

# 高出力連続波Nd:YAGレーザーの 第二高調波発生

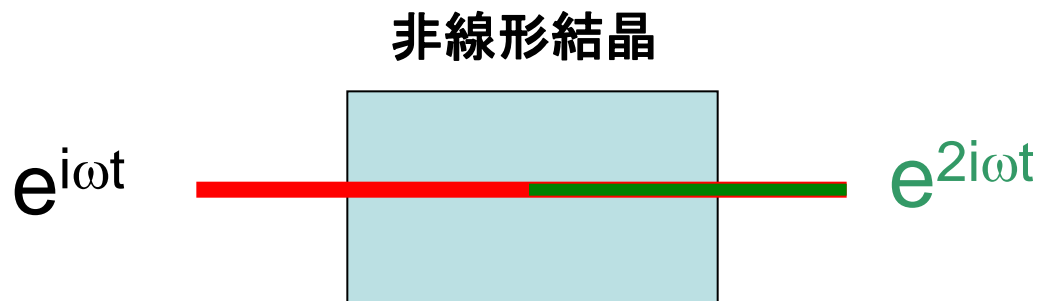
東京大学新領域 三尾研究室 M1 高山圭吾

- イントロ
  - 応用先など
  - 第2高調波発生装置の構成例
- 実験の話
  - 非線形結晶の選定
  - 光学系の設計
  - 複数の結晶を用いたSHG

# イントロ

- Nd:YAGレーザー(波長1064nmの赤外線)
- 重力波検出器用の光源としてもよく使われている
- 加工用に高出力のものが開発されている
  
- 第2高調波は波長532nmの緑色光で, こちらも応用先がある.
  - レーザープロジェクター(ディスプレイ) 数W~十数W
  - 赤外光を吸収しづらい金属の加工 数百W~
  - Ti:sapphireレーザーの励起

# 非線形光学効果を用いた第二高調波発生



- 非線形結晶中で、強い電場に対し、非線形な分極が発生

$$P = \chi E + \chi^{(2)} E^2 + \chi^{(3)} E^3 + \dots$$

$\downarrow$                        $\downarrow$                        $\downarrow$

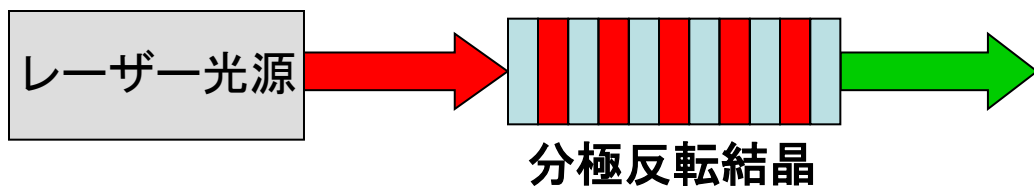
$e^{i\omega t}$                        $e^{2i\omega t}$                        $e^{3i\omega t}$

周波数 $\omega$ の光が入ると 周波数 $2\omega$ の光が発生

非線形感受率 $\chi^{(2)}$ が大きい結晶を選べば、波長を半分にできる。

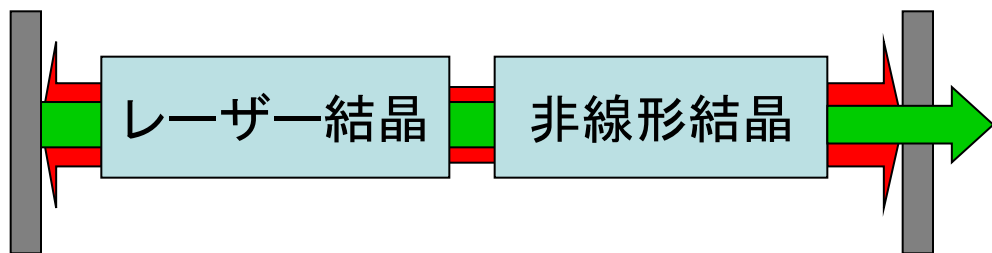
# 代表的なSHG装置の構成

## シングルパスSHG



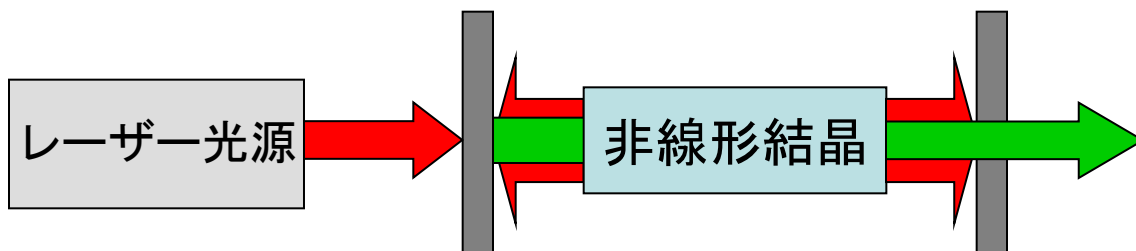
構成が簡単  
効率は上げにくい

## 内部共振器型SHG



効率が良い  
雑音が発生しやすい

## 外部共振器型SHG

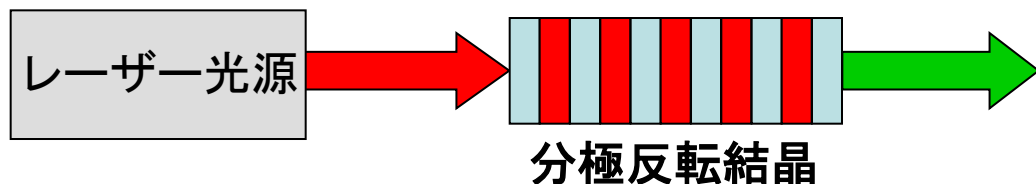


効率が良い  
構成が複雑  
単一周波数レーザーが要る

# 高出力連続波赤外線レーザーのSHG

出力(変換効率)

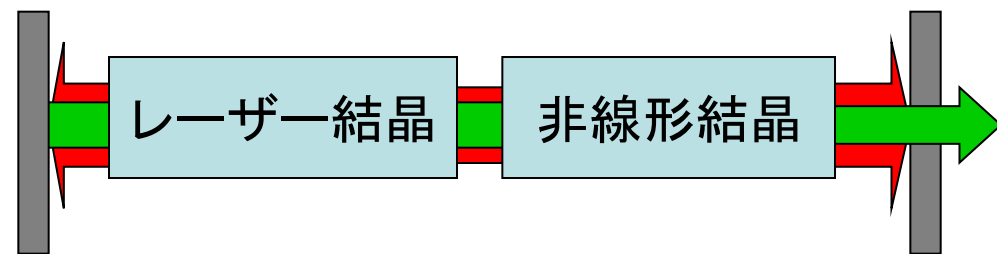
## シングルパスSHG



19 W (26.5 %)

(NIMS, 三尾研, 中央大学, 2010)

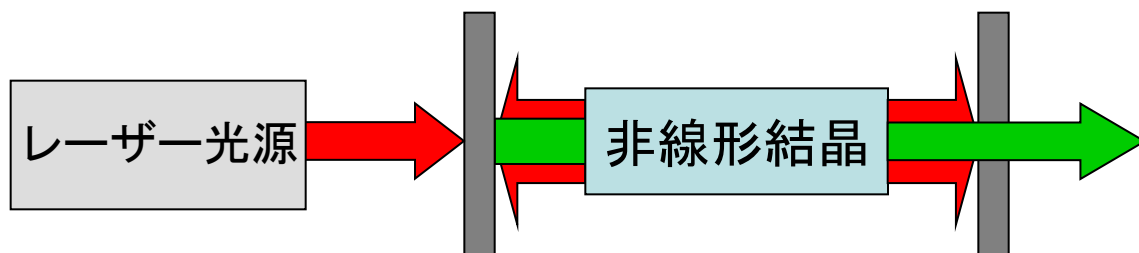
## 内部共振器型SHG



62 W

(Kaizerslautern大学, 2006)

## 外部共振器型SHG



63 W (57 %)

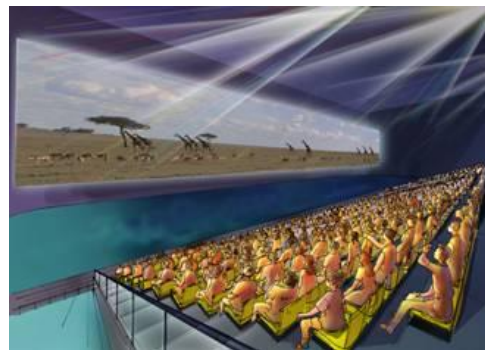
(三尾研, 2010)

構成によって, 出力, 効率も様々. 用途によって使い分けられている.

# 応用例～レーザープロジェクタ～



既存のプロジェクター(Sony HP)

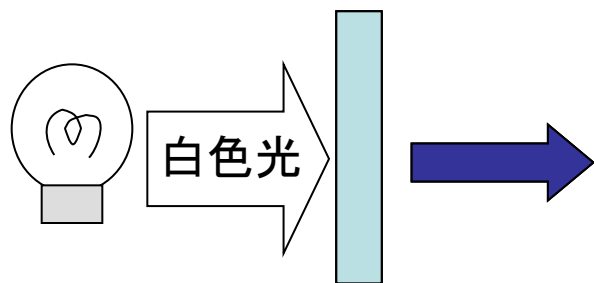


レーザーシアター(Sony HP) レーザーディスプレイ



既存のプロジェクタ

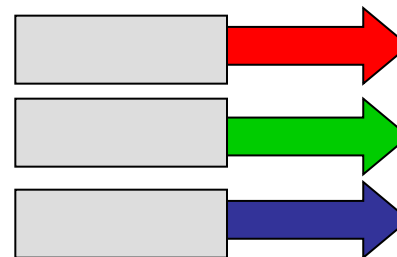
レーザープロジェクタ



フィルターで他の波長をカット

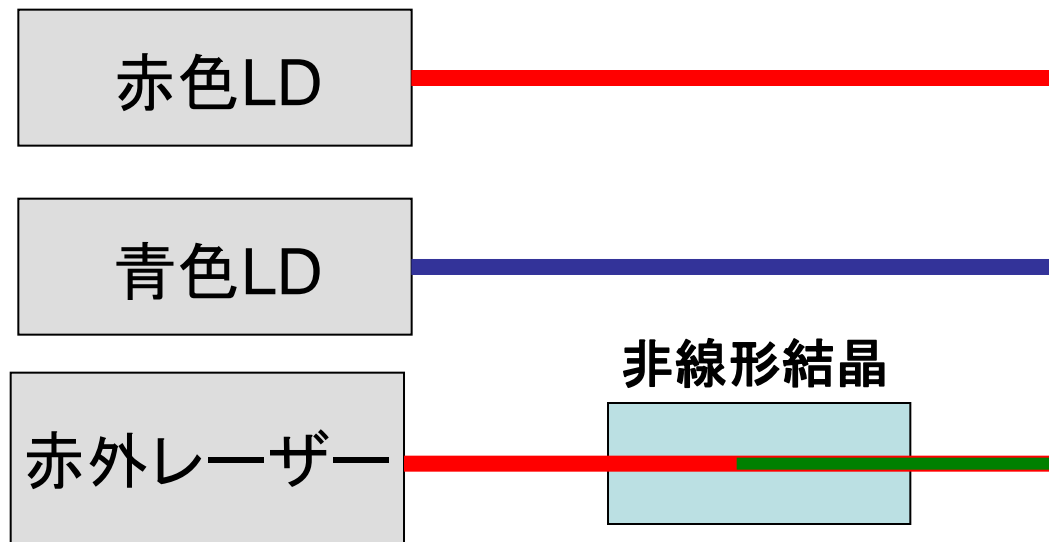
- フィルターでカットしないので省エネ
- スペクトルが狭いので、原色に近い色を再現

レーザー光源



# 緑色レーザー光が欲しい

- 赤, 青, 緑で10 W以上出る連続波レーザーが欲しい.
- 赤と青はレーザーダイオード(LD)がある.
- 緑の光源は, 高効率でWクラスの発振が直接得られるものが無い.
- 波長1  $\mu\text{m}$ 程度の赤外レーザー光を, 第二高調波発生(SHG)で半分の波長にして緑にしている.





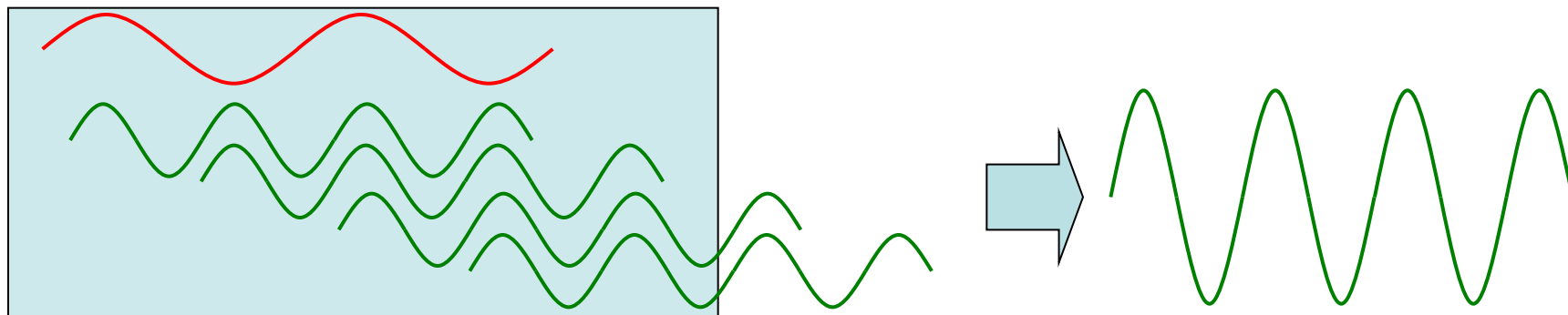
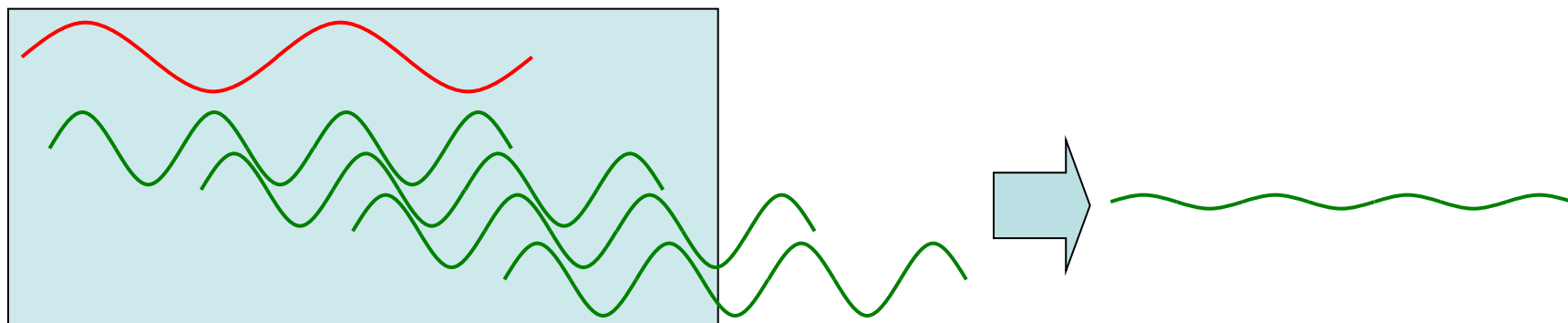
- 効率良く10 W程度の出力が得られるレーザーを, 赤外線レーザーの第二高調波発生を利用して作る.
- できるだけシンプルな, シングルパス構成で作る.

## 効率よくSHGを行うには

- 結晶を選ぶ
  - 位相整合がとれる
  - 非線形感受率が高い
  - パワーに耐えられる
- 光学系を設計する
  - 結晶への光の入れ方(結晶の形)

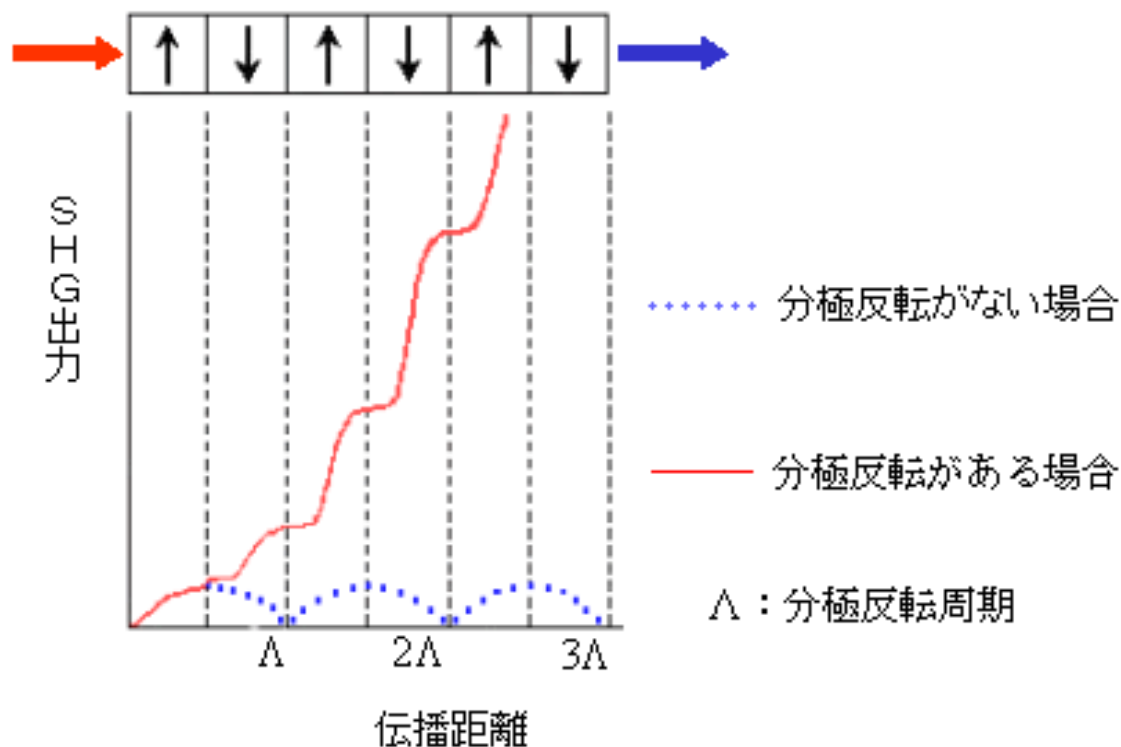
# 位相整合

結晶の各所で発生する出力の位相が，そのままでは揃っていない。



- 効率良くSHGを行うためには，位相を合わせる（位相整合をとる）必要が有る。
- 複屈折のある結晶では，角度と温度を調整して位相整合をとる。

# 擬似位相整合



- 打ち消し合いが始る場所で分極反転 (periodically poled; PP).
- 強め合う方向に緑の光の位相も反転.
- 位相整合をとるのが難しい結晶も使えるようになる.
- 温度制御は必要だが, 室温付近で使えるように設計できる.

# よく使用される非線形結晶

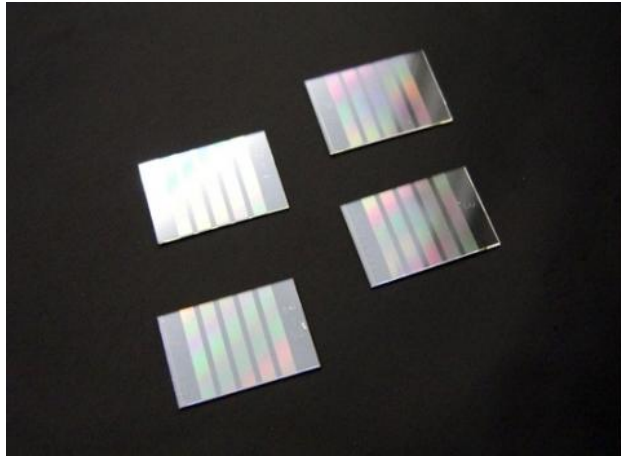
主な非線形結晶の特性

| 名称     | 化学式                               | 有効非線形感受率<br>(pm/V)    | 損傷閾値<br>(GW/cm <sup>2</sup> ) |
|--------|-----------------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| Mg:LN  | Mg:LiNbO <sub>3</sub>             | d <sub>33</sub> =16   | 0.3                           |
| Mg:SLT | Mg:LiTaO <sub>3</sub>             | d <sub>33</sub> =10   | 0.57                          |
| KTP    | KTiOPO <sub>4</sub>               | d <sub>33</sub> =11   | 0.3-3                         |
| //     | //                                | d <sub>31</sub> =2.4  | 0.3-3                         |
| LBO    | LiB <sub>3</sub> O <sub>5</sub>   | d <sub>32</sub> =0.63 | 19                            |
| BBO    | β-BaB <sub>2</sub> O <sub>4</sub> | d <sub>31</sub> =0.16 | 5以上                           |

有効非線形感受率は、よく利用される結晶方向のものを選んだ。

表のデータは、Laser Focus World Japan, 2008/09, pp.46

およびHandbook of Nonlinear Optical Crystals, V. G. Dmitriev他より. 12



PPMg:SLT

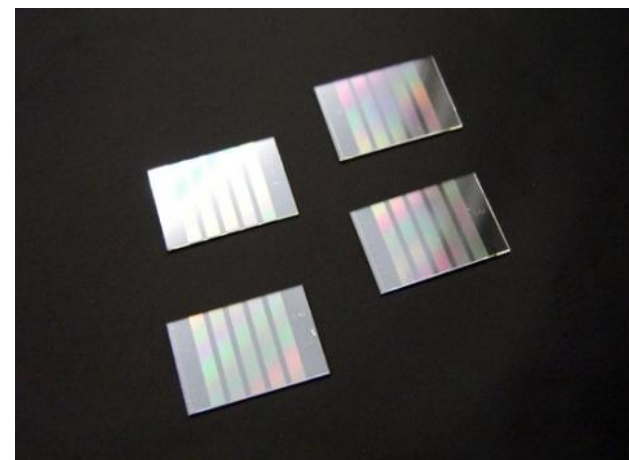
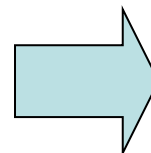


顕微鏡拡大図

- SLT: (Stoichiometric  $\text{LiTaO}_3$ )  $\text{LiTaO}_3$  結晶を作るとき, 組成比が1:1からずれるのを抑えている. 格子ひずみが小さい.
- Mgを添加して, フトリフラクティブ効果を抑えている.
- 約8  $\mu\text{m}$ ごとに分極を反転させ, 40  $^{\circ}\text{C}$ 付近で位相整合.
- 熱伝導率が高く, 熱が逃げやすいため, 十数Wの出力にも耐えられる.

## 効率よくSHGを行うには

- 結晶を選ぶ
  - 位相整合がとれる
  - 非線形感受率が高い
  - パワーに耐えられる



PPMg:SLT

- 光学系を設計する
  - 結晶への光の入れ方(結晶の形)

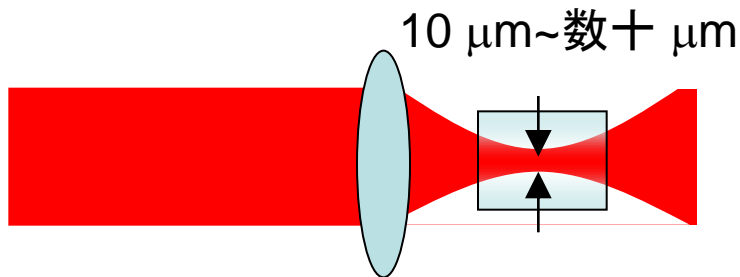
# 結晶の形と電場の強度

位相整合がとれた後, 効率を上げるには...

$E^2$ の項を使う

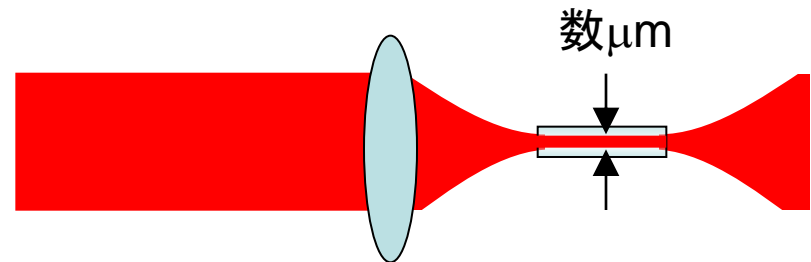
出力  $\longrightarrow$  強度の2乗に比例

ビームをレンズで絞って  
バルクに入射



- 効率を上げにくい
- 結晶に光を入れやすい

ビームを絞って  
光導波路に閉じ込める



- 高効率
- 結晶に光を入れにくい



# 先行研究

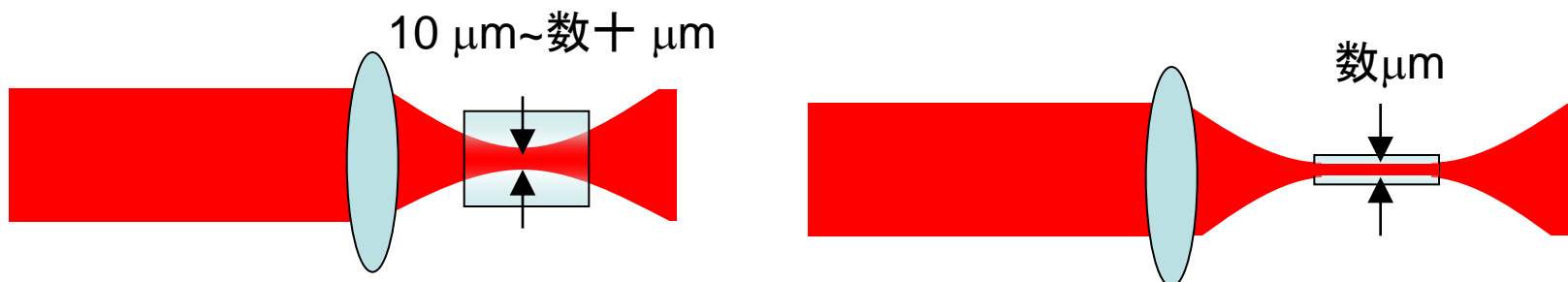
シングルパス構成で、効率よくWクラスの出力を達成している研究を挙げた。

| 年    | 結晶                              | 出力             | 変換効率       | 組織          |
|------|---------------------------------|----------------|------------|-------------|
| 1997 | PPLiNbO <sub>3</sub> (PPLN)バルク  | 2.7 W          | 42%        | Stanford U. |
| 2008 | PPLiTaO <sub>3</sub> (PPSLT)バルク | 18.8 W         | 25.3%      | Stanford U. |
| 2009 | PPMg:SLTバルク                     | 19 W           | 26.5%      | NIMS・三尾研    |
| 2009 | PPLN導波路                         | 1.6 W<br>1.2 W | 40%<br>60% | 三菱電機        |

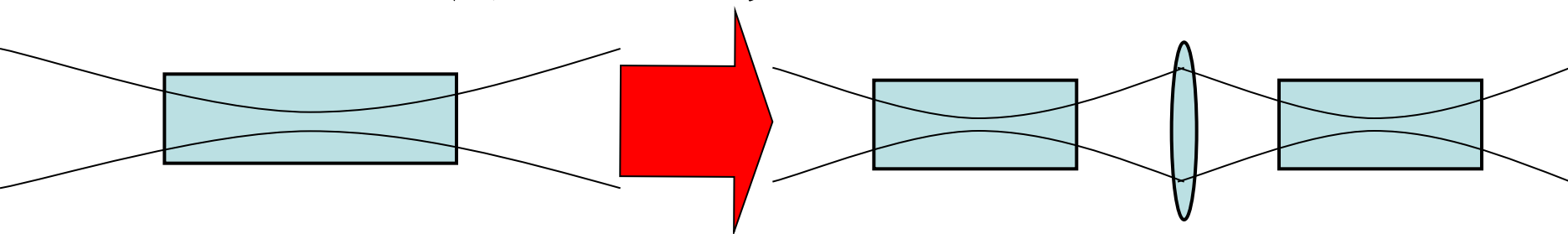
- 導波路は効率を高めやすいが、ハイパワーに耐えられない。
- LN結晶はバルクでもハイパワーに耐えられない。

 SLTのバルクで効率を高めたい。

# 複数の結晶を用いたシングルパス波長変換

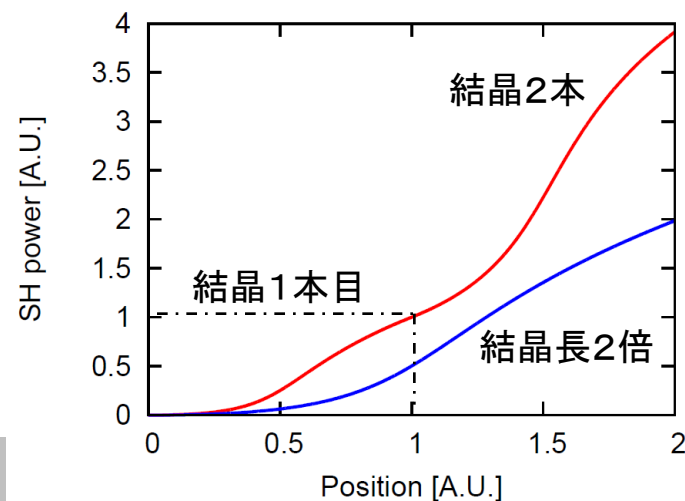


バルクでも、導波路のようにビームを閉じ込めたいが、ビームが広がってしまう。



結晶を分割し、何度もレンズで絞れば良い。

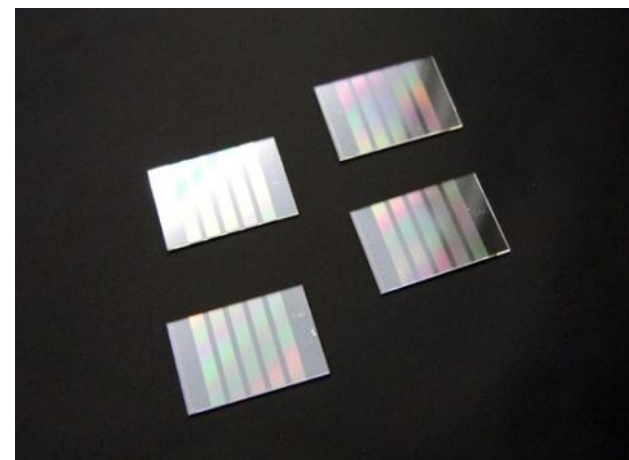
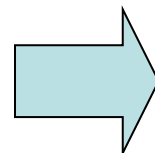
計算では、結晶1本のときの約4倍の出力。



# 効率よくSHGを行うには

- 結晶を選ぶ

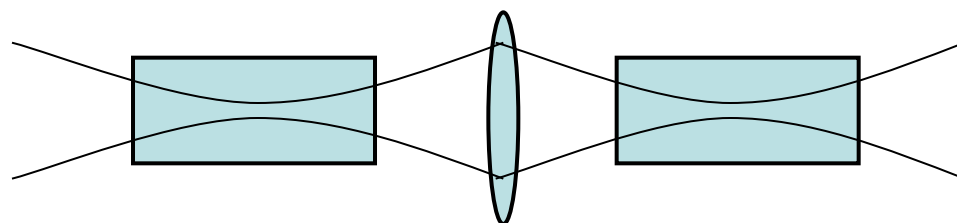
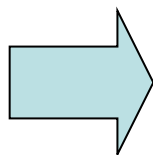
- 位相整合がとれる
- 非線形感受率が高い
- パワーに耐えられる



PPMg:SLT

- 光学系を設計する

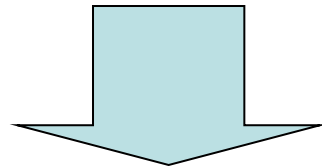
- 結晶への光の入れ方(結晶の形)



バルクの結晶で、複数本使用

# 実験の方針

- 高効率な10 Wクラスの出力のグリーンレーザーが必要とされている.
- 複数の結晶を用いて高効率化する方法を提案し, 勘案事項, 長所, 短所を洗い出すための評価を行いたい.

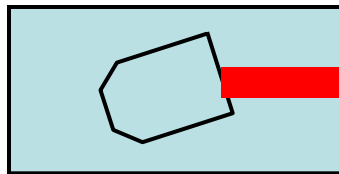
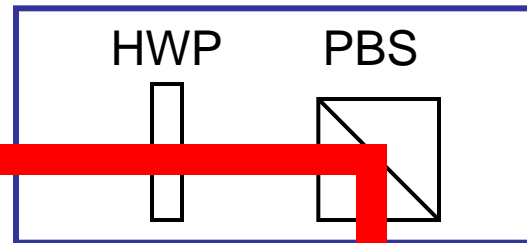


- まず, 2 W程度の出力の赤外線レーザーを光源とし, 2本の結晶を使用してSHGを行った場合の振る舞いを調べる.

# 実験に用いた光学系

Nd:YAG Laser (cw, 2 W,  
 $\lambda=1064$  nm, single frequency)

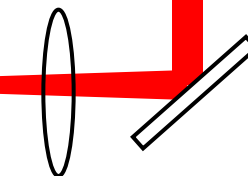
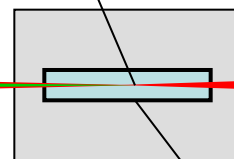
パワー調整



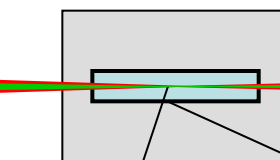
curved mirror  
 $R=500$  mm,  
HR @ 1064 nm,  
532 nm

$W_0=26$   $\mu\text{m}$

lens



power meter  
IR  
dichroic mirror  
Green  
power meter



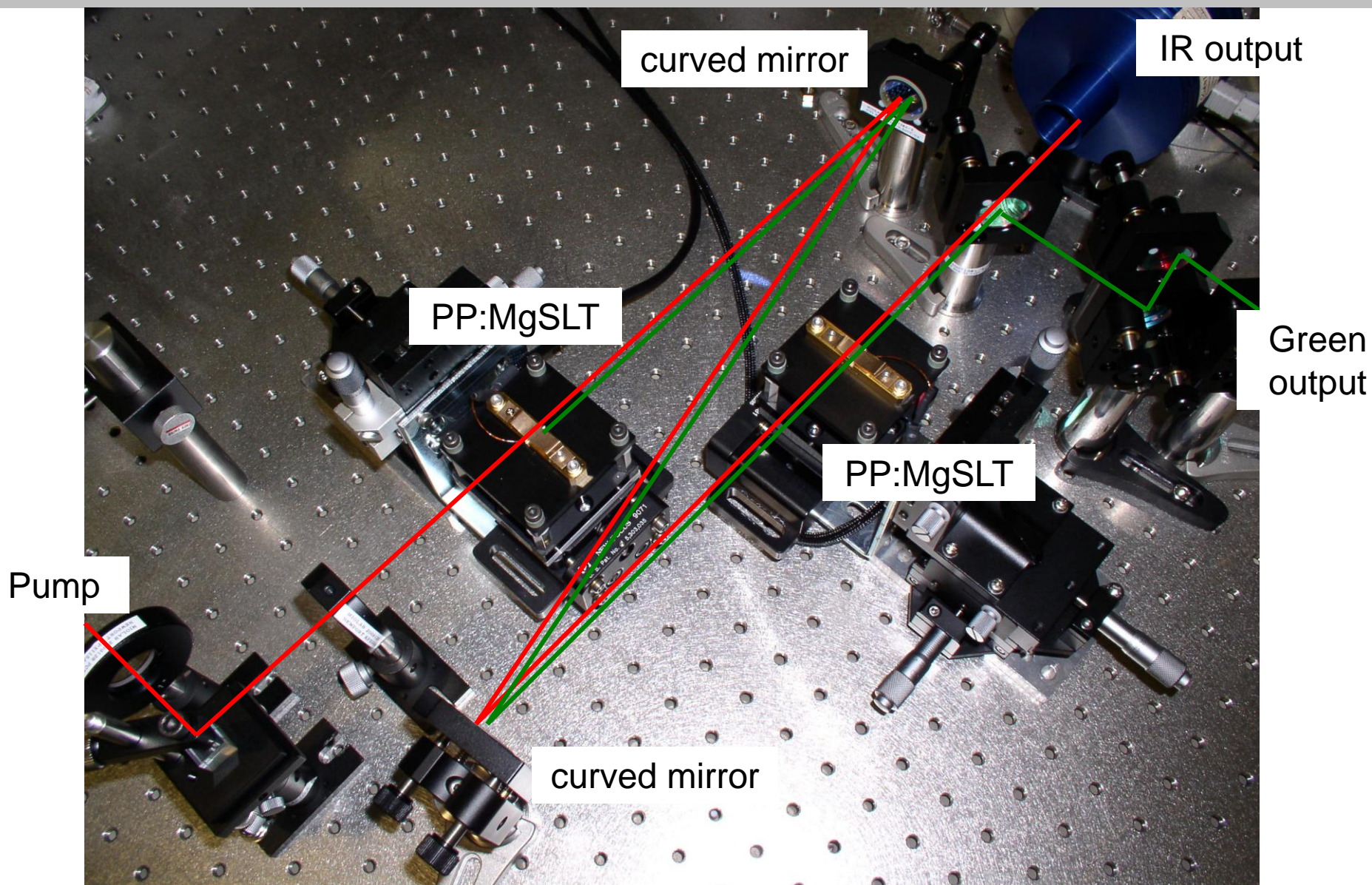
$W_0=24$   $\mu\text{m}$

PPMg:SLT  
 $L=10$  mm



curved mirror  
 $R=500$  mm,  
HR @ 1064 nm,  
532 nm

# 実験に用いた光学系

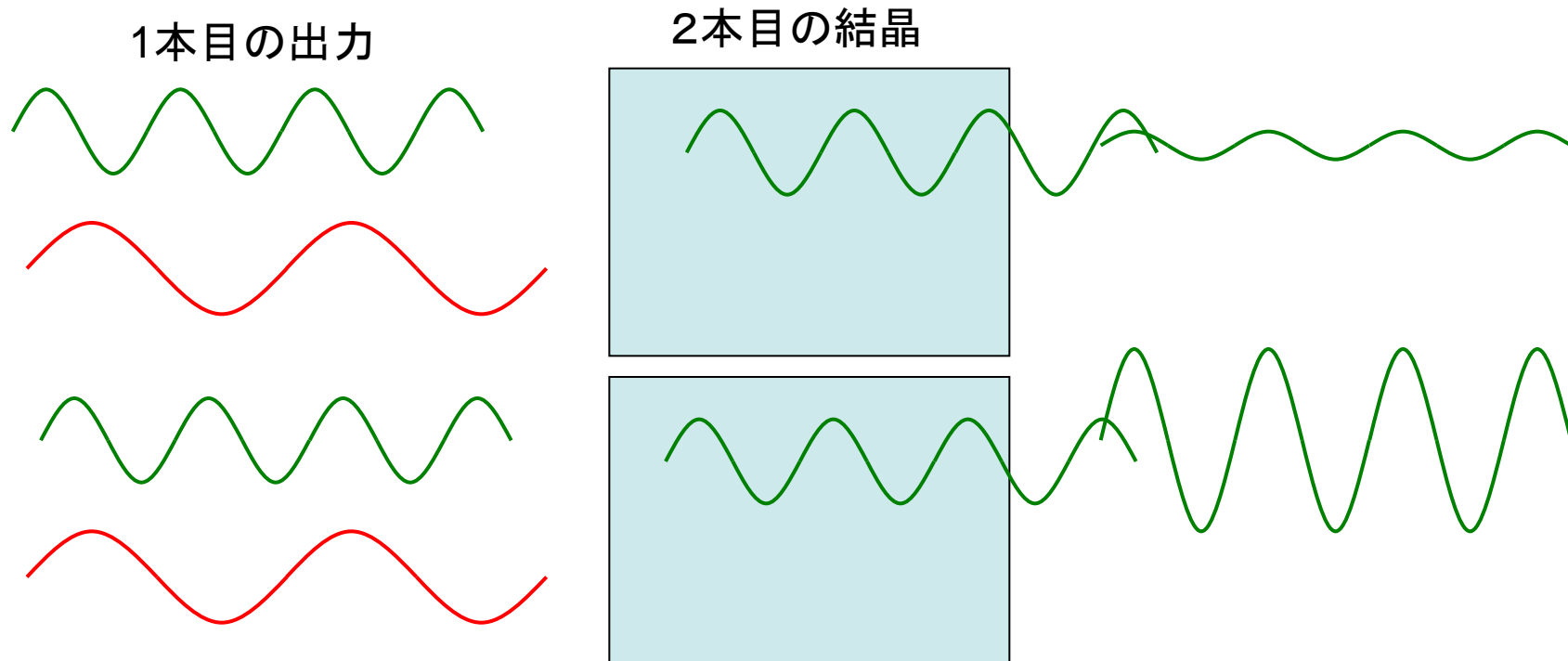


# 1本目と2本目の出力の位相整合

基本波・第二高調波間の  
位相シフト

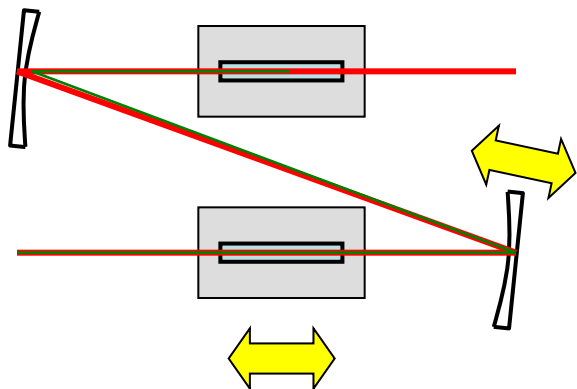


1本目の出力と2本目の  
出力の位相がずれる。

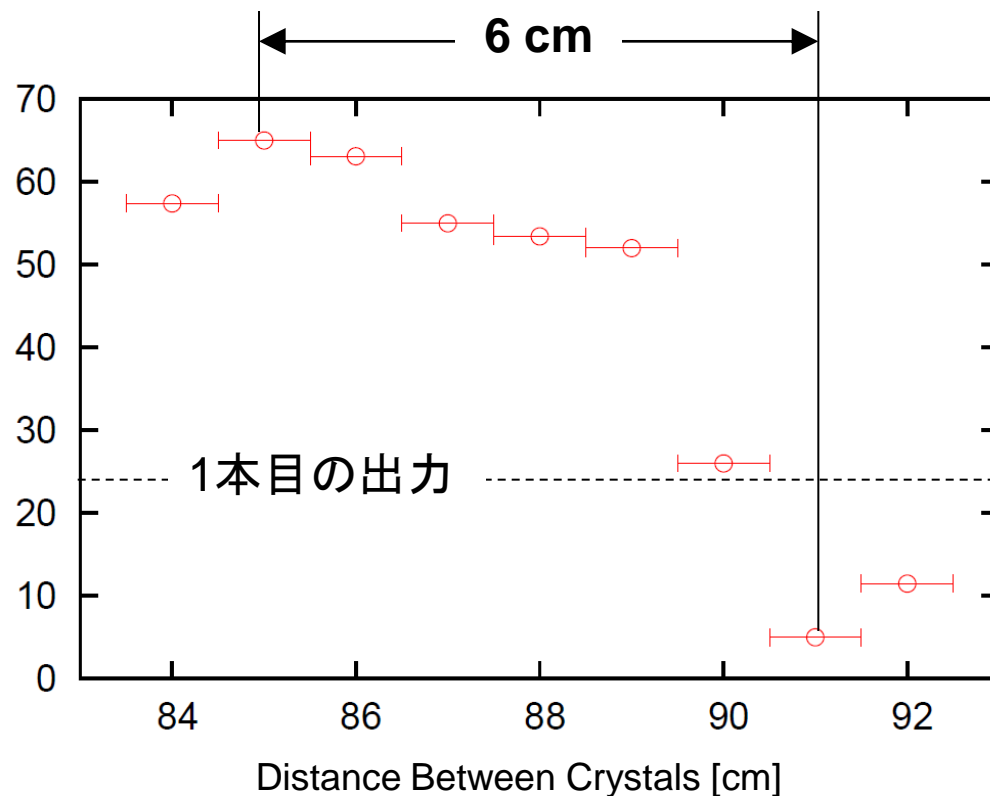


- 波長 $1\mu\text{m}$ のレーザーのSHGでは、空気中を約6 cm伝播すると赤外と緑の位相が $\pi$ ずれる。
- 結晶間の距離を調整することで、うまく重ねられるはず。

# 結晶間距離の調整による分散補償



SH Power[mW]



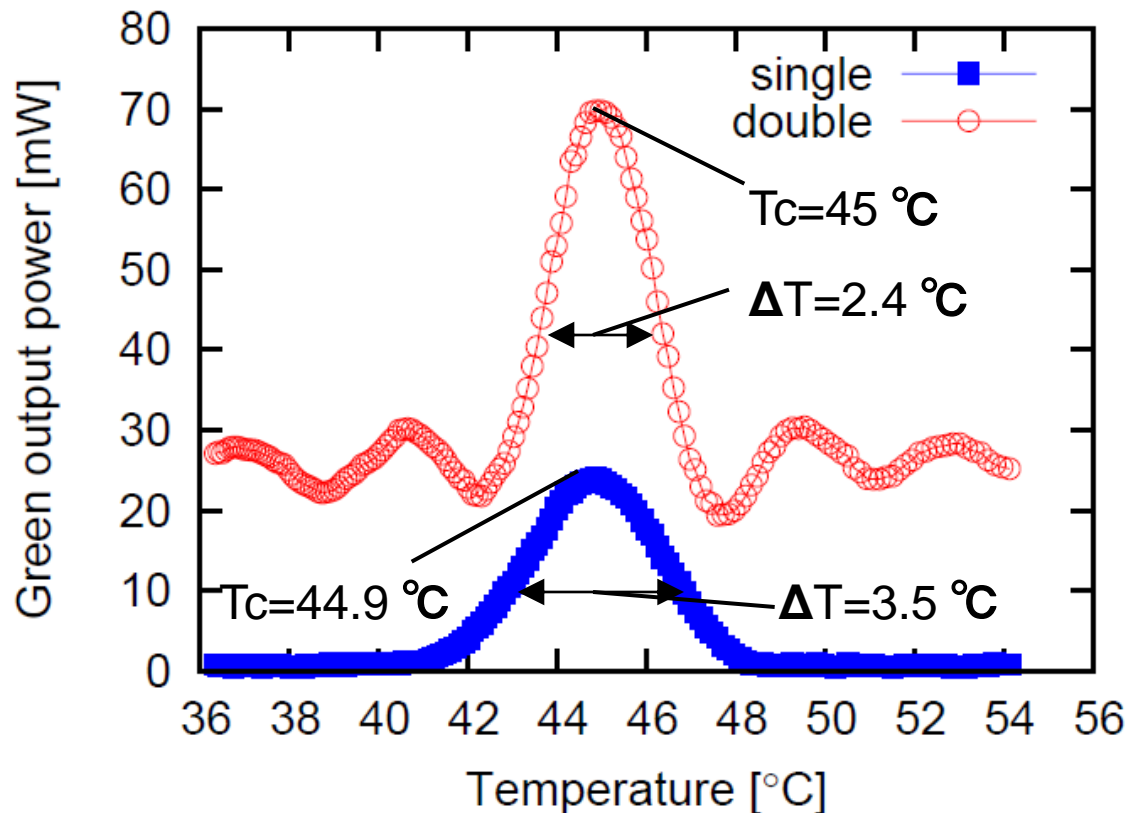
- 結晶中でのビームプロファイルが変化しないように結晶間距離を調整
- ペルチエ素子で、2結晶とも位相整合温度に温度を調整

- 結晶間距離が85 cmのときに出力が最大.
- 結晶間距離を6 cm程度変化させると、基本波と第二高調波の位相差が反転.



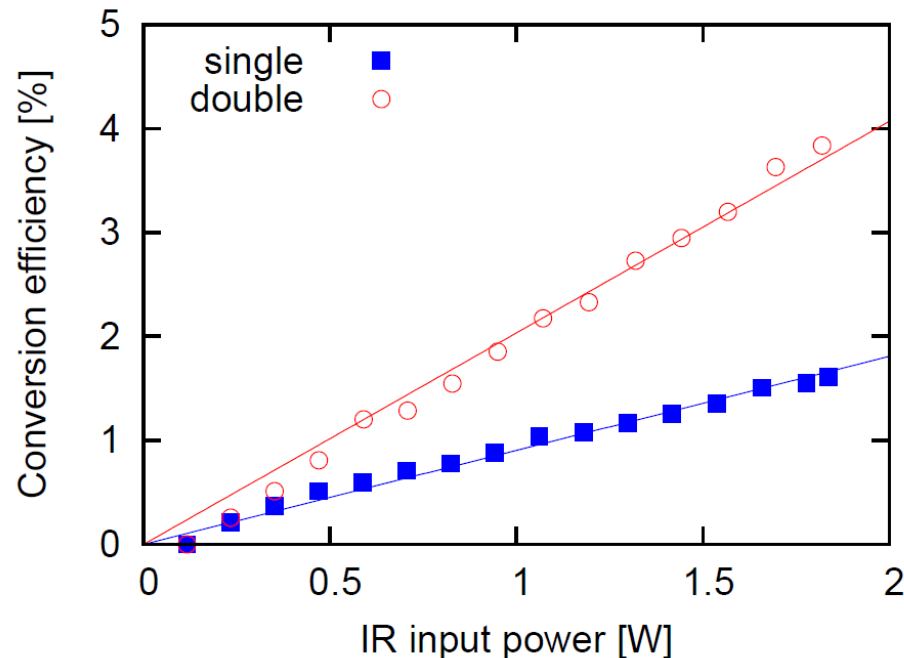
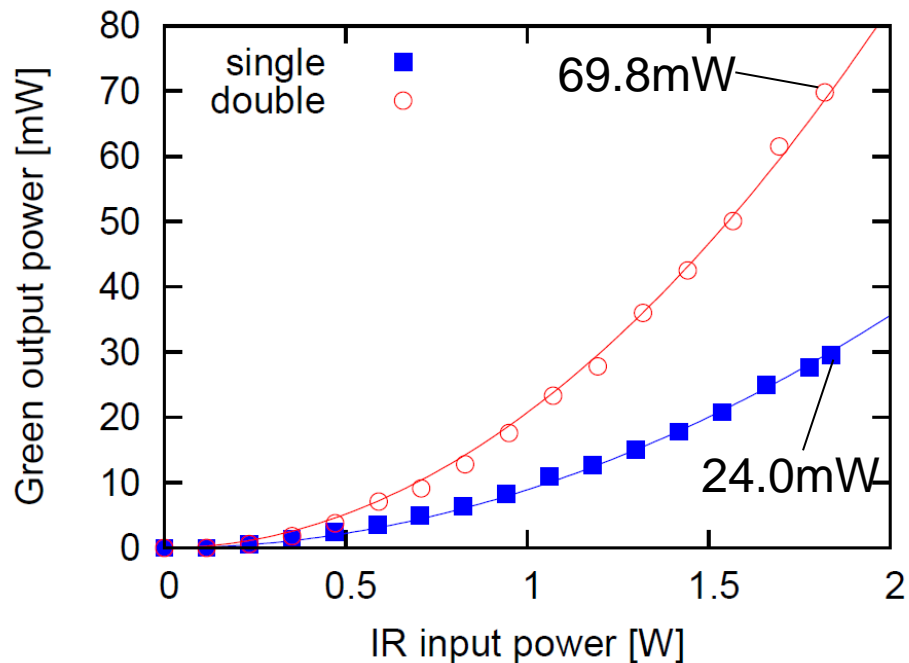
# 位相整合温度の評価

- 結晶間距離は85 cm
- 1本目の結晶の温度は位相整合温度に固定し, 2本目の結晶の温度を変化させた.



- 2本目の結晶の位相整合温度付近で, 全体の位相整合がとれた.

# 変換効率の評価



- 基本波のパワーが1.75 Wのとき、1本の結晶の**2.9倍**の出力を得た。
- 2倍の長さを持つ結晶よりも大きな出力が得られたと言える。

- 現状

- 結晶間の距離を調整して、1本目と2本目の結晶の出力の位相を合わせることができることを確認.
- 結晶1本の場合の2.9倍の出力を得ることができた.

- これから

- モードクリーナーを挿入して、効率が上昇するか見てみる.
- 出力ビームの評価を行い、光源としての評価を進める.
- 光源の出力を上げる、結晶を増やすなどして、10 W以上の出力を目指す.

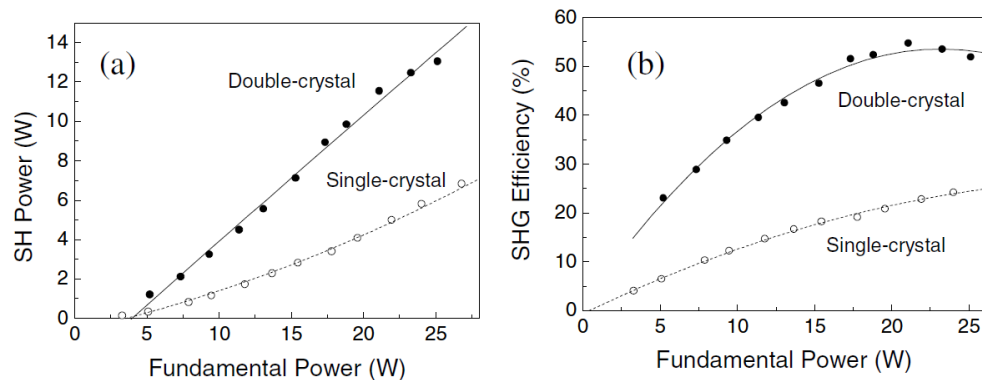


# 本研究の目的

- 複数の結晶を用いる場合に、効率悪化の要因として考えられるもの
  - 光学素子や空気による波長分散
  - 光学系の収差(色収差, 非点収差など)
  - 吸収が原因の温度勾配(高出力の場合)
- 本研究の目的
  - まず, 低出力で波長分散や収差について検討
  - 高出力で熱による効果について検討
  - 高出力・高効率シングルパス波長変換技術の開発

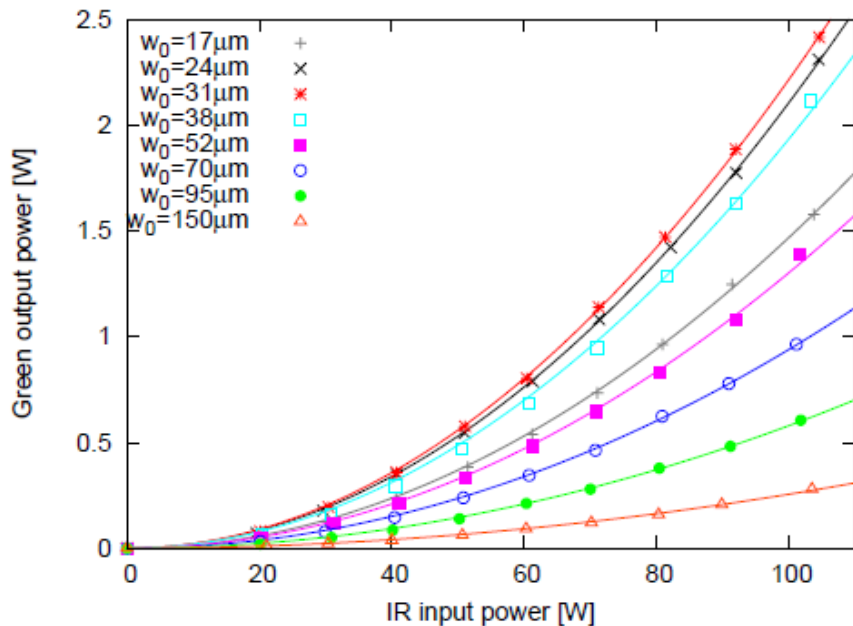
右図は複数結晶を用いて、シングルパス波長変換を行った先行研究から。

G. K. Samanta, S. C. Kumar, K. Devi, and M. Ebrahim-Zadeh, "55%-Efficient, 13-W, Single-Pass SHG of a CW Yb-Fiber Laser in a Double-Crystal Scheme," in *Conference on Lasers and Electro-Optics*, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2010), paper CWQ7.

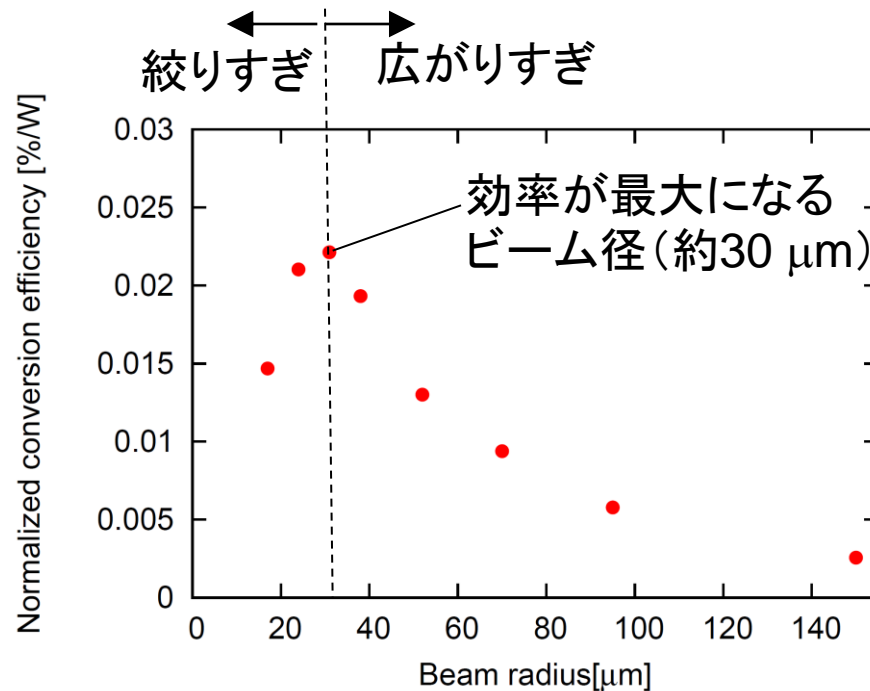


- 複数結晶を用いた波長変換についての数値計算
  - Gerald T. Moore and Karl Koch, "Efficient frequency conversion at low power with periodic refocusing," *J. Opt. Soc. Am. B* **16**, 781-791 (1999)
- 複数結晶を用いたSHG実験
  - G. K. Samanta, S. C. Kumar, K. Devi, and M. Ebrahim-Zadeh, "55%-Efficient, 13-W, Single-Pass SHG of a CW Yb-Fiber Laser in a Double-Crystal Scheme," in *Conference on Lasers and Electro-Optics*, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2010), paper CWQ7.
- ダブルパス波長変換において、波長分散をウェッジ付きのPPLN結晶を用いて補償している実験
  - G. Imeshev, M. Proctor, and M. M. Fejer, "Phase correction in double-pass quasi-phase-matched second-harmonic generation with a wedged crystal," *Opt. Lett.* **23**, 165-167 (1998)

# 入射ビームとSHG出力の関係(バルク型)



赤外光と緑色光のパワーの比



ビーム径と変換効率の関係

- 長さ2 cmのLBO結晶を用いて、ビーム径を変えながら入力パワーと出力パワーを記録.