

Measurement of Small Optical Absorption in Transparent Materials by Photo- Thermal Common-Path Interferometry

三尾研究室

M1 古谷 寛之

目次

- 吸収率測定の必要性
- 光学吸収
- Photo-Thermal Common-Path Interferometry(PCI)

目次

- 吸収率測定の必要性
- 光学吸収
- Photo-Thermal Common-Path Interferometry(PCI)

重力波検出プロジェクト

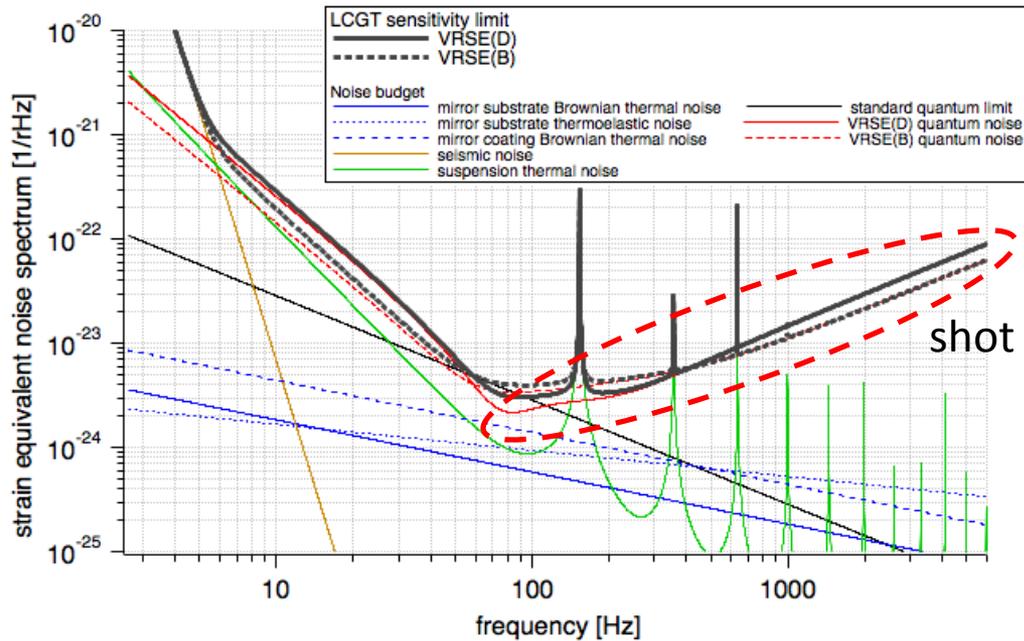


$L=3\text{km}$

<http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/>

KAGRAにおけるノイズ

100Hz~ではショットノイズが
支配的



<http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/researcher/parameters>

$$\text{shot noise} \propto \sqrt{N}$$

$$\text{signal} \propto N$$

$$\text{SNR} \propto \sqrt{N}$$

高出力レーザーが必要！
(KAGRAでは180W)

熱の問題

高出力レーザーを使用すると、鏡やビームスプリッターで光学吸収による熱が発生し、干渉計の感度が下がる

熱が発生すると

- 熱レンズ効果→波面が歪む
- 屈折率変化→光路長変化→誤差

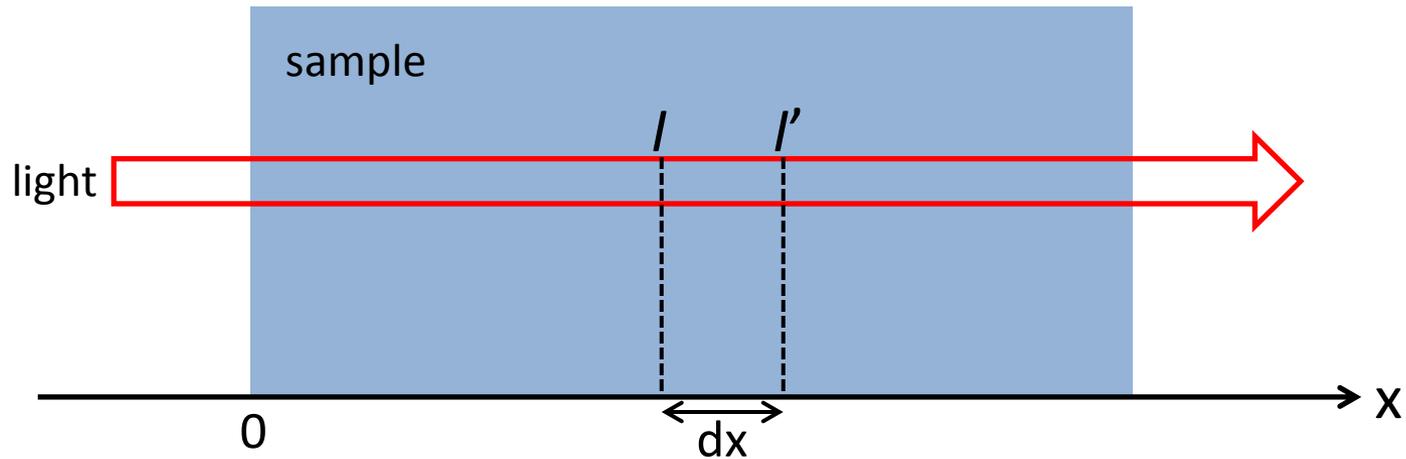
→吸収の少ないサンプルを用いる必要がある

→微小な光学吸収($\sim 10^{-5} \text{cm}^{-1}$)を測定する技術が必要！

目次

- 重力波
- 光学吸收
- Photo-Thermal Common-Path Interferometry(PCI)

吸収係数の定義



$$dI = I' - I = -\mu I dx$$

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

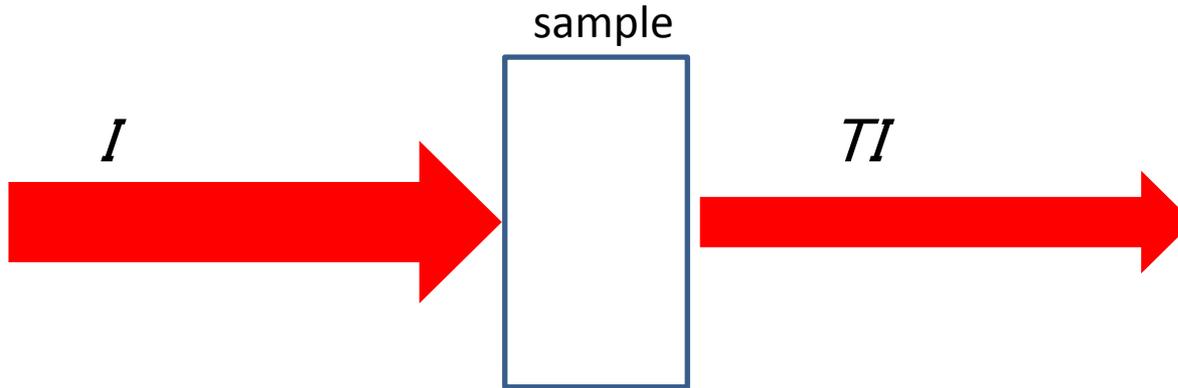
$$\approx I_0 - I_0 \mu x$$

全吸収係数 $\mu = \beta + \gamma$

吸収の項

散乱による損失

透過率測定法



$$T = \frac{(1 - R)^2 \exp(-\mu L)}{1 - R^2 \exp(-2\mu L)}$$

T : 透過率

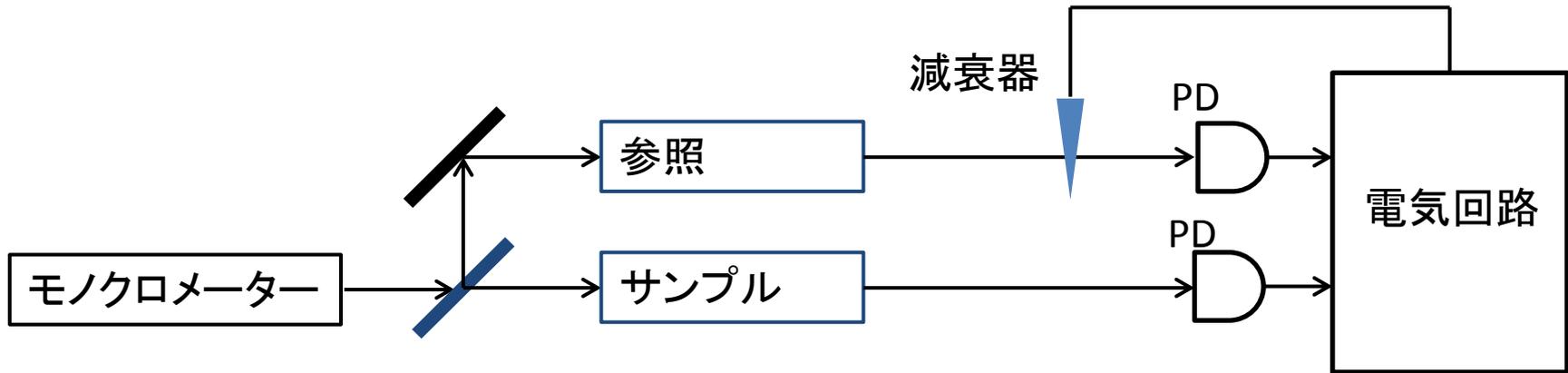
$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2}$: 反射率

L : sampleの長さ

n : sampleの屈折率

μ : 吸収係数

透過率測定法



- 減衰器を用いて、2つのPDに入る光量を等しくする。
- 参照とサンプルの透過率の比 T_{meas} を測定
- サンプル長が長く、参照長が短く、反射率が小さい($R < 0.1$)とき
- 反射率は小さくないが、 $\mu\Delta L$ が十分小さいとき

$$T_{meas} = \exp(-\mu\Delta L)$$
$$\mu = \frac{1 - T_{meas}}{\Delta L} \frac{1 - R^2}{1 + R^2}$$

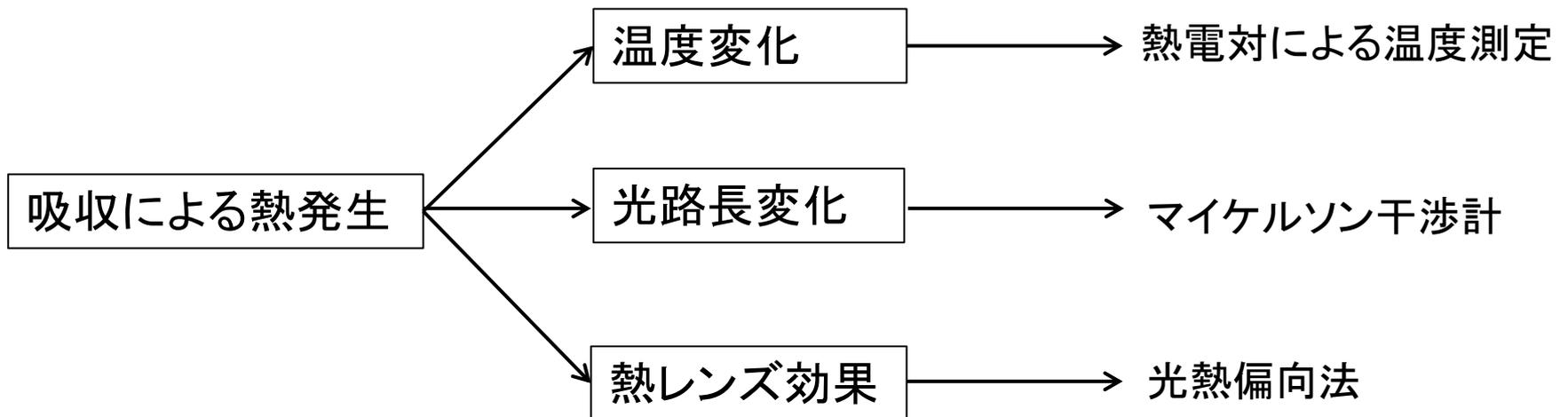
Klein, Philipp H. *Optical Engineering* 20, 790-794 (1981)

透過率測定法の特徴

- 長所
 - 透過率を直接測定するので、結果の信頼性が高い。
 - スペクトルデータが容易に得られる。
 - 表面における吸収も測定できる
- 短所
 - 反射によるロスのため、感度が低い($\sim 10^{-3}\text{cm}^{-1}$)
 - β ではなく、 μ を測定(散乱の影響 γ が入っている)

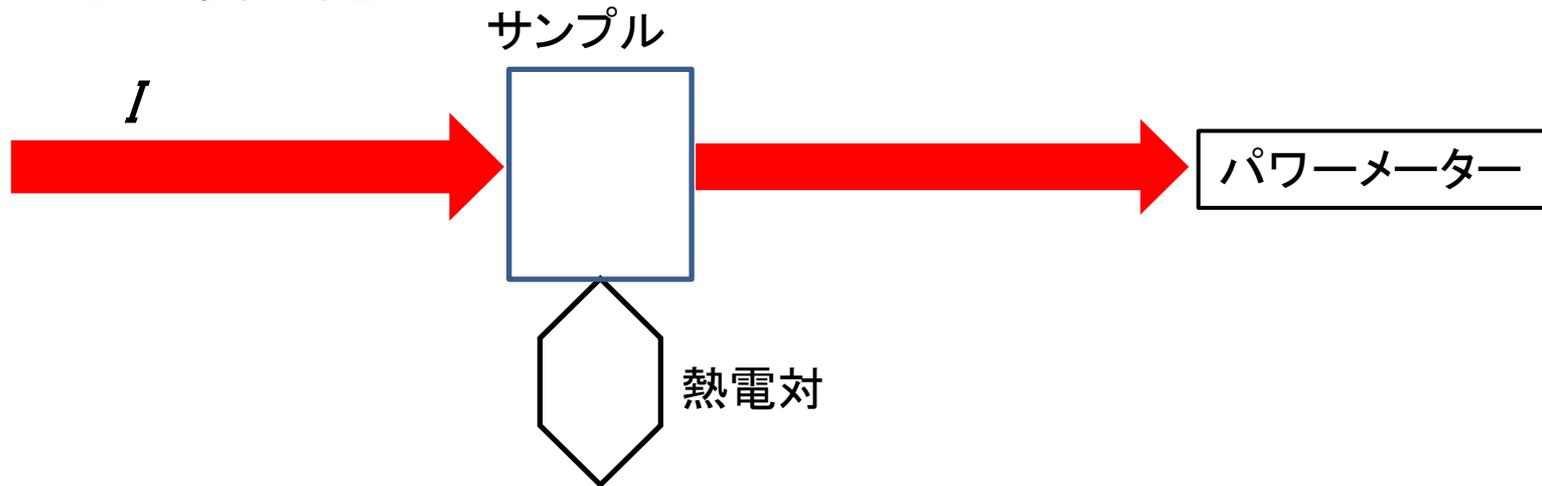
熱量測定法

発生する熱による効果を測定する。



熱量測定の実例

熱電対による温度測定



- 定常状態では、
熱の吸収=熱の損失

$$P_T \frac{n^2 + 1}{2n} \beta L = h S \Delta T$$

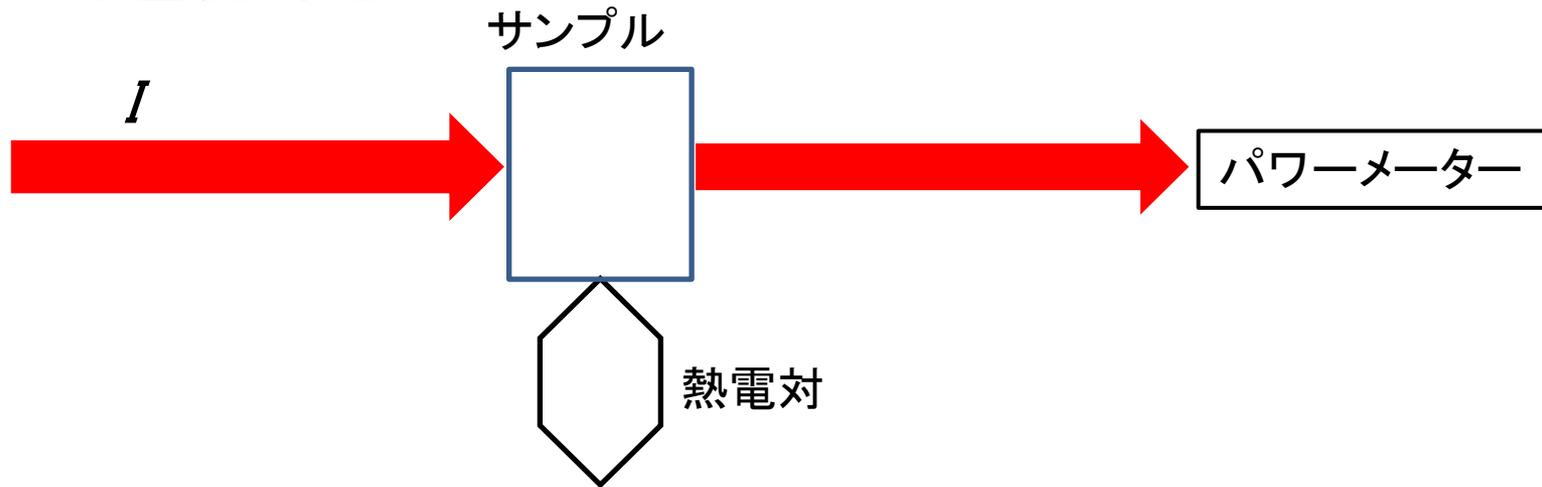
$$\Rightarrow \beta = \frac{h S \Delta T}{L P_T} \frac{2n}{n^2 + 1}$$

h : サンプル表面の熱伝達係数
 S : サンプルの表面積
 ΔT : サンプルと周囲の温度差
 P_T : 透過光強度

Klein, Philipp H. *Optical Engineering* 20, 790-794 (1981)

熱量測定の実例

熱電対による温度測定



- 長所
 - 感度が良い。 $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{cm}^{-1}$
- 短所
 - 定常状態にするため、測定に時間がかかる。
 - ハイパワー(10W以上)のレーザーが必要→スペクトルデータを得るのは難しい。
 - バルクと表面の吸収を分離するのは難しい

熱量測定の実例

マイケルソン干渉計

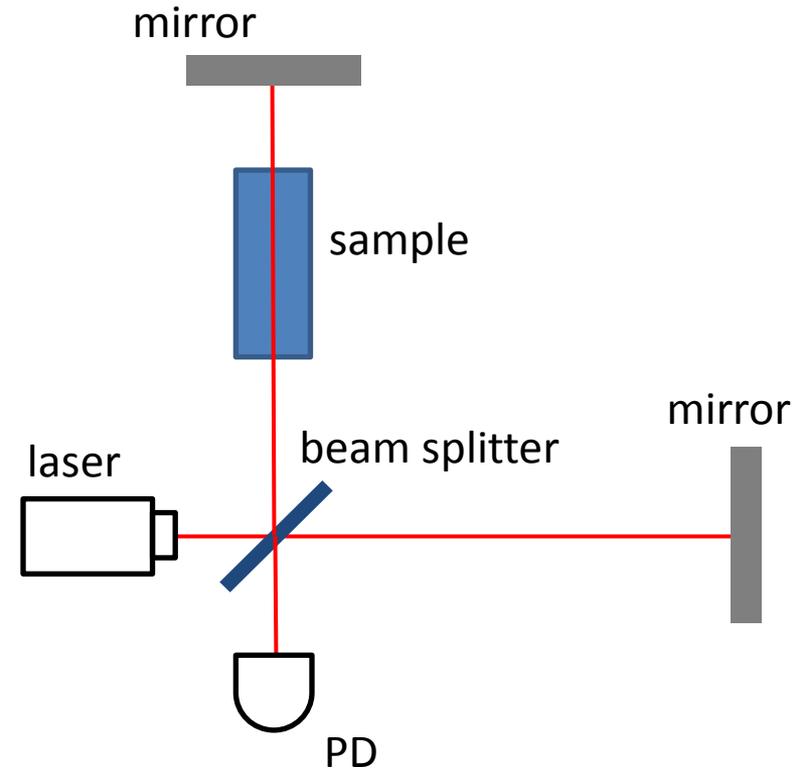
レーザーによるサンプルの加熱



光路長変化



マイケルソン干渉計で検出

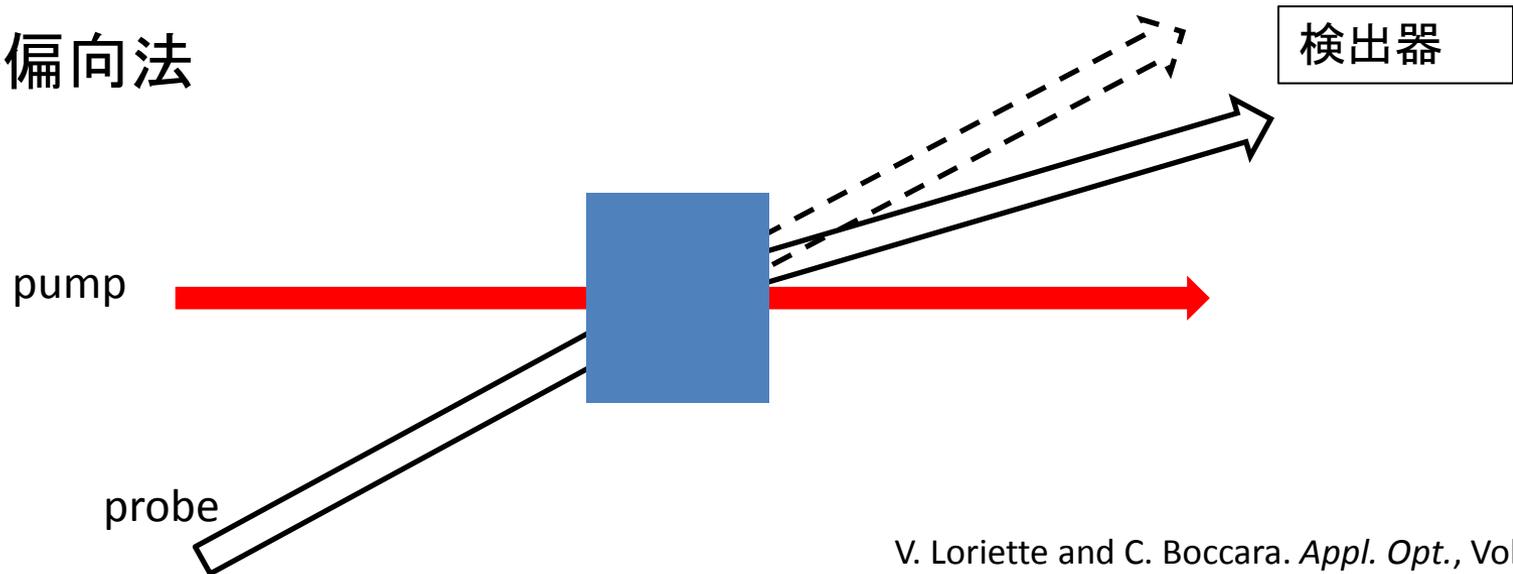


K.Watanabe 修士論文

- 長所
 - 感度が良い。 $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{cm}^{-1}$ 程度
- 短所
 - 高出力レーザーが必要なため、スペクトルデータを得るのは難しい
 - バルクと表面の吸収を分離するのは難しい

熱量測定の実例

光熱偏向法

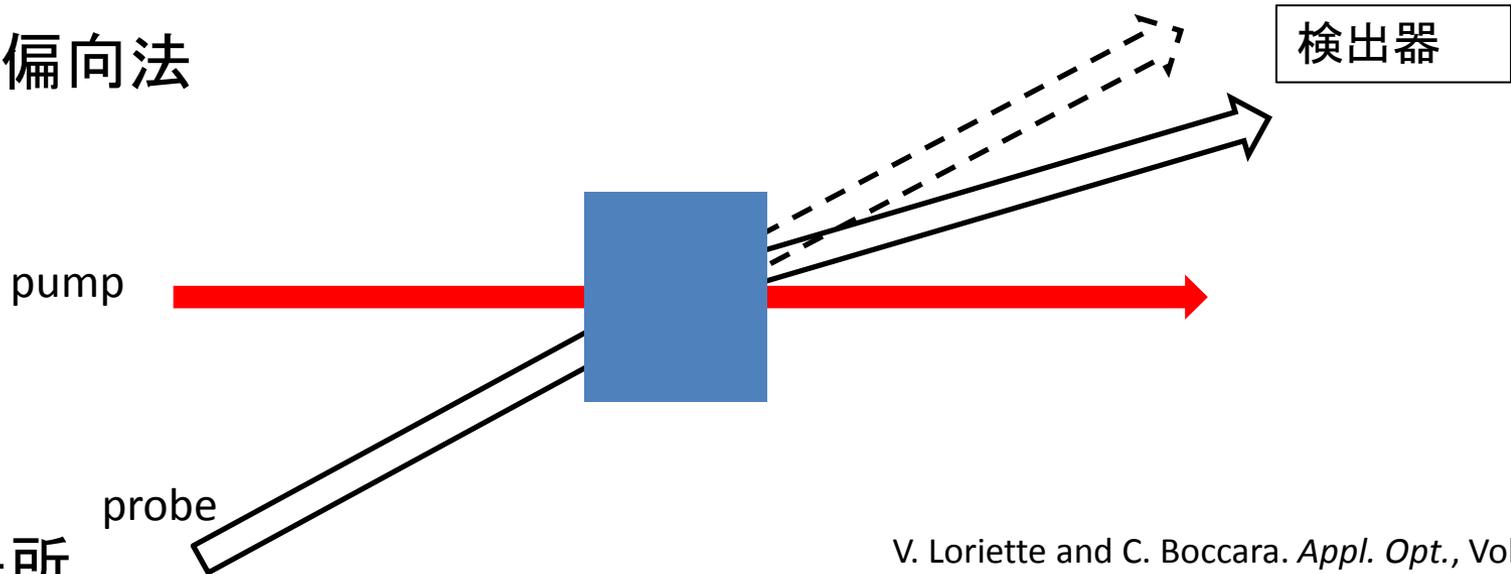


V. Lorientte and C. Boccara. *Appl. Opt.*, Vol. 42, No. 4, pp. 649–656 (2003)

- pump beamで試料を加熱することで、温度勾配が発生
→熱レンズ効果
- probe beamの熱レンズによる屈折の度合いを測定

熱量測定の実例

光熱偏向法



- 長所

- 感度が非常に良く、 $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{cm}^{-1}$
- pumpの出力は熱電対による測定の実験系の10分の1程度でよい

V. Lorient and C. Boccard. *Appl. Opt.*, Vol. 42, No. 4, pp. 649–656 (2003)

- 短所

- 実験系のセットアップ、解析が非常に煩雑
- スペクトルデータや、表面の吸収係数を得るのは難しい

測定法の比較

測定手法	測定精度(cm ⁻¹)	スペクトルデータ	バルクと表面の分離
透過率測定法	10 ⁻² ~10 ⁻³	容易に得られる	可能
温度測定	10 ⁻⁴ ~10 ⁻⁵	得るのは難しい	難しい
マイケルソン干渉計	10 ⁻⁴ ~10 ⁻⁵	得るのは難しい	難しい
光熱偏向法	10 ⁻⁵ ~10 ⁻⁶	得るのは難しい	難しい

測定精度は 熱量測定 > 透過率測定

バルクと表面の吸収を分離できる手法が必要

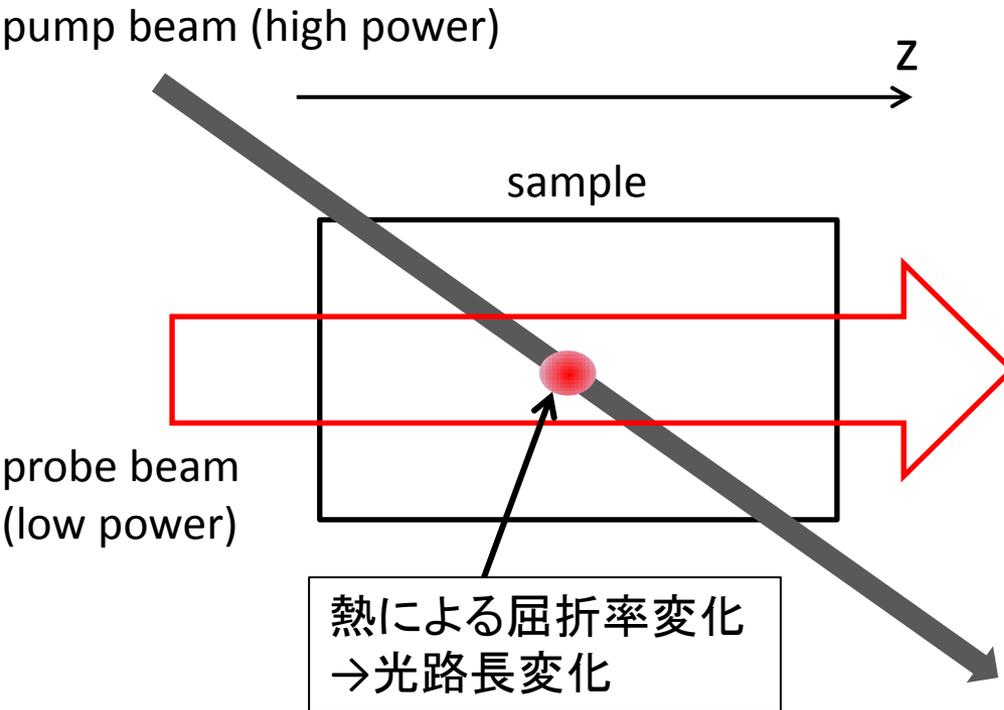
目次

- 重力波
- 光学吸收
- Photo-Thermal Common-Path Interferometry(PCI)

参考論文

Alexandrovski, Alexei, *et al.*, "Photothermal common-path interferometry (PCI): new developments." *SPIE LASE: Lasers and Applications in Science and Engineering*. International Society for Optics and Photonics (2009)

PCIとは



- ・熱による光路長変化
→probe光の位相が $\varphi(x,y)$ 変わる

$$\begin{aligned} E'(\mathbf{r}) &= E(\mathbf{r}) * \exp(-i\varphi) \\ &\sim E(\mathbf{r}) * (1 - i\varphi) \\ &= E(\mathbf{r}) - i\varphi * E(\mathbf{r}) \end{aligned}$$

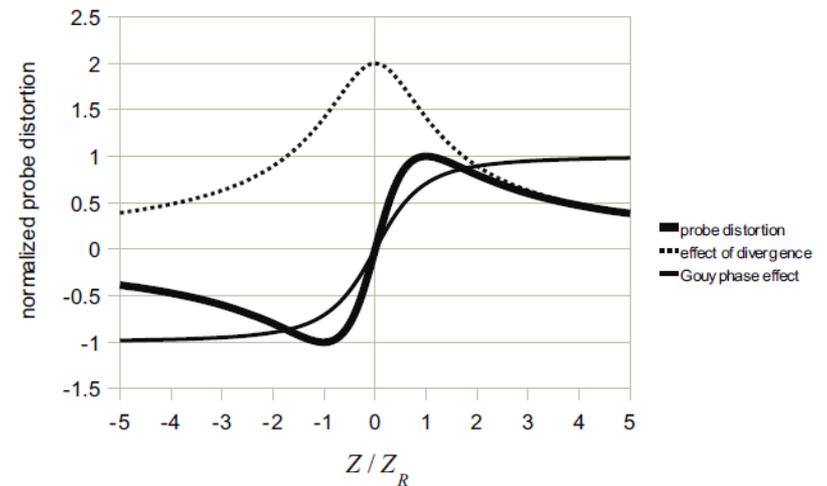
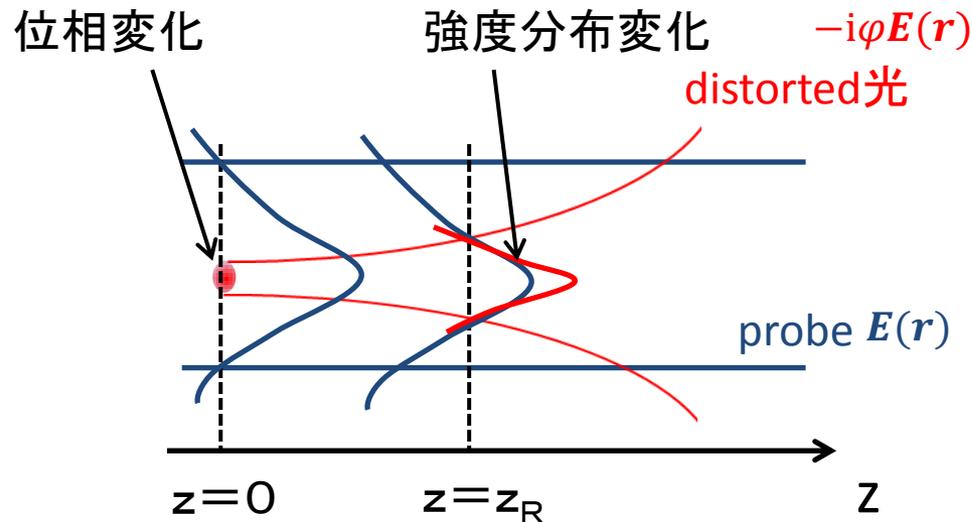
元のプローブ光 干渉 weak-distorted光

- ・元のプローブ光とweak-distorted光が同じ経路をとるので、common-path interferometry

PCIの原理

位相変化 $\varphi(x,y)$ の分布・・・ガウス分布(とみなすと)

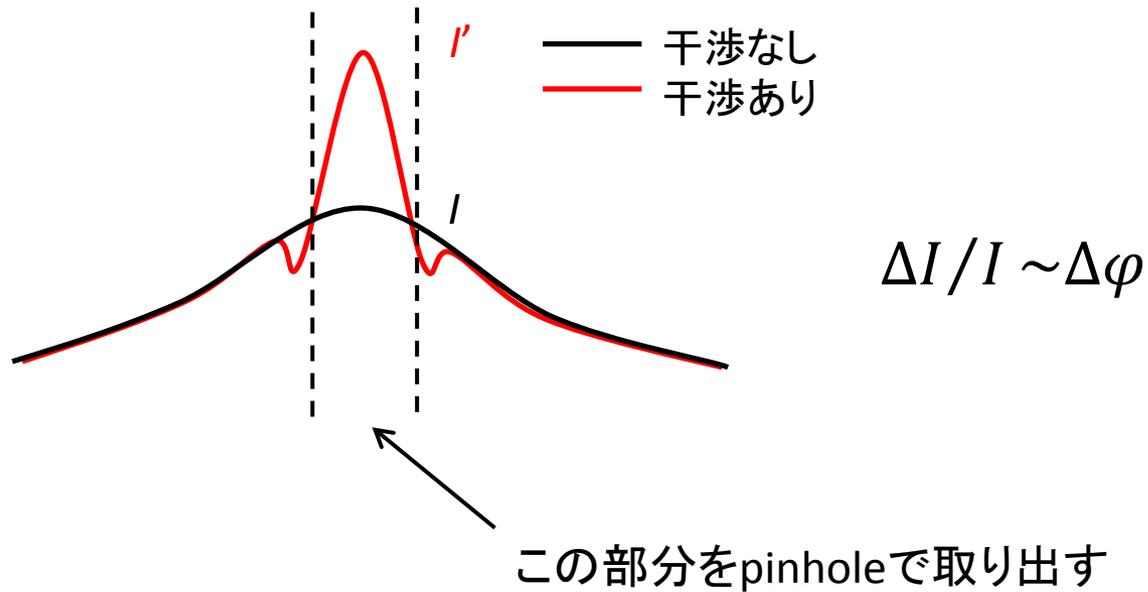
→weak-distorted光は、probeよりも細い(レイリーレンジも短い)ガウスビーム



Alexandrovski, Alexei, et al., *SPIE LASE: Lasers and Applications in Science and Engineering*. International Society for Optics and Photonics (2009)

PCIの原理

$z=z_R$ における強度分布



pump光による温度変化分布

- 熱伝導方程式による数値計算を行う。

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t}(\mathbf{r}, t) = Q(\mathbf{r}, t) + \nabla \cdot (\kappa \nabla T(\mathbf{r}, t))$$

pump光をチョップするので(周波数)、熱量、温度を

$$Q = Q_1 \cos \omega t$$

$$T = T_1 \cos \omega t + T_2 \sin \omega t$$

とかき、cos, sinでまとめると

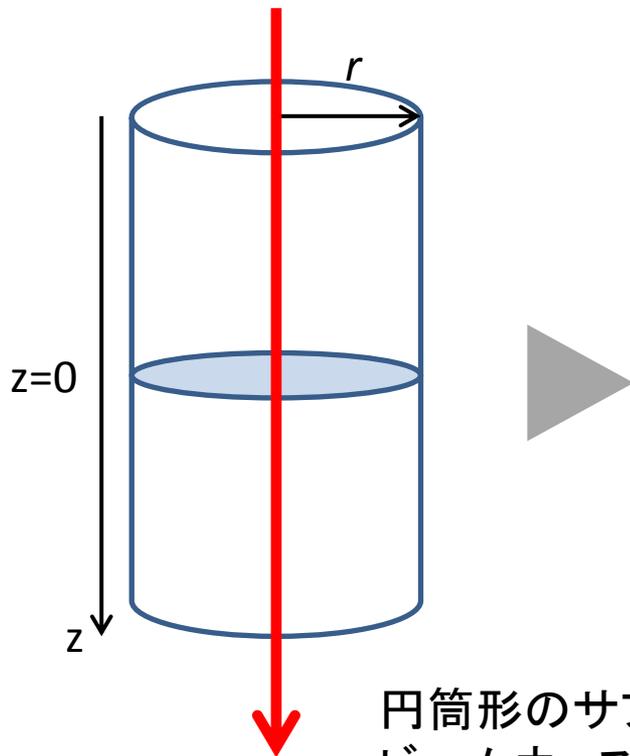
$$c\rho \frac{\partial T_1}{\partial t} = Q_1 - c\rho\omega T_2 + \nabla \cdot (\kappa \nabla T_1)$$

$$c\rho \frac{\partial T_2}{\partial t} = c\rho\omega T_1 + \nabla \cdot (\kappa \nabla T_2)$$

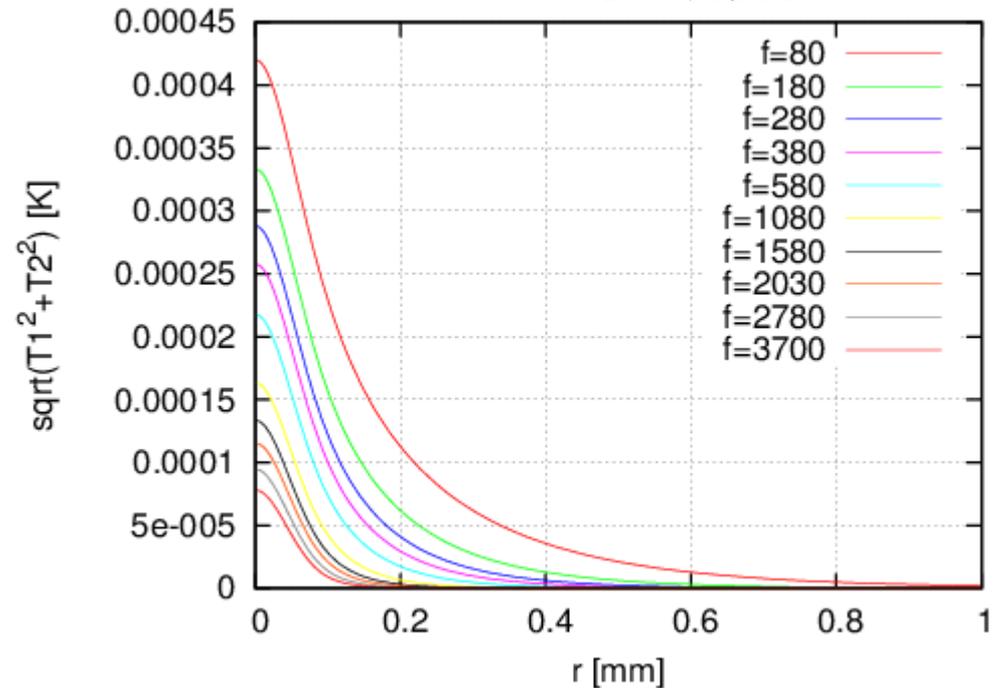
pump光による温度変化分布

数値計算ソフトウェアcomsolによる解析結果
(計算プログラムは本研究室博士課程の渡部による)

pump光(チョップ周波数 f [Hz])



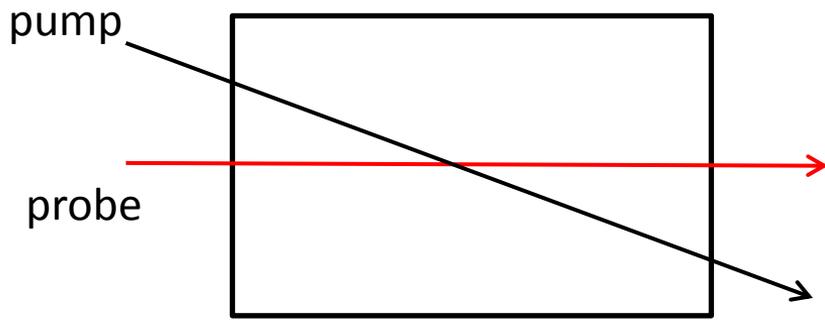
$z=0$ における温度変化



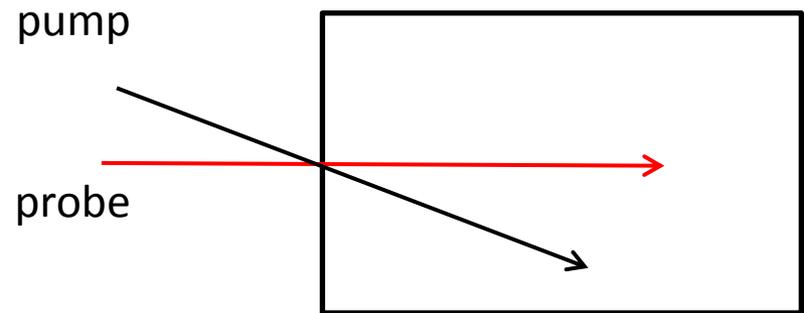
円筒形のサファイアサンプル(直径5mm)を仮定
ビームウェストは $z=0$ にあり、半径 $0.7\mu\text{m}$

PCIの利点

- バルク・表面の吸収を独立に測定できる。



バルクの測定



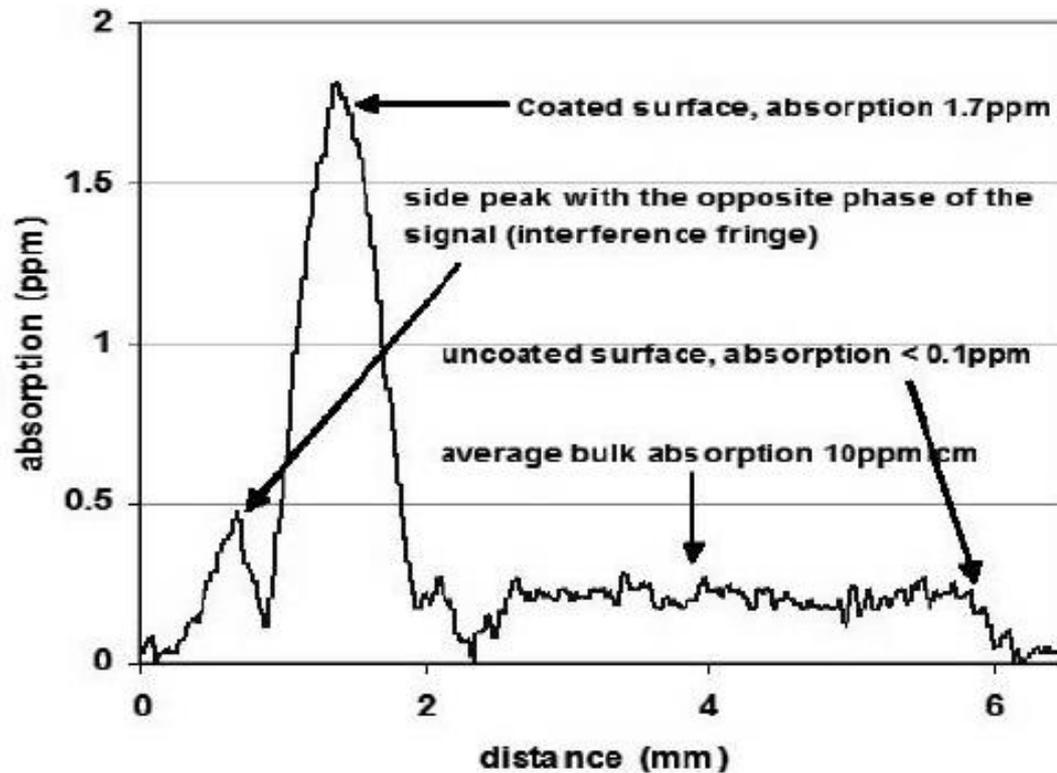
表面の測定

- 感度が良い(最高で 10^{-7}cm^{-1} のオーダー)

測定例

石英ガラスの吸収測定

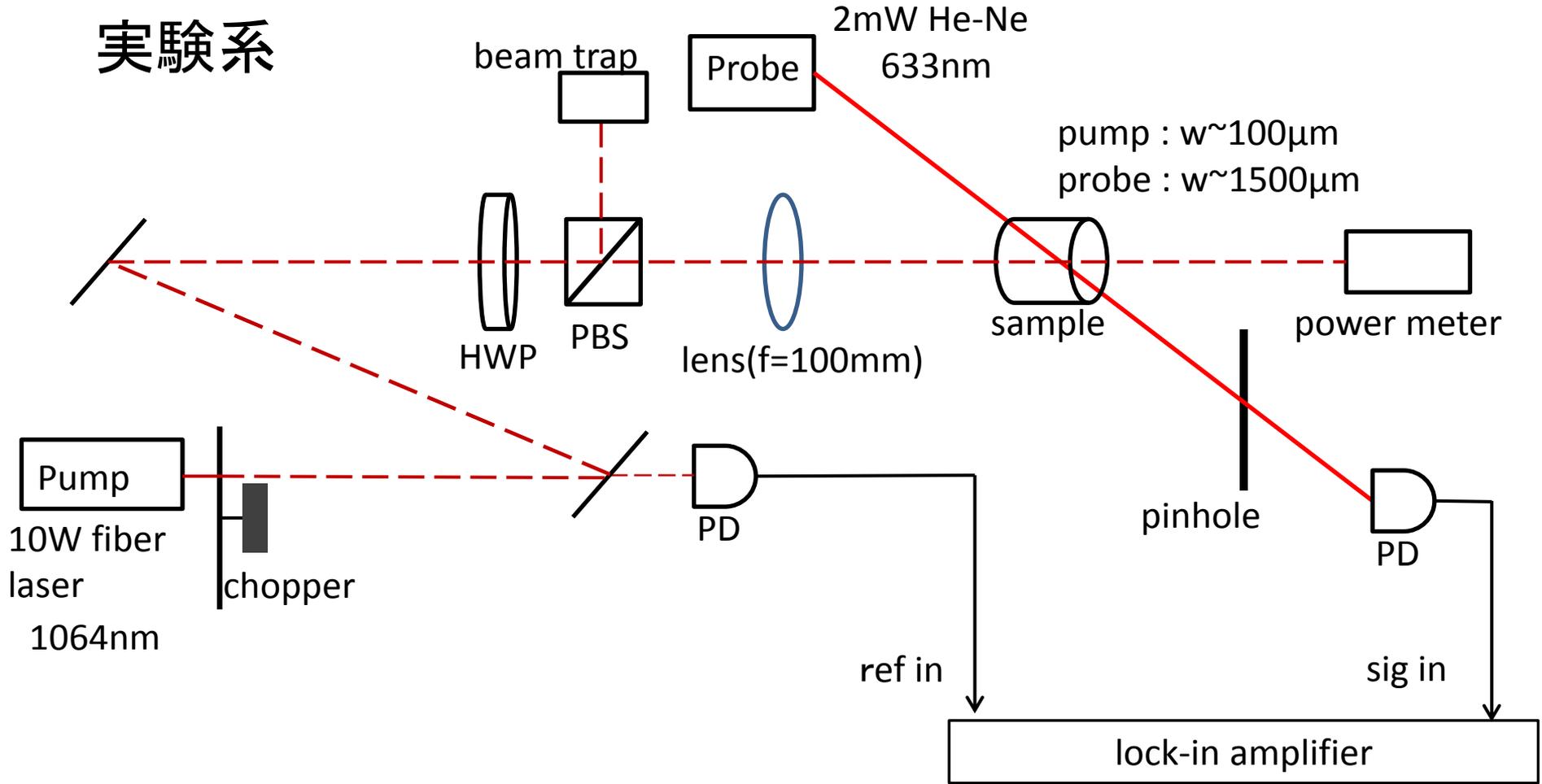
pump波長1064nm, pump power 5W



Alexandrovski, Alexei, *et al.*, *SPIE LASE: Lasers and Applications in Science and Engineering*. International Society for Optics and Photonics (2009)

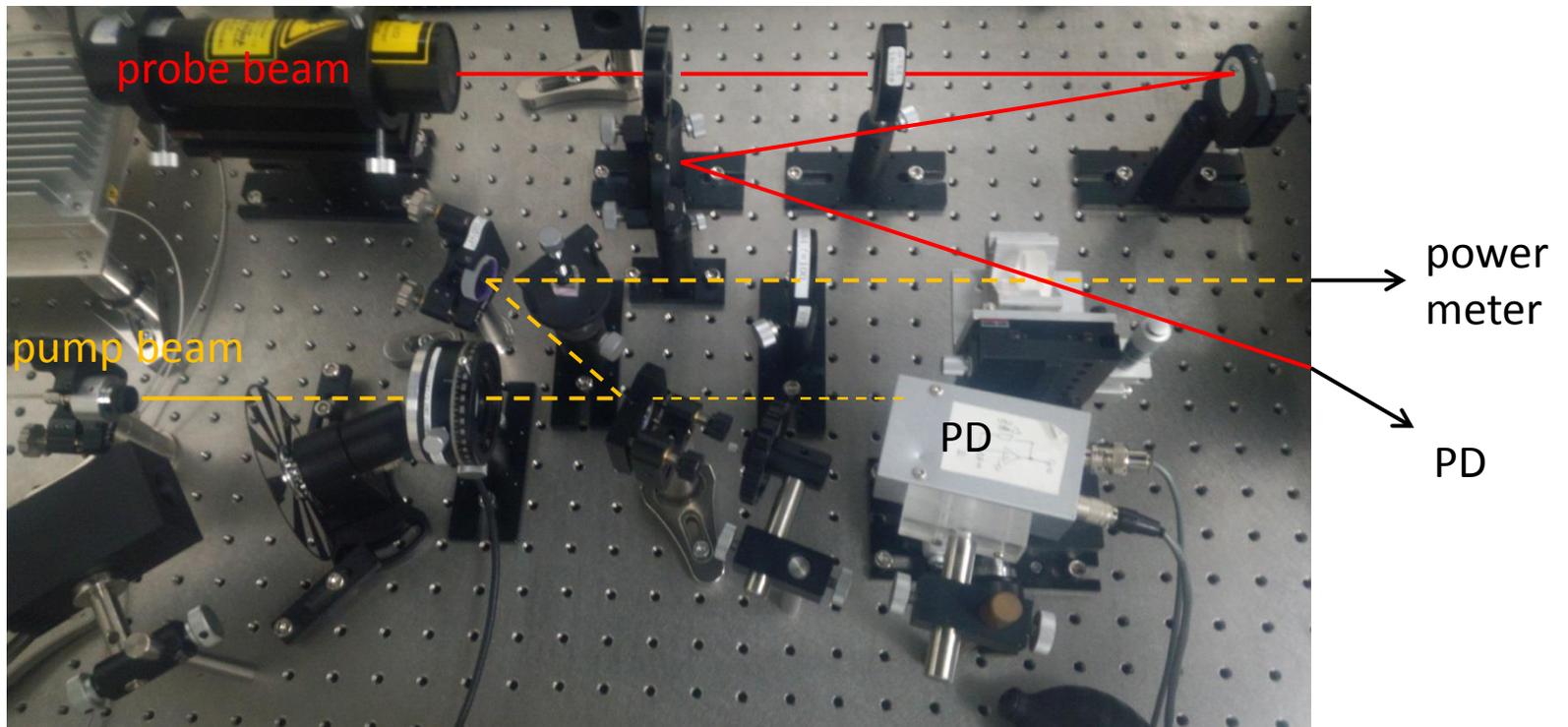
研究の現状

実験系



研究の現状

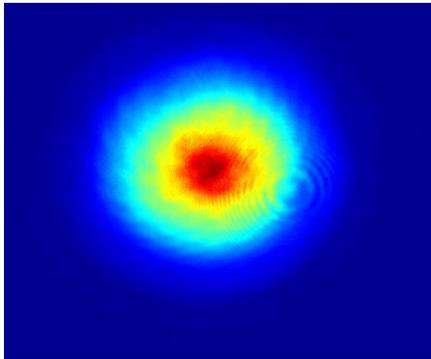
実験系



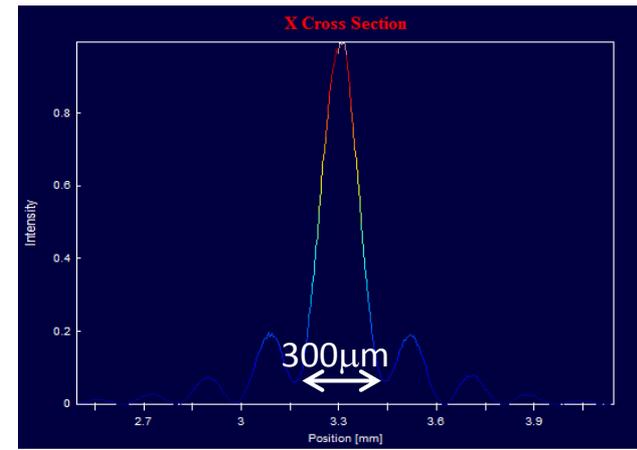
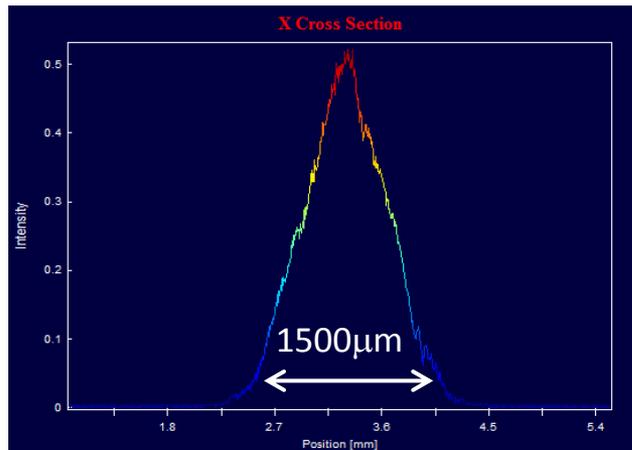
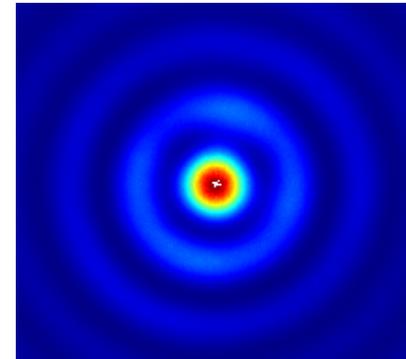
研究の現状

probe光とdistorted光の干渉(sample:NDfilter)

pump光off



pump光on



研究の現状

- 測定系に電氣的なノイズが入ったため、信号が見えなかった。→対策中
- 光学系もアップデート中(probe光源の交換、pump光をより絞る 半径 $\sim 50\mu\text{m}$)

今後の課題

- まず、比較的吸収率の高いBK7(吸収係数 $\sim 10^{-4}\text{cm}^{-1}$)をサンプルとして吸収測定を行い、信号を得ることを目指す。
- 数値シミュレーションを用いて、pump光によるサンプルの温度分布から、probe光の位相変化・強度変化を求める。
- KAGRA用サファイアの吸収測定($\sim 10^{-5}\text{cm}^{-1}$)