

シンクロトロン放射光角度分解光電子分光による
固体電子の様々な相互作用の検出

Probing of the electron-interaction in solids by means of angle-resolved photoelectron spectroscopy with synchrotron radiation

研究分野
Department励起物性科学
Excited solid-state dynamics研究者
Researcher田中慎一郎
S. Tanakaキーワード
KeywordARPES, シンクロトロン放射光、2次元物質、電子格子相互作用
ARPES, synchrotron radiation, 2D-material, electron-phonon interaction応用分野
Application新機能デバイス開発
development of new-functional devices

研究開発段階

基礎

実用化準備

応用化

背景

固体内の電子の静的な性質は、平均化したポテンシャル中での電子の波動方程式を解くことで理解できます。しかし、実際の固体の性質、特にデバイスとしての応用を考えた時重要な電子の動的な性質は、格子の運動による擾乱（電子格子相互作用；図参照）や、光（電磁波）による励起など、さまざまな相互作用によって決定されます。

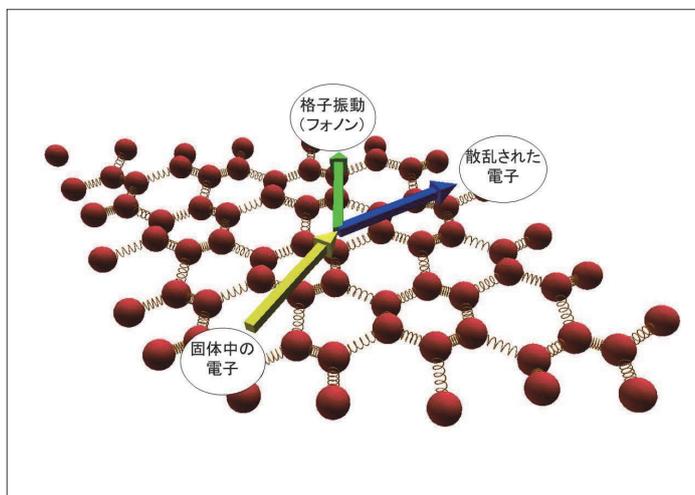
概要・特徴

最先端の計測技術を用いて、グラフェンや遷移金属ダイカルコゲナイドなど低次元系物質電子のダイナミクスを研究し、新機能物質開発のための指針を打ち立てます。

技術内容

固体内電子の相互作用を分光学的に調べることは、固体電子物性の理解に役立ち、将来の新機能デバイス開発のためのしっかりとした指針の形成につながります。現在は、興味深い低次元物性を示すため注目を集めるグラフェンや遷移金属ダイカルコゲナイドなどの層状物質について研究しています。これらは新奇デバイス候補としても有力です。

角度分解光電子分光 (ARPES) は、電子の運動量とエネルギーを直接検出できる非常に優れた実験手段です。この光源として最もふさわしいシンクロトロン放射光施設を利用し、多くの他機関の研究者とも連携して研究を進めています。さらに、高分解能電子エネルギー損失分光 (HREELS) や、電子コインシデンス分光法 (EECOS) など、先進的なさまざまな電子分光法も用いています。



社会への影響・期待される効果

- 物質の電子物性における基礎過程の解明
- 新機能物質開発のための指針の確立

【論文 Paper】

- [1] S. Tanaka, M. Matsunami, S. Kimura, Sci. Rep. 3, 3031 (2013).
- [2] I. Suzuki, Z. Lin, S. Kawanishi, K. Tanaka, Y. Nose, T. Omata, S. Tanaka, Phys. Chem. Chem. Phys., 24, 634 (2022).
- [3] T. Terasawa, K. Matsunaga, N. Hayashi, T. Ito, S. Tanaka, S. Yasuda, H. Asaoka, Pys. Rev. Matt. 7, 014002014002(2023).

電子エネルギー損失分光法によるナノレベル振動分光

Vibration spectroscopy at nano-scale using electron energy-loss spectroscopy

研究分野
Departmentナノ構造・機能評価
Nanocharacterization for
Nanostructures and Functions研究者
Researcher末永和知 吉田秀人 岩清水千咲
K. Suenaga H. Yoshida C. Iwashimizuキーワード
Keyword電子エネルギー損失分光法、走査透過型電子顕微鏡、フォノン
Electron energy-loss spectroscopy, Scanning transmission electron microscopy, Phonon応用分野
Application材料科学、ナノデバイス、化学反応解析
Material science, Nano device, Chemical reaction analysis

研究開発段階

基礎

実用化準備

応用化

背景

格子振動の量子であるフォノンの分散は、材料の熱的・光電子の特性などを特徴付けます。しかし、従来の振動分光法で得られる情報は平均データでした。医学・電子工学・エネルギーなど様々な分野でナノテクノロジーの発展と応用が進む中、ナノレベルで局所的なフォノン分散を測定・評価する技術の開発を目指しました。

概要・特徴

低加速電圧STEM-EELS装置の高空間・高エネルギー分解能化を達成し、微小二次元物質の振動スペクトルをナノスケールで取得する手法を見出しました。

技術内容

電子損失エネルギー分光法 (EELS) と走査透過型電子顕微鏡 (STEM) を組み合わせた STEM-EELS 装置を用いてグラフェンと六方晶窒化ホウ素 (h-BN) のフォノン分散を取得しました。EELS 検出器を軸中心から少しずつずらすことで、運動量移送ベクトル q の関数として分光しました (図 (a), (b))。縦軸に損失エネルギー、横軸に運動量 q 、色の明暗に強度を取ることで、フォノン分散図を実験的に取得できました (図 (c)) [1]。

応用として、幅数 10nm の短冊状グラフェンナノリボンの振動モードマッピング [1] や、同位体のピークシフトを利用した数 nm レベルでの同位体マッピング [2] に成功しました。

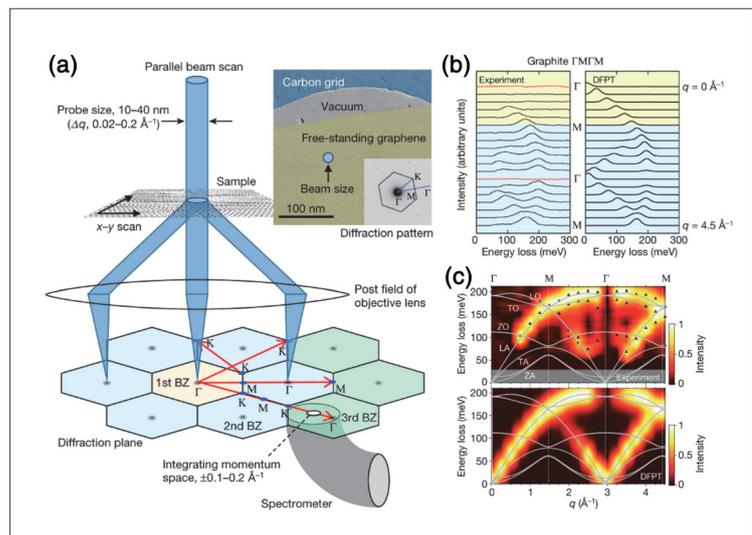
モノクロメーターを搭載し国内最高レベルのエネルギー分解能を達成できたことや、収差補正器の性能向上による高空間分解能化、検出カメラ感度の改善などによる低加速電圧 STEM-EELS 装置の高性能化がこれらを実現しました。

社会への影響・期待される効果

この研究成果は、半導体や電子デバイスにも応用されるナノ構造固体物質の局所 IR 測定に特に有用です。また、低加速電圧条件は電子線ダメージを受けやすい低次元物質や有機物の観察を可能にします。

【論文 Paper】

- [1] R. Senga, K. Suenaga, P. Barone, S. Morishita, F. Mauri and T. Pichler, Nature, 573 (2019) 247-250.
[2] R. Senga, Y.-C. Lin, S. Morishita, R. Kato, T. Yamada, M. Hasegawa, K. Suenaga, Nature, 603 (2022), 68-72.



動作中のナノギャップ電極の表面観察

Atomic scale analysis of the surface structure in working nanogap electrodes

研究分野
Departmentナノ構造・機能評価
Nanocharacterization for
Nanostructures and Functions研究者
Researcher末永和知 吉田秀人 岩清水千咲
K. Suenaga H. Yoshida C. Iwashimizuキーワード
Keyword金属ナノ構造、ナノギャップ、環境制御型透過電子顕微鏡
metal nanostructure, nanogap, environmental transmission electron microscopy (ETEM)応用分野
Application表面化学、ナノデバイス
surface chemistry, nano device

研究開発段階

基礎

実用化準備

応用化

背景

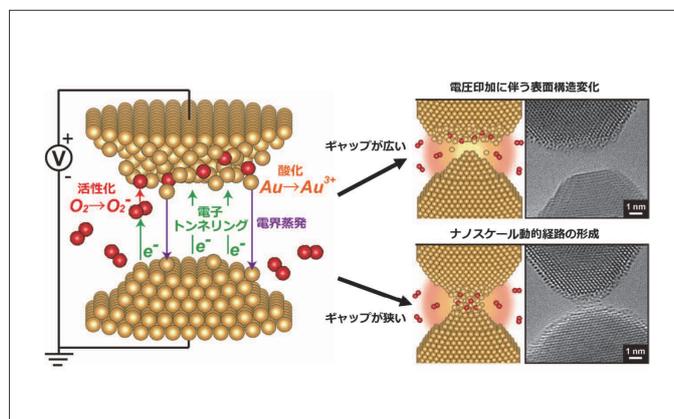
固体表面の構造は電子励起によって変化するが、その反応メカニズムの解明には実時間、実空間、実環境での観察が必要となります。高い空間分解能と時間分解能を有する環境制御型透過電子顕微鏡を用いることにより、動作中の金属ナノギャップ電極表面の原子スケールの構造変化をその場観察で捉えることができます。

概要・特徴

環境制御型透過電子顕微鏡と高速カメラを使用することにより、動作中の金属ナノギャップ電極において、電極表面の構造が原子スケールで連続的に変化する現象を初めて可視化しました。

技術内容

金は化学的に不活性な金属であり電極材料として広く利用されてきましたが、実際に動作中の電極表面の原子スケールの構造はこれまで明らかにされていませんでした。今回、電子顕微鏡内で金ナノギャップ電極に電圧を印加し酸素ガスを導入することで、正極表面の結晶構造が乱れることを明らかにしました。さらにナノギャップ間を金原子が移動する様子をその場で可視化することに成功し、その連続的に変化する構造が金の酸化物であることを解明しました。酸素ガス中における異方的な構造変化がトンネル電子とガス分子との反応によって引き起こされることを世界で初めて明らかにした成果です。



社会への影響・期待される効果

本研究成果により、ナノギャップ電極におけるトンネル電子とガス分子との反応メカニズムが解明され、この反応を利用した新たなナノ材料の開発に繋がると期待されます。

また、金ナノギャップ電極だけでなく、ナノデバイスに用いられる様々な金属電極表面の反応メカニズムを解明する手がかりになり、実環境ガスや実用電極材料を選択することで、電子を利用した新たなナノ材料の開発に繋がると期待されます。

【論文 Paper】

- [1] T. Tamaoka, H. Yoshida, and S. Takeda, RSC Advances 9 (2019) 9113-9116.
- [2] T. Tamaoka, R. Aso, H. Yoshida, and S. Takeda, Nanoscale 11 (2019) 8715-8717.
- [3] R. Aso, Y. Ogawa, T. Tamaoka, H. Yoshida, and S. Takeda, Angew. Chem. Int. Ed. 58 (2019) 16028-16032.

極短パルス電子線によるダイナミクス計測

Investigation of reaction kinetics induced by ultra-short electron beams

研究分野
Departmentナノ極限ファブリケーション
Advanced Nanofabrication研究者
Researcher楊 金峰 神戸正雄
J. Yang M. Gohdoキーワード
Keyword量子ビーム誘起超高速現象、フェムト秒光パルス・電子ビーム、放射線化学
quantum-beam-induced ultrafast phenomena, femtosecond electron beam/laser, radiation chemistry応用分野
Application材料評価、リソグラフィ
materials evaluation, lithography

研究開発段階

基礎

実用化準備

応用化

背景

極限ナノファブリケーションを実現するために材料中に量子ビームが誘起する基礎過程の解明を目指しています。そのためのツールとして、世界最高時間分解能を有するフェムト秒・アト秒パルスラジオリシスシステムの研究開発を行っています。

概要・特徴

フェムト秒極短パルス電子ビームを時間分解分光法に適用し、量子ビーム誘起反応による過渡種（ホール、電子、ラジカル）のダイナミクスを実測する装置と測定法を開発・運用しています。電子ビームによる分析光の発生により、THz光も使えるようになり、測定対象、現象に合わせた測定が可能です。パルス電子線の短パルス化と、時間分解分光法の高時間分解化の実現に注力しています。

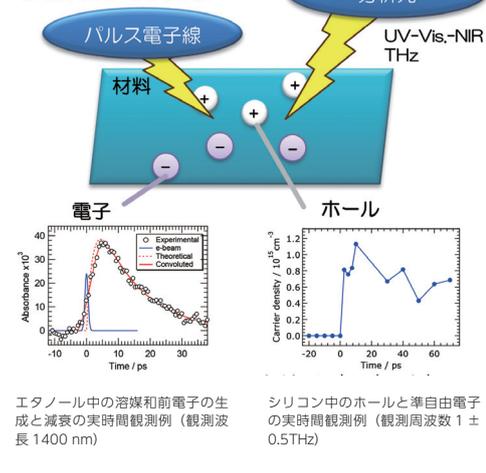
技術内容

我々は、量子ビームが誘起する超高速反応の基礎過程の解明を目指し、極短パルス電子線によるダイナミクス計測を行っています。フェムト秒・アト秒パルスラジオリシスでは、試料に量子ビーム(電子線)を照射し、分析光(紫外・可視・近赤外・遠赤外)の吸収・透過率の解析により、反応ダイナミクスの計測を行っています。この計測により、電離放射線の利用が検討されている次世代ナノファブリケーション、放射線治療、原子炉水化学等における量子ビーム誘起による超高速反応の知見の提供が可能となります。図にはエタノールやシリコンに電子ビームを照射した直後に起きるピコ秒オーダーの反応の観測例を示します。

社会への影響・期待される効果

放射線場や宇宙空間での材料の劣化や、材料中の電荷キャリアの動き、EUVリソグラフィ等の次世代半導体微細加工技術の基礎過程の解明に役立つ知見を与えます。これらの知見の材料へのフィードバックが極限空間での活動を支える材料や、次世代材料の開発の契機となることを期待します。

また、極短パルス電子ビームは、物質を高密度にイオン化・励起できる可能性があり、新たな材料プロセスの可能性を秘めています。

時間分解分光法
(パルスラジオリシス)

論文 Paper]

- [1] T. Toigawa, et al., Radiat. Phys. Chem. 123, 73-78 (2016); T. Kondoh, et al., Radiat. Phys. Chem. 84, 30-34 (2013); T. Kondoh, et al., Radiat. Phys. Chem. 80, 286-290 (2011); 80, 286-290 (2011).
- [2] I. Nozawa, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 17, 072803 (2014).
- [3] K. Kan, et al., Rev. Sci. Instrum. 83, 073302 (2012); J. Yang, et al., Nucl. Instr. Meth. A 629, 6-10 (2011).

超高速パルス電子顕微鏡

Ultrafast electron microscope with relativistic femtosecond electron pulses

研究分野
Departmentナノ極限ファブリケーション
Advanced Nanofabrication研究者
Researcher楊 金峰 神戸正雄
J. Yang M. Gohdoキーワード
Keyword電子顕微鏡、電子線回折、フェムト秒電子線パルス、構造ダイナミクス
electron microscopy, electron diffraction, femtosecond electron beam, structural dynamics応用分野
Application構造ダイナミクスの研究、物質機能の解明、新材料・デバイスの創製
structural dynamics, material functions, new device development

研究開発段階

基礎

実用化準備

応用化

背景

新しい物質創製・新物性発現には、実時間 (\sim fs) と実空間 (\sim Å) での原子・分子の動きや構造変化のダイナミクスを直接的に観察し理解することは必要不可欠です。一方、汎用の電子顕微鏡では高時間分解能がなく、フェムト秒・ピコ秒の早い時間領域での構造変化の観察がまだ不可能です。

概要・特徴

最先端加速器技術を用いて、エネルギーが3 MeV、パルス幅が100fsの高輝度電子線パルスを発生し、フェムト秒時間分解能を有する「超高速電子顕微鏡」を世界に先駆けて開発し、原理実証に成功しました。

技術内容

我々は、物質科学の研究力を高め、新たな学際領域を切り拓き、革新的製品開発の核となる新知見を創出するために、物理、化学、生物学など幅広い科学分野に利用可能な、時間的にフェムト秒、空間的にオンゲストロームの分解能を有する「超高速電子顕微鏡」を開発し、実証実験を試みました。

開発した超高速電子顕微鏡では、高周波電子銃技術を用いてエネルギー3MeV、パルス幅100fsの高輝度電子線パルスを発生し、相対論的フェムト秒電子線パルスを用いた電子顕微鏡像の測定に成功しました。電子回折の観察では、単一電子線パルスによる測定や、フェムト秒時間分解構造変化の観察に成功しました。これにより、今まで測定できなかった不可逆な構造ダイナミクスの解明を可能にしました。

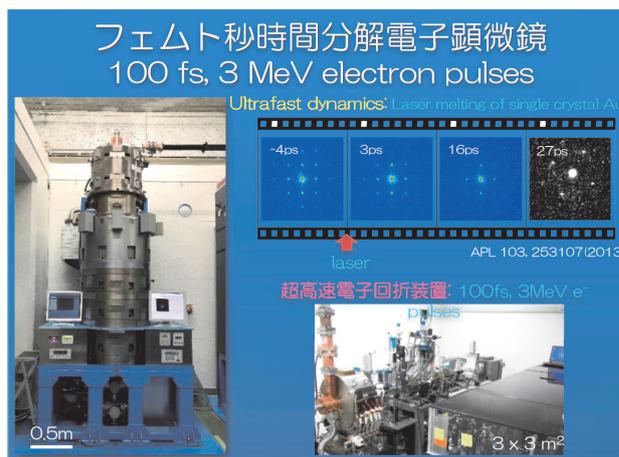
社会への影響・期待される効果

相転移等のトリガーに始まる構造変化等の拡大現象や、金属中の転移滑り現象の観測、化学反応における分子構造変化等のダイナミクス解明を目指しています。これにより新しい物質相・新物性の探索、化学反応から生成される様々な中間種の発見が期待されます。

また、様々なタンパク質の構造決定において、ビームダメージよりも早く回折像を取得し、構造決定する手法の確立を目指しています。これにより創薬等への貢献が期待されます。

【論文 Paper】

- [1] Electronics and Communication in Jpn, 98, No. 11, 50-57(2015);
- [2] Microscopy, 67, 291-295(2018);
- [3] Adv. in Cond. Matt. Phys. 2019, 9739241(2019);
- [4] Quantum Beam Sci. 2020, 4, 4(2020).



量子ビームによる材料の反応解析

Analysis of reactions induced in materials using quantum beam

研究分野
Department量子ビーム物質科学
Beam Materials Science研究者
Researcher古澤孝弘
T. Kozawaキーワード
Keywordレジスト、微細加工、リソグラフィ、量子ビーム
resist, nanofabrication, lithography, quantum beam応用分野
Application半導体リソグラフィ、レジスト材料
semiconductor lithography, resist materials

研究開発段階

基礎

実用化準備

応用化

背景

半導体製造における極端紫外光リソグラフィ、粒子線ガン治療等、今後電離放射線領域にある量子ビームの利用が大きく展開して行くことが予想されます。

概要・特徴

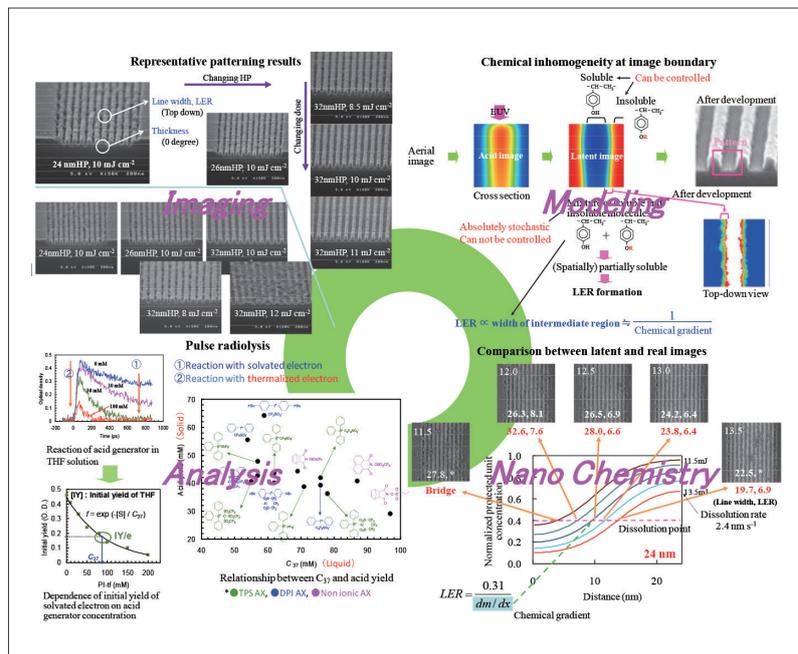
短パルス量子ビームを活用した高時間分解過渡吸収分光システムは他に類を見ない装置であり、モデリングに威力を発揮します。

技術内容

最先端の量子ビーム（電子線、極端紫外光、レーザー、放射光、X線、ガンマ線、イオンビーム）を利用して、量子ビームが物質に引き起こす化学反応と反応場の研究を行っています。量子ビームによる物質へのエネルギー付与から、化学反応を経て、機能発現に至るまでの化学反応システムの解明、得られた知見から新規化学反応システムの構築を行い、産業応用分野としては、特に半導体リソグラフィ材料をターゲットとして、反応解析、材料設計指針を得るための研究を行っています。

社会への影響・期待される効果

- レジスト材料の反応解析
- 新規材料の設計指針の取得



[論文 Paper]

- [1] T. Kozawa and S. Tagawa, Jpn. J. Appl. Phys. (Invited Review) 49 (2010) 030001.
 [2] T. Itani and T. Kozawa, Jpn. J. Appl. Phys. (Invited Review) 52 (2013) 010002.

量子ビームを用いた極限状態下の誘起反応化学

Study on radiation induced chemical reactions at extreme conditions

研究分野
Department量子ビーム物質科学
Beam Materials Science研究者
Researcher室屋裕佐
Y. Muroyaキーワード
Keyword量子ビーム、放射線化学、高温高压流体、超臨界状態、軽水炉水化学
quantum beam, radiation chemistry, high temperature and pressure fluids, supercritical state, water chem応用分野
Application環境科学、軽水炉水化学
environmental science, water chemistry in nuclear engineering

研究開発段階

基礎

実用化準備

応用化

背景

量子ビームはガン治療、半導体加工、環境有害物質の無害化や難分解性物質の分解といった幅広い分野に利用されています。照射によって物質中に生成するイオンやラジカル、電子といった反応活性種をうまく活用することが鍵となりますが、これらの反応性は高温下で著しく増大することから強力且つ効率的な反応場を創製できることが期待されています。一方で原子力工学においてこれらの反応活性種は構造材料の腐食促進の原因となり、バルク材料界面における化学雰囲気制御が長期安全性に関わる課題となっています。

概要・特徴

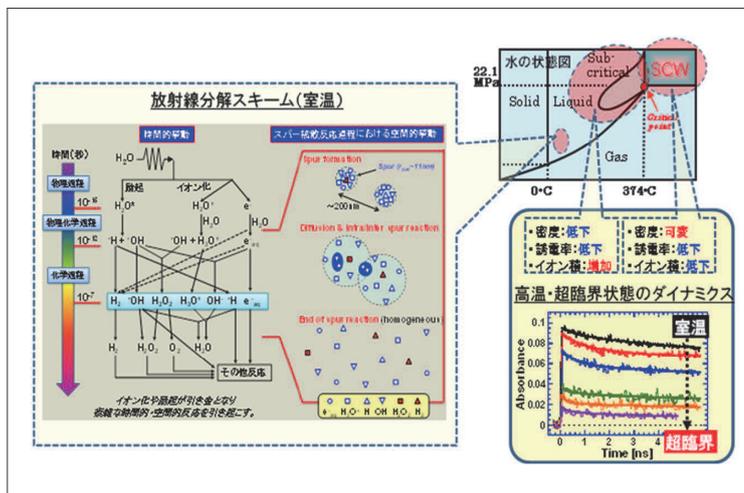
ピコ秒～ナノ秒～マイクロ秒といった極めて短時間に進行する放射線反応を素過程から解明し、これを基に反応システムの把握や制御の研究を行います。

技術内容

電子線、ガンマ線、極紫外光といった様々な量子ビームを用いてバルクや溶液-固体界面において誘起される反応を追跡し、シミュレーションも併用することにより反応機構の解明や新たな反応場創製のための指針を得ることを目指します。

社会への影響・期待される効果

- 高温高压溶媒の放射線分解反応過程の解明
- 亜臨界・超臨界水を用いた新しい反応場の創製
- 放射線照射下における溶液・固体表面相互作用の解明
- 量子ビームを用いたナノ粒子生成と界面の振る舞いの解明
- 放射性廃棄物処理における化学環境評価



【論文 Paper】

- [1] "Supercritical pressure light water cooled reactors", Springer, ISBN: 978-4-431-55024-2, pp.347-375 (2014).
- [2] Chem. Phys. Lett., 657 (2016) 102-106.
- [3] Phys. Chem. Chem. Phys., 19 (2017) 23068-23077.
- [4] Phys. Chem. Chem. Phys., 19 (2017) 30834-30841.
- [5] Nat. Commun., 10 (2019) 102.

レーザープラズマ駆動高エネルギー電子加速の研究開発

R&D on laser-plasma-driven electron acceleration

研究分野
Department量子ビーム物理
Beam Physics研究者
Researcher細貝知直 金展 Y. ゲー
T. Hosokai J. Zhan Y. Gu
水田好雄 中野和美
Y. Mizuta K. Nakanoキーワード
Keywordレーザー加速、プラズマ、超短パルスレーザー、極短電子バンチ
laser-driven particle acceleration, plasmas, ultra-short pulse lasers, ultra-short electron bunches応用分野
Application高エネルギー加速器、卓上加速器、超高速イメージング、医療、材料、創薬
high-energy accelerators, table-top accelerators, ultra-fast imaging, medicine, materials, drug discovery

研究開発段階

基礎

実用化準備

応用化

背景

高強度レーザーとプラズマとの相互作用で電子を加速するレーザープラズマ加速は従来の高周波加速の1000倍以上の超高加速電場を生成可能であることから、キロメートルサイズの高エネルギー加速器を卓上サイズにまで小型化可能と期待されています。

概要・特徴

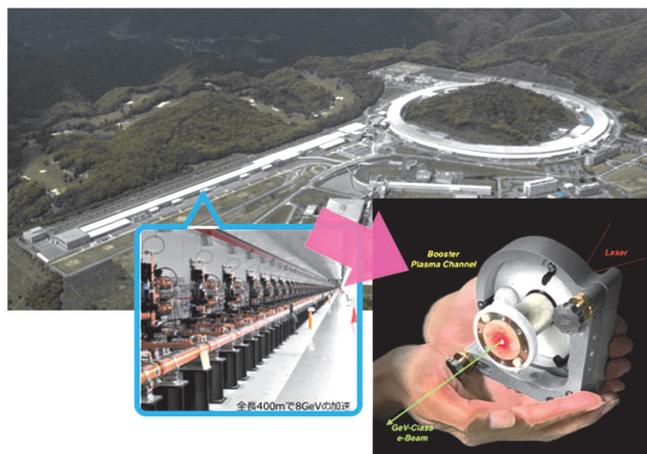
レーザープラズマ加速器の実現に向けた研究開発と高エネルギー電子ビームの利用開拓を行っています。

技術内容

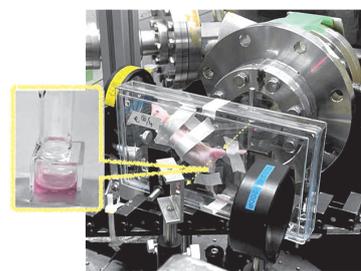
レーザー航跡場加速はGeV級の超高エネルギーの電子加速を卓上サイズで実現可能と期待されています。電子ビームの安定性/再現性、品質、制御性等の粒子加速器としての性能指標の向上がレーザープラズマ加速器実現への大きな課題です。相対論プラズマの挙動と電子加速機構の詳細な理解をベースに、レーザー加速実験を実施し、レーザープラズマ加速器の実現を目指します。同時に、レーザープラズマ加速器ならではのユニークなビームの特徴を利用する新しい研究テーマの開拓も行っています。

社会への影響・期待される効果

レーザープラズマ加速による高エネルギー電子ビームをドライバーにしたXUV領域の自由電子レーザーの発振を目指して研究開発を進めています。並行して、体内深部ビーム創薬など、高エネルギー電子ビームの新奇応用を開拓しています。



開発中のプラズマフースター
—5cmJJGeV級レーザー加速装置



高エネルギー電子ビーム創薬実験

【論文 Paper】

- [1] Z. Lei et al., Rev. Sci. Instrum. 95, 015111 (2024).
- [2] Z. Lei et al., Prog. Theor. Exp. Phys. 033J01 (2023).
- [3] N. Pathak et al., Phys. Plasmas, 28, 053105 (2021).
- [4] N. Pathak et al., Phys. Plasmas, 27, 1033106 (2020).
- [5] A. Zhidkov et al., Phys. Rev. Res., 2, 013216 (2020).
- [6] Z. Jin et al., Scientific Reports, 9, 20045 (2019).

【特許 Patent】

- [1] 特許第6873465号「電子ビーム照射装置及び電子ビーム照射装置の作動法」
- [2] US 10,104,753 B2 (米国)
- [3] GB 2559676 B (英国)
- [4] 特許第6319920号「光導波路形成法」
- [5] 特許第5611699号「電子ビームパルス出射装置」

超高感度ナノポアウイルスセンサー

Ultra-sensitive nanopore virus sensor

研究分野
Departmentバイオナノテクノロジー
Bio-Nanotechnology研究者
Researcher谷口正輝 筒井真楠 田中裕行 小本祐貴
M. Taniguchi M. Tsutsui H. Tanaka Y. Komotoキーワード
Keywordウイルス、ナノポア
virus, nanopore応用分野
Applicationウイルスセンサー
virus sensor

研究開発段階

基礎

実用化準備

応用化

背景

従来、インフルエンザの型判定は、イムノクロマト検査キットに現れるマーカーの有無を、熟練者が目視で判断する形式で行われており、ウイルス数が少ない感染初期の段階では判定が難しいだけでなく、その的中率は個人の能力にも依存していました。

概要・特徴

極薄窒化シリコン膜中に開けられたナノ細孔(ナノポア)を通るイオン電流を計測するナノポア法を用いて、インフルエンザウイルスを1個レベルで検出しました。

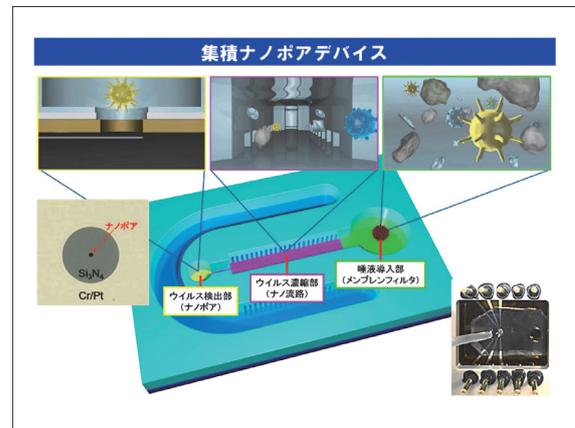
技術内容

我々は、ナノポアセンシングの単一粒子検出能という究極の感度を用いて、インフルエンザウイルスの検出を行いました。さらにそのシグナル解析では、従来利用されてきた波形の高さや幅だけではなく、シグナルの立ち上がり角度や尖り具合(尖度)などの特徴量を利用しました。この高次元解析を、AI技術を用いることにより、人間の目ではもはや判別不可能なシグナルのわずかな違いも判別できるようになり、今回の成果へと繋がりました。

インフルエンザウイルス粒子1個で72%,20個以上の検出で95%以上の精度で型判定が可能であることを実証しました。これにより、検査者の能力に依存しない、感染初期でのインフルエンザウイルス型判定の実現が期待されます。

社会への影響・期待される効果

本研究成果により、判定する人の能力に依存しない、感染初期でのインフルエンザの型判定が可能になり、患者の負担軽減やウイルス感染の拡大抑止が期待されます。また、本手法はインフルエンザのみならず、あらゆるウイルス種への応用が可能な原理を有しており、従来の1種類のウイルス同定のみに限定されている現状の検査キットの性能を大きく超える、多項目ウイルス検査の実現が期待されます。



【論文 Paper】

- [1] Sci. Rep. 7 (2017) 17371.
- [2] ACS Nano, 10 (2016) 803.
- [3] Appl. Phys. Lett., 104 (2014) 163112.
- [4] Sci. Rep. 3 (2013) 01855.
- [5] Appl. Phys. Lett., 103 (2013) 013108.
- [6] "Scientific Reports" on Friday, November 2. (2018.).

【特許 Patent】

- [1] 特願2012-017325
- [2] 特願2012-286115
- [3] 特願2013-047373