



平成18年 電気学会 電子・情報・システム部門大会
先端技術セミナー (2006年9月6日、関東学院大学)

テラヘルツ波が開く新しい 分光とイメージング技術

(株) 栃木ニコン テラヘルツ事業室
福島一城、深澤亮一

テラヘルツ波の特徴

- ・ 0.1THz (3mm) ~ 10THz (30 μ m)
- ・ X線の1/100万のエネルギー
- ・ 非侵襲、人体安全
- ・ 非破壊
- ・ 紙、プラスチックなどを良く透過
- ・ 水に吸収、水分に敏感
- ・ 物質の振動状態に敏感
- ・ 分子の弱い相互作用のエネルギーに相当 (非共有結合)
- ・ 6THzの電磁波と15 $^{\circ}$ Cのエネルギーは同程度

テラヘルツ波とは？

テラヘルツ技術の応用分野

材料分析

半導体, プラスチック, セラミックス, 住宅建材などの非破壊検査

セキュリティ

小包内の禁止薬物, 爆発物, 金属の探知

バイオテクノロジー

医薬品の品質管理 (結晶多形, 錠剤コート)

医療、美容

皮膚癌, 火傷, 虫歯の診断, 美肌 (角質層) の診断

農業、食品

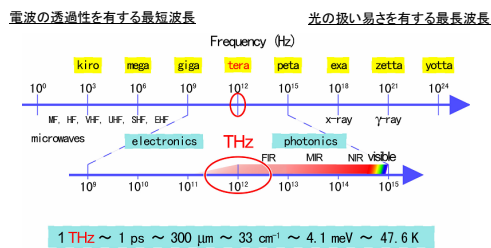
農作物水分のリアルタイムモニタリング, 冷凍食品検査

科学捜査

偽札識別, 偽造カード識別

テラヘルツ波

電波と光の間に残された未開拓の電磁波
→ 未発見の事実の宝庫



テラヘルツ波の発生・検出

広帯域テラヘルツパルス波の発生

光伝導スイッチ素子
非線形光学結晶 (光整流)
半導体表面

コヒーレント検出

光伝導スイッチ素子
電気光学結晶

波長可変単色テラヘルツ波の発生

光パラメトリック発生/発振 (LN)
差周波混合 (GaP, DAST)

インコヒーレント検出

焦電素子 (DTGS)
ボロメータ

その他の発生

共鳴トンネルダイオード,
QCL, p-Geレーザ, FIRレーザ,
FEL, BWO など

株式会社 坂本ニコソ
テラヘルツ事業室

テラヘルツパルス波 テラヘルツパルス分光

7

株式会社 坂本ニコソ
テラヘルツ事業室

テラヘルツパルス波の検出方法

フェムト秒レーザー

THz波

電流計

LT-GaAs AuGe/Ni/Au

光伝導スイッチ素子

フェムト秒レーザー

THz波

ZnTe

Wollaston polarizer

Balanced photodiode

1/4 波長板

電気光学結晶

10

株式会社 坂本ニコソ
テラヘルツ事業室

テラヘルツパルス波の特徴

- ・ 電磁波の「電場」を測定
- ・ 電磁波の位相情報を取得可能、複素誘電率が得られる → KK変換不要
- ・ 広帯域な周波数の電磁波を含む → 時間領域分光
- ・ 室温で発生検出可能 → 冷却不要

電場 (a.u.)

時間 (ps)

通常の光

電磁波の「強度」(E²)を測定

8

株式会社 坂本ニコソ
テラヘルツ事業室

ポンプ・プローブ法

ビームスプリッタ

フェムト秒レーザー

ポンプ光

光導

検出器

時間遅延

プローブ光

プローブ光(サンプリングパルス)

数十MHzの繰り返しで放射されるフェムト秒レーザーパルスをビームスプリッタによりポンプ光とプローブ光の2つに分割。ポンプ光(励起パルス)でテラヘルツ波を発生し、プローブ光(サンプリングパルス)を時間遅延させてテラヘルツ波を検出することでテラヘルツ電場の時間変化を測定。

$$E_{\text{detect}}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} E(t) S_p(t - \tau) dt$$

11

株式会社 坂本ニコソ
テラヘルツ事業室

テラヘルツパルス波の主な発生方法

フェムト秒レーザー

THz波

電流計

LT-GaAs AuGe/Ni/Au

バイアス電圧

光伝導スイッチ素子

フェムト秒レーザー

THz波

ZnTe

χ⁽²⁾

非線形光学結晶

THz波

フェムト秒レーザー

Semi-insulating InP

Fermi level

半導体表面

9

株式会社 坂本ニコソ
テラヘルツ事業室

テラヘルツパルス分光の位置づけ

TDR

テラヘルツパルス分光

FT-IR

マイクロ波

遠赤外

中赤外

近赤外

可視光

分子の配向

分子間の振動、緩和

気体分子の回転

結晶格子振動

水素結合の伸展、ねじり

周波数 (Hz)

波長

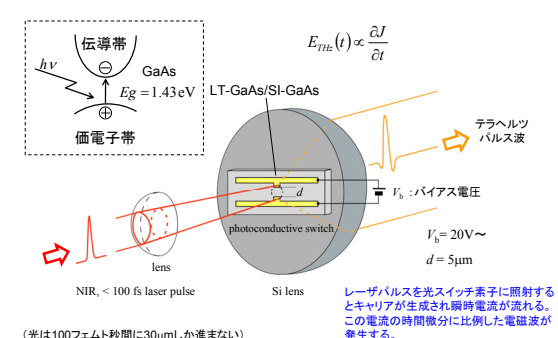
12

テラヘルツ分光の適用分野

対象材料・分野	取得が期待される情報
半導体 (Si, 化合物)	不純物 (ドナー, アクセプター), 局在振動モード, 格子振動, プラズマ振動 (キャリアー密度, キャリアー散乱)
LSI	配線故障解析
有機半導体 (有機EL, 有機太陽電池)	プラズマ振動 (キャリアー密度, キャリアー散乱)
セラミックス	誘電率, 格子振動, ソフトフォノンモード
超伝導体	電気伝導, 超伝導ギャップ, 局所超伝導現象
液体, 溶液, 水分	分子の運動性, 吸着
ポリマー	誘電率, 配向特性, 結晶化度, 分子間相互作用
ナノコンポジット	マトリックス/ナノ微粒子相互作用
医薬品	結晶多形, 構造解析
バイオ	構造解析, 分子間相互作用
セキュリティー	麻薬診断, 爆薬診断

永井直人, 光学 34, 465 (2005).

テラヘルツパルス発生器



レーザパルスを光スイッチ素子に照射するとキャリアが生成され瞬時電流が流れる。この電流の時間微分に比例した電磁波が発生する。

(光は100フェムト秒間に30μmしか進まない)

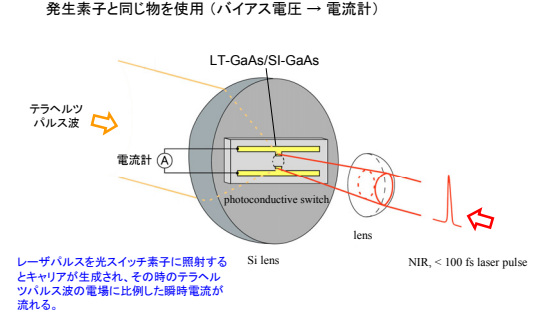
テラヘルツパルス分光装置



世界初
2003年6月完成

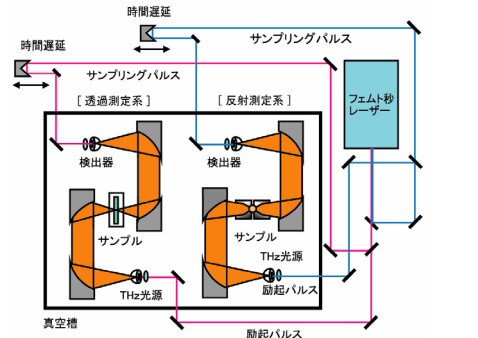
テラヘルツパルス検出器

発生素子と同じ物を使用 (バイアス電圧 → 電流計)



レーザパルスを光スイッチ素子に照射するとキャリアが生成され、その時のテラヘルツパルス波の電場按比例した瞬時電流が流れる。

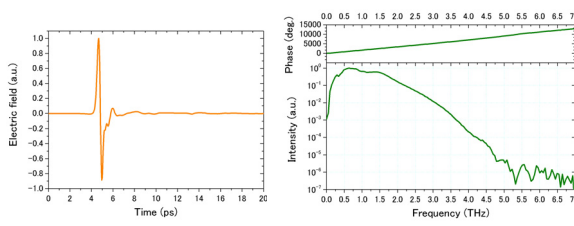
テラヘルツパルス分光装置 - 光学系

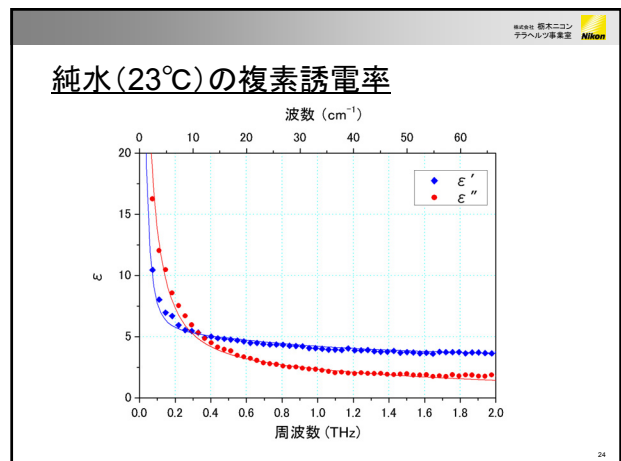
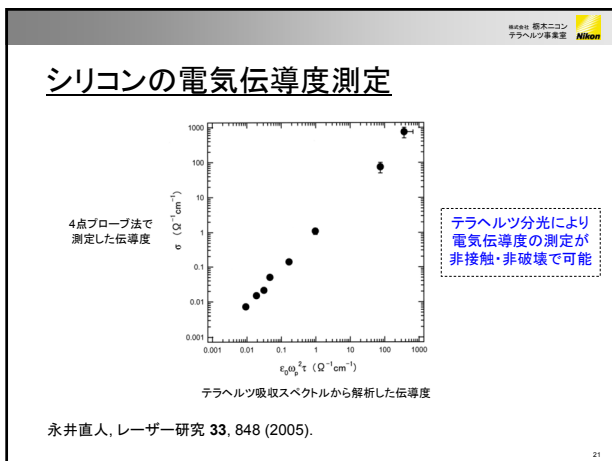
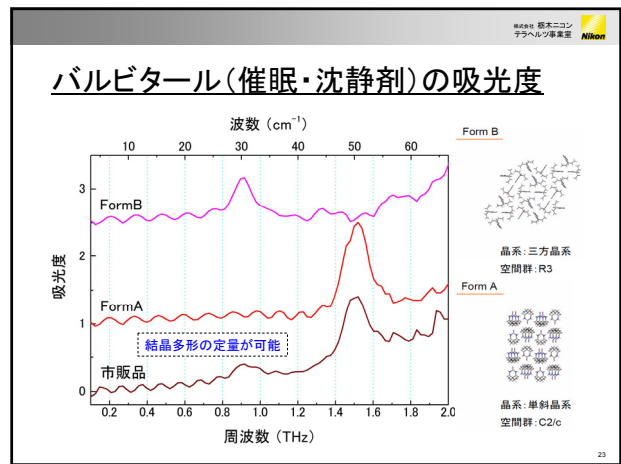
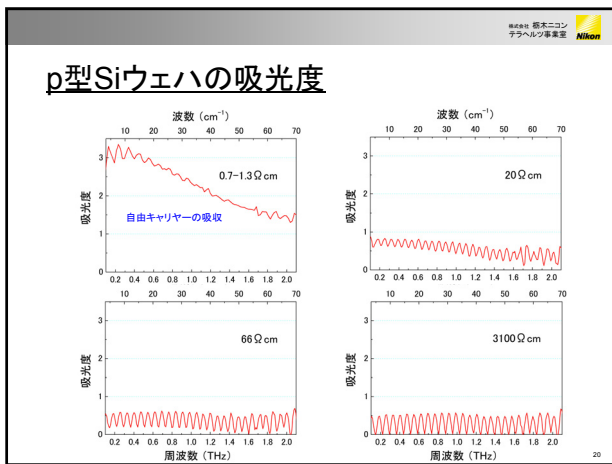
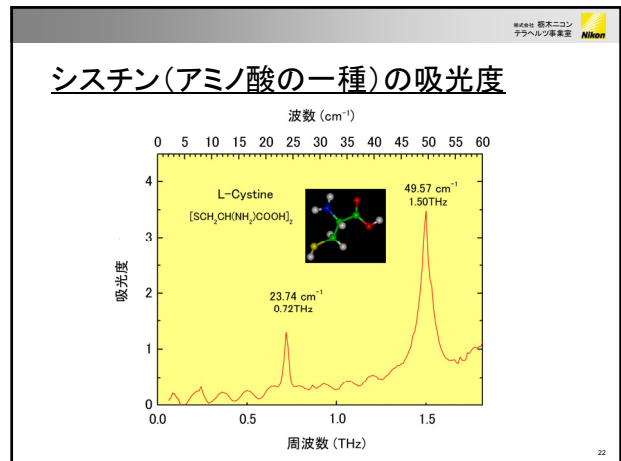
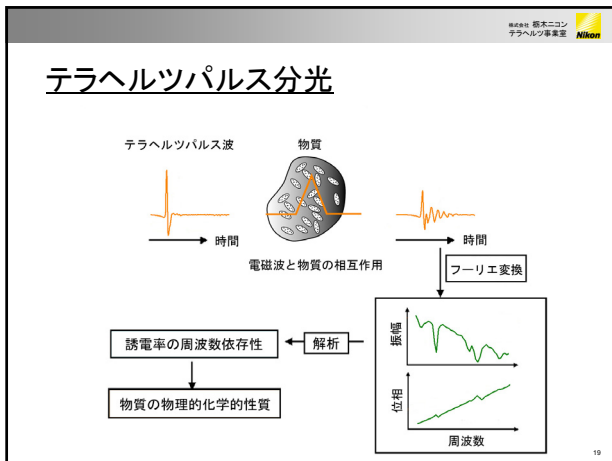


テラヘルツパルス分光 (時間領域分光)

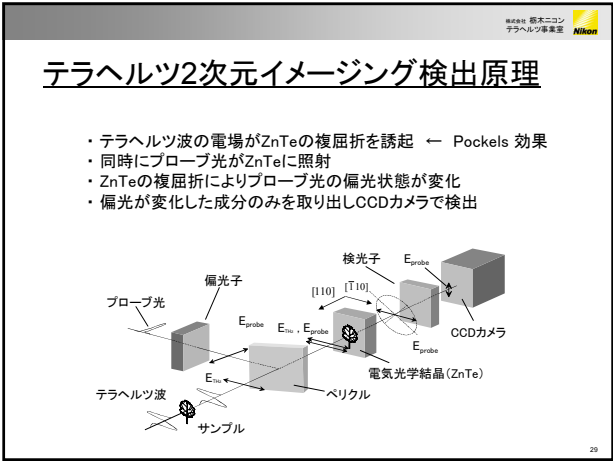
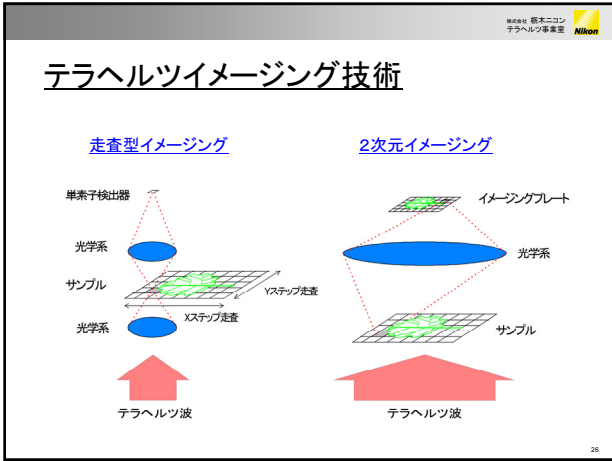
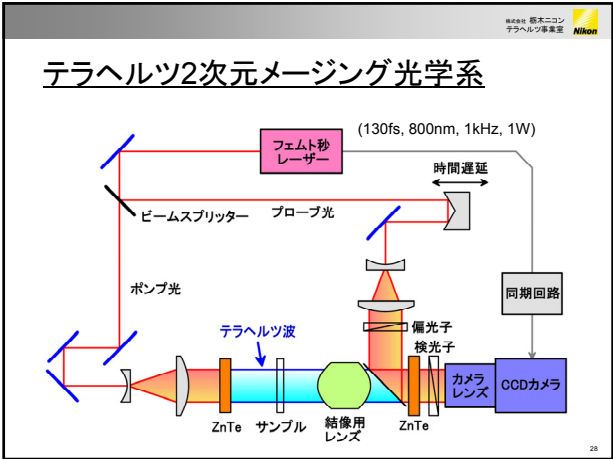
電場の時間波形をフーリエ変換し
振幅スペクトル・位相スペクトルを得る

Time Domain \xrightarrow{FFT} Frequency Domain





テラヘルツイメージング



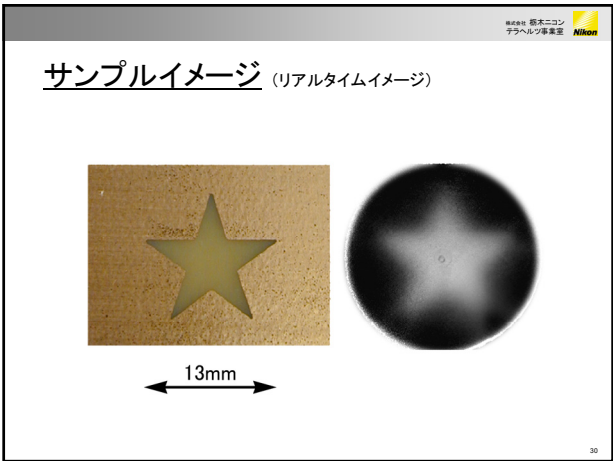
テラヘルツパルスイメージング技術

リアルタイムイメージングモード
時間遅延を固定してデータ取得し、画像化

時間分解イメージングモード
時間遅延を変化させながらデータ取得し、画像化

位相シフトイメージングモード
時間遅延を変化させながらデータ取得し、パルス遅れ情報で画像化

分光イメージングモード
時間遅延を変化させながらデータ取得し、フーリエ変換し画像化



画像処理

サンプル有りの画像を、サンプル無しの画像で除算
各画素のCCD出力値を、サンプルが無い場合のCCD出力値で規格化

サンプル有り画像

サンプル無し画像

31

ハエ取り草の透過イメージ

34

封筒内の刃の透過イメージ

32

テラヘルツ波の波面 (時間分解イメージ)

電気光学結晶

テラヘルツ波

テラヘルツパルス波の波面が電気光学結晶に向かって進んで来る様子を0.33ピコ秒(0.1mm)間隔のコマ送りで捉えた画像

35

葉の透過イメージ

水分の多い葉脈部の透過率が低い

33

特殊印刷物の透過イメージ (分光イメージ)

Nikon

17mm

Nikon

Nikon

@ 0.59 THz
 $\lambda = 0.51\text{mm}$

@ 0.88 THz
 $\lambda = 0.34\text{mm}$

@ 1.47 THz
 $\lambda = 0.20\text{mm}$

空間分解能は波長程度

36

