

近畿総合通信局 産学官連携セミナー、テラヘルツテクノロジーフォーラム共催研究会
「テラヘルツテクノロジーと超ブロードバンド情報通信の展望」

日時:2011年6月27日(月)

13:00~17:50

場所:大阪大学豊中キャンパス

Σ(シグマ)ホール

テラヘルツテクノロジーの現状と展望

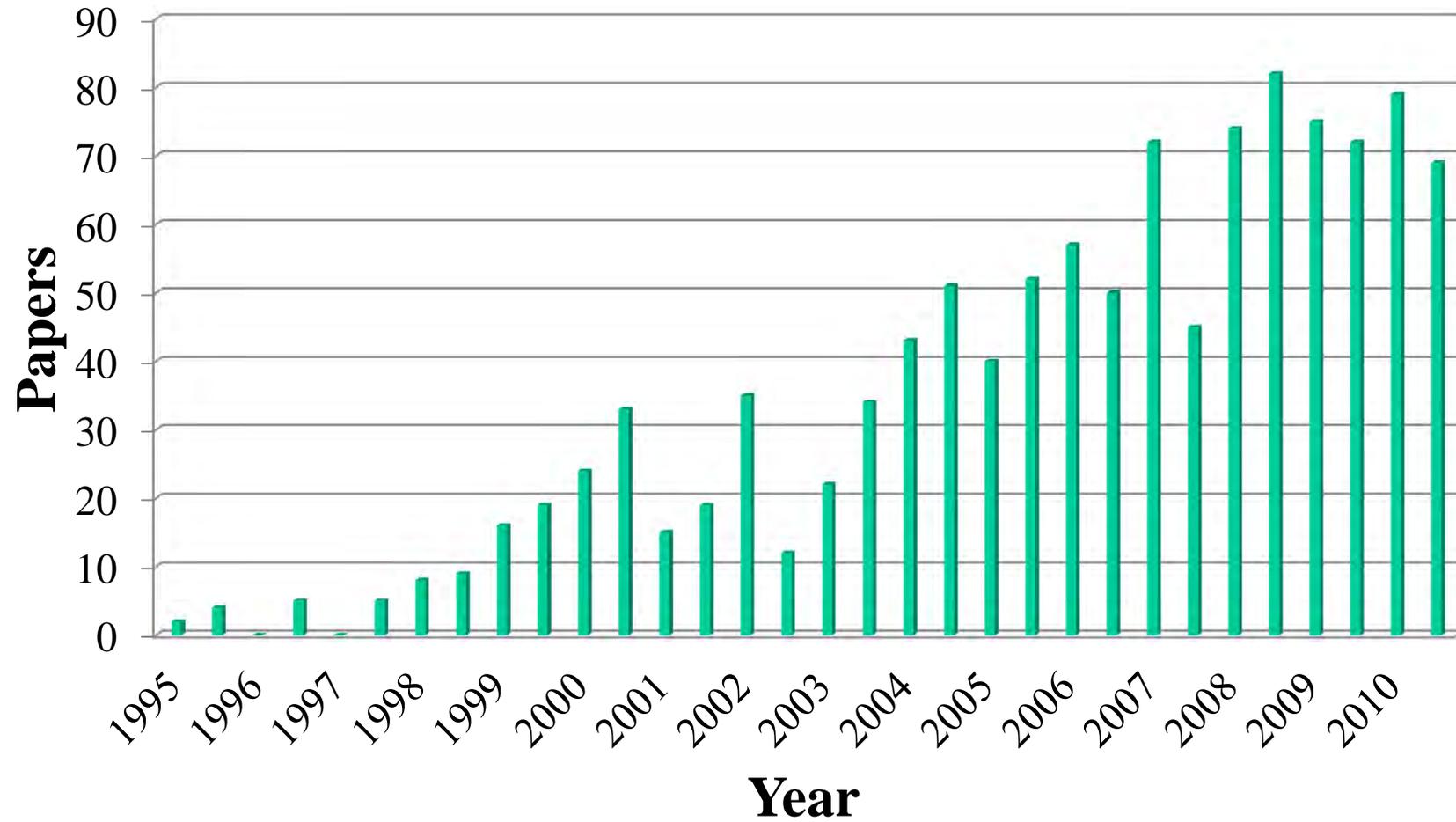
谷 正彦

福井大学 遠赤外領域開発研究センター

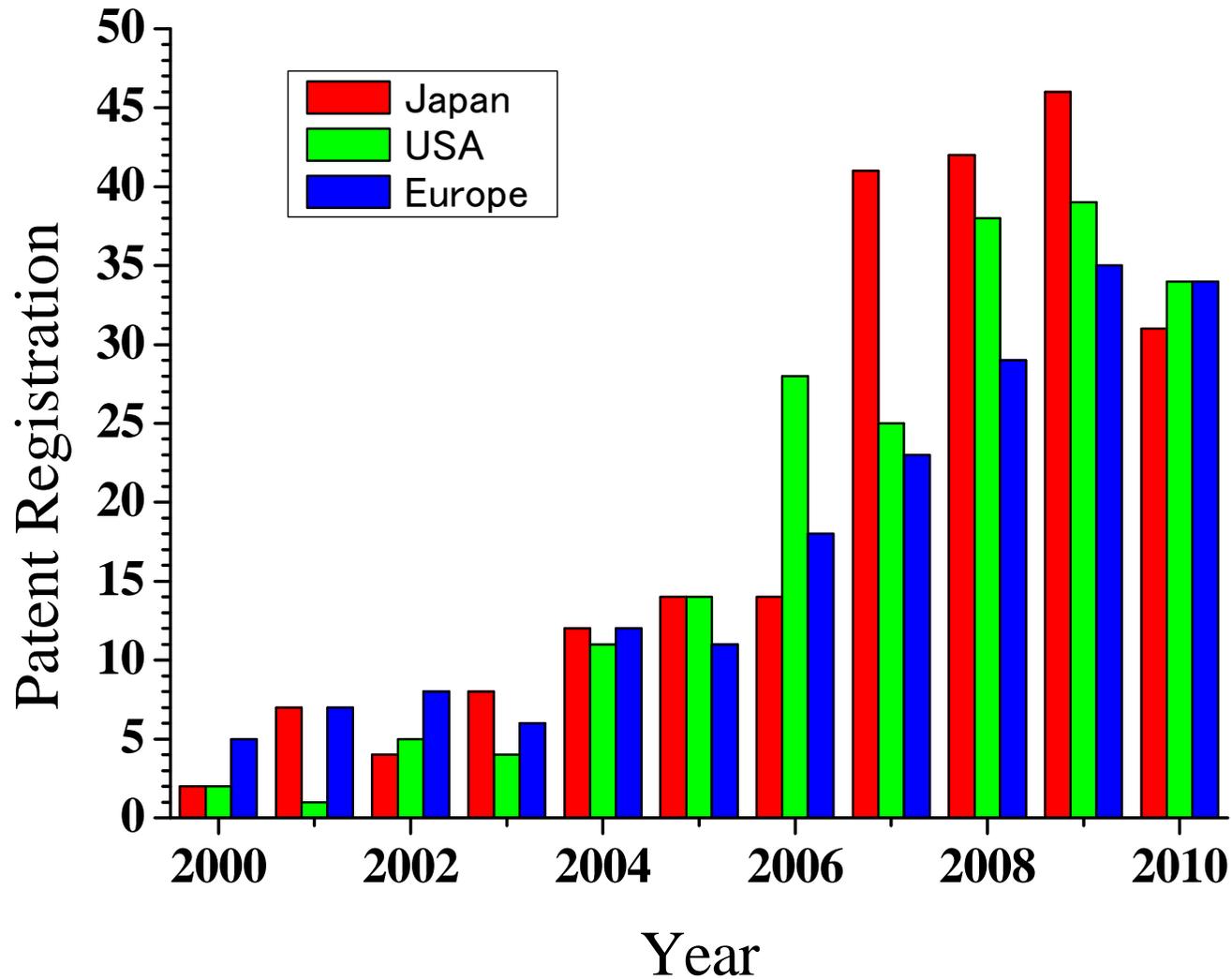
概要

1. はじめに: テラヘルツテクノロジーのめざすもの
2. THz光源技術
 - ・ 半導体固体発振器: 共鳴トンネルダイオード
 - ・ THz-QCL
 - ・ 高出力差周波発生
 - ・ 広帯域 Photomixing
3. THz検出器技術
 - ・ 長波長動作光伝導アンテナ
 - ・ ノンコリニアEOサンプリング
4. 導波路・伝送技術
 - ・ 平行平板導波路: THz波の超集束
5. まとめ: 今後の課題

応用物理学会でのTHzテクノロジー関連発表件数



日米欧のTHzテクノロジー関連特許登録数



日本における最近のTHzテクノロジー関連助成事業

**JST 研究成果展開事業(産学共創基礎基盤研究プログラム)の
技術テーマ「テラヘルツ波新時代を切り拓く革新的基盤技術の
創出」における新規研究課題決定(2011年6月14日発表)**

12件採択

テーマ支援期間:最長10年

研究期間:原則2年

研究費:1課題あたり最大3千万円/年程度

**総務省 平成23年度電波資源拡大のための研究開発に係る提案の公募の
結果(2011年6月17日発表、6件採択)**

**「超高周波搬送波による数十ギガビット無線伝送技術の研究開
発」**

2. 4億円程度、5か年

日本電信電話株式会社

富士通株式会社

独立行政法人情報通信研究機構

TeraTech テラヘルツイノベーションが目指すもの

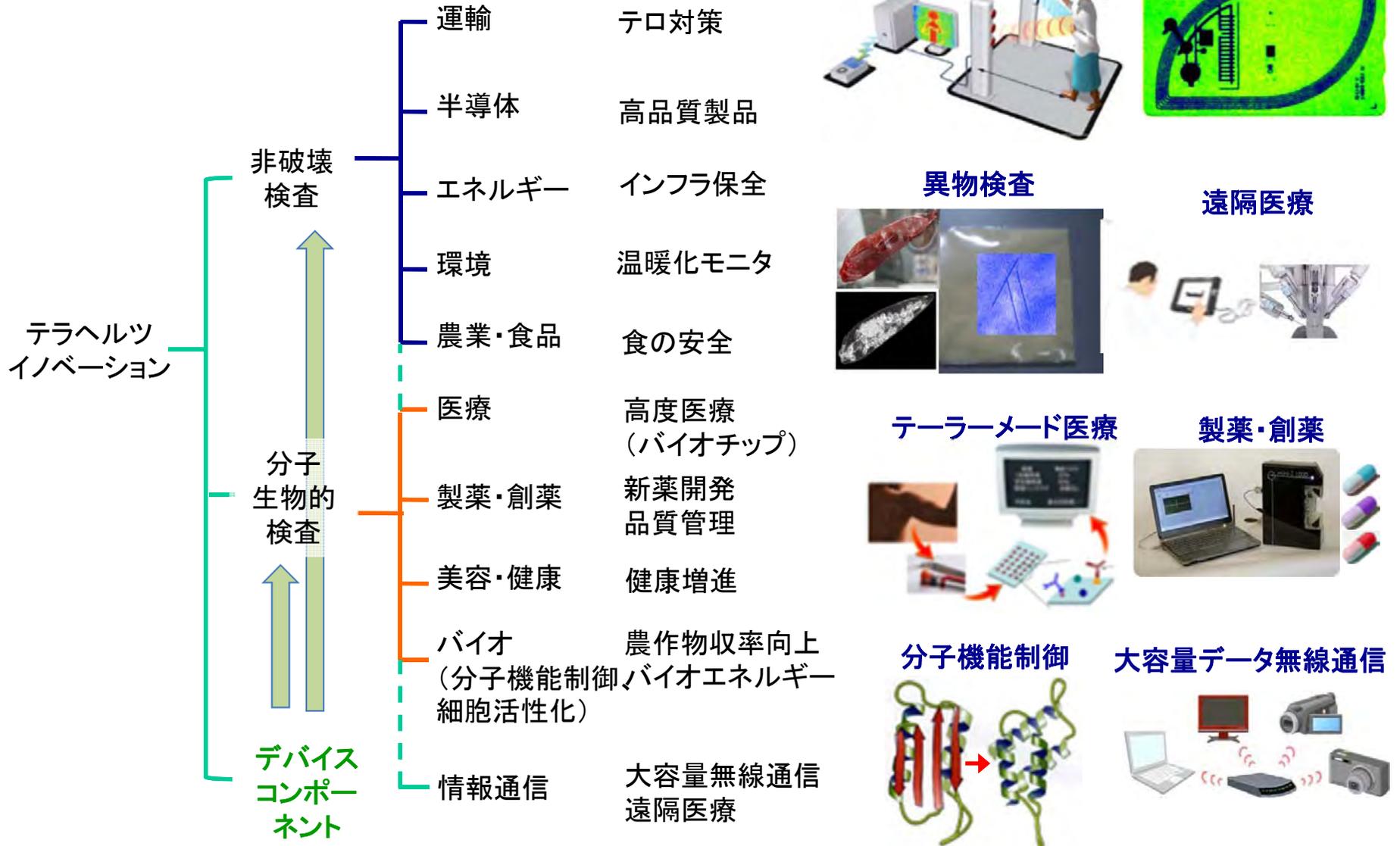
テラヘルツ産業の創出

既成産業の高効率化, 低コスト化

生活への効果

セキュリティゲート

プラスチック製品検査



基礎研究への要望・期待

1. 広帯域・高強度テラヘルツ光源の開発

- ・ レーザー励起テラヘルツ波光源の高出力・広帯域化
- ・ 半導体デバイス光源の高出力・広帯域化

2. 高感度テラヘルツ検出器の開発

- ・ 高感度・高速室温動作の検出器・イメージングデバイス
- ・ 導波路, メタマテリアル, フォトニック結晶等を用いた高感度・高機能検出器技術

3. 安価で小型の分光・イメージングシステムの基盤技術開発

- ・ 可搬型のフィールド用分光／イメージングシステム要素技術
- ・ 安価な光源・検出デバイスの要素技術
- ・ テラヘルツ波の伝搬・制御・変調技術

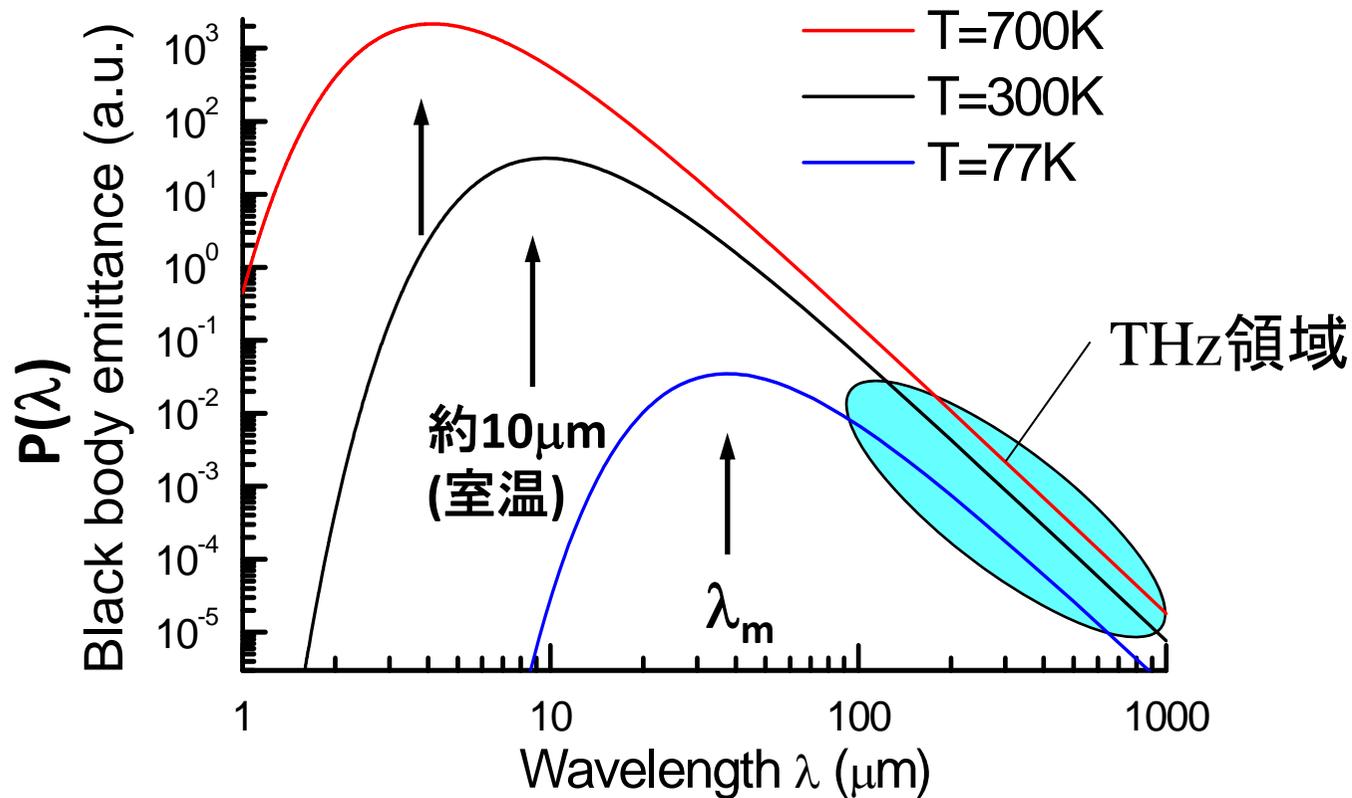
4. 新たな応用探索、基盤整備

- ・ 学際的な研究開発の推進
- ・ 他の光源・センシング・情報通信技術との融合
- ・ データベース・計測標準の確立

2. THz光源技術

- 半導体固体発振器：共鳴トンネルダイオード
- THz-QCL
- 高出力差周波発生
- 広帯域 Photomixing

黒体からの熱輻射とPlanckの輻射公式



$$P(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(ch/\lambda k_B T) - 1}$$

(波長 λ における単位面積, 単位時間, 単位立体角, あたりの放射強度)

ウィーンの変移則

$$\lambda_m [\text{mm}] = 2.89 / T [\text{K}]$$

λ_m : ピーク波長[mm]

一般の物質からの放射エネルギーと放射率

一般の物質からの放射エネルギー W' は理想的な黒体輻射によるエネルギー W にと放射率(Emissivity) ε をかけたもので表される。

$$\varepsilon = W' / W \quad \text{放射率の定義 (0~1の値を持つ)}$$

物体表面に放射エネルギーが入射したときの吸収率 α 、反射率 ρ 、透過率 τ とすると、エネルギー保存即より次の関係が成立する。

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

また、放射率と吸収率の間には次の関係が成り立つ

$$\varepsilon = \alpha \quad \text{キルヒホッフの法則}$$

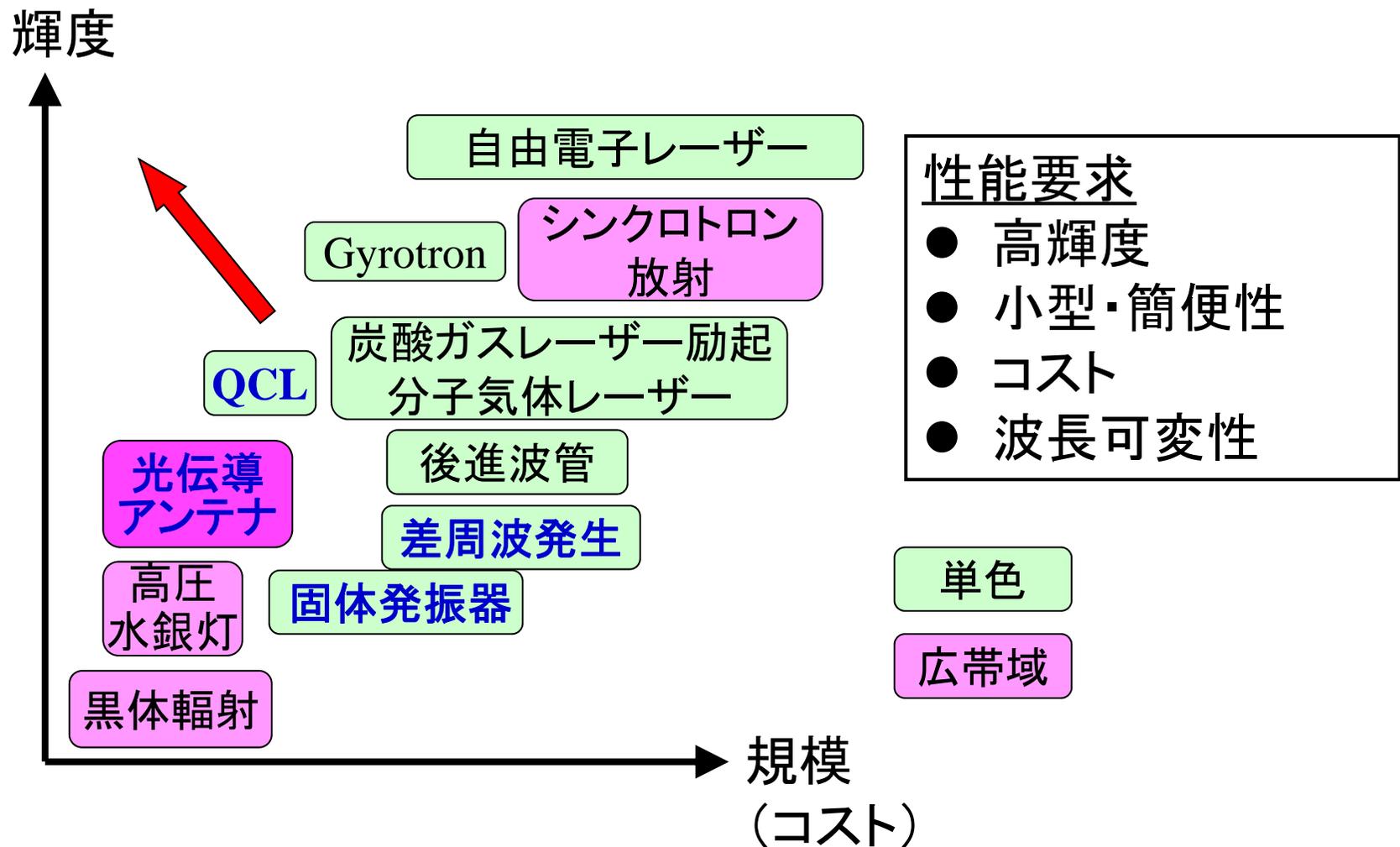
すなわち、放射エネルギーを吸収しやすい物体は同時に放射しやすい。これをキルヒホッフの法則という。

テラヘルツ電磁波を発生させるのが難しい理由

テラヘルツ電磁波を発生させるためには非常に早く電流を変調する必要がある。
しかし・・・

- (1) 電気回路に抵抗 R と容量 C があると $R \times C$ で決まる時定数よりも早く電流を変調することができない。
- (2) 可視、近赤外域のようにレーザー発振しやすい物質がない。
(ただし、近年量子カスケードレーザーという、人工的な物質(半導体量子構造)を用いた新しいレーザーが発明され、テラヘルツレーザーが実現された)
- (3) 発生するのと同様、テラヘルツ電磁波を検出することが難しい。

テラヘルツ帯光源のいろいろ



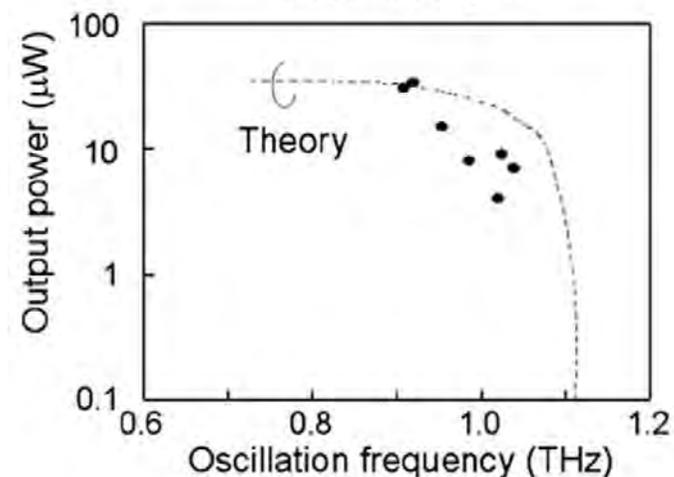
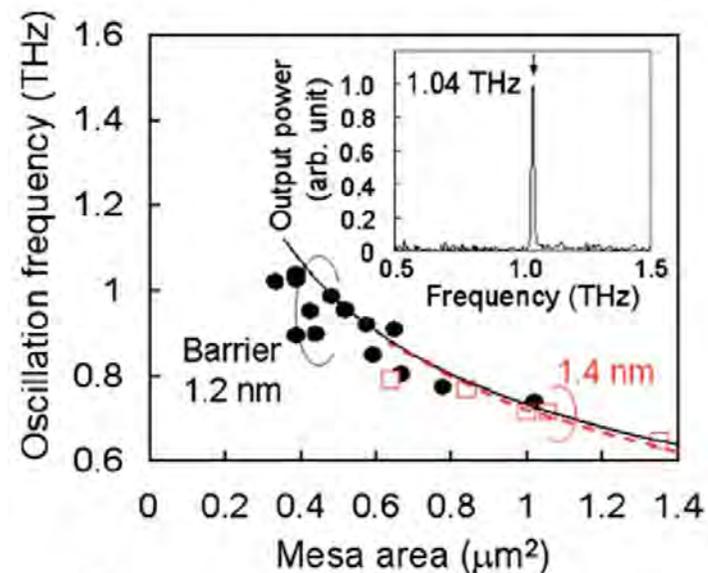
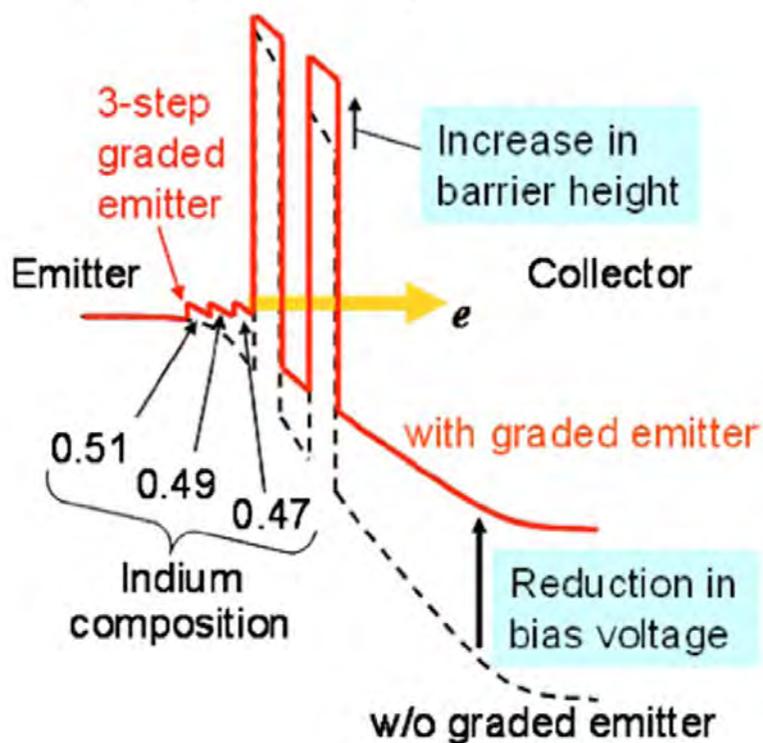
共鳴トンネルダイオードの室温での1THz超基本波発振

Suzuki et al, APL **97**, 242102 (2010): 東工大 浅田研

GaInAs/AlAs double-barrier resonant tunneling diodes

7 μ W @1.04THz, 10 μ W @0.9-1 THz

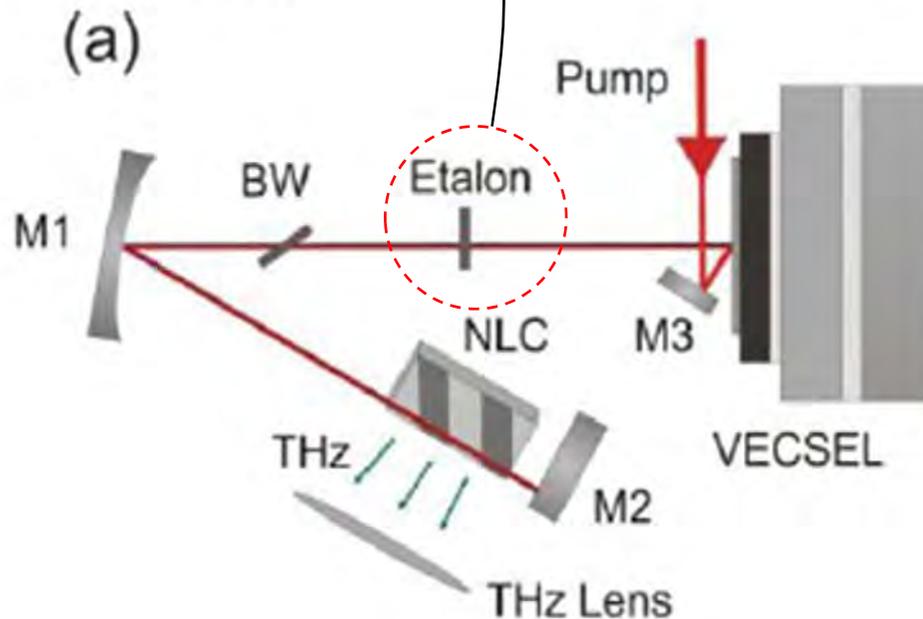
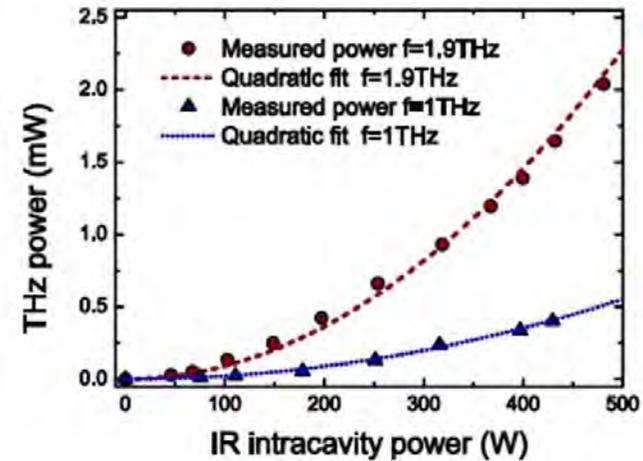
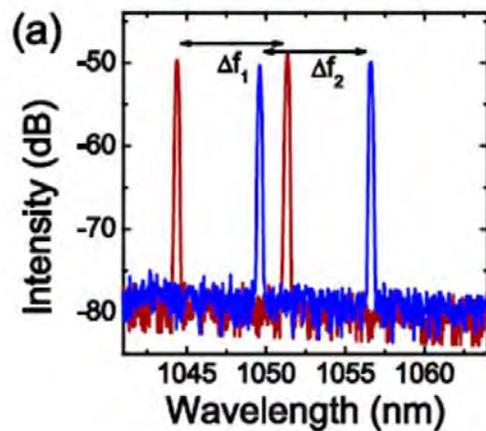
Frequency tunability \sim 4%



- ✓ 共鳴トンネルで負性微分抵抗発生
- ✓ 高周波化は寄生容量とTransit Timeを小さくすることがカギ

共振器内差周波発生による高出力CW-THz波発生

Scheller *et al*, Optics Express **18**, 27112 (2010)



Intra cavity
2波長VECSEL
完全CW-THz
mWレベル
(1.9THz発振で2mW
以上)

プリズム結合型チェレンコフ位相整合によるCW-THz波の差周波発生 (名古屋大 川瀬・水津グループ)

Optics Express 16, 7493 (2008)

Optics Express 17, 6676 (2009)

Optics Express 18, 3338 (2010)

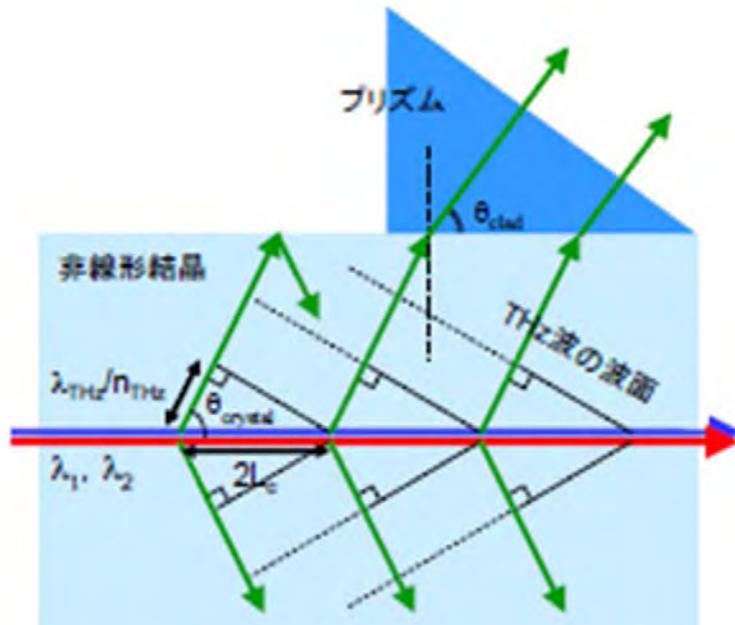


図1. チェレンコフ位相整合とプリズムによる空間結合の模式図

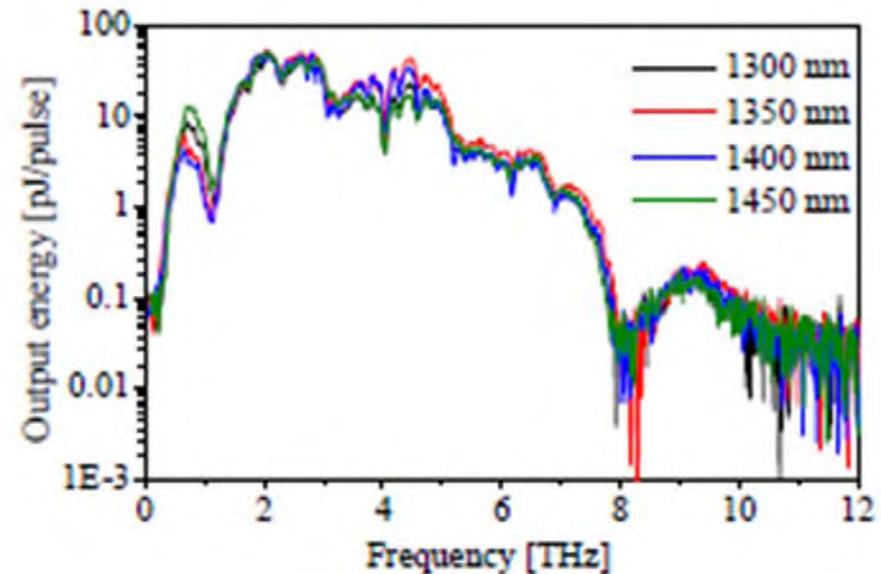


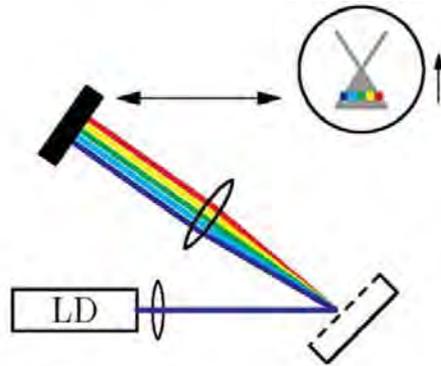
図2. DAST結晶によるTHz差周波発生.

$$\cos \theta_{clad} \cong \frac{n_{opt}}{n_{THz}}$$

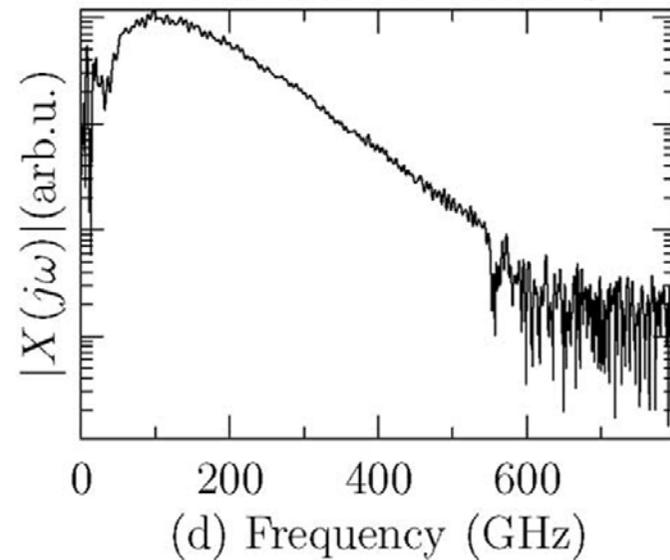
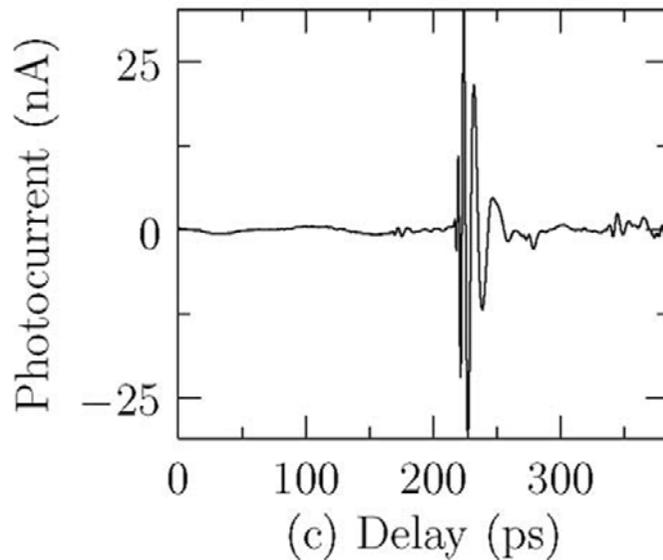
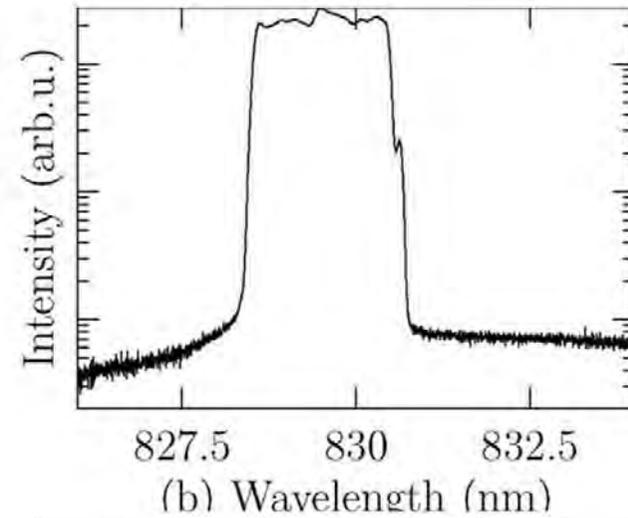
放射角 θ_{clad} は励起レーザー波長の非線形結晶中の屈折率とプリズムのTHz帯屈折率で決まる。

CW-THz-TDS system with a multi-mode LD

Brenner et al, Opt. Lett. **35**, 3859 (2010)



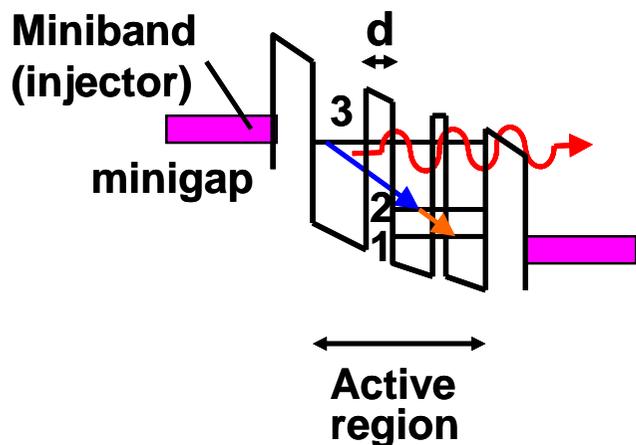
Fourier-transform external-cavity laser (FTECAL) + amplifier



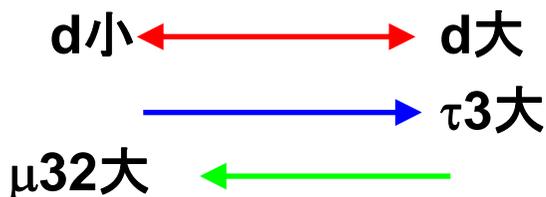
量子カスケードレーザー(Quantum Cascade Laser)

3-well system

Lasing condition: $\tau_3 > \tau_2$



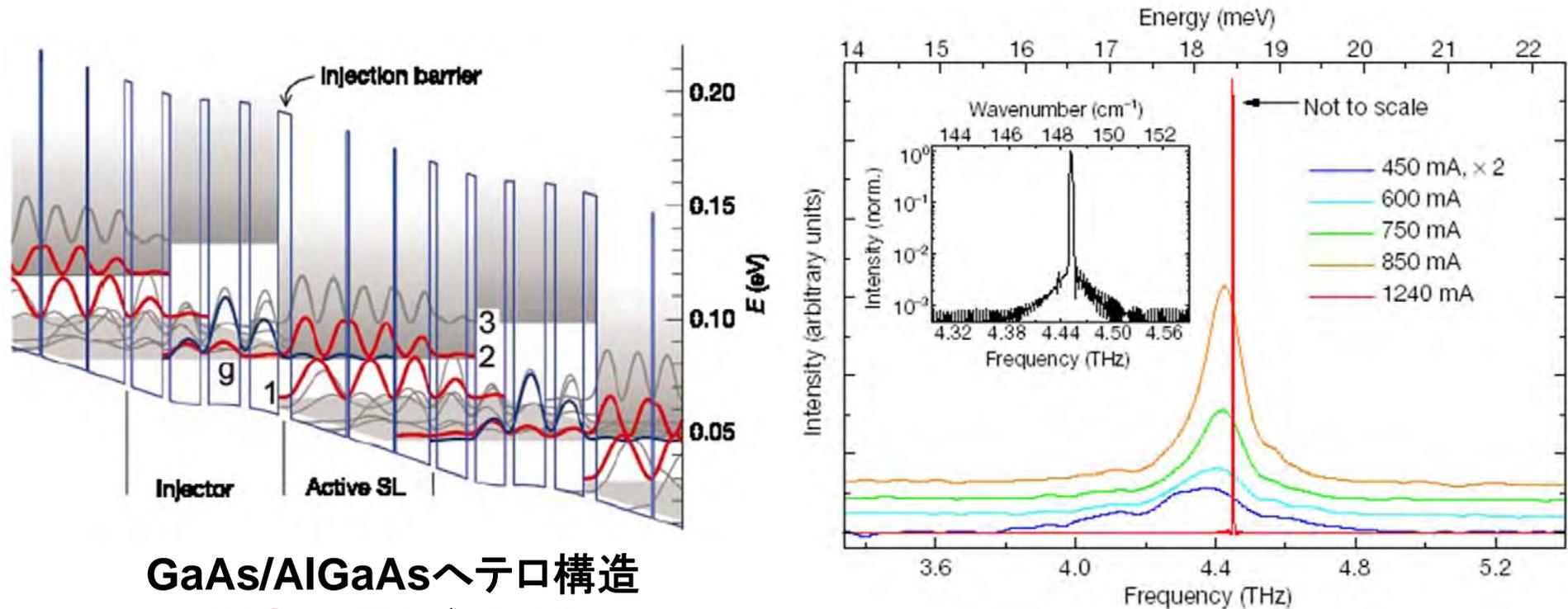
E2-E1をLOフォノンに共鳴させ、E2の電子を高速に引き抜く



- サブレベルのエネルギーは量子井戸の幅で決まる ($E_3 - E_2$) → 発振波長の制御
- ゲインが低いので多層にする → 電子のリサイクル。
- 電子遷移のみを使う(正孔は使わない)
- 同じ伝導帯の準位間の遷移、かう非常に高速な非発光遷移過程に起因してスペクトル幅が非常にシャープ → 温度にあまり影響されない発振が可能
- とんりの井戸の準位への遷移は障壁幅 d が狭いほど効率がよい。しかし、上位準位の寿命が短くなる(Trade-off)。
- THzの閉じ込め機構 → 金属、フォノン反射など
- 長波長限界は量子レベルの幅で決まる。 → できるだけ界面を平坦にして界面での散乱を減らす。

THz帯量子カスケードレーザーの例

R. Köhler *et al.*, Nature **417** (2002) 156



GaAs/AlGaAsヘテロ構造
2mW@4.4THz (<50K)

LOフォノン散乱を反転分布機構として使えない光学フォノンより下の周波数での達成は画期的だった。→2重表面プラズモン($<\epsilon$)による閉じ込めを採用。

THz-QCLの状況

長波長発振

Qin Hu's group at MIT

QCL @1.6 THz (187um) (Walther et al, APL 89, 231121 (2006))

@1.2THz(250um) (Walther et al, APL 91, 131122(2007))

⇒ 磁場印加によりさらに長波長化し, 0.85THzでの発振を確認

ハイパワー化

@4.4THz パルス発振: 248mW

CW発振: 138mW

(Electronics Letters 42, 89(2006))

高温動作

パルス発振: 189K@3.9THz

CWは発振: 117K

III-V族系半導体の光学フォノンの吸収帯5~12THzでの発振が困難だったが、Si/SiGe系のQCLによりこのギャップも埋まる可能性がある。

3. THz検出器技術

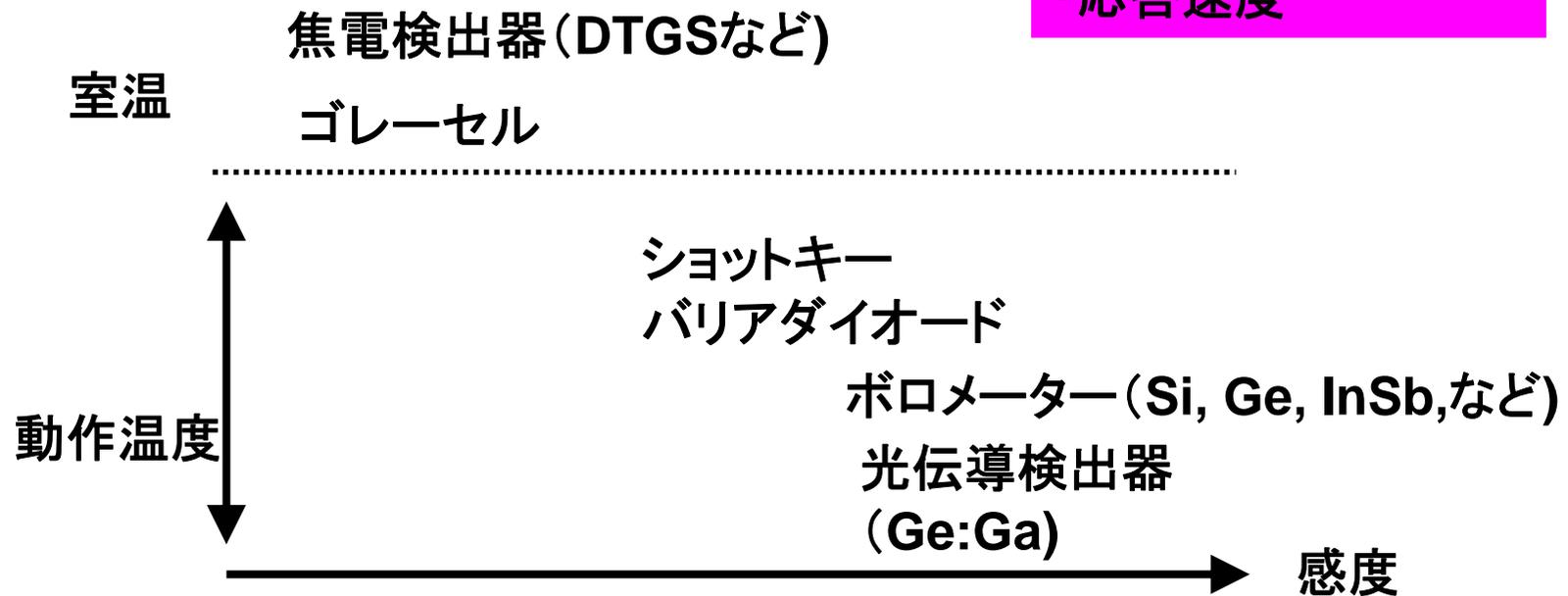
- ・ 長波長動作光伝導アンテナ
- ・ ノンコリニアEOサンプリング

テラヘルツ帯検出器

従来の検出器は冷やさないと感度が得られないのが大きな問題。

検出器の性能

- ・感度
- ・帯域
- ・低温冷却の有無
- ・応答速度



検出器の特性について

感度の指標

- **Responsivity (R)**

$$R_v = V_o/P \text{ [V/W]}, V_o: \text{出力電圧[V]}, P: \text{入射パワー[W]}$$

- **Detectivity(D)**

$$D = R_v/V_n \text{ [1/W]}, V_n: \text{ノイズ電圧[V] または } V_n \text{ [W/Hz}^{1/2}]$$

- **NEP(Noise Equivalent Power)**

$$\text{NEP} = 1/D/\Delta f^{1/2} = \text{[W/Hz}^{1/2}, \text{BW-1Hz]}, \Delta f^{1/2}: \text{検出帯域}$$

- **比検出能(specific detectivity)**

$$D^* = A_d^{1/2}/\text{NEP} \text{ [cm Hz}^{1/2}/\text{W}, \text{BW-1Hz]}, A_d: \text{検出器面積}$$

ノイズの種類

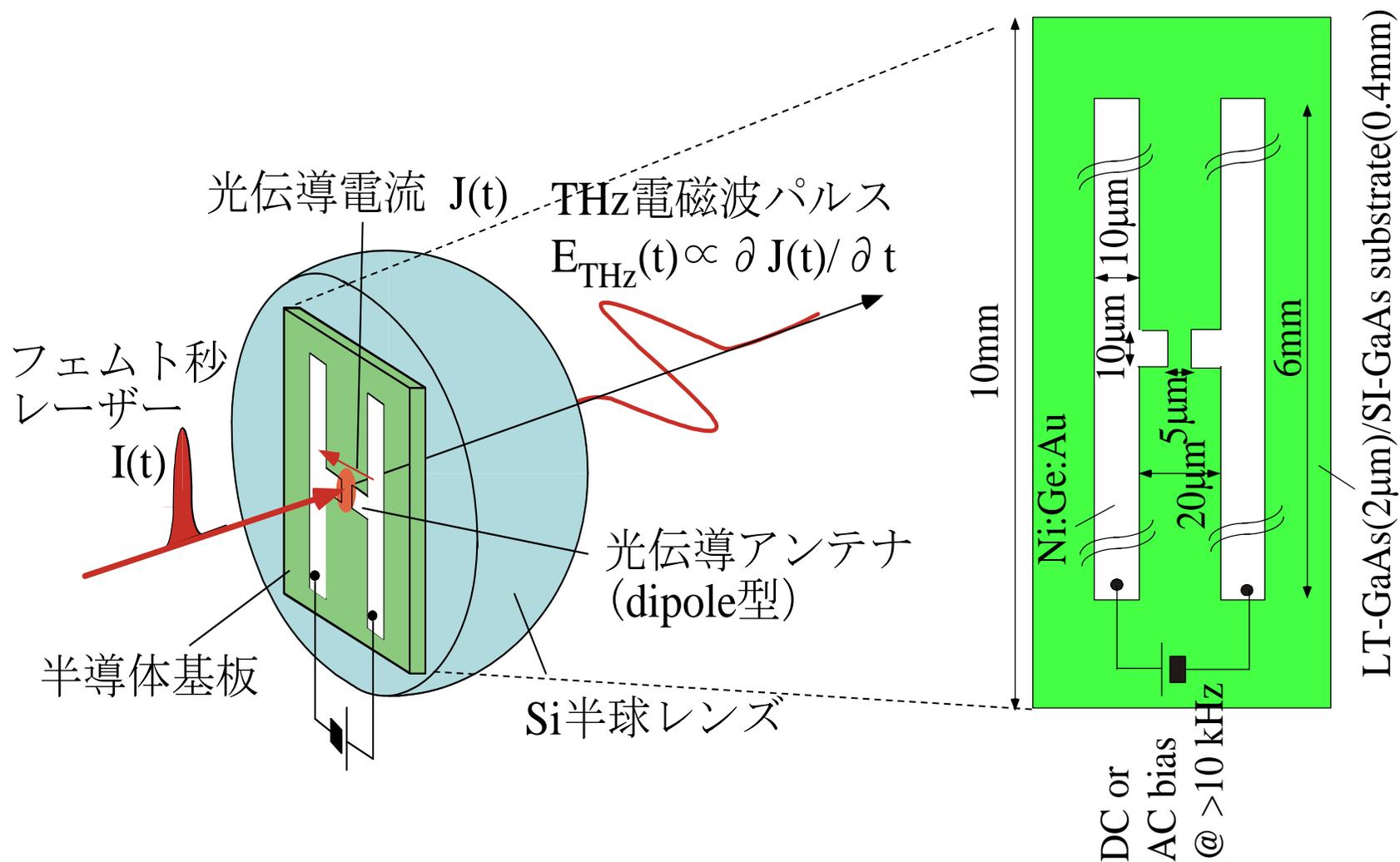
- **熱雑音 (Johnson noise):** $\bar{v}^2 = 4kTR\Delta f$

- **ショット雑音:** $\bar{i}^2 = 2eI_{dc}\Delta f$

各種検出器のNEP比較

	NEP [W/Hz ^{1/2}]	動作温度、応答速度
焦電検出器	~10 ⁻⁹	室温動作, 応答遅い
GolayCell	~10 ⁻¹⁰	室温動作, 応答遅い
ショットキーバリアダイオード	10 ⁻¹⁰ ~ 10 ⁻¹¹	室温動作可能, 冷却によりSNR向上
ボロメーター	~10 ⁻¹³	液体He温度以下
光伝導検出器 (Ge:Ga)	~8.5x10 ⁻¹⁶ @4.2K ~2x10 ⁻¹⁷ @2K	液体He温度以下
単一電子デバイス	~10 ⁻²² <0.1K	極低温動作, 単一光子検出可能

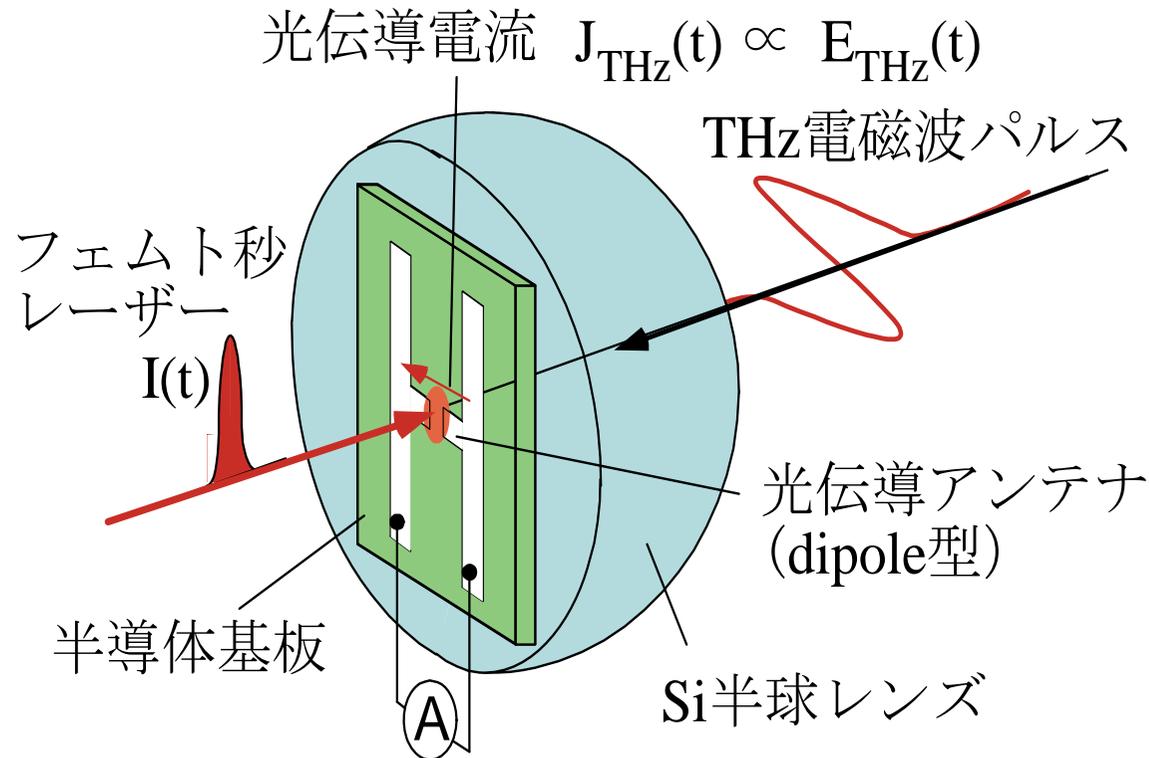
光伝導アンテナ素子によるTHz電磁波発生



光伝導スイッチ素子模式図

光伝導アンテナによるテラヘルツ電磁波パルスの検出

発生の逆過程で検出



- (1) サブピコ秒の間だけ回路が開いているのでノイズ電流が少ない。
- (2) パルスTHz波のピークパワーは比較的大きい。

Johnson noise
($>$ shot noise)

$$\overline{i_n^2} = \frac{4k_B T \Delta f}{R}$$

長波長 ($\lambda > 1\mu\text{m}$)動作PCアンテナ

利点: 通信波長用の光源, 光学素子が利用できる。
(コスト減, コンパクトシステム可能)

基板材料: Ge, InGaAs, GaAsSb, など

問題点:

バンドギャップの狭い半導体を使用するため本質的に高抵抗なPCアンテナ用基板を得にくい。SHG効率より発生・検出効率が低い場合, SHGによりLT-GaAs基板PCアンテナを励起したほうが有利。

イオン注入Ge: Sekine, *et al*: Appl. Phys. Lett. **68**, 3419-3421 (1996).

Feイオン注入 InGaAs: Suzuki, and M. Tonouchi: Appl. Phys. Lett. **86**, 163504 (2005).

Feイオン注入InGaAs: Suzuki, et al.: Appl. Phys. Lett. **86**, 051104 (2005).

Br イオン注入InGaAs: Chimot, et al: Appl. Phys. Lett. **87**, 193510 (2005).

Feイオン注入InGaAs: Takazato, et al: Appl. Phys. Lett. **91**, 011102 (2007).

Feイオン注入InGaAs: Takazato, et al: Appl. Phys. Lett. **90**, 101119 (2007).

InGaAs/ErAs: Sukhotin et al: Appl. Phys. Lett. **82**, 3116 (2003).

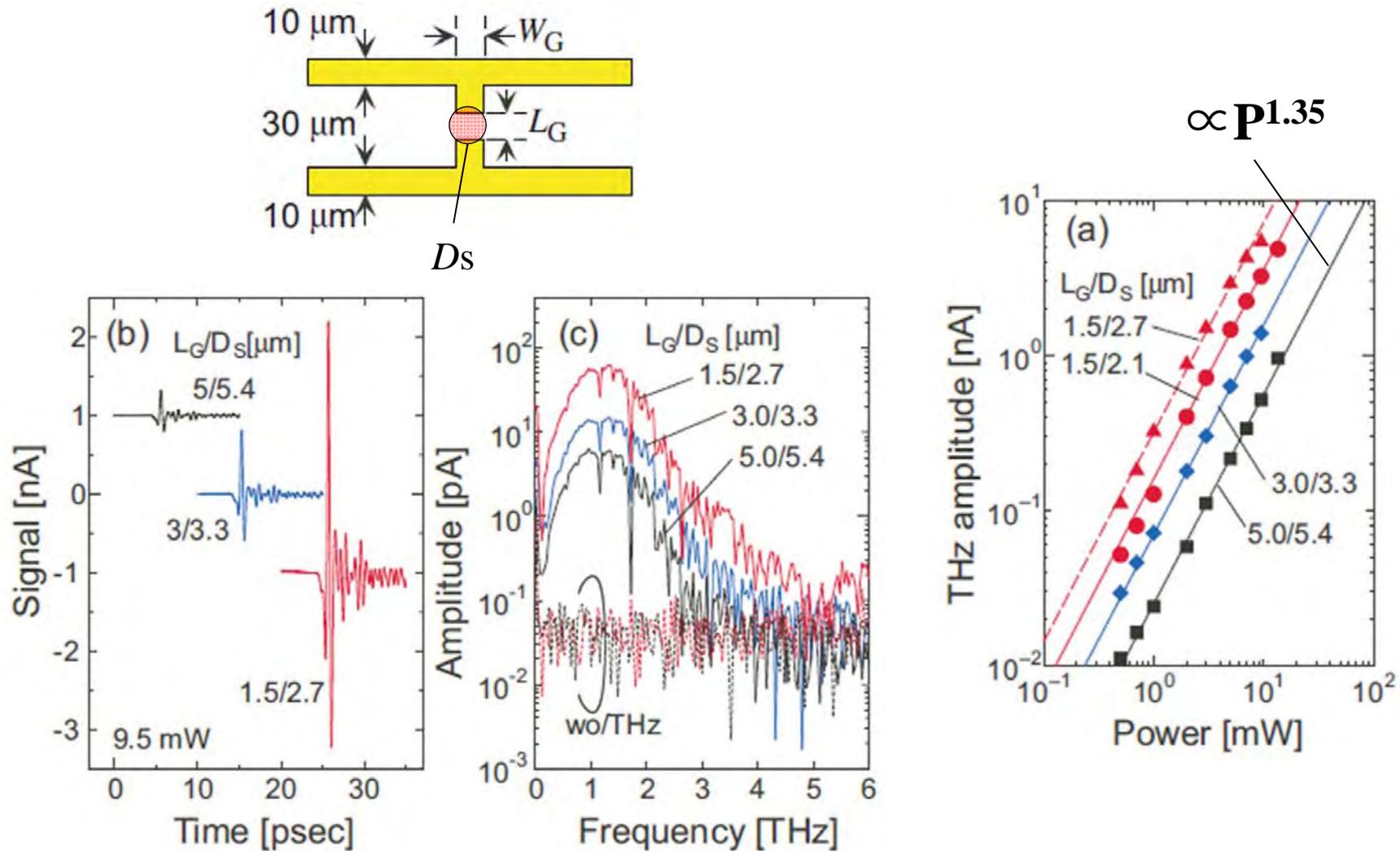
LT-GaAs: Tani, et al: Appl. Phys. Lett., 77, 1396-1398 (2000).

LT-GaAs: Kataoka, et al: Appl. Phys. Lett., 97, 201110, (2010).

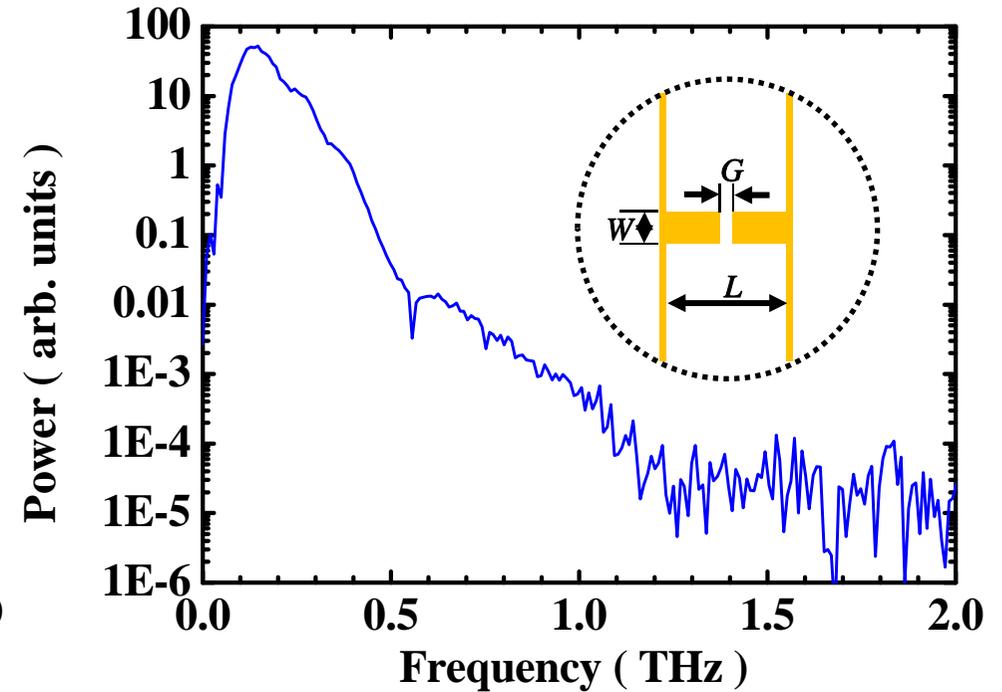
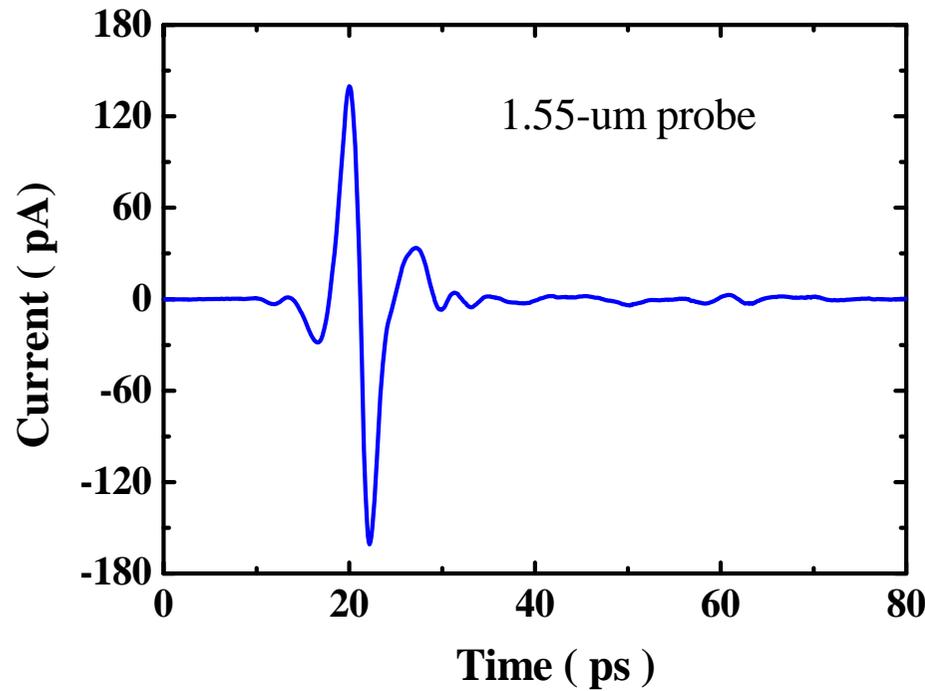
→ LT-GaAsでも1.55 μm のレーザー光を, 800nm励起に近いSNRでTHz波の検出は可能。

LTG-GaAs PC アンテナの1.560nm フェムト秒レーザー動作

Kataoka, et al: Appl. Phys. Lett., 97, 201110, (2010).



ギャップ2- μm LT-GaAs PCアンテナの1.55 μm 動作



Laser: 1.55 micron fiber laser

Emitter: InSb in B-field

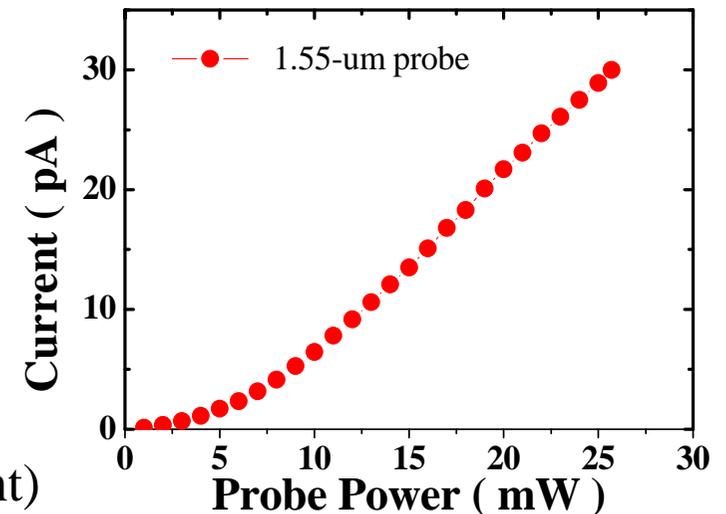
Detector: LT-GaAs (dipole: $G=2 \mu\text{m}$, $L=70\mu\text{m}$)

Pump: 60 mW

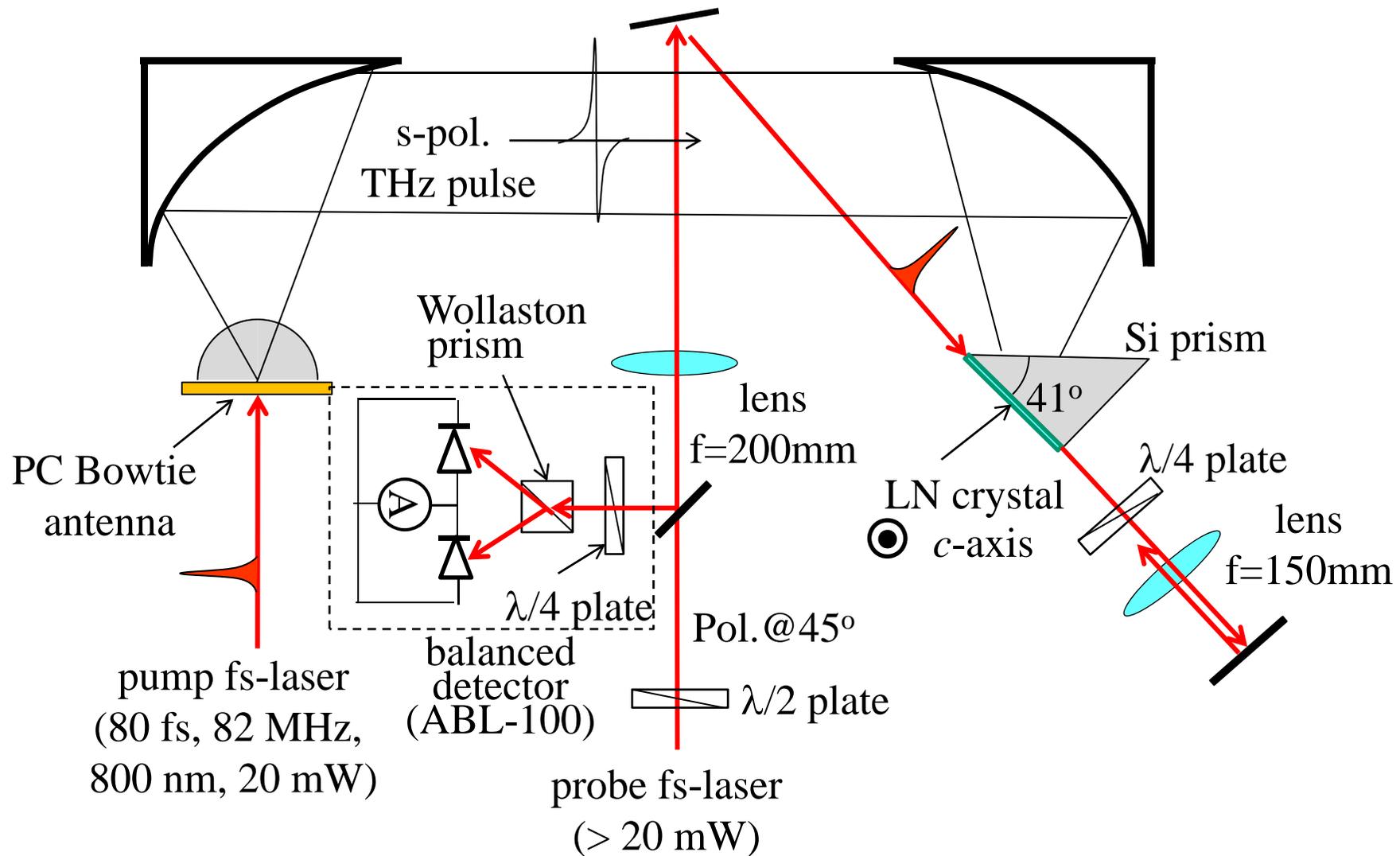
Probe: 30 mW

Chopper Freq: 2 kHz

Lock-in: I-mode (10^6V/A with 100 ms time constant)

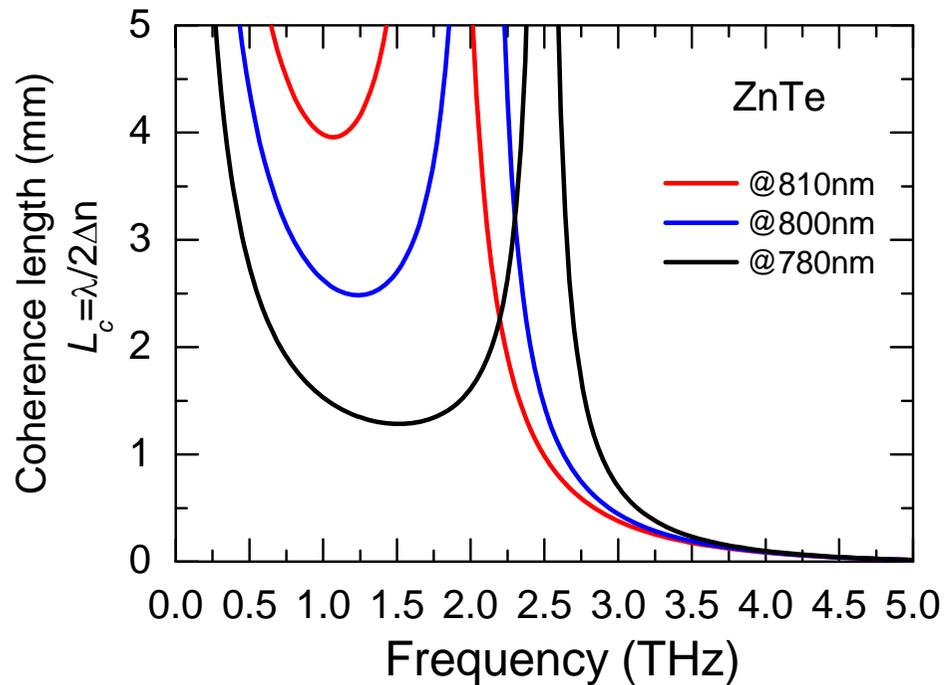


Cherenkov位相整合を用いたEOサンプリング実験



コリニア配置、ノンコリニア配置におけるコヒーレンス長

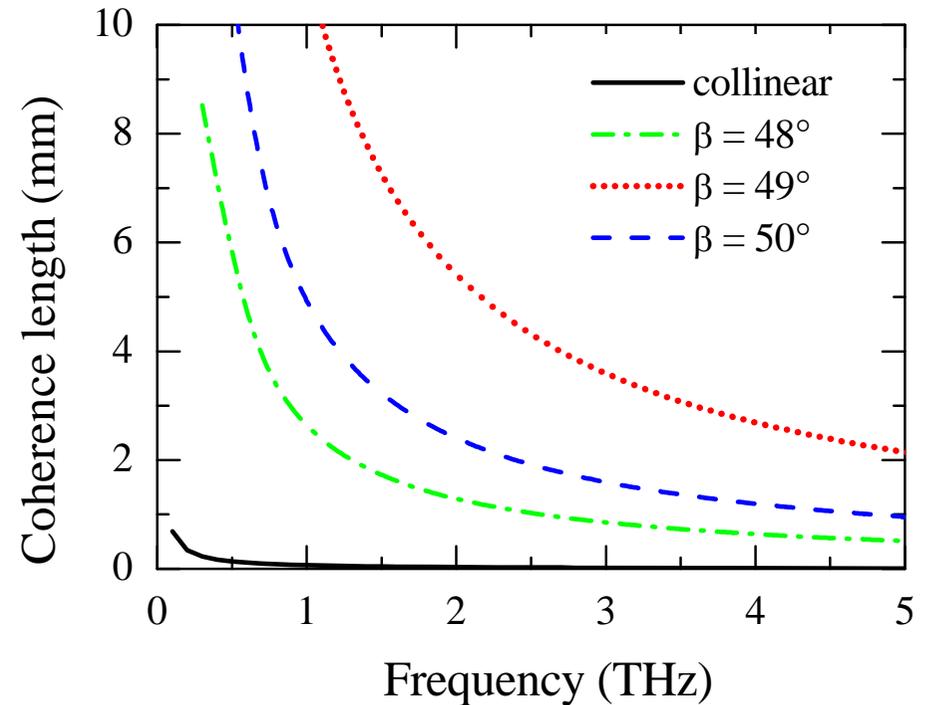
Collinear with ZnTe



$$L_c(\nu) = \frac{c}{2\nu |n_{\text{ZnTe}} - n_g|}$$

n_{ZnTe} : THz refractive index of ZnTe
 n_g : optical group index

Non-collinear with LN at 800nm

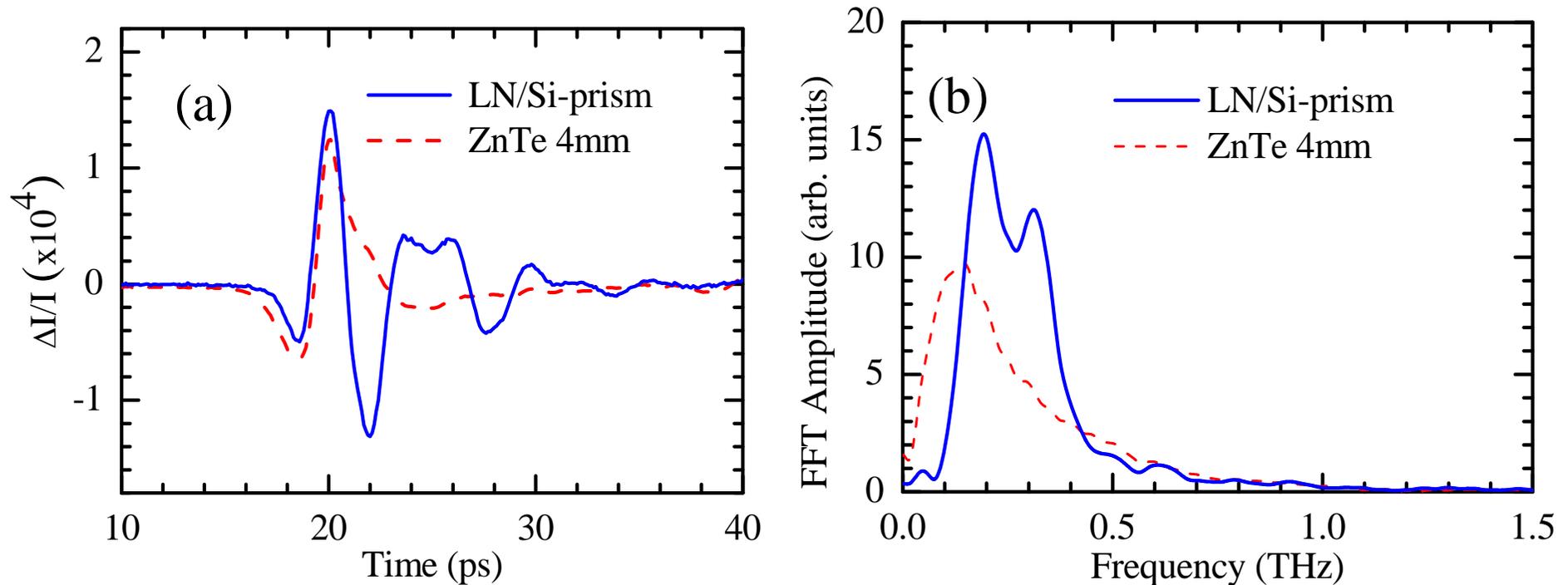


$$L_c(\nu) = \frac{c}{2\nu |n_{\text{Si}} \cos \beta - n_g|}$$

n_{Si} : THz refractive index of Si
 β : beam crossing angle

Cherenkov位相整合によるEOサンプリング： LN/Si-prism とZnTe(4-mm)との比較

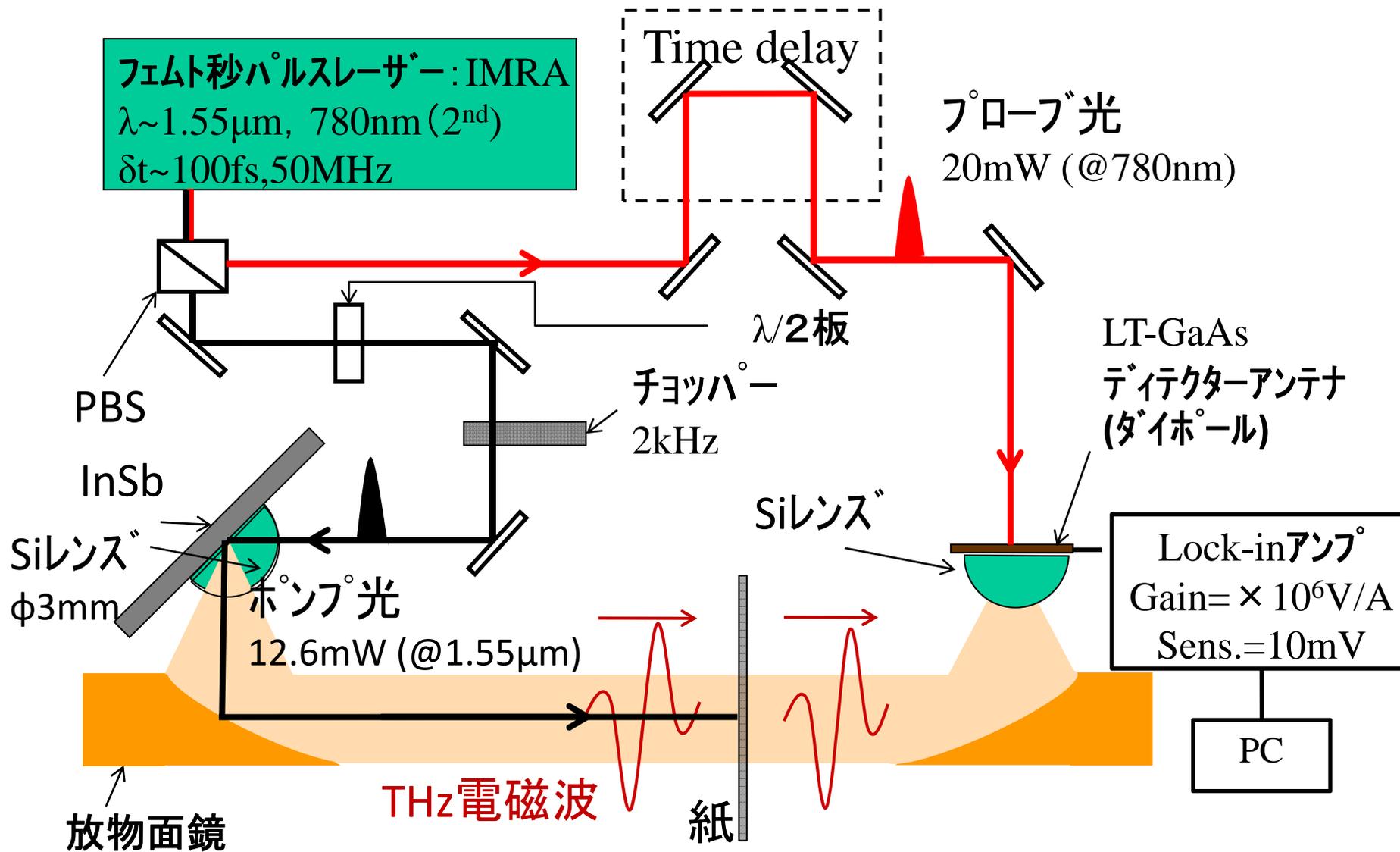
EO信号 $\Delta I/I \sim$ 位相遅れ $\delta\phi$



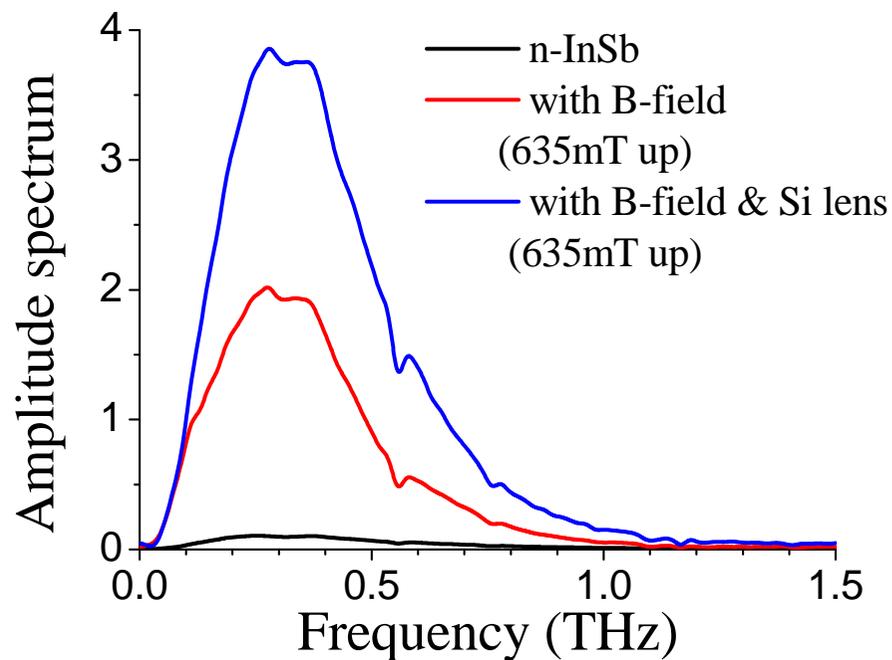
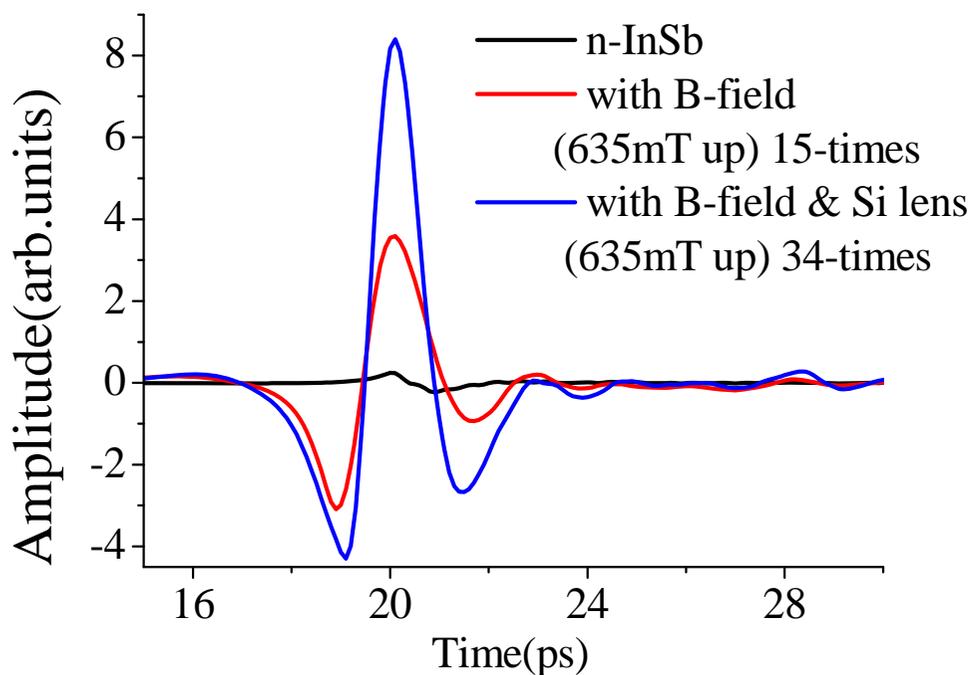
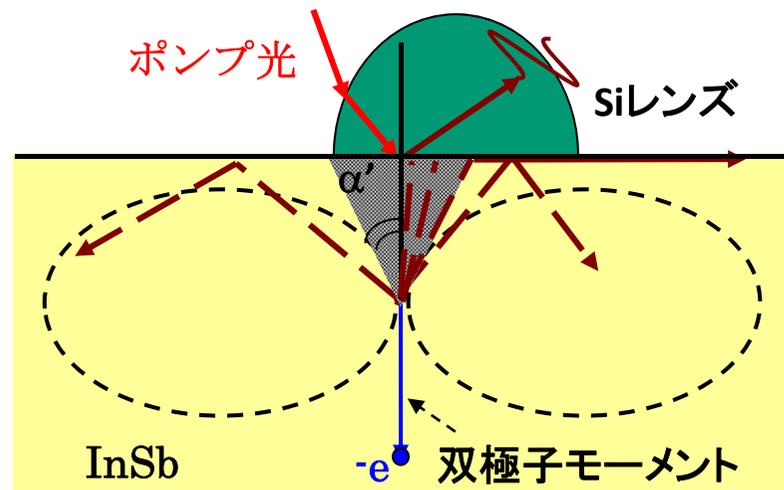
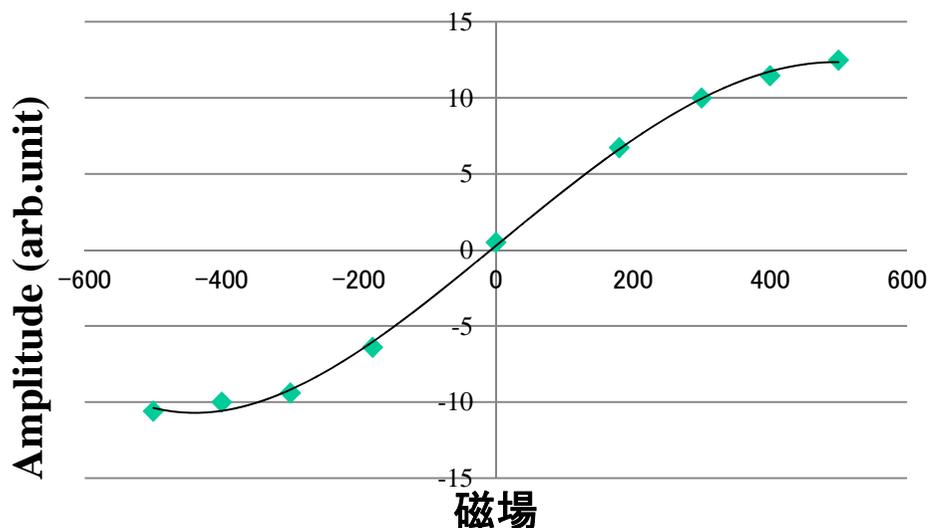
LN/Si	$\delta\phi(\tau) = \frac{\omega_{\text{opt}}}{2c} (n_e^3 r_{33} - n_o^3 r_{13}) E_{\text{THz}}(\tau) L$	$\text{FOM}_{\text{LN}} = \frac{1}{2} (n_e^3 r_{33} - n_o^3 r_{13}) \approx 104 \text{ pm/V}$
ZnTe	$\delta\phi(\tau) = \frac{\omega_{\text{opt}}}{c} n_{\text{opt}}^3 r_{41} E_{\text{THz}}(\tau) L$	$\text{FOM}_{\text{ZnTe}} = n_{\text{opt}}^3 r_{41} \approx 96 \text{ pm/V}$

Si レンズと磁場によるn-InSbからのTHz放射の同時増強効果

実験装置



Si レンズと磁場によるn-InSbからのTHz放射の同時増強効果

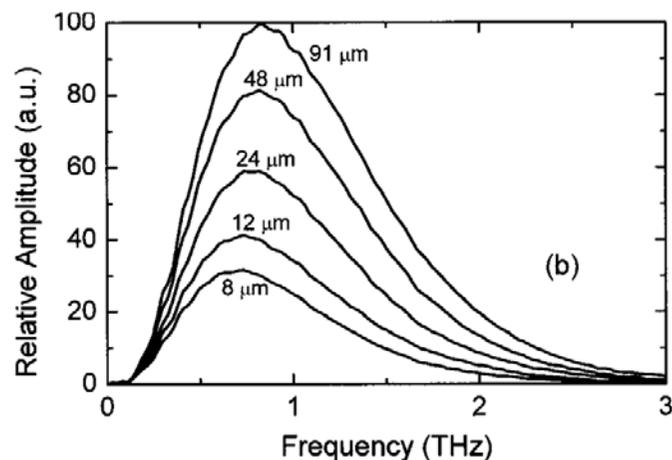
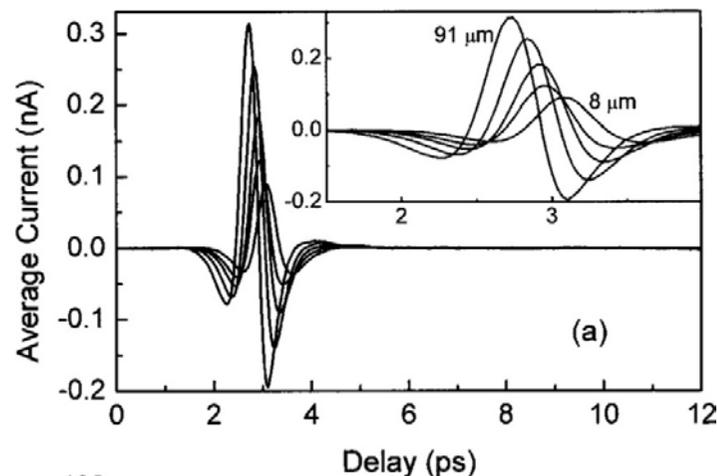
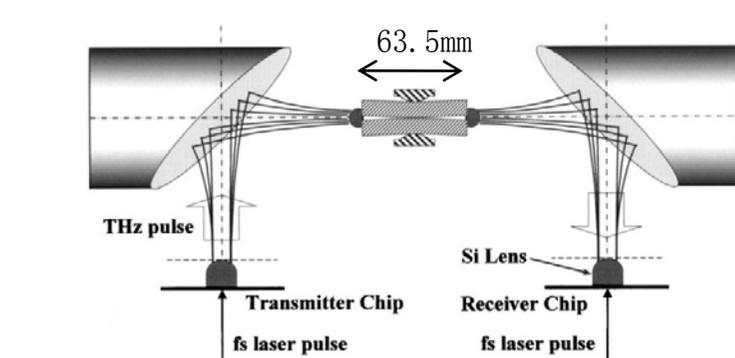


4. 導波路・伝送技術

- ・ 平行平板導波路：THz波の超集束

テーパー付平板導波路におけるTHz波の超集束(1)

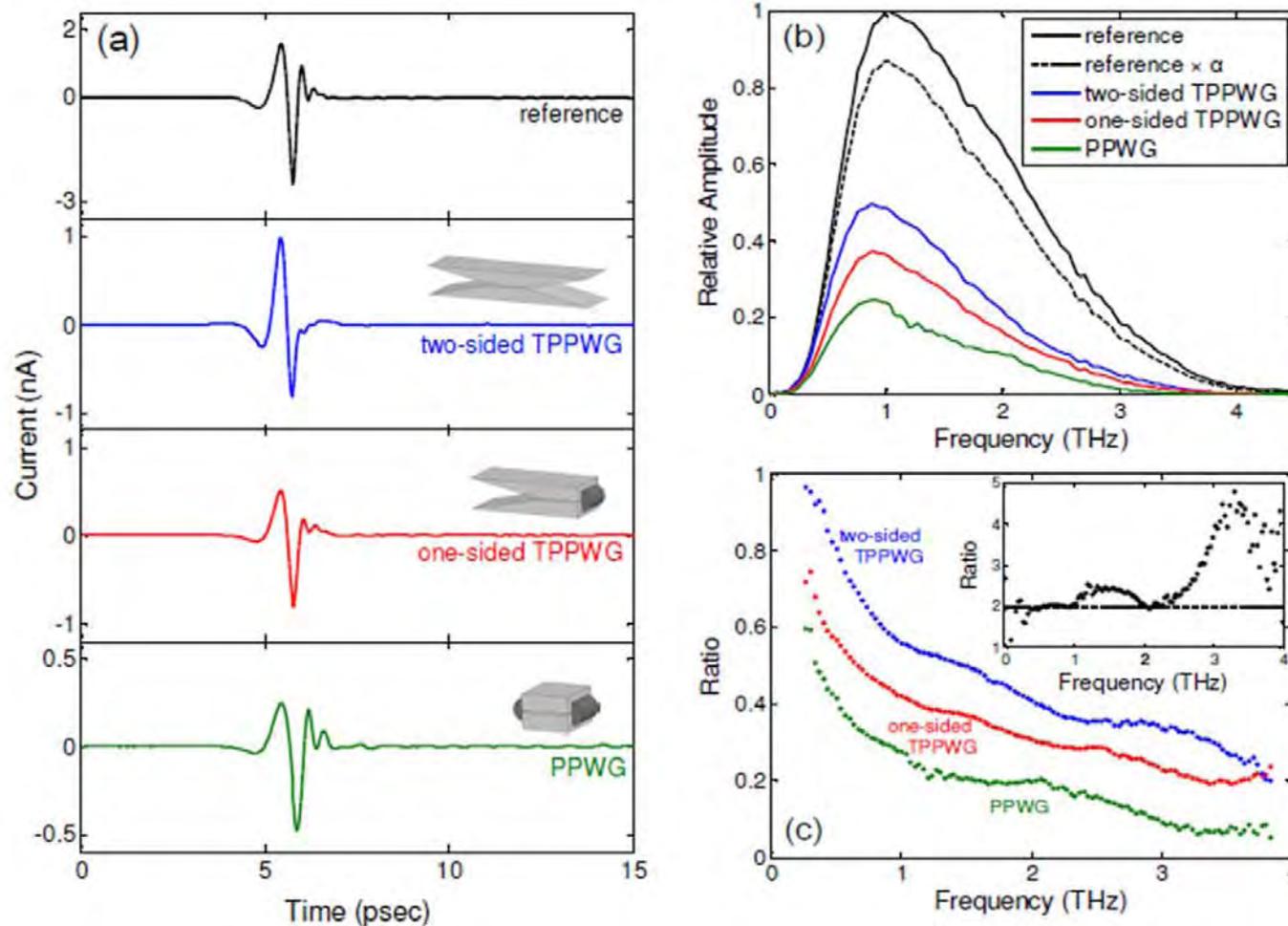
平行平板金属導波路の中央を狭窄化



Grischkowskyらは曲率をもった平板導波路を使用 (adiabatically compressed waveguide)

開口幅が $103\mu\text{m}$ と小さい為、Siレンズを使用→結合ロス

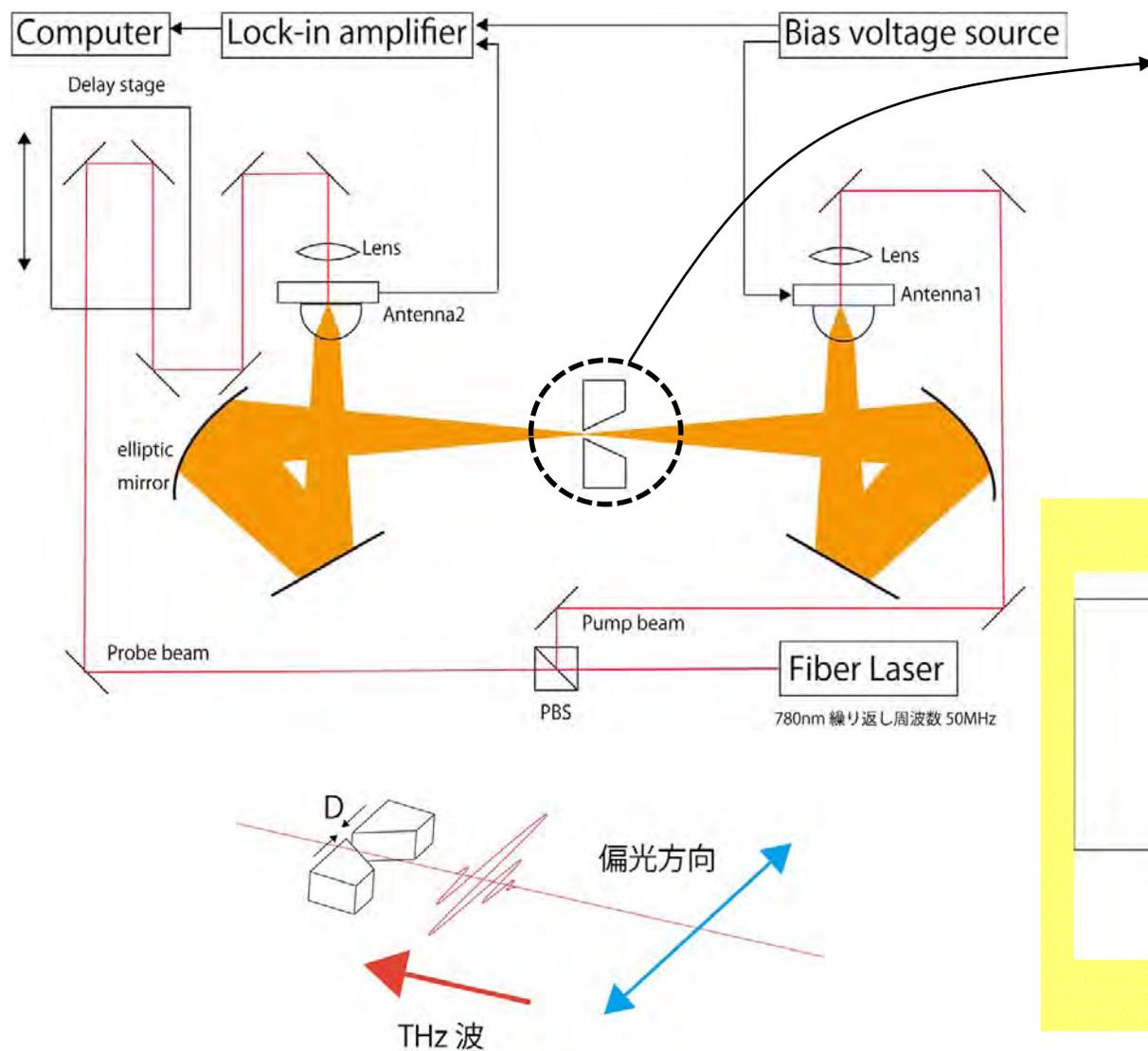
テーパー付平板導波路におけるTHz波の超集束(2)



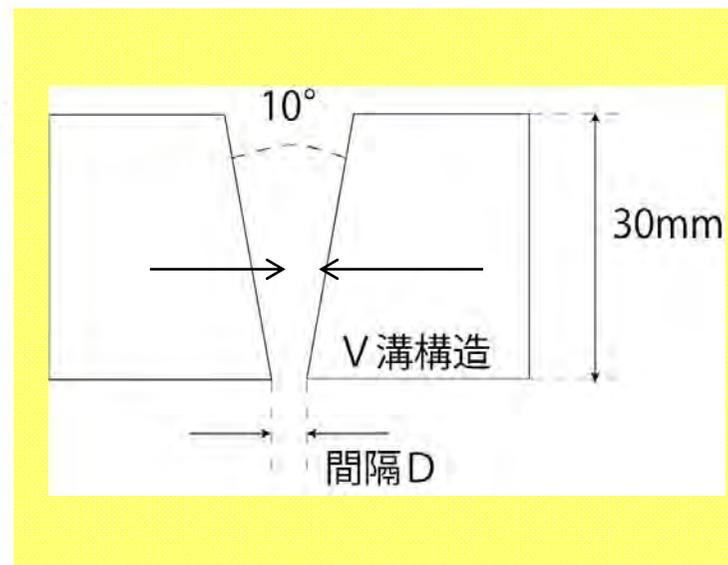
片テーパー角 $\theta = 3\text{deg}$, 最小幅 $100\mu\text{m}$

Sang-Hoon Kim, Optics Express Vol. 18, No. 2 1289 (2010)

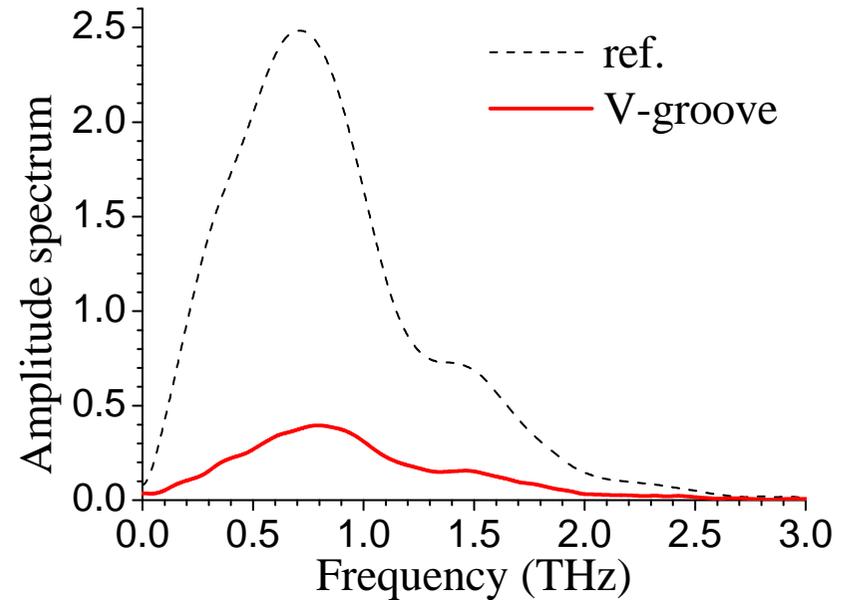
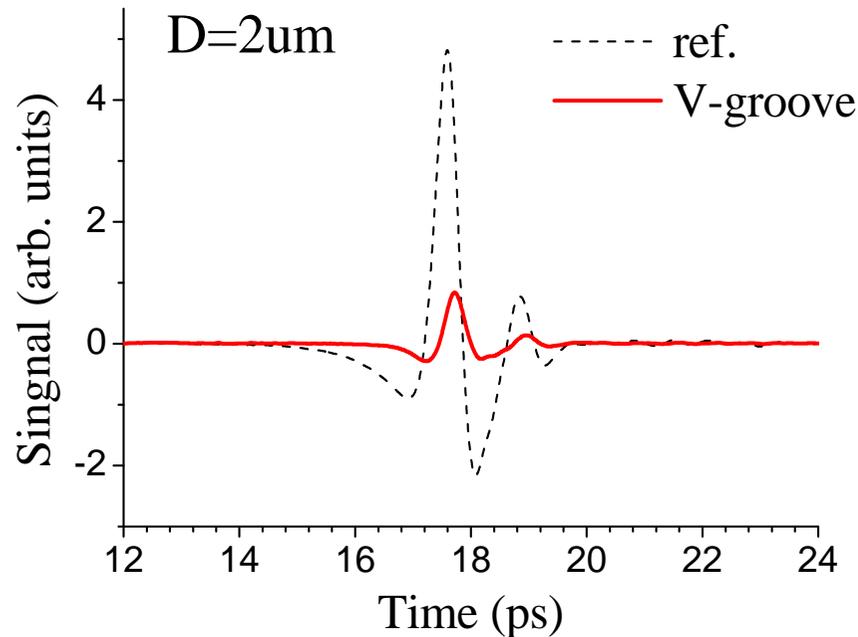
金属V溝構造におけるTHz波の超集束効果



V-groove structure



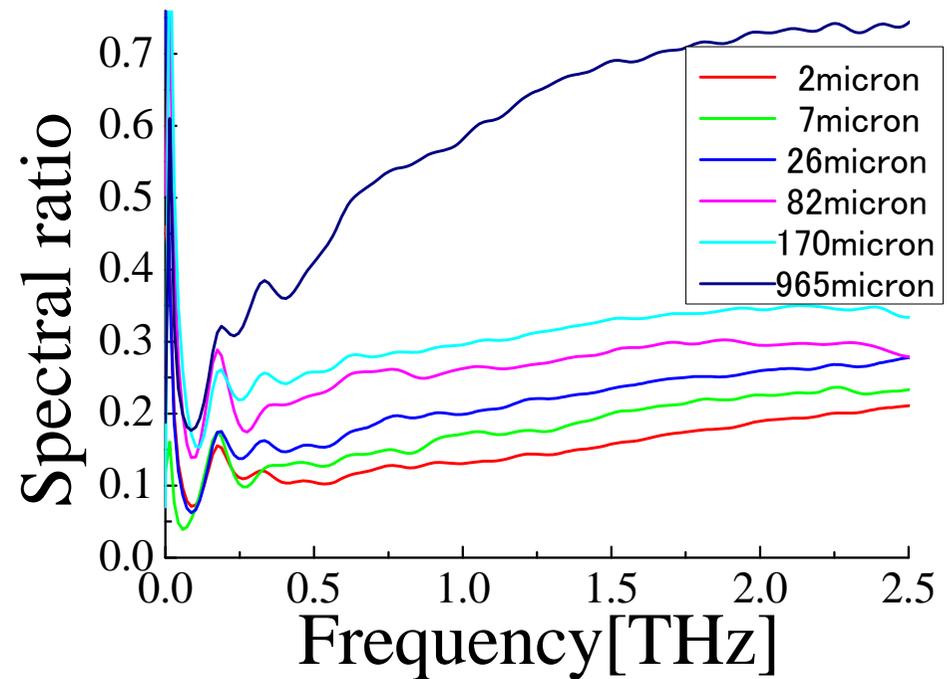
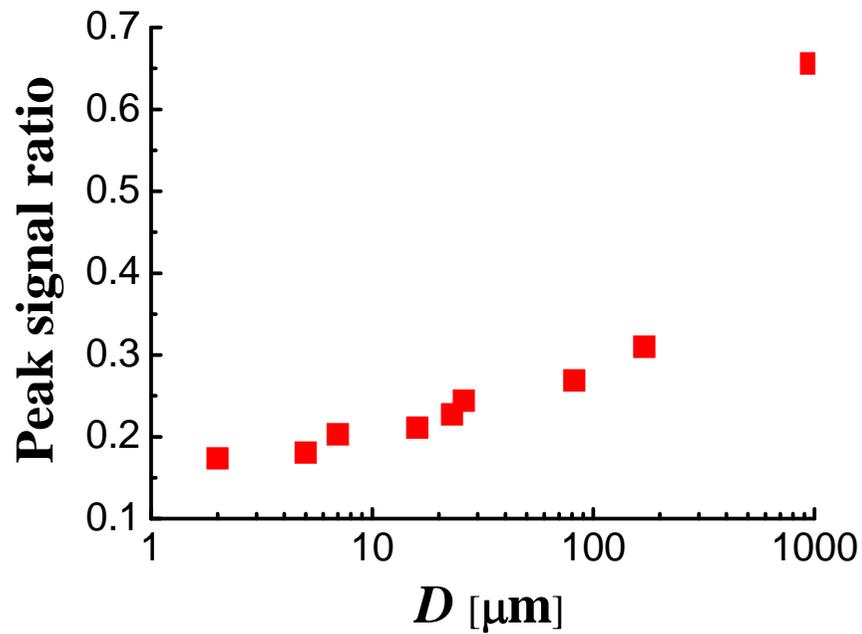
THz波の金属V溝構造の透過率



TM 波（偏光がV溝と垂直）は溝幅が波長以下でも金属V溝を効率よく透過し、波形の変化（位相変化）も小さい。

一方、TE波（偏光がV溝に平行）は溝幅Dが小さいとほ

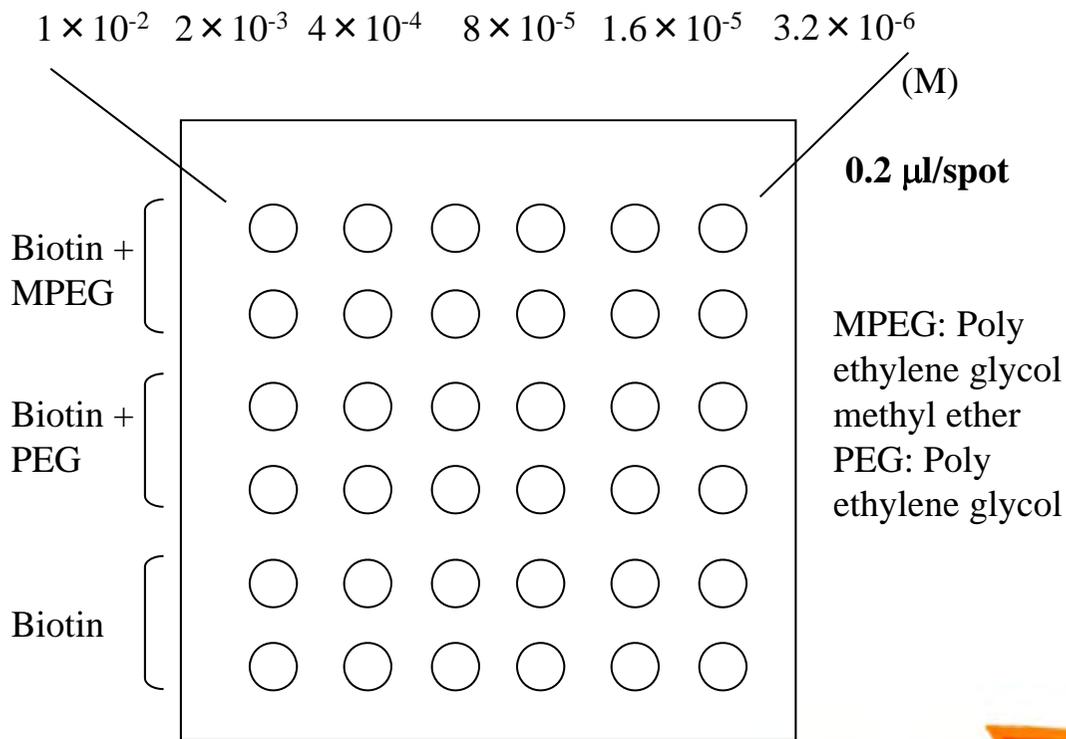
V溝の先端幅Dに依存したTHz波の透過率



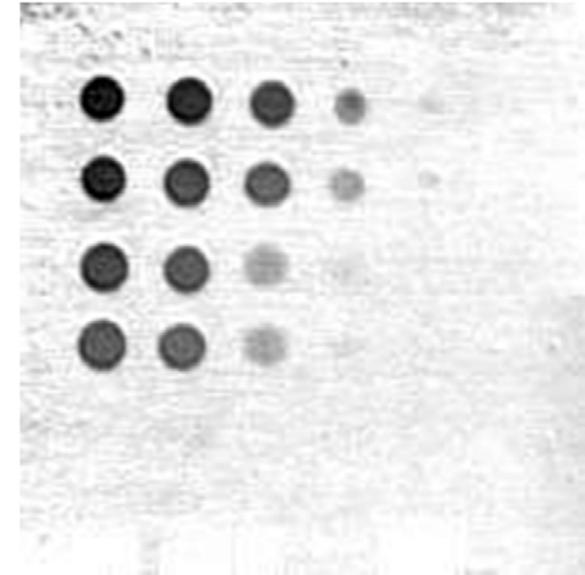
- ✓ High transmittance $\sim 20\%$ for $D \sim 10 \mu\text{m}$
- ✓ Higher transmittance for higher freq.

ビオチンのラベルフリーTHz イメージング

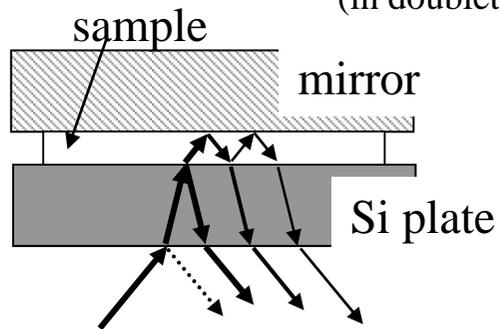
Y. Ogawa et al., Optics Express, **16**(26), 22083-22089 (2008).



**1.5THz imaging 200 μ m/pixel
35mm x35mm**

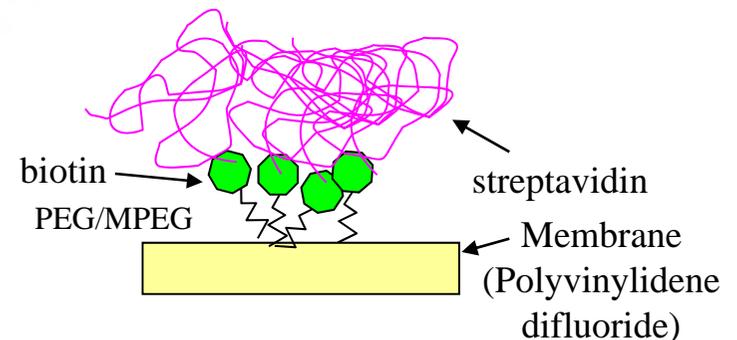


Biotin array
(in doublet)



光路長変化による
多重反射干渉強度
変化を検出

Label-free THz image
(interference method)



まとめ：今後の課題

- ✓ 活発な光源開発が行われている。高輝度光源によりTHz波による非線形分光、分子制御の可能性がでてきた。低コスト化が大きな課題。
- ✓ 通信応用には半導体固体発振器の実用化が望まれる。
- ✓ 検出器開発は光源に比べて遅れ気味。常温動作で高感度、高速応答の検出器開発が望まれる。一方、最近のTHzカメラ、THzメージャーの開発には注目すべきものがある。
- ✓ 平行平板導波路は比較的伝搬損失が少なく、またテーパ構造を持たせることで空間結合も改善できる。超集束効果による応用も期待できる。今後、曲げ構造、フレキシブルな構造のものものの開発が期待される。

- 高速化、
- 高感度・高効率化、
- 小型化、
- 低コスト化

にむけてさらなるブレークスルーを期待したい。