

# 社会連携研究部門における 光学材料の物性評価

令和2年（2020年）7月8日（水）

自然科学研究機構 分子科学研究所 研究棟 201室

佐藤庸一

<sup>1</sup>理化学研究所 放射光科学研究センター

<sup>2</sup>分子科学研究所 社会連携研究部門

yoichi.sato@spring8.or.jp

# 本日の内容

---

レーザー媒質の物性評価の必要性

分光計測および計測装置

熱物性計測および計測装置

理論計算で補完できる物性値

まとめ

# 『満足度が高い装置』の実現手段

レーザーの三要素に立ち返ってみても、結局はレーザー材料の物性パラメータにより基本は決定される

A. E. Siegman, *LASERS* (University Science Books, Sausalito, USA, 1986) p.2, Fig. 1.1によれば……

レーザー媒質

レーザー媒質の研究

新材料開発

新材料評価・材料評価法開発

共振器

共振器の研究

共振器中での吸収・利得飽和

熱による共振器条件変化

Qスイッチ素子（理論・実験評価）

CHAPTER 1: AN INTRODUCTION TO LASERS

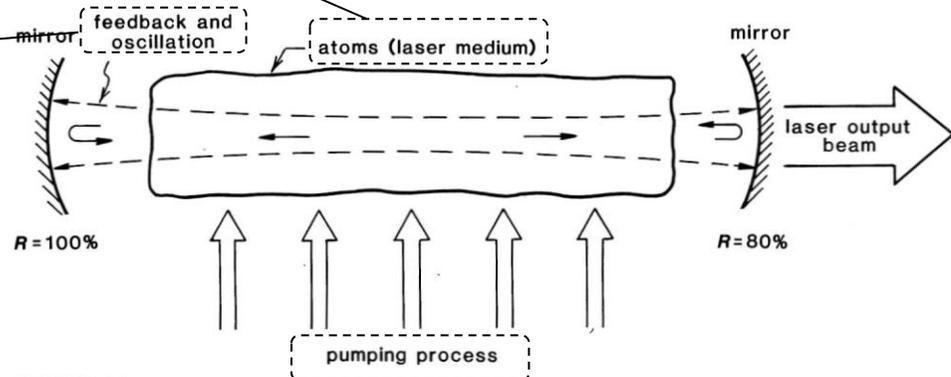


FIGURE 1.1  
Elements of a typical laser oscillator.

励起

励起の研究

上準位直接励起

蛍光量子効率（理論・実験評価）

# 材料の特性評価の重要性

## 例) Nd:YAGの誘導放出断面積

2.8	W. Koechner : <i>Solid State Laser Engineering 6<sup>th</sup> ed.</i> (Springer, New York, 2006) p.55.
3.0	A. A. Kaminskii : <i>Laser Crystals 2<sup>nd</sup> ed.</i> (Springer, Berlin, 1990) p.332.
4.6	A. E. Siegman : <i>Lasers</i> (University Science Books, Sausalito, 1986), p.290.
4.9	M. Sekita, H. Haneda, T. Yanagitani, and S. Shirasaki : <i>J. Appl. Phys.</i> 67 (1990) 457.
6.1	K. Fuhrmann, N. Hodgson, F. Hollinger, and H. Weber : <i>J. Appl. Phys.</i> 62 (1987) 4041.
6.5	R. C. Powell : <i>Physics of Solid-State Laser Materials</i> (Springer, New York, 1998) p.319.
8.8	T. Kushida, H. M. Marcos, and J. E. Geusic : <i>Phys. Rev.</i> 167 (1967) p.289.
9.0 ( $10^{-19}\text{cm}^2$ )	A. Yariv and P. Yeh : <i>Photonics 6<sup>th</sup> ed.</i> (Oxford University Press, New York, 2007) p.297.

- 文献値は収束の気配がない
- 実際には熱伝導率や熱膨張なども文献により値はバラバラ
- 問題は測定法なのか、材料なのか、それとも定義そのものか
- 結局、自分の試料は自分で計測しなければ信じられない

# 代表的な分光特性評価

## 分光計測

- 透過スペクトル計測（吸収係数）
- 蛍光スペクトル計測（誘導放出断面積）
- 蛍光時間分解計測（蛍光寿命）
- 最小偏角法（屈折率）
- フーリエ変換赤外分光（赤外吸収端）

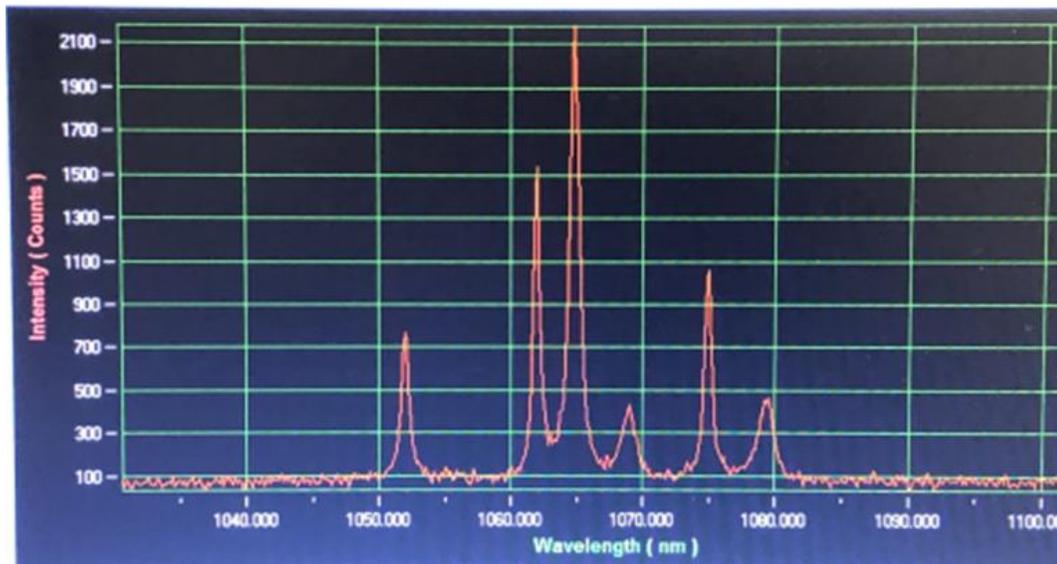
## 熱物性計測

- レーザーフラッシュ法（熱伝導率）
- 温度変調多重反射計測（屈折率温度係数）

## 理論計算

- Judd-Ofelt解析（自然放出寿命）
- 密度汎関数法（弾性係数）
- 直接法によるフォノン計算（比熱）
- 準調和近似によるフォノン計算（熱膨張係数）

# 分光計測および計測装置



**1at.% Nd:YAG ceramics  
の蛍光スペクトル**

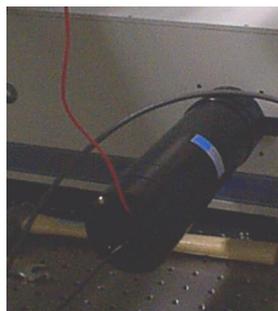
# 分光器 (モノクロメーター)

## Triax-550 + IGA512-1-1 (HORIBA Jobin-Yvon)

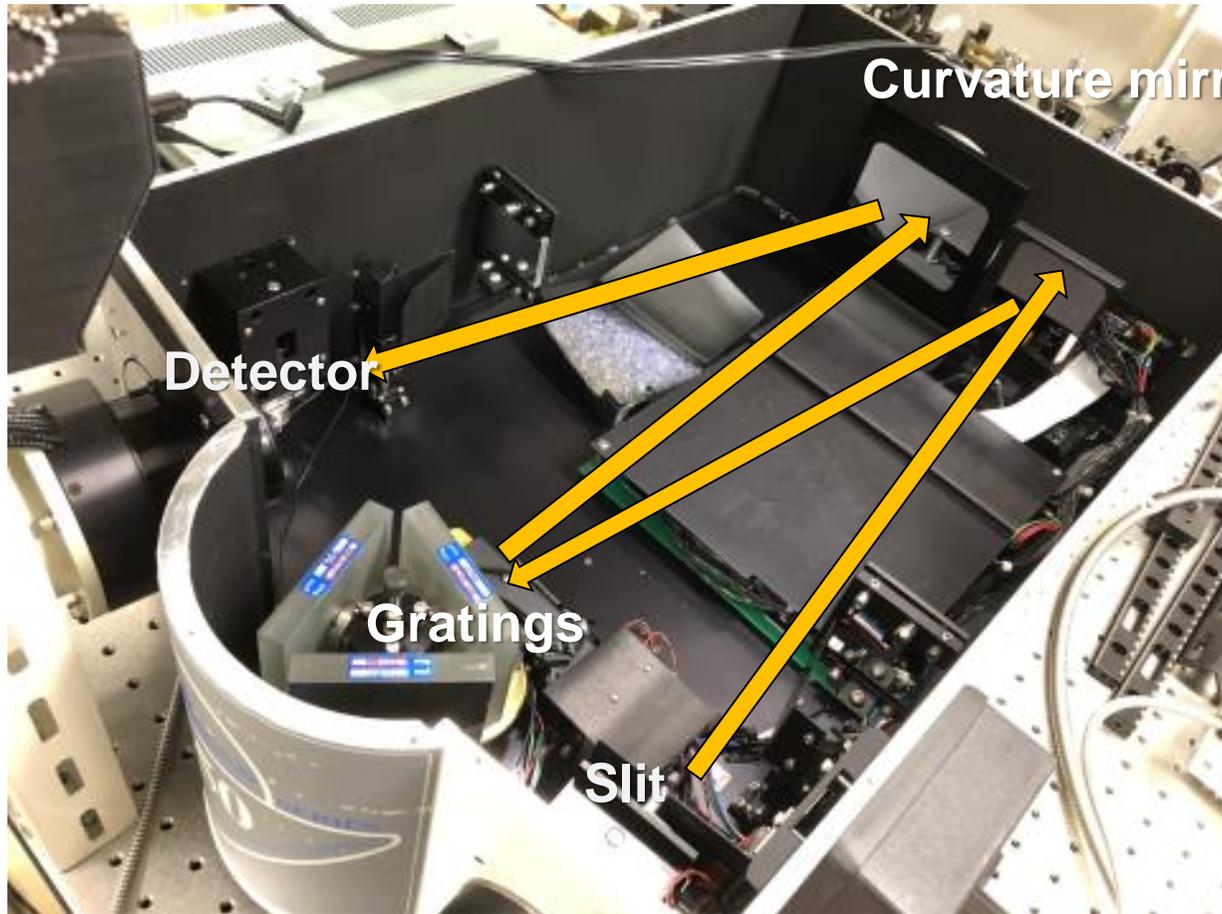
InGaAs714, 800-1700nm  
(JOBIN-YVON, IGA-512)



ホト71, 400-1200nm  
(浜ホト, R1767)



# TRIAx-550



## 3-type of gratings

Slit width = 1 mm

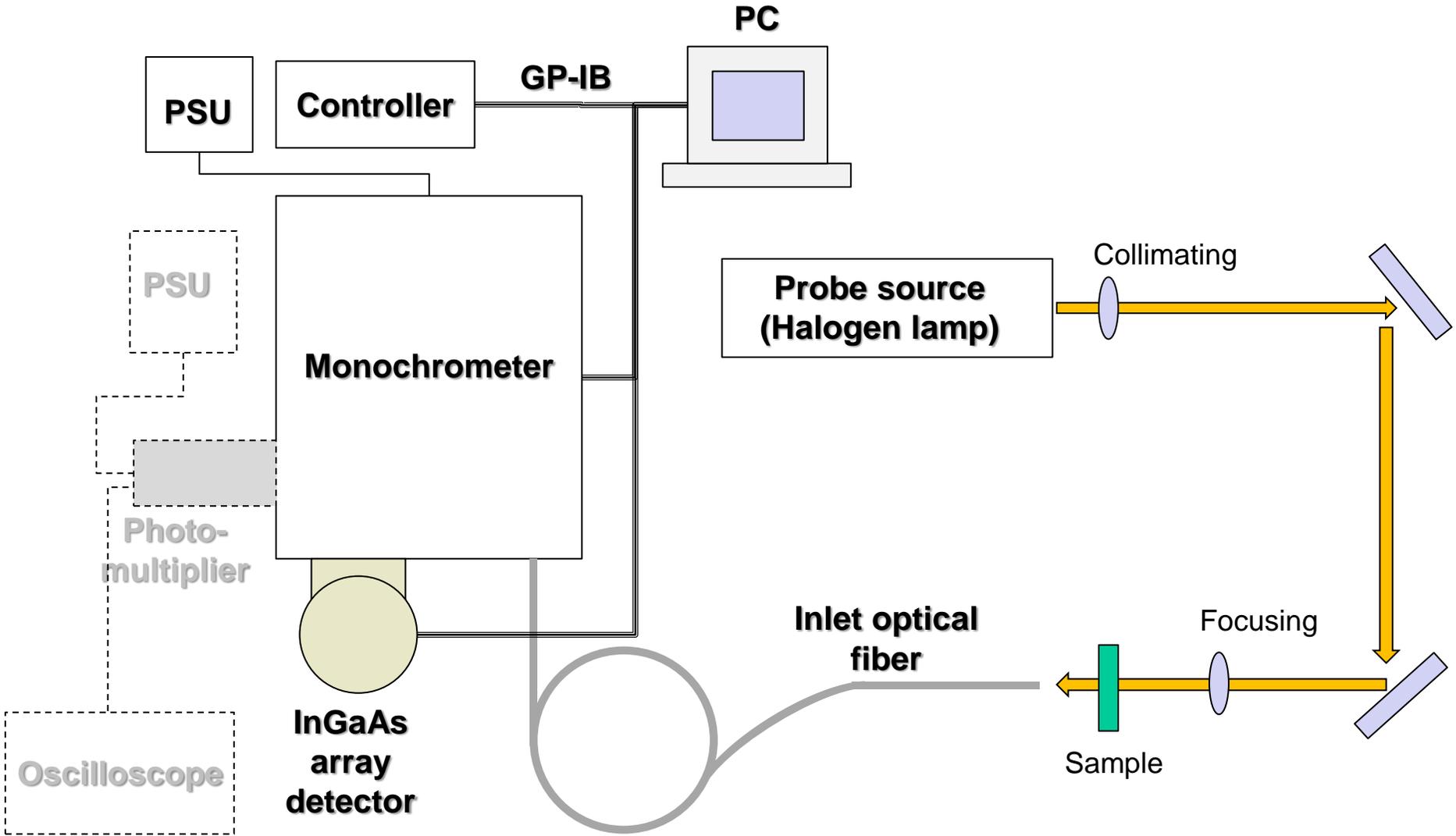
↕  
Resolution 1.55 nm  
(Grating: 1200 gr/mm)

Resolution 3.1 nm  
(Grating: 600 gr/mm)

Resolution 6.2 nm  
(Grating: 300 gr/mm)

Highest spectral resolution of 0.05 nm (effective value)

# 透過スペクトル計測のセットアップ



# 透過スペクトル計測例

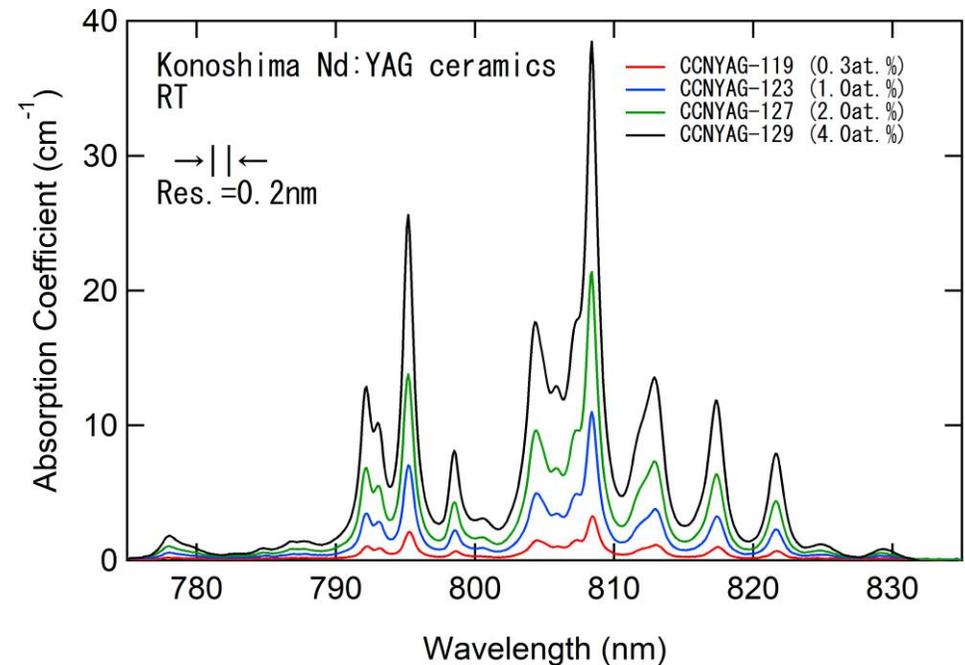
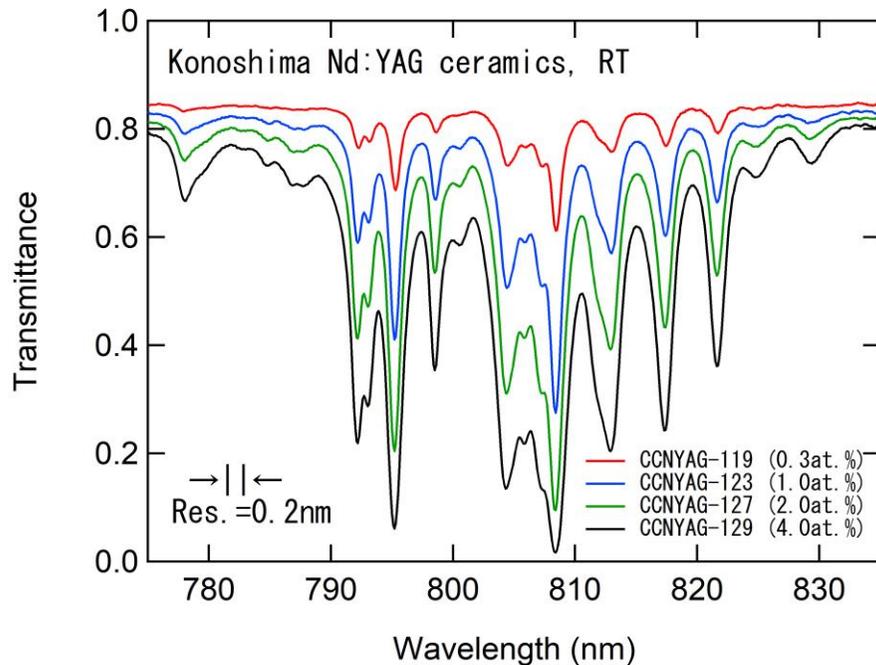
## 神島化学工業製Nd:YAGセラミックス

0.3at.%

1.0at.%

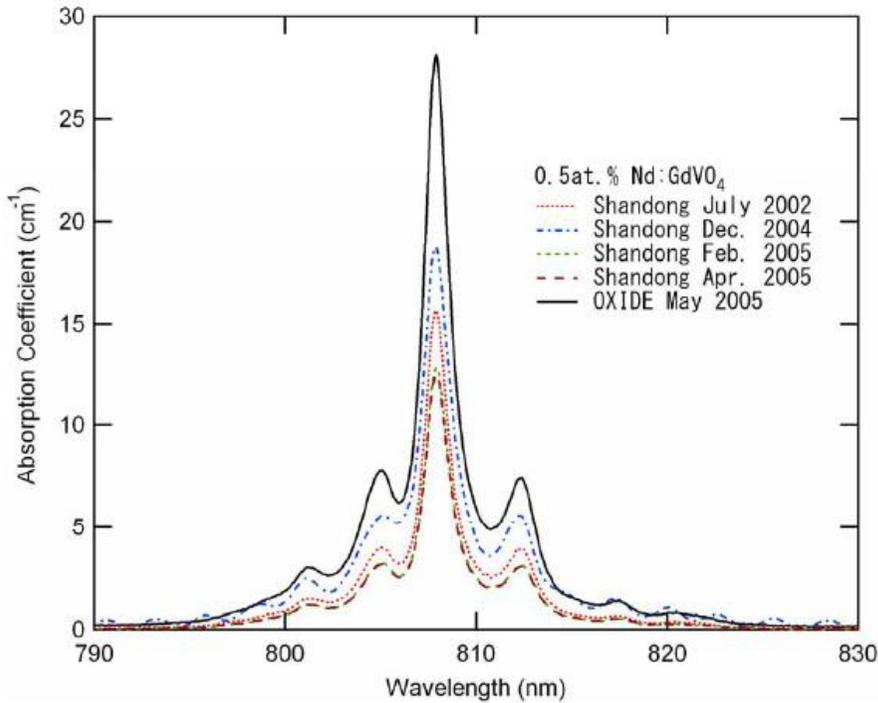
2.0at.%

4.0at.%



# 吸収係数を計測した方が良い理由

Y. Sato and T. Taira, IEEE JSTQE 11, 613 (2005).



同じ0.5at.%のNd添加濃度をオーダーした試料であるにもかかわらず、Ndによる光吸収の大きさは異なっている

濃度指定して業者から光学結晶を購入しても、正しい濃度かどうかを判断する手段が無い

幸いなことに濃度そのものは設計パラメータとしては二次的。最低限必要なパラメータは自分で計測したい

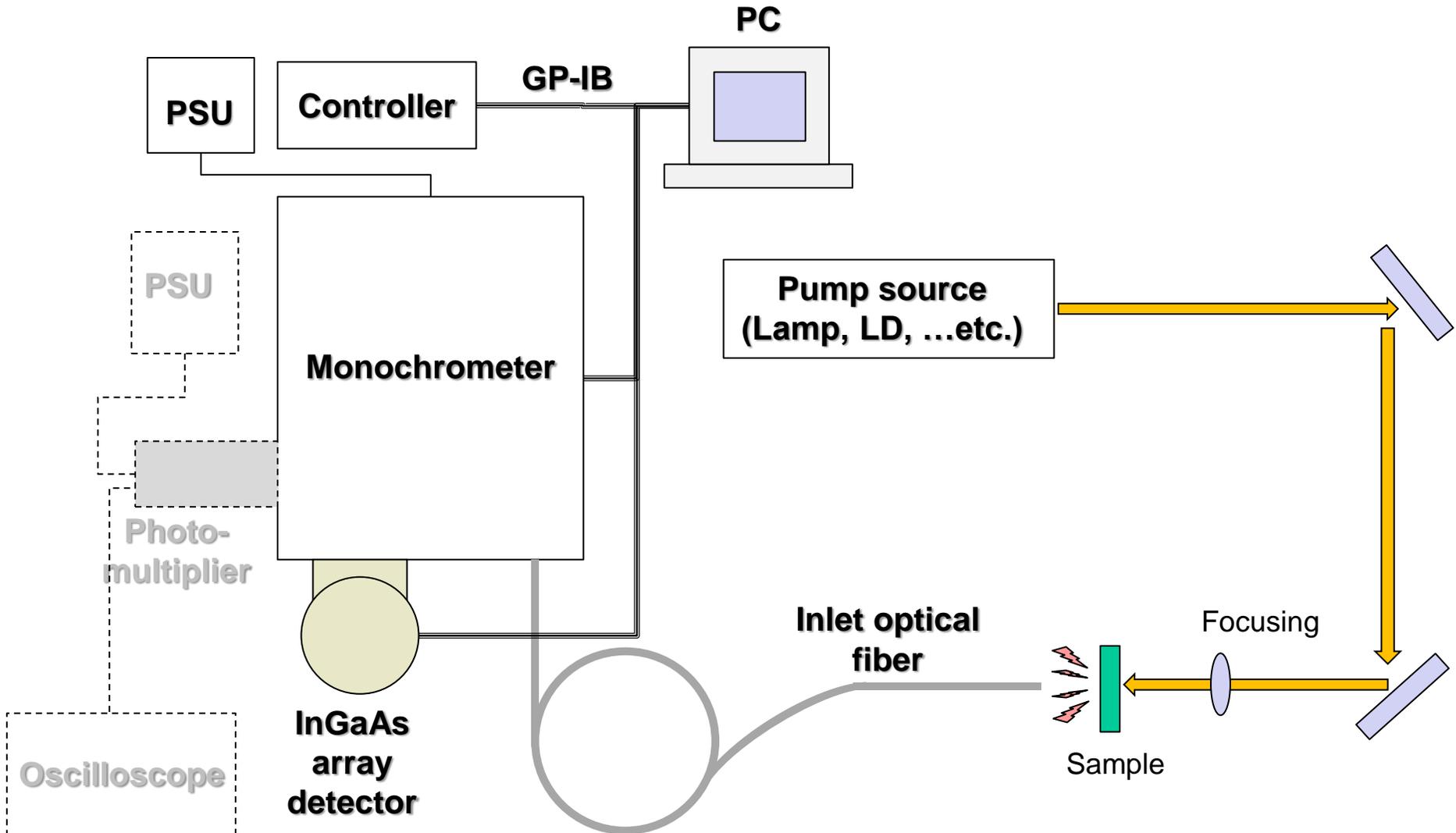
レーザー結晶のNd添加濃度評価に関して外注評価機関7社に委託した結果

1at.% Nd:GdVO<sub>4</sub>のNd定量分析結果

1at.% Nd:GdVO<sub>4</sub> (Shandong July 2002)

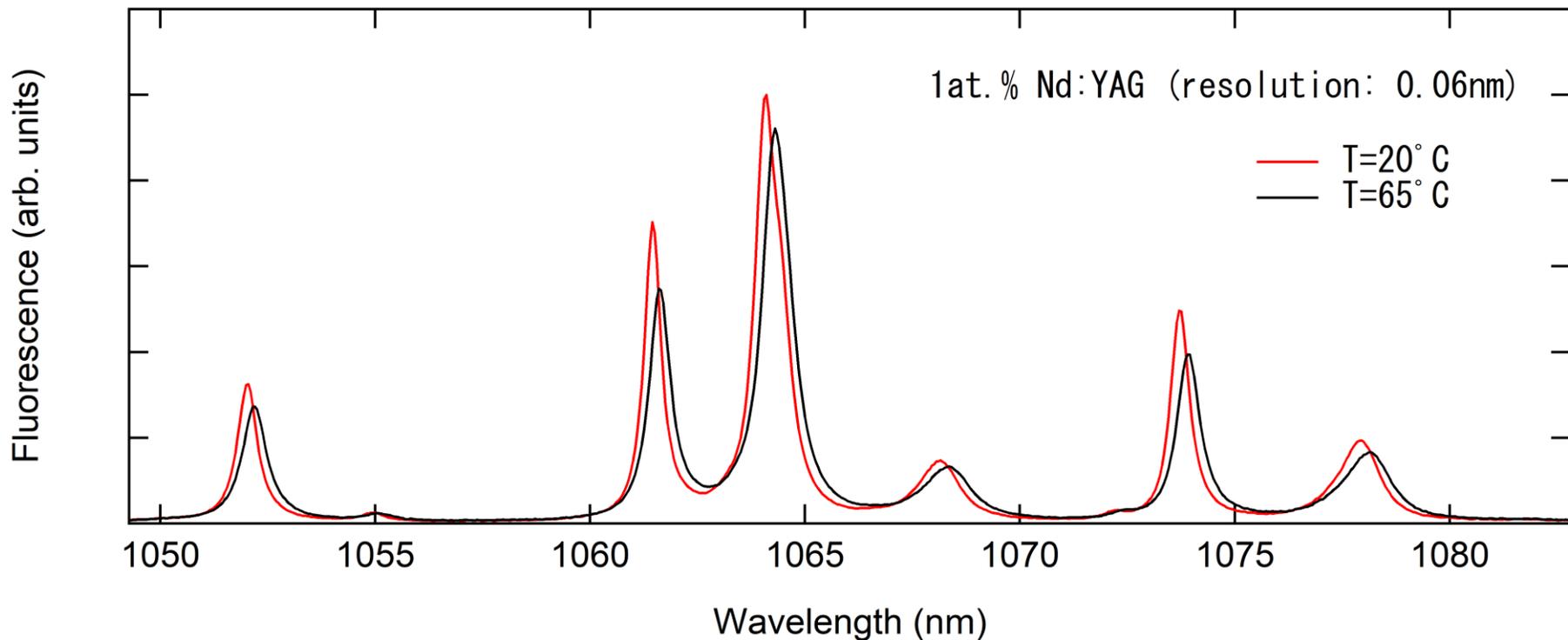
Method	XRF-EDX	XRF-WDX (1)	XRF-WDX (2)	EPMA-EDX	EPMA-WDX	ICP-AES (1)	ICP-AES (2)
C <sub>Nd</sub> (at.%)	1.27	0.866	0.462	1.18	0.399	0.529	0.554

# 蛍光スペクトル計測のセットアップ



# 蛍光スペクトル計測例

## Scientific Materials製Nd:YAG単結晶

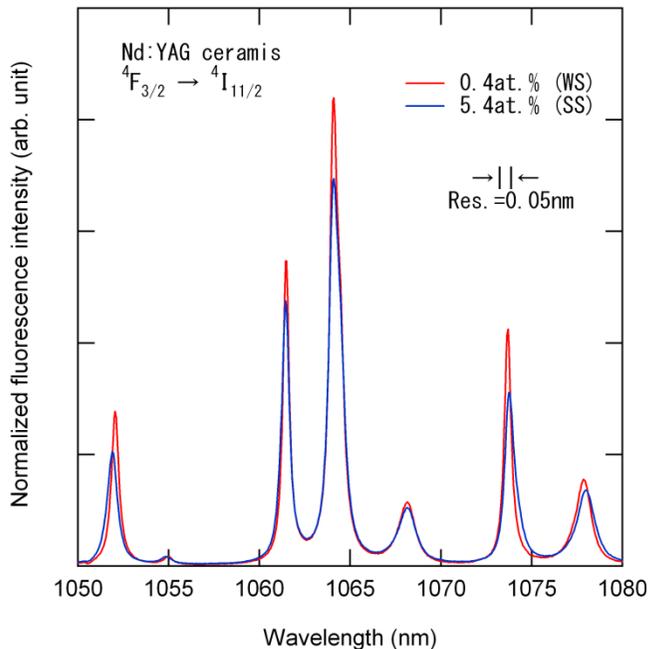


数10°Cの温度変化で、共振器の熱変調のみならず、利得自体が変化

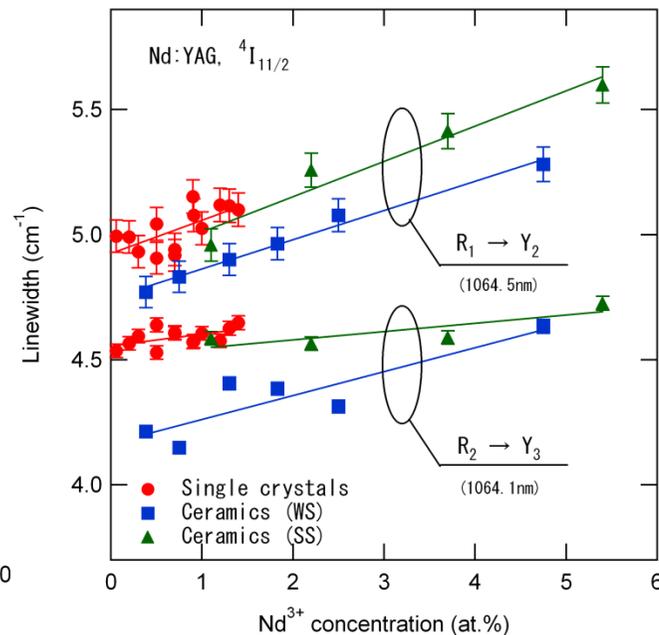
# 同種材料でも異なる分光特性

Nd:YAG, Transition between  $4F_{3/2} \rightarrow 4I_{11/2}$

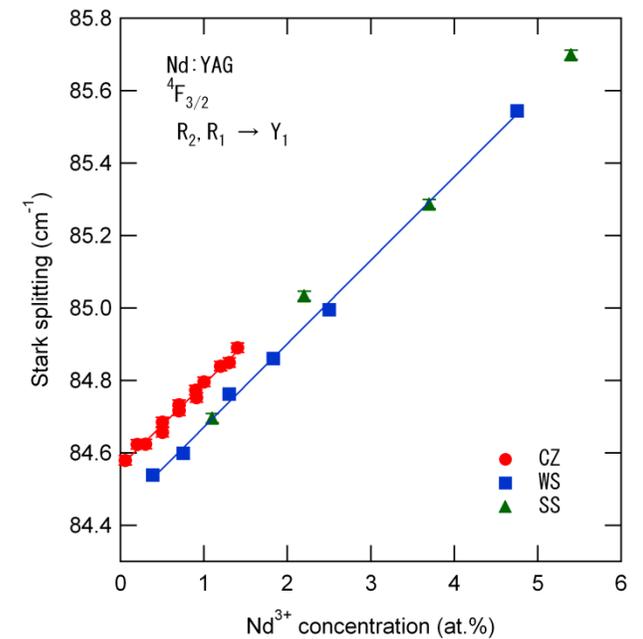
誘導放出断面積



スペクトル帯域

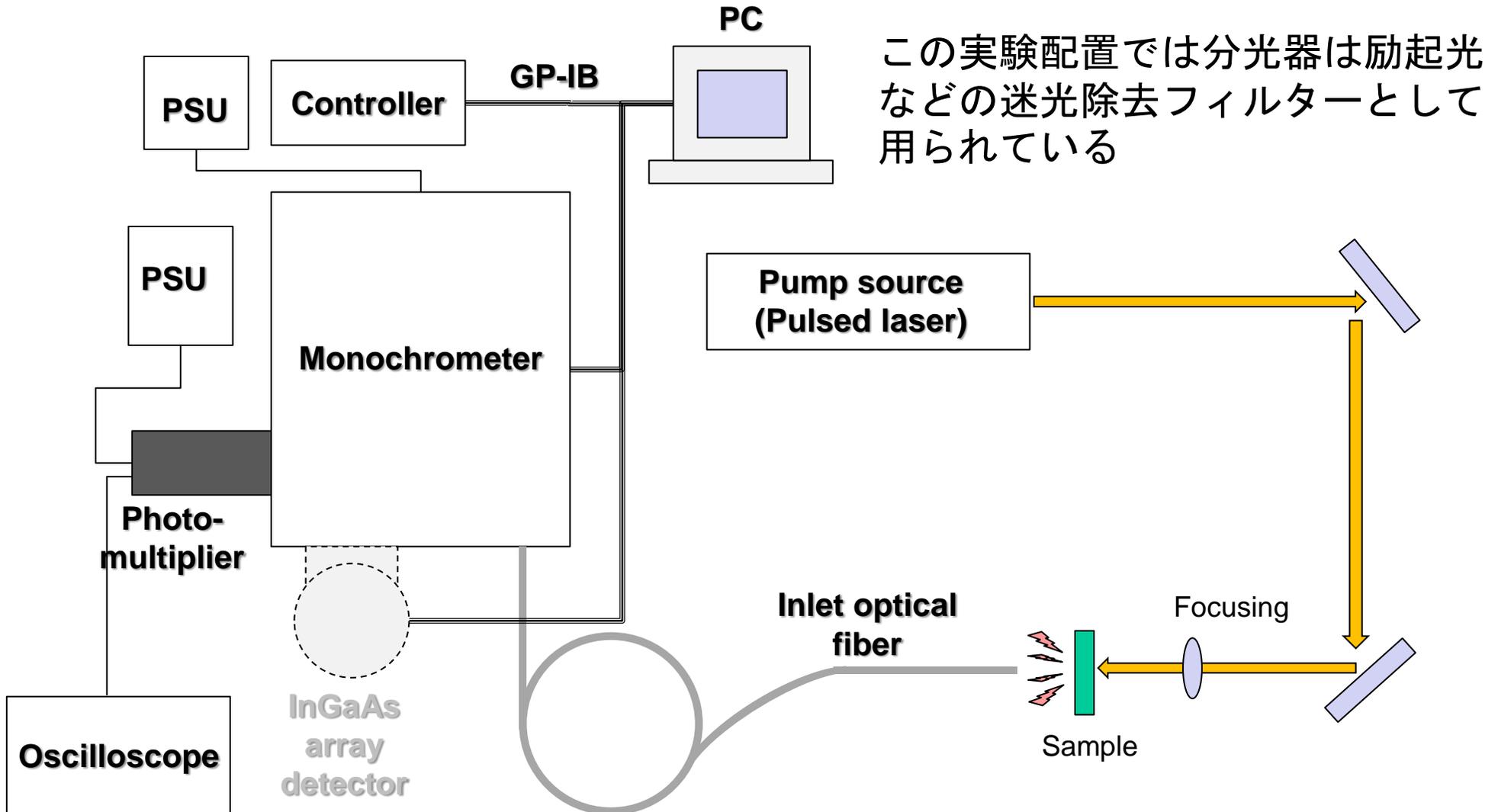


蛍光ピーク波長



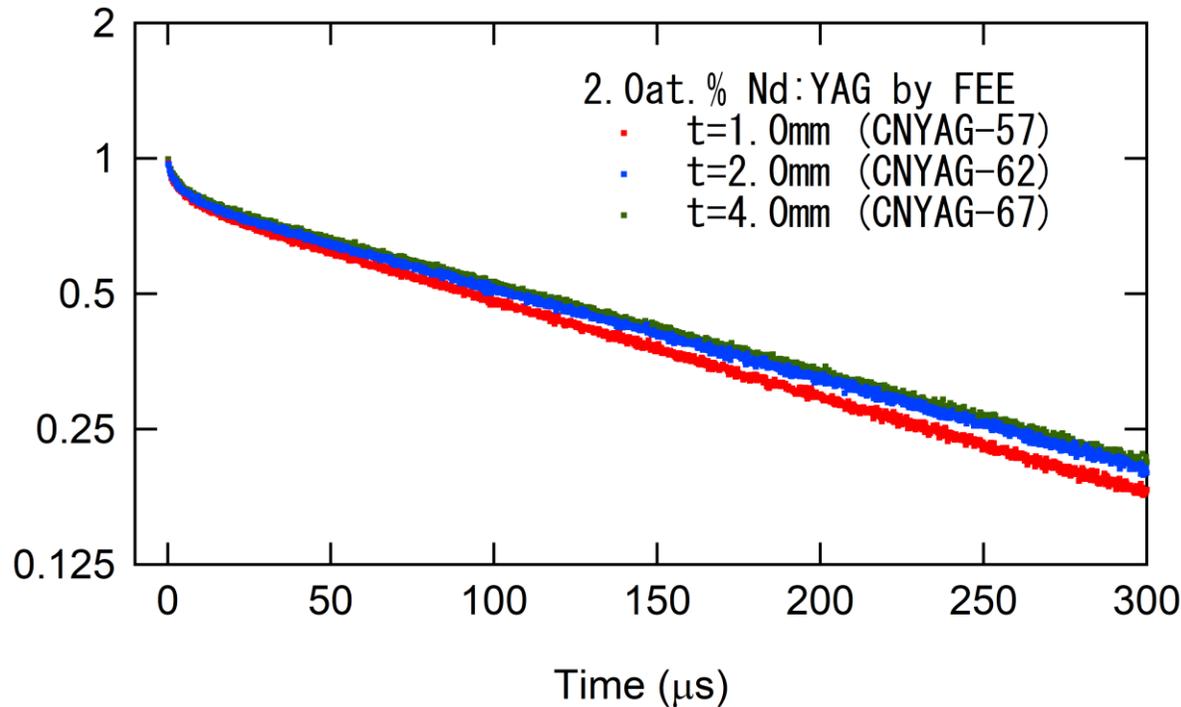
極端な話、物性値とはいえNd濃度、製法、製造ロットに依存している

# 時間分解蛍光計測のセットアップ



# 時間分解蛍光計測例

2.0at.% Nd:YAG単結晶  
商品名“Super YAG” by FEE



Measured by photo-multiplier (R1767, Hamamatsu PK)  
Pumped by 808nm OPO-output (MOPO-HF, Spectra Physics)  
Filtered by monochromator (TRIAX-550, JOBIN YBON)

蛍光寿命評価法 : V. Lupei et al., JOSAB **19**, 360 (2002).

励起直後の蛍光緩和を考慮

CNYAG-57 167 $\mu$ s

CNYAG-62 182 $\mu$ s

CNYAG-67 187 $\mu$ s



蛍光量子効率

CNYAG-57 167/280=0.60

CNYAG-62 182/280=0.65

CNYAG-67 187/280=0.67

従来の指数関数フィット

CNYAG-57 201 $\mu$ s

CNYAG-62 215 $\mu$ s

CNYAG-67 217 $\mu$ s



蛍光量子効率

CNYAG-57 201/250=0.80

CNYAG-62 215/250=0.86

CNYAG-67 217/250=0.87

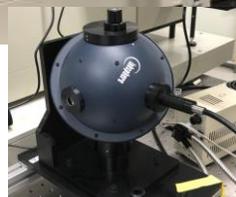
# その他の利用可能な分光器

1 m 分光器 Res.=0.01nm

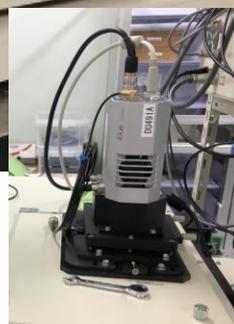
(日本分光, CT-100C) ※現在はSPring-8に設置



ホトマル, 300-1400nm  
(浜ホト, R5509-42)



積分球  
(Labsphere)



レーザー 0.8-1.7um  
(DU491 Andor)

25cm 分光器 Res.=0.4nm

(日本分光, CT-25)

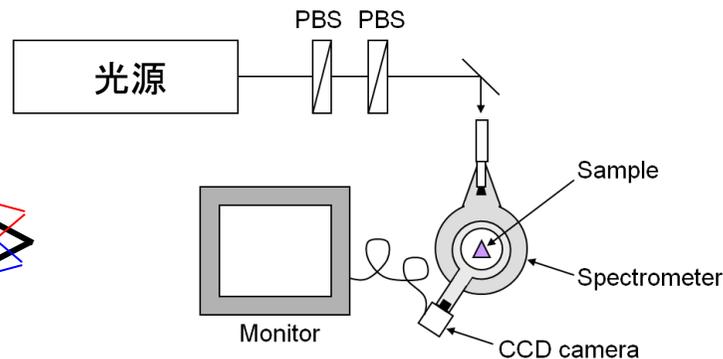
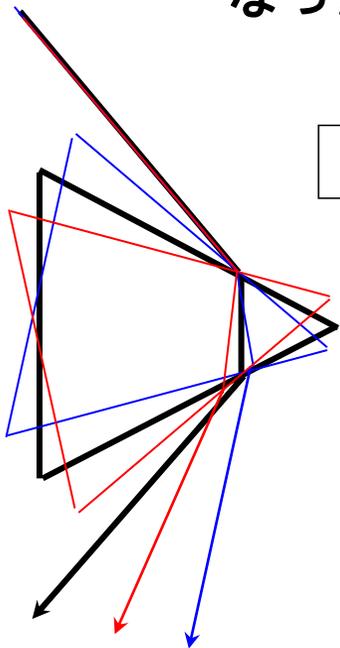


MCT, 2-16um  
(EG&G, J15D14)

# 屈折率計測

## 最小偏角法 W. L. Bond, JAP 36, 1674 (1965).

プリズムに光を入射した際  
入射光と出射光の角度は、  
プリズムへの入射角とプリ  
ズムからの出射角が等しく  
なった時に最小の値を取る



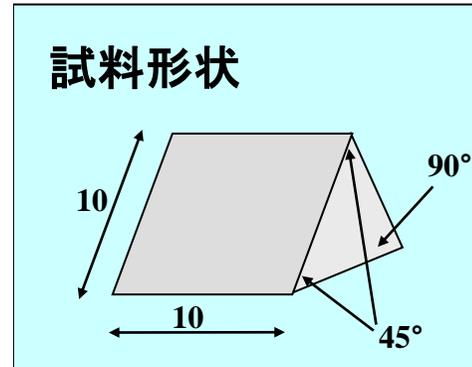
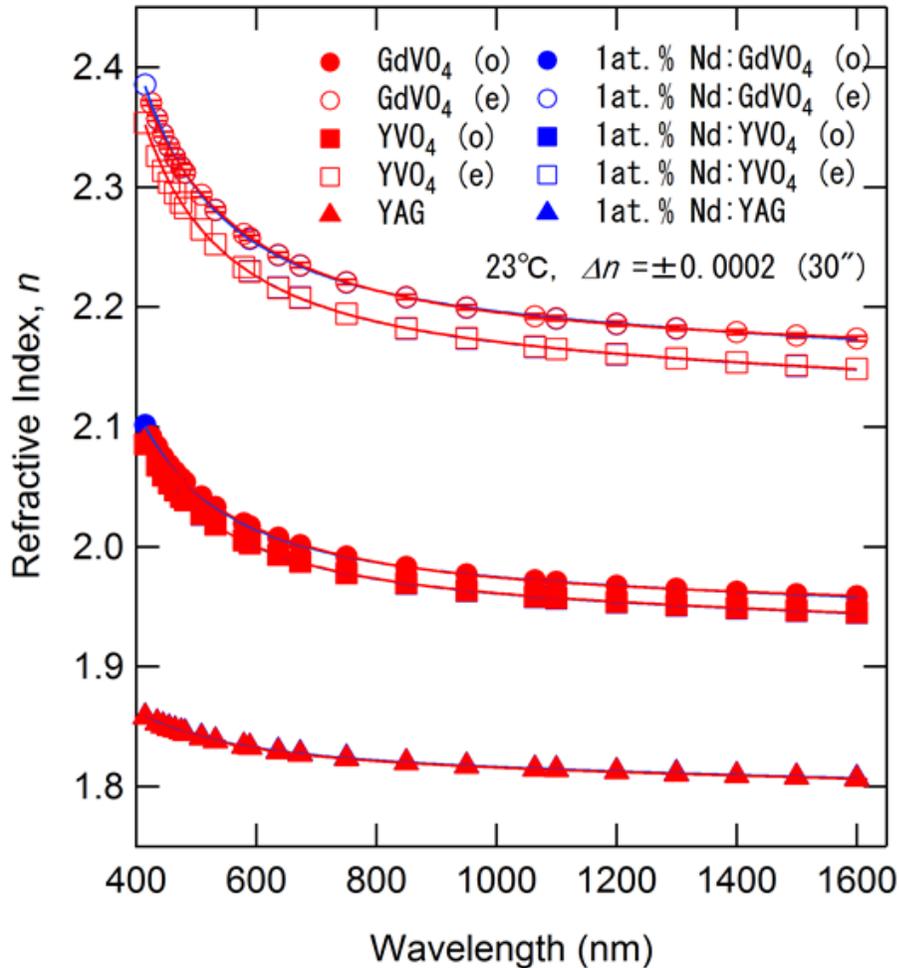
## 分光計 (V-30D、島津製作所) (現在はSpring-8に設置)

計測誤差 ~ 0.0003



ステージの上にプリズムを載せ、ステージを回転  
させて最小となる入射光と出射光の角度を計測

# 屈折率計測例



- Samples:
- Prism with bases of isosceles right triangle
  - 10 mm of long side in base
  - 10 mm of prism height
  - Undoped and 1.0at.% Nd<sup>3+</sup>-doped

YAG (Scientific Materials)  
YVO<sub>4</sub> (ITI Electro-optics),  
GdVO<sub>4</sub> (Shandong Newphotons)

## 屈折率の波長依存性 (セルマイヤーの式)

$$\text{YAG} \quad n^2(\lambda) = 3.793 + \frac{0.06437\lambda^2}{\lambda^2 - 0.05641^2} - 0.01428\lambda^2$$

$$\text{YVO}_4 \quad n_o^2(\lambda) = 3.793 + \frac{0.06437\lambda^2}{\lambda^2 - 0.05641^2} - 0.01428\lambda^2 \quad n_e^2(\lambda) = 4.631 + \frac{0.09736\lambda^2}{\lambda^2 - 0.06466^2} - 0.02189\lambda^2$$

$$\text{GdVO}_4 \quad n_o^2(\lambda) = 3.823 + \frac{0.07847\lambda^2}{\lambda^2 - 0.03430^2} - 0.006180\lambda^2 \quad n_e^2(\lambda) = 4.701 + \frac{0.1227\lambda^2}{\lambda^2 - 0.04199^2} - 0.008368\lambda^2$$

1at.%のNd添加による屈折率差は計測誤差以下

# フーリエ変換赤外分光

## 光学フォノンの観察装置

赤外反射および吸収を計測し  
遷移双極子をつくる振動モードを同定



フーリエ変換型赤外分光装置  
(FT/IR-6300、日本分光)

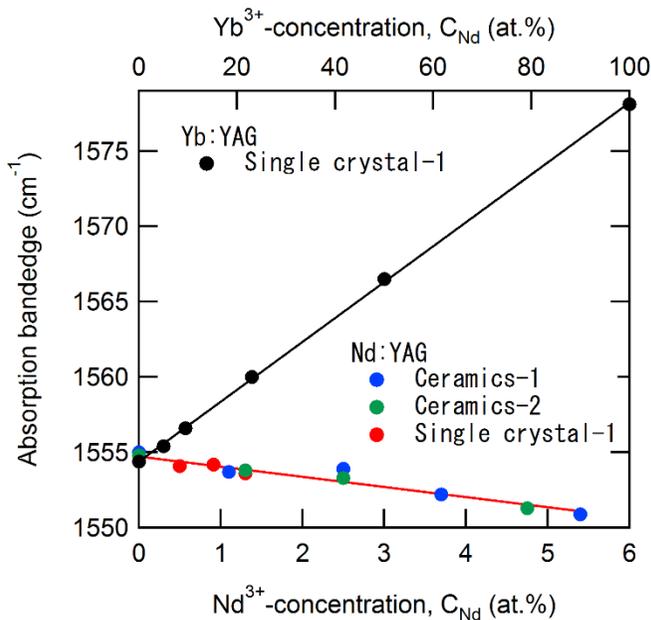
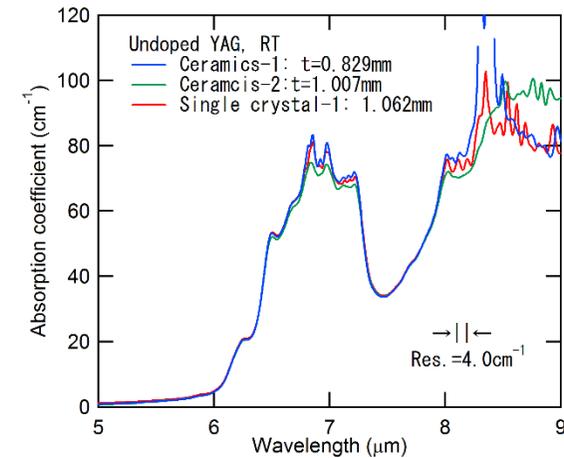
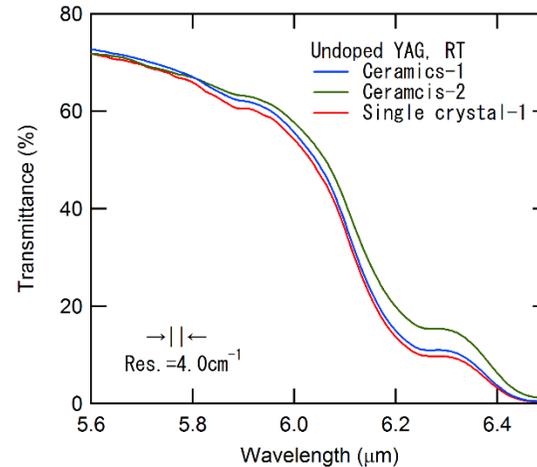
赤外領域における  
希土類による吸収  
の計測

赤外領域における  
光学窓として性能  
(波長帯域など)  
を評価

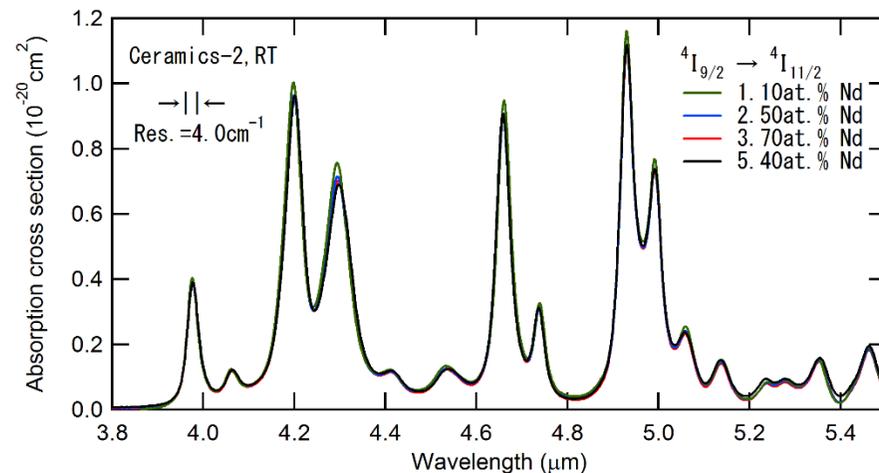
一般的な用法はIRデータベース  
と比較することでの主成分分析  
(有機物および一部の無機物)  
に供される

# フーリエ変換赤外分光計測例

光学フォノン特性  
(赤外吸収端) は  
製法や製造ロット  
などにほとんど依  
存しないが、希土  
類添加量で変化

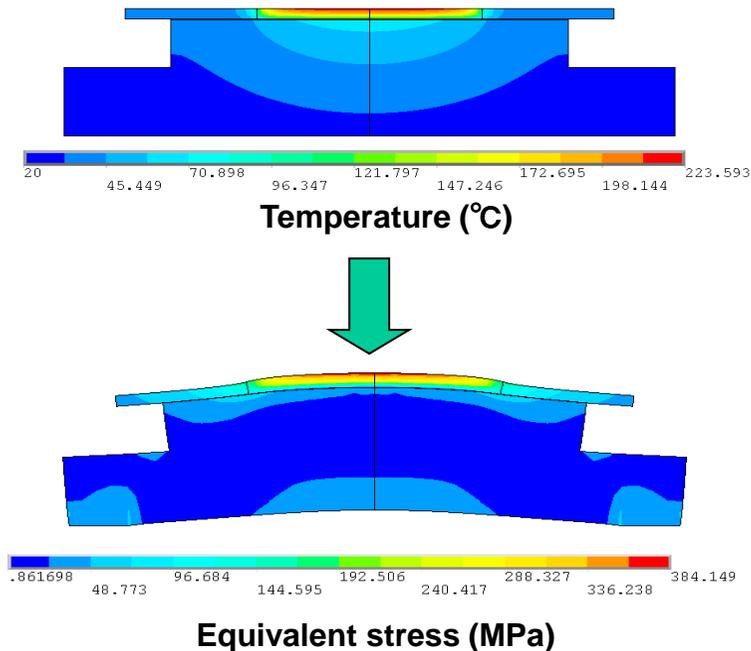


## 2000 cm<sup>-1</sup>近傍でのNd吸収



# 熱物性計測および計測装置

ANSYS



## Stress induced birefringence

$$\Delta n_r - \Delta n_\phi = \frac{n_0^3 (P_{11} - P_{12} + 4P_{44})}{48\pi} \cdot \frac{r^2}{r_0^2} \cdot \alpha_0 \eta_h P_p \cdot \frac{1+\nu}{1-\nu} \cdot \frac{1}{\kappa} \frac{dL}{dT}$$

## Stress induced lensing

$$\frac{1}{f_{TM}} = \frac{1 - \exp(-\alpha_0 L)}{\pi r_0^2} \cdot \frac{(10\nu - 6)P_{11} + (22\nu - 10)P_{12}}{32(\nu - 1)} n_0^3 \eta_h P_p \cdot \frac{1}{\kappa} \frac{dL}{dT}$$

## Thermal lensing

$$\frac{1}{f_{TO}} = \frac{1 - \exp(-\alpha_0 L)}{2\pi r_0^2} \eta_h P_p \cdot \frac{dn}{dT}$$

# 従来からの報告値と実測値の比較

Y. Sato, and T. Taira, Opt. Express, 14, 10528 (2006).

## 室温における熱伝導率 (c-axis)

YAG	: 10.5W/mK (従来値)	→	10.1W/mK
YVO <sub>4</sub>	: 5.1W/mK (従来値)	→	12.1W/mK
GdVO <sub>4</sub>	: 11.1W/mK (従来値)	→	10.4W/mK

Y. Sato and T. Taira, Opt. Mat. Express 4, 876 (2014).

## 室温における熱膨張係数(a-axis)

YAG	: $2.5 \times 10^{-6}/K$ (従来値)	→	$6.13 \times 10^{-6}/K$
YVO <sub>4</sub>	: $4.43 \times 10^{-6}/K$ (従来値)	→	$1.76 \times 10^{-6}/K$
GdVO <sub>4</sub>	: $2.16 \times 10^{-6}/K$ (従来値)	→	$1.19 \times 10^{-6}/K$

$\alpha$  of YVO<sub>4</sub>

0.3 ~  $13.5 \times 10^{-6}/K$

P. A. Loiko et al., Appl. Opt. 52, 698 (2013)

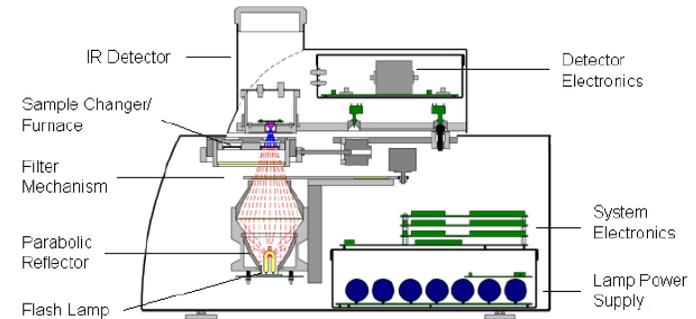
Z. Huang et al., J. Sol. Stat. Chem. 185, 42 (2012).

# 熱伝達係数計測装置

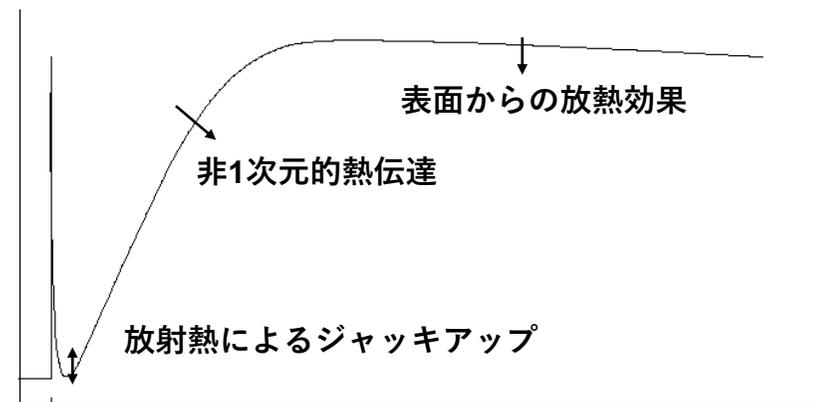


フラッシュ法熱拡散計測装置  
(LFA447、NETZSCH GmbH)

均一な強度分布を持つ光を試料に照射して、負荷された熱量による温度変化速度から熱拡散係数を計測。



温度上昇カーブ（時間依存性）

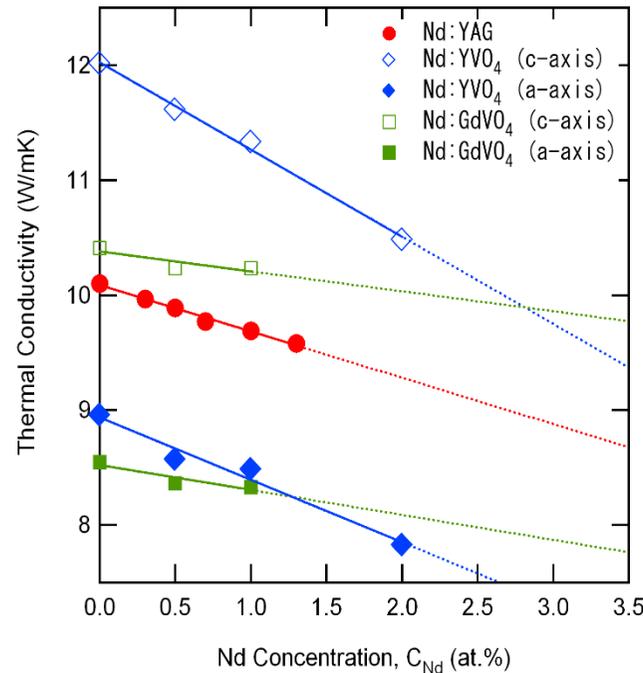
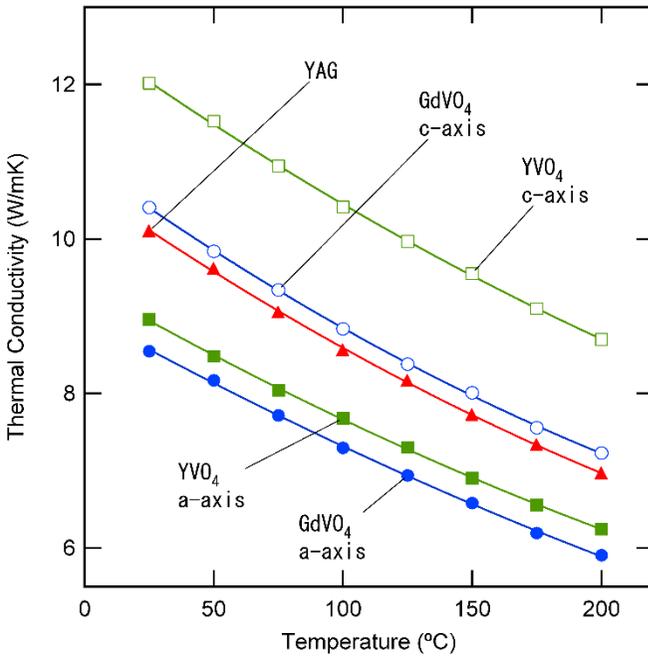


# 熱伝導率計測の例

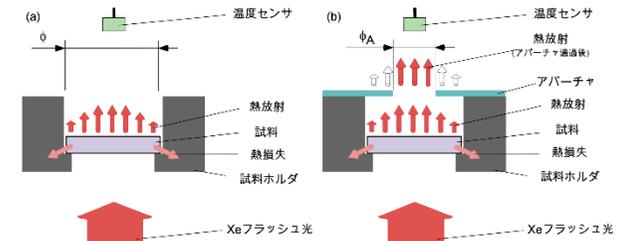
熱伝導率 $\kappa$ は熱拡散係数 $D$ と密度 $\rho$ 、比熱 $C_p$ の積で与えられる。

$$\kappa = \rho C_p D$$

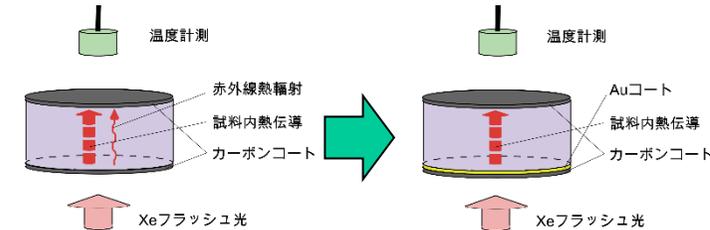
繰り返し誤差：1%以下



## 疑似一次元熱拡散法



## 赤外輻射の影響低減



Y. Sato, and T. Taira, Opt. Express, **14**, 10528 (2006).

# 比熱計測装置（導入予定）

## 示差走査熱量計測（DSC）の原理 (Difference scanning calorimetry)

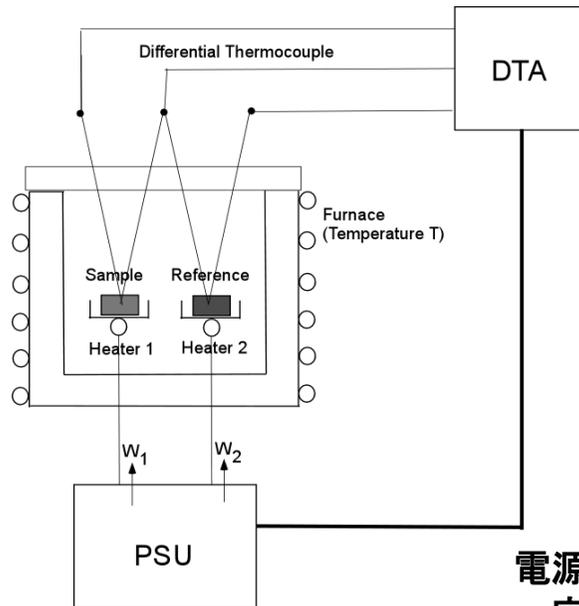
$$W_1 \Delta t = (C_p \cdot M + C_p' \cdot M') \Delta T$$

試料側投入電力   試料熱容量   試料容器熱容量   温度

$$W_2 \Delta t = (C_p^r \cdot M^r + C_p' \cdot M') \Delta T$$

リファレンス側投入電力   リファレンス熱容量

$$C_p = \frac{W_1 - W_2}{M \frac{dT}{dt}} + C_p^r \frac{M^r}{M}$$



電源は温度 T を一定に保つように電力を注入。



NETZSCH DSC204 F1 / μ-sensor  
Sample size : φ5 x 1 mm  
Reference : sapphire

# 熱膨張係数計測装置 (導入予定)

## 熱膨張係数の計測手法

### Absolute methods

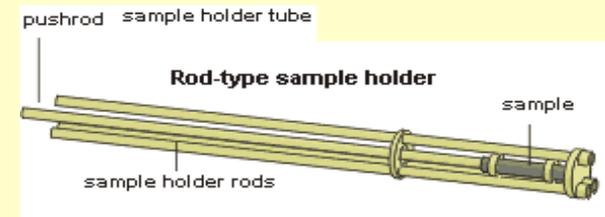
- Optical interferometric method. **Highly precision polishing required**
  - X-ray diffraction method.
  - Telemicroscope method.
  - Light scan method
- Read  
Knife edge

### Relative methods

- Push-rod method. → ISO7991, ISO17562
  - Mechanical lever method.
  - Optical lever method.
  - Capacitor method.
  - Strain gauge method.
- Enhance  
expansion

## 押し棒式熱膨張率計

NETZSCH DIL 402 C



Sample holders are made by fused silica.

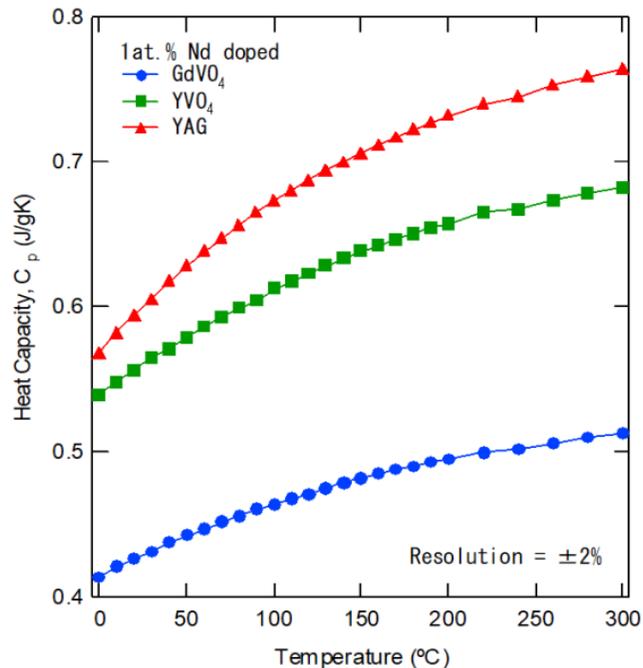
# 比熱および熱膨張計測の例

Y. Sato and T. Taira, Opt. Mat. Express **4**, 876 (2014).

YAG (Scientific Materials), YVO<sub>4</sub> (ITI Electro-optics), GdVO<sub>4</sub> (Shandong Newphotons)

## 定圧比熱

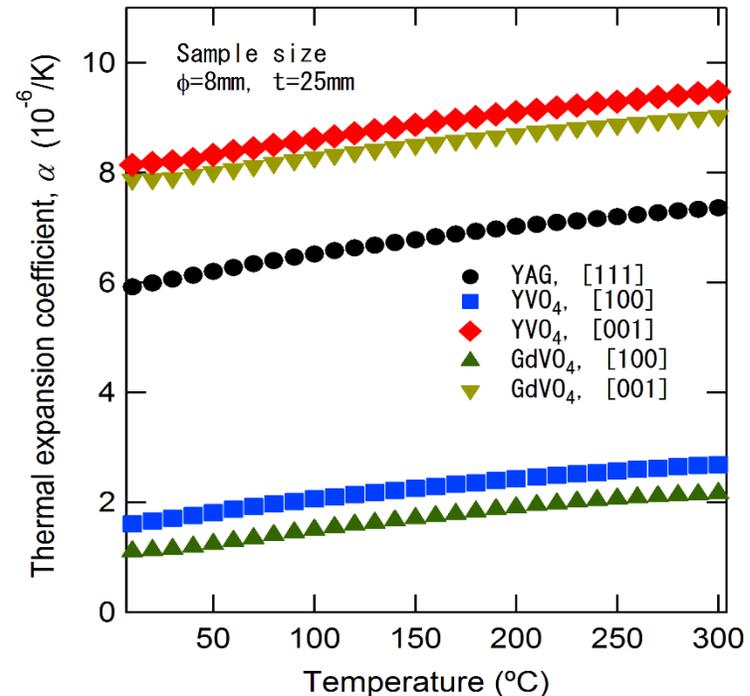
@25°C	YAG	YVO <sub>4</sub>	GdVO <sub>4</sub>
$K$ (W/mK)	10.1	12.1	10.5
$C_p$ (J/gK)	0.60	0.43	0.56



試料サイズ :  $\phi 5 \times 1$  mm  
昇温レート : 10°C / min

## 線膨張係数

$\alpha$ ( $10^{-6}/K$ )	YAG	Nd:YVO <sub>4</sub>		Nd:GdVO <sub>4</sub>	
direction	(111)	(100)	(001)	(100)	(001)
15 – 65°C	6.13	1.76	8.24	1.19	7.96
$\delta\alpha / \alpha$ (%)	0.065	±0.23	±0.049	±0.34	±0.05



Sample size :  $\Phi 8.0 \times 25.0$  mm Heating rate : 4K/min  
Under flowing He (50ml/min)

# 密度計測装置



密度はアルキメデス法により求める  
(液中浸漬による重量変化を利用)

ここに試料を載せ、重量Mを計測する

水槽中に皿が吊り下げられており、  
その皿の上に試料を載せて水中での  
重量M'を計測する

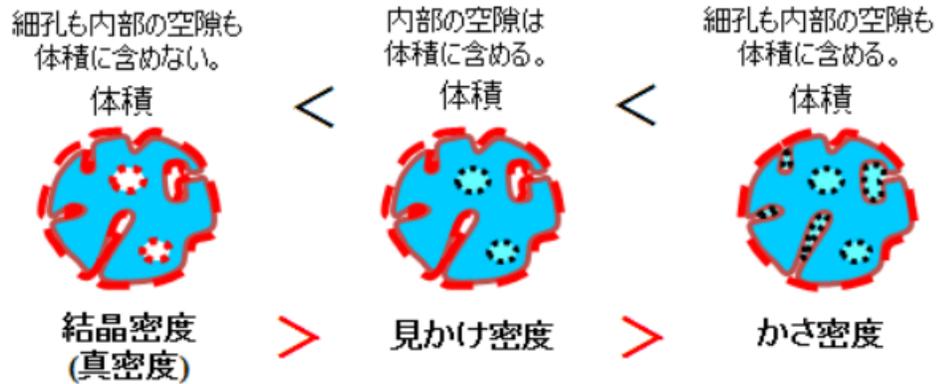
※試料表面における気泡などの発生を防ぐため、  
水槽中の水には微量の界面活性剤を添加する

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{M}{M - M'}$$

電子比重計 (現在はSPring-8)  
アルファミラージュ MDS-300

# かさ密度計測装置

密度には様々な種類があり、水を使ったアルキメデス法は『見かけ密度』の計測



真密度計測

流体としてHeを使用

見かけ密度計測

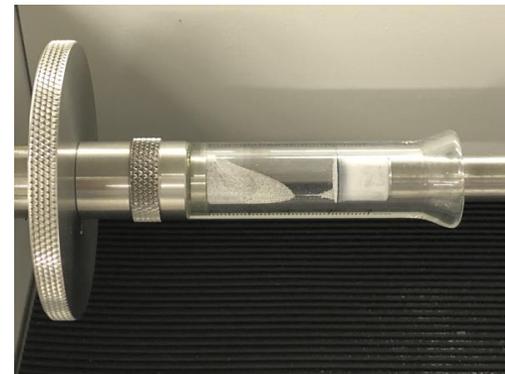
液体を使用

かさ密度計測

疑似流体を使用



圧粉体など水中に浸漬できない試料については、シリンダー中に試料と平均粒径120umの疑似流体（DRYFLO™）を充填し、疑似流体の量から試料の体積(かさ)を見積もる



かさ密度計（現在はSPring-8）

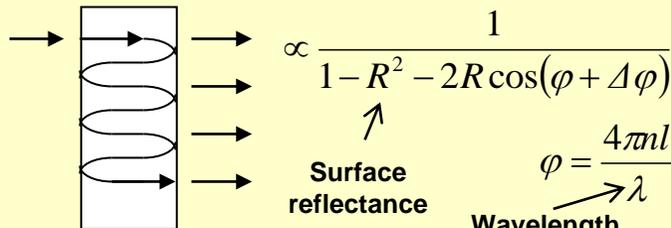
マイクロメリティクス GeoPyc 1365

# 屈折率温度係数計測

YAGの $dn/dT$  従来報告値 :  $2.5 \sim 8.2 \times 10^{-6}/K$

X. Xu et al., J. Cryst. Growth 262, 317 (2004).  
K. Wu et al., JOSA B 29, 2320 (2012).

## 透過光の強度変調



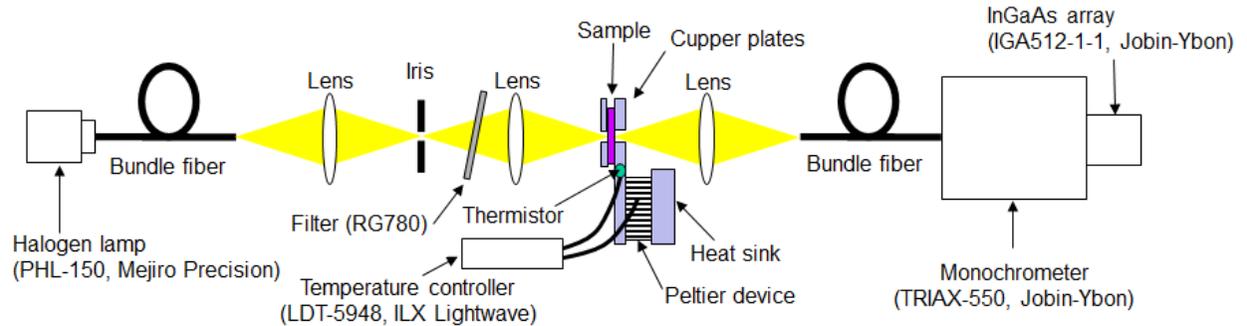
$$\propto \frac{1}{1 - R^2 - 2R \cos(\varphi + \Delta\varphi)}$$

Surface reflectance  $R$

$$\varphi = \frac{4\pi n l}{\lambda}$$

Wavelength  $\lambda$

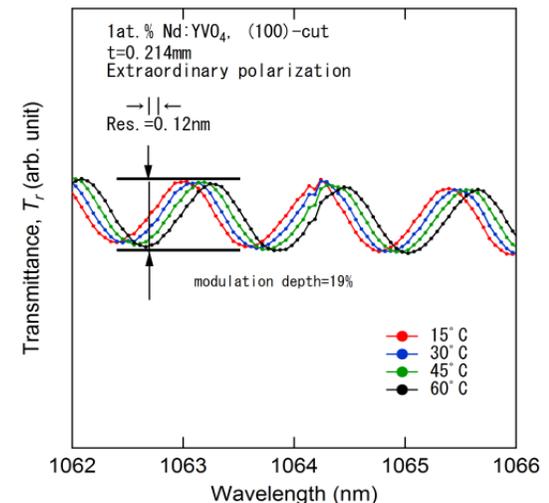
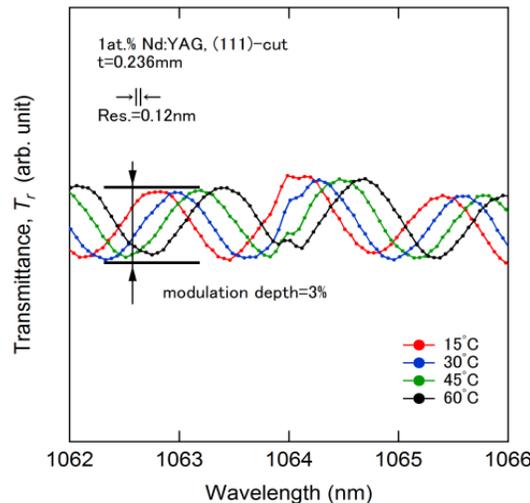
$$\frac{\Delta\varphi}{\varphi} = \left( \frac{1}{n} \frac{dn}{dT} + \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} \right) \Delta T$$



Sample thickness  
YAG: 0.2 mm (Cstech)  
YVO<sub>4</sub>: 0.2 mm (ITI Electro-optics)

## 位相差と熱膨張率から $dn/dT$ を評価

$dn/dT$ ( $10^{-6}/K$ ) polarization	YAG	Nd:YVO <sub>4</sub>		Nd:GdVO <sub>4</sub>	
		(100)	(001)	(100)	(001)
0.9 μm	11.7	16.3	8.92	15.7	10.7
Error	±0.21	±0.15	±0.15	±0.16	±0.13
1.06 μm	12.1	15.5	8.41	15.2	9.92
Error	±0.16	±0.14	±0.14	±0.17	±0.15
1.3 μm	11.8	14.7	7.92	14.5	9.30
Error	±0.15	±0.20	±0.22	±0.19	±0.20



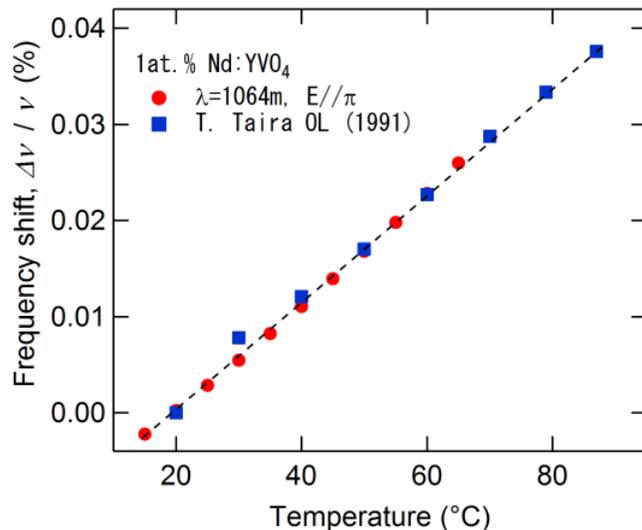
Y. Sato and T. Taira, Opt. Mat. Express 4, 876 (2014).

# dn/dT と dL/dT

## マイクロチップレーザー発振 波長の温度チューニング

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \left( \frac{1}{n} \frac{dn}{dT} + \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} \right) \Delta T$$

周波数シフトは透過光の位相差と等しい。



T. Taira et al., Opt. Lett, 16, 1955-1957 (1991).

## YAGの熱膨張係数について

YAGの線膨張係数には異方性があると信じられていた

YAG	(111)	(100)	(110)
$\alpha$ (10 <sup>-6</sup> /K)	7.8	8.2	7.7

A. Kaminskii "Laser Crystals". (1981) p.320.

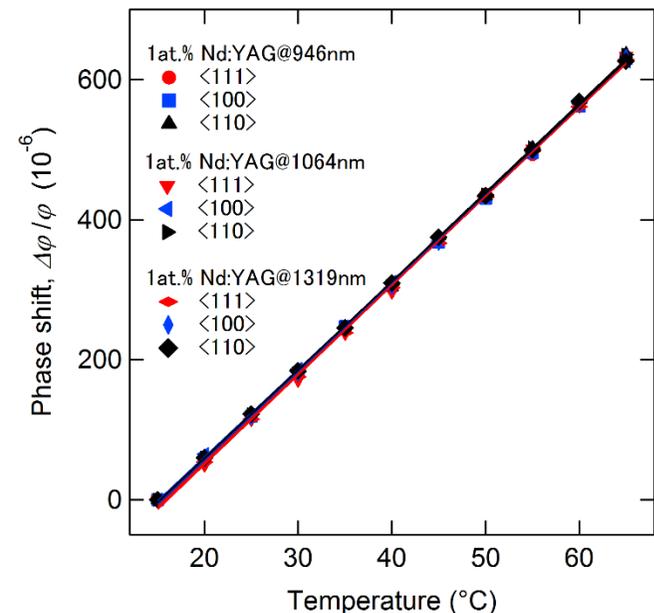
W. Koechner "Solid-State Laser Engineering 6<sup>th</sup> ed." (2006) p.55.

熱膨張係数は屈折率と  
同じ2階テンソル量

$$\alpha_{ij} = \frac{\partial e_{ij}}{\partial T} = - \frac{\partial^2 G}{\partial T \partial \sigma_{ij}}$$

従って立方晶系結晶で  
は等方的である。

実際に温度による位相  
変調には異方性が無い



Y. Sato and T. Taira, Opt. Mat. Express 4, 876 (2014).

# 理論計算で求める物性値

## 理論計算で物性値を求めることが適切である状況

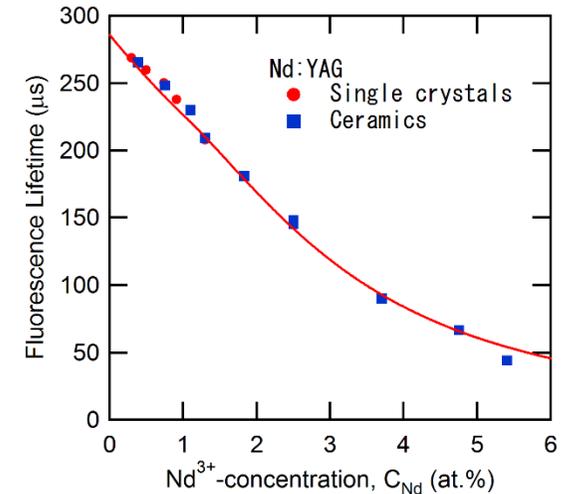
- 試料により値がばらつかない物性値を求める場合
- 物性値を正確に導出するための計測試料が不足している場合
- 物性値を計測するための計測装置が整備されていない場合

# Judd-Ofelt解析

自然放出寿命は希土類間相互作用が無い状態での蛍光寿命  
異なる希土類添加濃度を有する多数の試料の蛍光寿命  
におけるNd添加量依存性の外挿から評価

**Nd:YAGの自然放出寿命は280 us**

V. Lupei et al., Phys. Rev. B **64**, 092102 (2001).

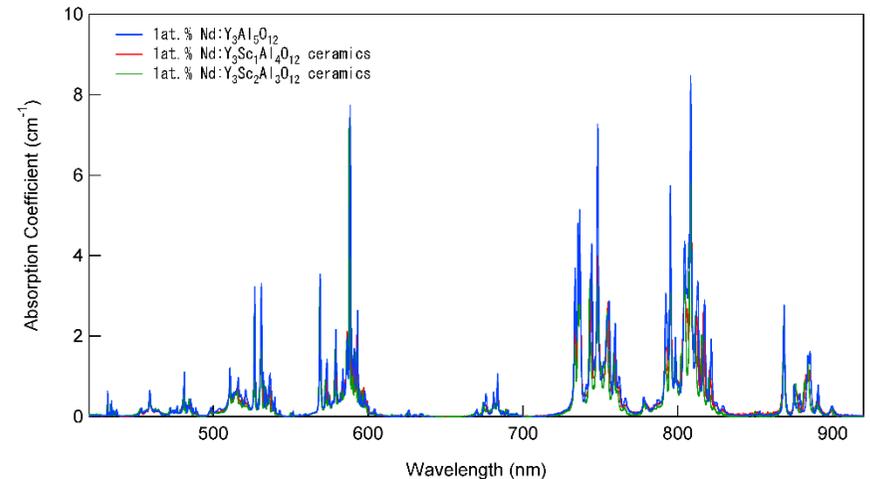


J-O解析とは、蛍光分岐率に関する結晶場効果を3つの  
Ωパラメータに還元することで、透過スペクトルから  
自然放出寿命を推定するという近似手法

$$\int \alpha(\lambda) d\lambda = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{8\pi^3 e^2 \bar{\lambda} \rho}{3ch(2J+1)} \cdot \frac{(n^2+1)^2}{9n} \sum_{i=2,4,6} \Omega_i \left| \langle (S, L) J \| U^{(i)} \| (S', L') J' \rangle \right|^2$$

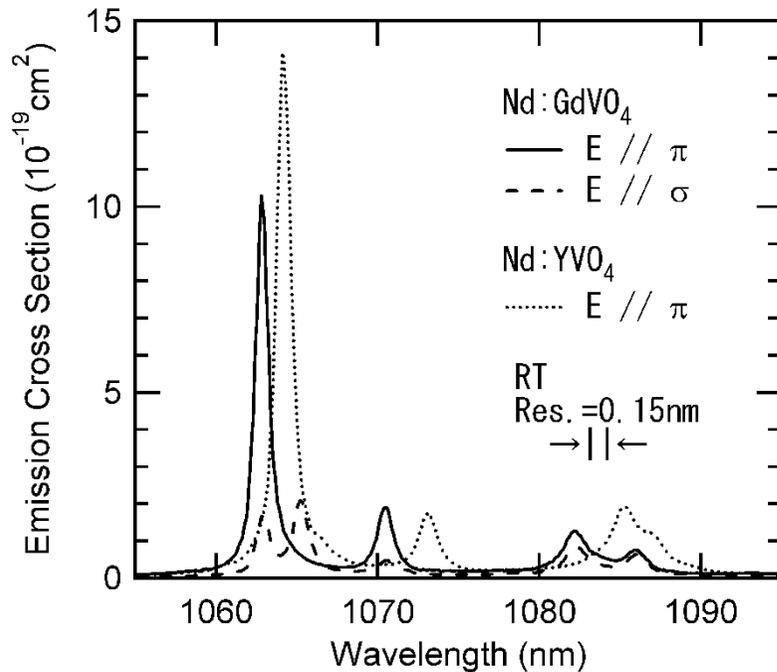
$$\frac{1}{\tau_{rad}} = \sum_{J''} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{64\pi^4 e^2}{3h\bar{\lambda}^3(2J'+1)} \cdot \frac{n(n^2+2)^2}{9} \sum_i \Omega_i \left| \langle (S', L') J' \| U^{(i)} \| (S'', L'') J'' \rangle \right|^2$$

Transition band	Nd:YAG	Nd:Y <sub>3</sub> Sc <sub>1</sub> Al <sub>4</sub> O <sub>12</sub>	Nd:Y <sub>3</sub> Sc <sub>2</sub> Al <sub>3</sub> O <sub>12</sub>
Ω <sub>2</sub> (10 <sup>-20</sup> cm <sup>2</sup> )	0.376316	0.220266	0.101373
Ω <sub>4</sub> (10 <sup>-20</sup> cm <sup>2</sup> )	4.06395	3.77715	3.22115
Ω <sub>6</sub> (10 <sup>-20</sup> cm <sup>2</sup> )	5.35931	4.60414	3.80633
τ <sub>rad</sub> (μs)	233.923	253.251	290.706



Y. Sato et al., JJAP **41**, 5999 (2002).

# Hybrid method



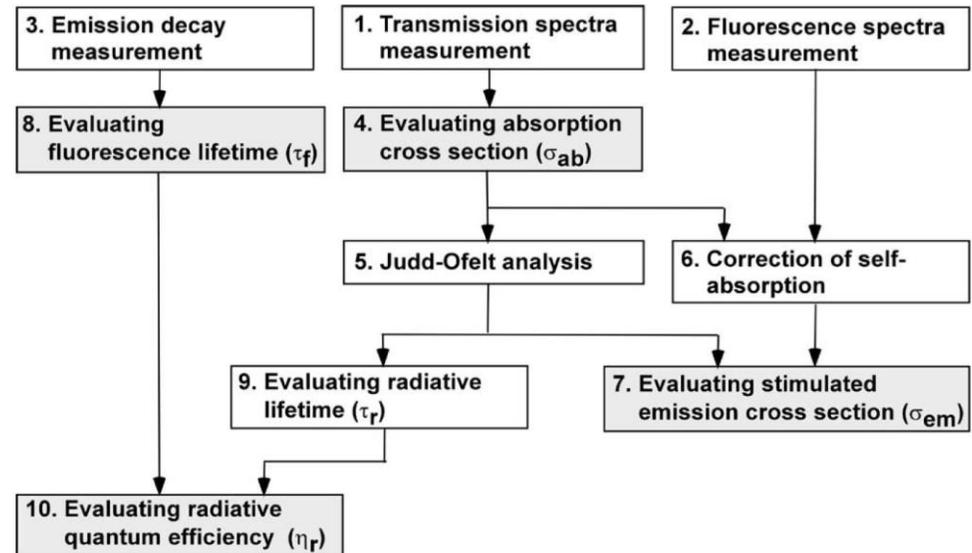
異方性材料の誘導放出断面積導出には各偏光成分における自然放出レートが必要

↓  
J-O解析と蛍光分光の双方が必要

Y. Sato and T. Taira, IEEE JSTQE 11, 613 (2005).

Füchtbauer-Ladenburg equation

$$\sigma_{em}(\lambda) = \frac{\lambda^2}{8\pi n^2 \tau_R} g(\nu) = \frac{\lambda^5}{8\pi n^2 c \tau_R} \frac{I_{em}(\lambda)}{\int \lambda I_{em}(\lambda) d\lambda}$$



	Nd:YVO <sub>4</sub>		Nd:GdVO <sub>4</sub>		YAG
	σ	π	σ	π	
λ <sub>e</sub> (nm)	1066.5	1064.1	1066.5	1062.8	1064.2
Δλ <sub>e</sub> (nm)	3.5	1.1	1.3	1.0	1.1
σ <sub>eff</sub> (10 <sup>-19</sup> cm <sup>2</sup> )	2.95	14.1	2.08	10.3	2.63

# 第一原理計算

## ・ 計算可能な物理量

全電子エネルギー、電子バンド構造、フォノン分散、密度、エンタルピー、音速、平衡電位、界面エネルギー、吸着エネルギー、化学反応経路、磁歪、仕事関数、応力テンソル、電子親和力……など

## 第一原理計算による導出に適した物性値

計測に大型の単結晶が必要な物性値

(ヤング率、ポアソン比などの弾性係数・線膨張係数など)

試料によるばらつきが少ない物性値

(比熱など)

## 第一原理計算による導出に適さない物性値

実用的なレベルで正確な値が計算できない物性値

(屈折率、誘電率、非線形感受率など励起準位に大きく依存する物性値)

計算コストが非常に高い物性値

(熱伝導率やスピン-軌道相互作用を考慮しなければならない物性)

# まとめ

## 分光計測

- 透過スペクトル計測（吸収係数）
- 蛍光スペクトル計測（誘導放出断面積）
- 蛍光時間分解計測（蛍光寿命）
- 最小偏角法（屈折率）
- フーリエ変換赤外分光（赤外吸収端）

分光器を用いた計測

プリズム形状の試料が必要  
光学フォノンの並進モード計測

## 熱物性計測

- レーザーフラッシュ法（熱伝導率）
- 温度変調多重反射計測（屈折率温度係数）

熱拡散係数の実測手法  
分光・熱機械計測の総合計測

## 理論計算

- Judd-Ofelt解析（自然放出寿命）
- 密度汎関数法（弾性係数）
- 直接法によるフォノン計算（比熱）
- 準調和近似によるフォノン計算（熱膨張係数）

蛍光量子効率の評価に必要  
大型材料が無くても評価可能  
熱伝導率計算に必要  
長尺材料が無くても評価可能

# References

日本語解説：『マイクロ固体フォトンクス材料：レーザー材料の物性値』  
佐藤 庸一, 平等 拓範、レーザー研究 37(4) 242 - 247 2009年4月

希土類添加濃度を疑う  
温度を変えると分光特性は変化する  
製法や濃度により分光特性は異なる  
指数関数フィットでの寿命評価は誤り  
最小偏角法による屈折率計測  
FTIRによる赤外領域の吸収評価

Q1D法による透明体の熱伝導率評価  
比熱の希土類イオン添加濃度依存性  
温度変調多重反射計測

単結晶におけるNd-Nd間相互作用解析  
Judd-Ofelt解析による量子効率評価  
Hybrid processによる異方性材料評価

- Y. Sato and T. Taira, IEEE JSTQE **11**, 613 (2005).  
Y. Sato and T. Taira, Opt. Mat. Express **2**, 1076 (2012).  
Y. Sato and T. Taira, Opt. Mat. Express **1**, 514 (2011).  
V. Lupei et al., JOSAB **19**, 360 (2002).  
Y. Sato and T. Taira, Opt. Mat. Express **4**, 876 (2014).  
Y. Sato et al., ICL'08, Lyon, France, July 7-11, Tu-P-62 (2008).  
  
Y. Sato, and T. Taira, Opt. Express, **14**, 10528 (2006).  
Y. Sato et al., Opt. Mat. **35**, 3598 (2009).  
Y. Sato and T. Taira, Opt. Mat. Express **4**, 876 (2014).  
  
V. Lupei et al., Phys. Rev. B **64**, 092102 (2001).  
Y. Sato et al., JJAP **41**, 5999 (2002).  
Y. Sato and T. Taira, IEEE JSTQE **11**, 613 (2005).