

量子機能材料のデバイス化加速

官民研究開発投資拡大プログラム (PRISM)

「量子技術領域」

令和3年度成果

令和4年3月

文部科学省

課題と目標

- **（課題）** 元施策の量子機能材料研究において、企業等の参画によるデバイス化の障壁となっている、イオンビーム照射の精度や安定度の不足を解決する。
- **（目標）** イオンビーム局所照射によって作製される量子機能材料の品質を向上させるために、イオンビームの多段集束と高精密位置決め及び高精度モニタリングとAI制御を導入することによって、高精度・高安定度のイオンビームを供給可能とする。

「施策名」の概要

- **元施策：** 量子科学技術研究開発機構（QST）運営費交付金「量子ビーム応用研究」のうち、量子ビームの1つである高エネルギーイオンビーム照射による材料改質技術を活用した量子機能材料研究を実施。（R3年度：241,000千円）
- **PRISMで実施する理由：**
多段集束技術や、高精度モニタリングとAI制御を導入することで、スピン欠陥の数や位置等をナノレベルで高精度制御した量子機能材料作製が可能となる。さらにその結果、新規量子ビットの創成やデバイス設計に合わせた材料作製が可能となり、元施策（量子ビームプラットフォームの最先端技術開発）と連携して量子機能材料のデバイス化研究が加速されることにより、民間企業等の参画が促進され、投資誘発効果が見込めることからPRISMで実施する。
- **テーマの全体像：**
元施策にて、QSTは保有する量子ビームプラットフォームの1つである高エネルギーイオンビーム照射施設を活用することにより、量子機能材料の特性評価や磁場、温度センシング等の原理実証を進めており、世界的に競争が激化している量子センサ開発に資する多数の基礎データを得ている。一方で、イオンビーム照射の精度や安定度の不足により、企業等の参画が不可欠な量子機能材料のデバイス化には踏み込めていないため、PRISMで高精度・高安定度のイオンビームを供給可能とする技術開発を行うことにより、量子機能材料のデバイス化を加速させる。

出口戦略

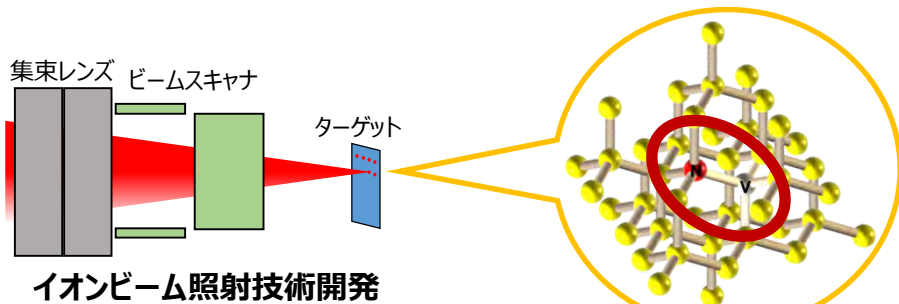
イオンビームの多段集束と高精密位置決め及び高精度モニタリングとAI制御を導入することによって、高精度・高安定度のイオンビームを供給可能とし、イオンビーム局所照射によって作製される量子機能材料の品質が向上し量子デバイスの研究開発が加速させる。さらに、高エネルギーイオンビームを利用した材料創成・評価が高精度化・高効率化することから、企業と連携したデバイス実装で必要となる条件探索が短期間で可能とし、様々な目的に応じた量子デバイスの研究開発を進める。

民間研究開発投資誘発効果等

- 民間投資誘発効果として、新技術の特許出願や実施許諾が見込まれ、量子機能材料開発で素材メーカーやデバイスメーカーとの連携が進む。高品質イオンビーム照射が容易に利用可能となり、量子機能材料以外にも高機能材料の民間企業による開発が拡大するとともに、民間企業による次世代パワーデバイス開発が加速し、10年で10億円の民間研究開発投資が見込まれる。
- 民間からの貢献額：5年で126,000千円相当（人件費等：6,000千円、共同研究費等：120,000千円）のマッチングファンドを見込む。

アドオン（文部科学省）：228,000千円
元施策名：量子ビーム応用研究 241,000千円

元施策では、高エネルギーイオンビームを試料上に集束し、局所照射する技術により、ダイヤモンド窒素-空孔中心（NVセンター）等の量子機能材料を作製、評価する基礎研究を実施。



量子機能材料作製、評価

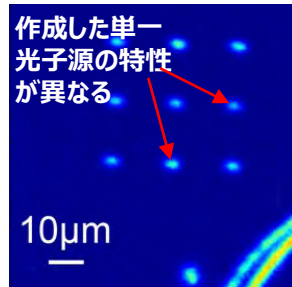


【PRISM】

量子機能材料のデバイス化に向け、多段集束と高精度位置決めによるイオンビーム照射の高精度化及び高精度ビームモニタリングによるAI制御によるイオンビームの高安定化を実現する（R3）。これにより、量子機能材料の高品質化を可能とすることで、企業や大学の研究者の参集を促進し、産学連携を通じた固体量子センサとしてのデバイス化などを加速させる（R4～）。

【開発のイメージ】

イオンビームの精度・安定度不足により、作製した量子機能材料の品質にばらつきが発生。



R3

ナノレベル高精度照射技術開発

ビーム軌道計算とビーム光学シミュレーションにより、精密磁気レンズを用いた多段集束技術と、高精度位置決め技術を開発

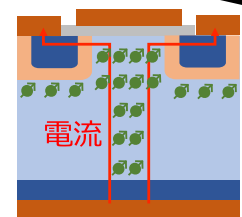
イオンビームの高安定化

ビームモニタリングの高精度化とAIを用いた高速フィードバック制御システムの開発

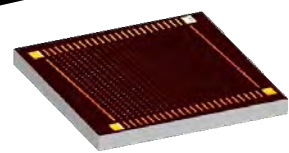
R4

高精度3次元スピン欠陥配列技術の開発

- 量子デバイス高機能化に向けた3次元スピン欠陥配列の形成
- 新規量子センサー用スピン欠陥の探索と任意位置形成



SiCデバイス



ダイヤモンド NVセンターアレイ

- 高品質な量子機能材料の企業等への提供
- 企業と連携したデバイス実装の研究開発の加速

○施策全体の目標

イオンビームの多段集束と高精密位置決め及び高精度モニタリングとAI制御を導入することによって、高精度・高安定度のイオンビームを供給可能とし、イオンビーム局所照射によって作製される量子機能材料の品質が向上し量子デバイスの研究開発が加速する。さらに、高エネルギーイオンビームを利用した材料創成・評価が高精度化・高効率化することから、企業と連携したデバイス実装で必要となる条件探索が短期間で可能とし、様々な目的に応じた量子デバイスの研究開発を進める。

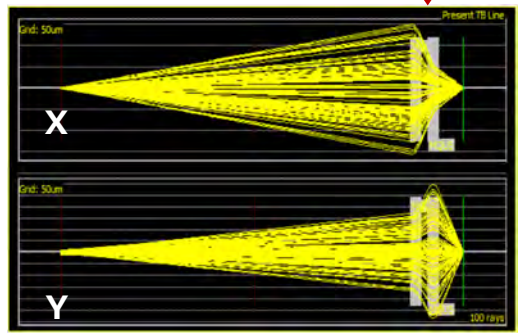
事業名等（※個別に目標を設定している場合）	当年度目標	目標の達成状況
① ナノレベル高精度照射技術開発	イオンビームの多段集束と高精密位置決めによって、100nm以下の高精度照射を実現する。	<ul style="list-style-type: none"> 磁気レンズの多段化によって高縮小率を得るためのビーム光学シミュレーションを実施し、企業の参画を得て、シミュレーション結果に基づいて磁気レンズを設計・製作した。縮小率を3倍以上に向上し、目標の100nm以下を達成。
②イオンビームの高安定化	ビームモニタリングの高精度化とAIを用いた高速フィードバック制御システムを開発し、経時的なビーム変動を抑制するとともに、ビーム集束システムを自動化する。	<ul style="list-style-type: none"> 高精度高速I/Oモジュールの導入によりビーム制御機器や診断装置の制御・計測信号の高分解能化と制御コンソール間の通信処理速度の高速化を実現。これによる加速電圧の安定性向上と高安定電源を組み込んだ偏向磁場の高速フィードバック制御によりビーム安定性が65%向上し、これにより当年度目標の高安定度イオンビーム供給を達成。 従来、手動で3時間以上を要していたビーム集束について、企業の参画を得て、AIの画像認識によりビームサイズを自動評価自動集束するシステムを開発した。これにより試料に照射できる時間が1.5倍に増加。

○ ナルベル高精度照射技術開発

多段化によって高縮小率を得るためのビーム光学シミュレーションを実施。シミュレーション結果に合わせた磁場を形成するための磁気レンズ設計と製作を東北大学、群馬大学及び民間企業と実施。

従来（1段集束）

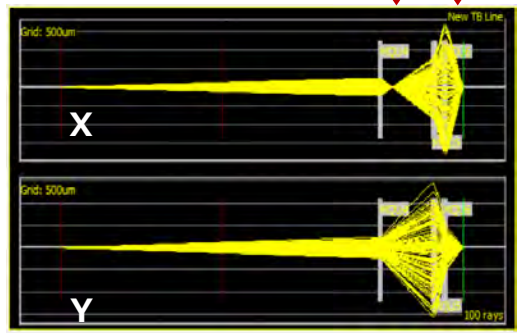
1段のみ



縮小率 X:5、Y:25

改良版（2段集束）

1段目 2段目



縮小率 X:18、Y:43

開発した磁気レンズシステム



3倍の縮小率を達成

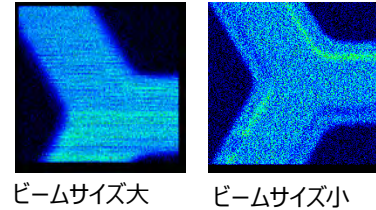
○ イオンビームの高安定化

各コンポーネントの高精度・高安定化と高速フィードバック制御システム開発を民間企業と実施。

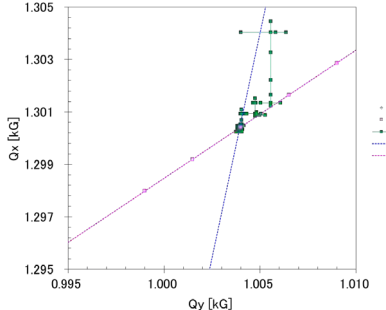


高精度高速I/Oモジュールの導入によりビーム制御機器や診断装置の制御・計測信号の高分解能化と制御コンソール間の通信処理速度の高速化を実現。これによる加速電圧の安定性向上と高安定電源を組み込んだ偏向磁場の高速フィードバック制御技術とのマッチングにより**ビーム安定性が65%向上**。

従来、手動で3時間以上を要していたビーム集束を自動化するシステムの開発を東北大学及び民間企業と実施。



金属の微細なメッシュをテスト試料として（電子顕微鏡と同じ原理の）二次電子像を取得し、AIの画像認識によりビームサイズを自動評価



- ピンクと青のラインの交点が集束ポイント
- 緑のラインがコンピュータによる自動集束の過程

試料に照射できる時間が1.5倍に増加。

資料5 量子機能材料のデバイス化加速」の民間からの貢献及び出口の実績

○民間からの貢献額：5年で126百万円相当

- ①（人件費）6,000千円（R3）
- ②（共同研究費）120,000千円（R4～）

当年度当初見込み	当年度実績
① 高精度集束技術開発と高精度AI制御技術開発とにおいて6,000千円（3,000千円×2社×1年）	① 高精度集束技術開発と高精度AI制御技術開発とにおいて6,000千円（2,000千円×3社×1年）
② 令和3年度に基盤整備が完了することにより、令和4年度以降、素材メーカーやデバイスメーカーなどの共同研究等による民間からの貢献が見込まれる。	② 令和4年度以降、素材メーカーやデバイスメーカーなどの共同研究が6社以上想定され、人件費や評価機器等の提供で4年間で120,000千円（5,000千円×6社×4年）が見込まれる。

○出口戦略

PRISMにより、イオンビームの多段集束と高精密位置決め及び高精度モニタリングとAI制御を導入することによって、高精度・高安定度のイオンビームを供給可能となり、イオンビーム局所照射によって作製される量子機能材料の品質が向上し量子デバイスの研究開発が加速される。さらに、高エネルギーイオンビームを利用した材料創成・評価が高精度化・高効率化することから、企業と連携したデバイス実装で必要となる条件探索が短期間で可能となり、様々な目的に応じた量子デバイスの研究開発を進めることができる。

当年度当初見込み	当年度実績
民間投資を呼び込むために、イオンビームの多段集束と高精密位置決め及び高精度モニタリングとAI制御を導入することによる統合的な高精度・高安定イオンビーム自動照射システムを整備する。	企業の参画を得て、統合的な高精度・高安定イオンビーム自動照射システムを完成させ、100nm以下の高精度と、65%の安定性向上及び1.5倍の照射時間を達成。令和4年度以降、素材メーカーやデバイスメーカーなどの民間投資が見込まれる。