

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：15501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630151

研究課題名(和文) THz帯における異常表皮効果の常温金属表面抵抗に対する影響の実験的評価

研究課題名(英文) Measurements of Anomalous Skin Effect on Surface Resistance at Room Temperature in THz Band

研究代表者

真田 篤志 (Sanada, Atsushi)

山口大学・理工学研究科・教授

研究者番号：20264905

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：金および銅に対するテラヘルツ帯の常温異常表皮効果を実験的に観測することに成功した。300Kにおける0.75-1.1 THz帯の金および銅の表面抵抗の測定値はそれぞれ周波数の0.54および0.58乗に比例することがわかった。これらの値は古典的な表皮効果を仮定した理論値0.5と異常表皮効果が支配的な場合の理論値の0.67の間にあることから、この周波数帯では古典的な表皮効果と異常表皮効果との遷移領域であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：The anomalous skin effect on the surface resistance in 1 THz band is successfully observed experimentally. It is shown that the surface resistances for gold and copper in 0.75-1.1 THz band at 300 K are proportional to the frequency to the power of 0.54 and 0.58, respectively, which are between the theoretical values for the classical skin effect and the anomalous skin effect. Therefore, it is concluded that the surface resistance is in the transition from the classical skin effect region to the anomalous skin effect region.

研究分野：マイクロ波工学

キーワード：異常表皮効果 テラヘルツ波 表面抵抗

1. 研究開始当初の背景

一般に金属中の高周波電流は表皮厚程度に表面に集中する。表皮厚は周波数が高くなるにしたがって小さくなり金属の電気抵抗は直流電流に対する値と比較して大きくなる。周波数がより高くなり、表皮厚が電子の平均自由行程と比較して無視出来なくなると、図1の様に電子の金属表面における散乱のために金属の電気抵抗は古典的な表皮厚を考慮したものと比較してもさらに大きくなる。この効果は異常表皮効果(H.R.Hindrey, Nature 161,394 (1948))と呼ばれている。例えば常温で銅中の電子の平均自由行程は約40nmであるが、1THzの表皮厚の理論値は67nmとなる。したがってこれ以上の周波数帯においては異常表皮効果の影響を考慮しなければならなくなると考えられる。この影響を明らかにする事は、近い将来のテラヘルツデバイスの設計やモデリングのために極めて重要となると考えられる。

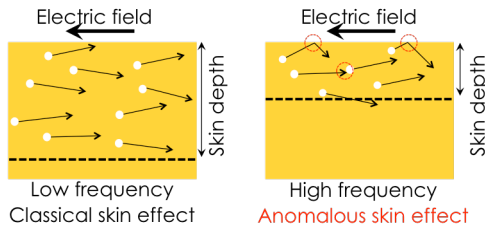


図1 異常表皮効果

2. 研究の目的

本研究ではテラヘルツ帯における常温の金属に対する異常表皮効果が表面抵抗に与える影響を定量的に示す事を目的とする。理論的には、異常表皮効果が無視出来るとすれば表面抵抗は古典的な表皮効果に従い $\omega^{(1/2)}$ に比例するが、異常表皮効果が支配的になると $\omega^{(2/3)}$ に比例する(Chambers, 1952)。したがって、表面抵抗の周波数依存性の指数の値は異常表皮効果の指標になる。本研究ではこれを実測により求める事を目標とする。本研究は、テラヘルツ帯における異常表皮効果の指標と金属の表面抵抗の定量的データを初めて供することになり学術的にも意義は大きい。また、このデータや測定技術はこの周波数帯の電子材料やデバイス・回路設計のための基準となり得、その有用性も高い。

表1 金属の材料特性

金属	導電率 (S/m)	平均自由行程 $l$ (nm)	表皮厚 (nm) (1.0 THz)
Ag	$6.21 \times 10^7$	52	64
Cu	$5.88 \times 10^7$	39	66
Au	$4.10 \times 10^7$	34	79
Al	$3.65 \times 10^7$	43	83

3. 研究の方法

(1) 導波管減衰定数の高精度測定

常温の金属の減衰定数の周波数特性を、導波管を DUT としてその損失から測定する。まず鑄造による継ぎ目の無い、壁面が金でできた長さが違う2本の WR-1.0 導波管(断面形状  $254\mu\text{m} \times 127\mu\text{m}$ )を用意する。導波管長は1インチ(25.4mm)および2インチ(50.8mm)とする。この2本の導波管の複素反射振幅および複素透過振幅を VNA により測定し、この測定データから反射損失を考慮して各導波管の挿入損失を求める。2本の導波管の挿入損失の差分をとることで導波管フランジの接触抵抗による損失を除去した導波管の減衰定数 $a$ を算出する。また予備実験によりこの帯域では導波管の損失が約3dB/inchであることが分かっており、差分により約3dBの挿入損失差が期待出来、この測定値からこの導波管の減衰定数 $a$ を算出する。

減衰定数 $a$ の計測精度の確保のため、差分測定に加えて次の対策を取る。

- ・TRL校正キットの使用

この周波数帯での TRL 校正キットはフランジ国際規格が提案段階でありまだ市販されていないが、提案ドラフト段階の産総研方式 TRL 校正キットを使用する。

- ・アライメントリングによるリピータビリティの確保

DUT 接続時のアライメントの確保のため、通常のアライメントピンに加えて、フランジ外周を機械的に位置決め可能なアライメントリング方式を採用する。この際、特性が既知な校正標準に対して10回以上脱着を繰り返して測定を比較しリピータビリティを確認する。

(2) 導波管分散の除去と統計処理による表面抵抗の周波数特性の算出

まず、この減衰定数 $a$ には導波管の分散特性が含まれているため、これを除去して表面抵抗 $R_s$ を次式により算出する。理論的には表面抵抗 $R_s$ は減衰定数 $a$ を用いて次式により算出する。

$$R_s = \alpha \frac{\xi b \sqrt{1 - (\omega_c / \omega)^2}}{1 + (2b/a)(\omega_c / \omega)^2}$$

ここで、 $a$ および $b$ はそれぞれ導波管断面の長辺および短辺の長さ、 $\omega_c$ はカットオフ各周波数、 $\xi$ は自由空間の波動インピーダンスである。いま導波管の減衰定数 $a$ を

$$\alpha = -\frac{\ln[1 - (|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2)]}{2L}$$

により測定すれば、式(3)より表面抵抗を得ることが出来る。

理論的には、異常表皮効果が無視出来ると

すれば  $R_s$  は古典的な表皮効果に従い  $\omega^{(1/2)}$  に比例するが、異常表皮効果が支配的になると  $\omega^{(2/3)}$  に比例する。表面抵抗  $R_s$  の周波数特性の指数値をフィッティングにより求める。

この際、計測精度の確保のため次の対策を取る。

- ・検波ダイオードの低ダイナミックレンジ周波数点データの除外

測定帯域内で検波ダイオードのダイナミックレンジの低い周波数点の測定データは周波数特性の指数推定に著しく悪影響を及ぼす。この除去のため測定のIF帯域の最適化を行うと同時に、測定を複数回(10回程度以上)行う事で統計処理を行いこの周波数データを判別する。

- ・大気吸収周波数測定点の除外

TDS 測定による大気吸収測定によりこの帯域では 0.7527, 0.9890, 1.0979 THz において大きな大気吸収が確認されている。この周波数帯の損失は導体損測定データから除外する。

### (3) 異常表皮効果の影響の検討

測定精度の検証を行いながら異常表皮効果の周波数特性を理論値と比較する。古典的な表皮効果による金属の表面抵抗の理論値

$$R_s = \sqrt{\omega\mu/2\sigma} \quad (\mu \text{ は透磁率}, \sigma \text{ は導電率})$$

と比較しながら絶対値および周波数特性の指数に対して定性的に検討する。この際、必要に応じて前年度と同じ測定を引き続き行う。

異常表皮効果の表面抵抗に対する影響を別の確度から裏付けるため、以下の検討も行う。

- ・長さの異なる導波管による検証

1.5インチや2.5インチなど長さの異なる導波管を導入して減衰定数を検討する。具体的な長さは鋳造の製造制限により決定する。

- ・金以外の材料に対する検証

鋳造により別の材料による導波管 DUT が作製可能であればこれを利用して同様な検討を行う。

- ・ミリ波帯(60GHz 帯)によるスケールモデルによる検証

測定や試料の入手が比較的容易なミリ波帯(V バンド: 60GHz 帯)において同様な測定を行い、スケールアップが成り立つかどうかを検証する。この周波数帯では異常表皮効果の影響はほとんど無視出来ると考えられる。

- ・異常表皮効果の影響は金属表面の状況にもよるため、金属の表面状態をレーザ顕微鏡、AFM 等により観測し把握し表面抵抗への影響を調べる。

## 4. 研究成果

### (1) 金の常温異常表皮効果の観測

図2のような雄島製作所製 WR-1.0 導波管を用意した。この導波管は継ぎ目のないよう鋳造で製造されており、UG-387 フランジを採用

している。導波管の断面サイズは、規格では長辺長  $a = 254 \text{ mm}$  および短辺長  $b = 127 \text{ mm}$  であるが、実測顕微鏡による計測では  $a = 261 \text{ mm}$ ,  $b = 119 \text{ mm}$  であった。また、導波管長の測定値は  $50.02 \text{ mm}$  であった。さらに、導波管内壁の粗さをレーザマイクロスコープ

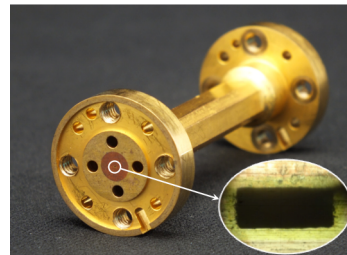


図2 WR-1.0 導波管 ( $L = 50.02 \text{ mm}$ ).

により測定したところ  $6 \mu\text{m}$  (RMS) であった。

室温 ( $T = 300 \text{ K}$ ) において 0.75-1.1THz における被測定物の通過反射特性をアジレント社製のベクトルネットワークアナライザ N5254A と VDI 社製の THz モジュールを用いて測定した。この際、WR-1.0 校正キットにより 2ポート TRL 校正を行った。導波管の接続のアライメント確保のために、フランジ外周を覆うアライメントリングおよびアライメントピンを使用した。さらに再現性の向上のため、空気懸架式モジュールプラットフォームを使用した。

測定した通過反射特性から算出した金の表面抵抗を求めた。得られた表面抵抗の周波数特性を図3に示す。図中の破線は測定値を累乗近似した場合の近似曲線である。また同図には古典的表皮効果が支配的な場合の理論的な表面抵抗値も併せて示した。ここで、ダイナミックレンジが低い周波数と大気吸収の影響が大きい周波数の測定値は測定精度確保のため取り除いた。測定した表面抵抗は 1.001 THz において理論値よりと比較して約 6.0% 大きかった。

得られた表面抵抗の周波数特性に着目すると表面抵抗は周波数の 0.54 乗に比例する結果となった。この指数値は、古典的表皮効果が支配的な場合の 1/2 (0.5) と、異常表皮効果が支配的な場合の 2/3 (0.667) の間の値となった。これらのことから、測定した周波数領

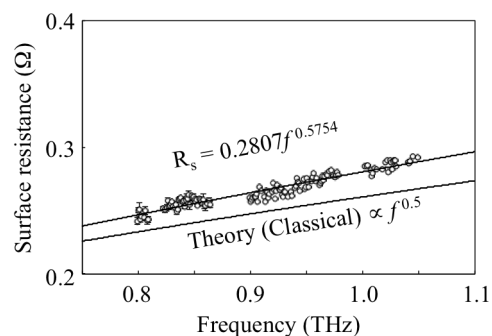


図3 金の表面抵抗 (測定値)

域においては、表面抵抗は古典的表皮効果領域と異常表皮効果領域の間の遷移領域にあると考えられることがわかった。

## (2) 銅の常温異常表皮効果の観測

表1より表皮厚が平均自由行程に対してより小さく異常表皮効果がより顕在化すると予想される銅に対しても同様に0.75-1.1 THzにおける常温の表面抵抗を測定し、異常表皮効果の影響を定量的に評価した。

図2と同様な銅製のWR-1.0導波管を用意した。導波管の断面サイズは、実測顕微鏡による計測では $a = 264$  mm,  $b = 124$  mmであった。また、導波管長の測定値は25.40 mmであった。

金の場合と同様な測定により測定した $T = 300$  Kの場合の表面抵抗 $R_s$ の周波数特性を図4に示す。本測定で得られた銅の表面抵抗の周波数特性の指数値は0.58で古典的表皮効果の場合と異常表皮効果の場合の指数値の間の値であった。このことより、測定した0.75-1.1 THzにおいて銅の表面抵抗は金の場合と同様に古典的表皮効果領域から異常表皮効果領域の遷移領域にあると考えられる。一方、金の表面抵抗の周波数特性の指数値は

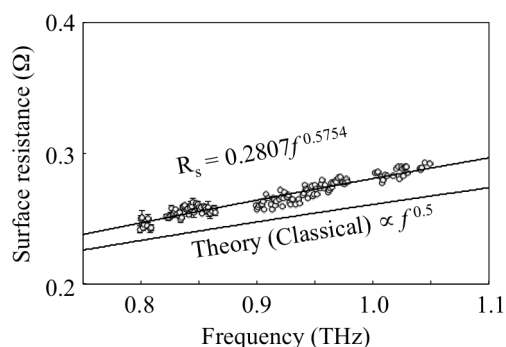


図3 金の表面抵抗 (測定値)

0.54と比較するとこの指数値は大きく、銅のほうが異常表皮効果の影響がより顕著であるという結果となった。このことは表1に示した様に金に比べて銅の方が異常表皮効果の影響がより顕著であるという予想と矛盾しない結果となった。

## (3) ミリ波帯における表面抵抗測定

本表面抵抗測定法の妥当性を確認するためにミリ波帯(40-65 GHz)において同様の測定を行った。内壁に金鍍金を施した長さ381 mmのWR-15導波管を用意し、アジレント社製バクトルネットワークアナライザPNA E8361を用いてそのSパラメータを測定した。この際、校正キット(V11644A)を用い導波管端面においてフル2ポートTRL校正を行った。この際、導波管のサイズの測定値は $a = 3.73$  mmおよび $b = 1.84$  mm、長さ381 mmである。

図4に得られた表面抵抗値を示す。また同図には古典的表皮効果が支配的な場合の理論的な表面抵抗値も併せて示した。測定した

表面抵抗は60 GHzにおいて理論値と比較して0.19%大きかった。

得られた表面抵抗は周波数の0.5乗に比例することがわかった。この指数値は、古典的表皮効果が支配的な場合の理論値と一致することから、この周波数帯においては古典的表皮効果が支配的であることがわかると同時に本測定法の妥当性を確認できた。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

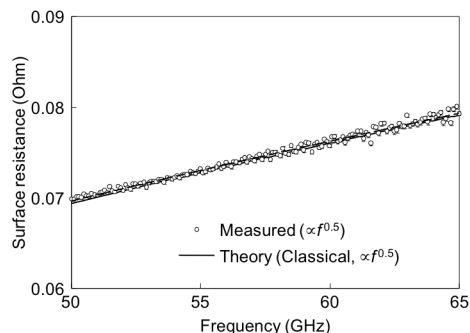


図4 V帯における金の表面抵抗(測定値)

は下線)

[学会発表] (計 5 件)

- ① 林賢宏, 真田篤志 “1 THz 帯における金属の常温異常表皮効果の実験的評価”, 電子情報通信学会 2015 年総合大会, C-2-44, p. 64, 2015 年 3 月 10 日, 立命館大学 (京都府草津市).
- ② 林賢宏, 真田篤志, “1 THz 帯における銅の常温異常表皮効果の実験的評価” 平成 26 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, 11-9, p.349, 2014 年 10 月 25 日, 福山大学 (広島県福山市).
- ③ 林賢宏, 永井翔太郎, 真田篤志, “1 THz 帯における常温異常表皮効果の実験的評価” 電子情報通信学会技術研究報告, MW2013-139, pp. 47-50, 2013 年 11 月 21 日, 鹿児島県文化センター (鹿児島県鹿児島市).
- ④ 林賢宏, 永井翔太郎, 真田篤志, “0.75-1.1 THz における常温異常表皮効果の実験的評価,” 電子情報通信学会 2013 年ソサイエティ大会, C-2-85, p.110, 2013 年 9 月 20 日, 福岡工業大学 (福岡県福岡市).
- ⑤ Shotaro Nagai, Takahiro Hayashi, Atsushi Sanada, “Measurements of Anomalous Skin Effect in 1THz Band” IEEE MTT-S 2013 International Microwave Symposium, WEPL-3, June 5, 2013, Seattle, USA.

[その他]

ホームページ

<http://www-ap.apsci.yamaguchi-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

真田 篤志 (SANADA, Atsushi)

山口大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：20264905