

SiC半導体固体量子センサを 利用した全光型磁場計測

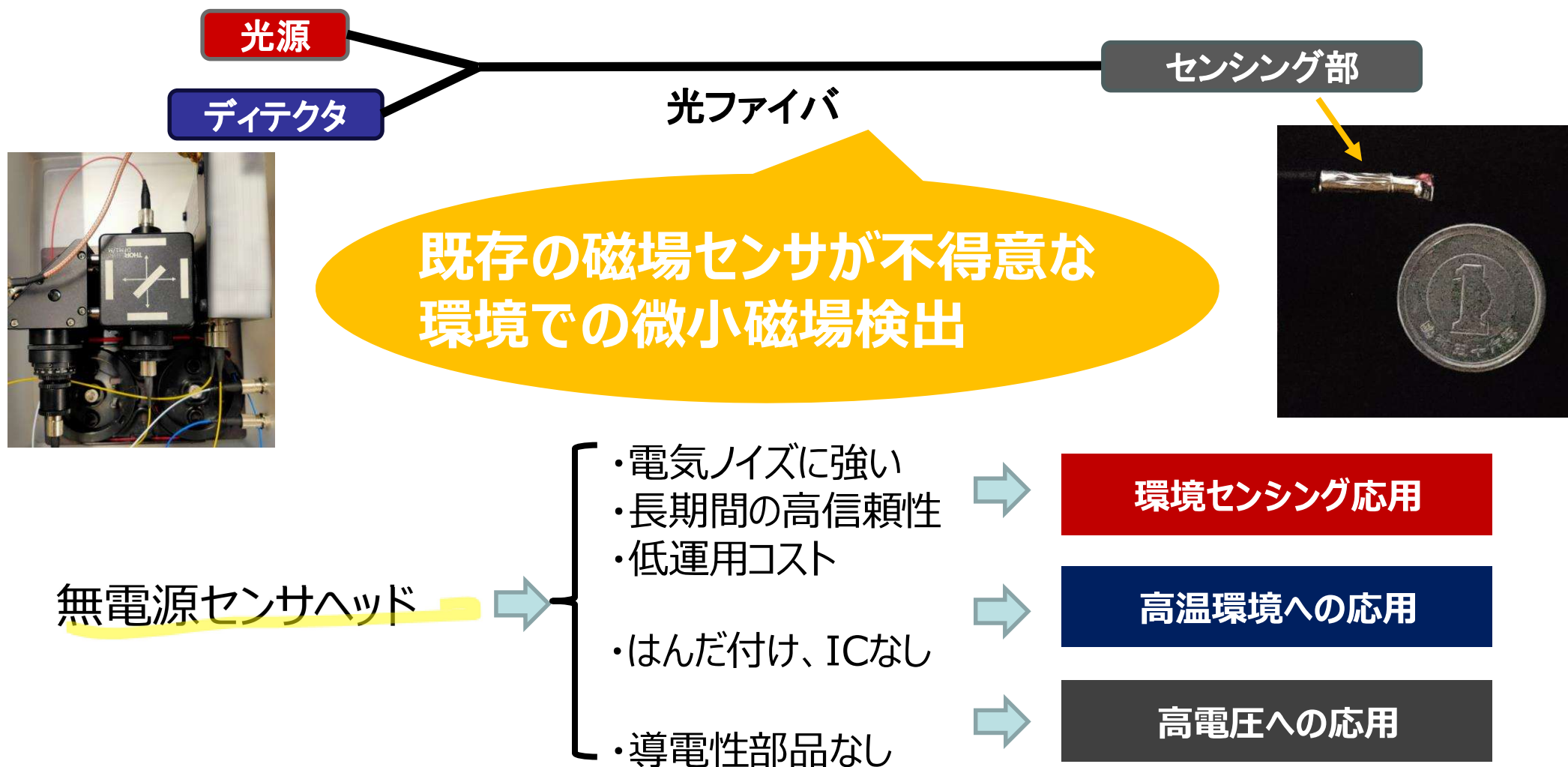
量子科学技術研究開発機構
高崎量子技術基盤研究所
量子機能創製センター

針井 一哉

2025年2月6日

新技術の概要

完全無電源小型磁場センサヘッド



従来技術とその問題点

磁場のファイバセンシングとしては

ファラデー効果を利用したものがある。

しかし、高感度化には大きなファラデー効果を持つ「特殊なフェライト素材」が必要で、価格、絶対感度に問題。

フェライト素材を使わないと、センサヘッドの小型化が困難。

ファラデー効果：物質を通る光の偏光面が磁場の強さに応じて回転する現象

新技術の特徴・従来技術との比較

- 従来技術：高感度化に特殊なフェライト材料
- 既存の固体量子センサ：高価なダイヤモンド基板



- 新技術：大規模量産が行われている4H-SiC基板＋工業的技術である電子線照射
- 原理的にはレーザースポットサイズの基板で十分なので小型化も容易



- センサヘッドのコスト～100円程度

(センサヘッド1mm角とし、4インチ基板1枚から5000個切り出せると仮定
→基板～30円＋プラスチックレンズ～50円＋組み立て費用)

新技術の特徴・従来技術との比較

- 従来技術：磁性体＝高温で利用できない



- 新技術：ワイドバンドキャップ半導体＝SiCのODMRは300℃でも動作確認されている

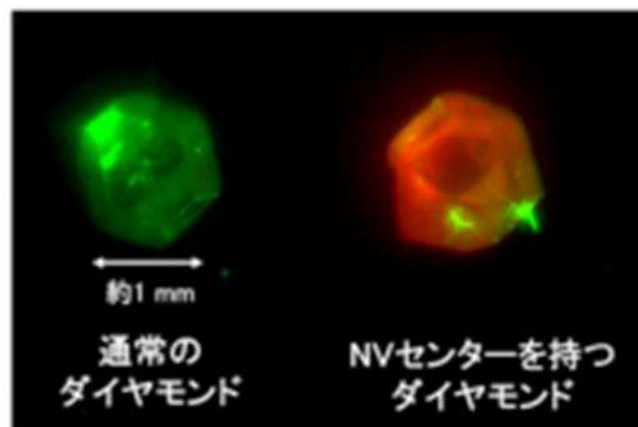


- 従来技術で困難な高温環境モニタリングが可能

以上の機能性を
SiC固体量子センサで実現

固体量子センサ

固体量子センサ：量子力学に基づいた次世代高感度センサ 



絶縁体、半導体中の結晶欠陥が持つ電子スピンを利用したセンサ
電子スピンの環境に対して脆弱（＝周囲の環境に敏感）ということを活用して、微小な環境変化（温度、磁場など）が高感度に読み取れる
例：ダイヤモンド中の窒素－空孔中心（NV）、
SiC（炭化ケイ素）中のシリコン空孔

現在、固体量子センサ等の量子技術を国家レベルで推進
複数の大型プロジェクトが展開中

内閣府

R2:量子イノベーション戦略

R4:量子未来社会ビジョン

R5:量子未来産業創出戦略

高感度性  Q-LEAP 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」

量子性 

 MOONSHOT
RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAM
「量子計算網構築のための
量子インターフェース開発」

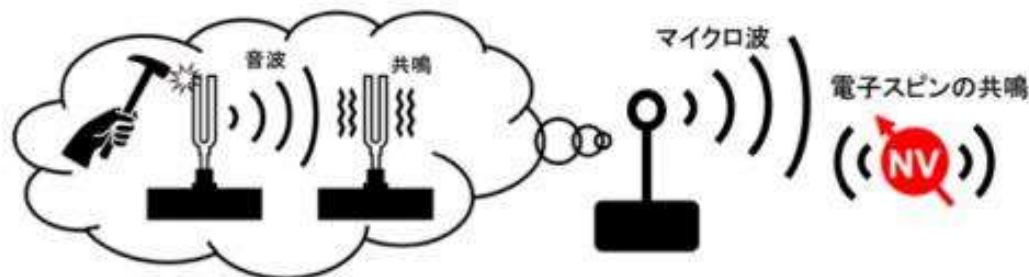
原子サイズ
センサ 

Q-LEAP Flagshipプロジェクト  量子生命
「量子生命技術の創製と医学・生命
科学の革新」（生体ナノ量子センサ）

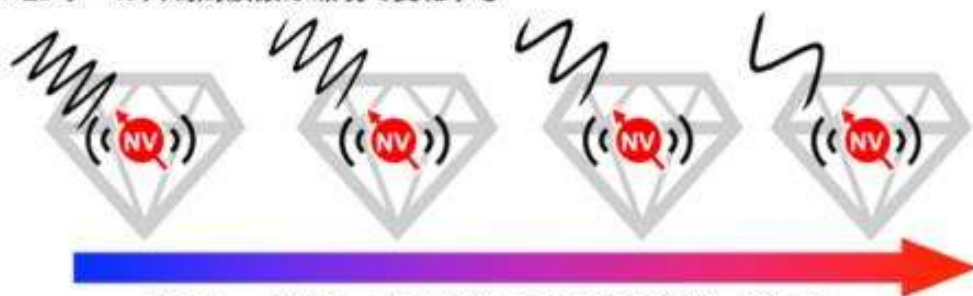
固体量子センサ

通常の固体量子センサ測定

NVセンターはある周波数で「共鳴」を起こす



NVセンターの共鳴周波数は環境で変化する



温度、磁場、電場等で共鳴周波数が変化

高感度

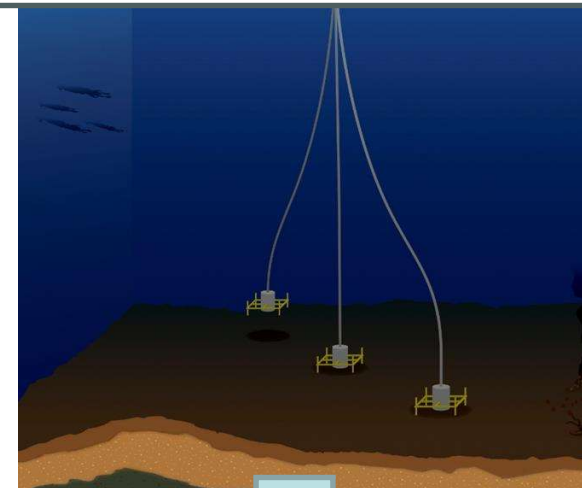


計測に光と高周波＝複雑



観測点（海底）と操作部（海上）が長距離

高周波は長距離伝搬が難しい



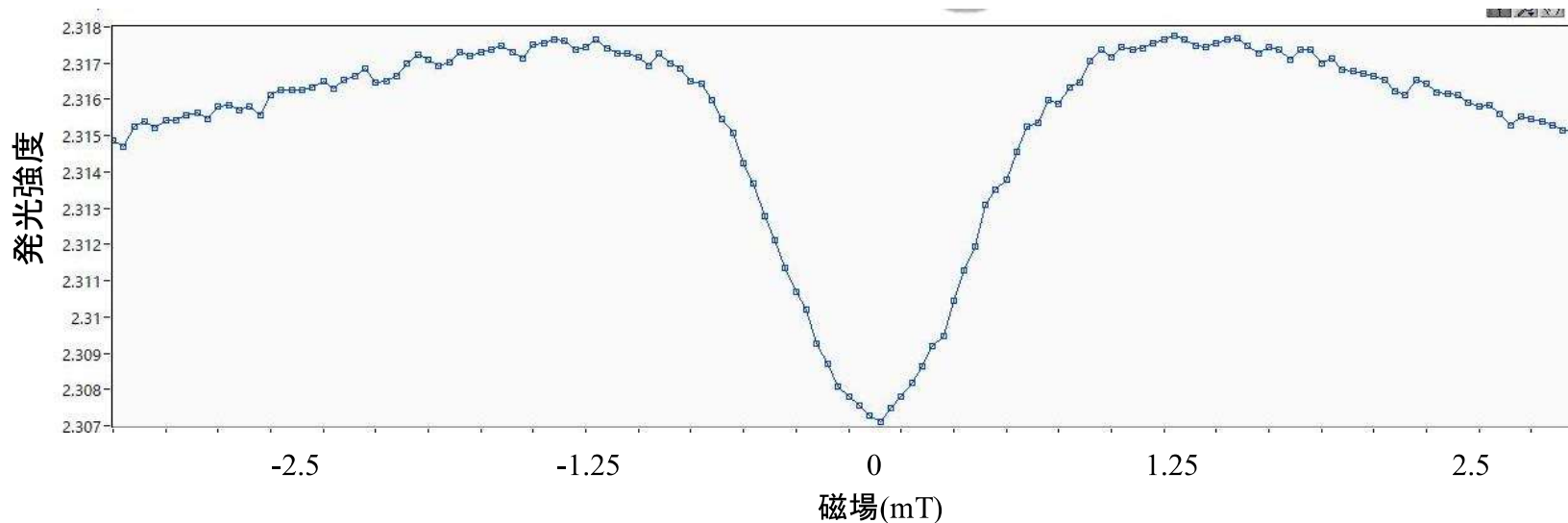
高周波減衰の根本的対策を研究

技術詳細

- $S_z = \pm 1/2$ に偏極
- $S_z = \pm 3/2$ の方が発光レートが高い



量子化軸(c軸)と直交する磁場による
 $\pm \frac{3}{2} \Leftrightarrow \pm \frac{1}{2}$ の混成で発光強度が増加



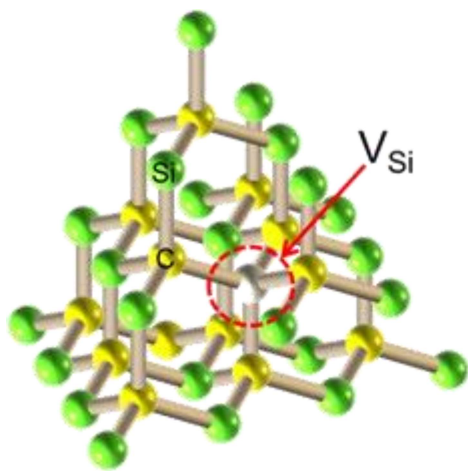
- 1.2mT程度の磁場範囲で発光強度が変化
- 高周波は必要ない
- 磁場の向き(SかNか)はわからない

技術の現状

ダイヤモンドによる固体量子センサを使って
全光型磁場計測デバイスは作成されている

が、ダイヤモンドは高価なうえにゼロ磁場付
近の感度が悪い

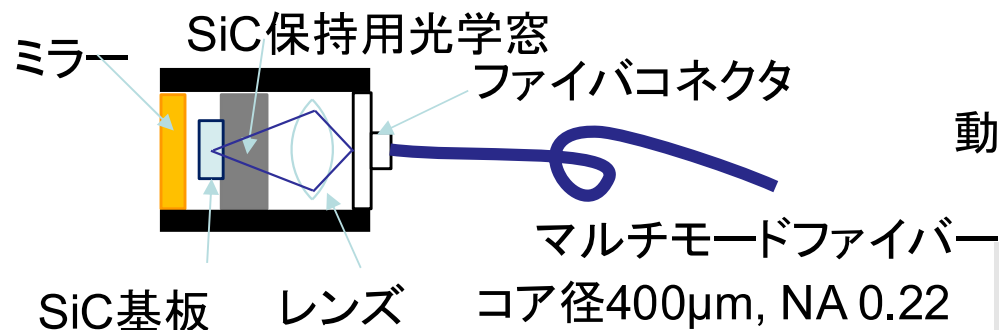
新技術の内容



**ダイヤモンドの代わりにSiC（炭化ケイ素）
の欠陥を全光型磁場測定に用いる。**

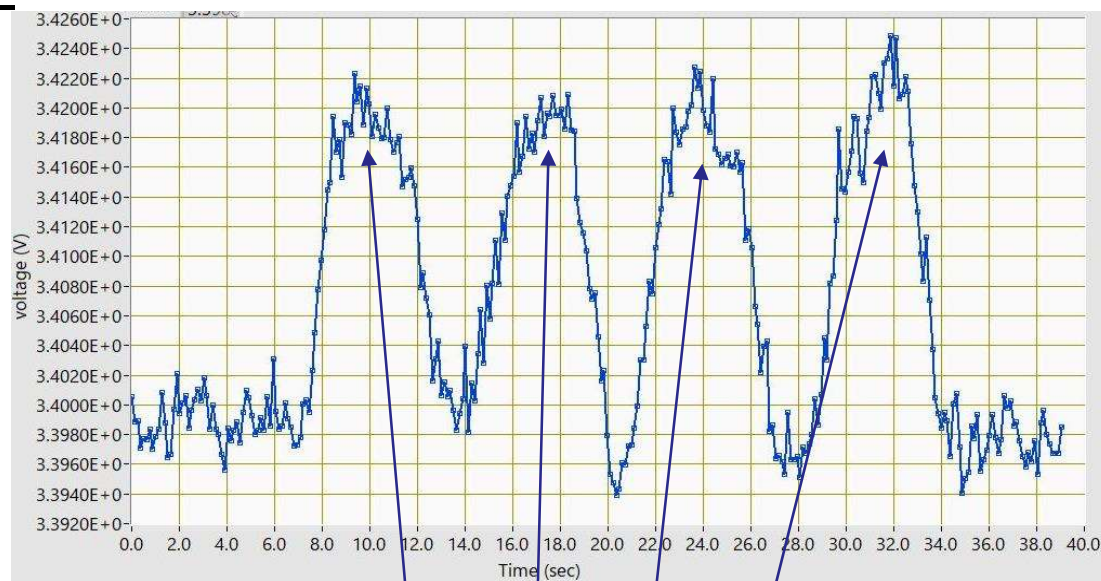
- ・ 基板価格1/100以下
- ・ ゼロ磁場付近での感度向上（5倍以上）
- ・ 欠陥作成が容易（電子線照射のみ）
- ・ ファイバ適合性のある励起/蛍光波長（785/920-1000nm）

技術実証実験結果



動作実証

レーザーパワー~26mW

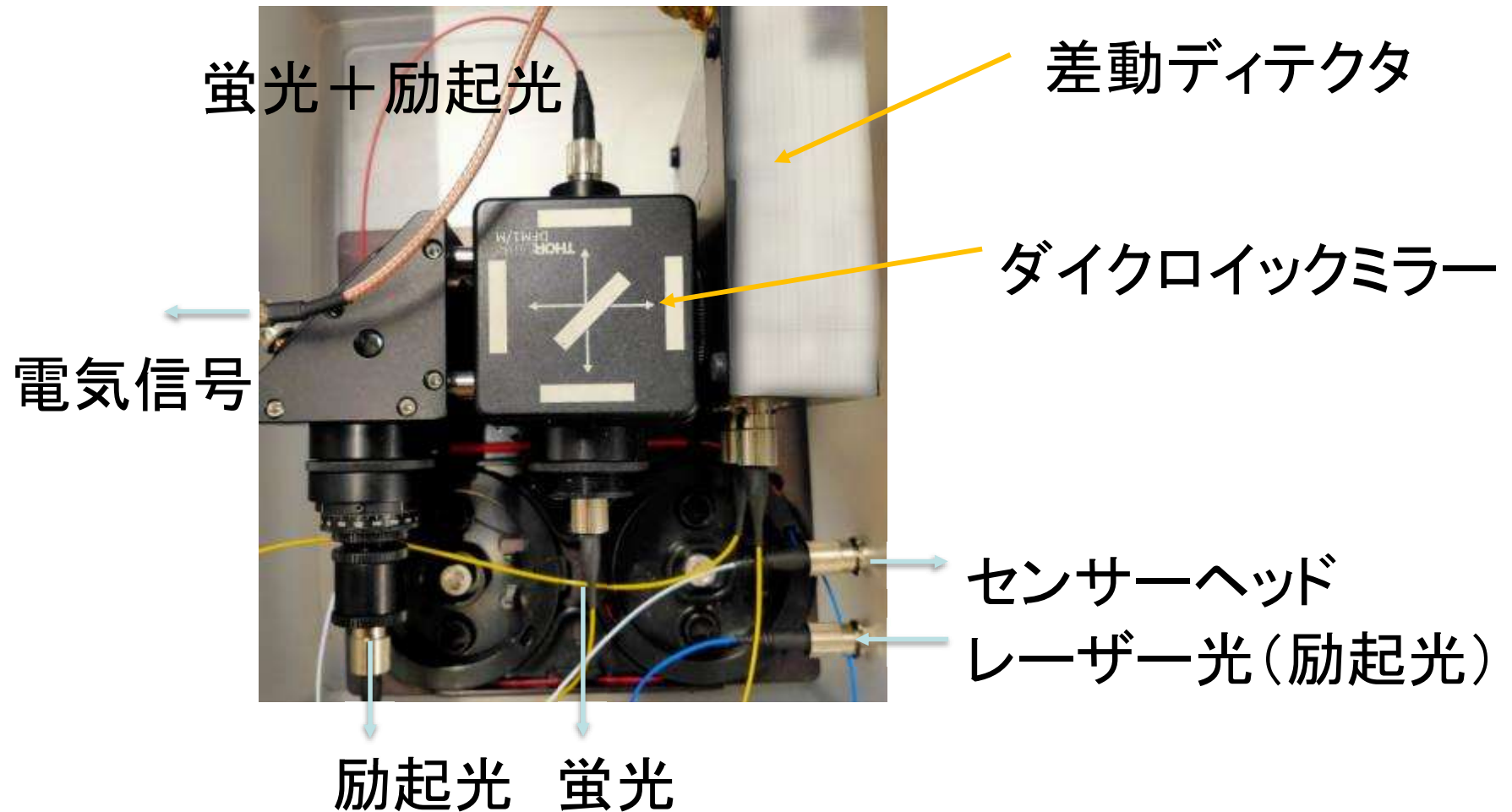


電磁石で ± 2.5 mTを交互に印加

➡ 4mm角基板で動作実証済み

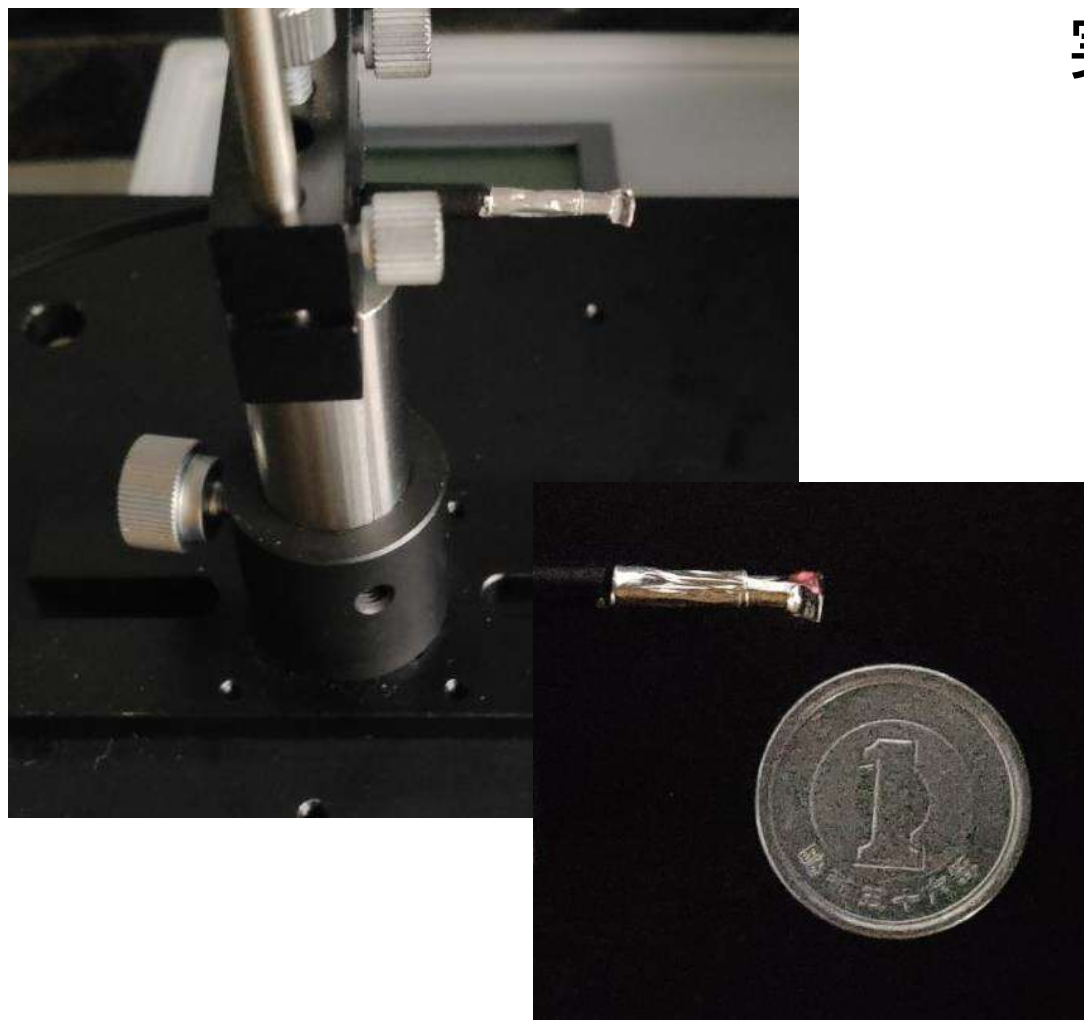
技術実証実験結果

蛍光分析システム



光強度測定のための非常に簡便な構造

小型化の試み



実時間測定結果



磁石を近づける

磁場応答を確認

先端サイズ2mmのセンサヘッド

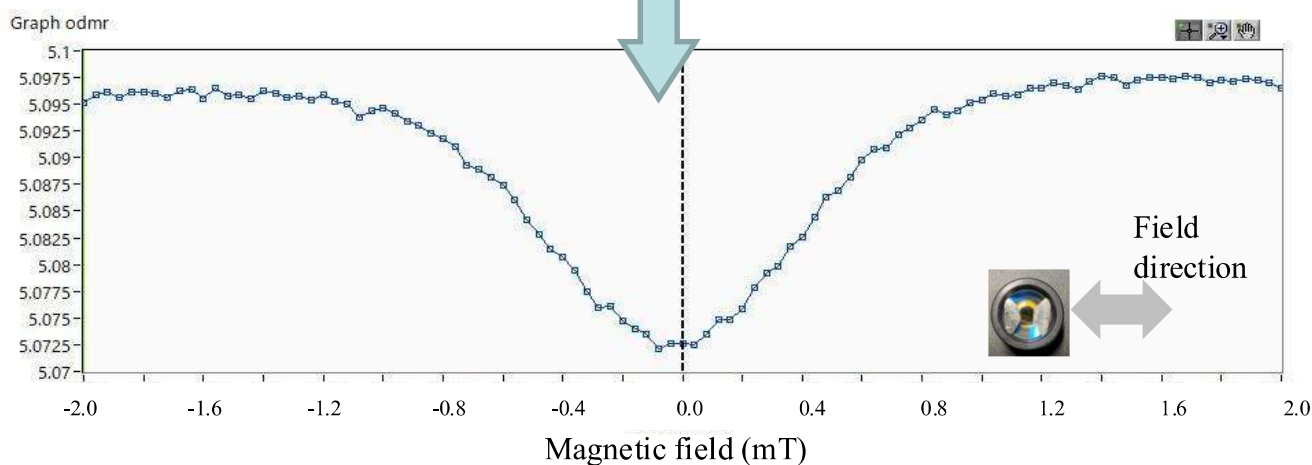
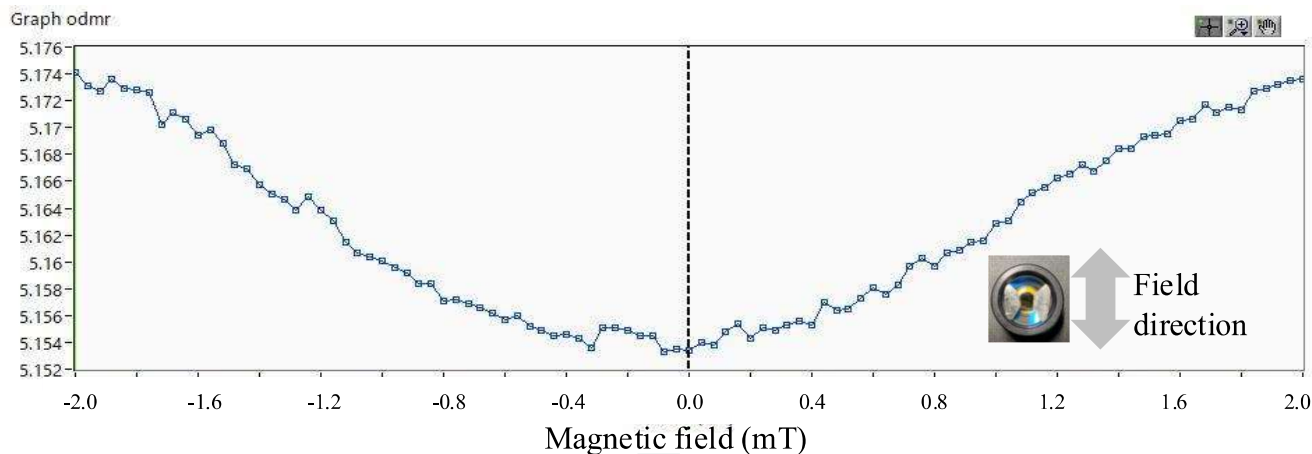
高感度化の試み1

磁場コンセンレータ



パーマロイ製磁場
コンセンレータ

SiC 基板



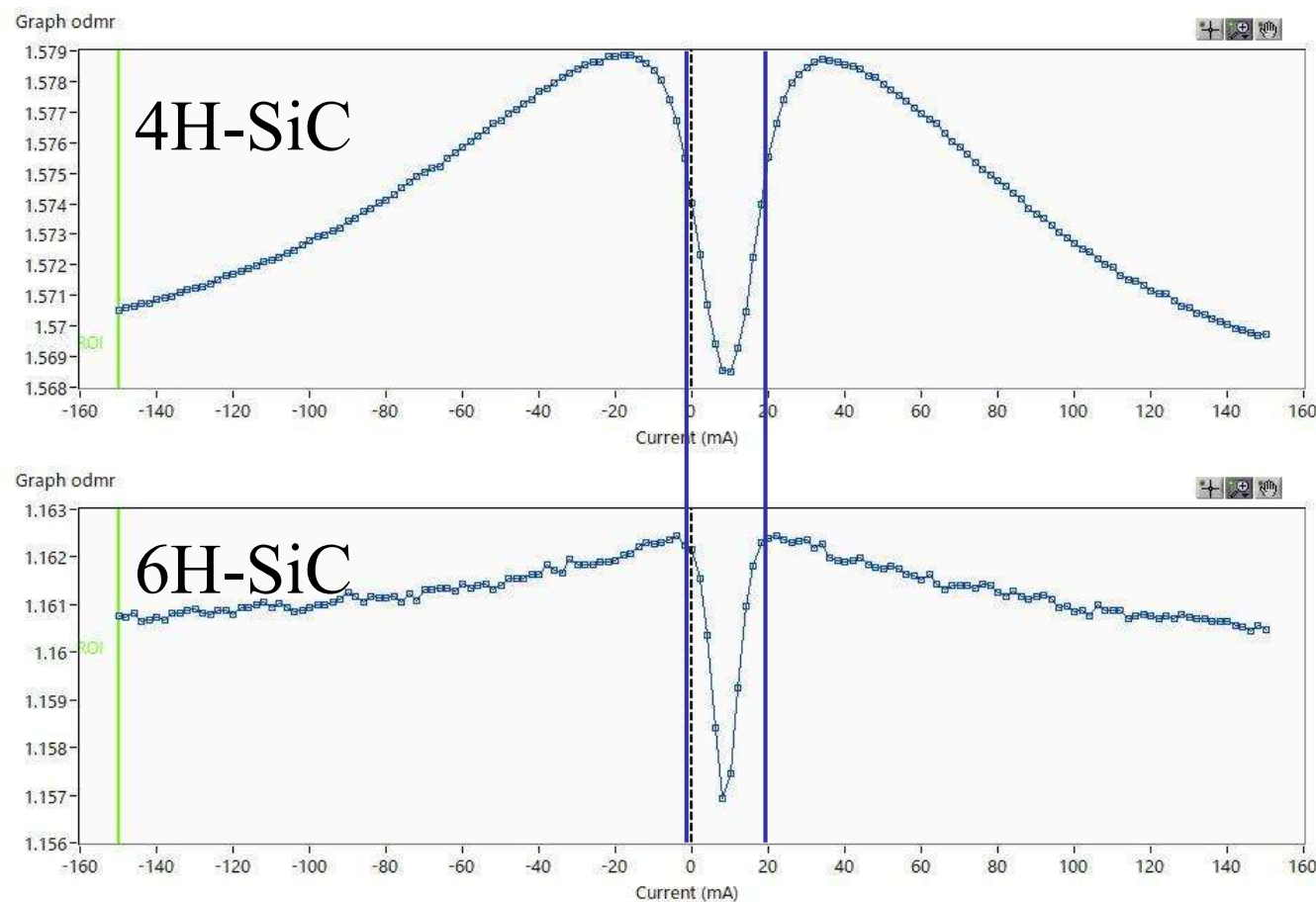
感度向上＋磁場方向に対する選択性が高まる

フェライト材料を使えば絶縁性を保てる

高感度化の試み2

6H-SiC

結晶構造の異なるSiC材料を
使うことで高感度化できる



6H-SiCを使うことで2倍程度の高感度化が可能

磁性体を使わないので温度耐性が高い

実用化に向けた課題

- 蛍光量変化は最大でも1%程度
→10 μ Tの分解能には0.01%の光量変化を検出する必要がある。
→光ファイバの最適化ができていない
- 必要SiCサイズはレーザースポット径程度
原理的には0.5mm角でも機能する
→微小光学系を構築する技術がない
- 単一ファイバに複数センサを配置する場合、
時間分解測定が必要

企業への期待

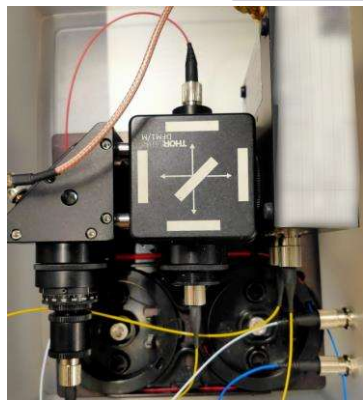
- ファイバーセンシング
- 光学系小型パッケージング
- 時間分解測定

などの技術を持つ企業様との共同研究

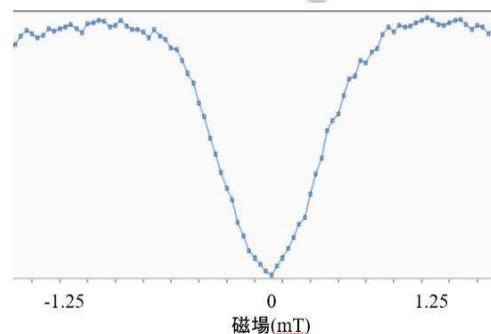
新技術のまとめ

完全無電源小型磁場センサヘッド

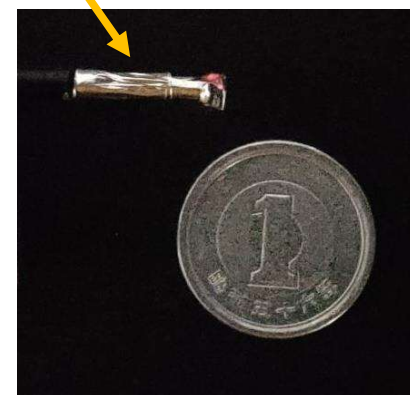
mmサイズ、非常に
安価なセンサヘッド



簡易な測定システム



サブmTオーダーの感度



- ・ローメンテナンスな環境センシング
- ・高温など過酷環境下での磁場センシング
- ・絶縁性が必要な状況での磁場検出

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 磁場測定方法及び磁場測定装置
- 出願番号 : 特願2023-143175
- 出願人 : 量子科学技術研究開発機構
- 発明者 : 針井一哉、大島武

お問い合わせ先

量子科学技術研究開発機構
イノベーション戦略部 知的財産活用課

T E L 043-206-3027
e-mail chizai@qst.go.jp