

## 第2章 マイクロ、ユビキタス情報システム

物理情報デバイス論  
2015. 11. 10 篠田

### アウトライン

#### ○マイクロ化で設計がどう変わるか

- ・スケーリング
- ・機械共振
- ・抵抗と電磁エネルギー
- ・Q 値
- ・熱容量

#### ○光MEMSの実例

参考資料: 光マイクロマシン 澤田、羽根、日暮 オーム社

小さくなると表面の寄与が大きくなる

体積 ---  $D$  の3乗に比例  
( $D$ : 代表長)

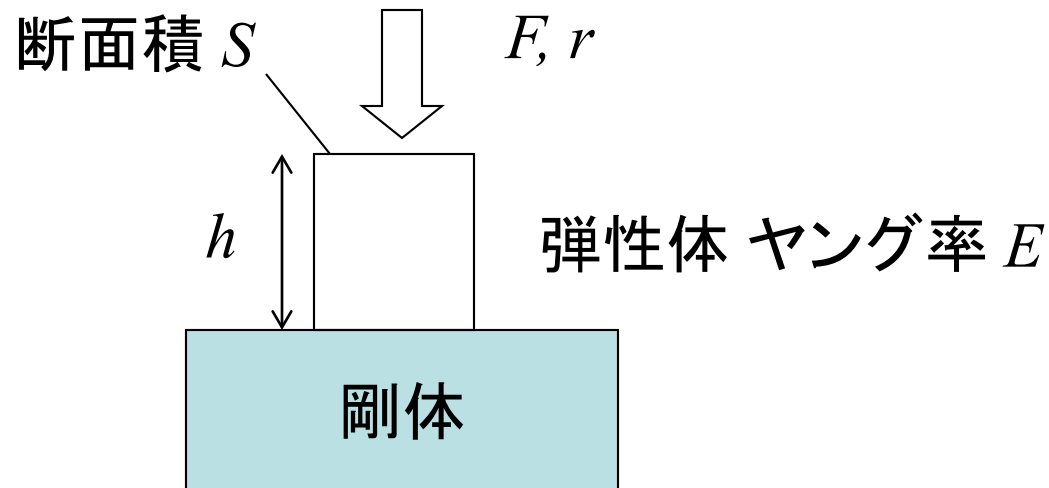
- ・ 質量、重力
- ・ 搭載可能なエネルギー
- ・ 熱容量

表面積 ---  $D$  の2乗に比例

- ・ 粘性力
- ・ 摩擦力
- ・ 受光量

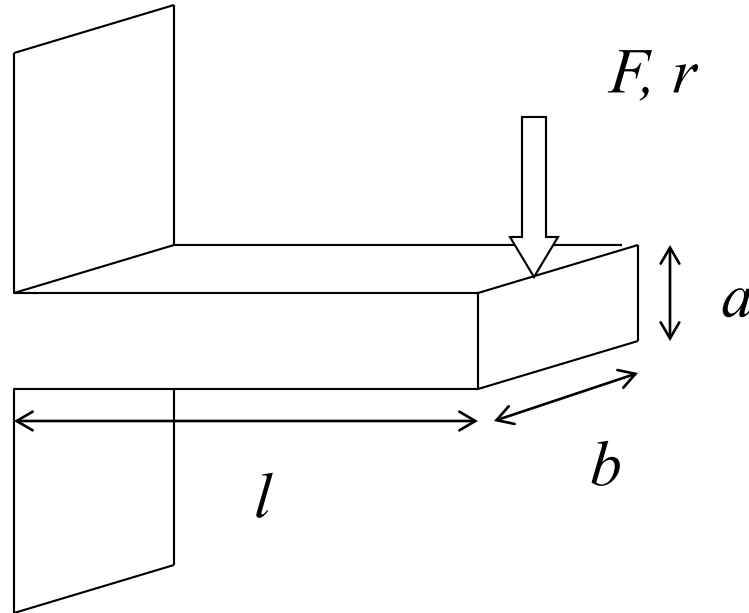
\*  $D$  の1乗に比例するものは？

## バネ定数



$$k = \frac{F}{r} = \frac{SEr/h}{r} = E \frac{S}{h} \longrightarrow \text{スケールの1乗}$$

## 梁の変形の場合

端点の変位  $d$  と力  $F$  の関係

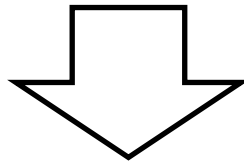
$$d = \frac{4l^3}{a^3 b E} F$$

一般的な理解

変形している任意形状の物体を、 $\alpha$  倍に相似拡大する

歪み(変形率、無次元) --- 不変

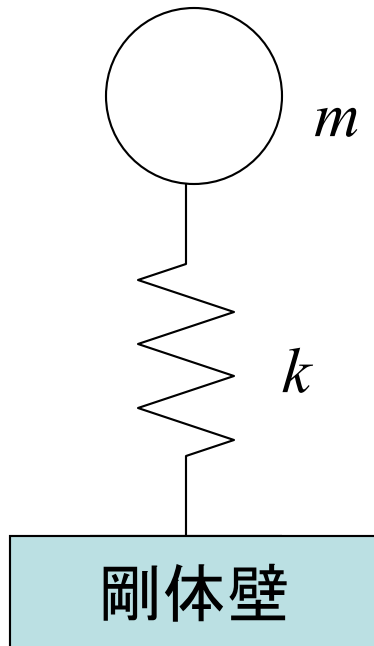
応力(N/m<sup>2</sup>) --- 不変



変位  $\alpha$  倍、力  $\alpha^2$  倍

バネ定数  $\alpha$  倍

## バネ-マス系の共振周波数



$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

スケールを  $\alpha$  倍すると、

$$\omega' = \sqrt{\frac{k\alpha}{m\alpha^3}} = \frac{\omega_0}{\alpha}$$

(共振周波数は  $\alpha^{-1}$  倍になる)

## 相似則の考え方

弾性体の場合：支配方程式

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \frac{E}{2(1+\sigma)} \Delta \mathbf{u} + \frac{E}{2(1+\sigma)(1-2\sigma)} \text{grad div } \mathbf{u}$$

---

$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$  が上の微分方程式と境界条件を満たすとする。

$\mathbf{u}(\alpha \mathbf{x}, \beta t)$  が上の微分方程式を満たすためには

$\alpha$ 、 $\beta$ はどのような関係にあればよいか？

—————> 波動方程式と拡散方程式を比較せよ

## 相似形状の機械的共振

1 m --- 100 Hz とすると、、、

10 cm --- 1 kHz

1 mm --- 100 kHz

1  $\mu\text{m}$  --- 100 MHz



マイクロ化に向くセンサ、向かないセンサ

## 判定の基準

センサを相似なままスケールダウンしたとき、

### 【判定基準1】

一定投入電力に対するSN比が減少しない。

(ただし電力の空間密度は増大するので注意が必要)

### 【判定基準2】

同じSN比を達成するための電力が減少する。

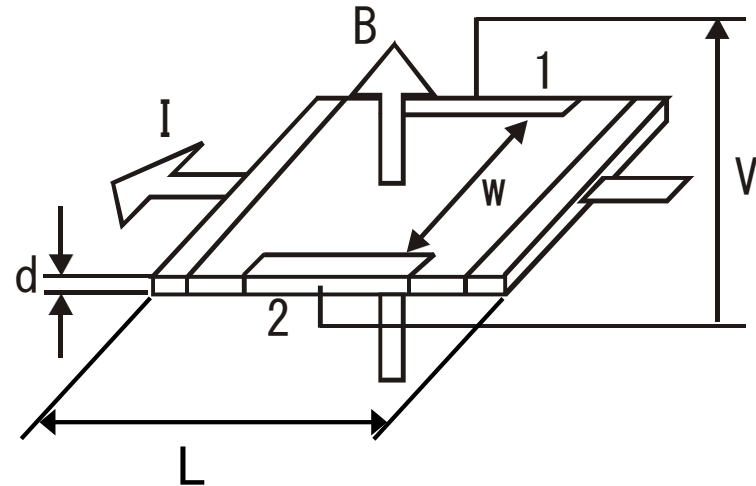
→ パターン計測への発展可能性が大きくなる。

マイクロ化に向くもの、向かないもの

例1) ホール素子

$$V = R_H \frac{IB}{d}$$

$R_H$ : 材料固有のホール定数



(導出)

$$I = qnv \cdot wd$$

$q$ : キャリアの電荷

$n$ : キャリアの密度

$v$ : キャリアの速度

$$V = vBw = \frac{IB}{qnd} = R_H \frac{IB}{d}$$



S. Hwang, M. Ahn, and K. Wohn. "MagGetz: customizable passive tangible controllers on and around conventional mobile devices," UIST '13, 411-416.

電流路の抵抗  $r = \sigma \frac{L}{wd}$       $\sigma$ : 抵抗率

投入電力  $J = \sigma \frac{L}{wd} I^2$      を一定と考える

$$V = R_H \frac{IB}{d} = R_H \frac{1}{d} \sqrt{\frac{J}{\sigma} \frac{wd}{L}} B$$

(スケールを  $\alpha$  倍すると、 $V$  は  $\alpha^{-0.5}$  倍になる)

発生する静電エネルギー

$$\frac{1}{2} CV^2 \propto \alpha \cdot (\alpha^{-0.5})^2 = 1 \quad (\text{不変})$$

## 例2) サンヤック(Sagnac)効果\*によるジャイロ

\* 回転している光学的な閉回路で互いに逆向きに伝播する光が一周する時間差は回転の角速度に比例する

### 例3) 加速度センサ

\* 以下  $D$  を代表長として記述

\* 相似のまま小さくし、一定の加速度  $a$  を与える

質量部に働く力  $ma \propto D^3$

① はりで支持し、歪みを検出する場合

質量部の変位  $\propto D^3 D^{-1} = D^2$

歪み  $\propto D$



② 静電気力で保持する場合、小さいほど保持が容易

静電気力  $F = \frac{QV}{d} = \varepsilon \frac{S}{d^2} V^2 = ma$  より、

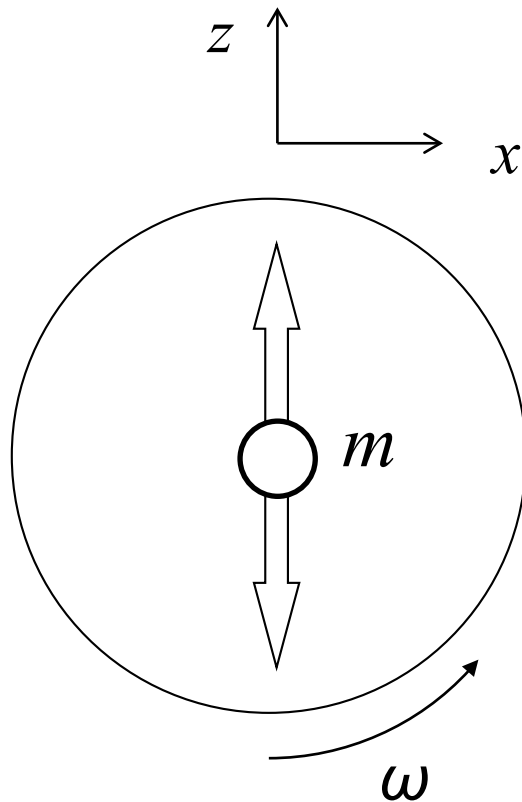
保持に必要な電圧  $V^2 \propto D^3$

静電エネルギー  $\frac{1}{2} CV^2 \propto D \cdot D^3 = D^4$

電界  $\propto D^{0.5}$  (エネルギー密度  $\propto D$ )

## 例4) コリオリ力による角速度センサ

矢印方向に振動している振動体が図のように角速度 $\omega$ で回転すると、振動方向と直交した方向に力 $F$ が発生する



原点を真上に通過した直後の  
おもりの  $z$  方向変位

$$z = v \Delta t$$

そのときの  $x$  座標

$$x = -(\omega \Delta t) v \Delta t = -\omega v (\Delta t)^2$$

おもりからうける力

$$F_x = 2mv\omega$$

\*  $\omega$  が計測したい角速度

振動体の振動速度  $v$  を一定とすると

(振動による構造体の最大歪みを一定とし、振動周波数は構造体の大きさに反比例する場合)

角速度センサのスケール依存性は加速度センサと同等。



電磁エネルギーから力学的エネルギーへの変換効率
-------------------------

電気・機械結合定数  $k = \sqrt{\frac{U_{\text{out}}}{U_{\text{in}}}}$

$$k^2 = \frac{\text{(機械的な形で蓄えられたエネルギー)}}{\text{(外部から投入された電氣的エネルギー)}}$$

$$= \frac{\text{(電氣的な形で蓄えられたエネルギー)}}{\text{(外部から投入された機械的エネルギー)}}$$

以下ではスケーリングによるアクチュエータの効率の変化を考察

【仮定】

1. (1) 電氣的エネルギー供給のプロセス と、  
(2) 蓄積した電氣的エネルギーを機械的仕事に変換するプロセス の、  
2段階動作を仮定。
2. エネルギーのロスとして、電氣的ロスのみを考慮  
(ここでは摩擦、粘性によるロスは考えない)

# スケーリングによるアクチュエータの効率の変化

(T: 周期、 $f = 1/T$ 、L: インダクタンス、C: 容量、R: 抵抗、I: 電流)

	1周期に蓄積される 電磁エネルギー	投入可能な パワーの上限	代表長 $D$ に対する 依存性
誘導型	$LI^2$	$LI^2 f$	$L \propto D$
静電型	$\frac{I^2}{C} T^2$ ( $CV = IT$ )	$\frac{I^2}{Cf}$	$C \propto D$
配線抵抗 での消費	$RI^2 T$ (周期あたり)	$RI^2$ (単位時間あたり)	$R \propto \frac{1}{D}$

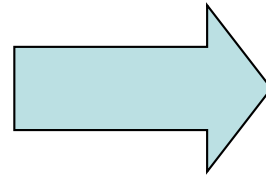
小型化とLC共振のQ値の関係 ( $D$ : 代表長)

$$L \propto D$$

$$R \propto \frac{1}{D}$$

(表皮効果は考えない場合\*)

$$C \propto D$$



LC回路の共振周波数

$$\omega \propto \frac{1}{D}$$


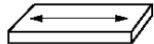




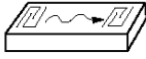
LC共振のQ値

$$Q \propto D$$

\* 金属の表面のみを電流が流れる場合、  
 $R$  は  $D$  に直接的には依存せず、 $\omega^{0.5}$  に比例して増大

# 1. サイズが小さくなると何が変わるか

## ■ 振動モードと周波数帯

振動モード		周波数 (Hz)						
		1k	10k	100k	1M	10M	100M	1G
1 屈曲振動		■						
2 長さ振動			■					
3 面積振動				■				
4 径方向振動				■				
5 厚み振動					■			
6 とじ込め振動					■			
7 表面波						■		

[注]: ←→ は振動方向を示す

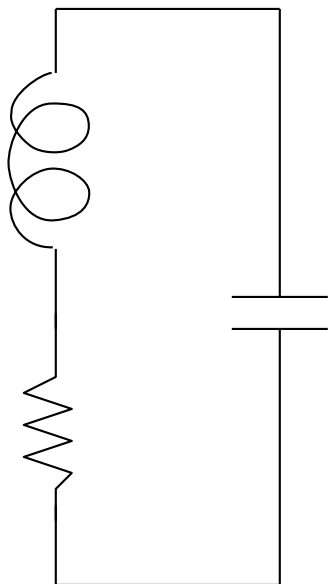
高周波数の発振器は、LC共振器ではなく機械的振動体で実現されることが多い。

## 問い

1. LC共振体のサイズを小さくしていくと、Q値はどうなるか？
2. Q値の高いLがあると、どのような使い道があるか？

$$Q = \frac{\omega_0}{2\Delta\omega}$$

$\Omega \pm \Delta\omega$ :  
同調曲線において振幅が  
 $1/\sqrt{2}$  になる周波数



$$= (\text{LC共振回路における}) \frac{|\text{リアクタンス分}|}{\text{抵抗分}}$$

$$= 2\pi \times \frac{\text{蓄積エネルギー}}{\text{1周期中での消費エネルギー}}$$

$$= \text{緩和曲線においてエネルギーが } 1/e \text{ になるまでに要する周期} \times 2\pi$$

## 問い1の答え

$$L \propto D$$

$$C \propto D$$

$$\text{共振周波数} \quad \omega_0 \propto D^{-1}$$

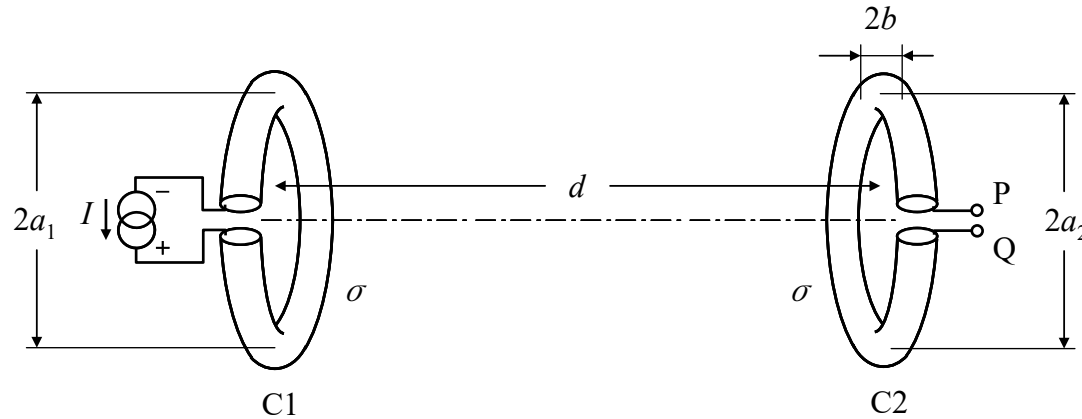
$$\text{リアクタンス分} \quad \omega_0 L \propto D^0$$

$$R \propto D^{-1} \quad (\text{表皮効果は考えない場合})$$

$$\therefore Q = \frac{\omega_0 L}{R} \propto D$$



<再掲> Marin Soljacic の電力伝送 (2007)



$$\left[ B(t) = \mu \frac{a_1^2}{2d^3} I(t) \right]$$

共振時の電力伝送効率

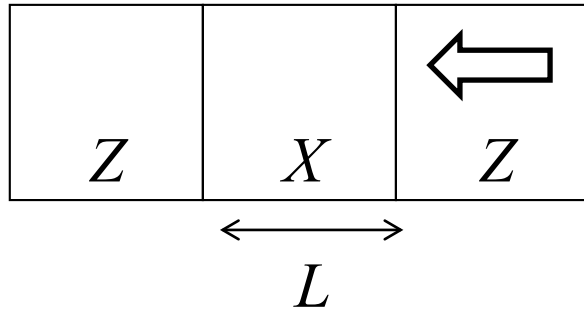
$$\eta = \frac{W}{(1/2)r'I_0^2 + W'} = \frac{1}{\left( \frac{8\sigma d^3}{\pi\omega\mu(a_1 a_2)^{1.5} b^2} \right)^2 + 2}$$

$$= \frac{1}{\frac{64d^6}{\pi^2 a_1^3 a_2^3} \left( \sigma \frac{a_1}{b^2} \cdot \frac{1}{\mu a_1 \omega} \right) \left( \sigma \frac{a_2}{b^2} \cdot \frac{1}{\mu a_2 \omega} \right) + 2}$$

波動の透過とQ値

$$|X| \ll |Z|$$

$$|X| \gg |Z|$$

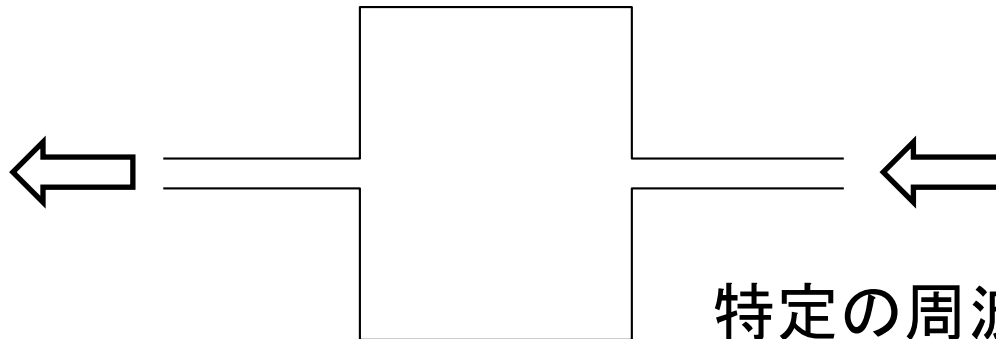


のとき、入射波は反射されるが、

$$L \approx \frac{\lambda}{2} n$$

付近のある周波数で反射が  
起こらなくなる

例2)



特定の周波数で透過が起こる

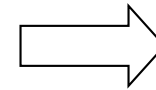
① 表皮効果

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$$

$$\mu = 1.2 \times 10^{-6} \text{ H/m}$$

$$\sigma = 6 \times 10^7 \text{ 1}/\Omega\text{m}$$

$$\omega = 2\pi \times 10^7 \text{ rad/s}$$



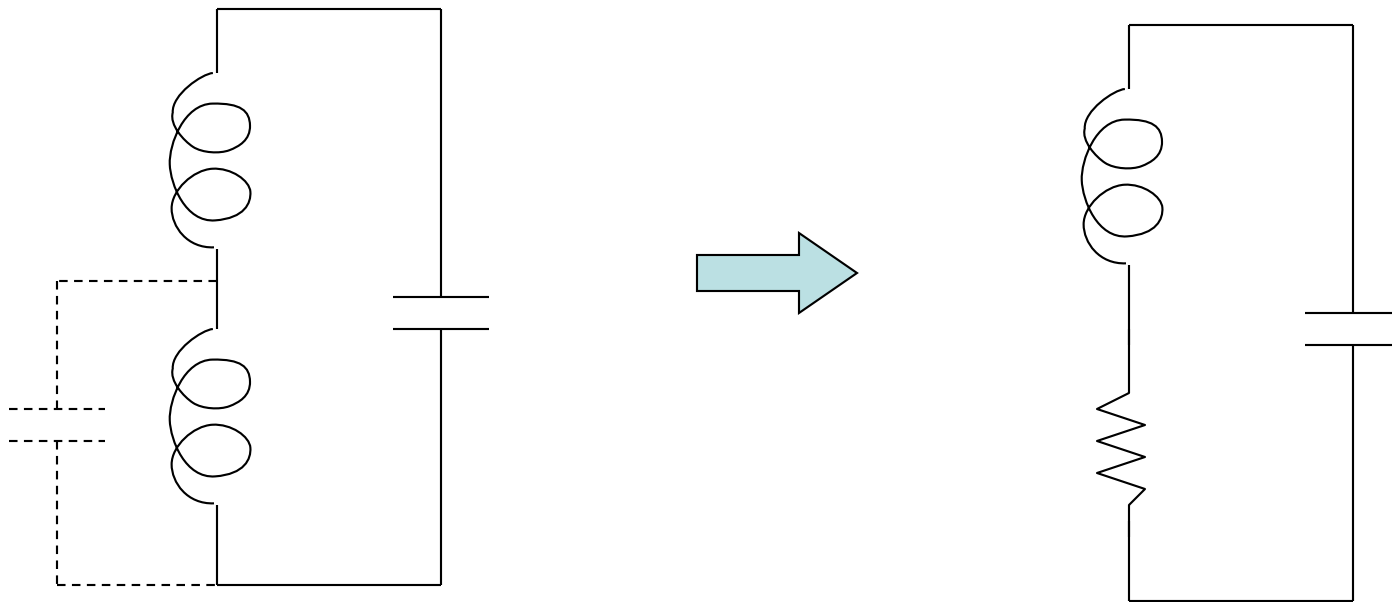
$$\delta \approx 20 \mu\text{m}$$

② 浮遊容量による共振

③ 電磁輻射

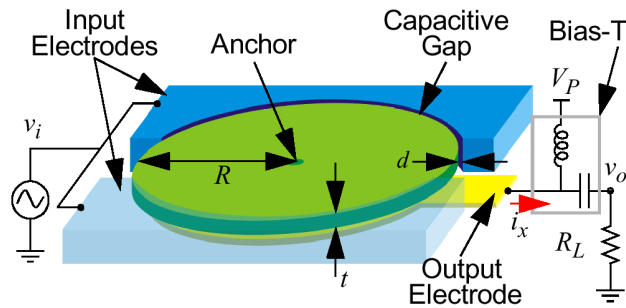
共振による損失発生の説明図。

直流抵抗は小さい導線でインダクタンスを実現した場合であっても、導線間容量との共振によって、より大きな抵抗をもつように見える場合がある。

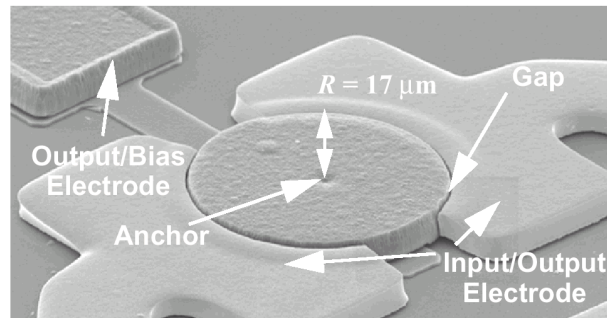


## マイクロマシンの実例

- ・ 加速度センサ
- ・ 圧力センサ
- ・ プリンタヘッド
- ・ ハードディスクのヘッド
  
- ・ マイクロフォン
- ・ 超音波トランスデューサ
  
- ・ 発振器
- ・ フィルタ
  
- ・ DNAチップ
- ・ 化学合成
  
- ・
- ・
- ・



径方向振動モードを  
利用した MEMS 振動子



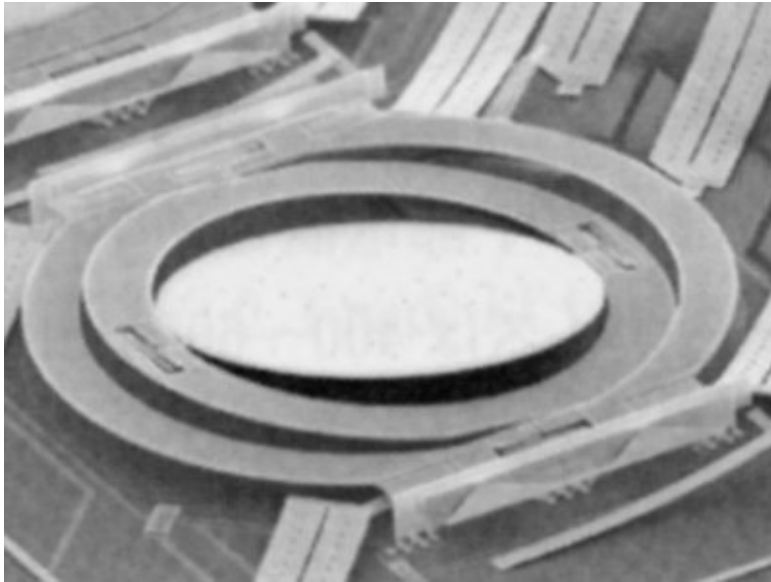
Q : 9,400

156MHz

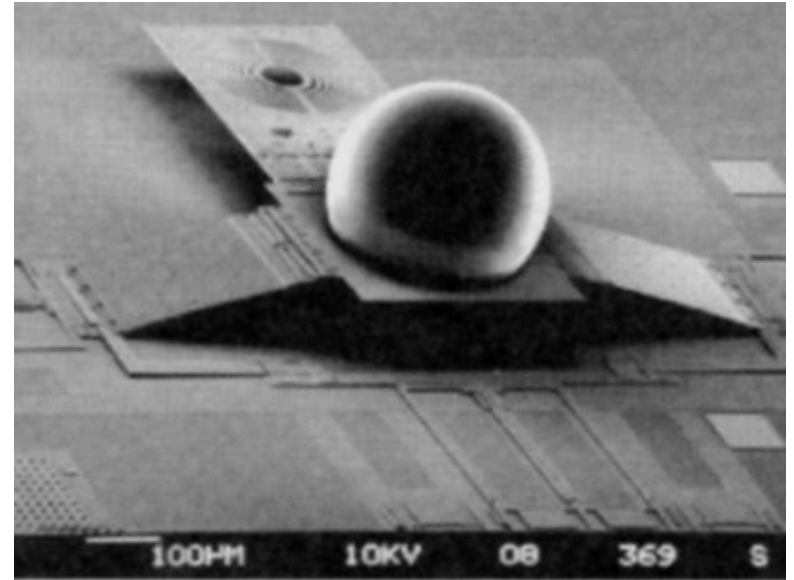
John R. Clark, et al. (Univ. of Michigan)

Measurement Techniques for Capacitively-Transduced VHF-  
to-UHF Micromechanical Resonators

Proc. Trnsducers 2001, pp. 1118-1121

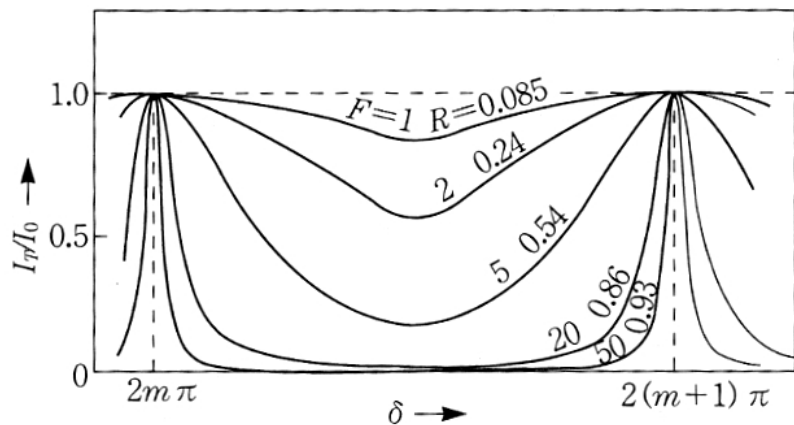


ミラーの回転



レンズの駆動

ファブリ・ペロー干渉

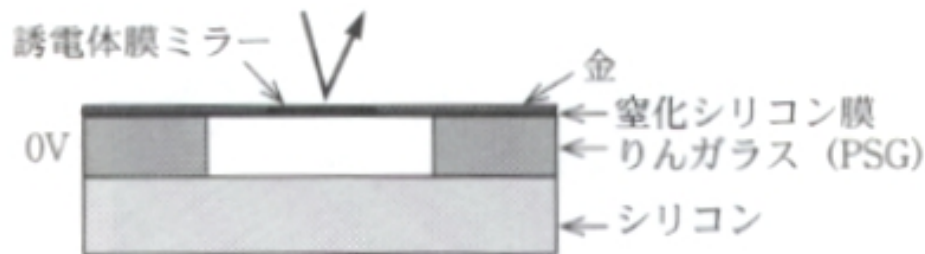


透過率  $I_T / I_0$  と  $\delta$  の関係

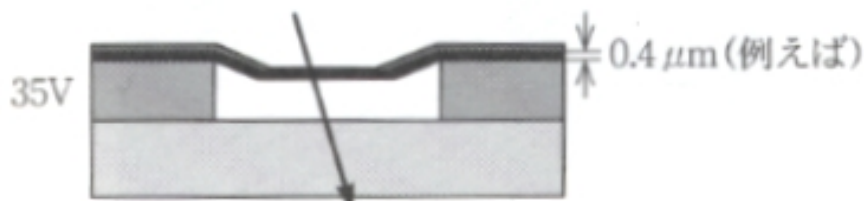
$I_0$  : 入射光パワー

$I_T$  : 透過光パワー

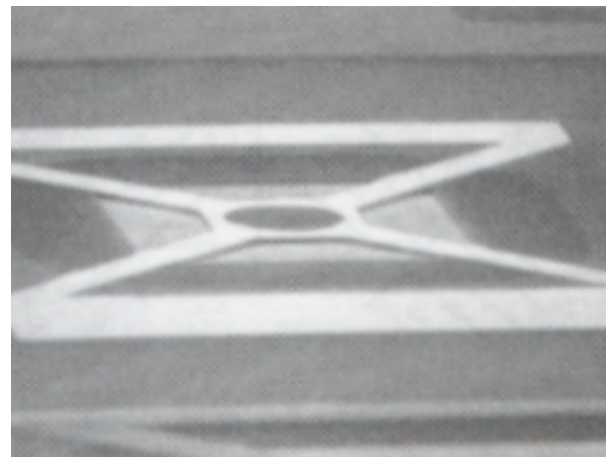
$$\delta : \frac{4\pi}{\lambda} h \cos \theta \quad (h: \text{ギャップ} \quad \theta: \text{入射角})$$



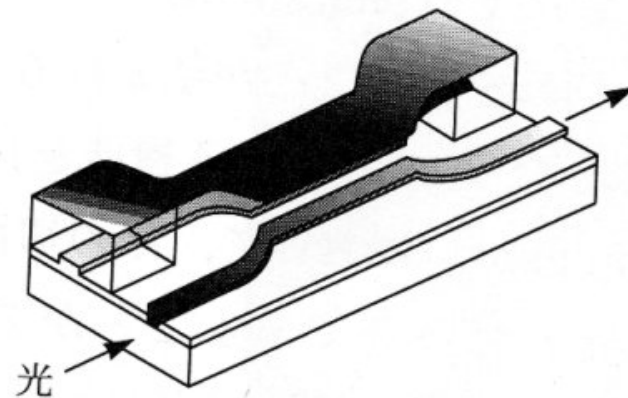
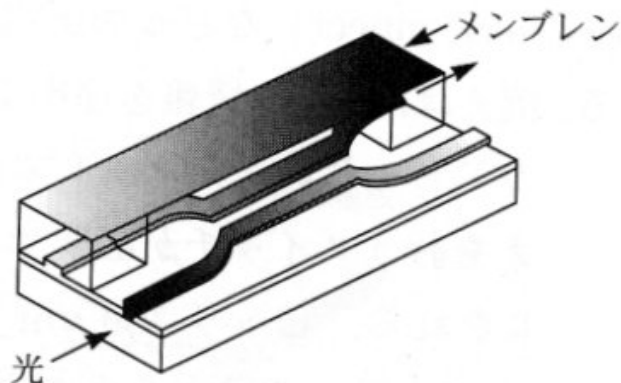
(a) ギャップ  $3\lambda/4$



(b) ギャップ  $\lambda/2$





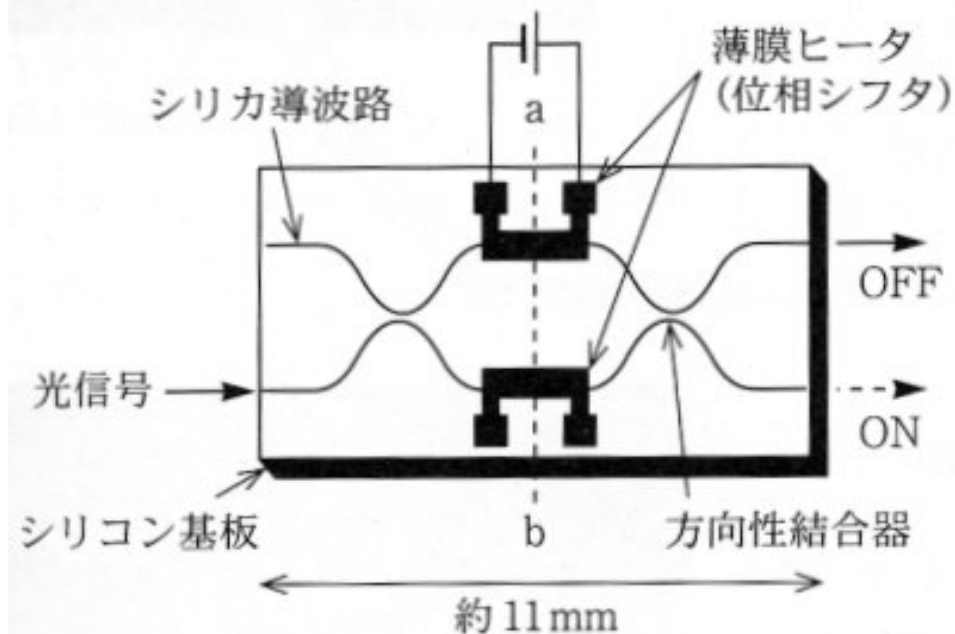


エバネッセント結合スイッチ  
透明体が近接すると、全反射が崩れる

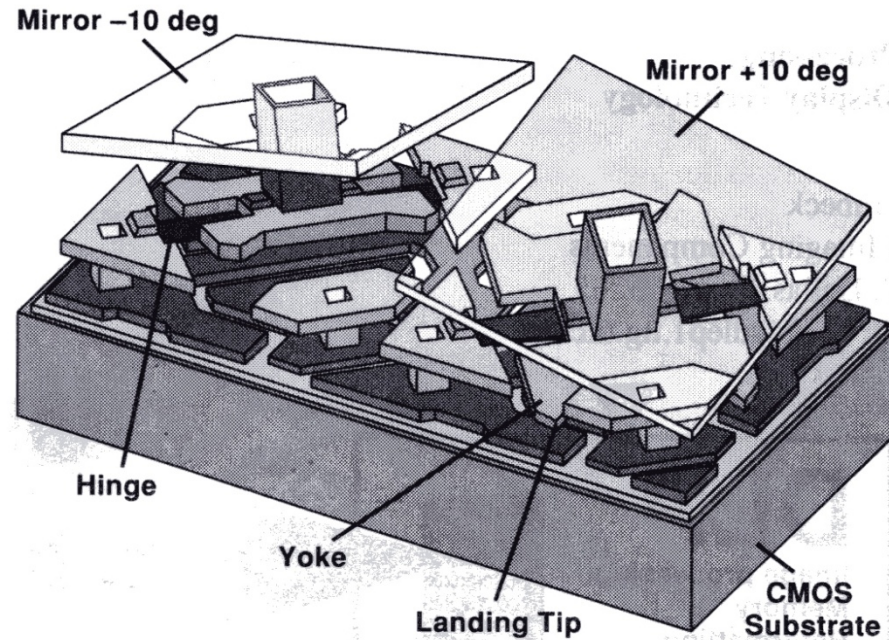
マツハ・ツェンダー干渉応用スイッチ

ヒータで加熱し、光熱屈折効果により光の位相を変化させ、スイッチにする。

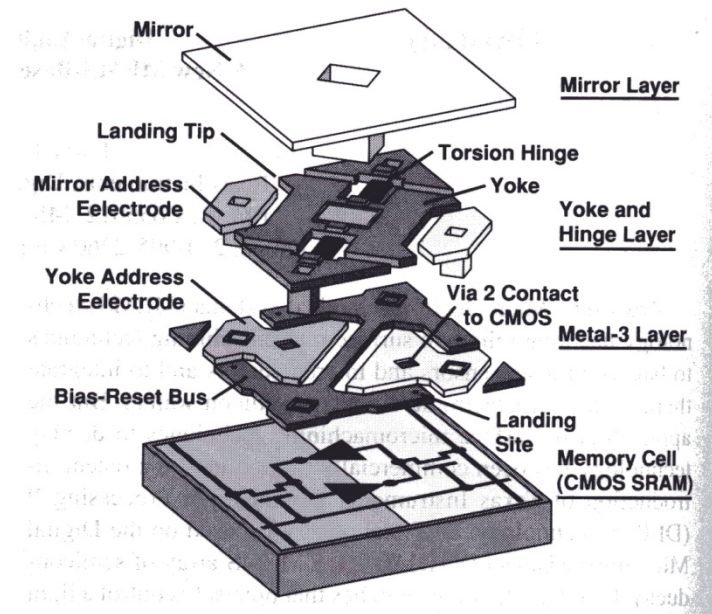
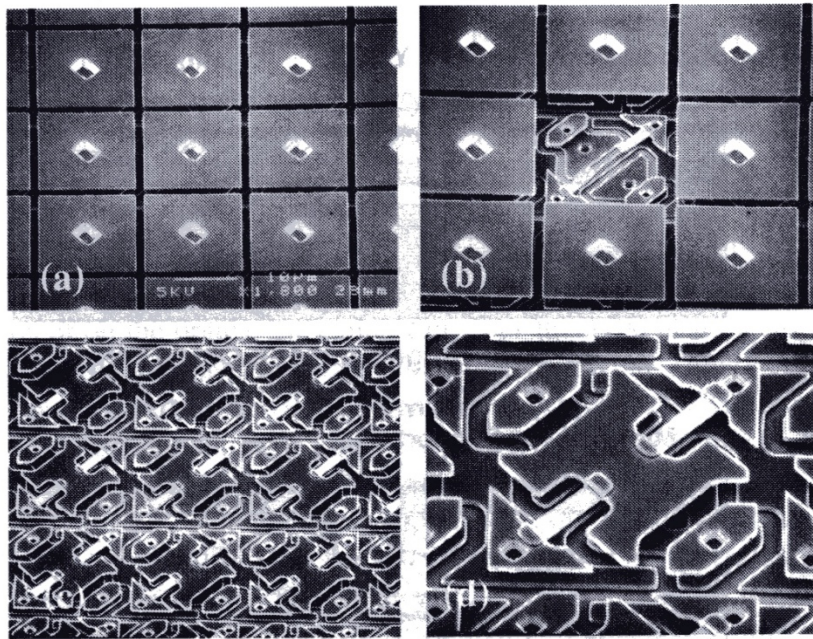
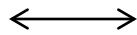
スイッチング時間 1ms



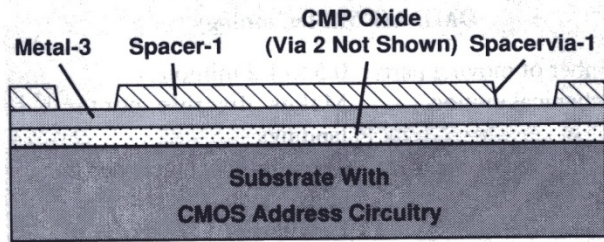
## DMD (Digital Micromirror Device)



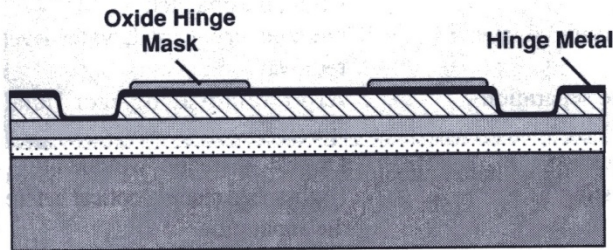
Proc. 14th Sensor symposium  
pp. 297~304, 1996

17  $\mu\text{m}$ 

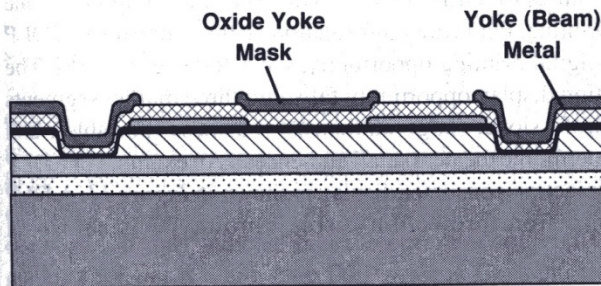




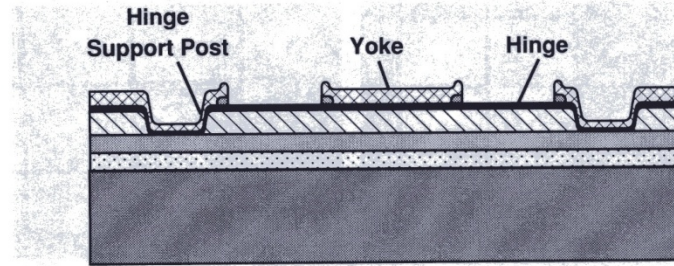
After Spacer-1 Patterning



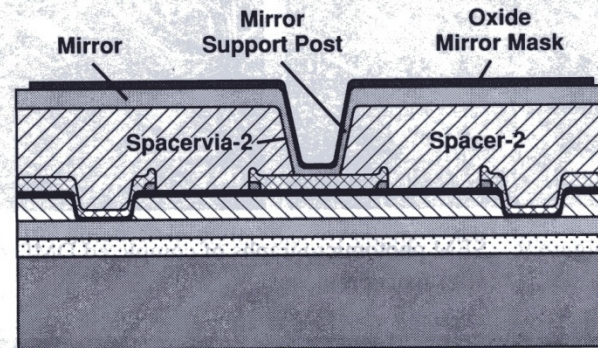
After Oxide Hinge Mask Patterning



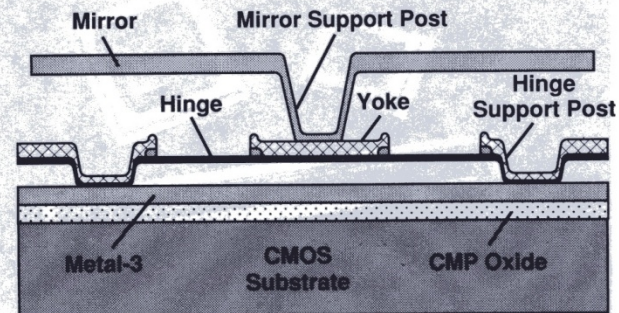
After Yoke Oxide Patterning



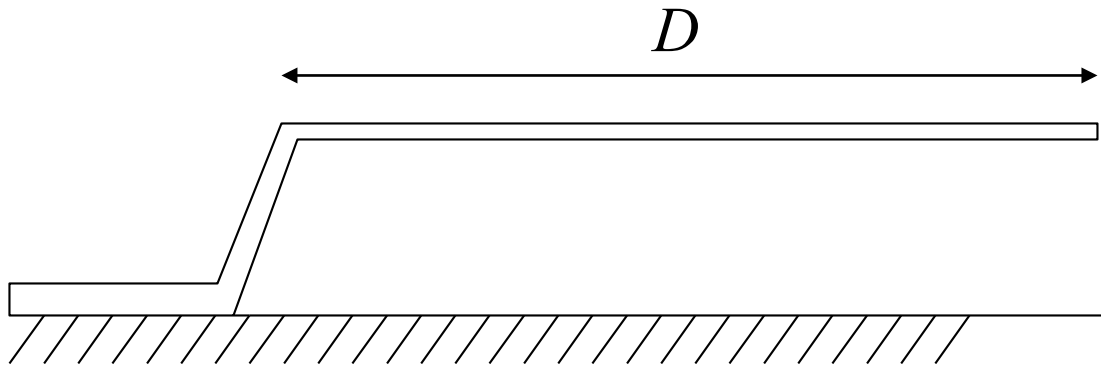
After Yoke/Hinge Etch and Oxide Strip



After Mirror Oxide Patterning



Completed Device

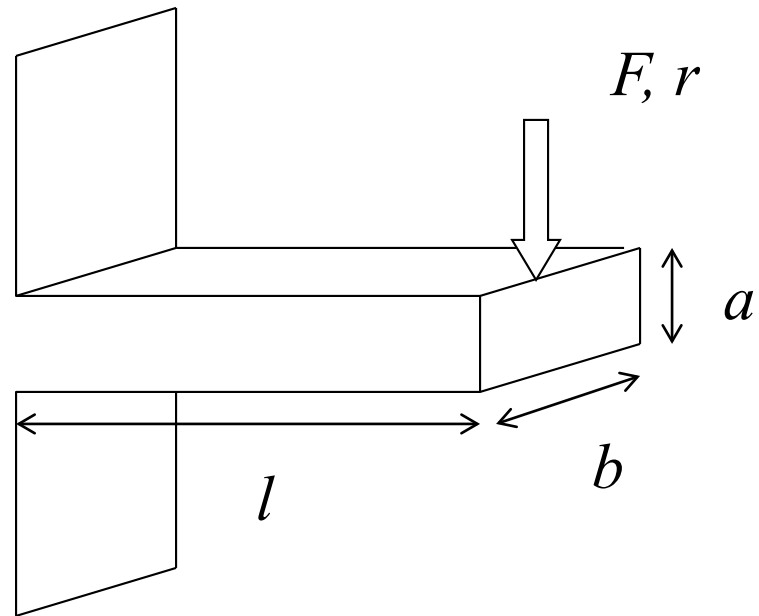


バネ定数  $k \propto D$

静電気力  $F = \frac{QV}{d} = \varepsilon \frac{S}{d^2} V^2 \propto D^0 V^2$

一定歪みに対応する電界  $D^0$  (サイズに依存しない)

$$d = \frac{4Fl^3}{a^3bE}$$



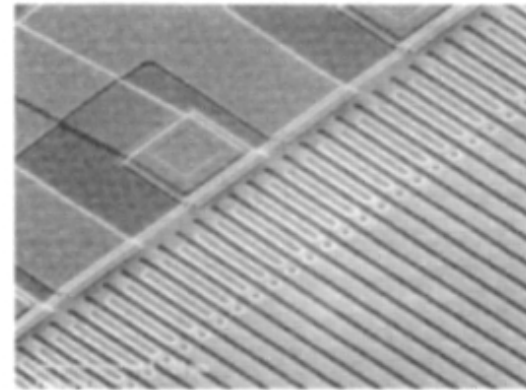
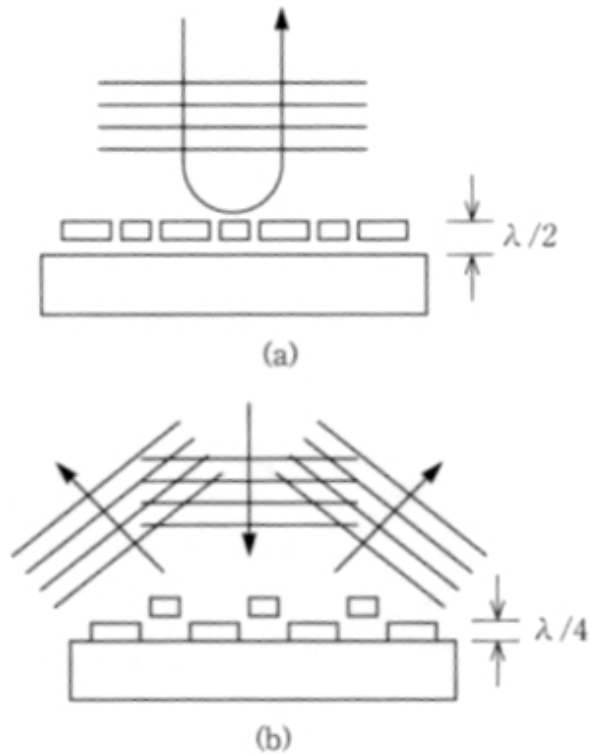
$$d = 1 \mu\text{m}, \quad l = b = 10 \mu\text{m} \quad (d/l = 10 \%)$$

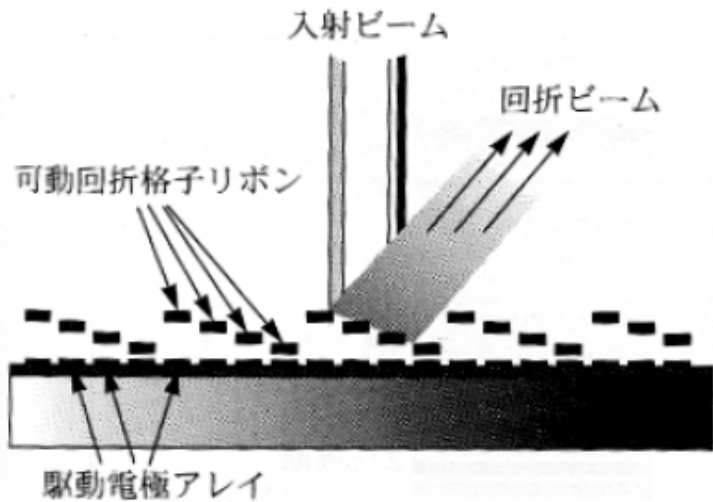
$$a = 0.1 \mu\text{m}, \quad E = 10^{11} \text{ Pa} \quad \text{とすると} \quad F = 2 \times 10^{-7} \text{ N}$$

$$10 \mu\text{m} \text{ 角、間隔 } 1 \mu\text{m} \text{ の極板に } 10 \text{ V} \text{ 印加} \quad \text{---} \quad F = 10^{-7} \text{ N}$$

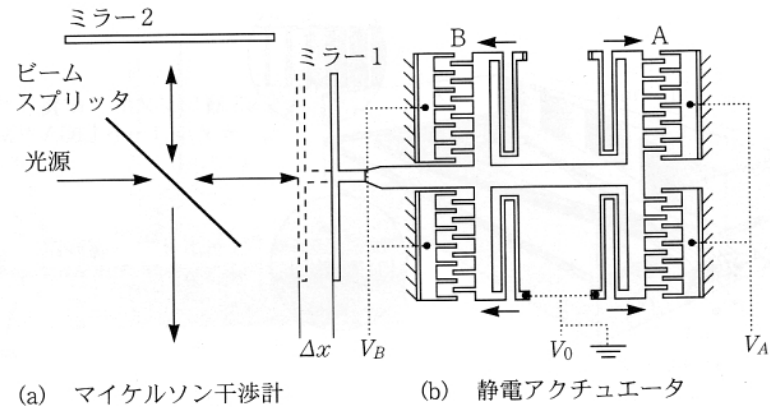
〔 形状が同一なら、同じ角度曲げるのに必要な力は大きさの2乗に比例 〕

## GLV (Grating Light Valve)



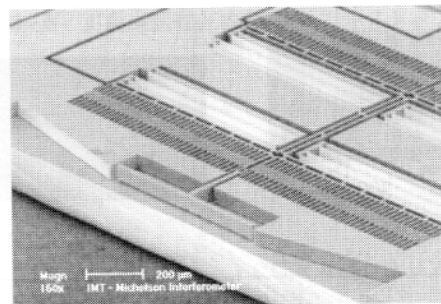


可動回折格子

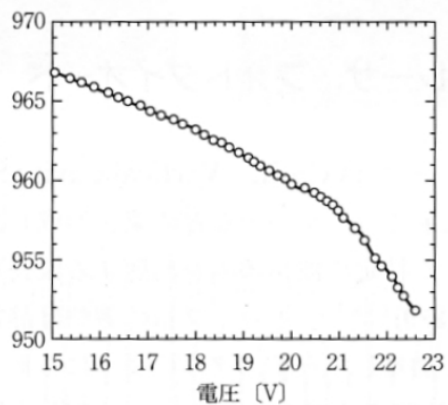
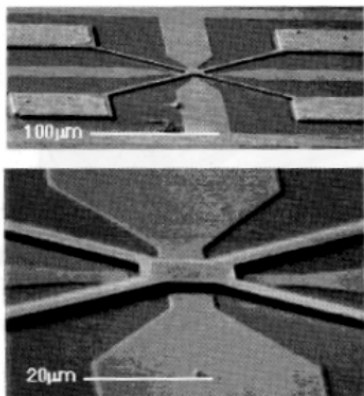


(a) マイケルソン干渉計

(b) 静電アクチュエータ



フーリエ分光装置

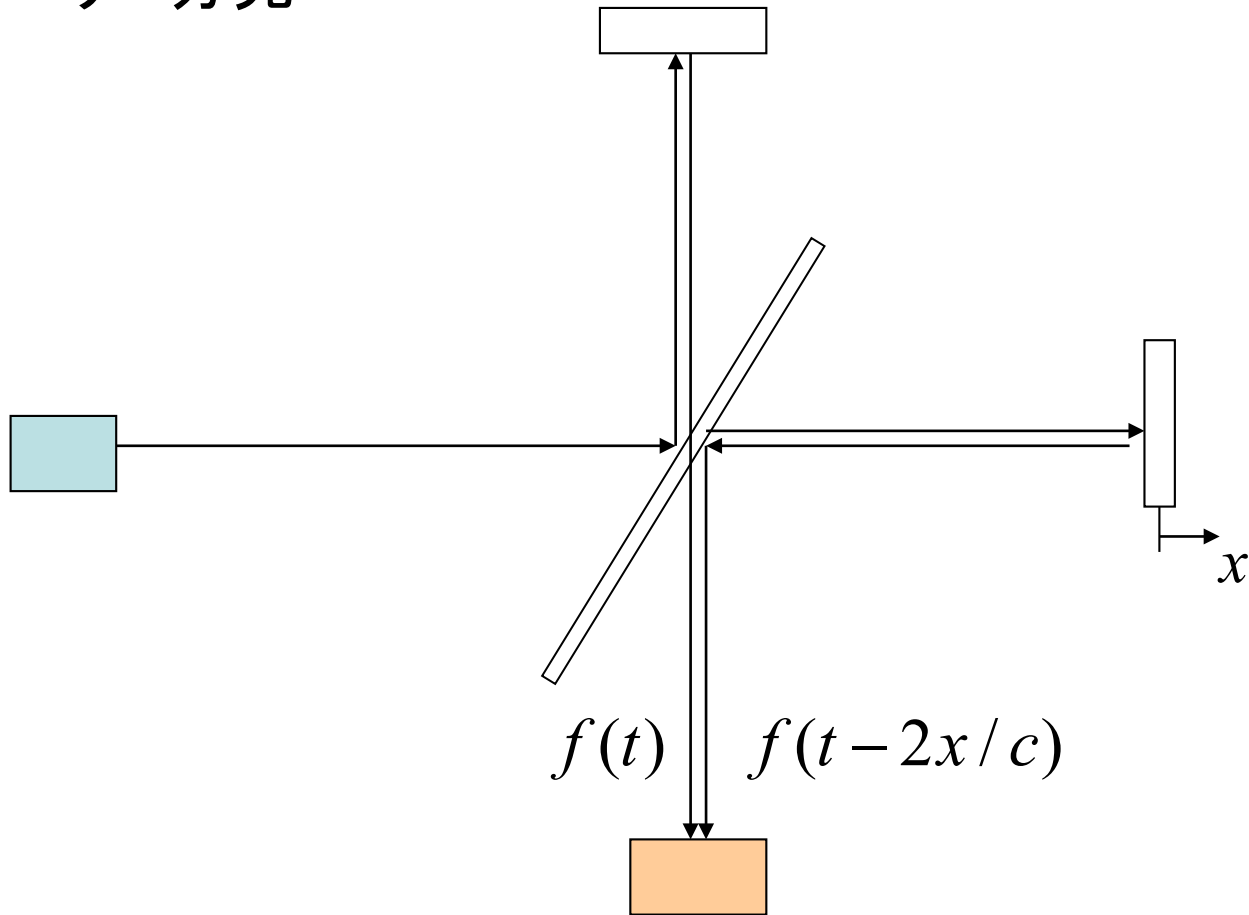


(c) 電圧と波長の関係

波長可変レーザ



## フーリエ分光



## 受光平均強度

$$p(x) = \frac{1}{T} \int |f(t) + f(t - 2x/c)|^2 dt$$

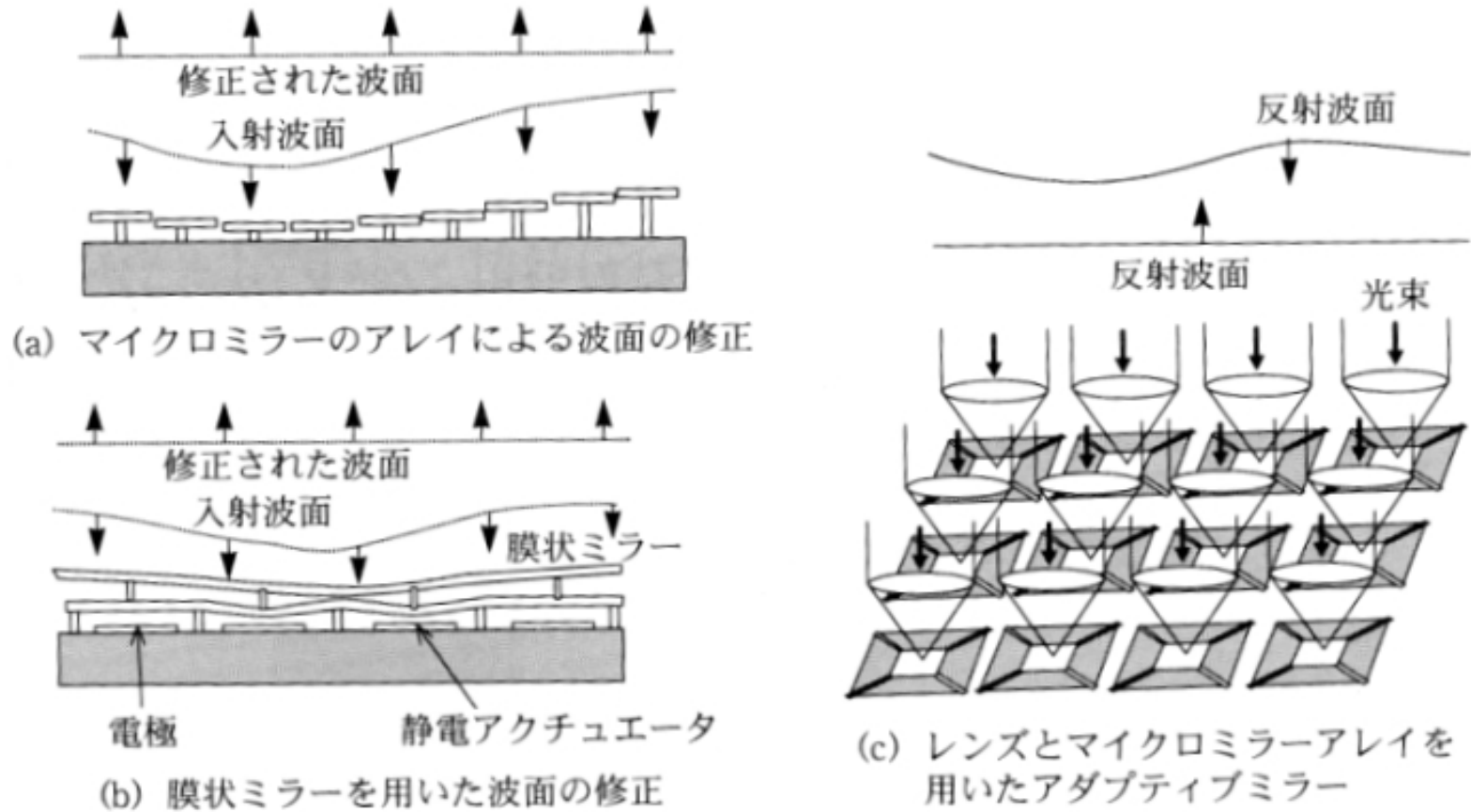
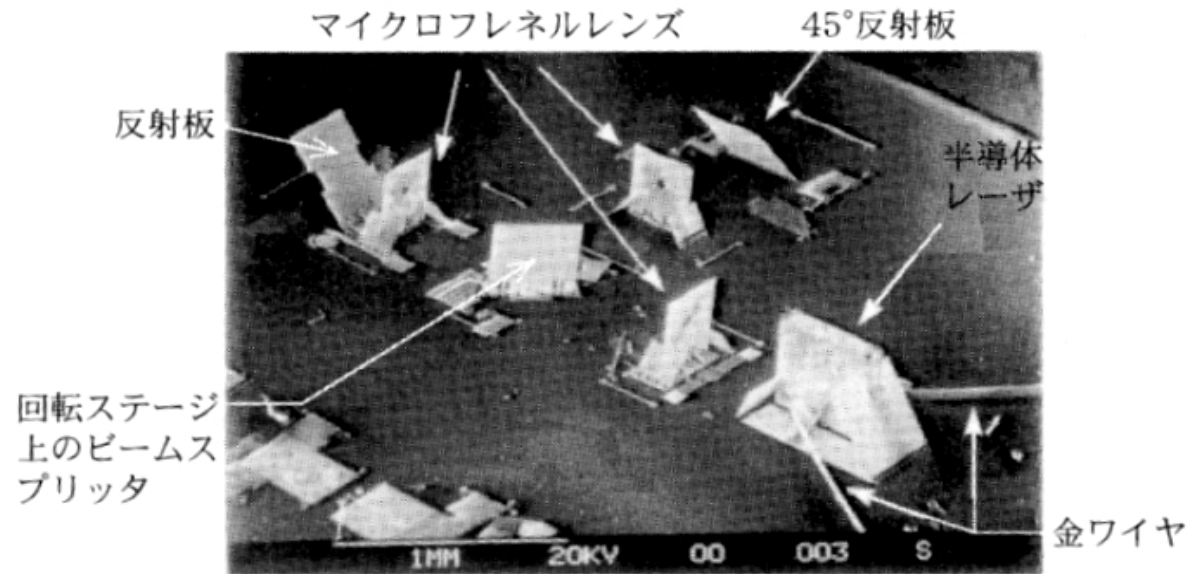


図 4・12 ミラーによる波面制御

## モノリシック光ピックアップ



## フォーカシングアクチュエータ

形状変化により浮上量を制御

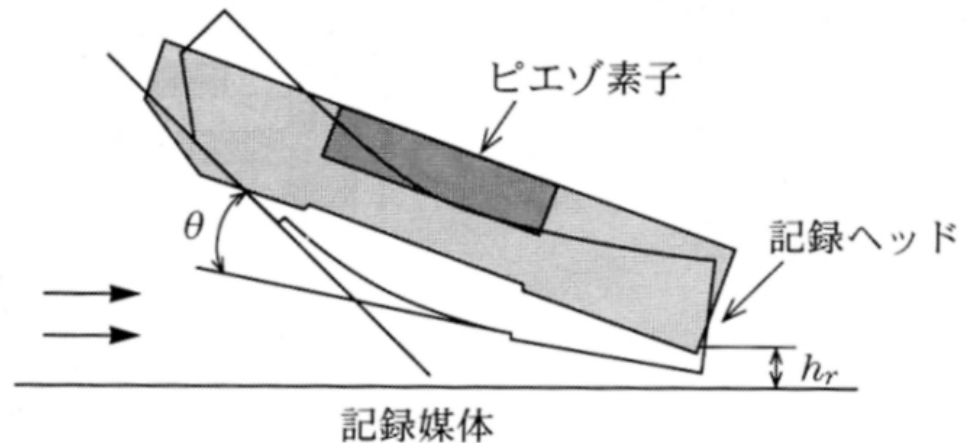


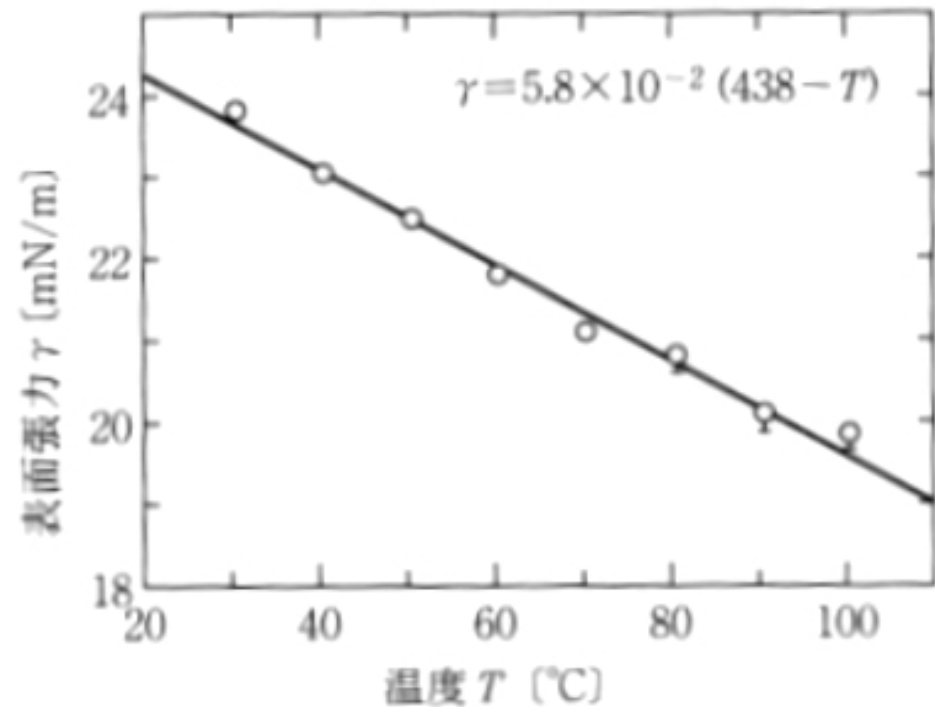
図 7・10 スライダの浮上の様子

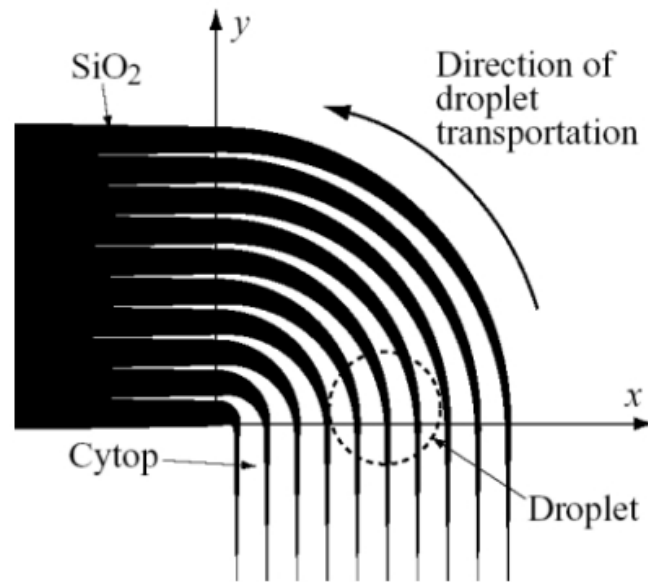
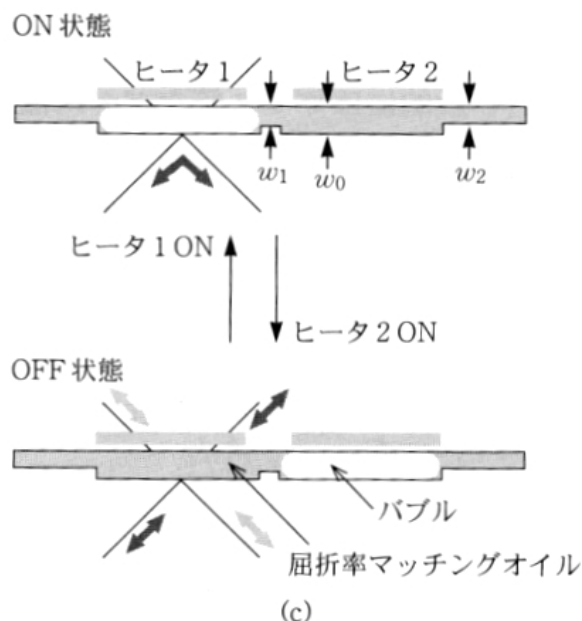
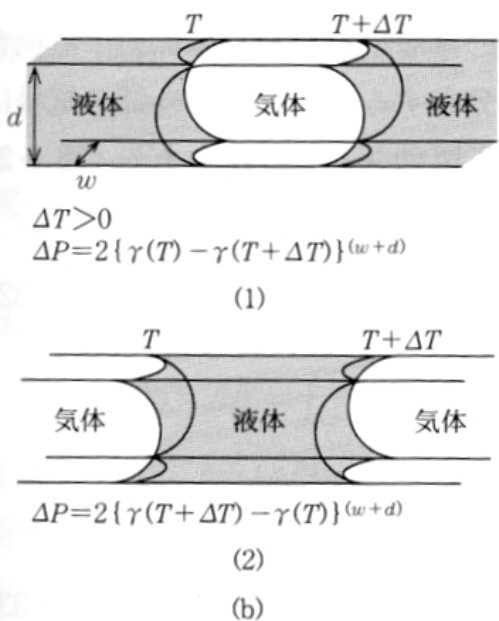
## 液体移動

表面張力の利用

インクジェット方式

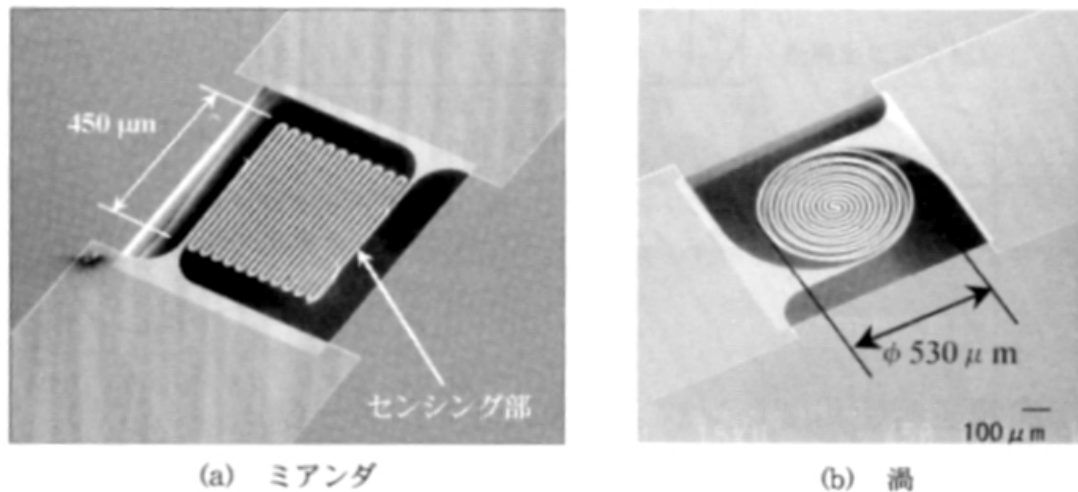
浸透圧による移動





熱毛細管現象を利用したスイッチ

表面張力が変化するパターン

図 5・31 ポロメータ<sup>(35)</sup>

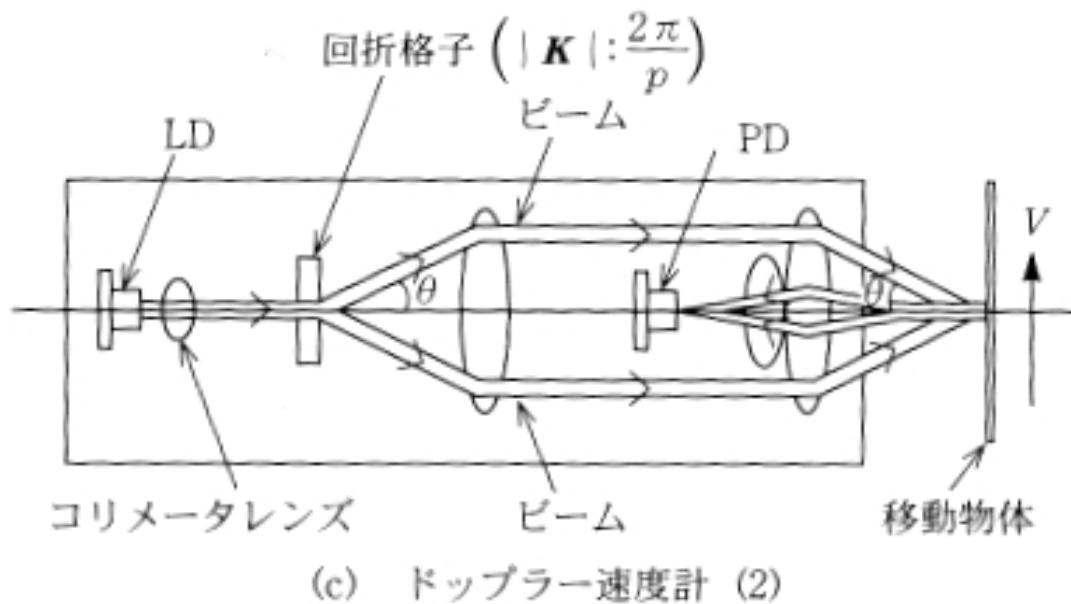
### ポロメータ

赤外線センサ。  
温度による Si 抵抗変化を利用

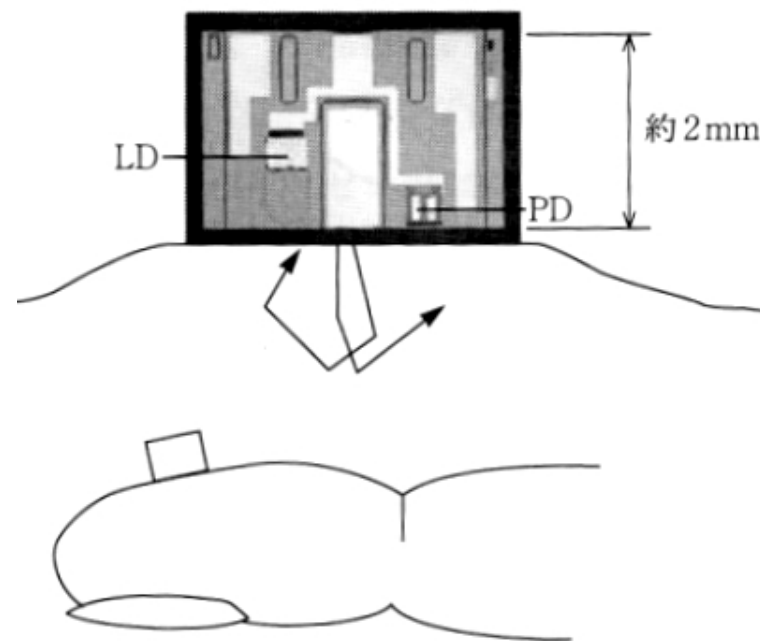
参考：太陽光 0.15 mW/mm<sup>2</sup>程度  
300 lux 0.5 μW/mm<sup>2</sup>程度

例)

1mm × 1mm × 1μm の水の膜 --- 10<sup>-6</sup> g  
300 lux であっても数秒で1 K 温度上昇

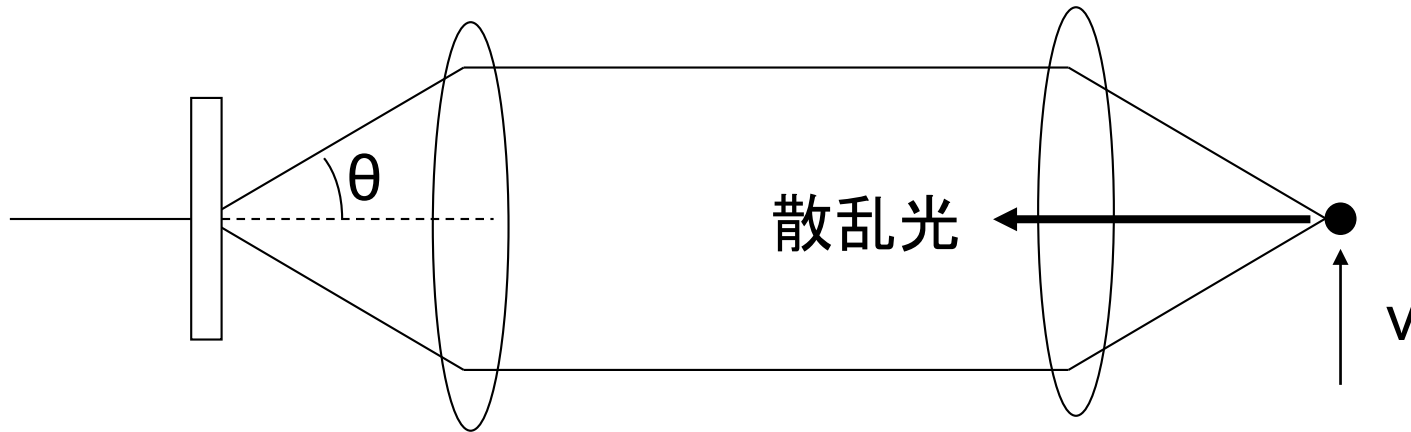


ドップラ速度計



ドップラ血流量センサ

# ドップラ速度計の波長ゆらぎ補償



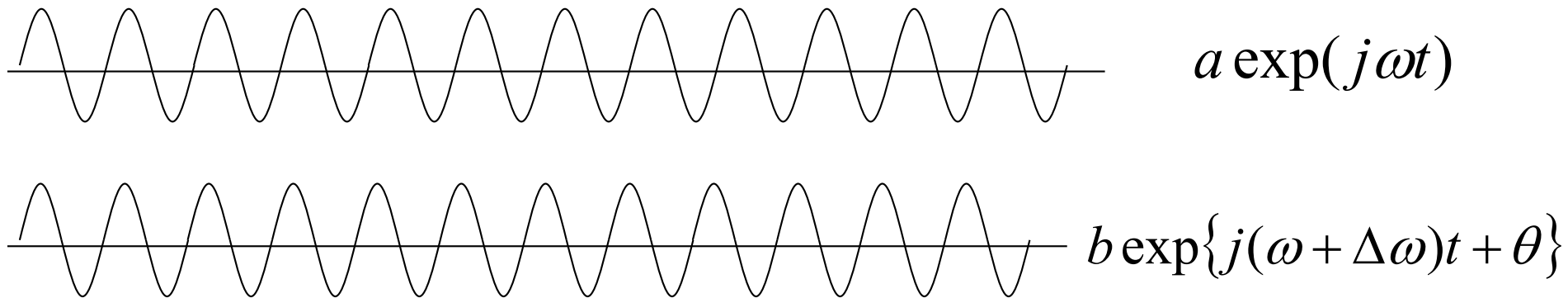
1次回折光  $d \sin \theta = \lambda$

ドップラシフト  $f' = \frac{c \pm v \sin \theta}{c} f$

差周波数  $f_1 - f_2 = \frac{2v \sin \theta}{\lambda}$



# 光ヘテロダイン干渉法



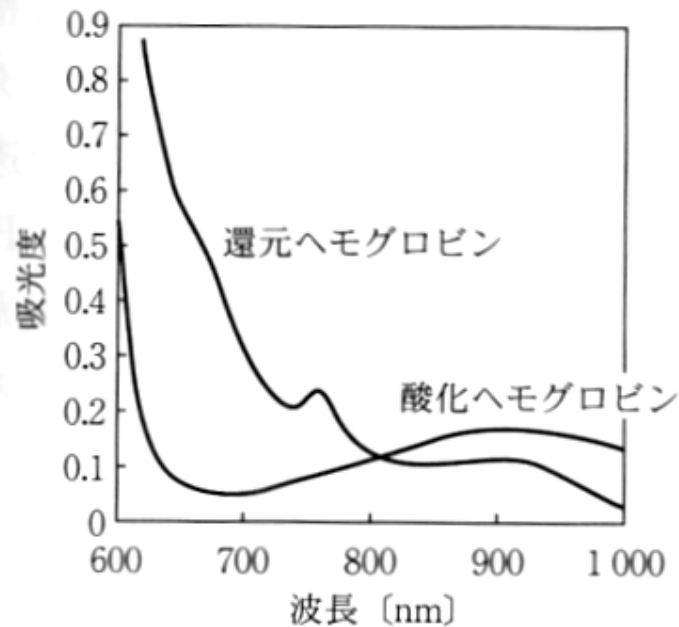
和信号の2乗の包絡

$$\frac{a^2 + b^2}{2} + ab \cos(\Delta\omega t + \theta)$$

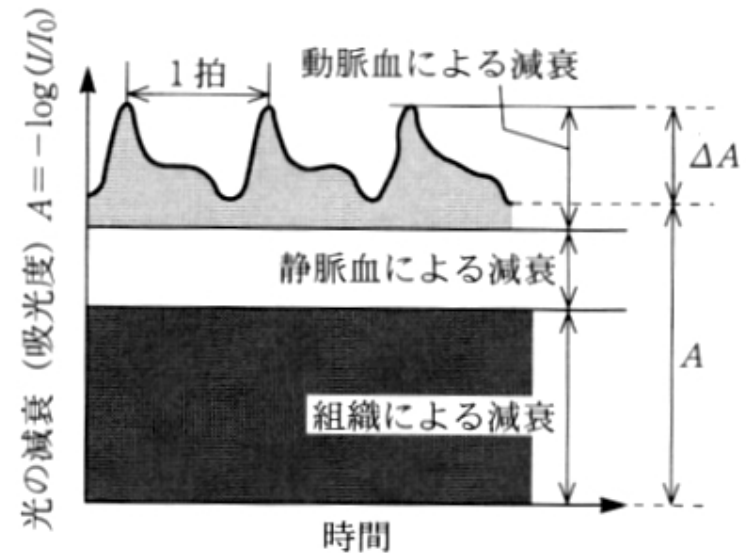
元の波形の位相関係が  $\theta$  ずれると、ビート信号の位相も  $\theta$  ずれる

- (1) 環境光のうち  $\Delta\omega$  で変動する成分以外は除去可能.
- (2) 参照光の強度を大きくすることで、微弱な信号の検出が可能になる.

問い: ホモダイン干渉で参照光を強くするとどのような不都合が生じるか



(a) ヘモグロビンの吸収スペクトル



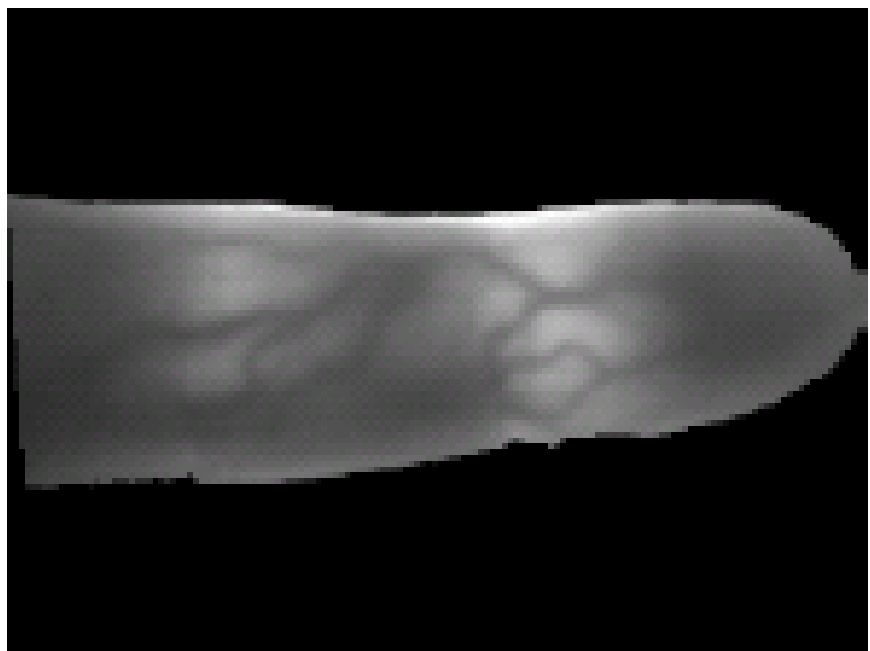
(b) パルスオキシメータの原理

## 血液酸素飽和度センサ

- ・ グルコースモニタ
- ・ 旋光の計測
- ・ 生物フォトンの計測

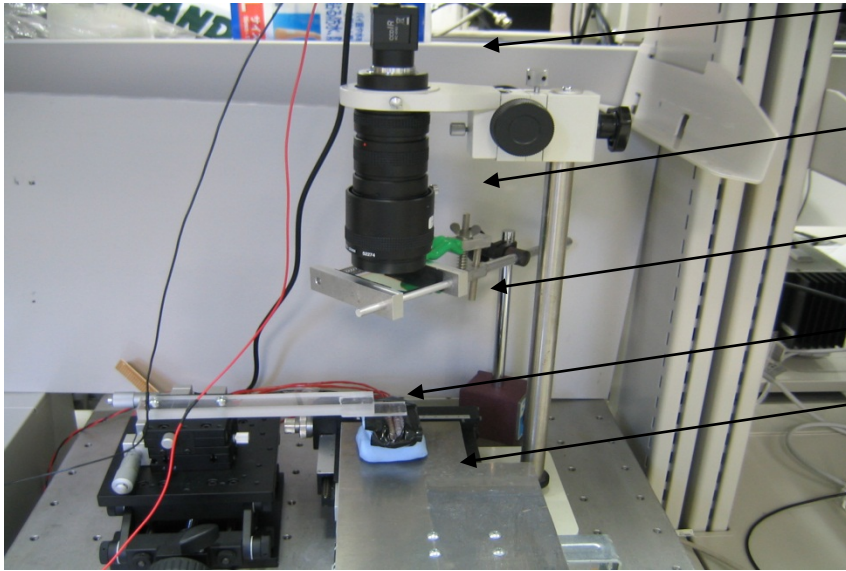
# 光で生体の内部を観察

- 静脈撮像
  - 生体認証
  - 還元ヘモグロ빈は760nmの赤外線を吸収



Miura [2004]

# 装置図



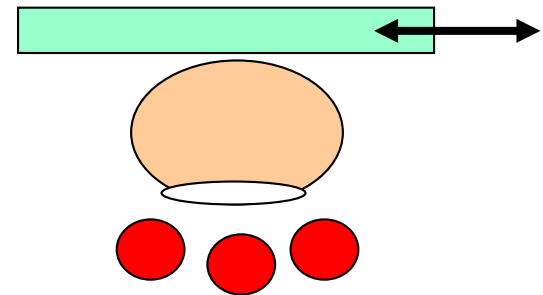
赤外線CCDカメラ

マクロレンズ

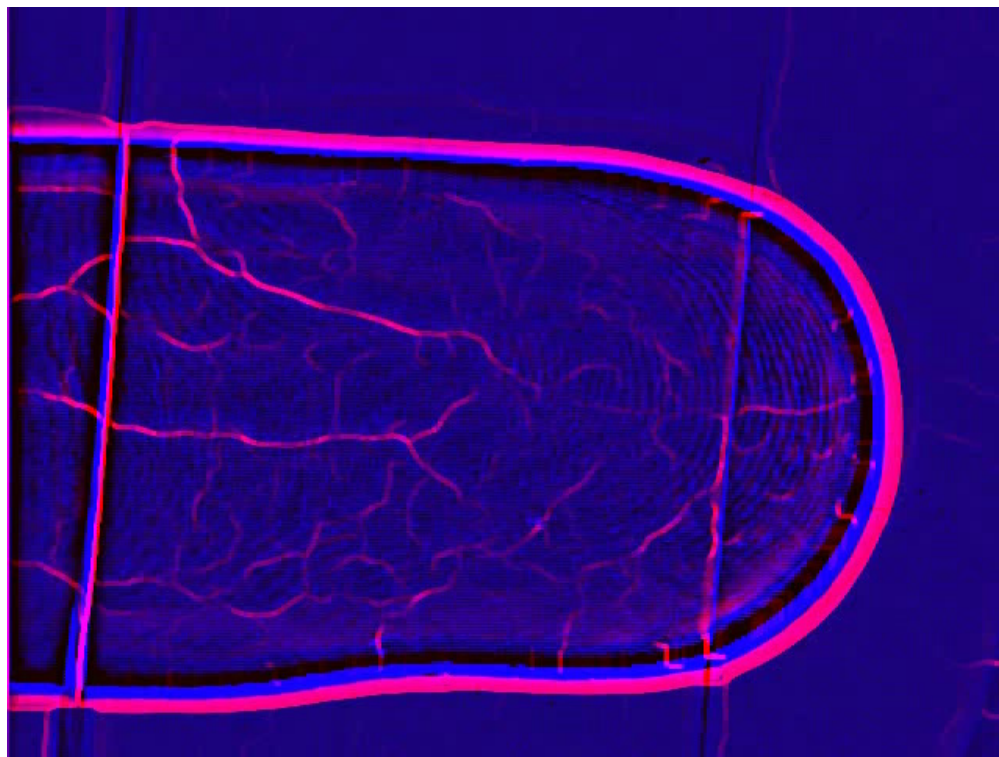
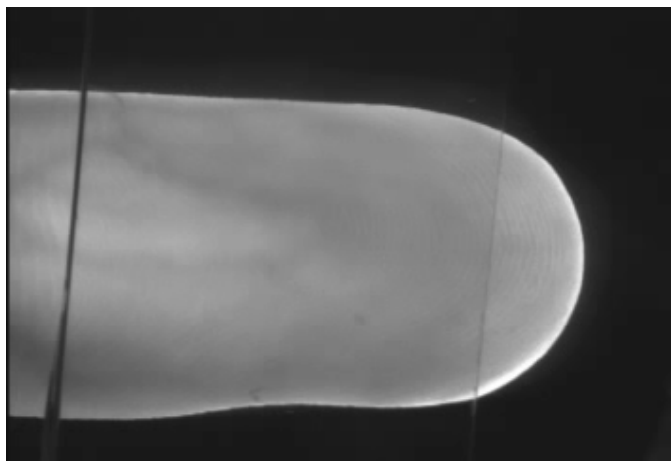
赤外フィルター

アクリル板

LEDアレイ

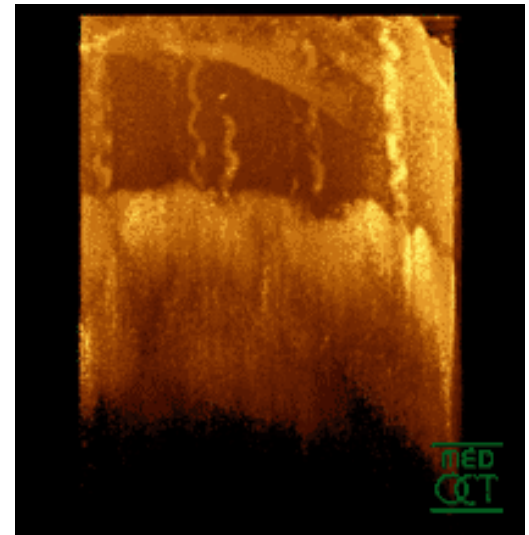
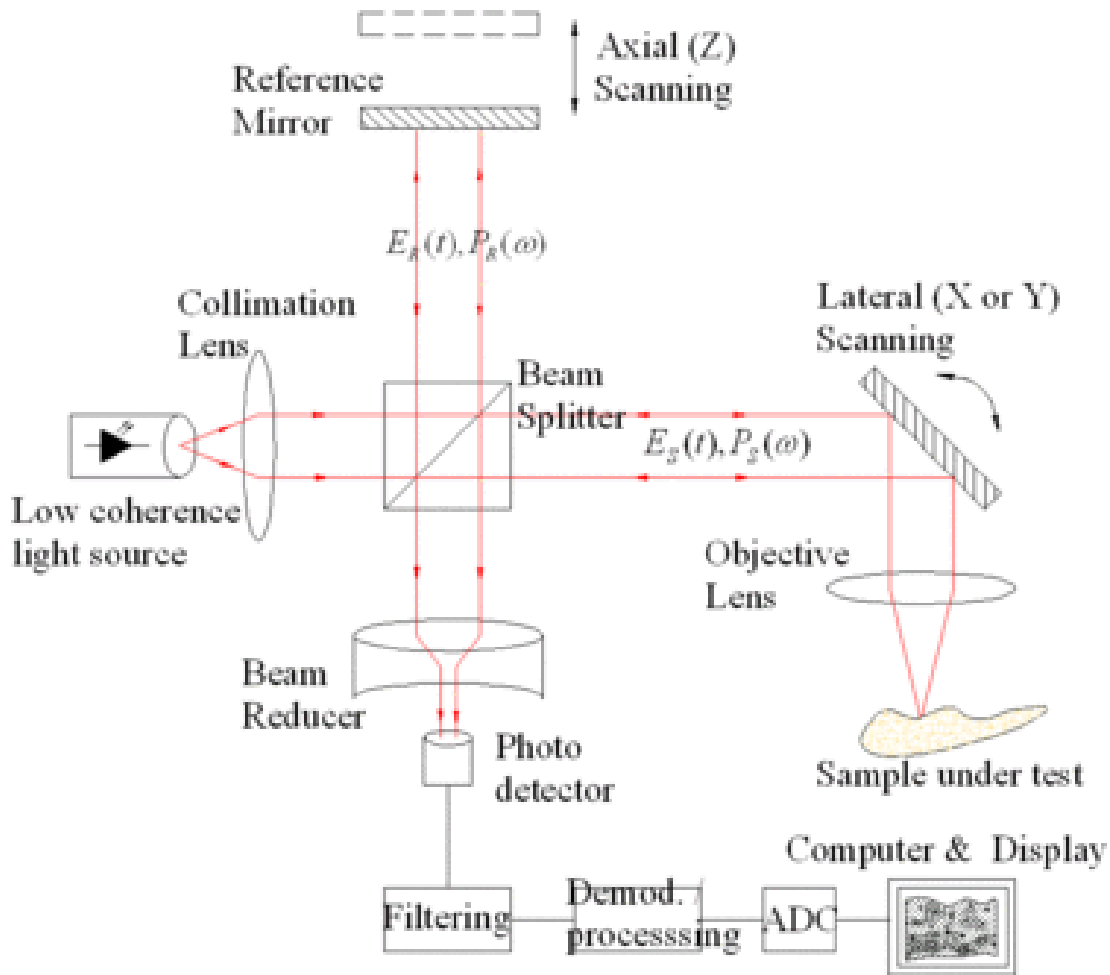


# 静脈の変形映像

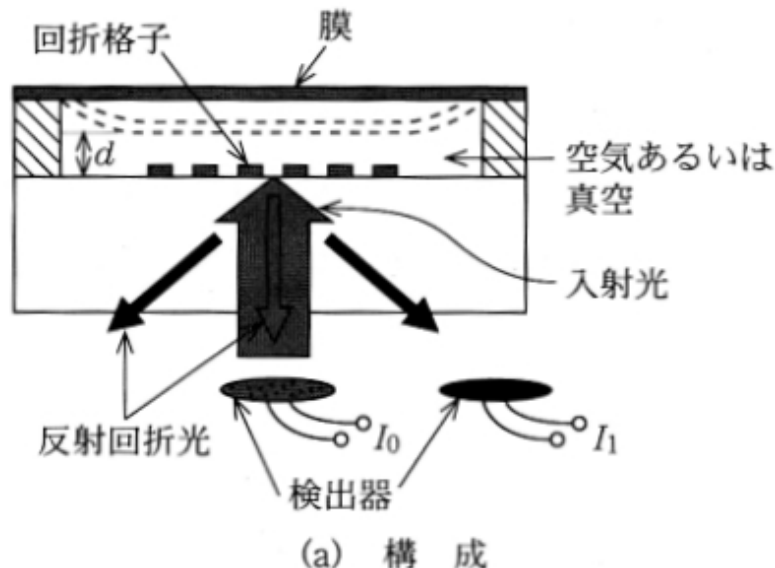


岩本 2007

# OCT (Optical Coherence Tomography)



Tomogram of a fingertip  
(Wikipedia)



## 回折格子内蔵光マイクロフォン

$$I_0 - I_1 \propto IR \sin\left(\frac{4\pi}{\lambda} \Delta x\right) \approx IR \frac{4\pi}{\lambda} \Delta x$$

左辺：0次回折光と1次回折光の強度差

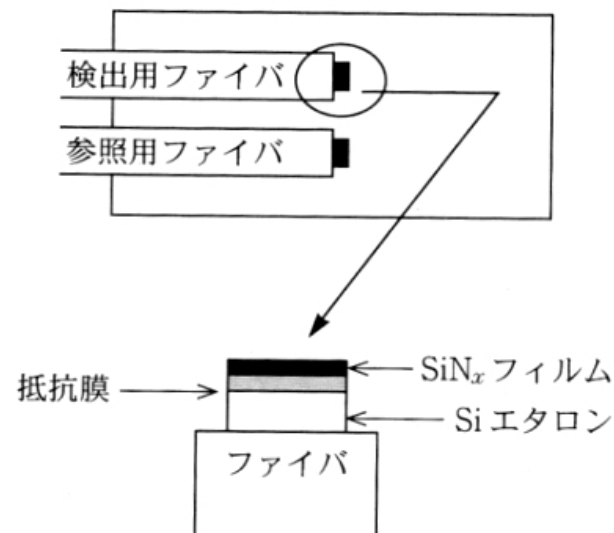
$\Delta x$ ：メンブレンの変位

## シリコンエタロン磁場センサ

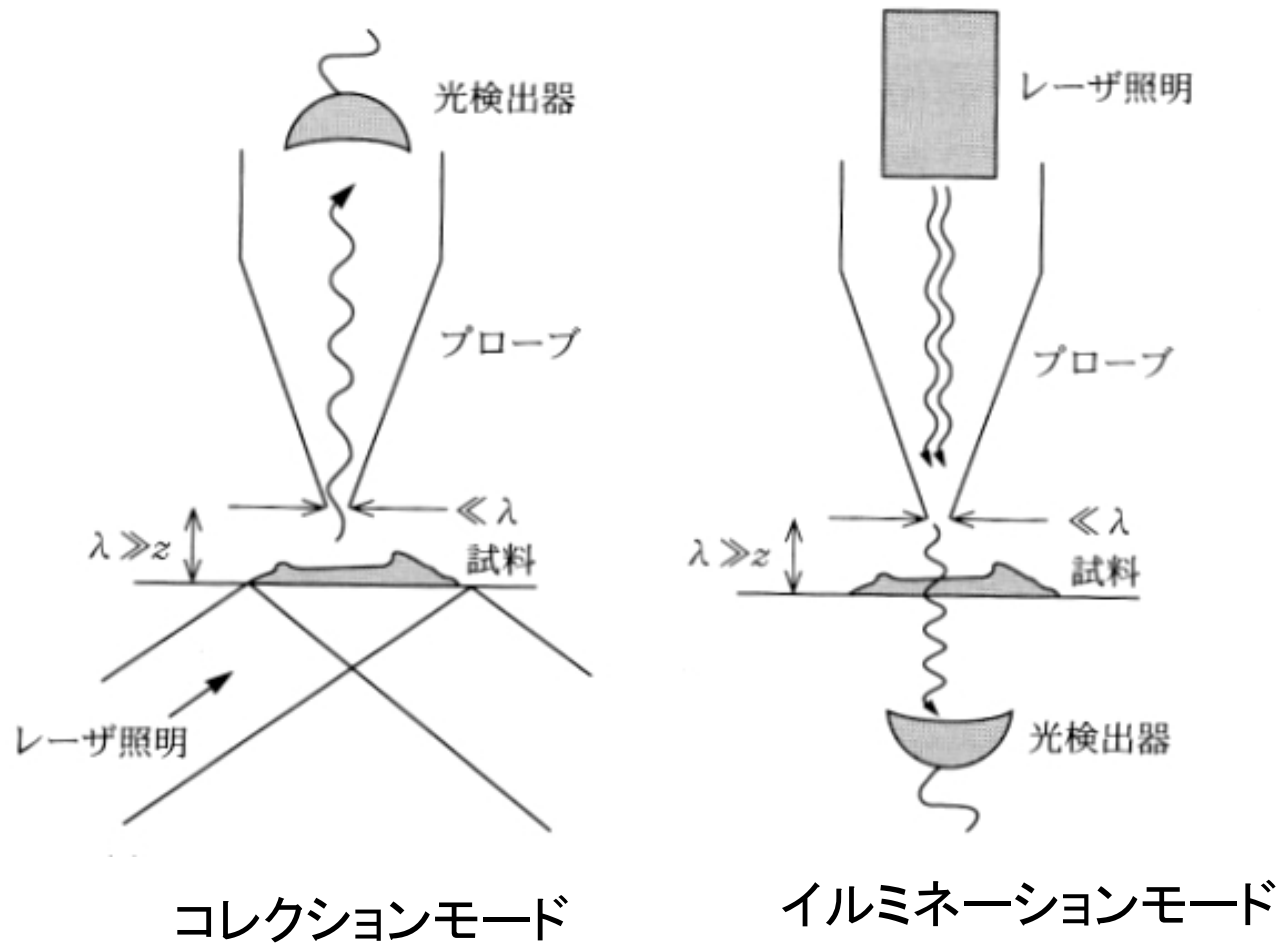
磁場変化 → 電流 → ジュール熱

$$\text{Si: } \frac{dn}{dT} = 1.86 \times 10^{-4} \text{ [K}^{-1}] \text{ (波長 } 1.55 \mu\text{m)}$$

$n$ : 屈折率 \*エタロン: 鏡を対向させた構造



## 近接場光学顕微鏡





## ドップラ冷却

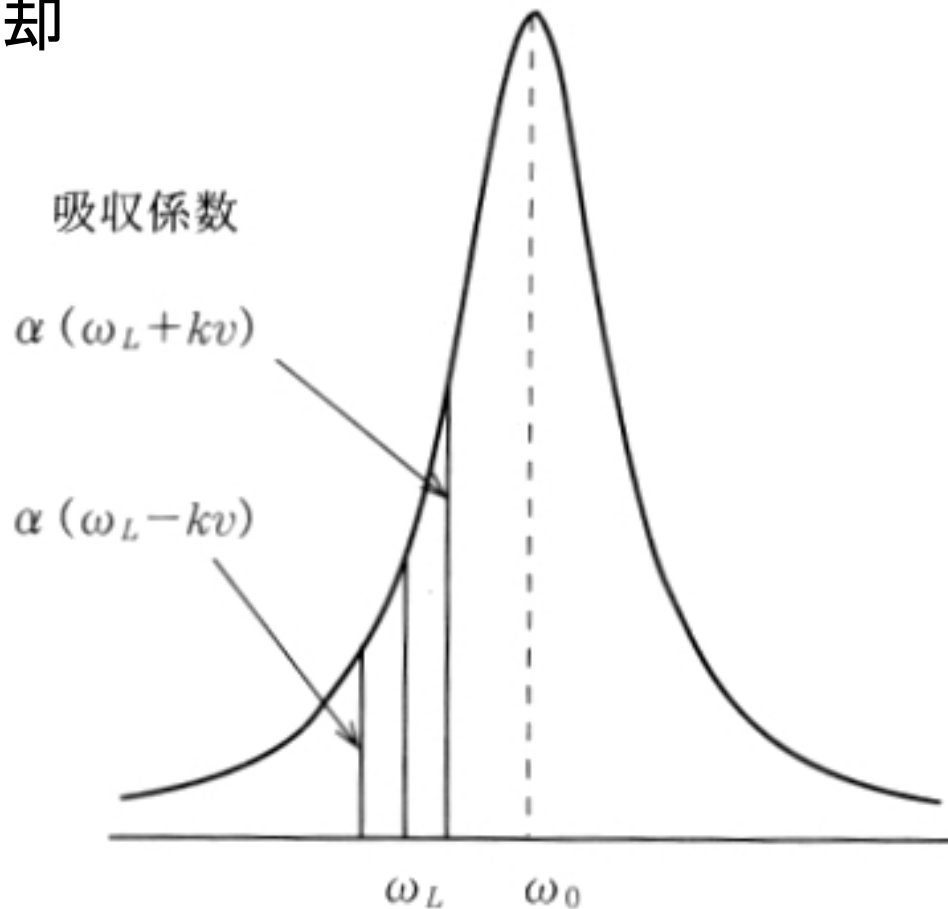


図 5・18 原子の吸収係数と角周波数

原子の両側から $\omega_0$ より少し低い周波数を照射すると、吸収係数のカーブより、減速側(ドップラーシフトにより原子はより高い周波数に感じる)の吸収がより多く生じ、原子が減速していく。

# 光によるマニピュレーション

1. 放射圧 
$$\mathbf{P} = \frac{\mathbf{S}}{c} \quad [\text{N/m}^2]$$

\* 入射ビームが完全吸収面に作用する際に生じる圧力

$\mathbf{S}$ : ポインティングベクトル

$c$ : 光の速さ

2. 勾配力 
$$F = 2\pi a^3 \frac{\varepsilon_0(\varepsilon - \varepsilon_0)}{\varepsilon + 2\varepsilon_0} \text{grad } E^2 \quad [\text{N}]$$

\* 真空中に置かれた半径  $a$  の球状誘電体 (誘電率  $\varepsilon$ ) が受ける力。

導体球の場合は  $\varepsilon \rightarrow \infty$  とすればよい。

# マイクロ・ユビキタス情報システム

## 問題

微細な素子にセンサや計算機機能を搭載できるようになると、従来とシステムの設計がどのように変わるか、整理せよ。