

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：13903

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14001

研究課題名(和文) 金属メッシュの表面プラズモン共鳴効果を用いた発振器型高感度計測法の研究

研究課題名(英文) Study on high sensitive measurement method with an oscillator utilizing a surface plasmon resonance in metal meshes

研究代表者

ベイ ジョンソク (BAE, Jongsuck)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20165525

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：微小な誘電率変化を検出可能とする新たなテラヘルツ帯材料計測法として、表面プラズモン共鳴効果を有する容量性金属メッシュを反射鏡として用いた固体発振器構造を提案し、その有用性を周波数75GHzから110GHzのミリ波帯で理論及び実験的に詳細に調べた。その結果、テラヘルツ帯で従来測定が困難とされた水性試料の測定が可能で、かつ $1E-5$ という微小な誘電率変化の検出が可能であることを実験的に示し、本計測法の有用性を立証した。

研究成果の概要(英文)：A solid state oscillator with a capacitive mesh used as one of the reflectors in the resonator has been proposed as a new high sensitive tool which can distinguish small differences of dielectric constant in materials used in a terahertz frequency region. This measurement tool utilizes a surface plasmon resonance effect happened in the capacitive mesh. Theoretical and experimental analyses have been done at the frequencies between 75-110 GHz. The results have shown that the measurement tool can be used for materials containing water and can detect small differences less than $1E-5$ in relative dielectric constants.

研究分野：工学

キーワード：計測機器 テラヘルツ光

1. 研究開始当初の背景

誘導性金属メッシュが、表面プラズモン共鳴効果による異常透過現象やメッシュの表面媒質に強く依存し変化する共鳴周波数特性を持つことから注目を集めている。この特性を利用し、テラヘルツ (THz) 波を用いたラベルフリーな DNA 等の生体高分子高感度計測への応用が提案されている。しかし、従来の THz 波の透過率変化を単純に測定する方式では、感度が不足し十分な精度での計測が難しく、THz 帯で強い吸収特性を持つ水分を含んだ材料の測定は困難であった。

2. 研究の目的

微小な誘電率変化を検出でき、かつ水分を含む材料計測が可能な THz 帯高感度計測法として、THz 帯固体発振器の共振器として表面プラズモン共鳴により反射率が最大となる容量性金属メッシュを用いた新たな方式を提案し、その動作原理を 0.1 THz (100 GHz) 帯で実験的に検証し、その有用性を示す。

3. 研究の方法

(1) 固体素子には、80 GHz から 110 GHz までの周波数範囲で発振可能で、かつ入手可能なガンダイオードを用いる。このため、動作中心周波数を 95 GHz に設定し、設計、製作、評価を行う。

(2) 先ず、パターンの異なる種々の容量性金属メッシュの設計、製作、そしてその特性評価を、また、それらのメッシュを使ったガンダイオード発振回路の試作を、それぞれ行う。製作した発振器の基本特性を詳細に測定し、電磁界シミュレータを用い計算した理論値との照合を通して、設計理論の正当性を検証する。

(3) 次に、試料形状と複素誘電率の異なる様々な試料に対し、発振出力の変化を実験的に詳細に調べ、 10^{-5} 以下の微小な誘電率差が測定可能であることを検証し、本方式の有用性を立証する。

4. 研究成果

(1) 厚さ t が 0.31 mm、0.54 mm、0.73 mm の各石英基板上に、1.8 mm、2 mm、2.2 mm のピッチ g が異なる容量性金属メッシュを、計 9 種類製作し、その反射および透過特性を、ベクトルネットワークアナライザを用いて詳細に測定し、3 次元電磁界シミュレータを用いた理論結果と照合した。その結果、周期境界を用いた理論解析モデルにより表面プラズモン共鳴周波数を $\pm 2\%$ 以内で設計可能であることを明らかにした。

図 1 に、製作したメッシュの写真を示す。図 2 は、 $g = 2$ mm、金属パターン間の距離 $a = 0.8$ mm、 $t = 0.31$ mm のメッシュの反射および透過特性の理論と実験の比較結果である。図より、図中矢印で示した共鳴周波数 $f_0 = 95$

GHz における急峻な透過率低下が理論とよく一致していることが分かる。一方、反射率特性において、理論にはない共振が周波数 86GHz 近傍に現れている。これは、他の金属メッシュでも同様に現れており、容量性金属メッシュ構造に付随した共振である。しかし、この共振現象に関しては、従来報告がなく、その原因究明については、メッシュパラメータを変えたより詳細な実験が必要であり、今後の検討課題である。

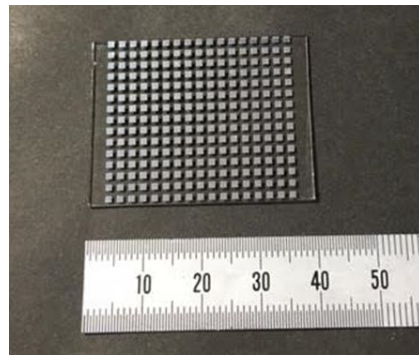


図 1 製作した容量性金属メッシュの写真

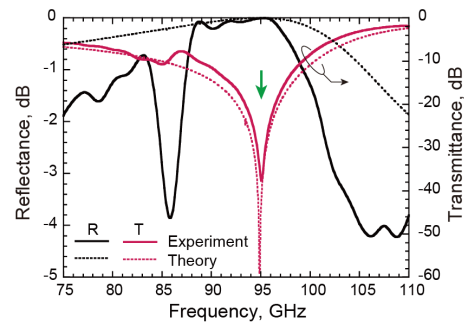


図 2 容量性金属メッシュの反射および透過特性

(2) 金属メッシュ基板として用いた石英板の厚さに依存した指数関数的な共鳴周波数特性変化を、理論および実験的に明らかにした。また、この結果より、石英基板の厚さを薄くすることにより、その実効的な誘電率 (屈折率 n) を低くすることができることが分かった。

図 3 に、 $g = 2$ mm、 $a = 0.8$ mm のメッシュに対する基板厚特性の結果を示す。図において、基板厚が 0 の場合 $f_0 = 150$ GHz となり、基板厚が無限大の場合、この周波数が石英板の屈折率 $n = 1.93$ 分だけ下がり、約 78 GHz となる。基板厚を 0 から徐々に増加させると、この周波数間を理論で示された通り指数関数的に変化する。この変化は、金属メッシュ表面に発生したエバネッセント波によって引き起こされている。この結果は、実効的に屈折率の低い基板を、その厚さを薄くすることで実現できることを示している。このことは、本測定法の動作原理より、計測可能な試料の誘電率が、メッシュ基板の誘電率で制限されることから、装置設計において重要な知見で

ある。

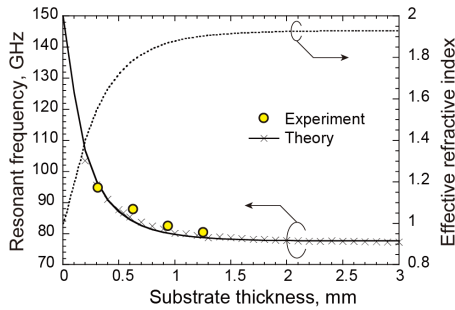


図3 共鳴周波数のメッシュ基板厚依存性

(3) 製作した金属メッシュに対し、誘電率の異なる様々な試料付着特性を実験的に調べ、単位比誘電率変化に対し 9GHz 以上の共鳴周波数変化が得られることを明らかにした。この結果より、 10^{-5} の微小誘電率変化が検出可能であるとの結論を得た。

図4は、 $(g, a, t) = (2 \text{ mm}, 0.8 \text{ mm}, 0.31 \text{ mm})$ のパラメータを持つ金属メッシュに対し、厚さの異なる石英板を密着させたときの共鳴周波数 f_0 の変化を測定した結果である。先に述べたとおり、厚みの異なる石英板は、実効比誘電率が異なるため、付着試料の誘電率変化に対する f_0 の変化を定量評価するのに適している。図より、石英板の厚さ $t = 0.31 \text{ mm}$ のとき $f_0 = 87.3 \text{ GHz}$ 、 $t = 0.73 \text{ mm}$ で $f_0 = 78.6 \text{ GHz}$ となる。図3の結果から、各厚さの実効比誘電率は、それぞれ 2.43、3.31 と見積もられる。これらの値より、比誘電率 1 の変化に対し、 f_0 の変化は 9.8 GHz となる。従って、比誘電率変化が 10^{-5} とすると、その周波数変化は 98 kHz と見積もられる。この周波数変化は、メッシュ単体に対する計測でも十分識別可能な値である。以上の結果は、容量性金属メッシュを用いた計測法により、当初研究目標とした 10^{-5} という微小な誘電率変化の検出が可能であることを示している。

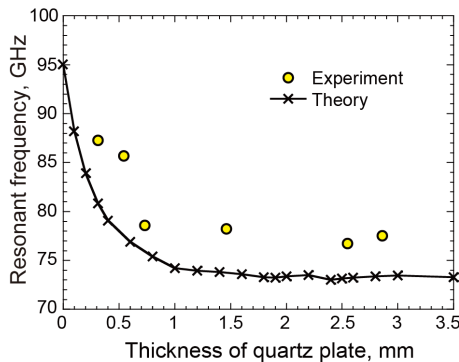


図4 厚さの異なる石英板をメッシュ表面に付着させたときの共鳴周波数変化の測定結果

(4) 容量性金属メッシュを反射鏡として用いたガンダイオード発振器の開発に成功した。

図5に、金属メッシュを用いた発振器において試料付着時の発振特性変化を測定するための実験概略図を示す。発振素子には、周波数 90 GHz から 100 GHz で動作する InP ガンダイオードを用いている。発振器部は、容量性金属メッシュ、ガンダイオードが装着されている標準 W バンド矩形金属導波管、そして両者をつなぐ矩形ホーンカプラで構成されている。発振器からの出力パワーは 20dB 方向性結合器で 2 つに分け、一つは出力パワーを、もう一つはミキサーを介してスペクトラムアナライザで発振周波数を、それぞれ測定した。また、メッシュからの透過波も検出器を用いて同時に測定した。

図6に、 $(g, a, t) = (2 \text{ mm}, 0.8 \text{ mm}, 0.31 \text{ mm})$ のパラメータを持つ容量性金属メッシュを反射鏡として用いたときの発振周波数特性を示す。横軸は、ホーンカプラとメッシュ間の距離である。この結果より、発振器の縦モード間隔 F が約 2 GHz であることが分かる。この値は、メッシュとガンダイオード間の共振器長が約 77mm であることから決定されている。最大出力は、96.5 GHz において 54 mW が得られ、ほぼ設計どおりに発振器製作を完了した。

今回開発した発振器は、図6の結果より分かるとおり、連続的に可変できる周波数範囲が $F = 2 \text{ GHz}$ となる。これが、メッシュへの試料付着時の共鳴周波数変化範囲を制限する。より広帯域な周波数可変範囲を得るためには、メッシュとガンダイオード間の距離を短くすればよく、長さが短いホーンカプラを用いる必要がある。一方、長さが短いカプラは、伝搬損失が増大する。従って、損失が少なく長さの短いカプラの開発は、本計測装置開発における今後の課題の一つである。

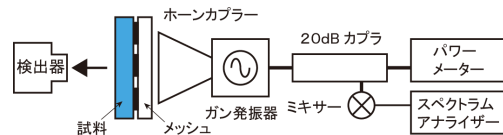


図5 容量性金属メッシュを用いた発振器の構成

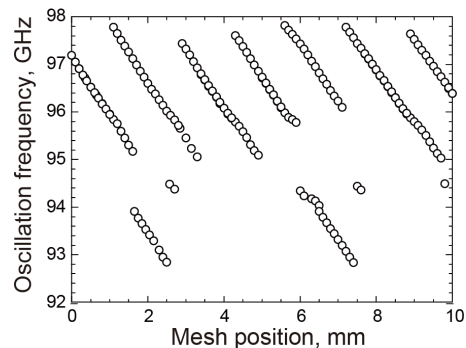


図6 ガンダイオード発振器の出力周波数特性

(5) 発振器部の金属メッシュに種々の水性試料を付着させ、その周波数変化を測定した

結果、本計測方式において、水分を含む試料の計測が可能であることを実験的に立証した。

図7に、エタノールと水をそれぞれ含ました厚さ約 0.3 mm の布をメッシュに付着させたときの発振周波数変化を測定した結果である。この結果より、97 GHz で約 60 dB/mm という激しい吸収特性を有する水をメッシュ表面に付着させても発振は止まらず、測定が可能であることを確認した。

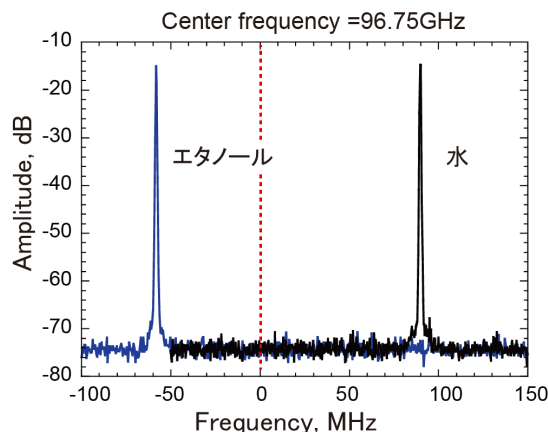


図7 液体試料付着時の発振周波数の変化

(6) 図7で示した実験結果と他の液体試料や誘電体試料付着時の発振特性変化の測定を通して、以下の結果と知見を得ることができた。

誘電体試料や吸収の小さい液体試料付着時に発振周波数は低下し、その変化量は、金属メッシュの反射率の位相変化割合×発振器の縦モード間隔 F で決定される。この発振周波数変化は、メッシュの共鳴周波数変化自体とは一致しない。

試料付着時の大きな共鳴周波数変化は、メッシュの反射率の低下(透過率増加)として現れる。従ってこの変化は、発振器出力と透過波出力の増減を測ることで検出できる。このため、付着試料の吸収率を含めて正しく評価するためには、発振器出力だけでなく透過波の測定が必要不可欠となる。

図7の結果から分かるとおり、水のような強い吸収を示す液体試料付着時には、発振周波数が減少するのではなく増加する。これは、液体試料付着時のメッシュでの反射位相が、吸収が少ない試料とは逆方向に変化するためである。しかし、何故水のような吸収が大きい試料付着時にのみ位相が逆方向に動くかは現在の所不明である。金属メッシュの表面プラズモン共鳴効果独特の特性と考えられるが、その原因究明には異なるパラメータを持つメッシュを用いた詳細な実験が今後必要となる。

メッシュ基板の実効誘電率(～2.43)より小さい誘電率を持つ試料に対しても、発振周波数変化を観測可能であることが実験を通して分かった。

図8は、試料として比誘電率が約1.01の発泡スチロールをメッシュに付着させたときの発振周波数変化を測定した結果である。この結果より、周波数が十分観測可能な約1.2MHz変化していることが分かる。この結果は、発振器を利用した本計測方式の高感度特性を示している。

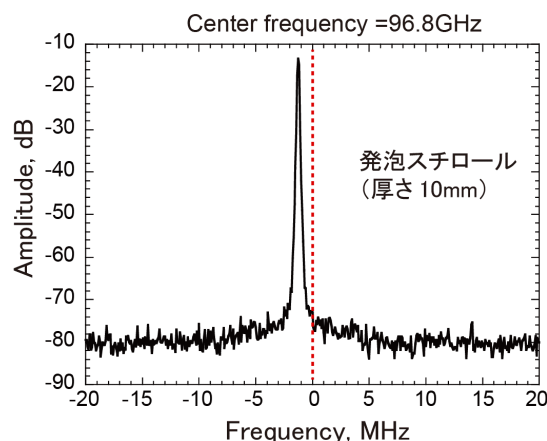


図8 発泡スチロールを試料として付着させたときの発振周波数変化

(7) 今後の展望

本研究を通して、容量性金属メッシュの表面プラズモン共鳴効果を利用した発振器型高感度材料計測法が、従来の計測法に比較し、微小な誘電率差を計測可能にする有用な方法であることを実証した。今後は、発振器の発振周波数、発振出力、透過波出力の各変化と、付着する試料の複素誘電率との関係を明らかにし、定量的な複素誘電率評価が可能になるよう研究を進める予定である。

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は下線)

〔雑誌論文〕(計6件)

菅原智幸、恒川太一、裊鐘石、ミリ波帯における容量性金属メッシュの表面プラズモン共鳴特性、信学技法、査読無、Vol. 116、No. 363、2016、pp. 31-34

T. Nozokido, M. Ishino, R. Seto, J. Bae, Contrast analysis of near-field scanning microscopy using a metal slit probe at millimeter wavelengths、Journal of Applied Physics、査読有、Vol. 118、2015 114905_1-8

〔学会発表〕(計8件)

Taichi Tsunekawa(Jongsuck Bae)、High sensitive measurement method of dielectric constant using a capacitive

metal meshes at millimeter wavelengths、
IEEE-MTTs Midland Student Express 2017
Spring、2017年4月29日、名古屋工業大学
(愛知県・名古屋市)

ベイジョンソク、偏波独立型高速テラヘルツイメージング装置の開発、日本学術振興会第158,125,130,182合同研究会、2016年7月8日、静岡大学(静岡県・浜松市)

菅原智幸(ベイジョンソク)、容量性金属メッシュのミリ波帯表面プラズモン共鳴周波数特性、電子情報通信学会総合大会、2017年3月25日、名城大学(愛知県・名古屋市)

高木康平(ベイジョンソク)、容量性金属メッシュを用いたミリ波帯高感度誘電率測定法、電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会、2015年9月9日、東北大学川内北キャンパス(宮城県・仙台市)

Kohei Takagi(Jongsuck Bae)、Millimeter wave transmission properties and their sensor application of capacitive metal meshes、IEEE Nagoya Chapter Midland Student Express 2015 Spring、2015年4月24日、ウインクあいち(愛知県・名古屋市)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

ベイ ジョンソク (BAE Jongusck)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：20165525

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

高木 康平 (TAKAGI Kohei)

菅原 智幸 (SUGAWARA Tomoyuki)

恒川 太一 (TSUNEKAWA Taichi)