

2025 年 9 月 26 日

報道関係者各位

国立大学法人筑波大学
国立大学法人北陸先端科学技術大学院大学
慶應義塾大学

特殊なダイヤモンドの針を開発し 超高速で変化する電場の局所計測に成功

NV 中心と呼ばれる格子欠陥を導入したダイヤモンドを原子スケールの空間分解能を持つ原子間力顕微鏡(AFM)の探針(プローブ)に用い、二次元層状物質の表面近傍の電場をフェムト秒(1000 兆分の 1 秒)・ナノメートル(10 億分の 1 メートル)の時空間分解能で計測することに成功しました。

ダイヤモンドの結晶中に不純物として窒素(Nitrogen)が存在すると、すぐ隣に炭素原子の抜け穴(空孔: Vacancy)ができることがあります。これを Nitrogen-Vacancy (NV) 中心と言います。そして、NV 中心を導入したダイヤモンドに電界を加えると、その屈折率が変化ようになります。これは電気光学(EO)効果と呼ばれる現象で、ダイヤモンド単体では実現していませんでした。

本研究チームはこれまでに、NV 中心を導入した高純度ダイヤモンドに 1000 兆分の 1 秒という極めて短時間だけパルス光を放出するフェムト秒レーザーを照射し、ダイヤモンドの EO 効果を計測することで、ダイヤモンドの格子振動ダイナミクスを動的に高感度に検出することに成功しています。このことは、ダイヤモンドが超高速応答する EO 結晶として利用可能で、電場を検出する探針(ダイヤモンド NV プローブ)となり得ることを示しています。

そこで本研究では、NV 中心を導入したダイヤモンドの超高速 EO 効果と、原子スケールの空間分解能を有する原子間力顕微鏡(AFM)技術とを融合し、フェムト秒($fs=1000$ 兆分の 1 秒)の時間分解能とナノメートル($nm=10$ 億分の 1 メートル)の空間分解能で局所的な電場のダイナミクスを測定できる、時空間極限電場センシング技術を開発しました。そして、このセンシング技術を用いることで、二次元の原子層が層状に重なった二次元層状物質であるセレン化タングステン(WSe_2)試料の表面近くの電場を 500 nm 以下かつ 100 fs 以下の時空間分解能でセンシングできました。

ダイヤモンド NV プローブはスピンや温度の変化にも感度があるため、本研究成果は、電場の検出に加え、磁場や温度を検出するためのセンシング技術としても展開されることが期待されます。

研究代表者

筑波大学数理物質系

長谷 宗明 教授

北陸先端科学技術大学院大学ナノマテリアル・デバイス研究領域

安 東秀 准教授

慶應義塾大学理工学部

ポール フォンス 講師(研究当時、同大学同学部電気情報工学科教授)

研究の背景

ダイヤモンド中の不純物には窒素やホウ素などさまざまな種類があります。その中でも、点欠陥に電子や正孔が捕捉され、発光を伴う種類のものはダイヤモンドを着色させるため、「色中心：カラーセンター」と呼ばれます。色中心には周辺環境の温度や磁場の変化を極めて敏感に検知して量子状態が変わる特性があり、温度や電場を読み取る量子センサー^{注1)}として用いられています。

量子センサーの中でも、ダイヤモンドに導入した窒素－空孔（NV）中心^{注2)}と呼ばれる複合欠陥を用いたセンサーは、まだまだ発展途上の技術ですが、高空間分解能・高感度が要求される細胞内計測やデバイス評価装置のセンサーへの応用など、新しい可能性が期待されています。

本研究チームは、フェムト秒（1000 兆分の 1 秒）の時間だけ近赤外域の波長で瞬くフェムト秒超短パルスレーザー^{注3)}を用い、NV 中心を導入したダイヤモンドの電気光学（EO）効果^{注4)}を実時間分解計測することで、ダイヤモンドの格子振動ダイナミクスを動的に高感度に検出することに成功しています^{参考文献 a)}。このことは、ダイヤモンドが超高速応答する EO 結晶になり、電場検出の探針（プローブ）となり得ることを示すものです。

これまでもダイヤモンドを原子間力顕微鏡（AFM）^{注5)}と組み合わせた電場センシングの試みはなされていましたが、局所ダイナミクスを動的に評価できる手法はほとんどありませんでした。特に時間分解能に関しては、発光測定に基づく従来の手法ではナノ秒程度が限界であり、ピコ秒以下の超高速時間分解能に関しては、全く開拓されていませんでした。

研究内容と成果

本研究では、量子光学（フェムト秒超短パルスレーザーを用いたダイヤモンドの EO 効果）と走査プローブ顕微鏡（SPM）の一種である原子間力顕微鏡（AFM）技術を融合することで、光の回折限界を超える空間分解能に加えて、今までの検出限界を超える超高速時間分解能で局所的な電場計測を実現することを目指しました（図 1）。

極めて不純物が少ない高品質のダイヤモンド結晶の表面近傍（深さ 40nm）に、密度を制御した NV 中心を導入し、そのダイヤモンド結晶をレーザーカットおよび集束イオンビーム（FIB）技術^{注6)}を駆使することで、先端径が 500 nm 以下のダイヤモンド NV プローブに加工することに成功しました。このダイヤモンド NV プローブを、フェムト秒超短レーザーを組み込むことが可能な、ピエゾ抵抗効果^{注7)}に基づく自己センシング方式^{注8)}の AFM のカンチレバーに取り付けました（図 2）。

このシステムを用いて、まずガリウムヒ素（GaAs）半導体基板の表面電場を調べました。フェムト秒超短パルスレーザーの出力光をビームスプリッターで約 10 対 1 に分岐し、強い方を励起のためのポンプ光、弱い方を探索のためのプローブ光とします。電子が電流を運ぶ n 型 GaAs 試料は高強度のポンプ光で励起され、プローブ光はダイヤモンド NV プローブに入射されます（図 3 a）。まず、ダイヤモンド NV プローブの有無による時間分解 EO 信号の検出感度を確認するため、ダイヤモンド NV プローブを用いないマクロ計測により時間分解 EO 信号を計測したところ、励起直後（Time delay=時間遅延 0 ps）に立ち上がり、数 ps（ps = 1 兆分の 1 秒）以内に緩和しポンプ光を当てる前に戻る信号が得られました（図 3 b）。また NV センターを導入したダイヤモンド NV プローブを通じて、n 型 GaAs の表面電場を検出することに成功しました（図 3 c）。ダイヤモンド NV プローブの導入により EO 信号の大きさは約 1/42 に減少しましたが、局所計測に成功したと言えます。

さらに二次元層状物質^{注9)}であるセレン化タングステン（WSe₂）単結晶をシリコン基板上に転写した試料を用いて実験を行いました。この WSe₂ 試料では、場所によって結晶の厚さが異なっていますが、光学顕微鏡で銀白色のバルク（Bulk）結晶（厚さが 10 原子層以上の結晶）を見つけ、このバルク結晶と接

する紫色の単層（1 ML）部分との界面に着目しました（図 4 a）。この厚さの異なる界面を用いて、局所的な表面電場の計測を行ったところ、単層部分とバルク部分のキャリア特性を反映した表面電場信号を、500 nm 以下かつ 100 fs 以下の時空間分解能でセンシングすることに成功しました（図 4 a,b）。また時間分解 EO 信号の減衰を指数関数を用いてフィッティング（モデル化）したところ、単層部分では約 200 フェムト秒で緩和する成分のみが観測されました。一方、バルク部分では、この成分に加えて、約 2ps で緩和する遅い成分の寄与があることが分かりました（図 4 c）。このことは、単層部分では電場は基板との相互作用などで高速に緩和するのみなのにに対し、バルク部分では、表面電場と結合したキャリアのバンド内緩和やバレー間緩和^{注 10)}が寄与していることを示しています。n 型 GaAs の時間分解 EO 信号による電場検出感度を見積もると、約 $100 \text{ V/cm}/\sqrt{\text{Hz}}$ （Hz は周波数）となりました。これは発光測定に基づく従来の手法で得られたマイクロ秒時間領域での DC（直流）電場センシングと同等の検出感度を達成したことになります。最近のマイクロ秒時間領域での AC（交流）電場センシングに関する検出感度には 2 桁及びませんが、本手法では DC（直流）電場センシングと同等の検出感度で 500 nm 以下かつ、100 フェムト秒というマイクロ秒を遙かに凌ぐ高い時空間分解能が得られることが示されたと言えます。

今後の展開

今回開拓した時空間極限センシング技術は、例えば炭化ケイ素（SiC）などのパワー半導体材料や燃料電池材料内での局所電場検知、トポロジカル絶縁体における局所電場検知など、基礎物理・化学のための基盤技術となることが期待されます。また、NV 中心を含むダイヤモンド NV プローブはスピンや温度の変化にも感度があるため、本研究のアプローチは、電場の検出に加え、磁場や温度を検出するためのセンシング技術としても展開可能であると言えます。例えばレーザー医療や分子レベルでの細胞の計測や制御を通じて、癌の治療をはじめとする量子生命科学の分野にも波及しうる革新的な展開が期待されます。

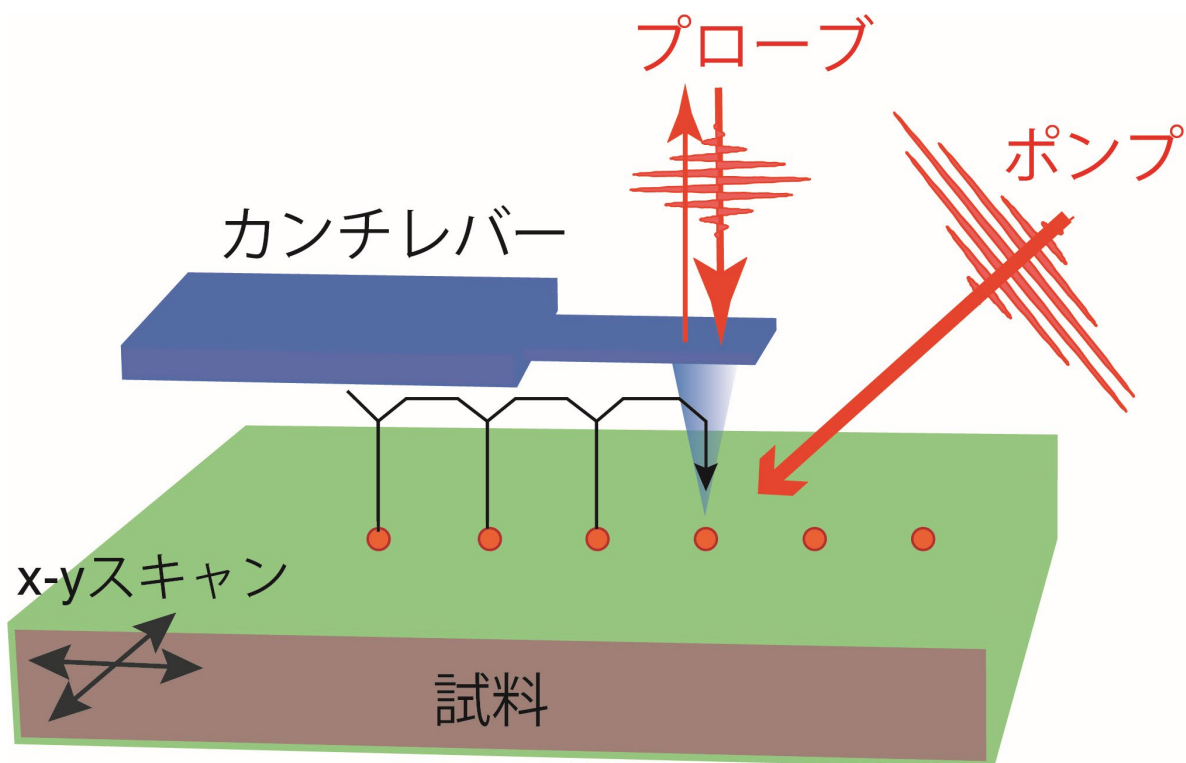


図1 本研究で行なった実験の概要図

ダイヤモンド NV プローブを用いた超高速ポンプ・プローブ電場センシング測定の概略図。試料上の各指定点において AFM プローブを垂直に接近・後退させる「ピンポイントモード」で測定を行った。また試料はピエゾスキャナーを用いて x-y 方向に走査される。

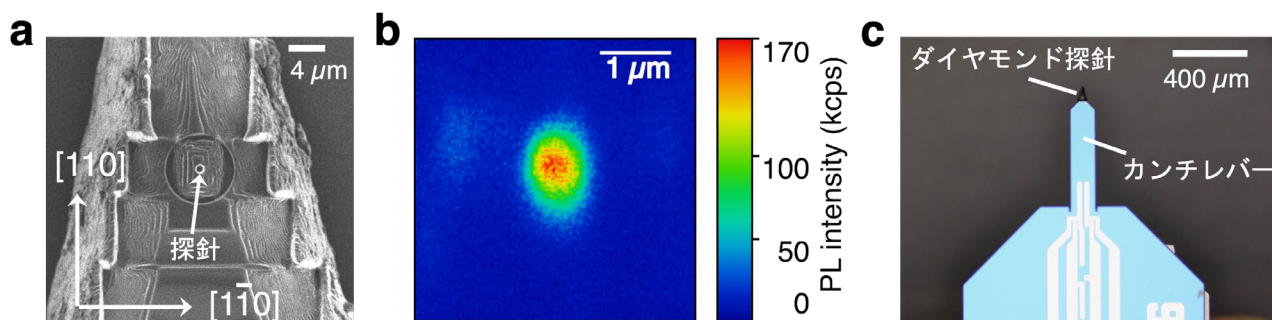


図2 本研究で作製したダイヤモンド NV プローブ概要図

(a) FIB で作製したダイヤモンド NV プローブ (探針) の走査型イオン顕微鏡像。マイクロメートルサイズに加工されたダイヤモンド結晶の一部が探針となっている。(b) ダイヤモンド NV プローブの探針部分のフォトルミネッセンス画像。赤色の部分から探針の直径が 500 nm 以下であることが分かる。(c) カンチレバーに取り付けたダイヤモンド NV プローブの光学顕微鏡像。カンチレバーは自己センシング方式用の回路部分の上部に位置しており、その先端に探針部分を含むダイヤモンド NV プローブが取り付けられている。

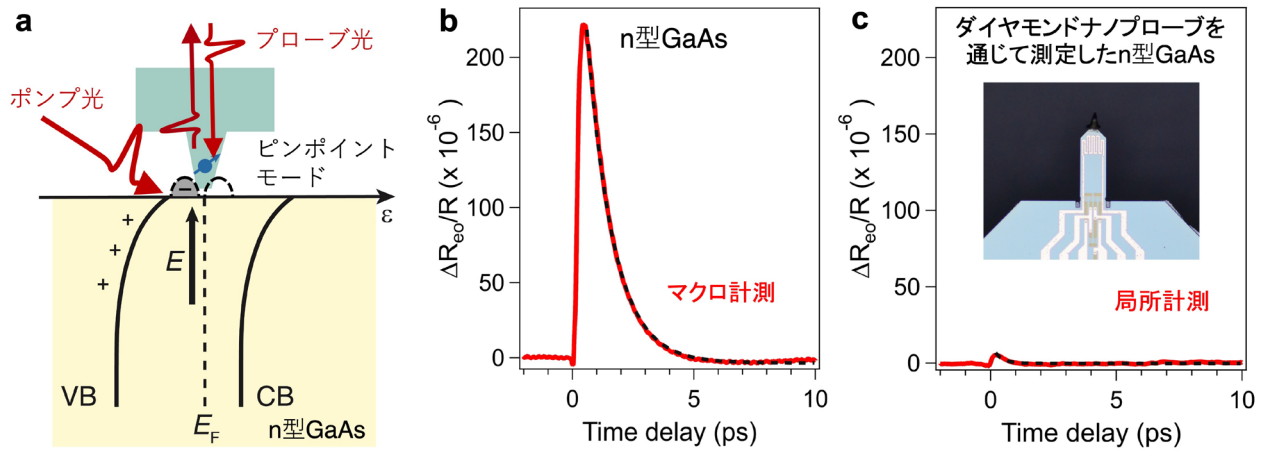


図3 ダイヤモンド NV プローブを用いた n 型 GaAs 表面の電場センシング

(a)ダイヤモンド NV プローブ先端近傍の表面バンド曲げと接触モードの配置図。表面状態はフェルミエネルギー (E_F) を示すベル形状の破線で表され、下側のバンドは電子 (−) で占有されている。VB は価電子帯、CB は伝導帯を示す。(b)ダイヤモンド NV プローブを用いないマクロ計測による n 型 GaAs ウェハからの時間分解電気光学信号。(c)ダイヤモンド NV プローブを用いた n 型 GaAs からの局所的時間分解電気光学信号。(b)のマクロ計測の場合に比べて EO 信号の大きさは約 1/42 になっているが、検出感度が十分であることが確認された。

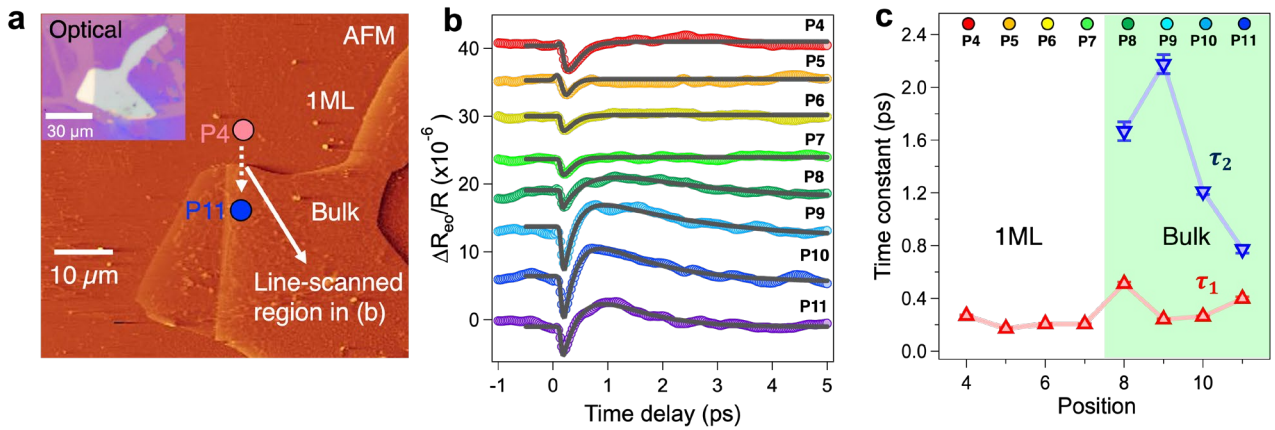


図4 WSe₂ の EO 信号の時空間測定

(a) ダイヤモンド NV プローブを用いた $60\ \mu\text{m} \times 60\ \mu\text{m}$ 領域のトポグラフ画像。色の薄い部分がバルク (Bulk) 結晶である。左上の挿入図は光学顕微鏡像であり、銀白色の部分はバルク (Bulk) 結晶である。局所計測では、単層 (1ML) 領域 (P4) からバルク (Bulk) 領域 (P11) までを $500\ \text{nm}$ ステップで計測する。(b)ダイヤモンド NV プローブを用いて得られた局所的な時間分解電気光学信号。P4 から P11 に行くに従い、単層 (1ML) からバルク (Bulk) 領域を測定している。図(b)の黒実線は、単一指数関数 (単層=1ML 領域のデータについて) または二重指数関数 (バルク領域のデータについて) を用いたフィッティング (モデル化) を示す。(c) P4 から P11 の異なる位置における $500\ \text{nm}$ ステップで得られた時間分解電気光学信号へのフィッティングにより得られた緩和時間定数。エラーバーは標準偏差を示す。

用語解説

注1) 量子センサー

量子化した準位や量子もつれなどの量子効果を利用して、磁場、電場、温度などの物理量を超高感度で計測する手法のこと。

注2) 窒素－空孔 (NV) 中心

ダイヤモンドは炭素原子から構成される結晶だが、結晶中に不純物として窒素 (Nitrogen) が存在すると、すぐ隣に炭素原子の抜け穴 (空孔: Vacancy) ができることがある。この窒素と空孔が対になった「NV (Nitrogen-Vacancy) 中心」はダイヤモンドの着色にも寄与する色中心と呼ばれる格子欠陥となる。NV 中心には周辺環境の温度や磁場の変化を極めて敏感に検知して量子状態が変わる特性があり、この特性をセンサー機能として利用することができる。このため、NV 中心を持つダイヤモンドは「量子センサー」と呼ばれ、次世代の超高感度センサーとして注目されている。

注3) フェムト秒超短パルスレーザー

パルスレーザーの中でも特にパルス幅 (時間幅) がフェムト秒 (1000 兆分の 1 秒) 以下の極めて短いレーザーのこと。光電場の振幅が極めて大きいため、2 次や 3 次の非線形光学効果を引き起こすことができる。

注4) 電気光学 (Electro-Optic, EO) 効果

物質に電場を加えると、電場の強度に応じて物質の屈折率が変化する効果のこと。

注5) 原子間力顕微鏡 (AFM)

先端が鋭い探針で試料の表面を走査し、探針と表面との間に働く微少な力を測定して表面構造を原子スケールの高分解能で観察することができる顕微鏡のこと。AFM 探針は、バネのようにしなるカンチレバーの先端に取り付けられており、コンタクトモードでは、この探針と試料表面を微小な力で接触させ、カンチレバーのたわみ量が一定になるように探針・試料間距離をフィードバック制御しながら X-Y 方向 (水平方向) に走査することで、表面形状を画像化できる。

注6) 集束イオンビーム (FIB) 技術

イオンビーム (荷電しているイオンを高電界で加速したもの) を細く絞ったものである。物質の微細加工、蒸着、観察などの用途に用いられる。

注7) ピエゾ抵抗効果

半導体材料などに機械的なひずみ (力による変形) を与えたとき、材料の電気抵抗が変化する効果のこと。

注8) 自己センシング方式

通常の AFM では、レーザー光をカンチレバー背面に照射し、反射したレーザービームの位置変化を位置センサーで計測することで、カンチレバーのたわみ量 (表面構造によりたわんだ量) を読み取る。カンチレバーのたわみ信号を光で読み取ることから、これを光てこ方式と呼ぶ。一方、自己センシング方式の AFM では、光てこ方式のようにレーザーと一センサーを必要とせず、ピエゾ抵抗効果などのカンチレバー自身の物理量の変化からカンチレバーのたわみ量を読み取ることができる。

注9) 二次元層状物質

共有結合が二次元方向だけに伸びている結晶のこと。原子一層レベルの二次元原子層が、ファンデルワールス力で積層して三次元結晶を形成している。炭素の二次元原子層であるグラフェンが積層したグラファイト、近年盛んに研究されるようになった遷移金属カルコゲナイドなどがある。本研究で調べたセレン化タングステン (WSe_2) も遷移金属カルコゲナイドである。

注 1 0) バレー間緩和

半導体などにおいて、バレーとは電子バンドの極小点を指す。異なるバレー間にキャリアが散乱（遷移）することでエネルギーを失う緩和過程をバレー間緩和と呼ぶ。

研究資金

本研究は、科研費による研究プロジェクト（25H00849, 22J11423, 22KJ0409, 23K22422, 24K01286, 24H00416, 23H00264）、および国立研究開発法人 科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 CREST 「ダイヤモンドを用いた時空間極限量子センシング」（研究代表者：長谷 宗明）（JPMJCR1875）の一環として実施されました。

参考文献

a) T. Ichikawa, J. Guo, P. Fons, D. Prananto, T. An, and M. Hase, 2024, Cooperative dynamic polaronic picture of diamond color centers. *Nature Communications*. **15**, 7174 (10.1038/s41467-024-51366-x).

掲載論文

【題 名】 An ultrafast diamond nonlinear photonic sensor.

（超高速ダイヤモンド非線形光センサー）

【著者名】 D. Sato, J. Guo, T. Ichikawa, D. Prananto, T. An, P. Fons, S. Yoshida, H. Shigekawa, and M. Hase

【掲載誌】 *Nature Communications*

【掲載日】 2025 年 9 月 25 日

【DOI】 10.1038/s41467-025-63936-8

問い合わせ先

【研究に関すること】

長谷 宗明（ハセ ムネアキ）

筑波大学数理物質系・物理工学域 教授

E-mail: mhase@bk.tsukuba.ac.jp

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報局

TEL: 029-853-2040

E-mail: kohositu@un.tsukuba.ac.jp

北陸先端科学技術大学院大学 広報室

TEL: 0761-51-1032

E-mail: kouhou@ml.jaist.ac.jp

慶應義塾広報室

TEL: 03-5427-1541

Email: m-pr@adst.keio.ac.jp