

量子ビームにより作製した 量子センサによる量子センシング技術

Quantum Sensing Techniques by Quantum Sensor
Fabricated by Quantum Beam



小野田忍

量子科学技術研究開発機構
高崎量子応用研究所
先端機能材料研究部

日本原子力学会創立60周年シンポジウム 量子ビームにより作製した量子センサによる量子センシング技術 '19/4/25 於 東京工業大学



コンテンツ

- 量子センサと量子センシング
 - 量子センサとは
 - ダイヤモンド中の窒素・空孔（NV）センター
- 量子ビーム
 - NVセンターの形成
 - 最近の研究紹介
- 将来展望・まとめ

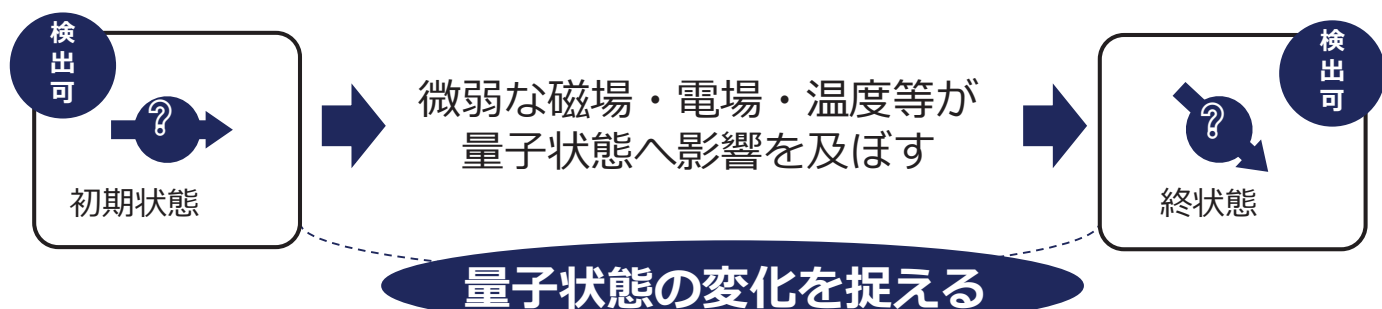
日本原子力学会創立60周年シンポジウム 量子ビームにより作製した量子センサによる量子センシング技術 '19/4/25 於 東京工業大学



量子センサとは

古典的計測では不可能なほど微小な物理量を
量子力学の法則を利用して計測するセンサ

例：ダイヤモンド中の窒素・空孔（NV）センター

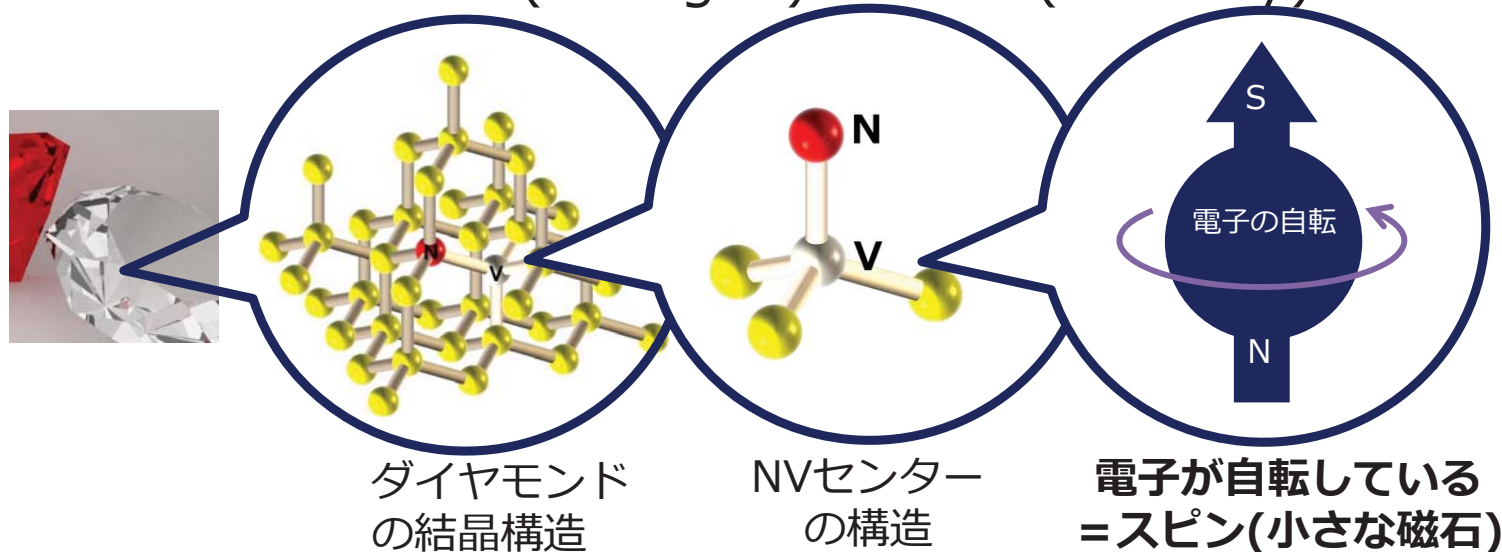


初期状態と終状態を検出できれば量子センサが実現できる

日本原子力学会創立60周年シンポジウム 量子ビームにより作製した量子センサによる量子センシング技術 '19/4/25 於 東京工業大学 QST QUBS

結晶中の量子センサ：NVセンター

炭素を置換した窒素(Nitrogen)と隣の空孔(Vacancy)



特徴

- ・ 室温で利用できる→**革新的**
- ・ ナノからミリメートルまで様々→**マルチスケール**

NVセンターによる量子センシングの例

http://www.mext.go.jp/b_menu/boshu/detail/_icsFiles/afieldfile/2018/10/03/1409113_3_2.pdfより抜粋

JST 光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP) 平成30年度～(10年間)

技術領域：量子計測・センシング

Flagshipプロジェクト

「固体量子センサの高度制御による革新的センサシステムの創出」

(代表機関)

東京工業大学

(共同研究機関)

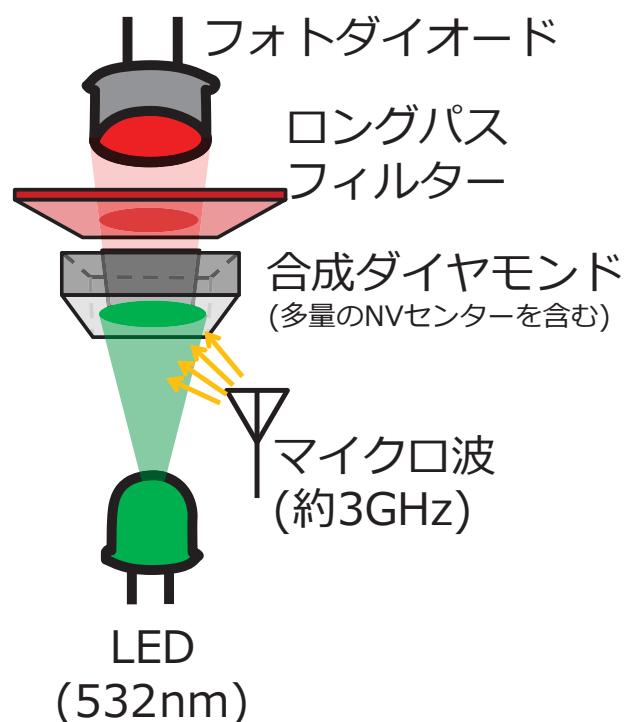
京都大学、東京大学、
産業技術総合研究所、量子科学技術研究開発機構
デンソー、日立製作所、矢崎総業など

(研究開発目標)

- 高い感度と高い空間分解能を持つ**脳磁計測**システムに関するプロトタイプの開発
- 電池やパワーデバイスの**電流・温度**をモニタリングするシステムに関するプロトタイプの開発

日本原子力学会創立60周年シンポジウム 量子ビームにより作製した量子センサによる量子センシング技術 '19/4/25 於 東京工業大学

量子センシングの例：磁気センサ



mm程度の合成ダイヤモンド
(高濃度NVセンターを含む)

フォトダイオードの出力
で量子状態を検出できる

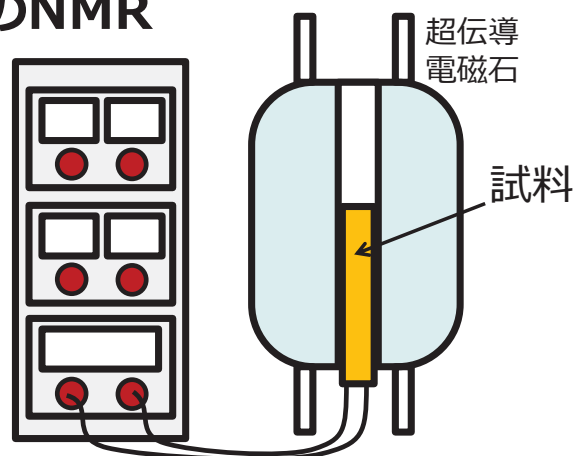
3cm³以下の大きさで実現さ
れていて、デモ機の開発が進ん
でいる

日本原子力学会創立60周年シンポジウム 量子ビームにより作製した量子センサによる量子センシング技術 '19/4/25 於 東京工業大学

量子センシングの例：NMR

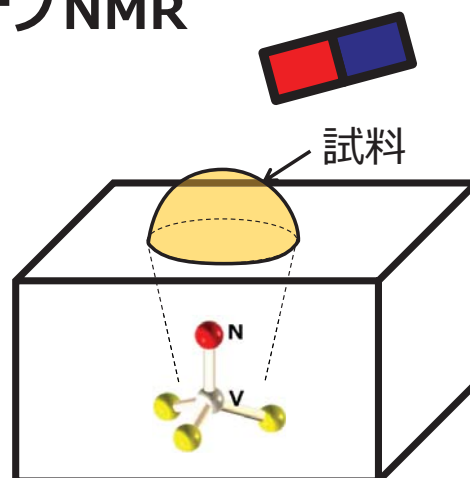
核磁気共鳴

市販のNMR



有機化合物、高分子材料、生体物質の分析。平面構造や立体的構造まで分かる。生命科学の発展に欠かせないツール。

ナノNMR



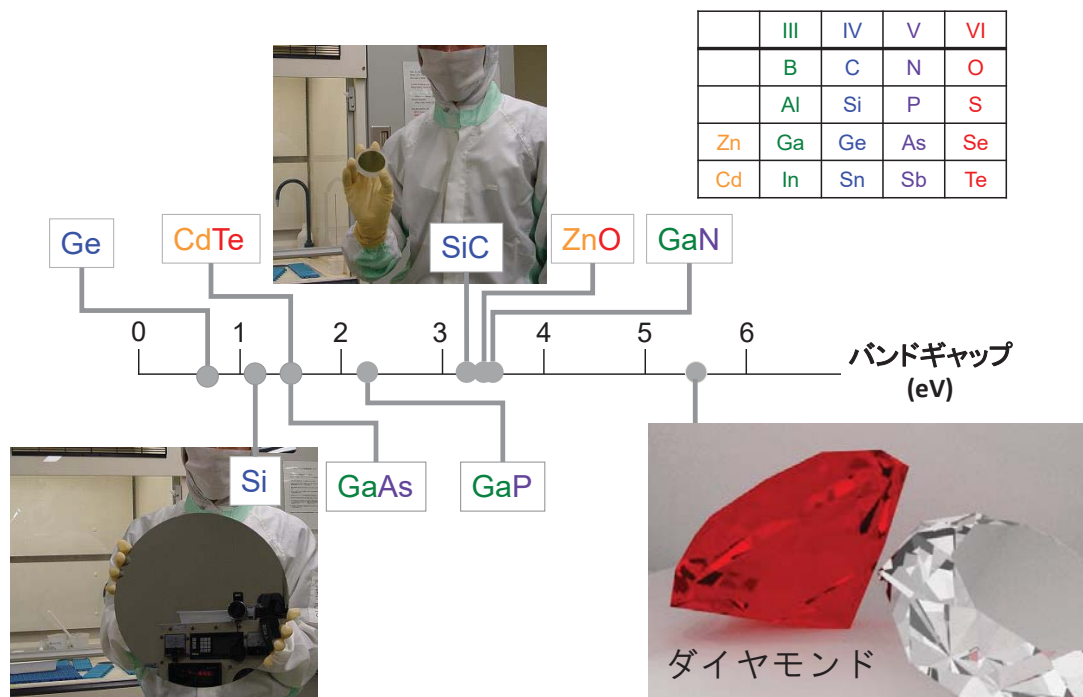
ナノメートルスケールの極微量試料の構造解析。次世代の超高感度NMRとして期待。

日本原子力学会創立60周年シンポジウム 量子ビームにより作製した量子センサによる量子センシング技術 '19/4/25 於 東京工業大学

コンテンツ

- 量子センサと量子センシング
 - 量子センサとは
 - ダイヤモンド中の窒素・空孔（NV）センター
- 量子ビーム
 - NVセンターの形成
 - 最近の研究紹介
- 将来展望・まとめ

ワイドバンドギャップ半導体

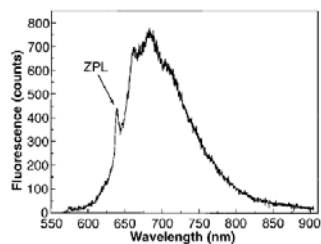
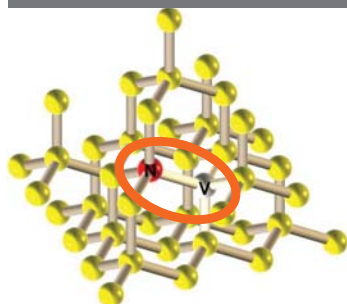


日本原子力学会創立60周年シンポジウム 量子ビームにより作製した量子センサによる量子センシング技術 '19/4/25 於 東京工業大学

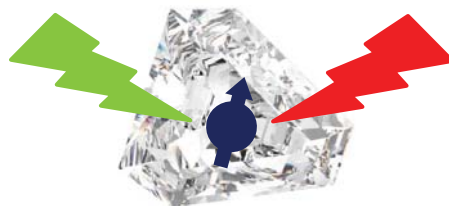
ワイドギャップ半導体の発光センター

ダイヤモンド中の窒素-空孔(NV)

研究・開発を先導 他にもSiV、GeV、NE8、

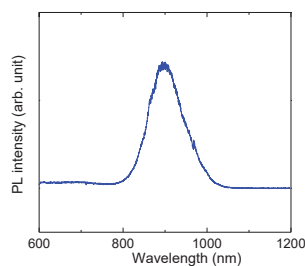
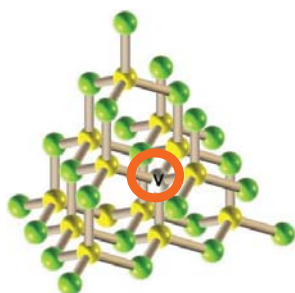


NVセンターの発光スペクトル(室温)

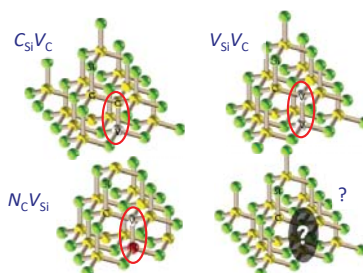


SiC中のシリコン空孔(V_{Si})

赤外領域発光であり、近年、活発に研究 他にも $C_{Si}V_C$ 、 $V_{Si}V_C$ 、



V_{Si} の発光スペクトル(室温)

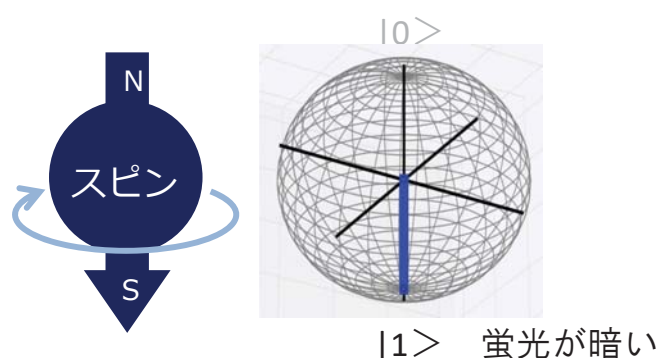
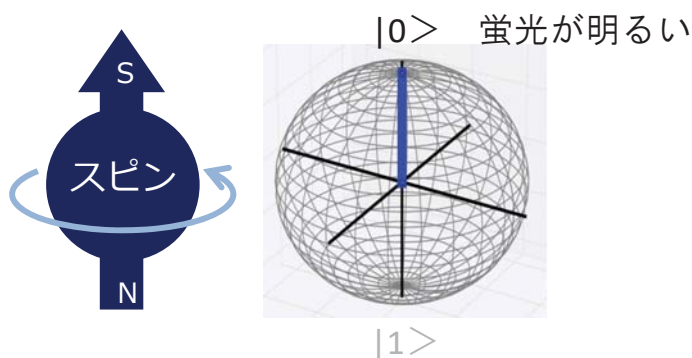
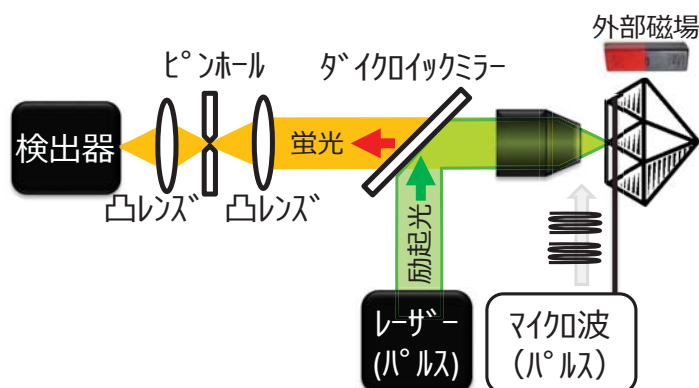


日本原子力学会創立60周年シンポジウム 量子ビームにより作製した量子センサによる量子センシング技術 '19/4/25 於 東京工業大学



NVセンターの量子状態制御装置

共焦点レーザー走査型蛍光顕微鏡



日本原子力学会創立60周年シンポジウム 量子ビームにより作製した量子センサによる量子センシング技術 '19/4/25 於 東京工業大学

コンテンツ

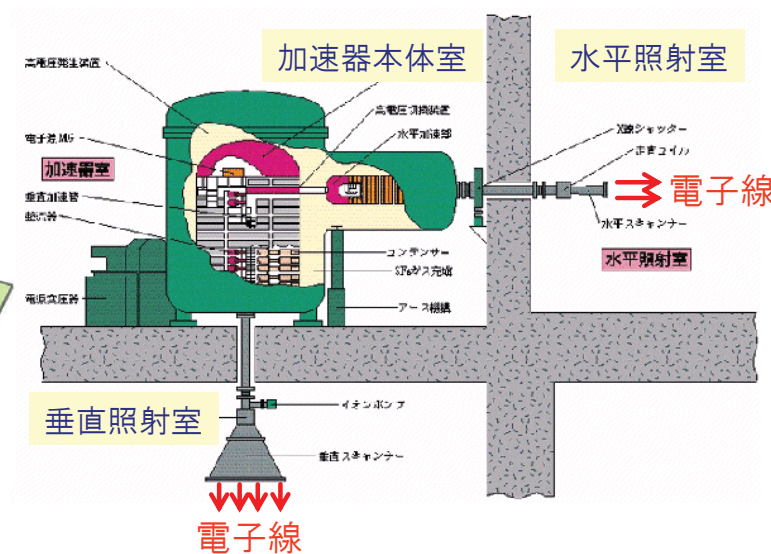
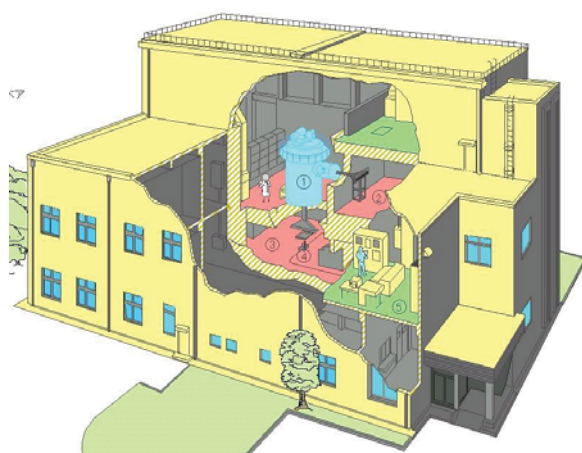
- 量子センサと量子センシング
 - 量子センサとは
 - ダイヤモンド中の窒素・空孔 (NV) センター
- 量子ビーム
 - NVセンターの形成
 - 最近の研究紹介
- 将来展望・まとめ

QST 高崎量子応用研究所



日本原子力学会創立60周年シンポジウム 量子ビームにより作製した量子センサによる量子センシング技術 '19/4/25 於 東京工業大学

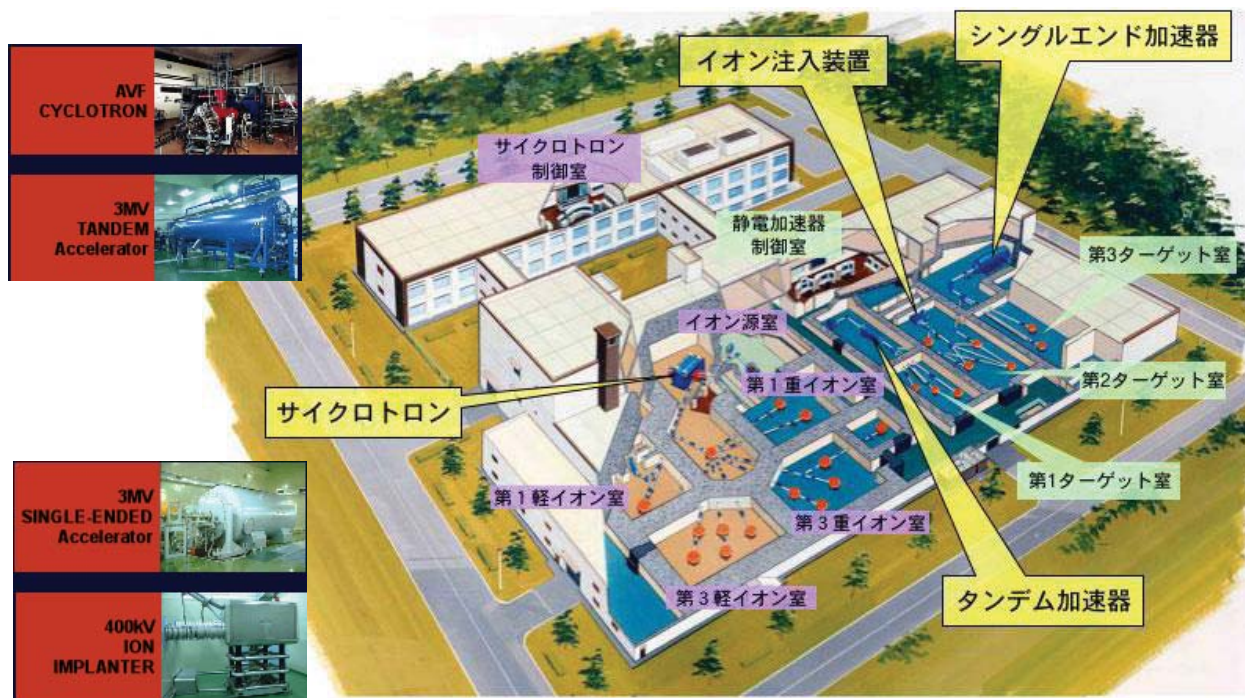
電子線照射施設



Cockcroft-Walton型
エネルギー: 0.5 ~ 2 MeV
電流: 0.1 ~ 30 mA

日本原子力学会創立60周年シンポジウム 量子ビームにより作製した量子センサによる量子センシング技術 '19/4/25 於 東京工業大学

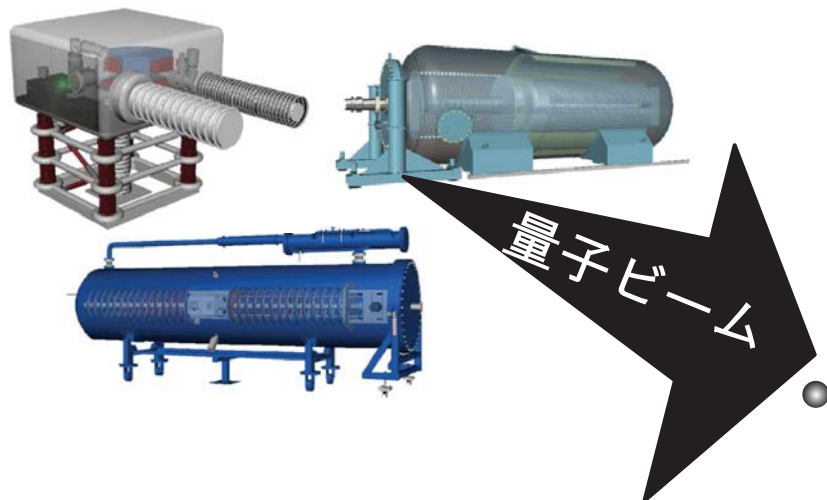
イオン照射施設 (TIARA)



TIARA: T_{akasaki} I_{on} Accelerators for A_{dvanced} R_{esearch} A_{pplication}

日本原子力学会創立60周年シンポジウム 量子ビームにより作製した量子センサによる量子センシング技術 '19/4/25 於 東京工業大学

QST高崎での取り組み



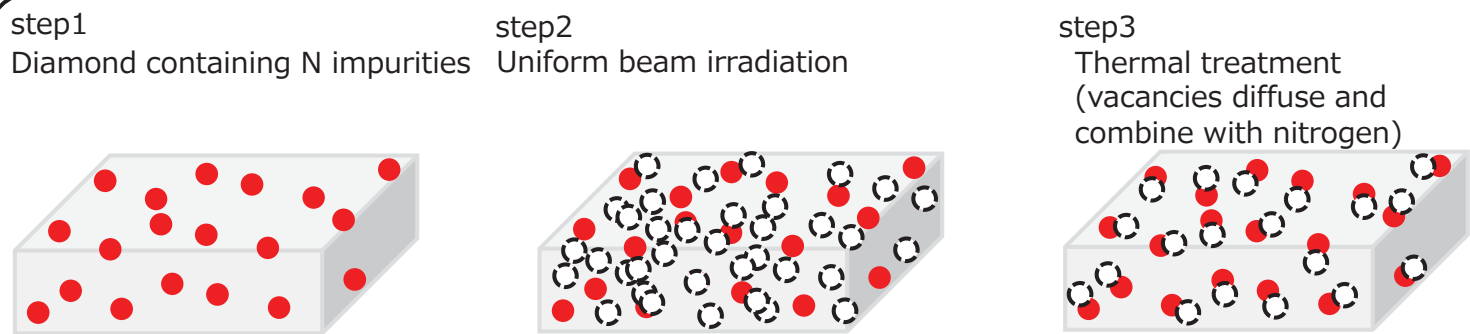
- ワイドバンドギャップ半導体
- ダイヤモンド
- 炭化ケイ素 (SiC)

量子ビームで作る量子ビット・量子センサ

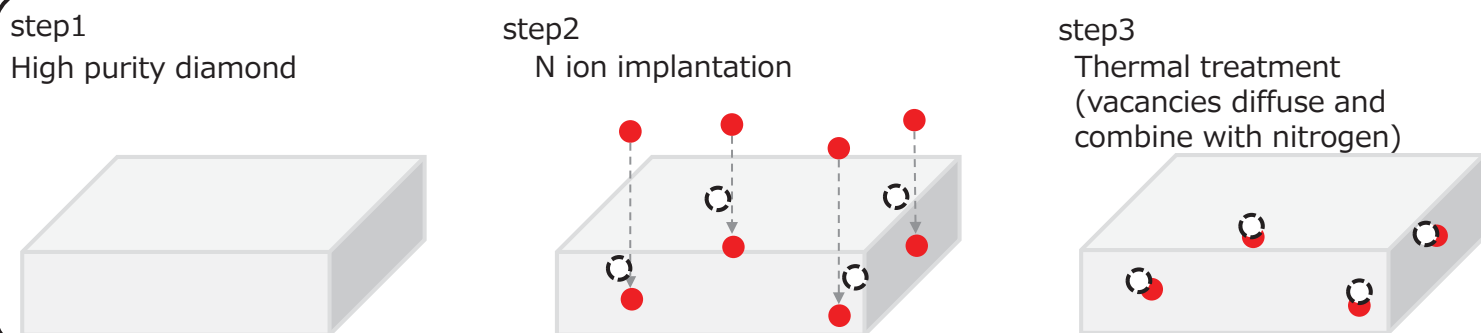
日本原子力学会創立60周年シンポジウム 量子ビームにより作製した量子センサによる量子センシング技術 '19/4/25 於 東京工業大学

量子ビームによるNVセンター作製方法

Electron/Ion beam



Ion beam



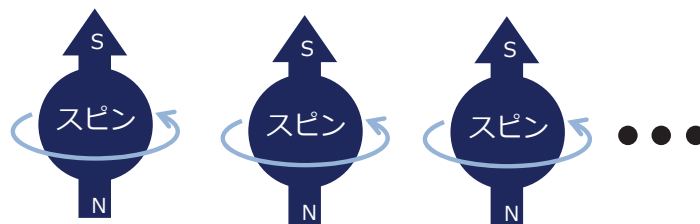
日本原子力学会創立60周年シンポジウム 量子ビームにより作製した量子センサによる量子センシング技術 '19/4/25 於 東京工業大学 QST QUBS

コンテンツ

- 量子センサと量子センシング
 - 量子センサとは
 - ダイヤモンド中の窒素・空孔（NV）センター
- 量子ビーム
 - NVセンターの形成
 - 最近の研究紹介
- 将来展望・まとめ

量子力学的重ね合わせを生む多量子ビット

背景



1量子ビット：1997 Gruber, Science

1量子ビット：2005 J. Meijer, APL (MeVマイクロビーム)

2量子ビット：2010 Neumann, Nat. Phys. (MeVマイクロビーム)

2量子ビット：2013 Yamamoto, PRB (keV窒素分子イオン)

2量子ビット：2016 I. Jakobi, Jour. of Phys. (keV窒素イオン+マスク)

課題：量子ビット数の増加は凡そ10年も停滞

原因：nm間隔に窒素を注入するための照準精度が十分でない

：ストラッグリングがあるため確定的に注入位置を制御できない

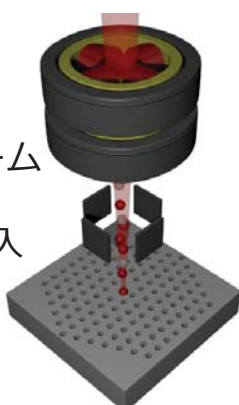
：電荷と個数を制御した窒素のみから成るクラスター形成が困難

日本原子力学会創立60周年シンポジウム 量子ビームにより作製した量子センサによる量子センシング技術 '19/4/25 於 東京工業大学 QST QUBS

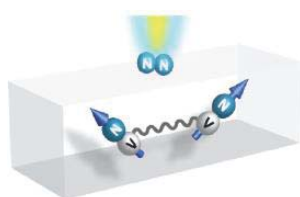
多量子ビット化の取り組み

実験例

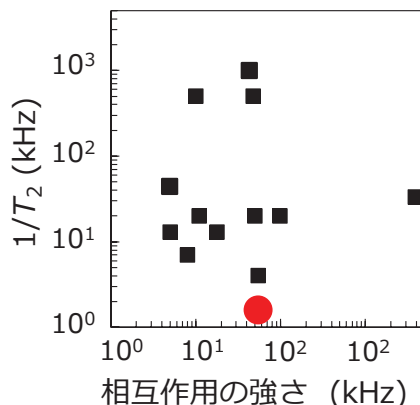
マイクロビーム
+
単一窒素注入



分子イオン注入
2013 Yamamoto, PRB



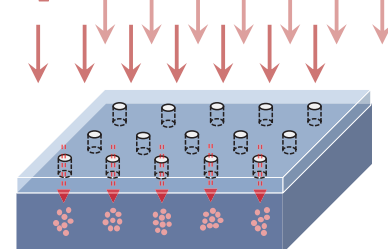
(■は他論文)



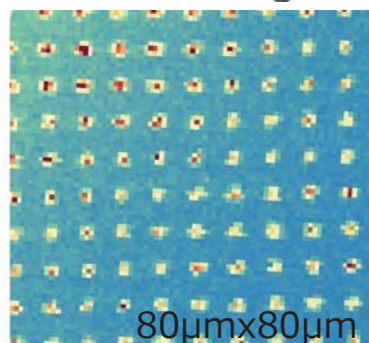
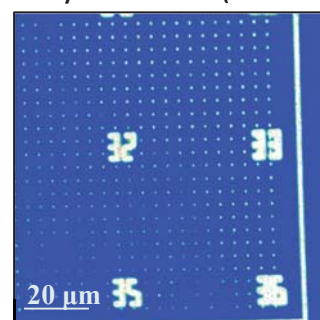
電子線描画(EB)で穴あけした
ナノマスク越しの注入

2018 Fukuda, New J. Phys

N_2^+



EB by Tanii Lab (Waseda Univ.)



多量子ビット化の最近の取り組み

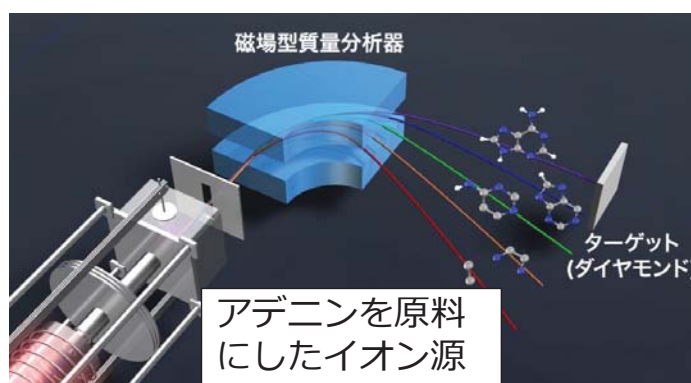
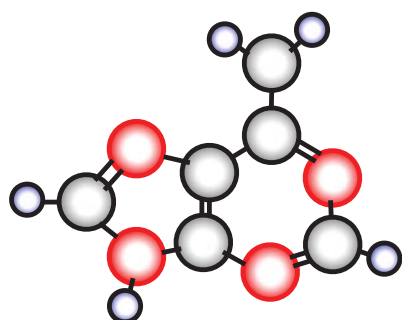
課題

- 1量子ビット・・・N注入
- 2量子ビット・・・N, N₂注入
- 3量子ビット・・・N, N₂注入
- Nクラスター注入？

窒素のみで構成されるNクラスターでなく、窒素を含む有機化合物イオン注入を発案

実験

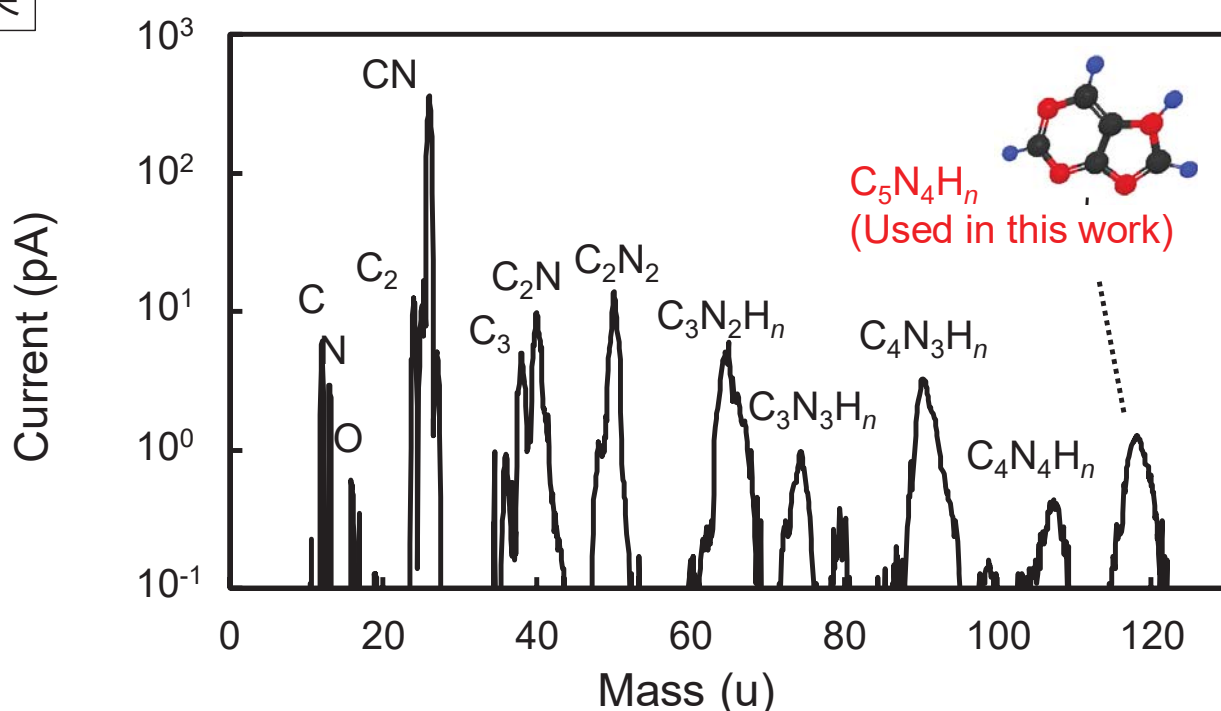
アデニン
(C₅N₅H₅)



日本原子力学会創立60周年シンポジウム 量子ビームにより作製した量子センサによる量子センシング技術 '19/4/25 於 東京工業大学

有機化合物イオンビームの質量分析

結果

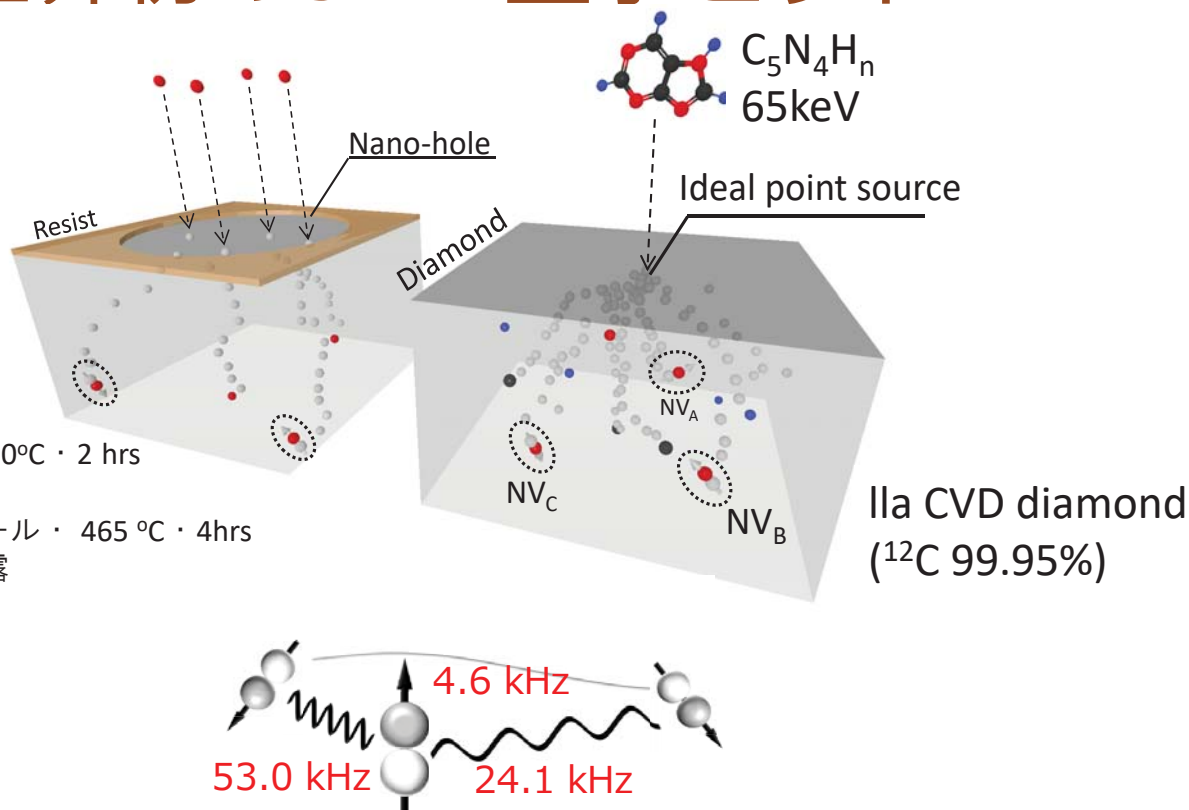


日本原子力学会創立60周年シンポジウム 量子ビームにより作製した量子センサによる量子センシング技術 '19/4/25 於 東京工業大学

世界初の3NV 量子ビット

結果

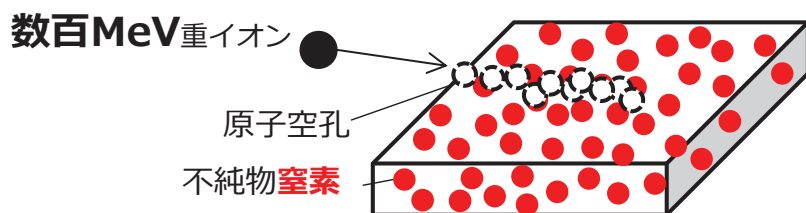
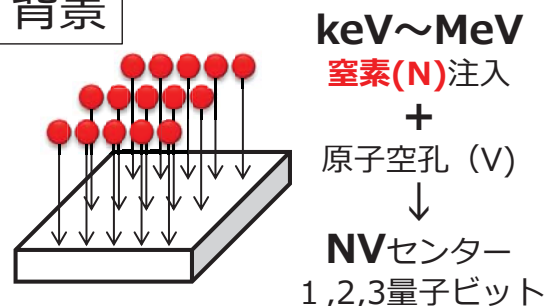
NV形成アニール：1000℃・2 hrs
洗浄：熱混酸・200℃
表面処理：酸素アニール・465℃・4hrs
表面処理：オゾン暴露



日本原子力学会創立60周年シンポジウム 量子ビームにより作製した量子センサによる量子センシング技術 '19/4/25 於 東京工業大学 QST QUBS

AVFサイクロトロンの利用

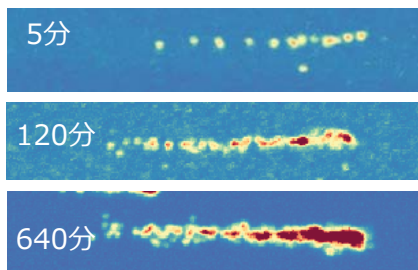
背景



飛跡に沿い多量子ビットが**自律的**に形成

結果

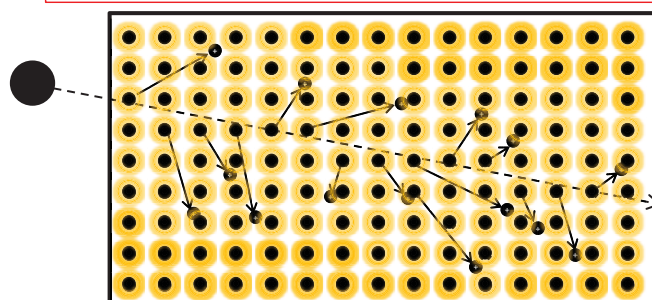
490MeV
Os注入
+
1000℃
熱処理



数百個のNVセンター形成に成功

但し、量子状態が不安定で
量子ビットとして不十分

イオン飛跡検出器として利用可

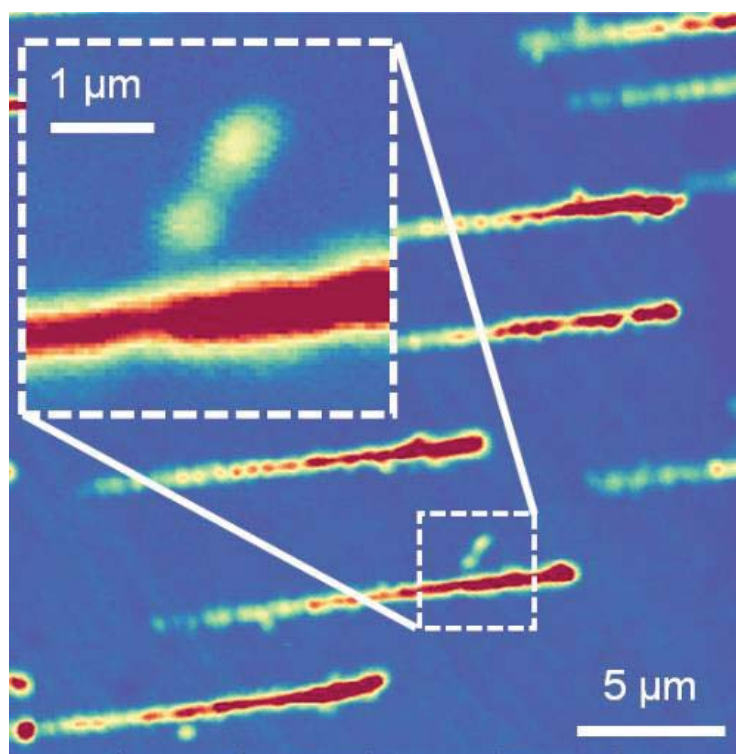
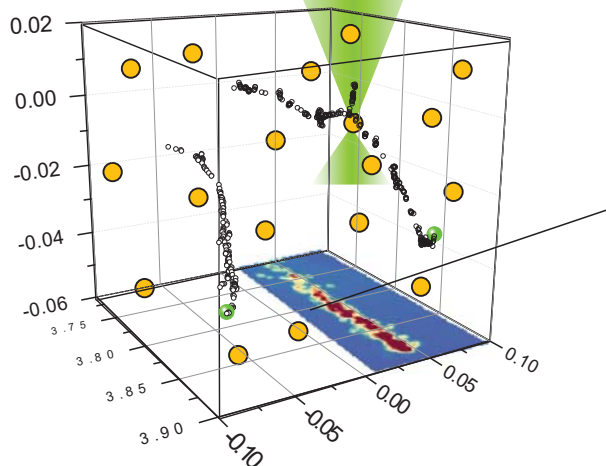


電子阻止能(半径:~5μm)ではなく核阻止能(半径:~10nm)
を利用することから原理的に高分解能

イオン飛跡検出器

結果

Os 490MeV ($5 \times 10^6 / \text{cm}^2$)



日本原子力学会創立60周年シンポジウム 量子ビームにより作製した量子センサによる量子センシング技術 '19/4/25 於 東京工業大学 QST QUBS

研究紹介 3

高濃度NVセンターの利用

背景

2012年
連続的時間並進対称性を自発的に破った
「時間結晶(time crystal)」が提唱
2017年
量子多体系において、非熱平衡状態であ
れば離散的な時間結晶が存在可能

量子多体系としてみなせる平均距離5nm以下の
高濃度NVセンターが必要

電子線照射は高濃度NVセンター形成に有利
但し、電子線照射は欠陥量が増大する問題有り



照射前
窒素:黄

10^{18}cm^{-2} 照射後
歪み:深緑

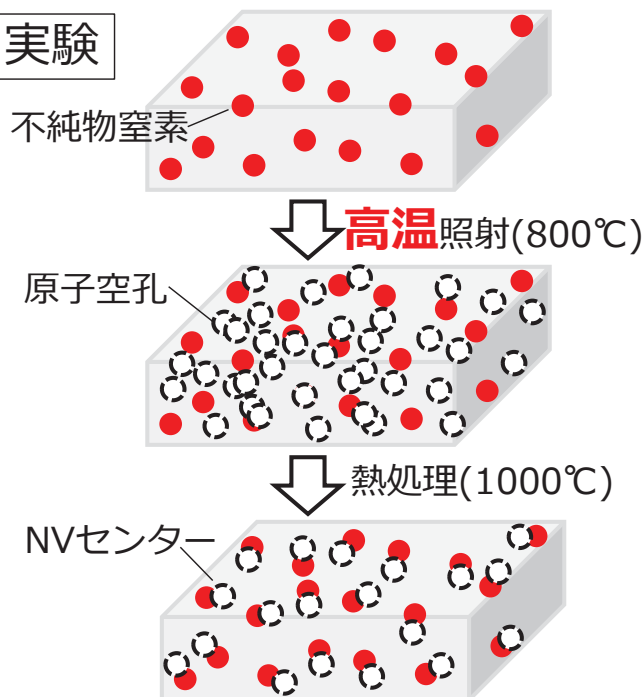
熱処理後
NV:赤

目的

- ・ NVセンター形成促進
- ・ 欠陥の凝集抑制

空孔が拡散する650℃よりも高温で照射を試みた

実験



結果

約5nm間隔に相当する世界
最高濃度 (45ppm) を実現

コンテンツ

- 量子センサと量子センシング
 - 量子センサとは
 - ダイヤモンド中の窒素・空孔（NV）センター
- 量子ビーム
 - NVセンターの形成
 - 最近の研究紹介
- 将来展望・まとめ

日本原子力学会創立60周年シンポジウム 量子ビームにより作製した量子センサによる量子センシング技術 '19/4/25 於 東京工業大学

将来展望・まとめ

量子ビームによる材料創製の紹介

- keV級の窒素「原子・分子」注入
- MeV級の窒素「原子」注入
- サブGeV級のイオン照射
- 電子線照射

世界随一の量子機能材料を量子ビームで創る

次の社会を担う新規の量子技術の創製

謝辞

- ・本研究は、量研高崎の「半導体照射効果研究」プロジェクトのメンバー、筑波大学・磯谷先生、早稲田大学・川原田先生、早稲田大学・谷井先生、群馬大学・加田先生、物材機構・寺地先生、東工大・波多野先生、ウルム大学（ドイツ）・Jeletzko先生らとの共同研究にて行われております。
- ・量子センサに関する研究の一部はMEXT Q-LEAPとCAO PRISM、科研費26246001、26220903、15H03980、16H06326、17H03526の支援を受けたものです。

科研費
KAKENHI

科学技術振興機構

ご清聴ありがとうございました



量子科学技術研究開発機構（QST）は、量子科学技術による「調和ある多様性の創造」により、平和で心豊かな人類社会の発展への貢献を理念とし、「世界トップクラスの量子科学技術研究開発プラットフォーム」の構築を志します。

■ Q S T ホームページ : <http://www.qst.go.jp/>