

量子センシングにおける技術の飛躍

- カスタマイズされた電子機器と高速切り替え可能なレーザーを使用したナノ磁力測定の実進

集団量子効果を利用することで、核磁気共鳴分光法、磁気共鳴イメージング、トランジスタ、LED、ソーラーパネル、レーザーの開発などの技術における、20 世紀におけるいわゆる「第一次量子革命」が可能になりました。現在、第二次量子革命のさなか、原子、量子ドット、色中心などの微視的なシステムにおける個々の量子状態を検出および制御できるため、新しいセンシング方式はより高い感度とより優れた分解能を提供します。

新たな量子センシング技術は、量子重力計や正確な原子時計から低ノイズ量子干渉顕微鏡に至るまでのセンシング技術の向上につながり、最終的には自動運転車用のジャイロ스코プや磁場センシングを介したブレインマシンインターフェースなどの商業用途につながる可能性があります。

近年、量子センシング技術が成熟するにつれて、商業的に開発されたシステムの競合技術の 1 つは、ダイヤモンドの窒素空孔 (NV) 中心を用いたナノスケール磁力測定に基づいています。これらの中心は、非常に小型化され、原子長スケールに局在化された、光学的にアドレス指定可能な高感度の量子センサーとして機能します。AFM (原子間力顕微鏡) カンチレバーの先端に 1 つの NV 中心を備えたスキャンングプローブアプローチを採用することで、ナノメートルスケールの空間分解能と極めて高い測定精度で磁場を測定できます。

どの量子センシング技術が普及しているかに関係なく、現在のソリューションは最先端のコンポーネントの利用可能性に依存しています。商業化に向けた取り組みにより、これらの量子中心を捕捉または冷却する技術や、単一量子状態を初期化、操作、読み出す技術の改善が推進されています。これにより、新しいレーザーやエレクトロニクスの開発、小型化や大量生産を可能にする革新的な方法の開発が促進されます。このホワイトペーパーでは、NV 中心磁力測定に基づいた量子センサー向けに現在提案されているソリューションの概要を説明します。

ナノスケール量子磁力測定

過去 10 年間にわたり、ダイヤモンド内の単一電子スピンは、磁場や電場や温度などの他の量のイメージングやセンシングに優れた感度とナノスケール分解能を示すナノスケール量子センサーとして確立されてきました[1]。スピンはゼーマン効果によって自然に磁場と結合します。それらは、優れた磁場感度を生み出すために利用できる長い量子コヒーレンス時間を示すことができます。

最後に、スピンを原子長スケールに局在化することができ、それによってナノスケールの解像度でのイメージングが可能になります。これらの量子センサーは、前例のない感度と空間分解能で磁場、つまり電流を測定できます。アプリケーションには、マルチフェロイックまたは反強磁性材料の表面の磁気構造の決定や、電子回路内を流れる高周波電流 (GHz) のマッピングなどが含まれます。

ダイヤモンドの窒素空孔 (NV) 中心は、マイクロ波を使用して操作できる孤立したスピン状態を提供するため、最近、適切な候補として同定されました。これらの特性を組み合わせることにより、個々の NV 電子スピンのレベルでの磁気スピン共鳴 (ODMR) の光学的検出が可能になります (図 1)。NV 中心スピンに基づく磁力測定では、磁場の存在下でスピンが経験するエネルギーシフト、または量子力学的位相のシフトを測定します。これらの ODMR トレースは、このようなシングルスピン磁力測定の最も単純な実装方法を表しており、観察された ODMR 共鳴間の分割は、NV スピンが経験する磁場に正比例します。

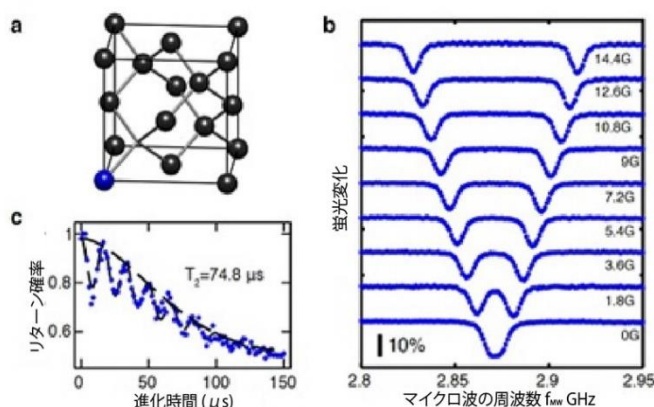


図 1. ダイヤモンドにおける NV 中心スピンの基本。(a) NV 中心の結晶構造。(b) 光学的に検出される電子スピン共鳴。これは、ほとんどの磁力測定アプリケーションの基礎を形成します。(c) スピンコヒーレンス減衰測定。一般に長い NV スピンコヒーレンス時間を利用して、NV の磁場感度をさらに高めることができます。バーゼル大学量子センシンググループの提供。

これらの魅力的な特性をナノスケール量子センシングに活用するには、NV センサーをセンシングターゲットに、理想的にはわずかに数ナノメートルに近づける必要があります。最も柔軟なアプローチは、イメージングのために NV とサンプルを相互にスキャンするスキャン プローブジオメトリを適用します。現在、このような走査型 NV 磁力測定の実装は、先端に個々の NV 中心を含むダイヤモンドナノピラーを走査プローブとして使用することによって実現されています（図 2 を参照）。これらのダイヤモンドチップを使用すると、約 20nm の分解能で漂遊磁場イメージングによる単一電子スピンの検出が可能になります。このアプローチは 2012 年に考案され[2]、その後洗練され[3]、現在ではスイスの新興企業 Qnami AG 社などの企業から商用ソリューションが入手できるようになりました。

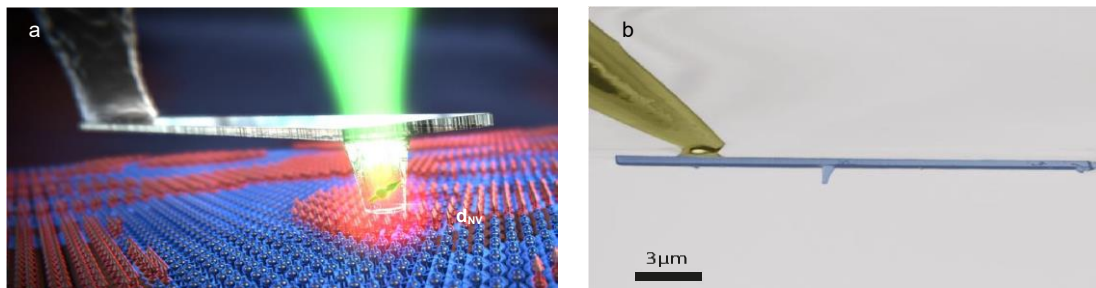


図 2. ダイヤモンドの単一スピンの基づくナノスケール量子センサー。(a) 先端に単一の電子スピン量子センサーを備えた全ダイヤモンドチップのアーティストによるレンダリング。スピンはサンプル表面上で $d_{NV} \sim 20\text{nm}$ の距離でスキャンします。 d_{NV} はこのアプローチの最終的なイメージング解像度を定義します。(b) 高純度単結晶ダイヤモンドから作製された実際のデバイスの走査型電子顕微鏡画像。バーゼル大学量子センシング グループの提供。

量子センシングへの新しいアプローチ

典型的な量子センシング実験は、数マイクロ秒続くレーザーパルスで NV 中心の電子スピンを初期化することから始まります。レーザーは通常、510nm～560nm の波長範囲で動作し、NV 中心を励起し、励起時に約 638nm で強い蛍光を引き起こす「明るい」電子スピン状態を生成します。続いてマイクロ波パルスを印加することにより、スピンをより蛍光の少ない二次的な「より暗い」状態に反転させることが可能です。マイクロ波照射後のスピン状態は、二次レーザーパルスで読み取られます。スピン反転は、マイクロ波の周波数が 2 つの状態間のエネルギー差と一致するときに発生します。このエネルギー差は NV 中心の周りの磁場に依存するため、どのマイクロ波周波数で暗い状態への反転が起こるか、つまり蛍光が低下するときを測定することで磁場を決定することができます（図 1(b)および 3 を参照）さまざまな周波数とさまざまなオン/オフ時間のマイクロ波パルスの精巧なシーケンス、いわゆる「センシングプロトコル」を適用することにより、測定分解能を最大化し、電界強度や温度などの磁界以外のパラメーターも評価することができます。

このアプローチでは、NV 中心位置に強いマイクロ波場が必要ですが、その付近に細いワイヤを配置することで最も効率的に実現されます。電子スピンの制御は、高絶縁スイッチを介してオン/オフに切り替えられるマイクロ波シンセサイザーを使用して実装されます。スイッチの立ち上がり時間と立ち下がり時間は数ナノ秒以内である必要があります。これは、原子遷移で通常達成可能な周波数（数十 MHz に達する可能性がある）によって課せられる制限です。

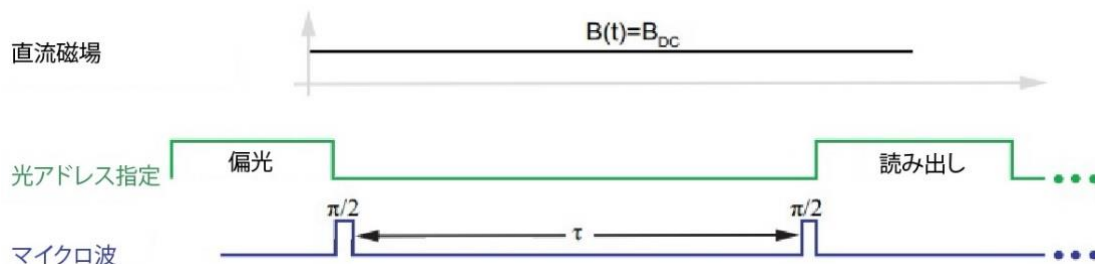


図 3. NV スピンの Ramsey パルスシーケンスを使用した典型的な NV 磁力測定シーケンス。NV スピンの初期化と測定には光励起が使用されます。バーゼル大学量子センシング グループの提供。

従来、パルスシーケンスはビット列として記述され、サンプルクロックティックごとに1ビットが消費されます。このアプローチでは大規模なサンプルメモリが必要となり、機器のアップロード時間が長くなります。より最近の方法では、ランレングスエンコーディングを使用してパルスシーケンスを記述します。この場合、各パルスは、その継続時間をクロックティックでエンコードする整数で記述されます。量子センシングプロトコルで一般的なまばらなパルスシーケンスの場合、このエンコードによりアップロード時間が短縮され、機器のプログラミングが大幅に容易になります。典型的な量子センシング実験では、一連の測定が何度も繰り返され、蓄積された光子数が最終測定のスピン状態の確率をコード化します。

ほとんどの量子センシング実験は、問い合わせ時間のパラメータスイープで進行します。これは、多くの場合、センシングシーケンスのパルス間隔に相当します[4]。このような場合、1つのセンシング測定は一連のパルスシーケンスで構成されます。Swabian Instruments 社などの企業は、最新の単一光子計数アプローチを適用して、柔軟な方法で単一光子検出イベントの高速オンザフライ処理を可能にしました。このようなアプローチにより、限定されたヒストグラム範囲やビン番号などの一般的なハードウェア制限が排除され、新しい量子センシング方式の実装が大幅に容易になります。

コンパクトな高速変調レーザー

光学的初期化と NV 中心のスピン状態の読み出しシーケンスには、NV 中心の励起スペクトル内で正確に調整された光パルスが必要です。その他の重要なパラメーターを以下の表に示します。

波長	510 nm – 560 nm
変調の立ち上がり/たち下がり時間	<10 ns
オン/オフ消光比	>60 dB
ビームプロファイル	ガウシアン
スペクトル純度	>40 dB
分極消光比	>100:1

一部の量子センシングアプリケーションでは、任意のオン/オフ時間と優れた強度安定性と再現性を持つパルス列を生成する機能も必要とします。最近まで、このようなレーザーパルスを生成する最も一般的なアプローチには、532nm 連続波レーザーとダブルパス音響光学変調器 (AOM) の組み合わせが含まれていました。

ただし、これらのレーザー+AOM セットアップは調整が難しく、かさばり、高価で、衝撃に弱く、大型またはアクティブなヒート

シンクが必要です。2018 年以來、直接強度変調を備えた 515nm のレーザーダイオードが、研究室のセットアップや商用システムで使用するための代替ソリューションを提供してきました。

これらのレーザーダイオードの主な利点は、真のオフ状態での高速アナログおよびデジタル変調などの変調機能と、外部変調器を必要としない正確なリアルタイム強度制御です。また、電子機器、光学機器、シングルモードファイバーカップリングをコンパクトで堅牢なプラットフォームに統合することもできます。これにより、量子センシングセットアップとのユーザーフレンドリーな統合、調整やメンテナンスの必要のない長寿命、よりコンパクトな設置面積が可能になります。図 4 は、変調周波数 10kHz の 515nm レーザーダイオードの典型的な変調特性を示しています。

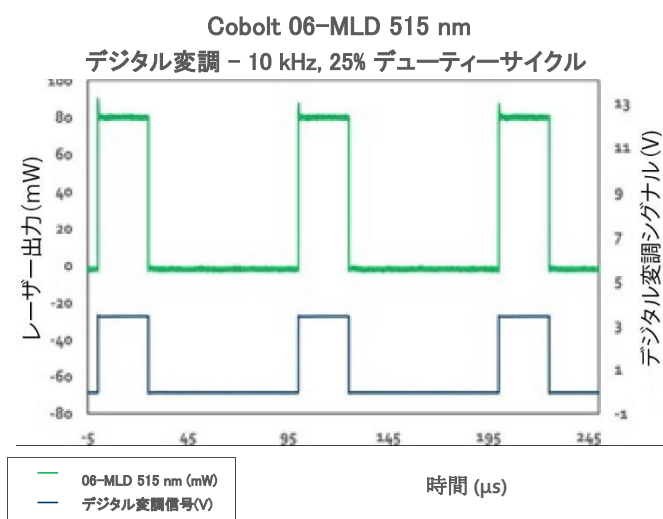


図 4: 変調された 515nm レーザーダイオード (Cobolt 06-MLD 515nm) の経時的な出力パワートレース。2020 年モデルの変調特性は量子アプリケーション向けに最適化されました。HÜBNER Photonics 社の提供による。



展望

高純度のダイヤモンド量子センシングカンチレバーが、専用の制御および測定電子機器や高品質のレーザー源と並んで登場するにつれ、多用途のスキニングプローブ量子センシング実験用のツールが、より多くの人々に利用可能になってきています。世界中の企業も、量子強化センシングを活用した初の量産製品の実現を目標に、NV ベースのアンサンブル量子センサーを商用チップパッケージに統合し始めています。さらなるブレークスルーにより、量子センシング技術が多用途のセンサー製品に変わることが期待されます。

参考文献

1. M. Chernobrod et al., Spin microscope based on optically detected magnetic resonance, J. Appl. Phys. 97, 014903 (2005).
2. P. Maletinsky, et al., A robust scanning diamond sensor for nanoscale imaging with single nitrogen-vacancy centres, Nature Nanotechnology 7, 320 (2012).
3. N. Hedrich et al., Parabolic diamond scanning probes for single spin magnetic field imaging, arXiv:2003.01733 (2020)
4. Photonics Spectra October 2020 New Tools Promise the Next Big Thing for Quantum Sensing | Features | Oct 2020 | Photonics Spectra

論文著者:

Niklas Waasem is regional sales manager and application specialist for HÜBNER Photonics.

Helmut Fedder is CEO and Co-Founder of Swabian Instruments.

Patrick Maletinsky is a professor at the University of Basel and the leader of its quantum sensing group.

会社概要

HÜBNER Photonics 社は、品質、信頼性、堅牢性に関する市場の期待を満たす、またはそれを超える高性能で革新的なレーザーを供給することに尽力しています。HÜBNER Photonics 社は、高性能 Cobolt レーザー、CW チューナブルレーザー C-WAVE、および C-FLEX レーザーコンバイナーの全製品を提供しています。継続的な技術開発、顧客志向、ISO 認定の品質管理システムを通じて、HÜBNER Photonics 社は、蛍光顕微鏡、フローサイトメトリー、ラマン分光法、計測学、ホログラフィー、ナノフォトニクス、量子研究における人気のあるサプライヤーとなっております。HÜBNER Photonics 社はドイツのカッセルとスウェーデンのストックホルムに製造拠点をもち、米国と英国に直接販売およびサービス オフィスを置いています。