
干渉計セミナー

2024 / 7 / 10 (水) 16:00 ~ 17:00

教科書 (レクチャー全体)

* レーザー物理入門(霜田光一, 岩波書店)

* 重力波物理の最前線(川村静児, 共立出版)

他におすすめの教科書

* Gravitational-Wave Physics and Astronomy: An Introduction to Theory, Experiment and Data

Analysis(Jolien D. E. Creighton)

(重力波探索手法のことも詳しい)

* 安東さんの修士論文 https://granite.phys.s.u-tokyo.ac.jp/theses/ando_m.pdf (干渉計制御について

詳しい)

■ 今年度の干渉計セミナー

https://gwwiki.icrr.u-tokyo.ac.jp/JGWwiki/KAGRA/IFOBasicLec/2024Basic_lecture

■ 過去の干渉計セミナー

https://gwwiki.icrr.u-tokyo.ac.jp/JGWwiki/KAGRA/IFOBasicLec/2022Basic_lecture

◦ 変調.

自由度 MICH, DARM, CARM, PRCL
(SRCL を入れたら 5 自由度)

変調を使う理由

重力波の影響や、制御に必要な信号は、光の位相に現れる

IRL-4" の波長 = 1064 nm

$$\begin{aligned} \Downarrow \\ \text{波長} &= \frac{c}{f} \\ &= 281 \text{ THz} \end{aligned}$$

$$c = f\lambda$$

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

$$T = 10^{12}$$

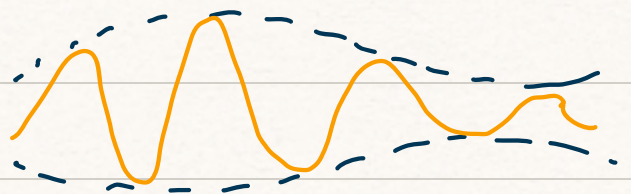
PD では検出できない

→ 変調法が用いられる

◦ 振幅変調 (amplitude modulation, AM) 変調周波数

$$E_0 \cdot e^{i\Omega t} \Rightarrow \left(E_0 + m \cos \omega_m t \right) e^{i\Omega t}$$

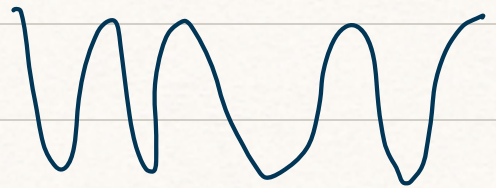
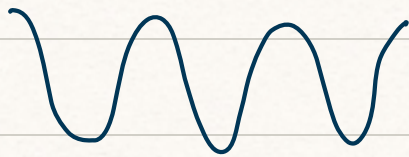
変調指数 (pointing to m)



○ 位相変調 (phase modulation, PM)

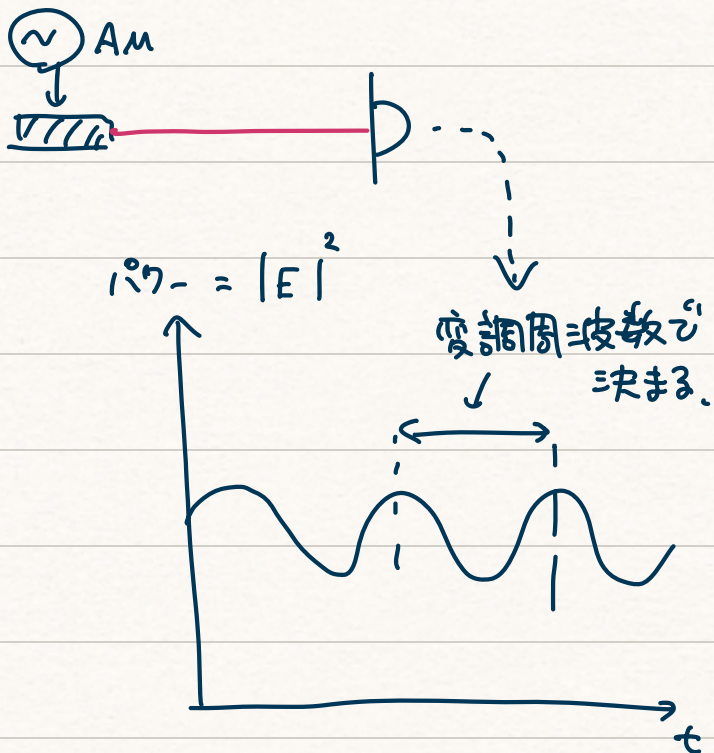
$$E_0 \cdot e^{i\Omega t} \Rightarrow E_0 \cdot e^{i(\Omega t + m \sin \omega_m t)}$$

↑ 変調指数 ↑ 変調周波数
 位相 = $2\pi f t$



PDで電圧の検出の変調は光で見ると……

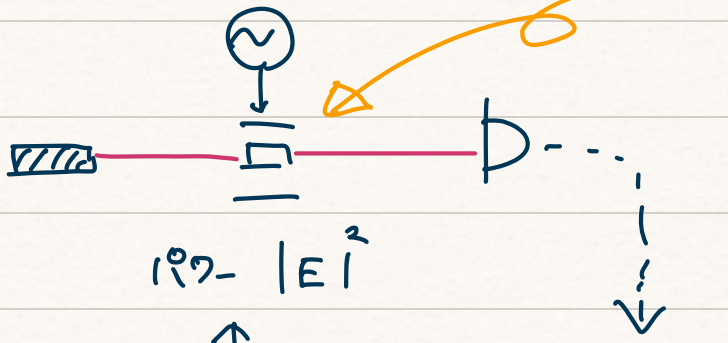
AM



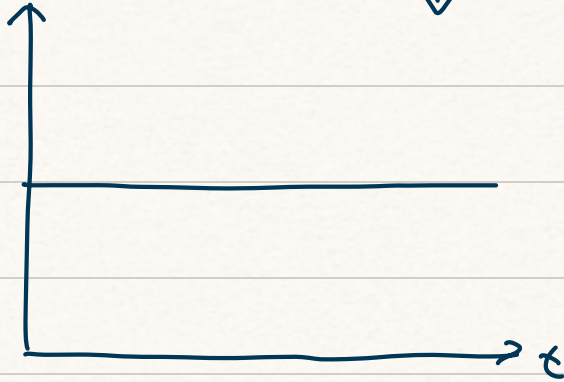
PM

EOM (electro-optic modulator)

電気光学変調器



$$I \propto |E|^2$$



電圧をかけたとき、屈折率が変化

↓
光路長が変化

↓
位相が変化

(EOM: MHz ~ GHz?)

PDは、AMの光は見えるけど、PMで変化した光は見えない

<https://gwwiki.icrr.u-tokyo.ac.jp/JGWwiki/LCGT/subgroup/ifo/MIF/OptParam>

$$f_1 = 16 \text{ MHz}$$

$$f_2 = 45 \text{ MHz}$$

$$f_3 = 56 \text{ MHz}$$

の位相変調が KAGRA では用いられている

local oscillator

$$E_0 \cdot e^{i(\Omega t + m \sin \omega_m t)}$$

Λ_{ω_m} の関数を用いて展開

$$= E_0 \cdot e^{i\Omega t} \cdot \sum_{i=-\infty}^{\infty} J_i(m) \cdot e^{i\omega_m t}$$

Bessel 関数

$$J_{-n}(m) = (-1)^n J_n(m)$$

$$J_n(m) \approx \frac{1}{n!} \left(\frac{m}{2}\right)^n \quad (m \ll 1)$$

$$\approx E_0 J_0(m) e^{i\Omega t} + E_0 J_1(m) e^{i(\Omega + \omega_m)t} + E_0 J_{-1}(m) e^{i(\Omega - \omega_m)t}$$

↑
キャリア
(carrier)

↑
サイドバンド
(side band)

↗ (+ higher mode)

$$J_{-1}(m) = (-1)^1 \cdot J_1(m) = -J_1(m)$$

$$= E_0 J_0(m) e^{i\Omega t} + E_0 J_1(m) e^{i\Omega t} \left(e^{i\omega_m t} - e^{-i\omega_m t} \right)$$

$$\parallel$$

$$2i \cdot \sin(\omega_m t)$$

$$= E_0 J_0(m) e^{i\Omega t} + E_0 J_1(m) e^{i\Omega t} \times 2i \cdot \sin(\omega_m t)$$

○ 復調

位相変調をためは使った信号 (local oscillator), RFPDからの信号にかけあわせる。適当なフィルタ (ローパスフィルタ) をかけて。

余計な周波数成分を落とす。

変調周波数付近の信号のみを取り出すことが出来る。

この RFPD に 13 倍する。

local oscillator の信号 $\sin(\omega_m t)$ をかけると。

$$V_{PD} = \underbrace{A}_{A \text{ を取り出す}} \cdot \sin(\omega_m t)$$

$$V_{PD} \times \sin(\omega_m t) = A \cdot \sin^2(\omega_m t)$$

$$= \frac{1}{2} A \cdot (1 - \cos \omega_m t)$$

$$\rightarrow \frac{1}{2} A$$

↑
ローパスフィルタを使う。
取り除く