

マツハツェンダ形
位相シフト
光干渉計測

群馬大学大学院工学研究科
電気電子工学専攻
高橋 佳孝



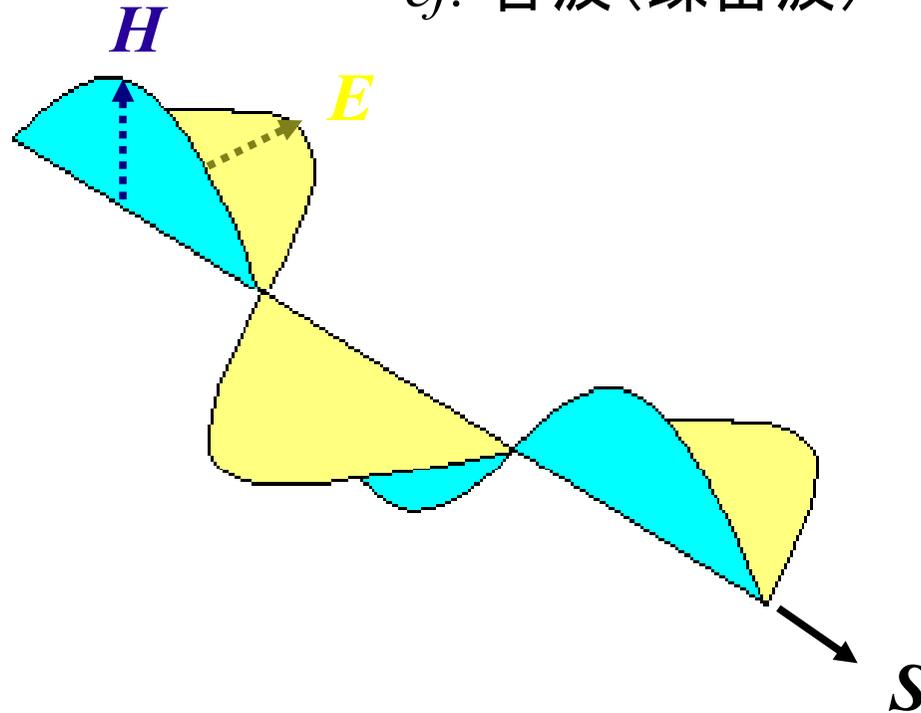
光とは

ある周波数(波長)領域の**電磁波**

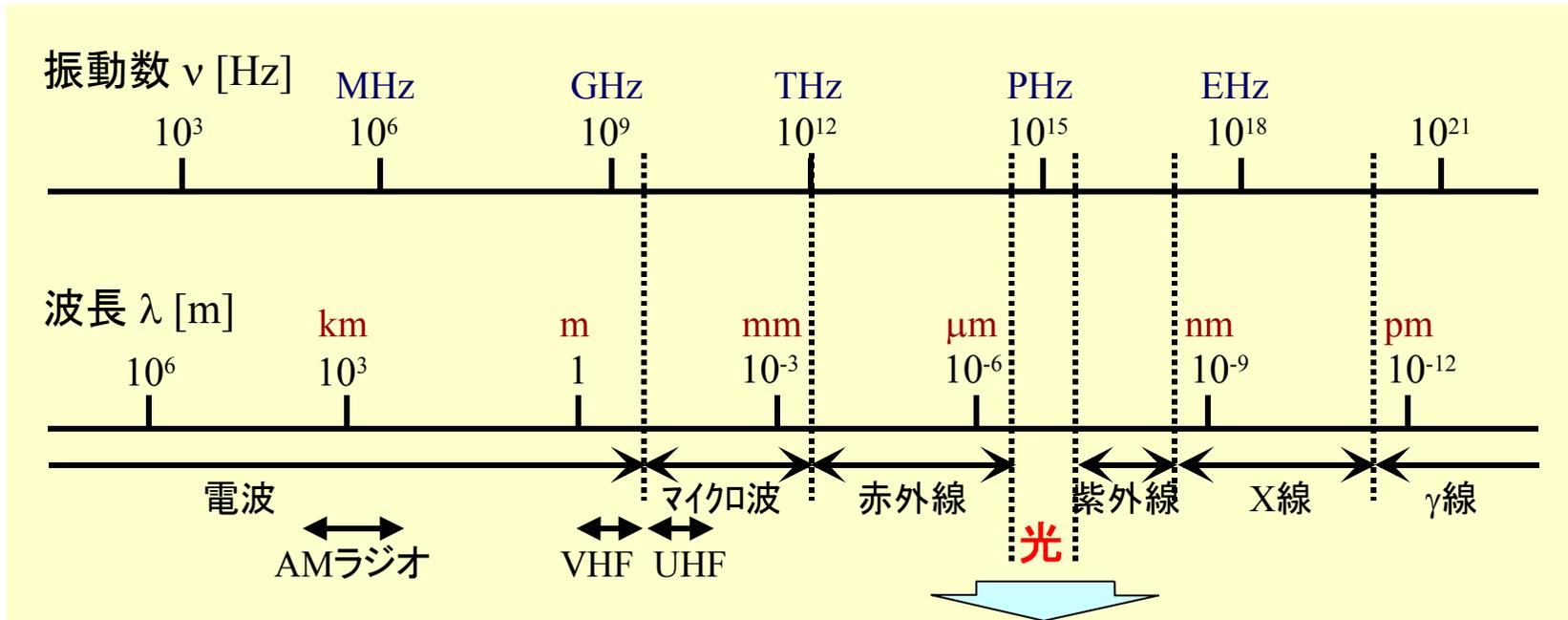
電場 E と磁場 H が互いに垂直方向に振動しながら進む
真空中を伝搬

横波

cf. 音波(疎密波) — 縦波



電磁波のスペクトル



(可視光線)

紫外線 (UV), 紫 - 藍 - 青 - 緑 - 黄 - 橙 - 赤, 赤外線 (IR)

短い < 0.35 < 0.5 < 0.6 < 0.7 μm < 長い

cf. FM群馬 (86.3 MHz) — 3.5 m

電子レンジ (2.45 GHz) — 12 cm



光計測の特徴

- 非接触
- 無侵襲・非破壊
- 耐環境性(耐水・耐火・高低温)
- 化学的安定性
- 絶縁性
- 無誘導(耐電磁ノイズ性)
- 高感度
- 高速応答
- 広帯域・多重通信
- 双方向伝搬
- 低損失



ホモダイン計測

周波数の等しい2つの光波の干渉(通常の2光束干渉)

2つの直線偏光の平面波

(振幅 A_i , 周波数 f_0 , 位相 $\phi_i : i = 1, 2$)

$$E_1(t) = A_1 \exp i(2\pi f_0 t + \phi_1)$$

$$E_2(t) = A_2 \exp i(2\pi f_0 t + \phi_2)$$

干渉信号 $I(t)$

$$\begin{aligned} I(t) &= |E_1(t) + E_2(t)|^2 \\ &= A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) \end{aligned}$$

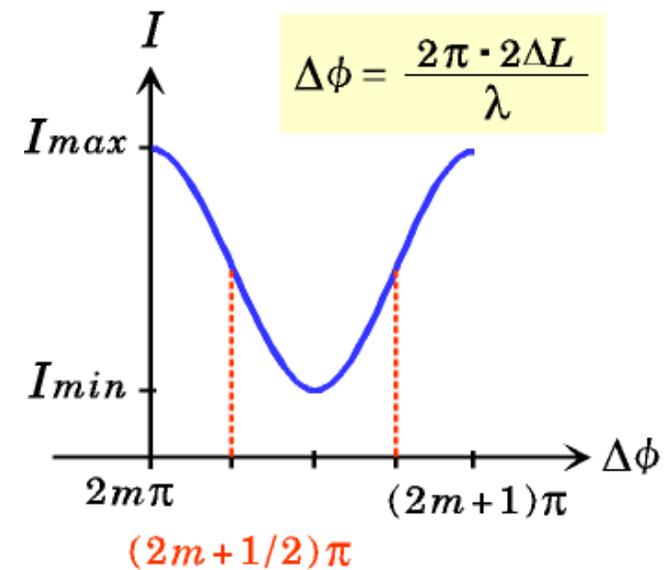
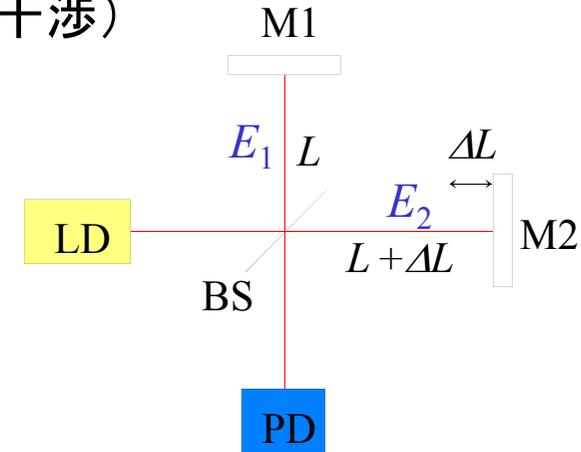
位相差 $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ にのみ依存

$$I = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \Delta\phi$$

感度 S

$$S = \frac{dI}{d(\Delta\phi)} = -2A_1A_2 \sin \Delta\phi$$

$\Delta\phi = \pi/2 + n\pi$ (n : 整数) のとき最大

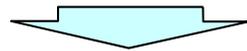


光ヘテロダイン計測

周波数の異なる2つの光波の干渉

$$E_1(t) = A_1 \exp i(2\pi f_1 t + \phi_1)$$

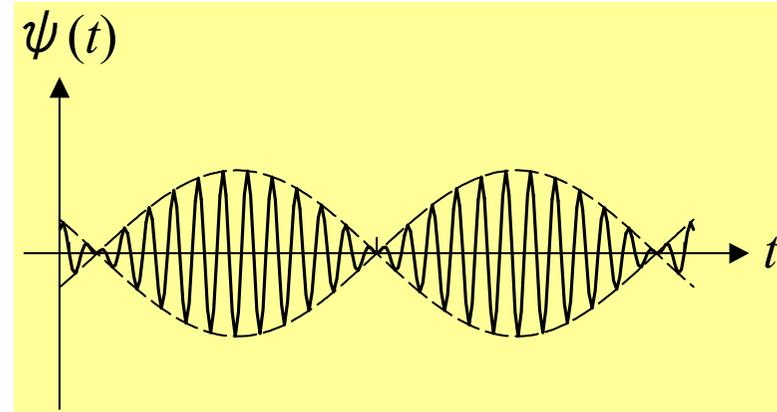
$$E_2(t) = A_2 \exp i(2\pi f_2 t + \phi_2)$$



$$P(t) = |E_1(t) + E_2(t)|^2$$

$$= A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos[2\pi(f_1 - f_2)t + (\phi_1 - \phi_2)]$$

$$= A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos[2\pi f_b t + \Delta\phi]$$



干渉出力には交流信号成分(うなり, ビート)が発生

出力は低周波数化した信号光のレプリカ

- ・光波の直接測定
- ・線形出力
- ・信号増幅
- ・吸収物体の測定



FMヘテロダイン計測

LDの駆動電流を変化 → 周波数変調

$$I = I_0 + at$$

$$f(t) = f_0 + a\chi t$$

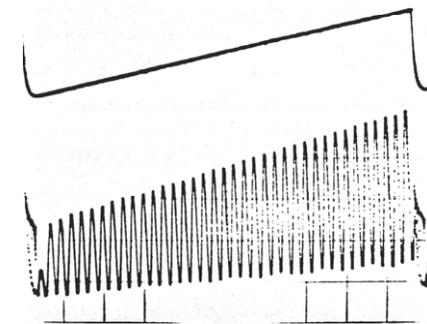
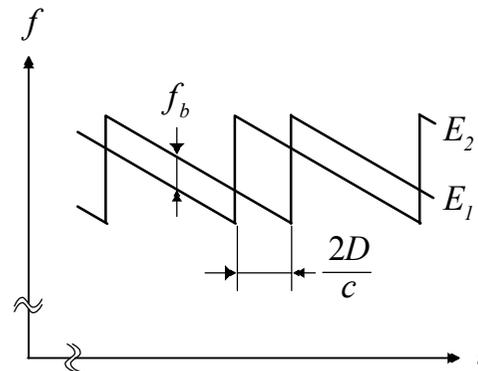
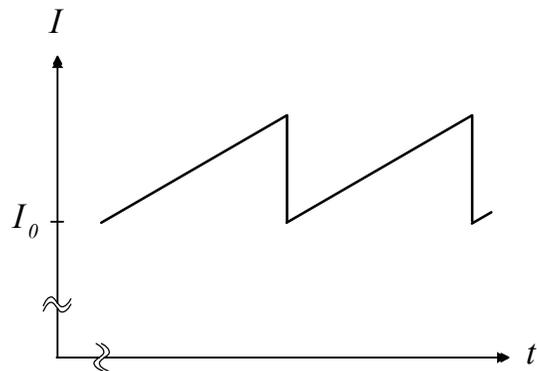
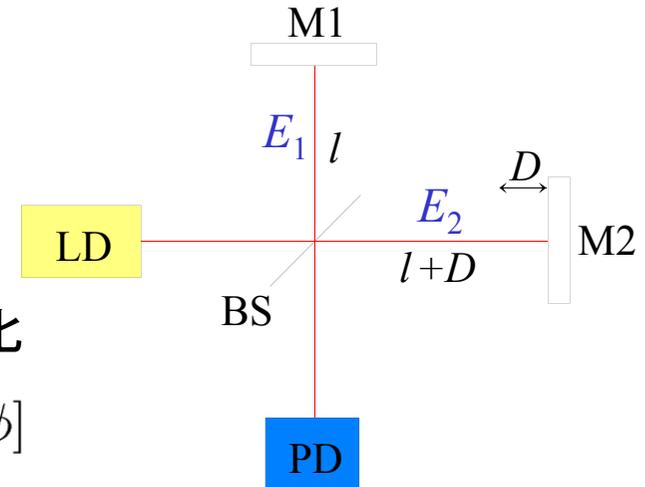


干渉出力は光路差 D に依存した周波数 f_b で変化

$$P(t) = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos[2\pi(a\chi\Delta t)t + \Delta\phi]$$

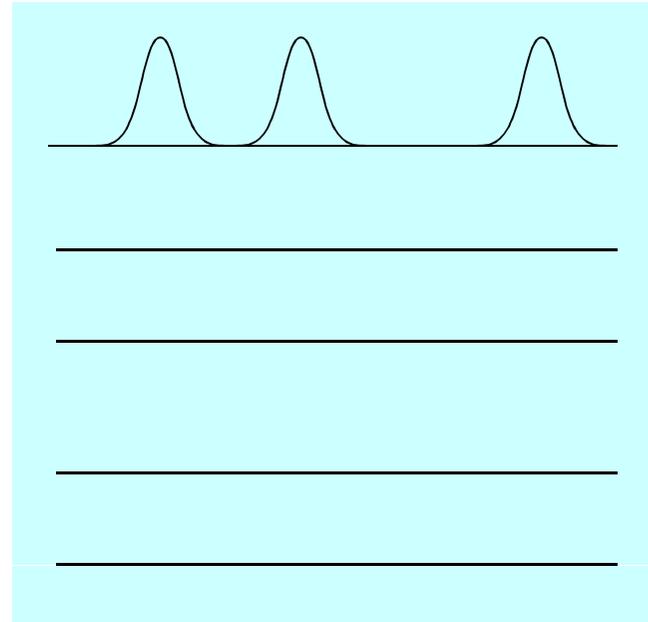
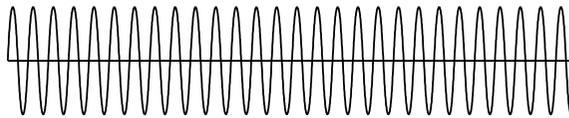
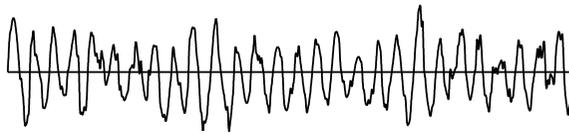
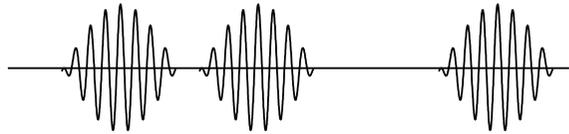
$$= A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos\left[2\pi \left(\frac{2a\chi D}{c}\right) t + \Delta\phi\right]$$

f_b



コヒーレンス(可干渉性)

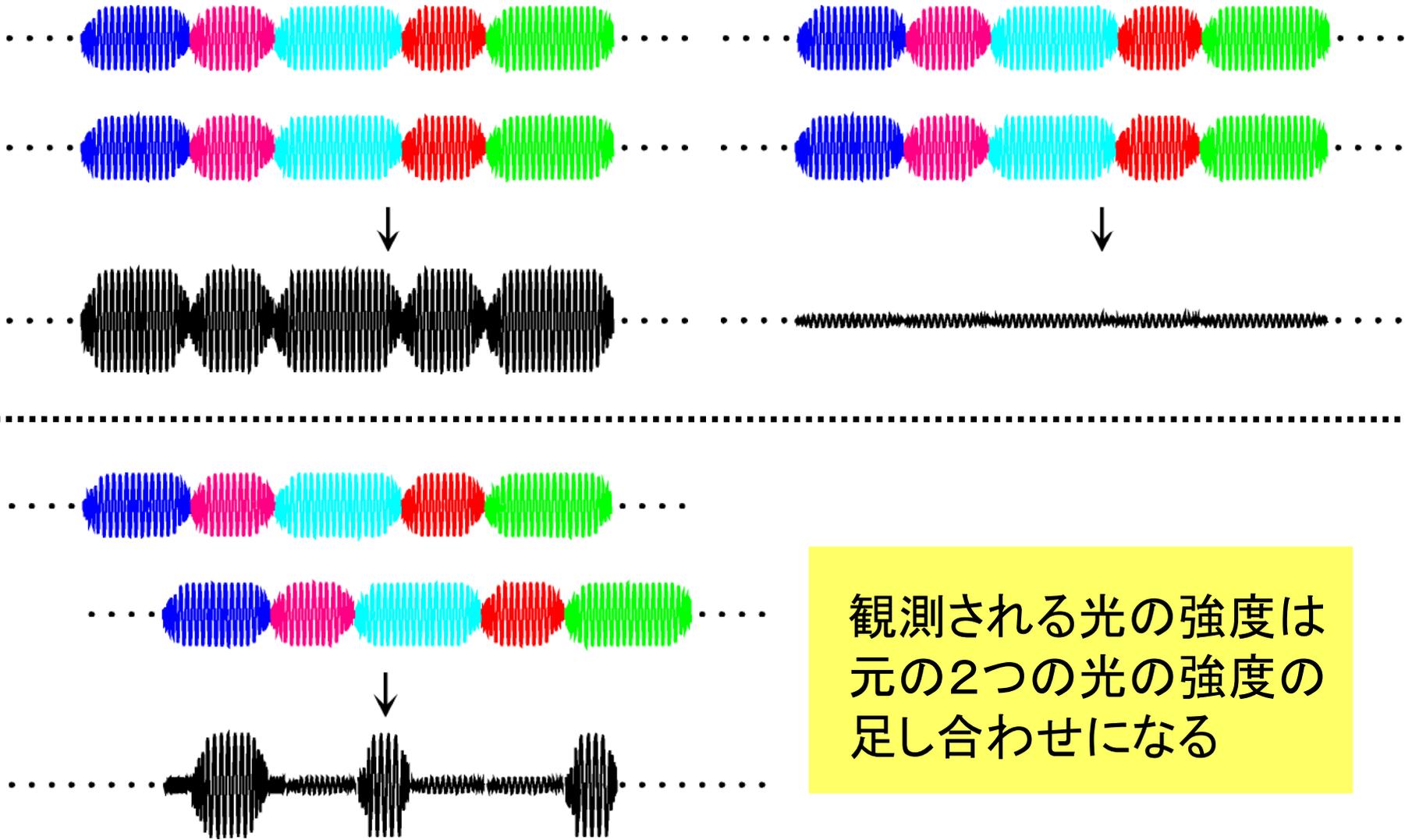
時間平均強度



1 ns → 赤色光 500,000波長相当



低コヒーレンス光の干渉

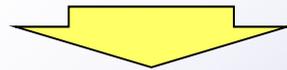


観測される光の強度は
元の2つの光の強度の
足し合わせになる



OCT（光コヒーレンストモグラフィ）

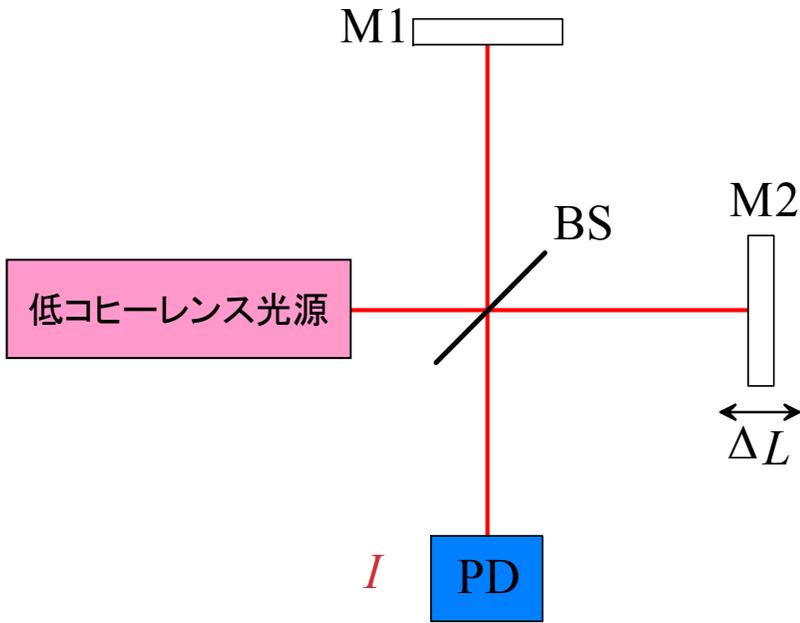
- ✓ 低コヒーレンス干渉による断層撮像法
- ✓ 無侵襲・非破壊
- ✓ 高度散乱体にも適用可能
- ✓ 比較的簡便



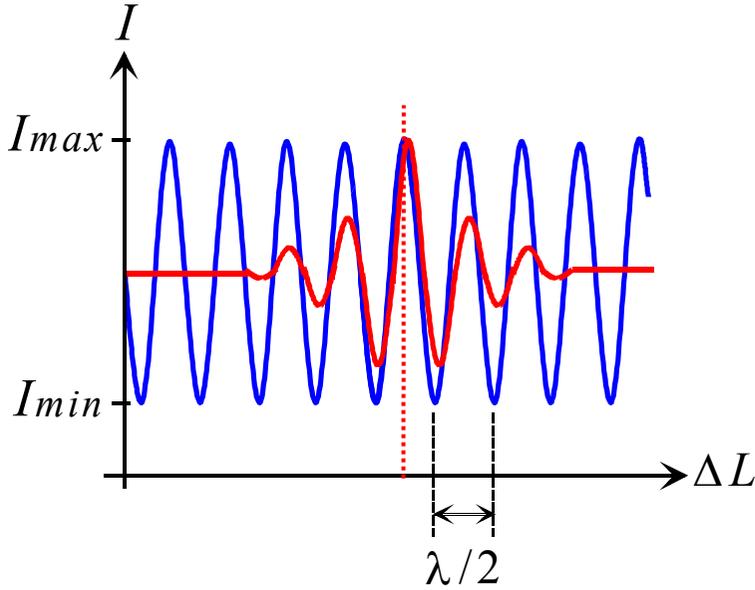
眼科応用を中心とした生体計測で実用化



OCT の原理



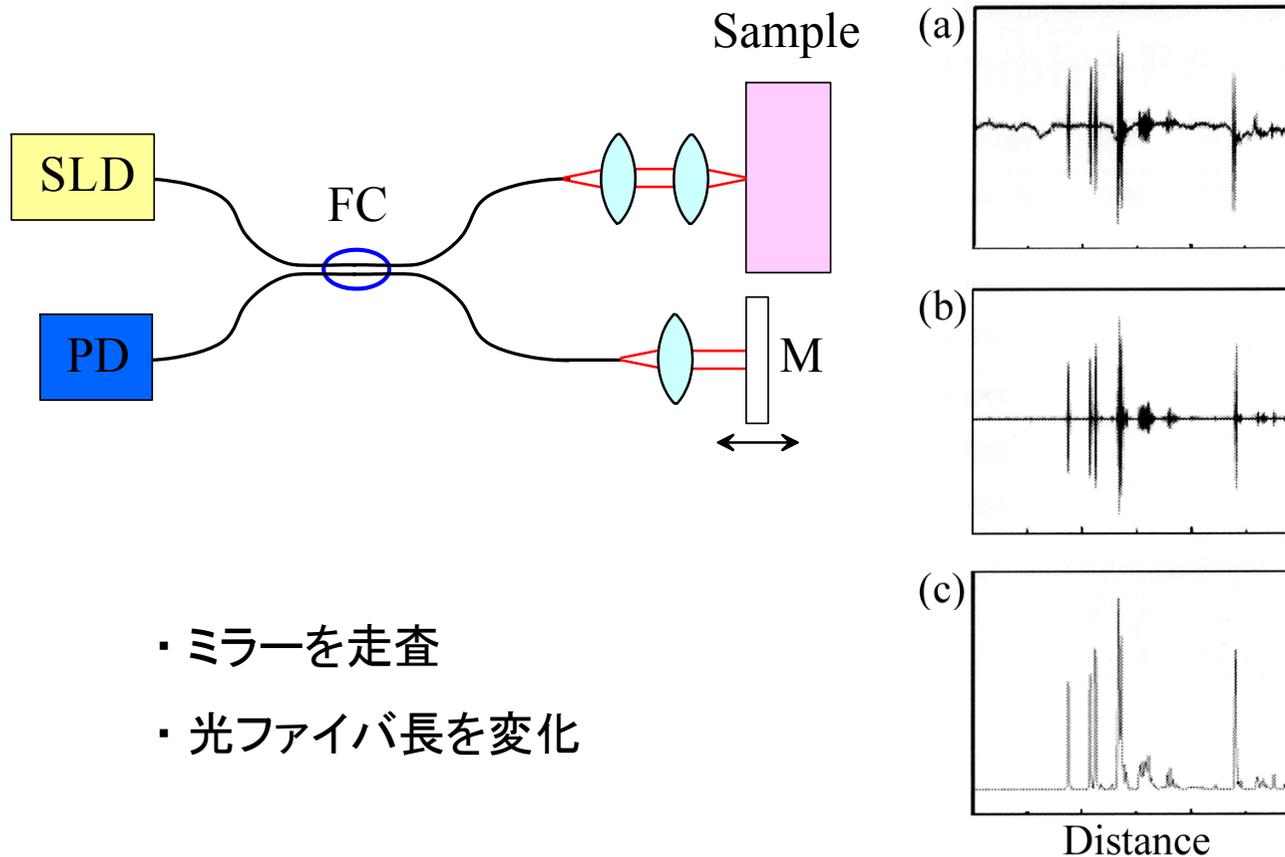
I の変化 - ΔL 半波長周期



信号光と参照光の
光路長が一致した
ときのみ干渉信号



OCTにおけるz-スキャン

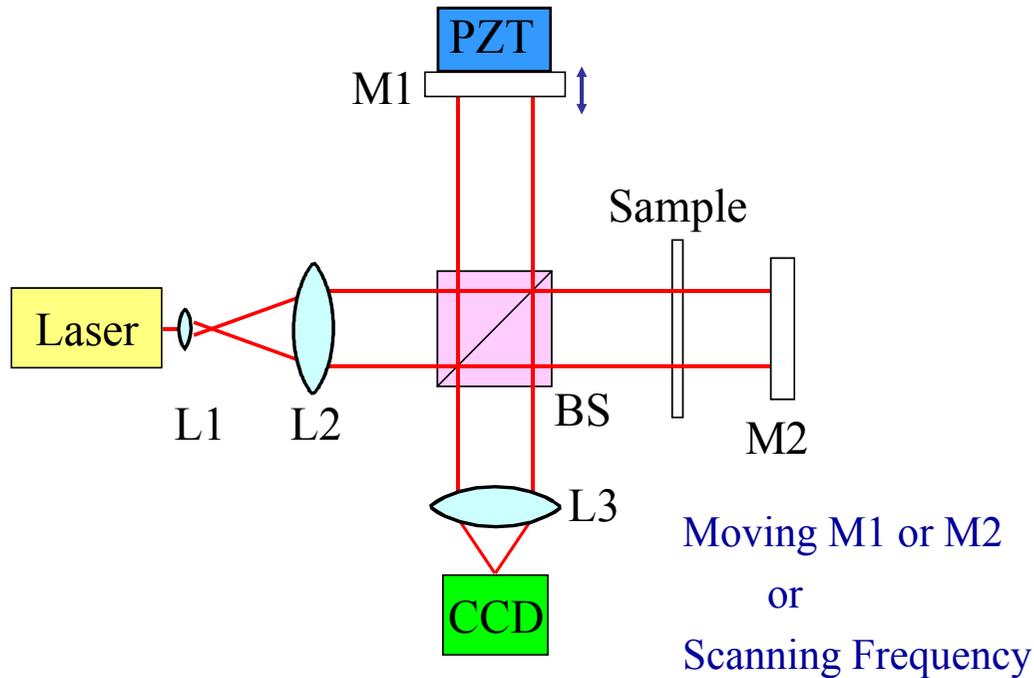


- ・ ミラーを走査
- ・ 光ファイバ長を変化

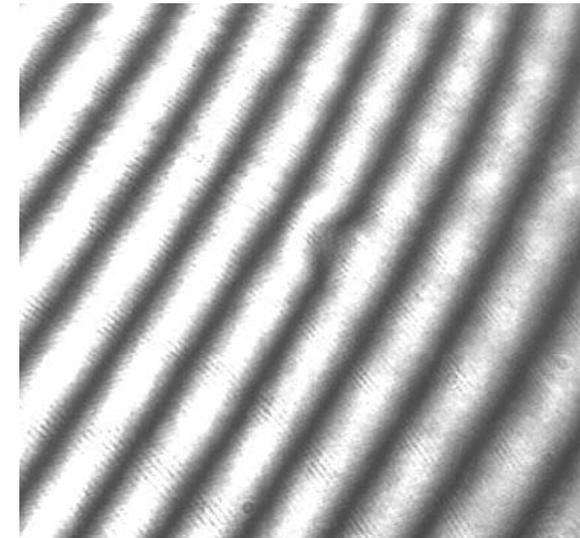
x-スキャンで断層像取得



位相シフト干渉計



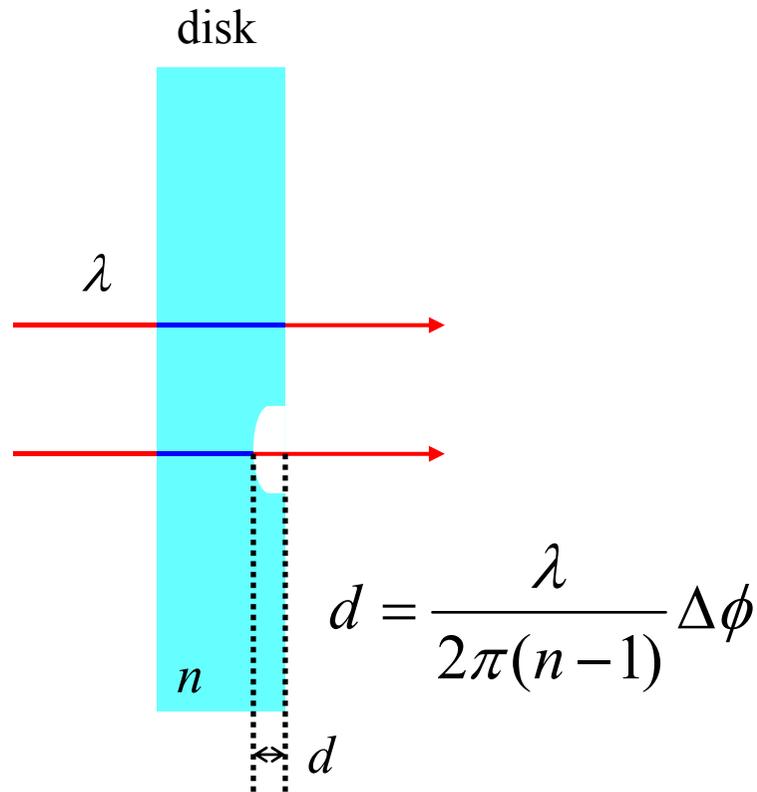
透明試料の干渉画像



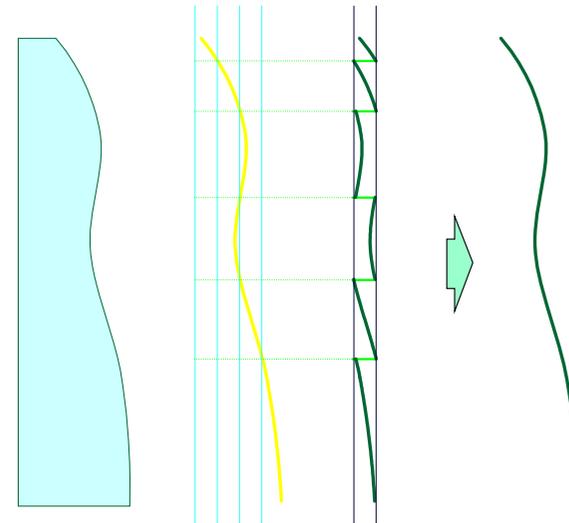
$$\begin{aligned}
 I_1 &= A + B \cos \phi \\
 I_2 &= A + B \cos \left(\phi + \frac{\pi}{2} \right) = A + B \sin \phi \\
 I_3 &= A + B \cos (\phi + \pi) = A - B \cos \phi \\
 I_4 &= A + B \cos \left(\phi + \frac{3\pi}{2} \right) = A - B \sin \phi
 \end{aligned}
 \Rightarrow \frac{I_2 - I_4}{I_1 - I_3} = \tan \phi \quad \therefore \phi = \tan^{-1} \frac{I_2 - I_4}{I_1 - I_3}$$



欠陥計測と位相接続

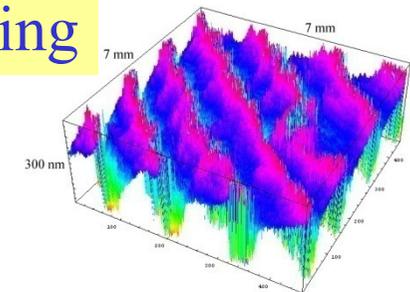


位相変化は十分大きい
 → $\tan^{-1} \phi$ の不連続性により
 測定位相に飛びが生じる

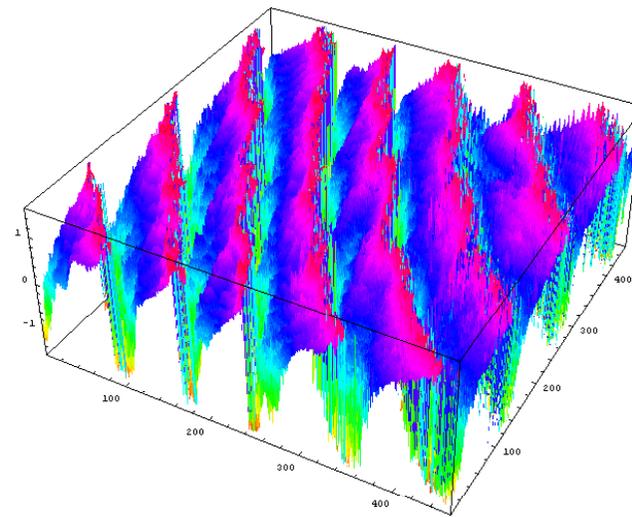
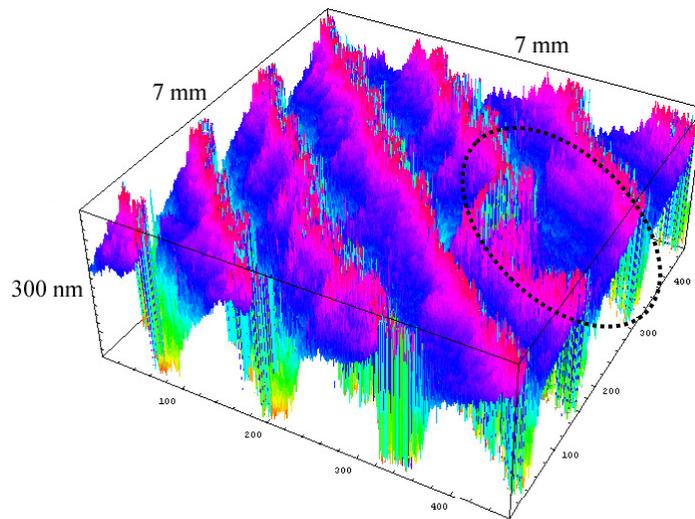
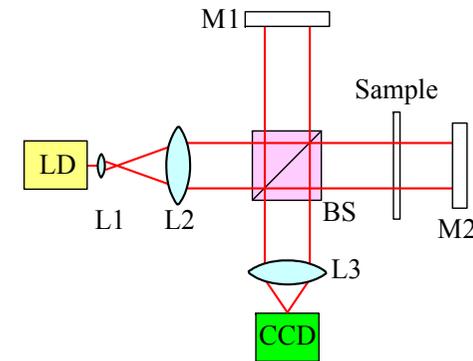
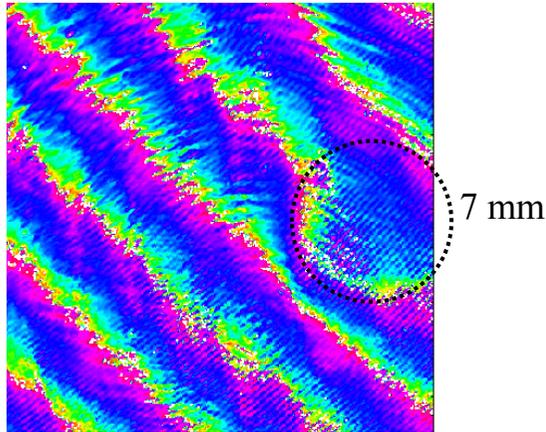


Phase unwrapping

$$cf. \phi = \tan^{-1} \frac{I_2 - I_4}{I_1 - I_3}, \quad \left[-\frac{\pi}{2} < \phi < \frac{\pi}{2} \right]$$



位相シフト干渉計による透明試料測定



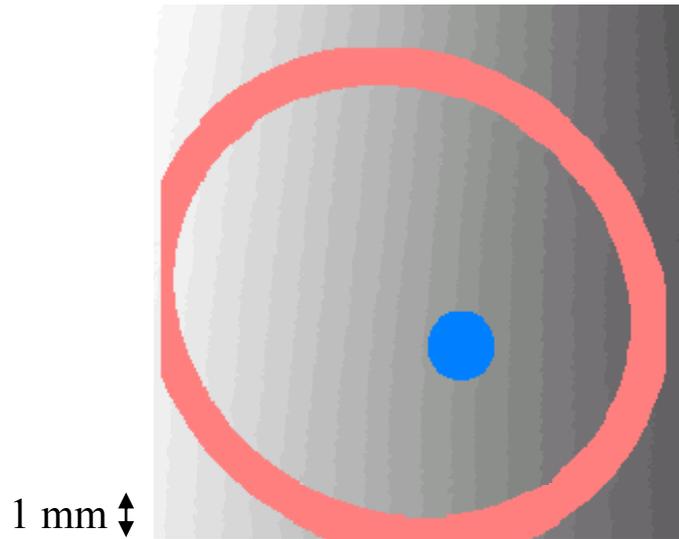
本位相シフト干渉法の特徴

- 相対光強度変化から位相を計算するので測定ビーム強度分布に依存しない
- 干渉計測の一種なので奥行き分解能が高い
- 数枚の静画像を取得するだけなので測定が速い
- 透明な試料も測定可能
- 垂直配置のため試料保持に際し自由度が高い
- 大口径光学系の導入により測定範囲が広い

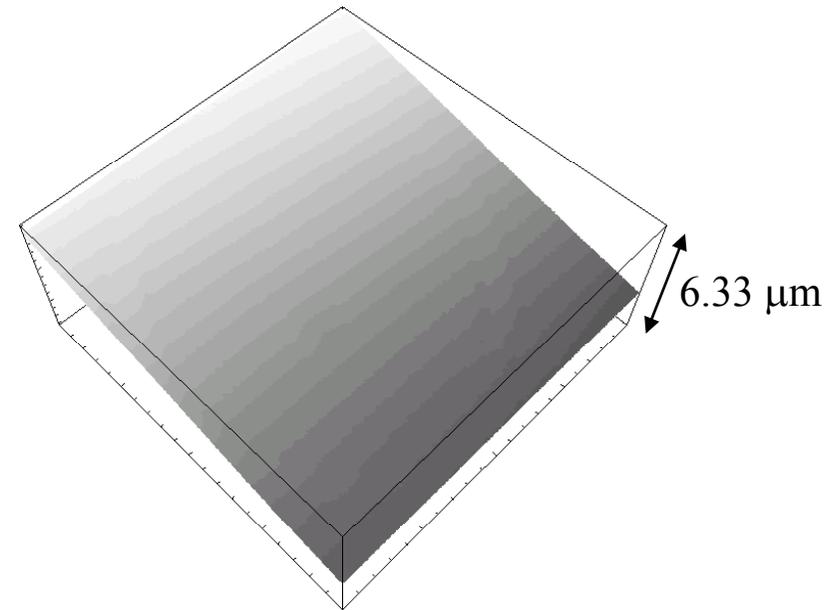


透明基板測定結果

欠陥のある透明基板



マーキング
欠陥



干渉光間の波面の傾き

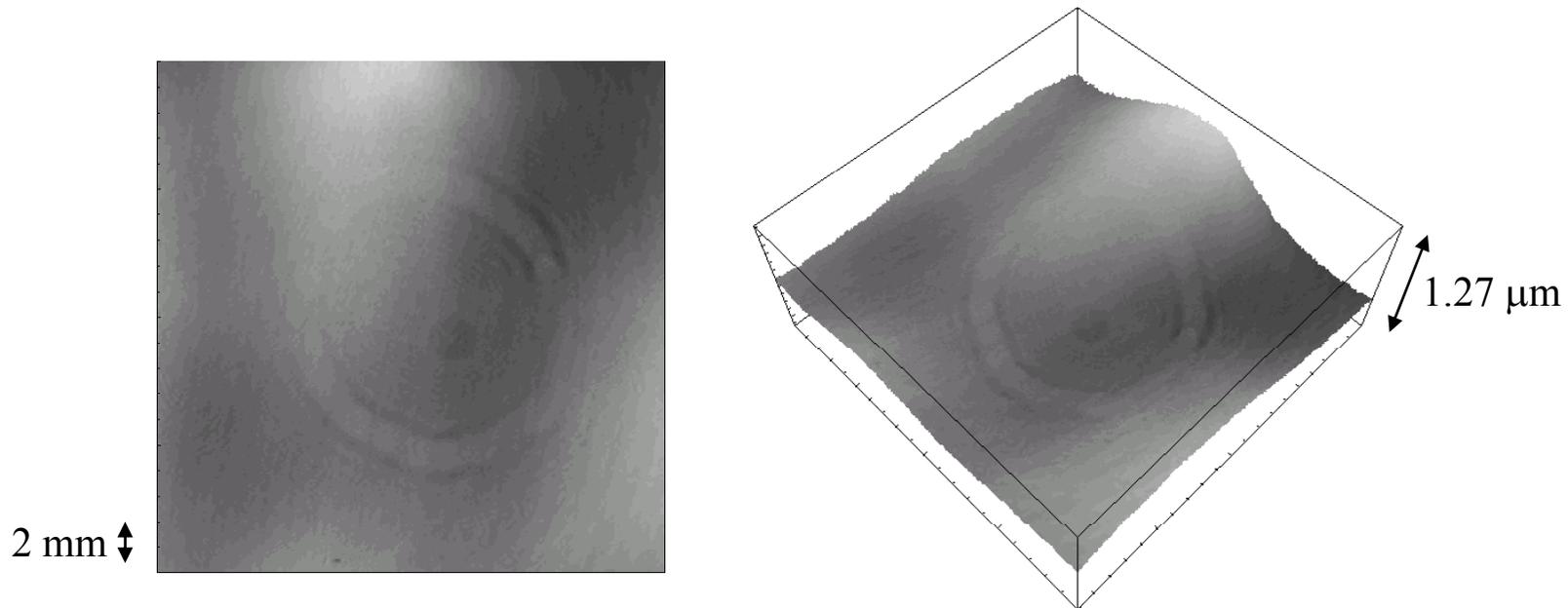


傾きを計算して補正



試料の光学的厚みムラ

欠陥周辺 (25 mm x 25 mm)



- ・本手法は光学的厚み測定に有効
- ・欠陥検出時には対策が必要



2次元FFTによる空間フィルタリング

画像を2次元フーリエ変換

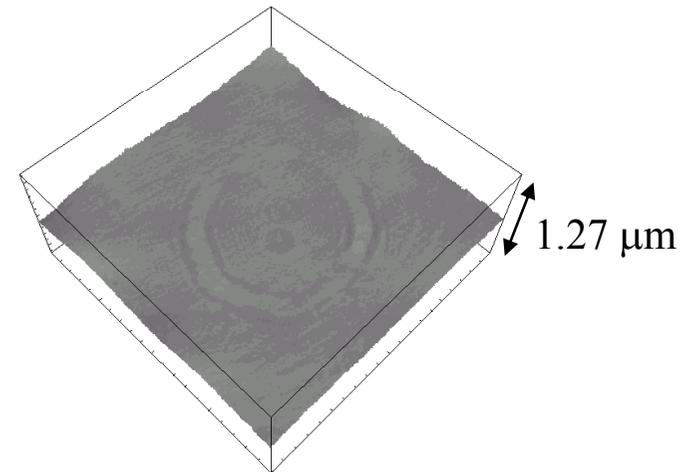
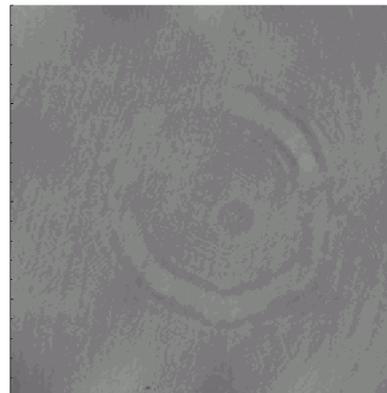


マップ上でカットしたい周波数成分を除去(マスクング)



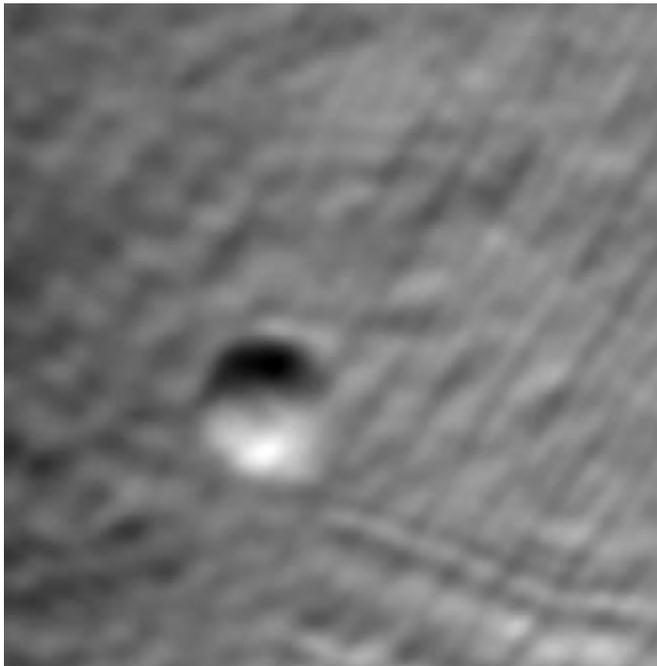
逆フーリエ変換によりフィルタリング画像を取得

HPF: $f_{\text{cutoff}} = 0.66/\text{cm}$

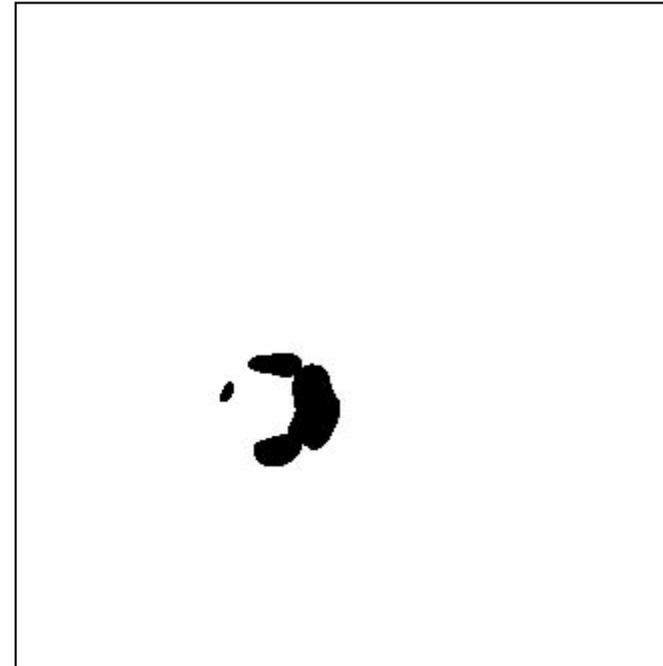


差分画像による欠陥の強調

平滑化 + 差分画像



閾値処理(2次微分) + 2値化



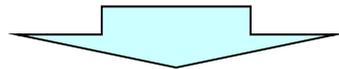
差分と閾値処理により欠陥の強調が可能



まとめ

マツハツェンダ形位相シフト光干渉計

- 垂直配置のマツハツェンダ干渉計
- 透明試料の測定



形状変化・欠陥・屈折率変化等、
光学的厚みムラの観測

光学的厚みムラの影響排除

- フィルタリング
- 差分画像を使った欠陥検出

