

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：81406

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04417

研究課題名(和文) 光走査式誘電体散乱電界センサによる高周波電界分布計測

研究課題名(英文) Microwave field distribution measurement with optical scanning dielectric modulated scatterer

研究代表者

黒澤 孝裕 (KUROSAWA, Takahiro)

秋田県産業技術センター・先端機能素子開発部・上席研究員

研究者番号：60370243

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：誘電体散乱波の光変調を利用した変調散乱手法において、変調光位置の走査で高周波電界分布を計測可能とした。マイクロストリップラインの面内電界分布を計測し、周波数10 GHzで-47 dBmの給電信号を検出可能な感度を達成した。散乱体形状や物性と感度や侵襲性との関係を数値計算で検討した結果、高感度および低侵襲性を得るためには、変調光強度の増加、光励起時の電子-正孔対の再結合寿命を大きくすること、および、散乱体厚を小さくすることが有効なことを見出した。また、提案手法の実用性を検証するため、電子機器動作時に放射される電磁波の分布を測定し、回路基板上のLSIチップが不要輻射源であることを特定できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電子機器からの不要電磁波ノイズの低減やアンテナを開発する際に重要な情報となる、電磁波源周辺の電磁界分布を高感度で低擾乱に計測する手法として提案されている完全非金属製の高周波電界センサに光走査方式を導入して、被測定物やセンサ本体を移動させることなく分布測定可能な技術を開発した。これにより高周波分布計測の高速化を達成でき、アンテナ開発や電磁波ノイズによる障害の解決に利用可能な新たな手法を提案できた。

研究成果の概要(英文)：Optical scanning technique is introduced to the microwave electric field measurement system based on the modulated scattering technique with optically modulated semiconductor scatterer. On near field measurements, distribution of the in-plane component on the microstrip line could be measured and the sensitivity of the feeding power was -47 dBm at the frequency of 10 GHz. The sensitivity and invasiveness were calculated from the modulation amplitude of forward scattering field with resistivity modulation of the disk scatterer and calculated from total cross section of it, respectively. Increasing the resistivity modulation amplitude and decrease the thickness of the scatterer is effective for increasing the sensitivity. Measurement of the field distribution on the commercial ethernet switching hub was demonstrated and field emission was come from the LSI chip on the circuit board.

研究分野：電気電子工学

キーワード：電界計測 変調散乱 光変調 光走査 半導体 高周波 電磁環境両立性

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

情報通信においては、従来から用いられてきた AM, FM, および、テレビ放送に加え、携帯電話等のマイクロ波・ミリ波帯を利用する移動通信システムが普及してきており、これに使用するアンテナについては多バンド対応や動的な指向性制御などの高機能化が進められている。こういった高機能アンテナの開発には、アンテナが生成する電磁界の振幅、位相分布を計測できることが望ましい。また、今後普及が見込まれる電気自動車には、各種放送波受信や移動通信システム、ミリ波レーダといった、中波からミリ波までの非常に広い周波数帯におよぶ無線通信システムが搭載されており、動力用の大電力インバータから放射される不要電磁波ノイズによって通信システムに障害を起こす懸念がある。こういった、電子機器からの不要電磁波ノイズの低減やアンテナを開発する際に重要な情報となる、電磁波源周辺の電磁界分布を低擾乱に計測する手法として、半導体散乱体からの散乱波強度を光変調して電界検出する、完全非金属製の高周波電界センサを提案してきた。

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、他の例は報告されていない。特に、誘電体散乱波の光変調を利用した電界計測手法は電磁波と光波との相互変調を利用し、センサ出力を電磁波として伝搬させて検出する新たな計測技術である。この技術を発展させて高周波分布計測の高速化を図ることが出来れば、これまで達成してきた高感度・低侵襲な計測とあわせて、アンテナ開発や電磁波ノイズによる障害の解決に利用可能な新たな手法を提案できると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、電磁波源が作る電磁界中に半導体散乱体を設置し、これに照射する光の位置を走査することによって高周波電界の分布計測を実現することを目的とする。散乱効率の変化が光照射された局所のみで起こるとすると、電界計測位置は半導体散乱体上の光照射位置となる。これにより光走査による電界分布計測が実現でき、被測定物あるいは散乱体を機械的に移動させるよりも高速な電界分布計測が可能になると期待される。

計測システムを構築してマイクロ波帯の高周波電界分布計測が可能であることを示し、感度、周波数特性、校正法、および、分布計測時の侵襲性について検討する。また、市販電子機器が動作する際に放射される電磁波の分布測定による不要輻射の波源特定を行い、提案手法の実用性を検証する。

3. 研究の方法

初めに光走査式変調散乱波測定システムを構築する。模式図を図 1 に示す。既知のマイクロ波帯電磁波源により生成した電磁界中に板状の半導体散乱体を設置し、散乱波を発生させる。この散乱体の局所に、半導体のバンドギャップよりも大きな光子エネルギーをもつ波長のレーザー光を照射する。散乱体上の光照射位置は、光路上に設けた 2 軸可動ミラーを用いて設定する。照射光を 1kHz 程度の低周波で強度変調して散乱体の導電率を周期的に変化させ、

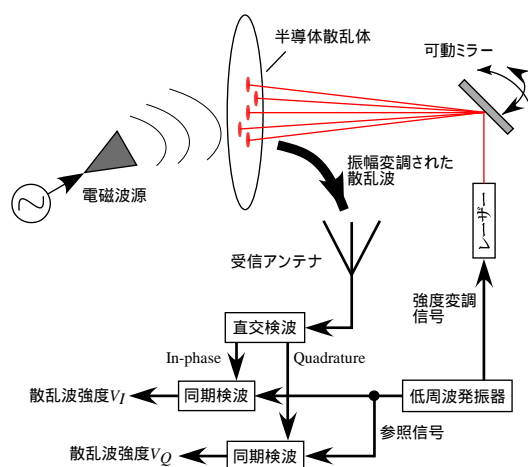


図 1 光走査式変調散乱波測定システム

その導電率変化に伴う散乱効率の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する。受信信号を直交検波器で検波した後、同相・直交の検波器出力について、散乱体入射光の強度変化に同期した成分をそれぞれ抽出し、散乱波振幅および位相を求める。既知の電磁波源としてアンテナ等の遠方界波源やマイクロストリップライン等の近傍界波源を用い、光照射位置の電界強度に対応した強度の散乱波の検出を試みる。次に、構築したシステムの測定結果および数値計算結果を用い、感度、周波数特性、校正法、および、分布計測時の侵襲性について検討する。最後に、市販電子機器が動作する際に放射される電磁波の分布測定による不要輻射の波源特定を行って提案手法の実用性を検証する。

4. 研究成果

図 1 に示した光走査式変調散乱波測定システムを用い、開放終端したマイクロストリップライン(MSL)近傍の面内電界強度を測定した結果を図 2 に示す。測定周波数は 10 GHz および 15 GHz とし、MSL への給電電力は-10.5 dBm とした。MSL 上の定在波分布が明瞭に観測されており、光走査による高周波電界分布の計測に成功した。

測定感度を見積もるため、繰返し測定時の信号振幅電圧の平均値とその標準偏差から SN 比を求めると、周波数 10GHz で 36.5dB が得られた。信号振幅は給電電力の平方根に比例することから、周波数 10 GHz で-47 dBm の信号を検出可能と言える。

次に、振幅・位相特性を計測するための校正手法を検討した。光走査によって分布計測するシステムでは、測定位置と受信アンテナとの相対的位置関係が光走査に伴って変化する。これに伴う散乱波の伝播経路の伝達関数の影響を計測した。周波数 7.1 GHz において MSL 近傍の面内電界の振幅および位相分布を光走査により測定し、測定位置と受信アンテナとの相対位置が固定される機械走査方式での測定結果と比較したところ、散乱波伝播経路の幾何学的な距離変化による影響が確認された。ここで、幾何学的な距離変化の影響は滑らかな変化を示すと考えられる一方、図 2 に示す強度分布には、周波数によって定在波の腹の振幅が異なるなどの急峻な変化が見られる。この原因として、周囲環境からの反射波の影響や受信アンテナの近傍感度分布の影響が考えられる。これらの影響を検討するため、散乱体 - 受信アンテナ間の伝達関数の実測を試みたが、十分な精度での計測は行えなかった。計測法も含め、さらなる検討が必要であり今後の課題としたい。

この測定システムについては、散乱体形状や物性と信号強度や周波数特性との関係が明らかになっておらず、さらなる高感度や低侵襲性を実現するための指針が示されていない。そこで今回は、この測定システムについて FDTD シミュレーションにより感度および侵襲性を検討した。円板形状の半導体散乱体を対象とし、光照射に伴う抵抗率変化量と変調散乱波強度との関係を求めるとともに、散乱の全断面積を用いて侵襲性を評価した。シミュレーションモデルを図 3 に示す。平面波源を電磁波源として散乱体円板に入射した。散乱体のみを囲む直方体表面を近傍 - 遠方変換面および全断面積を求める積分面とし、この変換面上の等価電磁流から遠方界を、Poynting ベクトルの積分値から全断面積を求めた。光照射に伴う散乱体の抵抗率変化を模擬す

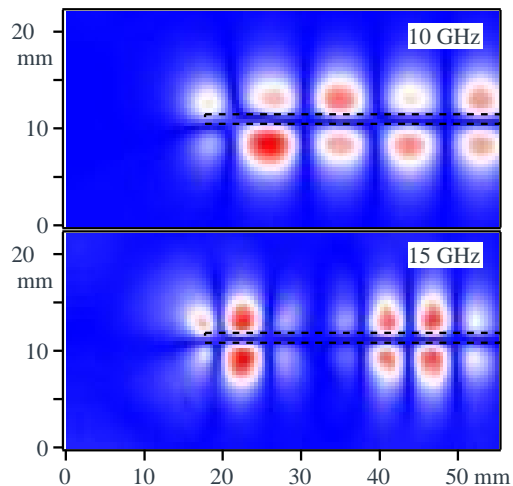


図 2 光走査式変調散乱波測定システムを用いて測定した開放終端マイクロストリップライン近傍の面内電界強度分布。ライン上部導体の外形を破線で示した。

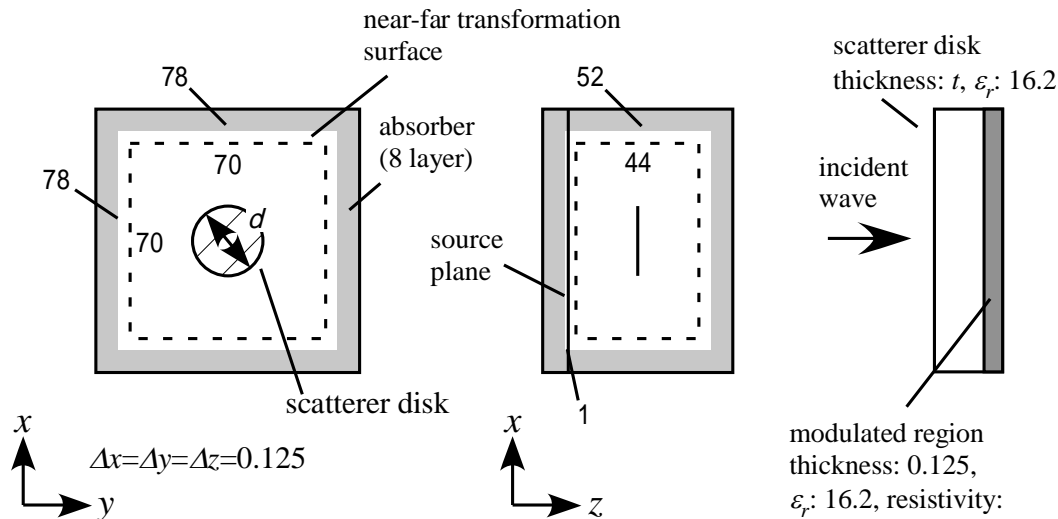


図 3 光変調散乱波測定システムのシミュレーションモデル

るため、散乱体の一方の表面が有限の抵抗率を持ち、それ以外の部分を無損失とした際に生じる前方散乱波強度を求め、全体が無損失の散乱体から生じる前方散乱波強度との差から変調散乱波強度を評価した。散乱体に光照射した際の抵抗率を半導体の物性値に基づいて推定する簡便な式を導くことにより、散乱体物性と信号強度との関係を明らかにした。

図 4 に計算された変調散乱波強度の周波数特性を赤線で示す。光照射領域の抵抗率は散乱体材料と測定条件に基づいた推定値とした。比較のため、実測値を黒線で併せて示した。実測値と計算値とはおおむね一致しており、提案したモデルにより測定システムを解析可能であるといえる。

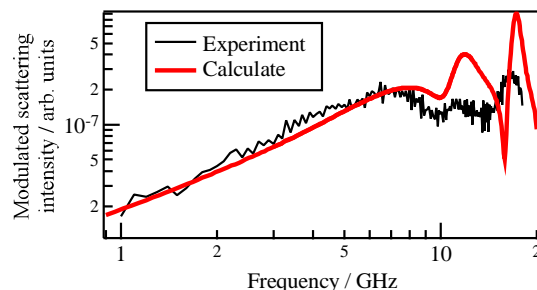


図 4 変調散乱波強度の周波数特性

光照射領域の抵抗率を変化させて同様の計算を行ったところ、信号強度は抵抗率に反比例する一方、周波数特性はほとんど変化しない。また、侵襲性の目安とした散乱体の全断面積は抵抗率にほとんど依存しなかった。このことから、散乱体を光照射した際の抵抗率を小さくすることにより、侵襲性をほとんど変化させずに高い測定感度を実現できると考えられる。光照射時の抵抗率低減には、単位面積当たりの照射光強度を多くする、あるいは散乱体を光励起した際に生成する電子 - 正孔対の再結合ライフタイムを大きくすることが有効なことを明らかにした。

散乱体厚さを変化させて変調散乱波強度の周波数特性を評価した結果を図 5 に示す。いずれの散乱体厚さにおいても、変調散乱波強度は周波数が大きくなるに従って増加して極大値をとり、これより高い周波数ではピーク・ディップを繰り返す特性を示した。極大値より低い周波数では、散乱体厚さが減少するに従って変調散乱波強度は増加した。一方、散乱体の断面積は散乱体厚の約 1.5 乗に比例した。これらのこと

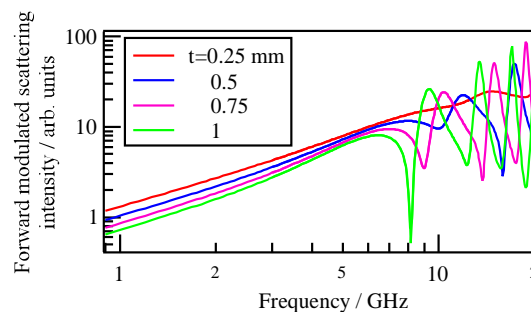


図 5 変調散乱波強度の散乱体厚依存性

から、散乱体の厚さ減少は測定感度の向上とともに侵襲性も低減でき、測定システムの性能向上に効果的であることを明らかにした。

散乱体直径を変化させて同様の評価をしたところ、変調散乱波強度はほぼ散乱体直径の 2.5 乗に比例して増加した。一方、全断面積は散乱体直径の 4 乗から 5 乗に比例して増加した。散乱波強度の次元と全断面積の次元と考慮すると、散乱体直径の増加による感度向上と侵襲性の悪化は同程度とみなすことができる。従って、所望の感度が得られる範囲で散乱体直径を減少させることによって、侵襲性を低減できると考えられる。

最後に、提案手法の実用性を検証するため、市販電子機器が動作する際に放射される電磁波の分布測定による不要輻射の波源特定を行った。供試機器にはギガビットイーサネットハブの回路基板を用いた。散乱体には直径 102 mm、厚さ 0.5 mm のアンドープシリコン基板を用い、発泡スチロール製スペーサ(厚さ 3 mm)を介して回路基板上に設置した。シリコン基板上に周波数 1025 Hz で強度変調したレーザー光(波長 638 nm、強度 80 mW、照射径 2mm)を照射して変調散乱波を検出した。散乱体上の光照射位置を光路上に設けた 2 軸可動ミラーを用いて走査することにより、高周波電界強度の分布を計測した。

周波数 2.5 GHz で観測された電界強度分布を図 6 に示す。機器外観と比較すると、基板上的 LSI チップ直上 4 隅で電界強度が大きくなっていることが分かる。これ以外の領域では電界強度は非常に小さかったことから、LSI チップが主な放射源となっていることが明らかとなった。

この結果から、光走査による電界分布計測の実現とともに、今回提案した手法を不要輻射の波源特定にも応用できることを明らかとした。これにより、被測定物あるいは散乱体を機械的に移動させるよりも高速な電界分布計測を可能とし、これまで達成してきた高感度・低侵襲な計測とあわせて、アンテナ開発や電磁波ノイズによる障害の解決に広く応用可能な手法を提案できた。

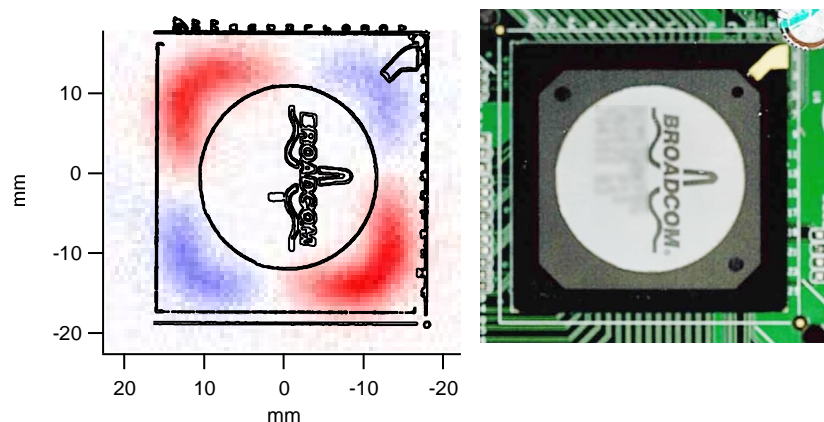


図 6 周波数 2.5 GHz において観測された供試機器基板上的電界強度分布。機器外観を併せて示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 黒澤 孝裕
2. 発表標題 光変調散乱素子における信号強度の散乱体抵抗率依存性
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会 ソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 黒澤 孝裕
2. 発表標題 光変調散乱素子を用いた高周波電界計測システムのFDTD法による性能評価
3. 学会等名 2021年10月電子情報通信学会 環境電磁工学研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 黒澤 孝裕, 駒木根 隆士
2. 発表標題 光変調散乱技術を用いた高周波電界センサの開発とEMCスキャナへの応用
3. 学会等名 電子情報通信学会光応用電磁界計測特別研究専門委員会第6 回研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黒澤 孝裕, 駒木根 隆士
2. 発表標題 光走査式変調散乱素子を用いた電界分布計測の定量性評価
3. 学会等名 2019年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋 徹, 駒木根 隆士, 佐藤 可奈, 菅原 英子, 黒澤 孝裕, 亀田 幸則, 吉田 尚弘
2. 発表標題 油品質評価のためのマイクロ波散乱スペクトラム分析手法
3. 学会等名 2019年4月電子情報通信学会 環境電磁工学研究会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関