

# 光技術を用いた高周波電波の計測とイメージング

永 妻 忠 夫

## Photonic Technologies for High-Frequency Radio-Wave Measurement and Imaging

Tadao NAGATSUMA

Recently, photonic measurement of radio waves has been attracting a great deal of interest, since it offers less *invasive* against the radiation and propagation of radio waves from antennas, and much wider frequency bandwidth extending from millimeter-wave band to terahertz band. This article describes principle and applications of several photonic techniques to measure radio-wave signals. In addition, imaging of objects using high-frequency radio waves is presented.

**Key words:** radio wave, millimeter wave, photonics, measurement, imaging

今日、われわれは華やかな電波の時代に生まれ、その恩恵を享受している。電波とは光と同じ電磁波のひとつで、その中で3 THz以下の周波数の電磁波を指す。われわれが利用する電波の周波数は、時代とともに低いところから高いほうへと開拓されてきており、現在、周波数1~10 GHz内外のマイクロ波帯の電波が、携帯電話、無線LAN、衛星放送、衛星通信など無線通信の分野を中心に供されている。そして、さらに高周波のミリ波帯(30~300 GHz)の産業化が、固定無線(60 GHz)や車載衝突防止レーダー(76 GHz)への応用を皮切りに始まり、300 GHzを超えるサブミリ波帯の電波(最近では、テラヘルツ波とも称する)の研究が内外で盛んになりつつある。

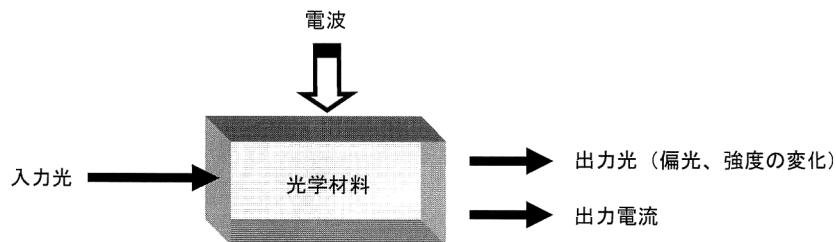
一方、光ファイバーを用いた有線通信も、fiber to the home (FTTH)に代表されるようにわれわれのごく身近な存在となり、光技術と電波技術とを巧みに融合させた「光&ワイヤレス」通信の時代が幕を開けようとしている。このような光技術と電波技術との融合は、通信だけでなく計測の分野においても有用である。従来の電波計測においては、自由空間を伝搬する電波をアンテナによって受信し、ダイオードなどの電子デバイスを使って信号振幅や電力を測定する方法が一般的であったが<sup>1)</sup>、近年、光技術を利用することで、電氣的な手法よりも高い周波数の電波を

低擾乱で計測することが可能になってきた。本稿では、光技術を用いた電波の計測技術について、その測定原理や計測事例を解説する。また、電波計測の新しい応用として、ミリ波・サブミリ波・テラヘルツ波を用いて物体を可視化するイメージング技術について紹介する。

### 1. 光技術による電波計測の原理と基礎

#### 1.1 計測の基礎となる物理現象

光による電波(電気信号)の計測においては、光と電波との相互作用を引き起こすさまざまな物理現象が基礎になる<sup>2)</sup>。図1に、実用的な観点から選んだ計測(プロービング)手法とそれを支える物理現象をまとめる。電界によって複屈折率が変化する現象(ポッケルス効果)を使った電気光学(electro-optic: EO)プロービング<sup>3-11)</sup>、光を照射すると導電率が変化する現象を利用する光伝導(photoconductive: PC)プロービング<sup>12-14)</sup>、電界によって光の吸収係数が変化する現象を利用する電界吸収(electro-absorption: EA)プロービング<sup>15-17)</sup>、および磁界による光の偏光面の回転などを利用する磁気光学(magneto-optic: MO)プロービング<sup>18-20)</sup>が代表的なものである。いずれの場合も、これらの諸現象を引き起こす特殊な材料が重要であり、電界あるいは磁界センサーとしての感度や帯



手法	物理現象	代表的な材料	備考
電気光学 (EO) プロービング	電界による複屈折率の変化	LiTaO <sub>3</sub> , LiNbO <sub>3</sub> , KTP, CdTe, ZnTe, BSO, DAST	バルク材料型 光導波路型 アンテナ集積型
光伝導 (PC) プロービング	光照射による導電率の変化	低温成長 (LT) GaAs, LT-InGaAs/InAlAs	アンテナが必要
電界吸収 (EA) プロービング	電界による光吸収係数の変化	GaAs InGaAs	偏光光学系が不要
磁気光学 (MO) プロービング	磁界による入射光の偏光面の回転 (ファラデー効果, 光磁気カー効果) など	YIG (yttrium iron garnet), Bi-YIG, GaP, KTB <sub>3</sub> F <sub>10</sub> , TGG (terbium gallium garnet), ZnTe, CdMnTe	磁界感度: 10 <sup>-7</sup> ~10 <sup>-8</sup> T 電流感度: 0.1~1 mA 程度

図1 光技術を用いた種々の電波計測の手法。

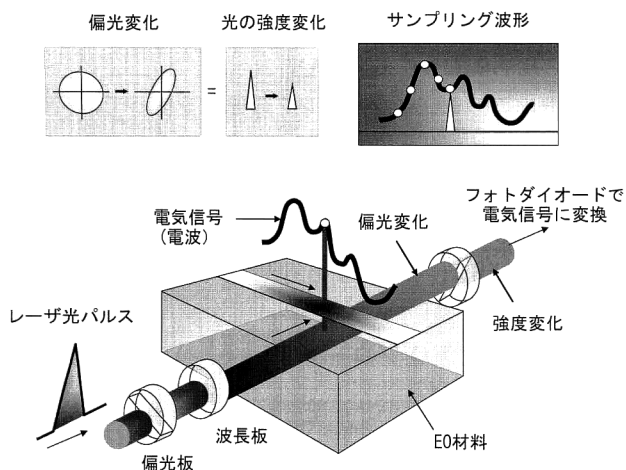


図2 EOプロービングによる電気(電界)信号計測のしくみ。

域は、材料の種類や形状などに大きく依存する。また、電波の受信(検出)感度を上げるために、アンテナと組み合わせたり、光を材料中に効率的に伝搬させるための光導波路を形成する場合もある。以下では、これらのプロービング手法のうち、電界計測として最も広く利用され実用化が最も進んでいるEOプロービングについての詳細と実際の応用例を説明する。

## 1.2 EOプロービングによる電界計測の原理

EOプロービングの原理は、図2に示すように、電界あるいは電圧による光強度変調である。光変調器では既知の電気信号で光信号を制御するのに対し、EOプロービングは光信号の変化から未知の電気信号を測る。光信号として

は、パルスレーザー光と連続レーザー光を用いる2通りの方法がある。

光パルスを用いたEOプロービングは、一般にEOサンプリング(electro-optic sampling: EOS)とよばれる。EOSでは、上述のように、電界が加わるとその強さに応じて屈折率が瞬時に変化する(応答速度は0.01~0.1 psのオーダー)EO材料が電界センサーになる。電界によって屈折率が変化したEO材料中に光を通過させると、材料に入る前と出た後で偏光状態が変わる。この偏光状態の変化は、EO材料を通過した光をさらに偏光板に通すことで、光の強さ(光量)の変化に変換することができる。パルス光を用いることで、時間的に変化する電気信号波形を、ほぼ光パルスの幅の分解能で測定することが可能となる。最近では、0.1~0.3 ps程度のパルス幅のレーザー光源が容易に入手できることから<sup>21-23)</sup>、サブピコ秒の時間分解能(帯域換算で1 THz)を得るのは難しいことではない。こうしたEOSの広帯域性は、現在の高周波電界(電気)信号計測技術の中で最高のものである。

パルス光のかわりに連続光を用い、高速フォトダイオードで電気信号に変換した後、電気的なサンプリングオシロスコープやスペクトラムアナライザーでそれぞれ波形や周波数を計測することも可能である<sup>9-11)</sup>。この場合、帯域がフォトダイオードおよびそれ以降の電気的な計測技術の性能で決まる。また、測定帯域を広げると、光のショット雑音が増えるため感度が劣化する。したがって、実用的には数GHz程度の測定に適している。

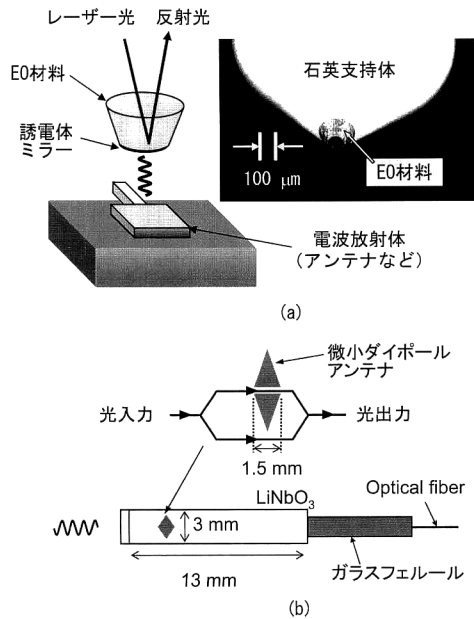


図3 EOプロービングによる電界計測の構成例。

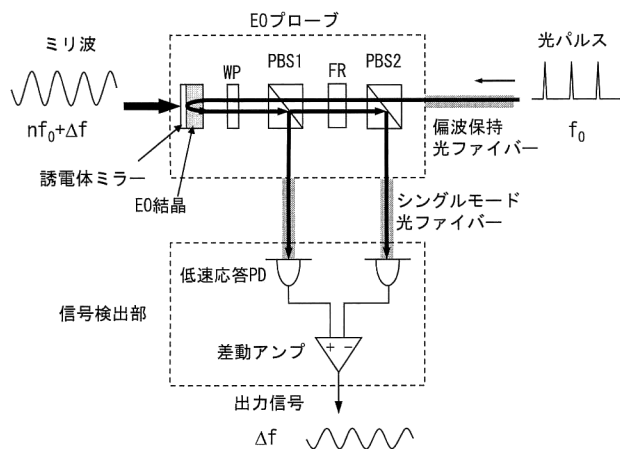


図4 電波計測用EOプロービングシステムの構成。

EO材料に要求される重要な項目は、①  $n^3r$  ( $n$ : 屈折率,  $r$ : ポッケルス定数) が大きい, ② 抵抗率が高い, ③ 誘電率  $\epsilon$  が低い, ④ 特定方向の電界に対してのみ感度を有する, ⑤ 使用するレーザー光の波長で大きな吸収がない, 研磨・切削加工やミラー等の膜蒸着が容易である, などがあげられる。①は感度, ②は低周波数での応答特性, ③は容量的な負荷あるいは擾乱, ④は空間分解能あるいはクロストーク特性に, それぞれ関連する。一般に, 電界に対するEO材料の屈折率の変化が  $n^3r$  に比例することから, この値が感度の目安として使われる。また, 誘電率が高いと, 電界のEO材料への侵入を妨げるため感度が低下する。そこで, 材料の感度指数として  $n^3r/\epsilon$  を用いることもある。さらに, ④に関連して, レーザー光の進行方向と検出される電界の向きが平行となる縦型の材料と, レー

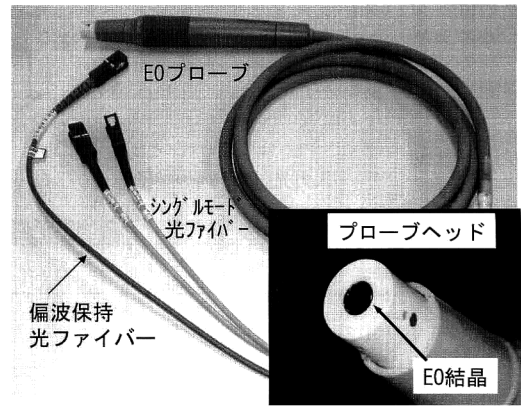


図5 開発したEOプローブの外観。

ザー光と電界の方向が垂直な横型の材料のどちらを選択するかが重要である。自由空間を伝搬する電波の計測においては, 横型を用いるのが一般的である。これらを満足するEO材料としては,  $\text{LiTaO}_3$  (横),  $\text{LiNbO}_3$  (横),  $\text{KTP}$  (横),  $\text{CdTe}$  (横・縦),  $\text{ZnTe}$  (横・縦),  $\text{BSO}$  (横・縦) などの酸化物結晶や半導体が代表的であり, その他高感度材料として, 高分子ポリマー<sup>24)</sup> や有機結晶 (例えば  $\text{DAST}$ <sup>25)</sup>) への期待度も大きい。

図3は, このEOプロービングの原理を使って, アンテナなどの電波放射体からの電界(電波)計測を行うための電界センサー部の形態例である。(a)はバルク材料型のもの, (b)は  $\text{LiNbO}_3$  基板にアンテナ電極と光導波路(干渉計)を形成したものである<sup>26)</sup>。

## 2. 電波計測用EOプローブ

### 2.1 システム構成

図4は, 電波計測用に開発したEOプロービングシステムの構成を示すブロック図である<sup>27)</sup>。プローブが電波伝搬に及ぼす影響をできるだけ少なくするために, EO結晶, 偏光板, 波長板といった非金属材料のみで集積できる部分を「プローブ」として一体に集積化し, レーザー光の入出力は光ファイバーを使う構成とした。通常のシングルモード光ファイバーではファイバーを動かすと応力により偏光状態が変化するため, 入力系統には, 偏波保持ファイバーを用いた。出力系統では, すでに偏光状態の変化が偏光板によって光強度の変化に変換されているためファイバーが動いても問題が生じないことから, 通常のシングルモード光ファイバーを用いている。

図5にプローブ部の外観写真を示す。プローブヘッドには, 1辺3mmの立方体にカットされた  $\text{CdTe}$  結晶が取り付けられている。結晶の(110)面に誘電体ミラーが蒸着されており, 電波ならびにレーザー光はこの面に垂直に入

射される。

レーザー光源としては、被測定電波の発生源（シンセサイザーと周波数通倍器の組み合わせ）との同期が容易な、能動モード同期ファイバーレーザー（波長  $1.55 \mu\text{m}$ 、パルス幅  $0.8 \text{ ps}$ 、繰り返し周波数  $1 \text{ GHz}$ ）を用いた。被測定信号周波数  $f$  を  $n \times 1(\text{GHz}) + \Delta f$  に設定することにより、サンプリング後の信号周波数は  $f$  から  $\Delta f$  に周波数変換されて検出される。通常  $\Delta f$  は kHz のオーダーであり、低速のフォトダイオードで電気信号に変換した後、スペクトラムアナライザーやロックインアンプでその振幅あるいは位相を測定する。

## 2.2 システム性能

システム帯域は、おもに、レーザー光のパルス幅、レーザー光源と被測定信号源間の位相ゆらぎ（ジッター）、CdTe 結晶中でのレーザー光と電波との速度不整合により決定される。本システムにおいては、パルス幅ならびにジッターにより決まる帯域が  $300 \text{ GHz}$ 、厚さ  $3 \text{ mm}$  の結晶を伝搬する光と電波の速度不整合により決まる帯域が  $150 \text{ GHz}$  と見積もられる<sup>28)</sup>。したがって、現状では結晶の厚みによって帯域が決められており、結晶を薄くすることで帯域を上げることが可能である。ただし、以下に述べるように感度とのトレードオフである。

最小検出可能電界  $E_{\min}$  は、(100) カットの CdTe を用いた場合、 $(\lambda/\pi n^3 r L) \times (q/I)^{1/2} (\text{V/m}\sqrt{\text{Hz}})$  で与えられる。 $\lambda$  はレーザー光の波長、 $q$  は素電荷、 $L$  は結晶厚、 $I$  は信号検出部のフォトダイオードに流れる平均電流である。ここで単位が  $\sqrt{\text{Hz}}$  となるのは、測定が観測時間に依存することを意味し、検出系の帯域により決まる。 $L=3 \text{ mm}$ 、 $I=100 \mu\text{m}$  とすると、 $1 \text{ Hz}$  の帯域（測定時間がおよそ  $1 \text{ 秒}$  に相当）に対して、 $E_{\min}=1 \text{ V/m}$  となる。実験においても  $1 \text{ V/m}$  程度の感度が確認されており、実用上十分な値である。

図6は、本プローブにより測定したホーンアンテナから放射された  $60 \text{ GHz}$  ミリ波の近傍界と遠方界である。測定値は有限要素法による電磁界シミュレーションとよい一致を示しており、測定の擾乱がほとんどないことを示唆している。遠方界における両者の差は、EOプローブの空間分解能に起因するものと考えられる。空間分解能はおもにEO結晶中のレーザー光のビーム幅（約  $1 \text{ mm}$ ）で決まっており、結晶のサイズを小さくしビーム径を絞ることで  $0.1 \text{ mm}$  のオーダーまで改善できると思われる。このように擾乱の少ない電波プローブを用いれば、従来広大な電波暗室で行っていたミリ波帯アンテナの評価を、数十  $\text{cm}$  程度の小さな暗室で行えることになるであろう。

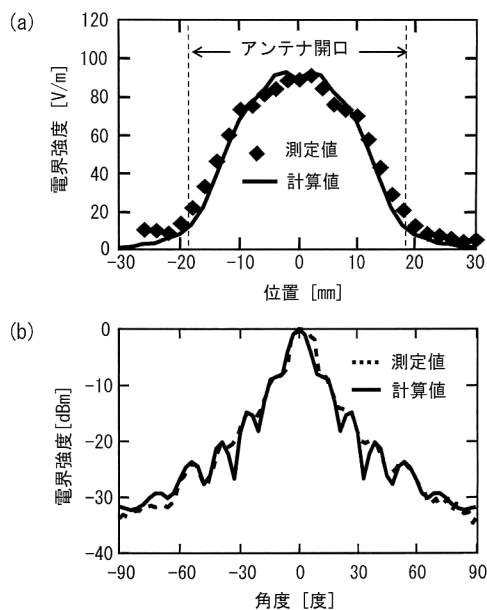


図6 アンテナの近傍界、遠方界の計測。

## 3. ミリ波イメージングへの応用

これまで述べてきたように、光技術の導入によって、これまで困難であった非常に高い周波数の電波（電磁波）の計測ができるようになってきた。ひとつの興味ある応用として考えられているのが、それを用いて物体を「見る」技術、すなわちイメージングへの適用である。図7は、これまで人類が開発してきた種々のイメージング技術を電磁波の波長を軸にまとめたものである。19世紀までは可視光が物体を見る唯一の電磁波であったが、20世紀になって、X線をはじめさまざまな波長の電磁波で物体を見ることができるようになった。現在、イメージング技術として未開拓なのは、電磁波の発生・検出技術が遅れていた、ミリ波・サブミリ波帯の電波領域である。この領域の電磁波は、可視光と比べて、プラスチック、壁、紙、衣服、煙、霧などを透過しやすいという特長を有する。加えて、マイクロ波レーダーと比較して、波長がミリ～サブミリメートルと短いため空間分解能が上がり、われわれのより身近な生活空間の物体を対象にできる可能性がある<sup>29)</sup>。

イメージング技術は、図8に示すように、物体そのものから発生する電磁波を検出し画像化する、受動型（パッシブ）イメージングと、ある既知の帯域の電磁波を物体に照射し、その透過波あるいは反射波を検出して画像化する、能動型（アクティブ）イメージングに分類できる。

人間をはじめ温度の高い物体は、黒体放射としてミリ～サブミリ波帯の電磁波エネルギーを放出している。ミリ波アンテナとショットキーダイオードをアレイ状に配置し

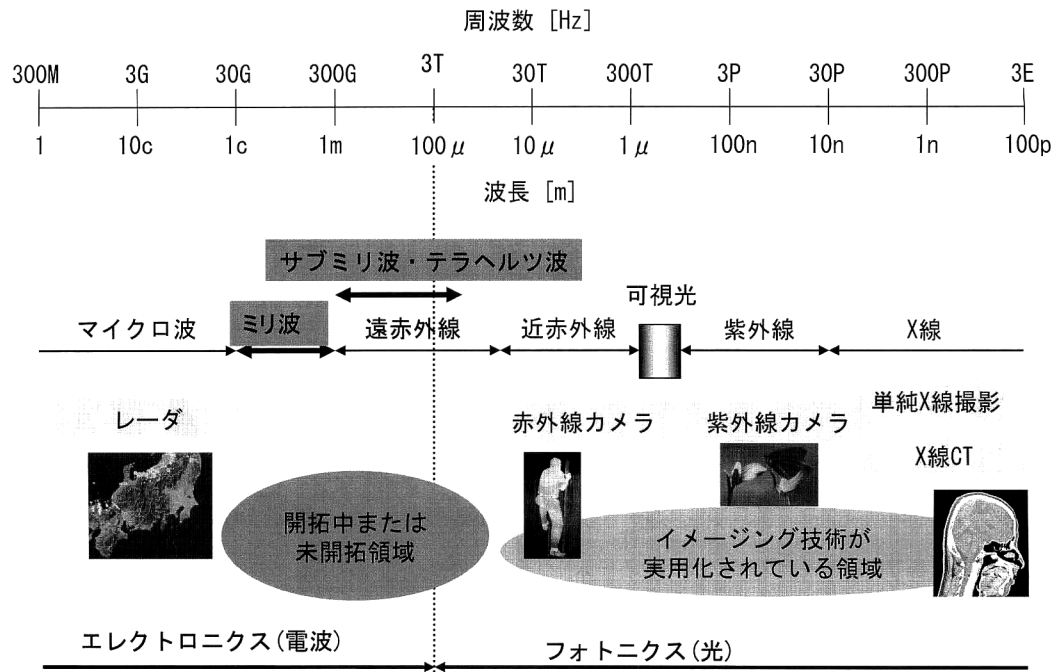


図7 電磁波スペクトラムと各種イメージング技術。

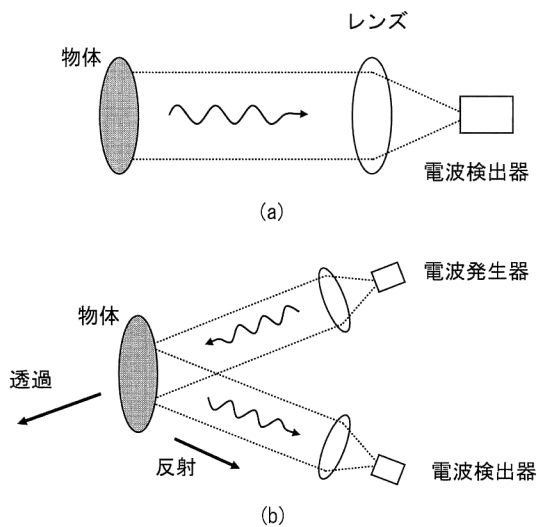


図8 イメージングの分類。(a) 受動型イメージング, (b) 能動型イメージング。

た検出器により、例えば、壁の裏にいる人間や、衣服に隠された金属の受動型イメージングが可能なが報告されている<sup>30)</sup>。一方、能動型イメージングにおいては、特定の電波を照明のように当てることで、物体の分光学的な特長を引き出し、物体の特定を行うことが可能になる。最近では、テラヘルツの周波数の連続波やパルス波を使って、皮膚がんの検出や薬物検査などに応用する試みが報告されている<sup>31)</sup>。また、パルス波を用いたイメージングでは、パルスレーダーと同様に複数の反射波の時間的な位置を解析す

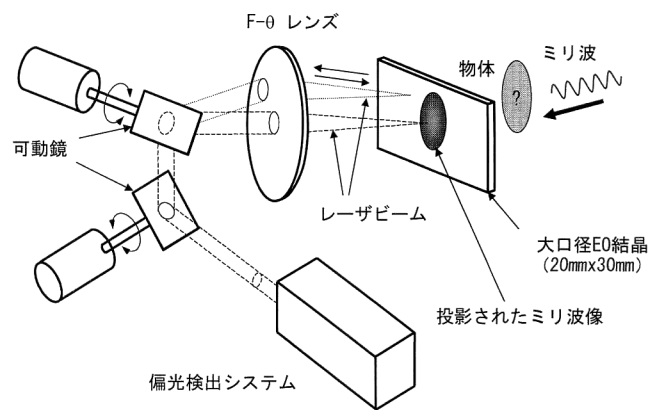


図9 スキャナー型イメージングシステムの構成。

ることで、物体内部の複雑な三次元構造を画像化することが可能である<sup>32)</sup>。

筆者らが行った能動型イメージングシステムの一例を図9に紹介する<sup>28,33,34)</sup>。物体を画像化するには、検出器をアレイ状に並べてそこに像を結像させるか、あるいは、電波を細く絞って物体に照射し、物体あるいは検出系を機械的にスキャンする方法の2通りが考えられる。後者は、機械ステージの移動速度の性能限界により、画像の取得に相当の時間(数分~数十分程度)を要する。また、物体を動かすのは実用的ではない。そこで、図9に示すように物体全面に電波を照射し、物体を透過した電波を大きな面積のEO材料上に結像させ、光ビームを二次元スキャンすることで画像を取得することとした。光ビームのスキャナーは

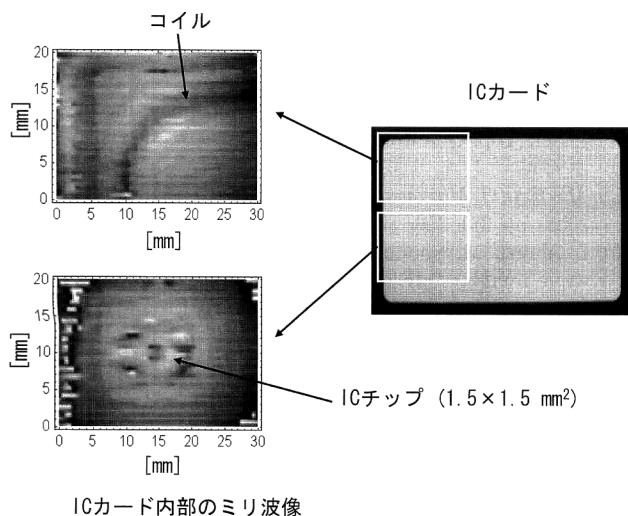


図10 180 GHz ミリ波による IC カードイメージング。

一般的に高速であるため、上述の機械ステージを用いる場合よりも1桁以上短い時間で画像の取得が可能となる<sup>34)</sup>。

図10は、本システムを用いてICカードの内部を透視した結果である。照射した電波の周波数は180 GHz (波長約1.7 mm)である。カード内部のICやコイルが明確に判別できている。実験で使用したミリ波信号源は、周波数通倍器を使ったものであり、周波数の可変域も1 GHz程度と狭い。ミリ波の発生において、光技術を用いれば、より高い周波数の電波をより広い帯域で発生できる。したがって、光技術による発生と検出の双方を組み合わせたいメージングが、能動型イメージングにおいて光技術の真価を発揮していくと考えられる。

光技術を使って高周波電波あるいは電気信号を測るための技術について、EO計測技術を中心に紹介した。低擾乱性と広帯域性が光技術の大きな特長であり、今後もこの特長を生かしながら、さまざまな電波環境における測定ニーズに合うようにセンサー構造やシステム構成における改良が進むものと思われる。高感度EO材料における技術革新も望まれる。

また、光技術の利用によって開拓が進んできたミリ波・テラヘルツ波帯の電波の応用のひとつとして、イメージング技術を紹介した。人類は可視光以外にもさまざまな電磁波を使って物質、物体の画像化を行いその情報を役立ててきた。特に、ミリ波・テラヘルツ波帯の電磁波は、各種分子や気体などとの相互作用が強いことから、環境計測や医療計測の分野でも注目されており、今後の発展が大いに期待される。

## 文 献

- 1) 大森俊一, 樺島一郎, 中根 央: 高周波・マイクロ波測定 (コロナ社, 1992).
- 2) T. Nagatsuma, M. Shinagawa, N. Sahri, A. Sasaki, Y. Royter and A. Hirata: "1.55- $\mu\text{m}$  photonic systems for microwave and millimeter-wave measurement," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **49** (2001) 1831-1839.
- 3) 永妻忠夫: "光・マイクロ波デバイスのEOS計測", *オプトロニクス*, **16** (1997) 133-138.
- 4) 永妻忠夫: "光を用いたマイクロ波計測", *エレクトロニクス*, **45** (2000) 48-51.
- 5) 永妻忠夫: "マイクロ波フォトニック計測技術の最近の進展", *電子情報通信学会誌*, **83** (2000) 600-603.
- 6) D. H. Auston: "Picosecond optoelectronic switching and gating in silicon," *Appl. Phys. Lett.*, **26** (1975) 101-103.
- 7) J. A. Valdmanis, G. Mourou and C. W. Gabel: "Subpicosecond electro-optic sampling," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-19** (1983) 664-667.
- 8) T. Nagatsuma: "Measurement of high-speed devices and integrated circuits using electro-optic sampling techniques," *IEICE Trans. Electron.*, **E76-C** (1993) 55-63.
- 9) H. Takahashi, S. Aoshima and Y. Tsuchiya: "Sampling and real-time methods in electro-optic probing system," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **44** (1995) 965-971.
- 10) S. Wakana, T. Ohara, M. Abe, E. Yamazaki, M. Kishi and M. Tsuchiya: "Fiber-edge electrooptic/magneto-optic probe for spectral-domain analysis of electromagnetic field," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **48** (2000) 2611-2616.
- 11) M. Shinagawa, T. Nagatsuma, K. Ohno and Y. Jin: "A real-time electro-optic handy probe using a CW laser," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **50** (2001) 1076-1080.
- 12) R. K. Lai, J. R. Hwang, J. Nees, T. B. Norris and J. F. Whitaker: "A fiber-mounted, micromachined photoconductive probe with  $15 \text{ nV/Hz}^{1/2}$  sensitivity," *Appl. Phys. Lett.*, **69** (1996) 1843-1845.
- 13) G. David, T. Y. Yun, M. H. Crites, J. F. Whitaker, T. R. Weatherford, K. Jobe, S. Meyer, M. J. Bustamante, B. Goyette, S. T. Thomas, III and K. R. Elliott: "Absolute potential measurements inside microwave digital IC's using a micromachined photoconductive sampling probe," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **46** (1998) 2330-2337.
- 14) 竹内恒一郎, 水原 晃: "原子間力顕微鏡を応用したピコ秒パルス測定", *応用物理*, **67** (1998) 568-569.
- 15) W. H. Knox, J. E. Henry, K. W. Goossen, K. D. Li, B. Tell, D. A. B. Miller, D. S. Chemla, A. C. Gossard, J. English and S. Schmitt-Rink: "Femtosecond excitonic optoelectronics," *IEEE J. Quantum Electron.*, **25** (1989) 2586-2595.
- 16) A. Stöhr, R. Heinzekmann, T. Alder, D. Kalinowski, M. Gross and D. Jäger: "Integrated optical E-field sensors using TW EA-modulators," *Tech. Dig. Int. Topical Workshop on Contemporary Photonic Technologies* (1998) pp. 227-228.
- 17) D. Kalinowski, S. Redlich and D. Jäger: "Novel micromachined fiber-optic E-field sensor," *Tech. Dig. IEEE LEOS Annual Meeting*, TuFF4 (1999) p. 385.
- 18) J. A. Riordan and X.-C. Zhang: "Sampling of free-space magnetic pulses," *Opt. Quantum Electron.*, **32** (2000) 489-502.
- 19) E. Yamazaki, S. Wakana, H. Park, M. Kishi and M. Tsuchiya: "High-frequency magneto-optic probe based on BiRIG rotation magnetization," *IEICE Trans. Electron.*, **E86-C** (2003) 1338-1344.

- 20) A. Y. Elezzabi and M. R. Freeman: "Ultrafast magneto-optic sampling of picosecond current pulses," *Appl. Phys. Lett.*, **68** (1996) 3546-3548.
- 21) N. Sahri, T. Nagatsuma, M. Yaita and N. Shimizu: "Picosecond synchronous electro-optic sampling with a jitter-reduced gain-switched laser diode," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37** (1998) L39-L41.
- 22) M. J. Guy, S. V. Chernikov, D. G. Moodie and R. Kashyap: "200 fs soliton pulse generation at 10 GHz through non-linear compression of transform-limited pulses from an electroabsorption modulator," *Electron. Lett.*, **31** (1995) 740-741.
- 23) T. Morioka, S. Kawanishi, K. Mori and M. Saruwatari: "Transform-limited, femtosecond WDM pulse generation by spectral filtering of gigahertz supercontinuum," *Electron. Lett.*, **30** (1994) 1166-1167.
- 24) M. Yaita and T. Nagatsuma: "Optical sampling of electrical signals in poled polymeric media," *IEICE Trans. Electron.*, **E76-C** (1993) 222-228.
- 25) 永妻忠夫, 滝沢孝充, 横尾 篤, 戒能俊邦: "DAST による EOS", 電子情報通信学会エレクトロソサイエティ大会講演論文集, C-221 (1996) p. 221.
- 26) 廣瀬雅信, 石曾根孝之, 一條 淳, 鳥畑成典, 小見山耕司: "光電界センサのマイクロストリップアレイアンテナのパターン測定", 電子情報通信学会総合全国大会講演論文集, B-1-188 (2003) p. 188.
- 27) 都甲浩芳, 佐々木愛一郎, 枚田明彦, 永妻忠夫: "ミリ波アンテナの近傍・遠方界計測用 EOS システムの開発", 第1回 マイクロ波・ミリ波フォトニクス研究会資料, MWP03-3 (2003) pp. 15-20.
- 28) A. Sasaki and T. Nagatsuma: "Millimeter-wave imaging using an electrooptic detector as a harmonic mixer," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **6** (2000) 735-740.
- 29) 水野皓司: "ミリ波帯パッシブ・イメージング技術", *MWE2003 Microwave Workshop Digest* (Yokohama, Nov. 2003) pp. 351-356.
- 30) L. Yujiri, M. Shoucri and P. Moffa: "Passive millimeter-wave imaging," *IEEE Microwave Mag.*, **4** (2003) 39-50.
- 31) Y. Watanabe, K. Kawase, T. Ikari, H. Ito and Y. Ogawa: "Component spatial pattern analysis of chemicals using THz spectral fingerprints," *Tech. Dig. 11th International Conf. Terahertz Electronics, THz2003* (Sendai, Sept. 2003) p. 9.
- 32) X.-C. Zhang: "Recent progress of terahertz imaging technology," *Proc. Conf. on Optoelectronic and Microelectronic Materials and Devices* (Sydney, Dec. 2002) pp. 1-6.
- 33) A. Sasaki and T. Nagatsuma: "Reflection-type CW-millimeter-wave imaging with a high-sensitivity waveguide-mounted electro-optic sensor," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **41**, (2002) L83-L86.
- 34) A. Sasaki and T. Nagatsuma: "Electric-field scanning system using electro-optic sensor," *IEICE Trans. Electron.* **E86-C** (2003) 1345-1351.

(2004年1月10日受理)