

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 25 日現在

機関番号：81406

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560430

研究課題名(和文) 光変調式誘電体散乱電界センサの開発

研究課題名(英文) Development of electric field sensor with optically modulated scatterer

研究代表者

黒澤 孝裕 (KUROSAWA, Takahiro)

秋田県産業技術センター・その他部局等・主任研究員

研究者番号：60370243

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：高周波電界中に半導体を設置して散乱体とし、そのバンドギャップエネルギーよりも大きなエネルギーを持つ光を照射すると散乱効率を変化させることができる。この特性を利用して散乱波に振幅変調を与え、遠方で受信した散乱波強度に基づいて電界強度を測定する電界センサを提案した。アンドープゲルマニウム基板を散乱体に用いて性能を評価した結果、従来の誘電体散乱電界センサの利点を保ったまま、10倍以上高速な時間応答性を得た。また、マイクロ波帯において金属エレメントを付加した光電界センサと同等の感度を達成した。これに加え、電界の方向、振幅、位相が計測可能なこと、及び、感度と空間分解能を連続的に変化可能なことを示した。

研究成果の概要(英文)：Electric field measurement sensor based on the modulated scattering technique with optically modulated scatterer had developed. A semiconductor is used as the scatterer, and illumination of the semiconductor with photons of energy larger than the band-gap energy of the scatterer, the scattering cross section can modulate. Undoped germanium is used as the optically modulated scatterer, time response of the detection is ten times faster than the previously developed dielectric scatterer system. This sensor obtained almost the same sensitivity of optical electric field sensor with metallic dipole elements in microwave region. This sensor can measure the direction, amplitude, and phase of electric field and can change the spatial resolution with varying the diameter of illuminated light.

研究分野：電気電子工学

科研費の分科・細目：電子デバイス・電子機器

キーワード：電界計測 変調散乱 光変調 誘電体 高周波 電磁環境両立性

1. 研究開始当初の背景

携帯電話や GPS 等、マイクロ波を利用している無線通信システムが普及している。特に自動車関連では、これらマイクロ波帯を利用するシステムに加え、AM、FM、およびテレビ放送波の受信も要求されており、中波からマイクロ波帯までの非常に広い周波数帯を無線通信に利用している。一方、今後普及が見込まれる電気自動車やハイブリッド車には動力用の大電力インバータが搭載されており、これから放射される不要電磁波ノイズが無線通信システムに障害を起こす懸念がある。この電磁波ノイズを抑制するためには、電磁波源近傍から比較的遠方までの3次元電磁界分布を計測し、その発生源を特定することが有用であると考えられる。

これまで、3次元電磁界分布を計測する手法として種々のものが提案されている。例えば、微小コイル等の磁界プローブや微小ダイポールアンテナ、光電界センサ、変調散乱素子等の電界プローブを使用して、空間を掃引することで電磁界を測定する手法が用いられてきた。しかしながら、金属製の信号伝達ケーブルやセンサ自体の金属部分によって測定対象の電磁界が乱れるため、被測定物近傍の電磁界強度を正確に測定することが困難であった。

このような電磁界の乱れを低減するため、非金属製の光ファイバを信号伝達に使用する光電界センサが提案されており、センサ本体の非金属化および2次元像の一括測定が達成されている。しかしながらこの手法で得られる感度は数 V/m 程度であり、電磁波ノイズの波源検出用途に応用するには感度が低い。高感度を意図して金属エレメントを付加した光電界センサも提案されているが、金属体による被測定電磁界の乱れが懸念される。

研究代表者らが提案してきた、誘電体散乱を利用する高周波電界センサは、こういった従来の電磁界測定技術の問題点を解決するものであり、電子機器の放射電磁ノイズを正確に評価することを可能とした。測定原理の概略を以下に述べる。電磁波源が作る電磁界中に誘電体を設置すると分極によって散乱波を放射する。誘電体を機械振動あるいは空間的に回転させることによって誘電体からの散乱波を振幅変調する。この散乱波を遠方に設置したアンテナで受信し、復調することによって散乱波強度を検出する。この散乱波強度に基づいて誘電体設置位置での電界強度を測定可能なセンサ、すなわち完全非金属かつワイヤレスな高周波電界センサを実現した。

一方で、これらの機械的に散乱波を変調する手法の場合、機械系の応答速度によって、変調周波数は数十 Hz に制限される。このため、信号対ノイズ比が十分な条件でも測定系全体の時定数を小さくすることができず、短時間で変動する信号の検出は困難であった。

2. 研究の目的

このような背景のもとに、本研究では、高周

波電界中に設置した誘電体散乱体の誘電率を光変調することによって散乱波を振幅変調し、この散乱体からの散乱波をアンテナで受信し、復調することによって散乱体位置の電界を計測する手法の確立を目指した。

誘電体散乱を利用した電界計測手法は研究代表者らによるものが唯一であり、これまで散乱体を機械振動あるいは回転させることにより散乱波に振幅変調を与えていた。この変調手法を発展させ、散乱体の誘電率自体を変化させて散乱波を振幅変調することで電界計測する手法は実証例が無い。これにより、従来の誘電体散乱を利用した電界センサから機械系による変調周波数の制限を除くことができ、変調周波数も大きくできることから、より高速な測定が可能となる。

3. 研究の方法

本研究では、高周波電界中に設置した誘電体散乱体の複素誘電率を光変調することによって散乱体からの散乱波に振幅変調を与え、その変調散乱波を遠方に設置したアンテナで受信して復調して散乱波強度を検出する。検出された散乱波強度に基づいて、散乱体位置の電界を測定する。

測定系の模式図を図1に示す。既知の電磁波源が作る電磁界中に誘電体散乱体を設置する。この散乱体にある周波数で強度変調した光を入射し、散乱体の誘電率を周期的に変化させる。誘電率の周期的変化によって振幅変調された散乱波を遠方に設置したアンテナで受信し、直交検波器で復調してその電界強度を測定する。同相、直交それぞれの検波器出

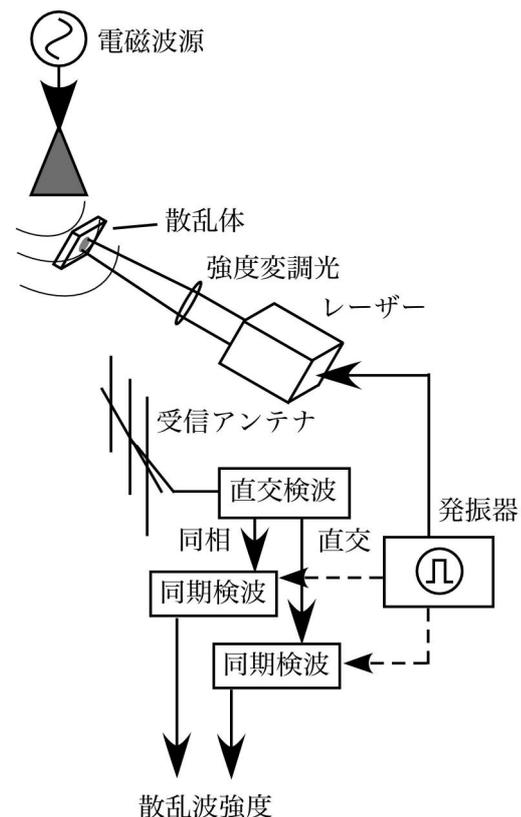


図1. 測定系の模式図

力について、散乱体入射光の強度変化に同期した強度変化を測定することで、振幅変調された散乱波の強度および位相を得る。

散乱体材料には半導体を用いた。半導体はそのバンドギャップより大きな光子エネルギーの光を入射すると電子が伝導体に励起されて導電率が増加する。この導電率増加に伴って誘電損失が増大するため、散乱効率を変化させることができる。半導体は誘電率の実部が異なる様々な材料があり、ドーピングによって誘電損失も制御可能なため、広範囲の物性選択肢が得られる。入射光源には半導体レーザー(波長 638nm)を用い、周波数約 1kHz の矩形波で強度変調した。

電磁波源として近傍界波源にマイクロストリップラインを、遠方界波源にアンテナを使用し、感度、空間分解能などを評価した。

#### 4. 研究成果

##### (1). 近傍界電磁波源を用いた電界センサの性能評価

主に近傍電磁界を生成する波源として整合終端したマイクロストリップライン(MSL)を用い、2GHz の高周波信号を給電した。MSL の線幅は 3mm とした。MSL への給電電力を変化させて散乱波強度を測定した結果を図 2 に示す。散乱体にはアンドープゲルマニウムの単結晶基板(円板形状、直径 25mm、厚さ 0.5mm)を用いた。照射光出力は 5mW または 80mW とし、散乱波強度が最大となるように照射位置を設定した。受信アンテナの偏波方向は MSL の幅方向とした。比較のため、給電電力の平方根に比例する値も実線で併せて示した。

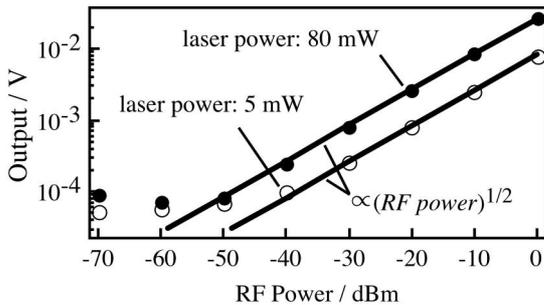


図2. 散乱波強度の給電電力依存性

図から、散乱波強度は給電電力の平方根にほぼ比例することが分かる。給電電力が減少すると散乱波強度も減少し、測定系のシステムノイズレベルに収束する。また、照射光出力が大きい場合、散乱波強度が大きくなる。これらの結果から、近傍界測定の場合、2GHz で-40dBm 程度の通過電力を検出可能といえる。MSL 近傍の電界強度は給電電力の平方根に比例するため、観測された散乱波強度は電界強度に比例すると考えられる。

光照射位置を MSL 幅方向に掃引し、散乱波強度を測定した結果を図 3 に示す。受信偏波方向を MSL の幅方向とした場合、散乱波強度はライン中央で極小値をとり、ライン両端に向かって増加して極大値をとる。ライン

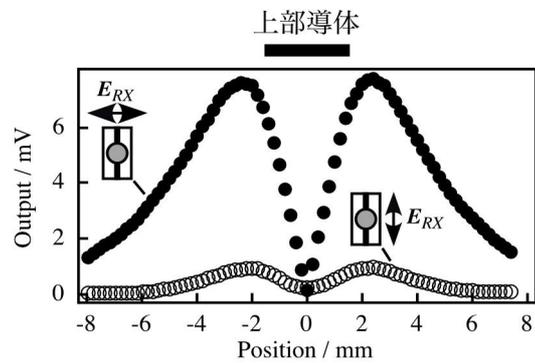


図3. 散乱波強度の光照射位置依存性。

マイクロストリップライン(MSL)の上部導体位置、および、受信アンテナの偏波方向  $E_{RX}$  と MSL 設置方向との関係を併せて示した。

端部よりさらに外側では減少して 0 に近く、一方、受信偏波方向を MSL 長手方向とした場合、散乱波強度は小さくなる。これらの特徴は MSL 近傍の面内電界強度分布に対応しており、今回提案する手法によって近傍電磁波源周辺の高周波電界分布を計測可能なことが分かる。また、散乱波を受信するアンテナの偏波方向によって計測する電界の方向成分を選択可能とした。

散乱体照射光の直径を変え、MSL 近傍の散乱波強度分布を計測した結果を図 4 に示す。それぞれの測定結果は最大値が 1 になるように規格化した。図から、照射光径が小さくなるに従い、極大をとる位置が内側に移動するとともに極大より外側の減少傾向が急峻になることが分かる。このことは、照射光径が小さくなるに従って空間分解能が向上するためと考えられる。すなわち、散乱体照射光の直径を変化させることにより、空間分解能を連続的に変化可能なことが示唆される。

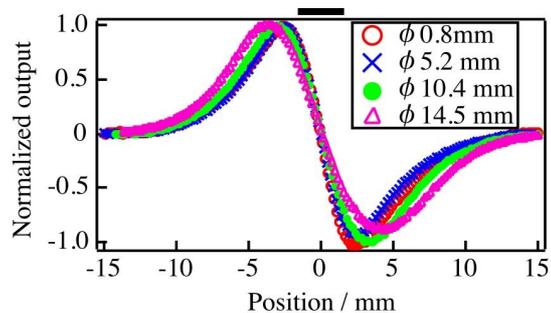


図4. 散乱波強度分布の照射光径  $\phi$  依存性。

電磁波源として開放終端した MSL を用い、MSL の設置位置を掃引して散乱波強度および位相の 2 次元分布を計測した結果を図 5 に示す。MSL 上に生じる定在波の腹、節に対応した散乱波強度分布が観測された。また、MSL 幅方向に対して位相が反転すること、および、定在波の節を境に位相が反転することが分かる。これらの特徴は開放終端線路の近傍電界にみられる特徴と一致しており、MSL 近傍の電界強度および位相が正確に計測可能

なことを示している。

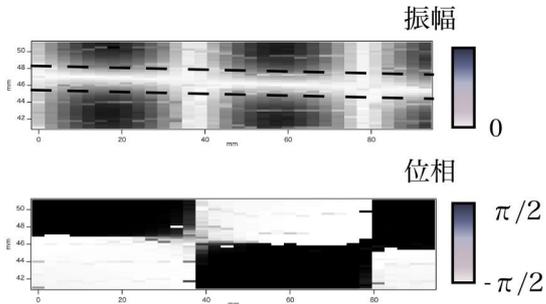


図5. マイクロストリップライン近傍で観測された散乱波振幅および位相の2次元像. マイクロストリップラインの位置を破線で示した.

(2). 遠方界電磁波源を用いた電界センサの性能評価

電磁波源として対数周期ダイポールアレイアンテナを用い、その遠方界中に散乱体を設置した。散乱体には、近傍界計測と同様のアンドープゲルマニウム基板を用いた。照射光の出力は 80mW とした。

散乱体位置の電界強度を変化させて散乱波

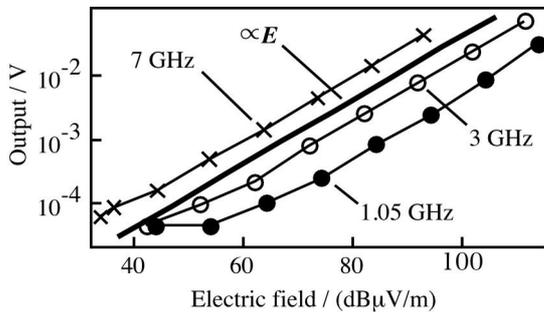


図6. 散乱波強度の電界強度依存性.

強度を測定した結果を図 6 に示す。散乱波強度は散乱体位置の電界強度に比例することが分かる。電界強度が減少すると散乱波強度も減少し、ノイズレベルに収束する。

感度と復調時定数との関係を明らかにするため、散乱波強度の信号対雑音比(SN 比)の復調時定数依存性を測定した。散乱体への印加電界強度を 80dB  $\mu$  V/m とした場合の結果を図 7 に示す。SN 比は復調時定数の平方根に比例することがわかる。印加電界強度を変化

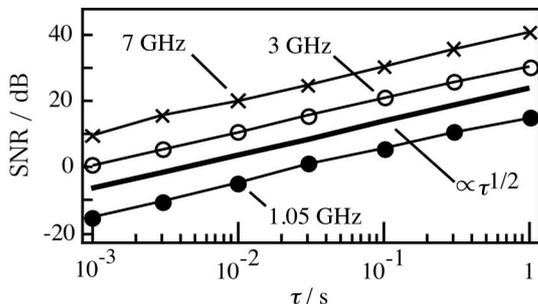


図7. 散乱波強度の信号対雑音比(SNR)の復調時定数 $\tau$ 依存性.

させて同様の測定をしたところ、散乱波強度は電界強度に比例する一方、ノイズレベルは電界強度に依存しなかった。これらのことから、SN 比は印加電界強度に比例して大きくなるとともに、復調時定数の平方根に比例して大きくなると考えられる。

この結果から、復調時定数 1s において SN 比が 0dB となる電界強度を求めると、1.05GHz で 65dB  $\mu$  V/m、3GHz で 50dB  $\mu$  V/m となる。また、復調時定数 3ms での感度は 1.05GHz で 90dB  $\mu$  V/m、3GHz で 75dB  $\mu$  V/m と見積もられる。この感度は、これまで報告されている微小ダイポールエレメントを付加した光電界センサの感度と同程度であり、完全非金属構成のセンサで同等の感度を達成した。また、従来の機械変調式誘電体散乱電界センサと比較して 1/10 以下の小さな時定数での計測が可能であり、短時間で変動する高周波信号も計測できる。

散乱波強度の周波数依存性を図 8 に示す。図から、照射光の直径が大きくなるに従って高感度になることがわかる。また、1-7GHz の範囲で感度を持つこと、および、周波数が

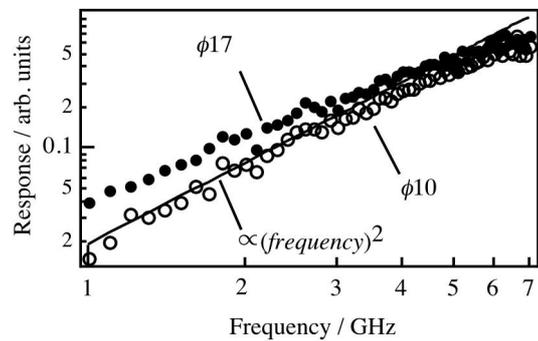


図8. 散乱波強度の周波数依存性.

高くなるに従って高感度となる。このため、今後、電子機器の高動作周波数化に対しても、容易に対応可能なことが期待できる。

(3)まとめ

以上、近傍、遠方、両電磁波源を用いた評価結果から、本研究によって、誘電体散乱体の複素誘電率を光変調することによって散乱体からの散乱波を振幅変調し、散乱波を遠方で受信して復調することにより、高周波電界を計測可能なセンサを構成できることが明らかとなった。これにより、完全非金属構成のセンサによって、高周波電界の方向、振幅、位相を計測可能な新たな手法を提案するとともに、従来の機械変調式誘電体散乱電界センサよりも 10 倍以上高速な変調周波数を達成した。この結果、誘電体散乱電界センサの特長を保ったまま、短時間で変動する信号の計測を可能とした。また、散乱体照射光の直径を変化させることにより、感度および空間分解能を連続的に変化できることが明らかとなった。得られた感度は金属エレメントを付加した光電界センサと同程度であり、本提案手法によって、これより低擾乱な高周波電界計

測を可能とした。

これら本研究成果により、電子機器から生じる不要電磁波ノイズの波源探知や伝搬経路の特定の際に重要な情報となる電磁波源近傍の電界分布を、従来よりも低擾乱かつ高速に測定することが可能となる。また、位相情報も計測できることから、プリント基板上に作成した平面回路やアンテナ等の動作検証も可能である。

#### 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 3件)

- [1] 黒澤 孝裕, 駒木根 隆士, “光学的変調散乱素子を用いた高周波電界計測システム”, 電子情報通信学会誌B, 査読有, Vol. J97-B, No.3, 2014, pp.279-285
- [2] T. Komakine, T. Kurosawa, and H. Inoue, “Electric Field Intensity of Cylindrical Dielectric Probe in Scattering Method for EM Field Measurement”, 2012 Proceedings of SICE Annual Conference, 査読有, Vol. 12PR0001, 2012, pp.412-415.
- [3] T. Kurosawa and T. Komakine, “Electric Field Measurement by using Cylindrical Dielectric Scatterer”, 2012 Proceedings of SICE Annual Conference, 査読有, Vol. 12PR0001, 2012, pp.407-411.

〔学会発表〕(計 7件)

- [1] “マイクロストリップラインの近傍界を利用した光学的変調散乱素子の空間分解能評価”, 黒澤 孝裕, 電子情報通信学会 2013年ソサイエティ大会, 2013.9.19, 福岡工業大学.
- [2] “光学的変調散乱素子を用いた電界センサの GHz 帯における性能評価”, 黒澤 孝裕, 駒木根 隆士, 電子情報通信学会 2013年総合大会, 2013.3.20, 岐阜大学.
- [3] “光学的変調散乱素子を用いた高周波電界の計測”, 黒澤 孝裕, 駒木根 隆士, 電子情報通信学会 2012年ソサイエティ大会, 2012.9.12, 富山大学.
- [4] “Electric Field Intensity of Cylindrical Dielectric Probe in Scattering Method for EM Field Measurement”, T. Komakine, T. Kurosawa, and H. Inoue, 2012 SICE Annual Conference, 2012.8.21, Akita University.
- [5] “Electric Field Measurement by using Cylindrical Dielectric Scatterer”, T. Kurosawa and T. Komakine, 2012 SICE Annual Conference, 2012.8.21, Akita University.
- [6] “電界分布計測による放射ノイズ源の可視化およびノイズ対策事例”, 黒澤 孝

裕, 駒木根 隆士, 電子情報通信学会 2012年総合大会, 2012.3.23, 岡山大学.

- [7] “変調散乱手法による電界計測における干渉波を用いる変調法”, 駒木根 隆士, 黒澤 孝裕, 宮永 和明, 井上 浩, 電子情報通信学会 2011年ソサイエティ大会, 2011.9.13, 北海道大学.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

なし

取得状況(計 1件)

- [1] 名称: 電磁界計測システム  
発明者: 黒澤 孝裕  
権利者:  
種類: 特許  
番号: 特許第4915565号  
取得年月日: 2012年2月3日  
国内外の別; 国内

〔その他〕

ホームページ等

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

黒澤 孝裕 (KUROSAWA, Takahiro)  
秋田県産業技術センター 主任研究員  
研究者番号: 60370243

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし