

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：81406

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06124

研究課題名(和文)パルス光変調による誘電体散乱電界センサの広周波数帯域化

研究課題名(英文)Wide frequency range electric field measurement with pulse amplitude modulated scattering technique

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・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) 3,700,000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できる。この現象を利用して散乱波に変調を与え、遠方で変調散乱波を受信して電界を計測する光変調式誘電体散乱電界センサについて、周波数特性を計測し、また、半導体のキャリア寿命とセンサ性能との関係を明らかとした。その結果1-18GHzの周波数の電界計測を達成した。また、短パルス光励起による散乱波のパルス変調および高周波電界計測が可能であることを示すと同時に、散乱体のキャリア寿命が短いほど計測の時間分解能が向上すること、キャリア寿命が長いほど高感度となることを明らかとした。

研究成果の概要(英文)：Microwave electric field measurement system based on the modulated scattering technique with semiconductor scatterer has been developed. The scattered wave by the scatterer was modulated with the light which has higher energy than the band-gap energy of the semiconductor. By using undoped germanium disk as the scatterer, microwave field could be detected in the frequency range of 1-18 GHz. The field also can be measured with short pulse amplitude modulation. The modulated pulse width is 12.7 ns at 3.7 GHz. This leads that time resolution with a few tens nanoseconds of the field measurement will be achieved. The short carrier lifetime of the scatterer gives high time resolution and the long carrier lifetime gives high sensitivity on field measurement.

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 半導体 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、マイクロ波帯を利用する無線通信システムが普及している。特に自動車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機や障害物検知用のミリ波レーダも搭載されており、中波からミリ波までの非常に広い周波数帯を無線通信に使用している。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。電磁波ノイズの障害防止には、電磁波源近傍の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。

このような測定に用いるプローブの性能としては、分布計測を可能とする感度および空間分解能をもつことが必要である。これに加え、信号伝送路やプローブ自体による被測定電磁界の乱れを抑えることが望ましい。信号伝送路による電磁界の乱れを低減するため、光ファイバを信号伝送路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や広周波数帯域化が進められている。しかしながら、センサ本体を完全非金属構成とした場合、得られる感度は 1V/m 程度であり、出力数 mW の通信システムの評価や電磁波ノイズの波源検出用途に応用するには感度が不足する。

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、従来の電磁界測定技術の問題点を解決するものであり、電界分布を高感度かつ低擾乱で測定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散乱体を設置すると分極によって散乱波を放射する。散乱波に振幅変調を与え、こ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することで散乱波強度を検出する。この散乱波強度に基づいて散乱体設置位置での電界強度、位相、方向を測定可能なセンサ、すなわち完全非金属構成かつワイヤレスな高周波電界センサを実現できる。

半導体を散乱体に用い、そのバンドギャップよりも大きな光子エネルギーをもつ光を照射するとキャリアが励起されて導電率が増加するため、散乱効率を局所的かつ選択的に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る光変調式誘電体散乱素子を作成し、これからの散乱波を検出して電界計測を行った。散乱体にアンドープゲルマニウムを用い、変調周波数 1kHz で性能を評価した。この結果、遠方界に対し

ては 1GHz で 65dB μ V/m の電界強度を検出可能な感度を持ち、近傍界では 2 GHz で -40 dBm の通過電力が検出できることを示した。すなわち、マイクロ波帯において、金属ダイポールエレメントを付加した光電界センサと同程度の感度を完全非金属構成で達成した。また、1-7 GHz の周波数範囲で散乱波強度を測定することにより、散乱波強度は周波数の 2 乗に比例することを実験、理論両面から明らかにした。

一方で、検出感度と密接な関係がある散乱波強度と散乱体の物性との関係は明らかになっておらず、高感度やより高速な応答を図るための指針が得られていない。これに伴い、原理的に感度が低下する低周波領域での感度向上を図る手法は明らかになっておらず、計測周波数の広帯域化は図れていなかった。

2. 研究の目的

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。この技術においては、光励起に伴う散乱体の導電率の変化量およびその時間応答が重要となる。そこで、導電率変化量および時間応答に関係する物性である半導体のキャリア寿命に着目し、これとセンサ性能との関係を明らかにするとともに、計測可能な周波数範囲の拡大を目指す。具体的には、

(1) キャリア寿命と変調散乱波強度との関係
変調散乱波強度は光照射に伴うキャリア密度の増加量に依存するため、半導体のキャリア寿命と密接な関連がある。従って、散乱体に用いる半導体のキャリア寿命を実測し、これと散乱波強度との関係を明らかにすることによって、高感度が得られる散乱体物性を明らかにする。

(2) キャリア寿命と散乱波強度の変調周波数依存性との関係

キャリア寿命は光変調の周波数特性に影響を及ぼし、キャリア寿命が短いほど高い周波数での光変調が可能となると考えられる。従って、実測した散乱体のキャリア寿命と散乱波強度の変調周波数依存性との関係を明らかにすることによって、高速変調を可能とする条件を見出す。

(3) 短パルス光励起による散乱波のパルス変調および被測定電界の検出

ここまでの検討で見出した高速変調に回答可能な材料を使用し、短パルス光照射によるキャリア励起でパルス変調された散乱波が生成することを実証する。この結果に基づき、パルス励起で生成する散乱波のスペクトルとキャリア寿命の関係、および、被測定電界の周波数、位相と散乱波スペクトルとの関係を明らかにし、パルス光励起によって被測

定電界の周波数，振幅，位相を計測できることを示す．

(4) 短パルス光励起により，低周波に対する感度が向上できることを明らかにする
 被測定電界の周波数より高い周波数成分を含む短パルス光変調によって被測定電界の周波数が高い周波数に変換されるため，散乱波強度が大きくなることが推察される．そこで，上記(1)-(3)で得られた関係から，従来の誘電体散乱を利用した電界計測手法で感度が低下する低い周波数での感度向上を実現できる条件を見出す．その結果から，散乱体の短パルス光励起を利用して，誘電体散乱による電界測定が適用可能な周波数範囲を拡大できることを明らかにする．

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 および図 2 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．この散乱体に強度変調した光を入射し，散乱体の誘電率を変化させる．誘電率の変化によって振幅変調された散乱波をアンテナで受信し，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．

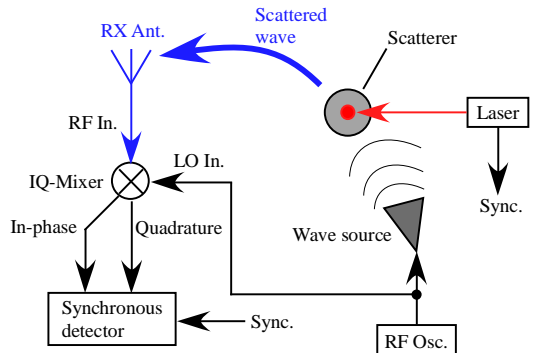


図 1 バイスタティック配置による測定系のブロック図

この際，電磁波源と散乱波受信に異なる 2 つのアンテナを使用するものをバイスタティック配置，電磁波源と散乱波受信アンテナを送受兼用としたものをモノスタティック配置と呼ぶ．バイスタティック配置では散乱体および送受信アンテナ，三体の結合を疎にできるため，散乱体に加わる電界を精密に制御可能である．一方モノスタティック配置の場合，散乱体を波源近傍に設置することで送

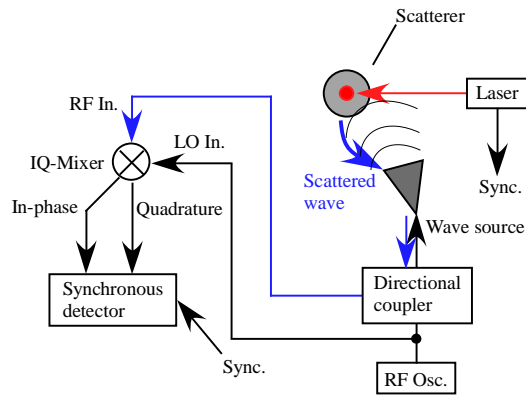


図 2 モノスタティック配置による測定系のブロック図

受信アンテナと散乱体との結合が密になり，高感度が得られるとともに外乱の影響を低減できる．

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フォトン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．入射光源にはダイオードレーザー(波長 638nm, デジタル変調可能, 最大変調周波数 250 MHz)または半導体パルスレーザー(波長 1064nm, パルス幅 0.8ns, パルスエネルギー $14\mu\text{J}$)を用いた．

4. 研究成果

散乱波をパルス振幅変調する際のパルス幅と周波数帯域には密接な関係があり，周波数帯域が広いほどパルス時間幅を小さくできる．そこで，変調散乱手法による電界計測の周波数特性を計測し，検出可能な最短パルス幅を見積もった．

散乱波測定系はバイスタティック配置とした．散乱体にアンドーゲルマニウム基板(円板形状，直径 25mm, 0.5mm 厚)を用い，ダブルリッジガイドホーンアンテナから放射される遠方電磁界中に設置した．散乱体には周波数 1kHz の矩形波で強度変調したダイオードレーザーを照射し，光強度変化に同期した散乱波の振幅変調成分をロックインアンプで検出した．

前方散乱波強度の周波数依存性を図 3 に示す．測定周波数の範囲は 1 - 18GHz，波源への給電電力は 0dBm とした．図から，測定範囲全域で散乱波を検出でき，本システムは 18 GHz での高周波電界を計測可能なことが明らかとなった．散乱波強度は周波数が増加するに従って増加し，約 6GHz で飽和する．これより高い周波数では概ね一定値をとり，その周辺でうねりを生じる特性となった．

こういった周波数特性を示す要因を明らかにするため、散乱波の E 面および H 面指向性特性を測定した。周波数 2 GHz および 6 GHz の場合、E 面指向性は 8 の字特性を示すとともに H 面はほぼ無指向性となった。この結果から、散乱体寸法が被測定電界の半波長より小さい場合、ダイポール散乱体と同様に動作すると考えられる。

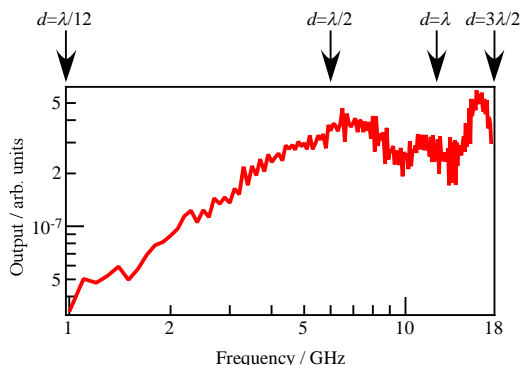


図 3 前方散乱波強度の周波数依存性．縦軸は散乱波強度を散乱体位置の電界強度、受信アンテナ係数、および、受信系のケーブル損失で規格化した値．散乱体直径 d と高周波電界の波長 との関係併せて示した．

一方、周波数特性にうねりが見られた領域である 11 GHz および 17GHz で指向性を測定したところ、E 面はほぼ 8 の字特性、H 面は周波数によって異なる複数のローブが伸びる特性となった。真空中の波長と散乱体直径とが等しくなる周波数は 12 GHz であることから、円板散乱体の直径が半波長程度より大きい場合、散乱体はダイポールとみなせなくなり、H 面指向性に強い影響が現れることが明らかとなった。

これらの結果から、少なくとも 1 - 18GHz の周波数範囲で電界計測が可能であることを明らかにした。円板散乱体の直径が測定電界の半波長より大きい場合、散乱波強度は概ね一定値を取るとともに、散乱波の H 面指向性が周波数によって大きく変化することが明らかとなった。測定可能な周波数帯域から、散乱波をパルス変調する際の最短パルス幅は 60ps 以下と見積もられる。

キャリア寿命と変調散乱波強度との関係を明らかにするとともに、短パルス光励起による散乱波のパルス変調および被測定電界の検出が可能であることを示すため、キャリア寿命の異なる半導体散乱体を用いて散乱波強度を計測した。

散乱体材料にはアンドープゲルマニウム基板（キャリア寿命 30ms）、および、ひ化ガリウム基板（キャリア寿命 8ns）を用いた。キャリア寿命の計測には図 2 に示すモノスタティック配置の散乱波計測系を用いた。電磁

波源にマイクロストリップラインを用いて直上に散乱体を設置した。散乱体にパルスレーザー光を照射した際の高周波反射率（周波数 2GHz）の時間変化を計測することでキャリア寿命を求めた。

次に、散乱体を近傍波源であるマイクロストリップライン直上に設置し、図 1 に示すバイスタティック配置で遠方に伝播する散乱波の検出を試みた。散乱体にひ化ガリウム基板を用い、パルスレーザー光を照射した際に検出された散乱波強度を図 4 に示す。

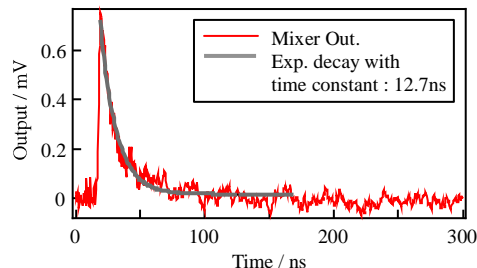


図 4 ひ化ガリウム散乱体を用い、周波数 3.8GHz で観測された散乱波出力の時間波形．灰線は指数関数的減衰関数で fitting した結果．

散乱波強度はパルス光照射に伴って立ち上がった後、指数関数的に減衰する。これは、パルス光照射によるキャリア密度の増加と、その後のキャリア脱励起に伴う減衰に対応する。減衰時定数は 12.7ns であり、高周波反射率の時間変化から求めたキャリア寿命とおおむね一致した。

この散乱体を用い、マイクロストリップライン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 5 に示す。散乱波強度は図 4 に示すパルスを時間領域でゲート積分することで求めた。積分ゲートの時間幅は 20 ns とし、1000 パルス積算することにより散乱波強度を求めた。

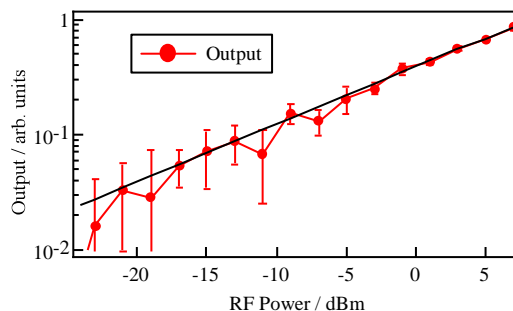


図 5 散乱波強度の充電電力依存性．横軸はマイクロストリップラインへの給電電力．実線は給電電力の平方根に比例する値．エラーバーは 4 回測定時の標準偏差．

図から、散乱波強度は給電電力の平方根に比例することがわかる。マイクロストリップライン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。繰り返し測定時の信号強度と標準偏差から感度を見積もると、-17 dBm の通過電力を計測可能であると言える。

同様に、アンドープゲルマニウム基板を用い、積分ゲート幅は 20ns として検出感度を評価した。その結果、-50dBm の通過電力を検出できた。このことから、散乱波強度は散乱体材料のキャリア寿命が長いほど強くなることが明らかとなった。

これらの結果から、短パルス光励起による散乱波のパルス変調および被測定電界の検出が可能であることを明らかとした。ひ化ガリウム散乱体で生成されたパルス変調散乱波は 12.7ns で減衰することから、数十 ns の時間分解能での電界計測が可能となることが期待される。

パルス光変調散乱波による定常電界の検出を試みた。近傍電界源として直流バイアスされたコプレーナウェーブガイドを用い、直上にひ化ガリウム散乱体を設置した。生成したパルス変調散乱波をモノスタティック配置で、DC ブロックを介して検出した。電界強度 10kV/m で検出されたパルス光変調散乱波を図 6 に示す。バイスタティック配置で同様の測定を行い、遠方に伝播する散乱波の検出を試みたが、検出できなかった。このことから、定常電界から生成して遠方に伝播する変調散乱波は高周波電界から生成するものよりも非常に弱いことが予想される。

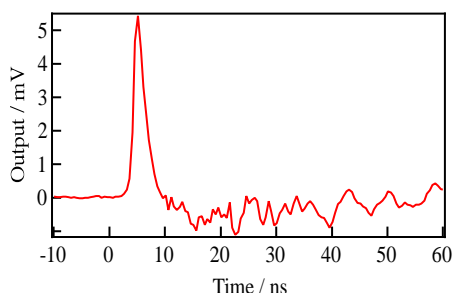


図 6 定常電界から生成されたパルス光変調散乱波。印加電界強度 10kV/m。

以上、誘電体散乱波の光変調を利用した電界計測手法について、18 GHz までの高周波電界を計測可能なことを示し、散乱体寸法が被測定電界の波長より大きい領域でも電界計測が可能となることを明らかとした。また、光励起に伴う散乱体の導電率変化量および時間応答に関する物性である半導体のキャリア寿命に着目し、これとセンサ性能との関係を計測した。短パルス光励起による散乱波のパルス変調および被測定電界の検出が可能であることを示すとともに、キャリア寿命と感度および時間分解能との関係を明らかにした。

その結果、散乱体のキャリア寿命が短いほど計測の時間分解能は向上する一方、キャリア寿命が長いほど高感度となることが示された。

また、定常電界から生成するパルス変調散乱波に関しては、近傍界では検出できた一方、遠方に伝播する変調散乱波は高周波電界から生成するものよりも非常に弱いことが予想された。散乱波の生成メカニズムが定常電界と高周波電界とでは異なることが考えられ、パルス変調による周波数変換を利用して散乱法で検出可能な周波数範囲を拡大する試みに関しては、今後さらなる検討が必要であろう。

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 0 件)

〔学会発表〕(計 8 件)

1. “モノスタティック配置による散乱マイクロ波スペクトルを用いた油劣化評価系”，高橋 徹，佐藤 可奈，菅原 英子，黒澤 孝裕，駒木根 隆士，2018 年電子情報通信学会総合大会 B-4-41，2018 年。
2. 変調散乱素子を用いた高周波電界のパルス変復調計測”，黒澤 孝裕，駒木根 隆士，2017 年電子情報通信学会ソサイエティ大会 B-4-39，2017 年。
3. “イットリウム鉄ガーネットの磁化ダイナミクスを利用した高感度磁気センシングの基礎検討”，神田 哲典，室賀 翔，遠藤 恭，黒澤 孝裕，日本磁気学会學術講演会 2017 年。
4. “Microwave Field Measurement by using Semiconductor Scatterer with Optical Modulation”，T. Kurosawa，International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2016)，” 2E3-1，2016 年。
5. “光学的変調散乱素子を用いた高周波電界計測システムの周波数特性”，黒澤 孝裕，2016 年電子情報通信学会ソサイエティ大会 B-4-35，2016 年。
6. “液体試料中の混入物に対する散乱マイクロ波応答スペクトラム”，鈴木 耕也，黒澤 孝裕，駒木根 隆士，2016 年電子情報通信学会ソサイエティ大会 B-4-39，2016 年。

7. “劣化油の散乱マイクロ波スペクトル特性”, 鈴木 耕也, 黒澤 孝裕, 駒木根 隆士, 2016 年電子情報通信学会総合大会 B-4-36, 2016 年.
8. “光学の変調散乱素子を用いた LSI チップ上の高周波電界分布計測”, 黒澤 孝裕, 2016 年電子情報通信学会総合大会 B-4-58, 2016 年.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)
なし

取得状況(計 0 件)
なし

〔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: 6 0 3 7 0 2 4 3

(2)研究分担者
なし

(3)連携研究者
なし

(4)研究協力者
なし