

# 광검출기의 종류 및 원리

Photodetectors from UV to Far IR

남 기 봉

한림대학교 물리학과

## 1. 머리말

19세기 말에서 20세기 초, 빛의 검출 및 기록은 현대 과학의 발달에 결정적인 단서가 된 수많은 자료들을 제공하였다. 특히 19세기 말, 독일 제철소의 용광로에서 나오는 빛을 이용하여 용의 온도를 측정하려고 하던 노력은 결국 에너지의 양자화라고 하는 충격적인 사실의 발견으로 연결되었다. 현재까지도 빛은 물질의 구성단위인 분자·원자의 내부구조를 연구하는데 있어서 그 어떤 다른 수단보다 선호되는 도구로서 이용되어, 원자·분자가 내는 빛을 연구하는 분광학은 그 응용분야가 자연과학의 거의 모든 분야를 포함하게 되었다. 최근에 와서 통신의 새로운 첨단분야로 각광받는 광섬유통신, 원음에 가까운 음을 재생시키는 레이저 음반(CD)등도 빛과 빛의 검출이 우리의 주변에서 유용하게 쓰이는 대표적인 예라고 할 수 있다.

이러한 일련의 광응용의 마지막 단계에서는 반드시 빛을 영구보존이 가능한 형태나 전기적인 신호로 변환하는 과정을 거치게 되는데, 이때 사용되는 광검출기는 전자기파 즉 빛의 형태로 입사하는 신호를 우리가 관찰·기록할 수 있는 형태의 신호로 변환시키는 역할을 한다. 광증폭관(PMT)처럼 널리 쓰이는 기기뿐 아니라 동물의 눈, 사진건판, 온도계등도 모두 이 범위에 포함된다. 대체로 인위적인 광검출기는 신호를 객관적인 수치로 변환시키거나 기록하는 용도로 쓰이게 되지만, 인간의 시력으로는 관찰 할 수 없는 대역의 빛을 검출·기록하는 용도로 쓰이는 경우도 이에 못지않게 흔한 일이다. 예를 들자면 1800년, Herschel에 의한 적외선의 발견이 역사적으로 의미있는 대표적 예가 되는데, 그는 프리즘에서 갈라진 햇빛의 붉은색 띠 바깥쪽에 온도계를 놓았다가 그 온도계의 눈금이 변화하는 것을 발견하여 적외선의 존재를 밝히게 된 경우이다. 근적외선을 이용하여 이루어지는 광섬유 통신도 좋은 예가 될 수 있다.

통상 광검출기는 하나의 소자로 구성되어 빛의 세기에 비례하는 신호를 생산하지만, 근래에 와서는 반도체산업의 집적기술을 이용, 미세한 크기의 이들 검출소자들을 평면에 일정하게 배치하여 2차원적인 전기신호를 큰 어려움 없이 얻어내어, 비디오 사진기등에 이들이 비교적 저렴한 가격으로 이용되게 되었다. 특히 이러한 소자와 소형·고성능 컴퓨터와의 결합은 전에는 상상도 하기 어려웠던 화상처리 기능들을 실현해 내었다.

본고에서 다루고자 하는 광검출기는 이러한 여러가지 중

에서도 光신호를 상응하는 전기신호로 변환시키는 單素子를 말하며, 또한 전자파, 즉 빛의 범위가 자외선부터 원적외선 까지만으로 제한하여 다루기로 한다.

## 2. 광검출기의 종류

전자기파로서의 빛은 파장에 반비례하는 에너지를 가지고 있으므로, 이 빛에너지와 검출기 물질과의 반응을 관찰하여 입사하는 에너지를 환산한다. 빛에너지가 반응하는 유형에 따라 광검출기는 크게 두가지 종류로 분류된다. 열 검출기(thermal detector)는 빛에너지가 검출기 물질에 흡수되어 열에너지로 변환되어 나타나는 물성의 변화를 이용한 검출기이다. 전기적 저항의 변화를 이용하는 bolometer, 열기전력을 이용하는 thermopile, 그리고 결정내에 나타나는 쌍극자의 변화를 이용하는 pyroelectric detector등이 이에 속한다. 이들은 pyroelectric의 경우만 예외로 하고 대개 반응속도가 상대적으로 느리고 검출능(detectivity)이 낮으나, 반응대역폭이 넓은 공통의 특징이 있다.

열검출기와 대별되는 다른 유형은 광전형 검출기(photoelectric detector)라 하는데, 이에 속하는 검출기에서는 빛의 에너지와 검출기 전자의 상호작용에 의한 물성의 변화를 이용한다. 이 과정에서는 물질의 저항이 변하는 수도 있으며(photoconductive), 전압이 발생하기도 하고(photovoltaic) 전자가 물질의부로 방출되기도(photoemissive)한다. 열 검출기와 달리, 이들 검출기는 그 반응속도가 빠르며 감지도도 높은 장점이 있으나, 이들 모두가 검출기 물질의 에너지 띠 사이의 천이를 이용하기 때문에, 입사하는 에너지가 이 에너지 차이보다 작은 경우에는 작동할 수 없는 특징이 있다. 또한 이들은 대개 그 열용량이 작으므로 강한 입사에너지를 직접 측정할 수 없는 것도 특징의 하나이다.

본 고의 범위를 벗어나지만, CCD (Charge Coupled Device)는 이들 광전형 소자들과 유사한 원리를 이용하는 하지만, 그 근본적인 구조는 MOS 형의 콘덴서와 가깝다. 다만 이들 콘덴서들을 소형·집적화 하여 10개 혹은 그 이상을 직선상에 배열한 것을 linear array 라 하며, 좌우로 수십개 혹은 그 이상의 크기로 조합, 2차원적 검출기로 이용할 수 있게 한 것을 통상 CCD 라 부른다. 집적형 소자는 위치에 따른 빛의 상대적 세기를 측정할 수 있으므로, OMA의 경우처럼 각 소자의 위치를 스펙트럼의 파장으로 환산하여 이용할 수도 있고, 신호의 1,2 차원적인 본포를 고속으로 측정할 수도 있다. 물론 單素子 검출기도 scanner등을 이용하면 위의 기능이 가능하나, 무게, 가격, 신뢰도 등에서 이들 집적형 소자들이 탁월한 강점을 지니고 있다.

3. 성능 비교용 지수 (Figures of Merit)

완제품으로 출하되는 광검출기는 그 제질, 감도, 크기, 사용법, 사용파장등이 동일하지 않으므로 그대로는 상대적인 성능의 평가가 용이하지 않다. 그런 반면 어느 특정한 환경과 용도에 필요한 검출기의 선정에 관한 계산 과정에서는 이들 검출기들의 성능을 수치로 표시한 data 가 필요하므로, 몇가지 규격에 의한 성능표시가 명시되게 되었다. 아래의 각 지수들에 대한 명칭은 명시된 조건에 따라 접두사가 추가되는데, 예를 들어 파장에 따른 성능을 표시할 때는 "spectral", 黑體 복사선에 대한 성능에는 "black body" 라는 접두사를 각각 갖게 된다.

(가) 반응도 (Responsivity)

입사하는 단위시간당의 에너지 (Watt)에 대하여 얻어지는 출력 (통상 전압 혹은 전류)를 말한다.

$$R_v(\lambda, f) = V_o / \Phi_o(\lambda) \quad (1)$$

(1)의 우변의 신호가 전압으로 얻어지면 위 표현식은 그대로 유지되며 "voltage" 라는 접두사가 추가되며, 이때 단위는 Volt/Watt가 된다. 신호가 전류의 형태로 얻어지면 좌변의 첨자 v 를 i 로 바꾸어 current responsivity라 하고, 단위는 Amp/Watt를 쓴다. 위에서 사용된 입사에너지는 파장  $\lambda$  에 의한 것이므로 (1)의 정확한 이름은 "spectral voltage responsivity" 가 된다. 이 입사에너지가 흑체에 의한 연속 spectrum으로 입사할 때는 온도 T 가 파장의 자리를 대신하며,  $R_v(T, f)$ 는 "blackbody responsivity"가 된다. 왼쪽의 f는 radiometry에서 통상 쓰이는 측정방법을 반영하는데, 이 f 는 입사하는 신호의 modulation 주기를 의미한다. 즉 Lock-in 검출에서 사용되는 chopping frequency를 말하며 보통 1000 Hz가 많이 사용된다.

(나) Noise Equivalent Power (NEP)

NEP는 검출기에서 얻어지는 잡음의 크기와 같은 크기의 검출신호를 내게하는 입사 radiant power를 말한다. 즉 신호/잡음 (S/N) 비가 1 이 되도록 하는 신호의 크기를 의미한다. 검출기에  $\Phi_o$  의 radiant power가 입사하면  $R_i(\lambda, f) * \Phi_o$  의 전류가 얻어지므로 신호/잡음 비는

$$S/N = R_i \Phi_o / i_{rms} \quad (2)$$

로 얻어진다.  $i_{rms}$  는 잡음전류를 의미한다. (2)에서 S/N 값이 1 이 되는 경우의  $\Phi_o$  가 NEP 로 정의되므로 광검출기의 NEP는 다음과 같이 주어진다.

$$NEP = i_{rms} / R_i \quad (3)$$

여기서도 반응도는  $R_i(\lambda, f)$  혹은  $R_i(T, f)$  등으로 대체 가능하며, NEP 의 이름에도 적절한 접두어를 첨부한다.

반응도와 달리 이 NEP는 잡음의 크기가 고려된 수치이기 때문에 약한 신호의 검출능력 판정에 이용될 수 있는 지수이다. NEP가 작을수록 잡음이 적어, 약한 신호의 검출능력이 우수한 검출기라고 할 수 있는데, 고성능에 높은 숫자를 사용하려는 경향에 의해 이 NEP의 역수물

검출능(detectivity)라 부르며 D로 나타낸다.

(다) 규격화 검출능 (Normalized Detectivity,  $D^*$ )

위의 NEP 나 D 는 동일한 조건에서 작동하는 유사한 검출기들을 비교하기에 유용한 수치이다. 그러나 이들 값은 잡음의 크기에 큰 역할을 하는 측정대역폭이나 검출기의 크기등이 고려되어 있지 않은 점을 중시 할 필요가 있다. 예를 들어 열잡음(Johnson noise)은

$$i_{j,rms} = (4 k T \Delta f / R)^{1/2} \quad (4)$$

로 주어지는데, 바토 잡음이 측정대역폭  $\Delta f$  에 직결되어 있음을 볼 수 있다. 검출기의 면적도 이와 비슷한 관계식을 가지고 영향을 끼칠 수가 있으므로 다른 종류, 크기의 검출기들을 비교할 경우에는 이들 변수들의 영향을 규격화시킨 비교수치가 편리함을 알 수 있다. 이러한 용도로 쓰이는 지수를 "규격화 검출능"이라 하며, 기호로는  $D^*$  (D-star) 를 사용한다.

$$D^* = D \sqrt{A_d \Delta f} = \frac{\sqrt{A_d \Delta f}}{NEP}$$

$$= \frac{\sqrt{A_d \Delta f}}{i_{rms}} R_v = \frac{\sqrt{A_d \Delta f}}{\Phi_o} \frac{S}{N} \quad (5)$$

이  $D^*$ 의 단위는  $cm^2 Hz^{1/2} W^{-1}$  가 이용되는데, 이를 (5)의 마지막 관계식과 연관시켜 보면, 이는  $1 cm^2$ 의 검출기에 1 Watt의 radiant power가 입사하고 이를 1 Hz의 대역폭으로 측정할 경우에 얻어지는 신호/잡음 비율 의미하는 수치이다. S/N 이 클 수록 같은 입사 power에 대하여 잡음이 작은 경우가 되므로,  $D^*$ 값이 클 수록 약한 신호의 검출에 유리한 검출기가 된다. 전형적인  $D^*$  값은 대략  $10^8 \sim 10^{12}$  에 이르며, 광증폭관의 경우에는  $10^{17}$  정도까지 가능하지만, 대부분의 검출기는 1 Watt 보다 훨씬 낮은 power에서 포화상태에 이르고, 실제 검출기의 실제  $D^*$ 값은 이 계산된 값에 이르지 못하기 때문에,  $D^*$  값 그 자체는 서로 다른 종류의 검출기를 정량적으로 비교하는 경우에 사용하는 이론적인 수치로 이해 되어야 한다.

다른 지수들과 마찬가지로  $D^*$ 에도 몇가지 접두어가 사용되는데,  $\Phi_o$ 가 흑체에 의해서 공급되면 "blackbody  $D^*$ "라 하고  $D^*(500, 1000, 1)$ 와 같이 표시하는데, 이 경우 500은 절대온도로 표시된 흑체의 온도, 1000은 chopping frequency, 그리고 1 은  $\Delta f$ 를 의미한다.

4. 열 검출기

열 검출기는 대부분 입사하는 에너지를 흡수하여 검출기의 온도를 변화시키고, 이 온도변화에 따라 나타나는 물성의 변화를 측정하여 입사하는 에너지를 환산한다. 에너지의 검출기 내에 흡수되어 나타나는 현상중 다음과 같은 변화들이 많이 이용된다.

- ① 전기적 저항의 변화
- ② 열기전력
- ③ 정전용량(capacitance) 변화
- ④ 매질(물,...)을 가열하여 온도상승 -> 열전대

이들은 모두 온도변화가 수반되어야 하므로 열 검출기는 상대적으로 반응속도가 느리며(1 msec 이상) 감지도 (sensitivity)가 낮으나, 입사하는 빛의 파장에 대하여 감지도의 변화가 거의 없으며, 또한 상온에서 동작이 가능하다는 장점이 있기 때문에 여러 파장에 걸쳐 정량적 측정을 하는 분광기 등에 유용하게 쓰일 수 있는 검출기이다.

열 검출기를 수학적인 모형으로 설명 하고자 하면 입사에너지에 의한 온도상승과 열전도 및 기타의 경로를 통한 열 손실 사이의 에너지 보존법칙이 이용된다. 검출기의 열용량을 H(J/K), 열 전도율을 K (W/deg)라 하고, 입사 power  $\Phi_0$ 를  $\omega$ 의 주기로 변조시킬 경우, 이때의 온도차  $\Delta T$ 는 아래와 같이 주어진다.

$$\Delta T = \frac{2 \Phi_0 \epsilon}{K (1 + \omega^2 H^2 / K^2)^{1/2}} \quad (6)$$

여기서  $\epsilon$ 는 검출기 물질의 emissivity로 대개는 1에 근사한 값을 갖는다. 이 식을  $\omega$ 에 대해서 圖示하면 대개 그림 1과 같이 나타나는데, 여기에서 3 dB 점을 cut-off 주파수  $\omega_c$ 로 보면

$$\omega_c = K / H \equiv 1 / \tau_t \quad (7)$$

로 주어지므로, 이  $\tau_t = H/K$ 를 熱時定數(thermal time constant)라 부른다. 입사에너지에 의하여 위와 같이 온도변화가 발생하면, 다른 모든 원인을 제거한다 하더라도  $\Delta T$ 의 통계적 확률오차에 해당하는 잡음(temperature noise)가 존재하게 된다. 이 잡음은

$$\Delta T^2 = \frac{4 k K T^2 \Delta f}{K^2 + \omega^2 H^2} \quad (8)$$

로 주어지는데, 여기서  $k$ 는 Boltzmann 상수이다. 전반적으로, 주어진 입사에너지에 대해서 검출기의 열용량이 작을수록  $\Delta T$ 가 크게 얻어지고 S/N 값이 커진다. 열전도율이 크면 검출기의 온도가 상승하기도 전에 다량의 열이 손실되기 때문에 가능한 최대의 온도차이를 얻는데 불리해진다. 따라서 열검출기에서는 열용량과 열전도율이 가능한 한 작게 되도록 되어있다. 이는 다른 말로 검출기의 질량을 가볍게 하고 heat sink로 연결해 주는 도산은 가는 것으로 하는 것이 권장됨을 의미한다.

#### 4.1 Bolometer

Bolometer는 1880년에 Langley에 의해서 발명된 이래 현재에도 적외선 영역에서 널리 쓰이고 있는 검출기이다. 그림 1에 보인바와 같이, bolometer에서는 검은 색의 얇은 금속이나 반도체의 막이 sensor로 사용되는데, 이 부분에 빛 에너지가 입사하면 온도가 상승하게 되고, 이에 따라 나타나는 저항의 변화를 bridge회로 등으로 측정하는 구조를 가진다. 이 저항의 변화는 전자의 band gap사이의 천이에 의한 것이 아니라 단순한 온도상승에 따른 결정내의 전자 유동성(mobility)의 변화에 의한 것이다. 이 경우 저항의 변화식은

$$R = R_0 (1 + \alpha \Delta T) \quad (9)$$

로 주어지는데,  $\alpha$ 는 금속에서는 (+), 반도체에서는 (-)의 값을 가진다.

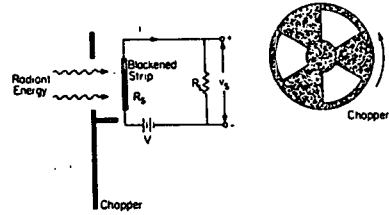


그림 1. Chopper를 사용하는 Bolometer의 예

Bolometer는 사용하는 sensing element에 따라 다섯종류로 분류가 되어, 금속, thermistor, 반도체, composite, 그리고 초전도형이 있는데, 이 중 초전도형은 금속의 초전도 천이점 근처에서 나타나는 전기적 전도도의 온도에 따른 변화를 이용하도록 하고 있으나, 온도조절의 어려움 때문에 널리 이용되지 않는다. Sensor가 금속일 경우, 대개는 열용량을 줄이기 위해 10 ~ 50nm 정도의 두께가 되도록 진공증착이나 sputtering하여 얇은 띠 모양으로 한다. 금속은 반사율이 높기 때문에 그 위에 금이나 백금등을 증착하여 흑색으로 한다. 통상  $\alpha$  값은 0.5 %/°C 정도이다. 이에 비해 thermistor나 반도체형의 bolometer에서는 10배 정도 큰 값을 얻을 수도 있다. Sensor를 냉각시키면 이 값이 더욱 향상되며 sensitivity도 상온에서 보다 order가 다르게 커질수도 있다. 그림 2는 일반적인 thermistor의 특성을 보인 것이다. Low가 1961년에 개발한 4.2 K의 Ge bolometer는  $D^*$ 가  $10^{13}$  정도이고 그 반응대역이 1.7 ~ 2,000  $\mu m$ 에 걸치는 것으로서, 근래에 우주선에 탑재하는 적외선 검출기로 쓰이기도 했다.

Composite bolometer는 "sapphire"를 이용하는데, sapphire는 열용량이 Ge의 60분의 1 정도 밖에 되지 않으므로 chopping frequency를 희생하지 않고도 면적을 크게 할 수 있는 잇점이 있다.

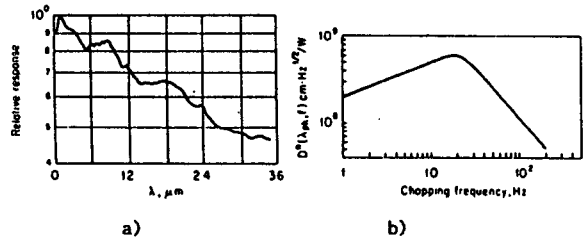


그림 2. Thermistor bolometer의 파장특성  
a) responsivity b)  $D^*$

#### 4.2 Thermocouple, Thermopile

Thermocouple은 일반적으로는 온도계로 더 잘 알려진 소자이다. 상이한 두 금속의 접합점에 열을 가하면 두 금속에 열기전력이 발생하는 "Seebeck 효과"를 이용하여 이 전압을 측정하여 온도를 환산하는 것이 일반적인 온도계로서의 사용법이다. 이 두 금속의 접합점 주위에 빛에너지 흡수체를 부착시키면 바로 광검출기로 사용할 수 있어 이를 radiation thermocouple이라 한다. 이런 소자

여러개를 직렬로 연결하여 그 열기전력이 커지게 만든 소자를 thermopile 이라 한다. 그림 3 에 이들의 구조를 보았다.

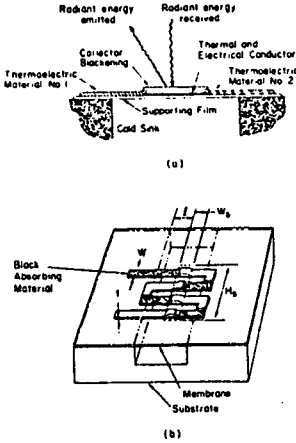
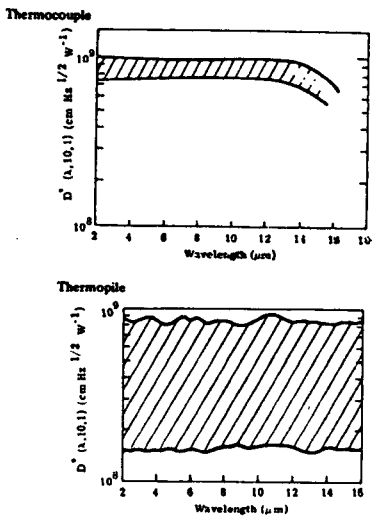


그림3. Thermocouple와 Thermopile 의 구조

Thermocouple와 thermopile은 thermostat형의 bolometer 에 비해 그 반응속도가 느리고 impedance와 반응도가 훨씬 낮으나, 측정회로가 간단하고 안정도가 좋은점이 있다. 또한 DC 측정방식이 가능하므로 chopper등이 꼭 필요하지 않고, 상온에서 작동하는 장점도 지닌다. 자장에 대한 반응은 표면의 흡수물질에 따라 달라지나, gold balck이 표면물질로 많이 이용되므로 이에 준한 자장특성을 지니게 된다. 그림 4 는 Thermocouple와 thermopile 의  $D^*$  와 반응도를 보인것이다. 일반적으로 반응도는 5 V/Watt, 시정수 10~20 ms 정도의 성능을 지닌다.



osa 4-13, fig 9

그림 4. Thermocouple와 Thermopile 의 성능

### 4.3 Pyroelectric 검출기

물질을 이루는 본자가 대칭성이 없으면 그 물질에는 영구 전기쌍극자(permanent electric dipole)가 남는다. 대부분의 물질은 그럼에도 불구하고 전체적으로는 이 dipole의 효과가 나타나지 않는데, 이는 물질내의 각 dipole이 random한 방향으로 유지되기 때문에 궁극적으로는 서로 상쇄되기 때문이다. 그러나 tourmaline과 같은 물질에서는 이들 dipole이 상쇄되지 않고 남는 경우가 있다. 이런 물질을 가열하면 dipole의 방향들이 옮겨지는 것이 아니라 모두가 같은 방향을 유지하면서 전체적으로 방향을 바꾸는 성질이 있다. 이 dipole의 방향전환은 외부에서 전장을 걸어주지 않아도 나타나기 때문에 이를 spontaneous polarization이라 하는데, 이와 같이 열에 의하여 전기적 극성이 변화하는 것을 火電效果 (pyroelectric effect, pyro -불)라 한다.

火電效果는 熱電效果와 분리하여 이해되어야 하는데, 후자의 경우는 두 상이한 금속의 두개의 접합면에 온도차이를 가하면 열기전력의 발생에 의하여 전류가 흐르지만, 前者의 경우에는 결정에 가해진 열에 의하여 전기쌍극자의 방향이 바뀌는 점이다. 따라서 火電결정을 일정한 온도로 유지시키면 이로부터는 아무런 신호, 즉 전류를 얻을 수 없으며, 입사신호를 교류의 형태로 가해 줄때에만 아래의 식으로 표현되는 교류전류신호를 얻을 수 있다.

$$i_p = \rho_T A dT/dt \quad (10)$$

여기서  $\rho_T$  는 火電계수, A는 그림 5 에서 처럼 火電結晶에 접촉한 전극의 면적을 의미한다.

따라서 火電형 광검출기는 언제나 AC mode로만 작동이 가능하므로, 신호가 modulation되지 않은 경우에는 chopper의 사용이 불가지하나, 많이 사용하는 lock-in형의 검출방식에서는 이는 전혀 문제가 되지 않는다. 또한 chopping 주기에 대한 반응대역이 여타의 경우보다 훨씬 넓으며, 반응도가 자장과 거의 무관하고 상온작동이 가능한 점 등 일반적인 열검출기의 장점도 공유한다.

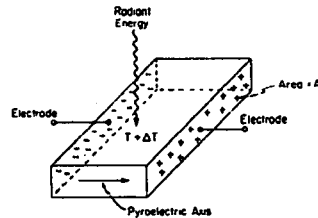


그림 5. Pyroelectric detector의 일반적 구조

이런 火電效果를 낼 수 있는 여러 결정중에 검출기로 선호되는 물질들은 Triglycin sulphate(TGS), KDP, BaTiO<sub>3</sub>, LiTaO<sub>3</sub> 외에도 몇가지가 있다.

本考에서 다루지는 않으나 언급할 만한 검출기로는 laser calorimeter가 있는데, 주로 laser의 출력을 측정하는 용도로 이용된다. 이들은 보통 흡열부와 보정용의 가열장치를 내장하고 있고, 흡열부와 가열부 주위에 배치된 thermocouple을 이용, 입사하는 laser 출력을 전기적으로 보정하는 기능을 갖고 있는 경우가 많다.

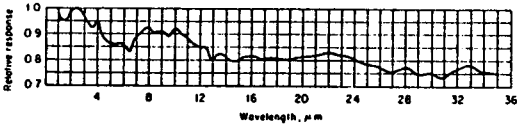


그림 6. 3M black을 입힌 TGS의 상대적 반응도

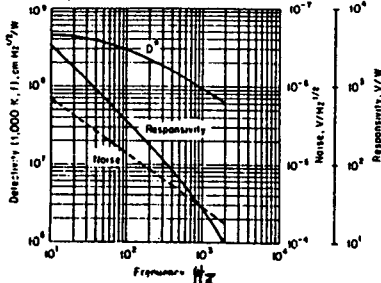


그림 7. TGS(A = 1 x 1 mm, T = 296K)의 특성

5. 光電 검출기

열 검출기와 대별되는 photoelectric detector는 전자 방출현을 예외로 하고는, 반도체 물질내의 전자와 입사하는 빛의 상호작용의 결과로 얻어지는 물성의 변화를 이용한다. 열작용과 달리 이 반응에서는 전자가 에너지 띠 사이를 천이하면서 물질변화에 직접 기여하는 점이 열 검출기와와의 차이점이다.

5.1 광다이오드( PhotoVoltaic detector, PV)

광다이오드는 p-n 접합체로 구성한다는 점에서는 여느 다이오드와 같으나, 이 접합부에 입사하는 빛에 의하여 전자-정공 쌍이 생성되는 점이 일반 다이오드와의 차이점이다. 이 부분의 에너지 구조는 대략 그림 8과 같이 modeling 되는데, 접합부 주위에 빛이 band gap  $E_g$ 를 넘는 에너지를 가지고 입사하면 전자-정공 쌍이 생성된다. 이 쌍은 junction field에 의하여 전자는 n 구역으로, 정공은 p 구역으로 확산이동하며 전류를 형성하고, 이 전류는 외부의 負荷 저항에 축적이 가능한 전압을 발생시킨다. 태양광에서 이렇게 전류를 얻는 소자가 바로 "태양전지"로서 이용되고 있으며, 광다이오드도 일종의 光電 滲透 이해할 수도 있다.

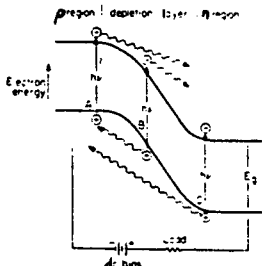


그림 8. 광다이오드 접합면에서의 전류생성

광다이오드의 효율을 높이기 위해서는 접합면이 넓고 크게 빛에 노출되는 구조를 할 필요가 있으므로, 통상 그림 9 와 같은 구조로 제작된다. 특이 이 구조에서는 접합부에서 흡수되지 않고 투과한 빛을 아래의 반사막으로 재 사용하게 하여 효율을 증대시킨다. 이 반사막은 전국으로 사용되는 이종의 쓰임새가 있다.

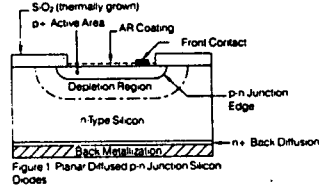


그림 9. 일반적인 광다이오드의 구조

광다이오드의 경우처럼, 에너지 band gap이 있는 물질을 검출기로 사용하면 입사하는 빛의 에너지가 이 gap보다 작은 경우에는 전자-정공쌍이 생기지 못한다. 따라서 어느 파장 이상의 파장에 대해서 반응하지 못하는 특성이 나타나는데 이는 거의 일정한 파장특성을 지니는 열검출기와 가장 대조되는 면이다. 그림 10에 대표적인 실리콘 광다이오드의 반응도를 보였는데, 1100nm 에서의 cut-off 가 대략 Si의 band gap 에너지 정도에 해당하는 빛의 파장이다. Si의 사용가능 대역은 대략 200nm ~1100 nm임을 그림 10 에서 볼 수 있으며, He-Ne laser, GaAs LED, laser diode등의 광검출에 유용한 검출기이다.

RESPONSIVITY CURVES (TYPICAL)

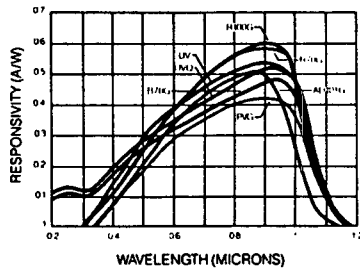


그림 10 Si 광다이오드의 반응도

광다이오드는 photovoltaic mode(PV)와 photoconductive mode (PC)의 두가지 방식으로 사용이 가능하다. PV의 경우에는 광다이오드를 광전지로 이용하는 것으로, 빛에 의해서 생기는 전압을 바로 측정하게 되므로 외부의 bias가 불필요하게 된다. PC방식은 광다이오드를 저항체로 보고, 빛에 의해 생성되는 전하운반자에 의하여 광다이오드의 전기적 저항이 감소하는 현상을 이용한다. ( 그림 11) 어느 방식을 이용하는가는 신호의 속도(chopping)와 검출기의 암전류를 고려하여 선정한다. PV식에서는 암전류가 작고 PC 식은 반응속도가 PV식에 비해 빠른 利點이 있다. Si 광다이오드의 온도를 올리면 그림 10의 반응곡선이 장파장쪽으로 이동하고, 냉각시키면 그 반대로 이동하는 현상을 보인다.

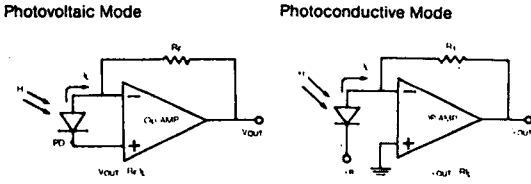


그림 11. 광다이오드의 사용법

광다이오드중에는 다이오드내에 강한 전장을 걸어 가속되는 전자에 의하여 또 다른 전자-정공쌍들을 만들어 내는 방식을 취한 것들이 있는데, 이를 avalanche 광다이오드라 한다. Johnson noise를 극복하기 위하여 이런 방식들이 쓰이는데, avalanche에 의한 전자증폭이 지나치게 커지면 shot noise가 커지므로 전자증폭을 200 혹은 그 이하로 유지하는것이 보통이다.

Si 외의 여러 반도체 물질도 광다이오드로 이용할 수 있는데, Ge도 1000~1500 nm 전후의 파장에 사용이 가능하며 avalanche 형의 최대  $D^*$ 가  $10^{12} \sim 10^{13}$  정도이다. 기타 검출기들의 성능포물 그림 12에 보였는데, 대부분 액체질소 온도 이하에서 사용할 것이 권장됨을 볼 수 있다. 이 냉각은 주로 열잡음을 최소화하여 상대적으로 감지도를 높이기 위해서 필요하게 되는데, InAs의 예를 들면, 77 K에서의 최대  $D^*$ 는 300 K에서 보다  $10^2$  배 정도 향상된다.

그림 12에 보인 물질외에도 근래에  $(\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x})\text{Te}$  가 광대역 광검출기로 많이 사용되고 있는데,  $(\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x})\text{Te}$  는 77K의 온도에서 적정성능이 얻어지고, 계차시에 Hg와 Cd의 조성비를 조정하여 최대반응 파장을 1~50  $\mu\text{m}$  까지 변경 할 수 있다. 그림 13의 네 곡선은 조성비 변경에 따른  $D^*$ 의 변화를 보인것이다.

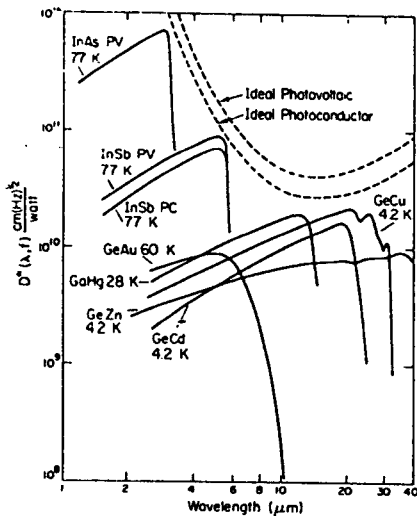


그림 12 광다이오드들의 파장특성

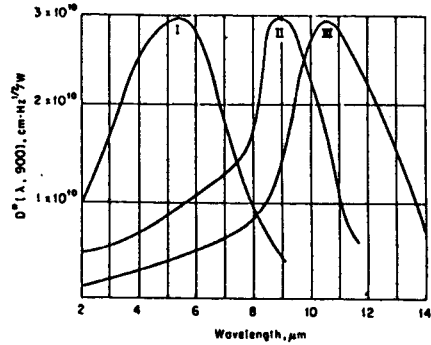


그림 13  $(\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x})\text{Te}$  의 파장특성  
T = 77 K, FOV 30°

5.2 光傳導형 검출기 (PhotoConductor, PC)

광전도형(PC)의 검출기도 PV 형 검출기와 마찬가지로 반도체 물질로 만들어지며, 앞에서 예로 든 것처럼 실제로 한가지 검출기가 사용방법에 따라 PC 혹은 PV형으로 분류 될수도 있다. 한가지 차이점은 PV형의 경우에는 p-n 접합부분이 있는 다이오드의 기본구조를 갖추어야 하나, PC 형의 경우에는 반드시 그러한 구조를 필요로 하지는 않는다는 것이다. PC 형 검출기에서 필요로 하는 조건은 입사하는 빛에너지에 의하여 conduction band에 있는 전자의 수가 늘어나는 것이다. 그러므로 단결정 상태의 Si 혹은 Ge도 PC형 검출기로 이용이 가능하게 된다.

PV형의 검출기에서 언급한 바와 같이, 어떤 에너지 띠를 가진 물질을 검출기로 사용하면, 그 에너지 차,  $E_g$  를 넘지 못하는 빛에 대해서는 반응이 거의 나타나지 않는다. Intrinsic 반도체인 Si의 경우  $E_g = 1.12 \text{ eV}$  ( $\lambda_{\text{out off}} = 1.1 \mu\text{m}$ ), Ge은  $E_g = 0.67 \text{ eV}$  ( $\lambda_{\text{out off}} = 1.85 \mu\text{m}$ ) 이므로, 각각의 적외선 측정대역에 한계가 정해진다. 이 한계파장( $\lambda_{\text{out off}}$ )을 옮기기 위해서는  $E_g$  가 낮은 물질을 찾아야 한다.

Intrinsic 반도체와 달리, extrinsic 반도체는 불순물을 doping시켜 donor와 acceptor에 의하여 이  $E_g$ 를 감소시킨 효과를 지니고 있어 장파장용의 검출기로서의 사용 가능성을 지니고 있다. 표 1에 광검출기로 사용되는 extrinsic 반도체들을 보였는데,  $E_g$ 가 가장 작은 Ge:Cu의 경우,  $\lambda_{\text{out off}}$ 는 30  $\mu\text{m}$ 가 된다. (그림 12)

	$E_g(\text{eV})$	carrier type
Ge:Hg	0.09	p
Ge:Cu	0.041	p
Ge:Cd	0.06	p
Si:As	0.0537	n
Si:Bi	0.0706	p
Si:P	0.045	n
Si:In	0.165	p
Si:Mg	0.087	p

표 1. 광검출기용 extrinsic 반도체의 예

이와 같은 반도체를 원격외선 (Far IR) 검출기로 이용하고자 할 때에는 valence band에 있는 전자의 평균 열운동 에너지가  $T = 300\text{ K}$ 에서  $0.04\text{ eV}$  정도 된다는 점이다. 그러므로 이들은 상온에서는 신호에 의한 전자의 전이와 열운동에 의한 전이가 같은 order 정도가 되어 S/N이 저하하므로 소기의 목적을 이루기 어렵다. 이들은 반드시 저온으로 유지시켜, 전자의 열운동 에너지의 크기를  $E_g$  보다 훨씬 작은 값이 되도록 하여야 한다. PC형 검출기의 사용법은 그림 11에 보인바와 같이, 검출기의 저항의 변화에 의한 부하양단의 전압변화를 이용한다.

5.3 광증폭관 (PhotoMultiplier Tube, PMT)

PMT는 어느 물질에 빛이나 전자가 입사하면 물질내의 전자가 외부로 방출되는 현상 두가지에 기초하고 있는데, 빛에 의한 전자방출은 광전효과, 고속 전자에 의한 전자방출은 2차전자 방출이라 한다. 이 중에서 특히 PMT의 특성결정에 큰 영향을 행사하는 것이 광전효과 부분인데, 이 부분의 素子를 광음극(photo-cathode)이라 한다.

광음극은 빛을 받아 전자를 방출하는 물질이면 어느 것이든 사용이 가능하지만, 금속보다는 alkali 계열의 원소나 반도체등의 효율의 우수성 때문에 금속이 광음극으로 쓰이지는 않는다. 금속은 반도체에 비해 흔히 반사율이 높고, 많은 자유전자가 있기 때문에 가속된 전자가 표면으로 이동하는 과정에 많은 전자-전자 산란을 겪을 확률이 높다. 표면에서 외부로 탈출하는데 필요한 에너지 - 일 함수 - 도 대부분  $3\text{ eV}$  이상으로, 파장  $0.5\text{ }\mu\text{m}$  인 빛의 에너지가  $2.5\text{ eV}$  정도인 점을 고려한다면 대부분의 가시광선대역에 대하여 음극으로서의 효율이 지극히 낮음을 짐작할 수 있다. 이에 비해 multi-alkali 광음극이나 반도체 광음극들은 높은 흡수율, 낮은 자유전자 밀도, 낮은 탈출소요 에너지 - 전자 친화도를 보이므로 여러 용도의 광음극 물질로 이용된다.

광음극에서의 전자방출 과정은 일반적인 반도체의 에너지 띠 이론에 전자친화도를 고려한 model을 이용하여 설명한다. 그림 14에 보인 model에서, vacuum level은 전자가 물질 외부로 방출된 상태를 의미한다. 입사하는 빛 에너지를 흡수한 valence band의 전자는 흡수에너지가  $E_g$  보다 클 경우 conduction band로 상태를 바꾸는 과정은 PV, PC형 검출기에서와 다르지 않다. 광음극에서는 그러나 이 conduction band에 있는 전자의 에너지가 전자친화도  $E_A$  보다 클 경우에 전자가 물질 외부로 방출되는데, 이때 전자가 가지는 최대 에너지는 빛에너지에서  $E_g + E_A$ 를 제외한 값이 된다. 대부분의 방출전자는 이 몇단계를 거치는 동안 여러종류의 손실을 겪게 되므로 이 보다는 낮은 에너지를 가지고 방출된다. 광음극 물질중 GaAs:Cs:O는 전자 친화도가 (-)값을 갖는다. 이런 물질의 conduction band로 천이한 전자는 (+)의 친화도를 가진 물질에서와 반대로 운동에너지를 얻으며 광음극에서 방출되기 때문에 고효율의 광음극 재료가 된다.

PMT의 기본 구조는 그림 15와 같이, 광음극과 여러개의 전극 - dynode -으로 된 저잡음 증폭단으로 구성된다. 입시 광신호에 의하여 광음극에서 방출된 전자는 첫번째의 dynode로 가속되는데, dynode 사이의 전압은 100~200 Volt 이므로 dynode에 충돌하는 전자는 대략 100eV이상의 에너지를 가진다. Dynode의 일함수가  $2\text{ eV}$ 라면 이 100 eV

의 에너지는 최대 50개의 2차 전자를 방출할 수 있다. 실제로는 가속전자가 dynode 길은 곳으로 침투하여 반응하기 때문에 방출되는 전자의 수는 훨씬 적어진다. 따라서 PMT의 진류증폭율은 dynode사이의 전압에 대해서 초기에는 증가하나, 고압에서는 오히려 감소하는 특성을 보인다. 이에 비해 (-) 전자 친화도를 가진 dynode에는 conduction band에 올라온 전자를 잡아 두려는 경향이 없으므로 이득이 전압에 비례하는 성질이 있다(그림 16). 그러면서도 PMT 전체적으로는 그림 17과 같은 포화특성을 나타내는데, 포화현상은 마지막 dynode와 양극사이의 공간에 전자의 밀도가 너무 커져, dynode에서 양극쪽으로 나오는 전자가 앞서가는 전자들에 의한 강한 척력 때문에 나오지 못하기 때문에 생긴다.

PMT의 선형반응대역 (linear dynamic range)는 암전류의  $10^8$ 배에 이르고, 반응속도는  $0.1\text{ nsec}$ 가 가능하다. Spectral sensitivity는 광음극 물질에 따라 주로 결정되는데 (window의 영향 있음), 그림 18에 소개한 재료종류 많이 이용되는 것은 S-20((Cs)Na<sub>2</sub>K<sub>2</sub>Sb), S-10 (Ag-Bi-O-Cs) 등이며, 가장 일찍부터 개발되었던 S-1 (Ag-O-Sb)는 낮은 효율 때문에 많이 쓰이지는 않으나, 아직도 근적외선대에서 반응하는 유일한 재료이다.

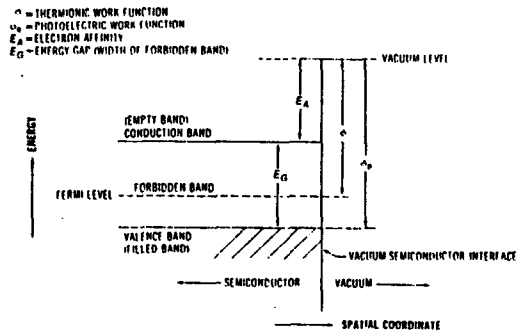


그림 14. 반도체 에너지 띠 모델

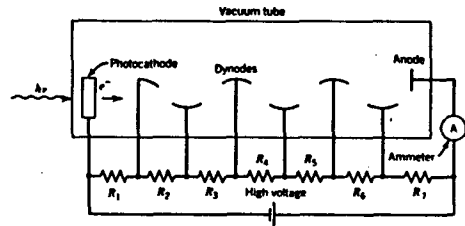


그림 15. 광증폭관의 작동구조

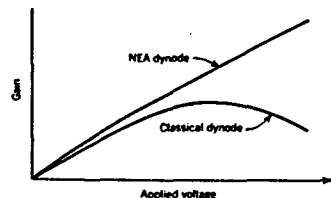


그림 16. Dynode의 전압에 대한 이득

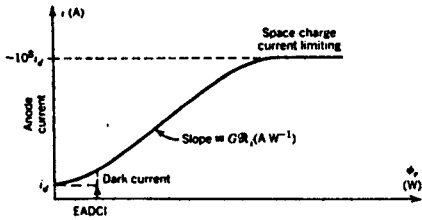


그림 17. PMT의 선형반응구간과 포화현상

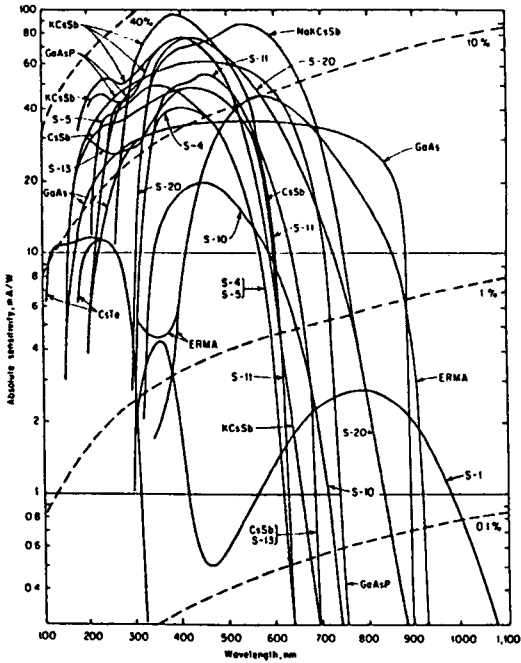


그림 18. 광음극의 파장에 따른 감도

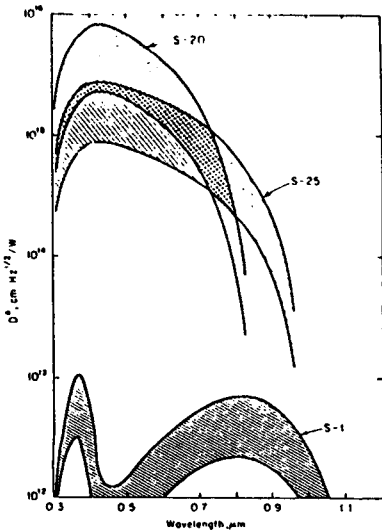


그림 19. T = 300 K 에서의 PMT D\*

6. 광 검출기의 잡음

광신호를 측정할 때 얻어지는 잡음의 원은 크게 3 곳으로 본다. 첫번으로는 대상물체나 광원에서 오는 광자의 요동(fluctuation)과 신호외의 배경에서 오는 빛, 즉 검출기 외적인 요인에 의한 잡음을 들 수가 있다. 다음이 검출기 자체에 의한 잡음으로 아래에서 이 부분을 좀더 상세히 다루기로 한다. 마지막 잡음의 출처는 검출기 이후의 신호처리 과정에 있는 전자소자들인데, 많은 경우에 이 단계의 잡음은 검출기 자체의 잡음과 그 성질이 같다. 여기서는 검출기 자체의 잡음만을 다루기로 한다.

6.1 Johnson noise

Nyquist noise, 열잡음이라고도 하며, 저항체 내부 대전입자의 열운동에 의한 열전류의 fluctuation에 의하여 생긴다. 이 잡음의 에너지는  $kT/2$  로 얻어지며, 이에 의한 잡음전압은

$$V_{J,rms} = \sqrt{4 k T \Delta f} \quad (11)$$

로 주어진다. 저항의 온도를 낮추어 주거나, 저항을 저항체를 이용하여 최소화 한다. 모든 검출기에 적용되는 잡음이다.

6.2 Shot noise

Shot noise는 광전형 검출기에서만 나타나는데, 광전자가 discrete 한 단위로 생성되기 때문에 발생한다. 신호가 극히 약할 경우-잡음의 문제는 이런 경우에 심각해짐 - 광자가 검출기에 도착하는 확률은 Poisson 통계 법칙을 따르게 된다. 이에 따라 검출기에서의 광전자 생성도 같은 확률식을 따르게 된다. 평균전류를  $\bar{I}$  라 하면, Poisson 통계에 의한 잡음 전류는

$$i_{s,rms} = \sqrt{2 q \bar{I} \Delta f} \quad (12)$$

로 주어진다. q는 전자의 전하량이다. 이 잡음은 광다이오드(PV形)처럼 potential barrier가 존재하는 검출기에서만 고려되어야 한다. 이런 barrier가 없는 경우에는 아래의 G-R noise가 이 shot noise를 대체한다. PV형 검출기 외에도 박막형 검출기에서도 나타난다.

6.3 Generation-Recombination noise

광다이오드식의 photovoltaic 검출기에서는 접합부 주위에 생긴 전자-정공은 각각 반대방향으로 이동하므로 이 쌍이 재결합하지는 않는 것으로 본다. 그러나 PC형의 검출기에서는 conduction band에 이온 전자가 다시 정공과 재결합할 수 있는 여지가 있다. G-R 잡음은 이 생성-재결합물의 fluctuation에 기인한다. 그 크기는 아래와 같이 주어진다.

$$i_{G-R,rms} = 2 \bar{I} \sqrt{\frac{\tau_0 \Delta f}{N_0 (1 + (\omega_c \tau_0)^2)}} \quad (13)$$

여기서  $\bar{I}$ 는 광전자뿐 아니라 모든 원인에 의한 전체 전류,  $\tau_0$ 는 전하운반자 수명,  $N_0$ 는 전체 자유운반자의 수 그리고 f는 측정주파수이다.



6.4 "1/f" noise

생성원인이 명확하게 알려져 있지 않다. 전극연결을 좋게하면 줄어들기는 하지만 이 잡음을 완전히 제거한 전극접촉은 알려지지 않고 있다. 이 잡음은 그 power spectrum이 1/f<sup>n</sup> 식으로 감소하는 특징이 있어 그 이름이 주어졌는데, n 은 0.8 ~ 2 정도이다. 모든 검출기에서 관찰된다.

6.5 온도잡음

검출기 소자가 입사하는 신호외에 heat sink와 傳導나 배경으로의 輻射에 의하여 생기는 자체온도의 변화에 의하여 생기는 잡음을 말한다. 열검출기의 경우에 傳導에 의한 영향을 무시할 수 있도록 설계 한다. 이 잡음은 모든 검출기에 관계되지만, 특히 얇은 박막으로 된 검출기에서 영향이 크다. 표현식은 아래와 같이 주어지는데, 각 기호의 설명은 (6) 식 주위를 참조하며, k 는 Boltzmann 상수이다.

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{4 k K T^2 \Delta f}{K^2 + \omega^2 H^2}} \quad (14)$$

6.6 Microphonics

검출기계통이 진동이나 충격을 받을때, 전선이나 부품의 변위에 의하여 나타나는 잡음이다. 또한 검출기소자에 열적인 stress가 가해 질 경우에도 나타나, 急冷과 急에서 관찰되기도 한다.

잡음은 또한 측정하는 주파수에 따라 변화하는데, 열잡음(Johnson)의 경우는 측정주파수에 무관한 white noise로 나타나지만 기타의 잡음들은 검출기마다 특징있는 반응을 한다. 아래에 光傳導형 검출기의 잡음특성을 보였다.

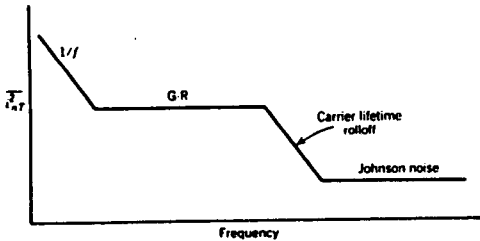


그림 20. PC 형 검출기의 잡음의 유형

참 고 문 헌

1. W.W. Wolfe, G.J. Zissis (eds.), "The Infrared Handbook", Office of Naval Research, 1978
2. W. G. Driscoll, W. Vaughan (eds.), "Handbook of Optics ", (McGraw Hill, 1978)
3. A. H. Sommer, "Photoemissive Materials", (Robert Krieger, New York, 1980)
4. E.L. Dereniak, D.G. Crowe, "Optical Radiation Detectors", (John Wiley & Sons, 1984)
5. F. Grum, R.J. Becherer, "Optical Radiation Measurements", (Academic, 1979)
6. I.P. Csorba, "Image Tubes", (Howard W. Sams, 1985)