

## 고온초전도 적외선 센서



### 한택상

한국과학기술연구원 정보재료·소자 연구센터 책임연구원

### 1. 서 론

YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub> 산화물 고온초전도체가 발견된 이래, 이 새로운 물질을 이용한 광 검지기 제작 가능성에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다[1~3]. 초전도체에서의 광반응(photo response)은 초전도 박막에 광을 조사하였을 때 박막에서의 전기적 특성이 변화됨을 이용하는 것으로서, 이 물질을 사용하였을 때에 이론적으로 감도가 우수하다는 점[4] 외에 초고속 반응시간을 갖는 광검지기를 만들 수 있다는 측면에서 크다란 관심의 대상이 되어[5, 6] 초전도 박막을 이용한 광검지기 개발에 대한 많은 연구 결과가 발표되고 있다. 이들 산화물 고온초전도체는 원적외선 영역에서부터 가시광선 영역에 걸쳐 광흡수 계수가 크기 때문에[7] 광검지기로 사용할 경우 다른 광검지기에 비해 큰 장점을 가진다.

과립모양을 갖는 초전도 박막에서의 초전도 특성은 비초전도 물질 즉 부도체나 도체 등이 함께 존재하는 host matrix 내에 초전도 물질이 과립 모양으로 분포된 계에서 초전도 조직간의 조셉슨 결합(Josephson coupling)을 통해 일어나게 되는데,

이러한 계에서의 초전도성은 percolation의 한 예로서 생각할 수도 있다[5]. Percolation의 확률밀도는 조직간의 조셉슨 결합(Josephson coupling)의 세기와 초전도 조직들의 부피분율(volume fraction), 및 조직크기의 분포에 밀접한 관계를 갖고 있기 때문에 초전도성을 나타내는 조직들 간의 결합이 약한 과립 모양의 초전도체는 광을 조사함에 따라 결합력의 세기가 민감하게 변화할 가능성이 많게 된다.

한편 고온초전도체가 발견된 후 이 신물질을 이용한 microbolometer array에 대한 연구가 많이 이루어지고 있는데[8], 고온초전도 microbolometer array는 이론적 한계치인 NETD=0.002K에 도달할 수 있고, 이는 비냉각 microbolometer array에 비하여 order를 달리하는 값이다. 현재까지 개발된 고온초전도 센서 중에는  $D^* = 3.4 \times 10^{10} \text{ cm Hz}^{1/2}/\text{W}$  (NEP=2.9 pW/Hz<sup>1/2</sup>)에 이르는 우수한 결과가 발표되고 있다[9]. 표 1에서 볼 수 있는 바와 같이 YBCO 초전도 재료는 상온에서의 bolometer 특성도 뛰어나서 다른 재료에 비해 검지도(D\*)가 우수하고, 잡음(noise)이 적으며, 공정상의 어려움이나 생산비 면에서 우수하기 때문에 주목을 받고 있다.

표 1. 여러 가지 적외선 센서의 특성 비교

Detector Material	YBCO	$\alpha$ -Si	VOx	HgCdTe	BST
Detector Type	bolometer	bolometer	bolometer	photovoltaic	pyroelectric
Compatibility with CMOS Fabrication	good	excellent	fair	poor	poor
Operating Temperature	20°C	20°C	20°C	-200°C	20°C
Detectivity (cm-Hz <sup>1/2</sup> /W)	2x10 <sup>9</sup>	1x10 <sup>9</sup>	1x10 <sup>9</sup>	5x10 <sup>10</sup>	1x10 <sup>9</sup>
Noise	100	5000	50	1000	100
Disadvantage	-	high noise, low sensitivity	difficult fabrication	difficult fabrication, operat. cost	difficult integration to silicon

## 2. 초전도 광센서의 광반응 메커니즘

초전도체에서의 광반응 메커니즘은 크게 두 가지로 생각할 수 있는데, 열적 효과(bolometric effect)와 비열적 효과(non-bolometric effect)가 그것이다. Bolometric 효과란 초전도체에 광이 입사되었을 때 광의 가열효과에 의하여 미세한 온도 상승이 있게 되고 온도 상승에 따른 초전도체의 저항 변화가 수반되는데, 그 저항 변화를 이용하여 광을 검지하는 방법이다. 반면에 non-bolometric 효과는 초전도체에 광이 입사되었을 때 입사광의 photon 에너지에 의하여 초전도체 내에서의 cooper pair가 깨어지고 quasi particle이 생성되면서 부분적으로 초전도 현상이 깨어지는 현상을 이용하는 것이다. 지금까지 알려진 연구에 의하면 초전도체에서는 이 두 가지 현상이 같이 일어나는 것으로 규명되고 있다.

그림 1은 YBCO 고온초전도 박막의 온도-저항 특성 곡선이다. 전이온도 부근에서의 특성을 보여주고 있으며, 내부 창에는 상온에서부터 0K까지 전 온도 범위에서의 온도-저항 특성을 보여준다. 온도를 내려줌에 따라 초전도체는 저항이 선형적으로 감소하여 급속적인 특성을 보인다. 온도가 초전도 전이 온도에 도달하면 저항은 급격하게 감소하여 영(0)이 되는데, 초전도 bolometer는 이러한 초전도 전이 영역에서의 급격한 저항 변화를 이용한다. 초전도 전이 영역에서는 미세한 온도 변화에 대해서 큰 저항 변화를 수반하게 된다. 초전도 광검지기에 bias 전류를 흘리고 있다면 이러한 저항 변화에 상응하는 전압의 상

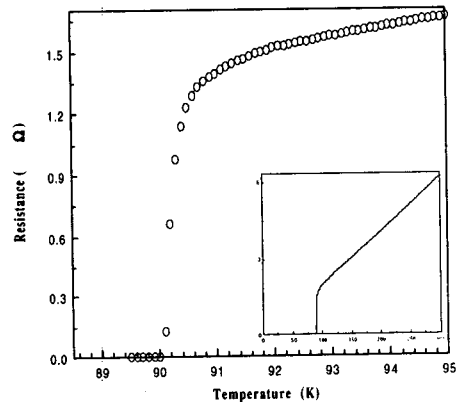


그림 1. 고온초전도체의 온도에 따른 저항 특성. 기울기가 가파른 온도에서 입사광에 의한 저항 변화를 이용한다.

승이 수반되고 이로부터 광반응을 측정하게 된다. 초전도체에서 bolometric 효과를 이용하기 위해서는 센서를 전이온도의 중간점에 해당하는 온도에 고정시키고 측정을 해야 하며, 따라서 너무 급격한 전이특성을 가지는 것보다 어느 정도 완만한 전이 특성을 가지는 박막이 온도를 고정시키기가 좋을 수가 있으나 전이 기울기가 클수록 감도는 좋아지므로 적절한 전이 특성을 가지는 박막이 요구된다고 할 수 있다. 열적 효과를 이용하는 센서의 단점은 센서가 가열되어야 하기 때문에 반응시간이 비교적 크다는 점이나, 최근에는 안테나 결합형 마이크로 bolometer array와 같은 응답시간이 매우 작은 bolometer 개

발에도 성공하고 있다.

한편 비열적 효과(non-bolometric effect)는 flux creep[10], nonequilibrium superconductivity[11, 12], phase slip[1], photofluxonic detection[13] 등과 같은 현상에 의하여 나타난다고 알려져 있으나 아직 그 메커니즘이 완전히 규명된 것은 아니다. 비열적 효과는 고속(fast), 고감도(sensitivity)의 과정이라고 여겨지고 있으며, 주로 과립 형태의 박막에서 관측되어 초전도체간의 입계면(grainboundary)에서의 광반응 과정이 중요한 문제로 인식되고 있다[14, 15]. 또한 비열적인 광센서의 경우는 bolometric의 경우와는 달리 초전도 전이 영역이 아니라 초전도 상태의 온도 영역에서 반응을 나타내는 특성을 가지고 있다. 그러나 대부분의 경우 초전도체의 광반응은 bolometric 효과와 non-bolometric 효과가 공존하고 있으며, 이들을 명확히 구분하여 이용하기는 매우 어렵다.

### 3. 고온초전도 bolometer

#### 가. Bolometer 이론

Bolometer는 광이 센서에 입사되었을 때 흡수된 광의 가열효과에 의하여 온도가 올라가는 것을 감지하는 일종의 미세 온도계이다. Bolometer의 원리를 그림 2에 보였는데, bolometer는 온도  $T_b$ 에서 열용량이  $C_b$ 인 열 흡수체로 이루어져 있고, 온도  $T_0$ 인 cold bath와는 conductance  $G_b$ 인 연결선으로 연결되어 있다. 전류 I로 bias된 bolometer는 저항의 온도계수(TCR)에 의하여 측정되는데, TCR( $\gamma$ )은 다음 식으로 정의된다.

$$\gamma = \frac{dR}{dT} \cdot R^{-1} \quad [K^{-1}] \quad (1)$$

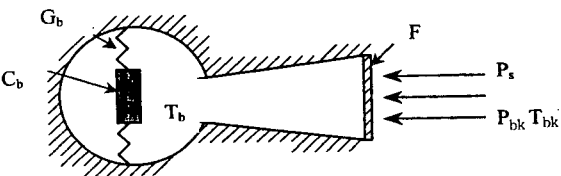


그림 2. 저온 bolometer의 개념도

이 때 온도계가 전류 I로 bias되어 있기 때문에,

bolometer의 응답은 열전 feedback에 의하여 영향을 받는다. 이 효과는 유효 열전도성  $G_0$ 의 개념을 도입함으로써 표현될 수 있고, 유효 응답시간(effective thermal time constant)  $\tau_0$ [초]를 도입하여 다음 식이 성립된다.

$$G_0 = G - I^2 \frac{dR}{dT} = G - I^2 \cdot R\gamma \quad [W/K] \quad (2)$$

여기서,  $\tau_0 = C_b/G_0$  이다. 안정된 동작을 위해서  $G_0$ 는 0 이상이어야 하고 TCR이 양일 때는 bias current에 대해서 최대치가 존재한다. 동작점은 대개 parameter b에 의해서,  $b = I^2 R\gamma/G_0$ 로 기술되며,  $b=0.3$ 이 최적에 가까운 값으로 알려져 있다.

변조된 주파수 f에서 시간에 따라서 input power P(f)가 변하는 경우 voltage responsivity(S)는 다음과 같이 주어진다. 여기서  $\epsilon$ 은 흡수 계수이고, f는 주파수이다.

$$S = \left[ \frac{\epsilon}{1-b} + B \frac{\gamma R}{G(1+4\pi^2 f^2 \tau^2)} \right]^{1/2} \quad [V/W] \quad (3)$$

Bolometer의 감도(sensitivity)는 잡음에 의해서 영향을 받는다. 잡음은 잡음원이 내는 신호와 같은 크기의 입사 전력의 양으로 정의할 수 있다. 즉 bolometer에 입사되는 전력의 양으로 나타내어 지는데, 이때 bolometer에 대해서 이 잡음 등가 전력(Noise Equivalent Power : NEP)은 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$NEP = \frac{8kBAF(Str/\pi)T_{bk}^5}{\epsilon} + \frac{4kT_b^2 G}{\epsilon^2} + \frac{4kT_b R}{S^2} + \frac{V_{amp}^2}{S^2} + \frac{S_v(\Omega)}{S^2} + \frac{G^2 S_T(f)}{\epsilon^2} \quad (3)$$

이 식에서 오른쪽 맨 앞의 항은 배경 잡음(background noise)인데, spectrum 전체에 걸쳐 반구형태의 흑체원(blackbody source)에 대해서 계산한 값이며, k=Boltzman 상수이고, B=Stefan-Boltzman 상수,  $T_b$ =bolometer 온도,  $T_{bk}$ =배경 온도, A=감지기의 면적, F=optical cold filter transmittance이다. 두 번째 항은 bolometer와 heat sink 사이의 열전도도 G를 통해 일어나는 불규칙한 에너지 교환에 의하여 결정되므로 온도는 낮을수록 열전도도는 작을수록 좋다. 세 번째 항은 bolometer 저항의 Johnson noise의 영향이고, 네 번째 항은 증폭기의 전압 잡음에 의한 항이며, 다섯 번째 항은 초전도체의 1/f 잡음에 의한 항이고, 마지막 항은 냉각기에서의 온도불안정에 기인하는 인자이다.

Bolometer에서 NEP와 함께 또다른 중요한 감도 인자는 비검지도(specific detectivity :  $D^*$ )이며, 이는 다음과 같이 정의되고, NEP 대신 검지기 면적을 고려하여 계산한 이 값이 검지기의 성능 평가 기준으로 보편적으로 많이 사용되고 있다.

$$D^* = \frac{A^{1/2}}{NEP} \cdot [cm \cdot Hz^{1/2}/W] \quad (5)$$

이상적인 경우 열 감지기의 문턱 flux는 배경에 입사되는 전력의 요동에 의해 제한을 받는다. 그림 3에 여러 가지 상황과 각기 다른 반응시간에서 감지도  $D^*$ 를 계산해서 보였다. 여기에서 면적  $A=1 \times 1mm^2$ , absorption coefficient( $\epsilon$ )=1, filter transmittance( $F$ )=1, viewing angle( $Str$ )=0.2 $\pi$  sr(when  $T_b < T_{bk}$ ),  $Str=\pi$ (when  $T_b = T_{bk}$ )이다. 수평선 1, 2, 3은 각기 다른  $T_{bk}$ 와  $T_b$ 에서 이상적인 열 검지기의  $D^*$ 와 일치한다. 1000 Å 두께의 감지에서 열용량을 고려하면,  $D^*$ 는 다음 식과 같이 감지기의 반응시간에 의존한다.

$$D^* = const \times \tau^{1/2} \quad (6)$$

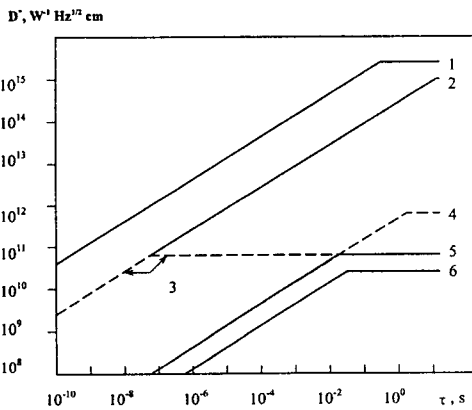


그림 3. 초전도 bolometer에서 응답시간( $\tau$ )과 검지도( $D^*$ )의 관계

그림 3에서 보면, 반응속도가 빠르면서도 감지도가 높은 감지기를 얻는 것은 불가능하다는 것을 알 수 있다. 그리고 논문들에서 보고되는 실험치  $D^*$ 는 계산해서 얻은 값보다는 항상 작는데, 이것은 기판의 열용량과 잡음 때문에 나타나는 결과이다.

#### 나. 초전도 bolometer의 형태

그림 4에 여러 가지 형태의 초전도 bolometer를 보였다. 그림 4(a)의 primitive bolometer는 비교적 두꺼운 기판(0.5~1.0 mm)을 사용하여 그 위에 초전도 전이단(transition edge) bolometer를 형성시킨 것이다. Heat bath와는  $G=10^3$  W/K로 강하게 결합되어 있고, 면적( $A$ )= $1 \times 1mm^2$ 에서  $NEP=2.5 \times 10^{-10}$  W/Hz $^{1/2}$ 의 값을 얻은 예가 있다[16].

그림 4(b)의 composite bolometer는 선으로 지지되어 있는데, 이렇게 함으로써 열용량( $C$ )과 열전도( $G$ )를 최적화 할 수 있다. 열용량은 기판의 두께에 크게 영향을 받아서 sapphire 기판의 경우 20 $\mu$ m로 정도로 얇아야 한다. 응답시간을 최적화하기 위해서는 열전도( $G$ )를  $10^4$  W/K 정도로 해야 하는데, 이 형태의 bolometer에서 얻어진 가장 우수한 결과는  $D^*=6 \times 10^9$  cm $\cdot$ Hz $^{1/2}$ /W이다[17].

가장 특성이 우수한 bolometer는 membrane bolometer이다. 그림 4(c)와 같은 형태의 bolometer는 매우 낮은 열전도값을 가지고 있으며,  $D^*=8 \times 10^9$  cm $\cdot$ Hz $^{1/2}$ /W로 적으나 응답시간이 0.1초로 큰 경우가 있고[18], 그림 4(d)와 같은 형태의 경우 응답시간이 0.4ms로 매우 작으면서  $D^*=4 \times 10^9$  cm $\cdot$ Hz $^{1/2}$ /W를 기록한 경우가 있다[19]. Membrane 형태의 bolometer인 경우 실리콘 마이크로머시닝 기술을 이용하여 실리콘 기판을 가공하고 질화실리콘 membrane을 제작한다. 이 기술에서의 어려움은 실리콘 기판의 높은 열전도도와 실리콘 기판 위에 YBCO 초전도체를 얼마나 잘 성장시키느냐 하는 것이다.

그림 4(e)에서는 다른 형태의 bolometer를 보여주고 있는데, 이것은 antenna-coupled microbolometer이다. 계산한 결과에 의하면 microbolometer와 기판간의 열전도값이 아주 작아서 이러한 형태의 감지기의 경우  $NEP=5 \times 10^{-12}$  W/Hz $^{1/2}$  까지 감소하게 된다. 구조상의 이점 때문에 광학적 효율을 0.7까지 올릴 수 있어서 10 $\mu$ m 정도의 짧은 파장에서도  $D^*=6 \times 10^9$  cm $\cdot$ Hz $^{1/2}$ /W 정도의 값을 얻을 수 있고, 응답시간도 매우 짧아서 5ns 정도의 값이 가능하다.

#### 다. 초전도 bolometer의 특성

이론적으로 초전도 감지기는 매우 감도가 높고 응답속도가 매우 빠르다고 알려져 있다. 그림 5에 두 가지의 bolometer에 대해서 계산 결과를 보이고 있는데, (a)는 열고립 구조의 다리를 가지는 고감도 복합

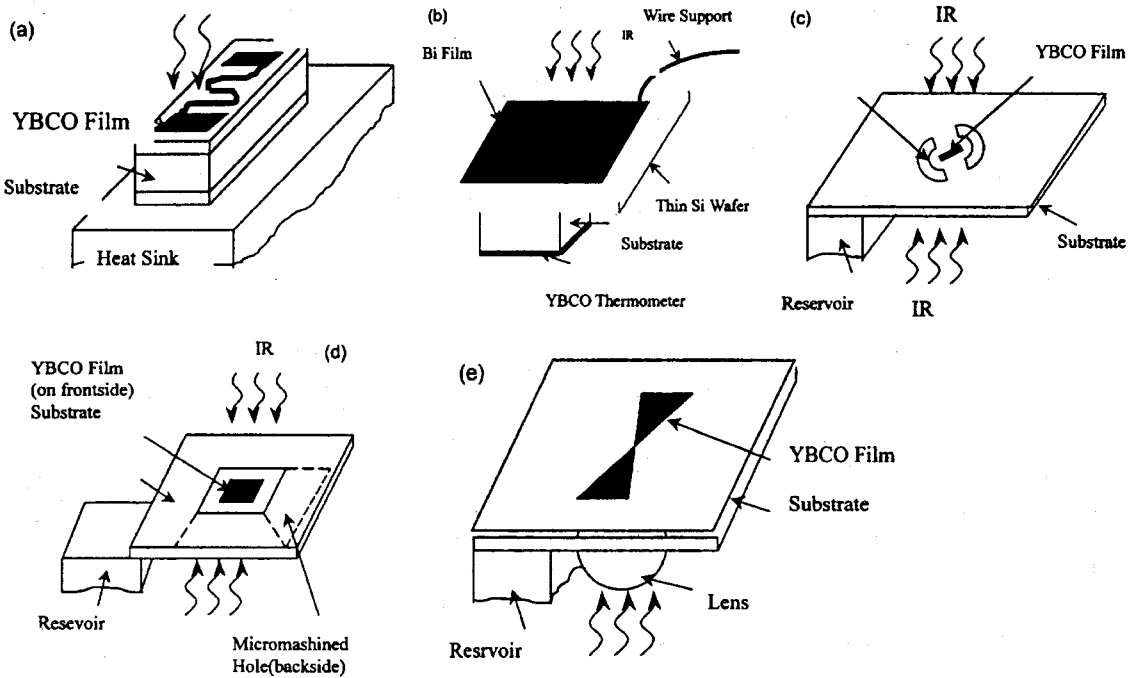


그림 4. 여러 가지 형태의 초전도 bolometer : (a) primitive bolometer, (b) composite bolometer with wire support, (c) membrane bolometer with low thermal conductivity, (d) membrane bolometer with high thermal conductivity, (e) microbolometer with bow tie antenna.

bolometer이고 (b)는 고속 microbolometer이다. (a)의 경우  $NEP = 3 \times 10^{-12} \text{ W/Hz}^{1/2}$  ( $D^* = 3 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ )으로 우수하나 응답속도는  $10^{-2}$ 초로서 매우 느린 것을 볼 수 있다. 반면에 microbolometer (b)의 경우는  $NEP = 8 \times 10^{-12}$  ( $D^* = 1.2 \times 10^7 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ )이나 응답속도는  $10^{-8}$ 초로 매우 작은 것을 알 수 있다. 이 경우 안테나를 사용하지 않으면 열수광 면적  $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ 에 불과하다.

고속 microbolometer의 경우  $1/f$  잡음이 미치는 영향이 매우 크다는 점에 주목하여야 한다(그림 5). 그러나  $1/f$  잡음은 짧은 파장의 IR 조사에는 큰 영향이 없다. 또한 파장이  $10 \mu\text{m}$  정도인 경우  $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ 인 microbolometer의 광학적 효율은 회절 문제 때문에 매우 낮는데, 이런 경우 안테나를 채용하면 문제가 해결된다. 마이크로 안테나는 유효 수광 면적을 크게 증가시켜주고 응답속도도 매우 빠르게 해준다. 그림 6에 여러 가지 광센서의 검지도를 파장에 따라 보여주고 있다. 두 가지의 초전도 광센서에 대한 특성이 나타나 있는데, 다른 센서에 비하여 비교적 넓

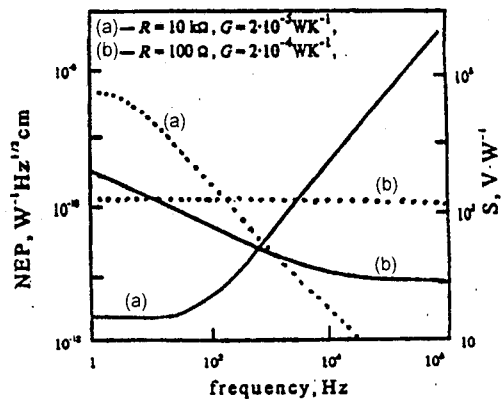


그림 5. YBCO 초전도 bolometer의 주파수에 따른 NEP와 감도(S) 변화 : (a) 다리를 가진 composite bolometer, 면적 =  $1 \text{mm}^2$ , membrane 두께 =  $1 \mu\text{m}$ , (b) microbolometer, 면적(A) =  $1 \mu\text{m}^2$

은 파장 범위에서 우수한 검지도를 가지고 있는 것을 볼 수 있다. 여기서 굵은 선이 고온초전도 bolometer의 예상되는  $D^*$  값이다. 이 선은 도달할 수 있는 최소의 열용량과 열전도도 그리고 고온초전도체에서의 전압 잡음의 측정을 통하여 산출한 값이다. 77K에서 작동하는 InSb, PtSi, HgCdTe 등의 2차원 array에 대한  $D^*$  값과 비교하여 볼 때 넓은 파장 범위에서 우수한 특성을 보여주고 있음을 알 수 있다.

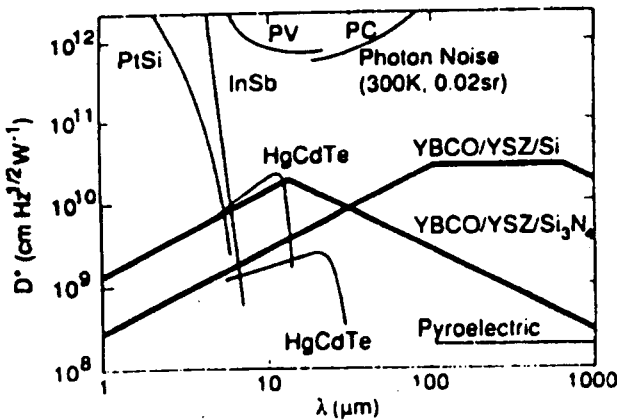


그림 6. 파장에 따른 검지도( $D^*$ ) 비교. 굵은 선이 고온초전도를 이용한 경우임.

열적으로 고립된 구조를 만들고, 열용량과 열전도도를 줄이기 위해서 membrane 구조의 센서가 바람직한데, 이를 위해서 실리콘 기판이 선호되고 있다. 실리콘의 마이크로머시닝 기술을 이용하면 매우 얇은 membrane을 제작할 수 있다. 이러한 membrane 위에 안테나 결합형 microbolometer를 제작할 수 있는데, 실리콘 기판의 경우  $\text{NdGaO}_3$ 나 YSZ 등의 결정성 기판을 사용하는 경우보다  $1/f$  잡음이 커서  $D^*$  값을 감소시킨다는 결점을 가지고 있다.  $1/f$  잡음은 샘플의 크기가 작아질수록 증가하기 때문에, 매우 낮은 flicker 잡음을 가지는 박막을 사용해야 한다. 이렇게 하기 위하여  $\text{NdGaO}_3$ 나  $\text{LaAlO}_3$  기판 위에 YBCO 박막을 제작한 경우 가장 좋은  $1/f$  잡음 특성을 얻을 수 있다고 알려져 있다. 그러나, 높은 주파수에서는  $1/f$  잡음이 NEP에 영향을 크게 미치지 못하므로 실리콘 기판을 사용한 membrane 형태의 안테나 결합형 microbolometer도 바람직하다고 할 수 있다.

#### 4. 결 론

초전도체를 이용한 광센서는 bolometer를 중심으로 세계 각국에서 활발히 연구되고 있다. 초전도체는 초전도 전이영역의 급격한 저항변화를 이용하므로 고감도의 센서 제작을 위해 사용될 수 있고, 비열적인 반응을 이용하면 초고속의 센서 응용이 가능하다. 현재 초전도 적외선 센서 연구는 초전도 전이 영역에서의 전기적인 특성을 이용하는 냉각형 센서와 초전도 재료를 사용한 비냉각형 센서 등 두 분야에서 연구가 활발히 진행되고 있다. 초전도재료는 상온에서 저항의 온도계수(TCR) 값이 매우 크기 때문에 비냉각형 센서 재료로서 주목을 받고 있고, 이와 관련한 연구 결과가 많이 발표되고 있다. 냉각형 초전도 센서 분야에서는 membrane 형태의 bolometer와 안테나 결합형 microbolometer에 대한 연구가 많은 진전을 보이고 있다. 머지 않은 장래에 초전도체를 사용한 냉각형 또는 비냉각형 적외선 센서가 개발되고 상용화 될 것으로 전망된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] M. Leung, P. R. Broussard, J. H. Classen, M. Osofsky, S. A. Wolf, and U. Strom, Appl. Phys. Lett., 51, 2046 (1987).
- [2] Y. Enomoto, T. Murakami and M. Suzuki, Physica C, 153-155, 1592 (1988).
- [3] W. S. Brocklesby, Don Mouroe, A. F. J. Levi, M. Hong, S. H. Liou, J. Kwo, C. E. Rice, P. M. Mankiewich and R. E. Howard, Appl. Phys. Lett. 54, 1175 (1989).
- [4] P. L. Richards, J. Clarke, R. Leoni, Ph. Lerch, S. Varghese, M. R. Beasley, T. H. Geballe and S. R. Spielman, Appl. Phys. Lett. 54, 283 (1989).
- [5] Y. Enomoto and T. Murakami, J. Appl. Phys. 59, 3807 (1986).
- [6] S. B. Kaplan, C. C. Chi, D. N. Langenberg, J. J. Chang, S. Jafarey and D. J. Scalapino, Phys. Rev. B14, 4854 (1976).
- [7] M. K. Kelly, Siu-Wai Chan, K. Jenkin, D. E. Aspnes, P. Barbonx and J. M. Tarascon, Appl. Phys. Lett. 53, 2333 (1989).
- [8] S. Verghese, P. L. Richards, K. Char, D. K. Fork, and T. H. Geballe, J. Appl. Phys. 71, 2491 (1992).
- [9] M. J. M. E. de Nivelte, M. P. Bruijn, R. de Vries, J. J. Wijnbergen, P. A. J. de Korte, S.

- Sanches, M. Elwenspoek, T. Heidenbult, B. Schwierzi, W. Michalke, and E. Steinbeiss, *J. Appl. Phys.* 82 (10), 4719 (1997).
- [10] E. Zeldov, N. M. Amer, G. Koren, A. Gupta, R. J. Gambino, and M. W. McElfresh, *Phy. Rev. Lett.* 62, 3093 (1989).
- [11] A. Frenkel, M. A. Saifi, T. Venkatesan, P. England, X. D. Wu, and A. Inam, *J. Appl. Phys.* 67, 3054 (1990).
- [12] W. R. Donaldson, A. M. Kadin, P. H. Ballentine, and R. Sobolewski, *Appl. Phys. Lett.* 54, 2407 (1989).
- [13] A. Kadin, M. Leung, A. D. Smith, and J. M. Murduck, *Appl. Phys. Lett.* 57, 2847 (1990).
- [14] J. C. Cullberson, U. Strom, S. A. Wolf, P. Skeath, E. J. West and W. K. Burns, *Phys. Rev.* B39, 12539 (1989).
- [15] D. P. Osterman, R. Darke, R. Patt, E. K. Track, M. Radparvar, and S. M. Faris, *IEEE trans. magnetism*, 25, 1323, (1989).
- [16] I. A. Khrebtov, A. Y. Klimov, V. N. Leonov, A. D. Tkachenko, *Instrum, Exp. Tech.* 36, 285 (1993).
- [17] J. C. Brasunas and B. Lakew, *Appl. Phys. Lett.* 64, 777 (1994).
- [18] B. R. Johnson, M. C. Foote et al. *SPIE*, 2267, 24 (1994).
- [19] H. Neff, J. Laukemper, I. A. Khrebtov, A. D. Tkachenko, E. Steinbeiss, W. Michalke, M. Burnus, T. Heidenblut, G. Hefle, and B. Schwierzi, *Appl. Phys. Lett.* 66 (18), 2421 (1995).