frequency ranges.^{5,6} Therefore, the HTS filters with narrow bandwidths have been strongly investigated in order to reduce multiple interfering signals at different frequency bands. They are expected to be replaced with conventional waveguide and dielectric resonator filters which limit the bandwidth and size due to their intrinsic loss.

Most of these superconducting devices to date have been concentrated on low-power applications or have been limited to relatively low power levels in the several mW range.⁷⁻⁹ The power handling capability of HTS devices is related to the nonlinearity of HTS materials.¹⁰ It is thought to be due to rf magnetic field or rf current dependence of surface impedance which is caused by a residual material property called weak links. The nonlinear effects in the bandpass filter result in harmonic generation or intermodulation distortion that pass spurious output signals with phase and amplitude distortion.

In this letter, we report the experimental performance of a HTS three-pole bandpass filter having a 5% bandwidth at a center frequency of 10.5 GHz. A microstrip structure using a conventional quarter-wavelength parallel-coupling comprised the HTS filter. The performance of the filter was presented as a function of temperature. In an effort to fully characterize the power handling capability of the filter, we have performed intermodulation distortion and group delay measurements. In addition, microwave response of the HTS bandpass filter was compared to that of a normal gold filter with similar geometry.

High- T_c superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) films

were deposited *in situ* on LaAlO_3 substrates utilizing a pulsed laser ablation system. A KrF excimer laser with a 248 nm wavelength (Lambda Physik 305iFi) was used at a laser pulse rate of 5 Hz and an energy density of about 1.5 J/cm². The YBCO films had zero resistance at 89 K and gave transition temperature width of less than 1 K. The critical current density was 5×10^6 A/cm² at 77 K. For the filter with a microstrip structure, two YBCO thin films have been fabricated on separate LaAlO_3 substrates. One of the films was used for circuit patterning of the filter. Patterning was accomplished by a standard photolithographic method and etched by an argon ion-milling system. After the circuit patterning, dc-sputtered gold film was deposited on the top surfaces of the 50 Ω input and output feed lines for electrical contact to the filter. The other film was used as a ground plane that was directly contacted with the package. Finally, the whole sample was annealed in flowing oxygen at 550 °C for 1 h.

In filter design, a conventional parallel-coupled filter that nominally consists of quarter-wavelength coupling sections

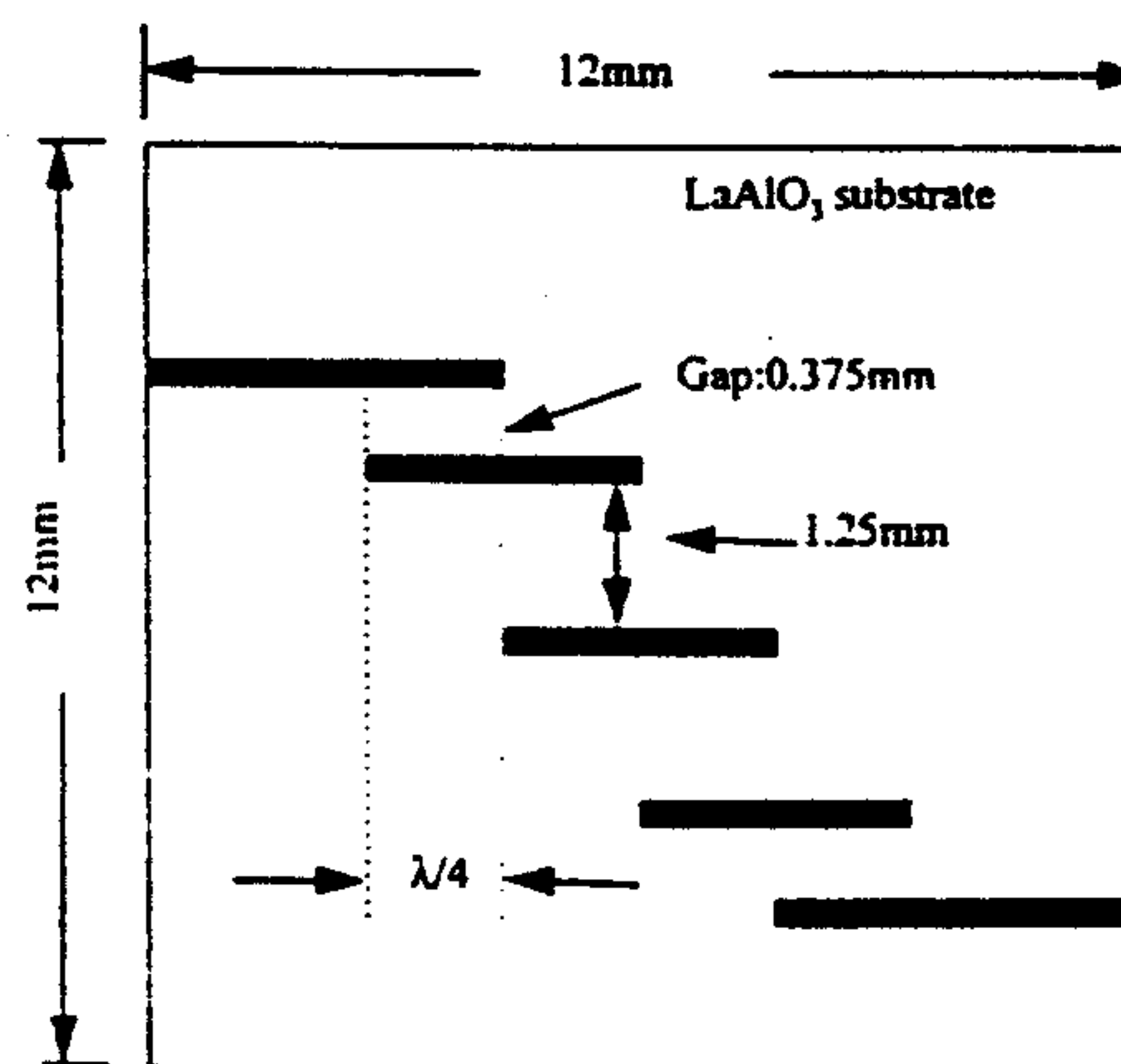


FIG. 1. Typical geometry of a 5% high- T_c superconducting 3-pole parallel-coupled bandpass filter with a center frequency of 10.5 GHz.

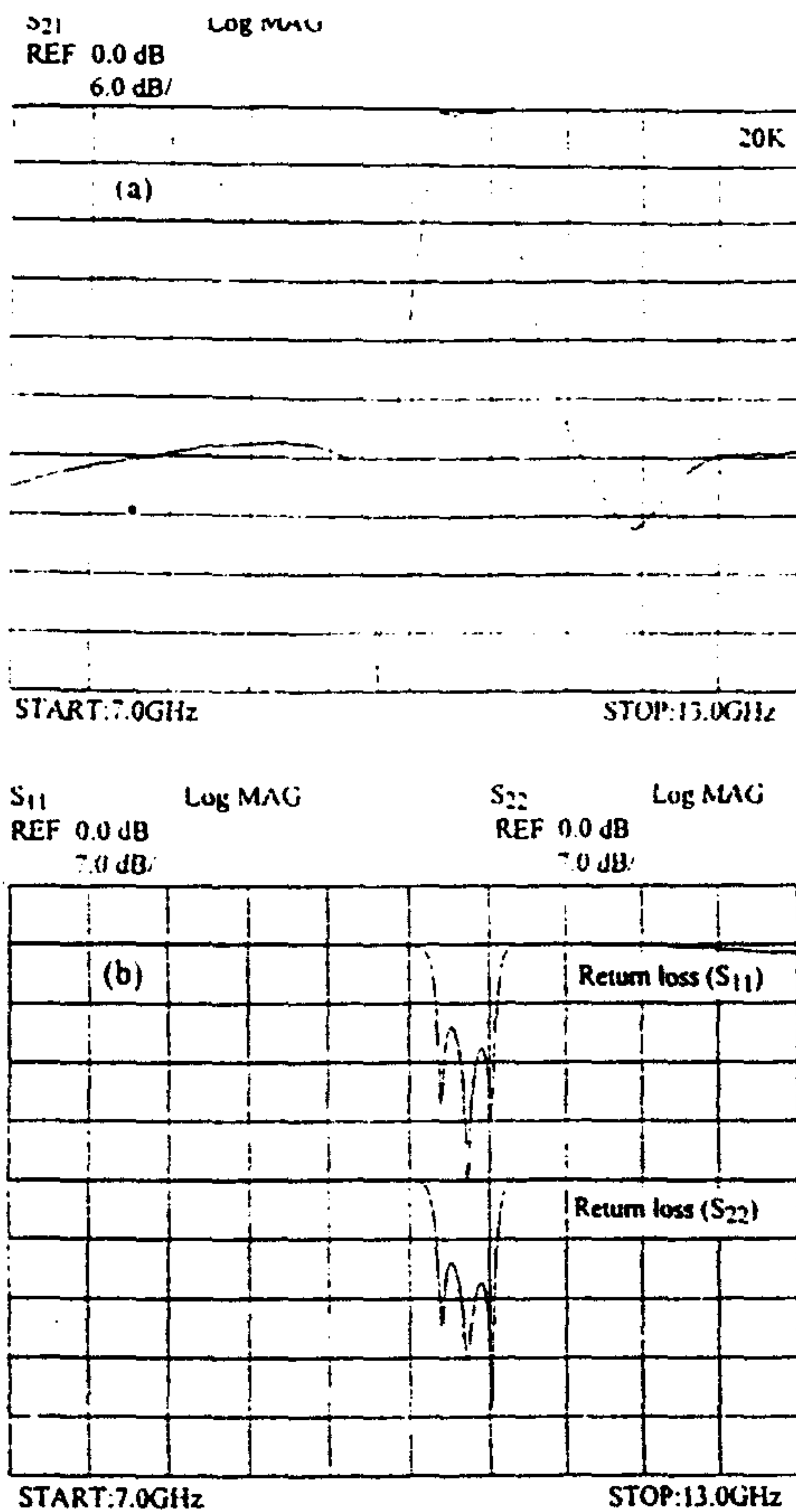


FIG. 2. (a) Typical transmission response (S_{21}) of the filter. (b) Return losses (S_{11}) and (S_{22}) at 20 K.

was used for the HTS 3-pole bandpass filter. The microstrip-line structure was chosen due to relative simplicity in packaging and fabrication. The filter was designed to achieve a fractional bandwidth of 5%. The design parameter of the HTS 3-pole filter was obtained and simulated by a commercially available computer-aided design (CAD) program called LIBRA. All of the coupled lines were set at 50Ω . In addition, the feed line with the same linewidth was connected to the circuit pattern of the filter for the impedance matching to the 50Ω resonator. However, no attempt in the design process was made to try to compensate for the effect of tolerances in parameters. Figure 1 shows the typical geometry of a HTS microstrip 3-pole parallel-coupled filter. The coupling gap was 1.25 mm. The spacing between the first and end resonator was kept constant at 0.375 mm.

Figure 2(a) shows typical frequency response of transmission (S_{21}) at 20 K. In this case, the input power was kept at 10 dBm. The filter showed a bandwidth of 5% in the passband. The low insertion loss of about 0.077 dB and better than 15 dB return losses were obtained at 20 K. As shown in this figure, the insertion loss was very flat across the passband, which indicated high quality resonators. The filter exhibited good out-of-band rejection of about 38 dB and did not show any spurious response of the filter skirt. Figure 2(b) shows reflection coefficients (S_{11} and S_{22}) of the filter at 77 K. From the return loss response that clearly showed all 3

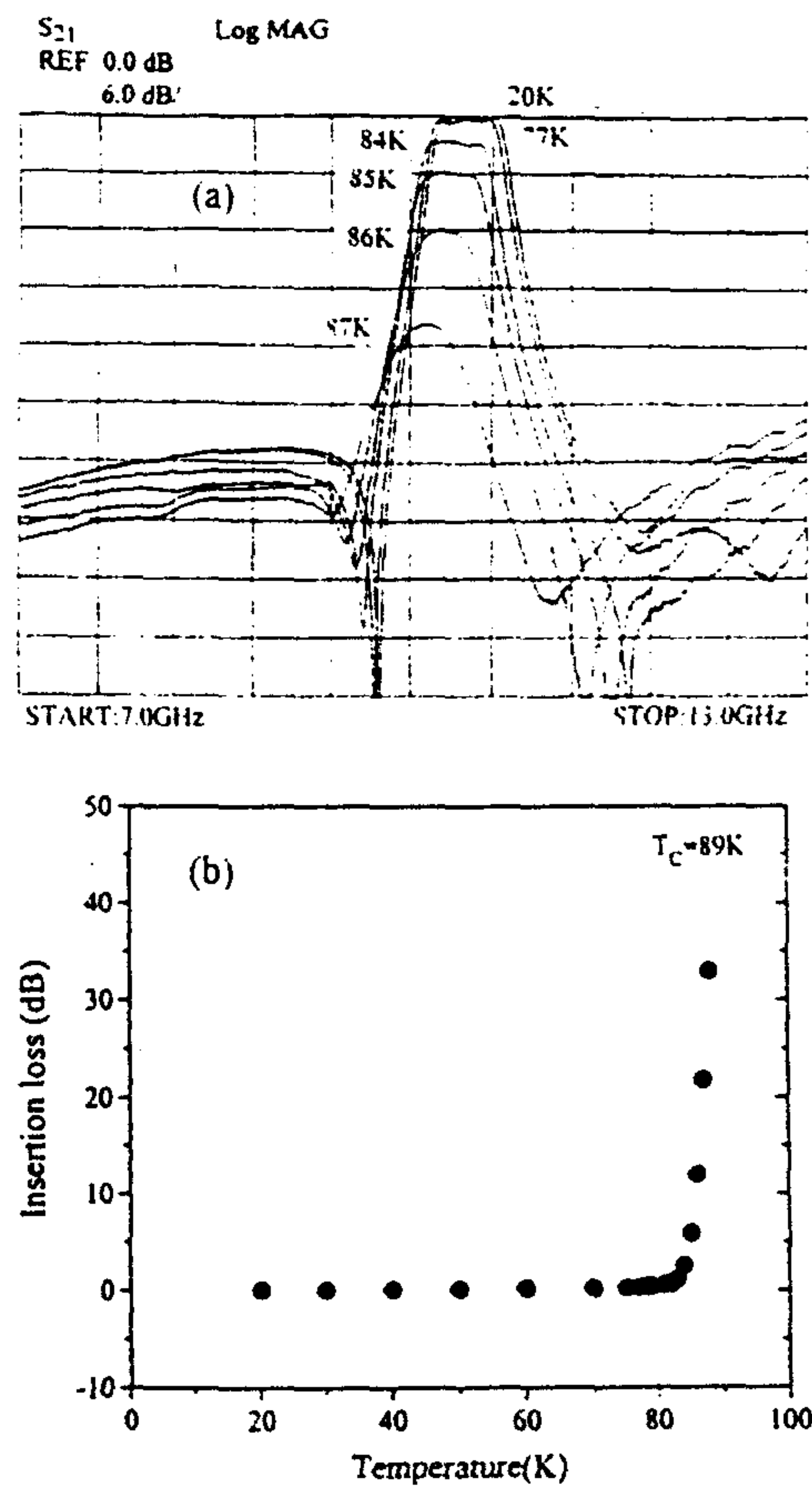


FIG. 3. (a) Typical temperature dependent transmission response (S_{21}). (b) Temperature dependence of insertion loss.

poles, it was expected that the filter was well aligned to the symmetry. The filter insertion loss was about 0.304 dB at 77 K.

Plots of transmission coefficients at various temperatures are presented in Fig. 3(a). The center frequency shift in the passband was observed. It was mainly due to the temperature dependence of the kinetic inductance (L_k) of the superconductor. The passband shape with increasing temperatures

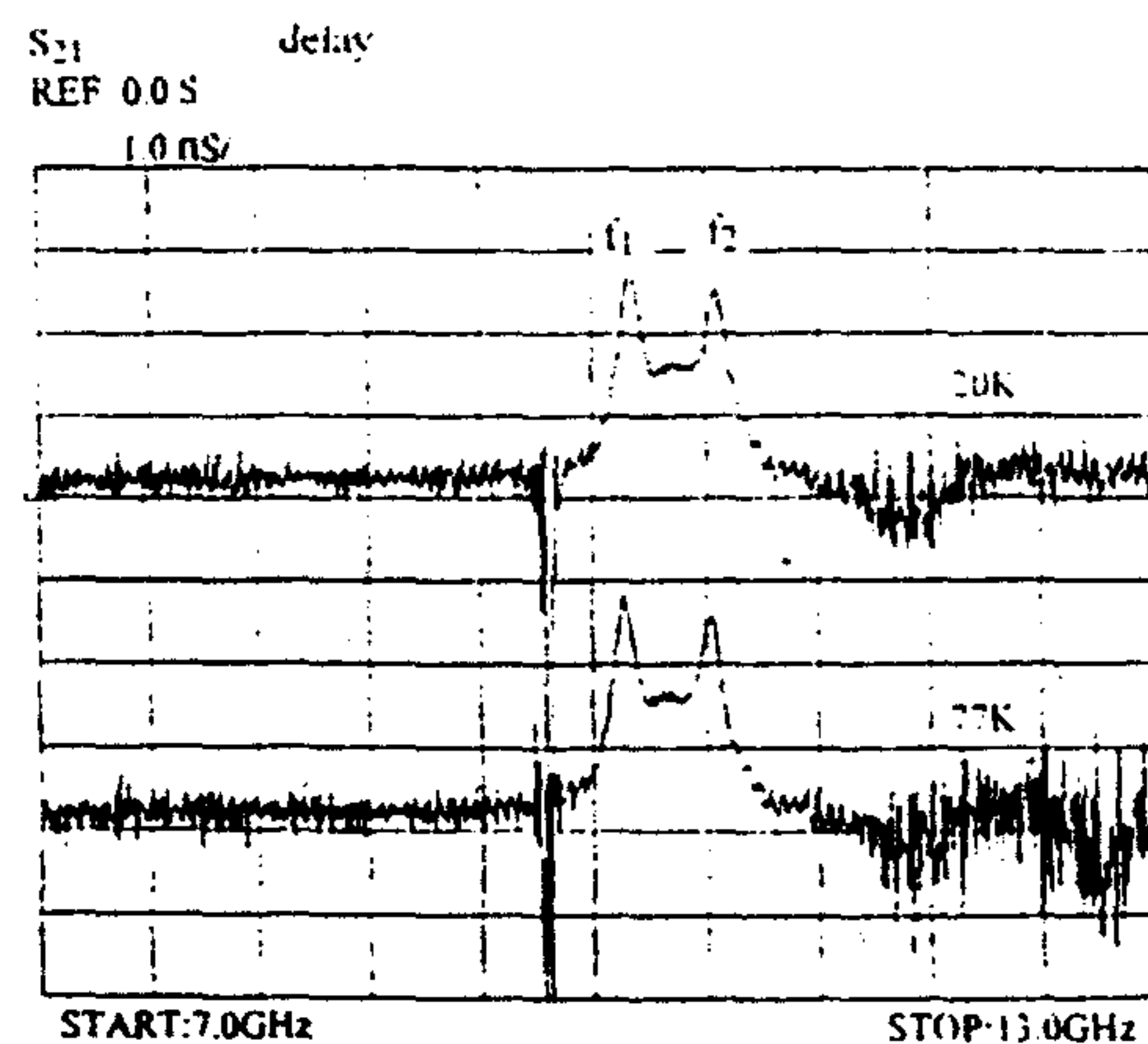


FIG. 4. Group delay curves as a function of frequency at 20 and 77 K.

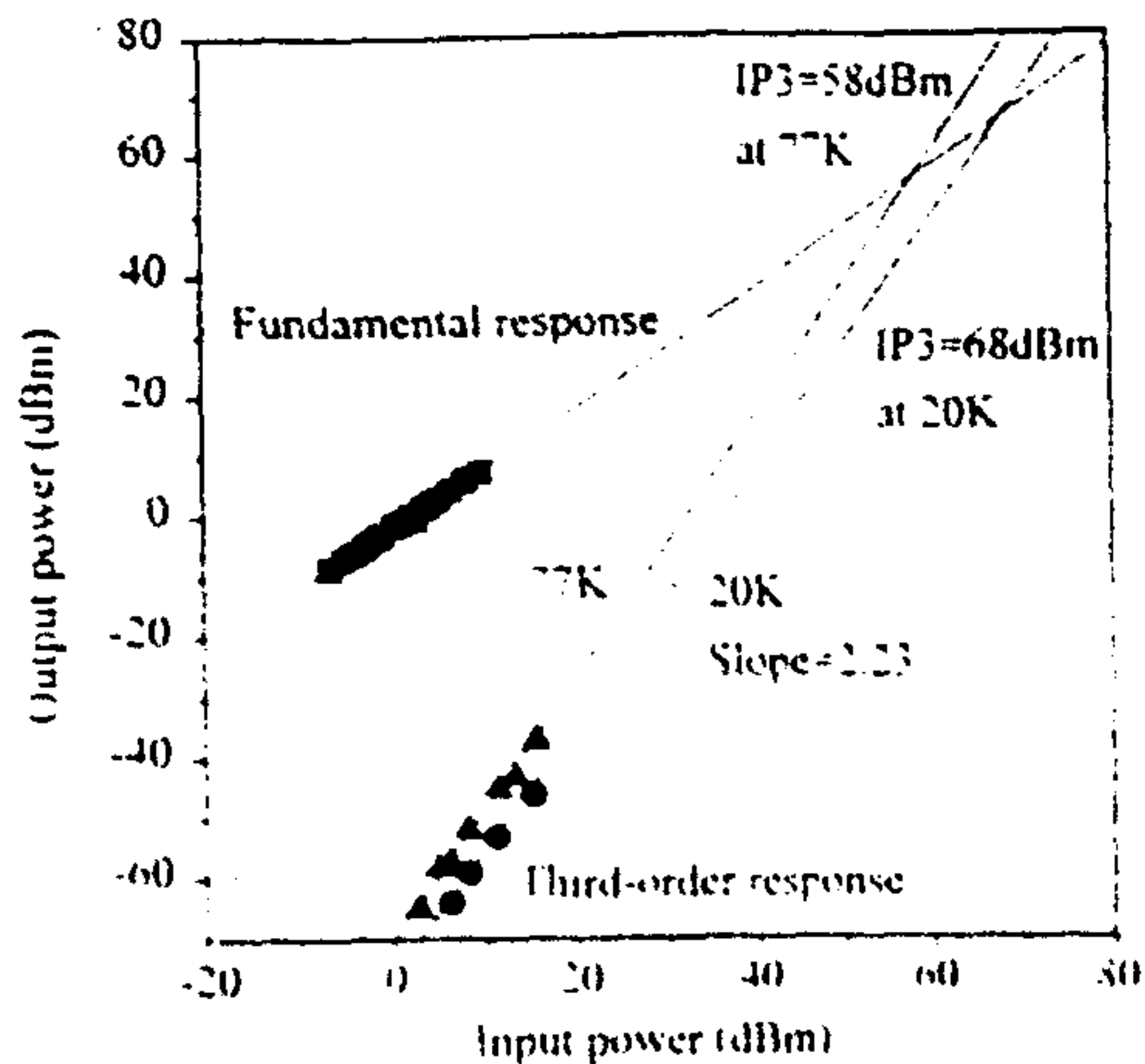


FIG. 5. Measurement of third-order intermodulation outputs as a function of input power.

was rounded out at the edges of the passband. Figure 3(b) shows the filter insertion loss for temperatures from 20 K up to the critical temperature ($T_c = 89$ K). With increasing temperatures, a large variation in the insertion loss was observed near the critical temperature, but the insertion loss increase from 20 to 80 K was less than 0.4 dB. At low temperature ranges below 80 K, the surface resistance (R_s) of our YBCO films might be due to residual surface resistance that was found temperature independent.

Figure 4 shows the results of group delay measurements at two different temperatures of 20 and 77 K. The group delay characteristic, which is defined as the derivative of the phase slope with respect to frequency, is the basis of stored energy in the passband.¹¹ From this figure, it is clear that significant increase in the stored energy was observed near two band edges of the filter. These behaviors in the group delay curve are similar to preliminary results reported by other institutions.¹¹ As the temperature increased, the peak frequencies were shifted to the low frequency side, which had the same reason of the center frequency shift with temperatures.

Figure 5 presents the measured results of intermodulation distortion products at various combinations of input power and temperatures. The measurement was done using two microwave frequencies (HP 83620A) and two microwave amplifiers (HP 8349B). Two microwave frequencies (f_1 and f_2) were chosen from the peak frequencies that were determined from the group delay measurements. The measured output power was linearly proportional to the input power. The third-order intercept was 58 dBm at 77 K and 68 dBm at 20 K. These new results are comparable with previously reported values obtained by other groups.¹¹

Figure 6 shows the transmission responses of a high- T_c superconducting filter and an equivalent gold filter at 77 K. The gold filter was made using essentially the same ge-

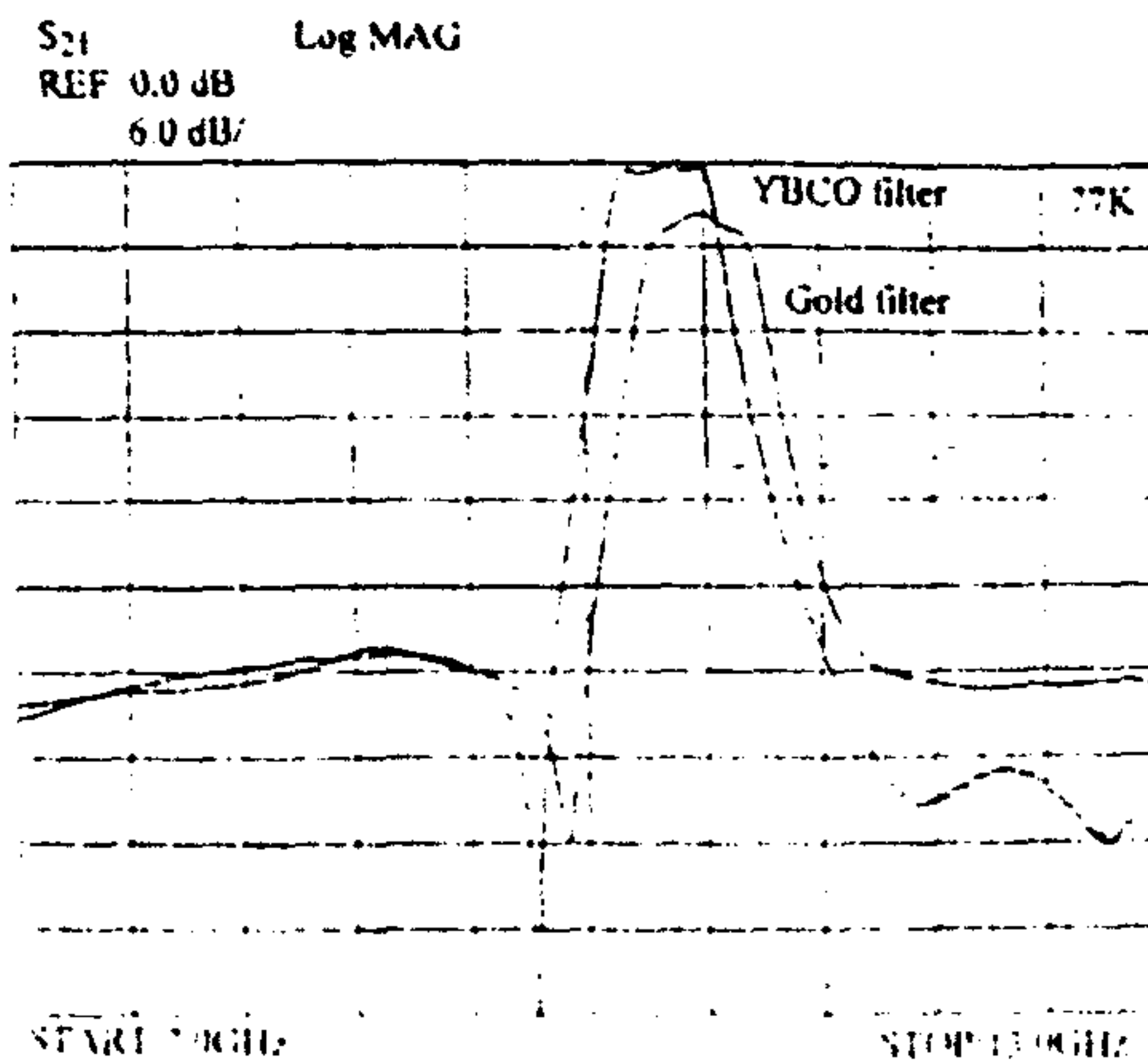


FIG. 6. Comparison of transmission responses of HTS and gold filters at 77 K.

ometry developed for the HTS filter, but with different film thickness of about 2 μm . The gold filter exhibited more than 3.5 dB in the insertion loss at 77 K. It confirms that large improvement in filter performance can be obtained with the use of high- T_c superconductors.

In conclusion, we have reported microwave performance of a high- T_c superconducting 3-pole microstrip bandpass filter. The filter was designed to have a fractional bandwidth of 5% at a center frequency of 10.5 GHz. The $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ thin films were deposited on separate LaAlO_3 substrates. The quarter-wavelength coupling section of the 3-resonator array was used in the bandpass filter design. The filter exhibited low insertion losses of 0.077 and 0.304 dB at 20 and 77 K, respectively. Intermodulation distortion measurements showed the third-order intercepts of 58 dBm at 77 K and 68 dBm at 20 K. The experimental results developed so far indicate that high- T_c superconductors can make efficient bandpass filters with low loss at liquid nitrogen temperatures.

¹A. A. Valenzuela and P. Russer, *Appl. Phys. Lett.* **55**, 1029 (1989).

²J. M. Pond, J. H. Classen, and W. L. Carter, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **35**, 1256 (1987).

³M. Nisenoff, J. C. Ritter, and S. A. Wolf, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **3**, 2885 (1993).

⁴J. S. Martens, V. M. Hietala, D. S. Ginley, C. P. Tigges, T. A. Plut, J. K. Truman, E. K. Track, K. H. Young, and R. T. Young, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **3**, 2824 (1993).

⁵Y. Nagai, K. Itoh, N. Suzuki, and O. Michikami, *Jpn. J. Appl. Phys.* **32**, 260 (1993).

⁶J. Everard and Y. Chiang, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **41**, 1568 (1993).

⁷G. C. Linag, D. Zhang, C. F. Shih, R. S. Withers, M. E. Johansson, B. C. Cole, M. Krivoruchko, D. E. Oates, and A. C. Anderson, *IEEE MTT-S Dig.* 1475 (1991).

⁸M. 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, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **39**, 1448 (1991).

⁹C. M. Jackson, R. Hu, K. P. Daly, J. H. Takemoto, J. F. Burch, and R. W. Somin, *J. Supercond.* **3**, 305 (1990).

¹⁰A. M. Portis and D. W. Cooke, *Mater. Sci. Forum* **31**, 315 (1993).

¹¹T. Yoshitake, S. Tahara, and S. Suzuki, *Appl. Phys. Lett.* **67**, 3963 (1995).



Pergamon

PII: S0964-1807(96)00014-2

Applied Superconductivity Vol. 2, No. 7/8, pp. 1-7, 1996
Copyright © 1996 Elsevier Science Ltd
Printed in Great Britain. All rights reserved
0964-1087/95 \$9.50 + 0.00

HIGH T_c SUPERCONDUCTING THREE-POLE PARALLEL- COUPLED BANDPASS FILTERS MADE FROM LASER ABLATED $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ THIN FILMS

JIN PYO HONG AND JEONG SOON LEE

New Materials Laboratory, Materials and Devices Research Center, Samsung Advanced Institute of
Technology, P.O. Box 111, Suwon, Korea

(Received 30 January 1996)

Abstract—We have investigated three-pole parallel-coupled bandpass filters with fractional bandwidths of about 6% and 3% at a center frequency of 10.5 GHz utilizing high T_c superconducting $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ thin films. The films were deposited on $LaAlO_3$ substrates by pulsed laser ablation. Microwave responses of the filters were measured as a function of temperature and input power. The performance of the 3% bandwidth filter exhibits low insertion losses of about 0.48 dB and 0.79 dB at 20 K and 77 K, respectively. The insertion loss in the 6% bandwidth filter was 0.96 dB at 77 K. Both filters showed return losses better than 15 dB. High T_c superconducting bandpass filters showed good reproducibility. They were also compared with equivalent gold filters which showed insertion losses of more than 8 dB at 77 K.

1. INTRODUCTION

High T_c superconducting thin films have demonstrated acceptable microwave properties, particularly, extremely low surface resistance (R_s). The surface resistance of high T_c superconductors has been found to be two orders of magnitude lower than that of conventional [1 - 2]. In addition, promising developments in recent high T_c superconducting epitaxial films have made it possible to achieve attractive high T_c superconducting devices. Microwave technologies in future satellite and wireless communication systems require better performance and higher compactness in device properties. There has been a great deal of effort focusing on the development of high T_c superconducting microwave devices, such as resonators, filters, channelizers and delay lines [3 - 7].

At present, multi-channelling communication networks demand filters with narrow bandwidths and sharp skirts in order to allow available RF frequency spectrums to be partitioned into small frequency bands. Therefore, high T_c superconducting filters become of primary importance because the use of high T_c superconductors is expected to achieve the reduction of the interfering signals and the minimization of device size and weight. Up to now, a lot of high T_c superconducting filters were constructed and tested using various transmission structures. It is expected that high T_c superconducting filters will replace present waveguide and dielectric resonator filters having a large size [8-14].

In this work, we report on design, fabrication and experimental results of high T_c superconducting parallel-coupled bandpass filters made from $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO) films on $LaAlO_3$ substrates. These films were deposited by utilizing a pulsed laser ablation system. For microstrip-line structures, two high T_c superconducting thin films were fabricated on separate $LaAlO_3$ substrates under identical growth conditions because high T_c superconducting thin films deposited on both sides of the substrate were not available. Two three-pole parallel-coupled filters with fractional bandwidths of about 6% and 3% were constructed by adjusting the separation gap (s) of each parallel-coupled resonator [10]. Microwave properties of these superconducting filters were tested as a function of temperature and input power. They were compared to normal-metal counterparts with same structures, but slight differences in film thickness.

2. EXPERIMENTAL

High T_c superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) films were deposited *in situ* on LaAlO_3 substrates utilizing a pulsed laser ablation system. A KrF excimer laser with a 248 nm wavelength (Lambda Physik, LPX 305iF) was used at a laser pulse rate of 5 Hz and an energy density of about 15 J/cm^2 . During the deposition, the LaAlO_3 substrate was heated and maintained to 780°C in an atmosphere of 100 mT of oxygen. A stoichiometric $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ target was rotated around a perpendicular axis at 5 Hz. After the deposition, the substrate was immediately cooled to 550°C and then annealed for 1 h in 20 T of pure oxygen pressure. The distance between the substrate and the YBCO target was maintained at 90 mm. The YBCO films measured by standard four probe had zero resistance at 89 K and gave transition temperature width of less than 1 K. Critical current density which was taken with electric field criterion of $1 \mu\text{V/cm}$ was $5 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ at 77 K. For a microstrip stack structure, two YBCO thin films have been fabricated on separate LaAlO_3 substrates under identical growth conditions because YBCO epitaxial films deposited on both sides of the substrate were not available. Both YBCO films had about 5000 \AA thickness. One of the films was used for circuit patterning of the filter. Patterning was accomplished by a standard photolithographic method. The film was etched by an argon ion-milling system. After the circuit patterning, DC-sputtered gold film was deposited on the top surface of 50Ω and output feed lines for electrical contact to the filter. The other film was used as the ground plane that was directly contacted with the package. Finally, the filter was annealed in flowing oxygen at 550°C for 1 hr to improve adhesion and to ensure low contact resistance between gold films and YBCO surfaces. The feeding pins of Wiltron K-connectors were used for the coupling between some of input and

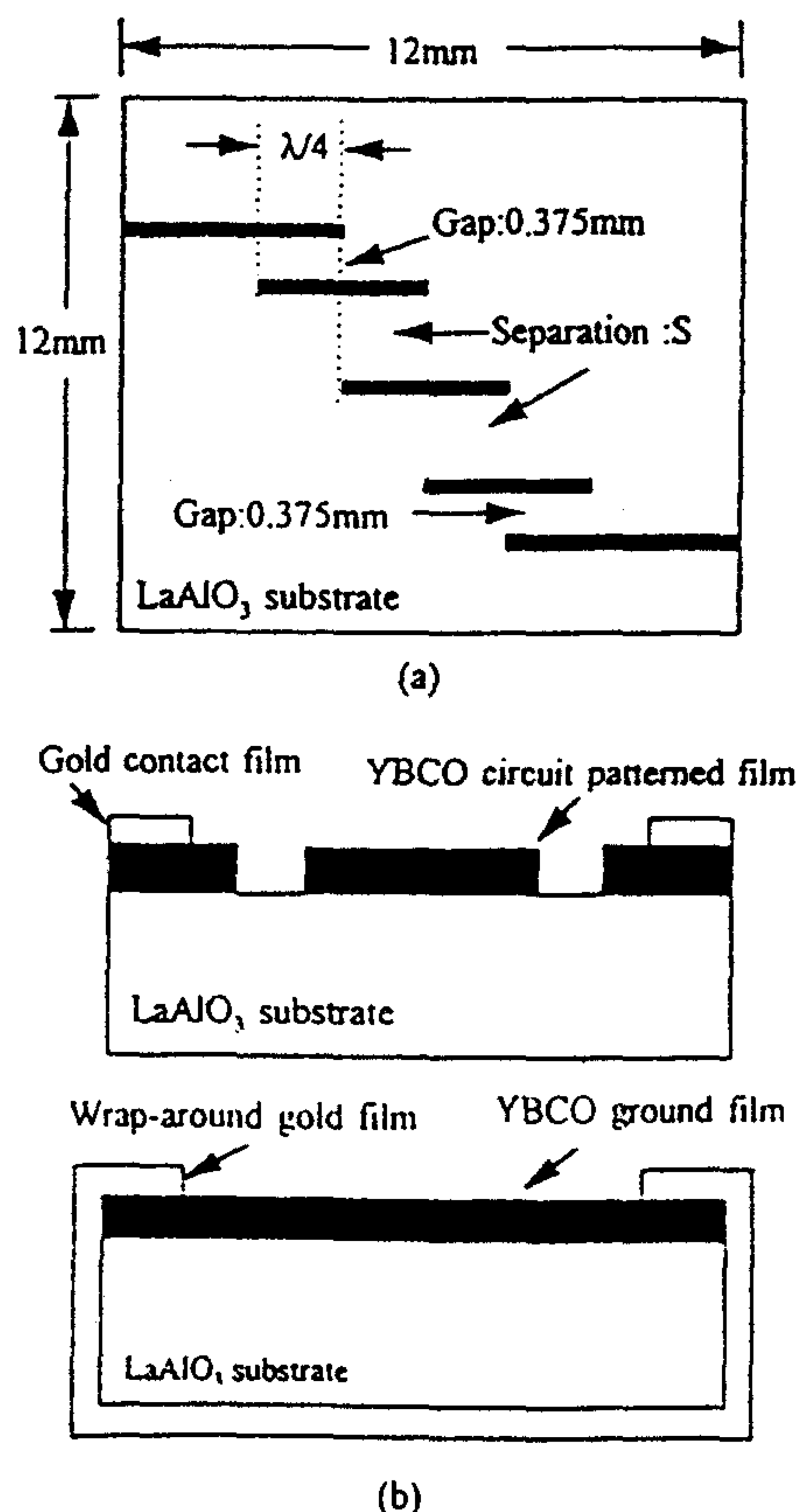


Fig. 1. (a) Typical geometry of a high T_c superconducting three-pole parallel-coupled bandpass filter, (b) microstrip structures using two separate substrates. The coupling gaps (S) of fractional bandwidths of about 6% and 3% was 1.125 mm and 1.5 mm, respectively.

output lines and K-cables. All the packages were directly mounted to the cold stage of a closed-cycle cryogenic system through a piece of thin indium foil.

Conventional parallel-coupled structures that nominally consist of quarter-wavelength coupling-sections were used to design high T_c superconducting bandpass filters. Microstrip-line structure in filter design was used due to the relative simplicity of packaging and fabrication. The filter under discussion consisted of three parallel array resonators that were assembled into four quarter-wavelength coupling sections. As the coupling gap (S) between the resonators is closely spaced, the more coupling can be introduced with respect to its neighbors. Two filters were designed to achieve fractional bandwidths of about 6% and 3% by adjusting the coupling gap (S) of each parallel-coupled resonator section. The coupling gaps of fractional bandwidths of about 6% and 3% were 1.125 mm and 1.5 mm respectively. For both filters, the spacing between the first and last resonator was kept constant at 0.375 mm. Figure 1(a) shows typical geometries of high T_c superconducting microstrip three-pole parallel-coupled filters. Design parameters of high T_c superconducting three-pole filters were obtained and simulated by a commercially available computer-aided design (CAD) program called Libra. After the computation, theoretical response of the filter that includes the effect of the test fixture (package) was then analyzed using a structure simulator called HFSS (HP85180A High-Frequency Structure Simulator). In the simulation, high T_c superconductors have been specified as good conductors with extremely high conductivity. The LaAlO_3 substrate was approximated to have a low dielectric loss ($\tan\delta = 1 \times 10^{-4}$) and a relative dielectric constant of 25. All of the coupled lines were set at 50 Ω . The feed lines with the same line widths were connected to the circuit pattern of the filter for impedance matching to the 50 Ω resonator. However, no attempt in the design process was made to try to compensate for the effect of tolerances in parameters. The simulated results were accurate except for about 0.2% error in the center frequency, when compared the experimental results. Figure 1(b) shows typical microstrip construction using two separate superconducting thin films, where one is for the circuit conductor and the other is for the ground plane. The dimension of the LaAlO_3 substrate was 12 mm \times 12 mm \times 0.5 mm.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Typical transmission (S_{21}) and reflection (S_{11}) coefficients of high T_c superconducting three-pole parallel-coupled bandpass filters were measured using a Hewlett Packard 8510C network analyzer. Figure 2 shows frequency response of transmission (S_{21}) and reflection (S_{22}) of the YBCO filter with a bandwidth of about 3% at 20 K. The input power applied to the filter was kept at 10 dBm. The low insertion loss of 0.48 dB was obtained at 20 K. It was very flat across the passband, which indicated high quality superconducting resonators. The frequency response of the filter exhibited out-of band rejection of about 36 dB. Transmission (S_{21}) and reflection (S_{11}) of the filter with a bandwidth of about 6% is shown in Fig. 3. Similar frequency response was also observed. The filter exhibited low insertion losses of about 0.65 dB and 0.96 dB at 20 K and 77 K, respectively. It showed symmetric response in return loss measurements, which indicates that resonant frequencies of the three resonators are all synchronous. The insertion loss of the 6% bandwidth filter was slightly higher than that of the 3% bandwidth filter at the same temperature.

The center frequency shift in the passband from 77 K up to critical temperatures ($T_c = 89$ K) is shown in Fig. 4. As the temperature was increased, the considerable shift in the center frequency was observed for both filters. It was mainly due to the temperature dependence of kinetic inductance (L_k) of the superconductor. The center frequency shift in the 3% bandwidth filter is shown in Fig. 4(a). Similar behavior for the 6% bandwidth filter is shown in Fig. 4(b). The passband shape of both filters was rounded out at the edges of the passband as the temperature was increased.

Figure 5 shows temperature dependence of insertion losses for both filters. With increasing temperature, the insertion loss increased steeply near critical temperature from 83 K to 89 K. However, the insertion loss was relatively temperature independent at all temperatures below

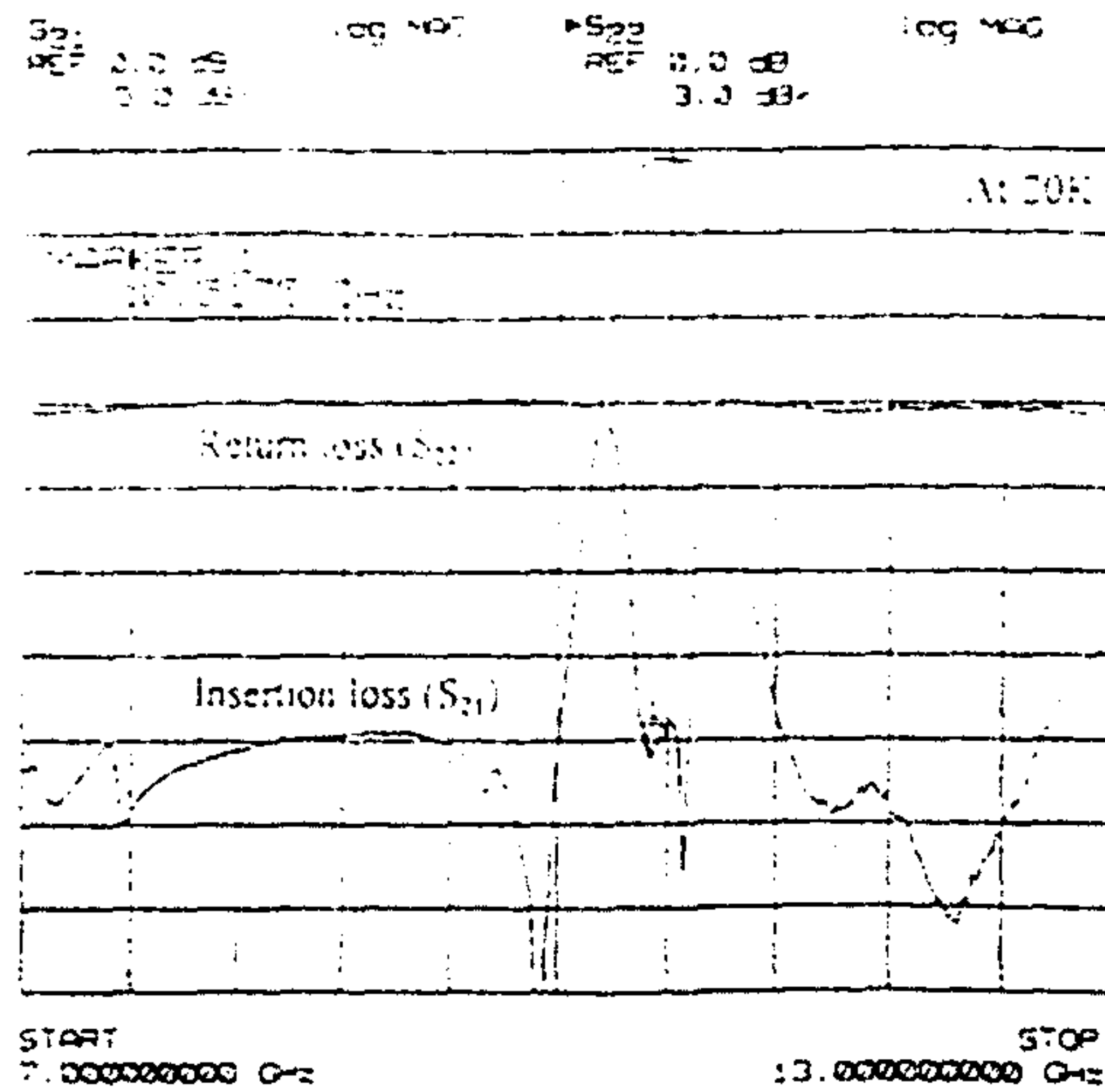


Fig. 2. Measured frequency response of insertion loss (S_{21}) and return loss of (S_{22}) of the three-pole parallel-coupled filter with a bandwidth of 3% at 20 K.

75 K. These characteristics in both filters seem to result from almost constant behavior of the surface resistance at low temperatures below 75 K.

Figure 6 shows insertion loss as a function of input power for both filters. The insertion loss was measured by varying input power over 40 dB dynamic ranges from -20 dBm to 20 dBm. The relative change in the insertion loss was less than 0.2 dB. Any significant degradation in filter performance was not observed as the input power was increased. High T_c superconducting filters were compared with equivalent gold filters with the same structures, but different film thickness of about 2μ . The insertion loss of the superconducting filter was about 8 dB lower than that of the conventional gold filter at the same temperature. High T_c superconductors exhibit good results in the insertion loss. Presently, high T_c superconducting filters with much narrow bandwidths are under construction.

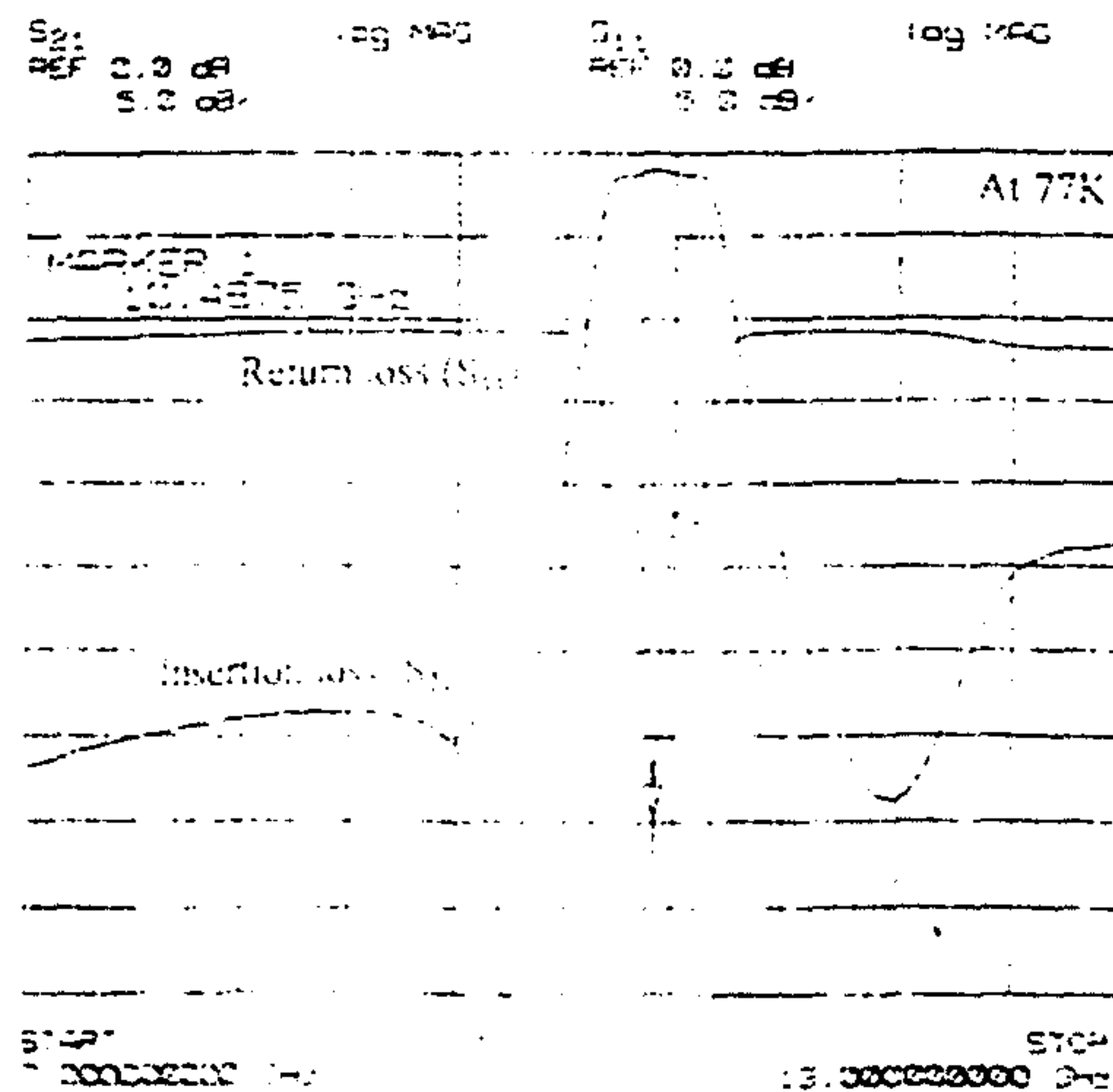
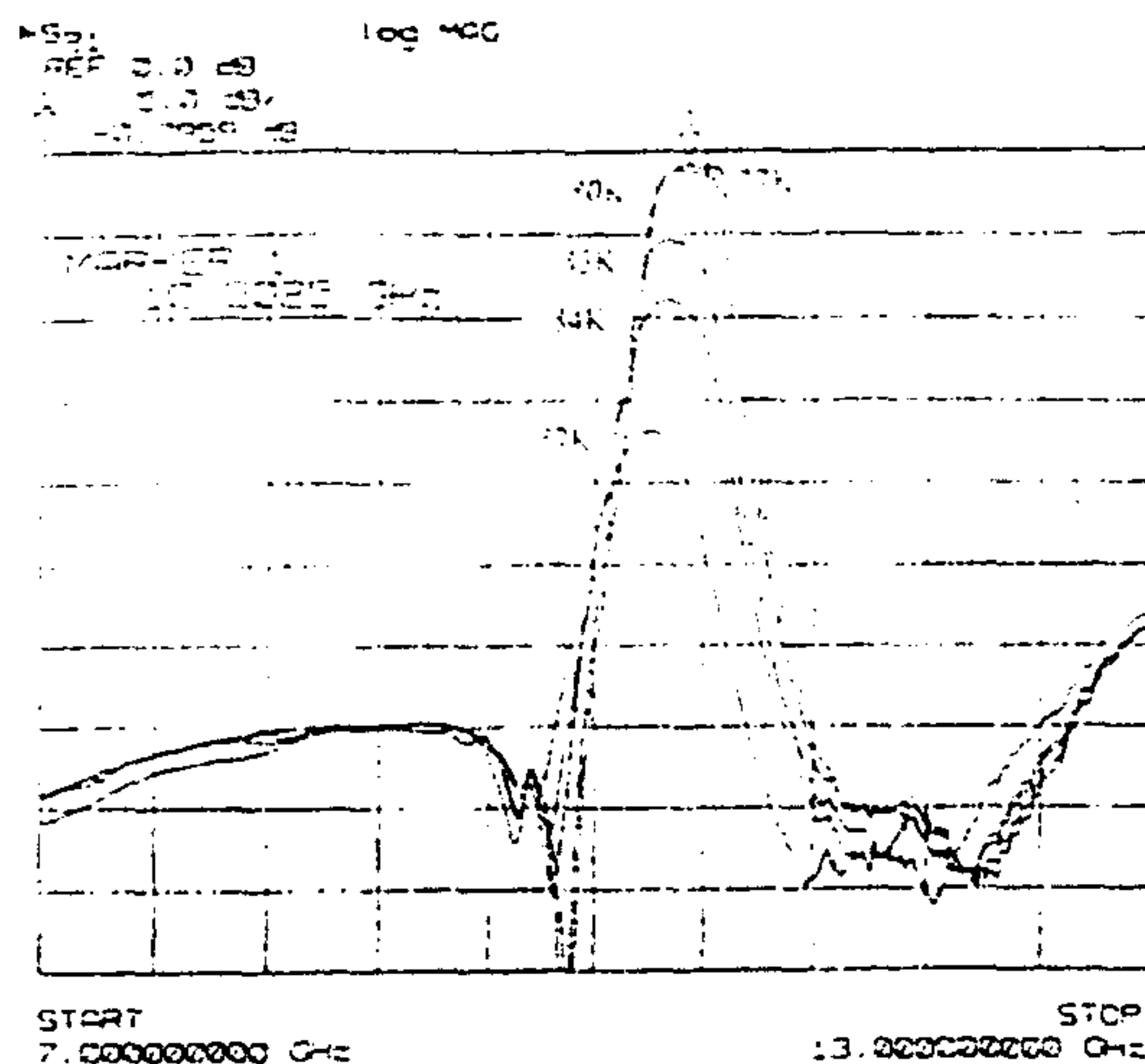
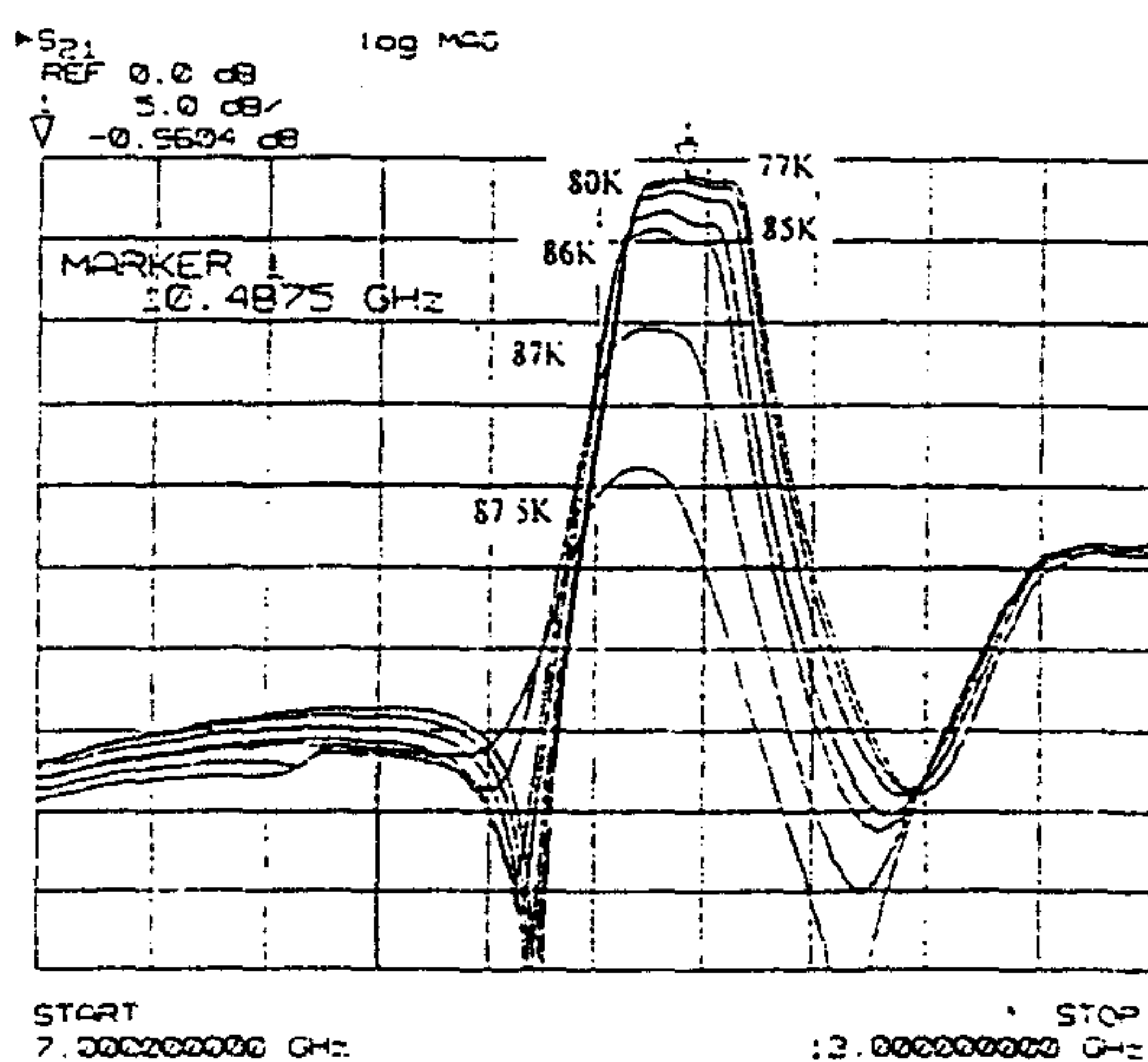


Fig. 3. Measured frequency response of insertion loss (S_{21}) and return loss (S_{11}), of the three-pole parallel-coupled filter with a bandwidth of 6% at 77 K.



(a)



(b)

Fig. 4. Microwave performance of both filters from 77 K up to critical transition temperature ($T_c = 89$ K): (a) for the 3% bandwidth filter, (b) for the 6% bandwidth filter.

CONCLUSIONS

We have measured microwave performance of high T_c superconducting three-pole microstrip bandpass filters. These filters were designed to have fractional bandwidths of about 6% and 3% at a center frequency of 10.5 GHz. High T_c superconducting $\text{YBaCu}_3\text{O}_{7-x}$ thin films were deposited on separate LaAlO_3 substrates by using a 248 nm KrF laser ablation system. The quarter-wavelength coupling section of a three resonator array was used in the bandpass filter design. The 3% bandwidth filter exhibited the lowest insertion losses of 0.79 dB and 0.48 dB at 77 K and 20 K, respectively. Experimental results developed so far show the realization of low loss bandpass filters with narrow bandwidths. However, we have to address an important issue, such as double-sided deposition of high T_c superconducting thin films for more potential applications in microwave superconducting devices. We expect that the use of high T_c

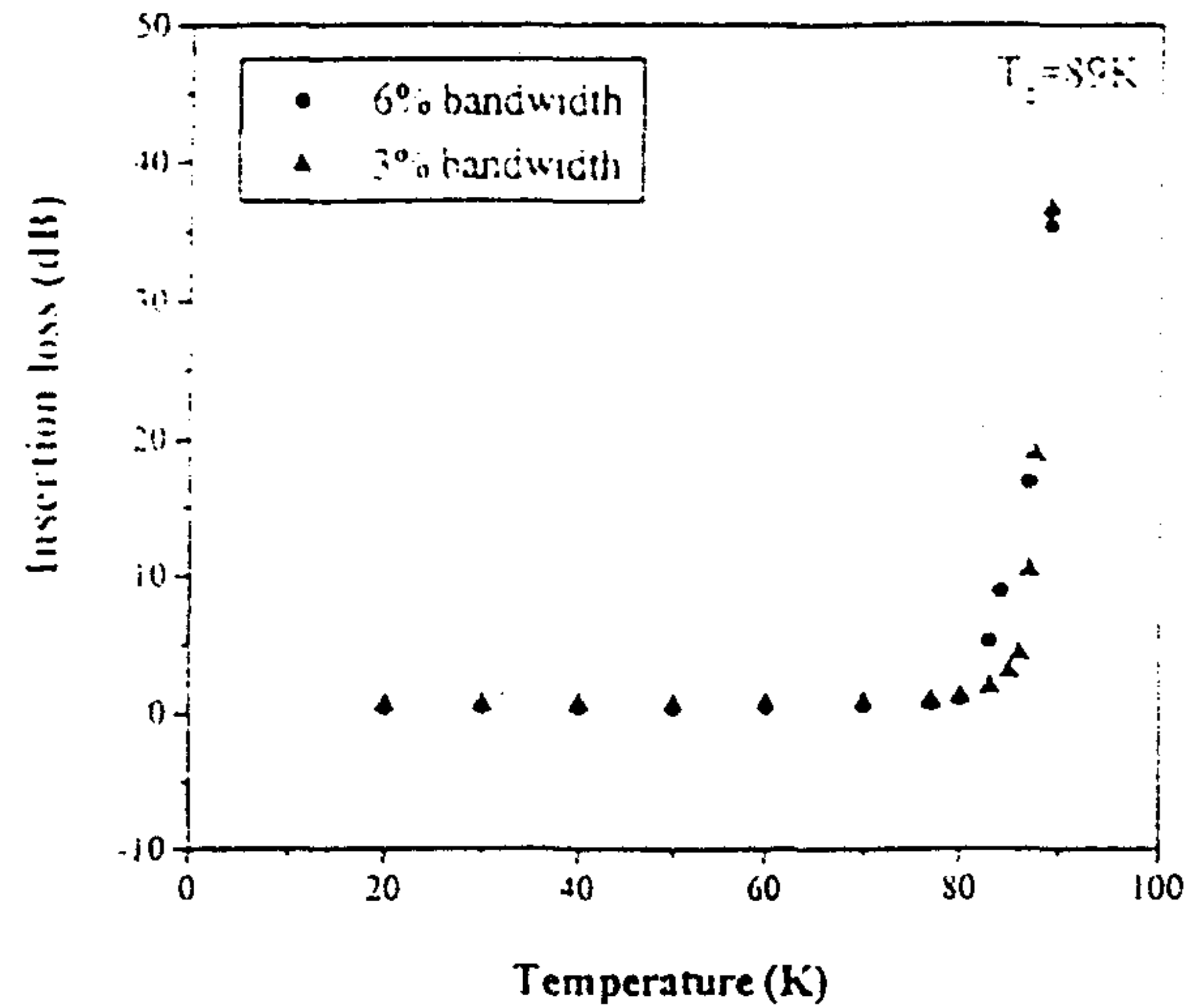


Fig. 5. Temperature dependence of insertion loss (S_{21}) for the 3% bandwidth filter (●) and for the 6% bandwidth filter (▲).

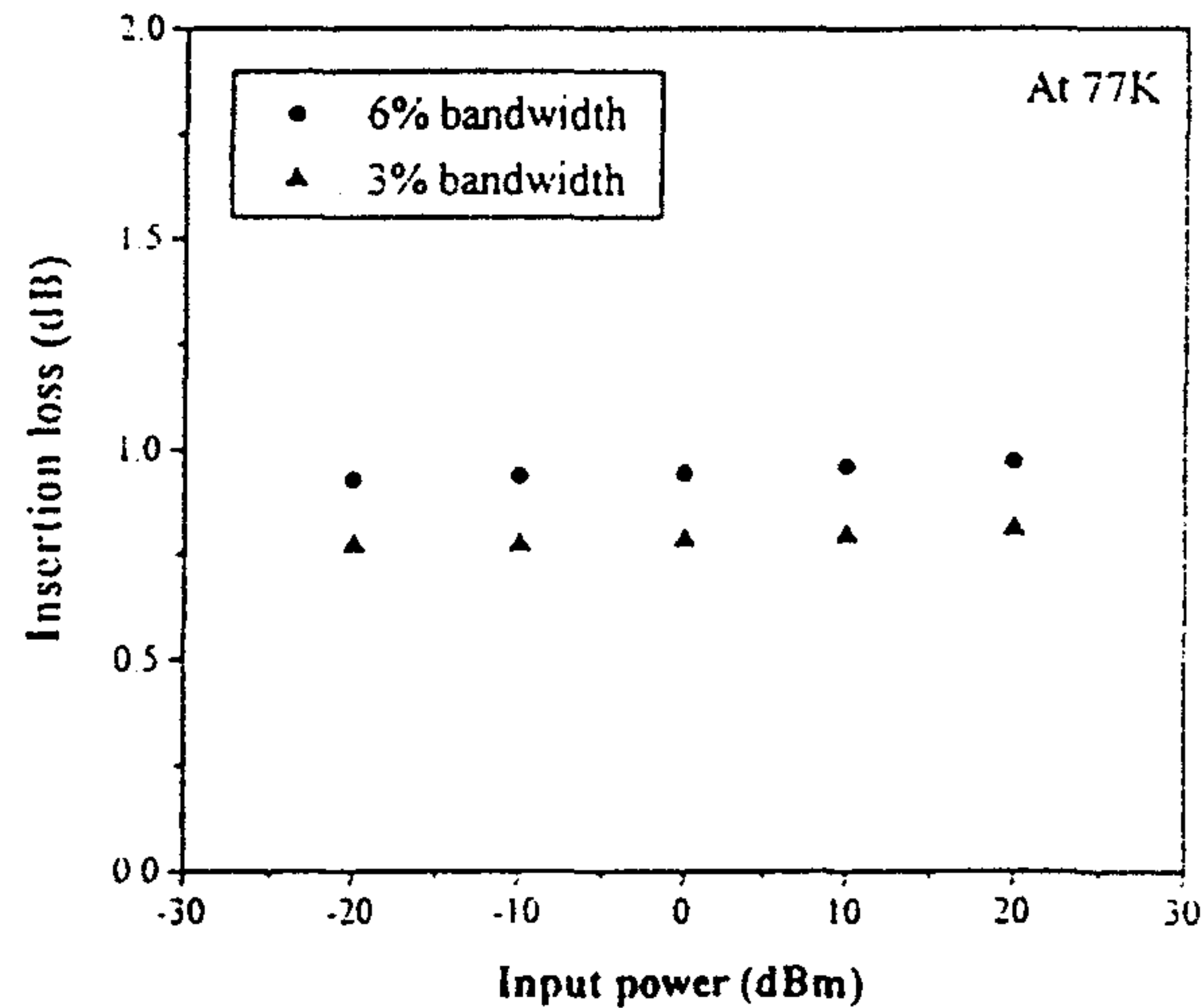


Fig. 6. Input power dependence of insertion loss (S_{21}) for the 3% bandwidth filter (●) and for the 6% bandwidth filter (▲) measured at 77 K.

superconducting thin films on the microwave components and subsystems will promise significant impact on near future communication systems.

Acknowledgements The research has been supported in part by Samsung Electronics Inc. and in part by Korea Science and Engineering Foundations.

REFERENCES

- 1 A. A. Valenzuela and P. Russer, *Appl. Phys. Lett.* 55, 1029 (1989).
- 2 J. M. Pond, J. H. Classen and W. L. Carter, *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.* 35, 1256 (1987).
- 3 M. Nisenoff, J. C. Ritter and S. A. Wolf, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 3, 2885 (1993).
- 4 J. S. Martens, V. M. Hietala, D. S. Ginley, C. P. Tigges, T. A. Plut, J. K. Truman, E. K. Track, K. H. Young and R. T. Young, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 3, 2824 (1993).
- 5 Y. Nagai, D. F. Hebert, T. Van Duzer and O. Michikami, *Appl. Phys. Lett.* 63, 830 (1993).
- 6 Y. Nagai, K. Itoh, N. Suzuki and O. Michikami, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 32, 260 (1993).
- 7 J. Everard and Y. Chiang, *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.* 41, 1568 (1993).

8. G. C. Linag, D. Zhang, C. F. Shih, R. S. Withers, M. E. Johansson, B. C. Cole, M. Krivoruchko, D. E. Oates and A. C. Anderson, *1994 IEEE MTT-S Digest* 39, 1475 (1991).
9. M. A. Janocko, C. Moskowitz, J. Talvacchio, J. F. Billing, R. Brown, D. C. Buck, C. K. Jones, B. R. McAvoy, J. R. Wagner and D. H. Watt, *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.* 39, 1448 (1991).
10. C. M. Jackson, R. Hu, K. P. Daly, J. H. Takemoto, J. F. Burch and R. W. Somin, *J. Supercond.* 3, 305 (1990).
11. E. Beiohoubek, E. Denlinger, D. Kalokitis, A. Fathy, R. Paglione, V. Pendrik, J. Brown, A. Pinque, X. D. Wu, S. M. Green, S. Mathews, R. Edwards, M. Mathur and T. Venkatesan, *J. Supercond.* 5, 423 (1992).
12. J. Eyraud and Y. Chuang, *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.* 41, 1568 (1993).
13. S. B. Coon, *in: Trans. on Microwave Theory and Tech.* 3, 223 (1958).
14. G. L. Matthaei, L. Young and E. M. T. Jones, Artech House, Dedham, MA, (1980).



HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTING MICROSTRIP LINE RESONATORS FOR MEASURING SURFACE RESISTANCE

JIN PYO HONG

New Materials Laboratory, Materials and Devices Research Center, Samsung Advanced Institute of
Technology, P.O. Box 111, Suwon, Korea

(Received 11 October 1995; in revised form 3 January 1996)

Abstract—Microstrip line resonators with transmission-line structures have been investigated to characterize microwave properties of rf sputtered $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ thin film deposited on LaAlO_3 substrates. Microstrip line resonators were designed to have fundamental resonant frequencies at 0.45 GHz and 7 GHz for meander line and straight line type resonators, respectively. With these resonators, the surface resistance of high T_c superconducting films was measured and discussed as a function of temperature, input power and frequency. The low surface resistances of about $300 \mu\Omega$ and $700 \mu\Omega$ were observed at 0.458 GHz and 7.015 GHz, respectively. Experimental results of high T_c superconducting resonators show pronounced improvement in unloaded quality factors Q_u , compared to those of gold resonators. The resonant frequency shift with temperature was also verified.

NOMENCLATURE

R_s	surface resistance ($\mu\Omega$)
f	frequency (GHz)
T	temperature (K)
L_m	magnetic inductance per unit length (H/m)
L_k	kinetic inductance per unit length (H/m)
t	thickness of YBCO film (\AA)
h	height of substrate (mm)
λ_0	magnetic penetration depth (\AA)
ϵ_{eff}	effective dielectric constant
Q_u	unloaded quality factor
Q_L	loaded quality factor
Q_d	quality factor for dielectric loss
Q_r	quality factor for radiation loss
rf	radio frequency
S_{21}	transmission coefficient

INTRODUCTION

A new class of microwave electronics is currently being developed for potential applications of high T_c superconducting thin films to microwave integrated devices and systems, such as space-based multi-channelling communication and cellular systems. Until now, various superconducting microwave devices have been successfully developed and demonstrated by several groups [1-4]. High T_c superconducting thin films are predicted to have low loss and low dispersion that can result in a much better performance and more compact devices than those based on conventional metal technologies. Therefore, extensive effort is being made to characterize microwave properties of high T_c superconducting films in which the surface resistance (R_s) is an important parameter in microwave device performance at any frequency range [5-7]. Planar resonators based on transmission line structures have been often used for simple but direct measurement of the surface resistance of high T_c superconducting materials. This method

allows realistic test of patterned high T_c superconducting films for practical applications. Among existing resonator structures, microstrip meander and straight-line resonators have been selected for study because of their simplicity. The resonators constructed in this work have resonant peaks at integer numbers of half wavelength.

In the present work, we present rf characteristics (in particular surface resistance R_s) of high T_c superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) thin film deposited on LaAlO_3 substrates. The measurements of the surface resistance are discussed using microstrip line resonator structures that are designed to have fundamental resonant frequencies at 0.45 GHz and 7 GHz. The surface resistance of our YBCO films is reported as a function of temperature and input power. Furthermore, the frequency dependence of R_s is investigated.

EXPERIMENTAL

High-quality $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) thin films were fabricated on LaAlO_3 substrates with large relative dielectric constant of 26 using an off-axis rf sputtering system. During the deposition, the substrate was heated and maintained to around 740–800°C in an atmosphere of flowing oxygen. The total pressure and rf power were 10 mTorr and 70 W, respectively. After the deposition, the substrate was immediately cooled to 500°C and then annealed for one hour in pure oxygen. The film thickness of about 5000 Å was obtained by considering the internal damping of the microwave fields associated with the high T_c superconducting penetration depth (λ_0). Two YBCO films were deposited on separate LaAlO_3 substrates under identical growth conditions. One of the films was used as the circuit line of the resonator. The circuit line was patterned by standard photolithographic techniques with either a wet chemical etch process or an ion-milling system, and the other was used as the ground plane which was gold-sputtered on the back and sides of the LaAlO_3 substrate for an excellent contact to the test package. In addition, 4000 Å thick gold films were sputtered on the top surfaces of the patterned circuit for good electrical contact between center pins of connectors and microstrip-lines. After the gold deposition, the resonators were annealed at 500°C for 1 h in a flowing oxygen atmosphere to promote good contact resistance between the YBCO films and the gold films. The feeding pins of Wiltron K-connectors suitable for operation up to 40 GHz were used for the direct coupling between some of the input and output lines and cables. Typical test package was made by an oxygen free high-conductivity (OFHC) copper. The whole resonators was directly mounted on the cold stage of a helium-gas closed-cycle refrigerator. The stage was enclosed inside a vacuum chamber with feed throughs. Temperature measurements were taken with a Lakeshore model 330 controller from 20 K to room temperatures.

Figure 1 shows typical layouts of linear end-coupled microstrip line resonators fabricated using the YBCO thin films. For each resonator the size of the LaAlO_3 substrate was 0.5 mm × 10 mm × 10 mm. The resonator's parameters were obtained by using a conventional transmission analysis program called Linecalc. The equivalent circuit responses were calculated with the aid of an EEsof microwave analysis program. These programs were also used to determine and analyze the coupling gap sizes to the external circuits. Schematic cross-sectional view of the microstrip line resonator is shown in Fig. 1a, where t is the thickness of the YBCO film and h is the height of the substrate. Figure 1b shows the meander line resonator which was 150 μm wide and 84600 μm long with a fundamental resonance of about 0.45 GHz. The coupling gap size was chosen to be 100 μm. Typical geometry of the 7 GHz line resonator is shown in Fig. 1c. It had a 160 μm width and 5450 μm length with a coupling gap of 300 μm.

RESULTS AND DISCUSSION

Frequency response measurements of high T_c superconducting resonators were carried out using a Hewlett Packard 8510C network analyzer with high frequency resolution. Figure 2 shows typical transmission coefficients (S_{21}) of the two types of resonators. The input power was set at 10 dBm. The fundamental resonant peak of the meander line resonator is shown in Fig. 2a. The resonator had a fundamental resonance of 458 MHz. Twelve resonant modes of the resonator were

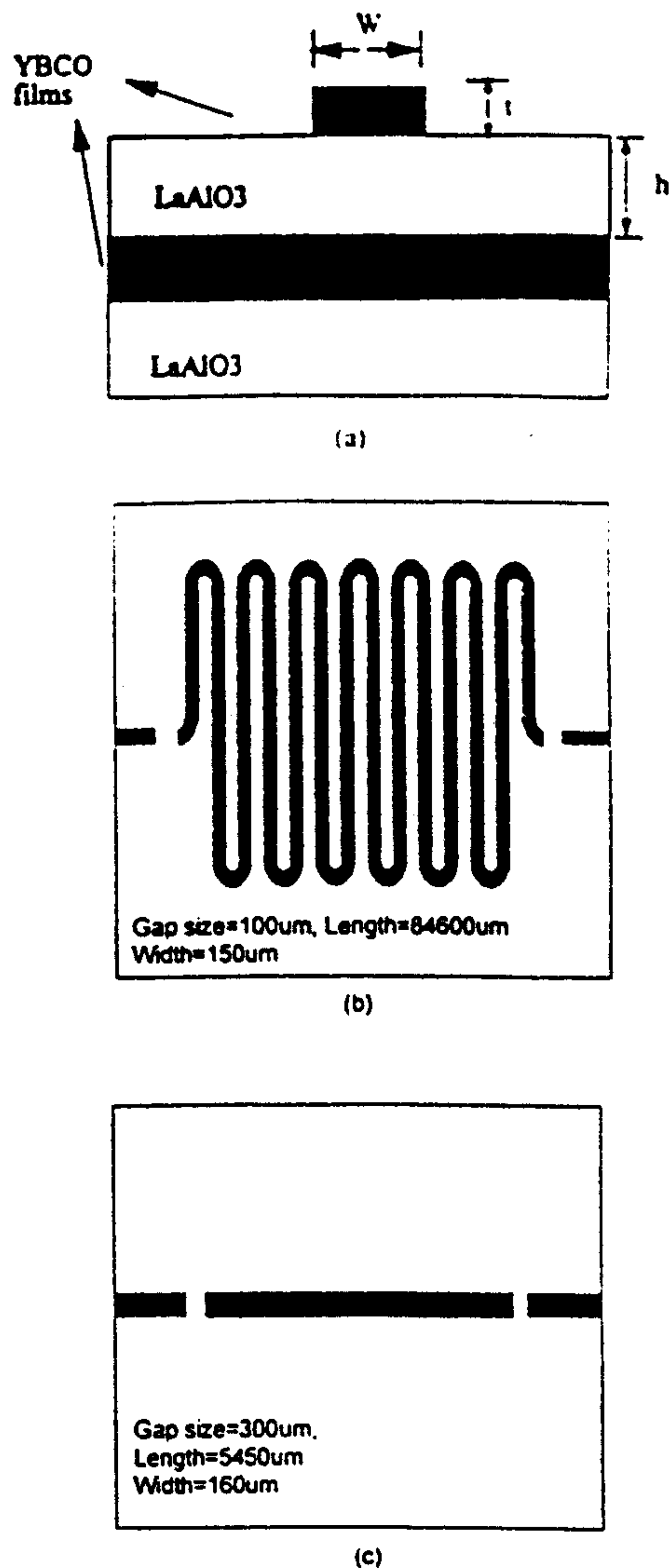


Fig. 1. Typical configurations of microstrip line resonators made from high T_c superconducting thin films: (a) cross-sectional view of microstrip line resonator, (b) 0.45 GHz meander line resonator, and (c) 7 GHz line resonator.

observed in the frequency range between 0.3 GHz and 4 GHz. From the ratios in adjacent resonant peaks, the meander-line resonator was predicted to be weakly-coupled through a capacitive coupling gap to an external circuit. Figure 2b shows typical transmission data of the straight line resonator. It exhibited fundamental resonance at 7.015 GHz.

Figure 3 shows typical shifts in the resonant frequency with temperature for the two resonators. The first 5 resonant modes of the meander line resonator were measured for determination of temperature dependence of resonant frequencies. The shift in the resonant frequencies of 7 GHz line resonator can be observed in Fig. 3. The associated frequency shift with increasing temperature results from both of the kinetic (L_k) and internal magnetic inductance (L_m) of the resonator. It is well-recognized that inductances in the resonator are attributed to two components, one related to the kinetic energy of superconducting pair carriers and the other to the effective dielectric constant (ϵ_{eff}) of the substrate.

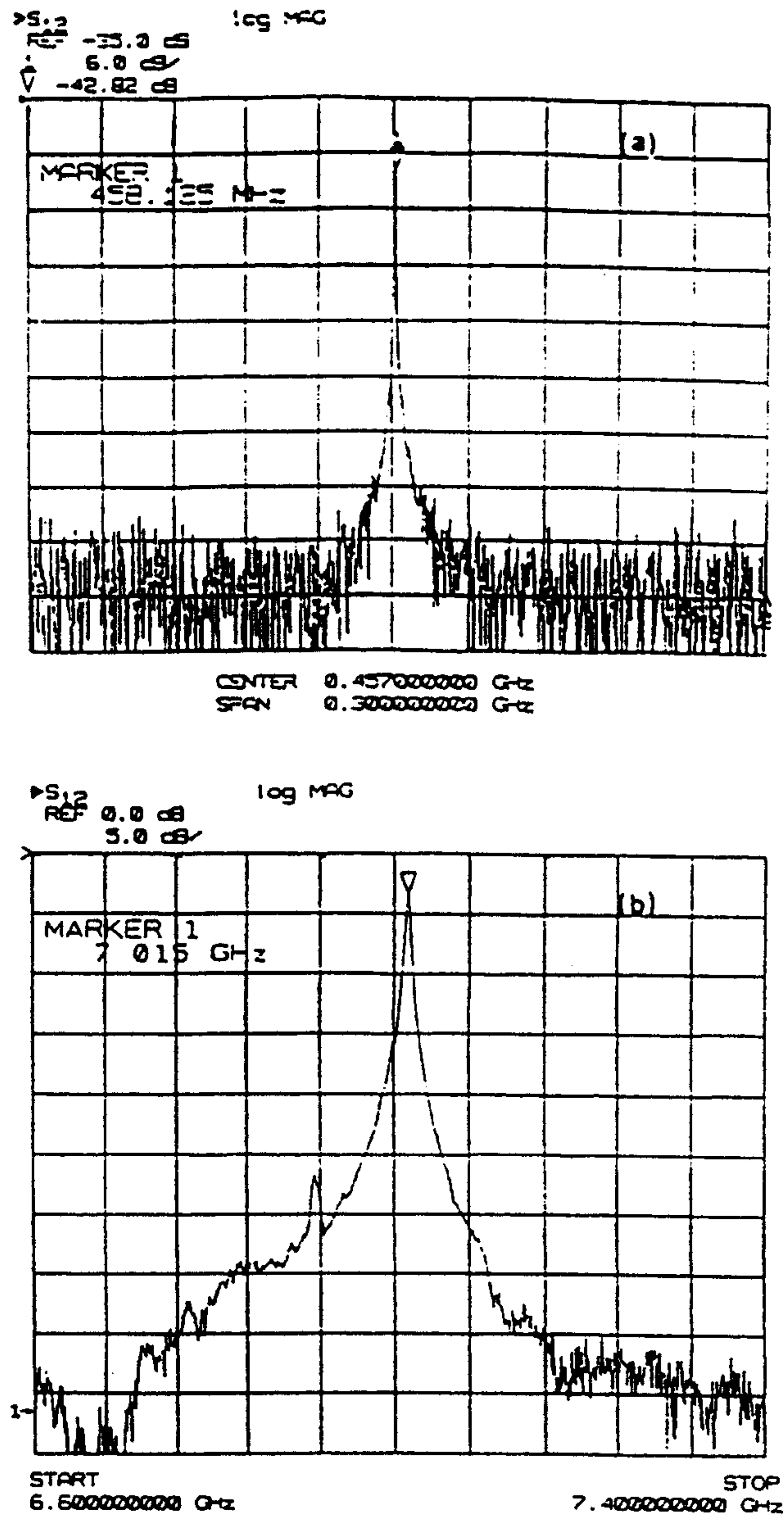


Fig. 2. Typical frequency responses of transmission coefficients (S_{21}) at 20 K and 20 dBm input power level: (a) meander-line resonator at 0.458 GHz and (b) straight line resonator at 7.015 GHz.

At the start of the determination of the surface resistance, the loaded quality factor Q_L was measured from the 3 dB-bandwidth points of the transmitted response. The unloaded quality factor Q_u was calculated using the measured Q_L value and transmission coefficients (S_{21}) of the resonant peak as follows,

$$Q_u = \frac{Q_L}{1 - |S_{21}|}, \quad |S_{21}| = 10^{-\frac{3}{10}} \quad (1)$$

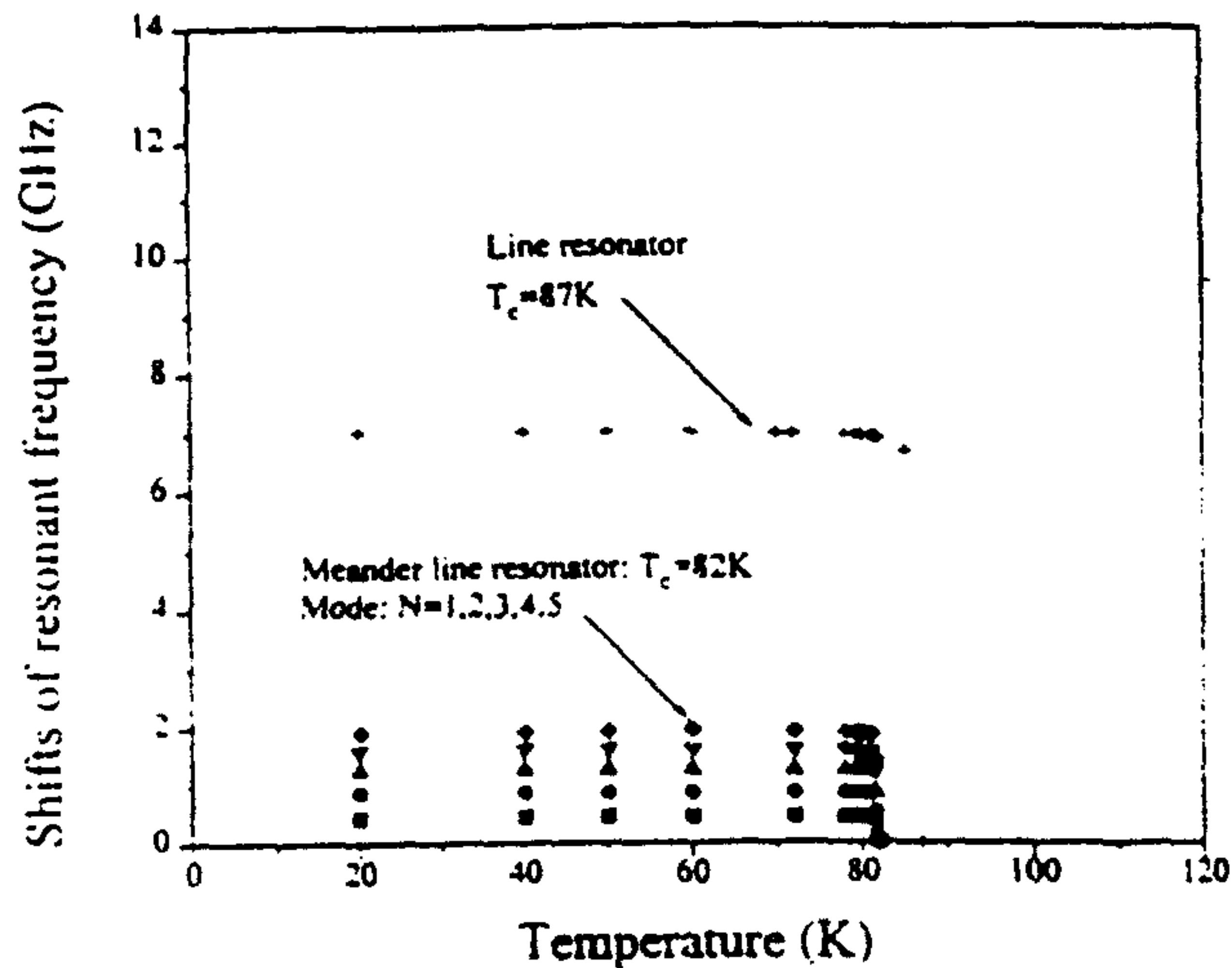


Fig. 3. Typical shift in the resonant frequency with temperature for the meander line resonator of first 5 resonant modes from $N = 1,2,3,4,5$ and fundamental resonant mode of 7GHz.

where \dot{L} is the insertion loss at the resonant peak. The losses encountered with open ended microstrip structures have three significant contributions that establish the quality factor as follows:

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_u} + \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_r} \approx \frac{1}{Q_u} + \frac{1}{Q_d} \quad (2)$$

where Q_u and Q_d are the quality factors due to the conductor and the substrate, respectively. Q_u is the radiation loss due to the open circuits that result in discontinuity. However, the first two types of losses have been considered to calculate the surface resistance of our films because the last loss has negligible effects in microwave frequency ranges which is pointed out in Ref. 8. The surface resistances of our YBCO films were extracted by considering only conductor loss and dielectric loss with the Pucel's equations [9].

Figure 4 shows the surface resistance as a function of temperature. As shown in this figure, the surface resistance decreases with decreasing temperature. This results from the condensation of normal electrons into superconducting pair electrons as the temperature decreases. However, the surface resistance does not obey the exponential relationship with temperature below 77 K. This may be due to residual surface resistance that comes from imperfect nature of high T_c superconducting films. The surface resistance measured from the meander line and straight line resonators at 20 K were about 300 $\mu\Omega$ and 700 $\mu\Omega$ at 0.458 GHz and 7.015 GHz, respectively. The surface resistance calculated for the 7 GHz line resonator was much larger than that by the meander line resonator. This behavior was mainly expected due to the porous surface morphology and surface roughness of the 7 GHz line resonator film. The YBCO films used for the 7 GHz line resonator was deposited at lower substrate temperature of 740°C and a new YBCO target was used. This implies that the surface resistance in the superconductor strongly depends on growth conditions of the films. Consequently, there is still possibility of obtaining lower surface resistance for our films.

Since superconducting materials show nonlinearity with respect to the applied rf field and this is one of the critical issues for microwave applications, we measured the input power dependence of the surface resistance. Figure 5 shows the surface resistance as a function of the input power for the two resonators. As shown in this figure, the surface resistance decreases slightly as the input power is decreased over the available 40 dB dynamic range from -20 dBm to 20 dBm. If high quality superconducting films are achieved by improvement of material deposition process, the power limitation of microwave devices would also be improved. Additionally, since the main contribution to the losses in the microstrip line structure is

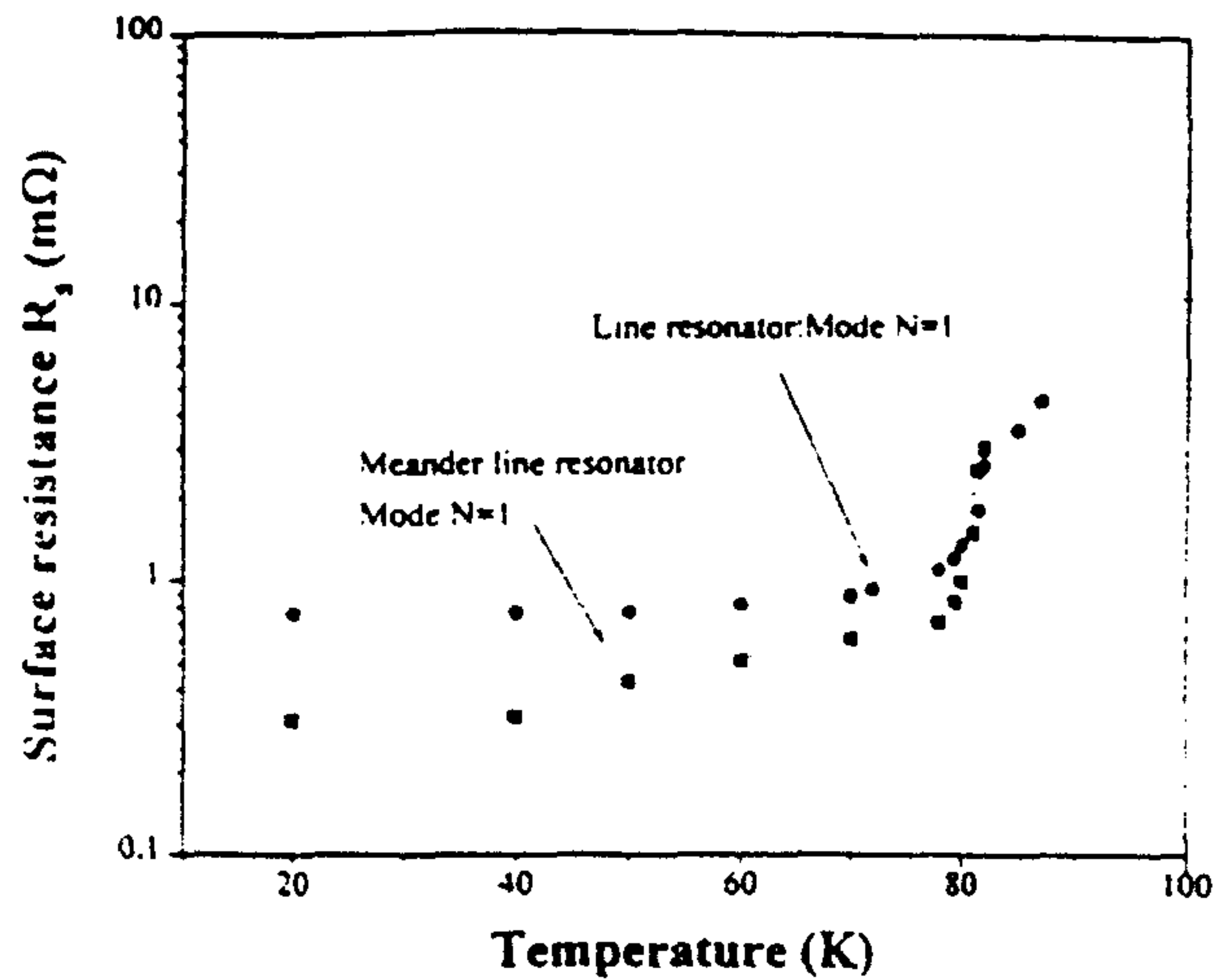


Fig. 4. Temperature dependence of surface resistance for 0.45 GHz meander line (■), and the 7 GHz line resonator (●).

predominantly from the patterned circuit line rather than the ground plane, much higher performance in device properties will be obtained by an enhanced patterning process.

Figure 6 shows frequency dependence of the surface resistance. The surface resistance increases with increasing frequency. The figure does not show squared frequency dependence of the surface resistance. This is in contrast with previous reports [10, 11]. Even if a thorough understanding of the discrepancy is lacking, we suppose one of the most probable reasons is that our films were deposited under different deposition conditions. Further measurements are needed to quantitatively verify the frequency behavior of the surface resistance by using more data.

SUMMARY

We have fabricated high T_c superconducting microstrip resonators using off-axis rf sputtered $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ thin films deposited on LaAlO_3 substrates. Two types of resonators were designed and constructed to determine the surface resistance of our patterned YBCO films. The temperature

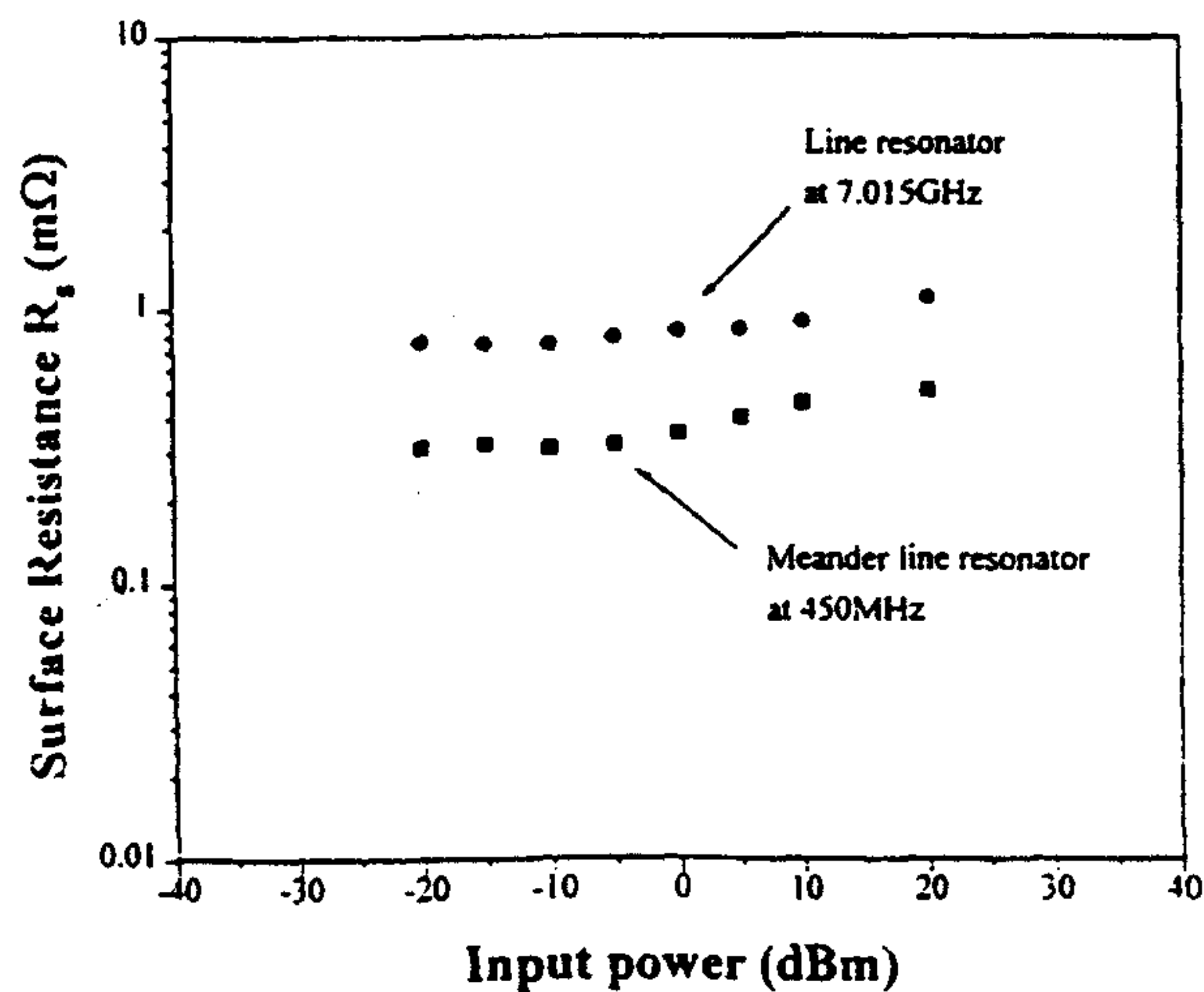


Fig. 5. Input power dependence of surface resistance for 0.45 GHz meander line (■), and the 7 GHz line resonator (●).

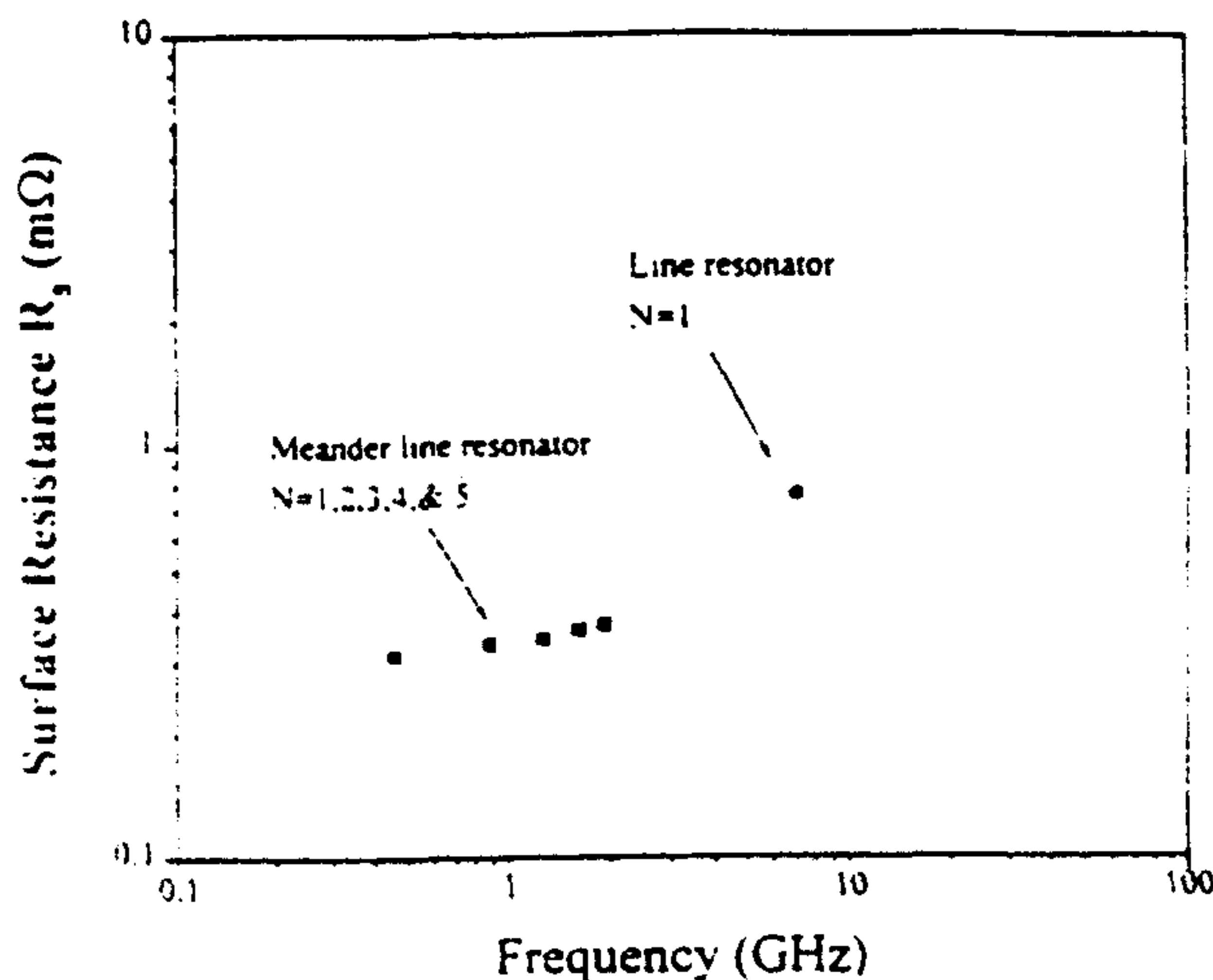


Fig. 6. Frequency dependence of surface resistance for 0.45 GHz meander line with the first 5 harmonic modes (■), and the 7 GHz line resonator with fundamental mode (●).

dependences of resonant frequency and surface resistance were measured. An interesting feature is that the surface resistance variation with temperature does not decay exponentially at lower ranges. The input power and frequency dependence of the surface resistance were also observed. The measured lowest surface resistances at 20 K were about $300 \mu\Omega$ and $700 \mu\Omega$ at 0.458 GHz and 7.015 GHz, respectively. According to our experimental findings, the use of high T_c superconducting thin films provides a promising potential for the development of microwave devices with higher performance and smaller size.

REFERENCES

1. L. C. Bourne, R. B. Hammond, M. Robinson, M. M. Eddy, W. L. Olson and T. W. James, *Appl. Phys. Lett.* **56**, 2333 (1990).
2. W. L. Holstein, L. A. Parisi, C. Wilker and R. B. Flippen, *Appl. Phys. Lett.* **60**, 2014 (1992).
3. H. S. Newman, A. K. Singh, K. Sadananda and M. A. Imam, *Appl. Phys. Lett.* **55**, 389 (1989).
4. J. S. Martens and J. B. Beyer, *Appl. Phys. Lett.* **52**, 1822 (1988).
5. A. A. Valenzuela, B. Daalmans and B. Ros, *Electron. Lett.* **25**, 1435 (1989).
6. G. C. Linag, Xiaohong Dai, D. F. Herbert, T. Van Duzer, N. Newman and B. F. Cole, *IEEE Trans. Appl. Super.* **1**, 58 (1991).
7. A. A. Valenzuela and R. Russer, *Appl. Phys. Lett.* **55**, 1029 (1989).
8. E. Belohoubek and E. Denlinger, *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.* **16**, 522 (1975).
9. R. A. Pucel, D. S. Masse and C. P. Hartwig, *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.* **16**, 1064 (1968).
10. S. A. Reible and C. W. Wilker, *IEEE Trans. on Magn.* **27**, 2813 (1991).
11. F. A. Miranda, *Supercond. Sci. Technol.* **6**, 605 (1993).

Surface Resistance Measurements of High-Temperature Superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ Thin Films using 7-GHz Line Resonators

Jun Pyo Hong

*New Materials Lab., Materials and Devices Research Center,
Samsung Advanced Institute of Technology, Suwon 440-600*

(Received 11 October 1995)

Surface resistance measurements of off-axis *RF*-sputtered $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ thin films deposited on LaAlO_3 substrates were performed by using microstrip-line resonators. These films have transition temperatures from 82 K and 90 K, depending on the growth conditions. The resonators with fundamental resonances at 7 GHz were designed and fabricated. The surface resistances (R_s) of these films were determined from 20 K up to the critical temperature ($T_c \approx 87$ K). The surface resistances were measured as a function of temperature and input power. Shifts in the resonant frequencies with temperature were observed as predicted from the effects of the kinetic inductance of the superconducting materials and the temperature dependence of the substrates. Our $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ thin films exhibited lower surface resistances than those of conventional metals at cryogenic temperatures.

I. INTRODUCTION

The applications of high- T_c superconducting thin films in microwave electronics operating over 77 K have drawn much attention. The prediction of much better performance and higher compactness than those of conventional metals has spurred a great deal of research on developing and investigating high- T_c superconducting passive components, such as resonators, filters, antennas, and delay lines [1-4]. In addition, a particular possibility resulting from size reduction of each component is the significant miniaturization of various integrated systems, such as communication and signal processing circuits. For these application possibilities of high- T_c superconducting thin films, acceptable microwave properties must be achieved for these high- T_c superconducting thin films to be suitable for use on microwave devices. Therefore, as one method of investigating microwave losses of high- T_c superconducting thin films, planar resonators have been very attractive for determining fundamental physical properties, such as surface resistance (R_s) and the magnetic penetration depth (λ_0) [5-10]. Among several transmission line structure, we fabricated line resonators with microstrip-line geometries. The resonant frequencies in the line resonator appear at integer numbers of half wavelengths. Our resonators were designed to have fundamental resonant frequencies at 7 GHz. Two high- T_c superconducting thin films on two LaAlO_3 substrates were patterned and packaged with gold-plated test fixtures for the surface resistance measurements.

In this report, we report microwave characteristics (particularly, the surface resistance R_s) of high- T_c superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) thin films *RF*-sputtered on LaAlO_3 substrates. Their performances as a function of the temperature and the input power were investigated. The frequency shift of the resonant curves with temperature is also discussed.

II. EXPERIMENT

High- T_c superconducting YBCO films were fabricated on LaAlO_3 substrates by utilizing an off-axis *RF*-sputtering method. The films were deposited at a substrate temperature of around 740 ~ 800°C in a total pressure of 10 mTorr with an *RF* power of 79 W. The final thickness of the YBCO films was chosen to be about 5000 Å by considering the internal damping of the microwave fields associated with the penetration depth (λ_0). Transition temperatures from 82 K to 90 K were obtained, depending on the growth temperature and the partial oxygen pressure. For microstrip-line structures, two films were deposited under identical conditions. One of the films was patterned by standard photolithographic techniques using a chemical solution (H_3PO_4) or an ion-milling system, and the other was originally used as a ground plane. The high- T_c superconducting ground plane also had about 4000 Å of gold sputtered on the back and the sides of the LaAlO_3 substrates for excellent contact to the test packages. The typical test pack-

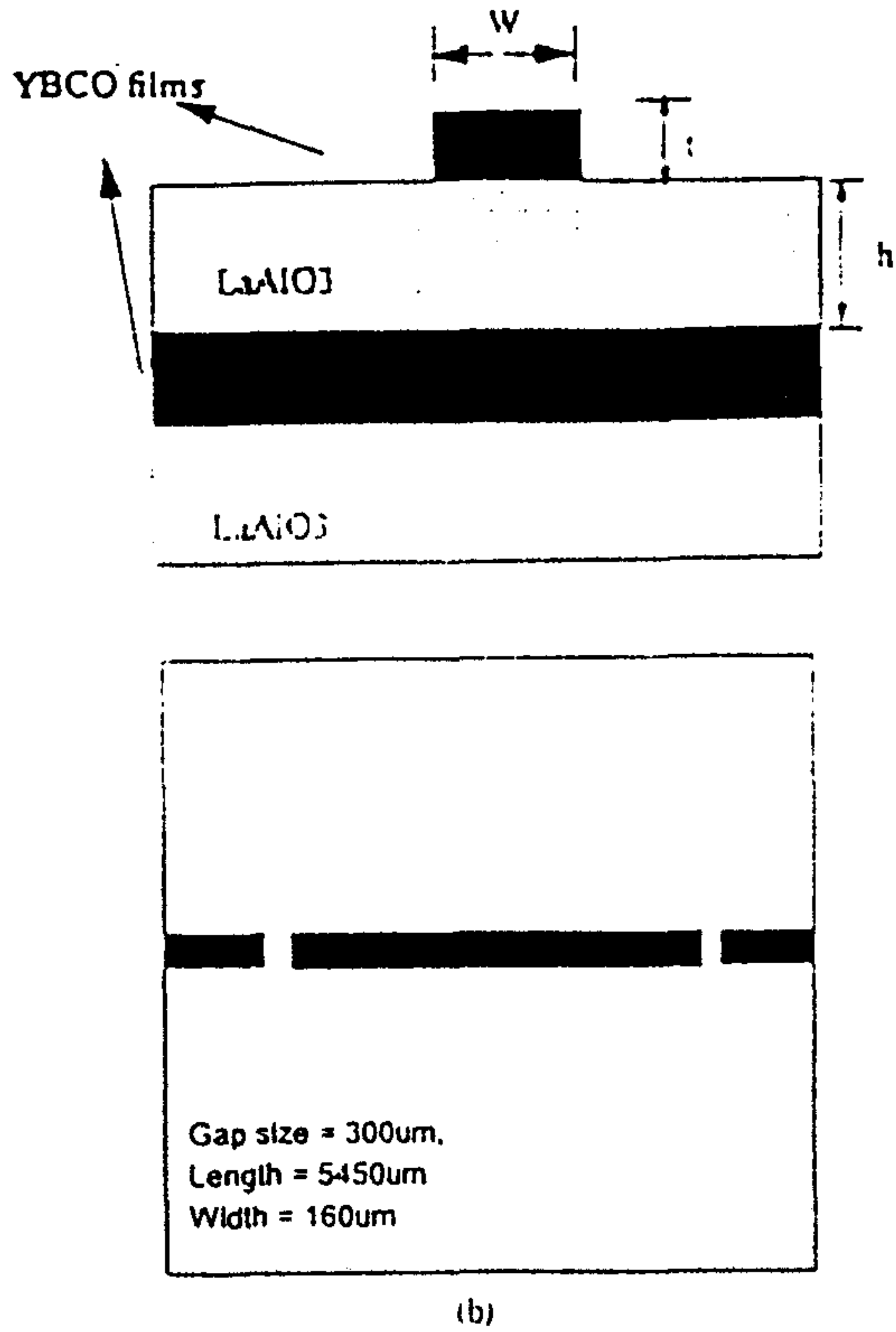


Fig. 1. Typical configurations of high- T_c superconducting microstrip-line resonators: (a) cross-section and (b) top view of a 7-GHz line resonator.

ages were made of oxygen-free high-conductivity (OFHC) copper which was gold-plated, and the packages were mounted on helium-gas closed-cycle refrigerator to control the temperature from 20 K to room temperatures. The feeding pins of the Witron K connectors were used for coupling between some of the input and the output lines and cables. 4000-Å-thick gold films were sputtered on the top surfaces of these microstrip lines for excellent electrical contacts between the center pins of the connectors and the microstrip lines. After the gold sputtering, the resonators were annealed at 500°C for 1 hour in a flowing oxygen atmosphere for excellent contact resistance between the YBCO films and the gold films. In addition, the microwave absorbers were added to the test housing in order to reduce unwanted resonances, which mainly result from test fixture configurations.

Schematic views of the high- T_c superconducting microstrip-line resonators are shown in Fig. 1; the substrate dimensions are 10 mm × 10 mm × 0.5 mm and its dielectric constant is 26. Figure 1(a) shows a cross-section view of the line resonator with its fundamental resonance at 7 GHz. The top view of the 7-GHz line resonator is shown in Fig. 1(b). It was 160-μm wide for a 50-Ω characteristic impedance and 5450-μm long with a coupling gap of 300 μm. The resonant frequency and the frequency

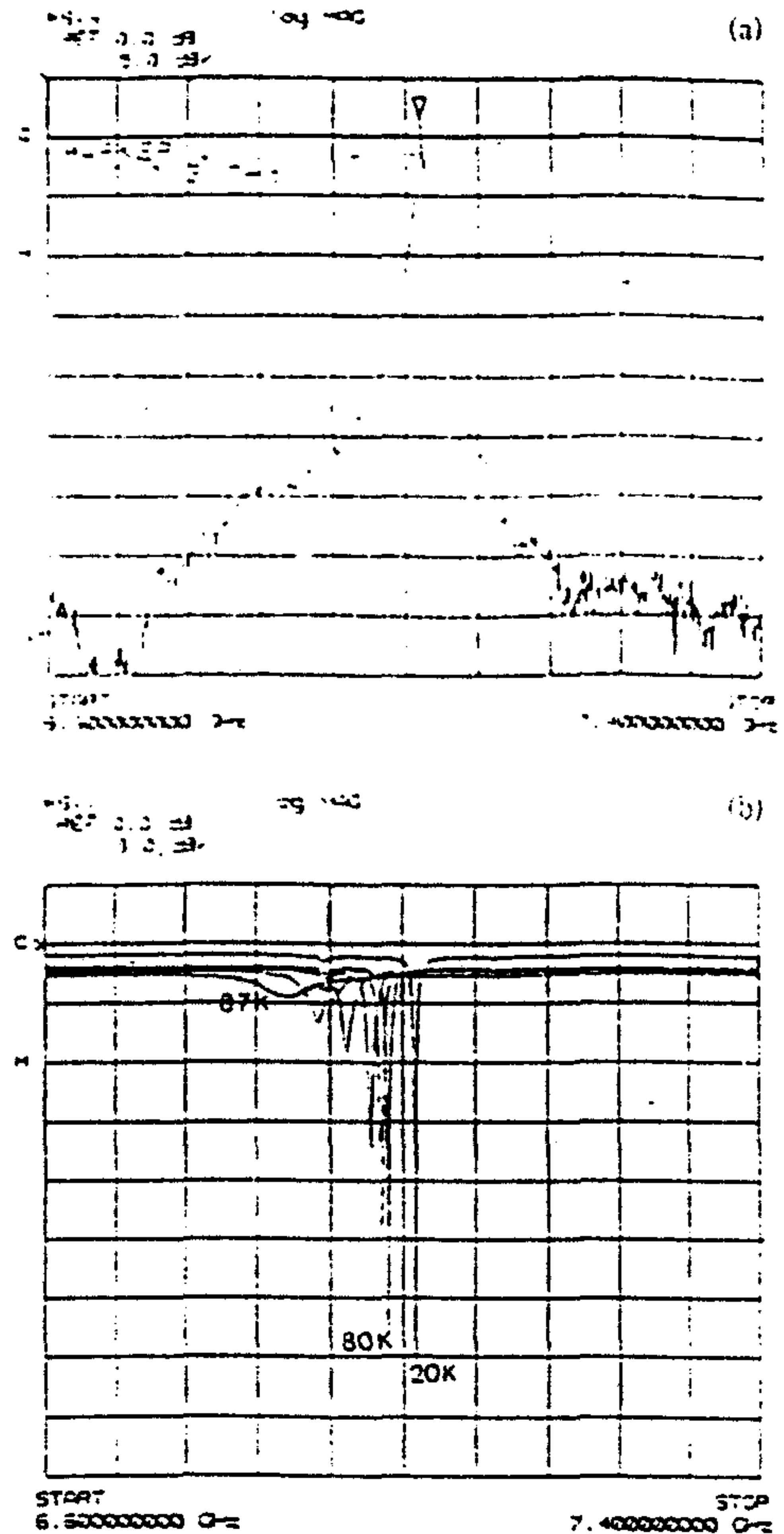


Fig. 2. (a) Frequency responses of typical transmission coefficients (S_{21}) at 20 K and 7.015 GHz and (b) the shift of the resonant curve in the reflected data for various temperatures.

response of the line resonator were determined and analyzed by using a conventional transmission analysis program called Linecalc and an EEs of microwave analysis program. The coupling gap sizes were determined with the aid of these programs for optimum rf -field coupling to the resonator.

III. RESULTS AND DISCUSSION

Typical transmission measurements at different temperatures and frequencies were performed using a Hewlett Packard 3510C network analyzer after room-temperature calibrations. Figure 2 shows experimental transmission data of the high- T_c superconducting resonators. The resonant curve of the 7-GHz line resonator is shown in Fig. 2(a). As shown in Fig. 2(b), the resonant curve of the reflected data shifted to low-frequency as the temperature decreased. From 20 K to 80 K, the funda-

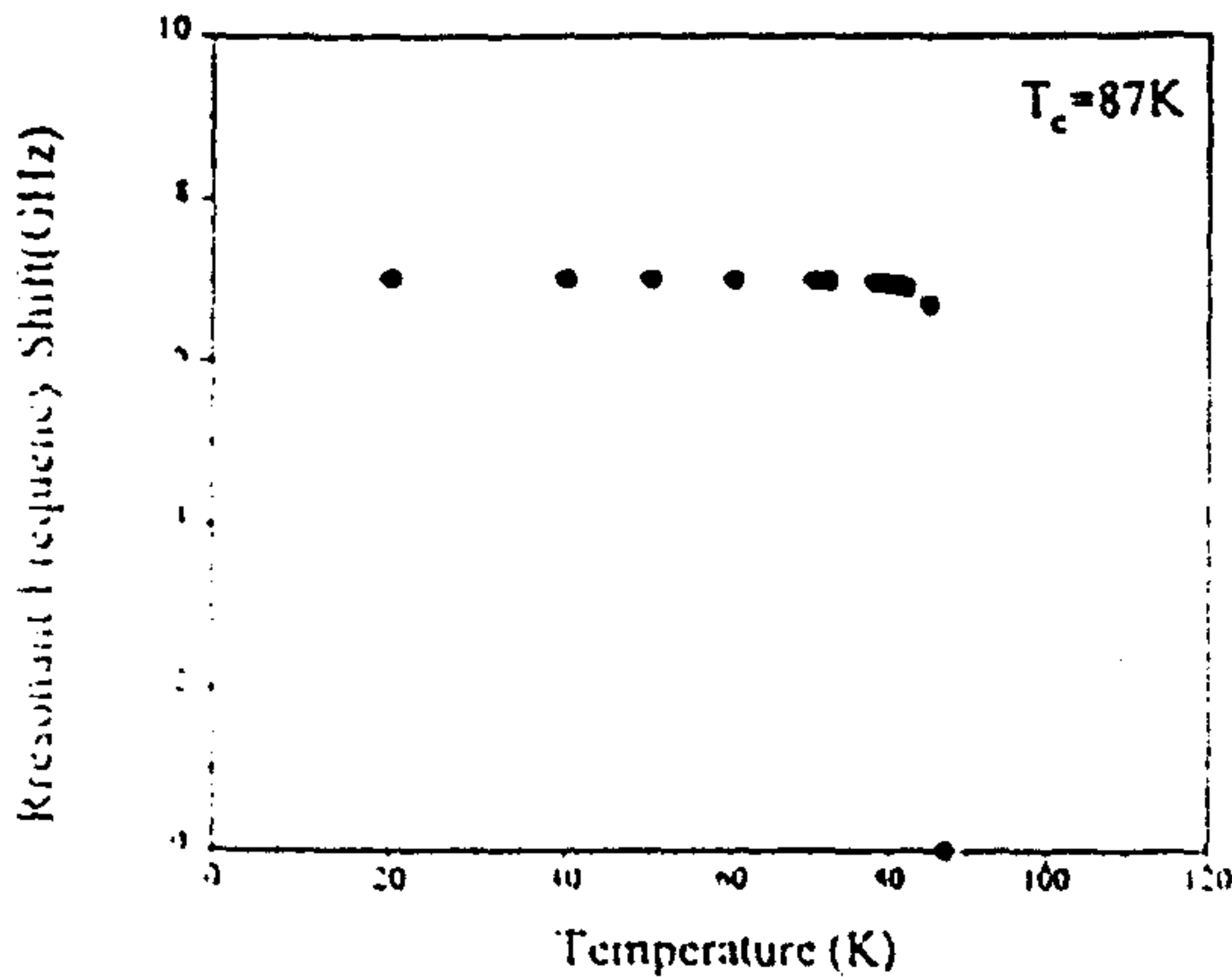


Fig. 3. Resonant frequency vs. temperature.

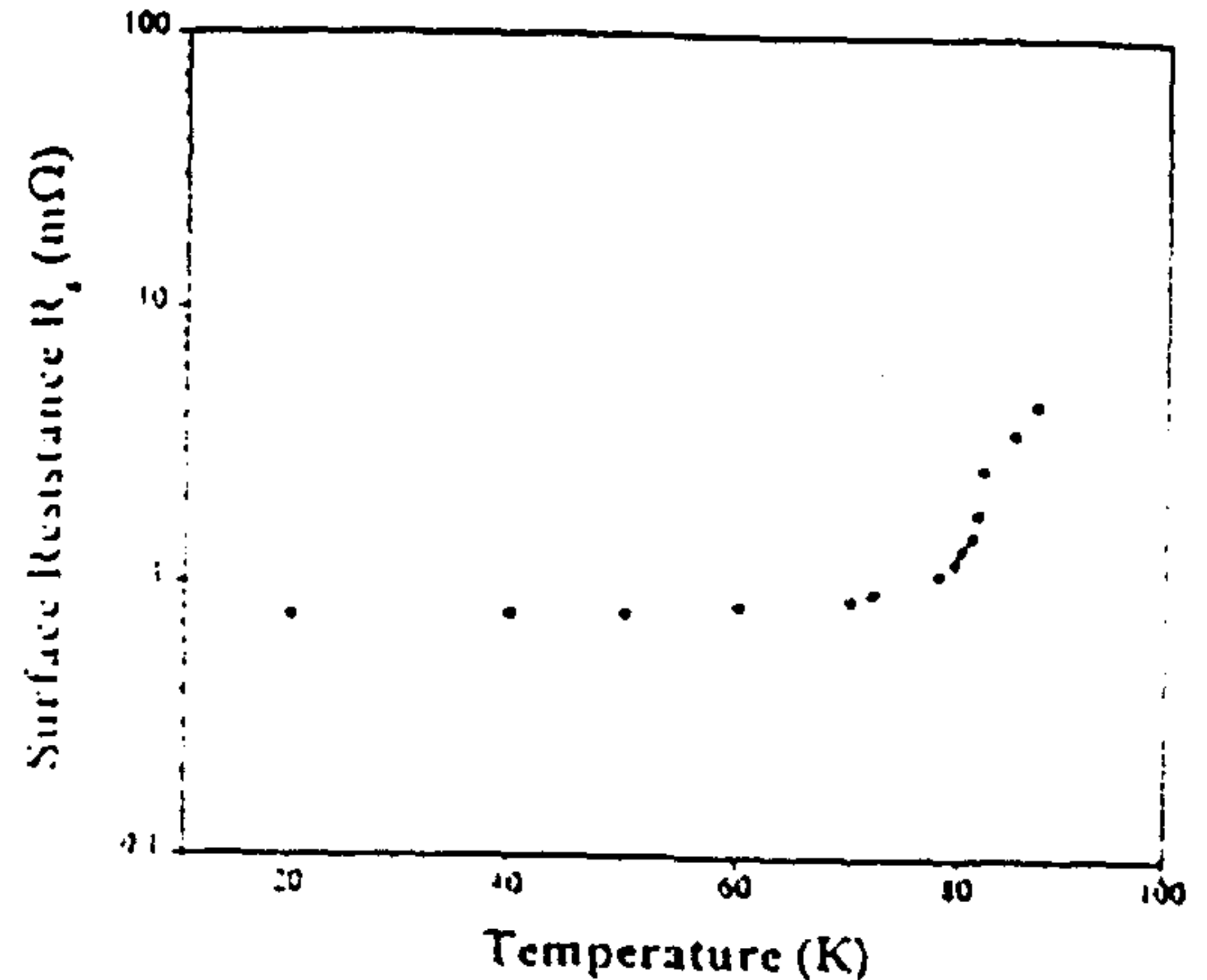


Fig. 4. Temperature dependence of the surface resistance.

mental resonance curve does not shift much, as expected. Figure 3 shows typical shifts in the resonant frequency as a function of temperature for the 7-GHz line resonator. The associated frequency shift with increasing temperature results in accommodation of the decrease in the phase velocity (V_{ph}) with minimum loss and dispersion:

$$V_{ph}(T) = \frac{1}{\sqrt{L(T)C}} = \frac{2\pi L \Delta f_0}{N}$$

where $L(T)$ is the temperature dependence of the total inductance, C is temperature-independent capacitance, L , Δf_0 , and N are the length of the resonator, the frequency separation between resonant modes, and the mode-order of the resonance, respectively. Therefore, the temperature dependence of the resonant frequencies mainly depends on both the kinetic (L_k) and the internal magnetic inductances (L_m). The former comes from the inertial mass of the superconducting pair carriers. The latter results from the change of the effective dielectric constant (ϵ_{eff}) of the substrate with temperature. The phase velocity propagating on the transmission line was measured to be 0.7519×10^8 m/s.

The unloaded quality factor (Q_u) was determined with the loaded Q -factor (Q_L) from the 3-dB down and transmission coefficients (S_{21})-of the resonant peak as follows:

$$Q_u = \frac{Q_L}{1 - S_{21}}$$

$$S_{21} = 10^{(-IL/10)}$$

where IL is the insertion loss of about 3.49 dB at 7.015 GHz. The R_s of our YBCO films was extracted from the calculated Q_u by considering only conductor loss and dielectric loss, while neglecting the radiation loss from our configurations. The dielectric loss (α_d) for the LaAlO_3 substrates was determined by using the Wheeler formulas [11]. The conductor loss (α_c) of the superconducting films was calculated by using Pucel's incremental inductance rules [12]. The comprehensive calculations of

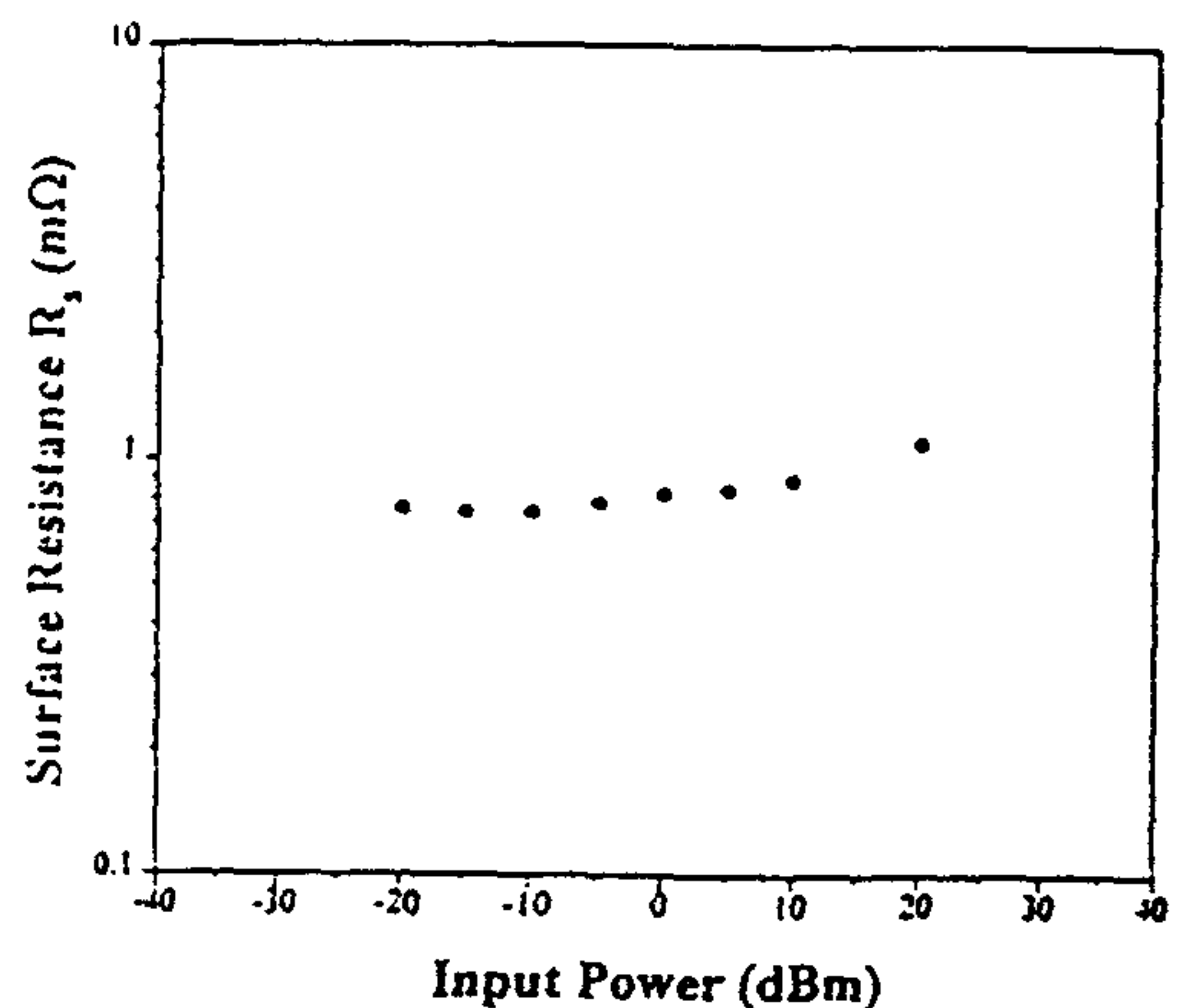


Fig. 5. Input power dependence of the surface resistance at 20 K.

the surface resistance are discussed in detail in Ref. 13.

Figure 4 shows the temperature dependence of the surface resistance. As shown in this figure, the R_s increases with increasing temperature, and near T_c , the R_s was larger than that measured from the fold resonators, as expected. The measured surface resistance R_s for the line resonator was about 0.7 mΩ at 7.015 GHz. This value was comparable to the results reported in the literature under similar conditions [9,14]. Figure 5 shows the R_s 's as a function of input power. It is well-known that high- T_c superconducting materials show a nonlinearity which can cause harmonic generation or intermodulation in device performance. This is expected due to the RF -magnetic-field or RF -current dependence of the surface resistance. Additionally, the patterned resonators have an input power limitation on device performance due to the higher field strength at the edge of the resonator, which will cause large loss. As shown in Fig. 5, the input power decrease slightly as the input power dependence of the surface resistance R_s is not clear; however,

the surface resistance R_s does decrease slightly as the input power decreases over the measured 40-dB dynamic range from -20 dBm to 20 dBm. We expect that if much lower input powers are used, higher Q -factors may be obtained, resulting in low surface resistances. In addition, resonators made from high-quality films will have much higher power limits. In microstrip-line structures, the main contribution to the losses is predominantly from the center line with high current densities rather than from the ground plane. This was confirmed by replacing the superconducting ground plane by a gold ground plane. Presently, the measurement of high-power dependence in the surface resistance is in progress by using microwave power amplifiers.

IV. CONCLUSION

Microwave properties of off-axis RF -sputtered $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ films on $LaAlO_3$ substrates were investigated. We observed frequency shifts of the resonant curves with temperature. The temperature and the input-power dependence of the surface resistance R_s was measured. From the experimental results, better surface resistances were obtained by using good quality $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ thin films. The results also confirm the usefulness of $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ superconducting thin films for microwave device components and extreme miniaturization in system applications.

REFERENCES

- [1] L. C. Bourne, R. B. Hammond, M. Robinson, M. M. Eddy, W. L. Olson and T. W. James, *Appl. Phys. Lett.* **56**, 2444 (1990).
- [2] W. L. Holstein, L. A. Parisi, C. Wilker and R. B. Eitzen, *Appl. Phys. Lett.* **60**, 2011 (1992).
- [3] I. S. Jeon, A. K. Singh, K. Satoh and M. A. Jamn, *Appl. Phys. Lett.* **55**, 189 (1989).
- [4] J. S. Martens and J. B. Beyer, *Appl. Phys. Lett.* **72**, 1822 (1998).
- [5] A. A. Valenzuela, B. Dammack and A. Ros, *Electron Lett.* **25**, 1445 (1989).
- [6] G. C. Liang, Xiaomeng Dai, D. F. Herbert, T. Van Duzer, N. Newman and B. F. Cole, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **1**, 58 (1991).
- [7] A. A. Valenzuela and R. Russer, *Appl. Phys. Lett.* **55**, 1029 (1989).
- [8] S. A. Reible and C. W. Wilker, *IEEE Trans. on Magn.* **27**, 2813 (1991).
- [9] F. A. Miranda, *Supercond. Sci. Technol.* **6**, 605 (1993).
- [10] M. Morisue, S. Furusawa, J. Asagina and A. Kanasugi, *IEEE Trans. on Magn.* **27**, 2805 (1991).
- [11] H. A. Wheeler, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **13**, 172 (1965).
- [12] R. A. Pucel, D. S. Masse and C. P. Hartwig, *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.* **16**, 1064 (1968).
- [13] J. P. Hong, C. W. Moon, C. H. Park, E. H. Lee, I. H. Song and J. W. Lee, *Jpn. J. Appl. Phys.* **33**, 1080 (1994).
- [14] G. C. Liang, X. Dai, D. F. Herbert, T. van Duzer, N. Newman and B. F. Cole, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **1**, 58 (1991).

Design and Characterization of High- T_c Superconducting 3-Pole Parallel-Coupled Bandpass Filters Utilizing $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ Thin Films

J. P. HONG and J. S. LEE

*New Materials Laboratory, Materials and Devices Research Center,
Samsung Advanced Institute of Technology, Suwon 440-600*

(Received 13 January 1996)

We have successfully designed and characterized high-temperature superconducting bandpass filters utilizing $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ thin films deposited by a KrF pulsed ablation method on LaAlO_3 substrates. The filter that consisted of 3-pole resonators in microstrip structures was designed to have a bandwidth of about 6% (600 MHz) at a center frequency of 10.5 GHz. The filter at 77 K and 20 K showed low insertion losses of 0.98 dB and 0.65 dB, respectively. At 77 K, the return loss was better than 10 dB. The temperature dependence of the insertion loss and the center frequency shift in the passband was also measured. For comparison, equivalent gold filters were fabricated, which showed an insertion loss of more than 3.5 dB at 77 K. These high- T_c superconducting bandpass filters also exhibited excellent reproducibility in fabrication.

I. INTRODUCTION

Microwave technologies in future satellite and wireless communication systems will require better performance and higher compactness in device properties. The minimization of size and weight in microwave components is likely not to be available with conventional normal-metals because of intrinsically large loss at high frequencies. However, the microwave properties of high- T_c superconducting epitaxial thin films have demonstrated an extremely low surface resistance (R_s) that occurs due to RF field absorption by the normal unpaired electrons at finite temperatures and RF frequencies. The low surface resistance makes many potential application possible. The R_s of high T_c superconductors has been proven to be two orders of magnitude lower than those of conventional metals [1,2]. Recently, impressive developments in the quality of high- T_c superconducting thin films have rendered it possible to develop much more attractive superconducting devices.

Up to now, a lot of research has focussed on the development of high- T_c superconducting microwave devices, such as resonators, filters, channelizers, and delay lines [3-5]. Among these these devices, superconducting planar bandpass filters with narrow bandwidths and sharp skirts are particularly promising because present communication systems demand available RF frequency spectra to be partitioned into small frequency bands in order to reduce multiple interfering signals. Therefore, high- T_c superconducting filters have been widely studied and reported on for the realization of narrow bandwidth filters

with superior performance in compact sizes, [6-11]. These superconducting filters in the near future are expected to replace large waveguides and dielectric resonator filters.

In this paper, we report the design, fabrication, and performance of a high- T_c superconducting $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) three-pole bandpass filter having a 6% bandwidth. Two high- T_c superconducting thin films on separate LaAlO_3 substrates were fabricated under identical growth conditions by utilizing a KrF pulsed laser ablation system. The performance of the high- T_c superconducting bandpass filters is presented as a function of temperature and is compared to that of their normal-metal counterparts with the same structure, but with slight differences in film thicknesses. A conventional quarter-wavelength parallel-coupling approach in filter design is also discussed.

II. EXPERIMENT

The YBCO films were deposited *in situ* on LaAlO_3 substrates by utilizing a pulsed laser ablation system. A 248-nm KrF excimer laser (Lambda Physik 300iF) placed outside the ultrahigh vacuum chamber was used as the laser source. It was operated at a laser pulse rate of 5 Hz and an energy density of about 1.5 J/cm². During the deposition, the substrate was heated to and maintained at 780°C in an atmosphere of 100 mTorr of oxygen. A stoichiometric $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ target was rotated around a perpendicular axis at 5 Hz to get the YBCO films as uniform as possible. After the deposition, the substrate

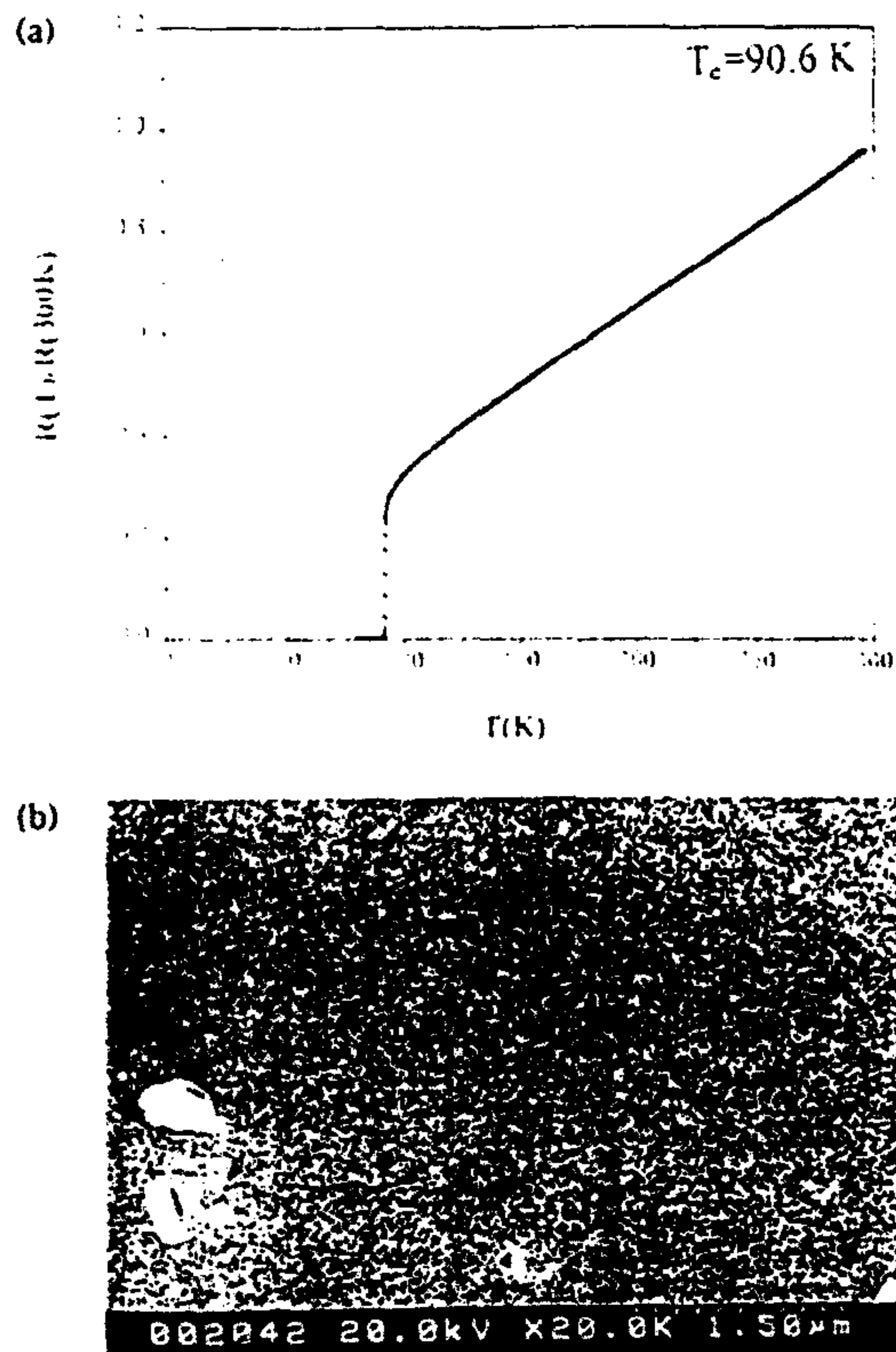


Fig. 1. (a) Typical resistance vs. temperature curve and (b) scanning electron micrograph (SEM) picture of the YBCO films deposited on LaAlO_3 .

Table 1. Deposition parameters for YBCO films grown using a laser ablation method

Deposition parameter	Condition
Laser source	248 nm KrF
Energy fluence	1.5 J/cm ²
Distance	90 mm
Substrate temperature	780°C
Total pressure	100 mTorr
Target rotation	5 Hz
Substrate	LaAlO_3

was immediately cooled to 550°C and then annealed for one hour in 20 Torr of pure oxygen. The distance between the substrate and the YBCO target was maintained at 90 mm.

A typical resistance vs. temperature curve which was measured by a standard four-probe system, is shown in Fig. 1(a). The films used in this experiment had zero resistance at 90.6 K and a transition temperature width of less than 1 K. The critical current density was 5×10^6 A/cm² at 77 K. Figure 1(b) shows a typical scanning electron micrograph (SEM) picture of the YBCO film deposited on a LaAlO_3 substrate. It shows a small number of droplets on the film's surface. For the filter measurement, two YBCO thin films were fabricated on sep-

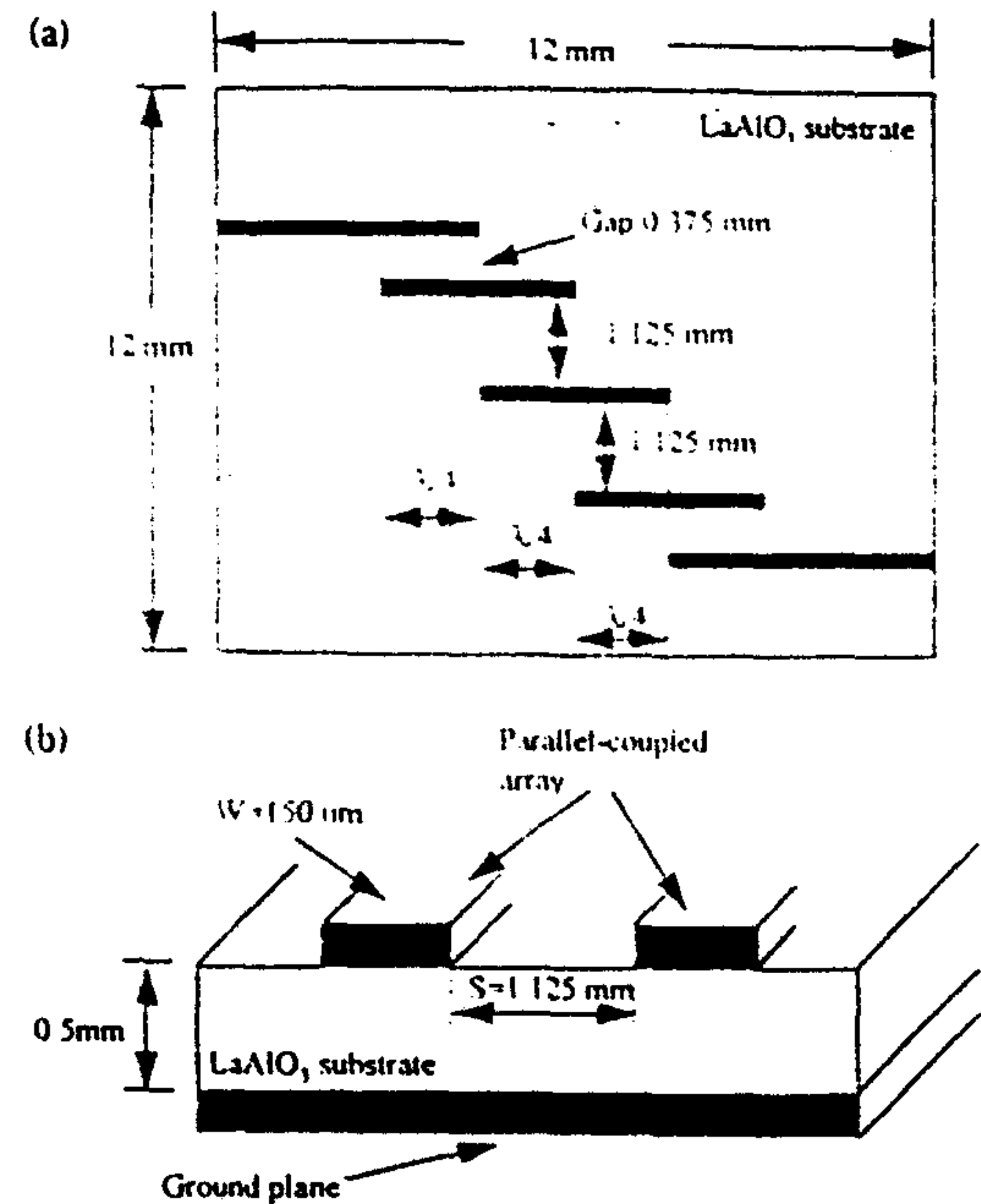


Fig. 2. (a) Typical circuit layout of a high- T_c superconducting microstrip 3-pole parallel-coupled bandpass filters and (b) cross-sectional transmission lines of parallel-coupled microstrip structures. The filter is 12 mm wide and 0.5 mm thick.

arate LaAlO_3 substrates under identical growth conditions, since high-quality YBCO films deposited on both sides of the substrate were not available. Typical deposition parameters for the YBCO films are summarized in Table 1.

Two YBCO films with microstrip structures were used for the filter. Patterning for the circuit section of the filter was accomplished after applying an AZ 1512 photoresist to the YBCO surface. The YBCO film was etched by an argon-ion-milling system. After the circuit patterning, a dc-sputtered gold film was deposited on the top surface of 50- Ω input and output feed lines for electrical contact to the filter. In addition, the back side of the patterned circuit substrate was ion-milled to eliminate possible problems with a small gap between the two substrates of the transmission line and the ground plane. The other film was used as a ground plane that was directly contacted with the package. Similarly, 4000 Å of gold was deposited on the back and the sides of the substrate of the ground plane for good electrical contact to the test fixture. Finally, the samples were annealed in flowing oxygen at 550°C for one hour to improve adhesion and to insure low contact resistance between the gold films and the YBCO surface. Both YBCO films used in this experiment had thicknesses of about 5000 Å as determined by considering the internal damping of the microwave RF fields associated with our penetration depth λ of about 1700 Å. The feeding pins of the Wiltron K-connectors were used for the coupling between some

of the input and output lines and the K -connect cables. One male and one female K -connector were used as contact parts to eliminate the calibration problems. The YBCO circuit pattern and the K -connectors were carefully aligned, and a mechanical pressure-contact between the two substrates was made to reduce air gaps which could result in poor device performance. All the packages were directly mounted to the cold stage of a closed-cycle cryogenic system for the filter measurement.

A typical layout of a high- T_c superconducting microstrip 3-pole parallel-coupled bandpass filter is shown in Fig. 2(a). The LaAlO_3 substrate was 12 mm wide and 0.5 mm thick. The filter under discussion consisted of parallel array resonators. Since each resonator in the parallel-coupled filter was coupled over a quarter-wavelength section, the filter with 3-pole resonators was assembled into 4 quarter-wavelength coupling sections. As the coupling gap between the resonators was closely spaced, the more coupling could be introduced with respect to a resonator's neighbors. Therefore, the filter used in this experiment was designed to have a bandwidth of about 6% at a center frequency of 10.5 GHz. The coupling gap for a bandwidth of about 6% was 1.125 mm while the spacing between the first and the end resonators was kept constant at 0.375 mm. The design parameters of the 3-pole filter were obtained and simulated by a commercially available computer-aided design (CAD) program called Libra. After the computation, the theoretical response of the filter, which included the effect of the test fixture (package), was analyzed using a structure simulator called a HFSS (HP85180A High-Frequency Structure Simulator). In the simulation, the high- T_c superconductors were specified as good conductors with extremely high conductivity. The LaAlO_3 substrate was approximated to have a low dielectric loss ($\tan\delta = 1 \times 10^{-4}$) and a relative dielectric constant of 25. All of the coupled lines were set at 50Ω . In addition, feed lines with the same width were connected to the circuit pattern of the filter for impedance matching to the 50Ω resonator. However, no attempt was made in the design process to try to compensate for the effect of the tolerances in the parameters. Figure 2(b) shows cross-sectional transmission lines of the filter.

III. RESULTS AND DISCUSSION

A Hewlett Packard 8510C network analyzer was used for the measurement of the typical transmission (S_{21}) and reflection coefficients (S_{11}) of the high- T_c superconducting 3-pole parallel-coupled bandpass filters. During the measurement, a Lakeshore model 330 temperature controller was used to take temperatures in a cryogenic environment, and the input power applied to the filter was kept at 10 dBm. The measured frequency response of the transmission (S_{21}) coefficient of the YBCO filter is shown in Fig. 3(a). The insertion loss in the passband is

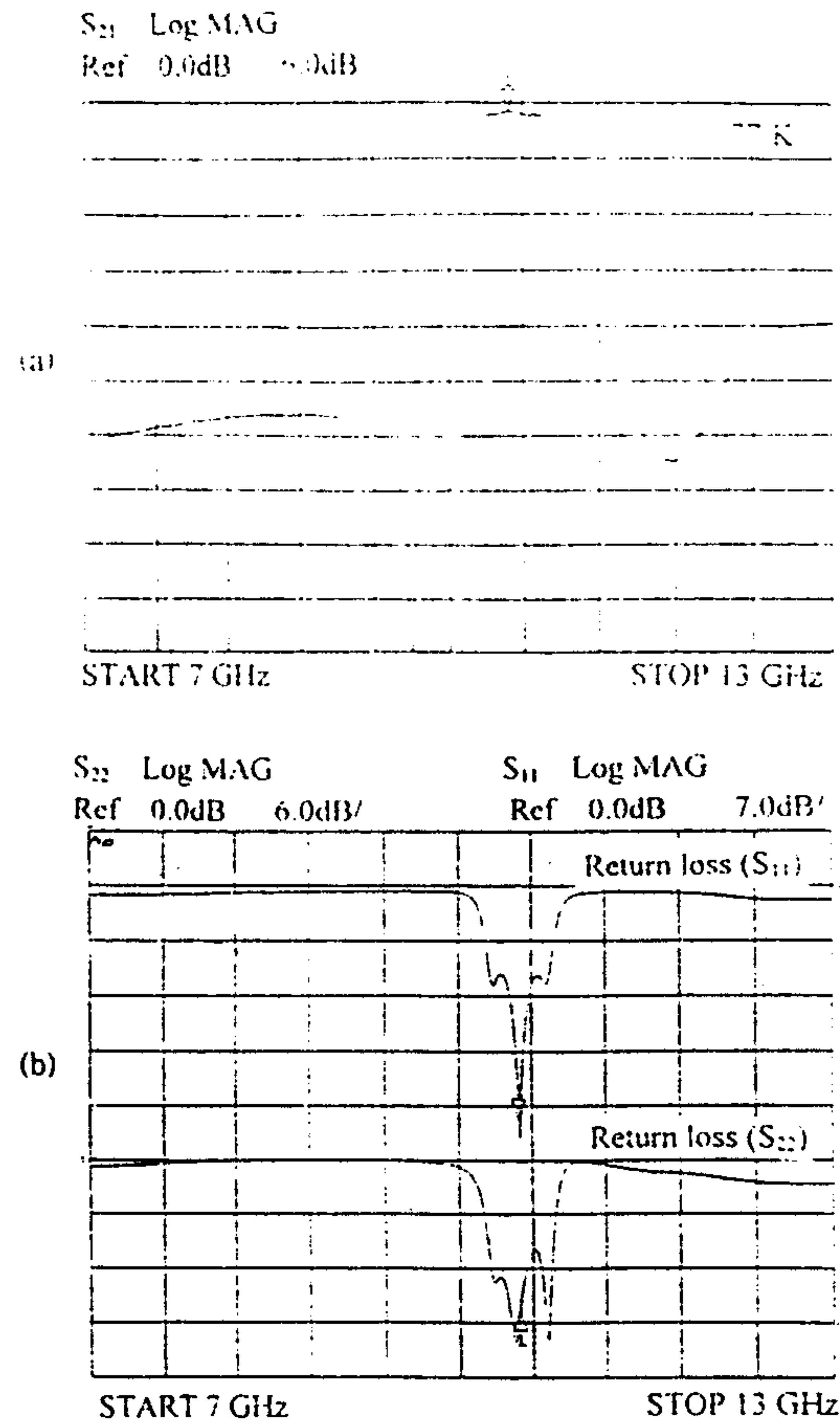


Fig. 3. (a) Frequency response of the insertion loss (S_{21}) and (b) the return losses (S_{11}) and (S_{22}) at each port at 77 K.

0.98 dB at 77 K. The shape of the passband is symmetric, which indicates that the resonant frequencies of the resonators are all synchronous. In addition, the insertion loss is very flat across the passband, and a good out-of-band rejection of about 40 dB is obtained. The insertion loss at 20 K is about 0.65 dB. Figure 3(b) shows the typical frequency responses of the reflection coefficients S_{11} and S_{22} at each port. They exhibit better than 10 dB return loss at 77 K and show an asymmetric frequency responses at the two ports. It is not certain where the asymmetry in reflection loss response comes from. It may be due to problems resulting from a possible gap in the connection between the connector-pins and the circuit pattern lines at each port.

The center frequency shift in the passband from 77 K up to the critical temperature ($T_c = 89$ K) is shown in Fig. 4(a). As the temperature was increased, the considerable shift in the center frequency was mainly due to the temperature dependence of the kinetic inductance (L_k) of the superconductor. With increasing temperatures, the insertion loss dropped steeply near the critical temperature from 83 K to 89 K, but the loss was rel-

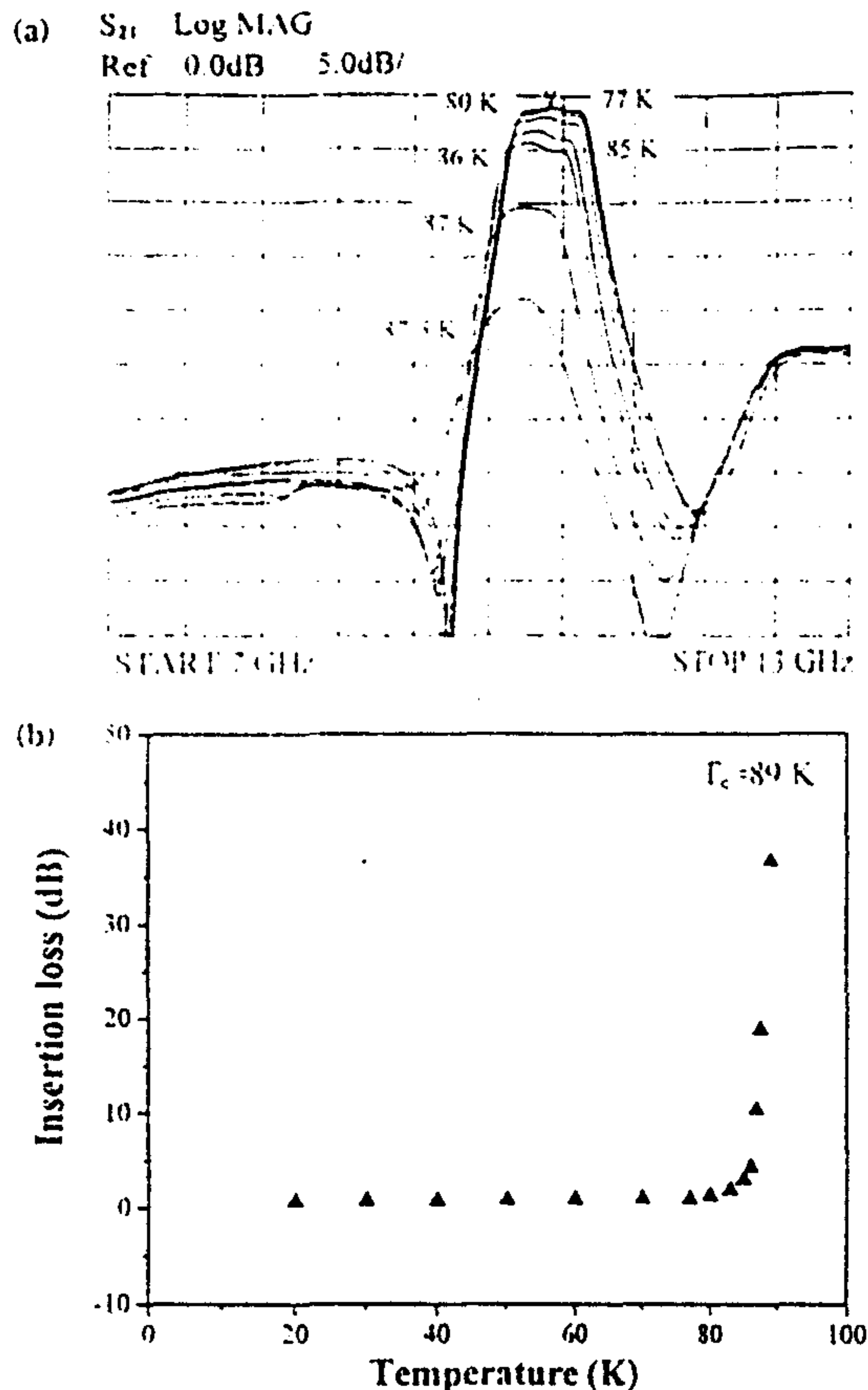


Fig. 4. (a) Typical center frequency shifts with temperatures and (b) temperature dependence of the insertion losses.

actively temperature independent below 70 K. It might have been due to a residual surface resistance that was found to be nearly temperature independent. This behavior was found by surface resistance measurements using microstrip resonators. Figure 4(b) shows the temperature dependence of the insertion losses. The pass-band shape with increasing temperatures was rounded out at the edges of the passband. For comparison, the gold filter that was fabricated to have the same structures showed an insertion loss of more than 3.5 dB at the same temperature, which resulted from the intrinsic loss of the normal metals. Figure 5 shows the insertion losses as a function of the input power. No significant degradation in filter performance was observed as the input power was increased over a 40-dB dynamic range from -20 dBm to 20 dBm. All of the filters made from high- T_c superconductors exhibited excellent results for the insertion loss, compared to conventional normal-metal filters with the same structure, but slightly different thicknesses (about $3 \mu\text{m}$). Presently, high- T_c superconducting filters with much narrower bandwidth are under construction by adjusting the coupling gap of the parallel-coupled resonators.

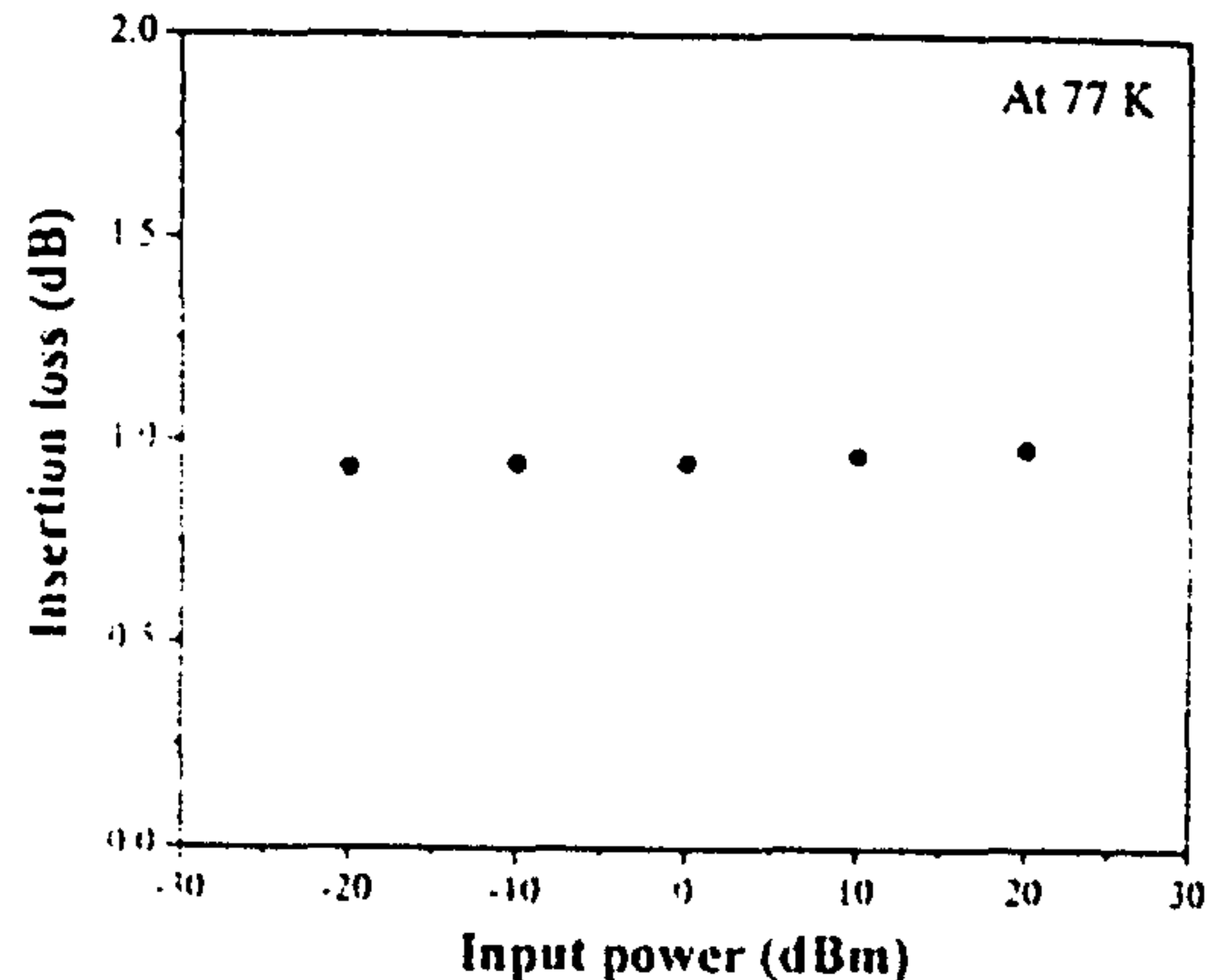


Fig. 5. Input power dependence of the insertion losses at 77 K.

IV. CONCLUSIONS

We have successfully designed and fabricated high- T_c superconducting 3-pole bandpass filters by utilizing $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ thin films on LaAlO_3 substrates. The YBCO films were made on separate substrates by a 248-nm KrF laser ablation system. The parallel-coupled section of a 3-resonator array was used in the filter design. Such filters had a bandwidth of about 6% at a center frequency of 105 GHz. The insertion losses at 77 K and 20 K were 0.98 dB and 0.65 dB, respectively. From experimental results, narrow-bandwidth, low-loss microstrip filters can be realized using superconductors. However, we have to solve several issues, such as accurate filter design, substrates, evaluation, and low-temperature measurements.

ACKNOWLEDGMENTS

The research has been supported in part by Samsung Electronics, Inc., and in part by the Korea Science and Engineering Foundation.

REFERENCES

- [1] C. M. Jackson, R. Hu, K. P. Daly, J. H. Takemoto, J. F. Burch and R. W. Somin, *J. Supercond.* **3**, 305 (1990).
- [2] E. Belohoubek, E. Denlinger, D. Kalokitis, A. Fathy, R. Paglione, V. Pendrik, J. Brown, A. Pinque, X. D. Wu, S. M. Green, S. Mathews, R. Edwards, M. Mathur and T. Venkatesam, *J. Supercond.* **5**, 423 (1992).
- [3] G. C. Linag, Xiaohong Dai, D. F. Herbert, T. Van Duzer, N. Newman and B. F. Cole, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **1**, 58 (1991).
- [4] J. Everard and Y. Chiang, *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.* **41**, 1568 (1993).
- [5] S. H. Talisa, M. A. Janocko, C. Moskowitz, J. Talvacchio, J. F. Billings, R. Brown, D. C. Buck, C. K. Jones, B. R.

- McAvory, G. R. Wagner and D. H. Watt, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **39**, 1448 (1991).
- [6] D. B. Rensch, J. Y. Josefowicz, P. MacDonald, C. W. Nieh, W. Hofer and F. Krajenbrink, *IEEE Trans. on Magn.* **27**, 2553 (1991).
- [7] G. L. Matthaei, L. Young and E. M. T. Jones, *Title of Book* (Artech House, Dedham, MA, 1980).
- [8] E. Belohoubek, E. Denlinger, D. Kalokitis, A. Fathy, R. Paglione, V. Pendrik, J. Brown, A. Pinque, X. D. Wu, S. M. Green, S. Mathews, R. Edwards, M. Mathur and T. Venkatesan, *J. Supercond.* **5**, 423 (1992).
- [9] M. Nisenoff, J. C. Ritter and S. A. Wolf, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **3**, 2885 (1993).
- [10] S. B. Cohn, *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.* **3**, 223 (1958).
- [11] G. Ramesh and I. J. Bahl, *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.* **27**, 700 (1979).