

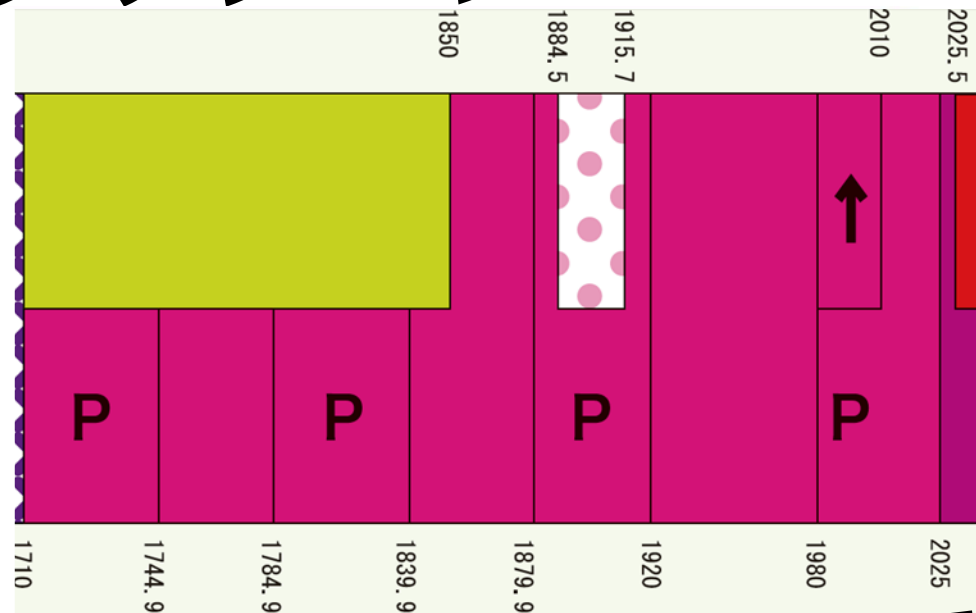
後期雑誌会

M2 木村

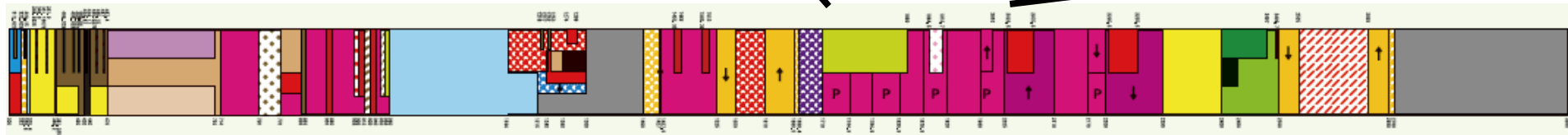
イントロダクション

高性能な波長可変THz波光源

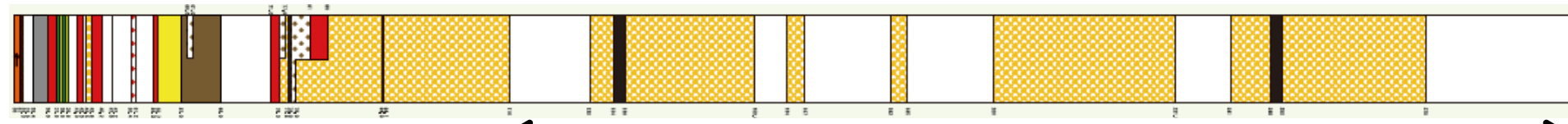
広帯域可変
周波数精度
小型・簡便



300MHz ~ 3GHz



30GHz ~ 0.3THz



THz周波数帯 : 0.1THz ~

総務省HP 『我が国の電波の使用状況』

THz波光源

	単一波長型	広帯域型
固体発振器	<ul style="list-style-type: none">• GUNNダイオード• 共鳴トンネルダイオード	
レーザ	<ul style="list-style-type: none">• CO₂レーザ励起分子気体レーザ• 量子カスケードレーザ	
電子ビーム 電子管型	<ul style="list-style-type: none">• 後進波管• 自由電子レーザ	<ul style="list-style-type: none">• コヒーレントシンクロトロン放射光
光エレクトロニクス型	<ul style="list-style-type: none">• 光パラメトリック発振• 差周波発生	<ul style="list-style-type: none">• 光スイッチング• 過渡的光整流効果

紹介論文

- ① Kodo Kawase, Jun-ichi Shikata, Hiroaki Minamide, Kazuhiro Imai, and Hiromasa Ito, “Arrayed silicon prism coupler for a terahertz-wave parametric oscillator” *APPLIED OPTICS*, Vol. 40, No. 9, pp. 1423–1426 (2001).
- ② Kodo Kawase, Hiroaki Minamide, Kazuhiro Imai, Jun-ichi Shikata, and Hiromasa Ito, “Injection-seeded terahertz-wave parametric generator with wide tunability” *Applied Physics Letters* 80, 195, pp. 194–197 (2002).
- ③ Isao Morohashi, Yoshihisa Irimajiri, Takahide Sakamoto, Norihiko Sekine, Tetsuya Kawanishi, Motoaki Yasui, and Iwao Hosako, “A Terahertz Source with High Frequency Accuracy Using a Mach-Zehnder-modulator-based Flat Comb Generator for High Resolution Spectroscopy” *Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings*, pp. 12–15 (2013).

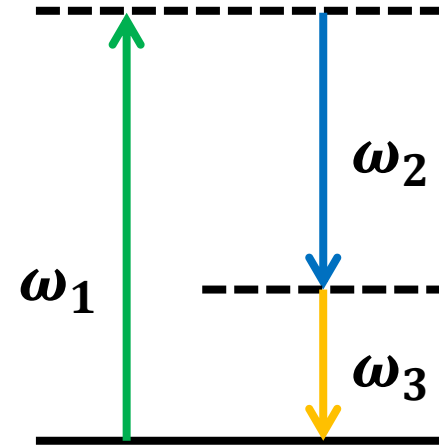
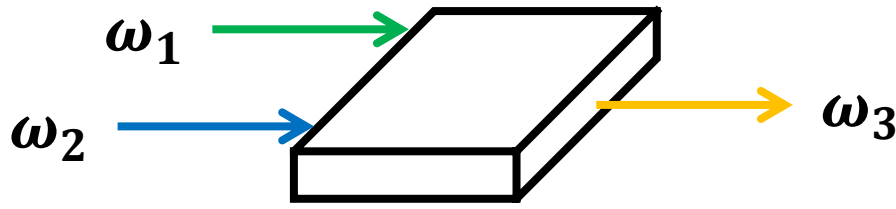
Arrayed silicon prism coupler for a terahertz-wave parametric oscillator

**Kodo Kawase, Jun-ichi Shikata, Hiroaki Minamide,
Kazuhiro Imai, and Hiromasa Ito**

**APPLIED OPTICS, Vol. 40, No. 9, pp. 1423-1426
(2001)**

光パラメトリック過程

差周波発生 (DFG) の様子

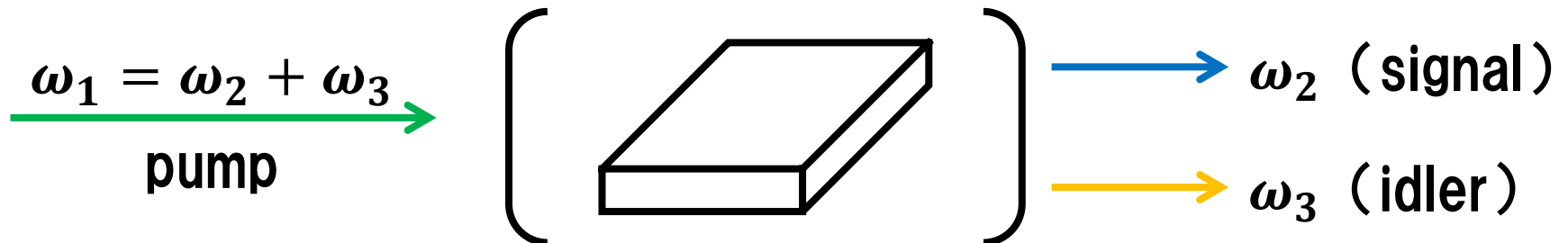


パラメトリック増幅

仮想励起状態 $\rightarrow \omega_2$ 入射 $\rightarrow \omega_2 \cdot \omega_3$ 放出 \rightarrow 基底状態

パラメトリック蛍光 or 自発的パラメトリック下方置換

$\omega_2 \cdot \omega_3$ を自然放出

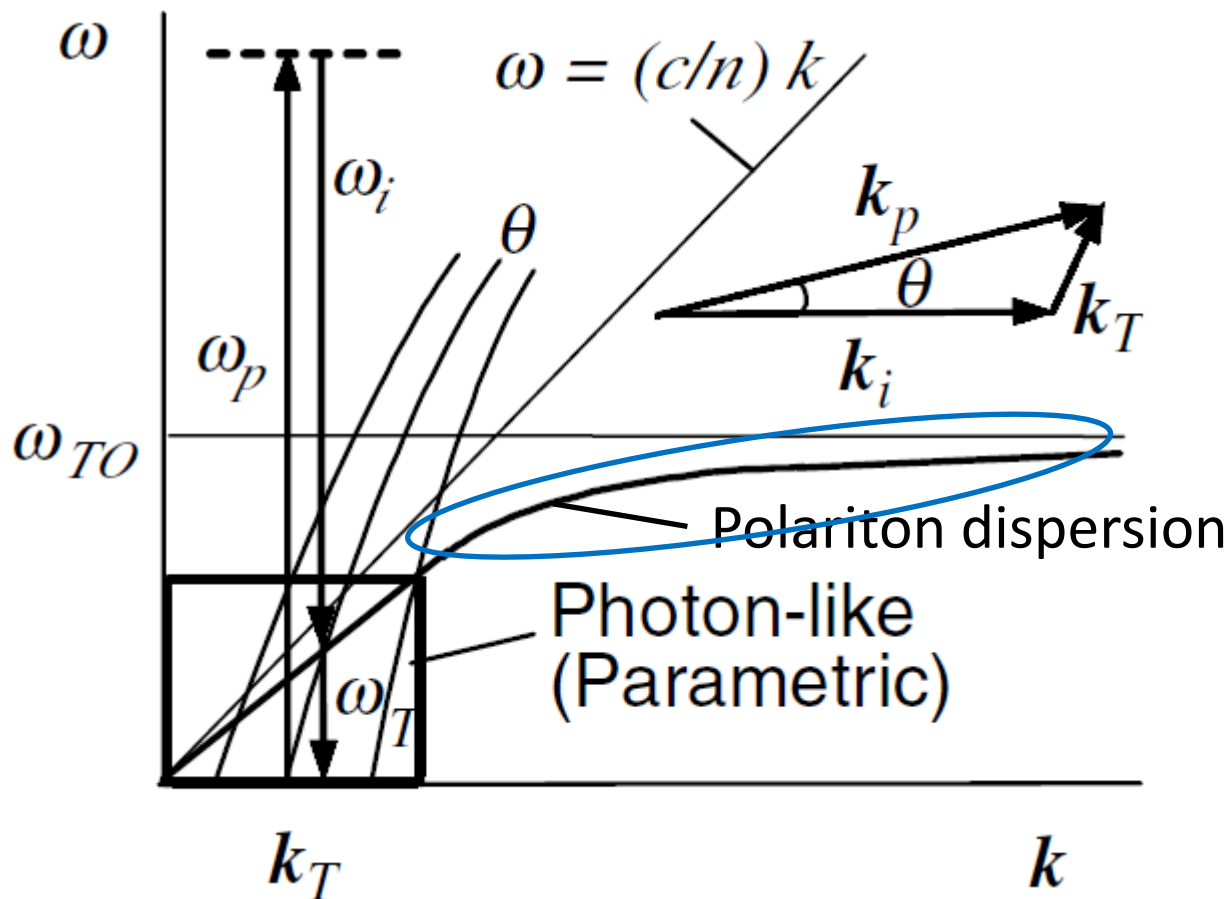


光パラメトリック発振器 (OPO)

ポラリトン分散とパラメトリック過程

LiNbO₃ : 7.5THzにTOフォノン

ポラリトン分散によりTHz帯のパラメトリック発生増強



エネルギー保存則

$$\omega_{THz} = \omega_p - \omega_i$$

波数保存則

$$k_{THz} = k_p - k_i$$

同時に満たす必要あり

実験装置 (OPO)

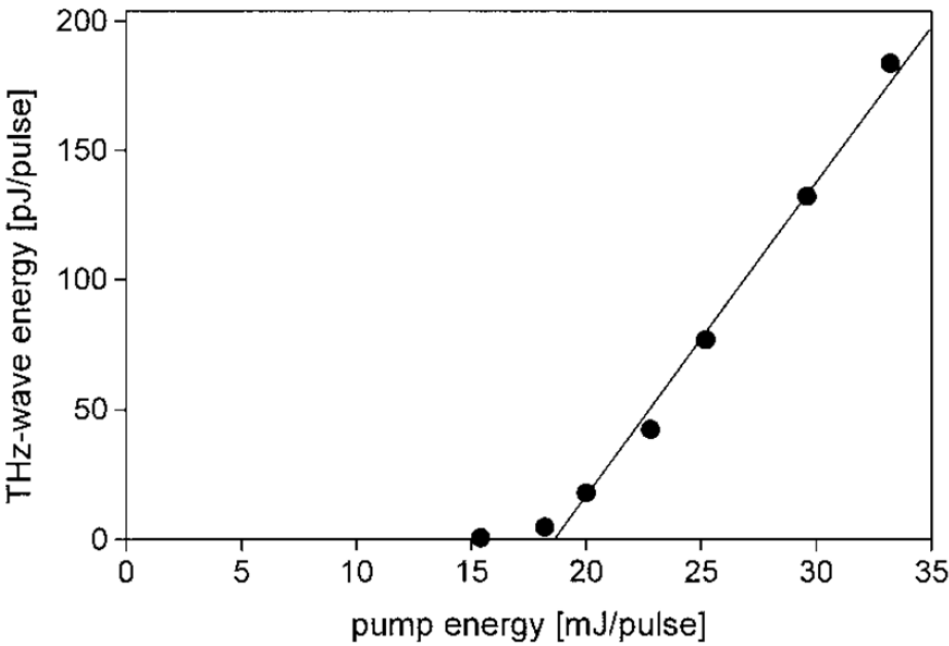
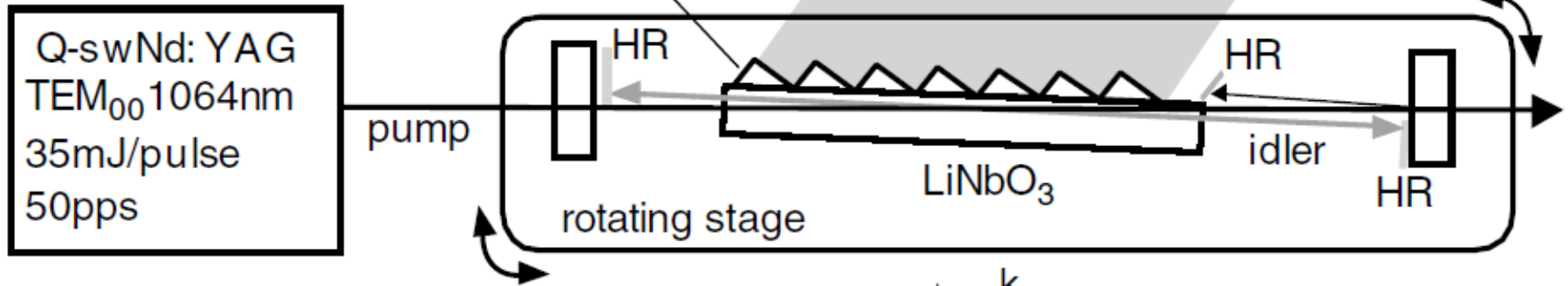
LiNbO₃ : 65mm×6mm×5mm

Si-prism : 8.0mm×6.1mm×5.1mm×5.0mm

ビーム径 : 1.5mm Φ

パルス幅 : 25ns

共振器長 : 15mm

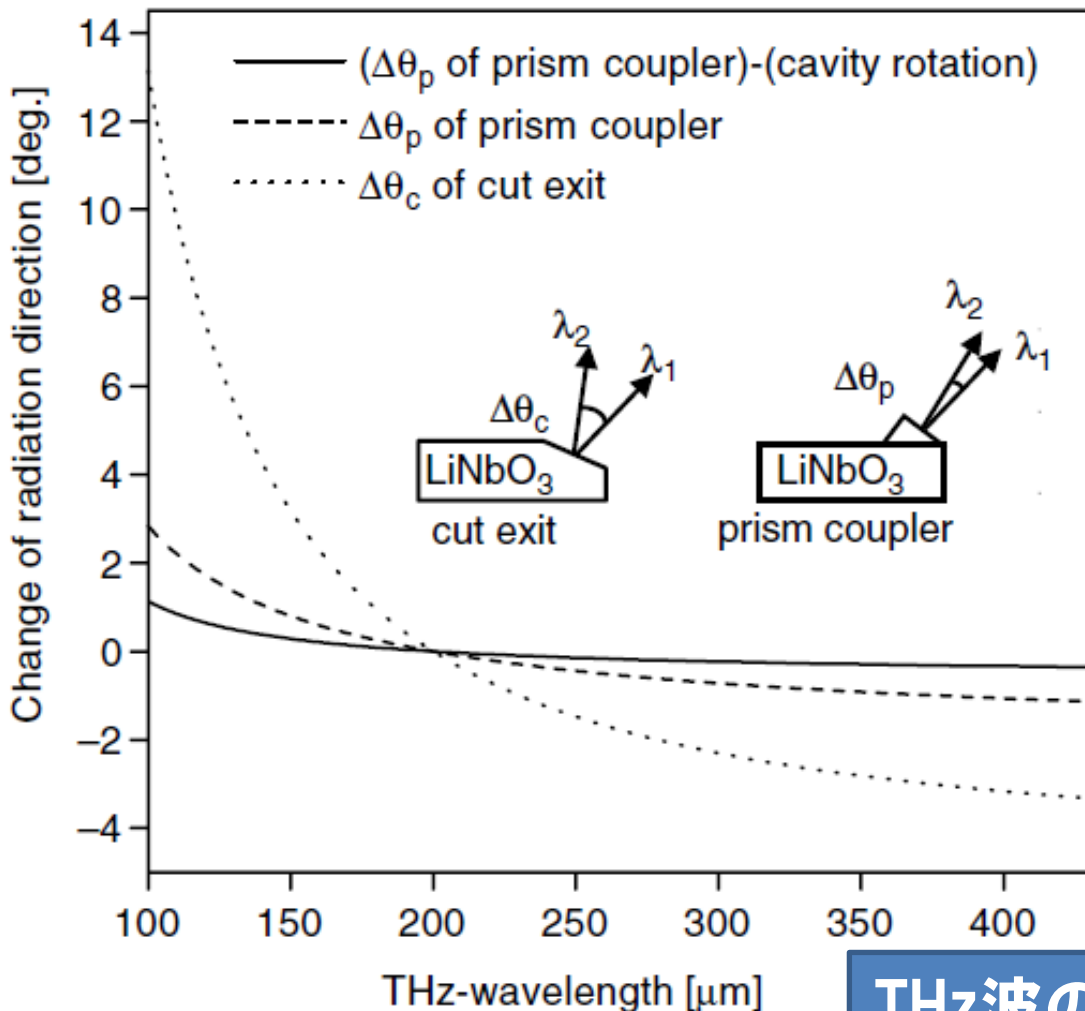


入射角を変化させTHz波長変化

励起光とLiNbO ₃ 入射角 [°]	3.13	0.84
Φ [°]	1.45	0.39
δ [°]	67.3	64.4
THz波 [μ m]	100	330
アイドラ光 [μ m]	1.075	1.067

プリズムカプラ有無による出射方向

cut exit Ref. : M. A. Piestrup, R. N. Fleming, and R. H. Pantell, "Continuously tunable submillimeter wave source," Appl. Phys. Lett. 26, 418-419 (1975).



0° @THz波 : 200 μm

計算による角度変化

$\Delta\theta_c = 16.5^\circ$ (cut exit)

$\Delta\theta_p = 4.0^\circ$ (prism coupler)

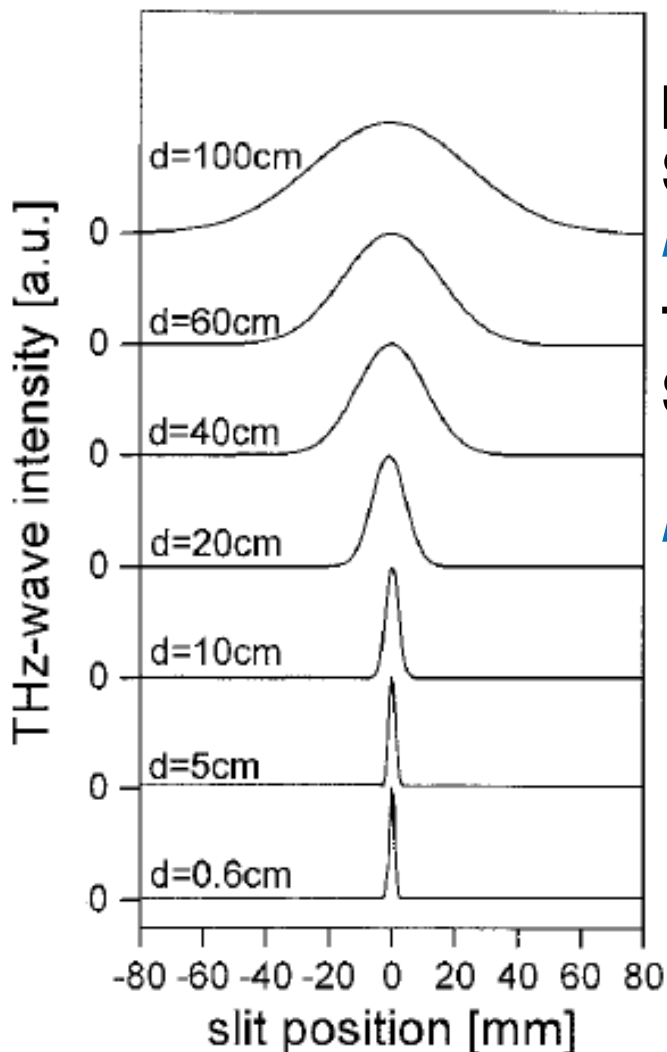
TPO外から計測

実際の角度変化 = 1.5°

THz波の出射方向はほぼ変わらない

プリズムカップラによる違い

Si-ボロメータ（1.4mmスリット）を横方向に移動させて計測



FWHM@ $d=100\text{mm}$

Single : 58mm

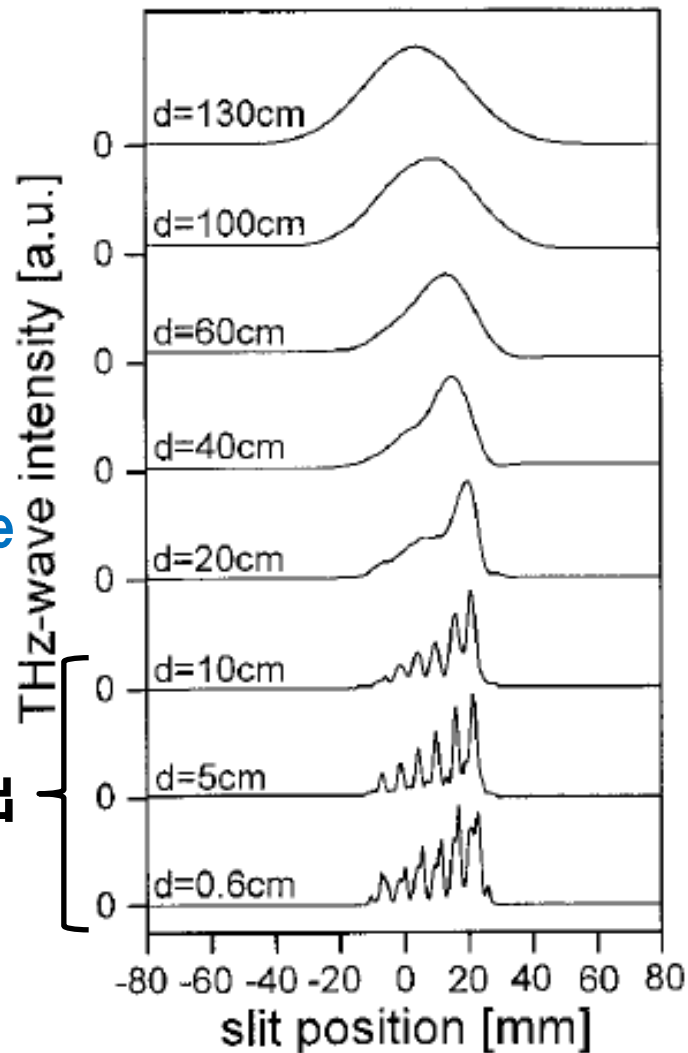
Arrayed : 34mm

THz波出力

Single : 30pJ/pulse
($< 3.0\text{mW}$)

Arrayed : 192pJ/pulse
($< 19.2\text{mW}$)

効率良くTHz波を抽出



Single-prism coupler

Arrayed-prism couplers

まとめ

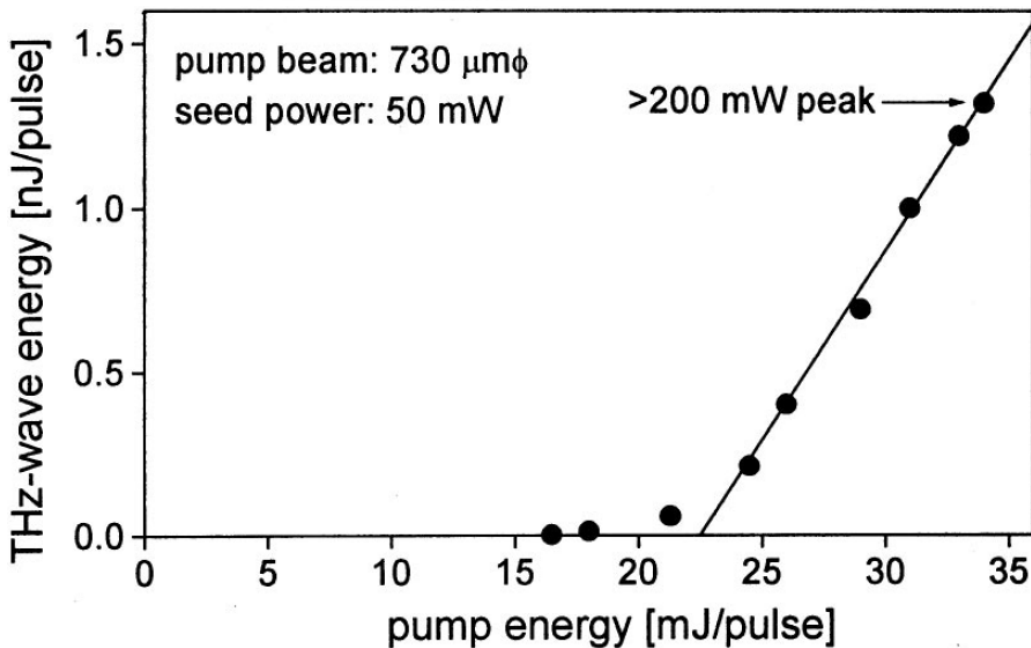
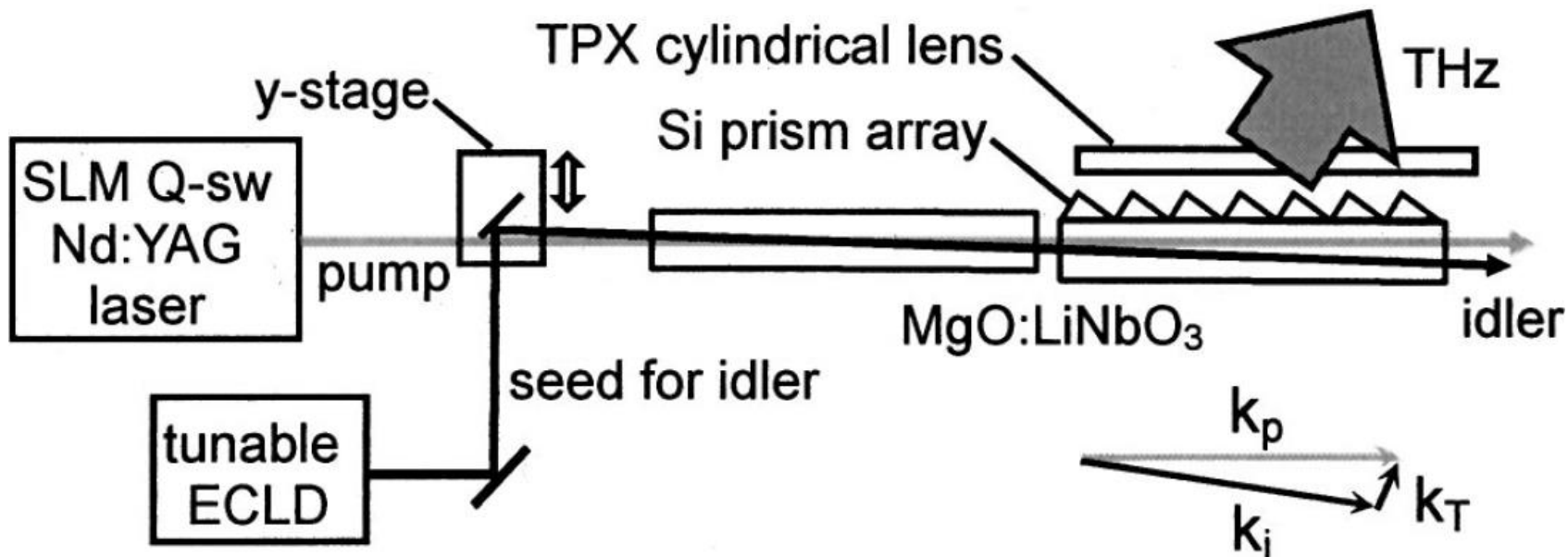
- THz波ピークパワー： $< 19.2\text{mW}$
- チューニングレンジ： $100 \sim 330 \mu\text{m}$
- Arrayed prism couplerの有用性
- ×THz波線幅：数十GHz程度（Ref.より）
- × LiNbO_3 の角度調整シビア

Injection-seeded terahertz-wave parametric generator with wide tunability

**Kodo Kawase, Hiroaki Minamide, Kazuhiro Imai, Jun-ichi
Shikata, and Hiromasa Ito**

Applied Physics Letters 80, 195, pp. 194-197 (2002)

実験装置 (IS-OPG)



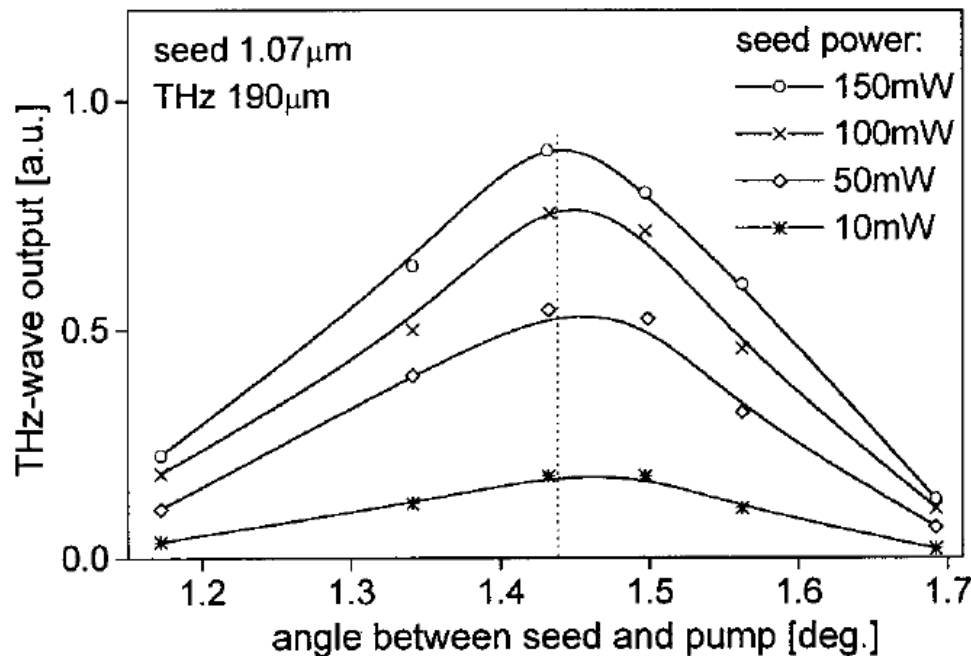
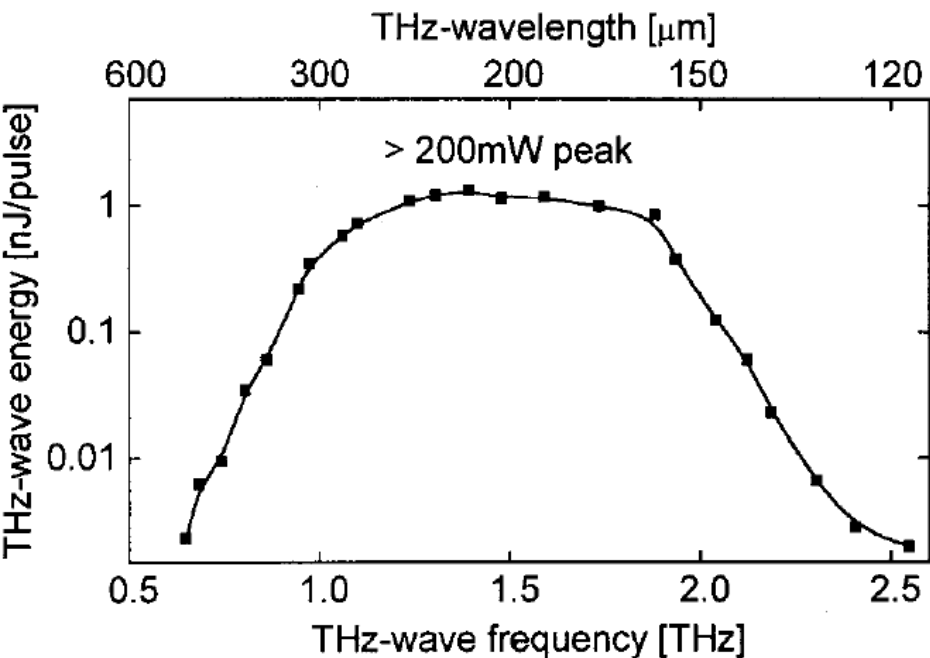
Nd : YAGレーザー
 波長 : 1.064 μm
 パルスエネルギー : 34.5mJ/pulse

ECLD
 波長 : 1.066 ~ 1.074 μm
 出力 : 50mW

シード光の波長変化により
 THz波の波長を変化させる！

実験結果

位相整合角 : 1.43°



シード光波長と入射角を変化

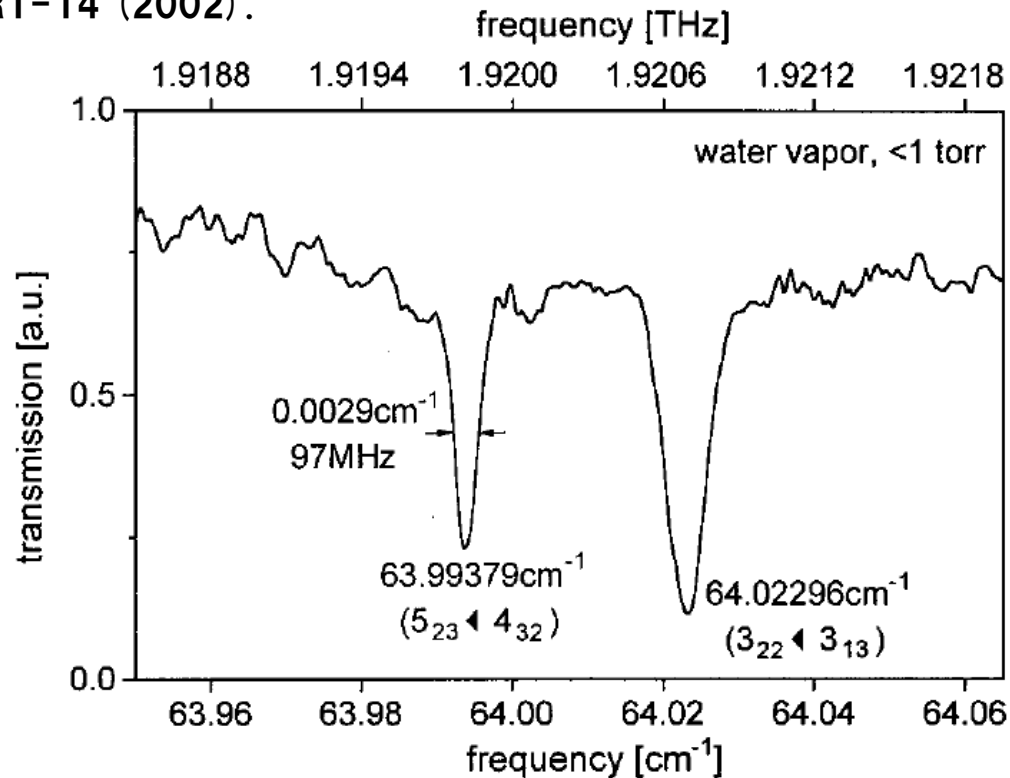
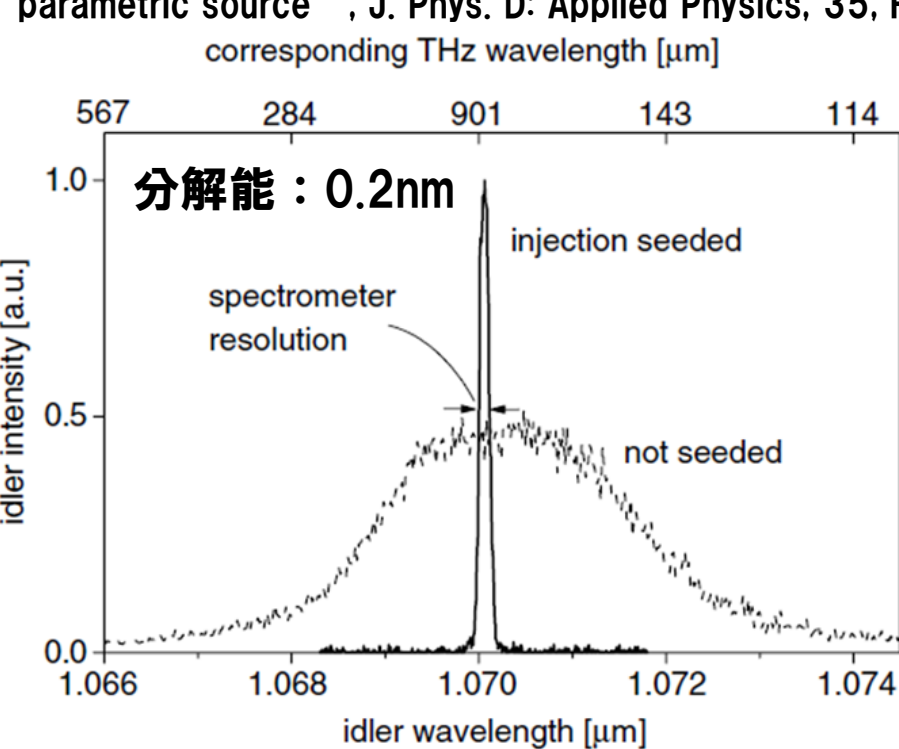
THz波 : $125 \sim 430 \mu\text{m}$
($0.7 \sim 2.4\text{THz}$)

シード光波長固定, 入射角変化
→入射角変化に対し, 非常に鈍感

シード光入射角走査は不要

THz波線幅評価

Ref. : K. Kawase, J. Shikata, and H. Ito, "Terahertz wave parametric source", J. Phys. D: Applied Physics, 35, R1-14 (2002).



シード光有無によるアイドラー光
スペクトル幅 < 0.2nm

1.92THz付近の水蒸気吸収線

THz波をアイドラー波で校正することも可能

THz波線幅
< 100MHz

まとめ

- THz波ピークパワー： $>200\text{mW}$
- チューニングレンジ： $125 \sim 430\ \mu\text{m}$
- THz波線幅： $<100\text{MHz}$ （水蒸気吸収線より）
- シビアな角度調整不要

A Terahertz Source with High Frequency Accuracy Using a Mach-Zehnder-modulator-based Flat Comb Generator for High Resolution Spectroscopy

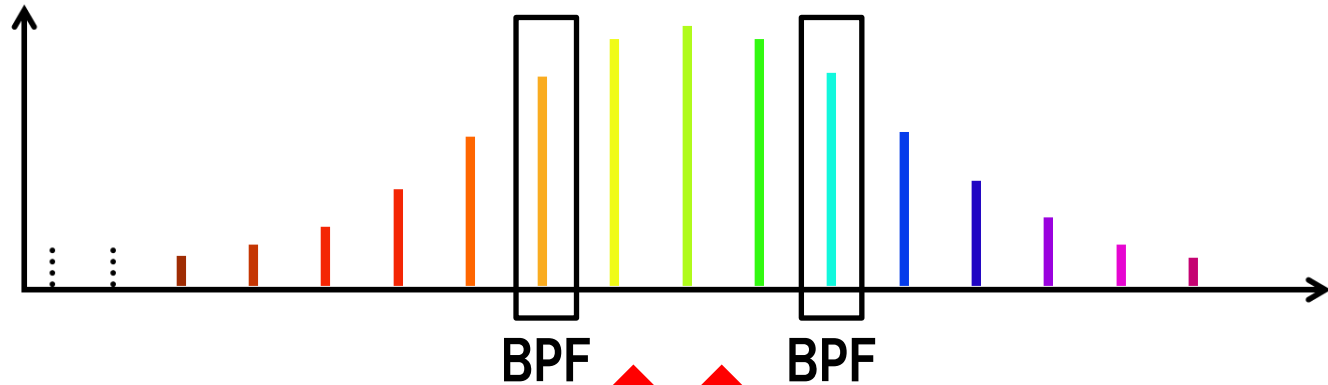
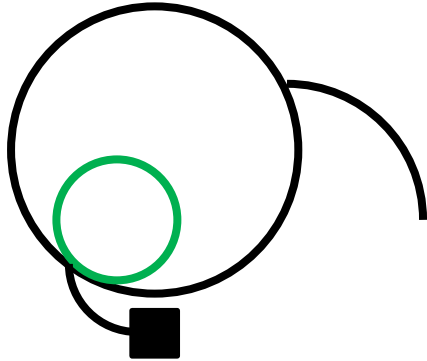
Isao Morohashi, Yoshihisa Irimajiri, Takahide Sakamoto, Norihiko Sekine, Tetsuya Kawanishi, Motoaki Yasui, and Iwao Hosako

Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, pp. 12-15 (2013)

イントロダクション

フェムト秒レーザ
(パルスレーザ)

光コム → 何万台もの安定なCWレーザ



コム1本だけ抜き出し、~~光~~波発生によるTHz波発生



Bandwidth variable from 0.1nm to 15nm

Center wavelength tunable from 1525nm to 1610nm

Alnair labs : <http://www.alnair-labs.com/product-CVF-220.php#>

繰返周波数10GHz程度必要？ → 共振器長30cm@1.5 μ m

実験装置 (MZM-FCG)

Ref. Sakamoto, T, T. Kawanishi, and M. Izutsu, "Asymptotic formalism for ultra at optical frequency comb generation using a Mach-Zehnder modulator", Opt. Lett., Vol. 32, No. 11, 1515-1517 (2007).

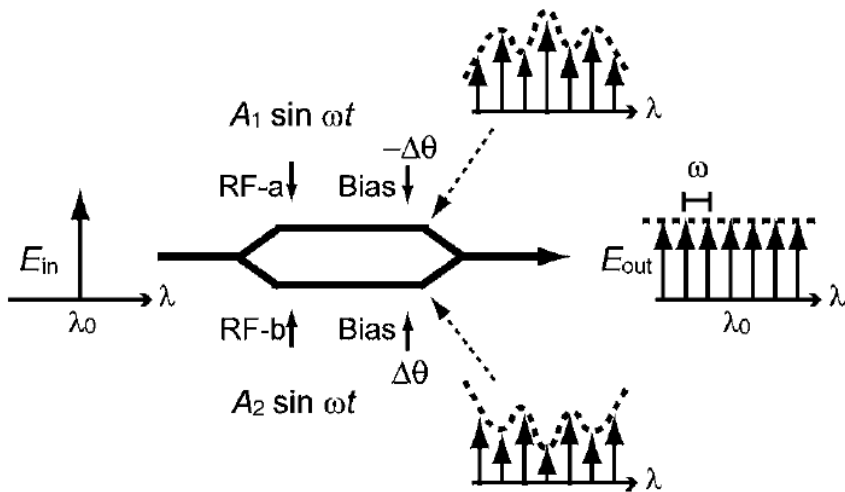
$$E_{out} = \frac{1}{2} E_{in} \sum_{k=-\infty}^{\infty} [J_k(A_1) e^{j(k\omega t + \theta_1)} + J_k(A_2) e^{j(k\omega t + \theta_2)}], \quad (1)$$

$$\eta_k \equiv \frac{P_k}{P_{in}} \approx \frac{1}{2\pi\bar{A}} \left[1 + \cos(2\Delta\theta)\cos(2\Delta A) + \{\cos(2\Delta\theta) + \cos(2\Delta A)\} \cos\left\{ 2\bar{A} - \frac{(2k+1)\pi}{2} \right\} \right], \quad (2)$$

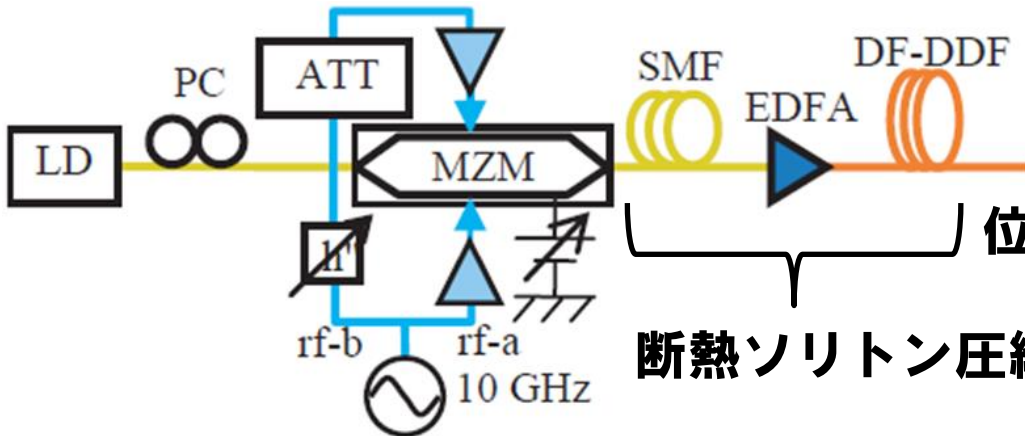
ここで, $\bar{A} \equiv (A_1 + A_2)/2$, $\Delta A \equiv (A_1 - A_2)/2$,

$$\Delta A \pm \Delta\theta = \frac{\pi}{2}, \quad (3)$$

$$\eta_{k,max} = \frac{1}{2\pi\bar{A}}, \quad \text{when } \Delta A = \Delta\theta = \frac{\pi}{4}. \quad (5)$$



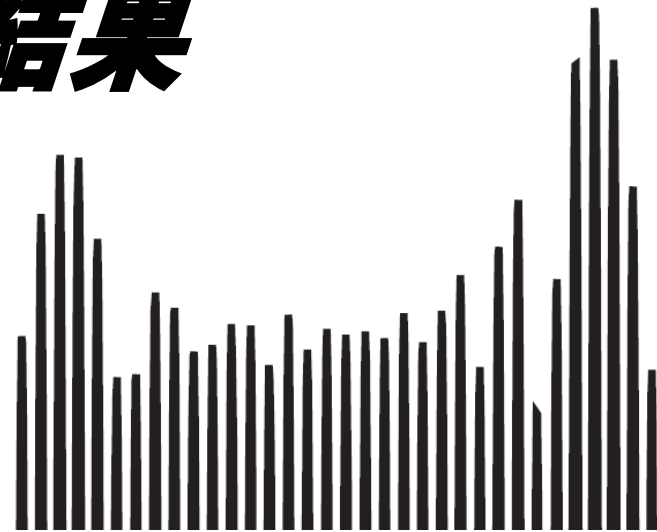
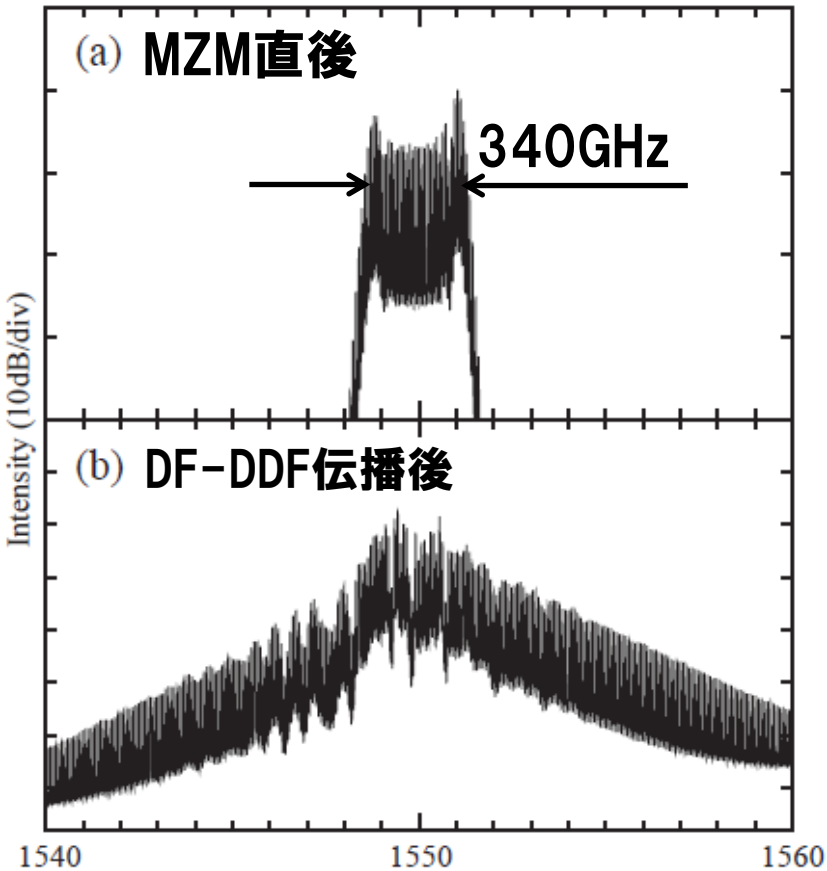
$$\eta_k = \frac{1 - \cos 4\Delta\theta}{4\pi\bar{A}}, \quad (4)$$



位相器と減衰器を用いて条件を満たす

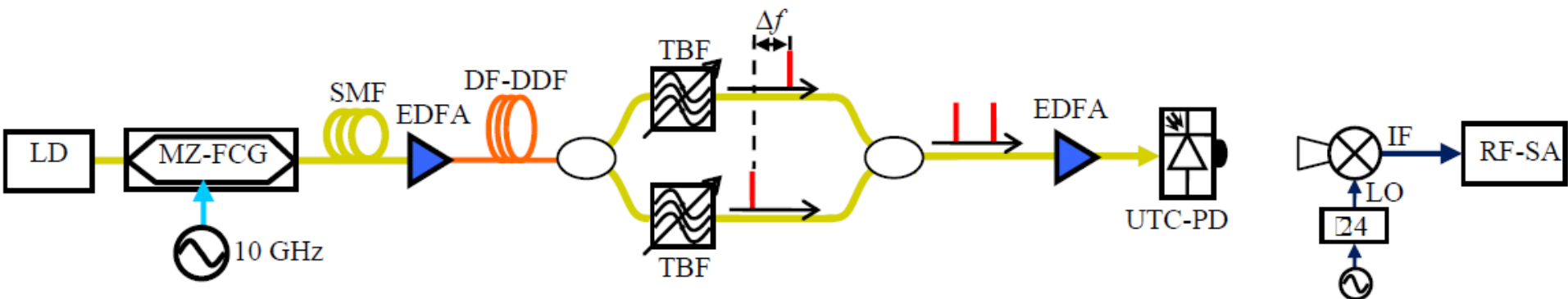
断熱ソリトン圧縮過程 → パルス幅圧縮

実験結果



THz波発生装置

TBF（透過幅：6GHz）により1本のみ抽出

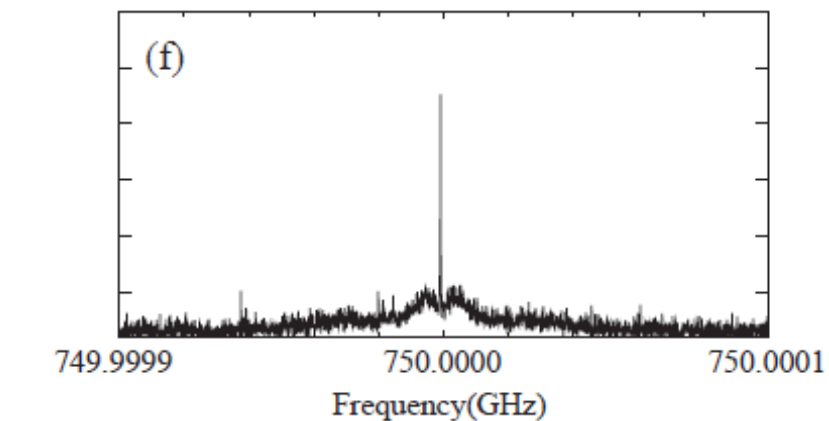
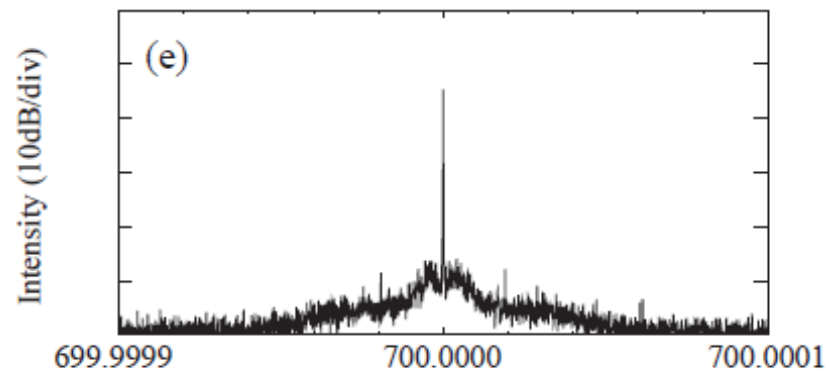
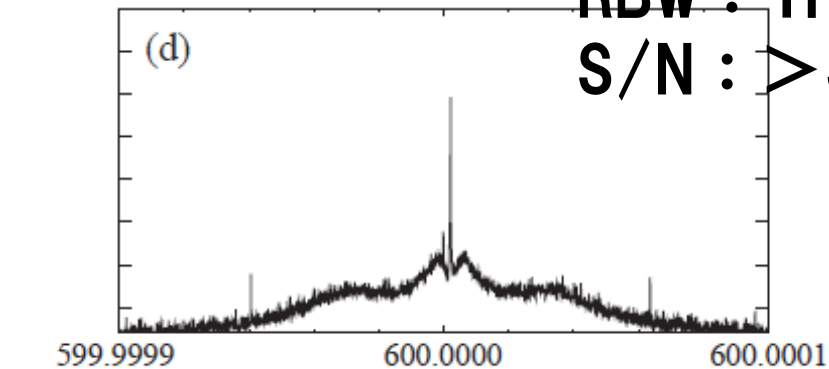
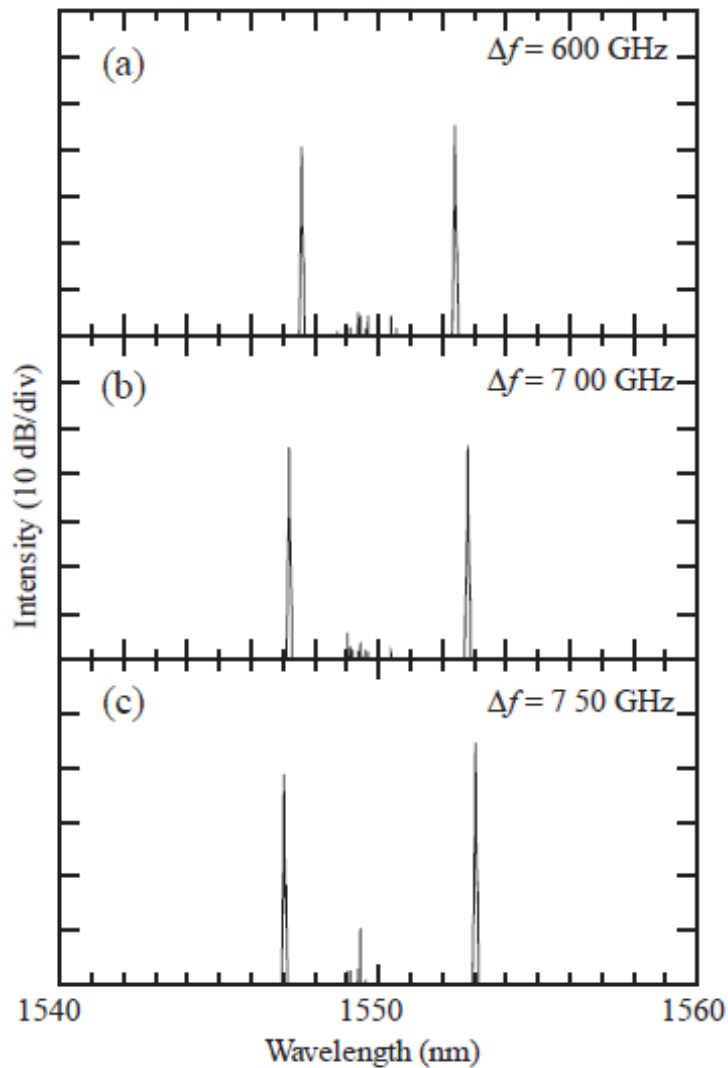


差周波発生によるTHz波

24逓倍器とミキシングし計測

RBW : 1Hz

S/N : > 30dB



まとめ

- LD光源をMZMにより平坦コム化
- コム安定性はLD & 参照信号に依存
- ×パルス圧縮の過程におけるファイバ長

後期雑誌会 宿題

M2 木村

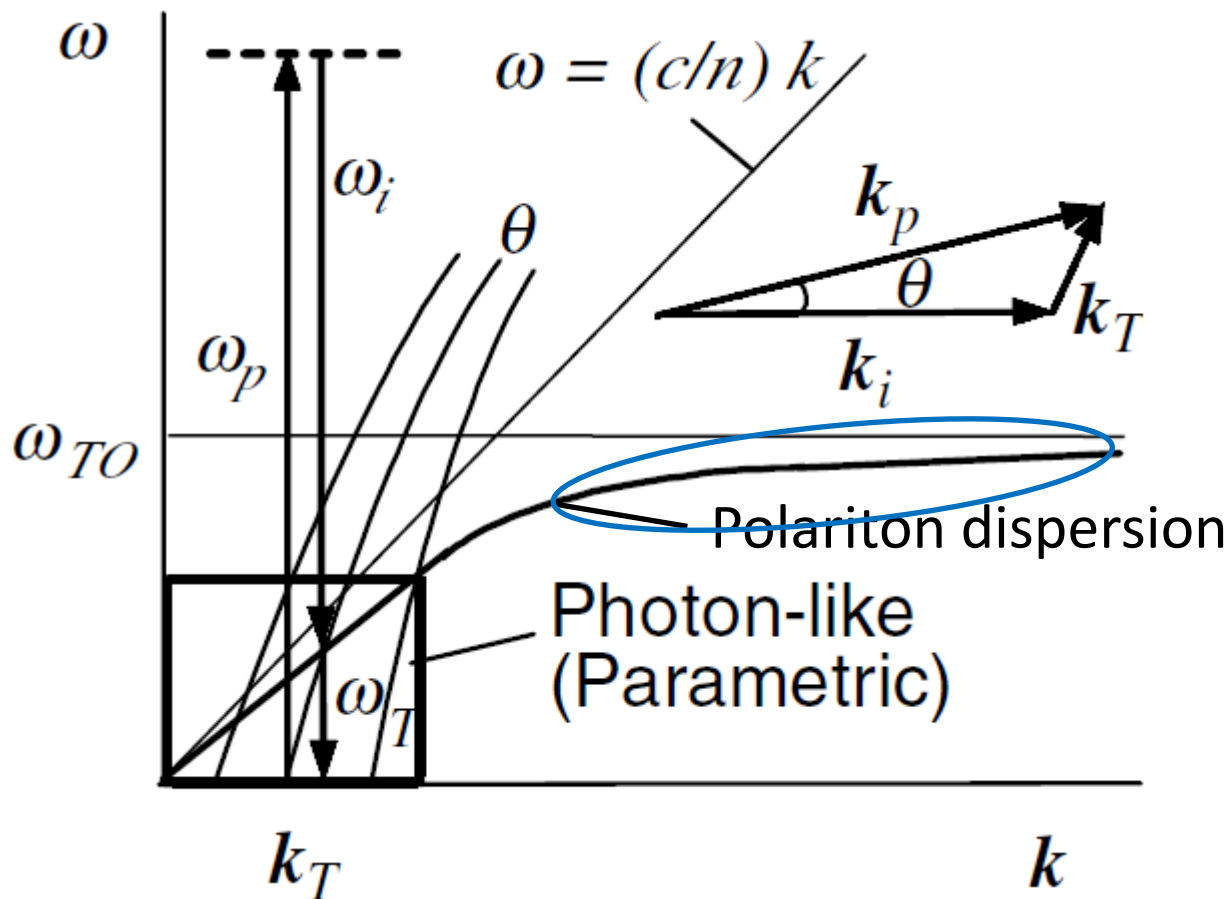
目次

- **ポラリトン分散とパラメトリック過程**
- **アイドラ光を閉じ込める理由**
- **Injection seeding について**
- **DF-DDFの説明**
- **MZMによる連続周波数走査可能か？**

ポラリトン分散とパラメトリック過程

LiNbO₃ : 7.5THzにTOフォノン

ポラリトン分散によりTHz帯のパラメトリック発生増強



エネルギー保存則

$$\omega_{THz} = \omega_p - \omega_i$$

波数保存則

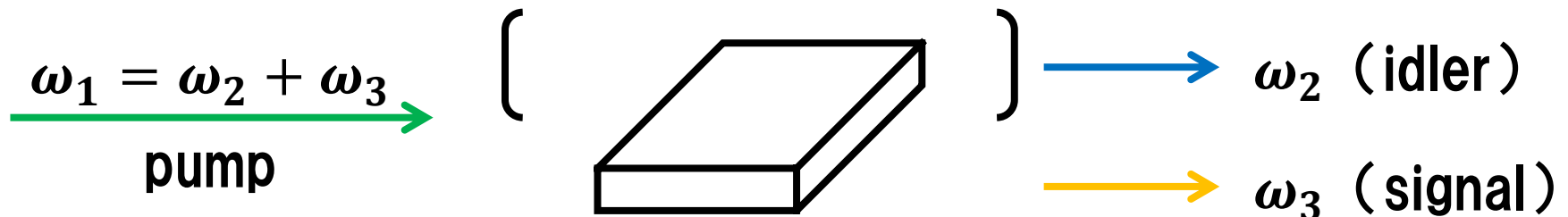
$$k_{THz} = k_p - k_i$$

同時に満たす必要あり

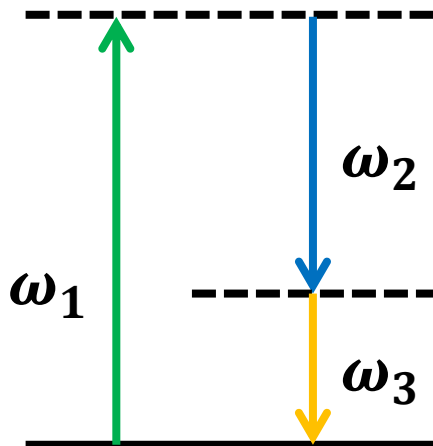
光パラメトリック発振器

パラメトリック蛍光or自発的パラメトリック下方変換

ω_1 の光子が $\omega_2 \cdot \omega_3$ の光子に分離



光パラメトリック発振器 (OPO)

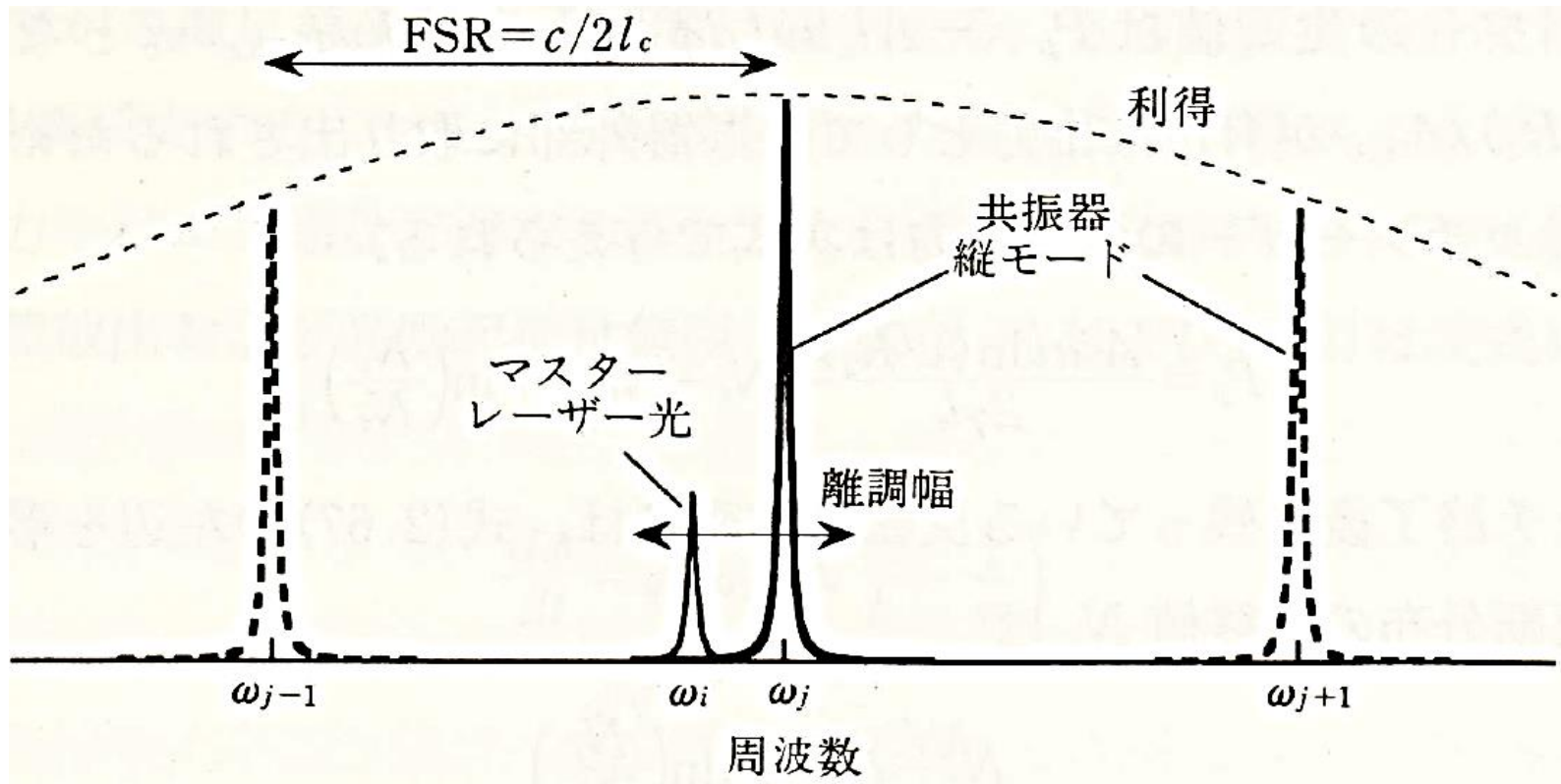


アイドラ光を閉じ込める

→アイドラ光がシグナル光の分離を誘導
(差周波発生過程による)

→シグナル光の狭窄化

Injection seeding について

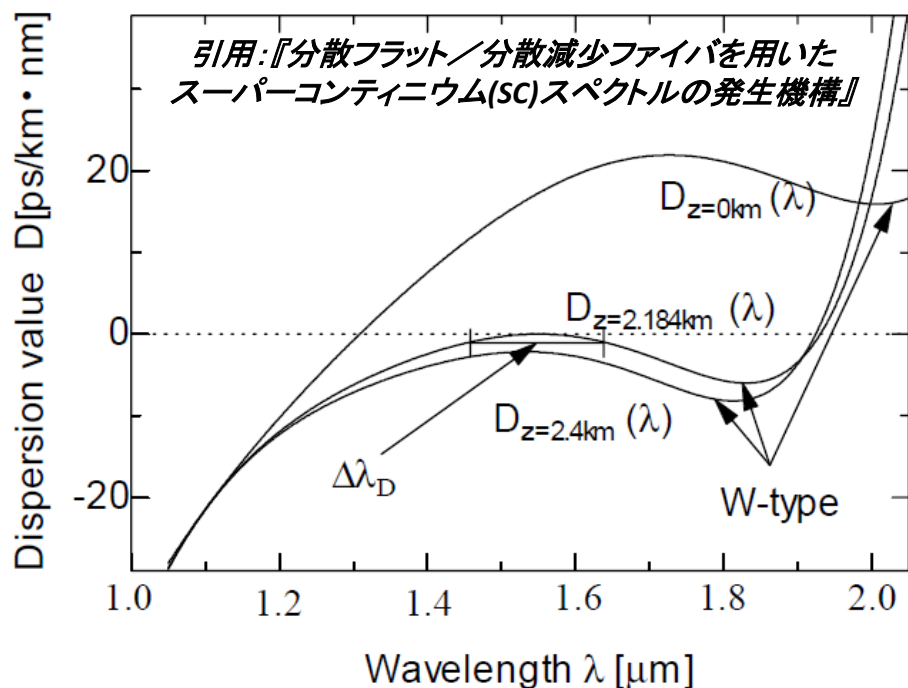


通常の共振器では、自然放出光からの雑音が増幅幅内の複数の縦モードと結合し、競合しながら成長するため不安定な多モード発振になる。

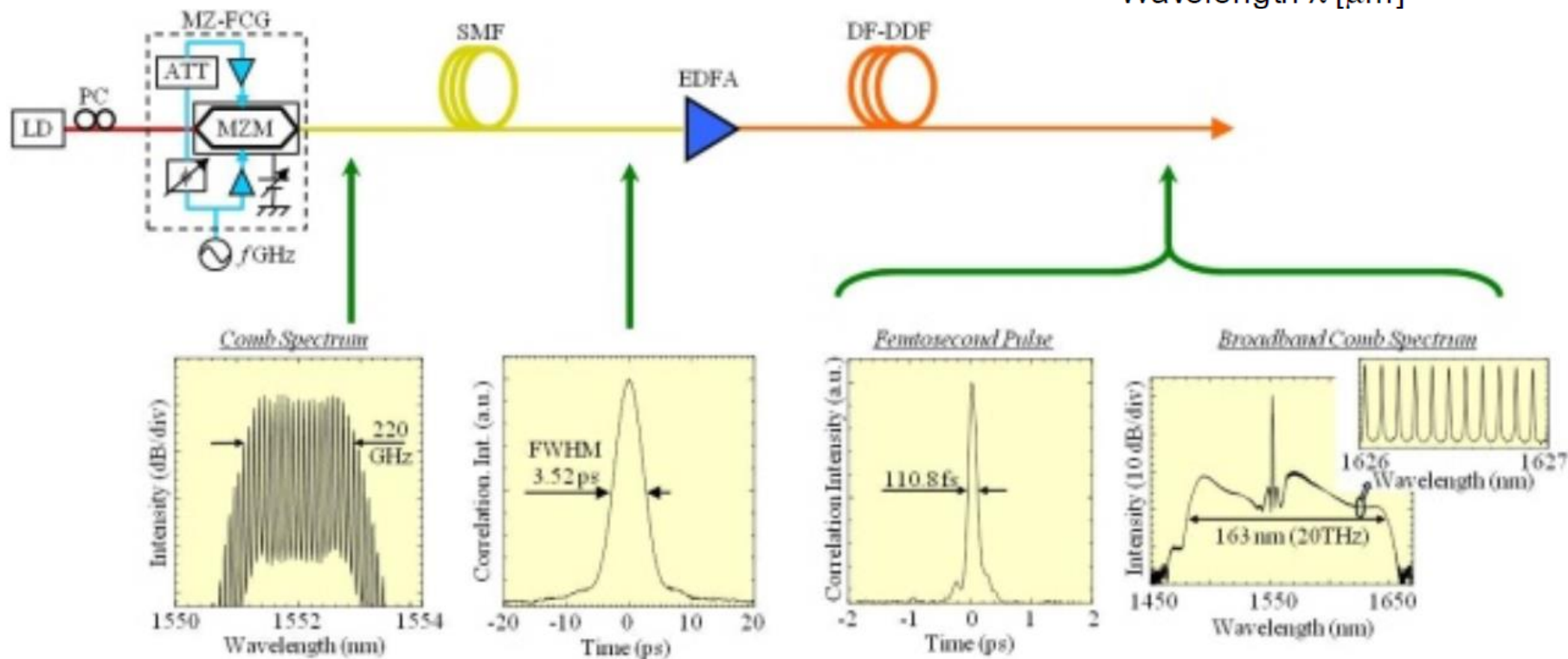
注入光を種 (seed) として j モードが他より早く成長してレーザー発振に至り媒質の利得を消費
→他のモードは発振できず単一モード化が実現

DF-DDF

→上に凸の波長分散特性を持ち、かつ分散値が長手方向に減少している分散制御ファイバーの一種



引用:NICT HP 『Mach-Zender (MZ) 変調器を用いた高安定周波数コム』



後期雑誌会 宿題②

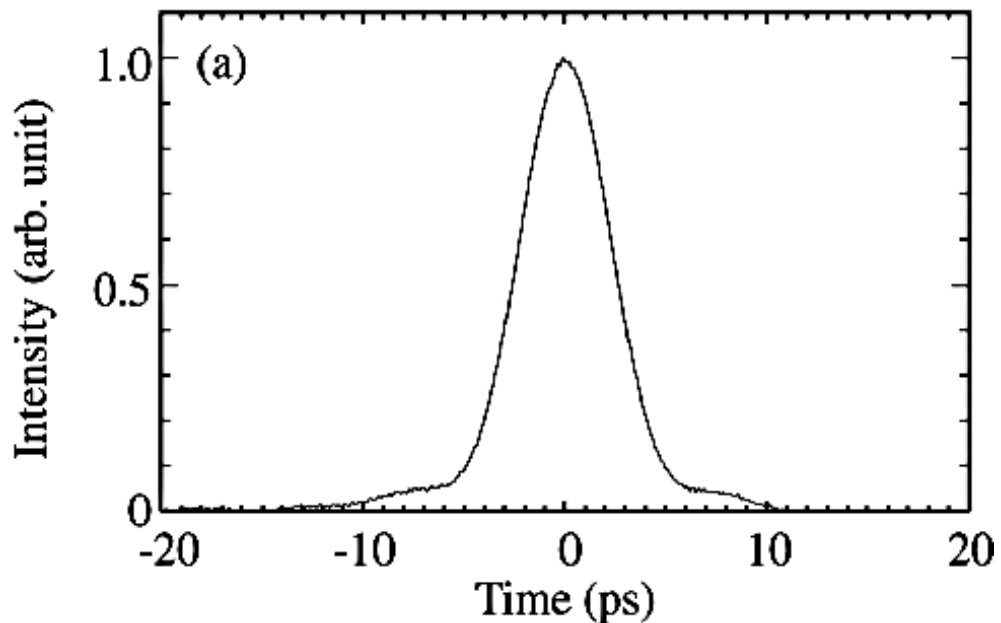
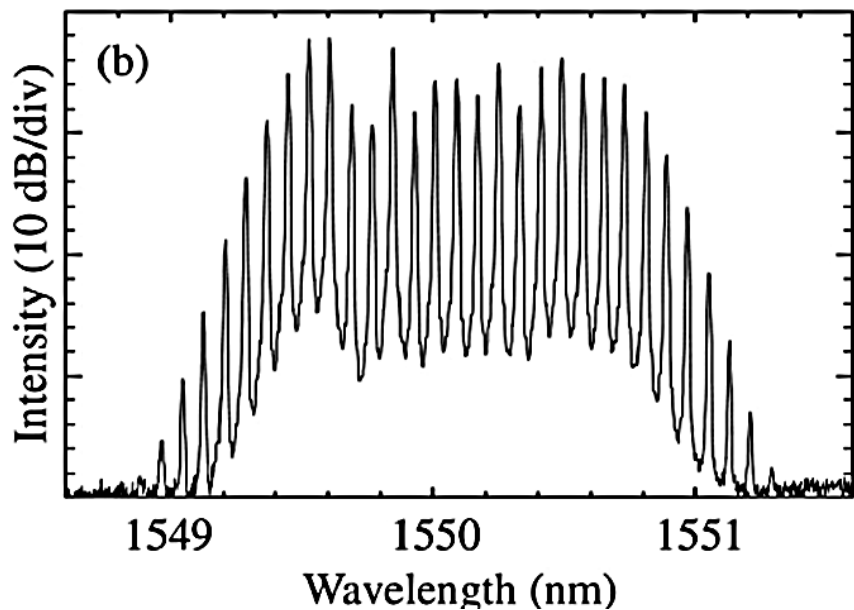
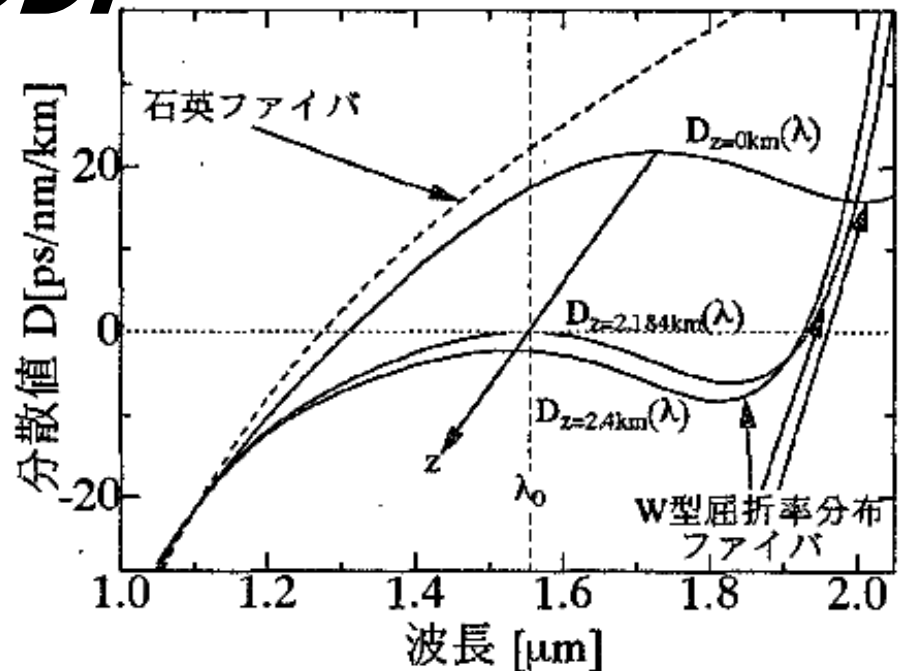
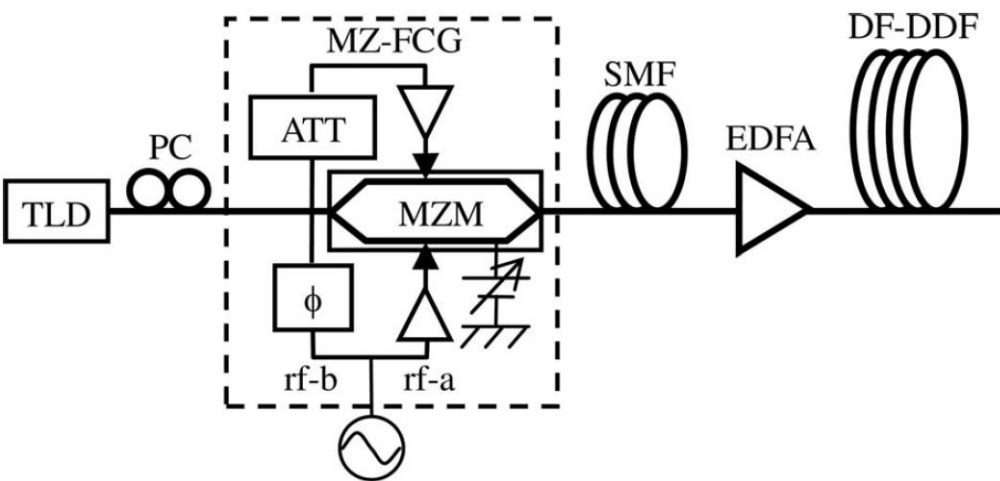
M2 木村

目次

- DF-DDFについて

DF-DDF

引用:『分散フラット/分散減少ファイバを用いたスーパーコンティニウム(SC)スペクトルの発生機構』



DF-DDF

引用:『分散フラット/分散減少ファイバを用いた
スーパーコンティニウム(SC)スペクトルの発生機構』

