Development of Gas Sensing Technique Using Narrow-Linewidth Terahertz-Wave Source

Yuji Takashima Non-member (Nagoya University)

Koji Suizu Non-member (Nagoya University)

Takayuki Shibuya Non-member (RIKEN)

Chiko Otani Member (RIKEN)

Kodo Kawase Member (RIKEN)

Keywords : terahertz wave, gas spectroscopy, remote sensing

The terahertz-wave (THz-wave) electromagnetic region is attractive because it has the potential for adoption to remote harmful-gas sensing applications in disaster environments. Infrared and visible waves, for example, cannot be adopted in this situation because aerosols prevent propagation of the waves to the target. In this study, we developed a tunable narrow-linewidth THz-wave source for this purpose. The THz-wave source must have a linewidth under 1 GHz because the linewidth of CO gas, one of the harmful gases present at fire disasters, is about 4 GHz. One of the candidate systems that satisfies this requirement is an injection-seeded THz-wave parametric generator (is-TPG). An is-TPG has a very narrow linewidth, about 100 MHz, and high peak power; thus, it would be a superior gas-sensing system. An air window exists in the 0.5- to 1.0-THz region that permits about 50 m of long-range propagation. The system should have enough power and tunability in the wave region under 1 THz.

A schematic of the is-TPG system is shown in Figure 1. We have used the is-TPG mainly in the 1-3 THz region. The conventional is-TPG system has a slightly lower output power in the wave region under 1 THz. We optimized the is-TPG system for low frequency generation through accurate alignment of the seeder beam path, successfully suppressing the reduction of output power in the low-frequency region, as shown in Figure 2.

An important consideration of remote gas sensing at fire disasters is the detection of THz waves that contain gas absorption information and are reflected by building materials. Thus, we

Fig. 1. Experimental setup for is-TPG

Fig. 2. THz-wave spectrum in the low frequency region

demonstrated absorption spectroscopy of N_2O gas using THz waves reflected off building material. We used harmless N_2O gas as the target, instead of dangerous CO gas, because N_2O gas has an absorption line spectrum similar to that of CO gas. The generated THz-wave propagated through a gas cell filled with N_2O gas, reflected off a metal siding panel, re-propagated through the gas cell, and was detected by the Si-bolometer. As shown in Figure 3, absorption lines of N_2O gas at 1.004 and 1.030 THz were successfully detected. The observed linewidth and absorption frequencies agreed well with calculated values from the HITRAN simulator. We successfully demonstrated remote gas

Fig. 3. Absorption spectrum of N_2O gas generated by reflection off building material sensing in the model case of a fire disaster.

狭線幅テラヘルツ波光源によるガスセンシング技術の開発

非会員 高島 祐二*

非会員 水津 光司*

非会員 澁谷 孝幸*,**

正員 大谷 知行**

正員 川瀬 晃道*,**

Development of Gas Sensing Technique Using Narrow-Linewidth Terahertz-Wave Source.

Yuji Takashima*, Non-member, Koji Suizu*, Non-member, Takayuki Shibuya*,**, Non-member, Chiko Otani**, Member, Kodo Kawase*,**, Member

A gas sensing technique on a fire site was developed. An output of is-TPG in a necessary low frequency for gas sensing controlled was obtained by optimizing the seeder so far. A reflection spectrum of an architectural material that used N₂O gas that was the model gas of CO gas generated at a fire was successfully obtained, and a realizability of remote spectrum sensing in the THz range was showed experimentally. An attenuation rate of the THz-wave when the long distance was propagated under the atmospheric pressure was measured experimentally, and an error margin with the calculation was within 10 %. A calculation result was able to endure practical use in the THz range to which the accuracy of the calculation was doubted.

キーワード：テラヘルツ波，ガス分光，リモートセンシング

Keywords : terahertz wave, gas spectroscopy, remote sensing

1. まえがき

これまでテラヘルツ (THz) 波は発生，検出共に困難であったが，近年，レーザー光の波長変換を用いて比較的簡単に THz 波発生が実現できるようになってきた。最も一般的な方法は，電気光学結晶や光伝導性アンテナ，半導体，超伝導体等をフェムト秒レーザーで励起して広帯域な THz 波パルスを発生・検出する THz 波時間領域分光法 (THz-TDS) ^{(1)~(4)} である。この THz-TDS は，従来の熱型光源を用いた遠赤外フーリエ変換分光光度計 (FT-IR) に比べて，非常に感度が高く，物質の THz 波分光やイメージング等に応用され，成果を上げている。

一方で，物質の特定量子状態への励起，超高分解能の分光，超高速光エレクトロニクス等への応用には，スペクトル線幅の狭い周波数可変 THz 波光源が必要である。現在，周波数 1 THz 程度以下の領域では，比較的小コンパクトで発振スペクトル幅の狭い周波数可変な光源である後進波管 (BWO) が利用できるが，寿命が数百時間程度と短く，BWO

の出力が急減する 1 THz 以上の高周波領域での光源開発は遅れている。

この領域における広帯域周波数可変 THz 波光源を以下に挙げる。

(i) 自由電子レーザー⁽⁵⁾は，相対論的電子ビームを周期磁場中で蛇行運動させてレーザー発振する方式で，原理的に任意の波長の THz 波の発生が可能である。しかし，大型装置であるため研究用途にほぼ限られると考えられる。

(ii) p-Ge レーザー⁽⁶⁾は，強磁場中で正孔の円運動を起こし反転分布を形成してレーザー発振する方式の広帯域波長可変 THz 波光源であり，テーブルトップ化も進められている。液体ヘリウムを要するため研究用途寄りの光源とも考えられる。

(iii) 非線形光学効果を用いた THz 波パラメトリック光源は，後述するとおり常温動作かつテーブルトップサイズの広帯域波長可変光源であり，研究及び産業用途が見込まれる。

(iv) 以上に挙げた (i)~(iii) の方式はパルス出力であるのに対して，2 台の半導体レーザー光を低温成長 GaAs 製のフォトミキサー上で光混合する方式⁽⁷⁾は，連続波出力かつテーブルトップサイズの広帯域波長可変光源であり，高出力化が進むと研究及び産業用途に魅力的である。

また，中赤外域で高出力を実現している量子カスケードレーザー⁽⁸⁾も，原理的に波長可変性に乏しく，3 THz 以下の

* 名古屋大学
〒464-8603 名古屋市千種区不老町
Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603

** 理化学研究所
〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉 519-1399
RIKEN,
519-1399 Aramaki-Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-0845

領域では、数例の報告例はあるものの、現在はレーザー発振が困難である。このため、可搬性にも通じるコンパクトで室温動作かつ簡便な THz 波光源が実現すれば、THz 波領域の研究が飛躍的に進展するのは間違いない。

THz 波の大きな特徴は、マイクロ波帯や準ミリ波帯 (1 GHz~30 GHz) 電波に比べ、一桁以上の高周波数 (短波長) であるため高空間分解能力を有すること、赤外線や可視光に比べると波長が長い伝搬において塵、煙、炎などによる散乱が少ないこと、THz 波帯に存在する物質固有の吸収スペクトルによって有毒ガス、危険物質を検知できることなどである。

そこで、この THz 波の特徴を、大規模地震などの災害発生時におけるセンシングに活用すれば、従来技術 (X 線、赤外線、マイクロ波、ミリ波) では困難であった新しい情報収集が可能となり、さらに得られた情報の迅速な流通と利用によって、被災者救援や二次災害防止などに役立て、災害被害を最小限に抑えることに貢献できると考えられる。

本論文では非線形光学効果⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾を用いたパラメトリック波長変換による THz 波光源、中でも、光注入型 THz 波パラメトリック発生器 (injection-seeded Terahertz-wave Parametric Generator: is-TPG) の構築を行う。本光源は、非線形光学結晶と励起光源だけで THz 波を発生させるため、小型簡便かつ室温動作可能であり、LiNbO₃ 結晶のパラメトリック利得の広帯域性から、周波数領域も 1 THz 以下から 3 THz 以上と広い。さらに、発振スペクトル線幅も約 100 MHz 程度まで狭線化が可能であり⁽¹¹⁾、高分解能の分光に有効である。特に、遠隔ガスセンシングで必要となる 1 THz 以下の低周波発生を目的とし、従来光源の改良を行う。

さらに、開発した本光源を用い、大規模地震時などにおける被災建物において、煙霧や火災などが視界の障害となっているような状況下で、火災時に発生する一酸化炭素などの有毒ガスを、THz 波を用いた分光的手法により効果的に検出し物質材料データベースなどの THz 帯固有の情報を活用して処理することによって、災害時の救援や二次災害防止などに効果的に役立てることを可能にする、遠隔センシング技術の実現可能性を示す。

2. THz 帯ガスセンシングの検討

災害現場での有毒ガス同定のためには、そのガス固有の吸収線を含み、大気中水蒸気の吸収が弱く、かつ建材等の災害現場での混在物質の吸収線の存在しない周波数帯での検出が重要である。この目的に適した 0.5~1 THz 帯で、検討を行う。

ガスセンシングの実験を行うにあたり、初期検討として、実際の使用状況を想定した、CO の透過スペクトル等をシミュレーションする必要がある。シミュレーターには、HITRAN を使用し、大気と CO についての透過スペクトルを計算した。尚、この領域での吸収は、分子の回転モードに起因するものである。

Fig. 1. Absorption spectrum change according to density of CO.

Fig. 2. Absorption spectrum of N₂O.

Fig. 1 に 1 気圧、湿度 40 % の大気の透過スペクトルと CO の大気混入濃度による透過スペクトル変化を示す。空気層として、大気圧、23℃、25 m 往復して得た透過スペクトルに対し、CO 層として、大気圧の空气中に CO の濃度が 0.01~1 % になるように CO 分圧をコントロールし、23℃、5 m を往復して得たスペクトルを加算した。即ち、全光路長 60 m の大気に対し、10 m の限定された区間において当該濃度の CO が混在した状況を模擬的に再現したものである。尚、大気の吸収は、ほとんどが水蒸気による吸収である。0.63~0.73 THz 帯及び 0.8~0.9 THz 帯に大気の窓が存在することが分かった。大気中においてガス分光を行う際には、大気による減衰の影響が少ない大気窓の周波数領域を用いる必要がある。また、CO ガス吸収による透過率の変化は、0.1 % の濃度 (人が吸気すれば死亡に至る危険性) であれば、15 % 程度、0.01 % の濃度 (吸気により昏睡状態に陥る可能性) の場合に 1.5 % であることから、十分に検出可能であると言える。また、CO 濃度 0.15 % で致死量であれば、致死量程度もしくはそれ以下の濃度で検出が可能ということになる。

実際に CO ガスを用いて検出実験を行うのは、非常に危険であるため、比較的 안전한テストサンプルを用いる必要がある。この領域で顕著な吸収のあるガスを調べた結果、亜酸化窒素 (N₂O) ガスに吸収線が存在することが分かった (Fig. 2)。尚、本計算では光路長 50cm、各ガスの分圧を 0.5 気圧とした。吸収線幅も CO と同程度で連続した吸収線を持

つこと、化学的に安定であるために分解などによってガスセル内での濃度変化が無いことから、CO のモデルガスとして用いることとした。

また、非常に重要な項目として、センシングに用いる周波数帯の大気窓の実際の減衰率を実験的に求める必要がある。現行用いられている数値解析シミュレーターでは、水蒸気の圧力広がり係数に正確な値を使用していないため、実際に長距離伝播させた場合、減衰率の実験値と計算値とで結果が大きく異なる可能性が高い。仮に圧力広がり係数をかなり正確に求めたとしても、大気窓は複数の吸収線の合間にあるため、係数のわずかな差が大気窓の減衰率に大きく影響を及ぼしてしまう領域であり、このような方法での大気窓減衰率の見積もりには原理的に限界があると言える。一番正確で確実な方法は、実際にテラヘルツ波の長距離伝播を行い、真空状態と大気状態との差を実験的に確認することである。

3. THz 波パラメトリック発生 の原理^{(9)(12),(13)}

Q スイッチ動作パルスレーザーから発生したレーザー光のような強電場を持つ電磁波が横光学フォノンモードをもつ非線形光学結晶を通過すると、光子と格子振動が結合してポラリトンと呼ばれる素励起状態を形成する。THz 波はポラリトンを介した誘導ポラリトン散乱によって発生する。このようにして、ポンプ光、アイドラー光、ポラリトン (THz 波) の間に強い相互作用が発生する。Fig. 3 のように、ポラリトンは共鳴周波数付近では格子様に振舞うが、共鳴周波数から十分離れた低周波数領域では光子様に振舞う。誘導ポラリトン散乱過程では、ポンプ光 (ω_p) とアイドラー光 (ω_i)、THz 波 (ω_s) の間に、エネルギー保存則

$$\omega_p = \omega_i + \omega_s \dots\dots\dots (1)$$

と運動量保存則 (ノンコリニア位相整合条件)

$$\mathbf{k}_p = \mathbf{k}_i + \mathbf{k}_s \dots\dots\dots (2)$$

が成立し、屈折率の波長分散特性のためにポンプ光の光軸からの散乱角に応じてアイドラー光および THz 波の波長が定まる。連続した広帯域波長可変性は、シード光の波長と入射角を変化させることで得られる。TPG の帯域幅は、結晶のパラメトリックゲインと THz 帯における吸収係数によって決まる。

4. is-TPG の特性

位相整合角は結晶に入射するシード光の波長により異なるため、シード光の波長を変化させると同時に、シード光が結晶へ適切な角度で入射するように毎回調整する必要がある。そこで、Fig. 4 に示すアクロマティック光学系により、ミラーを再調整することなしに、シード光を常に適切な位相整合角で結晶に入射させることができる⁽¹⁴⁾。Fig. 5 に本研究で構築した is-TPG の実験系を示す。アクロマティック光学系では 2 枚のレンズを用いるが、本研究では光源をコン

Fig. 3. Dispersion relation of the polariton.

Fig. 4. Schematic of an achromatically is-TPG.

Fig. 5. Experimental setup for is-TPG.

パクトにするために、レンズの代わりに 2 枚の凹面鏡を用いた。非線形光学結晶には THz 波の変換効率の良い 5 mol% MgO:LiNbO₃ を使用し、2 個を縦列に配置している。これは、結晶を縦に 1~3 個並べた場合を比較して、2 個のときに最大の THz 波出力が得られたためである⁽¹¹⁾。また、使用した結晶は 65×4×5 mm (x×y×z-軸) のサイズに切り出し、両端面を平行研磨し 1064 nm 付近での無反射 (AR) コーティングが施されている。また、発生した THz 波は LiNbO₃ 結晶の屈折率 ($n \sim 6$) の大きさ故に、界面で全反射を起こし、外部への取り出しが困難となる。そのため、結晶に Si プリズムアレイ ($n \sim 3$) を取り付け、THz 波の外部への取り出し効率を向上させている⁽¹¹⁾。

ポンプ光には波長 1064 nm、繰返し周波数 10 Hz、パルス幅 10.5 ns、最大出力 35 mJ/pulse、シングルモード Q スイ

ツチ動作 Nd:YAG レーザーを用いた。また、本実験で使用した結晶は、THz 帯における吸収係数が $10 \sim 100 \text{ cm}^{-1}$ 程度と大きい。発生した THz 波の結晶内部での吸収損失を最小に抑えるためには、ポンプ光を後段の結晶の y 面近傍に通過させる必要がある。そのため、後段の結晶を約 1 mm 程度ずらし、さらにポンプ光のビーム径をテレスコープにより 0.76 mm 程度に絞り、後段の結晶のできる限り y 面近傍を通過させるようにポンプ光を結晶にほぼ垂直に入射した。

シード光は、外部共振器型波長可変半導体レーザー (ECLD) を Yb ファイバ増幅器で増幅して用いた。いずれも連続波 (CW) かつシングルモードである。波長可変半導体レーザーから出力された光は、ファイバを通過してファイバ増幅器に入る。光は増幅された後、戻り光を防ぐためエアパスアイソレーターを通り、フリースペースへ出力される。その後、テレスコープによりビーム径を 1.1 mm 程度に広げている。また、シード光は波長を変えても前段の結晶の端面でポンプ光と交わるように、常に前段の結晶端面の同じ位置を通過するように調整した。結晶入射直前でのシード光パワーは 400 mW であり、波長可変範囲は $1 \sim 3 \text{ THz}$ の範囲を十分にカバーするものである。尚、ポンプ光、シード光ともに、波長板を使い偏光方向が結晶の z 軸方向に平行になるようにして、結晶に入射している。

THz 波の出力は、焦電検出器 (DTGS 検出器) 及び、Si ボロメーターで測定した。また、THz 波エネルギー [J/pulse] と Si ボロメーター及び DTGS 出力 [V] の関係は換算式が存在するが、正確であるとは言えないため、本論文では THz 波出力を DTGS 出力 [V] として表示する事とする。参考までに、Si ボロメーターの換算式として、現状もっとも真値に近いと思われるものは $10 \text{ V} \sim 110 \text{ pJ}$ であり、DTGS 検出器の感度は Si ボロメーターのそれに比べて $1/20 \sim 1/100$ 程度であり、個体差が大きい点に留意が必要である。また、is-TPG から出射した THz 波は縦方向に 4° 程度で広がっているため、シリンドリカルレンズで平行にしたのち、凸レンズで集光して検出器で検出した。

ポンプ光パワー密度 370 MW/cm^2 、シード光パワー 400 mW における、発生した THz 波のスペクトルを Fig. 6 に示す。シード光は、最も出力の見込める 1.5 THz 付近で位相整合角が合うように調整した。横軸はポンプ光とシード光の波長差から算出した物であるが、メタルメッシュによるスキニングファブリペローエタロンによる波長の実測値と良い一致を示していた。尚、図中の 1.70 THz 及び 1.75 THz 付近の吸収は水蒸気による吸収である。 1.5 THz 付近において、THz 波出力が DTGS の検出上限に達していることが分かる。 1 THz 以下の低周波域において THz 波の出力が弱くなった原因としては、所望の波長帯においてシード光が正確な位相整合角で結晶に入射していないことが考えられる。低周波側では、位相整合角がかなり小さくなるため、シード光の入射角も小さくする必要がある。また、Fig. 6 に示すスペクトルでは、シード光波長 1070 nm で凹面鏡の中心近くを反射させているため、短波長のシード光は一部分

Fig. 6. THz-wave spectrum of the is-TPG.

Fig. 7. THz-wave spectrum at low frequency.

が反射せず、パワーがロスしていると考えられる。しかし、この凹面鏡は、短波長のシード光が中心で反射する位置に置くと、ポンプ光の光路を遮ってしまうため、ポンプ光に触れない範囲で、できるだけシード光の大部分を反射できる位置に調整する必要がある。本研究で行うガスセンシングには、主に 1 THz 以下の低周波帯を用いる。そのため、低周波域において出力を向上させる必要がある。ここで、 1.5 THz 付近の高周波域では、位相整合角が多少正確に合っていないとしても、THz 波は発生する。しかし、 1 THz 以下の低周波域では、位相整合角が厳密に合っていないと THz 波は発生しない。Fig. 7 に低周波域での出力増強を目的としてシード光の調整を行った結果を示す。この結果から、低周波域での出力低下を従来よりも抑えることができた。また、 1 THz 付近以上で従来の光源に比べ、出力が低下したが、CO ガスセンシング用として高周波域は用いないため、今回は低周波域のみに注目した。また、大気窓等の測定には 1 THz 以上も用いるため、その際はその帯域に合わせて調整を行うこととする。さらに、シード光波長 1068 nm のときの波長測定結果を Fig. 8 に示す。この帯域においても、シード光の波長を変化させることで、発生する THz 波の波長が変化しており、波長可変性を有することが確認でき、実測値は理論値と良い一致を示している。

次に、減圧下の水蒸気を分光測定することで線幅の測定を試みた。 50 cm のガスセルを用い、 0.09 Torr に減圧した。

Fig. 8. THz wavelength measured with a scanning Fabry-Perot etalon at low frequency.

Fig. 9. Example of the absorption spectrum measurement of low pressure water vapor.

本測定では注入光波長を 0.2 pm の間隔でスキャンしている。これは THz 波の周波数に換算すると、約 60 MHz のステップとなる。Fig. 9 に吸収スペクトルを示す。1.446 THz 付近の吸収線に対し約 200 MHz の分解能が得られている。

5. is-TPG によるガスセンシング

〈5・1〉 建材反射分光 実際の火災現場においては、THz 波を火災場所に射出させ、反射 THz 波を検出して、ガスセンシングを行うことが想定される。そこで N₂O ガスを充填したガスセルを用い、一般的な建築物で用いられている金属系サイディングにより THz 波を反射させ、建材の反射特性とガスの吸収スペクトルが混在する状況下でガスの検知を行った。

実験系を Fig. 10 に示す。is-TPG から射出された THz 波はワイヤーグリッドを透過し、N₂O が封入されたガスセルに入射する。ガスセル終端から出た THz 波は、建材で反射して、もう一度ガスセルに入射する。その後ガスセルから射出された THz 波はワイヤーグリッドで反射され、THz 波用レンズを介し、シリコンボロメーターで受光した。本実験では、ガスセル長は 50 cm とし、is-TPG からガスセルまでの距離は約 10 cm である。N₂O ガスはガスセルを真空に引き、大気圧に到達するまで封入した。また、大気窓中の CO ガス検出のためには 0.8~0.9 THz の領域が望ましいが、Fig.

Fig. 10. Experimental setup for reflectance spectroscopy by the architectural material.

Fig. 11. Absorption spectrum of N₂O by reflection of the architectural material.

10 で示した当該実験系では THz 波がワイヤーグリッドを 2 度通過する事から検出信号強度が 1/4 に減衰するため、当該波長域で信号対雑音比 20 dB を確保する事が難しかった。そこで、信号対雑音比 20 dB を確保でき、かつ、N₂O ガスの分子回転運動に起因する吸収が存在する 1 THz 近傍での測定を行った。ただし、Fig. 2 に示したように N₂O ガスの吸収度は高周波側で減衰し、0.8 THz 近傍に比べて 1 THz 近傍における吸収度は低い。高濃度での実験を行っている。本実験条件での N₂O ガスによる透過率の変化は約 50% であり、これは Fig. 1 で示した計算における CO 濃度 0.1%~1.0% の領域に相当する。尚、測定周波数領域において、金属系サイディングは比較的平坦な反射特性を有している。結果を Fig. 11 に示す。1.004 THz 付近、1.030 THz における吸収を確認することができた。実験により得られた吸収線幅は約 7 GHz であり、数値計算との良い一致が得られた。また、高周波になるにつれて透過率が増加する特徴も確認することができた。また、透過率が高い窓の領域では、ガスセルの窓材による干渉が起きていると考えられる。これは、窓に角度をつけたウェッジ加工やブリースター角で取り付けることで干渉を取り除くことができると考えられる。建材からの反射波スペクトルにてサンプルガスの吸収線を観測できたことにより、THz 帯における遠隔分光センシングの実現可能性を実験的に示したと言える。

Fig. 12. Experimental setup for long-range propagation of the THz-wave.

Fig. 13. Absorption spectrum of atmosphere. The THz-wave propagate atmosphere by 7 meter.

〈5・2〉 大気窓減衰率測定 本項では、THz 帯における大気窓の減衰率を実験的に求める。先に述べたように、現行のシミュレーターでは水蒸気の圧力広がり係数に正確な値を使用していないため、実際のガスセンシングの使用状況下を想定した、THz 波の長距離伝搬シミュレーションを信頼することはできない。そこで、実際に THz 波を長距離伝搬させ、大気窓の減衰率を実験的に求める必要がある。大気窓測定の THz 波長距離伝搬は、THz 波光源の出力が高く、線幅もある程度細くなければならない。本研究で構築した is-TPG はこの条件を満たしており、最適な光源の一つであると言える。また、過去に THz 帯での大気窓長距離伝搬測定の例は無く、非常に重要な研究項目の一つである。THz 波の SN 比と大気による減衰を考慮し、初期段階の長距離伝搬測定として、7 m の伝搬測定を行った。実験系を Fig. 12 に示す。光源部で発生された THz 波を、出力揺らぎをキャンセルするためワイヤグリッドで 2 成分に分割し、透過成分はレンズで集光し長さ 7 m、内径約 4 mm のステンレス製ガスセルに入射し、セル内を透過した THz 波を Si ボロメーター検出器で受光した。反射成分は放物面鏡を介し、もう一方の検出窓で受光した。光源からガスセルまでの距離は約 10 cm である。また、大気窓の測定は、真空状態と大気状態の透過率の差を比べるため、ガスセルには真空排気ポートが備えられている。

本実験は比較的输出が高く、かつ大気窓が存在する 1 THz 付近で行った。また、シード光波長は 0.01 nm の間隔でスキャンした。これは THz 波の周波数に換算すると約 3 GHz のステップとなる。結果を Fig. 13 に示す。

この結果から、実験値と数値計算との誤差が 10 %以内であることを確認した。数値計算の正確性が疑問視されていた THz 波帯においても、その計算結果が実用に耐え得るものであることを証明できた。即ち、数値計算で求められた 60 m 伝播時の大気窓による減衰は、Fig. 1 に示した値と同程度であり、ガスセンシングにおいて本質的な問題とはならず、大気伝播損失は大きく見積もって 3 dB と想定すれば良い。

一方、10 m の空間領域に死亡に至る危険性のある濃度 0.1 %の CO ガスが充満している状況下では、透過強度に大気窓に対して 15 %の差が生じる。CO ガス充満領域の行路長が半分になれば、大気窓に対する透過強度の差も半分となる。部屋のサイズとしては最小 3 m 程度を想定すれば良く、死亡の危険性のあるガス検出のためには、信号対雑音比として 30 dB を確保すれば十分である。また、建築材からの反射として、金属系サイディング以外を想定しても反射損失は最大で 20 dB 程度である。検出感度を低減させる要因として、煙霧による散乱等も想定されるが、これは今後実験的に検討すべき課題である。現状としての見積りとして、信号対雑音比 60 dB を確保すれば確実に実用に耐え得るものとなる。Si ボロメーターを検出器とした現行のシステムでは、当該周波数領域における信号対雑音比 20 dB 程度であるが、超伝導ミキサ等の高感度検出器の導入によって信号対雑音比 60 dB を達成する事は原理的に可能である。

6. むすび

本論文では、狭線幅 THz 波光源を構築し、火災現場における有毒ガスのセンシング技術について述べた。大気圧下でのガスセンシングに適用可能な狭線幅 THz 波光源である is-TPG を構築し、約 200 MHz まで狭線化し、本システムに要求される 1 GHz 以下という値を十分満たすことができた。低周波域において位相整合角が正確に合うように注入光を調整することにより、ガスセンシングに用いる 1 THz 以下の帯域で THz 波出力を増大させた。また、実際の火災現場を想定し、建築材料からの反射波を用いて N_2O を分光することで、THz 帯遠隔分光センシングの実現可能性を実験的に示した。さらに、本システムを実現させる上で重要である大気窓領域での長距離伝搬測定を行い、大気の減衰率を実験的に取得し計算値と良く一致したため、数値計算が実用に耐え得る物であることが証明された。

尚、本研究は NiCT 委託研究「ICT による安全・安心を実現するためのテラヘルツ波技術の研究開発」によって支援されている。

建材をご提供いただきました有限会社スペクトルデザインの深澤亮一代表取締役様に深く感謝申し上げます。

(平成 20 年 3 月 17 日受付, 平成 20 年 8 月 19 日再受付)

文 献

- (1) P. R. Smith, D. H. Auston, and M. C. Nuss : "Subpicosecond photo-conducting dipole antennas", IEEE J. Quantum Electron., Vol.24, pp.255-260 (1988)
- (2) P. Y. Han and X.-C. Zhang : "Coherent, broadband midinfrared terahertz beam sensors", Appl. Phys. Lett., Vol.73, pp.3049-3051 (1998)
- (3) D. M. Mittleman, R. H. Jacobsen, and M. C. Nuss : "T-ray imaging", IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., Vol.2, pp.679-691 (1996)
- (4) R. A. Cheville, R. W. McGowan, and D. Grischkowsky : "Time resolved measurements which isolate the mechanisms responsible for terahertz glory scattering from dielectric spheres", Phys. Rev. Lett., Vol.80, pp.269-272 (1998)
- (5) J. Allen : "Free Electron Lasers and Other Advanced Sources of Light (National Academy Press, Washington, DC, 1994), pp.24-31
- (6) S. Komiyama : "Far-infrared emission from population-inverted hot-carrier system in p-Ge", Phys. Rev. Lett., Vol.48, pp.271-274 (1982)
- (7) E. B. Brown, K. A. McIntosh, K. B. Nichols, and C. L. Dennis : "Photomixing up to 3.8 THz in low temperature-grown GaAs", Appl. Phys. Lett., Vol.66, pp.285-287 (1995)
- (8) J. Faist, F. Capasso, D. L. Sivco, C. Sirtori, A. L. Hutchinson, and A. Y. Cho : "Quantum cascade laser", Science, Vol.264, pp.553-556 (1994)
- (9) S. S. Sussman : "Tunable Light Scattering from Transverse Optical Modes in Lithium Niobate", Microwave Lab., Report, No.1851, Stanford University (1970)
- (10) M. A. Piestrup, R. N. Fleming, and R. H. Pantell : "Continuously tunable submillimeter wave source", Appl. Phys. Lett., Vol.26, pp.418-421 (1975)
- (11) K. Kawase, J. Shikata, and H. Ito : "Terahertz wave parametric source", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol.35, pp.R1-R14 (2002)
- (12) J. Shikata, K. Kawase, K. Karino, T. Taniuchi, and H. Ito : "Tunable terahertz-wave parametric oscillators using LiNbO₃ and MgO:LiNbO₃ crystals", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol.48, pp.653-661 (2000)
- (13) Y. R. Shen, The Principle of Nonlinear Optics, John Wiley, and Sons, New York (1984)
- (14) K. Imai, K. Kawase, H. Minamide, and H. Ito : "Achromatically injection-seeded terahertz-wave parametric generator", Opt. Lett., Vol.27, pp.2173-2175 (2002)

高 島 祐 二

(非会員) 1983年8月25日生。2006年3月名古屋工業大学卒業。現在、名古屋大学工学研究科博士前期過程在学中。非線形光学効果を用いた THz 波発生に関する研究に従事。

水 津 光 司

(非会員) 1974年1月24日生。2001年3月九州大学大学院工学研究科応用物理学専攻博士課程修了(博士(工学))。2006年4月より名古屋大学大学院工学研究科助教。現在、テラヘルツ光源・イメージングの研究に従事。

澁 谷 孝 幸

(非会員) 1980年6月30日生。2006年3月東京理科大学大学院工学研究科電気工学専攻修了。2006年4月より理化学研究所テラヘルツイメージング研究チームテクニカルスタッフ、名古屋大学工学研究科博士後期課程在学中。現在、テラヘルツ光源・イメージングの研究に従事。

大 谷 知 行

(正員) 1965年11月22日生。1995年3月東京大学大学院理学系研究科天文学専攻博士課程修了(理学博士)。2005年より理化学研究所テラヘルツイメージング研究チームチームリーダー。現在、超伝導テラヘルツ波検出器の開発と応用に従事。

川 瀬 晃 道

(正員) 1966年9月14日生。1996年3月東北大学大学院工学研究科電子工学専攻博士課程修了(博士(工学))。2005年7月名古屋大学工学研究科教授。2007年4月より名古屋大学エクトピア科学研究所教授。現在、テラヘルツ光源・イメージングの研究に従事。