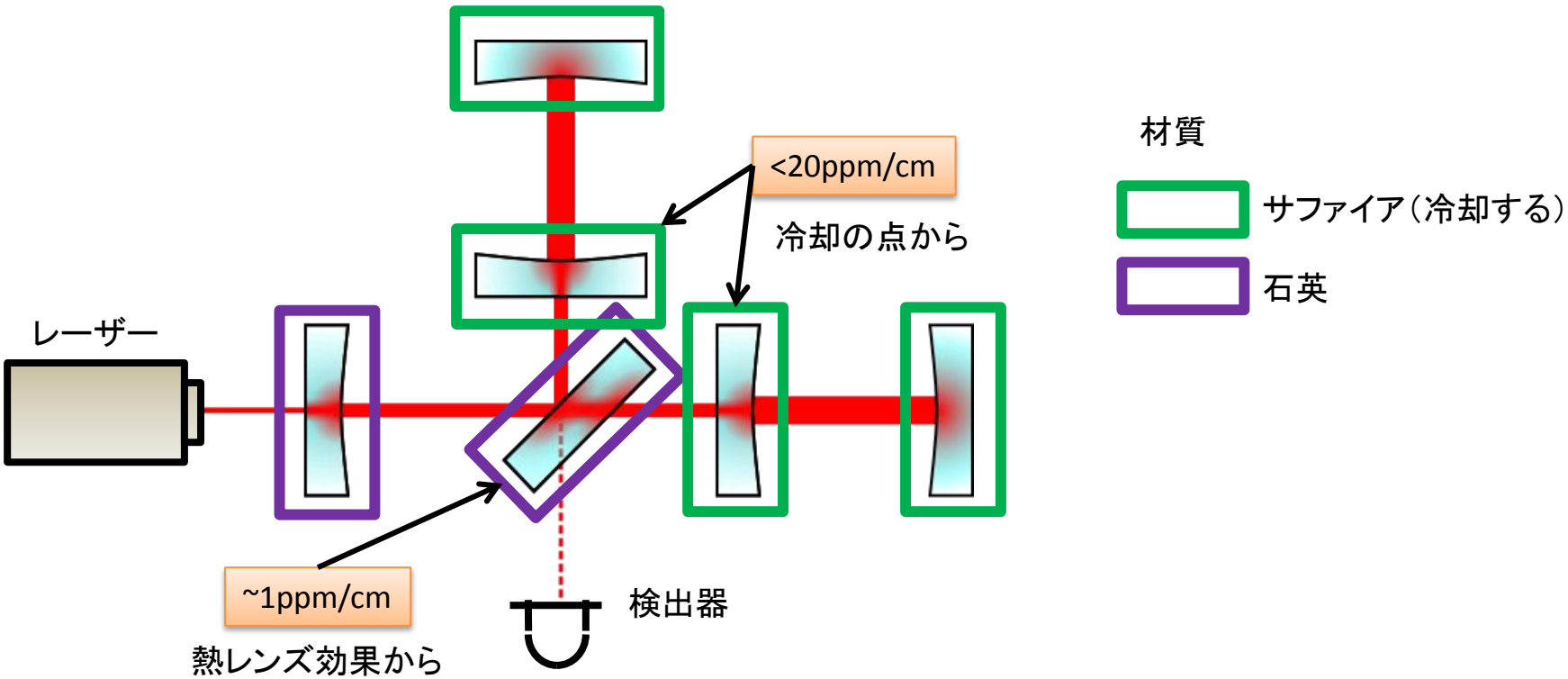
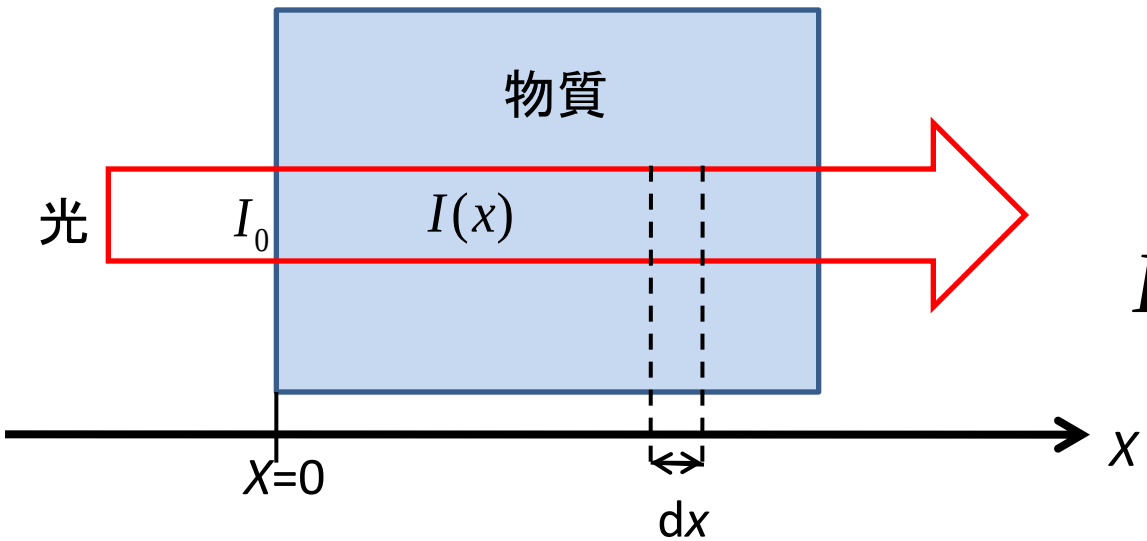
サファイア基材の光学吸収測定

三尾研M2　渡部恭平

LCGTの鏡の材質と吸収係数の要求値



吸収係数



光の強度Iとすると

$$\mathrm{d}I = -\mu I \mathrm{d}x$$

$$I(x) = I_0 \exp(-\mu x)$$

$$\approx I_0 (1 - \mu x)$$

全損失 $\mu = \beta + \gamma$ ← 散乱による損失

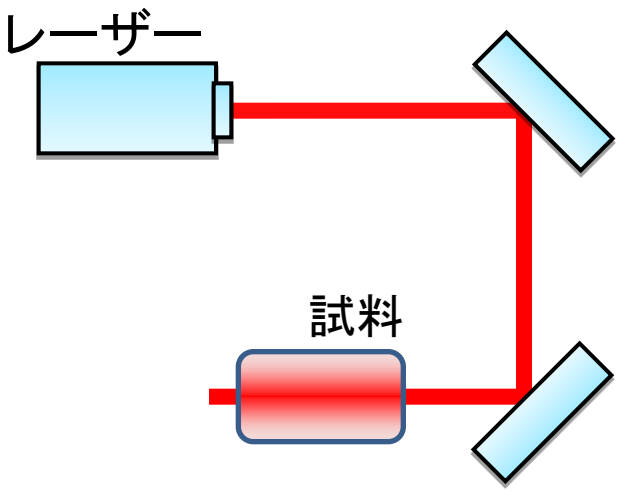
吸収による損失
熱に変わる

→ 本実験では、βのみを測定する

吸収係数の測定方法いろいろ

- 直接、光量の変化を測る方法
  - 0.1%/cmくらいまで
  - 散乱によるロスとの分離ができない
- 吸収によって生じた熱を測る方法
  - 温度を測る方法
  - 温度変化によって生じる屈折率変化を利用する方法
    - 光ー熱偏向法
    - 干渉計を用いる方法 ⇦ この方法で測定

マイケルソン干渉計を用いる方法



試料に光が入射

↓

光を吸収して熱が発生

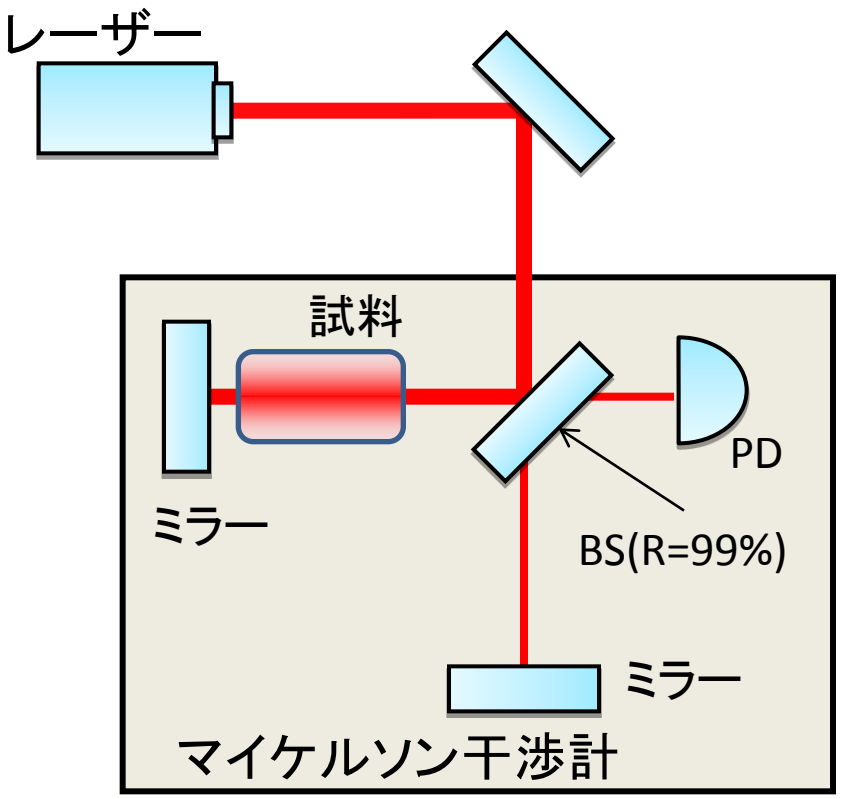
↓

試料の屈折率が変化
試料が熱膨張

↓

光路長が変化

マイケルソン干渉計を用いる方法



試料に光が入射

↓

光を吸収して熱が発生

↓

試料の屈折率が変化
試料が熱膨張

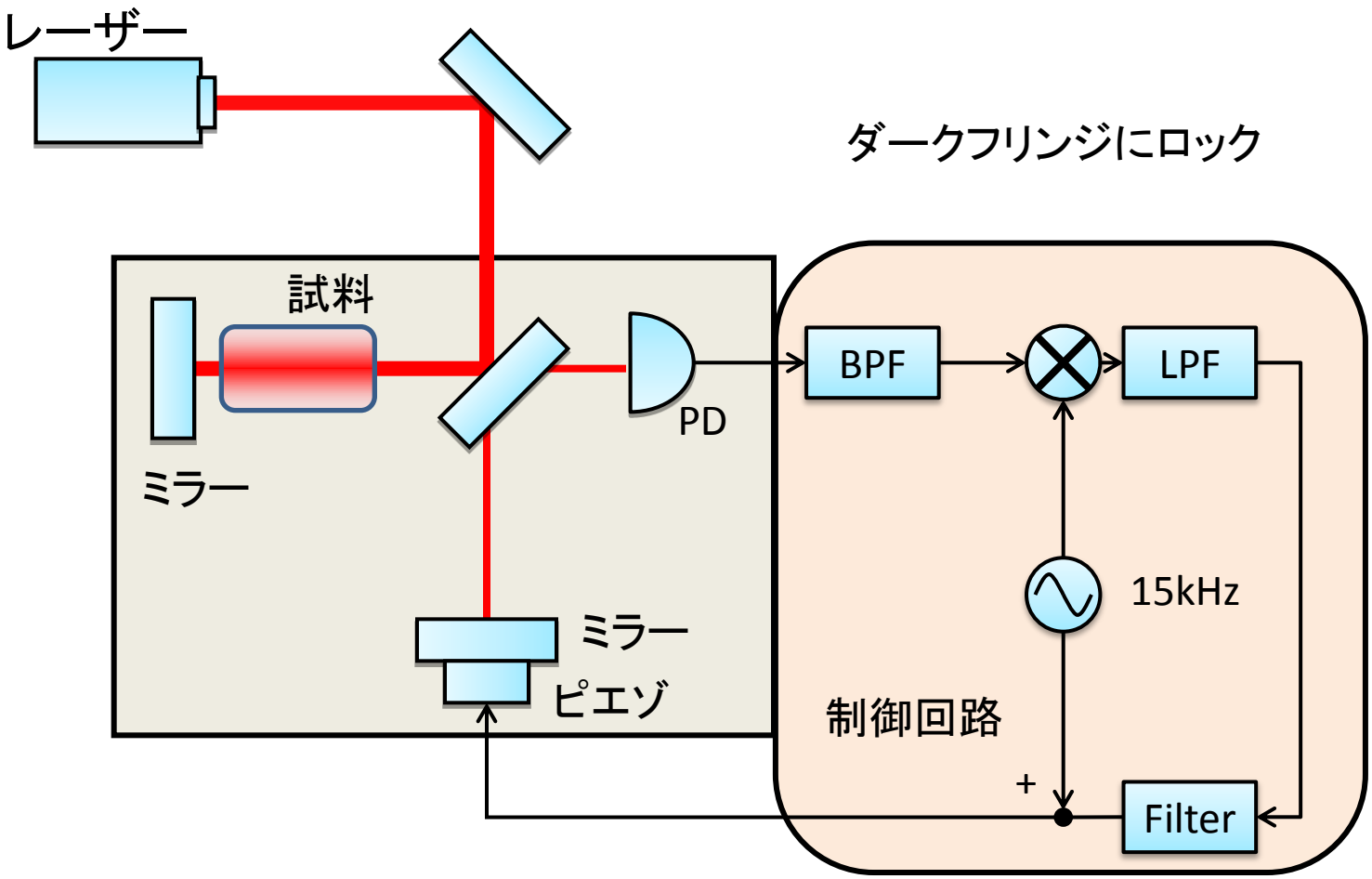
↓

光路長が変化

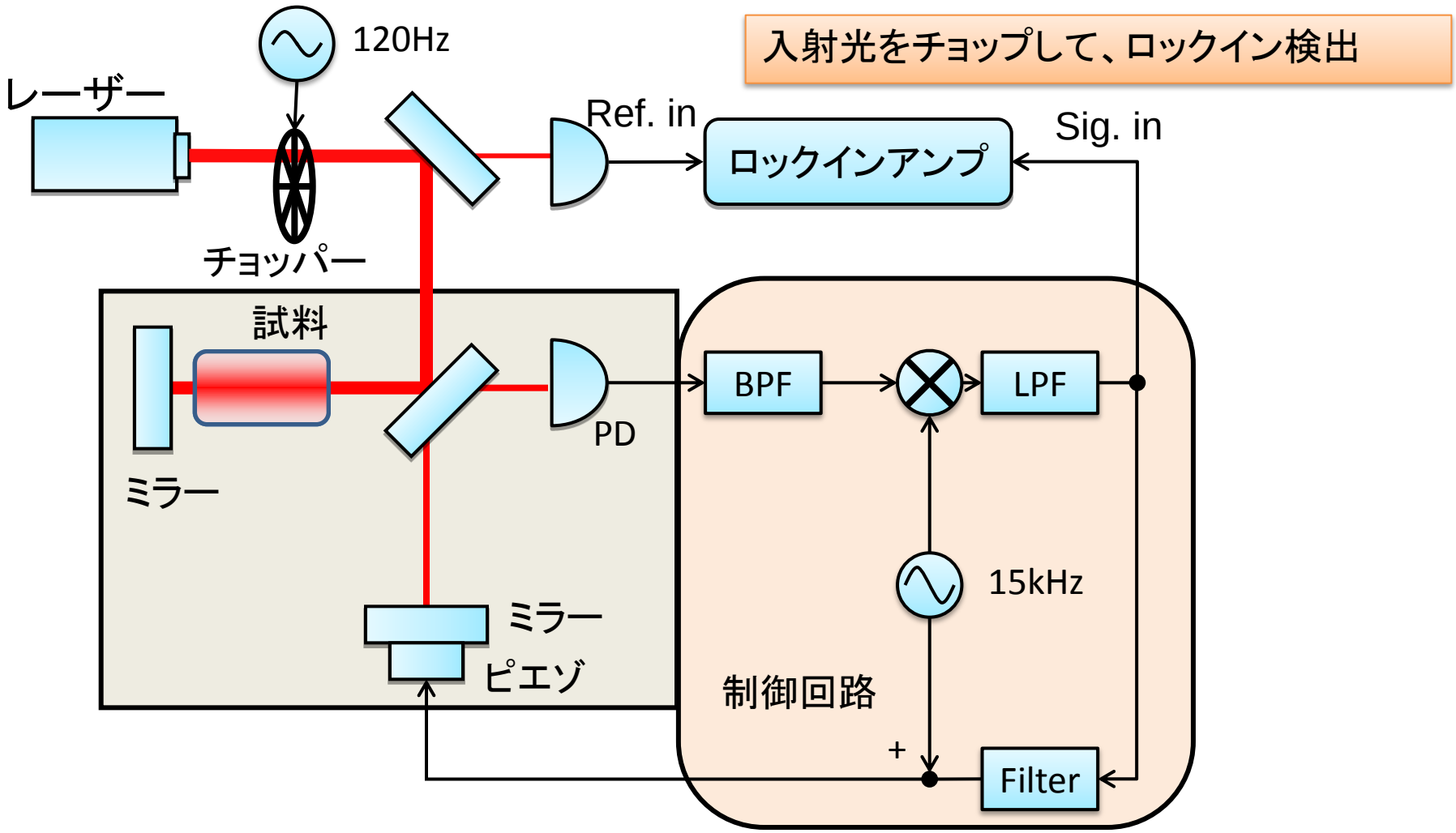
↓

マイケルソン干渉計で
光路長変化を検出

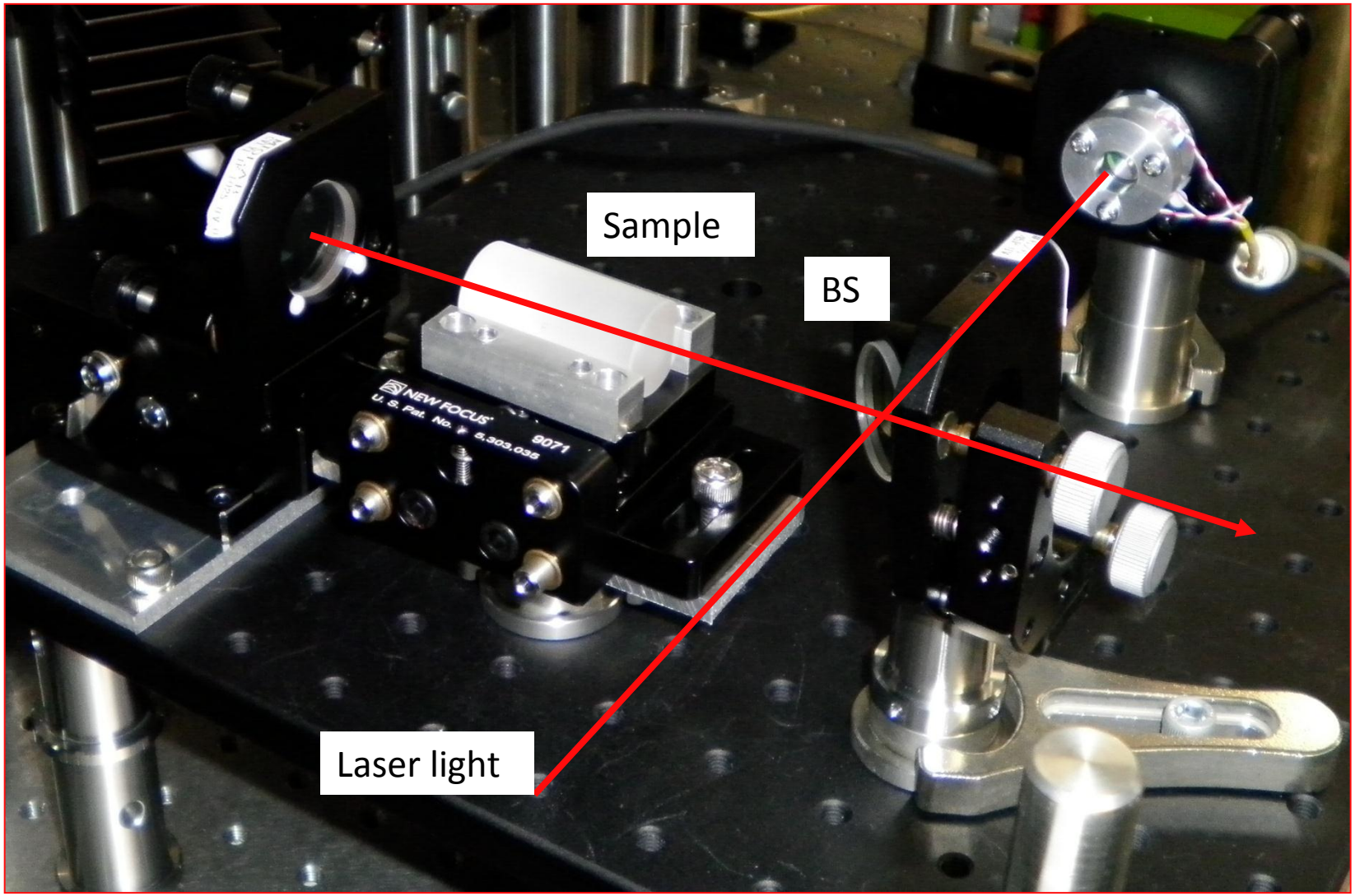
マイケルソン干渉計を用いる方法



マイケルソン干渉計を用いる方法



測定装置の写真



光路長変化→吸収係数

測定された光路長変化から吸収係数を求めるには、熱伝導方程式を解く必要がある。

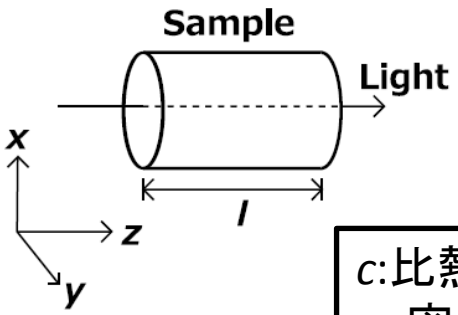
熱伝導方程式

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial t}=\beta P+\kappa\nabla^2 T$$

↖
熱源

入射光のパワーの分布

$$P(\mathbf{r},t)=\frac{2I_0}{\pi a^2}\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega_a t}\exp\left[-\frac{2}{a^2}\left(x^2+y^2\right)\right]$$



仮定：試料の長手方向の温度分布はない
入射光は平行光線
熱拡散を無視（$\kappa\nabla^2 T$の項を無視）

熱拡散長<<ビーム半径

$$\sqrt{\frac{\kappa}{\omega_a c\rho}}\ll a$$

c:比熱
ρ:密度
T:温度
β:吸収係数
κ:熱伝導率
a:ビーム半径
l:試料の長さ
ω_a:チョップの周波数

光路長変化→吸収係数

試料の温度変化

$$\Delta T = \frac{\beta}{\mathrm{i}\omega_a c\rho}\frac{2I_0}{\pi a^2}\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega_a t}\exp\left[-\frac{2}{a^2}\left(x^2+y^2\right)\right] \propto \frac{\beta I_0}{\omega_a a^2}$$

屈折率変化

熱膨張

光路長変化

$$2\Delta x = 2l\left[\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}T}+\alpha\left(n-1\right)\right]\Delta T$$

c:比熱
ρ: 密度
T:温度
β: 吸収係数
κ: 熱伝導率
a : ビーム半径
l: 試料の長さ
n:屈折率
α: 線膨張係数
ω_a:チョップの周波数

温度変化の分母にi

→ 強度変調に対して、光路長変化の信号は90°遅れる

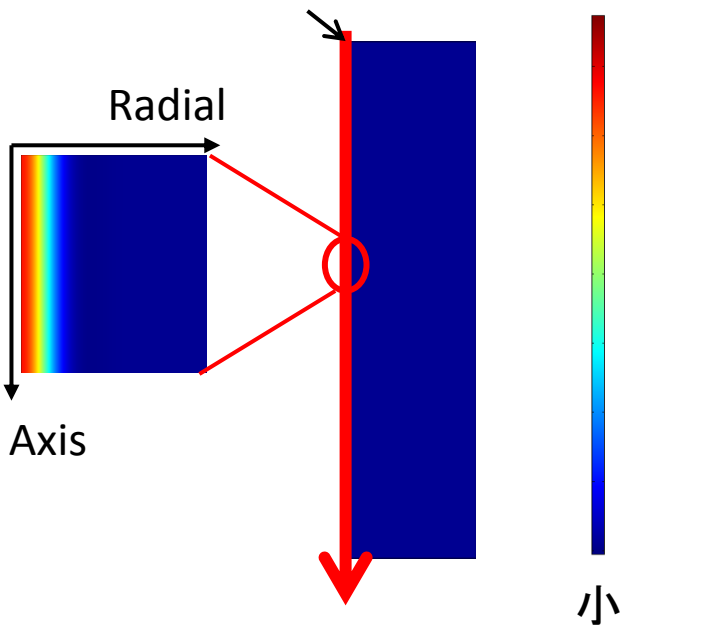
光路長変化→吸収係数

より正確に計算するために、有限要素法ソフトCOMSOLを用いている。

熱伝導方程式

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial t} = \beta P + \kappa\nabla^2 T$$

吸収で生じる熱



$$P = P_1\cos(\omega t)$$
$$T = T_1\cos(\omega t) + T_2\sin(\omega t)$$

熱伝導方程式に代入

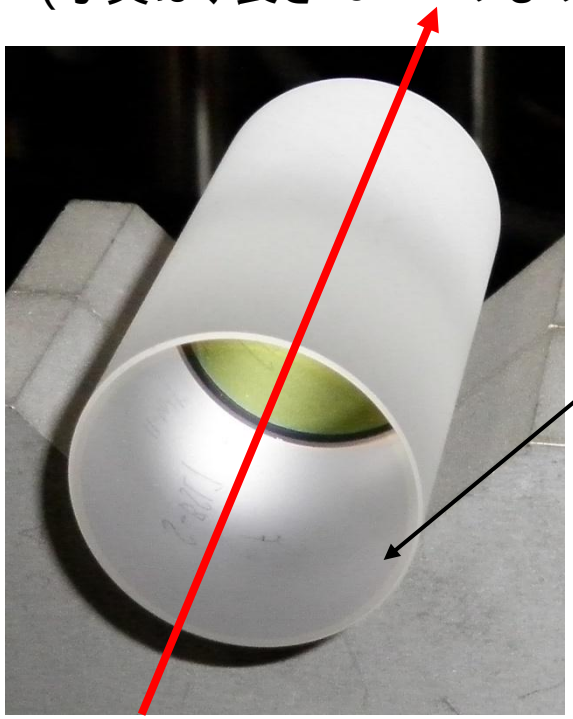
$$-c\rho\omega T_1 = \kappa\nabla^2 T_2$$
$$c\rho\omega T_2 = P_1 + \kappa\nabla^2 T_1$$

これを連立してCOMSOLで解く。
T_2を使って光路長変化を計算。

装置の評価（BK7で）

比較的吸収の大きい（1000ppm/cm程度）、BK7で装置を評価した

長さ40mmと10mm、直径20mm
(写真は、長さ40mmのもの)

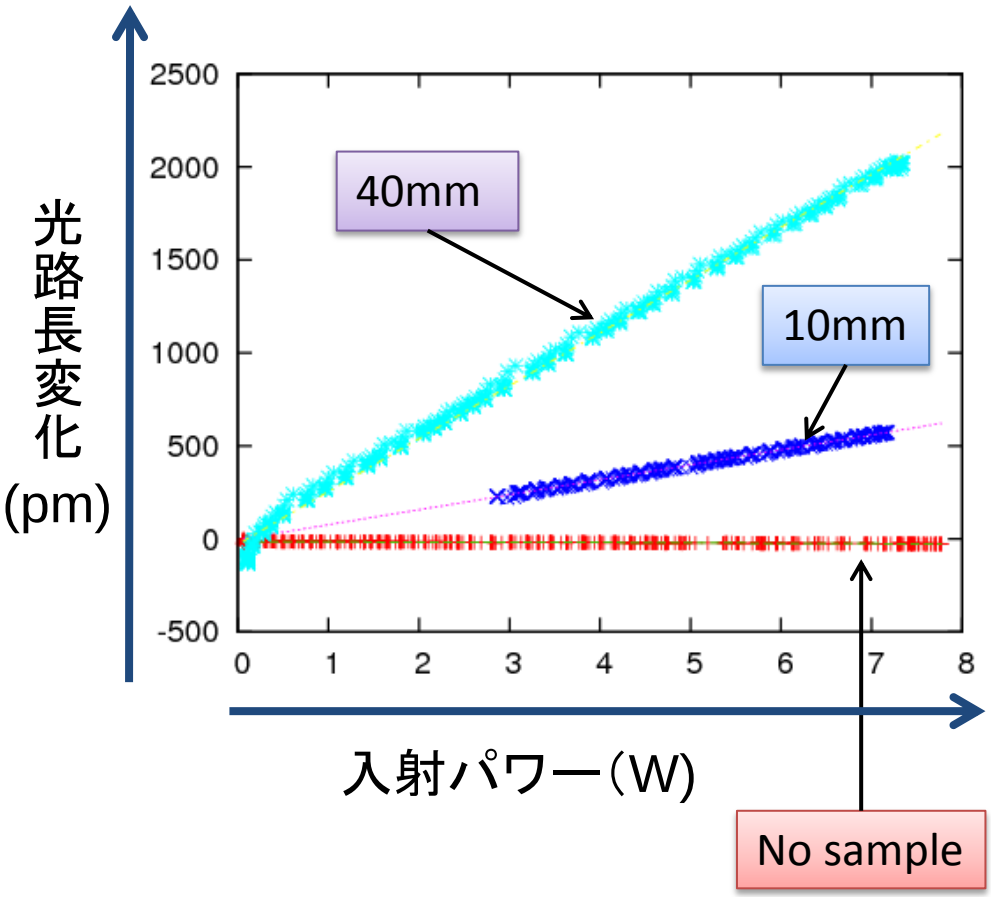


表面にはARコーティング

ビーム半径は約0.1 ㎜

BK7～試料の長さを変えて～

試料の長さを変えて、長さに応じた光路長変化が得られるか、確認。



傾き

No sample: -2pm/W

10mm: 80pm/W

40mm: 284pm/W

吸収係数は、

10mm: 2230 ppm/cm

40mm: 2300 ppm/cm

ほぼ同じ

BK7を別の方法で測定

サンプルの側面にサーミスタを取り付け、温度変化を直接測定。
レーザーのオン、オフを繰り返すことで、外部へ逃げる熱の影響をキャンセルできる。

温度変化

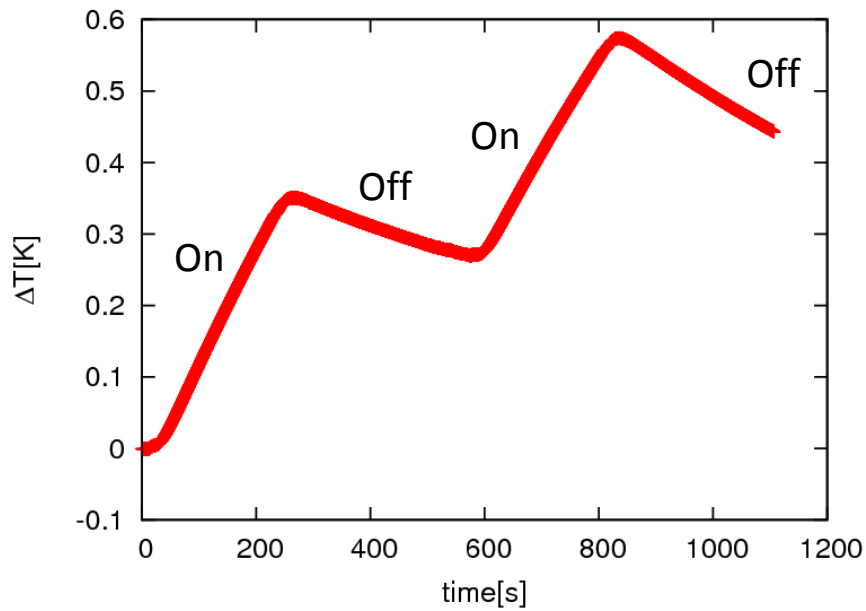
吸収で生じる熱

外部へ逃げる熱

On $$\rho c \frac{\partial T}{\partial t}\bigg|_{\mathrm{on}} = \beta I L - hS\Delta T$$

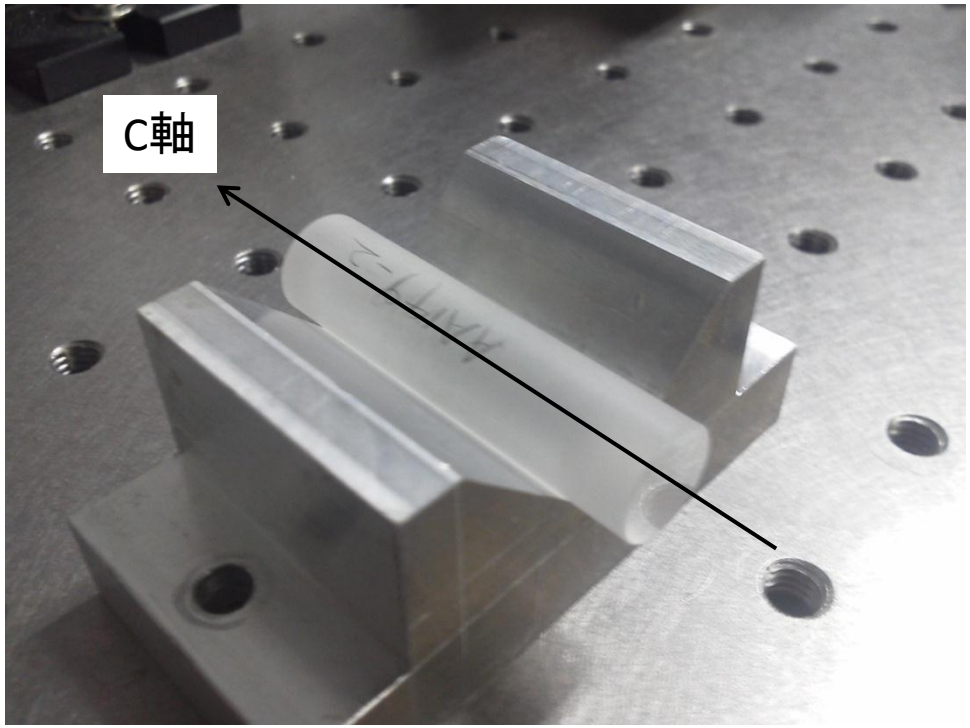
Off $$\rho c \frac{\partial T}{\partial t}\bigg|_{\mathrm{off}} = -hS\Delta T$$

$$\frac{\partial T}{\partial t}\bigg|_{\mathrm{on}} - \frac{\partial T}{\partial t}\bigg|_{\mathrm{off}} = \frac{\beta I L}{\rho c}$$



吸収係数: 1600 ppm/cm

サファイア



アメリカ　CSI社製

ϕ:10mm
L:40mm

C軸結晶

サファイアの測定結果

	boule	吸収係数 [ppm/cm]			
新	AA149	48	47		
	AC150	229	138	682	687
	P401	34	32	65	67
旧 →	P376	87			

- bouleによってかなり吸収係数が異なる。
- P401はかなり吸収が下がっている。
  が、20ppm/cmには達してない。

- AC150とP401では、同じbouleでも、２本ずつ値が異なる。
  bouleから切り出した場所によって異なる？

- AC150の吸収の多い方はサーミスタで測れるかも。

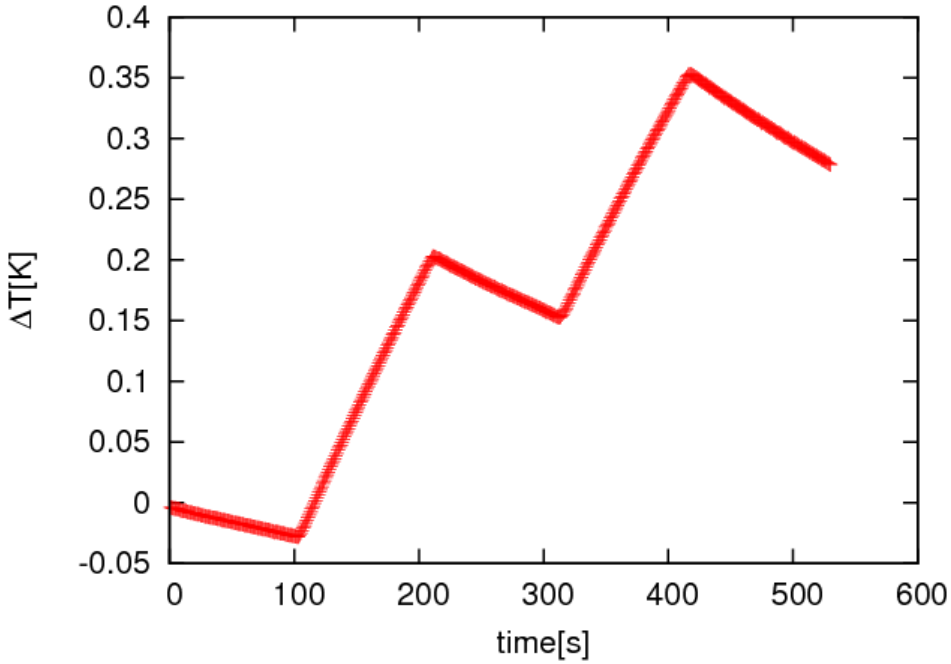
サファイアの吸収係数をサーミスタで

- 最も吸収の大きかったAC150-4の吸収係数を、サーミスタを用いて測定。
- ただし、干渉計で測った時とは、サンプル内でのビームが入射する位置が異なる。

干渉計による方法：687ppm/cm

に対して、

サーミスタによる方法：825ppm/cm



まとめ

- 現状、サファイアの吸収係数は、一番低いもので30ppm/cm程度。しかし以前よりは良くなっている。
- BK7で、干渉計での測定結果とサーミスタでの測定結果は50%くらい異なるが、サファイアでは両者の差は20%弱。
  - BK7だと、光弾性効果が現れているかも。（干渉計の方。）

おまけ：First Contact 失敗例

First Contact

鏡の表面に塗る

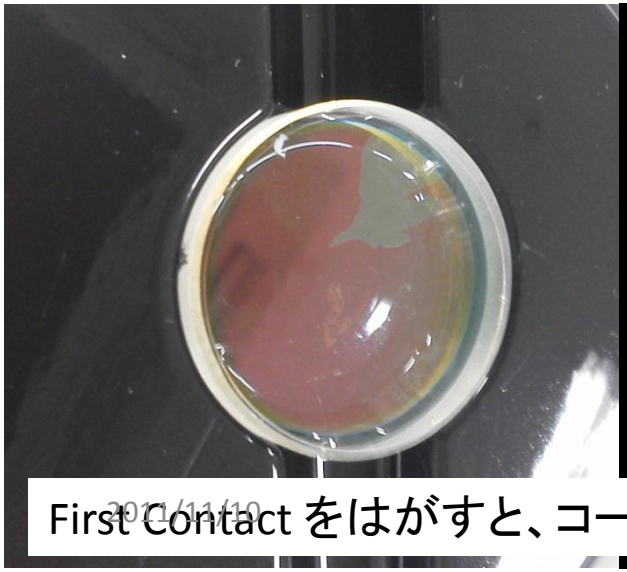
乾くまで待つ

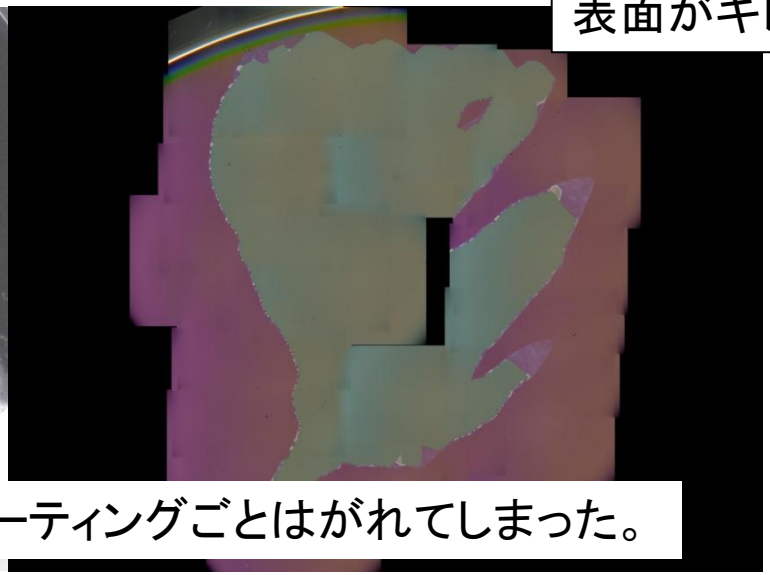
……

テープで剥がす

First Contact と一緒にゴミがとれて
表面がキレイに！

なるはずが・・・





First Contact をはがすと、コーティングごとはがれてしまった。