

논문 2005-42TC-7-9

High-Q $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 고온초전도체 공진기를 이용한 주파수 튜닝이 가능한 고성능 발진기 제작

(Fabrication of a High-performance Oscillator with a Tunable High-Q
HTS $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ Resonator)

양 우 일*, 이 재 훈*, 허 정**, 이 상 영**

(Woo Il Yang, Jae Hun Lee, Jung Hur, and Sang Young Lee)

요 약

위상잡음(phase noise)이 작은 발진기(oscillator)는 주파수 대역의 효율적 활용과 고속의 데이터 전송을 가능하게 하는 통신 시스템의 구축과 Doppler 효과를 이용하는 RADAR의 제작을 위한 핵심소자로서 발진기의 위상잡음은 공진부의 loaded Q (Q_L)값이 클수록 작아진다. 본 논문에서는 고온초전도 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) 박막을 사용하여 TE_{011} 모드 고온초전도 YBCO-루타일 공진기를 제작하고 이 공진기가 공진단으로 사용된 발진기 특성의 시뮬레이션, 발진기 제작 및 위상잡음 측정 연구를 수행하였다. 23.5 K 및 TE_{016} 모드 공진주파수인 8.545 GHz에서 $Q_L=180000$ 인 고온초전도 YBCO-루타일 공진기를 사용하여 제작된 발진기의 위상잡음은 1 KHz offset에서 -104.8 dBc/Hz 정도의 매우 작은 값을 지님을 확인하였다. Piezoactuator를 이용한 상온에서의 발진기 주파수의 튜닝 결과를 제시하고, 이러한 공진기가 사용된, 튜닝 가능한 고성능 발진기의 제작 가능성에 대해 논의하였다.

Abstract

We investigated the phase noise of an oscillator with an extremely high-Q resonator used as the resonant element. A TE_{011} mode rutile-loaded resonator with high-temperature superconductive (HTS) $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) films used as the endplates is prepared for this purpose. At 23.5 K, the unloaded Q and the loaded Q are 863000 and 180000, respectively. The phase noise of -104.8 dBc/Hz at 1 KHz offset was observed for the oscillator having a resonator with $Q_L=180000$ at the TE_{016} mode resonant frequency of 8.545 GHz at 23.5 K. Such oscillators with very low phase noise are expected to be used for building up communication systems capable of efficient use of the frequency band and high-speed data transmission as well as for Doppler radars. Frequency tuning could be realized for the resonator by using a piezoactuator. Applicability of the tunable rutile resonator for fabricating tunable oscillators of high performances is discussed.

Keywords : 발진기, 위상잡음, 고온초전도 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, 루타일 공진기.

I. 서 론

최근 들어 급격히 증가하고 있는 통신 정보량을 처리하기 위해 다양한 통신 수단이 개발되고 있고, 이와 더

불어 주파수 대역의 효율적 활용과 높은 주파수 대역에 대한 관심이 커져가고 있다.

발진기는 고주파 대역 송수신 시스템의 핵심 부품으로서 전체 시스템의 성능에 직접적인 영향을 미치므로 우수한 성능을 지닌 발진기의 개발은 보다 고성능의 고주파 통신 시스템 개발을 위한 필수 조건이라 할 수 있다.

발진기의 성능을 평가하는 위상잡음 ($L(f_m)$)은 offset 주파수 f_m 에서 발진기를 구성하는 공진부의 loaded Q (Q_L)에 의존하는데 $L(f_m)$ 과 (Q_L)의 일반적인 관계는 식

* 정희원, 건국대학교 물리학과
(Department of Physics, Konkuk University)

** 정희원, 건국대학교 전자공학과, + 교신저자
(Department of Electronic engineering, Konkuk University)

접수일자: 2005년2월17일, 수정완료일: 2005년7월11일

(1)과 같이 주어진다^[1,2].

$$L(f_m) = 10 \log \left(\frac{GfkT}{P} \left(1 + \frac{f_0^2}{4Q_L^2 f_m^2} \left(1 + \frac{f_c}{f_m} \right) \right) \right) \quad (1)$$

여기서 G, P, T, F 및 f_c 는 각각 발진기를 구성하는 증폭기의 이득(gain), 출력(output power), 온도, 잡음지수(noise figure) 및 $1/f$ noise의 corner 주파수이며 f_0 는 공진기의 공진 주파수이다.

X-band 대역의 주파수에서 microstrip GaAs FET 발진기는 10 kHz offset에서 대략 -65 dBc/Hz 정도의 위상잡음을 지니는데, 보다 높은 Q를 지닌 유전체 공진기를 사용할 경우, 같은 offset에서 위상잡음은 -95 dBc/Hz 정도로 크게 개선될 수 있다^[3]. 이는 발진기의 잡음특성이 공진부의 Q값과 관계가 있다는 것을 말한다.

보다 작은 노이즈를 갖는 발진기의 개발을 위해 10^5 이상의 Q값을 가지는 공진기를 발진기 회로에 적용시키는 연구가 이미 여러 차례 수행된 바 있는데, 이 중 대표적인 것으로 77 K, 10 GHz에서 표면저항이 무산소구리 (oxygen-free high purity copper)의 1/100 - 1/50 인 고온초전도 YBCO 박막을 공진기에 사용하거나^[2,4,5,6,7] 또는 whispering-gallery 모드와 같은 특별한 공진 모드를 사용하는 경우가 알려져 있다^[8].

본 논문에서는 고온초전도 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) 박막이 사용된 high-Q 루타일(rutile) 공진기(여기서는 'YBCO-루타일 공진기'라 함)의 전송 모드가 발진기 회로에 이용된 경우 발진기가 지니는 노이즈 특성 및 주파수 튜닝 특성을 시뮬레이션 및 실제 실험을 통하여 연구하였다. 지금까지 고온초전도 YBCO 박막이 사용된 고성능 유전체 공진기의 제작에는 저온에서 10^{-9} 정도의 매우 작은 loss tangent ($\tan\delta$)를 지니고 유전상수가 9.4 정도인 c-cut 사파이어가 사용되거나 $\tan\delta$ 가 10^{-5} 정도이고 유전상수가 24.5 정도인 LaAlO_3 가 사용된 바 있다^[2]. 참고로 루타일(루타일상의 TiO_2 단결정 유전체를 줄여 표현한 것임)은 저온에서 110 이상의 매우 큰 유전상수를 지니고 10^{-7} 이하의 상당히 작은 $\tan\delta$ 를 지니고 있어서 공진기의 높은 Q와 큰 tuning 범위를 동시에 구현할 수 있는 유전체라는 점에서 많은 연구자들의 관심을 끄는 물질이다.

II. High-Q YBCO 유전체 공진기

그림 1은 윗면과 아랫면에 고온초전도 YBCO 박막을

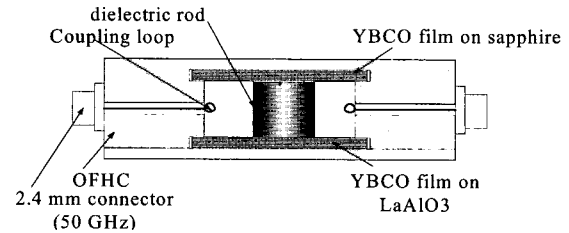


그림 1. 고온초전도 YBCO-유전체 공진기의 개략도
Fig. 1. A diagram of a YBCO dielectric resonator.

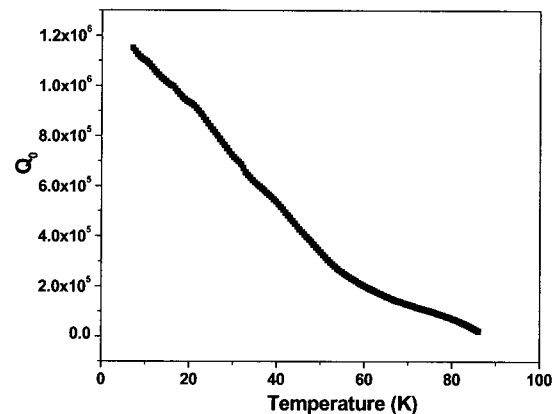


그림 2. YBCO-루타일 공진기의 온도에 따른 TE_{016} 모드 Q_0 의 변화

Fig. 2. TE_{016} mode Q_0 vs. T data at ~8.5 GHz for the rutile resonator with YBCO endplates.

사용하여 매우 큰 Q를 갖도록 제작된 원통형 cavity 공진기의 개략도이다. 공진기의 본체는 고순도 무산소동 (Oxygen-Free High-purity Copper)으로 제작되었는데, 아랫면에 고정된 유전체는 두 개의 YBCO 박막 사이에 놓여있다.

그림 2는 제작된 공진기의 unloaded Q (Q_0)를 온도의 변화에 따라 측정한 결과이다. 측정을 위하여 공진기는 냉각 chamber내의 cold finger에 고정 되었으며, 유전체로는 루타일(rutile-phase TiO_2)이 사용된 유전체 공진기의 TE_{016} 모드 Q를 측정 하였다.

사용된 루타일은 높이가 2.73mm, 지름이 3.88mm 이며 cavity의 직경은 9 mm이다. YBCO 박막의 임계온도 (87K) 이하에서 TE_{016} 모드 공진주파수는 약 8.54 GHz로서, 측정 시 YBCO 박막의 간격은 상온에서 2.83mm로 고정되어 있다.

측정결과 YBCO 박막이 안정적으로 초전도 상태를 유지하는 온도(60K)에서의 Q_0 는 약 200000인 것으로 관측되었다.

III. 발진기 설계 및 시뮬레이션

그림 3은 간단한 귀환회로가 사용된 발진기의 개략도이다. 발진기 회로는 증폭기, 위상변위기(phase shifter), 공진기로 구성되어있으며 각각의 부품은 동축 전송선(coaxial transmission line)으로 연결되었다.

본 발진기는 공진기의 전송 모드가 다시 증폭기의 입력단으로 귀환되는 구조를 지니고 있는데, 측정시 방향성 결합기(directional coupler)에서 출력된 신호를 spectrum analyzer 에 입력하였다.

발진기의 시뮬레이션은 Ansoft사의 "Serenade"를 이용하여 수행하였는데, 회로의 구도로는 앞에서 언급한 귀환회로가 사용되었다. 그림 4는 시뮬레이션용으로 설계된 증폭기에 대한 시뮬레이션 결과이다. Agilent사의 ATF-13736 라이브러리를 사용하여 설계한 3단 증폭기는 저온에서 YBCO-루타일 공진기의 TE₀₁₆모드 주파수인 8.5 GHz 대역에서 약 20 dB의 소신호 이득을 갖도록 설계하였으며 잡음 레벨은 1.5 dB이다.

그림 4의 inset은 실제 실험에 사용한 Agilent사의 8349B 증폭기의 소신호 이득으로 8.5 GHz 대역에서 약 25 dB의 이득을 나타내며, 시뮬레이션에서 사용한 증폭기보다 넓은 주파수 영역에서 20 dB이상의 이득특성을 나타내고 있다.

시뮬레이션을 위한 공진기의 특성으로는 실제 저온에서 측정된 YBCO 공진기의 S-parameter 측정결과가 이용되었다. 증폭기의 이득을 고려하여 YBCO-루타일 공진기의 삽입손실은 -20 dB 정도로 하였는데, 이때 측정된 YBCO-루타일 공진기의 Q_L은 163000이다. 위상변위기는 시뮬레이션 프로그램에서 제공하는 것을 사용하였는데 신호의 손실 없이 단순히 각도만 조절하도록 되어 있다. 방향성 결합기는 strip line형태로 8.6 GHz에서 -13 dB의 커플링 크기를 지니도록 설계되었는데, 제작된 방향성 결합기의 특성은 시뮬레이션 결과가 거의 같음을 확인하였다.

그림 5는 Q_L=163000의 YBCO-루타일 공진기 데이터를 이용하여 발진기의 위상잡음을 시뮬레이션으로 구한 결과이다. 이 그림에서 위상잡음은 100 Hz offset에서 가장 작은 값이 -123 dBc/Hz임을 알 수 있다. 발진이 일어나는 위상 범위 내에서 위상잡음은 위상변위기의 위상잡음에 따라 매우 민감하게 변화하였으며, 정확한 시뮬레이션을 위하여 위상값의 변화폭을 0.1°의 매우 작은 값으로 하였다.

표 1은 위상변위기의 값에 따른 발진기의 위상잡음

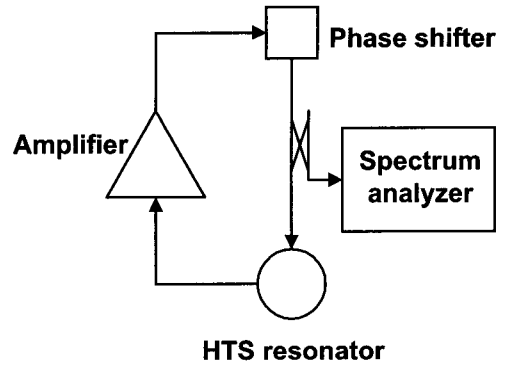


그림 3. 공진기의 전송 모드가 사용된 발진기의 개략도

Fig. 3. A diagram of an oscillator with a resonator in the transmission mode.

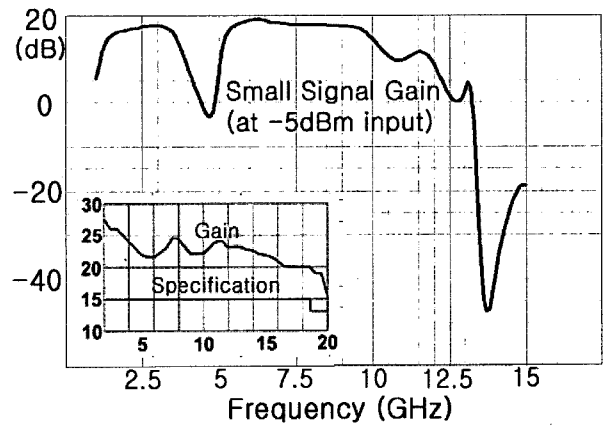


그림 4. 시뮬레이션을 위해 사용된 증폭기의 이득 특성

Fig. 4. Small signal gain of the amplifier used for computer simulation.

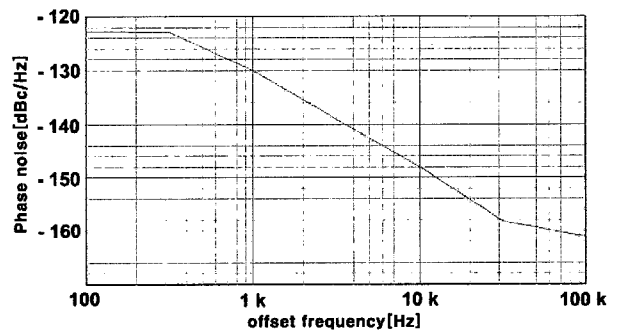


그림 5. Q_L=163000의 YBCO-루타일 공진기가 설치된 발진기의 위상잡음 대 offset 주파수의 시뮬레이션 결과

Fig. 5. Simulated result for the phase noise versus the offset frequency data for an oscillator having a resonator with Q_L=163000.

의 시뮬레이션결과를 정리한 것이다. 표에서phase는 위상변위기의 입력 값이며, noise (dBc/Hz 단위)는 100 Hz offset에서의 값이다.

표 1. 발진기의 위상잡음 시뮬레이션 결과 B.E. 는 harmonic balance error를 의미한다

Table 1. Simulated results for the phase noise of our oscillator. Here B.E. denotes the harmonic balance error.

$f_0 = 8.545 \text{ GHz } (Q_L=163000)$			
phase	noise	phase	noise
301	-25	301.8	-54
301.1	-19	301.9	-54
301.2	-42	302	-122
301.3	-28	302.1	-123
301.4	-51	302.2	-51
301.5	-50	302.3	-51
301.6	-50	302.4	B.E
301.7	-108	302.5	-48

표 2. 주파수 튜닝에 따른 발진기의 위상잡음 시뮬레이션 결과 B.E는 harmonic balance error를 의미한다

Table 2. Simulated results for phase noise of frequency tuned oscillator. Here B.E. denotes the harmonic balance error.

$f_0 = 8.345 \text{ GHz}$		$f_0 = 7.995 \text{ GHz}$	
phase	noise	phase	noise
122	B.E	208	-58
123	B.E	209	B.E
124	-55	210	B.E
125	B.E	211	-58
126	B.E	212	B.E
127	-131	213	-120
128	B.E	214	B.E
129	B.E	215	B.E

표 1에서 발진기의 발진이 예상대로 공진기의 공진주파수 f_0 (8.545 GHz)에서 일어남을 확인 할 수 있다. 잡음 값은 위상변위기의 값에 따라 -19dBc/Hz 에서 -123dBc/Hz 사이의 큰 변화폭을 보이는데 이 결과는 본 실험에서와 같이 매우 큰 Q 의 공진기가 사용될 경우 0.1° 단위까지 조절되는 정밀한 위상변위기가 필요하게 됨을 보여준다.

표 2는 발진기의 주파수 튜닝에 대한 시뮬레이션 결과로서 $Q_L=163000$ 의 YBCO-루타일 공진기의 공진 주파수를 각각 200 MHz, 550 MHz 변화시킨 경우에 대한 것이다.

위상변위기의 값을 1° 씩 변화시키면서 위상잡음을 구한 결과 발진 주파수가 수백 MHz 이동한 상태에서도 위상잡음은 100 Hz offset에서 각각 -131dBc/Hz , -120dBc/Hz 로 매우 작은 값을 가지게 됨을 알 수 있다.

IV. 실험장치

발진기의 위상잡음의 개선정도를 확인하기 위하여 상온에서 Q_L (3500)을 갖는 무산소동 루타일 공진기와 저온에서 높은 Q_L (180000)을 갖는 YBCO-루타일 공진기를 발진기 회로에 번갈아 연결하고 발진 스펙트럼을 비교 하였다.

그림 6(a)-(c)은 측정을 위해 발진기가 설치된 모습을 보여준다 (냉각장치 내에 설치된 YBCO-루타일 공진기는 그림 7에서 볼 수 있는데, 이 공진기는 SMA 커넥터용 adapter를 통하여 냉각장치의 외부와 연결되어 있다.). YBCO-루타일 공진기를 제외한 증폭기(①), 위상변위기(②), 방향성 결합기(③) 등은 상온에서 동작하게 되어있다. 그림 6(a)는 스펙트럼 분석기까지 포함된 전체 모습을 보여주는데, 측정에 사용한 스펙트럼 분석기는 Agilent사의 제품 (model E4440A)이다. 그림 6(b)와 6(c)는 냉각장치 내의 공진기가 외부의 증폭기에 전송선으로 연결된 모습과 발진기 회로 내의 위상변위기와 방향성 결합기의 모습을 각각 보여준다.

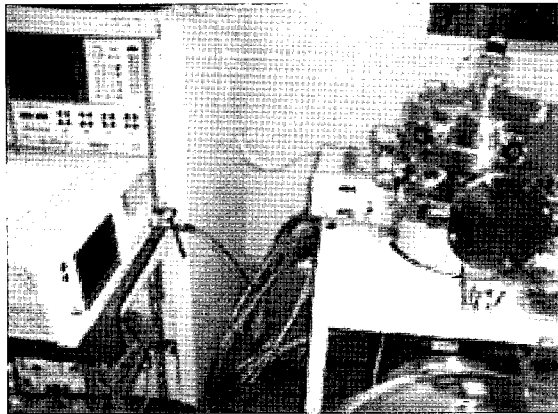
그림 7은 냉각장치 내에 설치된 YBCO-루타일 공진기의 사진으로 공진기는 냉각장치 내의 'cold finger' (가장 온도가 낮은 부분)에 고정 되어있으며 냉각장치의 작동 시 공진기는 진공상태에 놓인다. YBCO-루타일 공진기의 냉각은 무산소동 전선의 다발을 'cold finger'와 공진기에 연결함으로써 구현할 수 있다.

V. 결 과

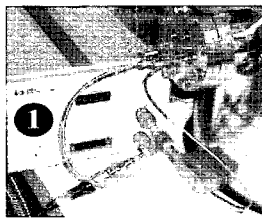
그림 8은 저온인 23.6 K에서 측정된 YBCO-루타일 공진기의 S_{21} data이다. 발진기를 구성하는 소자들의 신호 손실 및 증폭기의 이득을 고려하여 YBCO-루타일 공진기는 삽입손실이 -15dB 정도가 되도록 외부회로에 연결되어 있다. 이 YBCO-루타일 공진기의 상온에서의 공진주파수와 Q_L 은 각각 8.32 GHz와 3500 이고, 23.6K에서의 값은 각각 8.526 GHz 와 180000 이다.

그림 9는 YBCO-루타일 공진기의 Q_L 값에 따른 발진 스펙트럼을 비교한 결과이다. 측정을 위하여 스펙트럼 분석기의 RBW와 VBW의 비는 1:1로 고정하고 auto 모드를 이용하였다. 또한 $Q_L=180000$ 의 YBCO-루타일 공진기가 연결된 경우 20 kHz의 span으로 측정하였으며, $Q_L=3500$ 의 YBCO-루타일 공진기가 사용된 경우 100kHz의 span으로 측정하였다.

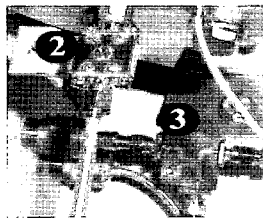
그림 9(a)와 9(b)에 나타난 결과로부터 span의 차이



(a)



(b)



(c)

그림 6. (a) 설치된 발진기 사진 (b) 냉각장치 내의 공진기와 외부의 증폭기(1)가 연결된 모습 (c) 발진기 회로에 연결된 방향성 결합기(3)와 위상변위기(2)의 모습

Fig. 6. (a) The oscillator circuit with a YBCO rutile resonator. (b) Amplifier(1) connected to the YBCO rutile resonator placed inside the cryostat. (c) The directional coupler(3) and phase shifter(2) in the circuit.

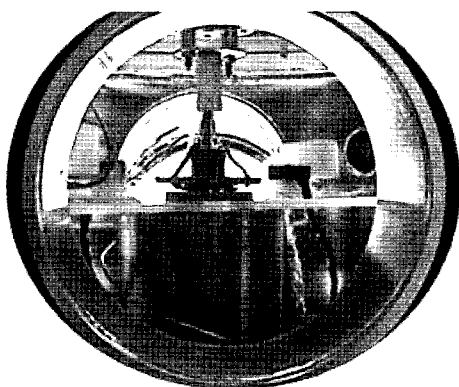


그림 7. 냉각 chamber 내에 설치된 YBCO-루타일 공진기

Fig. 7. A view of the YBCO rutile resonator placed on top of the cold finger inside the cryostat.

가 5배임에도 불구하고 측정된 신호의 폭은 거의 비슷한 것을 알 수 있는데, 이로부터 YBCO-루타일 공진기

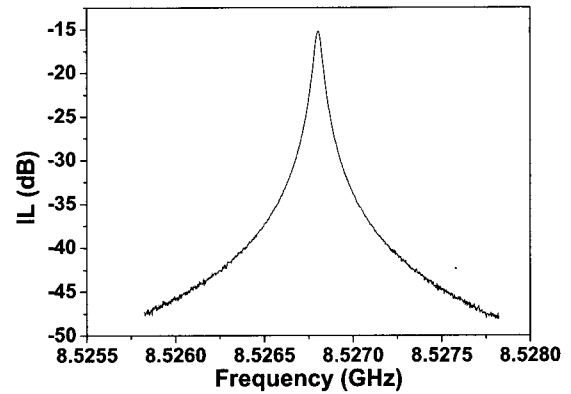


그림 8. 23.6 K에서 측정된 YBCO 루타일 공진기의 S₂₁ data (Q_L=180000)

Fig. 8. Measured S₂₁ data for the YBCO rutile resonator with Q_L=180000 at 23.6 K.

가 사용된 발진기의 특성이 무산소동 루타일 공진기가 사용된 발진기에 비해 상당히 우수함을 알 수 있다.

이 실험 결과와 아래의 식 (2)를 이용하면 발진기의 위상잡음을 간접적으로 구할 수 있다^[9].

$$\text{위상잡음} = \Delta\text{amplitude} - 10\log(\text{RBW}) \quad (2)$$

여기서 $\Delta\text{amplitude}$ 는 peak 주파수와 offset 주파수에서의 발진 신호의 진폭 차이를 나타내며, 'RBW'는 스펙트럼 분석기의 측정 시 사용된 resolution band width를 의미한다.

그림 10(a)와 10(b)는 그림 9에 제시한 발진기 스펙트럼을 정확한 계산을 위해 Lorentzian fit을 한 결과인데, offset 주파수에서의 발진 신호의 진폭은 fitting을 통해 구한 값이 사용되었다.

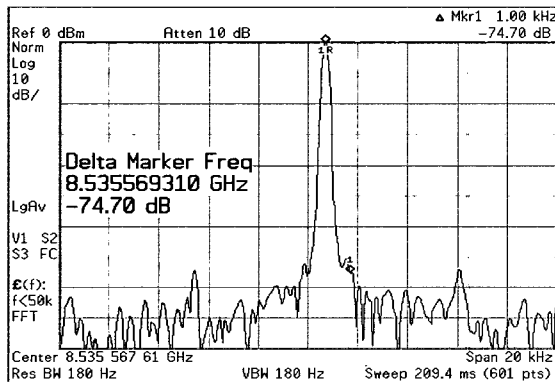
그림 10(a)는 Q_L=180000인 YBCO-루타일 공진기가 사용된 발진기의 측정결과인데 신호의 peak와 1 kHz offset에서의 발진 신호의 진폭 차이는 -82.2 dBc 이고 이때 스펙트럼 분석기의 RBW 값은 180 Hz 였다. 이 값들과 식 (2)를 이용하여 구한 위상잡음은 -104.8 dBc/Hz 이다.

그림 10(b)는 Q_L=3500인 무산소동 루타일 공진기가 사용된 발진기의 측정 결과인데 발진 신호의 peak와 10 kHz offset에서의 진폭의 차이는 -79.6 dBc 이고 이때 스펙트럼 분석기의 RBW는 910 Hz 이다. 이 값들은 식 (2)에 대입하여 10 kHz offset에서의 위상잡음은 -109.8 dBc/Hz이다.

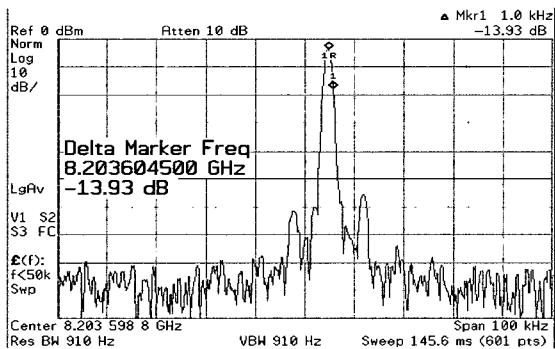
발진기의 튜닝 실험은 공진기의 윗면에 연결된 piezo actuator를 사용하여 루타일과 공진기의 윗면 간의 거

리를 변화시켜서 루타일 공진기의 공진주파수를 변화시 방법으로 행하였는데, 그림 11은 piezo actuator에 인가된 전압 변화에 따른 발진기의 주파수 변화를 상온에서 측정된 결과이다. 상온에서의 실험 시 YBCO 박막의 표면저항이 구리에 비해 매우 큰 값을 지님을 고려하여 YBCO 박막 대신 무산소동이 사용되었다. 그림 11은 piezo actuator에 인가된 전압이 120 V에서 130 V로 바뀔 경우 발진기의 주파수가 8.311 GHz에서 8.366 GHz로 55 MHz 정도 변화하는 모습을 보여준다. 참고로 루타일의 유전상수가 상온에서 약 85 정도이고 저온에서 110 이상임을 고려할 때 piezo actuator에 인가된 같은 정도의 전압변화에 대해 저온에서는 55 MHz 이상의 튜닝이 가능하게 될 것으로 기대된다. 본 실험에는 위상변화의 범위가 0° ~ 140° 인 위상 변위기가 사용되었다.

위의 실험결과는 piezo actuator가 결합된 루타일 공진기를 사용할 경우 piezo actuator에 인가된 전압을 변화시키면서 발진기의 주파수를 크게 변화시킬 수 있음



(a)



(b)

그림 9. Q_L값에 따른 발진 신호의 비교:
(a) Q_L=180000, (b) Q_L=3500

Fig. 9. Measured oscillator signal with a rutile resonator having (a) Q_L=180000 and (b) Q_L=3500, respectively.

을 보여주는데, 아직 이러한 발진기의 주파수 튜닝을 전자식으로 구현한 실험결과는 보고된 바 없다. 또한 표 1과 표 2에 기술된 시뮬레이션 결과는 본 실험에 사용된 발진기의 전자식 튜닝을 구현하기 위해서는 전압으로 조절되는 고성능 위상변위기가 필수적으로 사용되어야 함을 보여주는데, 향후 이러한 위상변위기를 사용하여 저온에서 전자식으로 발진기의 주파수를 변화시키는 연구가 행해질 계획이다.

VI. 결 론

Unloaded Q가 매우 큰 고온초전도 YBCO-루타일 공진기를 제작하여 그 특성을 연구하고 이 공진기가 사용

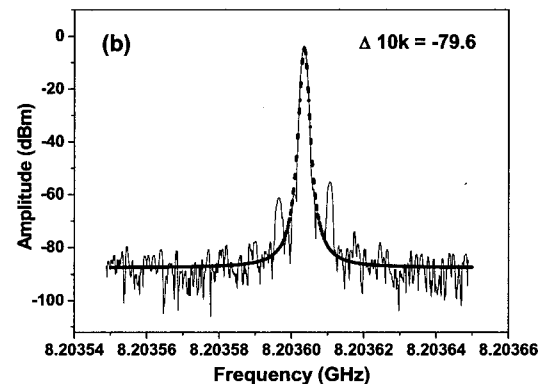
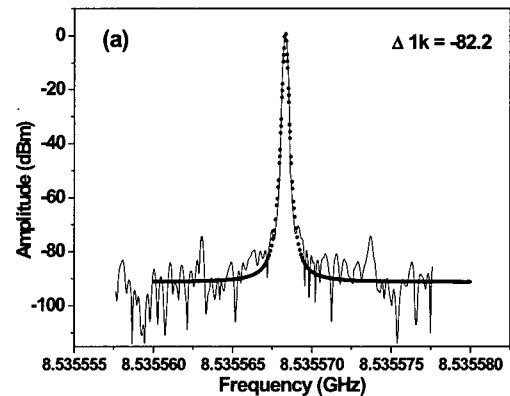


그림 10. 위상잡음 계산을 위한 Lorentzian fit (점선) 결과와 계산 결과 구한 위상잡음은 (a)의 경우 -104.8 dBc/Hz(1 kHz offset) 이고, (b)의 경우 -109.2 dBc/Hz (10 kHz offset) 이다

Fig. 10. Results from the Lorentzian fit (dot line) for the measured oscillator signal. The calculated results for the phase noise are (a) -104.8 dBc/Hz (1 kHz offset) and (b) -109.2 dBc/Hz (10 kHz offset), respectively.

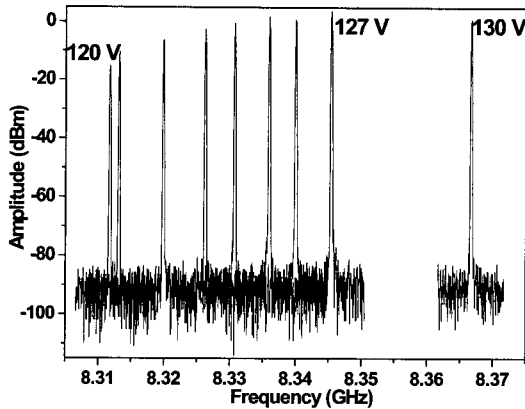


그림 11. 상온에서의 발진기의 주파수 튜닝특성.
Piezo actuator에 인가된 전압의 크기가 120 - 130 V인 경우이다.

Fig. 11. Frequency spectrum of tunable oscillator at room temperature for the voltages of 120-130 V applied to the piezo actuator.

된 발진기의 저온에서의 위상잡음 특성을 시뮬레이션 및 실험을 통하여 측정 하였다.

발진기의 특성은 고온초전도 YBCO-루타일 공진기만 저온에서 작동하고 증폭기를 포함한 나머지 부분은 상온에서 작동하는 상태로 측정되었는데, 사용된 공진기의 23.5 K에서의 TE₀₁₆ 모드 Q_L은 약 180000 이다. 측정결과 1 kHz offset 주파수에서 발진기의 위상잡음은 -104.8 dBc/Hz의 매우 작은 값을 지니는 것으로 관측되었다. 공진기 제작 시 사용된 루타일의 유전상수가 77 K 이하의 온도에서 100 이상의 매우 큰 값을 지니서 공진기의 구조 변화에 따른 공진주파수의 의존성이 크다는 사실을 고려할 때, 본 연구에서 사용된 고온초전도 YBCO-루타일 공진기와 360° 이상의 위상변위 범위를 가지는 전자식 위상변위기를 사용할 경우 향후 위상잡음이 매우 작으면서도 주파수 튜닝 범위가 큰 발진기의 제작도 실현될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] D. B. Leeson, "A simple model of feedback oscillator noise spectrum", *Proc. IEEE*, Vol. 54, pp. 329-330, February 1966.
 [2] I. S. Ghosh, N. Tellmann, D. Scholen and N. Klein, "Low phase noise microwave oscillator based on HTS shielded dielectric resonator", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 7, No. 2, pp. 3071-3074, June 1997 ;

Indra S. Ghosh, Detlev Schemion, Norbert Klein, "Temperature Compensated High-Q Dielectric Resonator for Long Term Stable Low Phase Noise Oscillator" *IEEE Int. Frequency Control Symposium*, pp. 1024-1029, 1997.
 [3] Zvi Galani, Michael J. Bianchini, Raymond C. Waterman, Jr., Robert Dibiase, Richard W. Laton and J. Bradford Cole, "Analysis and design of a single-resonator GaAs FET oscillator with noise degeneration", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 32, No. 12, pp. 1556-1565, December 1984.
 [4] J. H. Lee, W. I. Yang, M. J. Kim, J. C. Booth, K. Leong, S. Schima, David Rudman, and S. Y. Lee, "Accurate measurements of the intrinsic surface impedance of thin YBa₂Cu₃O_{7-δ} Films using a modified two-tone resonator method", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol. 15, No. 2, pp. 3700-3705, June 2005.
 [5] J. H. Lee, J. Lim, S. H. Moon, J. H. Yoon, Y. H. Choi, B. Oh, and Sang Young Lee, "Microwave Properties of Large YBCO Films on As-prepared and Annealed MgO Substrates", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 13 (2), pp. 2875-2878, June 2003.
 [6] Jung Hun Lee, J. S. Ryu, J H Lee, J. Lim, S. H. Moon, B. Oh and Sang Young Lee, "Measurements of the Loss Tangent of Rutile Using an Extremely High-Q Sapphire-loaded Cavity Resonator with YBa₂Cu₃O_{7-δ} Endplates", *J. Korean Phys. Soc.*, vol.39(6), pp.1065-1071, December 2001.
 [7] N. Klein, N. Tellmann, U. Dähne, A. Scholen, H. Schulz, G. Höfer and H. Kratz, "YBCO shielded LaAlO₃ dielectric resonator for stable oscillator", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 5, No. 2, pp. 2663- 2666, June 1995.
 [8] S. Vitusevich, M. Winter and N. Klein, "Cryogenic high-Q microwave resonators for stable oscillators", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 11, No. 1, pp. 1195-1198, March 2001.
 [9] Cynthia L. Baker, "Introduction to Single Chip Microwave PLLs", *National Semiconductor Application Note 885*, 1995.

저 자 소 개



양 우 일(정회원)
1998년 상지대학교
물리학과 학사 졸업.
2000년 건국대학교
물리학과 석사 졸업.
2005년 현재 건국대학교
물리학과 박사 과정.

<주관심분야 : 고온초전도체의 고주파 응용분야,
초전도체 박막제작 및 고주파소자의 제작>



이 재 훈(정회원)
1997년 건국대학교
물리학과 학사 졸업.
1999년 건국대학교
물리학과 석사 졸업.
2005년 현재 건국대학교
물리학과 박사 과정..

<주관심분야 : 고온초전도체의 마이크로파소자
응용 및 특성 평가, 고온초전도체-유전체 접합을
이용한 고주파소자 응용, 초전도체 박막 및 고주
파소자의 제작>



허 정(정회원)
1981년 서울대학교
전자공학과 학사 졸업.
1983년 서울대학교
전자공학과 석사 졸업.
1991년 서울대학교
전자공학과 박사 졸업.

1991년~현재 건국대학교 전자공학부 교수
<주관심분야 : 안테나, 전파통신, 초전도통신소자,
무선전원>



이 상 영(정회원)
1979년 서울대학교
물리학과 학사 졸업.
1987년 오하이오주립대학교
물리학과 박사 (Ph.D.).
1987년~1992년 한국과학기술
연구원 선임연구원

1992년~현재 건국대학교 물리학과 교수
2002년~2003년 미국 NIST 객원연구원
2003년~현재 IEC TC-90 Co-convenor.
1999년~현재 한국초전도학회 편집이사
<주관심분야 : 초전도체, 초전도 통신소자, 초전
도체 및 유전체 저온특성 평가, 무선전원>