

KARCFRONT

未来 ICT 研究所ジャーナル

Vol. **32**
2015
WINTER



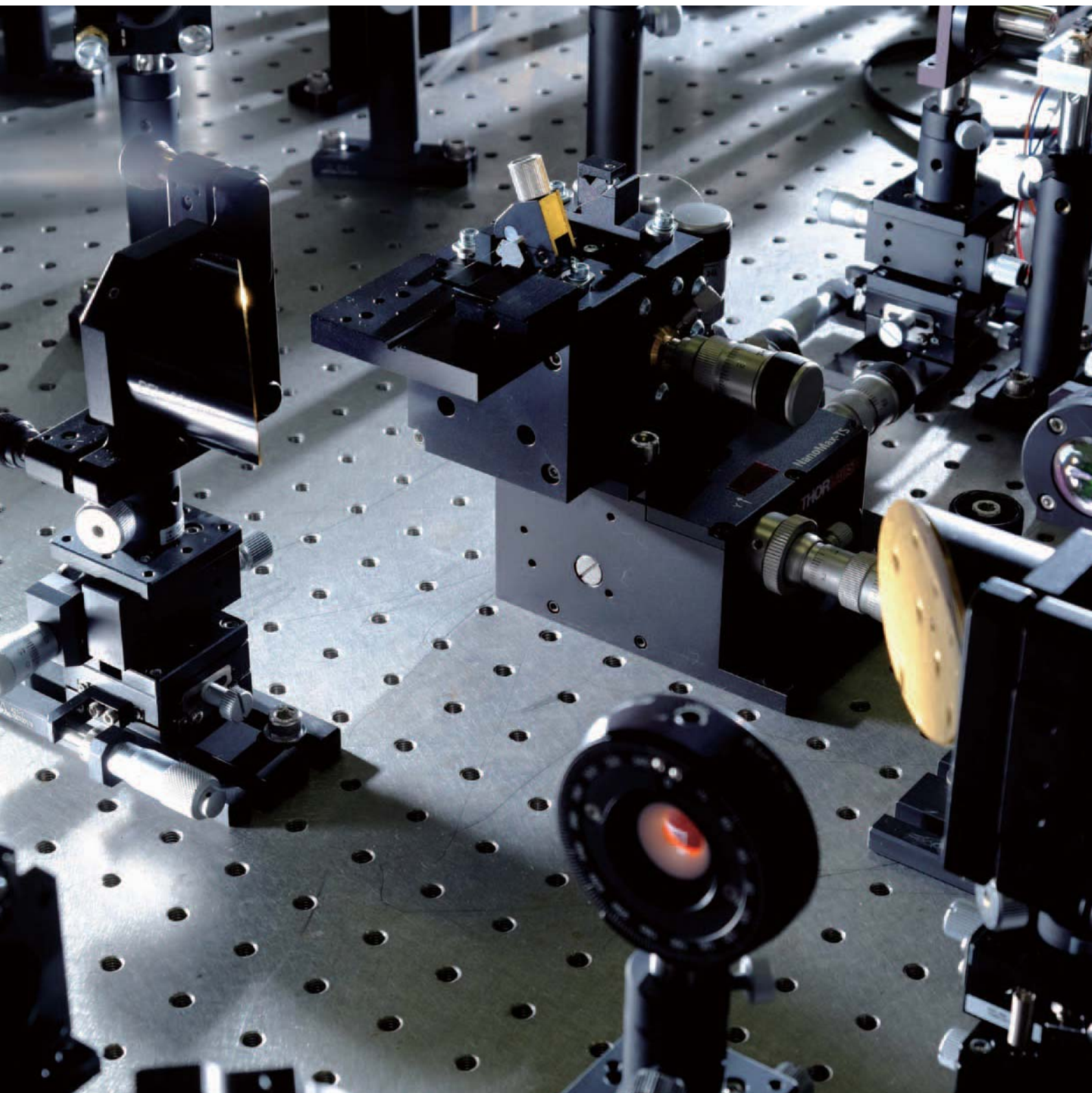
特集に寄せて

未来 ICT 研究所で芽吹いた成果

特集 実用化に向け芽吹いた期待の研究

細菌を利用した
化学物質センシング技術の開発

先端有機材料での「テラヘルツ波」発生



有機非線形光学材料が拓くセンシングと通信の未来

先端有機材料での「テラヘルツ波」発生

非接触でのセンシングや超高速の無線通信を可能にする「テラヘルツ波」の利用を加速することで、これまでにない安心・安全で快適な ICT 社会が実現します。私たちは、“有機非線形光学ポリマー”という先端有機フォトンクス材料とそれらを用いたデバイスの開発を進めることで、革新的な小型テラヘルツ光源などの実現を目指しています。



未来ICT社会でのテラヘルツ波利用

次世代の安心・安全なICT社会では、様々なセンサー端末から収集したデータを活用することで、社会活動を効率化したり、社会の危険をいち早く検知したりすることがますます重要になります。カメラ画像や位置情報といった従来型のセンシングデータに加えて、身の回りに存在する様々な「もの（物質や生体物質など）」に関するセンシングデータを利用できるようになれば、より快適で効率的な社会が実現するとともに、社会における危険の検知の精度が大きく向上するものと期待できます（図1）。

テラヘルツ波は、電波と目に見える光の中間に位置する周波数の電磁波（おおよそ $0.1 \times 10^{12} \sim 10 \times 10^{12}$ ヘルツ（0.1～10THz））で、電波のような物体を透過する性質に加えて、光波のように物体と相互作用をする性質をもっています。そのため、テラヘルツ波を用いることで、物体内

ナノICT研究室
主任研究員

梶 貴博

Takahiro Kaji

博士(工学)

略歴

2009年、大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了後、グローバルCOE特任助教を経て、NICTに入所。2015年5月より現職。

研究分野

有機光デバイス、テラヘルツ分光、レーザー光化学

近況

旅行、登山、自転車、写真、尺八演奏などを中心に趣味を拡大中です。

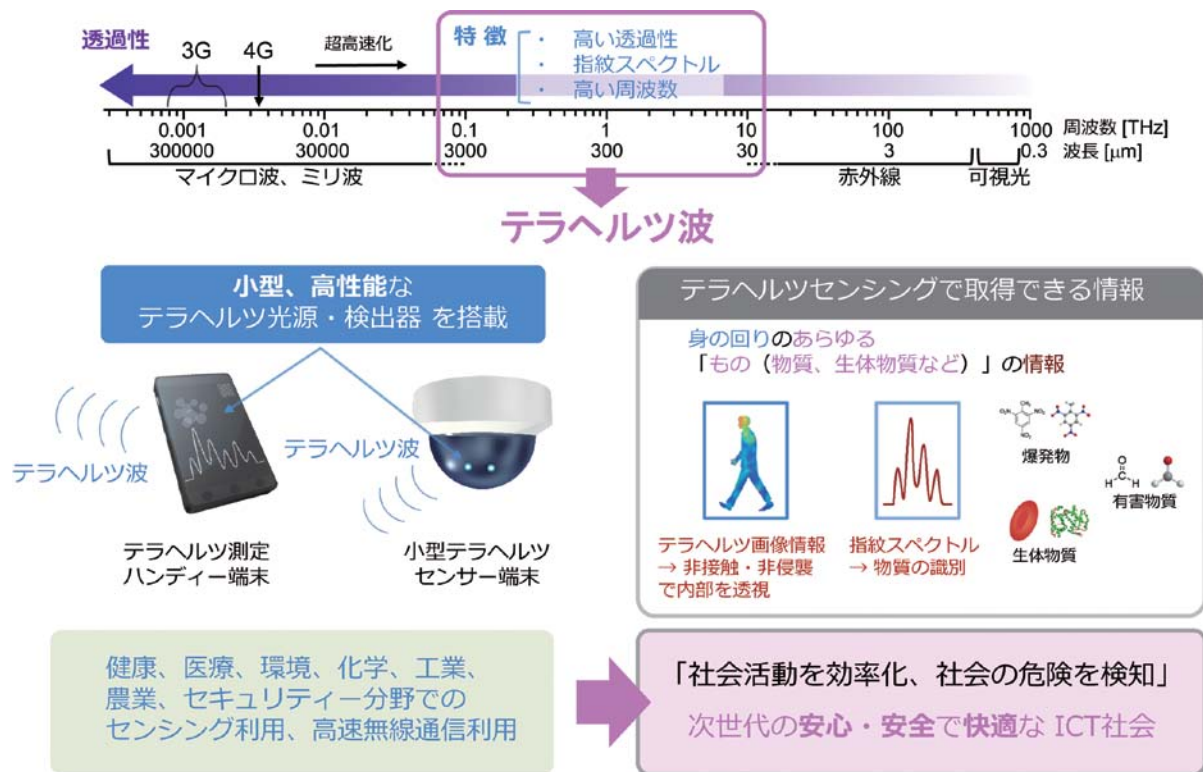


図1 未来 ICT 社会でのテラヘルツ波利用

部の非接触・非侵襲でのイメージングが可能になるとともに、物質（分子）固有の振動や回転に由来する「指紋スペクトル」から物体がどのような物質で出来ているかを識別することが可能になります。さらに、テラヘルツ波の特徴として、人体にとって安全な電磁波である点があげられます。

これらの性質から、テラヘルツ波は、セキュリティーや健康、医療、環境、化学、工業、農業分野などでのセンシング利用が期待されています。また、電波よりも高い周波数をもつテラヘルツ波は、超高速無線通信での利用が期待されています。

テラヘルツ波の利用が社会で広がるためには、従来は大型で手軽に持ち運ぶことができなかったテラヘルツ測定装置を大幅に小型化、高性能化することが鍵となります。テラヘルツ波は、多くの場合、レーザー光を波長変換することで発生させま

す。しかし、現在のところ、波長変換の効率がきわめて低いため、テラヘルツ測定装置には大きくて高出力なレーザー光源を搭載せざるを得ず、装置が大きくなっていました。テラヘルツ測定装置の小型化のためには、波長変換の効率を向上させることが重要なのです。また、現在の多くのテラヘルツ測定装置は、測定可能なテラヘルツ領域が低周波の領域(0.1~4THz程度)に限られています。しかし、これよりも高い周波数の領域には、物質(分子)に特徴的な多くの振動モードが存在します。そこで、テラヘルツ光源や検出器をより広帯域化することが、物質の識別の精度を高めることにつながります。

テラヘルツ波の発生と検出の方法

テラヘルツ波を発生させたり検出したりする代表的な方法としては、非線形光学材料を用いる方法や光伝

導アンテナを用いる方法があります。非線形光学材料を用いる方法は、特に、高周波(広帯域もしくは超広帯域)のテラヘルツ波の発生や検出、高強度のテラヘルツ波の発生において頻繁に用いられています。

非線形光学材料を用いたテラヘルツ波の発生では、2つ以上の波長成分を含む強いレーザー光を非線形光学材料に照射します。このとき、光差周波混合という2次の非線形光学効果により2波長のレーザー光のエネルギー(周波数)差に対応したテラヘルツ波が発生します。2波長の連続発振のレーザーを照射することで、単一周波数のテラヘルツ波が発生します。一方、パルスのレーザー光には様々な周波数の光が含まれるため、発生するテラヘルツ波にも様々な周波数が含まれることになり、広い周波数成分を含む広帯域テラヘルツ波を一度に発生させることができます。

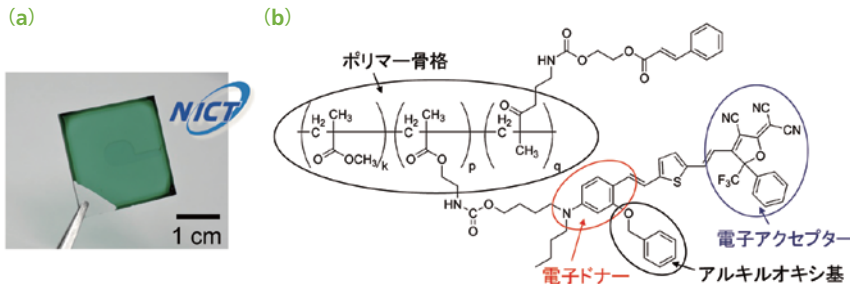


図2 (a) ITO基板上に塗布した非線形光学ポリマー、(b) 非線形光学ポリマーの化学構造の例

	テラヘルツ帯域	屈折率 n_o, n_{THz}	電気光学定数 r (pm/V)	THz発生 性能指数	微細加工
非線形光学 ポリマー	0.1 - 20 THz以上	~1.7, ~1.7	100以上	8900以上	◎
ニオブ酸リチウム (LiNbO ₃)	0.1 - 2 THz	2.2, 4.96	32	1500	
テルル化亜鉛 (ZnTe)	0.1 - 4 THz	2.83, 3.16	4	160	△
DAST (有機結晶)	0.3 - 16 THz	2.13, 2.26	47	5600	

図3 テラヘルツ波の発生や検出に用いられる非線形光学材料の比較

テラヘルツ波の検出に関しても、非線形光学材料の2次非線形光学効果を利用した電気光学サンプリングと呼ばれる方法などが利用されています。

別の原理に基づく単一周波数のテラヘルツ光源として、エレクトロニクスの技術に基づいたテラヘルツ量子カスケードレーザーの開発が進められています。テラヘルツ量子カスケードレーザーは、電流注入によってテラヘルツ波を直接発振できることに加えて、高出力という利点があります。現在、冷却器が不要な小型光源の実現に向けて研究が進められています。

非線形光学ポリマーを用いたテラヘルツ技術

私たちは、テラヘルツ波の発生や検出に用いる新しい非線形光学材料として、非線形光学ポリマーという先端有機フォトニクス材料の開発を進めています(図2)。

私たちは、これまで、高性能な非線形光学色素の開発を行ってきました。非線形光学色素は、電子ドナーと呼ばれる電子を押し出す性質をもつ部分と電子アクセプターと呼ばれる電子を引き付ける性質をもつ部分、それらをつなぐ π 共役系によって構成されます。私たちは、この電子ドナー部分にアルキルオキシ基という官能基を付与することで、非線形光学特性の指標となる超分極率と呼ばれる値がこれまでの非線形光学色素に比べて1.3から1.4倍程度大きくなることを見出しました。

このような非線形光学色素とポリマー(有機分子の重合体)からなる非線形光学ポリマーは、テラヘルツ波の発生や検出のために従来用いられているニオブ酸リチウム(LiNbO₃)やテルル化亜鉛(ZnTe)などの無機の非線形光学結晶やDASTなどの有機の非線形光学結晶と比較して、大きな電気光学係数(>100pm/V)をもち、材料の屈折

率の効果を考慮したテラヘルツ波の発生に関する性能指数についても、従来の材料の値を大きく上回ります(図3)。また、ニオブ酸リチウムやテルル化亜鉛などの無機結晶材料では、結晶格子の振動による影響で、発生したテラヘルツ波が高周波領域で吸収されて失われてしまうことが発生するテラヘルツ波の帯域を狭める要因となっています。一方、非線形光学ポリマーは、テラヘルツ領域の広範囲にわたって吸収係数が比較的小さいことから、超広帯域(0.1~20THz)でのテラヘルツ波の発生や検出が可能になります。

そして、高効率なテラヘルツ波の発生のためには、入射するレーザー光と発生するテラヘルツ波の速度が一致していることが重要になります。これを位相整合といいます。ニオブ酸リチウムなどの無機結晶では、光領域での屈折率とテラヘルツ領域での屈折率が大きく異なるため、位相整合の達成には、周期構造を導入したり、結晶への光入射の角度やレーザーパルスの波面の角度を調整したりするなどの工夫が必要でした。一方、非線形光学ポリマーは、光領域での屈折率とテラヘルツ領域での広範囲にわたる屈折率がほとんど同じであるため、位相整合を容易に達成することができます。

さらに、無機・有機の非線形光学結晶材料は、微細加工が難しいことから、光の閉じ込めによりテラヘルツ波の発生効率を高めることができる導波路デバイスなどの作製が容易ではありませんでした。非線形光学

ポリマーは、微細加工プロセスによる導波路デバイスの作製が容易であるため、テラヘルツ波の発生効率を飛躍的に高めたデバイスを実現できます。

1.5μm帯レーザーを用いたテラヘルツ波の発生

小型のテラヘルツ光源の実現には、波長変換デバイスに加えて、もともとなるレーザー光源が小型であることが重要です。私たちは、小型半導体レーザーや小型ファイバーレーザー（エルビウムドープファイバーレーザー）で発振が可能であり、様々な光通信技術が利用可能な波長である1.5μm帯のレーザー光を用いたテラヘルツ波発生デバイスの開発を進めています。

私たちは、電圧を印加することで非線形光学色素の向き（配向）をそろえた非線形光学ポリマー膜を作製し、波長が800nmでパルス幅が100fs（フェムト秒、 10^{-15} 秒）のフェムト秒チタンサファイアレーザーを照射することで、テラヘルツ波が発生することを確認しました（図4）。さらに、フェムト秒チタンサファイアレーザーからのレーザー光を光パラメトリック増幅により波長変換することで発生させた波長1.5μmのレーザー光を照射することで、テラヘルツ波を発生させることに成功しました。使用した非線形光学ポリマーは、波長1.5μm付近では、非線形光学色素による吸収がほとんどないことから、光吸収によるレーザー光の損失なしに材料の厚

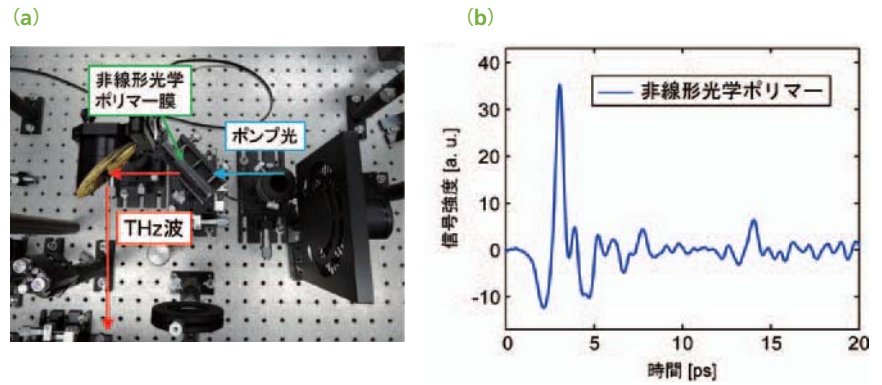


図4 (a) テラヘルツ波発生の評価装置、(b) 非線形光学ポリマーから発生したテラヘルツ波の時間波形

みに比例したテラヘルツ電場強度が得られることが分かりました。

より小型で低出力のレーザー光源を用いたテラヘルツ波の発生を実証するため、パルス幅100fsの1.5μm帯小型エルビウムドープファイバーレーザーを用いた実験を進めました。その結果、1.5μm帯レーザーを用いた弱ポンプ光強度条件下での非線形光学ポリマーからのテラヘルツ波の発生に成功しています。

テラヘルツ波の発生効率をさらに高めるために、微細導波路構造を用いたテラヘルツ波発生デバイスの開発を進めています。さらに広帯域でのテラヘルツ波の発生に向けて、よりパルス幅の短い1.5μm帯超短パルスファイバーレーザーを用いた実験を進めています。

今後の研究展開

高性能なテラヘルツ装置の実現に向けて、デバイスの開発だけではなく、非線形光学ポリマー材料の開発が重要になります。現在、非線形光学ポリマーのポリマー骨格として、ポリメタクリル酸メチルを用いています。しかし、ポリメタクリル酸メチルのメチル基などの振動や回転に由来する吸収ピークがテラヘルツ領

域に存在することが、これまでの研究で明らかになっています。発生したテラヘルツ波の吸収ロスをさらに減少させるため、テラヘルツ領域に吸収をもたないポリマー材料を用いた非線形光学ポリマーの開発を進めています。

また、テラヘルツ波の発生効率をさらに高めた新規デバイスの開発が重要です。私たちのグループでは、超高速光変調器の実現に向けて有機・シリコンハイブリッドデバイスの開発を進めていますが、この技術を応用することで、さらに高効率なテラヘルツ波発生デバイスを実現することができます。また、テラヘルツ波の検出器に関しても、非線形光学ポリマーを用いたデバイスにより、検出感度の大幅な向上が実現できます。

このように、私たちは、材料とデバイスの両面から研究開発を進めることで、これまでになかった小型で高性能なテラヘルツデバイスの実現を目指しています。これにより、テラヘルツ波のセンシング利用と無線通信利用の社会普及が大きく進展し、これまでになかった安心・安全で快適なICT社会が実現するものと期待しています。