

ダイヤモンドを使って電磁波を可視化する新しい方法を開発

本研究では、電磁波イメージングに用いる材料として、ダイヤモンド窒素-空孔(NV)センターに着目し、これにマイクロ波パルスシーケンスを照射してスピンロッキングを行い、電磁波強度をダイヤモンド NV センターの量子スピン状態を介して広視野光学顕微鏡上に像を取得することにより、高い空間分解能での電磁波イメージングに初めて成功しました。

電磁波イメージングの空間分解能は、広視野光学顕微鏡の分解能で決まります。従来の微小アンテナや電磁波センサアレイを用いた手法では mm (ミリメートル) オーダーであった空間分解能は、本研究により3桁改善された μm (マイクロメートル) オーダーを達成しました。

電磁波イメージング技術は、今後高い空間分解能での検査技術が求められる、5G やこれに続く 6G といった高速無線通信帯域における、高密度に実装された高周波デバイス、高周波回路等からの電磁波強度や誘電率の可視化技術への貢献が期待される。

研究代表者

名古屋大学大学院工学研究科

柏谷 聡 教授

筑波大学数理物質系

野村 晋太郎 准教授

研究の背景

医療や創薬、そして新素材やエレクトロニクス技術開発、さらに、通信機器や情報処理機器分野等における品質管理や計測に、非破壊・非侵襲による検査への要求があります。例えば、「医療や創薬分野」において、将来医療の鍵とされる「超早期医療診断」構想には、分子レベルでの診断と創薬支援を戦略の柱としており、それを実現させるための、1分子計測・イメージング技術のブレークスルーが不可欠となっています。さらに、「通信機器や情報処理機器分野」においては、5G（第五世代移動通信システム）によるワイヤレス技術の利活用が急速な広がりと進歩を遂げ、既に10年後の6Gを見据えた、「新素材・エレクトロニクス技術」開発もスタートしています。その中、これらを支える高周波技術は、現在の5Gの3.5 GHz~28 GHzから将来の6Gでは100 GHz以上となり、超高周波や超高密度化による部品の実装検査(電波干渉防止のためのシールド、誘電体基板や材料レベルでの電気エネルギー損失による部材の発熱や故障)が課題となっており、検査技術の高度化への要求は一段と増しています。

現在、非破壊・非侵襲検査技術の基盤となるのが、電気、磁気、電磁波などの電磁界の状態（物理現象）や情報（空間や時間）を科学的原理を応用して読み取り、その強度や分布を高感度に高空間分解能でセンシングすることにあります。実際、非可視光領域での電磁波イメージング^{注1)}として、マイクロ波領域のレーダー、超伝導量子干渉計（SQUID）やトンネリング磁気抵抗（TMR）素子をセンサとする磁気イメージング装置や赤外線、紫外線領域の赤外線・紫外線カメラ、X線領域のX線CTなどが活躍しています。電磁波イメージングのための素子としては、これまで、微小アンテナや電磁波センサアレーが用いられてきましたが、電磁波イメージの画素数はセンサのサイズや配線の本数で制限されること、センサ間およびセンサと測定対象物間の相互干渉の影響を排除できないこと等の課題がありました。一方、量子センシング^{注2)}のための材料として期待されているダイヤモンドNVセンター^{注3)}は、ナノメートルサイズからスケラブルなセンシングと光によるダイヤモンドNVセンターの量子スピン状態の読み出しを可能とする特徴をもっています。そこで本研究チームは、電磁波の強度分布をダイヤモンドNVセンターの量子スピン状態^{注4)}に転写し、その量子スピン状態を広視野光学顕微鏡上に像として取得することにより、微弱な電磁波の空間分布を可視化する手法を開発しました。

研究内容と成果

本研究では、ダイヤモンド中の表面近傍に形成した多数のダイヤモンドNVセンターを電磁波センサとして用い、これにマイクロ波パルスシーケンス^{注5)}を照射してスピンロッキング^{注6)}を行い、電磁波強度をダイヤモンドNVセンターの量子スピン状態を介して広視野光学顕微鏡に像を取得することにより、電磁波強度分布を高感度イメージとして可視化することに成功しました（図(a-c)）。具体的には、マイクロ波平面アンテナからダイヤモンドに照射するマイクロ波駆動パルスの強度を特定の値に設定して、検出する電磁波の周波数を選択します。このスピンロッキングにより、量子スピンは周囲の環境の電磁波ノイズから遮断され、量子コヒーレンス^{注7)}が保たれるコヒーレンス時間^{注7)}を100倍以上に延長することに成功しました。その結果、量子センシングの感度が向上し、マイクロ波パルスシーケンスによって選択された周波数の電磁波を高感度に検出することが可能となりました。

実際の測定環境下では、測定視野内においてマイクロ波強度の分布がどうしても生じます。このことがマイクロ波パルスシーケンスによる量子スピン状態の制御の精度を劣化させ、測定感度の低下を招くという課題がありました。この課題を克服するために、マイクロ波パルス強度エラーによる影響を緩和するマイクロ波複合パルス^{注8)}を用いました（図(d)）。このマイクロ波複合パルスを導入することにより、実際にマイクロ波パルス強度エラーによる影響が低減し、その結果、マイクロ波パルス強度が他の電子部品

等の影響を受けてさまざまに変化する現場の環境下において、測定精度が向上することが実証されました。

本技術は、電磁波の強度分布が転写された量子スピン状態を広視野光学顕微鏡上に像として光学的に取得する手法を用いました。ダイヤモンド NV センターを十分高い密度で二次元的に形成し、それらをセンサとして用いました。それぞれのダイヤモンド NV センターに読み出しのための配線をする必要はなく、電磁波イメージの画素数は、センサの配線の本数で制限されなくなりました。さらにダイヤモンド NV センターのサイズは 0.2 nm 以下と小さく、センサと測定対象物をナノメートル程度と極めて近接できるため、測定対象物から発せられる電磁波をセンサに高い空間分解能で転写することが可能となりました。その結果、検出される電磁波の解像度は光学顕微鏡の解像度で決まり、電磁波のイメージング手法としての優れた特徴を実証しました。その一例として、シリコン基板上に形成した幅 10 μm の金属細線に周波数 15 MHz の微弱電磁波を印加し、その周囲に発生する電磁波強度の空間分布を μm オーダーの空間分解能でイメージングしたところ、金属細線の両端において電磁波の強度が大きくなっている様子が観測されました。これにより金属薄膜表皮効果による電磁波の強度分布が明らかにされました。本技術を用いて、このような金属薄膜の膜質によって電磁波シールドの効率がどのように影響を受けるかの研究が可能となりました。

今後の展開

本研究成果は、MHz 帯からサブミリ波帯までの広いレンジに適用が可能であり、それに加えてダイヤモンド NV センサーを使わない手法では実現できなかったマイクロメートルオーダーの高空間分解能で電磁波強度の分布を可視化するための新しい手法を提供するものです。今後、ポスト 5G に向けた高密度に実装された高周波デバイス、高周波回路等からの電磁波放射や誘電率の可視化技術に広く寄与すると考えられます。

参考図

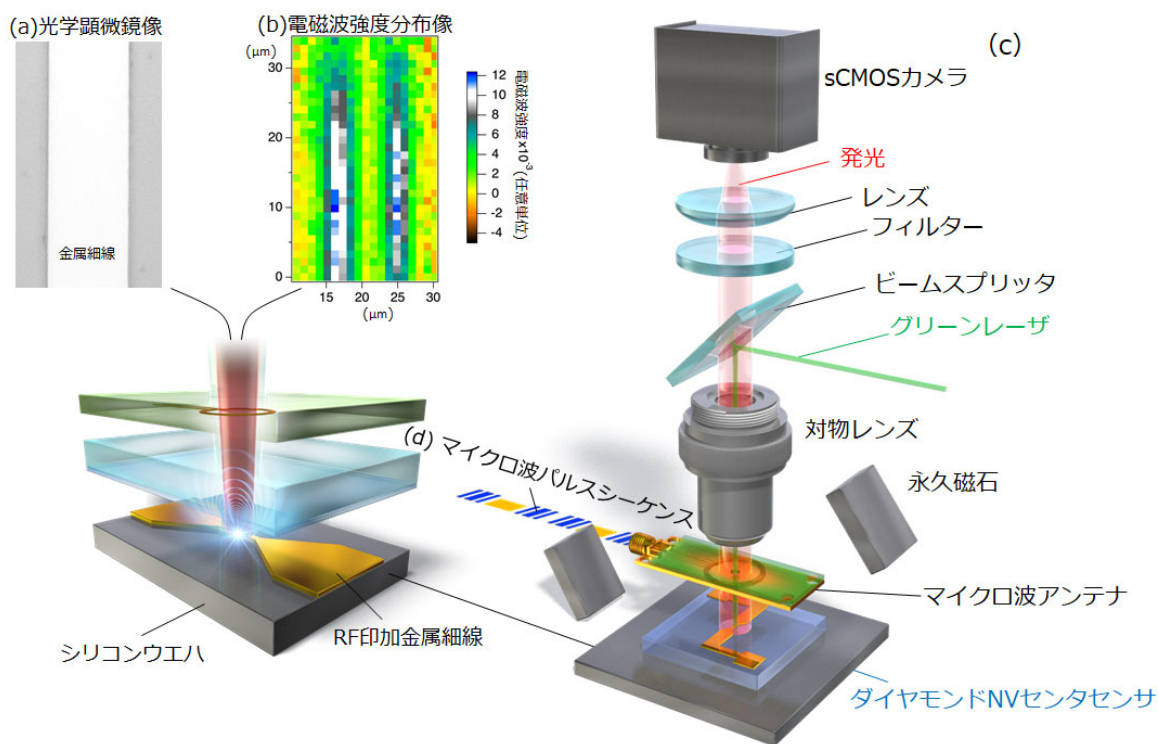


図 (a) 模擬対象物であるシリコン基板上の微弱電磁波 (RF) 印可金属細線の光学顕微鏡像。(b) 本研究の手法で得られた電磁波強度分布像。シリコン基板上に形成した幅 $10\mu\text{m}$ の金属細線に印可したところ、微弱電磁波の空間分布が μm スケールの空間分解能で検出された。(c) 今回開発した電磁波イメージングシステムの概略図。(d) スピンロッキングのためのマイクロ波パルスシーケンス。ダイヤモンド NV センター量子センサにマイクロ波パルスシーケンスを照射しスピンロッキングを行い、電磁波強度をダイヤモンド NV センターのスピン状態に転写、そのスピン状態を広視野光学顕微鏡と高速 sCMOS カメラにより像として取得し、電磁波の空間分布を可視化した。

用語解説

注1) 電磁波イメージング

電磁波強度の空間分布の可視化のこと。非破壊検査の手法の一つである。

注2) 量子センシング

量子的な性質を活用して、物理量の測定精度または測定感度を向上させるセンシング手法。例えば微弱的な電磁波を高い感度で検出することを可能となる。

注3) ダイヤモンド NV (窒素-空孔) センター

炭素原子からなるダイヤモンド結晶中の格子点の一つが窒素原子 N と入れ替わった N と、炭素原子 C が抜けた空孔 V とが隣接する複合欠陥。この複合欠陥が電子を捕獲した状態は、ユニークな量子スピン状態をもち、周囲の静磁場、交流磁場の影響を敏感に受けて変化する。

注4) 量子スピン状態

電子などの量子的な粒子は、その自転に対応する量子的な状態をもち、これを量子スピン状態とよぶ。量子スピンは小さな磁石としての性質 (磁気モーメント) をもつ。

注5) マイクロ波パルスシーケンス

量子スピン状態に対して、特定の目的をもった操作を実現するための、一連のマイクロ波パルスやタイ

ミングの組み合わせのこと。

注6) スピンロッキング

回転座標系の xy 面内に向いた NV センターのスピン状態と平行に電磁波を印可することにより、電磁波ノイズを遮断してコヒーレンス時間を延ばし、印可電磁波強度で決まるエネルギー間隔と共鳴する電磁波を高感度に検出する手法。

注7) 量子コヒーレンス、コヒーレンス時間

スピン状態の量子的干渉性が維持されることを量子コヒーレンス、量子的干渉性が維持される時間をコヒーレンス時間という。一般に、コヒーレンス時間が長いほど量子センシングの感度が向上する。

注8) マイクロ波複合パルス

マイクロ波パルスの不完全性による系統的エラーを減らすために設計された、複数のパルスからなるマイクロ波パルス列のこと。

研究資金

本研究成果は、科研費基盤研究(B)、挑戦的研究(萌芽)、新学術領域「ハイブリッド量子科学」、他の研究プロジェクトの一環として実施されました。

掲載論文

【題 名】 Near-field radio-frequency imaging by spin-locking with a nitrogen-vacancy spin sensor.

(窒素-空孔スピンセンサを用いたスピンロッキングによる近接場 RF イメージング)

掲載誌の編集者によって“Featured Article”に選ばれました

【著者名】 Shintaro Nomura, Koki Kaida, Hideyuki Watanabe, and Satoshi Kashiwaya

【掲載誌】 Journal of Applied Physics

【掲載日】 2021 年 7 月 9 日

【DOI】 doi: 10.1063/5.0052161

【URL】 <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/5.0052161>