

초전도 디바이스를 사용한 테라헤르츠파 검출기

Terahertz Detector Using Superconductor Device

강광용 (K.Y. Kang)	테라전자소자팀 책임연구원
백문철 (M.C. Paek)	테라전자소자팀 책임연구원
곽민환 (M.H. Kwak)	테라전자소자팀 선임연구원
강철 (C. Kang)	테라전자소자팀 선임연구원

목 차

-
- I. 서론
 - II. SIS 혼합기
 - III. 열전자 볼로미터 혼합기
 - IV. 펨토초레이저와 고온초전도체를 이용한 테라헤르츠파의 발생
 - V. 결론

조셉슨 터널접합을 사용한 초전도 혼합기 또는 믹서(SIS mixer)와 매우 얇은 초전도 박막을 이용한 초전도 혼합기(HEB mixer)는 초전도 현상에 있어서의 거시적 양자효과를 유발하는 강한 비선형성을 가지기 때문에, 종래의 전자파 검출기로는 구현이 어렵고 또한 극도로 낮은 잡음특성을 실현한다. 테라헤르츠(THz) 주파수 영역용 고감도 검출기로서도 기대되는 질화니오븀(NbN) 박막을 사용한 SIS 혼합기와 HEB 혼합기의 개발현황과 연구결과에 대하여 소개하고자 한다. 그리고 최근에 많이 연구되고 있는 펨토초레이저와 고온초전도 상호작용을 이용한 테라헤르츠 연구결과도 소개한다.

I. 서론

초전도 SIS 혼합기 또는 믹서는 초전도 터널(관통) 접합(junction)에 있어서, 준입자(準粒子; quasi-particle) 터널 전류의 강한 비선형성을 이용하기 때문에 고전적 반도체보다 고변환효율 및 극저 잡음으로 직접검파(直接檢波) 및 헤테로다인 믹싱(heterodyne mixing)을 수행하여, 밀리미터파 및 서브-밀리미터파 대역에 있어서의 고감도 혼합기로서 전파천문과 지구환경계측 등의 분야에 사용되고 있다. 그러나 SIS 혼합기의 동작주파수 상한값은 전자파 전송선로로 사용되고 있는 초전도재료의 고유변수(파라미터)인 갭(gap) 주파수(f_g)에 의하여 제한된다는 단점이 있다. 예를 들면, 현재 주로 사용되고 있는 금속 나오비움(Nb)의 갭 주파수는 700GHz이기 때문에, 그 이상의 주파수에서는 전자쌍의 파괴(pair breaking)에 의하여 전자파 전송 선로의 손실이 증대하므로 수신기의 잡음온도도 급격하게 증가한다[1].

700GHz 이상의 테라헤르츠(THz) 대역용 저잡음 수신기를 제작하기 위해서는 두 가지 접근 방법이 있다. 하나는 SIS 혼합기에 있어서 높은 갭 주파수(높은 임계온도(T_c))를 가지는 초전도 재료의 사용 방법이 있지만, 높은 T_c 를 가지는 초전도 재료는 합금이 아닌 화합물과 산화물이기 때문에 Nb와 같이 양호한 초전도 특성을 가지는 다층박막(多層薄膜)의 성장과 고품질 터널링 접합의 제작이 어렵다.

한편 SIS 혼합기는 초전도체-절연체-초전도체의 샌드위치 구조로 되며, 혼합기 소자 자체의 상전도 저항(常傳導 抵抗; R_N)과 접합용량(接合容量; C_J)과의 곱에 의하여 결정되는 차단(遮斷) 주파수 값을 높이기 위해서는 전극재료의 T_c 값을 높임과 동시에 10^4A/cm^2 이상의 임계전류밀도($J_c \sim 1/R_N C_J$)를 가지는 소자가 필요하다. 아울러, 동작주파수를 올림에 따라서 도파관의 크기도 감소시켜야 하기 때문에, 혼합기-칩 제작과 도파관 실장(實裝; 마운트)도 어려워진다. 두번째 접근방법은 원리적으로 초전도 갭 주파수의 제한을 받지 않는 열-전자 볼로미터

(HEB)형 혼합기가 최근에 제안되어, THz 대역용 SIS 혼합기를 대체할 수 있는 저잡음 혼합기 소자로서 주목을 받고 있다. HEB 혼합기는 최근 수 년간 THz 대역의 저잡음 동작에 성공한 보고도 있고 대단한 발전이 있지만[2],[3], IF 대역폭이 좁고 SIS 혼합기에 필적하는 성능은 아직 얻어지지 않고 있다.

THz 대역에서 동작하는 초전도 재료로서, Nb 보다 2배 이상 높은 임계온도(T_c) 값을 가지는 질화나오비움(NbN)이 기대를 모으고 있지만, NbN의 초전도 가간섭 길이(coherence length)가 짧은 것과 박막 및 접합특성이 박막자체의 결정구조에 강하게 의존하기 때문에 고품질 박막, 터널링 접합 및 동조회로 등 주변회로를 제작하는 것이 어렵다. 최근 수 년간 Nb의 갭 주파수를 증가하는 THz 대역용 SIS 혼합기를 구현하고자, NbN과 동일한 결정구조를 가지는 단결정 산화마그네슘(MgO) 기판을 사용한 NbN 단결정 박막의 에피택셜 성장[4], 질화알루미늄(AlN)과 MgO 터널링 장벽(barrier)을 사용한 고임계전류밀도(J_c) 뿐만 아니라 고품질이 가능한 터널링 접합[5],[6], 광대역 동조회로와 MgO 기판을 사용하여 도파관을 실장하는 기술 등을 개발하여 왔다[7]. 또한, NbN SIS 혼합기보다 더욱 높은 주파수에서 동작하는 혼합기 소자로서 NbN 기반의 초박막 및 고품질의 박막을 사용한 HEB 혼합기의 연구 개발을 수행하여, THz 대역에서의 저잡음 동작을 실현하였다[8],[9].

● 용어해설 ●

혼합기(mixer): 두 입력신호의 합(合) 또는 차(差) 주파수로 구성된 출력스펙트럼을 발생·검출하기 위하여 다이오드의 비선형성을 이용하는 부품임. 100GHz 이하의 대역에서는 주로 HEMT를 이용한 저잡음 기본파 혼합기가 사용되었고, 이 이상의 주파수 대역에서는 잡음특성이 양호한 다이오드(조셉슨 접합도 다이오드임)가 사용됨. 특히, 100GHz 이상의 주파수 대역에서 사용하는 송·수신기 개발에서는 충분한 전력을 가지는 고안정도의 국부발진기(local oscillator)를 얻기가 어렵다. 따라서 낮은 주파수 대역용 국부발진기를 이용하는 고조파 혼합기(MMIC 기술을 포함함)가 유효한 것으로 알려져 있다.

한편, 최근에는 펨토초레이저 기술, 반도체 및 고온초전도체와 관련된 신기술을 사용하여 THz 기술을 한층 더 발전시켰다.

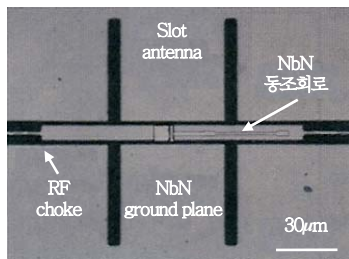
II. SIS 혼합기

1. 준(準)광학 혼합기

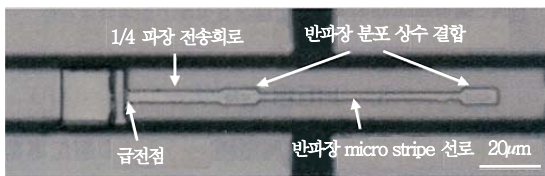
SIS 혼합기 제작에 사용된 터널링 접합은 구조상 큰 정전용량을 갖고 있어서, 접합 자체로서는 고주파 신호를 단락(短絡: short)한다. 따라서 입력 신호를 접합에 효율적으로 결합시키기 위해서는 접합 크기를 줄이고, 또한 접합용량을 제거하기 위하여 동조회로를 집적화할 필요가 있다. 한 가지 방법으로 분포정수형(distributed element type) 터널링 접합의 성질을 이용하여, 여러 개의 공진회로를 사용함으로써 $1/(\omega R_N C_j)$ 보다 넓은 비대역을 달성하는 분포정수형 2-접합 동조회로가 제안되었다[7]. 분포정수형 2-접합 동조회로를 가지는 준광학형 혼합기는 입력 광학계에 무반사층을 부착한 MgO 초반구(hyper hemisphere) 렌즈와 두 개의 슬롯 안테나(twin slot antenna)로 구성된다. (그림 1a)에는 제작된 혼합기-칩의 현미경 사진을, (그림 1b)에는

그 동조회로 부분의 확대 사진을 나타내었다. 두 개의 슬롯 안테나의 급전점(feed point)은 코플래너형(coplanar type) 도파로를 이용하여 중심에 배치하였다. 중심주파수는 870GHz가 되도록 설계함에 따라, 그 부근에서의 안테나 임피던스(impedance: Z)는 약 65Ω 으로 된다. 동조 회로는 한 방향의 코플래너 도파로의 중심도체(가운데 있는 각종 회로)를 접지평면(ground plane: 중심도체 양 옆의 회로들)과 접촉하고, 안테나 임피던스와 정합시키기 위하여 1/4 파장 임피던스 변환기(impedance transformer)를 사용하여 구성한다.

제작한 혼합기의 성능은 준광학 수신기시스템을 통하여 평가하였다. (그림 2)에 분포정수형 2-접합 동조회로를 사용한 수신기의 대표적인 헤테로다인 응답특성을 나타내었다. 초전도 재료가 NbN이기 때문에, 갭 전압이 약 $5.5mV$ (1.34THz에 해당함)로 크고, 종래의 초전도 재료인 Nb 경우보다 약 2배 정도이다. 갭 전압은 SIS 접합 특유의 준입자 전류에 의한 급격한 상승이 생겨나는데, 이를 이상적인 I-V



(a)



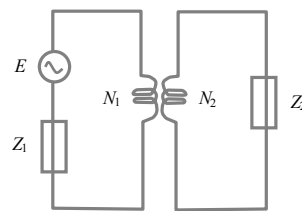
(b)

(그림 1) 준광학 NbN SIS 혼합기-칩의 광학현미경 사진(a)과 동조회로 부분의 확대사진(b)

● 용 어 해 설 ●

임피던스(impedance): 저항, 인덕턴스 및 정전용량이 어떤 특정 주파수에 미치는 복합 효과를 일컫음. 즉, 교류 회로에 가해진 교류전압(V)과 그 회로에 흐르는 교류전류(I)와의 비를 말하며, 단위로는 옴(ohm: $1/\Omega$)을 사용한다. 따라서 임피던스 Z 를 식으로 나타내면, $Z=V/I=R+jX$ 와 같다. 여기서 실수부 R 을 저항, 허수부 X 를 리액턴스라 한다. 그리고 임피던스의 역수를 어드미턴스라 한다.

임피던스 변환기(impedance transformer): 임피던스의 변환을 목적으로 하는 변환기. 내부 임피던스 Z_1 , 기전력 E 인 전원을 부하 임피던스 Z_2 와 접속할 경우에는 아래 그림과 같이 임피던스 변환기를 사용하며, 변환비율(n), $n = N_2 / N_1 = \sqrt{Z_2 / Z_1}$ 으로 하면 정합(매칭)된다.



특성이라고 부른다. 한편, 국부발진기(LO)의 주파수를 690GHz로 하여 입력시킬 경우, 갭 전압의 약 절반이 되는 위치에서 제1차 광자 유기(誘起) 터널링 스텝(계단)이 명확하게 관측된다. 임계전류밀도가 설계치보다 낮음에도 불구하고, 수신기는 295K와 77K의 흑체복사(黑體輻射) 입력에 대하여는 큰 IF 출력비를 나타내었고, 약 3.2mV의 바이어스 전압값에 대해서는 Y-인자법(admittance factor method)으로 최대의 1.81이 얻어졌다. 이것을 이용하여 계산한 양측파대(兩側波帶, DSB)의 수신기의 잡음온도는 192K로서, 양자잡음(量子雜音; hf/k_B)의 약 5.8배에 해당한다. 이 값은 NbN 접합을 사용한 SIS 수신기로 측정할 때, 이 주파수 대역에서 얻게 되는 최

고성능을 나타낸다. (그림 3)은 여러 가지 광대역 동조회로 및 임계전류밀도를 사용한 NbN SIS 혼합기의 DSB 잡음온도의 주파수 의존성을 정리한 것이다. 어떤 형태(타입)의 혼합기에서도 양자잡음 10배 이하의 저잡음 동작을 실현하고 있고, 특히 분포정수형 동조회로를 사용한 경우는 최고의 광대역 특성을 보인다.

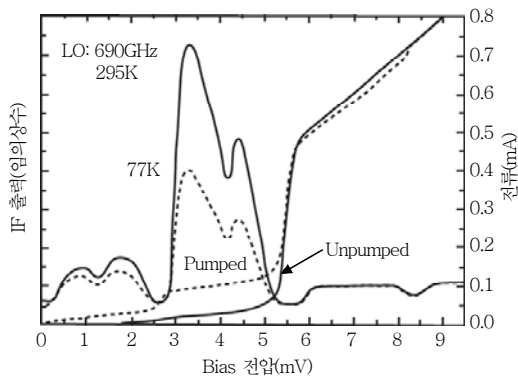
2. 도파관형 혼합기

SIS 혼합기를 수신기에 도입할 경우, 전자과 입력계의 결합효율이 가장 좋은 도파관 회로를 사용하더라도 MgO 기판의 높은 유전율 때문에 도파관 혼합기 회로의 설계가 어렵다. 특히, 기판의 두께를 아주 얇게 만들어야 하는 것($< 20\mu\text{m}$ @1THz)과 기판 크기를 매우 작게 해야 하기 때문에 기판 연마와 도파관 블록에 혼합기 소자를 실장하는 것이 상당히 어려워져 실용화에 큰 걸림돌이 되고 있다.

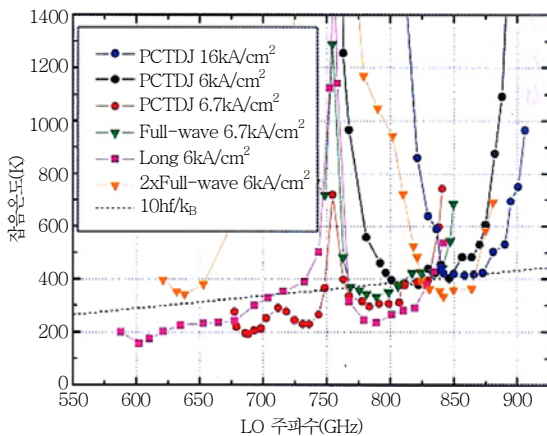
그러나 다이싱(dicing)에 의한 MgO 기판의 절삭 공정과 연마(폴리싱)에 의한 기판의 박형화 공정을 개발하고(두께를 $25\mu\text{m}$ 이하까지 얇게 만듦), MgO 기판을 사용한 도파관 실장기술도 확립하였다.

(그림 4)는 제작한 880GHz 대역 혼합기 블록의 실물(a) 및 혼합기 블록에 실장한 소자 칩(b)의 사진을 나타내고 있다. 칩사이즈는 $1 \times 0.064 \times 0.025\text{mm}^3$ 이다. 제작된 혼합기 소자는 도파관 블록에 실장한 후, 접지 및 IF 회로(50ohm 스트립라인)의 접속은 소자의 양단을 저온 왁스(wax)로 고정하고, 알루미늄(Al) 와이어 본더(wire bonder)로서 전기적 접촉(contact)을 형성하였다.

혼합기 블록은 액체 헬륨(He) 냉각기(cryostat) 내부에 설치하고, 준광학 혼합기와 마찬가지로 측정계를 통해 Y-인자법을 사용하여 수신기 잡음온도를 평가하였다. 국부발진기(LO)로는 BWO를 사용하였다. RF 신호원은 상온(295K)에서 액체질소온도(77K)까지 냉각한 전파흡수체로부터의 흑체복사를 사용하고, 두께 $25\mu\text{m}$ 의 마일라 필름에 의하여 국부발진기와 결합하여 혼합기에 입력하였다. (그림 5)에



(그림 2) 준광학 NbN SIS 혼합기의 I-V 특성과 헤테로다인 응답특성



(그림 3) 여러 가지 동조회로를 사용한 NbN SIS 혼합기의 수신기 잡음온도의 주파수 의존성

수신기 잡음온도의 국부발전기 주파수 의존성을 나타내었다. 800GHz 부근에서 1.22의 Y-인자를 나타내므로 수신기 잡음온도는 895K(DSB)라는 것을 알아냈다. 이 값은 양자잡음 한계의 약 20배 정도이지만, 도파관형 NbN 혼합기로서 세계 최초의 결과이다. 잡음온도의 주파수 의존성은 785GHz로부터 825GHz까지와 협대역(狹帶域) 특성을 보였지만,

접합의 임계전류밀도가 설계치($20\text{kA}/\text{cm}^2$)와 실측치($3\text{kA}/\text{cm}^2$)에서 큰 차이를 보이고, 접합의 특성 커패시턴스 값이 설계치의 약 1/3 정도($38\text{fF}/\mu\text{m}^2$)로 되었기 때문이다. 향후, 접합변수(parameter)와 주변회로의 최적화를 통하여 더욱 잡음을 낮출 수 있을 것으로 기대된다.

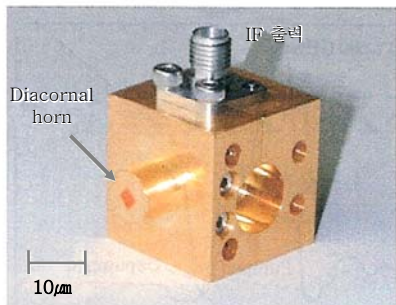
III. 열전자 볼로미터 혼합기

열전자 볼로미터(HEB) 혼합기는 두 개의 금속 전극과 그 사이의 초전도 박막 스트립(strip)으로 구성되고, 원리적으로 초전도 박막 스트립의 초전도 전이온도(T_c) 근처에서 보이는 저항값의 강한 비선형성을 이용하여 헤테로다인 믹싱을 실행한다.

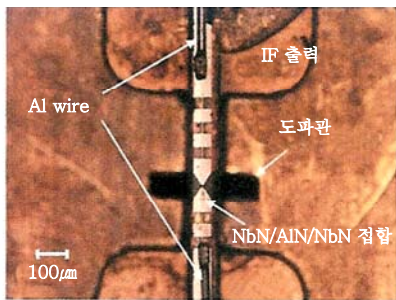
HEB 혼합기의 실용화를 위해서 해결해야 할 연구 과제의 하나로는 IF의 광대역화이다. 다시 말해, 외부 전자파의 조사(照射)에 의하여 여기된 열-전자(hot-electron)가 효율적으로 에너지를 확산하고, 초전도 전도쌍으로 재결합할 필요가 있다. 예를 들면, 포논(phonon) 냉각형 HEB 혼합기의 경우, 여기된 열-전자는 먼저 격자 간의 상호작용으로 에너지를 방출하고, 격자에 제공된 에너지는 점차 기판으로 확산된다. 이를 위하여 포논 냉각형 HEB 혼합기에 있어서 IF 대역폭을 넓히는 데는 전자-포논 완화 시간(relaxation time), τ_{e-ph} 이 짧은 초전도 재료, 다시 말하면 T_c 값이 높은 초전도 재료를 선택할 필요가 있다[10].

또한, 격자에너지를 효율적으로 기판에 확산시키기 위해서는 초전도 스트립의 박막 두께를 얇게 하고, 기판과 박막 사이의 계면(界面) 열저항을 아주 작게 해야 한다[11],[12]. 이것을 만족하는 초전도 재료로서는 현재 질화나오비움(NbN)이 가장 유력하지만, 매우 얇은 NbN 박막의 T_c 값을 높이고, 결정성을 향상시키는 연구가 HEB 혼합기의 소자 성능을 높이는 지름길(key-point)의 하나이다.

(그림 6)은 제작한 HEB 혼합기의 광학현미경 사진이다. HEB 혼합기 소자는 두 개의 금(Au) 전극

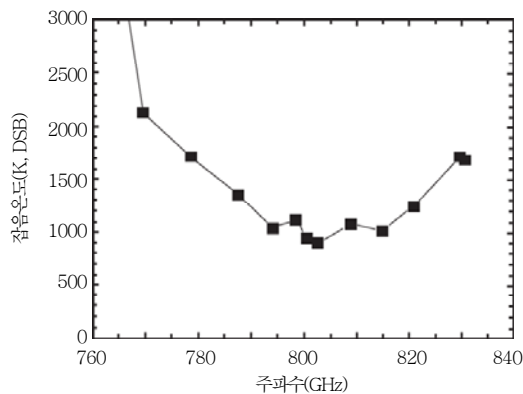


(a)

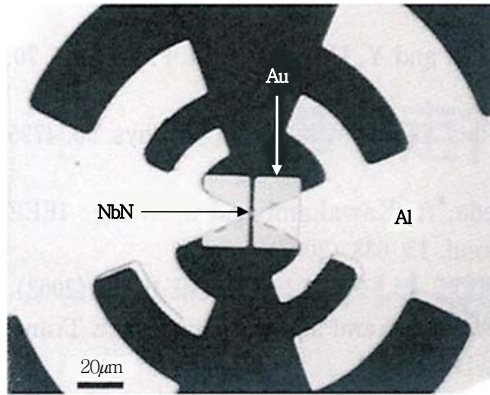


(b)

(그림 4) 880GHz 대역용 도파관형 SIS 혼합기 블록(a) 과 실장한 칩의 광학현미경 사진(b)



(그림 5) 도파관형 NbN SIS 수신기 잡음온도의 주파수 의존성



(그림 6) NbN HEB 혼합기의 광학 현미경 사진

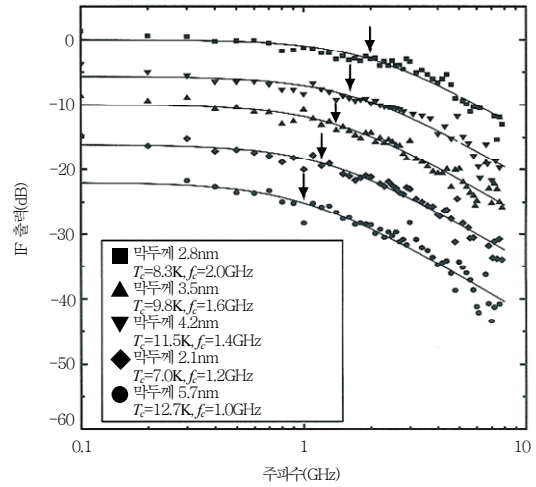
부위와 그 사이의 초전도 NbN 마이크로스트립으로 구성되며, 외부 전자파를 효율적으로 입사시키기 위하여 Al 박막으로 구현한 대수 주기 안테나(log-periodic antenna) 사이에 위치한다. NbN 초전도 마이크로스트립의 크기는 폭 3µm, 길이 2µm이다. 초전도 NbN 마이크로스트립의 두께에 따른 IF 대역폭의 특성을 평가하기 위하여 박막 두께를 각각 2.1nm, 2.8nm, 3.5nm, 4.2nm 및 5.7nm로 하여 5 가지 종류의 HEB 혼합기를 제작하였다.

(그림 7)은 제작된 5가지 종류의 HEB 혼합기 소자에 대해 IF 대역폭을 측정한 결과이다. 이와 같은 HEB 혼합기 소자의 마이크로스트립 부분의 T_c 값은 각각 7.0K, 8.3K, 9.8K, 11.5K, 12.7K이다. (그림 7)에 나타낸 곡선은 다음 방정식을 적용하고, 최소자승법에 의한 근사치를 취하여 얻은 결과이다[13].

$$U(f) = U(0) \left[\frac{1}{1 + (f/f_c)^2} \right]$$

여기서 f 는 IF 신호의 주파수, f_c 는 IF 신호의 출력전력이 3dB까지 감소된 경우의 주파수, $U(f)$ 는 IF 신호주파수 f 에 대한 IF 신호의 전력이다. 또한 IF 신호의 출력전력이 3dB 하락한 주파수 f_c 를 IF 대역폭으로 정의한다.

(그림 7)에 표시한 바와 같이, 박막 두께가 2.8 nm인 HEB 혼합기 소자에 있어서 가장 넓은 IF 대역폭(2GHz)이 얻어졌다. HEB 혼합기에 있어서 출력신호인 IF 주파수의 대역폭은 입사된 전자파 에너지

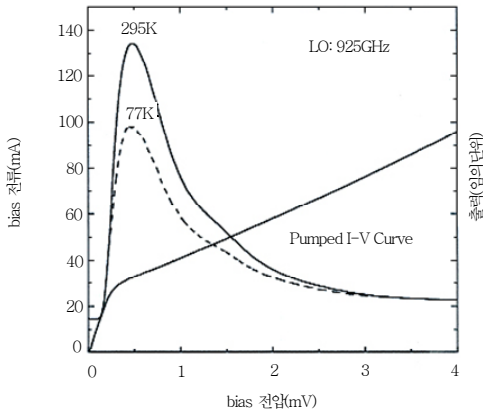


(그림 7) 박막의 두께를 다르게 하여 제작한 HEB 혼합기 소자의 IF 출력의 IF 주파수 의존성

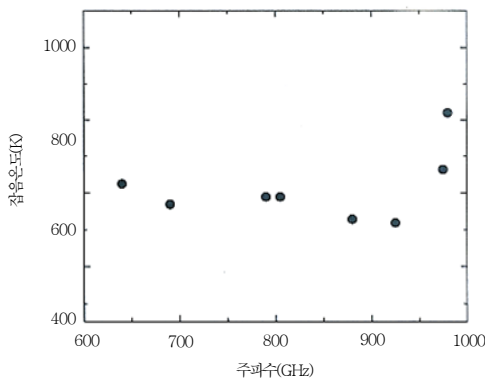
지에 의하여 여기된 전자가 에너지를 방출하고, 초전도 전자쌍(pair)으로 재결합하는 시간에 의하여 결정된다. 박막 두께가 2.1nm인 HEB 혼합기 소자의 경우, 박막 두께가 얇기 때문에 포논 확산시간이 단축되었지만, T_c 값의 저하(7K)에 따른 전자-포논 완화시간의 증가에 의하여 IF 대역폭이 작아졌다고 판단된다.

한편, 박막 두께가 2.8nm보다 두꺼운 HEB 혼합기 소자에서는 T_c 값이 커졌지만, 박막 두께가 두꺼워짐에 따라 수반되는 포논 확산시간도 커져서 IF 대역폭은 작아졌다. 따라서 IF 대역폭을 확대시키기 위해서는 박막 두께가 얇고, T_c 값이 높은 초전도 마이크로스트립이 필요하다는 것을 알게 되었다. 향후, HEB 혼합기 소자 제작 공정의 최적화를 통하여, 얇은 NbN 박막의 손상(damage)을 개선하면 더욱더 넓은 IF 대역폭을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

(그림 8)에서는 925GHz에 대한 NbN HEB 혼합기의 헤테로다인 응답특성을, (그림 9)에서는 수신기 잡음온도의 주파수 의존성을 나타내었다. 0.5mV의 바이어스 전압에 해당하는 지점에서 295K와 77K의 IF 신호비(Y-인자)는 최대치 1.37이 되므로, 이로부터 계산된 잡음온도는 510K로 되고 상당히 저잡음에서 동작하고 있음을 나타낸다. 또한 (그림 9)에 표시된 바와 같이 600GHz로부터 1THz까지



(그림 8) 925GHz에 대한 NbN HEB 혼합기의 헤테로다인 응답특성



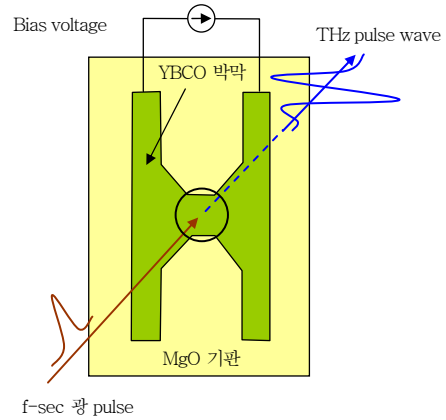
(그림 9) NbN HEB 혼합기에 대한 수신기 잡음온도의 주파수 의존성

의 광대역에 걸쳐서 저잡음 동작이 가능하기 때문에, THz 대역용 고감도 전자파 검출기로서의 잠재 능력을 보여주고 있다.

IV. 펨토초레이저와 고온초전도체를 이용한 테라헤르츠파의 발생

1. 바이어스 전류 하에서의 THz파 발생

(그림 10)과 같이 절연기판 상에 다리(bridge) 형태로 제작된 초전도 박막을 임계온도 이하로 유지하고, 바이어스 전류를 흘리면서 브리지 부분에 펨토초 광펄스를 조사하면 쿠퍼쌍(cooper pair)이 붕괴



(그림 10) 고온초전도 박막에 의한 THz 펄스 발생 개념도

되고 초전도 전류에 변화가 일어나서 THz파가 방출된다[14].

고온초전도 재료는 매우 잘 알려진 YBCO의 c축에 배향된 박막을 MgO(100) 기판 상에 약 100nm 두께로 성장시킨 것을 사용하였다. THz파 발생과 검출의 발생부는 HTS 소자를 10~300K까지 온도를 변화시킬 수 있는 냉각기 내부에 위치시킨다. 검출부는 반도체 광스위치를 그대로 사용하였다.

소자에 바이어스 전류를 흘리지 않으면 물론 THz 펄스와 발생은 일어나지 않지만, 바이어스 전류 방향을 거꾸로 할 경우, 방출되는 THz 펄스파의 극성도 바뀐다. 이런 THz 펄스파는 80fs 여기광에 의해서, 약 3THz까지의 주파수 성분을 포함하게 된다. 방사 출력은 바이어스 전류, 여기 레이저광의 파워 및 소자온도에 따라 변한다. 바이어스 전류값이 낮을 때에는 방사파워(전계)가 레이저 출력의 2승(1승)에 비례하여 증가하지만, 전류치가 클 때에는 2승(1승)보다 크게 변화한다. 온도의존성도 임계온도 근방을 제외할 경우, 온도가 높아지면 THz파 출력이 증가한다. 이는 박막의 온도가 상승하여 박막의 복소굴절률이 변하고 박막과 주변 공기층(자유공간)과의 임피던스 부정합이 감소하여 THz파가 공기 중으로 빠져 나오기 쉽게 되었기 때문이라고 해석되고 있다. 최근, THz용 소자가 있는 기판 뒷면에 MgO 반구렌즈를 접착한 대수 주기 안테나를 이용하고 1A의 바이어스 전류를 흘려서 평균 100mW

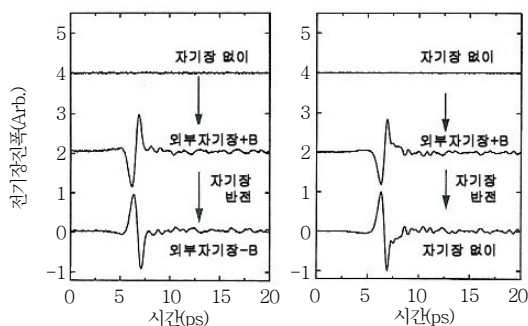
파워로 여기시키면 수 mW의 THz파가 얻어진다는 보고도 있다[15].

2. 바이어스 전류가 없고 외부 자장 하에서 THz파의 발생

고온초전도 박막으로 제작한 상기 소자에 바이어스 전류를 흘리지 않고, 대신 외부로부터 자장을 걸어준 상태에서 펨토초 광펄스를 조사한 경우에서도 THz 펄스파가 발생한다[16]. 자장은 구멍이 뚫린 시판용 소형 영구자석을 사용하여, 약 150 가우스(Gauss) 정도를 걸어준다.

(그림 11a)는 이런 구성에 의하여 발생된 THz 펄스파의 시간의존적 진폭파형이다. 자장을 반전시키면(극을 바꾸면) 파형도 반전된다. 이것은 외부자장에 대응하는 차폐전류 또는 침투자장에 동반된 초전도 전류를 광으로 고속 변조시킨 것이 이러한 현상을 유발한 메커니즘이라고 생각되고 있다. (그림 11b)는 외부에서 자장을 걸어준 뒤 다시 자기장을 제거시킨 경우로서, 자장 제거 후에도 THz 펄스파는 여전히 관측되고 있는 것을 보여주고 있다.

하지만 파형은 자장 제거 전후에서 반전된다. 이런 현상은 외부 자장이 초전도 박막 내부에 침투하여 외부 자장을 제거하더라도 자속 형태로 초전도 내부에 포획되어 있는 것에 기인하며, 이 자속에 동반된 영구 전류를 광펄스로 변조시키면 THz 펄스파의 방사가 일어나는 것이다. 이 THz파는 광펄스를



(a) 인가 자기장을 반대로 할 경우, THz 펄스의 극성이 반전
(b) 자기장을 제거한 경우, 여전히 THz 펄스파가 관측됨

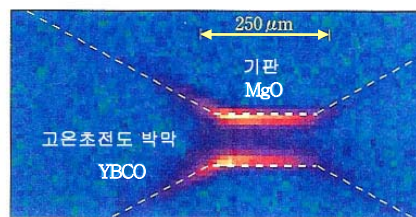
(그림 11) 외부 자기장 하에서의 THz 펄스파의 발생

계속 조사하더라도 광의 강도를 높이지 않은 이상 감쇠되지 않는다. (그림 11a, b)의 THz 펄스의 파형을 푸리에(Fourier) 변환시킨 모양은 바이어스 전류 하에서 발생된 THz 펄스파와 같은 모양이다.

3. 응용 예

가. 초전도 전류의 가시화

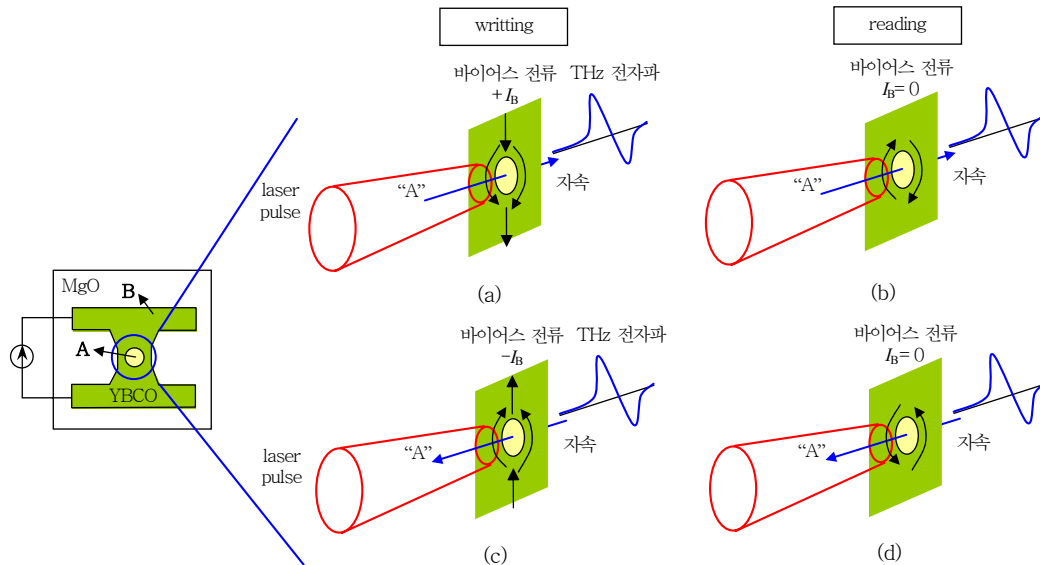
초전도 전류가 흐르는 곳에 펨토초 광펄스를 조사(照射)하면 THz 펄스파가 발생하는 것을 이용하여 소자 내부를 흐르는 초전도 전류분포를 가시화할 수 있다[17]. (그림 12)는 나비 벡타이(bowtie) 안테나형 소자의 브리지 중앙부근의 전류분포를 나타낸 것이다. 이 경우는 레이저 광을 충분히 집속하여 시료에 조사하면서 동시에 시료를 이차원적으로 움직여갈 때 발생하는 THz파를 측정하여 얻은 결과이다. 시료에 MgO 반구형 렌즈를 부착하여 시료 중앙부근의 집광효율을 높였다. 이 그림에서 초전도 전류는 주로 초전도 박막의 가장자리를 따라서 흐르고 있는 것을 나타내고 있다. 이것은 초전도체 내부에서 자속이 움직이는 것을 설명하는 전형적인 모델인 “Bean-model”에 의하여 설명된다.



(그림 12) 초전도 브리지 내부를 흐르는 초전도 전류의 가시화(밝게 보이는 부분이 초전도 전류가 흐르고 있는 곳임)

나. 초전도 광자속포획(光磁束捕獲) 메모리

광펄스로 박막 내부의 구멍에 자속의 기록(write)과 광펄스로 여기된 THz파 방사를 읽는(read) 독특한 메모리 소자에 대한 원리를 (그림 13)에 나타내었다[18]. (그림 13a)와 같이 구멍이 뚫린 고온초전도 YBCO 박막에 바이어스 전류를 흘리고, 위치



(그림 13) 초전도 광자속 포획메모리의 개략도, (a), (c)는 쓰기, (b), (d)는 읽기를 나타냄

“A”에 광펄스를 조사한다. “A” 부분은 “B” 부분에 비해 초전도 전류가 약해져, “A”와 “B”에 흐르는 전류량에서 불균형이 생긴다. 이런 상태에서 바이어스 전류를 단절하면 (그림 13b)에 나타낸 것과 같이 구멍에 자속이 생성되고 구멍주위를 도는 영구전류가 생긴다. 이것이 정보의 기록이다. 이런 상태에서 “A”에 광펄스를 조사하면, THz파가 발생된다. 이것이 정보의 재생에 해당한다. (그림 13c)와 같이 역방향으로 바이어스 전류를 흘리면, (그림 13d)와 같이 (그림 13b)와는 달리, 자속이 포획되는 역방향의 영구전류가 흐른다. 이를 위해 위치 “A”에 광펄스를 조사하면 (그림 13b)와 부호가 반대인 THz파가 발생된다. (그림 13b)와 (그림 13d)는 예를 들면, 각각 0과 1에 대응하는 메모리로 이용할 수 있다.

주파 영역에서는 여기서 소개된 NbN 이외에 높은 갭 주파수를 가지는 초전도 재료 기반의 SIS 혼합기의 개발이 요구된다. 그리고 연구단계도 실험실 수준에서 실용화 수준으로 이동중이다. 한편, HEB 혼합기는 초전도 동작특성과 갭 주파수의 한계에도 불구하고, 수 THz로부터 수십 THz까지 동작이 가능하지만, 실용화를 위해서는 IF의 광대역화 및 안정성 확보 등의 연구 과제가 남아 있다. 그리고 펄스 레이저 기술과 고온초전도 기술을 이용한 THz 연구도 활성화되어, 전장 및 자장 하에서의 THz 발생과 검출뿐만 아니라, THz파의 응용(메모리 응용 등)에도 박차를 가하고 있어 기대된다.

약어 정리

V. 결론

초전도 NbN 소자를 사용한 SIS 혼합기와 HEB 혼합기의 개발 현황과 연구 성과에 대하여 기술하였다. Nb 기술을 사용한 SIS 혼합기는 1THz 이하의 주파수 영역에서 고감도, 저잡음 전자파 검출기로서 부동의 위치를 확보하고 있지만, 1THz 이상의 초고

BWO	Backward Wave Oscillator
DSB	Double Side Band
HEB	Hot-Electron Bolometer
HEMT	High Electron Mobility Transistor
HTS	High Temperature Superconductor
LO	Local Oscillator
SIS	Superconductor-Insulator-Superconductor
YBCO	Y-Ba-Ca-O(HTS Material)

τ_{e-ph} Electron-Phonon Relaxation Time

참 고 문 헌

- [1] J. Zmuidzinas, N.G. Ugras, D. Miller, M. Gadis, H.G. LeDuc, and J.A. Stern, "Low-noise Slot Antenna SIS Mixers," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.5, 1995, p.3053.
- [2] B.S. Karasik, M.C. Gaidis, W.R. McGrath, B. Bumble, and H.G. LeDu, "A Low-noise 2.5THz Superconductive Nb Hot-electron Mixer," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.7, 1997, p.3580.
- [3] C.-Y.E. Tong, J. Kawamura, R. Blundell, G. Gol'tsman, and E. Gershenzon, "Millimeter and Submillimeter Range Mixer Based on Electron Heating of Superconducting Films in the Resistive State," *Proc. of the 1999 IEEE 7th Int'l Conf. on Terahertz Electronics*, Vol.44, Nara, Japan, 1999.
- [4] Z. Wang, A. Kawakami, Y. Uzawa, and B. Komiyama, "Superconducting Properties and Crystal Structures of Single-crystal Niobium Nitride Thin Films Deposited at Ambient Substrate Temperature," *J. Appl. Phys.*, Vol.79, 1996, p.7837.
- [5] Z. Wang, A. Kawakami, and Y. Uzawa, "NbN/AlN/NbN Tunnel Junctions with High Current Density Up to 54kA/cm²," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.70, 1997, p.114.
- [6] A. Kawakami, Z. Wang, and S. Miki, "Fabrication and Characterization of Epitaxial NbN/MgO/NbN Josephson Tunnel Junctions," *J. Appl. Phys.*, Vol.90, 2001, p.4796.
- [7] Y. Uzawa, M. Takeda, A. Kawakami, and Z. Wang, "Design and Analysis of an All-NbN SIS Mixer Using a Tuning Circuit with two Half-Wavelength Distributed Junctions," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.13, 2003, p.688.
- [8] S. Miki, Y. Uzawa, A. Kawakami, and Z. Wang, "IF Bandwidth and Noise Temperature Measurements of NbN HEB Mixers on MgO Substrates," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.11, 2001, p.175.
- [9] S. Miki, Y. Uzawa, A. Kawakami, and Z. Wang, "Improvement of Phonon Diffusion Efficiency in Phonon-Cooled NbN Hot Electron Bolometer Mixers," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.42, 2003, p.3383.
- [10] Y.P. Gousev, G.N. Gol'tsman, A.D. Semenov, E.M. Gershenzon, R.S. Nebosis, M.A. Heusinger, and K.F. Renk, "Broadband Ultrafast Superconducting NbN Detector for Electromagnetic Radiation," *J. Appl. Phys.*, Vol.75, 1994, p.3695.
- [11] G.N. Gol'tsman, A.D. Semenov, Y.P. Gousev, M.A. Zorin, I.G. Gogidze, E.M. Gershenzon, P.T. Lang, W.J. Knott, and K.F. Renk, "Sensitive Picosecond NbN Detector for Radiation from Millimetre Wavelengths to Visible Light," *Supercond. Sci. Technol.*, Vol.4, 1991, p.453.
- [12] A.D. Semenov, R.S. Nebosis, Y.P. Gousev, M.A. Heusinger, and K.F. Renk, "Analysis of the Non-equilibrium Qhotoresponse of Superconducting Films to Pulsed Radiation by Use of a Two-temperature Model," *Physical Reviews B*, Vol.52, 1995, p.581.
- [13] P.J. Berke, R.J. Schoelkopf, D.E. Prober, A. Skalare, W.R. McGrath, B. Bumble, and H.G. LeDuc, "Length Scaling of Bandwidth and Noise in Hot-electron Superconducting Mixers," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.68, 1996, p.3344.
- [14] M. Hangyo, S. Tomozawa, Y. Murakami, M. Tonouchi, M. Tani, Z. Wang, K. Sakai, and S. Nakashima, "Terahertz Radiation from Superconducting YBa₂Cu₃O_{7- δ} Thin Films Excited by Femtosecond Pulses," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.69, 1996, p.2122.
- [15] H. Saijo, M. Morimoto, M. Yamashita, O. Morikawa, T. Kondo, M. Tonouchi, and M. Hangyo, "Terahertz Radiation from High-T_c Superconductive Log-Periodic Antenna," *Proc. IEEE 7th Int'l Conf. Terahertz Electronics*, Nara, 1999, p.245.
- [16] M. Tonouchi, M. Tani, Z. Wang, K. Sakai, N. Wada, and M. Hangyo, "Novel THz Radiation from Flux-Trapped YBa₂Cu₃O_{7- δ} Thin Films Excited by Femtosecond Laser Pulses," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.36, L93, 1997.
- [17] S. Shikii, T. Kondo, M. Yamashita, M. Tonouchi, M. Hangyo, M. Tani, and K. Sakai, "Observation of Supercurrent Distribution in Superconducting YBa₂Cu₃O_{7- δ} Thin Films Using THz Radiation Excited with Femtosecond Laser Pulses," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 74, 1999, p.1317.
- [18] M. Tonouchi, N. Wada, M. Hangyo, M. Tani, and K. Sakai, "Control of Magnetic Flux in a YBa₂Cu₃O_{7- δ} Thin Films Loop Using Femtosecond Laser Pulses," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.71, 1997, p.2364.