

論文

テラヘルツ連続波を用いた誘電体・半導体の電気特性評価

時田 幸一^{*1)} 太田 優一^{*1)}

Evaluation of electrical properties of dielectric and semiconductor materials using continuous-wave terahertz radiation

Kouchi Tokita^{*1)}, Yuichi Ota^{*1)}

Terahertz (THz) radiation has the penetration properties of radio wave and straight running properties of light together. It is known that THz wave penetrates ceramics, plastics and papers. In general, evaluation of electrical properties of materials is essential to product development. It is expected that the THz spectroscopy will be a powerful tool for non-contact measuring of electrical properties, because THz wave penetrates dielectric and semiconductor materials used for electric devices and integrated circuits (IC).

In this study, the electrical properties of dielectric and semiconductor materials were evaluated using the continuous-wave THz radiation.

キーワード：テラヘルツ, 連続波, 電気特性

Keywords : Terahertz, Continuous wave, Electrical properties

1. はじめに

テラヘルツ帯は周波数0.1 THz~10 THz (波長3 mm~0.03 mm) の領域であり, 光と電波の境界領域に位置する。この帯域は電磁波の発生や検出が困難であったことから, 長い間「未開拓の領域」とも言われていたが, 近年技術革新が進み, 高速情報通信や医療, 非破壊検査, 材料の物性特性評価等, 様々な分野で産業応用が期待されている^{(1)~(3)}。その中で, 今回我々が注目したのはテラヘルツ波を用いた材料の電気特性評価である。

一般に電気製品をはじめ様々な製品開発において, 使用する材料の電気特性評価は不可欠である。材料を電気抵抗によって分類すると, 電気抵抗が小さい「導電体」, 電気抵抗が大きい「誘電体 (絶縁体)」, それらの中間の抵抗値を持つ「半導体」の3つに大別することができる。この中で誘電体と半導体はテラヘルツ波をほぼ透過し, 金属に代表される導電体はテラヘルツ波を反射することが知られている。今回はテラヘルツ波が透過する誘電体と半導体について取り上げる。

一般に誘電体では, 式 (1) で示す複素誘電率が電気特性の指標となる。

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon_1 + i\epsilon_2 \dots \dots \dots (1)$$

なお通常は真空の誘電率 ϵ_0 との比をとった比誘電率が用いられることが多く, 以下では誘電率と表記した場合も比誘電率を示すものとする。近年スーパーハイビジョンや各

種ミリ波帯無線, 車載用衝突防止レーダーなどの電子機器の高周波化が進むとともにマイクロ波帯やミリ波帯での測定ニーズが高まっている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。その流れを受け, 今後はテラヘルツ帯での誘電特性評価も必要となる可能性が高いと考えられる。

一方半導体では, 体積抵抗率が電気的特性のひとつとして用いられる。体積抵抗率は単位体積当たりの抵抗値であり, 半導体材料に対しては四探針法という測定方法がJIS (日本工業規格) に記載されている⁽⁶⁾。この方法は, 電流および電圧端子から成る計4本のピンがついたプローブを用いて比較的簡単に測定できるが, プローブを直接試料に押し当てて測定する接触法であり, 場合によっては試料を傷つける可能性がある。またプローブの押し当て方で数値がばらつきやすく, 体積抵抗率を算出するためには長方形や円板という決まった形状の試料が必要となる。

今回我々は, テラヘルツ波が誘電体・半導体を透過する性質に注目し, 透過法により非接触で誘電体・半導体材料の電気特性評価を行った。

2. テラヘルツ連続波を用いた透過法の概要

2.1 CW-テラヘルツ分光システム 本研究で使用する装置はCW-テラヘルツ分光システム (ドイツTOPTICA社製, 型式SYST1-SPK-EXTD-850) である⁽⁷⁾。この装置はテラヘルツの連続波 (Continuous Wave) を発生させるシステムであり, テラヘルツ波の発生・検出部および光学系から構成されている。システムの概要を図1に示す。本システムでは, 波長の異なる2つのダイオードレーザーを重ね合

事業名 平成25年度 基盤研究
*1) 電子半導体技術グループ

わせてテラヘルツ連続波を発生させるフォトミキシングと呼ばれる手法を用いている⁽⁷⁾。この方式では、2つのレーザーの波長を温度で制御することにより、テラヘルツ波の周波数を連続的に変化させることができる。本システムの公称周波数範囲は0から1.8 THzである。しかし実際の測定では、光学系内で発生する定在波によるノイズの影響や、空気中の水蒸気の吸収を考慮したうえで、目的に応じて測定周波数範囲を決定する。

図1のTXおよびRXはフォトミキサと呼ばれる光伝導アンテナであり、それぞれテラヘルツ波の送信部、受信部である。RXでは受信したテラヘルツ波の振幅 E_{THz} に対して、式(2)の I_{ph} で示す光電流 (photocurrent) が計測される。

$$I_{ph} \propto E_{THz} \cos\left(\frac{2\pi L\nu}{c}\right) \dots\dots\dots (2)$$

ここで ν は周波数、 c は光速であり、 L は「送信側フォトミキサまでのレーザーの伝搬距離 L_S 」と「受信側フォトミキサまでのレーザーの伝搬距離 L_D 」、「テラヘルツ波の光路長 L_{THz} 」を用いて式(3)で得られる光路差である⁽⁷⁾。

$$L = (L_S + L_{THz}) - L_D \dots\dots\dots (3)$$

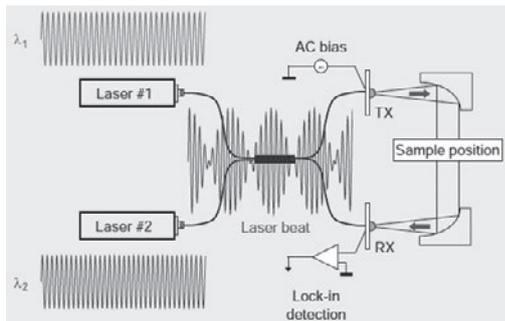


図1. CW-テラヘルツ分光システムの概要
TOPTICA Photonics AG HPより

2.2 透過法での材料測定 本研究では透過法での測定を行うため、図1の“Sample Position”の位置に測定試料を配置する。一般に測定試料に対して電磁波を照射すると、試料を透過した電磁波には振幅や位相の変化が生じる。これは試料がある屈折率を持つと同時に、試料と空気の境界面における反射、さらには試料内での電磁波の吸収によるものである。したがって試料なしの時と試料ありの時のデータを比較することで、振幅や位相の変化が得られる。それをもとに複素屈折率を求め、最終的に複素誘電率や体積抵抗率といった電気特性を計算する。

テラヘルツ帯での材料評価については、既に複数の論文での報告や特許が存在するが、主に使用されているのは「テラヘルツ時間領域分光 (THz-TDS)」と呼ばれる方法である⁽⁸⁾。この方法は、フェムト秒レーザーを用いてパルス状のテラヘルツ波を発生させ、試料を透過したパルス波の時間波形を取得し、フーリエ変換によって周波数スペクトルを得ている。これに対し連続波を用いた本研究は、実周波数での測定、および周波数掃引によってスペクトルを得ることから、周波数ドメイン (周波数領域) と言える。本研究の手法

は周波数帯域の広さではTHz-TDSにやや劣るが、実周波数での測定が可能であり、THz-TDSよりも高い周波数分解能が実現できる。

3. 誘電体の測定および結果

今回はテフロン (試料厚さ5 mm) と66-ナイロン (試料厚さ2 mm) に対してテラヘルツ帯での誘電特性を測定した。まず試料なしの状態 (reference) と試料ありの状態 (sample) で透過スペクトルを取得する。図2にreferenceとして空気、sampleとしてテフロンと66-ナイロンのスペクトルを示す。図3は図2に示したスペクトルから求めた、テフロンと66-ナイロンにおけるテラヘルツ波の透過率である。

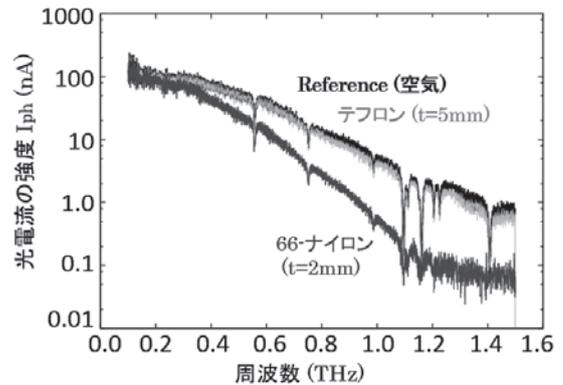


図2. referenceおよびsampleのテラヘルツスペクトル

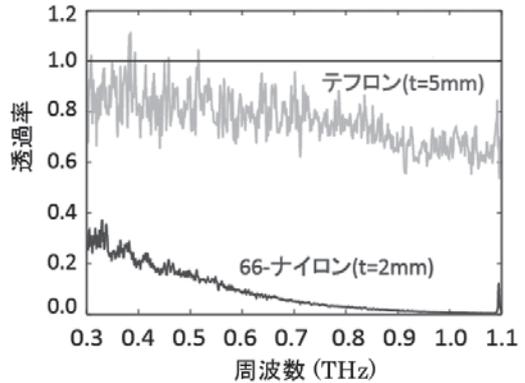


図3. テフロンと66-ナイロンの透過率

テフロンと66-ナイロンの透過率を比較すると、テフロンは広帯域で透過率が高いのに対し、66-ナイロンは周波数が高くなると透過率が大きく減少することがわかる。透過率が減少する要因としては、試料表面での反射や試料内での吸収があるが、今回のような樹脂の場合は主に試料内の吸収による効果が大きいと考えられる。

次に試料を透過したことによる位相の変化から、試料の屈折率を求める。一般に屈折率 n の物質中では、電磁波の波長は真空中に比べて $1/n$ になる。これは光路長が n 倍になったとみなすことができる。今空気の屈折率はほぼ真空の屈折率に等しいとすると、屈折率 n 、厚さ d の試料を透過した場合、テラヘルツ波の光路長変化 ΔL は式(4)で書くことができる。

$$\Delta L = (n - n_{air})d = (n - 1)d \dots\dots\dots (4)$$

透過率と同様, 試料なしの状態 (reference) と試料ありの状態 (sample) での測定から, テフロンと66-ナイロンの屈折率を求めた結果を図4に示す。図4には隣接平均によるスムージング処理を行った結果も合わせて示す。今回測定した周波数帯域において, テフロンは約1.4, 66-ナイロンは約1.8ではば一定の値を示すことがわかる。

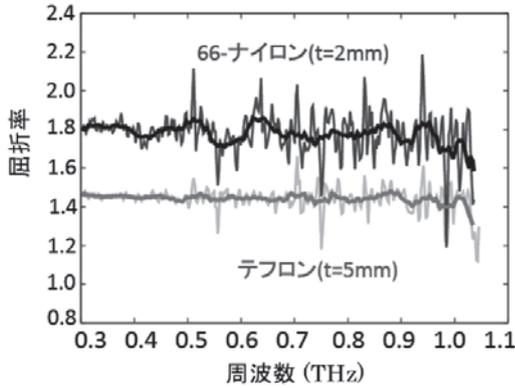


図4. テフロンと66-ナイロンの屈折率

誘電特性は今までに得られた試料の透過率および屈折率を用いて計算した。図5および図6にテラヘルツ帯でのテフロンと66-ナイロンの誘電特性をそれぞれ示す。

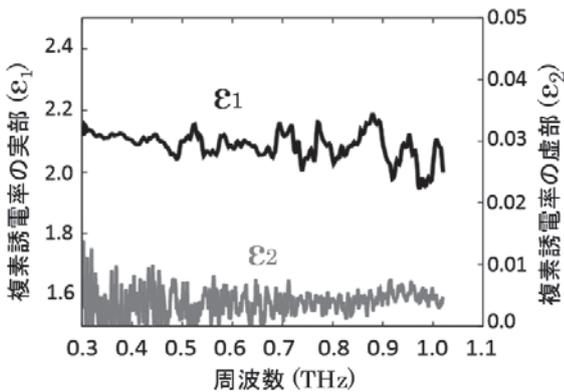


図5. テフロンの誘電特性

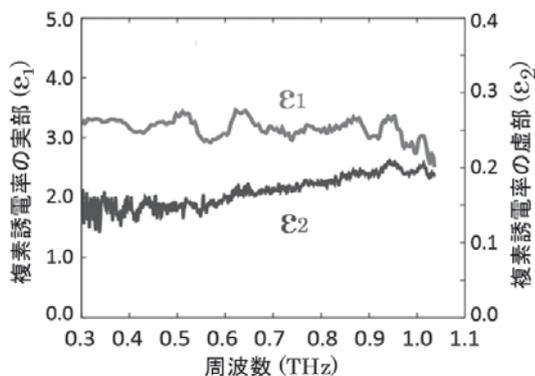


図6. 66-ナイロンの誘電特性

複素誘電率の実部 ϵ_1 はテフロンが約2.0~2.2, 66-ナイロンが約3という値が得られた。誘電率の虚部 ϵ_2 については,

テフロンは0.01以下の小さい値を示し, 66-ナイロンは周波数とともに0.1から0.2まで緩やかに上昇する結果が得られた。この結果はマイクロ波帯からミリ波帯で知られている傾向と近いものであった。また66-ナイロンについてはTHz-TDSで測定された結果⁽⁹⁾と比較しても, 近い結果が得られた。

4. 半導体の測定および結果

半導体試料としては4種類のシリコンウェーハを用意し, テラヘルツ波を用いた体積抵抗率測定を行った。測定試料の一覧を表1に示す。今回の試料はいずれもN型であり, 片面のみ鏡面研磨が施されている。テラヘルツ波を用いて測定した体積抵抗率と比較するため, 四探針法での測定を行った結果も表1に示す。

半導体試料の電気特性評価では, まず試料なしの状態 (reference) と試料ありの状態 (sample) のテラヘルツスペクトルを透過法により取得し, 試料の透過率及び屈折率を求める。そして透過率と屈折率を用いて誘電特性 (複素誘電率) を計算する。今回半導体の電気特性として最終的に求めたいのは体積抵抗率なので, テラヘルツ測定で得られた誘電特性とドルーデモデルの理論式を用いて体積抵抗率を計算する。ドルーデモデルは, 金属中の自由電子や半導体中のフリーキャリアによる電磁波の吸収, 及びそれに基づく誘電特性をモデル化したものである。ドルーデモデルの理論式では, 複素誘電率は式 (5) で与えられる⁽¹⁰⁾。

$$\tilde{\epsilon}(\omega) = \epsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + (i\omega/\tau)} \dots\dots\dots (5)$$

ここで ω_p はプラズマ周波数, τ は緩和時間である。 ϵ_{∞} は高周波誘電率で, ここではシリコンの値として知られている11.7を用いた⁽¹¹⁾。式 (5) とテラヘルツ測定により得られた誘電特性を比較し, 測定結果を再現するようにプラズマ周波数と緩和時間を決定する。これらが求まると, 半導体中のキャリア濃度 N , キャリアの移動度 μ , そして体積抵抗率 ρ_v が式 (6) から (8) をもとに計算できる⁽¹⁰⁾。

$$\omega_p^2 = \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m^*} \dots\dots\dots (6)$$

$$\tau = \frac{m^* \mu}{e} \dots\dots\dots (7)$$

$$\rho_v = \frac{1}{Ne\mu} \dots\dots\dots (8)$$

式 (6) から (8) において e はキャリアの電荷量, m^* はキャリアの有効質量である。N型半導体の場合キャリアは電子と考えられるため, e は素電荷, m^* は電子質量の0.26倍の値を用いて体積抵抗率を計算した⁽¹¹⁾。図7はサンプルBのシリコンウェーハにおいて, テラヘルツ測定で得られた誘電特性にドルーデモデルをフィッティングした結果である。同様に, 他の試料に対してもドルーデモデルのフィッ

表1. 測定したシリコンウェーハ一覧

| Sample | 型 | サイズ | 厚さ (μm) | 体積抵抗率 ρ_v ($\Omega\text{ cm}$) | | |
|--------|---|-------------------|----------------------|---------------------------------------|--------|---------|
| | | | | 公称値 | 四探針法測定 | テラヘルツ測定 |
| A | N | ϕ 3 inch | 500 | 1~10 | 1.6 | 1.6 |
| B | N | 50 \times 50 mm | 780 | 1~2 | 1.7 | 1.4 |
| C | N | ϕ 6 inch | 675 | 2~4 | 3.8 | 3.8 |
| D | N | ϕ 4 inch | 525 | 8~12 | 10.3 | 23.4 |

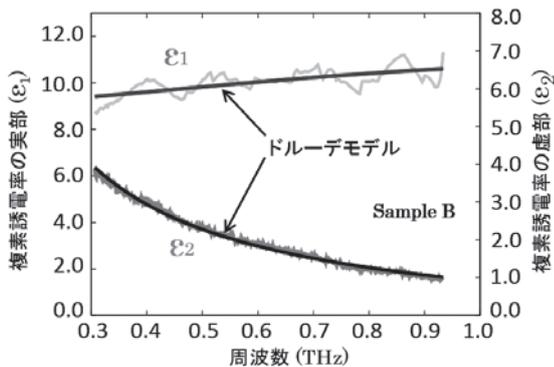


図7. テラヘルツ測定で得られた誘電特性に対するドルーデモデルのフィッティング

フィッティングを行い、求めた体積抵抗率をテラヘルツ測定の結果として表1に示す。四探針法測定の結果と比較すると、サンプルDについてはやや違いが大きいものの、A, B, Cについてはほぼ一致した結果が得られた。サンプルDの体積抵抗率が四探針法測定とテラヘルツ測定でずれた原因としては、試料内での多重反射の影響が考えられる。テラヘルツ波を透過する試料においても、一部は試料と空気との間で反射が生じる。そのため、試料内で多重反射が起こる場合は、試料をそのまま透過した電磁波と試料内を複数回反射した透過光とが干渉し、透過率において顕著なフリンジパターンを形成する(図8参照)。シリコンウェーハでは抵抗率が高くなるほど、試料内のフリーキャリアによる吸収が減少し、多重反射の影響が無視できなくなる。その結果、テラヘルツ測定で求めた誘電特性にもその影響が残る、ドルーデモデルでのフィッティングに誤差を生じたものと考えられる。

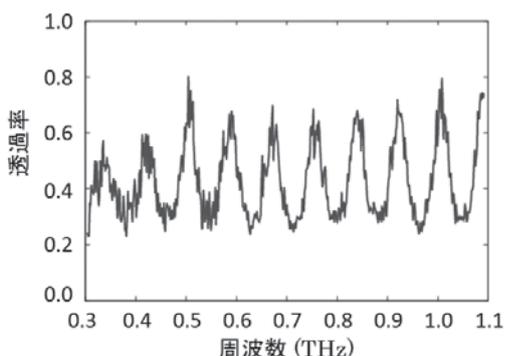


図8. サンプルDの透過率に見られる試料内多重反射の影響

5. まとめ

本研究ではテラヘルツ連続波を用いて、透過法で誘電体・半導体の電気特性評価を行った。誘電体に対しては、テフロン、66-ナイロンの誘電特性を求めることに成功し、マイクロ波帯やミリ波帯での誘電特性、およびTHz-TDSで測定された値と定性的には近い結果が得られた。半導体に対しては、4種類のシリコンウェーハの体積抵抗率をテラヘルツ測定から求めることができ、四探針法で測定した値とも近い結果が得られた。しかしながら一部の試料では、四探針法測定とテラヘルツ測定で得た値のずれが大きかった。これは試料内の多重反射の影響によるものと考えられる。

今後の課題としては、S/N (Signal to Noise ratio) 改善方法の検討、電気特性の定量的検証、試料内の多重反射が大きい試料の評価方法検討が挙げられる。現段階では定性的な議論に留まっているため、測定精度の評価など定量的な議論を行うには、S/Nの改善が必要である。また連続波を用いた測定の信頼性評価のためにも、THz-TDSの結果と定量的な比較を今後行う必要がある。そしてより多くの試料に今回の測定方法を適用できるよう、多重反射を考慮したモデルの構築も含め、試料内の多重反射が大きい試料に対する評価方法の検討が必要である。

(平成27年7月13日受付, 平成27年7月30日再受付)

文 献

- (1) 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): 「テラヘルツ技術」(2006)
- (2) 西澤潤一: 「テラヘルツ波の基礎と応用」(2005)
- (3) 大森豊明 (監修): 「テラヘルツテクノロジー」(2005)
- (4) 橋本修: 「高周波領域における材料定数測定法」(2003)
- (5) ミリ波技術のグローバルシステム応用とその展開調査専門委員会 (編): 「ミリ波技術の基礎」(2009)
- (6) 日本工業規格 JIS H 0602: 「シリコン単結晶及びシリコンウェーハの4探針法による抵抗率測定方法」
- (7) A. Roggenbuck et al.: “Coherent broadband continuous-wave terahertz spectroscopy on solid-state samples”, *New Journal of Physics* 12, 043017 (2010)
- (8) 萩行正憲他: 「フェムト秒レーザーを用いたテラヘルツ波の発生と応用」, *The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research*, Vol.84, No.11, pp.731-739 (2008)
- (9) 永井直人: 「テラヘルツ波分光による工業材料分析」, *レーザー研究*, Vol.33, No.12, pp.848-854 (2005)
- (10) 巨陽, 久保田穂高: 「テラヘルツ電磁波による半導体ウェーハの電気特性の計測・評価」, *日本機械学会論文集 (A編)*, 76巻, 763号, pp.339-343 (2010)
- (11) S. Nashima et al.: “Measurement of optical properties of highly doped silicon by terahertz time domain reflection spectroscopy”, *Applied Physics Letters*, Vol.79, No. 24, pp.3923-3925 (2001)