

ELECTRONIC IMAGING IN ASTRONOMY

Detectors and Instrumentation

5 Instrumentation and detectors

櫛引洸佑

理学部天文学科 4 年

2017/5/10

- 5.4 Interferometers
 - 5.4.1 The Fourier Transform Spectrometer (FTS)
 - 5.4.2 The Fabry-Perot etalon
 - 5.4.3 Interference filters
- 5.5 Detectors
 - 5.5.1 Classification
 - 5.5.2 Semiconductors
 - 5.5.3 Photoconductors and photodiodes
 - 5.5.4 Thermal detectors
 - 5.5.5 Coherent detectors

- 5.4 Interferometers
 - 5.4.1 The Fourier Transform Spectrometer (FTS)
 - 5.4.2 The Fabry-Perot etalon
 - 5.4.3 Interference filters
- 5.5 Detectors
 - 5.5.1 Classification
 - 5.5.2 Semiconductors
 - 5.5.3 Photoconductors and photodiodes
 - 5.5.4 Thermal detectors
 - 5.5.5 Coherent detectors

5.4.1 FTS

- Michelson 干渉計 (右図) を用いる。
- 経路差は $\Delta x = 2(x_b - x_a)$ であり、位相差は $k\Delta x = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x$
- 入射波 (の強度) に対する output (の強度の) 割合はある波数 k の波に対して、
$$T(k, \Delta x) = \frac{1}{2}[1 + \cos(k\Delta x)](?)$$

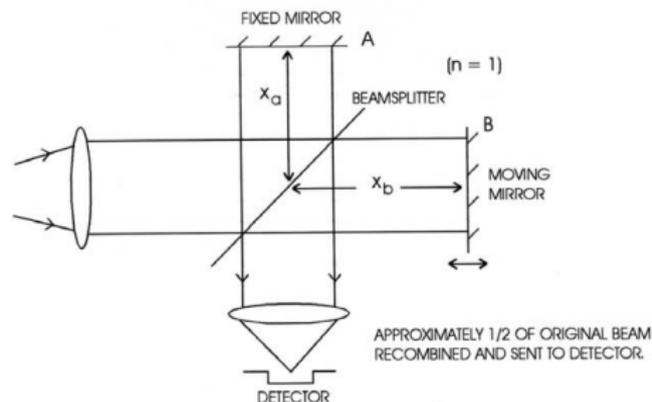


Fig 1: Mclean 教科書より

5.4.1 $T(k, \Delta x)$ について

- 複素表示の波動 $E(t) = E_0 \exp(i\omega t)$, $|E(t)|^2 = |E_0|^2$
- Beam Splitter で半分ずつ鏡 A,B に向かうとすると、検出する波 $E_A + E_B$ は

$$\begin{aligned} E_A + E_B &= \frac{1}{2} E_0 \exp(i\omega t) + \frac{1}{2} E_0 \exp(i\omega t + ik\Delta x) \\ &= \frac{1}{2} E_0 \exp(i\omega t) (1 + \exp(ik\Delta x)) \end{aligned}$$

したがって、

$$\begin{aligned} |E_A + E_B|^2 &= \frac{1}{4} |E_0|^2 (2 + \exp(ik\Delta x) + \exp(-ik\Delta x)) \\ &= \frac{1}{2} |E_0|^2 (1 + \cos(k\Delta x)) \end{aligned}$$

5.4.1 FTS の原理、利点

- スペクトルが $I(k)$ である入射波に対して検出される電磁波強度は

$$F(\Delta x) = c \int_0^{\infty} I(k) T(k, \Delta x) dk = \text{const.} + \frac{c}{2} \int_0^{\infty} I(k) \cos(k\Delta x) dk$$

- $F(\Delta x)$: Interferogram
- 第二項は $I(k)$ のフーリエ余弦積分なので逆変換で

$$I(k) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} F(\Delta x) \cos(k\Delta x) d\Delta x$$

- FTS の利点
 - 波長分解能が非常に高い。 $R = 4\Delta x_{\max}/\lambda$ 。
Ex. $\Delta x_{\max} = 10 \text{ cm}$, $\lambda = 1 \mu\text{m} \Rightarrow R = 400,000$
 - 検出器にすべての光が落ちるので S/N が高い。
- FTS 欠点
 - スペクトルの決定に時間がかかり、大気の状態が変化するかも。

- 5.4 Interferometers
 - 5.4.1 The Fourier Transform Spectrometer (FTS)
 - 5.4.2 The Fabry-Perot etalon
 - 5.4.3 Interference filters
- 5.5 Detectors
 - 5.5.1 Classification
 - 5.5.2 Semiconductors
 - 5.5.3 Photoconductors and photodiodes
 - 5.5.4 Thermal detectors
 - 5.5.5 Coherent detectors

5.4.2 エタロン

- エタロン: 向かい合った plane parallel plates
間隔 d (図では l)、間の屈折率 $n (= 1)$ 、入射角 $\theta (\ll 1)$ (屈折角も $\sim \theta$)
- 干渉の条件から $m\lambda = 2nd \cos \theta$ が強め合っ出てくる (θ の依存)。

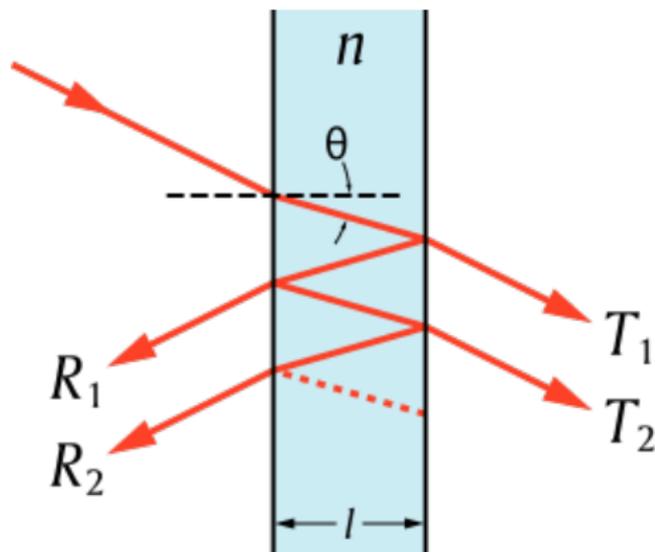


Fig 2:

<https://ja.wikipedia.org/wiki/ファブリ・ペロー干渉計より>

5.4.2 ファブリペロー干渉計の分解能、フィネス

- 分解能:

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda_{\text{FSP}}} \frac{\Delta\lambda_{\text{FSP}}}{\delta\lambda} = \frac{2Fnd}{\lambda}$$

- フィネス: $F = \frac{\Delta\lambda_{\text{FSP}}}{\delta\lambda}$
フィネスは plate の反射率を用いて $F = \pi\sqrt{r}/(1-r)$ と表せる。
典型的値は 30-50。
- Transmitted intensity:
位相差 $\delta = \frac{2\pi}{\lambda}2nd \cos\theta$ を導入して、

$$\frac{I(\delta)}{I(0)} = \frac{1}{1 + (2F/\pi)^2 \sin^2(\delta/2)}$$

5.4.2 ファブリペロー干渉計の透過波形

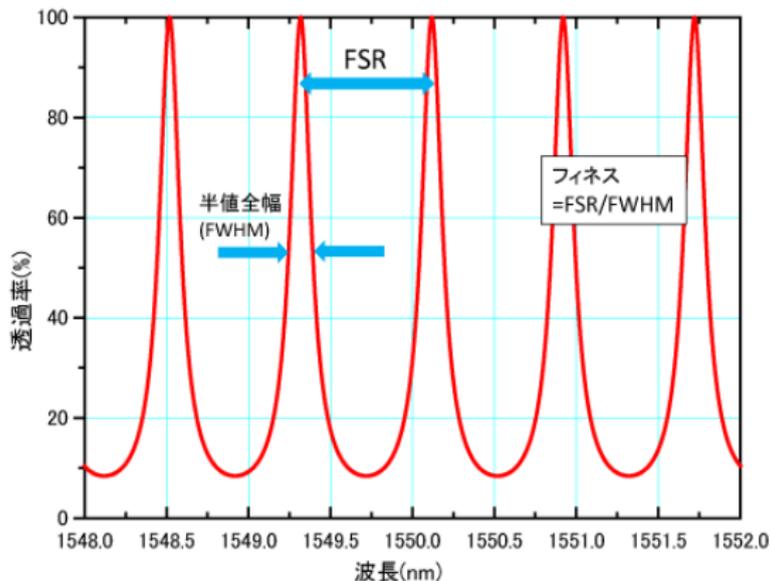


Fig 4: <https://www.kogakugiken.co.jp/products/etalons.html> より

- 5.4 Interferometers
 - 5.4.1 The Fourier Transform Spectrometer (FTS)
 - 5.4.2 The Fabry-Perot etalon
 - 5.4.3 Interference filters
- 5.5 Detectors
 - 5.5.1 Classification
 - 5.5.2 Semiconductors
 - 5.5.3 Photoconductors and photodiodes
 - 5.5.4 Thermal detectors
 - 5.5.5 Coherent detectors

5.4.3 干渉フィルターの基本

- Fabry-Perot etalon と同じ原理。
- 強め合いの干渉は $m\lambda = 2nd \cos \theta$ の式で考えられる。
- 最も単純なものは Fabry-Perot etalon のギャップを望む波長の $1/2$ 波長の光学長を持つ誘電体で埋めたもの。
- blocking layer を含む全体の基本構造が以下の図。

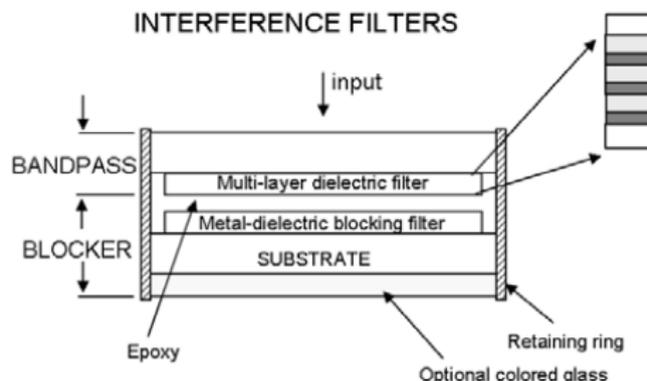


Fig 5: Mclean 教科書より

5.4.3 反射膜 (誘電体多層膜)

- 望む波長の $1/4$ 波長の光学長の誘電体薄膜の重ね合わせ。
- 反射光はすべて強め合う。
- 典型的には 3-5 層の積み重ね。
- その他の入射光は十分に減衰。

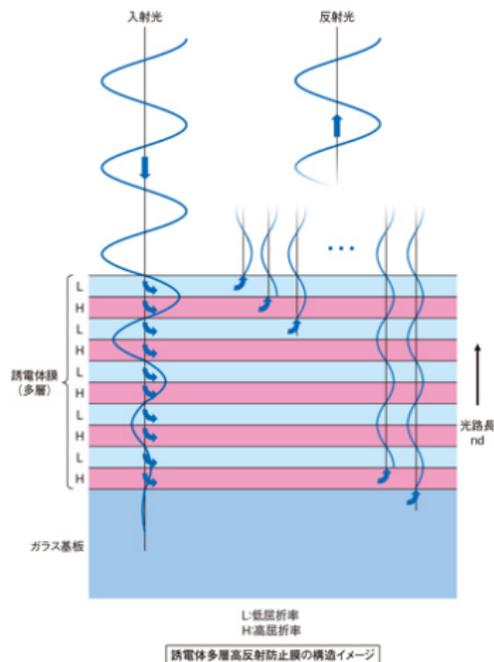


Fig 6: https://www.global-optosigma.com/jp/category/opt_d/opt_d03.html より

5.4.3 波長透過特性

- 透過のピーク波長は以下で与えられる。

$$\lambda = \lambda_0 \sqrt{1 - \left(\frac{n_0}{n_e}\right)^2 \sin^2 \varphi}$$

n_0 : 外部の屈折率 (~ 1)

n_e : spacer の有効屈折率

φ : 入射光の external angle

- 入射角が傾くとピークが短波長側に移動 (blue shift)

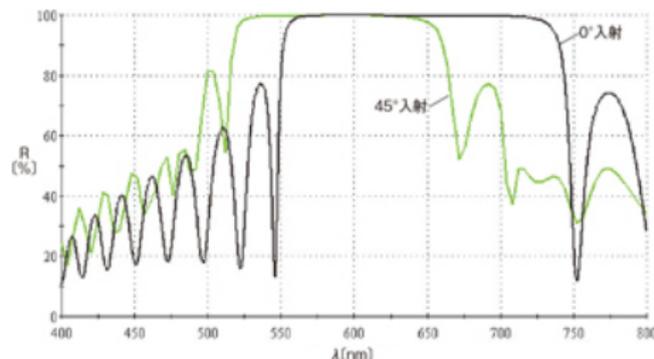


Fig 7: https://www.global-optosigma.com/jp/category/opt_d/opt_d03.html より

- 5.4 Interferometers
 - 5.4.1 The Fourier Transform Spectrometer (FTS)
 - 5.4.2 The Fabry-Perot etalon
 - 5.4.3 Interference filters
- 5.5 Detectors
 - 5.5.1 Classification
 - 5.5.2 Semiconductors
 - 5.5.3 Photoconductors and photodiodes
 - 5.5.4 Thermal detectors
 - 5.5.5 Coherent detectors

5.5.1 検出器 3 つのグループ分け

- Photon detectors
 - 個々の光子が検出物質との反応で一つかそれ以上の電子 (もしくはその他キャリア) を放出。
 - ガンマ線から遠赤外線まで。
- Thermal detectors
 - 光子のエネルギーが物質内で熱になり、検出器の測定可能な特性 (電気伝導度など) に変化を与える。
 - 主に赤外とサブミリ。
- Coherent detectors
 - 電場の波を直接観測し、その位相情報を保存する。
 - 最も一般的な形式は電磁放射の電氣的なシグナルへの変換の前か後で局所的に生じる場との干渉を利用。
 - 遠赤外から電波まで。

5.5.1 Photon or Thermal の違い

- Photon detectors と Thermal detectors の区別。
 - Thermal detector は光子の spectral distribution によらず、合計のパワー (P) のみによる。
⇒ ワットあたり単位波長幅あたりのアウトプットはフラットで波長によらない。
 - Photon detector は光子の到達率 ($N = P/h\nu$) を測る。また単位時間あたり入射エネルギーのワットあたり個数 ($N/P = \lambda/hc$) は波長に比例。
⇒ その反応は光電効果が起こせる最大波長まで波長とともに増加する。

5.5.1 Photon detectors の細分

- Photoemission device: 物質から charge carrier (electron) をたたき出す (external photoelectric effect).
 - PMT の photocathode。
 - UV imaging
 - down conversion による low energy photons (fluoresce)
- Photoabsorption device: 物質内で charge carrier を自由にする (internal photoelectric effect).
 - Photoconductor effect
 - 単体の一様な半導体で作られる。
 - 光子の吸収で free charge carrier が作られ、伝導性が変化する。
 - たいてい外部電場がある。
 - Photovoltaic (Photodiode) effect
 - 違う物質の結合や電氣的な性質の意図的变化により内部電場とポテンシャル障壁を作る。
 - 生じた carrier はこれらの場に従う。

- 5.4 Interferometers
 - 5.4.1 The Fourier Transform Spectrometer (FTS)
 - 5.4.2 The Fabry-Perot etalon
 - 5.4.3 Interference filters
- 5.5 Detectors
 - 5.5.1 Classification
 - 5.5.2 Semiconductors
 - 5.5.3 Photoconductors and photodiodes
 - 5.5.4 Thermal detectors
 - 5.5.5 Coherent detectors

5.5.2 バンド構造

- 個々の原子が近づくと価電子の相互作用で外側の軌道が変化。
- 原子が多くなると、バンドが形成される。
 - valence band: 電子に満たされたエネルギーの低いバンド。
 - conduction band: 電子がないエネルギーの高いバンド。
- 二つのバンドのエネルギー差:
forbidden energy gap (E_G)

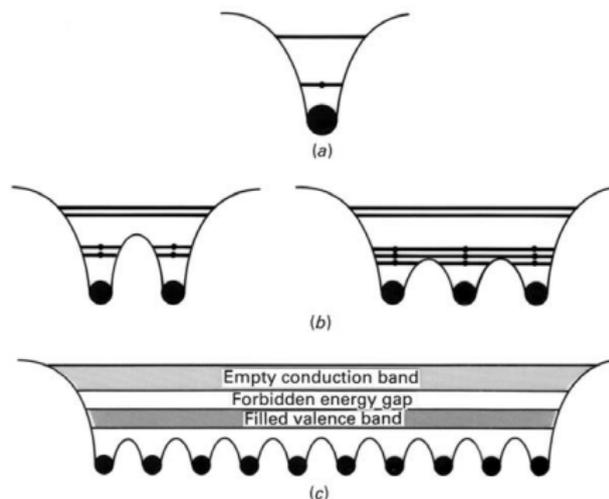


Fig 8: Mclean 教科書より

5.5.2 バンド構造 (続)/金属、絶縁体

- ここまでの注意点
 - 結晶は純物質で一種類の原子しか含まない。
 - 周期的な構造が破れてはいけない (不自然な電子共有でエネルギーレベルがゆがむ)。
 - 現実にはこれらは破られ、デバイスのパフォーマンス低下につながる。
- 金属
 - valence band と conduction band が重なっていて、価電子が自由に動き回る (電気熱伝導)。
 - 外部電場にも反応。
- 絶縁体
 - E_G が大きい。
 - conduction band に電子がなく、電流を作れない。
 - valence band の電子は隣の軌道が埋まっているために電場に反応できない。

5.5.2 真性半導体

- 室温で valence band から conduction band への遷移が可能。
- 遷移に関わる熱エネルギーは $E_{th}(\text{eV}) = kT = 0.026(T/300) \text{ eV}$
- 遷移によって生じる valence band 中の hole も電気伝導に寄与する ("electron-hole" pairs)。
- E_G が重要。
 - 典型的に $\sim 1\text{eV}$ だが、 0eV から 3.5eV の幅を持つ。
 - 1eV は室温の 38 倍、可視光は $2.25\text{eV}(550\text{nm})$ 。
 - 遷移する電子の数は $\exp(-E_G/2kT)$ くらいなので、環境変化の影響を受けなため、 E_G が大きいものが好まれる。

5.5.2 真性半導体 (続)

- Table 5.1

- 元素周期表で IV 族は半導体。
- III-V 化合物 (GaAs, InSb) や II-VI 化合物 (HgCdTe) も半導体の性質を示す。

- Table 5.2

- 光子を吸収して電子を valence band から conduction band へ遷移させる。
- 赤い光は遷移に十分なエネルギーを持っていない (吸収係数について考える)。
カットオフ波長は

$$\lambda_c = \frac{hc}{E_G} = \frac{1.24 \mu\text{m eV}}{E_G}$$

5.5.2 外因性半導体

- ドープされた不純物が forbidden gap の間に中間的なエネルギー順位を作る。⇒ 遷移に必要なエネルギーが小さくなり赤外線でも使える。
- n-type
 - 不純物の価電子が半導体より多い。
⇒ conduction band に電子を提供する。
- p-type
 - 不純物の価電子が半導体より少ない。
⇒ valence band にホールが生じる。
- Table 5.3 に例。

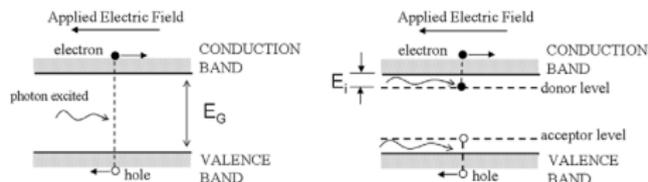


Fig 9: Mclean 教科書より

- 5.4 Interferometers
 - 5.4.1 The Fourier Transform Spectrometer (FTS)
 - 5.4.2 The Fabry-Perot etalon
 - 5.4.3 Interference filters
- 5.5 Detectors
 - 5.5.1 Classification
 - 5.5.2 Semiconductors
 - 5.5.3 Photoconductors and photodiodes
 - 5.5.4 Thermal detectors
 - 5.5.5 Coherent detectors

5.5.3 Photoconductor

- 光子が吸収され electron-hole pair を作る。
- electron も hole も光電流に寄与するが、electron が支配的。

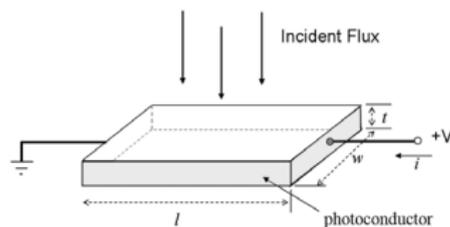


Fig 10: Mclean 教科書より

- 入射フラックス P [W] で生じる平均光電流

$$I = \frac{e\eta P}{h\nu} \frac{v\tau}{l}$$

- η : 量子効率
- τ : mean carrier lifetime (\ll a few milliseconds)
- v : charged carrier の平均速度 ($v = \mu E = \mu V/l$) (μ : carrier の可動性)

5.5.3 Photoconductor

- transit time: l/v
- mean carrier lifetime と transit time の比: $G = v\tau/l$
- 検出器の反応性: $S = I/P$ or $V/RP \Rightarrow S = \frac{e\eta G}{hc}$
- 二乗平方根ノイズ: $\sqrt{4eGIB}$ (B : electrical bandwidth)

5.5.3 Photodiode

- p-n 結合を考える。
 - 結合部周辺で electron と hole が打ち消し合う (depletion region)。
 - n-type の方が電子が多いので n-type→p-type の流れができる。
 - ポテンシャル障壁が出来て流れが止まる。
- ポテンシャル障壁の大きさについて
 - 不純物の集中度合いによる。
 - フェルミレベル (E_F)(電子の存在確率が 1/2 になる準位) が物質内で一定であるという要件を満たす分だけシフトする。
 - E_F は n-type では conduction band 側、p-type では valence band 側に寄っている。

5.5.3 Photodiode

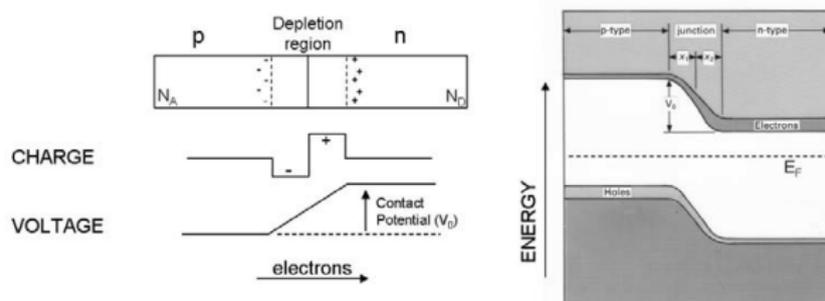


Fig 11: Mclean 教科書より

- junction region の幅 ($X_1 + X_2$) は以下の条件で大きくなる
 - 電圧 V_0 が増える。
 - アクセプター原子が減る。
- p 側に正の電圧をかけるとポテンシャル障壁が弱まり電子を引き付ける (forward bias)。一方で p 側の負の電圧が大きくなり depletion region の幅が増える (reversed bias)。

5.5.3 Photodiode

- depletion region に光があたって、electron-hole pair ができる。
⇒ 電場によって別々の方向へと再結合する前に別れる。
- 入射フラックス P [W] で生じる電流と二乗平方根ノイズは

$$I = \frac{e\eta P}{h\nu}$$
$$\text{noise} = \sqrt{2eIB}$$

- photoconductor と比べて、 $G = 1$ かつノイズが $1/\sqrt{2}$
⇒ depletion region では再結合が生じないから。

- 5.4 Interferometers
 - 5.4.1 The Fourier Transform Spectrometer (FTS)
 - 5.4.2 The Fabry-Perot etalon
 - 5.4.3 Interference filters
- 5.5 Detectors
 - 5.5.1 Classification
 - 5.5.2 Semiconductors
 - 5.5.3 Photoconductors and photodiodes
 - **5.5.4 Thermal detectors**
 - 5.5.5 Coherent detectors

5.5.4 Bolometer

- 遠赤外からサブミリで発展。
- 感度の高い Thermometer と大きな吸収断面積 ($QE(\eta) \sim 100\%$) の Absorber(熱容量 C [J/K]) で構成される。
- Thermometer と Absorber は低温で heat sink とつながっていて、この伝導率は G [W/K]。
- P [W] の光源からくるエネルギーは $E = \eta P \Delta t$ (教科書ではこれを $h\nu$ で割っているがそうするとエネルギーじゃなくなる...??)
⇒ 温度上昇は $\Delta T = T - T_0 = E/C$
- バイアス電流を含めて考えると $T = T_0 + (P + P_{\text{bias}})/G$
- 温度変化で bolometer の抵抗に変化が生じるので電圧の変化によって測定。

- 5.4 Interferometers
 - 5.4.1 The Fourier Transform Spectrometer (FTS)
 - 5.4.2 The Fabry-Perot etalon
 - 5.4.3 Interference filters
- 5.5 Detectors
 - 5.5.1 Classification
 - 5.5.2 Semiconductors
 - 5.5.3 Photoconductors and photodiodes
 - 5.5.4 Thermal detectors
 - 5.5.5 Coherent detectors

5.5.5 Heterodyne

- 異なる周波数の信号をミックスして、二つの周波数の間のうなり周波数を検出。
- 入射波を電気信号にして増幅し Local Oscillator と合成する。
 - 1GHz 以下: cryogenic transistor pre-amplifier で増幅し合成。
 - 1GHz から 40GHz: FET, parametric, and maser amplifier で増幅し合成。
 - 40GHz 以上: 増幅の前に合成が来る。(周波数を減らすため)
- うなり周波数は $\nu_{IF} = \nu_S - \nu_{LO}$
- mixer について
 - オリジナルの周波数からうなり周波数にする非線形装置。
 - diode: I-V 関係に二乗則が近似的に成立。 $I = V^2$ ならば $I \propto P$ 。
 - SIS mixer: 二つの superconductor から作られる接合。