

スピントロニクス-量子センシング 技術を融合させた 超低消費電力不揮発性メモリ

量子科学技術研究開発機構量子ビーム科学部門

高崎量子応用研究所先端機能材料研究部

半導体照射効果研究

主幹研究員 山崎雄一

2021年7月13日

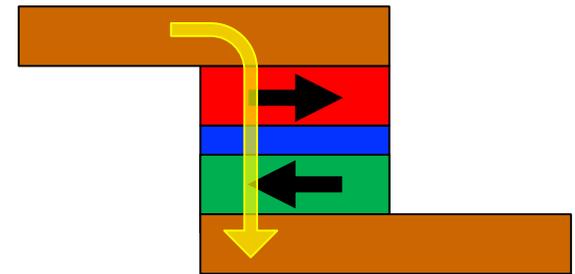
従来技術とその問題点

従来の不揮発性メモリ

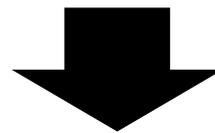
磁気抵抗メモリ(MRAM), 抵抗変化型メモリ(ReRAM), 強誘電体メモリ(FeRAM)など
→電気駆動(電流書き込み・読み出し)

- 電力消費が大きい
- 電気配線で生じる信号遅延(高速化の障壁)

更なる低消費電力化、高速化が難しい



磁気抵抗メモリ
(MRAM)



電気駆動に変わる新原理が求められる

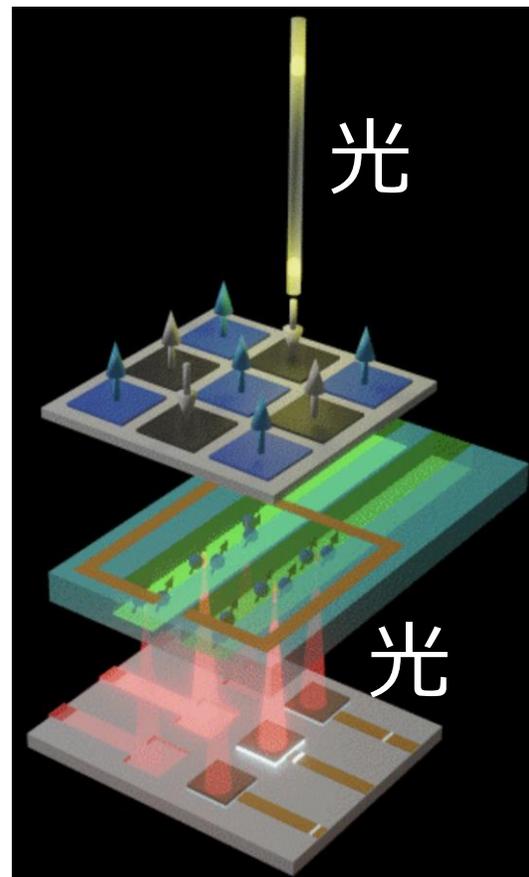
新技術の特徴・従来技術との比較

＜光による書き込み/読み出し＞

書き込み側→光磁化(=光駆動スピン変換)

読み出し側→量子センサー(光)による磁場検出

磁性層
スピン欠陥層
光検出層

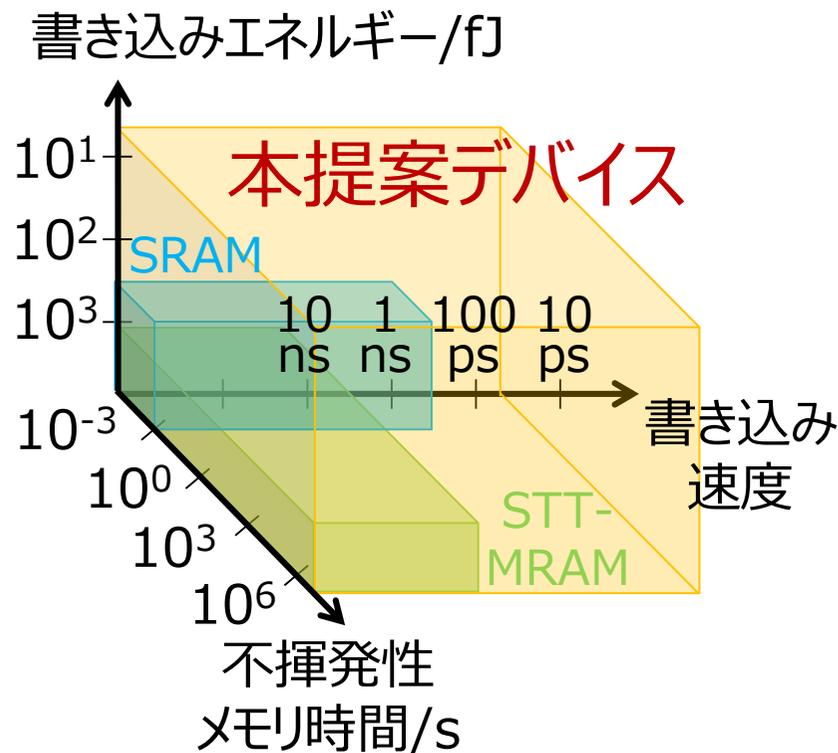


新技術の特徴・従来技術との比較

＜光による書き込み/読み出し＞

書き込み側→光磁化(=光駆動スピン変換)

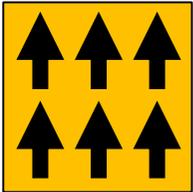
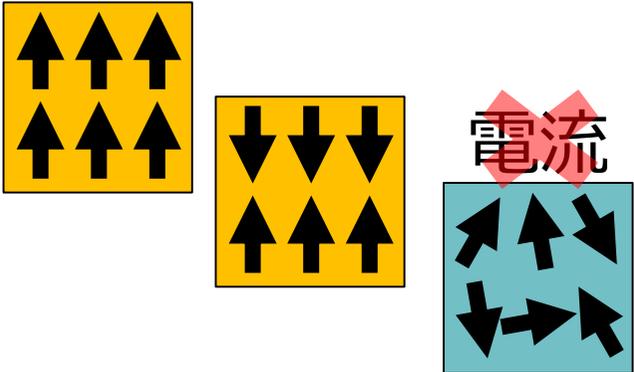
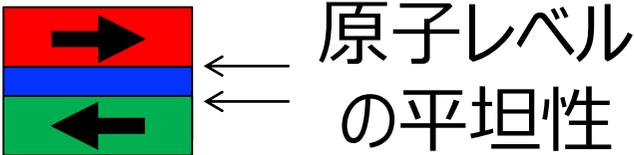
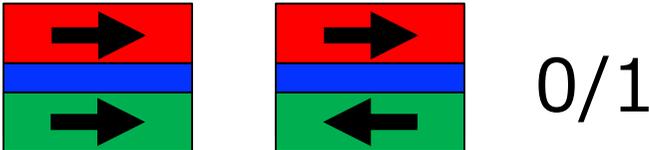
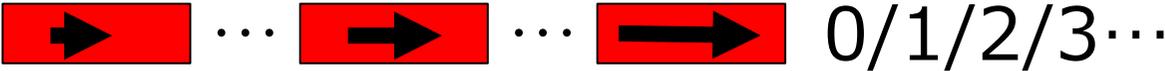
読み出し側→量子センサー(光)による磁場検出



	従来技術(MRAM)	新技術
動作原理	スピン注入トルク トンネル磁気抵抗効果	光-スピン相関
速度	~10ns/bit (WR)	100ps/bit (W) 1ns/bit (R)
消費電力	1pJ/bit (WR)	10fJ/bit (WR)

新技術の特徴(書き込み側)

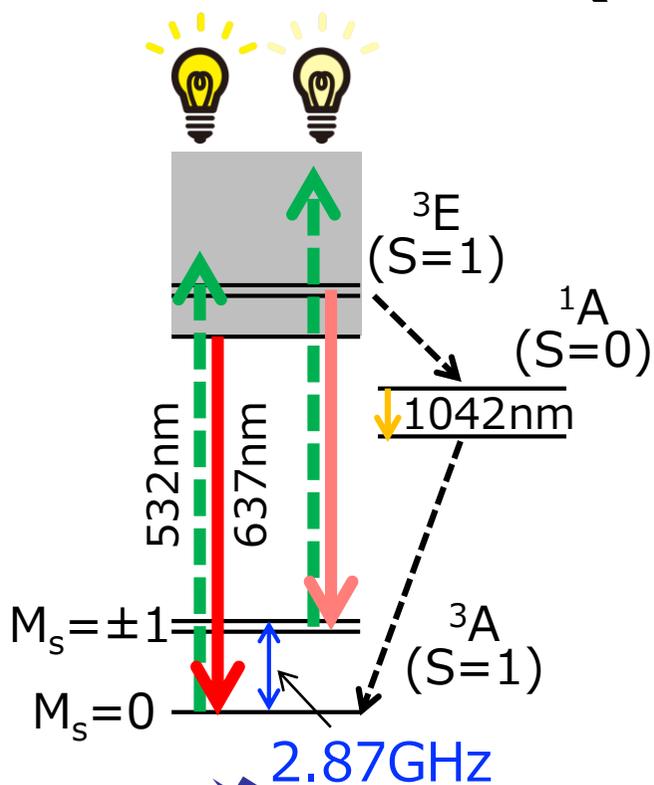
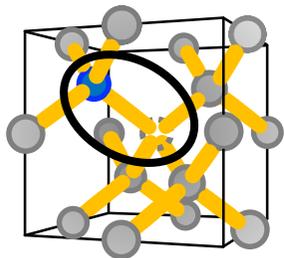
光磁化(=光駆動スピン変換)

従来技術=電流書き込み (MRAM)	新技術=光磁化
<p>磁気記録層の材料制限が厳しい</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 強磁性体(高磁気抵抗比、面直磁化、小さい磁気異方性) 	<p>磁気抵抗変化に適さない材料も使用可能</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 強磁性体 ✓ 反強磁性体 ✓ 磁性絶縁体 
<p>高度成長技術(界面制御等)が必要</p> 	<p>単層で構成可能→作製容易</p> 
<p>多値化不可能(平行/反平行)</p> 	<p>多値化可能→メモリ容量増大可能</p> 

新技術の特徴(読み出し側)

量子センサー(光)による磁場検出

ダイヤモンド
窒素-空孔
複合欠陥
(NVセンター)

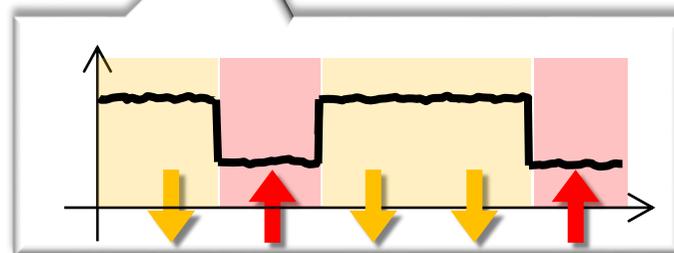
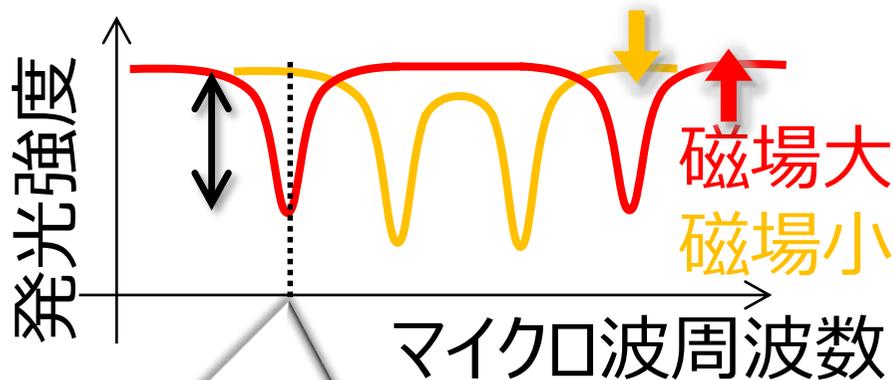


磁場で変化

(電子のエネルギー準位→環境に非常に敏感)

磁場感度： $\sim f \text{ T}/\sqrt{\text{Hz}}$ (理論)
 $0.9 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ (実験)

光検出磁気共鳴(ODMR)測定

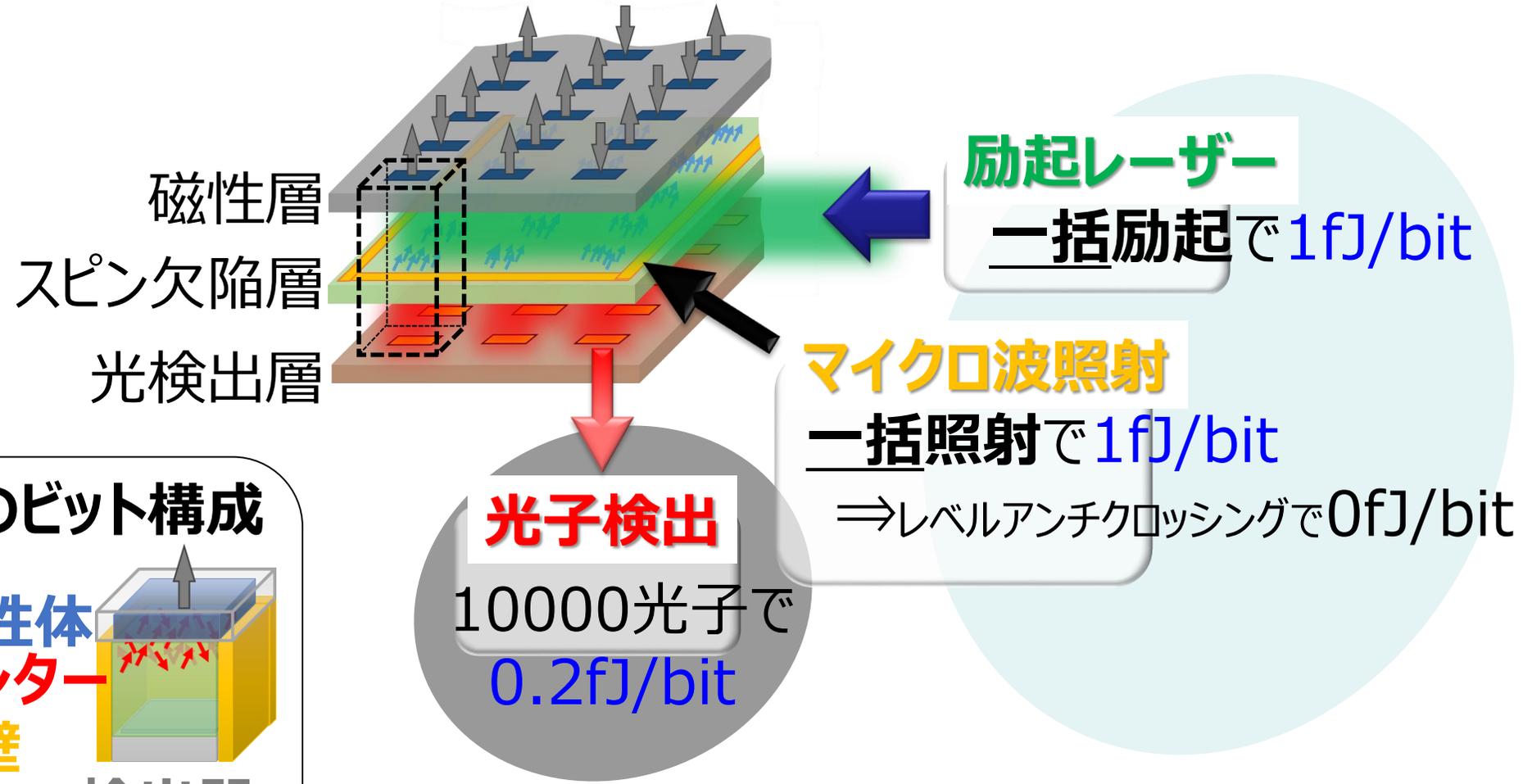


超高感度



超微弱光(=超低エネルギー)
で検出可能

超低消費電力施策(読み出し側)



ひとつのビット構成

磁性体
NVセンター
遮蔽壁
(金属 etc) 検出器

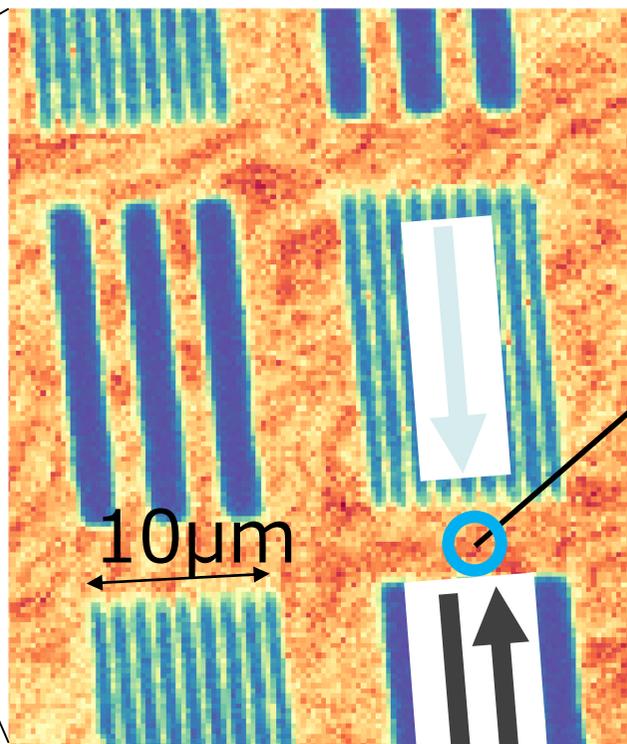
光による一括読み出し(電気では不可能)

→各セルへの微細配線不要、更なる低消費電力を可能に

デモンストレーション(読み出し側)

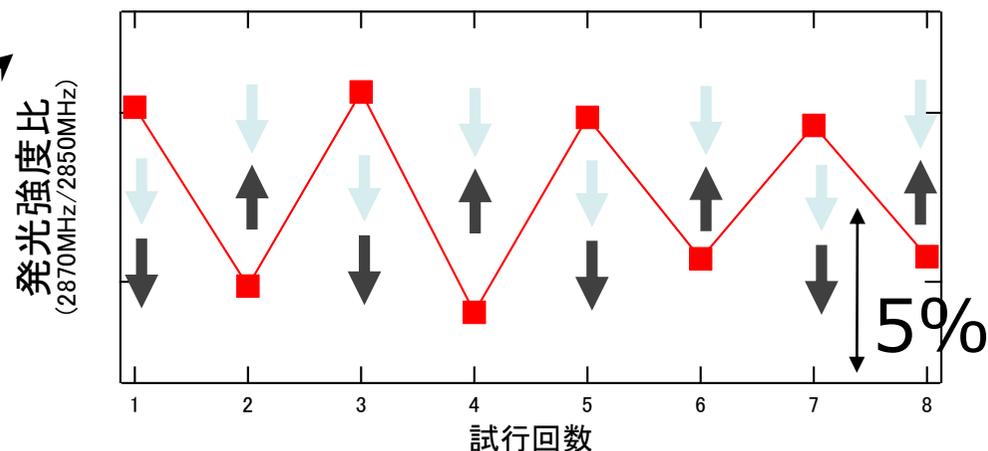
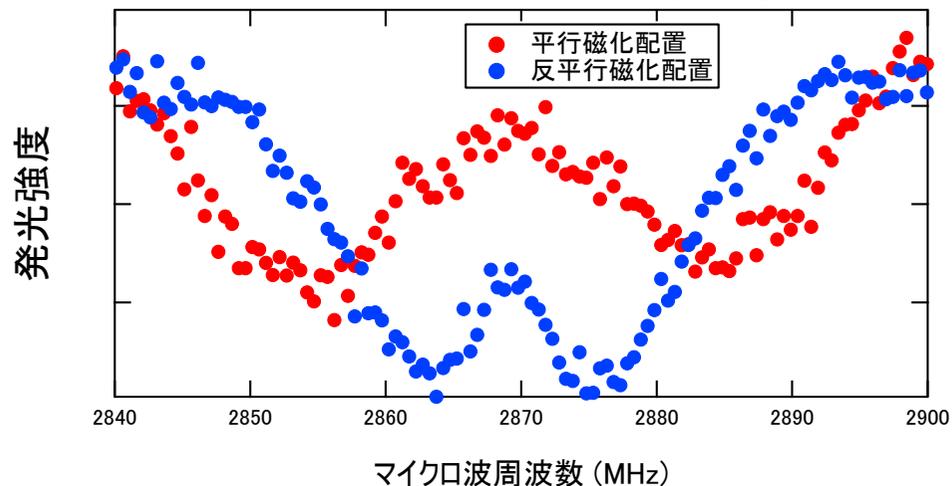
NVセンターを含むダイヤモンド上への
磁性体(パーマロイ)パターンニング

発光強度分布像



一方の磁化を
外部磁場で反転

ODMR測定結果



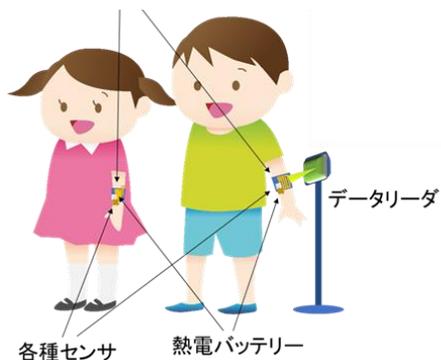
1mT以下の磁場変化を
量子センサーで測定できることを確認

想定される用途

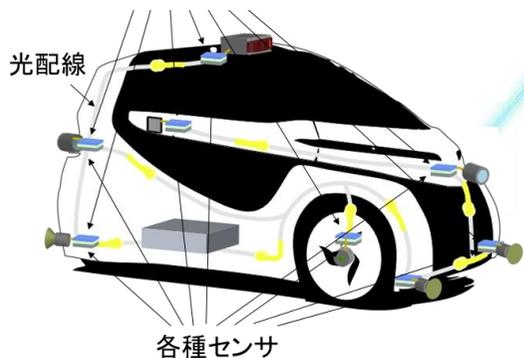
- 本技術の特長を活かして、光-電気変換インターフェースや光バッファメモリへの応用が期待される

エッジ

超低消費電力不揮発性メモリ



超低消費電力不揮発性メモリ



クラウド

フォトニックネットワーク



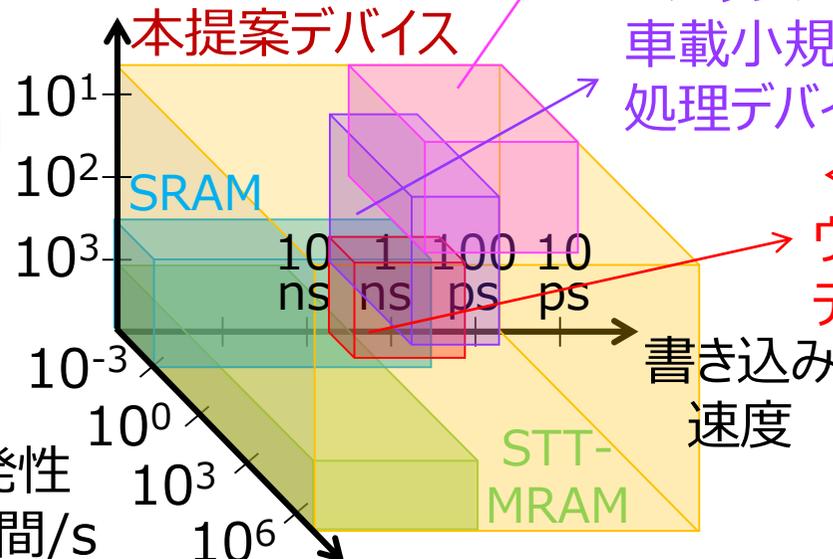
<クラウド>
光電変換デバイス

<エッジ>
車載小規模情報
処理デバイス

<エッジ>
ウェアラブル
デバイス

書き込み
エネルギー/fJ

不揮発性
メモリ時間/s

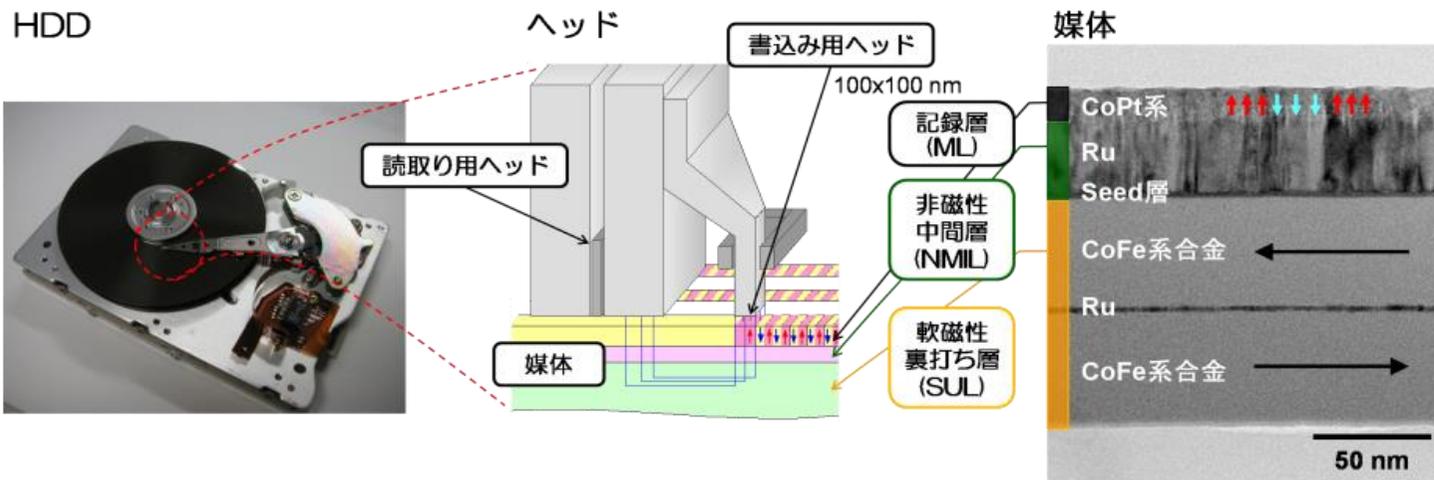


想定される用途

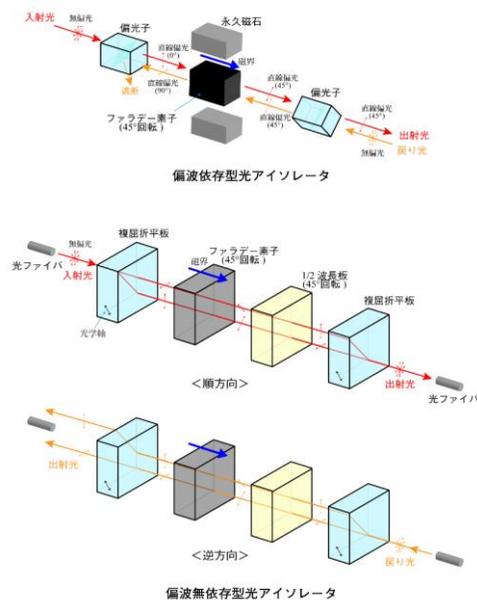
- 個々の技術の適用先として、以下が考えられる

光磁化：記録装置(HDD、磁気テープ)
光アイソレーターなど

記録装置(ヘッド、記録層)



光アイソレーター



想定される用途

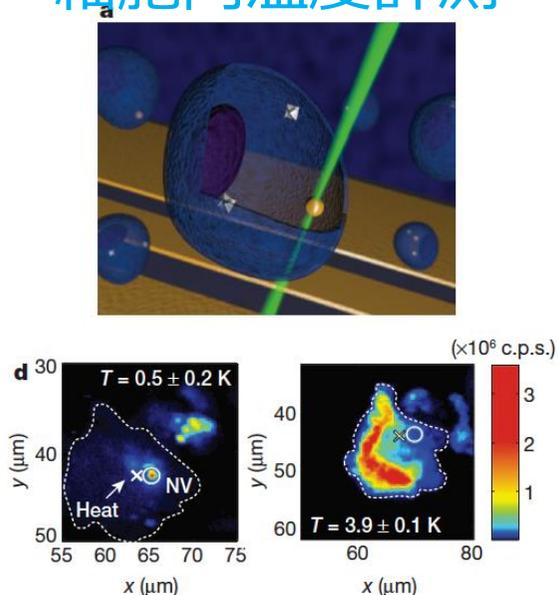
- 個々の技術の適用先として、以下が考えられる

量子センサー：磁場、温度、電界(歪み)の
高精度、高空間分解能センサー

* センサー材料はダイヤモンド以外に炭化ケイ素(SiC),
六方晶窒化ホウ素(hBN→2次元材料)がある

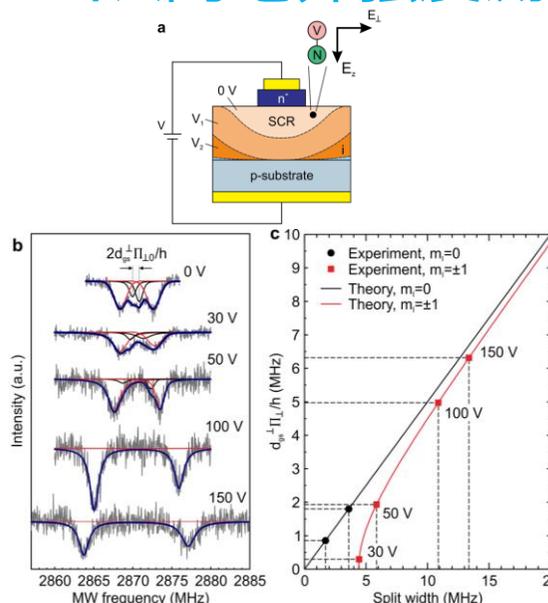
想定される用途

細胞内温度計測



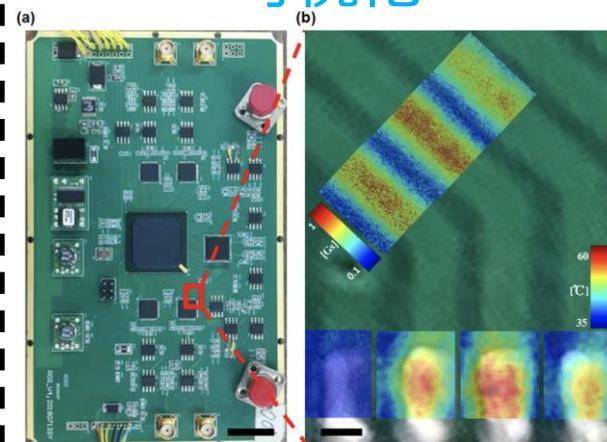
G. Kucsko et al.
Nature 500 54 (2013)

デバイス内電界強度測定



T. Iwasaki et al.
ACS Nano 11 1238 (2017)

温度、磁場分布可視化

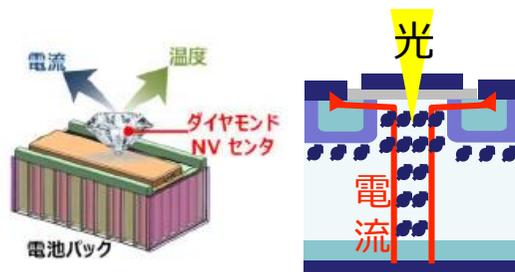


Chen et al.
EPJ Quantum Technology 8
Article number: 8 (2021)

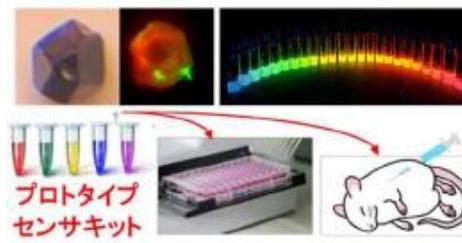
Q-LEAP量子計測・センシング/量子生命



脳磁計測 (イメージ)



電池/パワーデバイスモニタリング



生体ナノ量子センサ (イメージ)



超高感度MRI/NMR (イメージ)

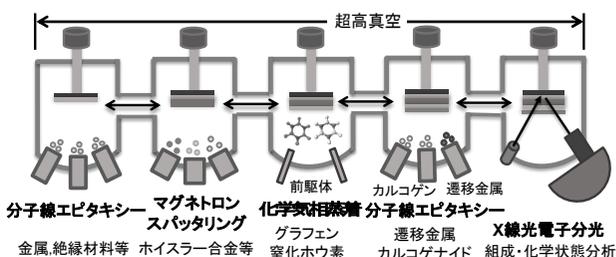
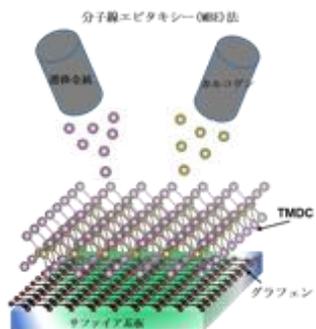
実用化に向けた課題

- 現在、量子センサーによる磁化読み出しについては予備実験済み。
- 今後、光による磁化制御について、材料も含めた最適手法の選定が必要である。
- 実用化に向けては、光磁化および量子センサーのアセンブリ最適化、更なる低消費電力化が求められる。

企業への期待

- 実用化に向けた諸課題解決のための共同研究、個々の技術(光磁化技術および量子センサー)の具体的な応用のご提案を希望いたします

光磁化



量子センサー

ECR ion source



0.1keV

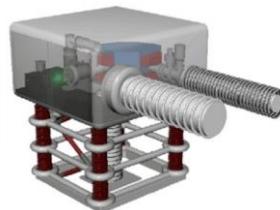
電子線加速器



2MeV

欠陥作製→イオン、電子線照射

Ion implanter



共焦点レーザー走査型蛍光顕微鏡



Tandem accelerator



AVF Cyclotron



~500MeV

量子センサープロトタイプ



技術相談、材料提供・加工依頼など歓迎いたします

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 光スピンデバイス、これを用いた情報保持装置、及び光スピンデバイスの動作方法
- 出願番号 : 特願2020-165535
- 出願人 : 量子科学技術研究開発機構、東北大学
- 発明者 : 山崎雄一、増山雄太、境誠司、李松田、平山祥郎、大島武、新田淳作

お問い合わせ先

量子科学技術研究開発機構

イノベーションセンターまでお願いいたします。

TEL 043-206-3146 (共同研究)

043-206-3027 (ライセンス)

FAX 043-206-4061

e-mail innov-prom1@qst.go.jp (共同研究)

chizai@qst.go.jp (ライセンス)