

「ジャイアント・マイクロフォトンクスによる高出力極限固体レーザー」

極限波長変換に向けたQPM-PowerChipの開発

(項目⑥⑬⑭⑮)

石月秀貴^{1,2}

- 1 理化学研究所・放射光科学研究センター・先端光源開発研究部門
兵庫県佐用郡佐用町光都1-1-1
- 2 自然科学研究機構・分子科学研究所・社会連携研究部門
愛知県岡崎市明大寺町字西郷中38

目次

- ・担当する実施項目
- ・関連する基礎項目説明
- ・研究内容と方針
- ・前年度(令和2年度)実施内容
- ・実験室整備
- ・まとめ

担当する実施項目

⑥ 局所加熱・応力印加による極性制御法の開発

波長変換のQPMに求められる周期的な極性反転には光リソと組み合わせた局所電場印加や、局所加熱・応力印加による極性制御法(STAMP法: 判子を押しように局所加圧する手法。ここでは高温にして水晶の極性制御を行う)の開発を図る。具体的には、結晶加熱加圧装置、微細パターンニング用フォトリソシステム、分極反転素子作製装置などにより、波長選択域拡大のための微細周期化／スペクトル取扱自由度拡大のための任意構造化／高出力化に適した大口径化／用途に適した素子材料選択肢拡大などを検討する。

⑬ 高品位の非線形材料開発

MgLN(Mg-doped LiNbO₃)/MgLT(Mg-doped LiTaO₃)、水晶につき材料育成に立ち回り検討を加え、それぞれの非線形光学定数 d や損失係数 α_a を、まだ評価の進んでいないTHz波帯で評価し特性を求める。併せて、これまで開発したマイクロチップレーザにImPACTで開発した利得アパーチャを用いて非線形光学結晶のレーザ損傷耐性やフォトリソ耐性などのレーザ耐性評価を行い、高品位の非線形材料開発につなげる。

⑭ QPM特性の評価

チャープを含めたQPM構造をMgLN(Mg-doped LiNbO₃)/MgLT(Mg-doped LiTaO₃)や水晶に造り込んだ後にそのQPM特性を評価し、それらの結果を実施項目⑬に反映させる。

⑮ THz波への極限波長変換素子の開発

実施項目⑬及び⑭を通してTHz波への極限波長変換素子であるQPM-PowerChipを開発する。まずは1mJ出力の構成検討を行う。なお、水晶は150nmまでのVUV域まで透明な優れた材料であることからUV並びにVUV域でのQPM-水晶の可能性も検討する。

担当する実施項目

⑥ 局所加熱・応力印加による極性制御法の開発

波長変換のQPMに求められる周期的な極性反転には光リソと組み合わせた局所電場印加や、局所加熱・応力印加による極性制御法(STAMP法: 判子を押しように局所加圧する手法。ここでは高温にして水晶の極性制御を行う)の開発を図る。具体的には、結晶加熱加圧装置、微細パターンニング用フォトリソシステム、分極反転素子作製装置などにより、波長選択域拡大のための微細周期化／スペクトル取扱自由度拡大のための任意構造化／高出力化に適した大口径化／用途に適した素子材料選択肢拡大などを検討する。

⑬ 高品位の非線形材料開発

MgLN(Mg-doped LiNbO₃)/MgLT(Mg-doped LiTaO₃)、水晶につき材料育成に立ち回り検討を加え、それぞれの非線形光学定数 d や損失係数 α_d を、まだ評価の進んでいないTHz波帯で評価し特性を求める。併せて、これまで開発したマイクロチップレーザにImPACTで開発した利得アパーチャを用いて非線形光学結晶のレーザ損傷耐性やフォトリソ耐性などのレーザ耐性評価を行い、高品位の非線形材料開発につなげる。

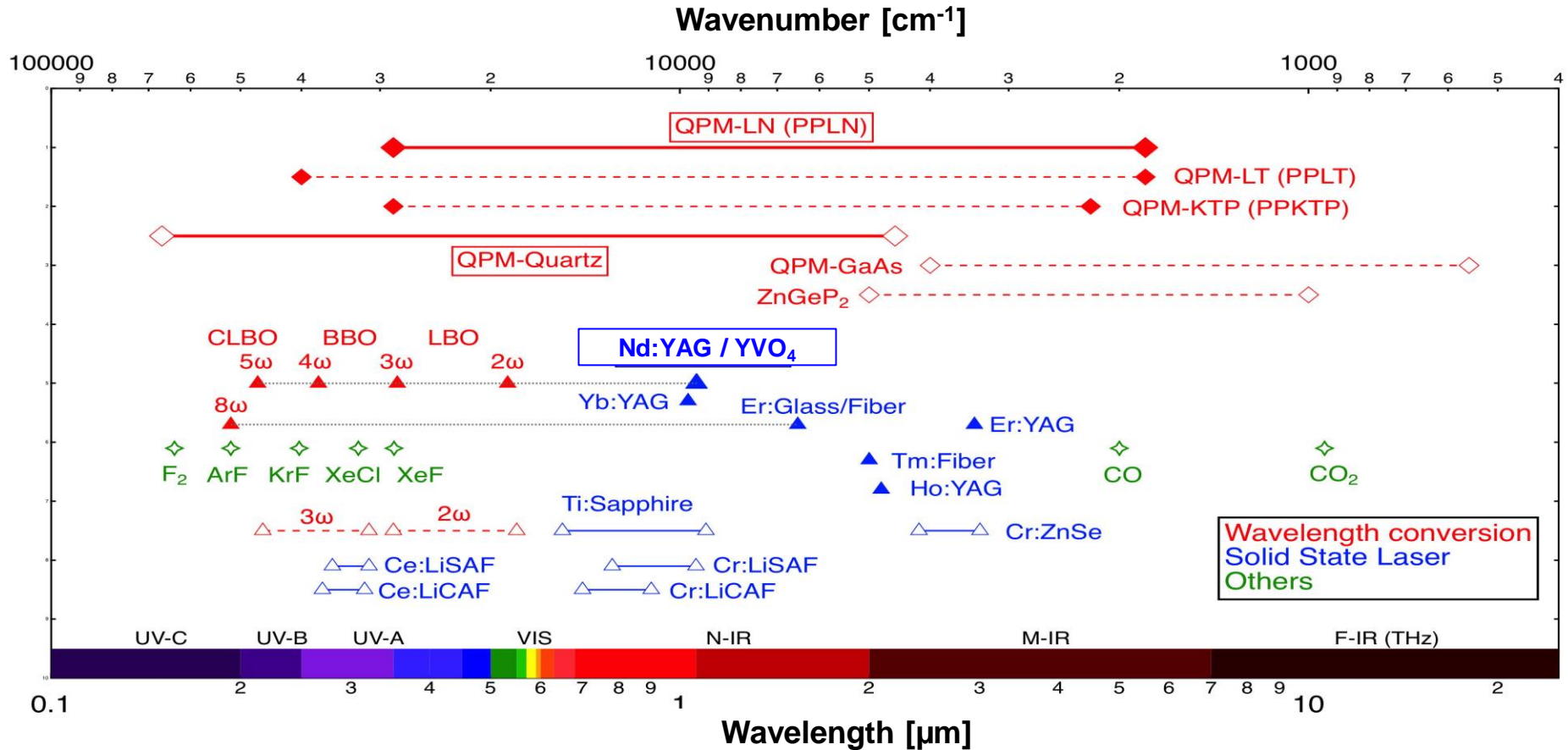
⑭ QPM特性の評価

チャープを含めたQPM構造をMgLN(Mg-doped LiNbO₃)/MgLT(Mg-doped LiTaO₃)や水晶に造り込んだ後にそのQPM特性を評価し、それらの結果を実施項目⑬に反映させる。

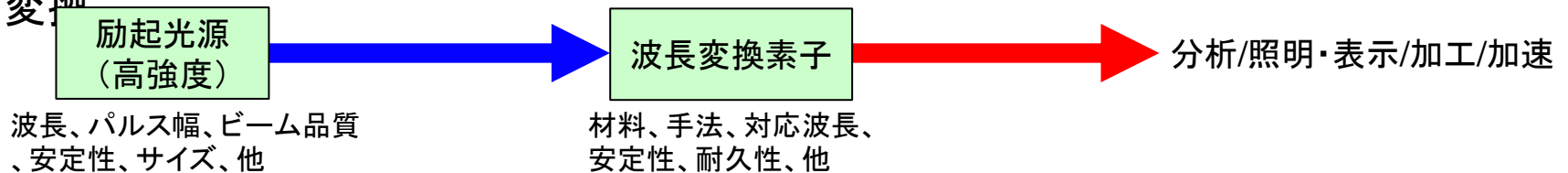
⑮ THz波への極限波長変換素子の開発

実施項目⑬及び⑭を通してTHz波への極限波長変換素子であるQPM-PowerChipを開発する。まずは1mJ出力の構成検討を行う。なお、水晶は150nmまでのVUV域まで透明な優れた材料であることからUV並びにVUV域でのQPM-水晶の可能性も検討する。

非線形光学波長変換



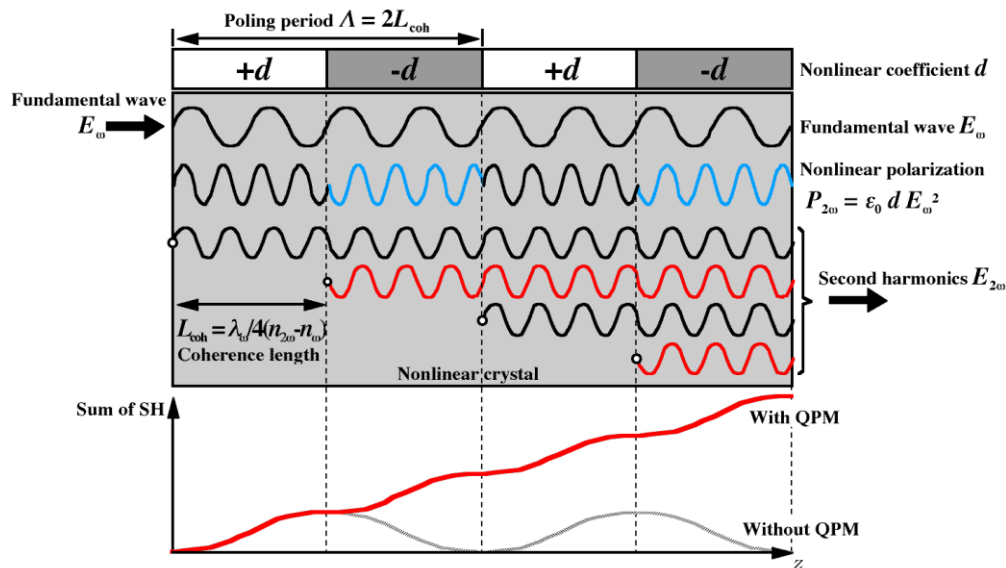
➡ 直接発振不可能なコヒーレント光を得るため、非線形光学特性を利用しレーザー光波長を変換



QPM : 擬似位相整合

QPM (Quasi Phase Matching : 擬似位相整合)

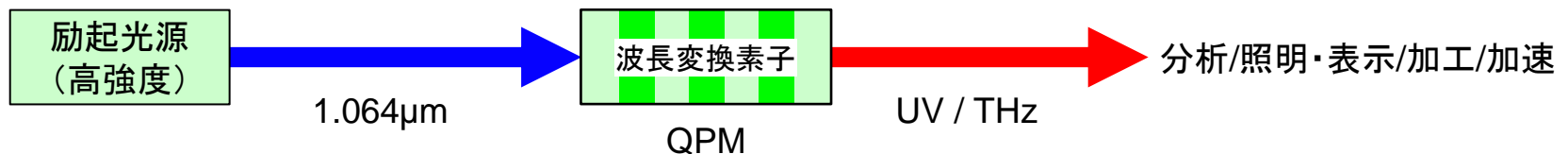
- ・人為的な周期構造形成による位相整合
- ・材料透明域内の全範囲で適用可



BPM

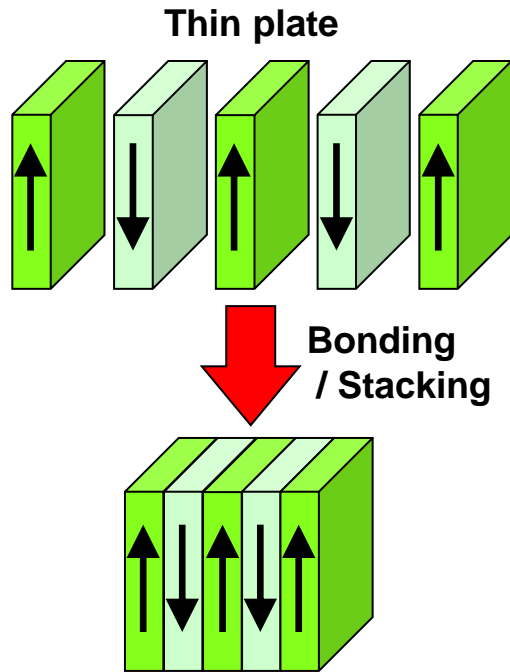
(Birefringent Phase Matching : 複屈折位相整合)

- ・複屈折を利用した位相整合
- ・自然の特性(屈折率分散)に依存
- ・整合条件に制限あり



QPM素子の作製手法

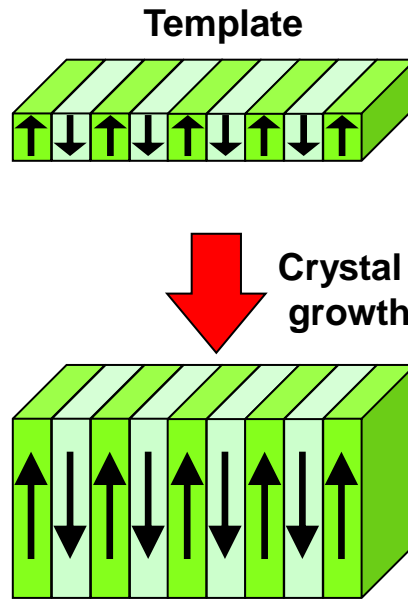
薄板多積層



All materials

- 😊 材料制限無し
- 😊 大口径化容易
- 😞 板厚に制限

結晶成長



Semiconductor

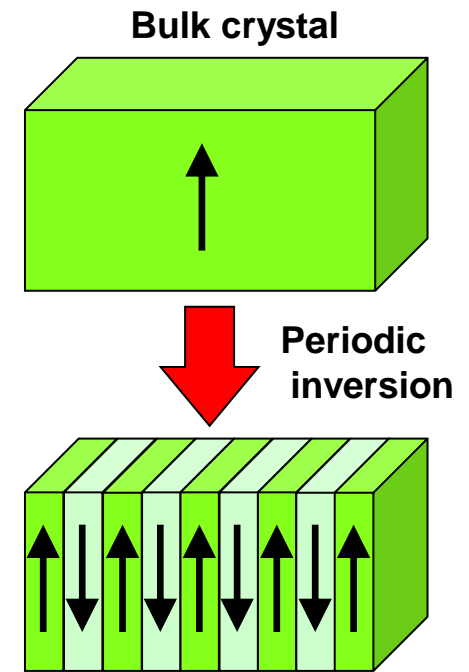
(GaAs, GaP)

Ferroelectrics

(KTiOPO₄)

- 😊 高精細パターンニング可
- 😞 材料に制限有り
- 😞 大口径化に制限有り

バルク中への構造形成



Ferroelectrics

(LiNbO₃, LiTaO₃, KTiOPO₄)

Quartz (*under developing*)

- 😊 高精細パターンニング可
- 😞 材料に制限有り
- 😞 大口径化に制限有り

LiNbO₃ & LiTaO₃



LiNbO₃, LiTaO₃

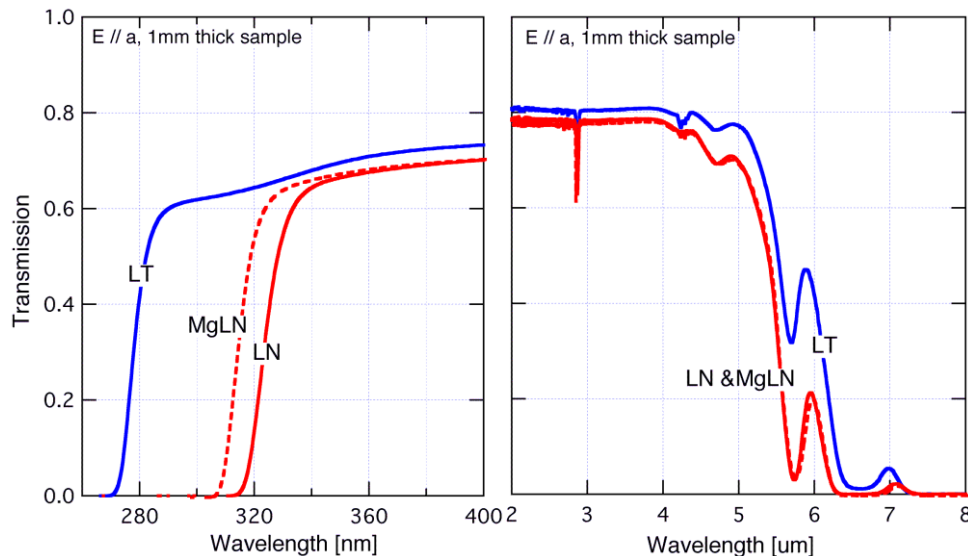
- Wide transparent range
 - LN : 330 nm ~ 5 μm
 - LT : 280 nm ~ 5 μm
- Large nonlinearity
 - LN : $d_{33} \sim 25$ pm/V
 - LT : $d_{33} \sim 14$ pm/V
- Large EO, AO, & NLO effect
- High-quality crystal
- Combination with waveguide technique
- Improved property by Mg-doping

Mg-doped congruent LiNbO₃, LiTaO₃ for QPM

- Expansion of transmission range
- Improved resistance to PR-damage
- Low coercive field E_C
 - MgLN (5mol%, RT): $E_C \sim 5$ kV/mm
 - MgLT (8mol%, RT) : $E_C \sim 4$ kV/mm

QPM device using LiNbO₃, LiTaO₃

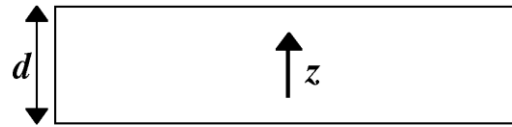
- PP Mg-doped congruent LiNbO₃ (*PPMgLN*, *PPLN*)
- PP Mg-doped stoichiometric LiTaO₃ (*PPSLT*)



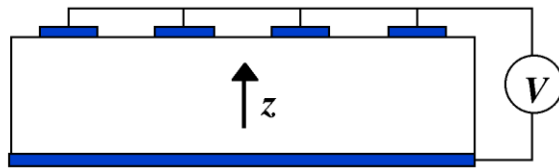
LNおよびLTにおける電圧印加分極反転

Field poling

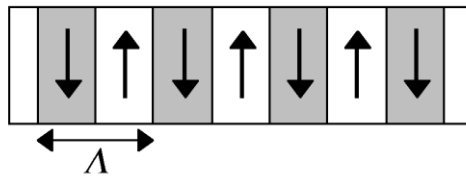
(1) Original Crystal : z-cut



(2) High-voltage application

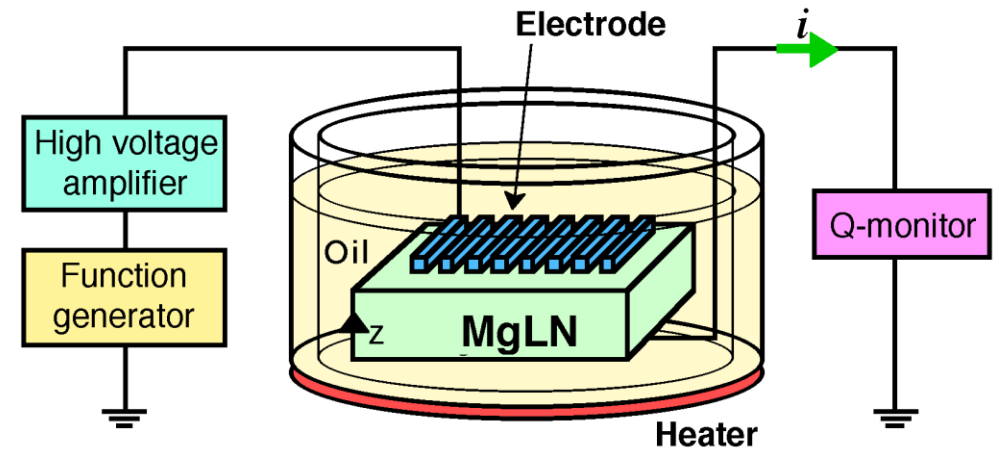


(3) Periodically poled crystal



$$E = V/d > E_c \text{ (Coercive field)}$$

Temperature-elevated field poling



MgLN

Mg-doping	: 5 mol%
Cut	: z-cut
Thickness	: 10 mm (~12.7mm max)

QPM structure

Period	: ~ 30 μm (for OPO by 1.064 μm)
Width	: 10 mm (typical)
Length	: ~ 40 mm (typical)

Periodical poling

Voltage	: ~ 33 kV (for 10 mm)
Temperature	: 120 °C
Pulse shape	: Triangle
Pulse rep.	: 2ms

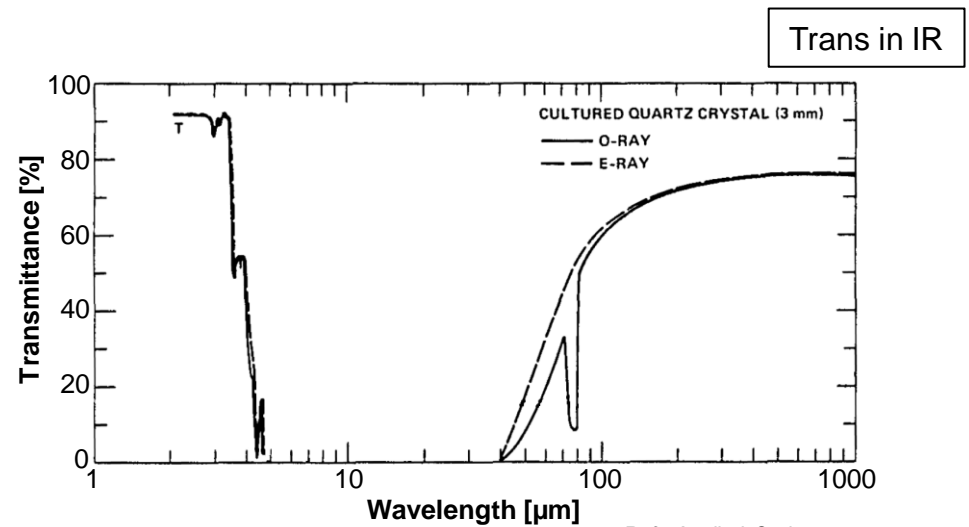
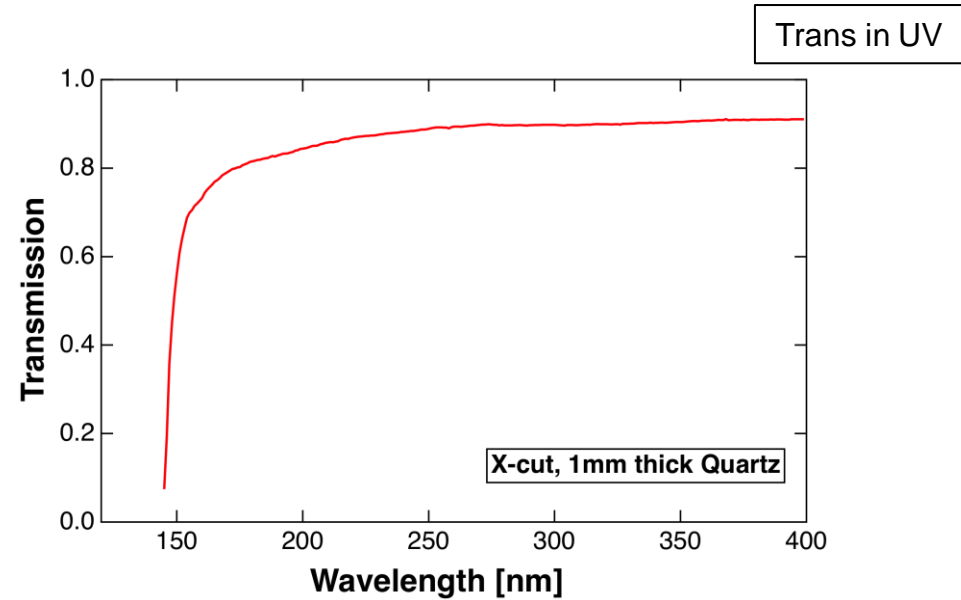
水晶

Crystal quartz

- High durability for laser irradiation
- High transparency in UV (~150 nm) & IR
- High quality crystal available
- No hygroscopic susceptibility
- Nonlinear material (used for 1st SHG)
- **BPM impossible** (small birefringence)



Photo from Wikipedia



Ref : Applied Optics v22, pp.4069

非線形光学材料

Material	Quartz	LBO	LN
Formula	SiO ₂	LiB ₃ O ₅	LiNbO ₃
Structure	Trigonal	Orthorhombic	Trigonal
Point group	32	mm2	3m
Transparent range	0.15 - 2.8 μm, IR	0.16 - 2.6 μm	0.33 – 5 μm, IR (in low T)
Refractive index @1.064 μm	$n_o = 1.5341$ $n_e = 1.5428$	$n_x = 1.5656$ $n_y = 1.5905$ $n_z = 1.6055$	$n_o = 2.234$ $n_e = 2.144$
Hydroscopic Susceptibility	None	Low	None
Laser damage threshold @1.064 μm	396 GW/cm ² @ 31 ns (a)	45 GW/cm ² @1.1 ns (b)	~300 MW/cm ² @10 ns (c)
Nonlinear coefficient (pm/V) @1.064 μm	$d_{11} = 0.30$ (d)	$d_{31} = 0.67$ $d_{32} = 0.85$ $d_{33} = 0.04$ (e)	$d_{31} = 4.6$ $d_{33} = 25.2$ (d)
Wavelength conversion by BPM	X	OK	OK
Electric field poling for QPM	X	X	OK



Photo from Wikipedia

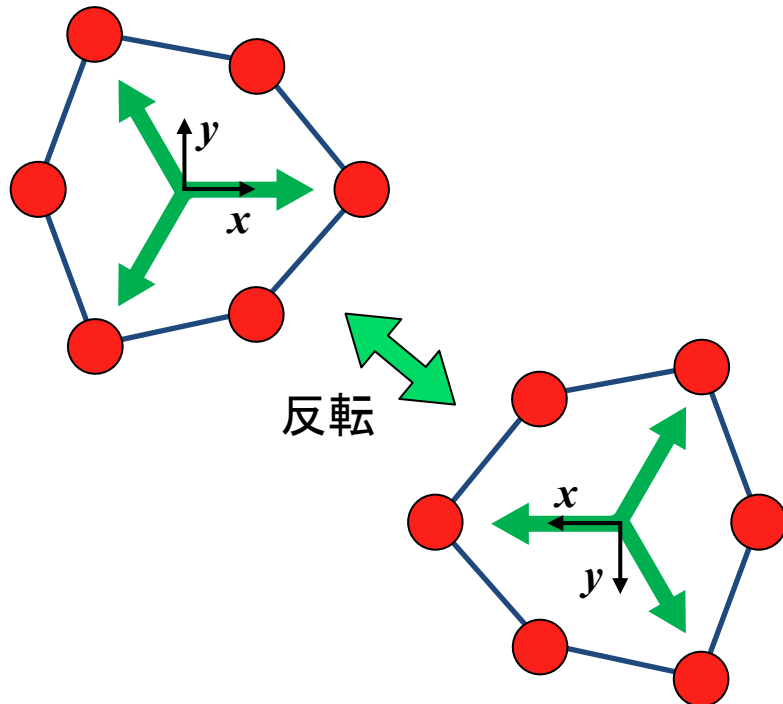
- (a) JQE 16,814 (1980)
- (b) JJAP 38,L129(1999)
- (c) Authors
- (d) JOSAB 14, 2268 (1997)
- (e) JQE 28,2057 (1992)

実施項目⑥

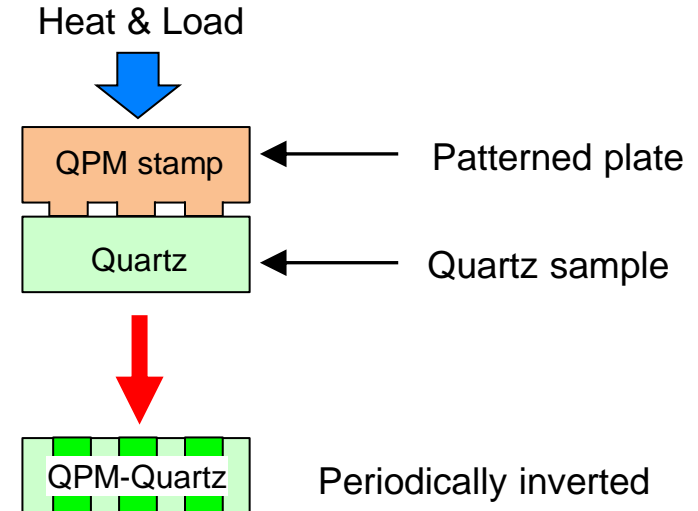
⑥ 局所加熱・応力印加による極性制御法の開発

波長変換のQPMに求められる周期的な極性反転には光リソと組み合わせた局所電場印加や、局所加熱・応力印加による極性制御法 (**STAMP法**: 判子を押しのように局所加圧する手法。ここでは高温にして水晶の極性制御を行う) の開発を図る。具体的には、結晶加熱加圧装置、微細パターンニング用フォトリソシステム、分極反転素子作製装置などにより、波長選択域拡大のための微細周期化／スペクトル取扱自由度拡大のための任意構造化／高出力化に適した大口径化／用途に適した素子材料選択肢拡大などを検討する。

Polarity inversion of Quartz



QPM stamp method



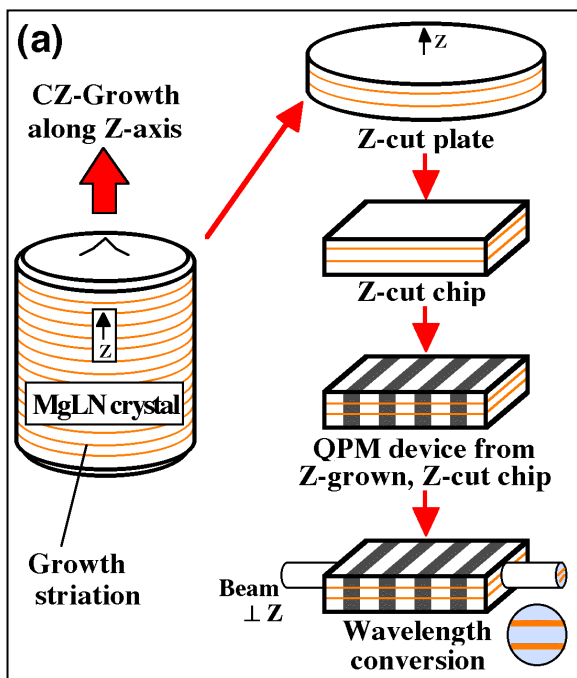
Ref: H. Ishizuki, et. al., Opt. Express, 28, 6505 (2020).

実施項目⑬

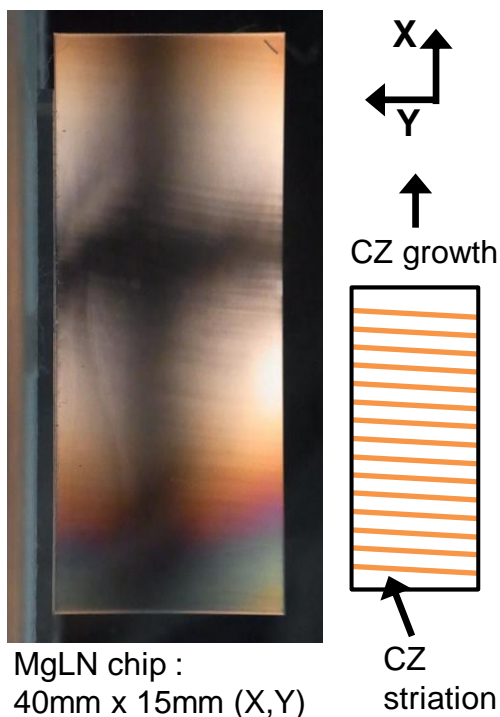
⑬ 高品位の非線形材料開発

MgLN(Mg-doped LiNbO₃)/MgLT(Mg-doped LiTaO₃)、水晶につき材料育成に立ち回り検討を加え、それぞれの非線形光学定数 d や損失係数 α_a を、まだ評価の進んでいないTHz波帯で評価し特性を求める。併せて、これまで開発したマイクロチップレーザにImPACTで開発した利得アパーチャを用いて非線形光学結晶のレーザ損傷耐性やフォトリフ耐性などのレーザ耐性評価を行い、高品位の非線形材料開発につなげる。

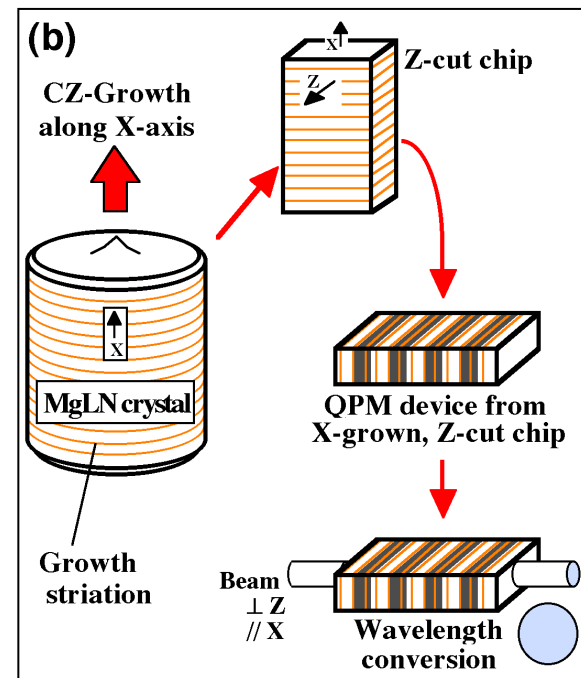
CZ Striation in Z-grown LN



CZ-growth striation

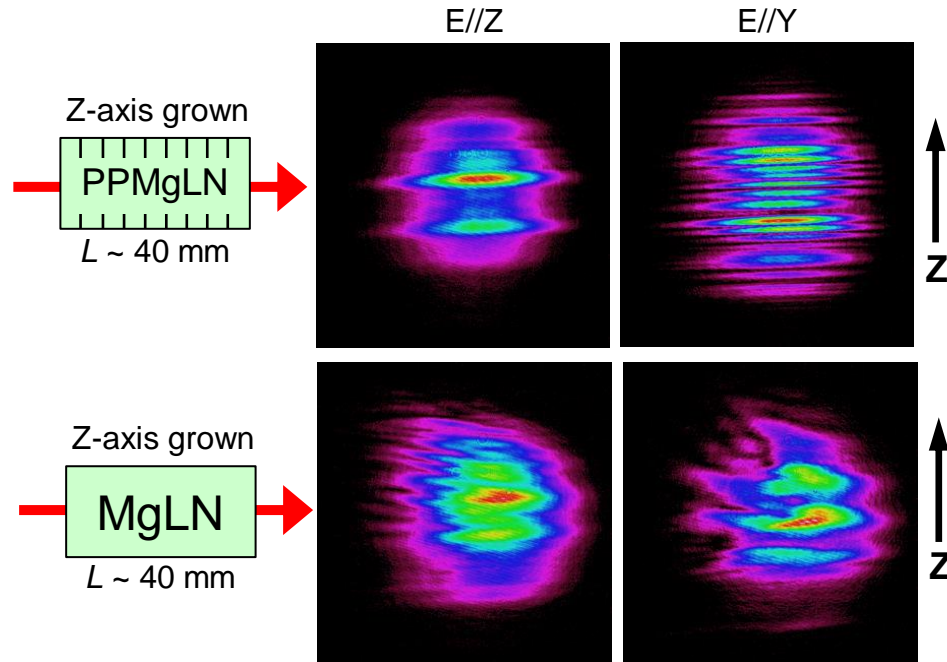
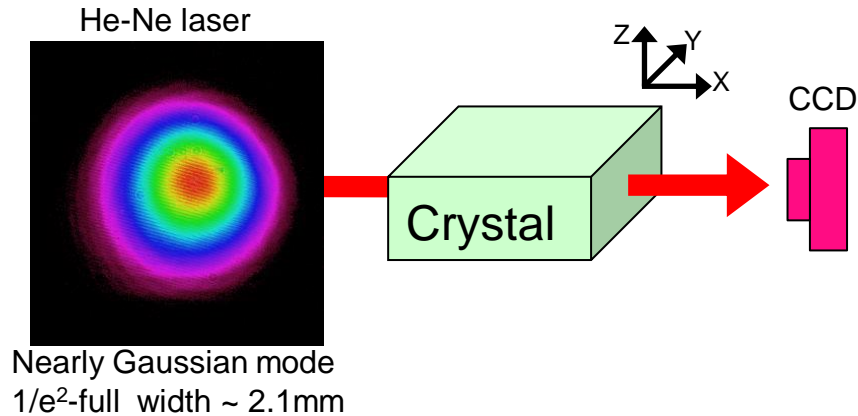


X-grown LN for improvement

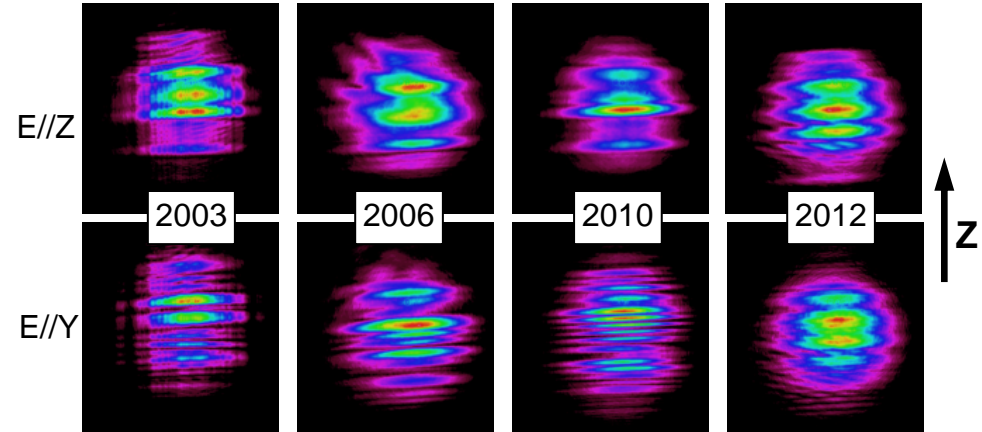


項目⑥補足：Z軸CZ育成MgLNのビーム透過波面

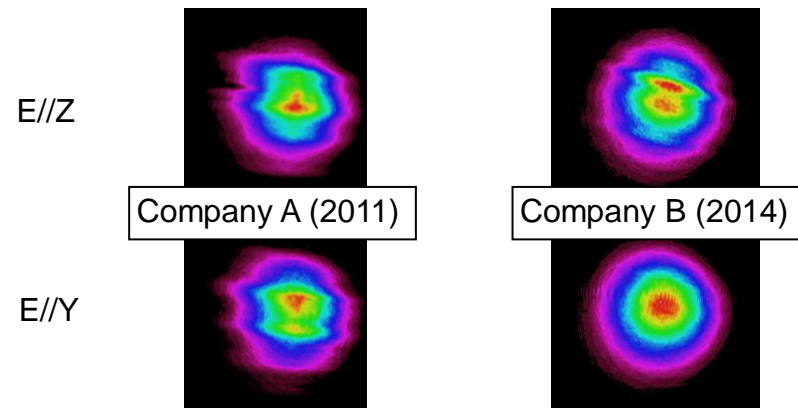
Evaluation of beam distortion
in Z-grown PPMgLN and non-PP MgLN



Distortion on Years



Distortion from various crystal company



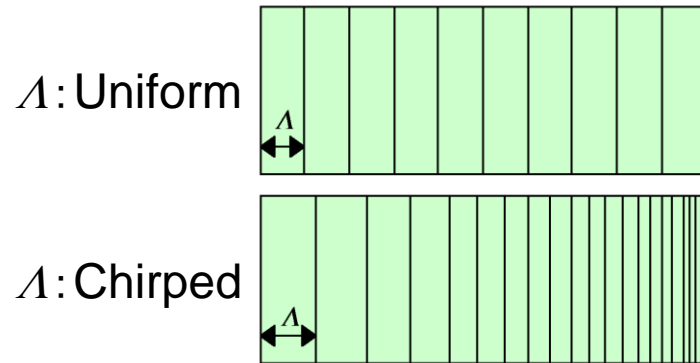
- ・縞はPPの有無に無関係
- ・過去の長期間のMgLN結晶で育成縞あり
- ・縞の周期や頻度はランダム
- ・MgLN以外にMgLTでも確認
- ・育成軸方位によらず、Z軸育成でもX軸育成でも確認
- ・メーカー問わず(国内、海外メーカーともに確認)

実施項目⑭

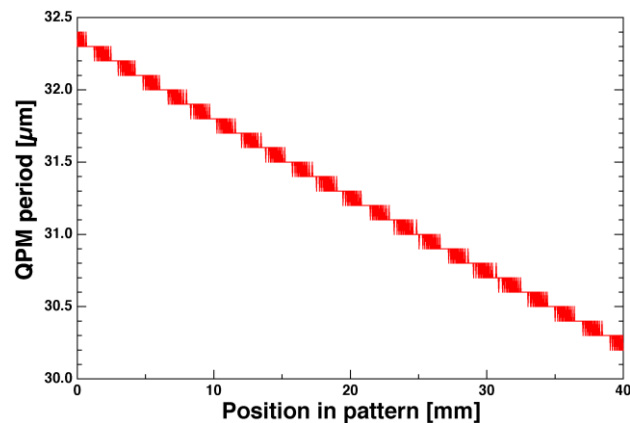
⑭ QPM特性の評価

チャープを含めたQPM構造をMgLN(Mg-doped LiNbO₃)/MgLT(Mg-doped LiTaO₃)や水晶に造り込んだ後にそのQPM特性を評価し、それらの結果を実施項目⑬に反映させる。

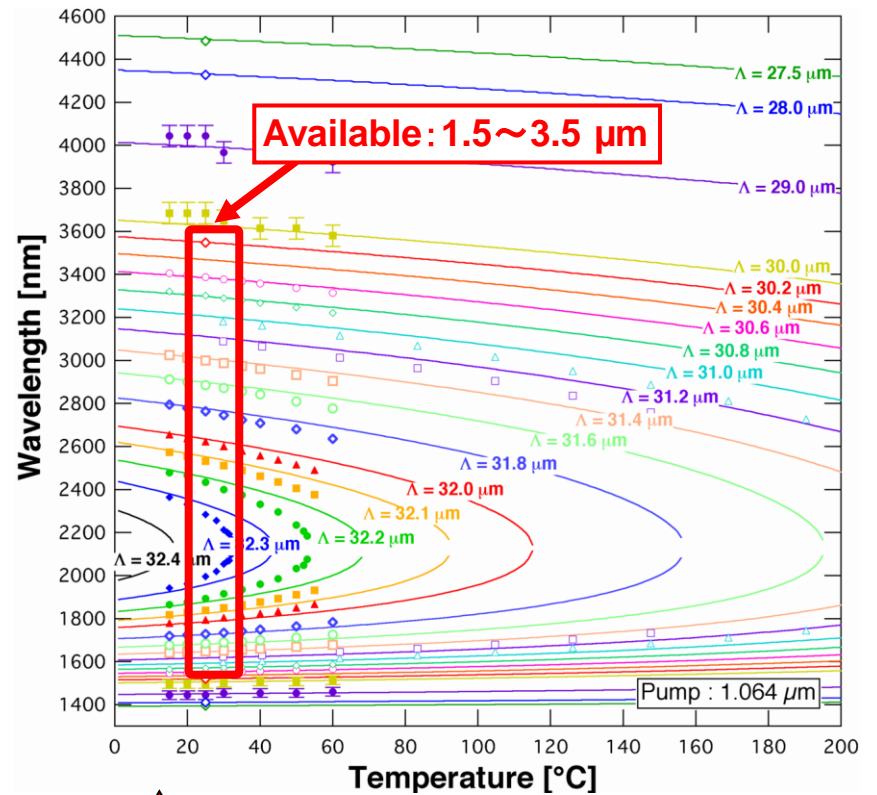
Chirped QPM structure



Example of Chirped PPLN structure

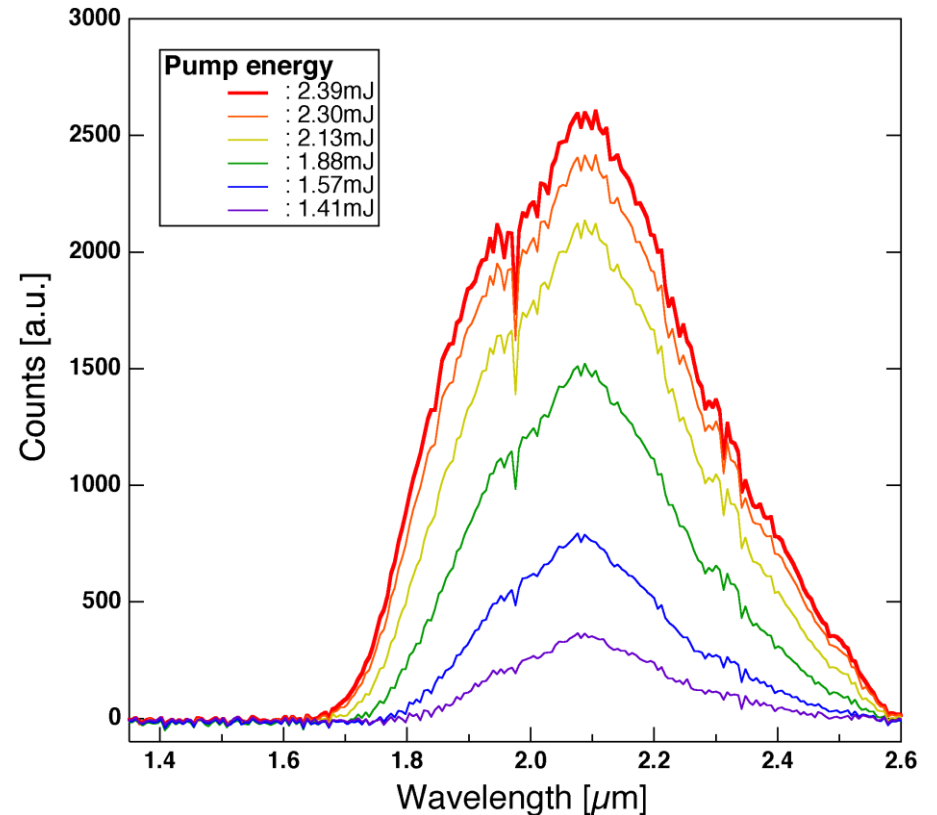
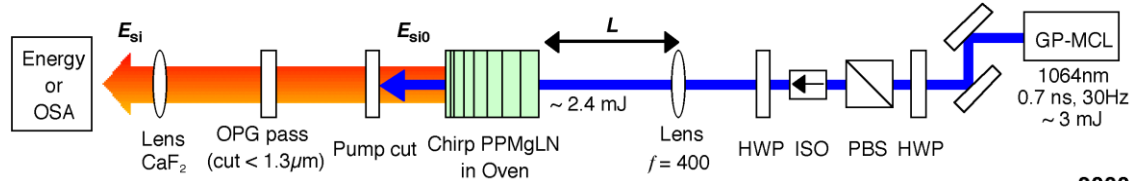


Wavelength on T for Chirped PPLN



項目⑭補足：チャープ構造QPM素子と広帯域波長変換

Broadband 2um band generation by chirped PPLN



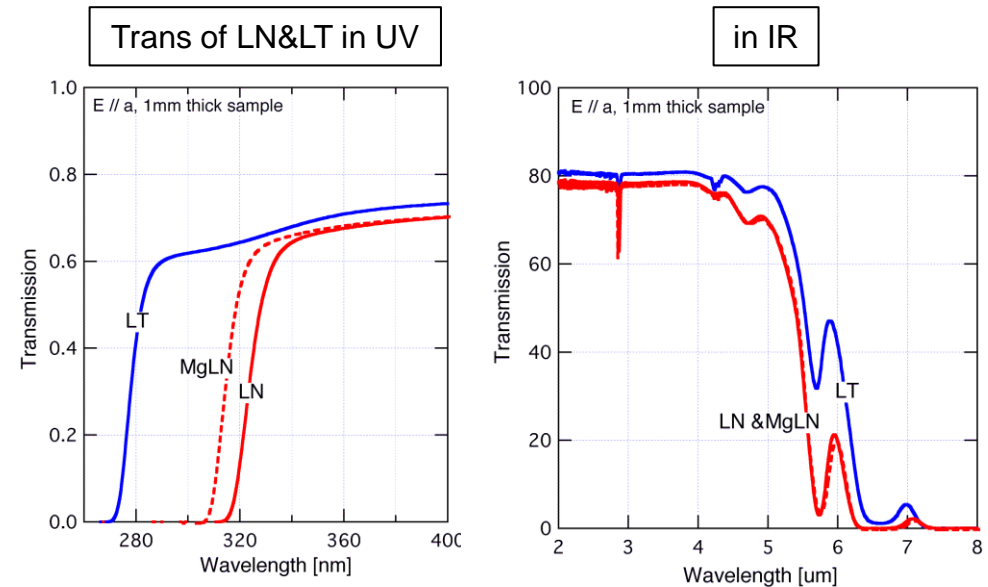
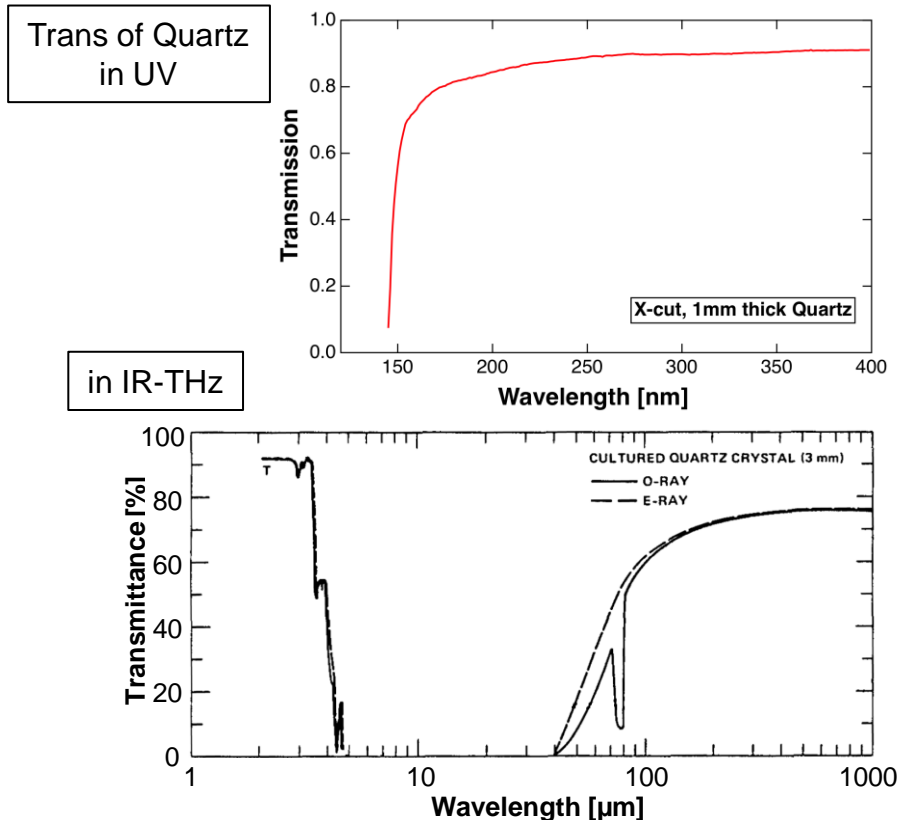
狭帯域1ミクロン光を広帯域2ミクロン光に変換

実施項目⑮

⑮ THz波への極限波長変換素子の開発

実施項目⑬及び⑭を通してTHz波への極限波長変換素子であるQPM-PowerChipを開発する。まずは1mJ出力の構成検討を行う。なお、水晶は150nmまでのVUV域まで透明な優れた材料である事からUV並びにVUV域でのQPM-水晶の可能性も検討する。

Transmittance in UV and THz region



- Accurate measurement
- Temperature dependence ?
- Crystal quality dependence ?
- Crystal company dependence ?

前年度(R2年度)～現在までの実施内容

- ・前年度導入品(結晶他、右写真)
一部共通予算購入品含む

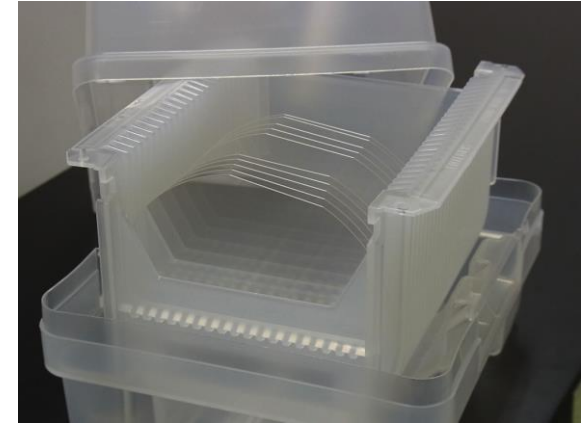
- ・実験室整備(後述、継続中)

分子研 実験棟113(理研分室)

真空蒸着装置
暗室(フォトリソ用)
高電圧印加装置
高温プレス機

理研 物理科学棟403

クリスタルカッター
ワイヤーソー
スパッター



MgLN 4inch ウェハー



MgLTインゴット(X軸育成),
ブロック状加工済み

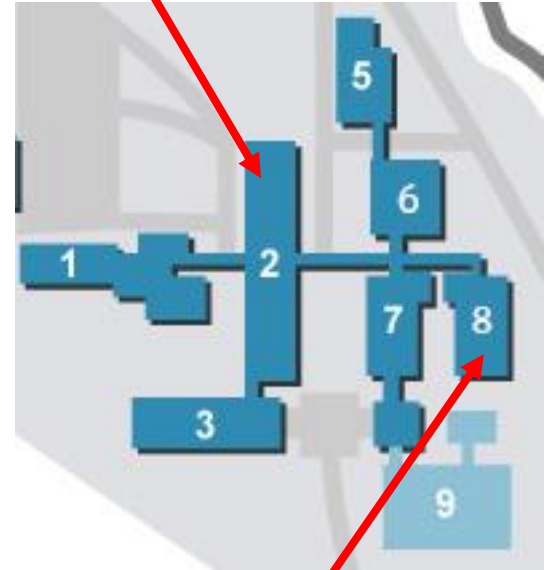
実験室の再整備(前) at 2021/4/16

Empty room in IMS 113



IMS Myodaiji campus
in Okazaki

2 : Main Lab. Bldg. 実験棟



8 : Bldg. D D棟

実験室の再整備(現状) at 2021/7/29

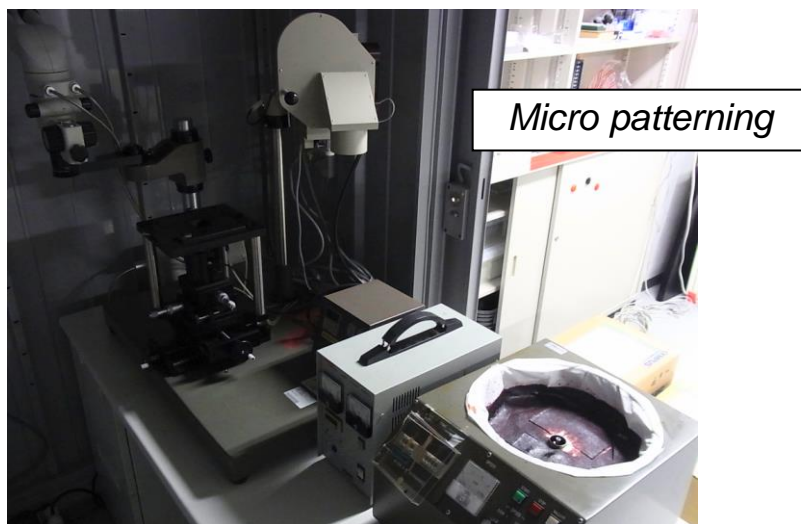
HV application system



Vacuum evaporation system



Photo-lithigraphy system



Yellow room (INABA), under construction



まとめ

- ・担当する実施項目 : ⑥⑬⑭⑮
- ・基礎項目説明 : 波長変換、QPM、LNや水晶など
- ・研究内容と方針 : ⑥⑬⑭⑮
- ・前年度実施内容 : 結晶準備など
- ・実験室整備 : 分子研内および理研実験室現状