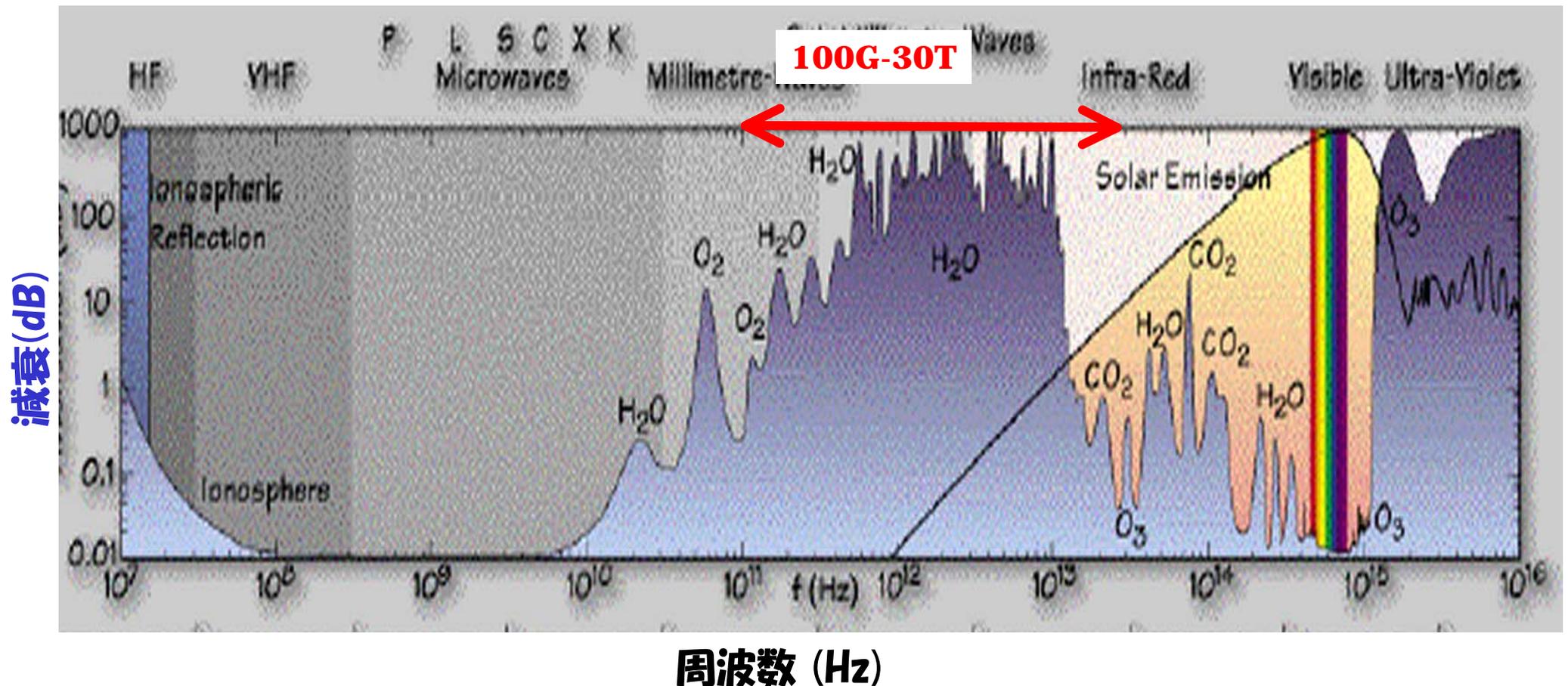


テラヘルツ技術の現状と展望

大阪大学レーザーエネルギー学研究センター
斗内政吉

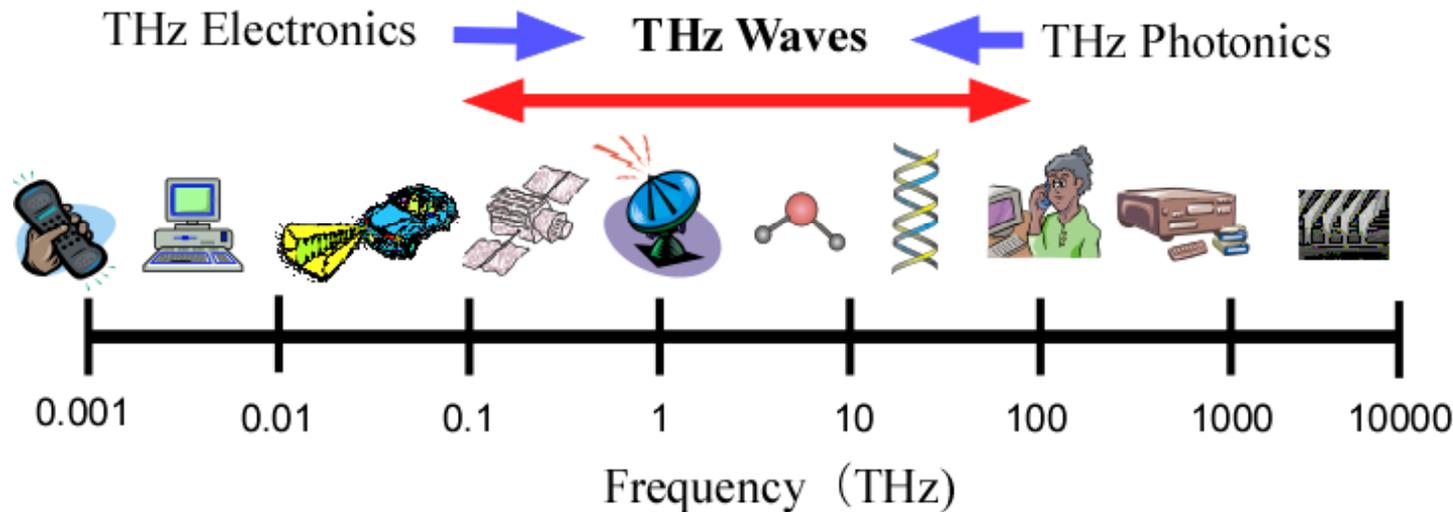
tonouchi@ile.osaka-u.ac.jp

光・電波の減衰

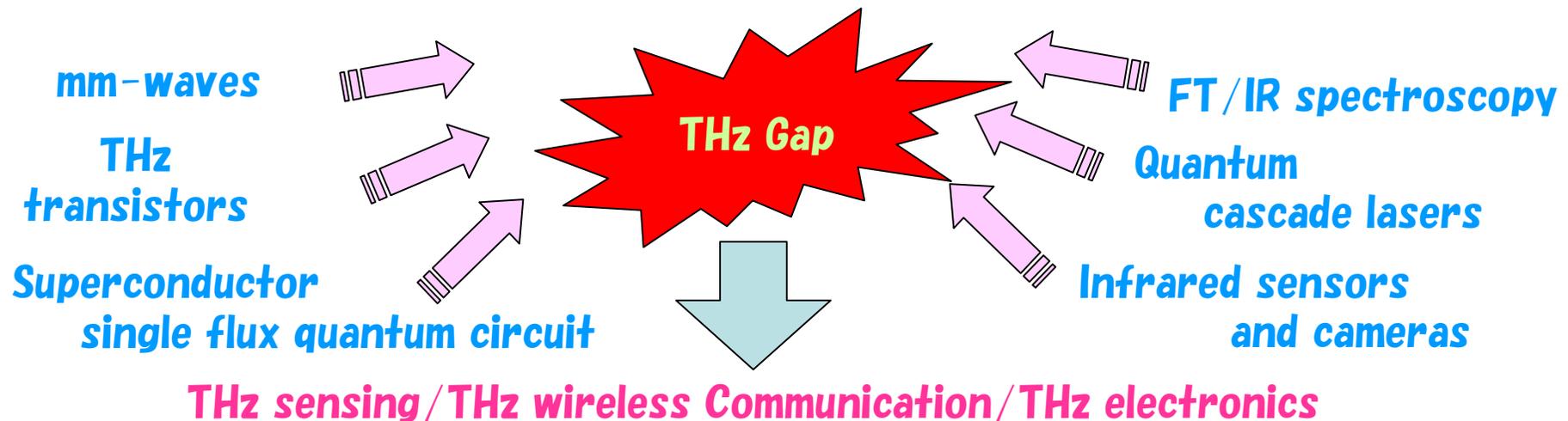


1. 背景 ～テラヘルツ技術の新展開～
2. テラヘルツ技術の現状
3. テラヘルツ技術が拓く新しい科学技術分野
4. 高輝度テラヘルツ光への期待
5. まとめ

未開拓領域“テラヘルツ”帯



1) テラヘルツ技術は新しいセンシング機能を提供し、工業・医療・バイオ・農業・セキュリティなど様々な分野における応用が見込まれている。2) 情報通信・エレクトロニクス分野においても基盤技術となりつつある。3) バイオ・生体活動を科学する重要なプラットフォームである。4) テラヘルツ波を観測することで宇宙誕生の鍵を解く情報収集が期待されるなど、サイエンスの宝庫でもある。



テラヘルツ技術の新展開

キーテクノロジー

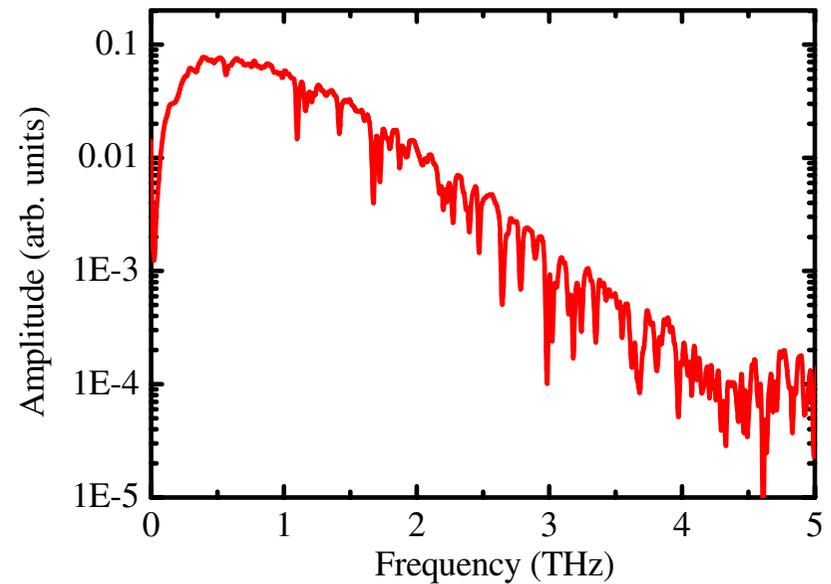
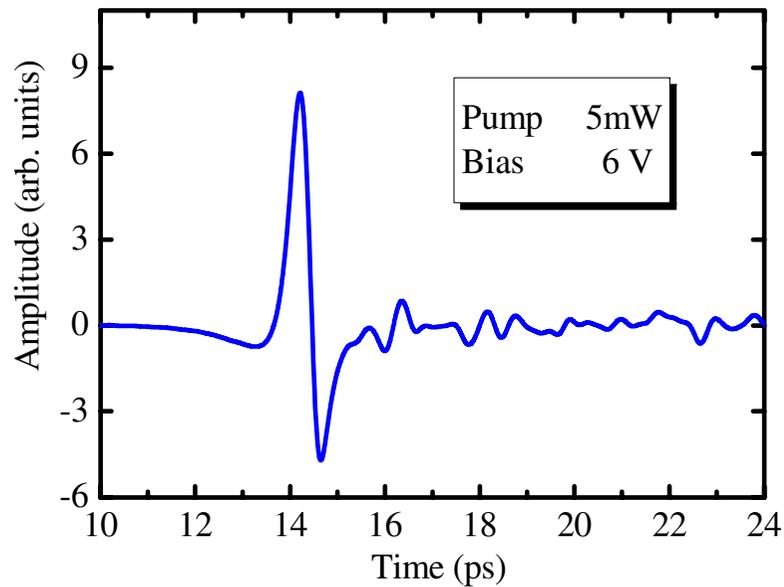
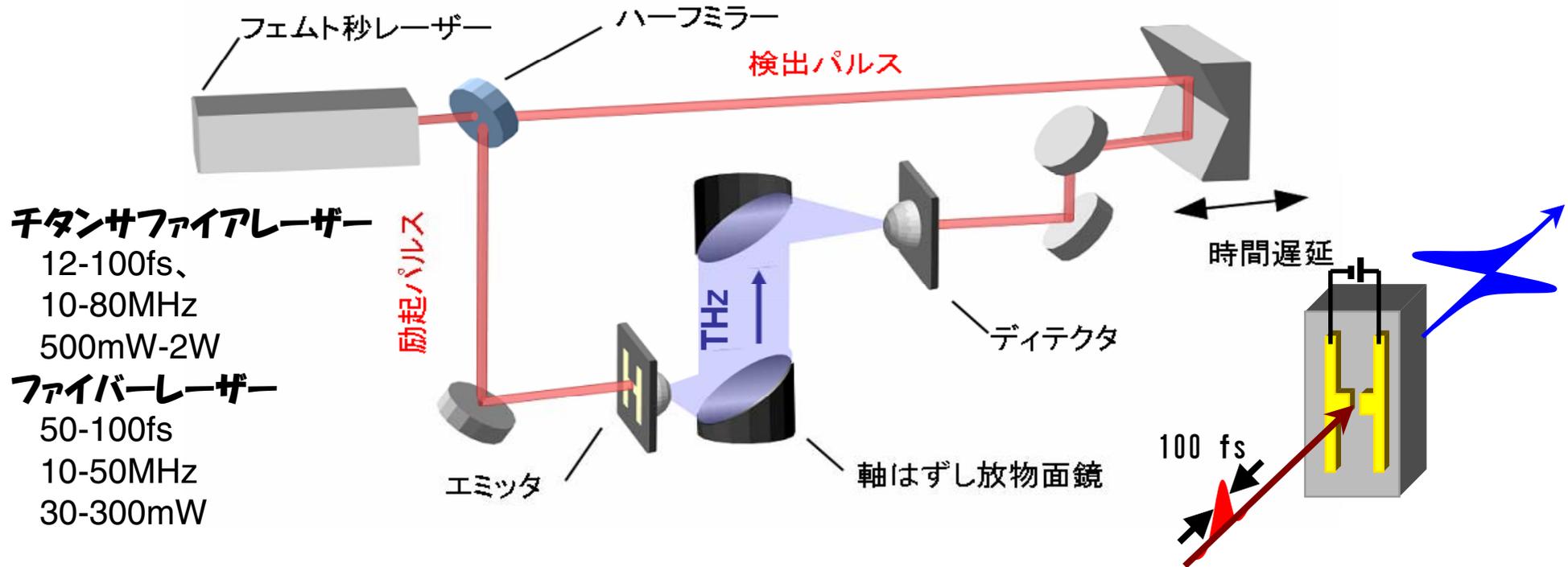
1. テラヘルツ時間領域分光法(1990年代以降)
 - 物質の複素パラメーター(光学定数、誘電率など)が、簡単に計測できるようになった。
 - 分光イメージングにより様々な応用が期待されている。
 - フェムト秒時間スケールの物質のダイナミックな応答を追跡できるようになった。
2. テラヘルツ量子カスケードレーザー(2002年以降)
 - ナノテクノロジーの進化により新しいレーザーが誕生
 - 新しい分析・センシング応用が期待(ガス分析など)
3. 高出力テラヘルツ波光源(2000年以降)
 - フォトミキシングによる高精度なチューナブルテラヘルツ波の発生
 - 非線形効果による高出力テラヘルツ光源(パラメトリック、差周波混合など)
 - THz自由電子レーザーなど(ジェファーソン研究所など)
4. サブテラヘルツ電子デバイス・集積回路技術(2005年以降)
 - 半導体・超伝導集積回路の高速動作(100GHz以上)
 - 共鳴トンネルダイオードなどの基礎研究(1THzの発振など)

テラヘルツ時間領域分光法

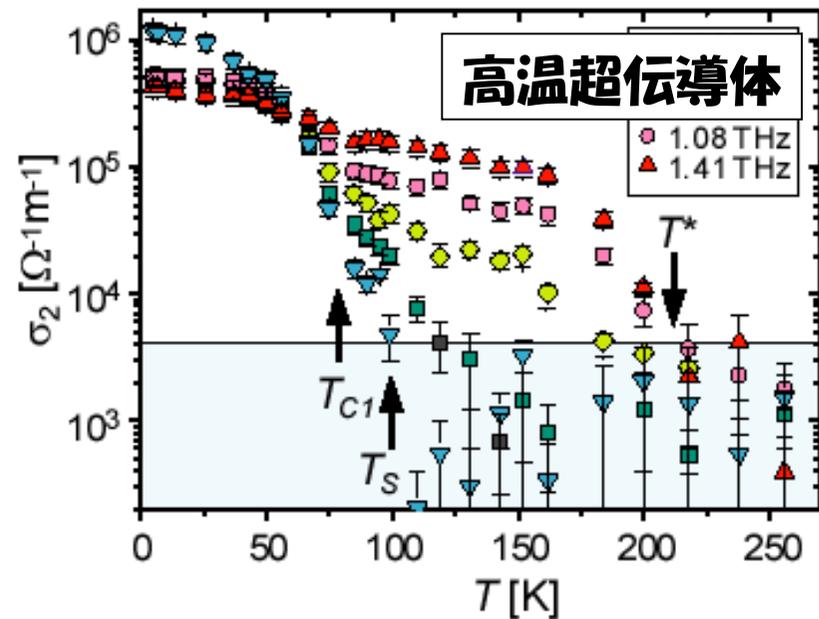
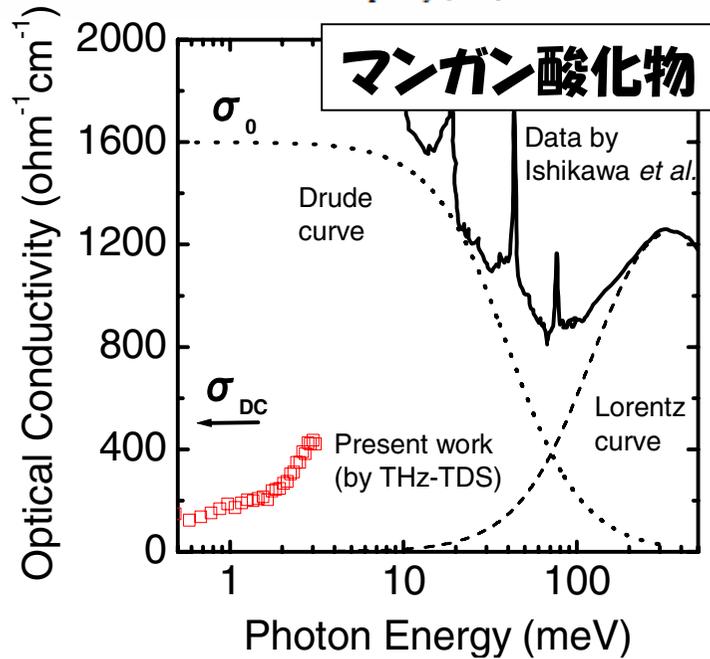
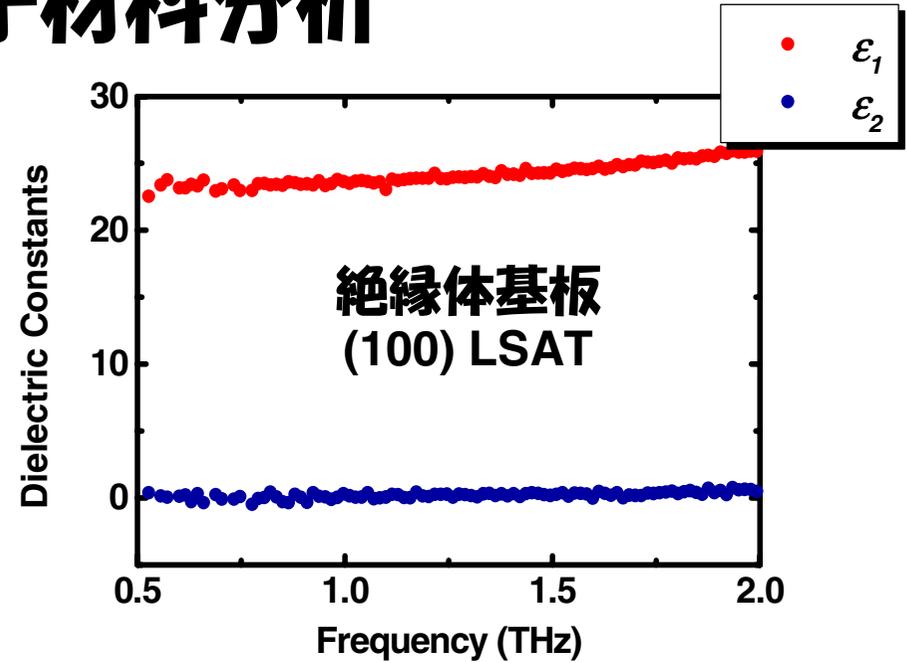
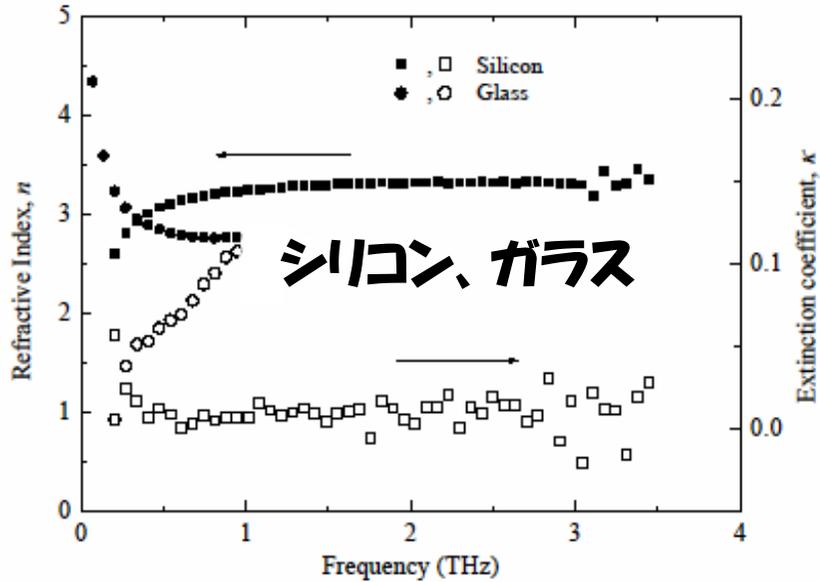
Terahertz Time Domain Spectroscopy

THz-TDS

時間領域テラヘルツ波分光システム



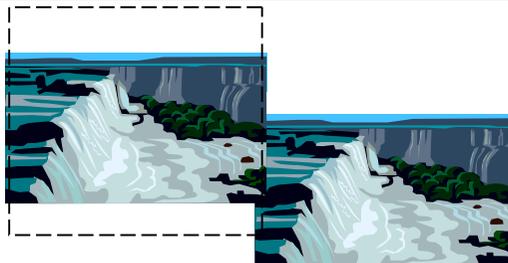
さまざまな電子材料分析



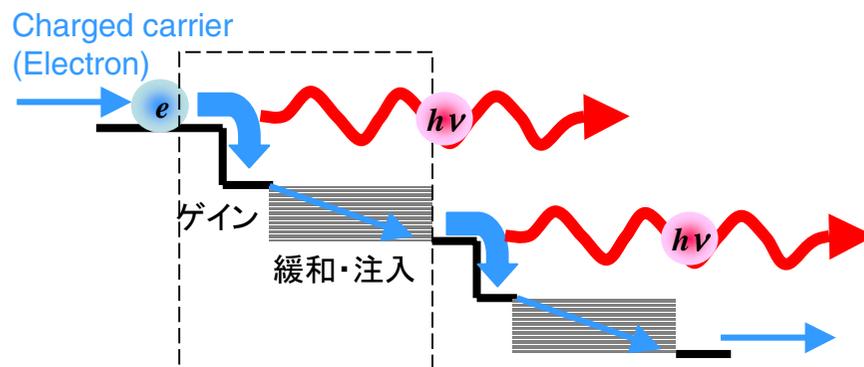
テラヘルツ量子カスケードレーザー Terahertz Quantum Cascade Laser THz-QCL

量子カスケードレーザ: Quantum Cascade Laser

多段滝(水)



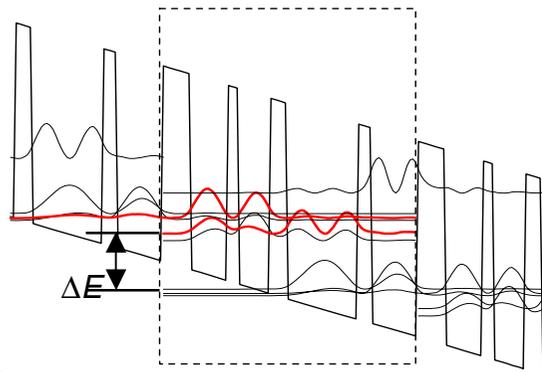
量子力学的
多段滝(電子)



◇ 量子カスケードレーザの特徴

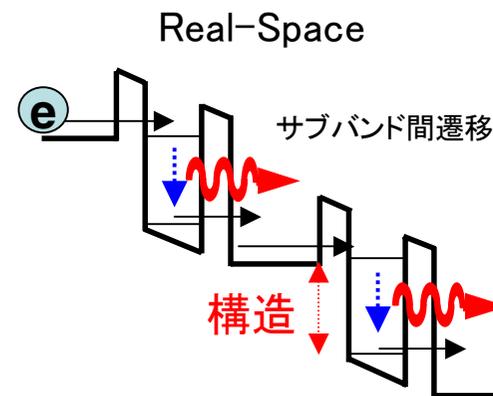
- ◇ サブバンド間遷移
- ◇ ユニポーラ素子(電子のみ)
- ◇ 発振波長は量子井戸設計により調整
- ◇ キャリアリサイクリング
(1電子がユニット数個の光子を発生)

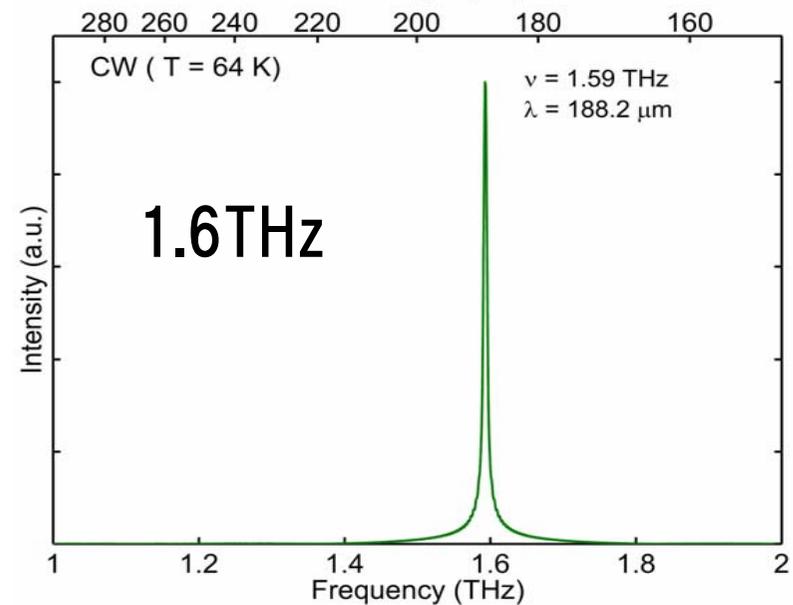
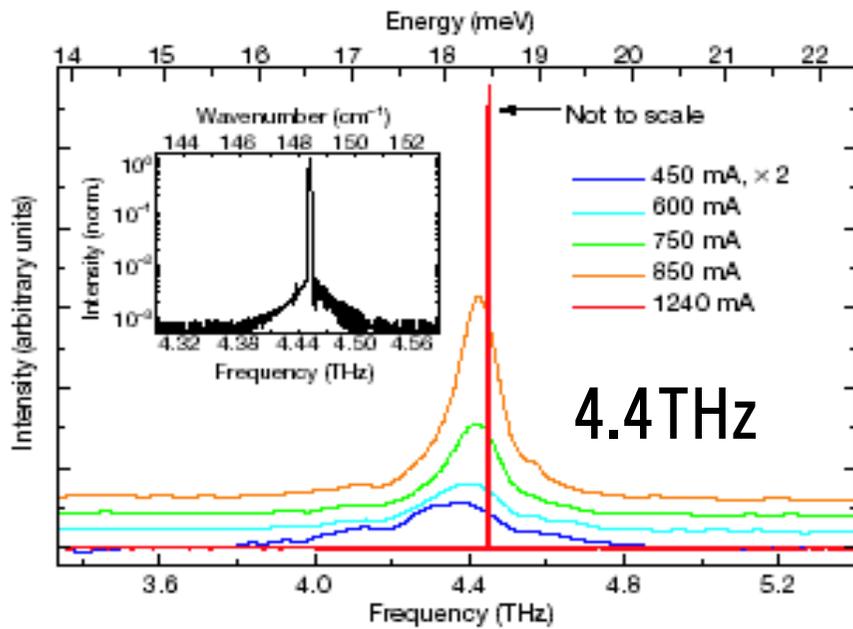
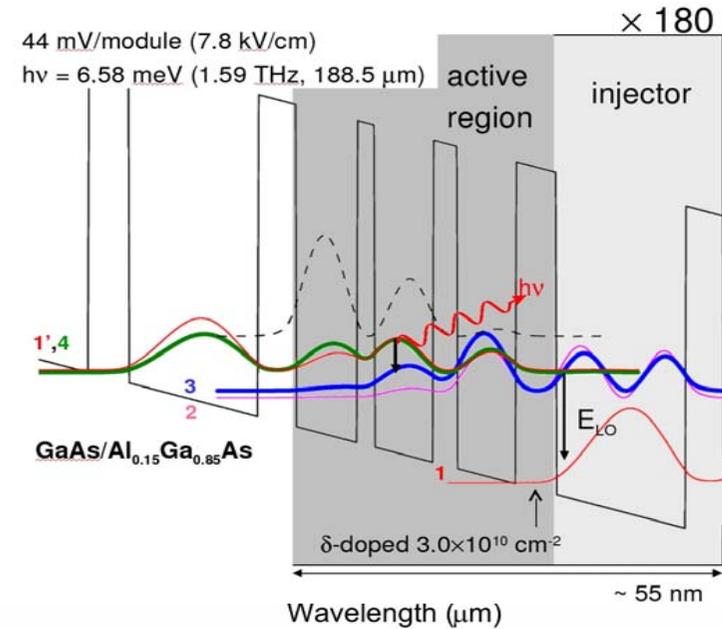
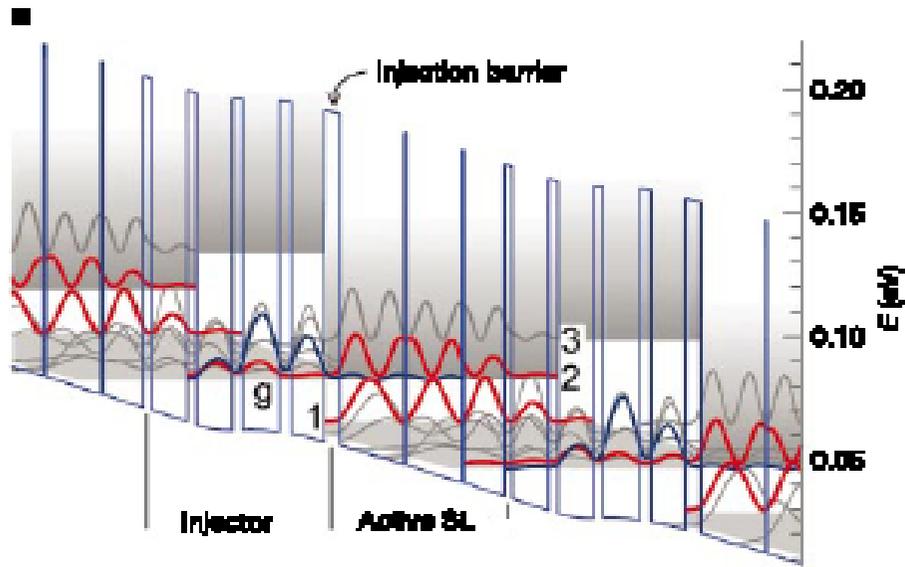
化合物半導体
多層膜で実現
GaAs/AlGaAs



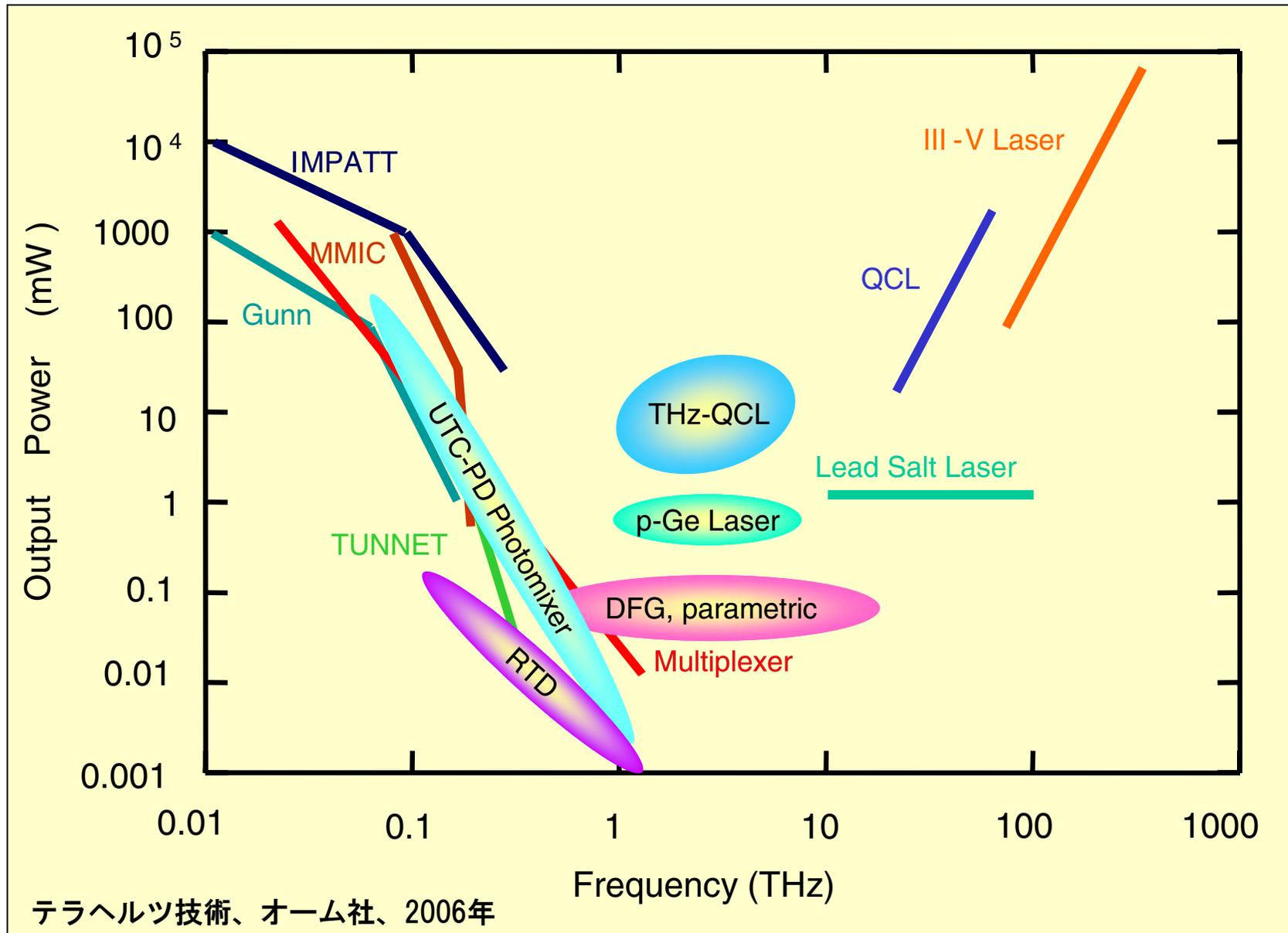
- $E_{\text{emit}} \sim 3.3 \text{ THz}$
- $\Delta E > E_{\text{LO}} (\sim 36 \text{ meV})$

B. Williams *et al.*, APL **83**, 5142 (2003).

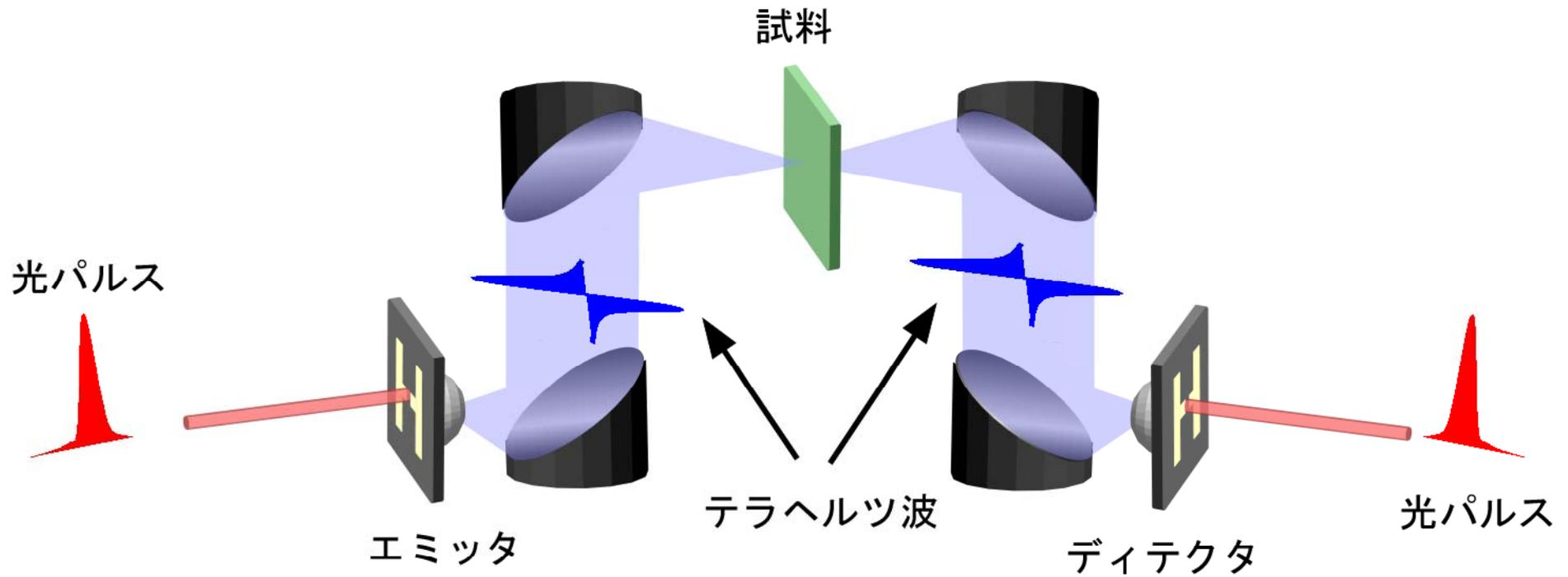


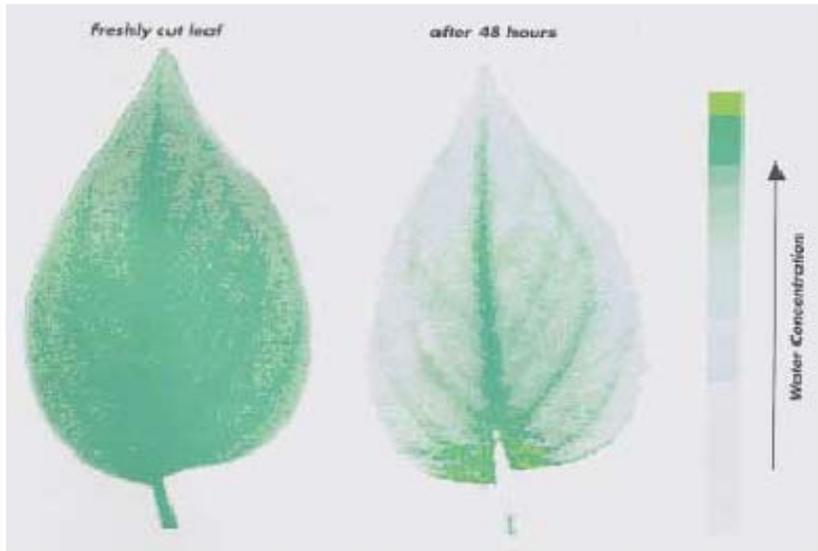


New approach to THz sources

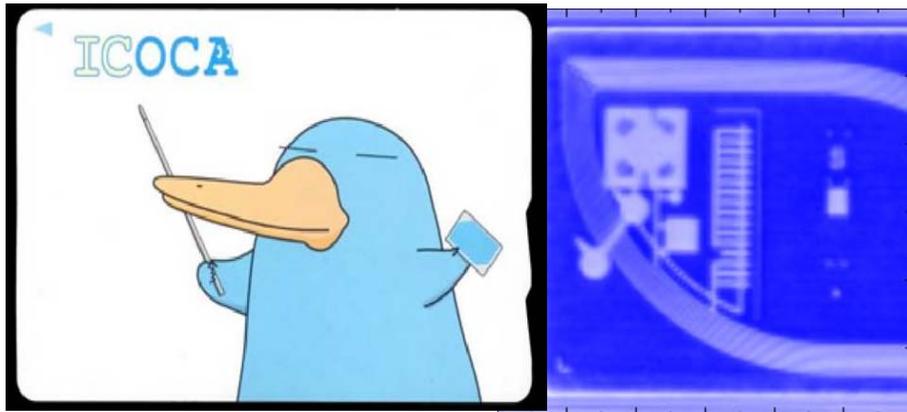


テラヘルツイメージング

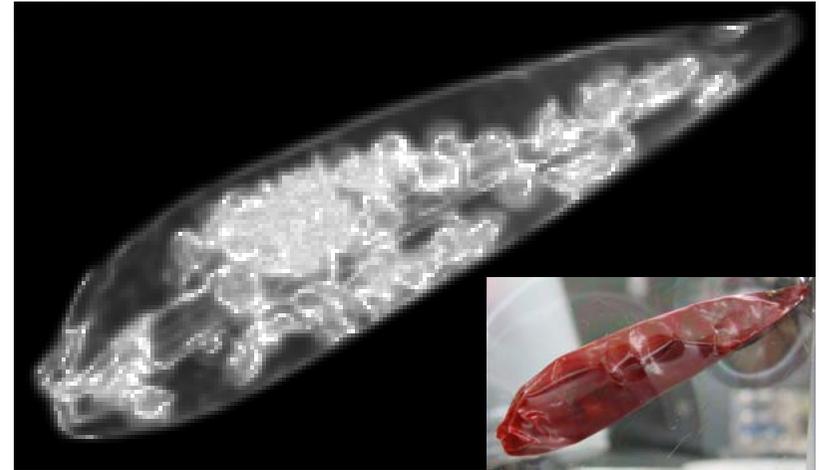




B. B. Hu and M. C. Nuss Opt. Lett. 20, 1716 (1995).

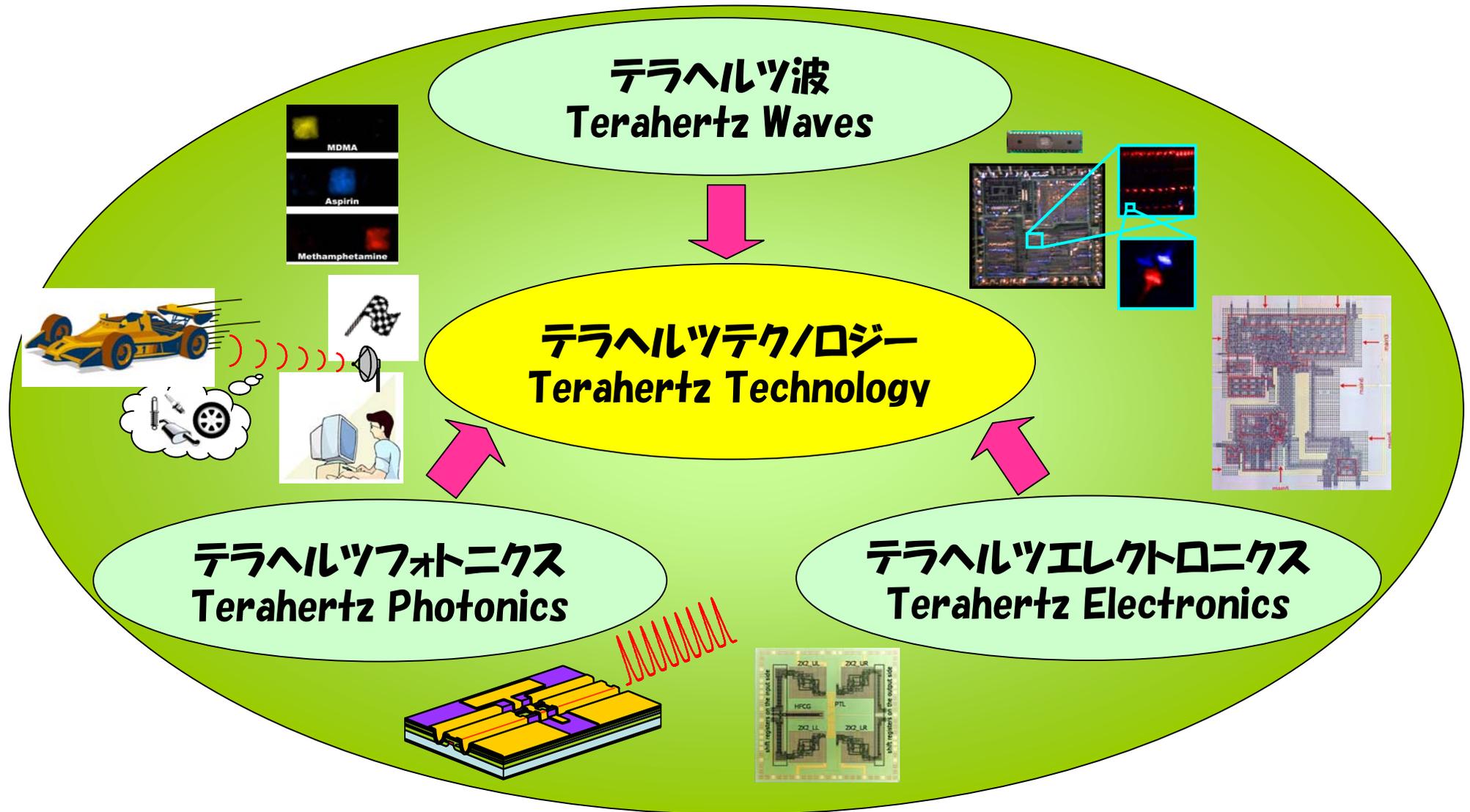


阪大斗内研

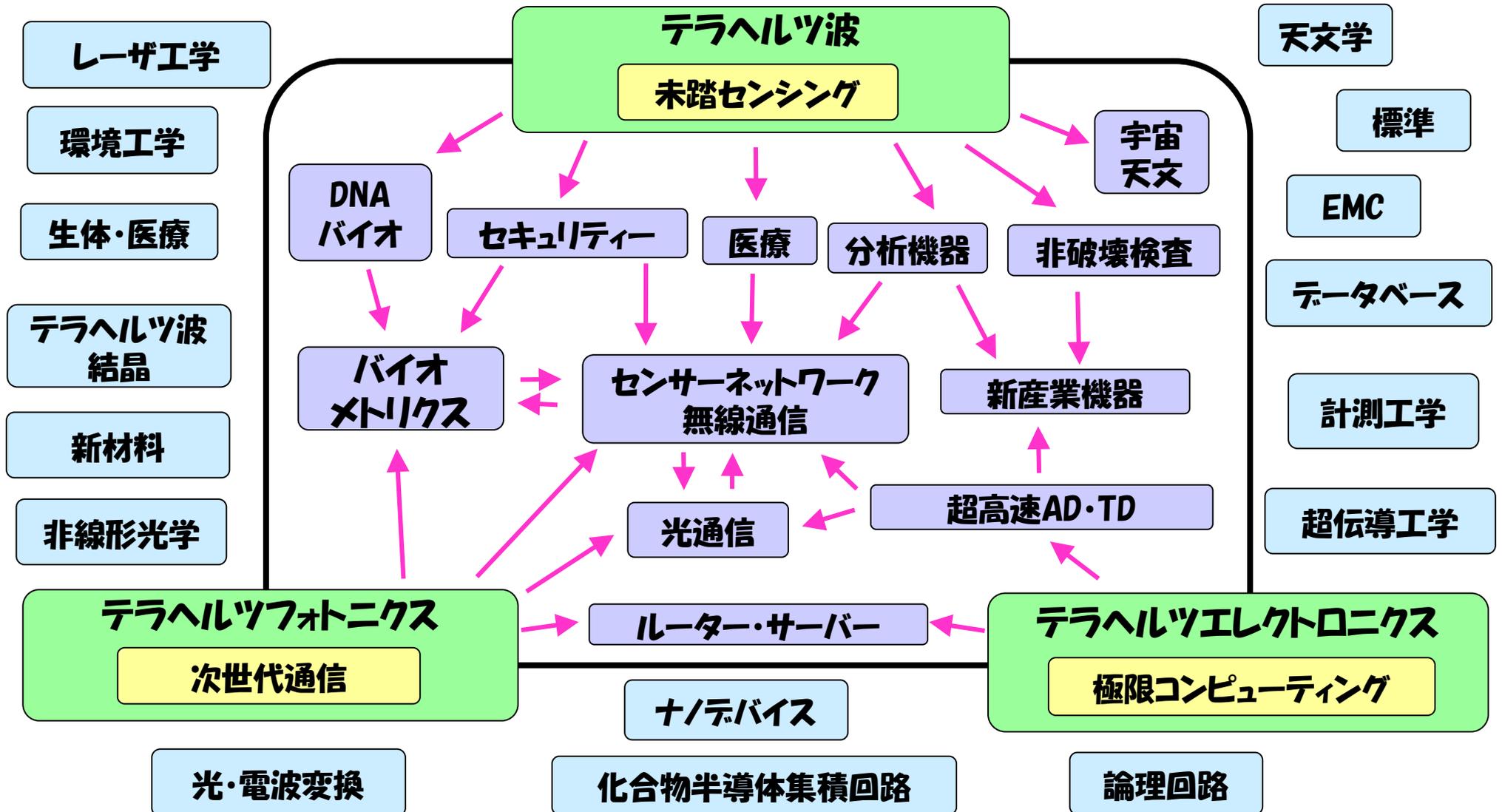


名大/理研・川瀬晃道&栃木ニコン

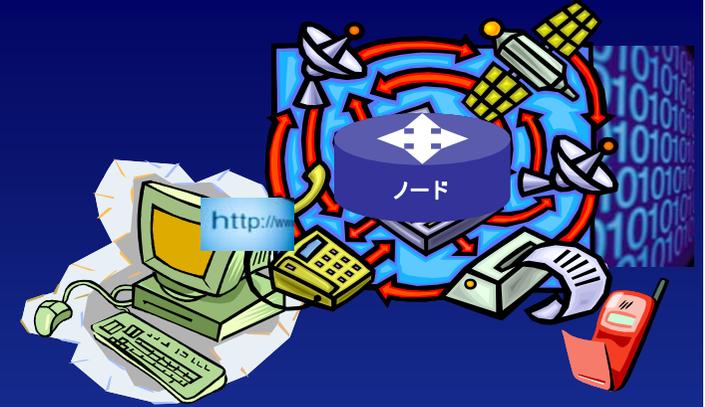
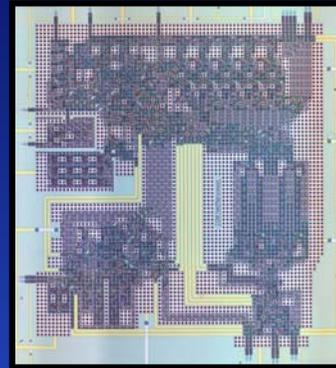
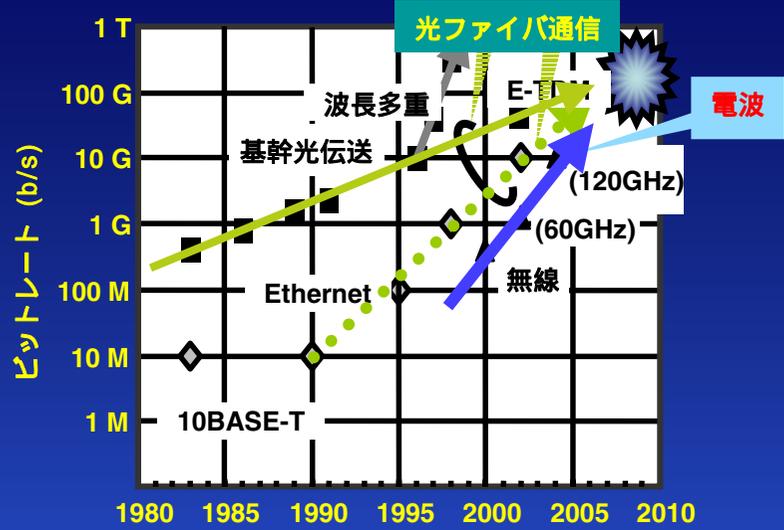
テラヘルツ技術の将来展望



テラヘルツテクノロジー分野の融合とシナジー効果

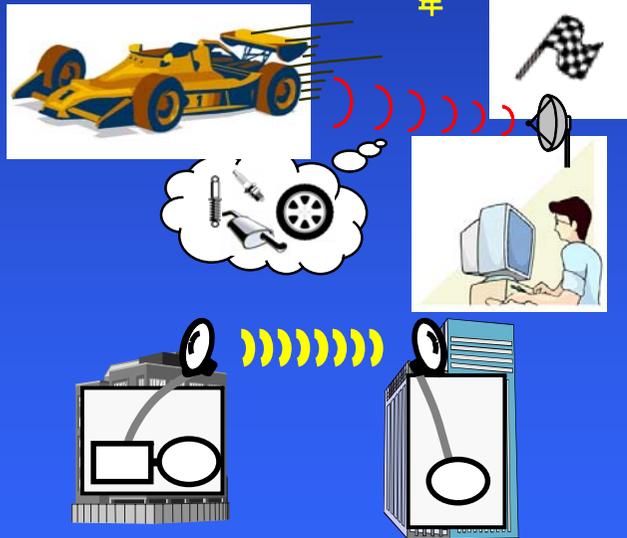


テラヘルツ ICT

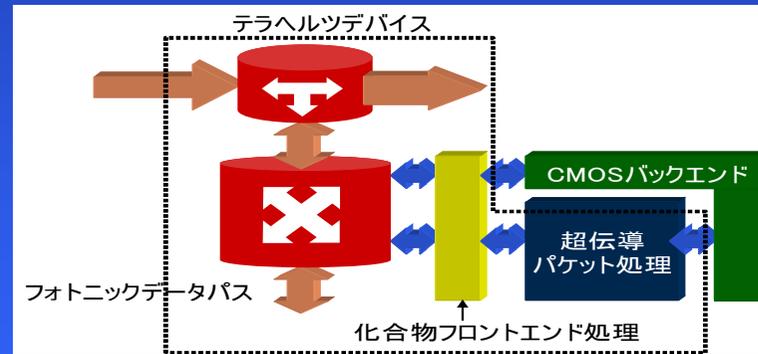


~1900 HBTs

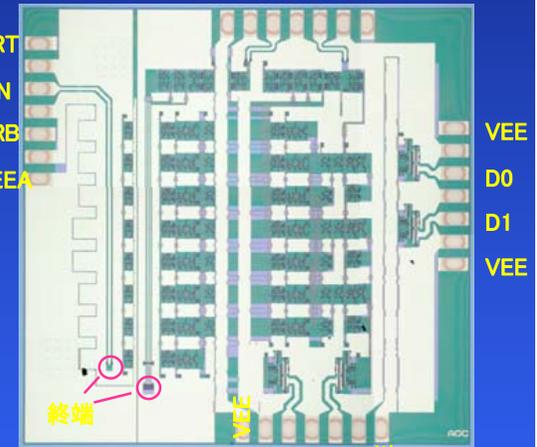
VEE CKT GKS CKC



20GHz SFQ Micro-Processor



SFQ光パケットスイッチ



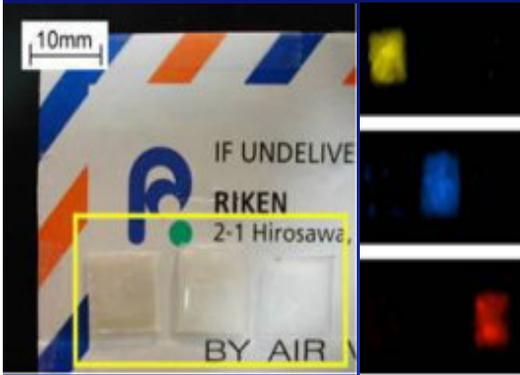
アナログ デジタル 10 D2 VEE

36Gbps ADC

数十Gbps無線実現へ

テラヘルツ無線・超高速論理回路・SFQノード/サーバーなど、
様々なテラヘルツ技術が次世代ICTを開拓する。

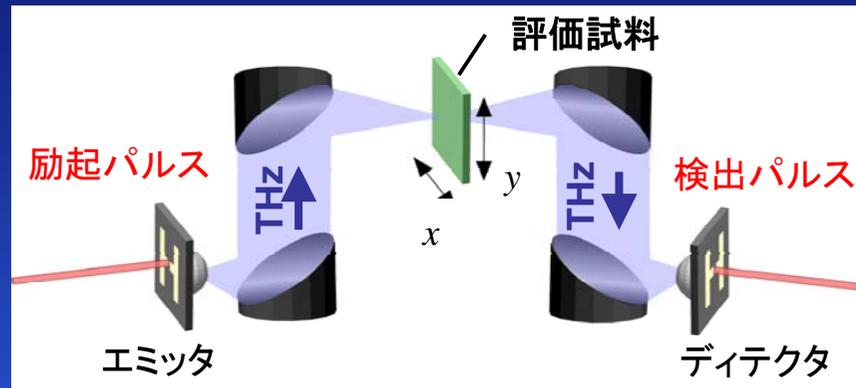
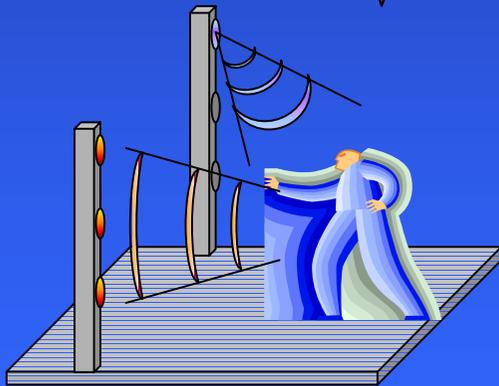
テラヘルツイメージング と安全安心応用



違法薬物検知

バイOMETRICS

外乱光源



スケールモデル
シミュレータ

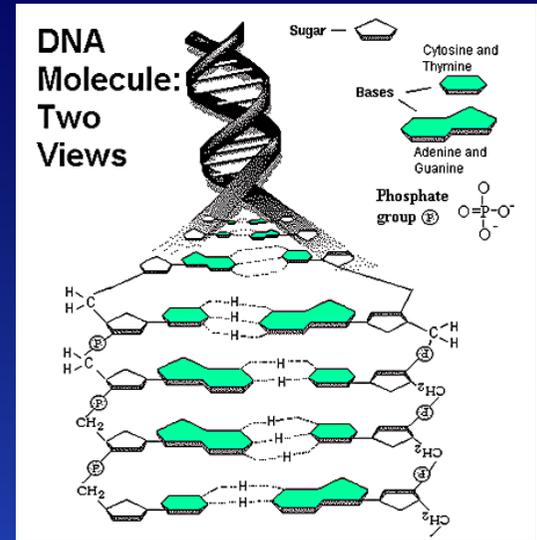
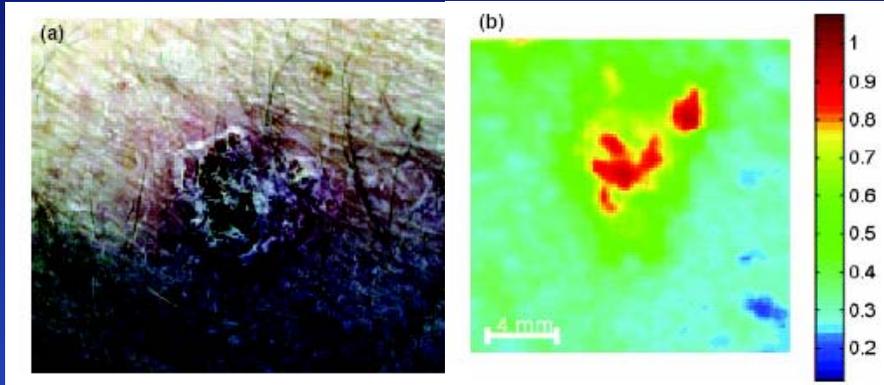
隠匿物検査



テラヘルツイメージングは、様々なセンシング機能を有し、危険物・禁止薬物検査・隠匿物検査など、セキュリティ分野における新展開が期待されている。

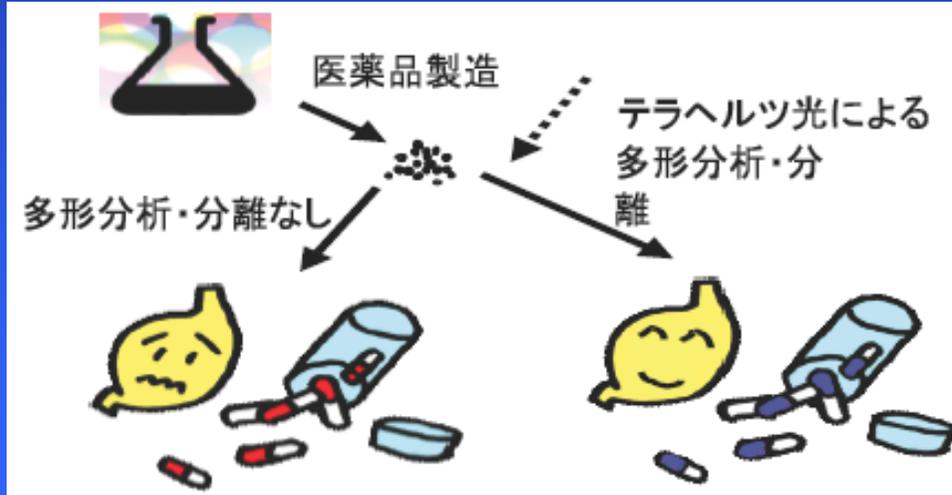
バイオ・生体・ 医療・医薬品検査応用

皮膚がん診断

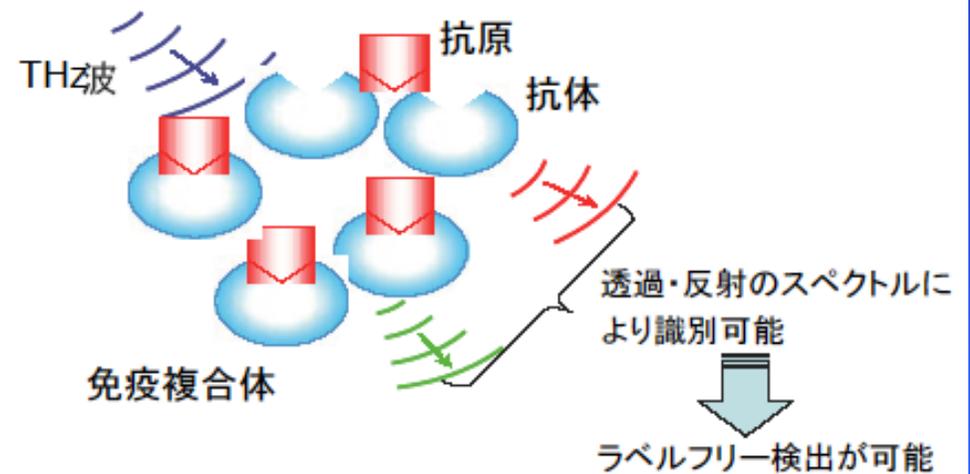


DNA検査

医薬品結晶多形分析



イムノアッセイ(抗原抗体反応)



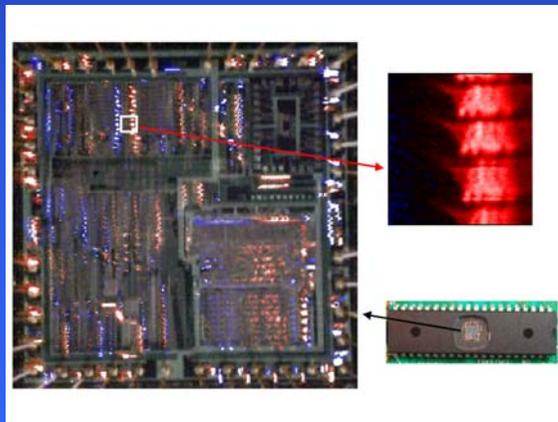
テラヘルツ分光イメージングは、医薬品結晶多形、分子間相互作用、水素結合評価、成分検査など、様々な新しい分析応用が期待されている。

工業・農業応用

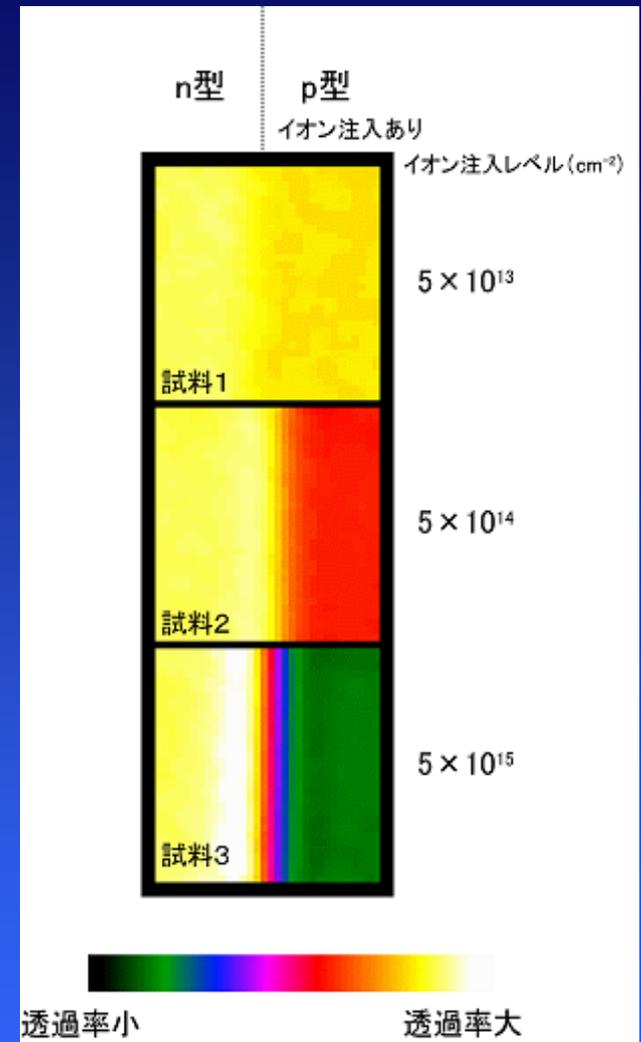
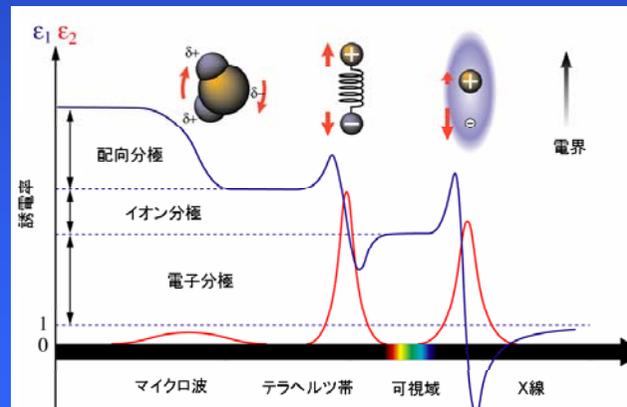
農作物／食品 検査・管理



LSI不良解析



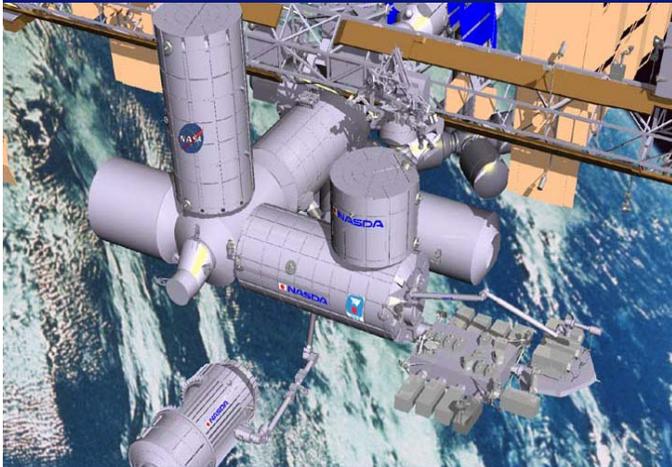
電子材料／ナノ材料分析



半導体ウェファー評価

誘電率／導電率評価による電子・ナノ材料分析、農作物等の水分成分検査、テラヘルツ波発生によるLSI不良解析など、産業展開への期待も大きい。

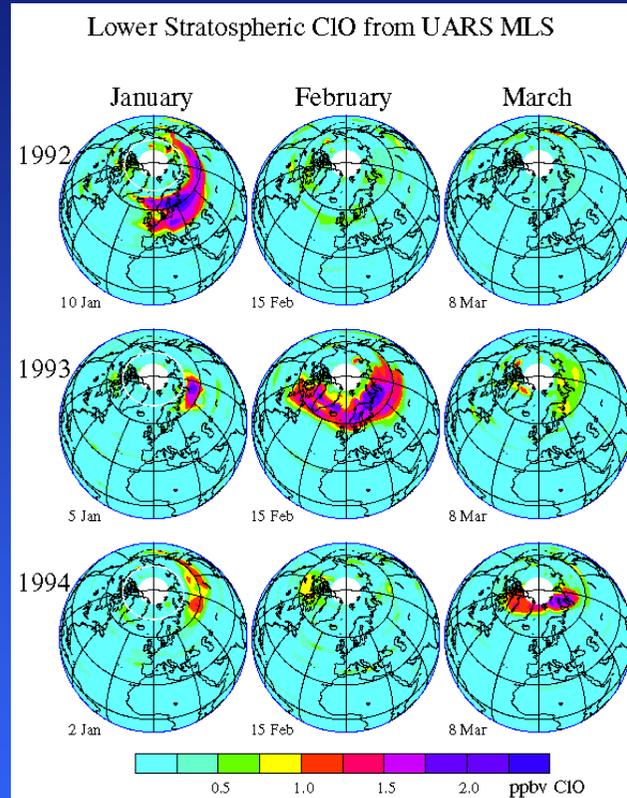
宇宙・環境計測



SMILES

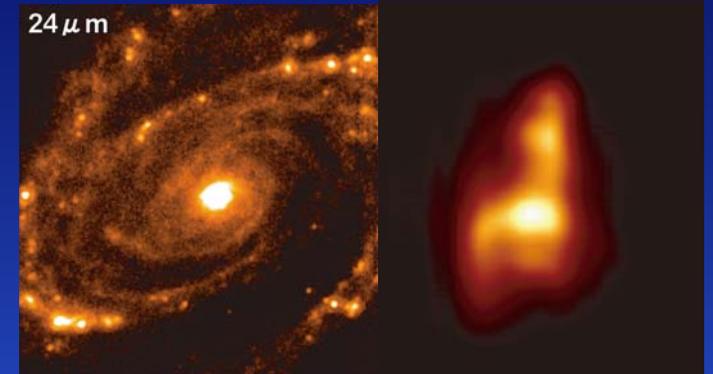


ALMA

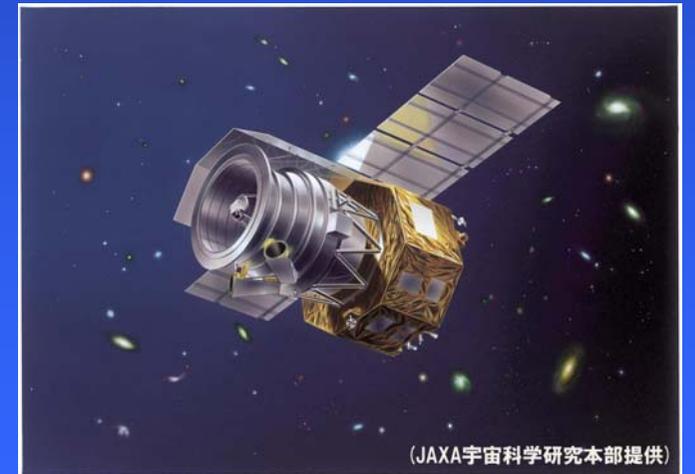


Earth Monitoring

Image courtesy of JAXA



12.5&3.3THz Camera



(JAXA宇宙科学研究本部提供)

Akari

テラヘルツテクノロジーが目指すもの

より豊か、より便利、より安全・安心な社会への貢献

高度情報通信技術革新

- ☞ 次世代光通信
- ☞ テラヘルツ無線
- ☞ 高速ネットワークノード
- ☞ 超高速論理回路/サーバー

新機能センシング・分析技術の創製

- ☞ バイオ/生体分析・医療
- ☞ セキュリティ・環境検査
- ☞ 非破壊検査・工業分析
- ☞ 宇宙観測・基礎科学

新規融合分野の開拓

- ☞ センサーネットワーク
- ☞ バイオメトリクス
- ☞ リモート分析・診断
- ☞ 大容量分光イメージング

テラヘルツフォトニクス

テラヘルツ
エレクトロニクス

テラヘルツ波

産業展開

分析機器

⇒ 電子材料・工業材料・バイオ/医薬品・農作物・
環境計測など

診断・検査技術

⇒ 皮膚癌・セラミックス・美術品・LSI不良解析・
医薬品・建物（建材）・スペースシャトル断熱材など

安全・安心技術

⇒ 禁止薬物・危険物（爆薬・有毒ガスなど）・
セキュリティ（THzカメラ）・指紋・食品検査など

情報通信

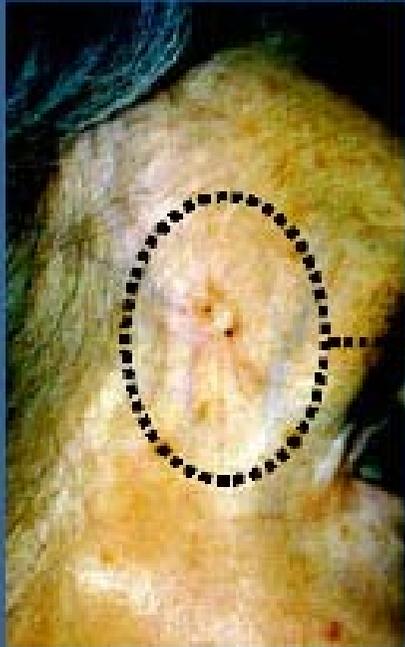
⇒ サブテラヘルツ無線（ビル間通信・ホットスポット・
遠隔医療・ハイビジョンTV）・光ルーターなど

基礎科学研究機器

⇒ 宇宙天文・分子/電荷ダイナミクス観測など

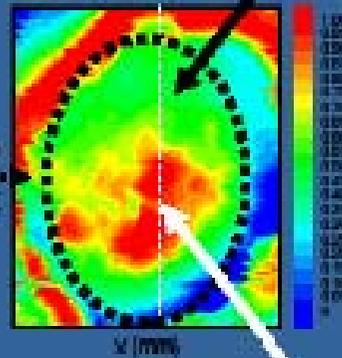
皮膚癌診断例

Visible picture of patient forehead with suspect lesion



Where is the lesion?

TPI image

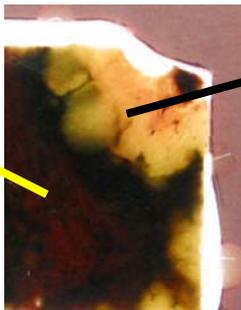


Uniform low absorption (green) by healthy tissue

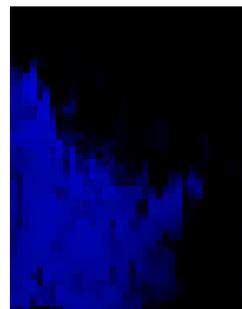
Large 'hot spots' show huge, invisible tumour under surface of skin

Teraview, UK,

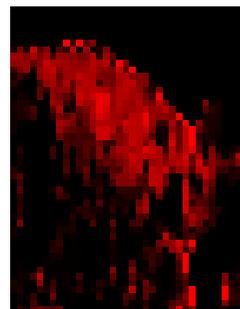
normal tissue



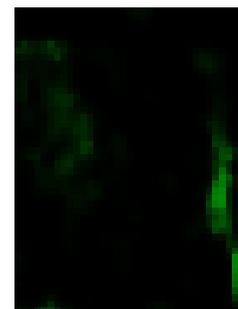
cancer



正常組織



癌組織



ノイズ

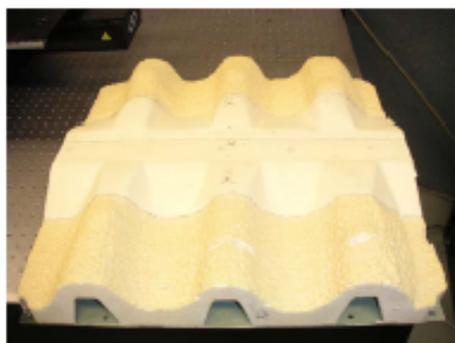
by 名大 川瀬晃道ら

検査・NDE応用

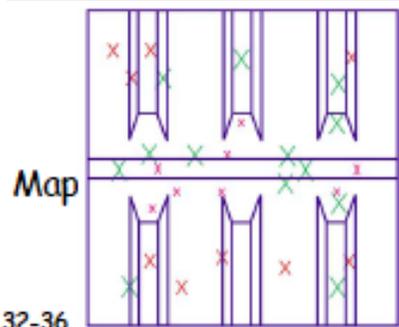
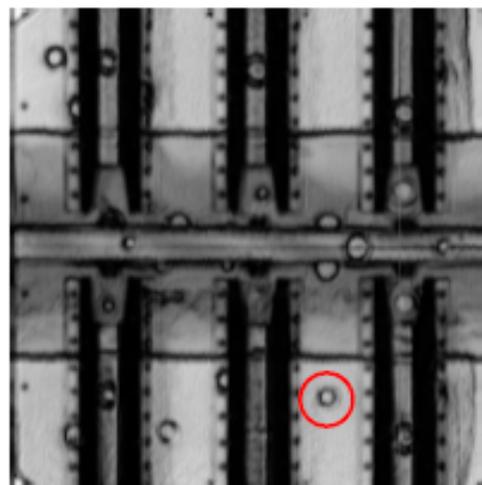
スペースシャトル 外壁パネル全数検査

LSI不良箇所特定装置 (阪大、NECEL他開発中)

NASA Panel #75 with Artificial Defects



0.2 THz image

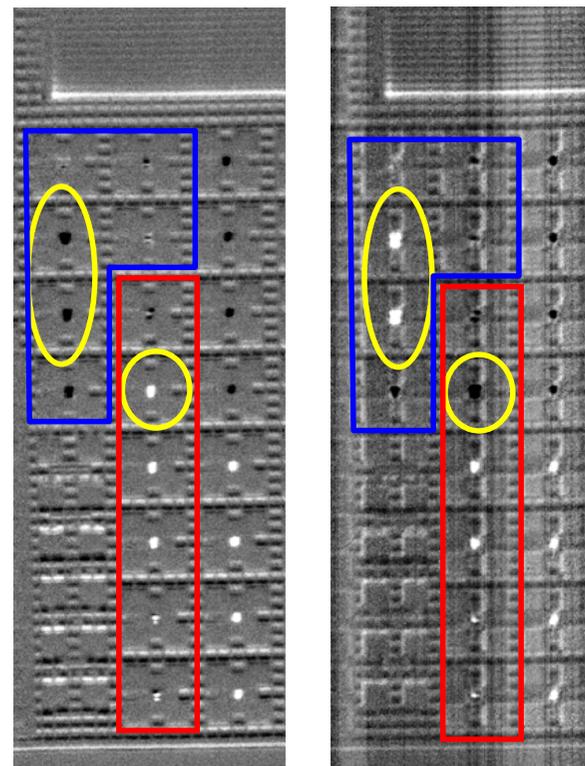


28 of 30 defects are identified

<http://www.rpi.edu/~zhangxc>

<http://www.rpi.edu/~zhangxc>

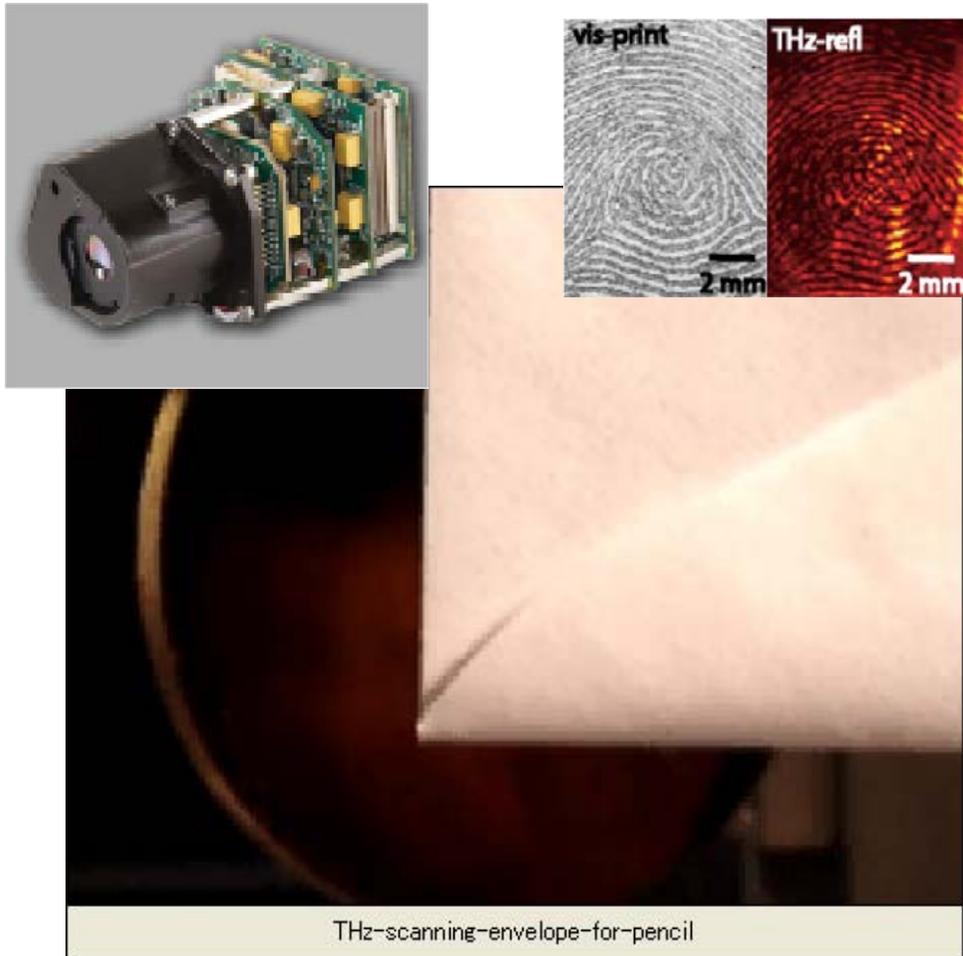
断線なし 断線あり



MOS TEGサンプル

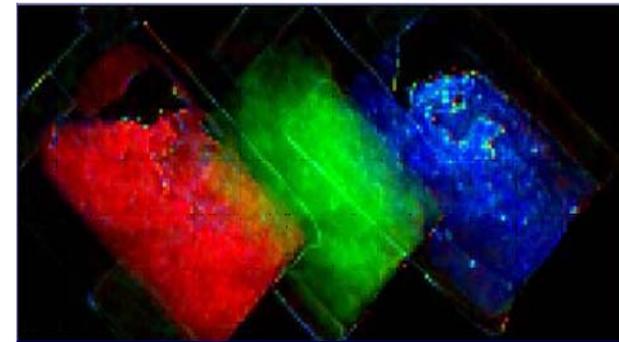
安全・安心応用例

THz-QCLによる リアルタイムイメージング



IEEE Photonics Technol. Lett. 18, 1415(2006).

郵便物内の麻薬検査

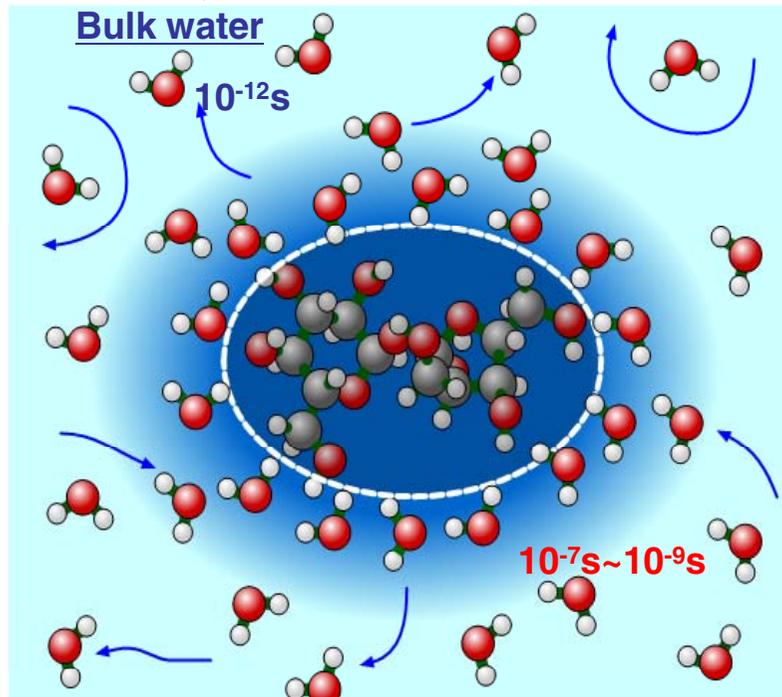


codeine cocaine sucrose
(60 mg each)

理研・名大他

基礎科学応用

水分子の ダイナミクス

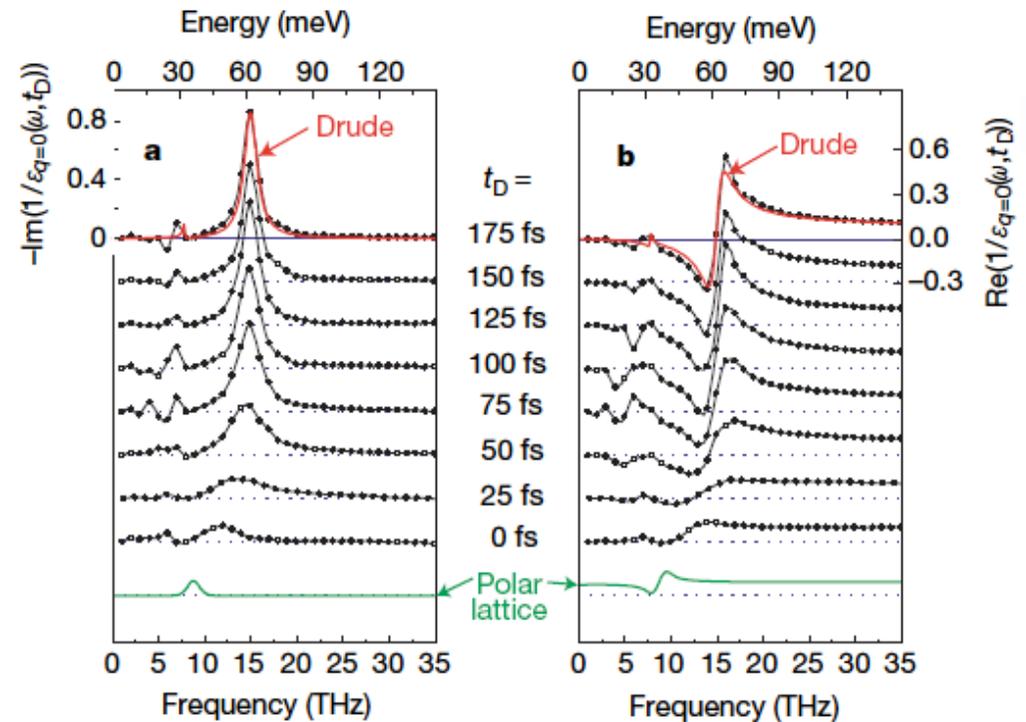


サクローズ
 水和数 \Rightarrow 約11個

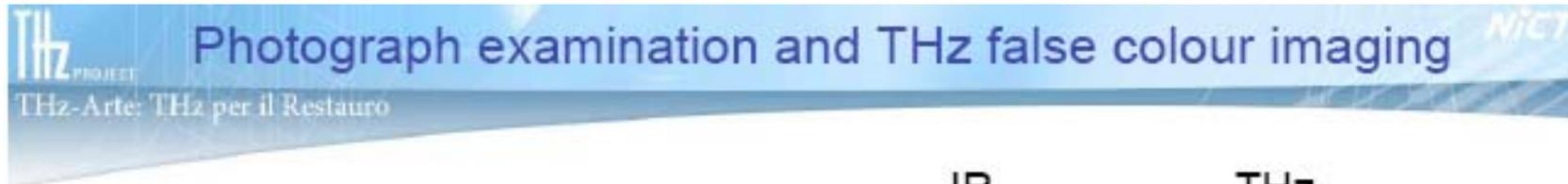
*Int. J. Infrared and Millimeter
 Waves* 27, 505-515 (2006)

How many-particle interactions develop after ultrafast excitation of an electron-hole plasma

R. Huber*, F. Tauser*, A. Brodschelm*, M. Bichler†, G. Abstreiter†
 & A. Leitenstorfer*



Art Conservation

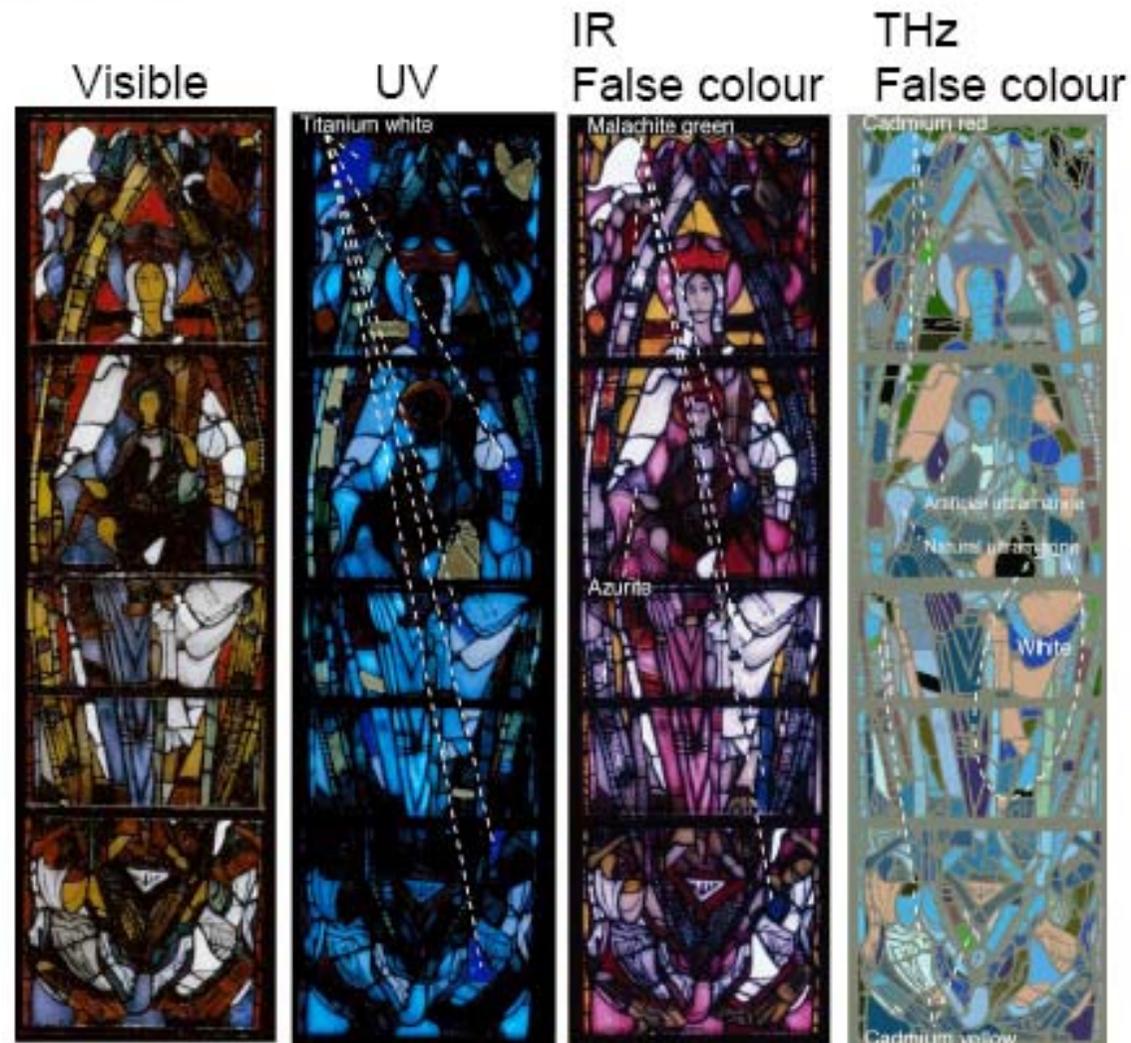


UV and IR photographs can suggest some materials.

THz can indicate all pigments.

Coloured specimen preparation, photographs:
Istitute per il Restauro
"L'Ambiente"

Contact: kaori@nict.go.jp



高輝度テラヘルツ光への期待

1. EMC技術の標準化

- ⇒テラヘルツの安全・安心／セキュリティー応用
- ☆データベースの構築
- ☆生体への影響を検証し、産業展開規格を提供

2. THzポンプ&プローブ

- ⇒材料科学への新展開
- ☆基礎科学・新Qbits…

3. テラヘルツ非線形光学

- ⇒新しい非線形光学
- ☆バイオ・製薬・材料科学・基礎科学・天文…

4. 新電磁気学

- ⇒新しい光科学のための基盤ツール
- ☆メタマテリアル・スーパーレンズ・透明マント…

まとめ

テラヘルツテクノロジーは、主要3分野、テラヘルツ波・テラヘルツフォトンクス・テラヘルツエレクトロニクスの融合により、生命・医療・健康・産業・宇宙・環境・安全/安心・情報通信・基礎科学など、広範な領域において、新規科学技術・応用分野を切り拓き、大きな波及効果をもたらすことが期待される。



Star Trek
1966-1969



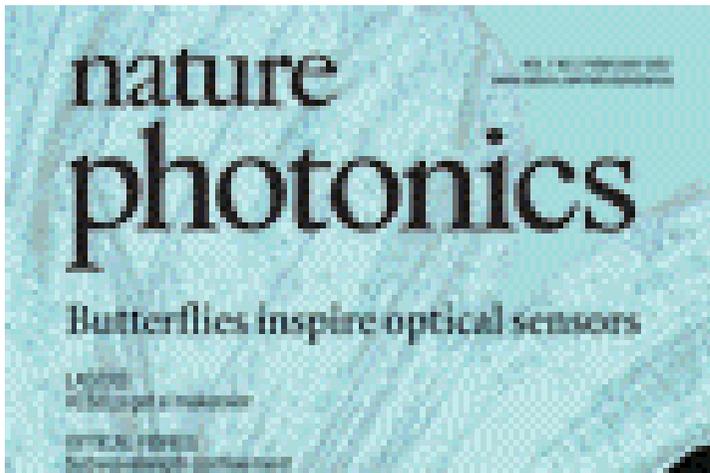
ショルダーホン！
1985



携帯電話からICT端末へ
2005

参考文献

応用物理学会誌 2006年2月号
nature photonics 2007年2月号
テラヘルツ技術 (オーム社、2006年5月)
<http://www.ile.osaka-u.ac.jp/research/THP/>



REVIEW ARTICLE

Cutting-edge terahertz technology

Research into terahertz technology is now receiving increasing attention around the world, and devices exploiting this waveband are set to become increasingly important in a very diverse range of applications. Here, an overview of the status of the technology, its uses and its future prospects are presented.



総合報告

テラヘルツ波技術の現状と展望

斗内 政吉**

近年の光・ナノ技術の進歩により、テラヘルツ分野における技術革新が著しい。テラヘルツ領域の偏光分光法、テラヘルツ量子カスケードレーザー、サブテラヘルツ超伝導線、サブテラヘルツ電圧検出器等の開発によりテラヘルツデバイスなどさまざまなテラヘルツ関連技術が実用化されており、新しい科学技術分野として、また、新産業の創出を促すものとして、大いに期待されている。その一方で、固体材料の非破壊検査などにも応用される。テラヘルツ技術に関する国内動向が実用化された。本稿では、国内の現状と展望を踏まえて、テラヘルツ波技術の現状と展望について概論し、次に電圧検出器・レーザー・検出器を例として、テラヘルツ電圧検出器・テラヘルツフォトニクス・テラヘルツエレクトロニクス三領域分野の最新動向を概説する。

Keywords: terahertz wave, terahertz photonics, terahertz electronics, time-domain spectroscopy, THz sensing, THz imaging, THz wireless communication

1. まえがき

テラヘルツ工学は、近年の光・ナノ技術の進歩により技術革新がもたらされ、新しい分野を開拓するものとして注目されている。テラヘルツ波は、電波天文や分析化学の分野において、広く研究・利用されてきたが、その対象は限定されたものであった。そのテラヘルツ技術に、今、新しいセンシング機構が追加され、工業・医療・バイオ・農業・セキュリティなどさまざまな分野における応用が期待されている。また、情報通信分野においては、利用電磁波のますますの高周波化が進んでおり、数百GHzの無線通信が実現される時期も遠くない。さらに、テラヘルツデバイスの開発も急速に進捗し、超高速信号処理技術も利用可能になりつつある。すなわち、テラヘルツ技術は、基礎科学分野のみならず、新産業創出・情報通信・エレクトロニクス分野において、新産業の創出に大きな役割を果たすことが期待される。次世代に不可欠な科学技術と位置づけることができる。

テラヘルツ帯(THz)における技術革新は、①テラヘルツ電磁波、②テラヘルツフォトニクス、③テラヘルツエレクトロニクスの三つの主要分野で進んでいる。テラヘルツ電磁波分野においては、フォトソリッドレーザーの開発によりテラヘルツ超伝導線分光法¹⁾が開発され、フーリエ成分が数十GHzから百THzを超える超広帯域分光電磁波発生装置²⁾の発生と超伝導検出器³⁾により、新しいテラヘルツ分光・イメージング技術が開発された。フォトニクス

からのアプローチとして、フォトミキシングによる光・電磁波変換により、110 GHz 等の無線通信技術が実用化され、数十GHzの無線通信が実現可能となっている。また、ナノ技術の進歩により、高精度に制御された半導体量子井戸構造の作成が可能となり、量子カスケードレーザー(QCL)のテラヘルツ帯実用化が実現された⁴⁾。現在では1.9 THz 程度までの高周波化が進んでいる⁵⁾。エレクトロニクス研究分野では、化合物半導体超伝導線による、MMICや高速AD変換器の開発も進んでおり、また、超伝導一維分子(SFQ)超伝導線の実用化により、110 GHz で動作するシフトレジスタードラムや40 GHz × 4~16 Gbps の光パケットスイッチも実現可能である⁶⁾。今まさに、テラヘルツデジタル信号処理技術を開発できる機運が整い、基礎・計測応用

図1 高周波によるさまざまな基礎・応用技術とテラヘルツ帯電磁波、テラヘルツフォトニクス、テラヘルツエレクトロニクスの関係

**テラヘルツテクノロジー動向調査委員会 〒110-0052 東京都港区新橋1-29-2 小島ビル 分類番号 12.6.7.1 (財)テラヘルツ先端技術開発センター内
**大阪大学レーザーエネルギー学研究中心 〒995-0871 宮城県仙台市太白区 仙台市太白区3-6, e-mail: tonouchi@ile.osaka-u.ac.jp
Current status and future prospect of Terahertz Technology, Mitsuhiro TOUOCHI, Research Committee on the Current Status and Future Prospect of Terahertz Technology, 1-29-2 Shinjuku Shinjuku-ku, Tokyo 110-0052.
**Institute of Laser Engineering, Osaka University, 3-4 Toyonaka, Suita 995-0871.

テラヘルツ技術

Terahertz Technology

斗内 政吉 ● 監修
テラヘルツテクノロジー動向調査委員会 ● 編

Ohmsha