

第2回コンパクトERLサイエンスワークショップ

日時： 2012年7月30日~31日

場所： 高エネルギー加速器研究機構・研究棟本館小林ホール

## 大強度THz光源の現状と応用展開

谷 正彦（福井大学・遠赤外領域開発研究センター）

7月31日(火) 9:45~10:05

# 講演概要

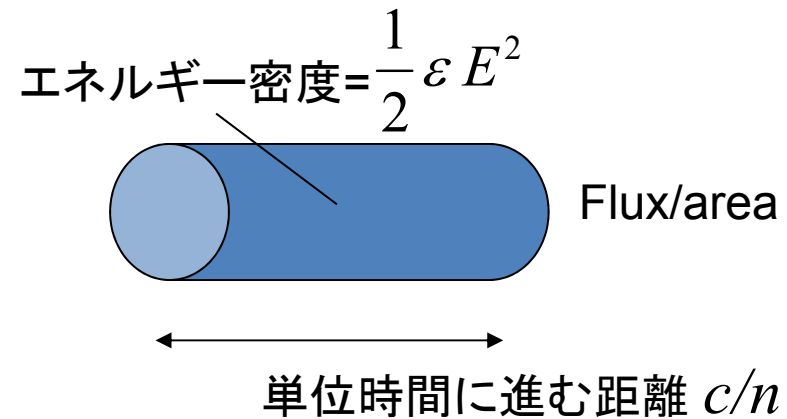
---

1. はじめに
2. THz帯の高強度・高出力光源
  - 電子ビーム型
  - 電子管型
  - フェムト秒レーザー励起
3. 電界増強法
4. cERLからのTHz波の応用

# 光強度と電場の関係

光強度と電場の関係:

$$I = \frac{c}{n} \frac{1}{2} \varepsilon E^2$$



光強度と電場の換算式

$$I [\text{W/cm}^2] = 1.33 \times 10^{-3} E^2 [\text{V/cm}]$$

物質の破壊電界  $E = 10^{10}$  V/cm  
= 10 GV/cm



$I \sim 10^{17}$  [W/cm<sup>2</sup>]

この強度に達する前に摂動論的な扱いができなくなる。

～ MV/cm (～ GW/cm<sup>2</sup>) の電界においても様々な非線形現象が観測される,

# THz帯での主な光源または発振器

	単一波長型	広帯域型
固体発振器	ガンダイオード, インパットダイオード, 共鳴トンネルダイオード	
レーザー	CO <sub>2</sub> レーザー, 励起分子気体レーザー, 半導体(p-Ge)レーザー, 量子カスケードレーザー	
電子ビーム, 電子管型	クライストロン, ジャイロトロン, 後進波管, 自由電子レーザー	コヒーレントシンクロトロン放射光
熱放射型		黒体炉, グローバー, 高圧水銀灯
光エレクトロニクス型	差周波ビートによる光混合, 光パラメトリック発振, 差周波発生	超短パルスレーザーによる光スイッチング, 過渡的光整流効果

# 自由電子レーザー(FEL)

---

どのような波長でも発振できる強力なオールマイティーなレーザー。  
ただし、大規模な施設を要する。

現在テラヘルツ帯で発振しているのはUCSB(カリフォルニア州立  
大学サンタバーバラ校)のFELほかごく少数

出力 500 W - 5 kW

発振周波数: 120 GHz to 4.8 THz (可変)

パルス幅: 1- 20  $\mu$ secs, 繰り返し 1 Hz

# コヒーレントシンクロトロン放射

インコヒーレント放射  $\propto N_e$

コヒーレント放射  $\propto N_e^2$  (Ne: 電子ビームバンチの電子数)

$$P_{coh} = \{Ne(1 - f(\omega)) + f(\omega)(Ne)^2\} \quad a: \text{加速度}, c: \text{光速}$$

$$\times \frac{a^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} \gamma^4 \quad \leftarrow \quad \gamma = \sqrt{1 - v^2 / c^2} : \text{電子の相対論的質量と静止質量の比} \sim 100$$

( $\gamma=1$  の極限ではLarmorの公式と一致)

コヒーレント放射効果 + 高エネルギー電子ビームにより  
非常に強いTHz電磁波放射が得られる。

**Jefferson Lab**

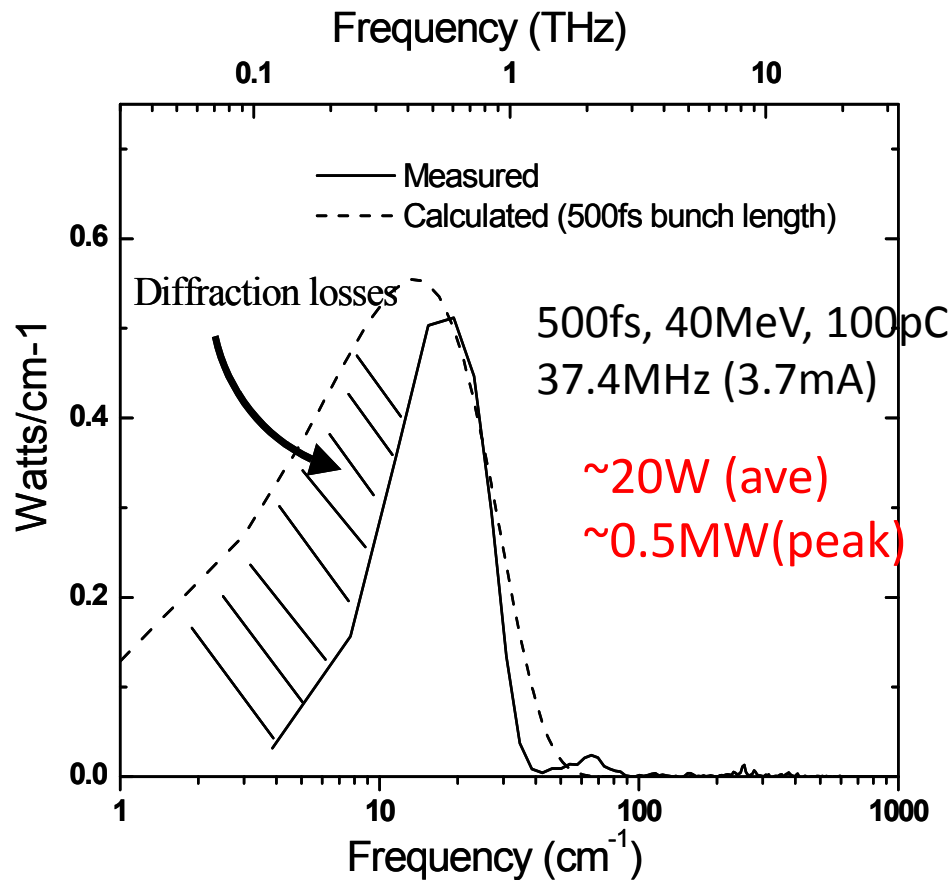
Brookhaven National Laboratory

阪大自由電子レーザー研

→ Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section

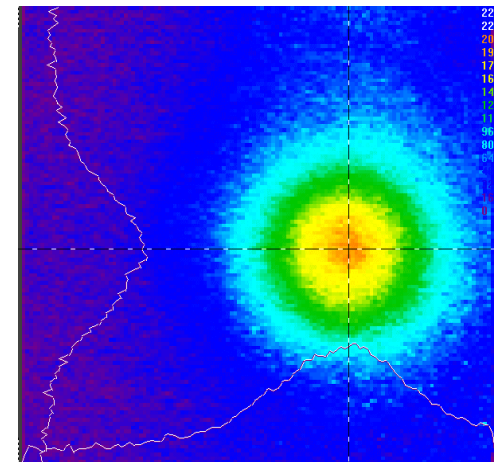
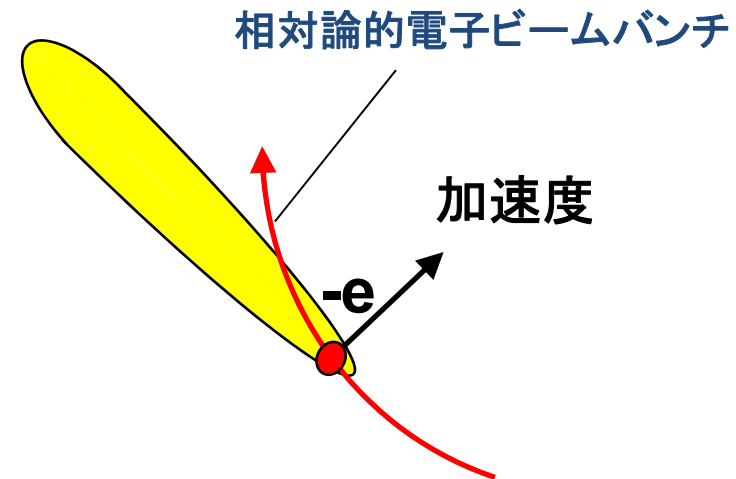
A, Vol. 528, pp.152-156 (2004)

# コヒーレントシンクロトロン放射の報告例



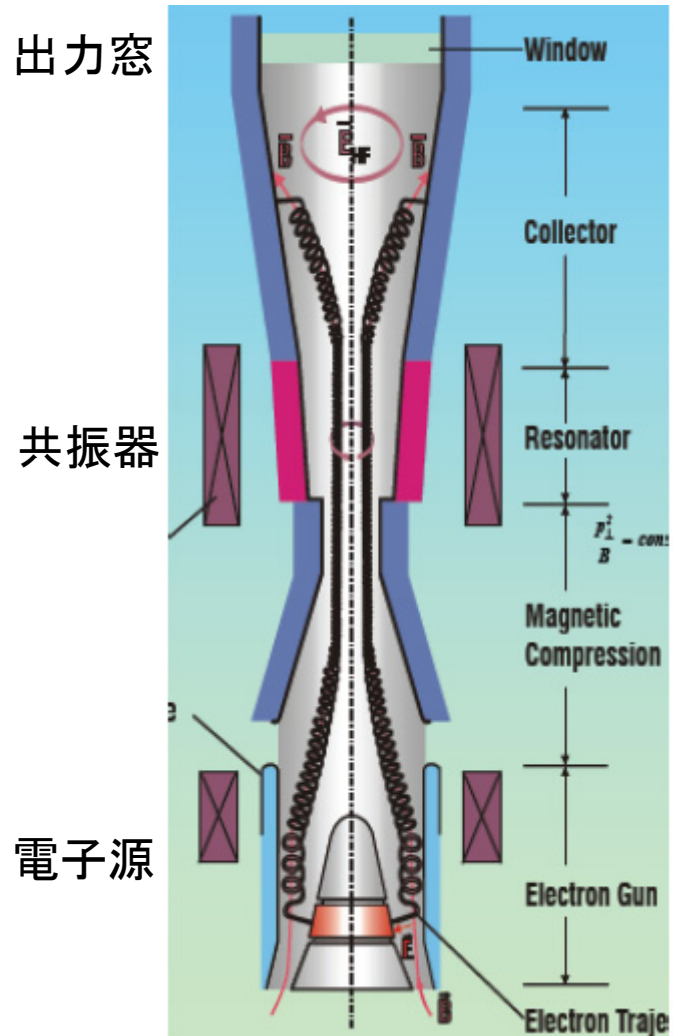
Nuclear Instruments and Methods in Physics  
Research Section A, Vol. 507, pp.537-540  
(2003)

(アメリカ、Jefferson研究所)

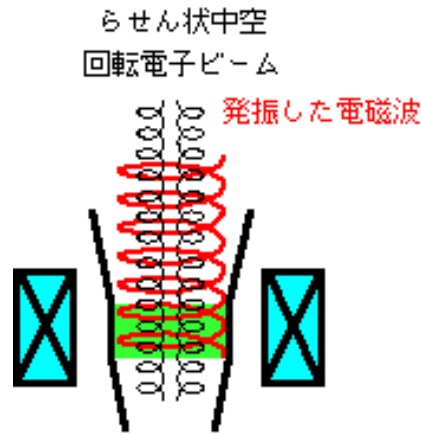


焦電検出カメラで撮ったTHzビームのプロファイル

# サブテラヘルツ発振ジャイロトロン



(福井大遠赤セ, 立松氏)



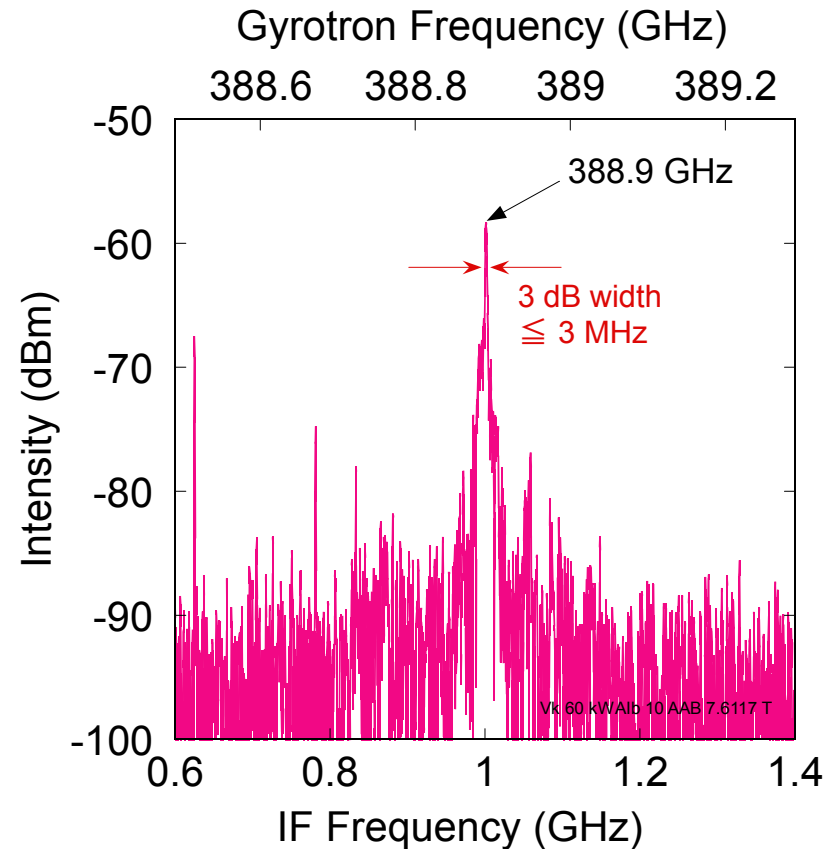
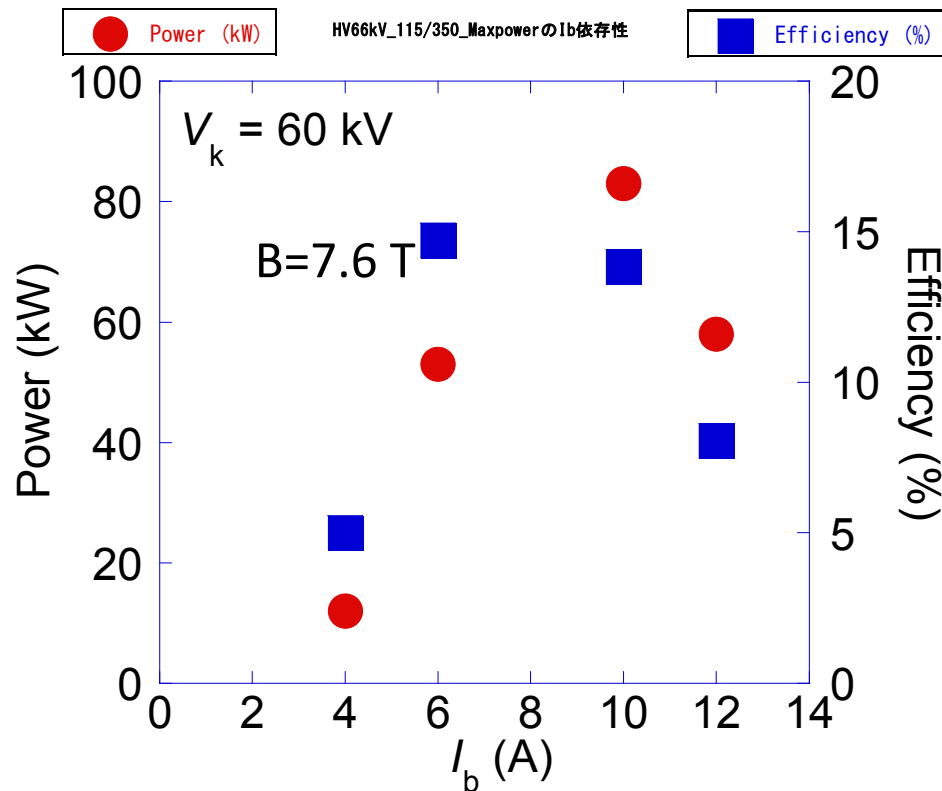
磁場中の電子のサイクロトロン運動を利用  
→高周波発振には高磁場～10Tが必要

ジャイロトロン発振(電子の集群化)には相対論的効果が本質的  
→相対論的速度の電子ビーム  
共振器設計が発振周波数を決める  
→シミュレーション技術とumオーダーの精密加工が必要(波長可変は困難)  
通常, 空間モードは多モードなので, ガウシアンビームへのモード変換が必要  
→モード変換技術が重要



# 福井大遠赤セでの300~400GHz帯高出力Gyrotronの開発

2次高調波パルス389GHz発振で、最高83kW



山田他, 遠赤セH23年度研究成果報告書より

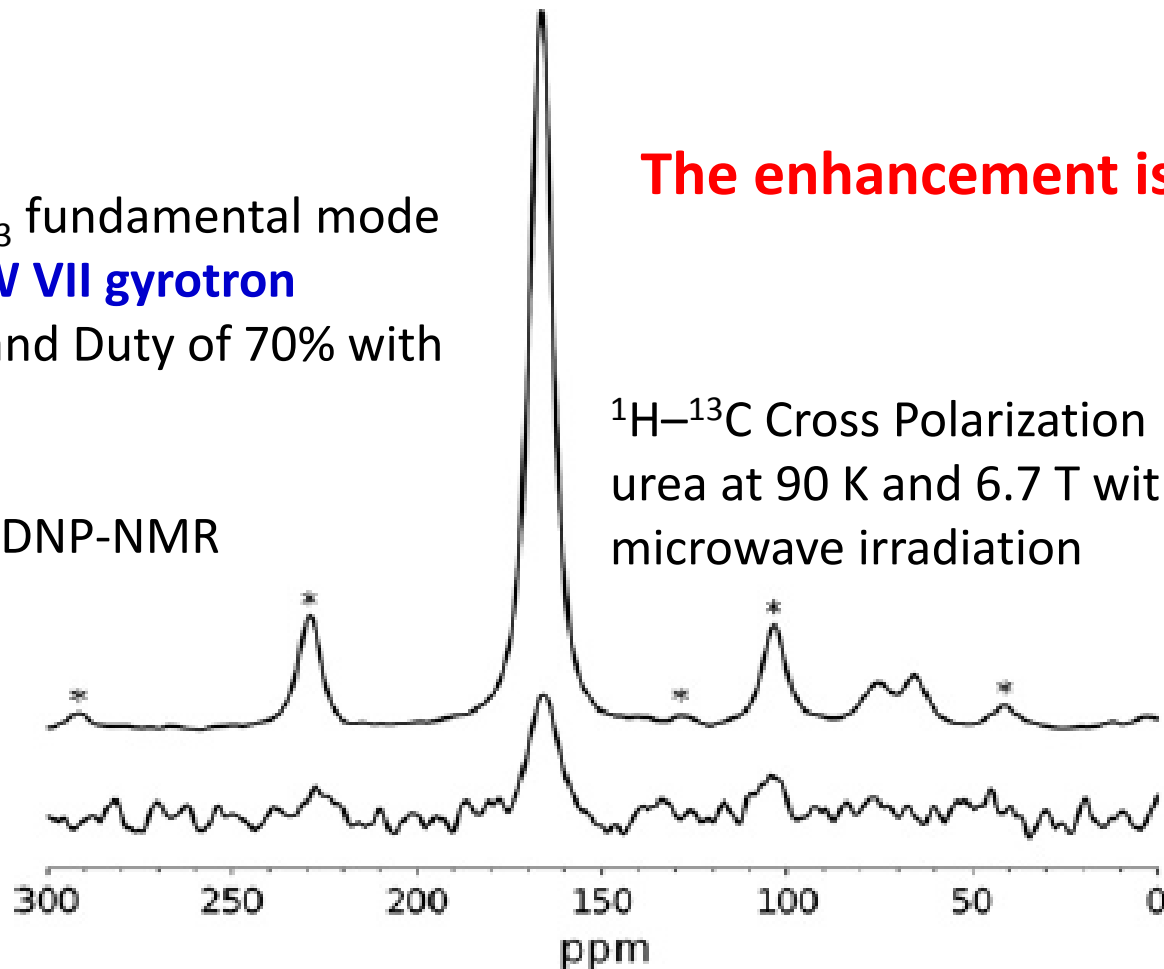
# DNP(Dynamic Nuclear Polarization)-NMR測定

A spectrometer designed for 6.7 and 14.1 T DNP-enhanced solid-state MAS NMR using quasi-optical microwave transmission

Pike et al, J. Magnetic Resonance , Vol.215 (2012) p.1–9 (University of Warwick)

187 GHz  $TE_{13}$  fundamental mode  
of the **FU CW VII gyrotron**  
1W at 2 Hz and Duty of 70% with  
15 s.

284 MHz  $^1H$  DNP-NMR



$^1H$ - $^{13}C$  Cross Polarization NMR signal of  $^{13}C$   
urea at 90 K and 6.7 T with and without  
microwave irradiation

## その他の高出力Sub-THz発振 Gyrotron応用

---

- ◆ セラミックス(ジルコニア, アルミナなど)の焼結
  - 電磁波加熱の特殊効果(非ボルツマン的温度, コヒーレント効果?)
  - 周波数(マイクロ波・ミリ波・サブミリ波)による違い
- ◆ ESR測定
  - ESRエコー測定
    - 150 GHz (ESR共鳴磁場 5-6 T) 数百W
    - 計測温度 2 K -300 K
    - $\pi$  and  $\pi/2$  パルス( $\sim 10$ nsパルス)を利用
- ◆ 飽和プラズマ発生による放射性物質のリモート検出
  - (Nusinovichの提案, Nusinovich *et al*, JAP 109, 083303 (2011))
  - 400GHz帯の周波数が適している
  - MWクラス( $\sim 100$ nsパルス)の出力が必要

# フェムト秒レーザーによる高ピーク強度THz波発生

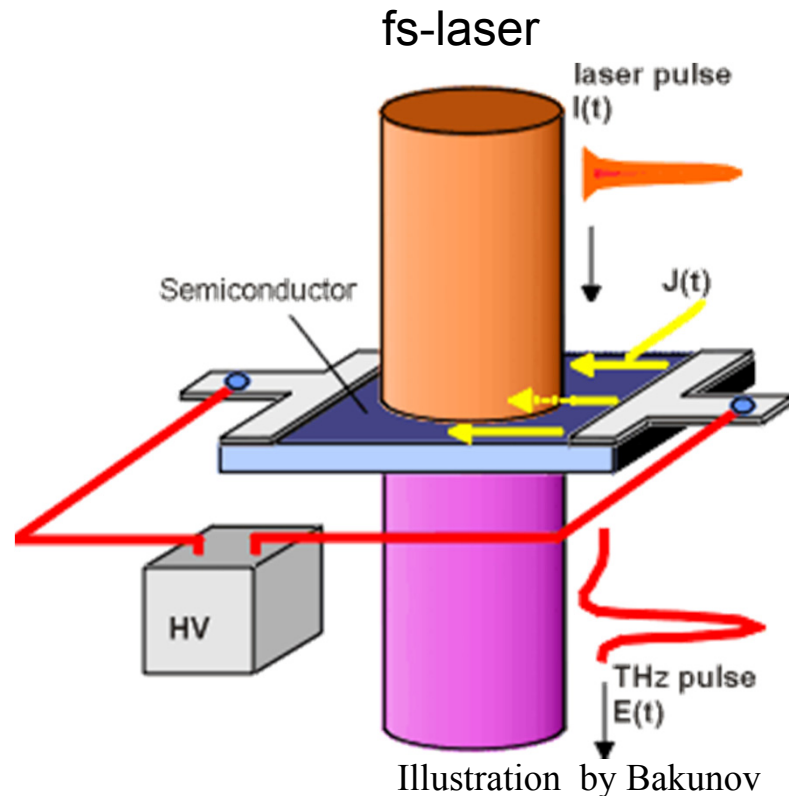
---

近年、フェムト秒レーザーを用いた高強度（高ピークパワー）テラヘルツ電磁波の発生研究が活発になっている。すでに数MV/cm( $\sim$ GW/cm<sup>2</sup>)レベルのTHz波電界が発生されている。

## フェムト秒レーザー励起によるTHz発生法

- (1) 大口径光伝導アンテナ
- (2) 光整流 ( $\chi^{(2)}$  process)
- (3) レーザー誘起プラズマ ( $\chi^{(3)}$  process)

# 大口径光伝導アンテナによるTHz波発生



E. Budiarto et al, IEEE J Quantum Electron 32, 1839 (1996)

3cm gap on GaAs, 1 kHz with 45 kV,  
0.5mJ/pulse

→ 400 nJ THz pulse

D You et al, OL 18, 290 (1993)

1 cm gap, on GaAs

40uJ/cm<sup>2</sup>, 10 Hz with 11 kV

→ 800 nJ THz pulse

欠点

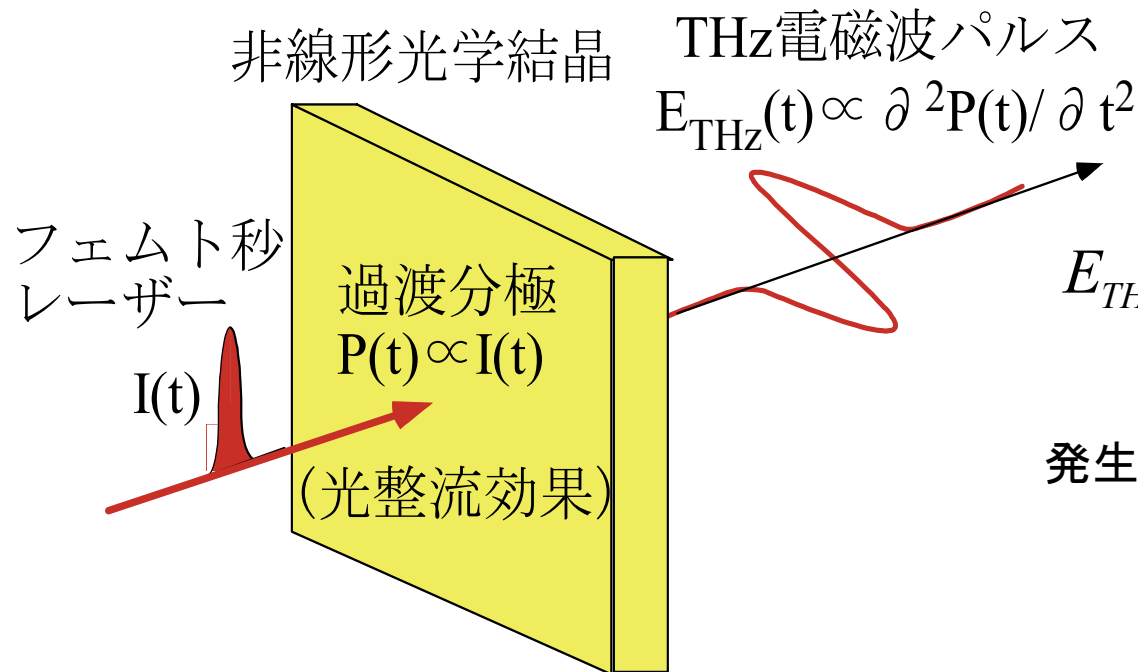
- ✓スペクトルピークは1THz以下
- ✓光源サイズが大きい
- ✓発生時の電気ノイズが大きい
- ✓バイアス電界以上のTHz電界を発生することが難しい

# 光整流効果 ( $\chi^{(2)}$ process)を用いたTHz電磁波発生

## 光整流効果THz波発生

$$P(t) = \frac{1}{cn} \chi^{(2)} I(t)$$

レーザー強度  
プロファイル



双極子放射の遠方解は分極の2次の時間微分に比例するので:

$$E_{THz}(t) \propto \frac{\partial^2 P(t)}{\partial t^2} \propto \frac{\partial^2 I(t)}{\partial t^2}$$

発生効率はコーレンス長  $L_c$  に比例

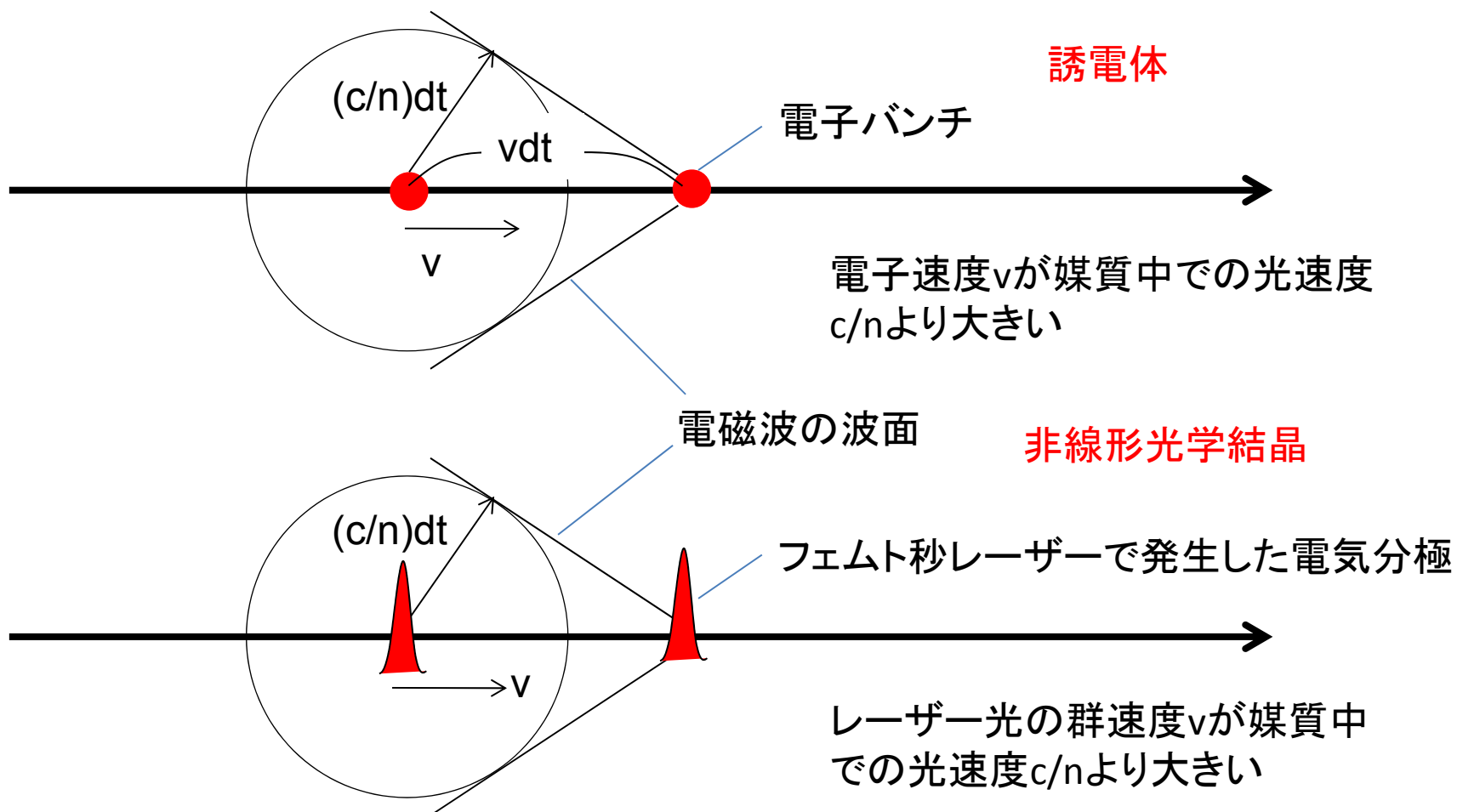
$$E_{THz}(\omega) \propto L_c$$

$$L_c(\omega) = \frac{\pi}{\Delta k(\omega)}$$

高効率なTHz波発生には波数不整合  $\Delta k$  をできるだけ小さくし、コーレンス長  $L_c$  をできるだけ大きくすることが必要。

# Cherenkov型位相整合とは？

もともとは電子ビームバンチからの下記のような電磁波放射についてCherenkov放射という言葉を用いていた。



# Nizhny Novgorod大のBakunovらのグループによる報告

S. B. Bodrov, A. N. Stepanov, M. I. Bakunov, B. V. Shishkin, I. E. Ilyakov, and R. A. Akhmedzhanov: "Highly efficient optical-to-terahertz conversion in a sandwich structure with LiNbO<sub>3</sub> core"  
Optics Express Vol.17, No. 3, 1871 (2009).

Siプリズム(8mm)+LN結晶(50um)+BK7ガラスの構造で**パワー変換効率0.1%**, THz帯域~3THzを達成,

励起レーザー: 40  $\mu$ J, 50 fs  
Ti:sapphire laser

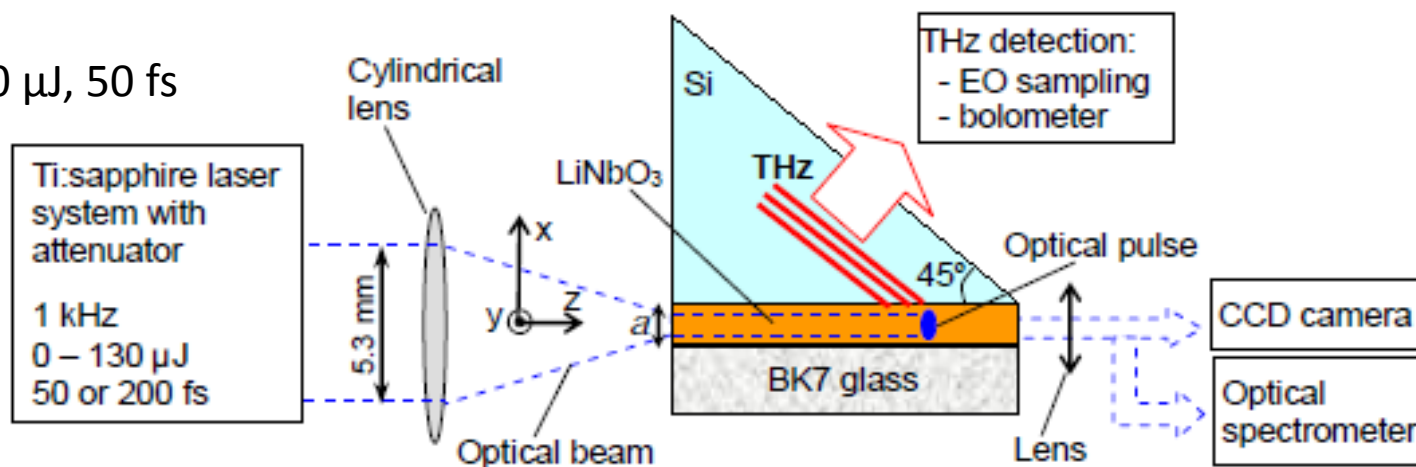


Fig. 1. Schematics of the sandwich structure and experimental setup.



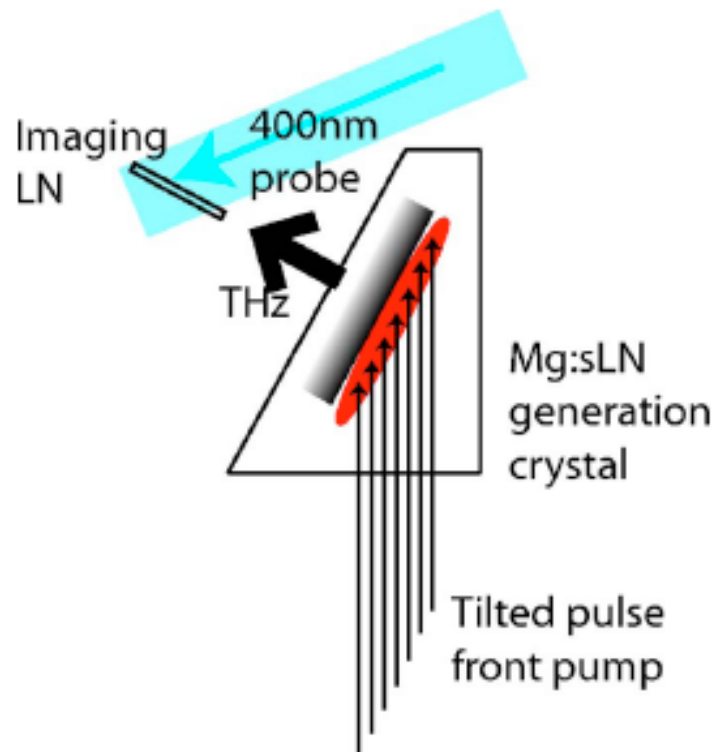
# Tilted optical pulse frontによる高強度THz波パルスの発生

Yeh, et al, APL **90**, 171121 (2007)

Hebling et al, IEEE J. Sel. Topics in QE, **14**, 345 (2008)

Hebling et al, JOSA B **25**, B8 (2008)

✓LiNbO<sub>3</sub>結晶からの10uJ/pulseを観測(周波数ピーク0.5THz)



～MV/cmのTHz波発生  
(ただし平均パワーは～1mW)  
光子変換効率>50%

- 励起レーザー: 10Hz~1kHz  
のチタンサファイア再生増幅器
- 帯域～3THz

# 空気・気体プラズマからのTHzパルス放射のこれまでの報告

Hamster et al, PRL **71**, 2725 (1993) ~50mJ, He gas, ponderomotive  
Hamster et al, PRE **49**, 671 (1994) フルペーパー

Cook et al, Opt. Lett. **25**, 1210 (2000) FWM( $f+f-2f$ )による最初の論文

Kreß et al, Nature Physics, **2**, 327 (2006) CEPの影響

Kim et al, Opt. Express, **15**, 4577 (2007) transient photocurrent mode  
(ドリフト電流モデル)

レーザー誘起プラズマTHz放射についての一連の論文

Xie et al, PRL **96**, 075005 (2006) FWMの位相制御性を確認

Zhong, et al, APL **88**, 261103 (2006) 放射パターン

Dai, et al, PRL **97**, 103903 (2006) 逆過程による検出

Xie et al, APL **90**, 141104 (2007) Pre-pulseによるプラズマ生成の影響

Karpowicz and Zhang, PRL **102**, 093001(2009) トンネルイオン化の計算

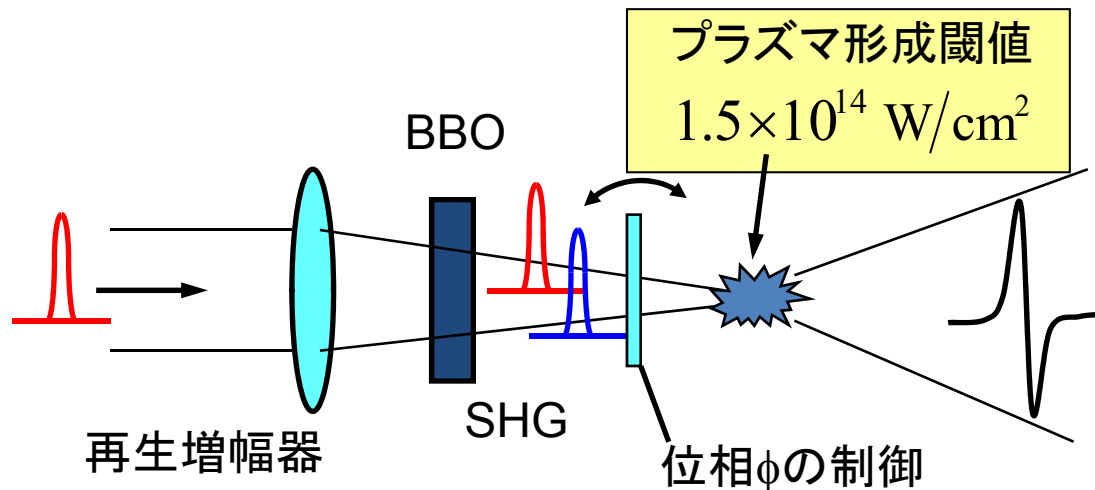
Silaev and Vvedenskii, PRL **102**, 115005(2009) 量子力学的計算

Dai et al, PRL **103**, 023001(2009) 偏光制御

Babushkin et al, PRL **105**, 053903 (2010) pumpパルスのreshaping効果

Wen and Lindenber, PRL **103**, 023902 (2009).

# レーザー誘起空気プラズマ中の 4光波混合(Four Wave Mixing)によるTHz電磁波放射



**10THz以上の広帯域  
発振可能**

4光波混合による光整流効果

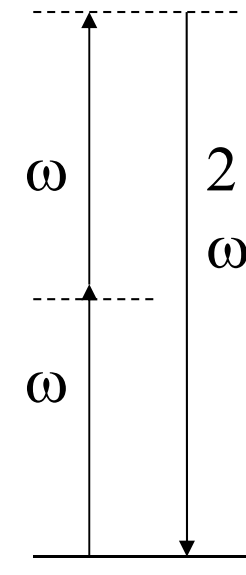
$$P^{(3)}(0) \propto \chi^{(3)}(0=\omega+\omega-2\omega)E(\omega)E(\omega)E^*(2\omega)$$

$$\propto \chi^{(3)}(0=\omega+\omega-2\omega)|E(\omega)|^2|E(2\omega)|\cos\phi_g$$

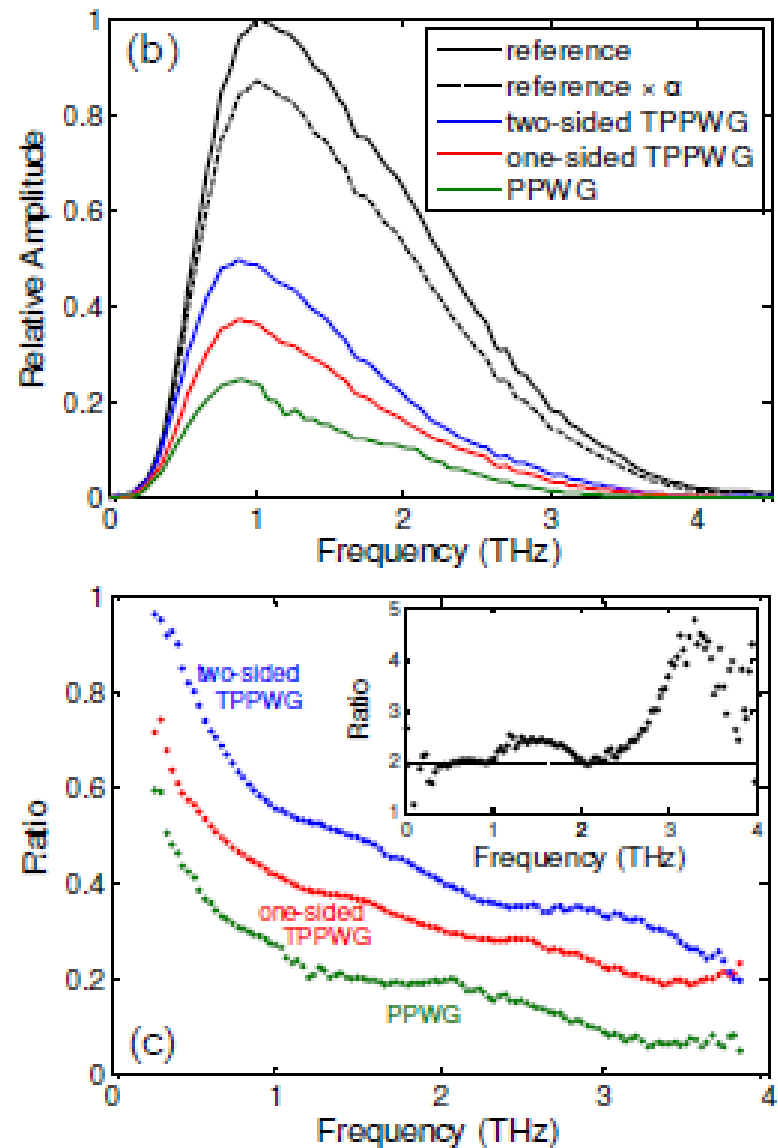
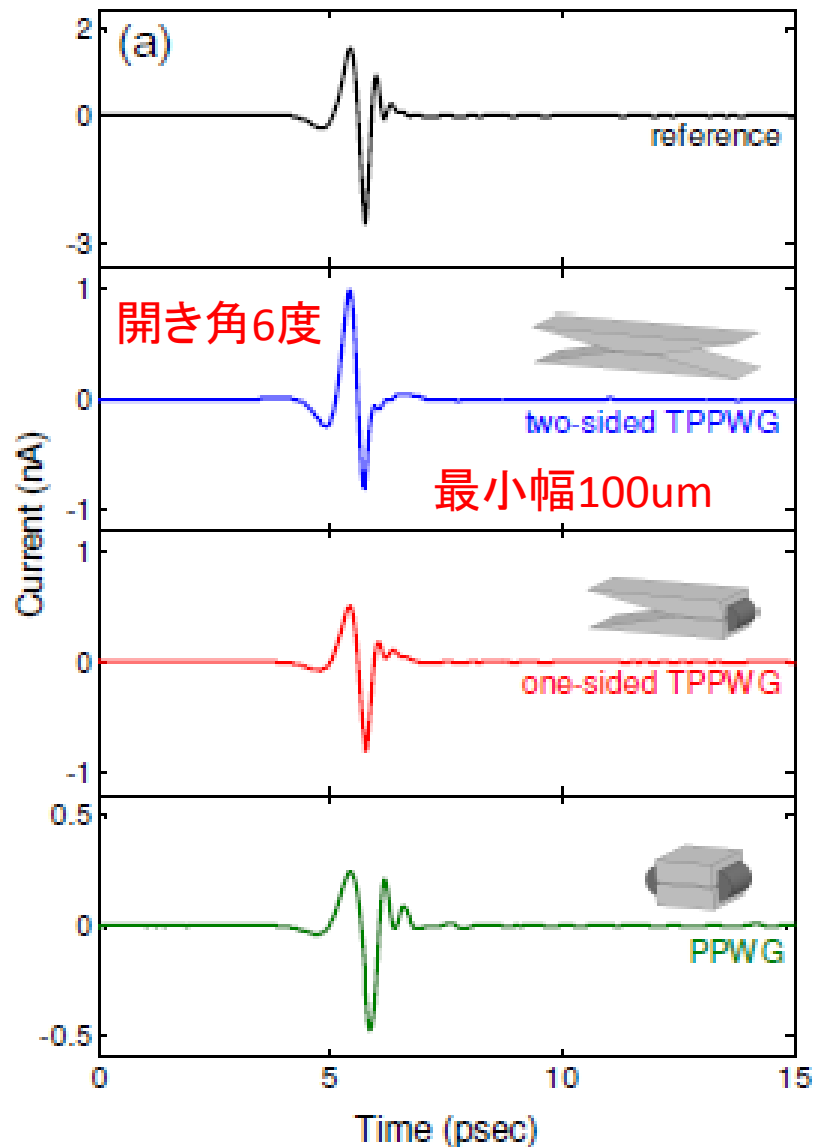
THz波放射

$$E_{\text{THz}} \propto d^2P^{(3)}(t)/dt^2$$

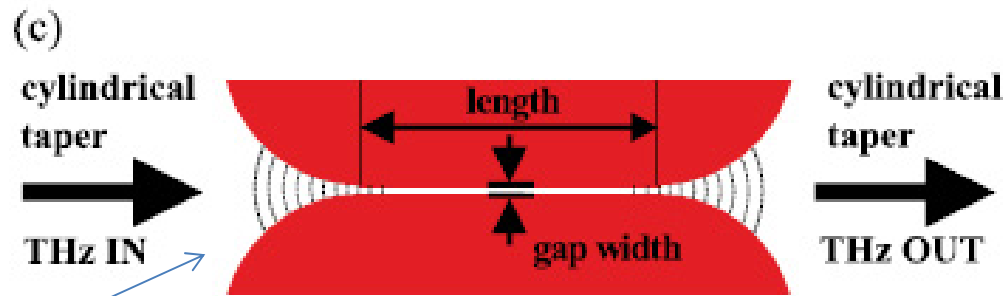
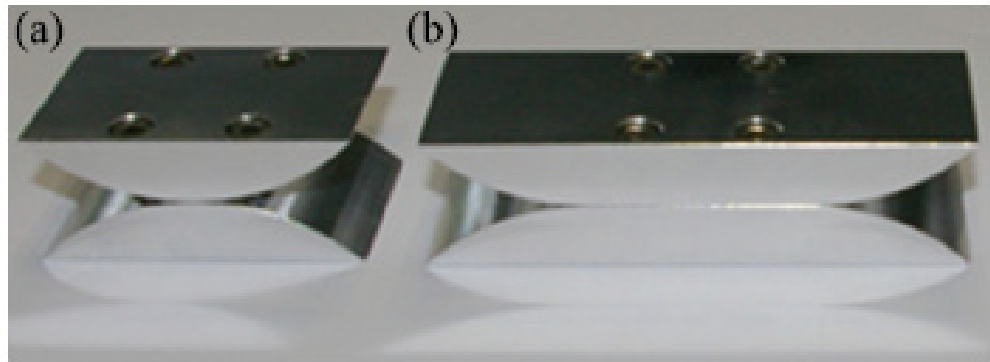
Cook *et al*, Opt. Lett. 25, 1210 (2000)



# Tapered parallel-plate waveguide (TPPWG)によるサブ波長領域へのTHz波集束



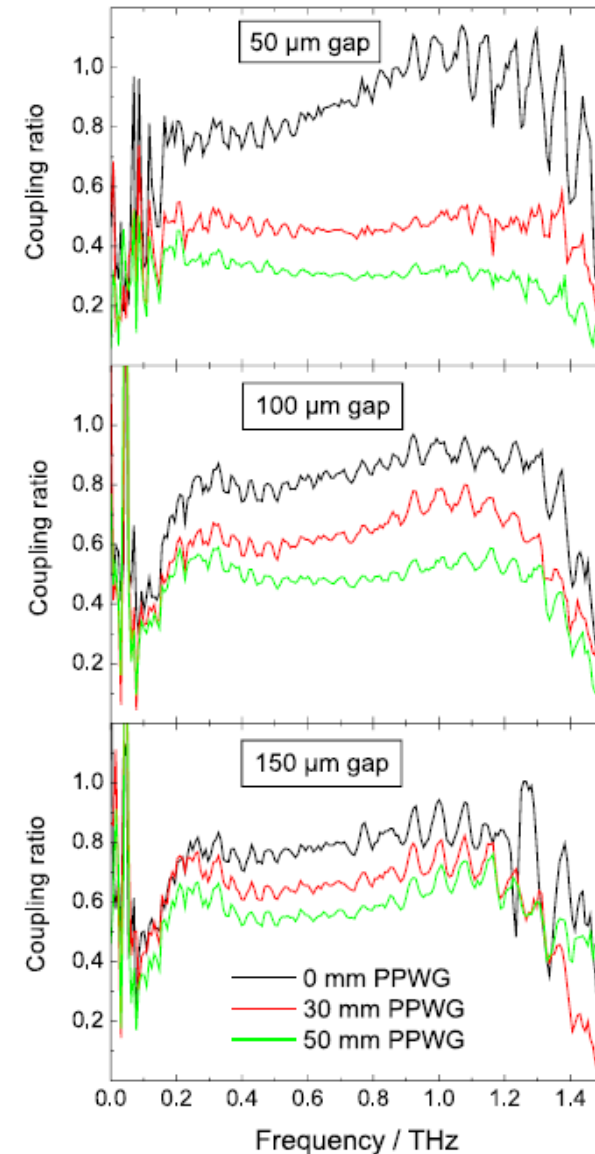
# Tapered parallel-plate waveguide (TPPWG)によるサブ波長領域へのTHz波集束



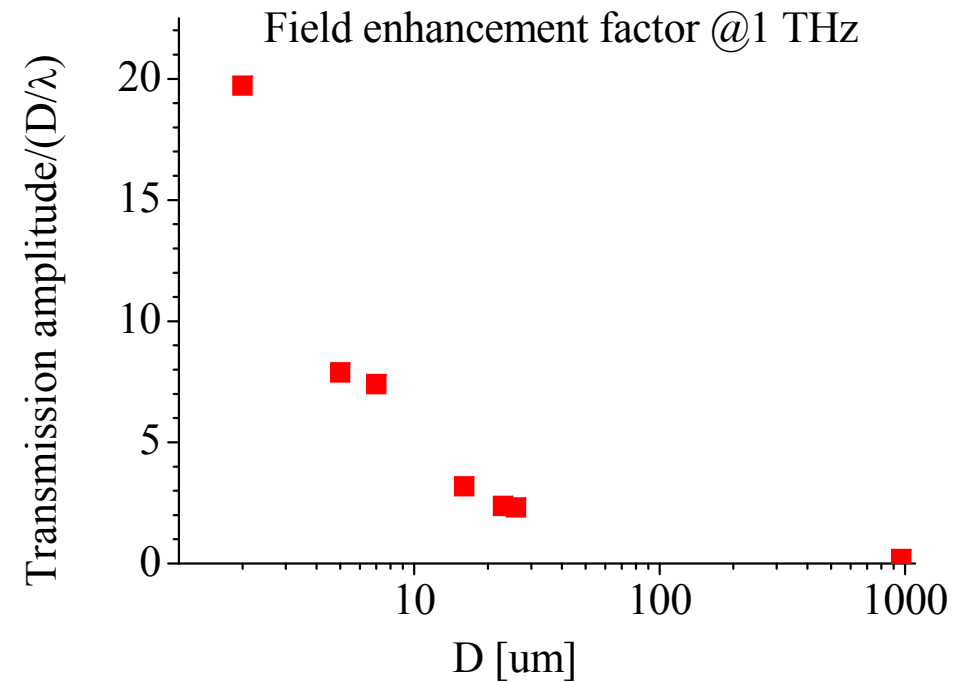
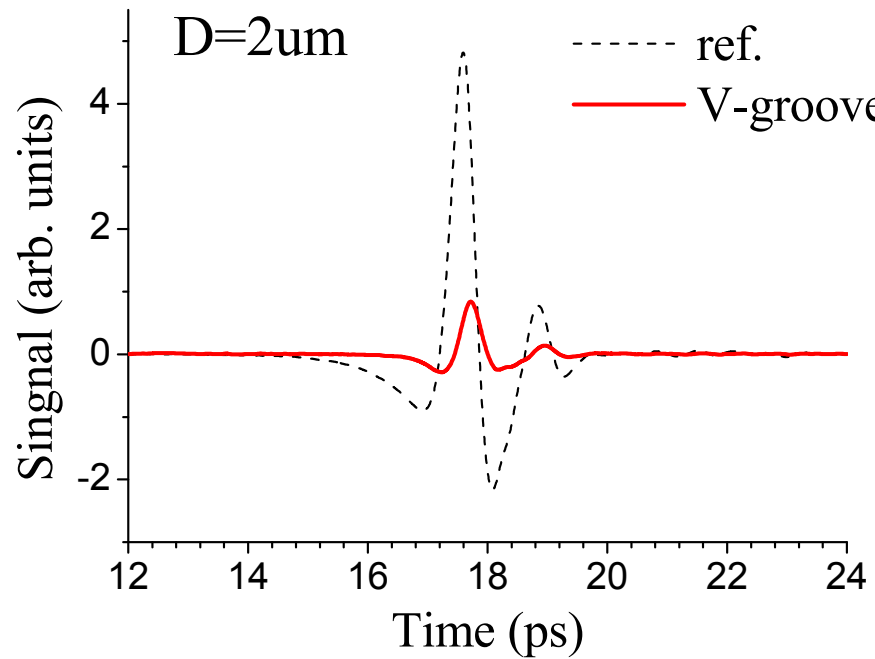
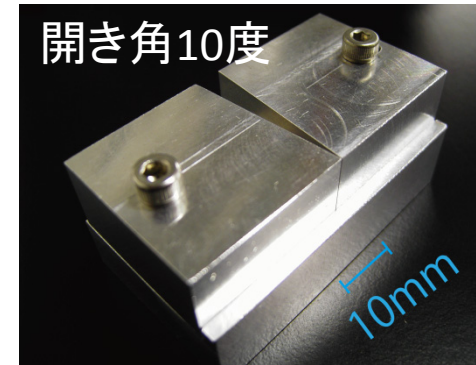
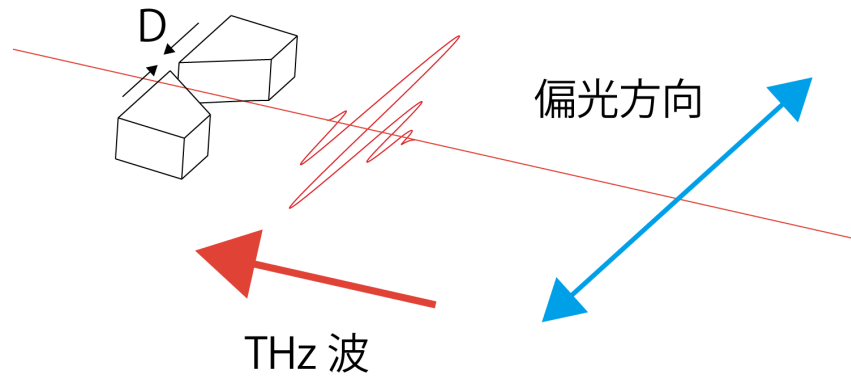
円筒面

円筒面を用いた導波路構造で非常に高いサブ波長領域の透過率を観測

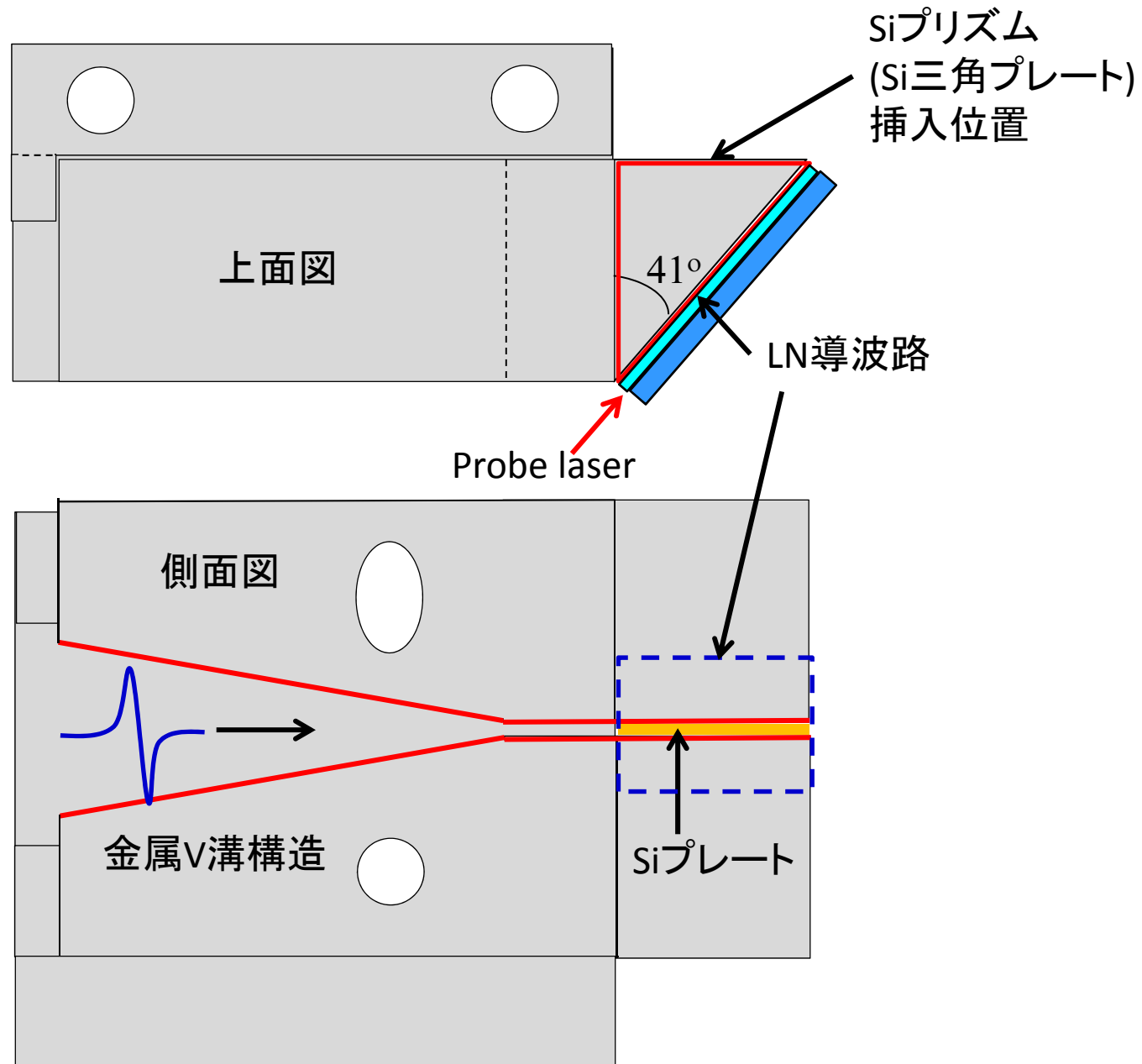
Gerhard, *et al*, Appl. Phys. Lett. **101**, 041109 (2012).



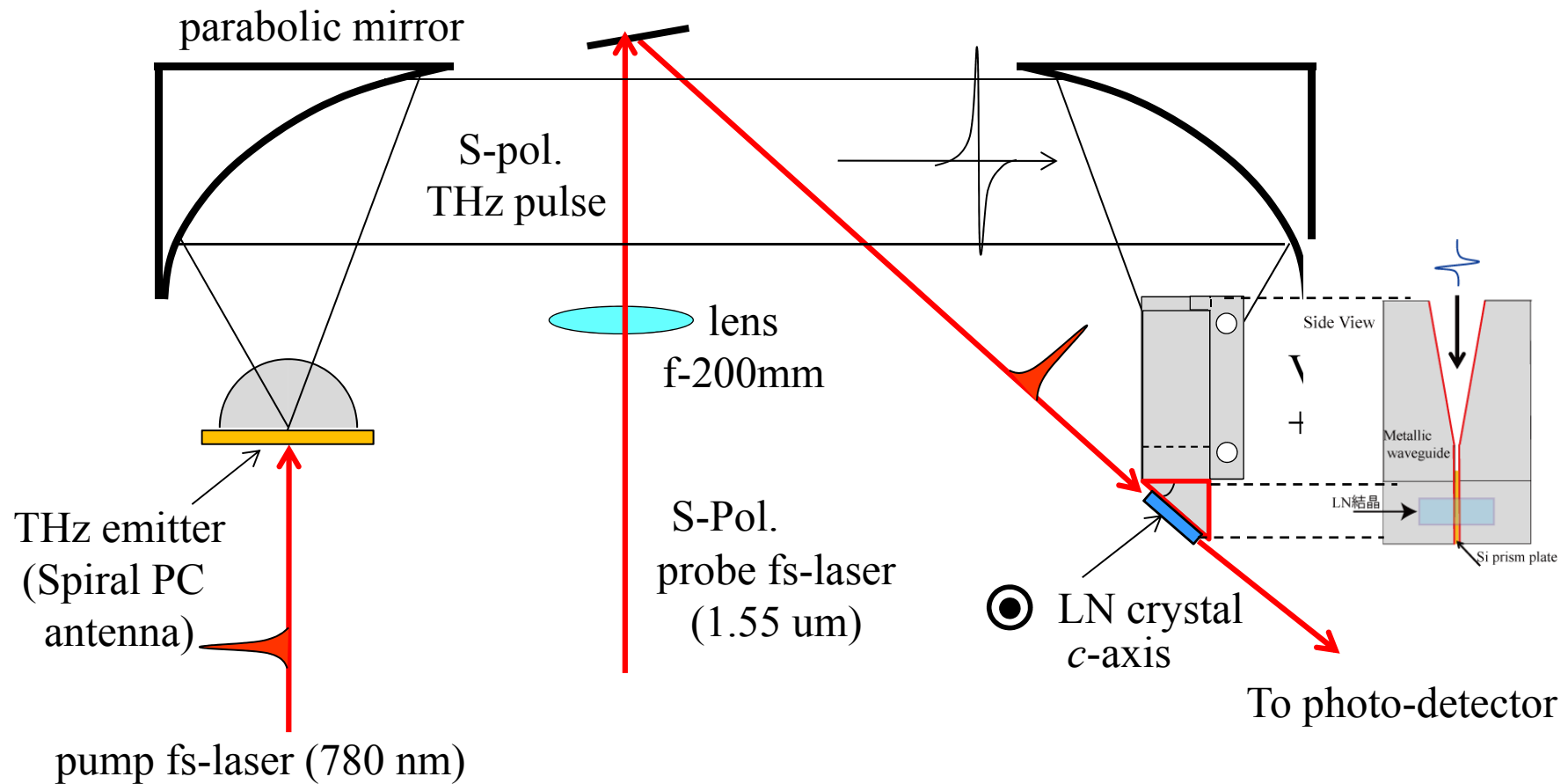
# 金属V溝を利用したTHz波の超集束



# Cherenkov位相整合と金属導波路を用いたEOサンプリング素子

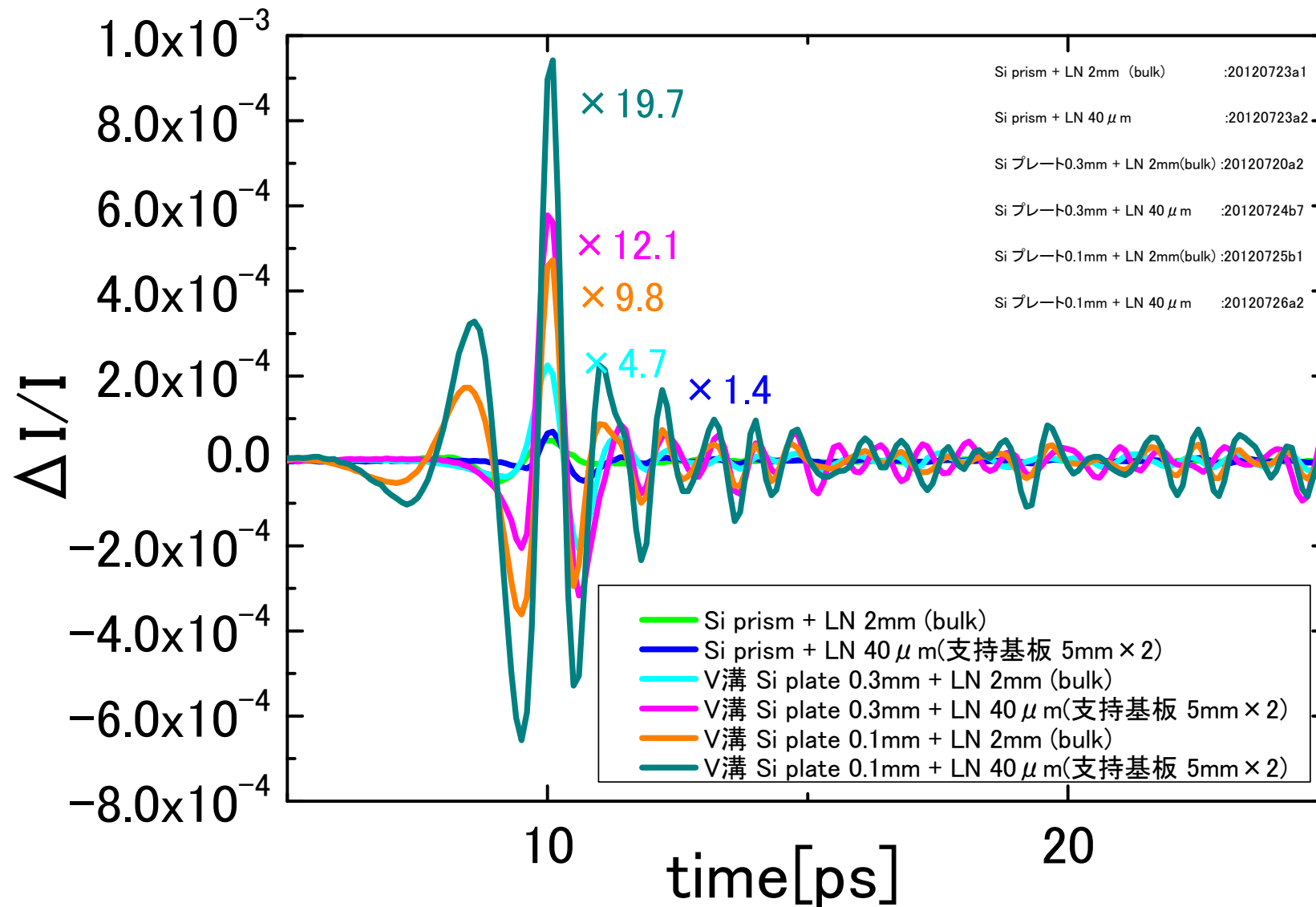


# Cherenkov位相整合と金属導波路を用いた THz波の高感度EOサンプリング





# 金属V溝による感度増強：導波路幅0.3mmおよび0.1mmの場合



# Denmarkのグループによる実験

Iwaszczuk, *et al*, Opt. Express , 20 (2012) 8344

<TPPWG>

材質:アルミ

入口幅:  $x=3\text{mm}$ , 出口幅:  $x=49\mu\text{m}$ 、  
プレート間隔入口:  $1\text{mm}$ , 出口  $0\sim 500\mu\text{m}$   
長さ:  $25.4\text{mm}$

<EO結晶>

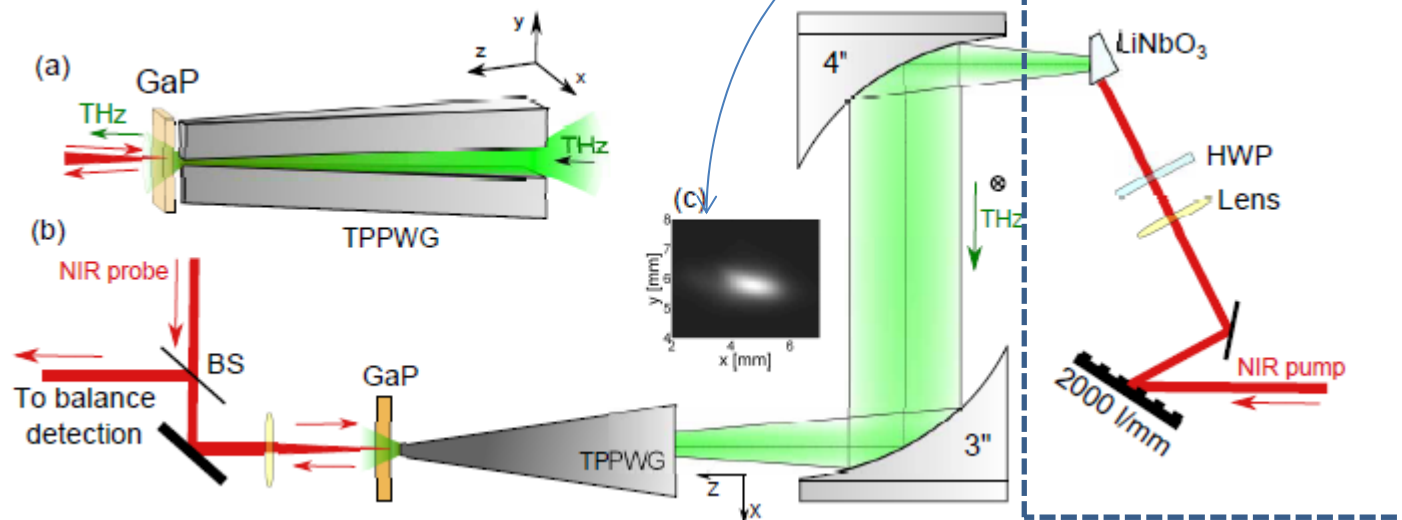
300 $\mu\text{m}$ 厚のGaP[110]結晶

TPPWGの先端から360 $\mu\text{m}$ 離して配置

プローブ光を  $f=50\text{mm}$  レンズで約20 $\mu\text{m}$  に集光

<Focusing>

TPPWGの入口でx方向FWHM幅  
1.6mm、Y方向FWHM幅0.7mm  
(有効径250 $\mu\text{m}$ の焦電検出器で測定)



<Laser> 0.6mJ, 1kHz, 90fs, 800 nm, Ti: sapphire laser Regen amp.

# GaPによるEOサンプリングの測定結果

$$E_{THz} = \frac{\Delta I}{I_0} \frac{c}{\omega n_0^3 r_{41} L}$$

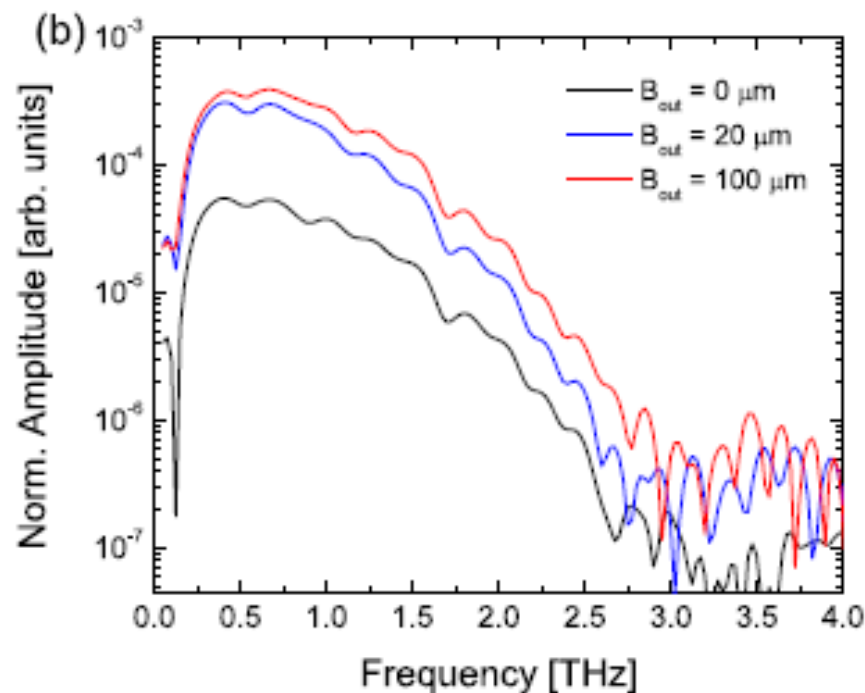
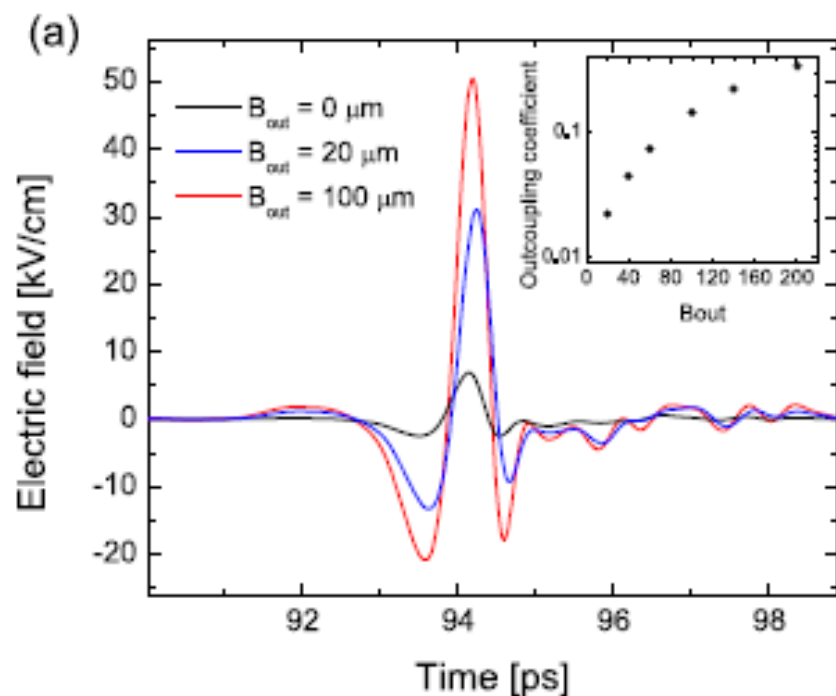
EO信号

$r_{41} = 0.88 \text{ pm/V}$

$L = 0.3 \text{ mm}$

$n_0$ : GaPの屈折率@800nm

$\omega$ : サンプリング光の角周波数



内挿図はCST Microwave Studioを用いて計算したプレート間隔Boutに依存した結合係数 $C = \text{GaPでのピークTHz電界(平均値)} / \text{TPPWG先端での電界}$

- ✓ 入射端での電界69 kV/cmとGaP結晶への結合効率を考慮して、先端幅Bout=20μmのときのピーク電界は1.4MV/cmを超え、約20倍の増強と結論。

# 高強度THz波パルスの応用

---

- ✓ 多光子電離
- ✓ クーパー対消滅
- ✓ フォノン励起
- ✓ THz帯非線形物理

レーザーの電界が $10^{10}$  V/cm(=  $1\sim 10^{17}$  W/cm<sup>2</sup>) (破壊電界)程度になると摂動論的な非線形光学は破綻する。

→ 非摂動論的 **高次高調子発生**

**ponderomotive potential**  $U_p = e^2 E^2 / (4m\omega^2) \propto$  **波長の自乗!**

→ Ponderomotive force  $F_p = -dU_p/dx$  による **電子加速**

→ 磁場による効果が無視できなくなる。→ **Lorentz force** による **SHG発生**

さらに強くなると相対論的効果を考慮する必要がある。

# まとめ

---

- (1) フェムト秒レーザー励起によりピークで1 MV/cmのTHz波電界が発生できるようになった。
- (2) CSR放射, THz帯発振FEL, サブTHz発振ジャイロトロンなど高出力THz光源が利用できるようになってきた。
- (3) 金属導波路の超集束効果を利用してTHz波の強度を数10～数100倍さらに増強することができる。
- (4) Compact-ERL電子ビームバンチによるCSRは高出力かつ高ピーク強度のTHz波光源であり, その特徴を活かした学術研究と応用を目指す必要がある。  
例: ●1.3GHzの高強度THzパルスを用いた, シングルショット高時間分解(～0.8ns)分光およびイメージング  
●THz波とX線同時測定